

Автономная некоммерческая организация высшего образования  
«Университет Иннополис»

На правах рукописи

Буличев Олег Викторович

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

Специальность:

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

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

Иннополис — 2023

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Обзор и анализ робототехнических систем, условия их применения . . . . .</b>	<b>10</b>
1.1 Классификация машин, использующих ноги в качестве движителя .	10
1.2 Роботы, которые могут использоваться для исследования пещер .	20
1.3 Исследования роботов с цикловым движителем . . . . .	22
1.4 Описание условий в пещерах . . . . .	27
1.5 Классификация сенсорных устройств . . . . .	31
1.6 Обзор подходов оценки поверхностей . . . . .	33
1.7 Обзор алгоритмов триангуляций . . . . .	35
1.8 Обзор разработанной системы . . . . .	38
1.9 Применимость системы . . . . .	40
<b>Глава 2. Оптимизация конструкции робота . . . . .</b>	<b>42</b>
2.1 Задача структурного синтеза на основе критериев проходимости, детализации и пройденного пути . . . . .	42
2.1.1 Математическая модель робота . . . . .	45
2.1.2 Представление робота . . . . .	47
2.1.3 Генерация семейства поверхностей, по которой будет проходить робот . . . . .	48
2.2 Задача оптимизации колебаний робота при походке . . . . .	55
2.3 Оптимизация конструкции робота для прохождения узких участков	59
2.4 Разработанные концепции робота . . . . .	60
<b>Глава 3. Разработка и исследование преобразователя силы на основе Velostat . . . . .</b>	<b>64</b>
3.1 Физическая реализация преобразователя силы на основе Velostat .	68
3.2 Разработка экспериментального стенда . . . . .	69
3.3 Экспериментальная часть . . . . .	73
<b>Глава 4. Разработка метода тактильного чувствования . . . . .</b>	<b>78</b>

4.1	Кинематическая схема робота для определения профиля опорной поверхности . . . . .	78
4.2	Картографирование с помощью ощупывания поверхности . . . . .	80
4.3	Определение физико-механических свойств опорной поверхности .	88
4.4	Метод для классификации свойств поверхностей . . . . .	89
4.5	Экспериментальная установка для обучения определения физико-механических свойств поверхности . . . . .	92
<b>Заключение . . . . .</b>		99
<b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>		102
<b>Словарь терминов . . . . .</b>		104
<b>Список рисунков . . . . .</b>		119
<b>Список таблиц . . . . .</b>		122

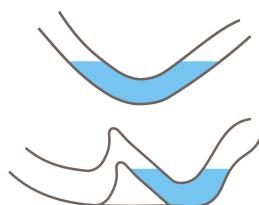
## Введение

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

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



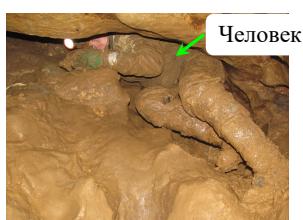
а) Соляные отложения



б) Сифон



в) Ледяная пещера

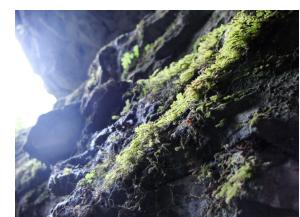


г) Глина



д) Пещера, заполненная

водой по колено



е) Мох

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. Та-

кие работы могут проходить по сыпучим грунтам, каменистым грядам и преодолевать небольшие водные преграды.

Для полноценного функционирования любого мобильного робота необходимы сенсоры. Сенсоры мобильных роботов можно разделить на внешние и внутренние. Под внешними сенсорами подразумеваются устройства, элементы которых не могут быть защищены от воздействия окружающей среды. Примерами таких сенсоров являются камеры, лидары, сонары и тому подобные устройства.

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

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

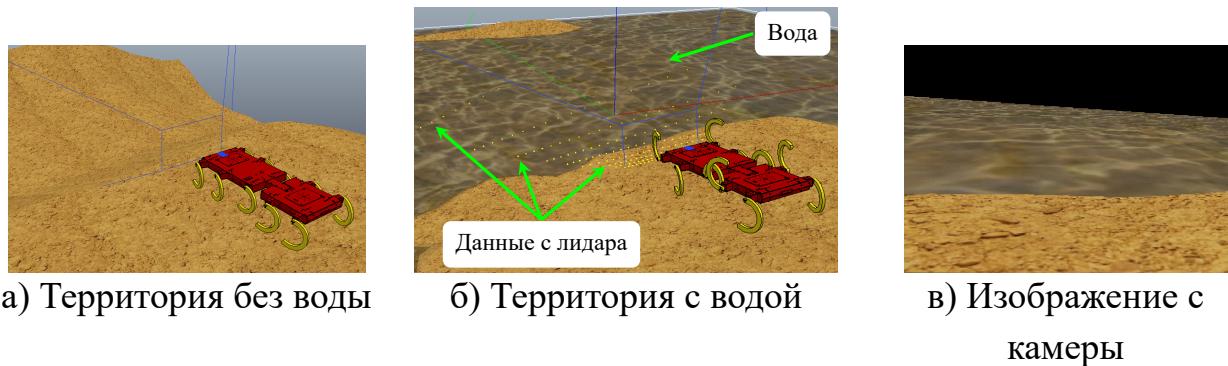


Рисунок 2 — Примеры ситуаций, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту

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

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

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

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

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

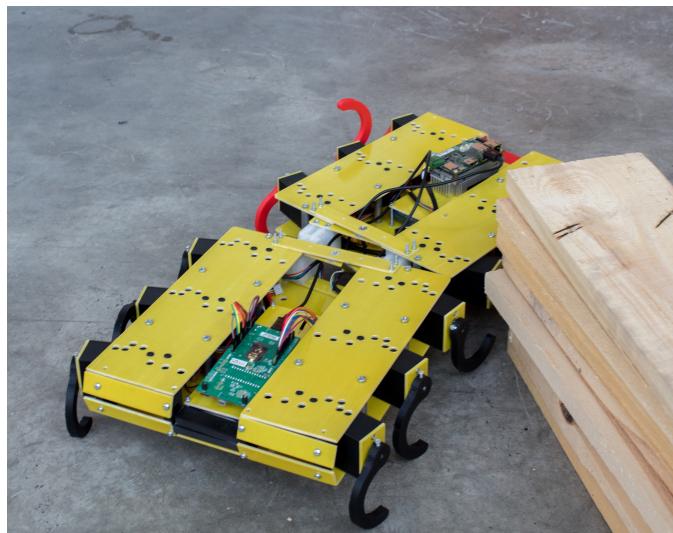


Рисунок 3 — Прототип, на котором было сделано большинство экспериментов

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

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

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

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

3. **Предложена** методика роботизированного исследования датчика силы.

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

4. Предложен аддитивно-мультиплексивный критерий оптимизации кинематической схемы многоногих шагающих роботов с цикловыми одностепенными движителями, включающий в себя показатели проходимости, длины пройденного пути, покрытия опорной поверхности и её детализации. **Показано**, что оптимальное количество ног для циклового движителя с одной степенью свободы в ноге находится в диапазоне от 8 до 14 ног.

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

**Основные положения, выносимые на защиту:**

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

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

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

4. Критерий оптимизации кинематической схемы многоногих шагающих роботов с цикловыми одностепенными двигателями, включающий в себя показатели проходимости, длины пройденного пути, покрытия опорной поверхности и её детализации.

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

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

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

- ICINCO 2017 — 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (Мадрид, Испания, 26-28 июля 2017);
- IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2017 (Макао, Китай, 5-8 декабря 2017);

- Международная научно-практическая конференция «Прогресс транспортных средств и систем» (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.);
- 23rd IEEE FRUCT Conference (Болонья, Италия, 13-16 ноября 2018);
- XXXI международная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС-2019 (Москва, 4-6 декабря 2019 г.);
- Международная конференция «Зимняя Школа Робототехники в Сириусе — 2022» (Адлер, Россия, 25 января - 6 февраля 2022).

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

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Зарегистрированы 8 программ для ЭВМ.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов:

- НТИ по поддержке Центра «Технологий Компонентов Робототехники и Мехатроники» на базе Университета Иннополис по теме «Разработка 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».

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 122 страницы, включая 66 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 126 наименований.

## Глава 1. Обзор и анализ робототехнических систем, условия их применения

Прежде чем разрабатывать робототехническую систему, необходимо проанализировать существующие решения которые используется в предполагаемых местах использования. Необходимо разобраться к какому семейству относится разрабатываемая система. На основе этой информации возможно избежать типичных проблем при разработке, связанных с конкретным типом двигателя, которые неочевидны в начале разработки.

Более того, необходимо просмотреть описания пещер, так как это является основным место для использования робототехнической системы. Знание препятствий, их размеров позволяют подобрать параметры робота, максимально подходящие для обхода препятствий.

Любая робототехническая система не может обходиться без сенсоров. Поэтому необходимо рассмотреть существующие сенсоры, которые могут использоваться в мобильной робототехнике, предложить их классификацию и на основе классификации, выбрать необходимые сенсоры для решения поставленных задач.

При разработке технической системы необходимо также рассмотреть алгоритмы навигации мобильных автономных роботов.

После глубокого разбора всех систем, возможно объединить полученные знания и привести концептуальное решение, которое должно иметь возможность решить задачи разведки пещер.

### 1.1 Классификация машин, использующих ноги в качестве движителя

Эта классификация основана на работе [12]. Первые попытки создания многоногих роботов были предприняты в эпоху до нашей эры. В настоящее время можно найти десятки конструкций шагающих роботов, но, как правило, это только экспериментальные прототипы. Из-за обилия различных конструкций, их классификация является нетривиальной задачей. Более того, термин «ходьба» имеет различные трактовки, что также является усложняющим фактором для классификации [1; 7; 14; 15].

Определяющей особенностью аппарата, которая в целом позволяет говорить о шагании, является наличие специальных механизмов (ног, шагающих механизмов), которые обеспечивают движение аппарата в результате дискретного взаимодействия с опорой. Под дискретным взаимодействием понимают ситуацию, когда есть моменты времени, в которые механизм контактирует с опорной площадкой, и моменты времени, в которые с опорой механизм не взаимодействует.

Ходьба — только один из нескольких возможных видов локомоции с помощью ног. Для двуногой системы: ходьба — чередование опоры на одну ногу и опоры на обе ноги (потом на другую ногу); спортивная ходьба — чередование опоры на одну ногу и на другую; бег — чередование опоры на одну из ног и безопорного движения (потом на другую ногу); скачки — чередование одноопорной, двухопорной и безопорной фаз; прыжки — чередование опоры на обе ноги и безопорной фазы; прыжки на одной ноге - то же, что и прыжки, но одна нога вообще опоры никогда не касается.

Для многоногой системы понятие ходьбы легко обобщается. Спортивная ходьба и прыжки на одной ноге теряют смысл. А вот граница между бегом, прыжками и скачками уже не так очевидна [1].

Если фаза движения машины с опорой на ноги чередуется с фазой покоя, в которой машина неподвижно лежит на опорной поверхности, то такое движение называется ползанием. Ноги могут быть оснащены специальными устройствами - захватами, присосками и т.п., позволяющими устройству осуществлять удерживающие связи с опорной поверхностью. Тип движения такого устройства называется лазанием.

Подводя итог, профессор Белецкий в своей книге использовал следующую классификацию. Важно отметить, что в одном экземпляре может сочетаться несколько типов движителей.

Псевдошагающие машины похожи на роботов с ногами, но их ноги всегда контактируют с опорной поверхностью. Другими словами, эти машины могут только имитировать полноценную походку. Одним из распространенных примеров является механическое устройство, называемая шагающий слон (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 — Механический слон

К классу шагающих машин с дополнительными опорами относятся устройства, имеющие помимо дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью шагающих движителей дополнительные механизмы, постоянно контактирующие с опорой [12]. Необходимость в дополнительных опорах обычно возникает тогда, когда шагающих движителей недостаточно для обеспечения устойчивости машины. Чаще всего для этой цели шагающее транспортное средство оснащается колесной тележкой (рис. 1.2,1.3)[2; 3; 7; 13; 15; 16].



Рисунок 1.2 — Робот рикша

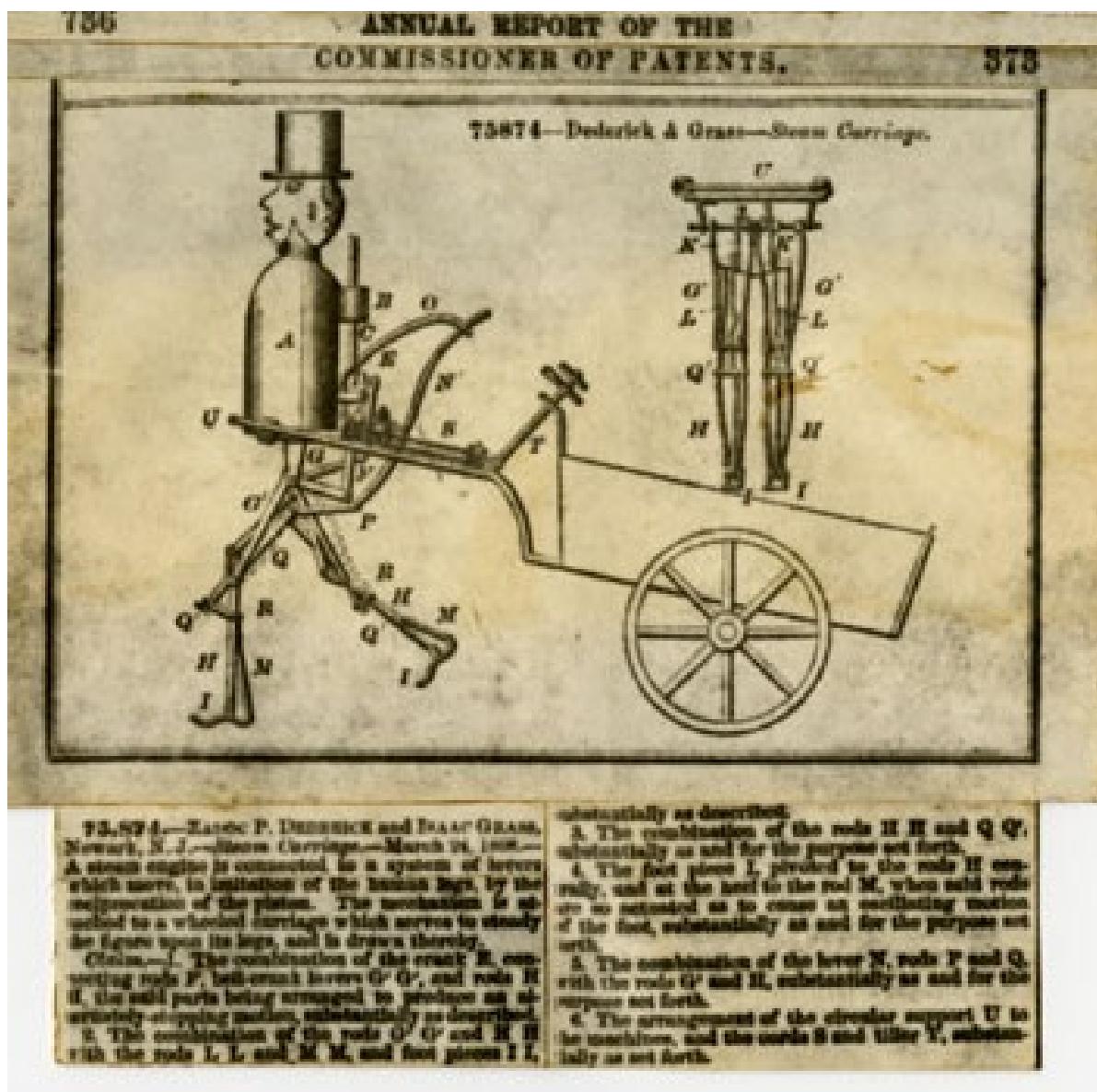


Рисунок 1.3 — Робот паровой человек

Такие машины обычно используются для демонстраций и отладки систем. Их применение бессмысленно, потому что они не обладают никакими преимуществами в сравнении с колесным роботом.

Шагающие машины с циклическими движителями имеет несколько особенностей. Он характеризуется тем, что опорные точки шагающих механизмов движутся по одной и той же траектории относительно корпуса машины, и не решают проблемы адаптации к грунту и выбора точек постановки ног на землю. Такие машины имеют лучшую проходимость по сравнению с колесами меньшее сопротивление движению от земли, лучшее сцепление с основной поверхностью, большие возможности для снижения давления на грунт [41]. Примеры машин с циклическими движителями: (рис. 1.4,1.5).

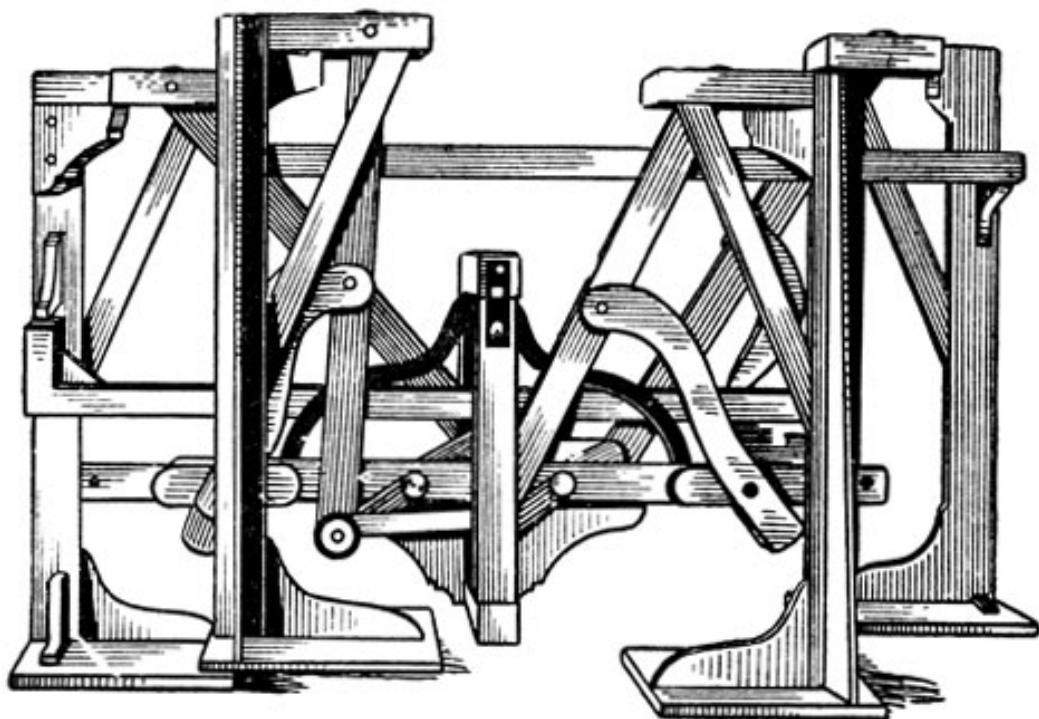


Рисунок 1.4 — Машина Чебышева



Рисунок 1.5 — Робот ВолгГТУ Кубань

Главной особенностью циклических шагающих машин является их простота конструкции и управление.

Полноценная ходьба — модификация предыдущего типа движителя и она дает наибольшие преимущества по сравнению с другими заявленными типами движителей.

Данный способ передвижения позволяет использовать произвольный закон изменения скорости движения ноги как на этапе взаимодействия с землей, так и на этапе переноса. Такие машины обычно превосходят традиционные транспортные средства не только по грунтовой, но и по профильной проходимости. А их главным недостатком является сложность конструкции и системы управления. Это самый разнообразный и многообразный класс шаговых машин в мире, и многие из приведенных здесь примеров относятся к этому классу.

Колесно-шагающими машинами традиционно называют класс устройств, в которых колеса шагающих движителей служат упорами. Такие машины могут работать в двух режимах: в режиме колесной машины и в режиме шагающей машины. В первом случае машина движется только с помощью колес. Во втором случае машина совершает шагающие движения, отрывая поочередно колеса от земли и переставляя их на новое место. В этом случае те, что соприкасаются с землей, могут либо блокироваться, либо поворачиваться в соответствии с движением опорных ног. Известно несколько примеров (рис. 1.6,1.7,1.8) [58].

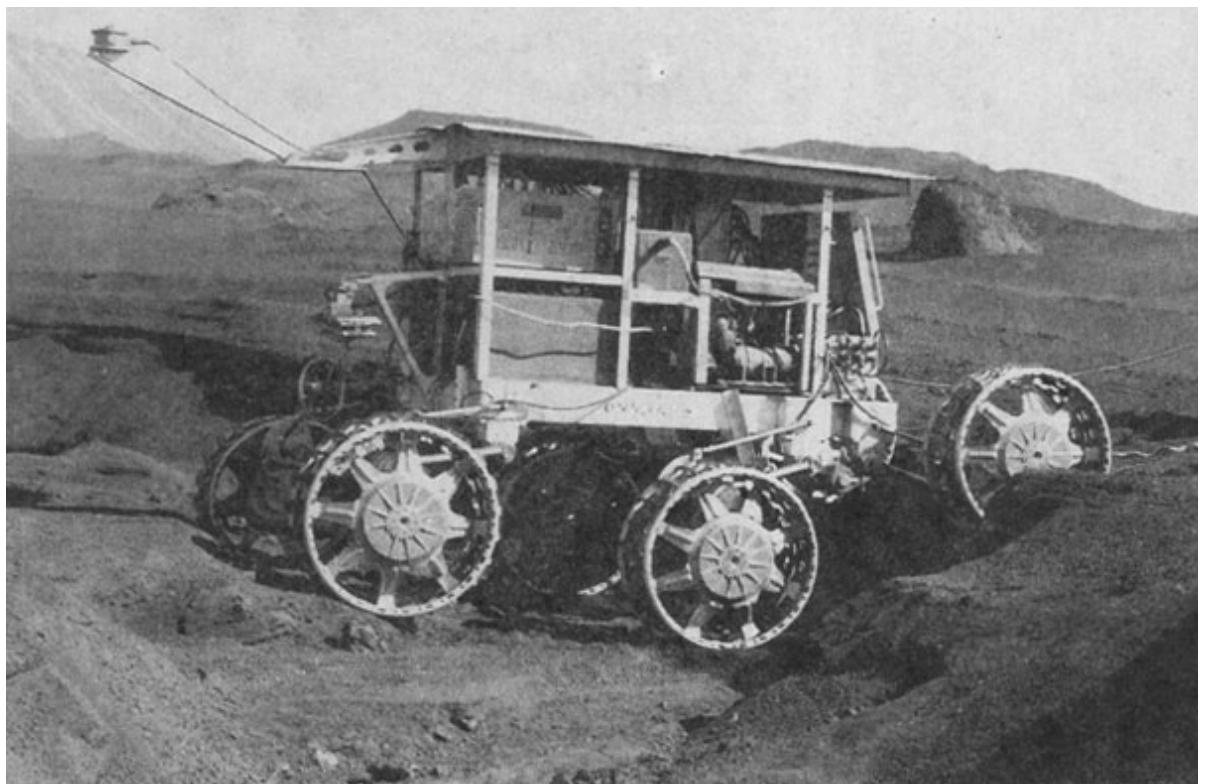


Рисунок 1.6 — VNIITM

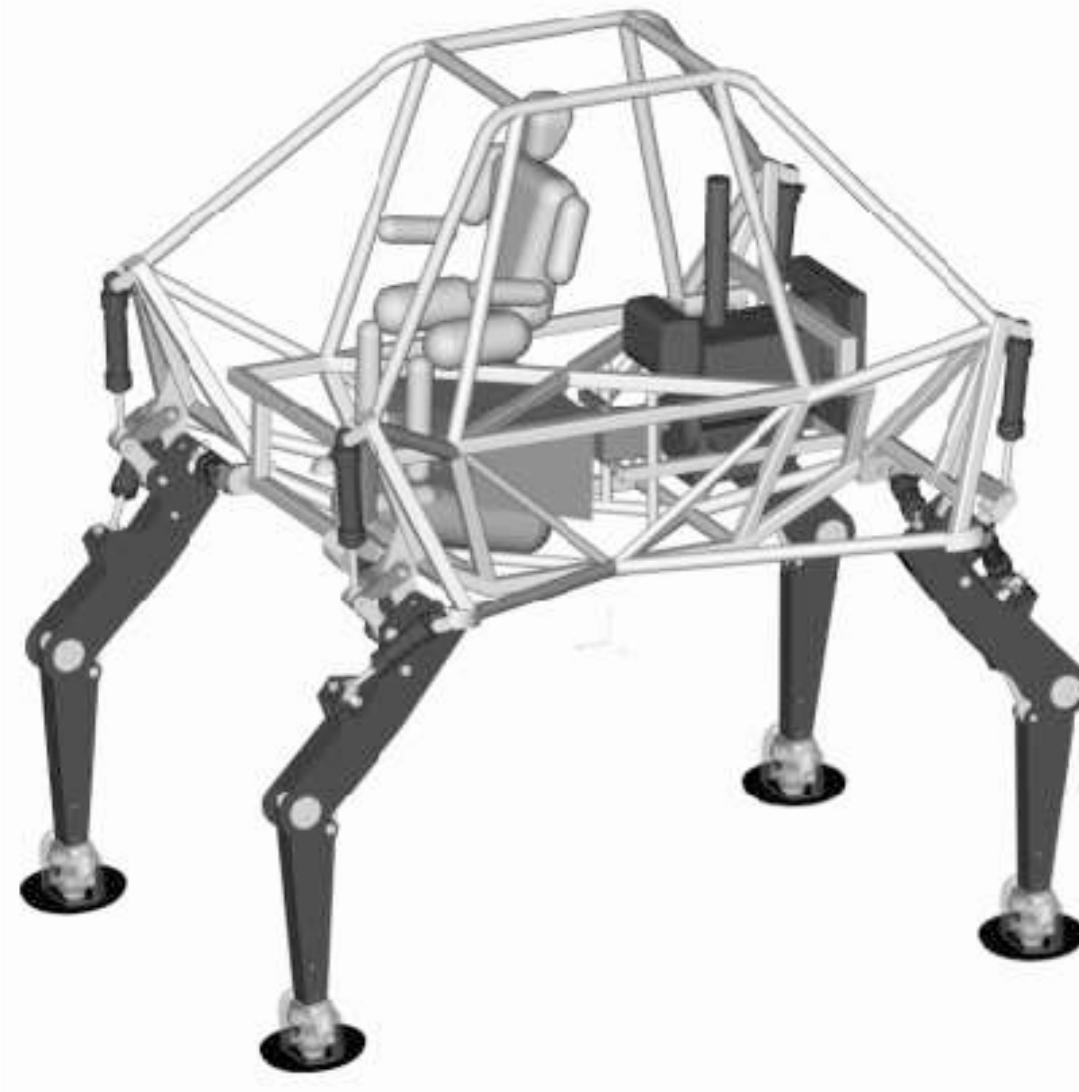


Рисунок 1.7 — Робот Alduro

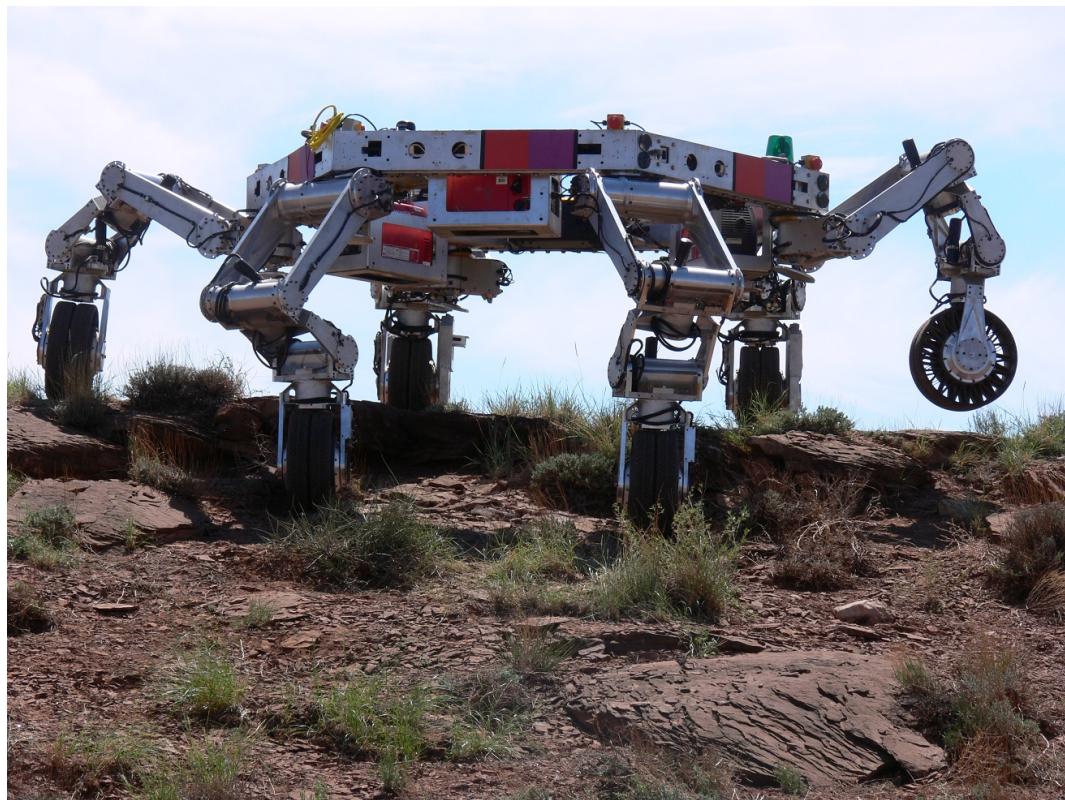


Рисунок 1.8 — Робот Athlete

Есть несколько машин, которые могут не только прыгать или бегать, но и шагать. Примеры следующие [4; 5; 15; 72] (рис. 1.9).

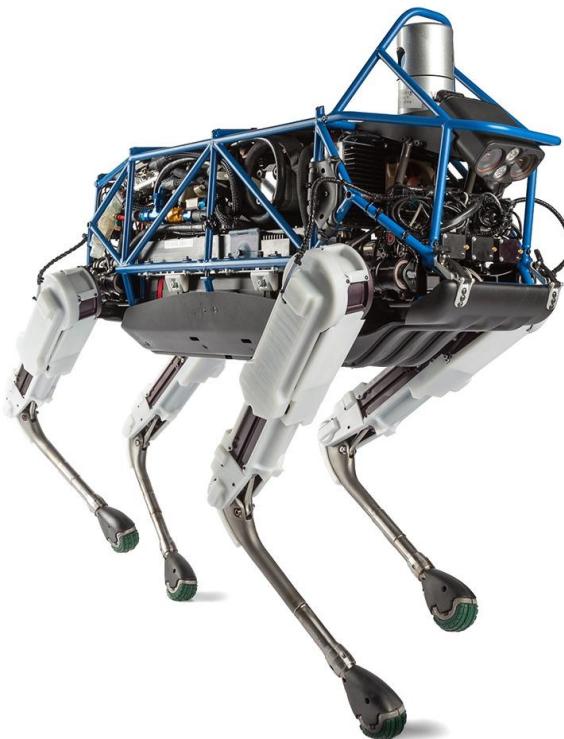


Рисунок 1.9 — BigDog

В соответствии с определением выше, к ползающим экскаваторам относятся большинство таких машин, как шагающие экскаваторы (рис. 1.10). Несмотря на название "шагающие такие машины перемещаются, поднимаясь по лестнице и ложась на опору при передвижении ног [6; 24; 72].



Рисунок 1.10 — Ползающий экскаватор Российского производства

Специфика взаимодействия с опорной поверхностью и область применения лазающих машин настолько сильно отличаются, что сравнение их показателей (за исключением общетехнических) становится практически бессмысленным. Следует также отметить, что многие ползающие и лазающие роботы не имеют ног или какого-то их подобия, передвигаясь, например, за счет движений гибкого тела.

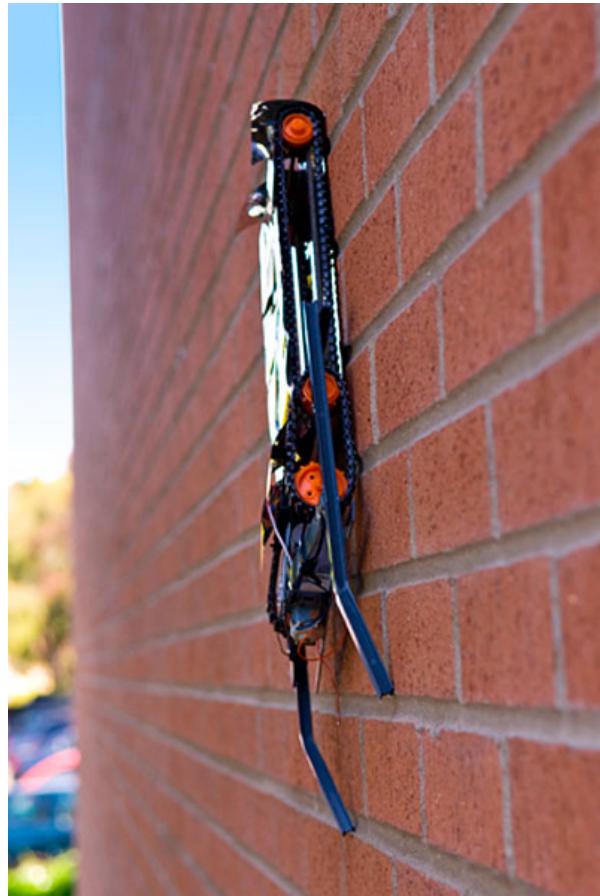


Рисунок 1.11 — BrickWall робот

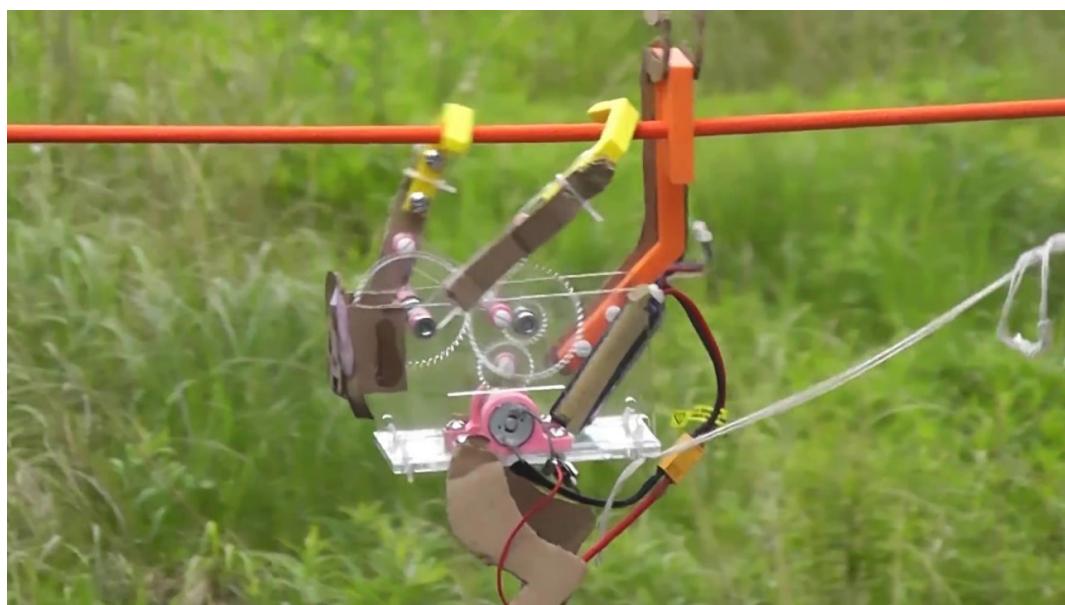


Рисунок 1.12 — Робот, взбирающийся по канату

Согласно этой классификации, робот, который используется в экспериментальной части, относится к категории «Шагающие машины с циклическим действием движителей».

В течении разработки робототехнической системы, были спроектированы и изготовлены несколько прототипов шагающих роботов. Первым всемирно известным прототипом с подобной системой движения является робот RHex [99] от Boston Dynamics. Группы ученых по всему миру развивали эту идею. Таким образом появились 3 новых подмножества. Роботы, которые умеют много сочленений. Системы, которые могут трансформироваться в колесных роботов и обратно. А также системы, которые являются псевдоколесными, то есть количество ног на одном моторе больше одной. Как итог, было решено добавить сочленение в разрабатываемую конструкцию. Также было оценен концепт с псевдоколесными роботами, так как это увеличивает проходимость по грунтам.

## **1.2 Роботы, которые могут использоваться для исследования пещер**

Как было отмечено выше, одной из основных областей применения разрабатываемых роботов являются пещеры. Исследование пещер естественного происхождения является комплексной задачей, сопряженная со множественными трудностями [68; 104]. Деградация сенсоров [47], перебои в коммуникации между роботами из-за потери сигналов [56; 119], сложный рельеф пещер [56], обилие грязи [21], жидких препятствий [92], требующие герметизацию корпуса, являются только малой частью встречаемых проблем в пещерах.

В пещерах возможно встретить почти все типы поверхностей, с которыми приходится сталкиваться роботам в мире. Это и твердые поверхности: мрамор, кварц, базальт. Осадочные горные породы, такие как: мел, гипс, известняк. Часто встречаются водные препятствия — как лужи, так и целы залы, погруженные в воду. Особую опасность для человека вносят сифоны. Скользкие поверхности: лед, мох, глина, а так же разрушаемые поверхности — каменная грязда и паутина [8—11]. Знание типов поверхностей и габаритов пещер влияет на типы сенсоров, которые будут установлены на робота и на необходимую автономность робототехнической системы [23].

Для преодоления сложного рельефа различные роботы, робототехнические системы и типы движителей были предложены исследователями по всему миру [34]. Разрушение пещер нежелательно, поэтому роботы, которые для перемещения ломают породу, не рассмотрены в данном обзоре [20]. Для исследования пе-

щер используются, как наземных роботов, так и летающие аппараты, робототехнические комплексы. Из летающего транспорта это коптеры [28; 78; 122] и дирижабли [47]. Дирижабль намного более автономен и может нести большую нагрузку. Наземных роботов очень много типов, но основными являются: шагающие [77; 108] колесные [81; 119], трековые [93] и специфичные. Специфичные движители это движители роботов, которые не поддаются классификации, например змеевидные [31; 46], шарообразные [56; 60; 62] и другие.

Для исследования пещер система роботов является самым эффективным способом разведки. Для использования систем роботов необходимо решать дополнительные задачи, как архитектурного характера, телекоммуникационного и управляемческого. Обычно системы состоят из нескольких одинаковых роботов [119], связка – коптер и шагающий [36; 117].

Ползающие роботы [101] являются перспективными для исследования пещер по причине их высокой проходимости по узким и невысоким лазам. Например, известны ползающие роботы для исследования пещер, находящихся на других планетах [74].

Важным критерием для выполнения задач разведки пещер, является способность перемещаться по вертикальным поверхностям, благодаря высокой адгезии с поверхностью. Это достигается следующими способами: существуют магнитный [39; 44; 71; 109], электрический [75], негативного давления [28; 39; 109], пневматический или помощью присосок [84; 112], зацепов ("когтей"), что иногда называют механической адгезией [57; 74; 103; 106]. Последний способ является самым применимым для пещер, так как стены рельефные. Рельефные стены с одной стороны препятствуют другим способам прикрепления к поверхности, а с другой стороны облегчают использование зацепов.

Навигация в пещерах является нетривиальной задачей, поэтому рассмотрены сенсоры и алгоритмы, а также архитектурные решения, которые используются в представленных выше роботах. Целесообразно рассмотреть работы в близких и смежных областях. К примеру, исследование трубопровода [100] или завалов после техногенных катастроф. С точки зрения навигации основной проблемой является недостаток света, а также сильная неоднородность территории и обилие гранулированных поверхностей. Решение данной проблемы сейчас удделено много внимания, одним из подтверждений данного тезиса является прошедшее соревнование DARPA Subterranean Challenge. В данном направлении используются как лазерные дальномеры (лидары), так и визуальные SLAM алгоритмы [23; 54; 55;

111]. С точки зрения архитектуры, наблюдается тенденция к модульности, а также к возможным защитам от потерь робота [80; 125]. при работе роботов в группе один 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 [43; 97; 100; 102; 108; 111; 113; 124]. Критичным критерием навигации является решение задачи в реальном времени.

Тип опорной поверхности является одним из ключевых параметров для адаптации управления робота. Зная тип опорной поверхности возможно оптимально построить маршрут по исследуемой территории. Следующие статьи и их обзоры покрывают основные способы решения данной задачи [66; 96; 107].

Подведя итог, в данном разделе были представлены причины проблем, возникающие при разведке пещер роботами. Представлены причины, к примеру типы опорных поверхностей, которые влияют на подбор сенсоров и алгоритмов, 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.

### **1.3 Исследования роботов с цикловым движителем**

Одной из разновидностью роботов с цикловым движителем является гексаподы. Гексапод это разновидность мобильных шагающих роботов с 6 конечностями. Такая форма демонстрирует качественное поведение сороконожки. То есть, чаще всего роботы гексаподы — биомиметические роботы, то есть роботы, вдохновленные природой.

Не смотря на это, существуют интересные попытки создать гибриды между колесными роботами и многоножками, чтобы получить «лучшее из обоих миров».

Boston Dynamics RHex [95] - это шестиногий робот (рис. 1.13). Данный робот является идейным вдохновителем множества разработок по всему миру, в том числе и для робота, разработанного автором диссертации. Независимо управляемые ноги создают специальные походки, которые перемещают его по неровной местности, такой как лестница, каменная грязь и т.д. Данный робот умеет пры-

гать. Форма ног обеспечивает плавность движений. Однако у робота есть и ряд недостатков. Прежде всего, это высокое энергопотребление, так как он содержит шесть двигателей. Кроме того, у этого робота есть некоторые трудности с управляемостью.



Рисунок 1.13 — Boston Dynamics робот RHex

Gakken Mechamo Centipede [79; 80] - робот (рис. 1.14), который имеет схожую кинематическую схему с СтриРусом. Стрирус это разработанный автором робот. Большое количество ног может обеспечить ему хорошую проходимость на пересеченной местности, и потеря ноги не будет критичной для робота. Однако это увеличило количество компонентов робота, что удорожает производство и техническое обслуживание. Минусом данной конструкции это малая длина педипальпатора снижает возможности передвижения по пересеченной местности.

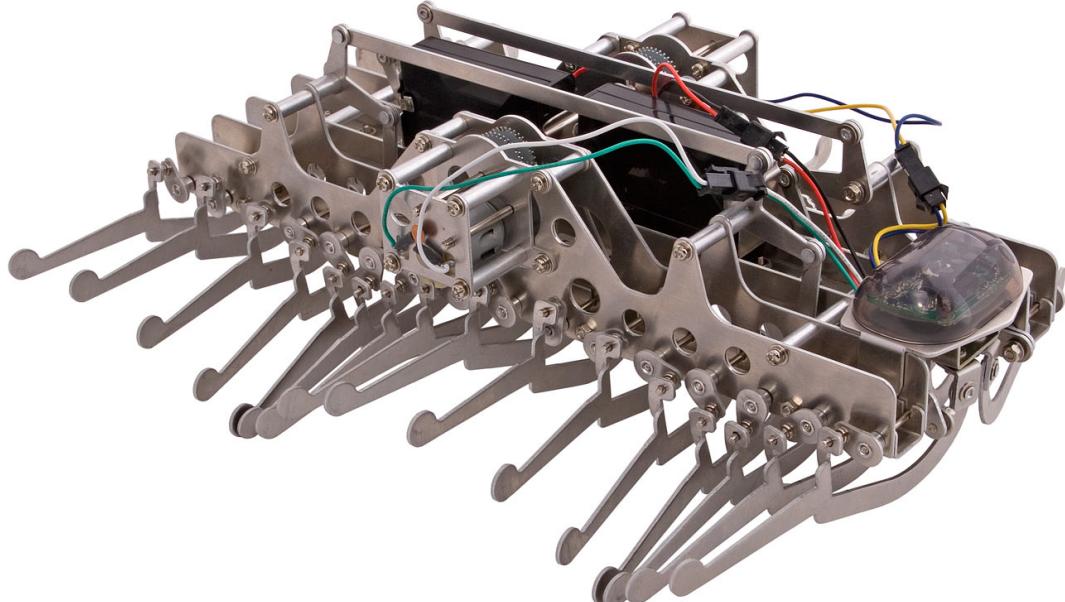
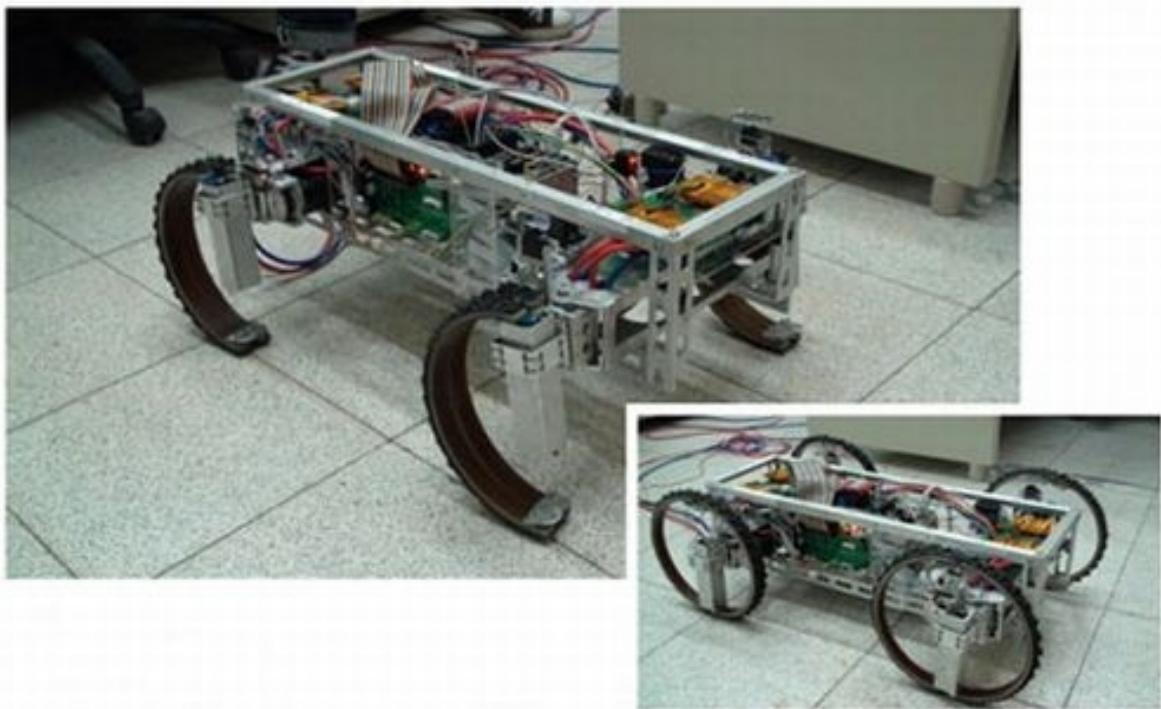
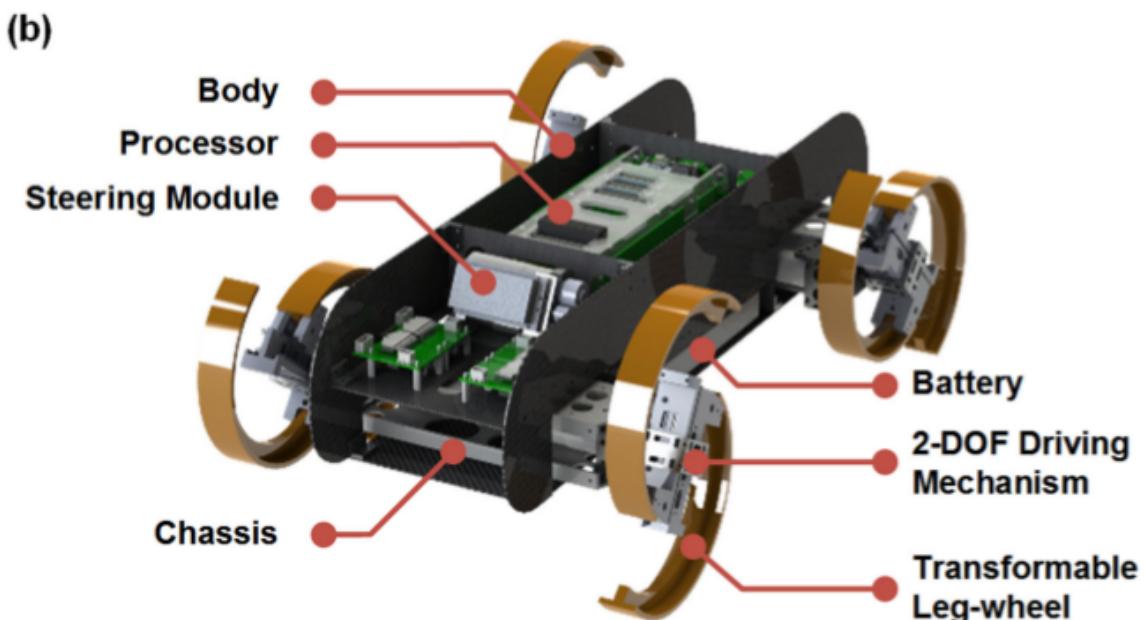


Рисунок 1.14 — Gakken Mechamo Centipede робот

Quattroped и TurboQuad [45; 91; 115] — это роботы, трансформирующие колеса в ноги (рис. 1.15). Когда он использует ноги, его кинематическая схема похожа на робота RHex, в случае режима работы колес он похож по управлению представляет собой четырёхколёсное транспортное средство. Данный инженерный прием обеспечивает высокую скорость на ровной местности, но конструкция робота становится конструкционно сложной, что снижает надежность системы. У робота 4 ноги, что делает его неустойчивым в некоторых ситуациях.



a) Quattroped robot



б) TurboQuad robot

Рисунок 1.15 — Quattroped семья роботов

Whegs [40] (рис. 1.16) использует стратегию локомоции, которая сочетает простоту колеса с преимуществами преодоления препятствий ногой. Робот обладает сегментированным телом, что позволяет ему при малой длине педипуляторов соперничать по проходимости с остальными представителями данного класса роботов. Сегментированность корпуса делает робота более сложным в изготовлении и управлении.



Рисунок 1.16 — Whegs II

Сравнительный анализ между представленными выше роботами приведен в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнительный анализ гексаподов

Параметры, СИ	RHex	Gakken Mechamo Centipede	Quattroped	Whegs II
Длина, мм	540	320	600	470
Ширина, мм	200	140	190	360
Высота, мм	127	100	140	50
Масса, кг	8.2	1.1	8.6	3.86
Количество ног	6	32	4	18
Высота ноги, мм	175	50	175	100
Масса ноги, кг	0.1	0.02	0.38	0.05
Скорость, м/с	1.6	0.1	2	1.5

Все эти роботы, кроме Gakken Centipede, были созданы для разведки, в том числе и пространствах искусственного происхождения, поэтому значения параметров можно легко объяснить. Ширина должна быть меньше ширины дверного проема. Еще лучше, если ширина робота будет меньше  $2/3$  размера двери, и все прототипы удовлетворяют этому условию. При навигации внутри помещений

длина также должна быть минимально возможной, иначе он не сможет передвигаться в коридорах и тесных помещениях. Масса зависит от других параметров. Высокая скорость не нужна в помещениях и опасных зонах.

Работы с цикловым движителем, такие как Boston Dynamics RHex [95], Gakken Mechamo Centipede [80], Quattroped and TurboQuad [91; 114; 115], а также Whegs [40] были рассмотрены. Рассмотрев других представителей выбранного класса роботов и определив причины таких параметров, было решено, что не следует превышать длину аппарата в один метр, в ширину — меньше 70 см (стандартная ширина дверного проема). Иметь меньше 32 лапок и высота лапки должна быть больше 10 см. При большем количестве лапок начинаются большие проблемы с трением и КПД, что негативно сказывается на проходимости и энергопотреблении конструкции.

#### **1.4 Описание условий в пещерах**

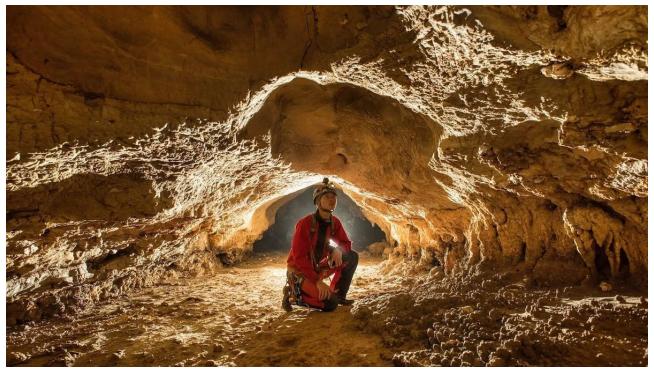
Пещера — полость в верхней части земной коры, сообщающаяся с поверхностью одним или несколькими входными отверстиями. Пещеры естественного происхождения бывают: карстовые, тектонические, эрозионные, ледниковые и вулканические. В них могут быть найдены следующие структуры поверхностей:

- твердые породы, прочные – мрамор, кварц, базальт (магма) (рис. 1.17);
- твердые породы, податливые – мел, гипс, соль, известняк (рис. 1.17);
- сыпучие грунты – песок, глина, снег (рис. 1.18);
- водные препятствия – как и лужи (малый слой воды), залы, погруженные под воду, сифоны (рис. 1.19);
- скользкие поверхности – отложения мха и плесени, лед (рис. 1.20);
- разрушаемые поверхности – каменная грязь, паутина.



а) Кристаллы

б) Солевые отложения



в) Мagma

г) Известняк

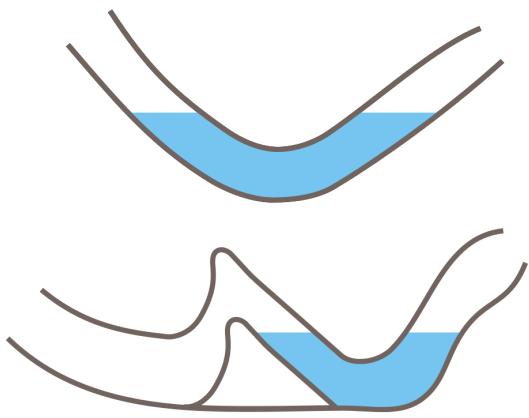
Рисунок 1.17 — Твердые поверхности



а) Песок

б) Глина

Рисунок 1.18 — Сыпучие грунты



а) Лужа

б) Сифон

Рисунок 1.19 — Водяные препятствия



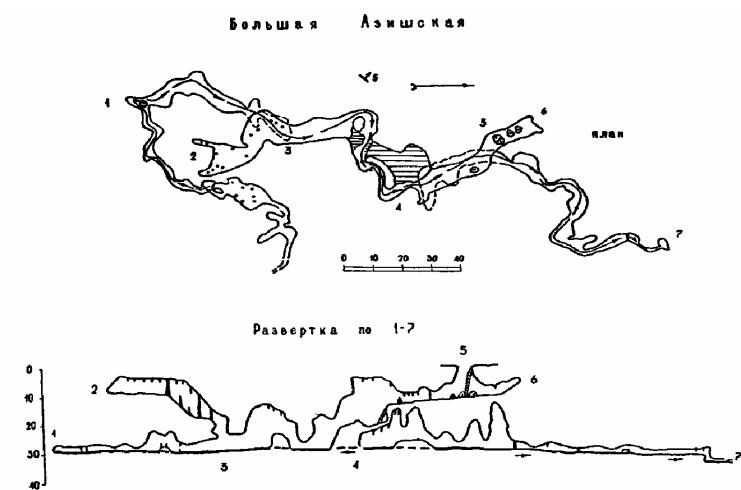
а) Ледяная пещера



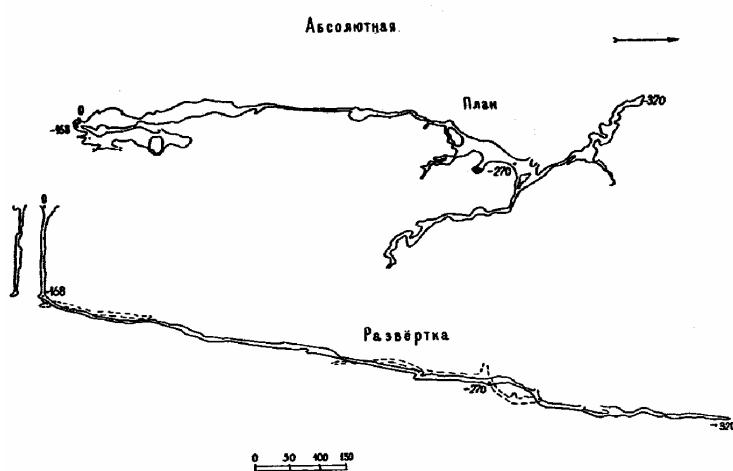
б) Мх

Рисунок 1.20 — Скользящие поверхности

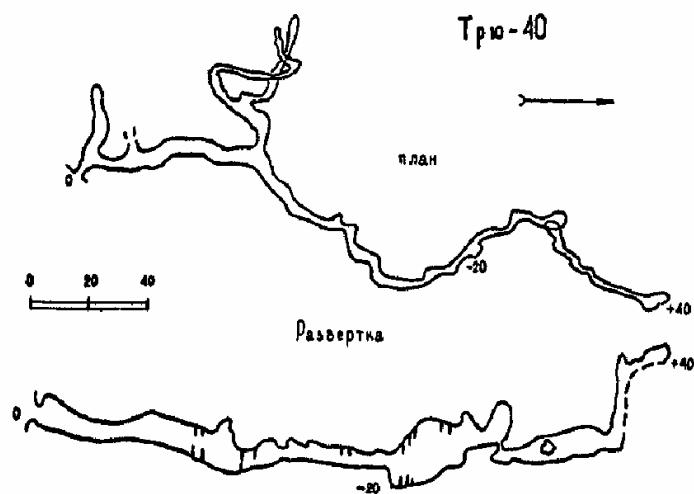
Представлены габаритные размеры нескольких пещер для определения необходимого запаса хода и размеров компонентов робототехнического комплекса [8—11].



а) Большая Азишская пещера



б) Абсолютная пещера



в) Трю - 40

Рисунок 1.21 — Примеры карт некоторых пещер

Так как существующие карты построены только там, где прошли исследователи-люди, то таким образом возможно только оценить верхние грани-

цы для габаритов робота. Основное преимущество робота это то, что он может пройти в те места, которые недоступны человеку из-за своих размеров.

## 1.5 Классификация сенсорных устройств

Информация, поступающая с различных сенсорных устройств, используется в системе управления робота для обнаружения и распознавания объектов внешней среды, построения модели окружающих поверхностей, а также для управления движением робота и его манипуляторов при выполнении различных технологических операций. В соответствии с этим, используемые в роботах предложенного класса, группы сенсорных устройств можно описать как сенсоры, необходимые для выявления свойств внешней среды, отдельных объектов и обеспечения перемещения исполнительных органов [17—19].

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 мобильных 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 сверхближние, ближние, дальние и сверхдальние (работающие вне рабочей зоны).

Сенсорные устройства сверхближнего 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, плотномеры 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 мобильных 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 были выбраны следующие сенсоры для решения задач перемещения и локализации в пещерах, параллельно определяя тип опорной поверхности. Выбранными семействами сенсоров являются силомоментные, сверхдальнего действия, бесконтактные, а также датчики обратной связи.

## 1.6 Обзор подходов оценки поверхностей

Генерация семейства поверхностей является одним из способов решить задачу оценки сложности рельефа. Основными найденными подходами к оценке рельефа являются.

1. Анализ множества физических свойств поверхностей с точки зрения максимальной скорости, мощности и других параметров робота при их прохождении [95].

2. Построение конкретной местности, которая является достаточно сложной по мнению человека, который ее генерирует. В задании Rough Terrain Task в DARPA's Virtual Robotics Challenge используется этот подход. Таким образом тестиировался робот ATLAS [87] (рис. 1.22).

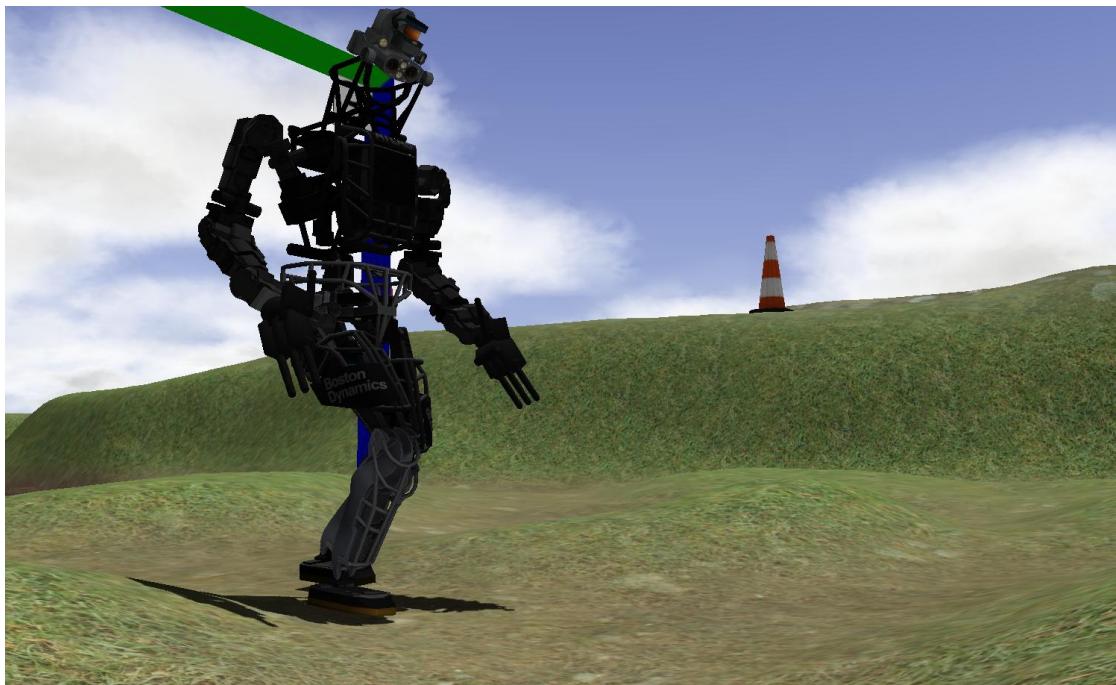


Рисунок 1.22 — Задание на пересеченной местности в конкурсе виртуальной робототехники DARPA

3. Оценка местности в соответствии с возможностями робота. Она основывается на перепаде высот, который может преодолеть робот. Если робот не может его преодолеть, значит, местность неудовлетворительная [63; 65] (рис. 1.23).

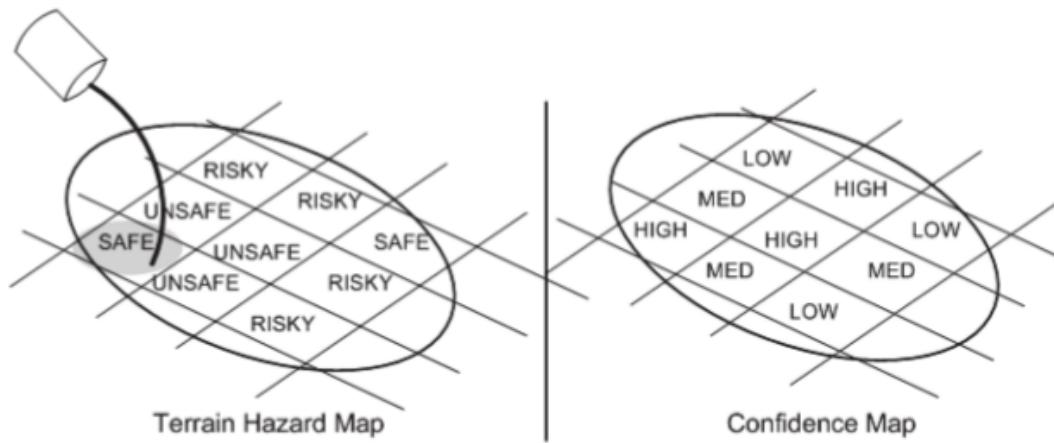


Рисунок 1.23 — Пример карт местности: карта опасности местности и карта достоверности местности

4. Оценка по карте с использованием ряда анализируемых параметров, таких как дисперсия, дальность, тип почвенно-растительного покрова, количество граней и так далее [65].

5. Получение искусственных поверхностей на основе параметров генерации. Первая версия этой идеи была связана с получением жестких ландшафтов с квадратной сеткой, где каждая ячейка имеет некоторую высоту [25] (рис. 1.24).



Рисунок 1.24 — Рельеф с параметризованными ячейками

Рассмотрев преимущества и недостатки всех вариантов, последний подход с некоторыми модификациями и расширениями лучше всего подходит для оценки сложности поверхности.

## 1.7 Обзор алгоритмов триангуляций

Для решения задачи построения карты с помощью тактильного очуствления генерировать поверхность на основе полученных точек является адекватным решением, так как большинство алгоритмов навигации используют облака точек в своих данных. Таким образом концепты, используемые в других алгоритмах, могут быть адаптированы и в данной задаче. Эта задача формулируется следующим образом. Необходимо получить поверхность из набора точек, полученных с ног робота. Одним из примеров оболочки является выпуклая оболочка. Выпуклая оболочка это наименьшее выпуклое множество, содержащее в себе некоторое множество  $X$ .

Для выбора алгоритма необходимо формализовать ограничения и условия, которые присутствуют в конкретной задаче по построению карты с помощью тактильного очуствления [26; 48].

- Граница вокруг объекта должна быть вогнутой формы, а не выпуклой. Более подробно этот тезис объясняется в главе Разработка метода тактильного очуствления.

- Плотность полученного облака точек не играет роли, так как разрабатываемый алгоритм не будет страдать из-за разряженности точек.

Область интерполяции [33; 50; 61; 70; 89] — это когда одна группа объектов или набор данных является базой для определения диапазона значений для интерполяции и заключена в некую границу выпуклой формы. Область за пределами этой границы или корпуса обозначается как область экстраполяции. Обычно эту область называют выпуклой оболочкой.

Существуют множество алгоритмов, которые рассматривают случай, когда у одной группы объектов оболочка не является выпуклой. [94; 118; 121].

Для решения задачи построения карты необходимо использовать алгоритмы, основанные на получении вогнутой оболочки. Чаще всего такие алгоритмы используют за основу выпуклую оболочку и модифицируют ее.

Первыми алгоритмами для вычисления выпуклых оболочек были Алгоритм Грэхема [59] и Алгоритм Джарвиса [67], которые были усовершенствованы в [35].

Для получения выпуклой оболочки большей размерности был предложен алгоритм быстрой оболочки [38]. Более современные алгоритмы применимы к более комплексным областям применения. К примеру такими алгоритмами являются «динамические выпуклые оболочки», «аппроксимация оболочки для больших наборов данных», «алгоритмы выпуклых оболочек для больших размерностей» [32; 69; 126]. Например для задач построения карты для беспилотных автомобилей требуется решения в режиме реально времени, авторы разрабатывают усовершенствования производительности алгоритмов путем распараллеливания и использования графического процессора (GPU) для определения внутренних точек [37; 105; 116; 126].

Для построения вогнутых оболочек существует несколько различных подходов к вычислению границ произвольной формы. Основные концепции алгоритмов построения вогнутых оболочек основаны на методах ближайших соседей, kernel функциях или триангуляции Делоне. Хотя это не совсем алгоритм для построения вогнутой оболочки, существует также подход, который с помощью статистики определяет признаки новизны. В итоге данный подход решает ту же проблему [126].

Известным алгоритмом для построения вогнутой оболочки является  $\alpha$ -shapes [49; 86]. Это обобщение вогнутой оболочки, где  $\alpha$  - параметр, и по мере приближения  $\alpha$  к 0,  $\alpha$ -оболочка приближается к обычной выпуклой оболочке.  $\alpha$ -оболочки строятся из диаграмм Вороного. Есть альтернатива —  $\chi$ -фигуры [51]. Алгоритм  $\chi$ -форм является простым, гибким и эффективным для построения возможно невыпуклого простого многоугольника, который характеризует форму набора входных точек на плоскости, называемую характерной формой. Вместо диаграмм Вороного алгоритм основан на триангуляции точек по методу Делоне. Есть еще модификации на основанные на алгоритме Грэхема [22] с унаследованными ограничениями. Другой подход представлен Парком [88], который начинается с выпуклой оболочки и применяет алгоритм "копания".

Благодаря работе [118] и метода машинного обучения SVM, возник новый класс методов обнаружения. Однако одноклассовые SVM не дают точной оболочки, и для различия между внутренним и внешним необходимо задать порог. С дополнительной информацией возможна двухклассовая SVM.

Для вычисления независимых оболочек для нескольких групп объектов предлагается алгоритм с использованием алгоритма кластеризации общих ближайших соседей (SNN) , который вычисляет оболочку для каждой группы, применяя подход k-nearest neighbors (kNN) [29; 30; 52; 82].

## 1.8 Обзор разработанной системы

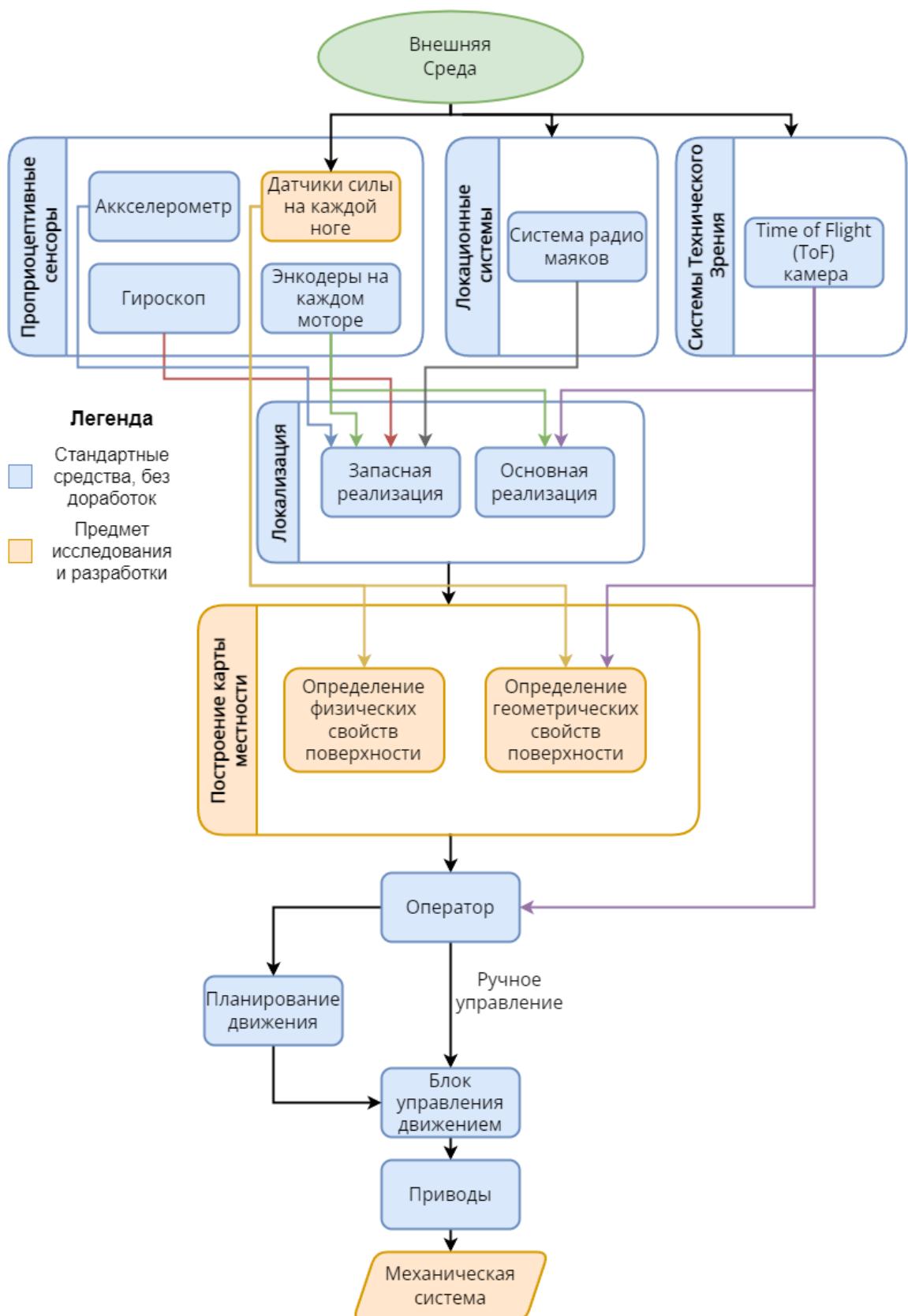


Рисунок 1.25 — Структурная схема разработанной системы

Для реализации экспериментальных исследований разработана робототехническая система, структурная схема которой показана выше (рис. 1.25)

Оранжевым цветом выделены те компоненты системы, которые представляют собой предмет исследования в рамках диссертационной работы. Их разработка и научная новизна описаны в последующих главах диссертации. Голубым цветом выделены блоки, соответствующие которым элементы в разработанную систему были интегрированы как стандартные средства, без каких-либо существенных доработок.

Верхний блок — внешняя среда, то есть вся информация о внешнем мире, с которой работает робот. То есть, это окружающее робота пространство, которое возможно считывать с помощью установленных сенсоров, с ним возможно физически взаимодействовать.

Следующая группа блоков связана с сенсорами. Здесь представлены «Проприоцептивные сенсоры», то есть внутренние датчики, такие как гироскоп, акселерометр, энкодеры и датчики силы. Единственному оранжевому соответствующему элементу в данной группе «Датчики силы на каждой ноге» посвящена глава Разработка и исследование преобразователя силы на основе Velostat. В ней рассказывается о разработке датчика на основе Velostat, о проблемах, возникающих при использовании данного материала, и как эти проблемы были решены.

Также есть группа блоков, посвященная техническому зрению. В представленном роботе это камеры Time of Flight (ToF). Это камера, которая может выдавать облако точек. Это другое облако точек, не то, которое получено с ног робота, но их возможно объединить для получения более точной карты местности.

Последней группой элементов является «Локационные системы», представленные системой радио маяков. Во время движения робот может оставлять радио маяки, таким образом делая радио локационную сеть. Такая сеть позволяет определять местоположение робота в пространстве. Предметом исследования эта задача не является.

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

на на Инерциальном измерительном устройстве (IMU), датчиках силы и системе маяков.

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

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

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

## **1.9 Применимость системы**

Необходимо понимать возможности робототехнической системы. Следующей задачей является формализация условий ее применимости. Из полученных условий возможно определить конкретные существующие места, где такую систему возможно применить.

Итогом размышлений на тему возможностей был сделан вывод, что данная система может использоваться в узких пещерах, где не может пролезть человек. Шагающие машины обладают лучшей проходимостью, чем гусеничный или колесный тип движителя, поэтому его использования в местах, где есть большой перепад высот и нет возможности набирать высокую скорость из-за обилия

препятствий обоснован. Для получения геометрической поверхности разработан алгоритм создания вогнутой оболочки с помощью триангуляции Делоне и alpha геометрии. На входе этот алгоритм использует облако точек, полученное с педипуляторов робота. Физические свойства поверхности определяются с помощью обучения стеновой установки на различных типах поверхности с использованием алгоритма SVM и kNN.

## Глава 2. Оптимизация конструкции робота

Вторая глава раскрывает детали разработки объекта исследования, а именно решение задачи структурного синтеза и инженерную разработку прототипа. Прототипом робота, является шагающий робот с цикловым типом движителя.

### 2.1 Задача структурного синтеза на основе критериев проходимости, детализации и пройденного пути

Зная область применения робототехнической системы возможно оптимизировать ее механическую часть. Были выдвинуты следующие требования к конструкции. Робототехническая система должна:

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. уметь взбираться на большие каменные уступы.

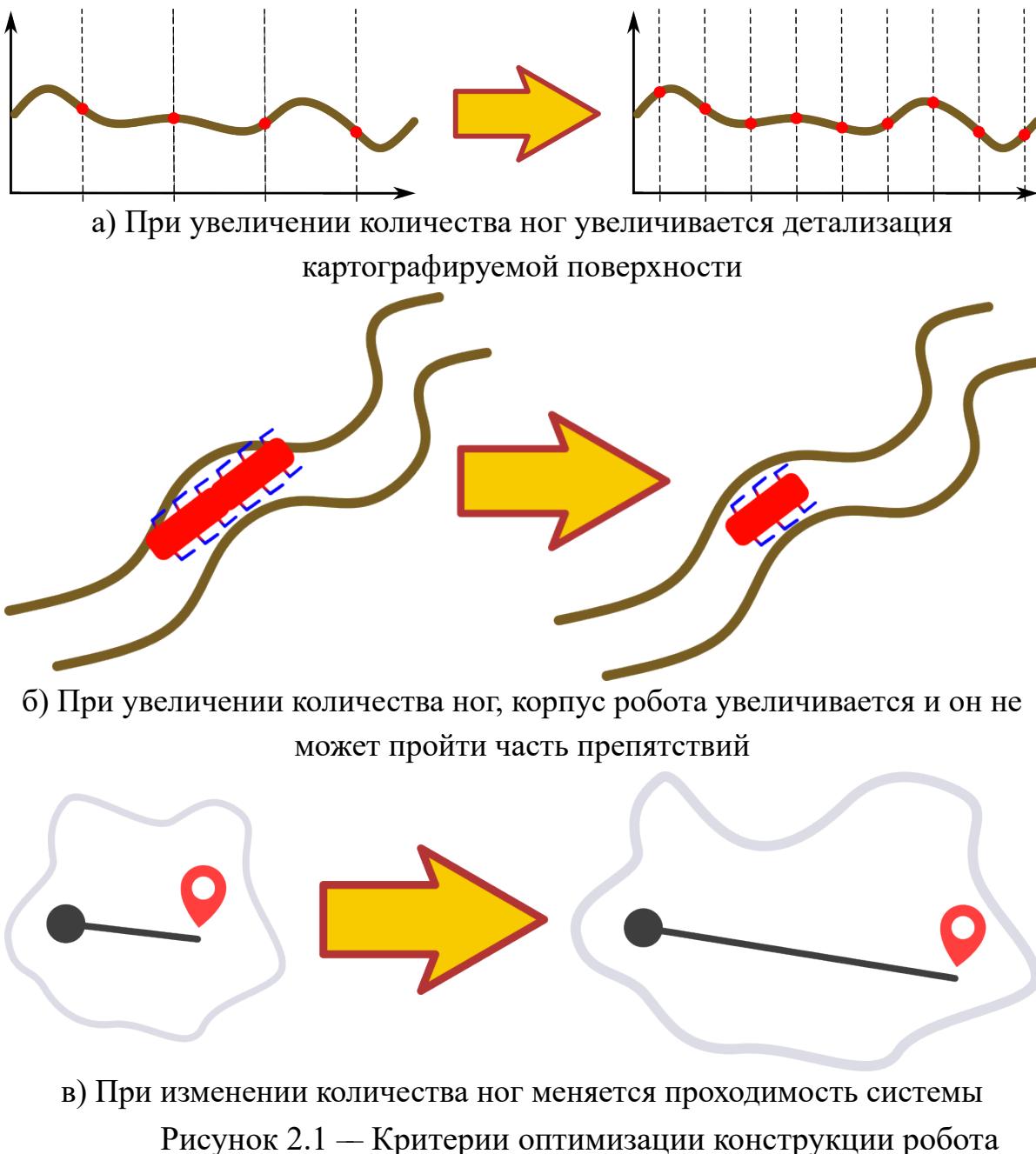


Рисунок 2.1 — Критерии оптимизации конструкции робота

Изучая данные требования возможно заметить, что часть из них коррелируют друг с другом, а часть - диссонируют. Чем больше количество полученных точек на пройденной поверхности, тем выше будет детализация карты. Одним из способов увеличения детализации это увеличение количества ног у робота (рис. 2.1а). С другой стороны, это увеличивает длину робота, а следовательно робот хуже сможет проходить узкие участки с обилием поворотов (рис. 2.1б). Чем большее расстояние робот сможет пройти за одно и то же время, тем быстрее будет построена карта и робот меньше повлияет на окружающую среду при прочих равных условиях (рис. 2.1в).

Из-за того, что требуется оптимизировать несколько критериев, часть из которых имеют обратную зависимость, то невозможно получить единственное лучшее решение. Результатом будет фронт Парето, то есть, множество лучших решений. Данная задача является мультикритериальной задачей оптимизации.

Для цикловых движителей, где в педипуляторе нету суставов, вопрос о количестве ног не имеет однозначного решения. Поэтому необходимо решить задачу структурного синтеза, чтобы определить оптимальное количество ног в роботе. Задача по подбору количества ног решалась с помощью генетического алгоритма.

Генетический алгоритм — 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 и OpenAI.

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 данном случае важно максимизировать ходовые качества робота на различных сложных участках, и основным используемым показателем будет проходимость по местности. Генерируется семейство роботов, изменяя выбранные параметры конструкции робота, такие как количество ног.

Понятие сложности поверхности субъективно. Поэтому хорошей практикой является генерация семейства проходимых поверхностей. Для оценки пригодности сгенерированного индивида создается физическая симуляция, во время которой робот будет проходить по созданному семейству поверхностей. Генерацию поверхностей возможно параметризовать. Это позволит на более позднем этапе исследовать влияние не только типа местности, но и параметров местности и, следовательно, на лучшие конструкции в зависимости от конкретной местности.

Для того чтобы направлять процесс поиска в пространстве возможных значений параметров, решено использовать модифицированный эволюционный алгоритм, который создает последовательные поколения конструкций с помощью соответствующих генетических операторов, играющих роль мутаций и скрещивания.

Результатом работы алгоритма стал диапазон количества ног, значительно улучшающие проходимость робота.

### 2.1.1 Математическая модель робота

Исследуется механическая система, состоящая из твёрдых тел (2.1), движение которых описывается дифференциальными уравнениями вида:

$$M\dot{\vec{u}} = \vec{g} \quad (2.1)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}, \quad M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\vec{u}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{v}_i^T & \vec{\omega}_i^T \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\vec{g}^T = \left[ \cdots \vec{F}_i^T, (\vec{\tau}_i - \vec{\omega}_i \times I_i \vec{\omega}_i)^T \cdots \right] \quad (2.4)$$

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

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

$$\phi(q_{j_1}, u_{j_1}, \dots, q_{j_k}, u_{j_k}, t) \geq 0 \quad (2.5)$$

$$\vec{q}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{x}_i^T & \vec{Q}_i^T \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\dot{\vec{q}}_i = \begin{bmatrix} E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & G(\vec{q}_i) \end{bmatrix} \vec{u}_i \quad (2.7)$$

$$\vec{g}_i = \tau_i^T \vec{z}_{i-1} - k_i \dot{\vec{q}}_i \quad (2.8)$$

где через  $\phi$  – обозначена функция связи ;  $t$  – время ;  $q_j$  – вектор обобщенных координат, включающий в себя координаты центра масс  $\vec{x}_i$  и кватернион  $\vec{Q}_i$ , описывающий ориентацию тела в пространстве ; через  $G(\vec{q}_i)$  – обозначена матрица, вид

которой зависит от выбранной системы координат и способа задания ориентации тела ;  $k$  — коэффициент вязкого трения в шарнире – .

Контакт ног робота с опорной поверхностью (рис. 2.2) описывается на базе модели сухого трения и выражается следующими уравнениями:

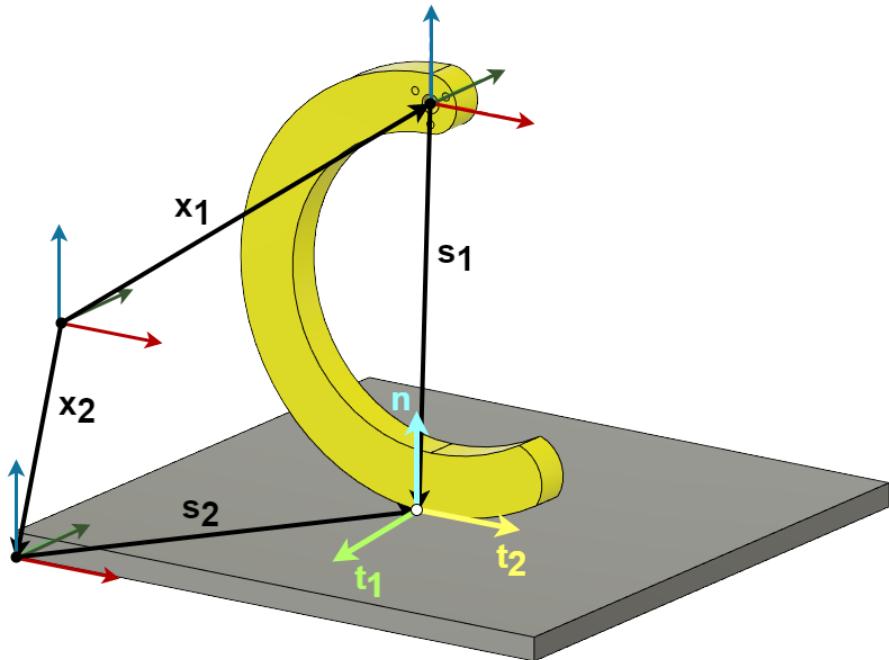


Рисунок 2.2 — Отображение переменных для модели взаимодействия опорной поверхности и ноги робота

$$\phi_u(\vec{q}) \geq 0 \quad (2.9)$$

$$\phi_u(\vec{q}) = (\vec{x}_1 + \vec{s}_1 - \vec{x}_2 - \vec{s}_2) \cdot \vec{n} \quad (2.10)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_u(\vec{q}) \approx \begin{bmatrix} \vec{n}^T & (\vec{s}_1 \times \vec{n})^T & -\vec{n}^T & (-\vec{s}_2 \times \vec{n})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{\omega}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{\omega}_2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} \mu f_n \geq \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \\ \|\vec{v}_t\| (\mu f_n - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}) = 0 \\ \frac{\vec{f}_t}{\|\vec{f}_t\|} = -\frac{\vec{v}_t}{\|\vec{v}_t\|} \end{cases} \quad (2.12)$$

где,  $\phi_u(\vec{q})$  – функция связи;  $\mu$  – коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью;  $\vec{x}_{1,2}, \vec{s}_{1,2}$  – радиус-векторы и орты координатных осей  $\vec{t}_{1,2}$ ,  $\vec{n}$  показаны на рисунке (рис. 2.2);  $f_{1,2}$  – значения сил трения вдоль осей  $t_{1,2}$  соответственно .

### 2.1.2 Представление робота

Геометрическая модель корпуса робота представлена в виде параллелепипеда. Количество движителей по каждому из бортов обозначается через  $\gamma$ . Разность фаз между соседними движителями обозначается через  $\alpha$  (рис. 2.3).

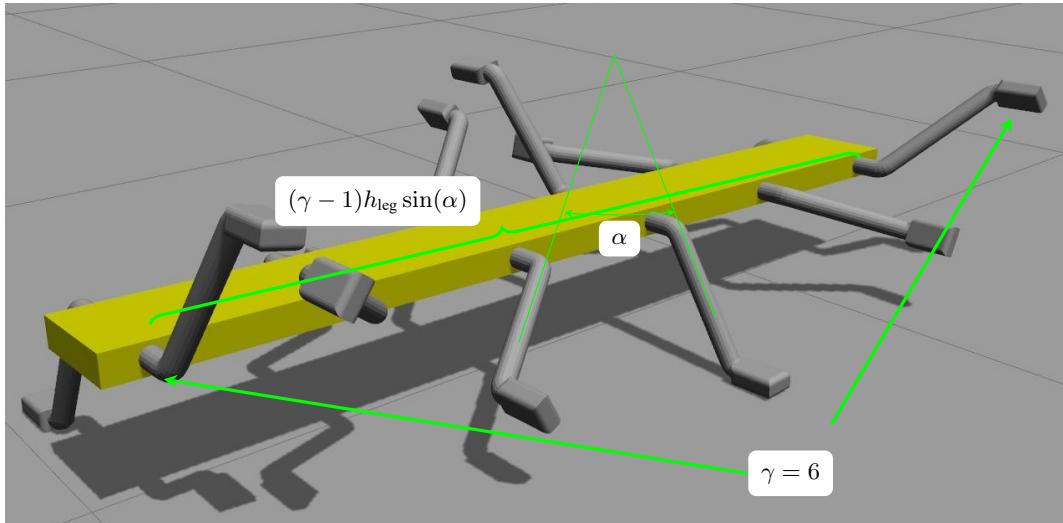


Рисунок 2.3 — Схема модели робота для генетического алгоритма

Эту задача сформулирована, как мультикритериальная задача оптимизации, где необходимо максимизировать дистанцию, пройденную за фиксированное время, и минимизировать длину робота (2.13). Изменяемыми параметрами индивида являются  $\gamma$  и  $\alpha$ .

$$F \rightarrow \max = \beta \left( \underbrace{\omega_1 \cdot \delta}_{\text{Distance}} + \omega_2 \cdot \underbrace{\frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}} \sin(\alpha)}}_{\text{Simplified body length}} \right) + (1 - \beta) \delta^{\omega_1} \left( \frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \right)^{\omega_2} \quad (2.13)$$

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

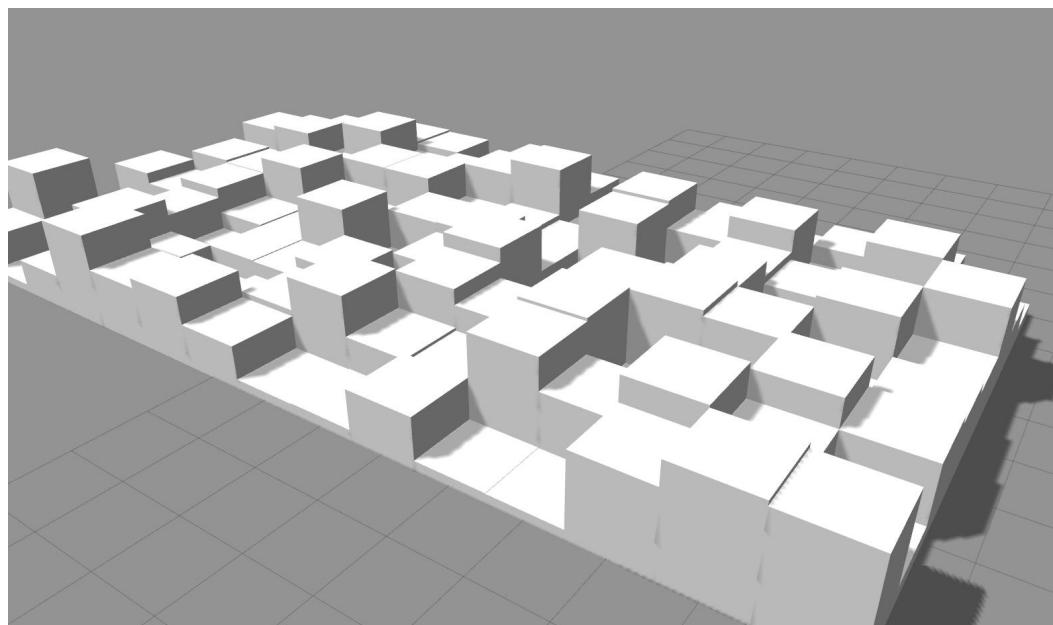
Модель робота реализована в формате URDF. Это язык разметки формата XML для представления модели робота. Это старый формат, и когда модель загружается в Gazebo, URDF преобразуется в формат SDF. Это важно, потому что часть функций не реализованы в чистом URDF. В нашем случае это шарнир коробки передач.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

### 2.1.3 Генерация семейства поверхностей, по которой будет проходить робот

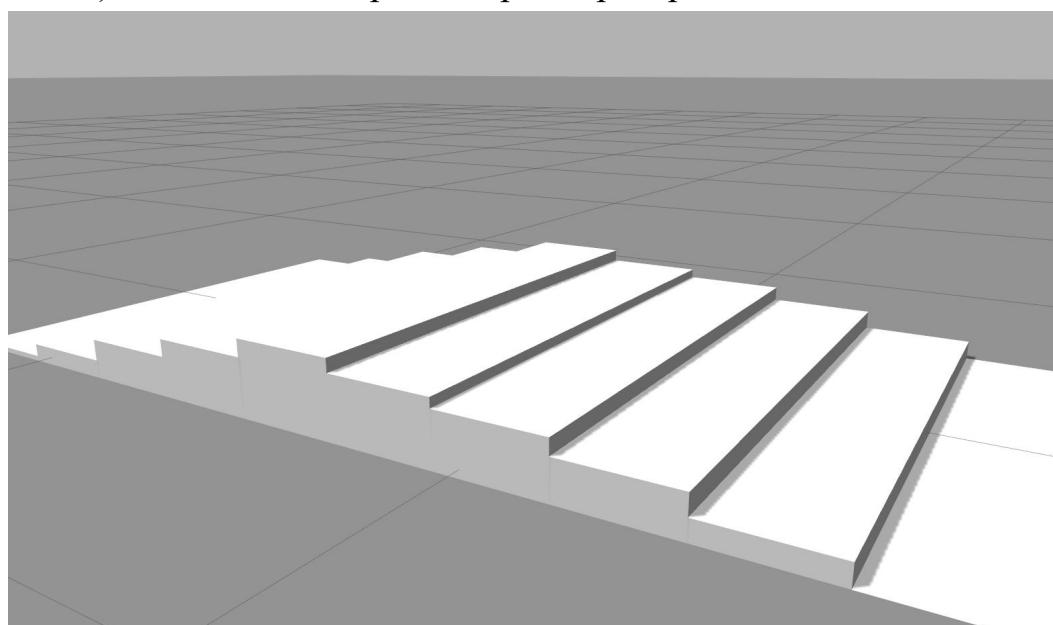
Так как нахождение оптимальной конструкции робота происходит посредством использования симуляции, то необходимо каким-либо образом оценивать сложность пройденной роботом поверхности. Исследуя различные варианты, самым приемлимым для подобного типа оптимизаций, оказалось, что генерирование семейства поверхностей на основе параметров.

Параметры местности, которые могут быть изменены, следующие:

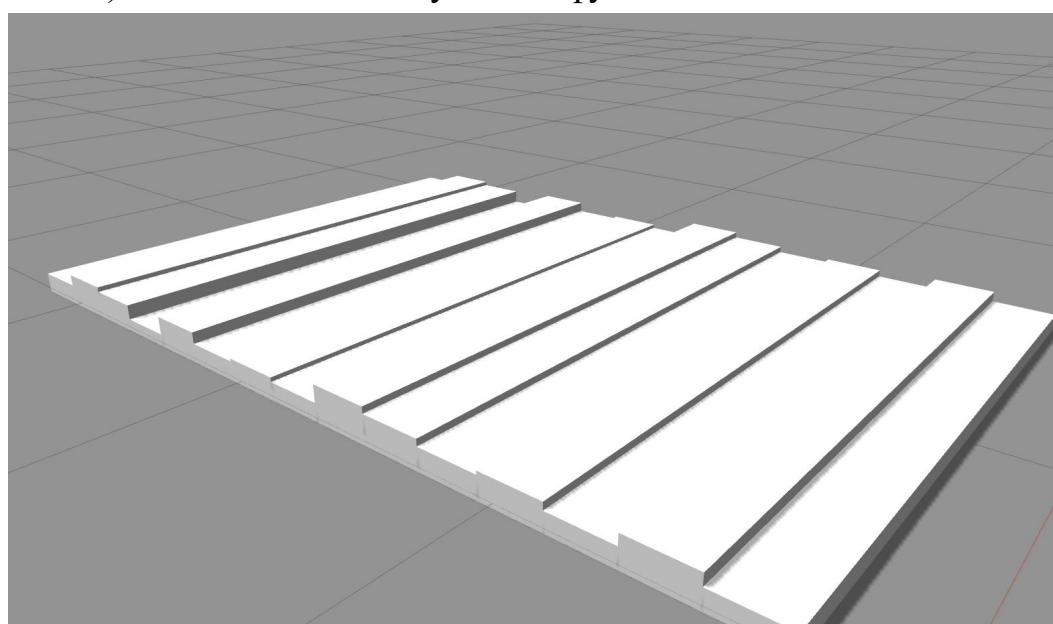
- количество клеток в ширину и в длину;
- максимальный перепад высоты клетки;
- ширина и длина клетки;
- 2(3) измерения местности (рис. 2.4а);
- параметр распределения (рис. 2.4б).



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



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



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

Рисунок 2.4 — Примеры сгенерированных территорий

Для выбора высоты клеток были проведены эксперименты. Эксперимент выглядел следующим образом. На основе длины лапки было выбраны 3 диапазона, определяющих свойства местности, которые изображены ниже (рис. 2.5). Для каждого диапазона было сгенерировано 20 местностей и 50 роботов. Каждый индивид пытался пройти все 20 местностей. Время на прохождение препятствия — 4 секунды. Успешные попытки засчитывались и заносились в таблицу. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

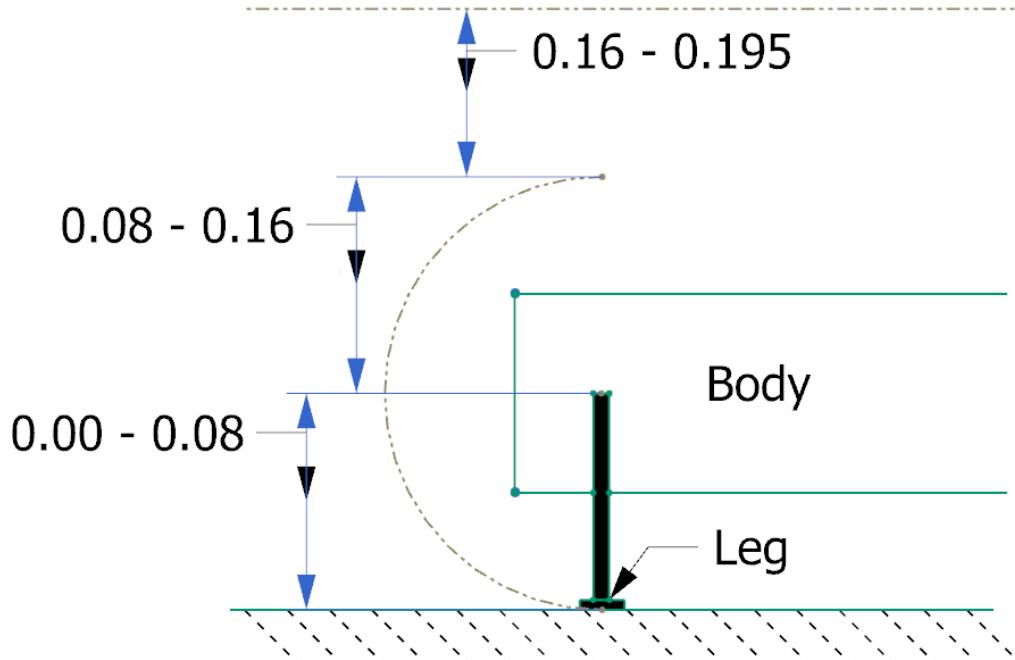


Рисунок 2.5 — Три диапазона для оценки рельефа местности

Таблица 2 — Процентное соотношение между диапазонами и успешными попытками

Диапазон	Процент успешных попыток
0.00 – 0.08	99.7
0.08 – 0.16	79.7
0.16 – 0.195	47.3

Для того, чтобы не отбрасывать большое количество индивидов, которые с большой долей вероятности не могли бы пройти даже первое препятствие, было решено, что второй и первый диапазоны (0.00 - 0.16) будут использоваться в алгоритме оптимизации.

В информатике генетические алгоритмы — 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.

Реализация генетического алгоритма основана на библиотеках Deap и OpenAI-ES [42; 53].

Генетический код особи содержит 3 основных гена: количество ног, угол между двумя соседними ногами и волновое смещение между сторонами, а также 1 дополнительный ген — пройденная дистанция, который зависит от других генов и поэтому не участвует в процедурах скрещивания и мутации.

Алгоритм заключается в следующем. После случайной генерации начальной популяции, популяция эволюционирует с помощью трех операторов: селекции, основанного на повышенной вероятности выживания сильнейшего; скрещивания, который представляет собой спаривание между особями и мутации, которая вносит случайные изменения в значения генов отдельных особей.

Процедура селекции, реализующая турнирный подход, была взята из библиотеки Deap без изменений.

Были написаны собственные реализации скрещивания и мутации:

1. Для скрещивания используется общая функция с некоторыми дополнениями. Каждая особь имеет 4 гена. Один из генов (расстояние) зависит от других генов. Поэтому функция скрещивания должна работать только с тремя характеристиками.

2. Мутация: Аналогично скрещиванию, используется только 3 поля. Модель робота имеет ограничения, например по максимальной длине, поэтому с некоторой заданной вероятностью каждая из характеристик может быть изменена в определенном интервале. Допускается осуществление с одной и той же особью нескольких мутаций, но с каждым разом вероятность мутации уменьшается.

Представленный ниже псевдокод дает высокоуровневое описание всего алгоритма.

**Input:**  $\alpha$  – количество поколений,  $\beta$  – количество индивидов,  $\gamma$  – количество территорий

**Output:** Лучшие параметры

**begin**

```

Генерация семейства поверхностей;
случайная генерация первого поколения индивидов;
for  $i = 0$  to  $\alpha$  do
    for  $j = 0$  to  $\beta$  do
         $distance = 0;$ 
        for  $k = 0$  to  $\gamma$  do
            запуск симуляции;
             $distance+ = cur\_distance;$ 
        end
         $avg\_distance = distance/\gamma;$ 
        высчитывание фитнес функции;
    end
    выбор лучших родителей;
    скрещивание выбранных родителей;
    мутация генов;
end

```

**end**

**Algorithm 1:** Верхнеуровневый генетический алгоритм

Было проведено два эксперимента. В первом эксперименте искались лучшие параметры робота для территории T1. Во втором эксперименте рассматривалась зависимость от разных типов ландшафтов при меньшем количестве индивидов. Различные весовые коэффициенты  $\omega_1, \omega_2$  были опробованы, Но представленные дальше результаты были получены при  $\omega_1 = 0.6, \omega_2 = 0.4$ .

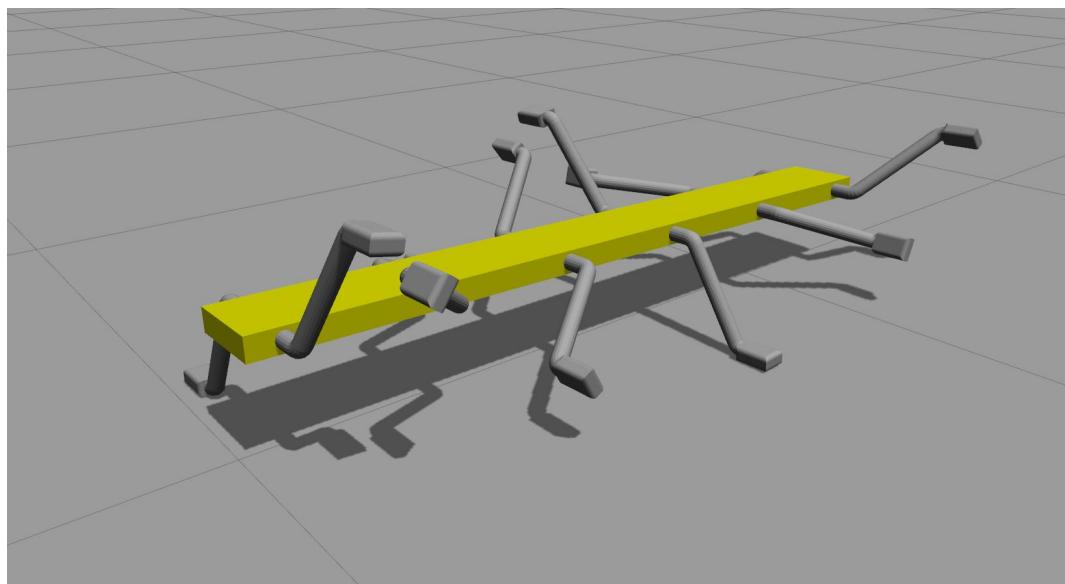


Рисунок 2.6 — Робот с результирующими результатами

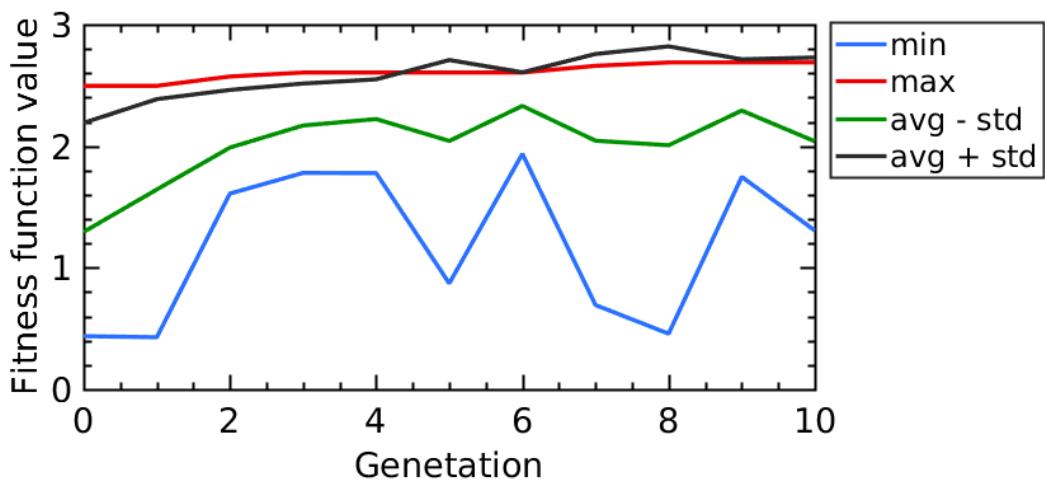


Рисунок 2.7 — Среднее значение фитнес-функции  $\pm$  std на поколение Минимальное и максимальное значения фитнес-функции на поколение

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

Первый эксперимент: каждый робот проходил 10 разных ландшафтов по 9 секунд каждую. Второй эксперимент: эксперимент 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) видна сходимость в параметрах. Ссылка на видео прохождения препятствия лучшим индивидом



Таблица 3 — Зависимость между статистикой целевой функции и типами поверхности

Территория, популяция	Параметры	Среднее	Стандартное отклонение
T1 (рис. 2.4а), 110	(6, 72)	2.38	0.34
T2 (рис. 2.4б), 55	(5, 68)	1.95	0.35
T3 (рис. 2.4в), 55	(6, 77)	2.08	0.33

Одним из основных результатов исследования, полученных при варьировании значений весовых коэффициентов  $\omega$  является зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией (рис. 2.8), которая показала наличие локального оптимума при количестве ног у робота в диапазоне от 8 до 14.

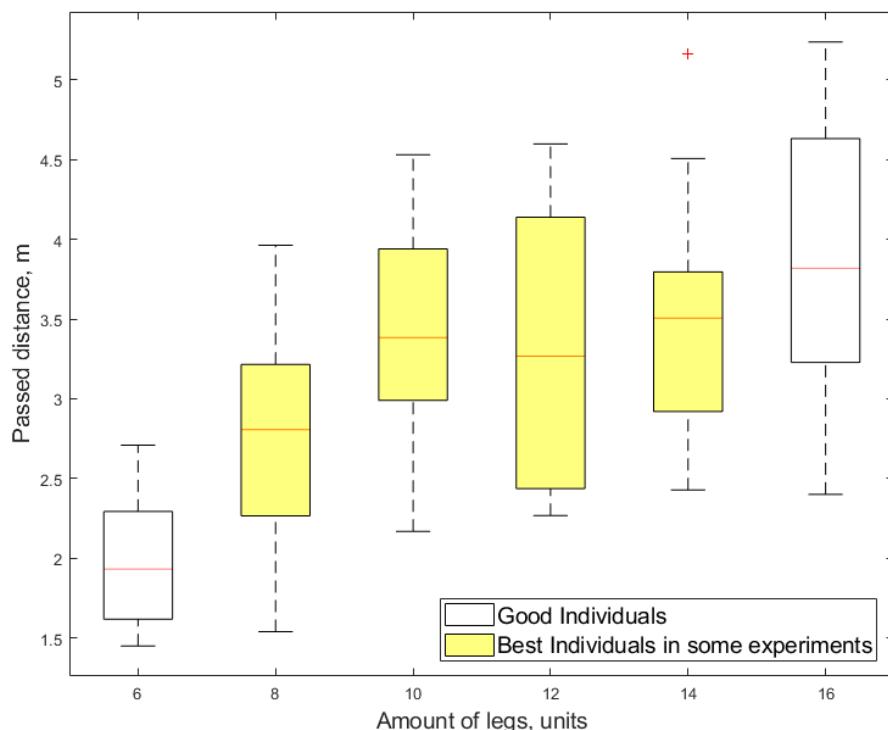


Рисунок 2.8 — Зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией

Этот факт может быть объяснён следующими соображениями. С одной стороны, слишком много ног значительно удлиняет корпус робота, что снижает его профильную проходимость за счёт того, что робот с большей вероятностью может задеть выступы при движении. С другой стороны при слишком малом количестве

ног происходит потеря статической устойчивости робота. Поскольку для гарантированного обеспечения статической устойчивости необходимо обеспечить контакт не менее, чем 4 ног с опорной поверхностью в каждый момент времени, то естественным ограничением является 8 ног у робота.

## 2.2 Задача оптимизации колебаний робота при походке

Несмотря на то, что каждая нога робота может двигаться независимо, что позволяет получать абсолютно разные походки, возможно оптимальную походку робота, которая характеризуется определённым углом между ногами робота при движении по плоскости. В качестве критериев оптимальности целесообразно выбирать такие критерии как максимальный клиренс и минимальную амплитуду колебаний системы. Клиренс это расстояние от корпуса робота, до опорной поверхности. Это позволит быстро преодолевать прямые участки с минимальным риском для оборудования, находящегося в роботе.

Задача целевой функции — максимизировать положение  $Z$  и минимизировать  $STD$ . Одновременно необходимо сделать минимальным среднеквадратичное значение ( $RMS$ ) и среднее стандартное отклонение ( $STD$ ) углов по направлением тангажа и крена. Целевая функция учитывает направление движения.

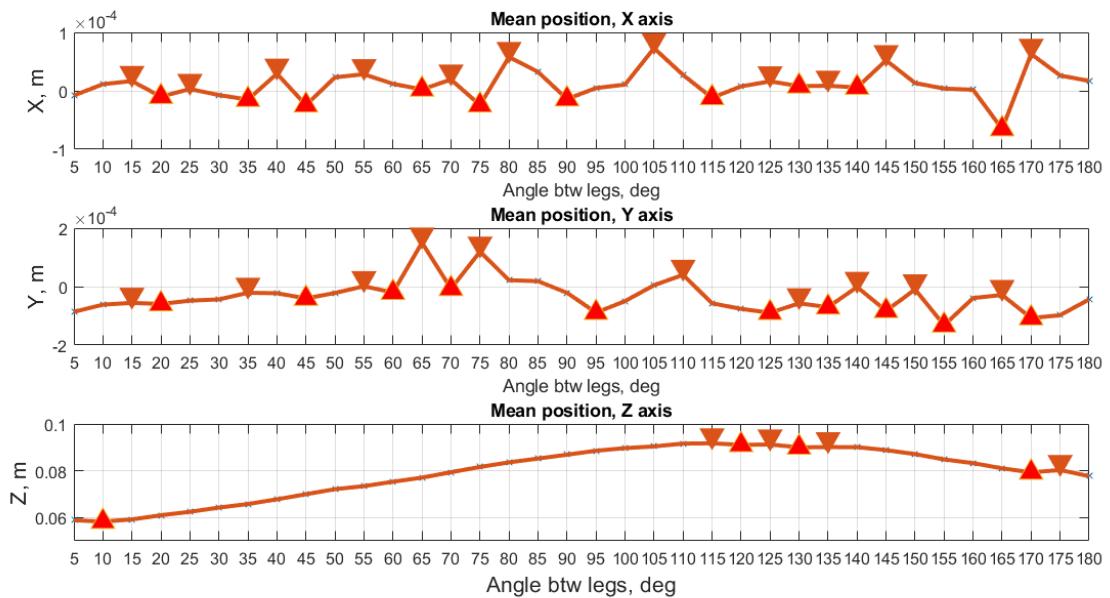
Целевая функция выглядит следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot \left( \frac{1}{\omega_{z1} Z_{rms}^i - \omega_{z2} Z_{std}^i} + (\omega_{p1} \alpha_{rms}^i + \omega_{p2} \alpha_{std}^i) + (\omega_{r1} \beta_{rms}^i + \omega_{r2} \beta_{std}^i) \right) \rightarrow \min \quad (2.14)$$

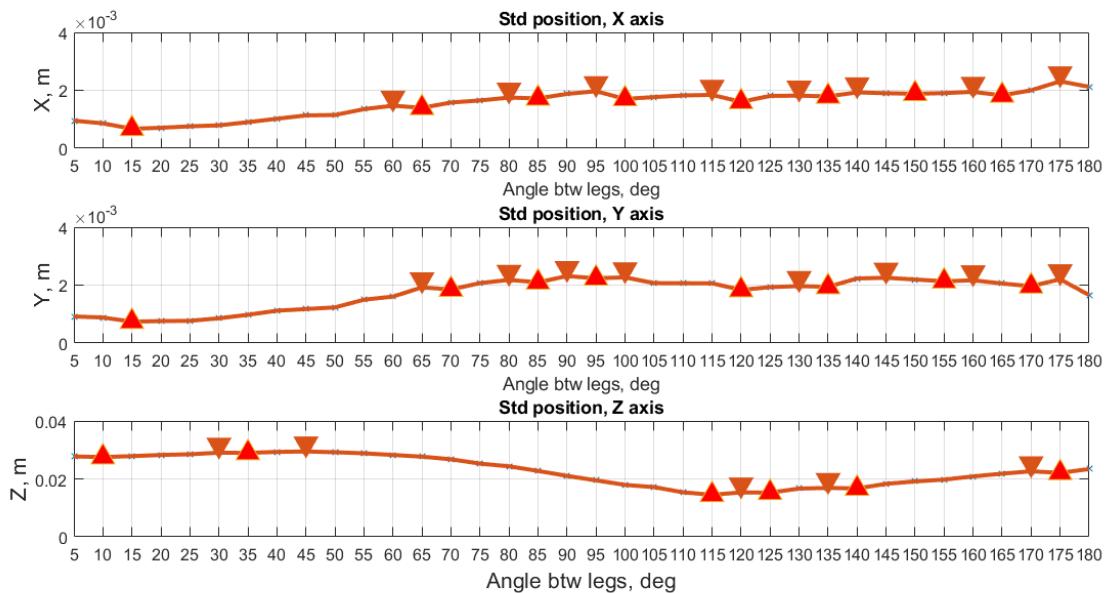
где  $i = \{1,2,3,4\}$  – индекс, который определяет направление движения: 1 — вперед, 2 — влево, 3 — вправо, 4 — вращение ;  $Z$  – координата по оси  $Z$  ;  $\alpha, \beta$  – значения ориентации по крену и тангажу ;  $\omega_i$  – весовой коэффициент для направления движения ,  $\omega_{z,roll,pitch}$  – весовые коэффициенты .

Решение задачи оптимизации проводилась с помощью метода полного перебора, так как надо было проверить  $36$  углов ·  $4$  направления ·  $100$  экспериментов для каждого направления ·  $144$  шага в каждом. То есть всего  $2073600$  вариантов.

Есть пример, который описывает два возможных движения: вперед и вбок. Ниже представлены только графики по движению вперед, так как графики связанные с движением в бок имеют примерно те же значения.



а) Средние координаты корпуса робота при движении вперед



б) STD координат корпуса робота при движении вперед

Рисунок 2.9 — Данные о положении корпуса робота для движения прямо и в бок

Среднеквадратичное значение (RMS) отличаются при движении прямо и в бок. Поэтому представлены графики обоих типов движения/

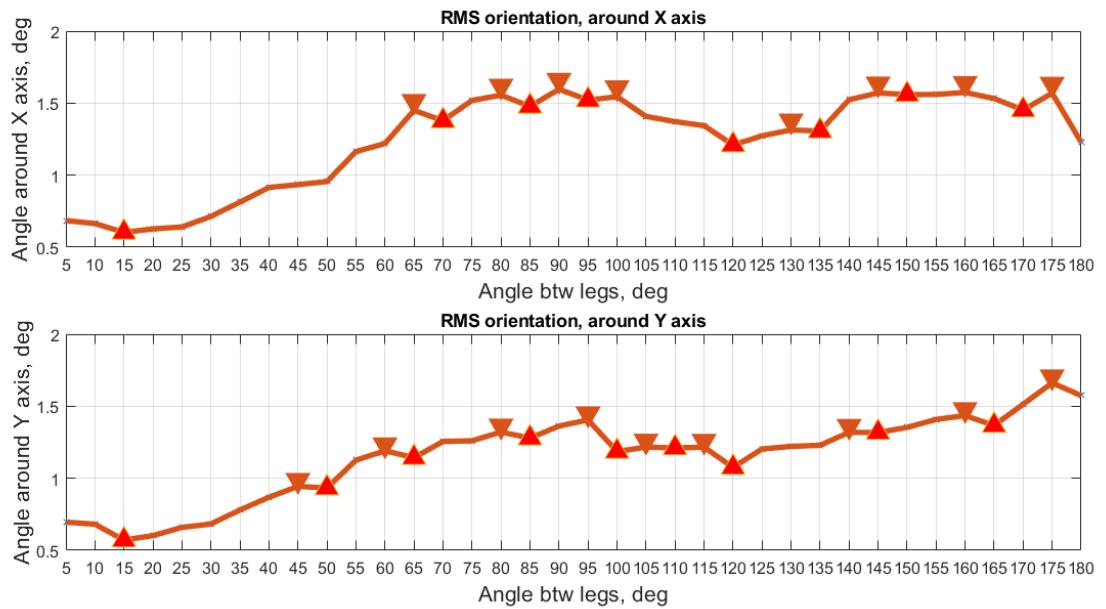


Рисунок 2.10 — RMS из данных об ориентации для типа движения вперед

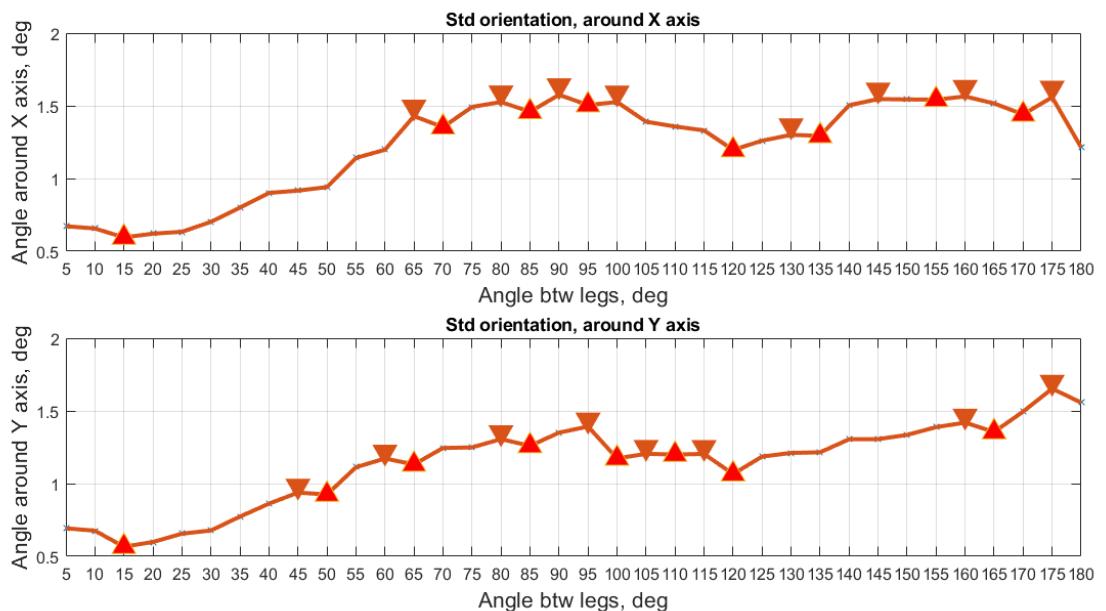
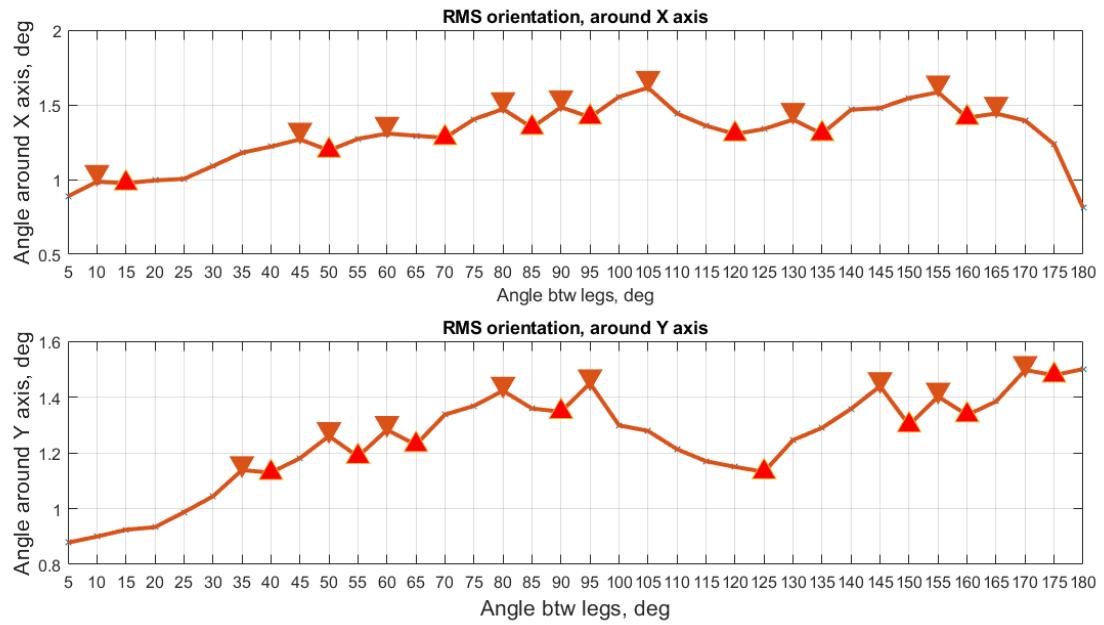
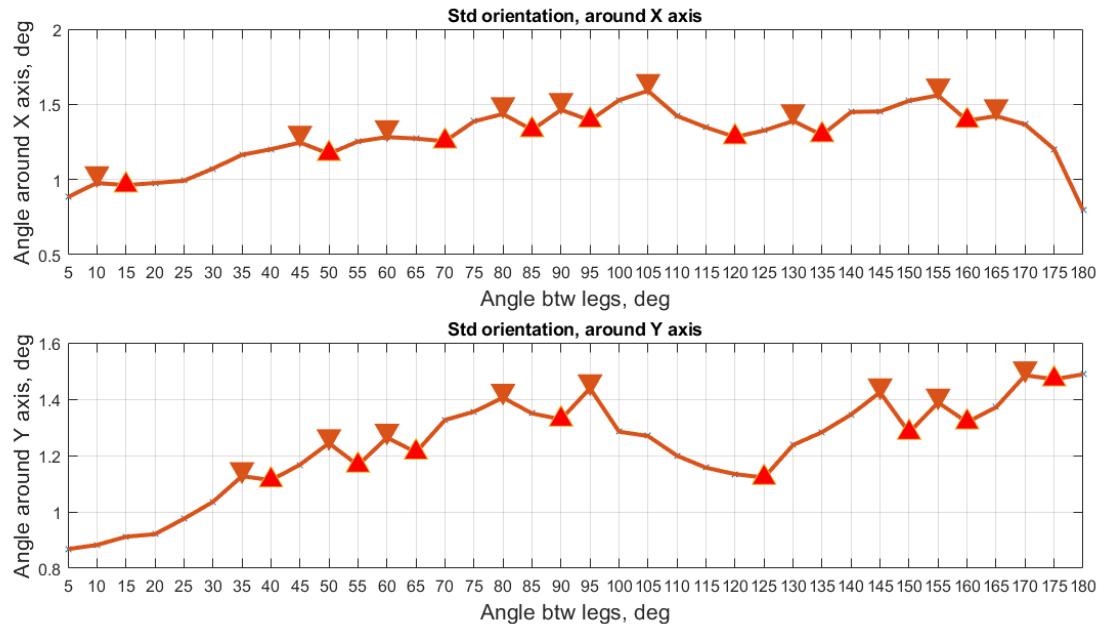


Рисунок 2.11 — STD из данных об ориентации для типа движения вперед



a) RMS из данных об ориентации для типа движения вбок



б) STD из данных об ориентации для типа движения вбок

Рисунок 2.12 — из данных об ориентации для типа движения вбок

Результатом оптимального положения угла между соседними ногами робота, когда угол между соседними педипуляторами одинаков, является 120 градусов. Оно было получено с помощью полного перебора, что гарантирует нахождение глобального оптимума. Полученный угол можно объяснить тем, что при угле 120 градусов получается периодическая функция, а статистически известно, что такие типы функции дают лучшие результаты в данных типах механизмов.

## 2.3 Оптимизация конструкции робота для прохождения узких участков

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.

Возможность двигаться во всех направлениях без смены ориентации значительно повышает проходимость робототехнической системы во многих случаях. Классическая компоновка многоногого шагающего робота с одной степенью свободы в ноге не позволяет перемещаться таким образом. Но если воспользоваться концептом, который используется в всенаправленных колесах, то шагающий робот с одной степенью свободы в ноге перемещается всенаправленно без смены ориентации.

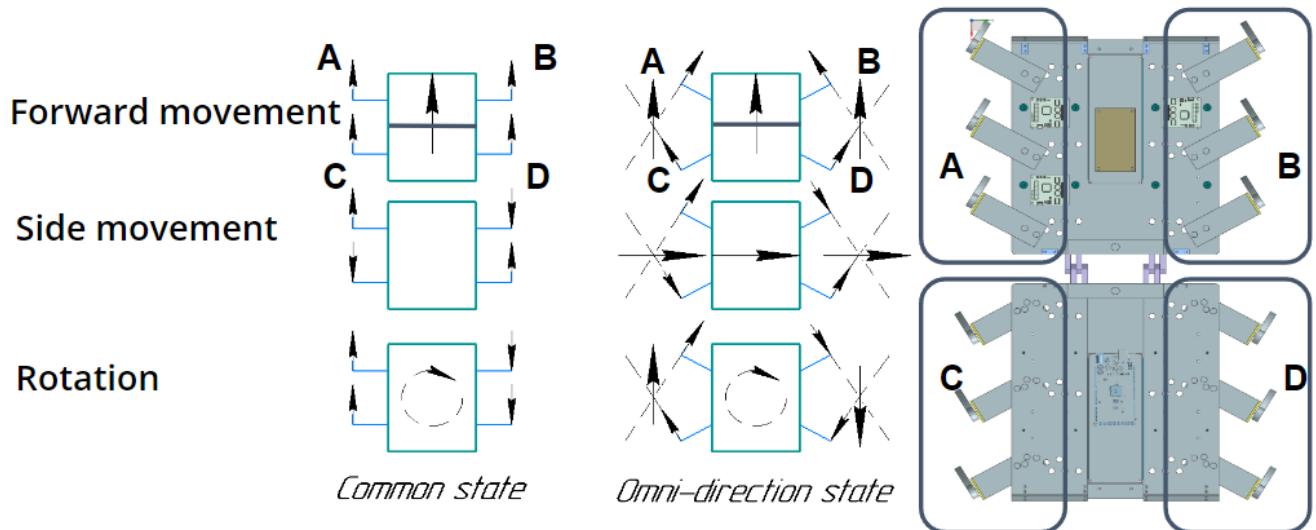


Рисунок 2.13 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоянии

На рисунке 2.13 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. 2.13. Стрелка в центре робота — суперпозиция всех отображенных на изображении сил. Если изменить угол оси привода ноги в соответствии с предлагаемой концепцией, то возможно получить значения

суперпозиции сил, представленные на рис. 2.13 в центре. То есть, чтобы переместить корпус робота направо, группы А и D должны вращать ноги в одну сторону, а группы С и В — в противоположную. Правая часть рисунка иллюстрирует расположение групп ног на исследуемом роботе.

## 2.4 Разработанные концепции робота

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. В течение исследования различных конструкций, было замечено, что высота ноги и наличие сегмента разительно влияет на проходимость конструкции.



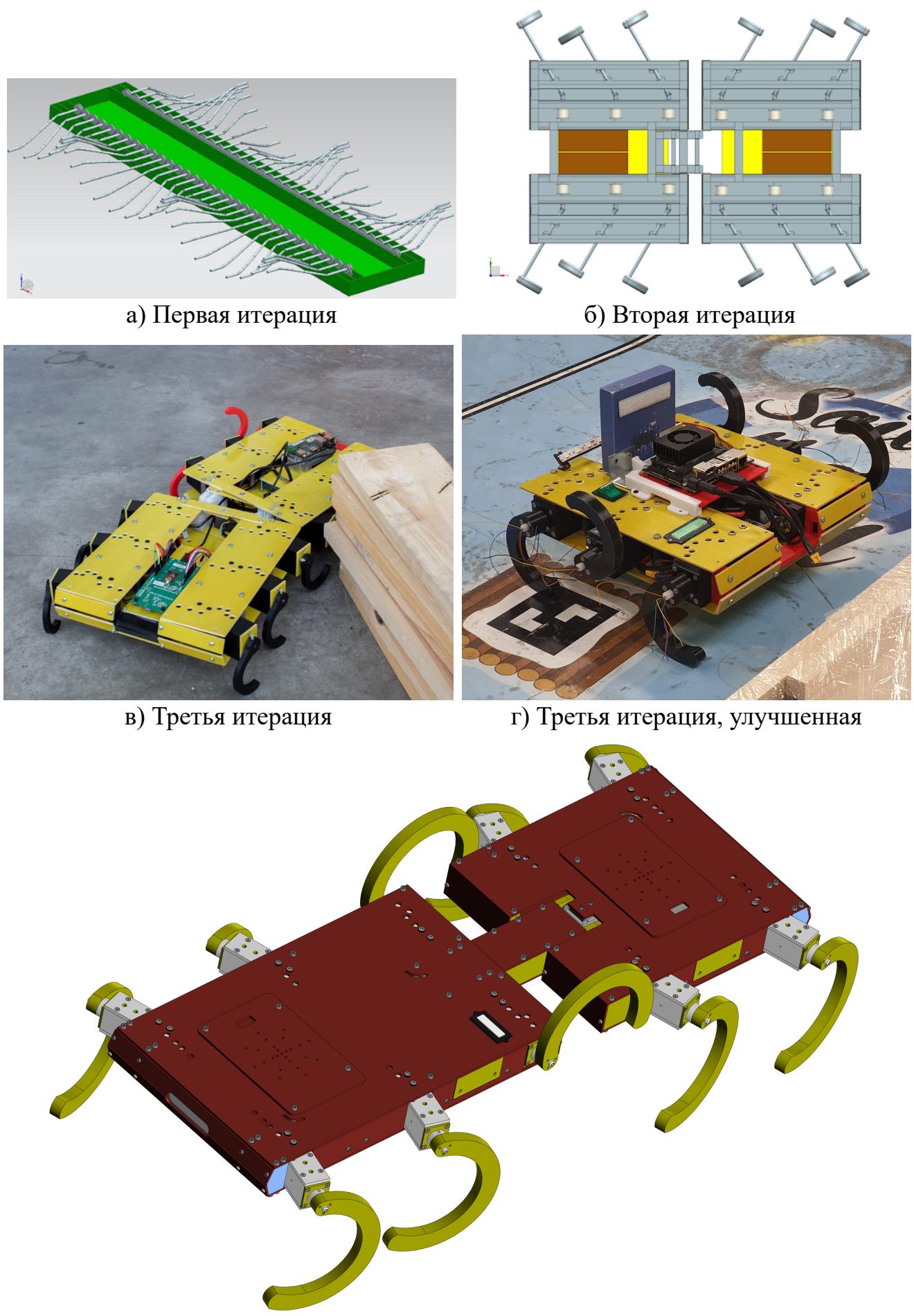


Рисунок 2.14 — Итерации робота СтриРуса

Таблица 4 — Сравнение итераций робота

Итерация	1 (рис. 2.14а)	2 (рис. 2.14б)	3 (рис. 2.14в)	3+ (рис. 2.14г)	4 (рис. 2.14д)
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 непре- рывно изменять отн. угол	Двухсте- пенной узел, соеди- няющий сегменты	Большие ноги	Гигант- ские ноги
Недостатки	Невоз- можно уста- новить сенсоры на ноги. Много по- движных частей	Слишком сложный механизм, изменяю- щий отн. угол	Мал. ноги. Избыточ- ная вторая степень свободы в соедини- тельном узле	1 сегмент. Маленькие ноги	—

Как итог, был разработан десятиногий, состоящий из двух сегментов, робот СтриРус. Количество ног было выбрано на основе результатов, полученных во время решения мультикритериальной задачи оптимизации с помощью генетического алгоритма.

Результируя вышесказанное, получив Парето решение параметрической задачи оптимизации на основе критериев проходимости и пройденного пути было выбрано решение с 10ью ногами робота. Оптимальным углом между соседними ногами робота при движении по плоскости является угол в 120 градусов. Идея

по всенаправленному движению шагающего робота без смены ориентации, основанная на концепте всенаправленного колеса нашла свое подтверждение.

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

Третья глава содержит описание этапов разработки и исследования пьезорезистивного тактильного преобразователя силы на основе материала Velostat. Тактильное ощущение является основным способом получения информации о геометрии и физических свойствах опорной поверхности по которой движется робот в условиях отсутствия видимости. Именно для шагающих аппаратов, в отличие от колёсных и гусеничных, такой способ является актуальным, поскольку ноги робота используются одновременно и как движители, и как устройства для ощупывания поверхности. В главе обосновано применения преобразователя силы на основе полимерного материала Velostat, представлены экспериментальные исследования работы преобразователя при площади нагрузки меньше размеров самого преобразователя, что имитирует условия контакта ног шагающего робота с жесткой опорной поверхностью, по результатам экспериментальных исследований показано при каких условиях характеристики преобразователя удовлетворяют требованиям к системе тактильного восприятия шагающего робота.

Среди возможных способов определения силы реакции опоры наиболее целесообразным представляется её измерение с помощью датчиков силы, расположенных непосредственно в зоне контакта ноги с опорной поверхностью. Среди доступных датчиков такого типа большинство обладают излишней чувствительностью и точностью, а также имеют очень высокую стоимость, что делает их применение неоправданным для использования в роботах, предназначенных для изучения труднодоступных мест, в которых высока вероятность потери робота. В связи с этим, предложено использовать преобразователь силы на базе материала Velostat. Первоначально Velostat был разработан как упаковочный материал, изготовленный из полимерной пленки (полиолефины), пропитанной сажей для придания ей электропроводности. Свойство изменять свое сопротивление при изгибе или давлении сделало материал популярным решением для изготовления недорогих датчиков давления [120]. Такой датчик позволяет решить проблемы классификации местности и создания карт на биомиметическом многоногом роботе StriRus. Velostat обладает вязкоупругим поведением, а также свойствами квантового туннелирования и предварительной локализации, что существенно влияет на отклик датчика. Но при исследовании разработанного преобразователя, была замечена зависимость в результатах показания преобразователя при разных пло-

щадях касаемой поверхности и рабочей области сенсора. Эту зависимость необходимо формализовать.

Система из нескольких датчиков усилия, расположенных на опорной поверхности ноги робота позволяет определить величину и точку приложения силы реакции опоры. В совокупности с показаниями датчиков тока, определяющих нагрузку на двигателях, датчиков поворота ног, определяющих конфигурацию шагающего робота, а также инерциальных датчиков, определяющих ускорения корпуса робота и, соответственно, изменение его скорости, положения и ориентации, это потенциально даёт необходимую информацию как для определения геометрической формы, так и некоторых физических свойств поверхности, по которой движется робот.

В мобильных роботах широко используются сенсорные системы, которые включают в себя инерциальные измерительные приборы (IMU), датчики тока двигателей, датчики силы, звуковые датчики, системы технического зрения и другие оптические сенсоры [76; 90; 110]. Однако, для решения указанных задач в условиях плохой видимости, оптические системы становятся неработоспособны, и на первый план выходит использование датчиков силы. В обнаружении формы поверхности. Существует класс роботов (RHEX, Strirus), которые обладают такими параметрами.

Как было отмечено в предыдущих разделах, наиболее перспективным является применение разрабатываемого шагающего робота в пещерах, поверхность которой имеет неровности и 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, возможно решить множество задач, таких как идентификация местности [66; 73; 83; 123], управление походкой на основе рельефа местности [27; 107], анализ устойчивости и SLAM [85; 90; 95]. Решение этих задач позволяет значительно повысить проходимость и возможности исследования мобильных роботов.

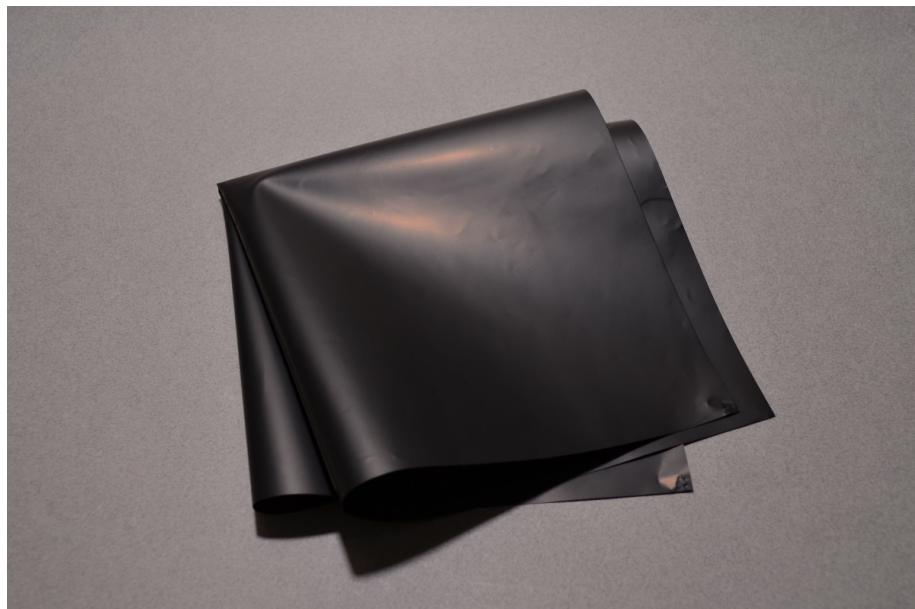
Существует несколько типов датчиков, которые могут измерять контактные силы и распределение давления. Это могут быть оптические, пьезорезистивные, пьезоэлектрические, магнитные, емкостные, на основе оптических волокон [64]. Промышленные датчики момента силы (F/T) широко распространены на гуманоидах (Atlas, Fedor) или четвероногих (Spot, AnyMal). Однако они слишком велики для небольших роботов, таких как RHEX, WHEGS или StriRus [0; 40; 98]. Та же проблема применима к оптическим и магнитным датчикам. Емкостные датчики требуют высокой точности изготовления. В свою очередь, пьезорезистивные датчики имеют маленькие размеры, могут быть размещены практически на любой поверхности, имеют низкую стоимость и не требовательны к условиям эксплуатации.

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 [107]. 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. Было решено использовать Velostat (Linqstat)[120] в качестве промежуточного слоя для резистивного датчика.

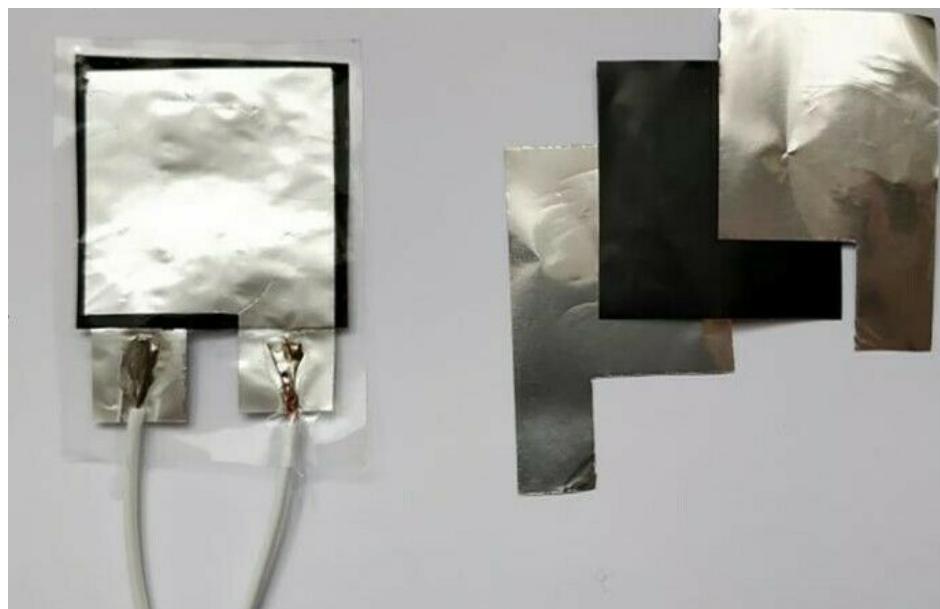
Velostat — это вязкоупругое проводящее волокно. Вязкие материалы, такие как медь, при сопротивлении сдвигаются и натягиваются линейно во время напряжения. Упругие материалы тянутся во время растягивания и быстро возвращаются в обратное состояние, когда уходит напряжение. проявляются свойства обоих типов, что, по сути, приводит к постепенному изменению напряжения в материале в зависимости от времени. Это резко влияет на отклик датчика. Вязкоупругое поведение материала является высоко нелинейным, что влияет на получаемые данные с сенсора.

На основе данного материала был разработан и изготовлен пьезорезистивный датчик, где материал Velostat (рис. 3.1а) является промежуточным слоем для датчика (рис. 3.1б).

Для использования такого датчика необходимо оценить его поведение. Например, выяснено, что если приложить одинаковую точечную силу в разных точках датчика, результат измерений будет значительно отличаться. Чтобы понять, как с этим работать, нужно сформулировать и смоделировать сценарии использования.



а) Материал Velostat



б) Простейший преобразователь силы на основе Velostat

Рисунок 3.1 — Примеры использования Velostat

При исследовании преобразователя силы на основе Velostat, было замечено, что площадь нажатия влияет на показания преобразователя. Поэтому актуальна задача изучения характеристик преобразователя , когда площадь касания меньше, чем размер сенсора.

### 3.1 Физическая реализация преобразователя силы на основе Velostat

Датчик состоит из двух медных оболочек, разделенных слоем Velostat. Давление на датчик приводит к изменению его сопротивления: чем выше давление, тем ниже сопротивление. Измеренное сопротивление Velostat образует делитель напряжения с постоянным резистором R1...R8 (рис. 3.2).

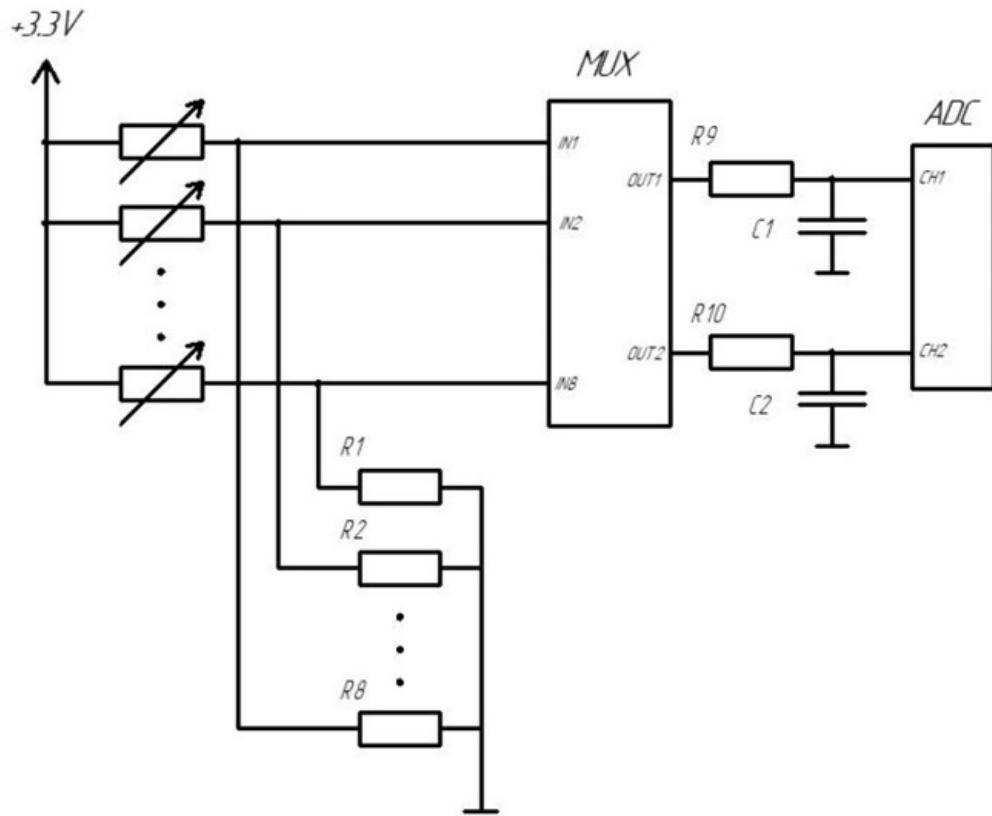


Рисунок 3.2 — Электрическая схема преобразователя силы

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.

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. Как видно из графика, сопротивление в рабочем диапазоне (5...6 кг) уменьшается

незначительно. Для проведения измерений сопротивления с достаточной точностью номинал резисторов R1...R8 подбирается таким образом, чтобы обеспечить наклон зависимости напряжения на выходе делителя от сопротивления датчика в интересующем диапазоне.

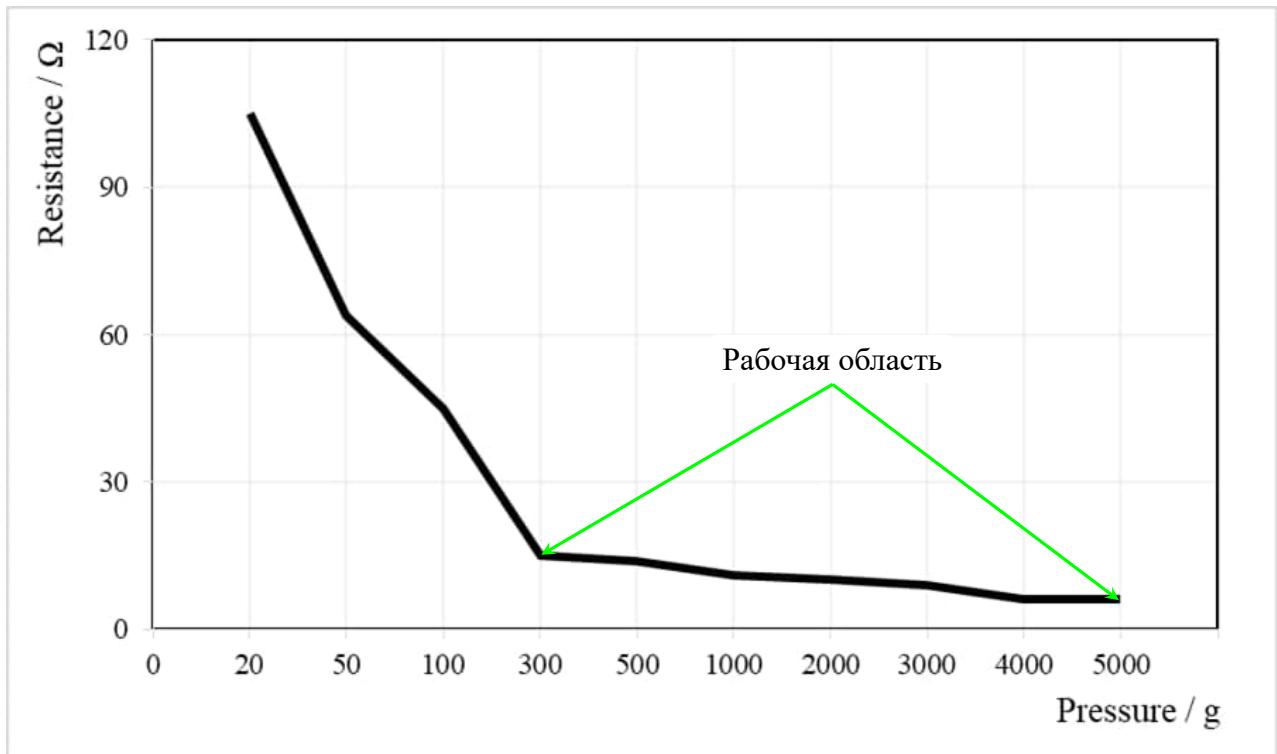


Рисунок 3.3 — График зависимости прикладываемого веса от сопротивления

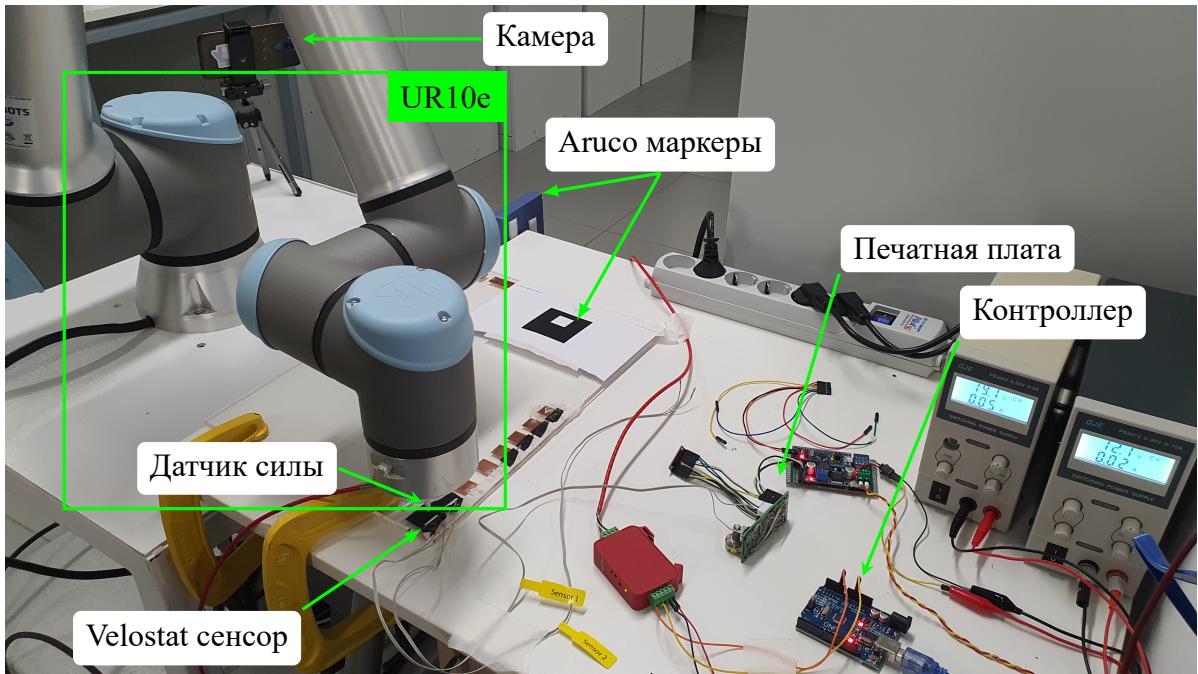
### 3.2 Разработка экспериментального стенда

Исследования преобразователя Velostat, для случаев которых площадь нагрузки меньше, чем размер преобразователя, были проведены с помощью разработанного для этой цели исследовательского стенда. Основные требования к стенду включали в себя: 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 бли-

ности от экспериментатора. Разработанный стенд, представлен на рисунке 3.4а.

Ссылка на видео работы стенда



а) Общий вид экспериментального стенда

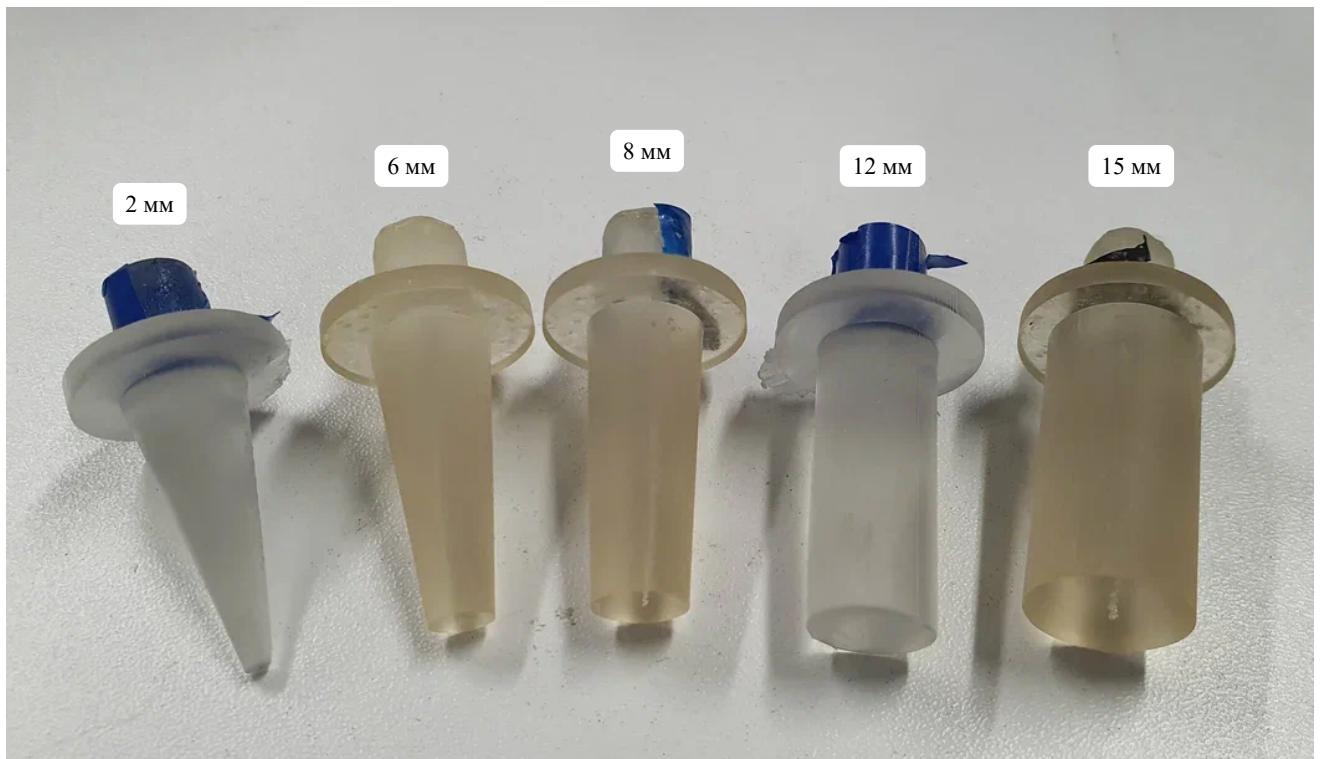


б) Способ нивелировать ошибку по углу с помощью Aruco маркеров

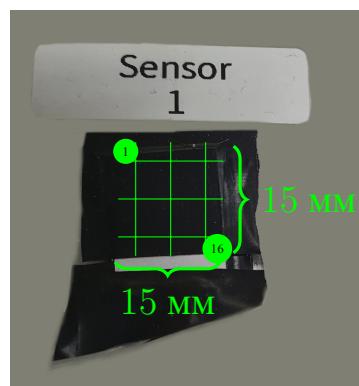
Рисунок 3.4 — Разработанный экспериментальный стенд

Для касания только части объекта исследования были разработаны различные насадки. Представленные размеры (рис. 3.5а) были выбраны из-за размеров преобразователя. Ожидается, что минимальный размер пятна контакта движителя с жёсткой опорной поверхностью будет определяться податливостью материала

самого движителя и составит порядка 2 мм. При контакте с более податливым грунтом площадь пятна контакта может быть намного больше, поэтому максимальный размер насадки ограничен размерами самого датчика.



а) Насадка для нажатия объекта 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 N.

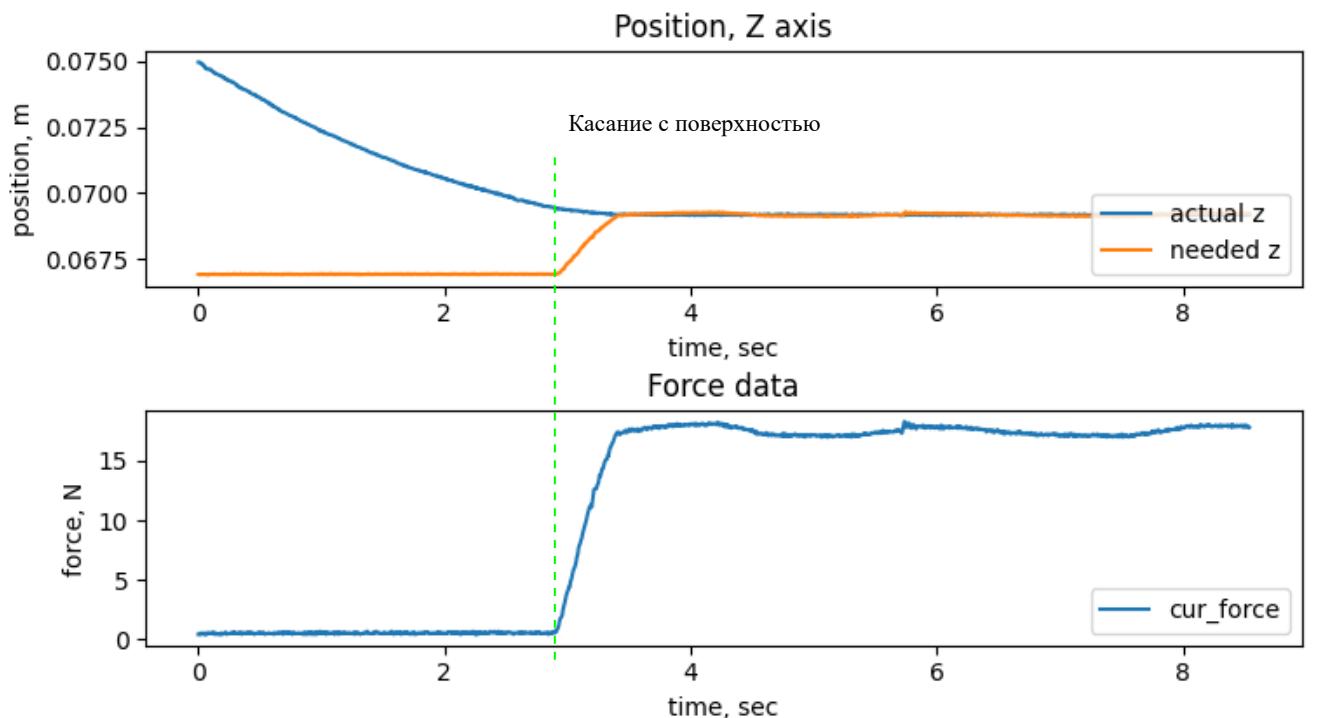


Рисунок 3.6 — Графики зависимости силы и позиции по  $z$  от времени во время эксперимента по исследованию Velostat

### 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;

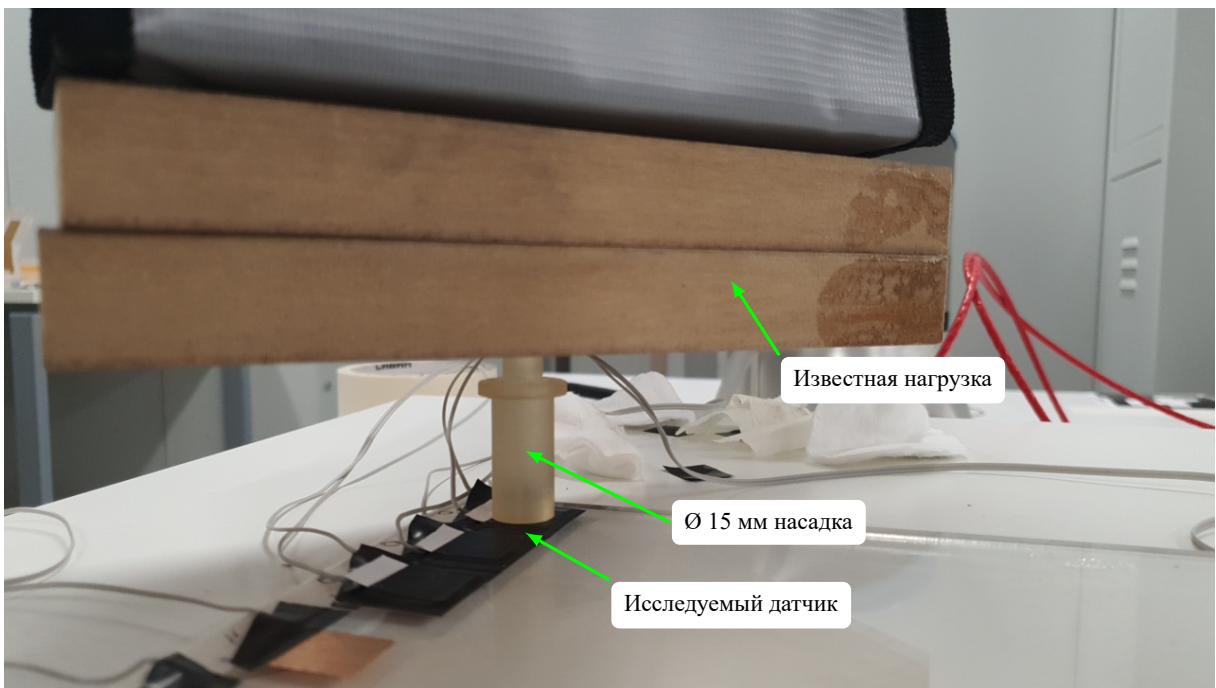
2. **Динамический эксперимент.** Цель — определить влияние показаний сенсора в зависимости от положения площадки контакта. Для этого преобразователь представлен в виде матрицы  $4 \times 4$ . Размер преобразователя в эксперименте 15 на 15 мм. Манипулятор нажимает на преобразователь с одинаковым давлением на протяжении всех экспериментов в различные позиции на преобразователе, используя пять различных насадок (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 приложении на сенсор постоянной силы 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 устойчивый нелинейный метод наименьших квадратов. Результат представлен ниже (рис. 3.7).



caption Экспериментальная установка для статического эксперимента

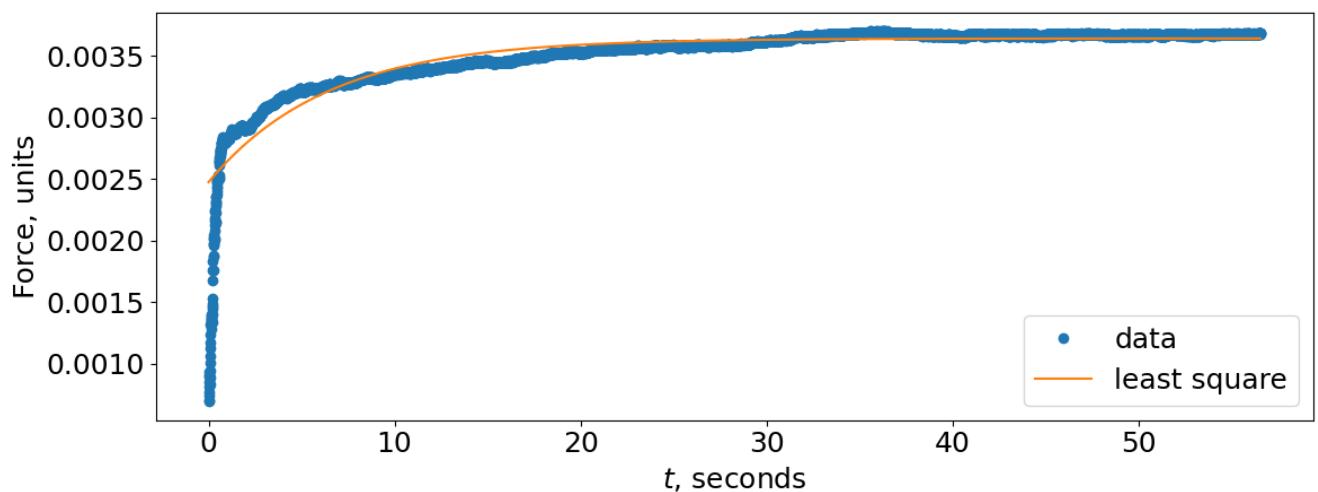


Рисунок 3.7 — Результаты статического эксперимента

Ниже (рис. 3.9) представлены некоторые результаты распределения ошибок по площади сенсора при взаимодействии с насадками разных размеров. Ошибки определялись как нормализованная разница между показаниями калиброванного сенсора силы Futek и исследуемого преобразователя на базе Velostat. На рисунке 3.9а показаны ошибки для насадки диаметром 2 мм, а на рисунке 3.9б — для насадки диаметром 8 мм.

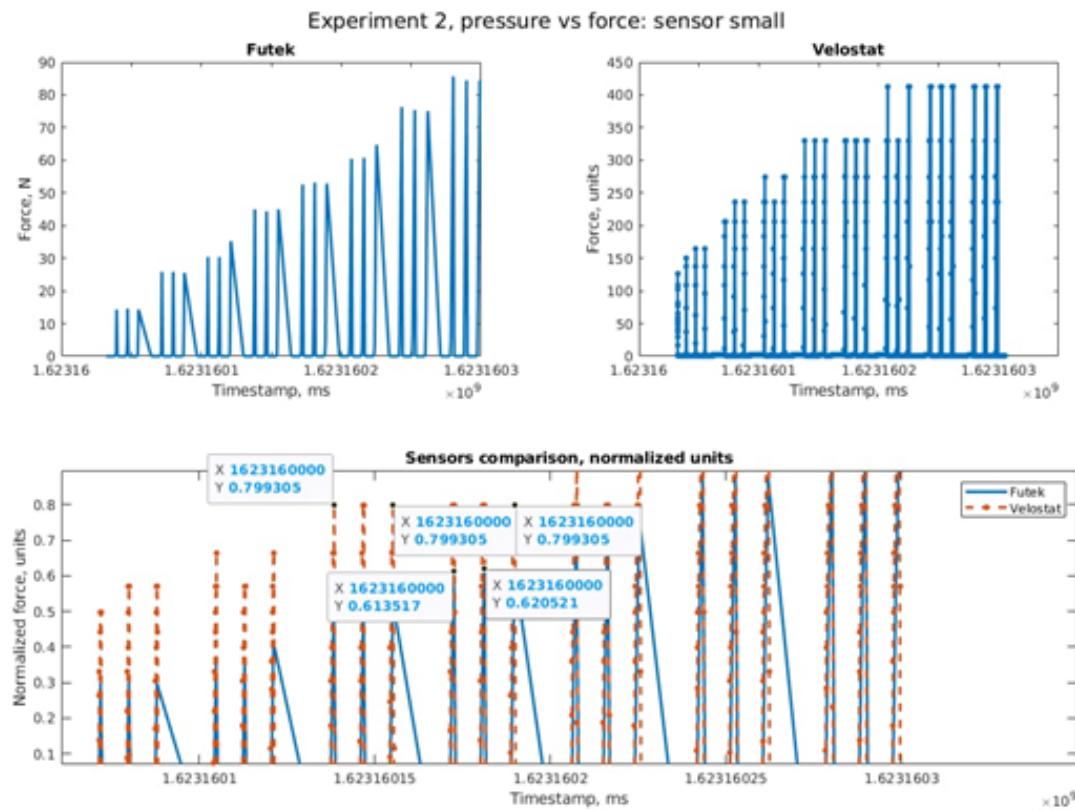
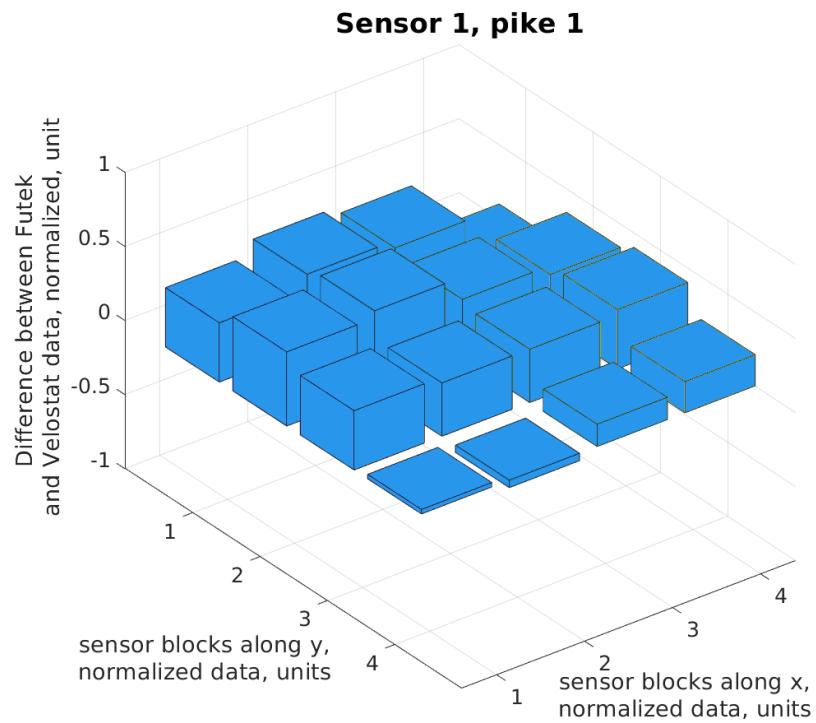
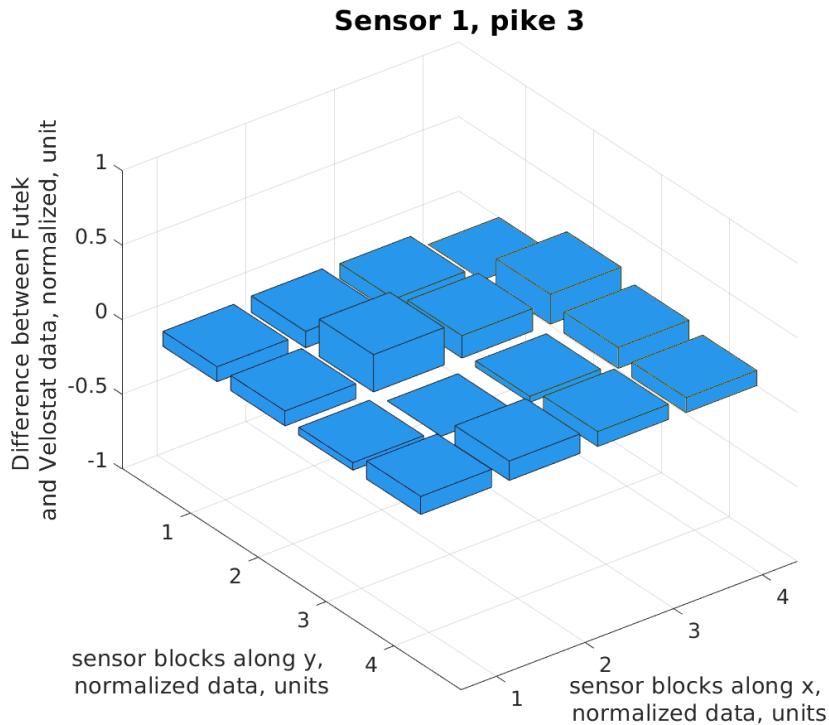


Рисунок 3.8 — Проверка чувствительности датчика. Слева - идеальные данные, справа - результат, полученный с помощью созданного датчика.

Можно заметить, что в 3.9б максимальная разница нормированных показаний между Futek и Velostat — 19% единиц. В остальных ячейках разница значений не превышает 10%. Такая же тенденция продолжается как и при увеличении размера насадки, так и на других сенсорах.



a) диаметр насадки равный 2 мм



б) Диаметр насадки равный 8 мм

Рисунок 3.9 — Динамический эксперимент

Результатом данной главы является описание разработки пьезорезистивного датчика на основе Velostat. Описана и обоснована экспериментальная установка для определения силы нажатия на часть сенсора. Для экспериментальной установки была разработана система управления, а также методика работы.

Были успешно проведены два эксперимента, целью первого являлось определение коэффициентов для математической модели преобразователя. А для второго — определить влияние показаний сенсора в зависимости от положения площадки контакта.

По результатам исследований показано, что характеристики преобразователя удовлетворяют требованиям к системе тактильного восприятия шагающего робота по точности и отзывчивости, когда ожидаемый размер площади контакта превышает 25 процентов площади преобразователя.

## Глава 4. Разработка метода тактильного очуствления

Четвертая глава раскрывает детали определения профиля опорной поверхности, на основе информации о точках её касания ногами робота и внутренних датчиков, характеризующих механическое состояние аппарата. Вторая часть главы показывает определение физико-математических свойств опорной поверхности: жесткости, вязкости и пластичности, и выделение на их основе классов поверхностей на основе информации с датчиков силы, установленных на ногах и внутренних датчиков робота.

### 4.1 Кинематическая схема робота для определения профиля опорной поверхности

Для реализации блока «построение модели поверхности», необходимы входные данные, которые были описаны в главе Разработка и исследование преобразователя силы на основе Velostat. Для определения геометрических свойств поверхности необходимо получить облако точек касаний опорных поверхностей. То есть мы должны знать трансформацию систем координат от глобальной (к примеру начало движения робота), до конкретного сенсора на ноге. Это возможно сделать, решив задачу кинематики и локализации робота.

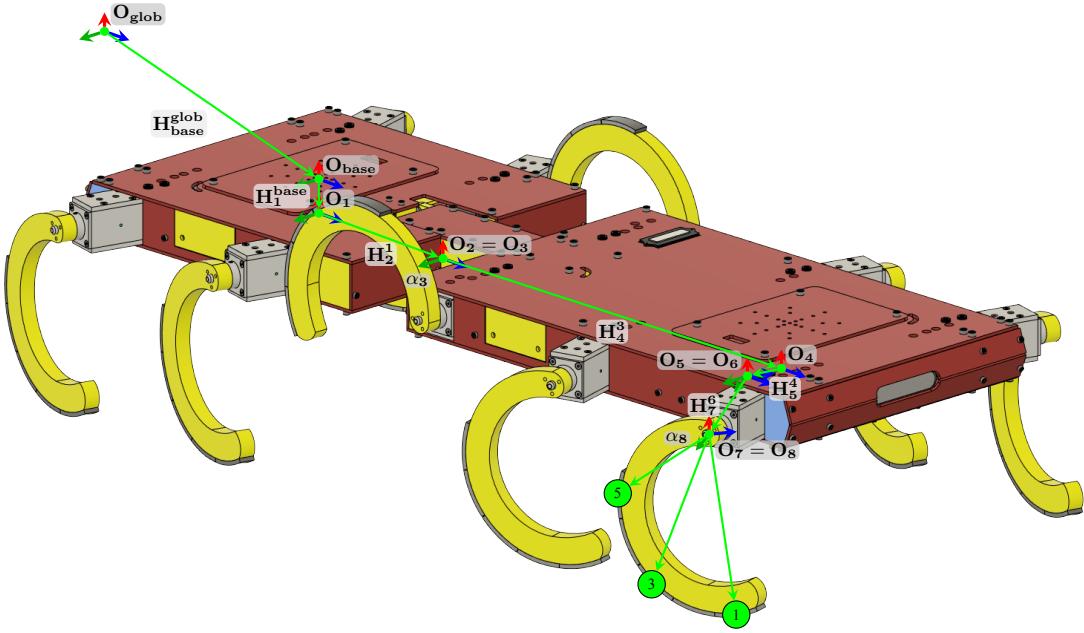


Рисунок 4.1 — Кинематическая схема для определения точки касания опорной поверхности роботом

$$H_{leg}^{glob} = H(x_{glob}, y_{glob}, z_{glob}, \alpha_{glob}, \beta_{glob}, \gamma_{glob}) T_z(l_1) \\ T_x(l_2) R_y(\alpha_3) T_x(l_4) T_y(l_5) R_z(-15^\circ) T_y(l_7) R_y(\alpha_8) \quad (4.1)$$

Где каждая матрица представлены в виде однородной матрицы преобразования  
 $H = \begin{bmatrix} R & T \\ 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ 0 & 1 \\ 1 \times 3 & 1 \times 1 \end{bmatrix}$ , где  $R_i$  — матрица поворота, относительно одной из осей,  $T_i$  — вектор сдвига.

Ниже представлены типы однородных матриц, которые могут быть встречены далее в высокоуровневых уравнениях.  $H$  — означает, что матрица содержит в себе одновременно и вращение и перемещение.  $T_i$  — подматрица поворота является единичной матрицей, а векторе сдвига присутствует только один компонент под осью координат  $i$ , остальные значения равны 0. При обозначении  $R_i$  — вектор сдвига равен нулю, а матрица поворота представляет поворот против часовой стрелки вокруг представленной оси вращения

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Таким образом, мы получаем матрицу, позволяющую получать координаты педипуляторов, относительно абсолютной системы координат. Матрица перехода учитывает подвижность самого педипулятора, а так же относительное изменение позиций сегментов.

## 4.2 Картографирование с помощью ощупывания поверхности

Определение геометрической модели поверхности позволяет оператору понимать примерные габариты пещеры, что позволит подготовить более специализированных роботов для решения исследовательских или поисковых задач.

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, можно предположить, что поверхность, полученная как выпуклая оболочка, на основе точек контакта ног с поверхностью, является плоскостью.

Было выдвинуто ограничение, что робот движется по поверхности, у которой каждому набору координат  $x, y$  соответствует одно и только одно значение координаты  $z$ . Что позволяет применять следующее уравнение  $z = f(x, y)$ . Обратная функция не действительна.

Для создания геометрической модели поверхности был разработан алгоритм, описанный далее. 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. 4.2) (вогнутая оболочка (рис. 4.6)). На ее основе получается необходимое плотное облако точек (рис. 4.4в).

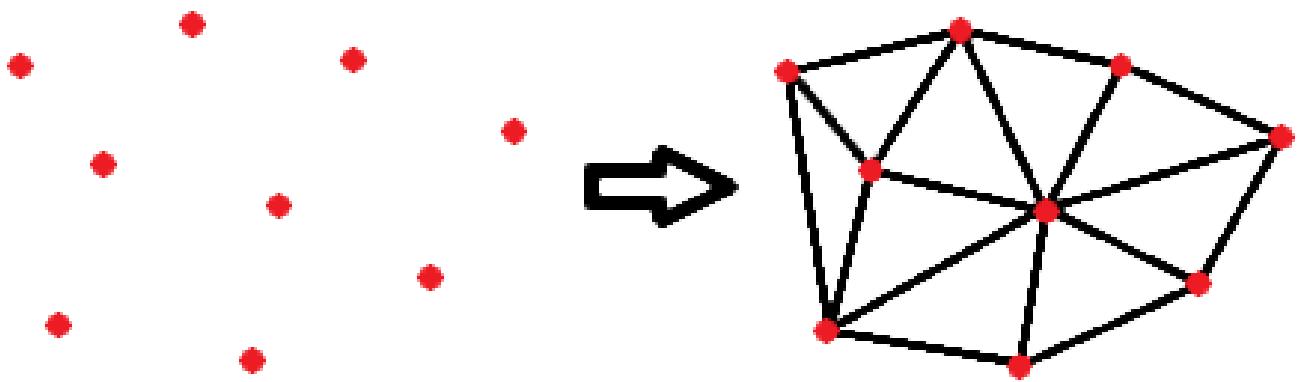
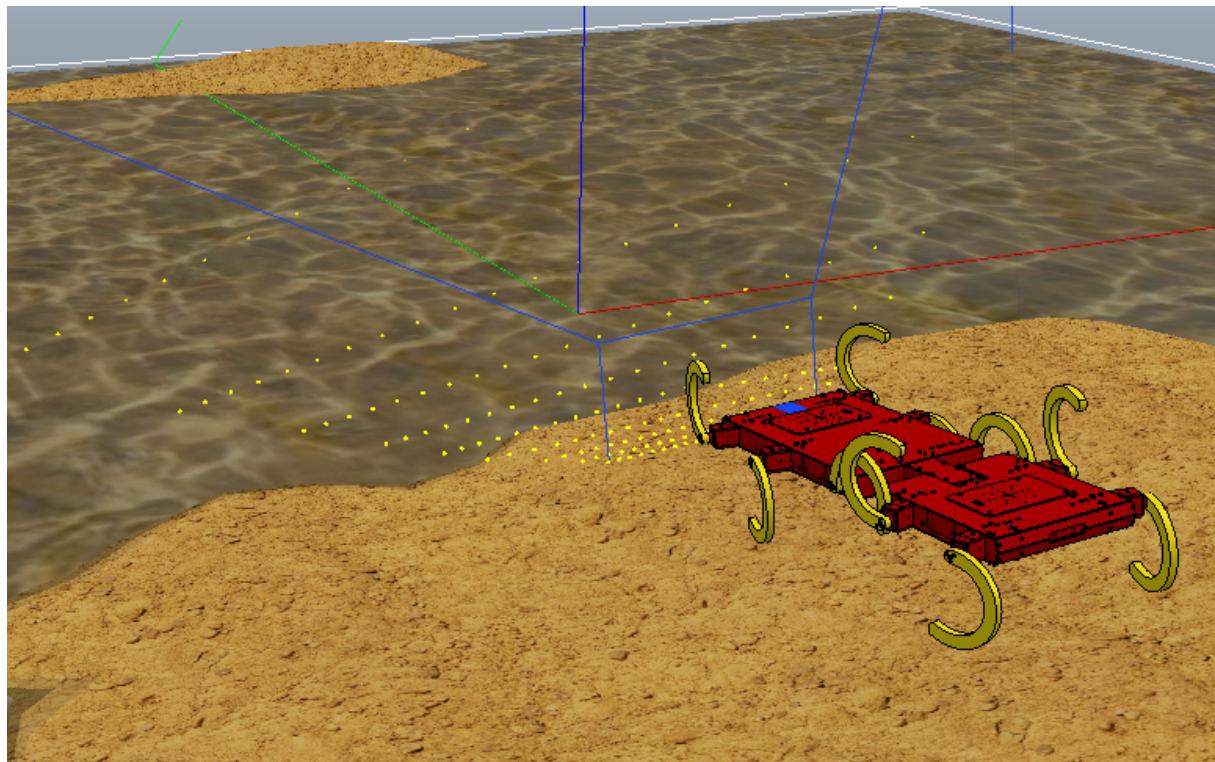


Рисунок 4.2 — 2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка)

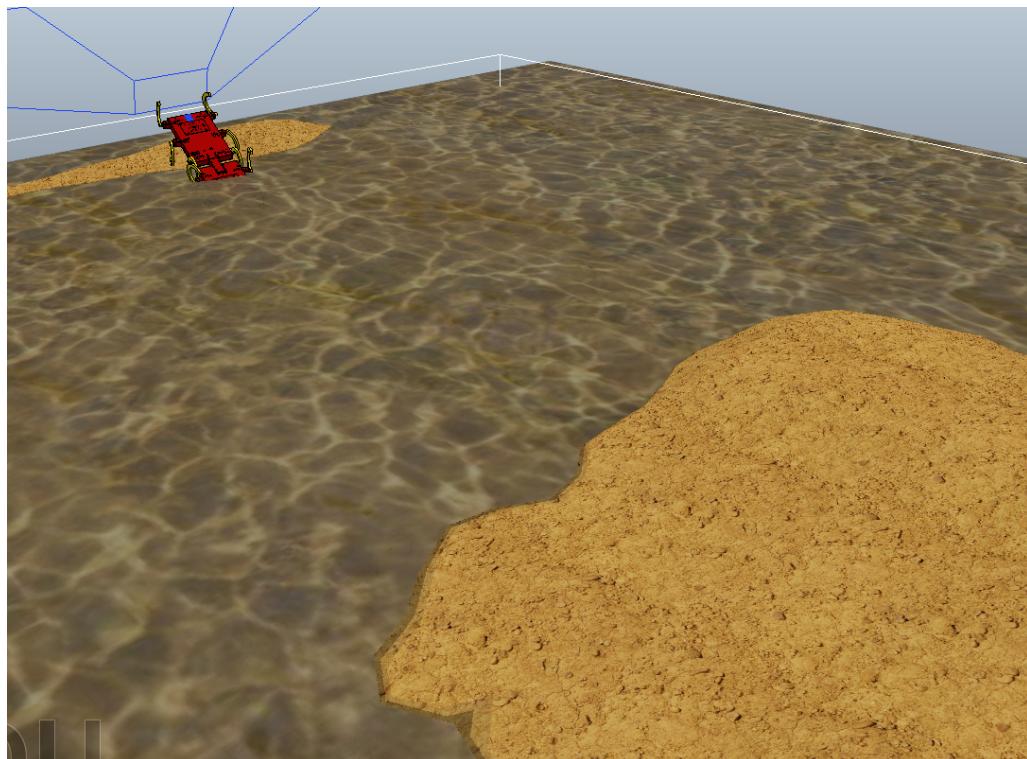
Реализованный алгоритм проверялся, как в симуляции (Рис. 2, 4.3), так и на реальном роботе (рис. 4.8). Ссылка на видео представлена рядом



Симуляция проводилась в CoppeliaSim, по причине того, симулятор отличного подходит для симуляции физики трения, что является ключевой частью корректной работы шагающих цикловых роботов. В симуляции использовался робот, состоящий из пяти пар ног и двух сегментов. Поверхность генерировалась случайным образом.



а) Начало движения



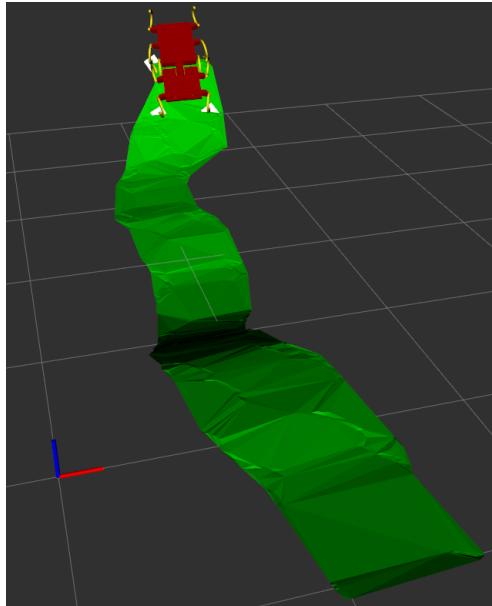
б) Конец движения

Рисунок 4.3 — Эксперимент в симуляторе

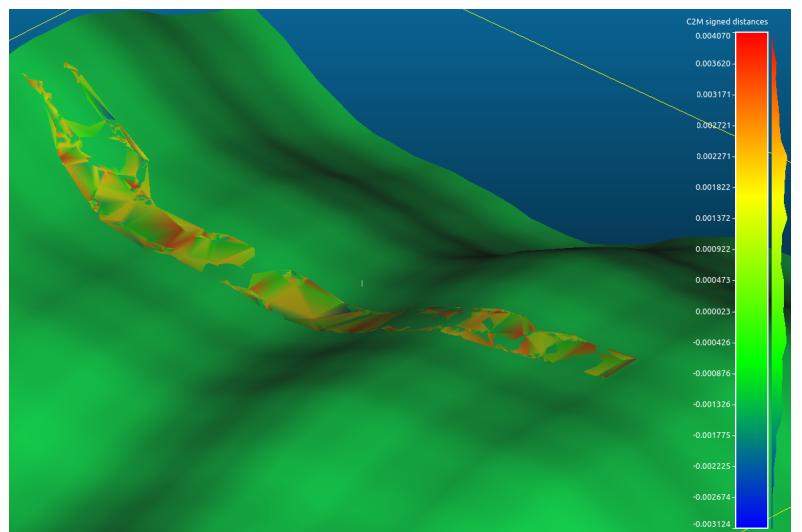
Ниже представлены полученные результаты (рис. 4.4). Для оценки точности полученных данных использовались метрики С2С (4.2) и С2М (рис. 4.7). Они основаны на метрике Хаусдорфа.

$$d_H(X, Y) = \sup_{m \in M} \{ |\text{dist}_X(m) - \text{dist}_Y(m)| \} \quad (4.2)$$

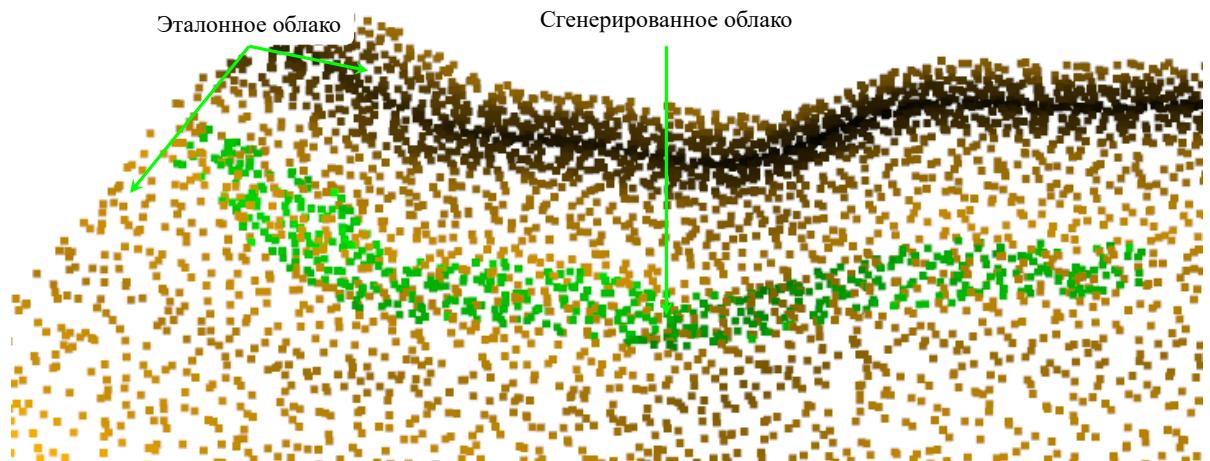
Где  $X, Y$  – непустые подмножества метрического пространства  $M$ ;  $\text{dist}_X : M \rightarrow \mathbb{R}$  – обозначает функцию расстояния до множества  $X$ .



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

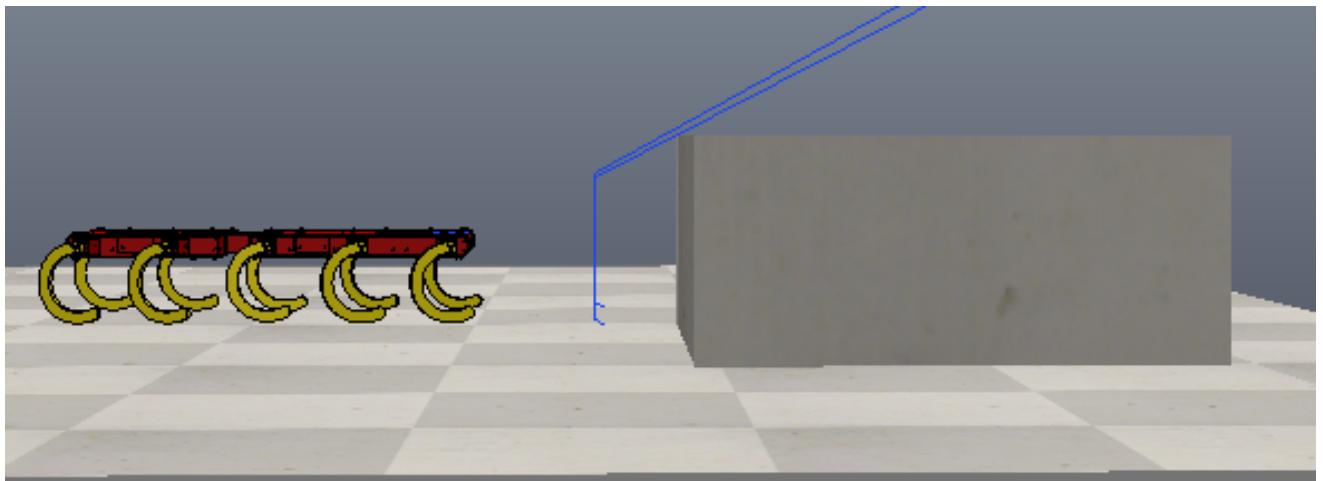


б) Наложенные полигональные сетки

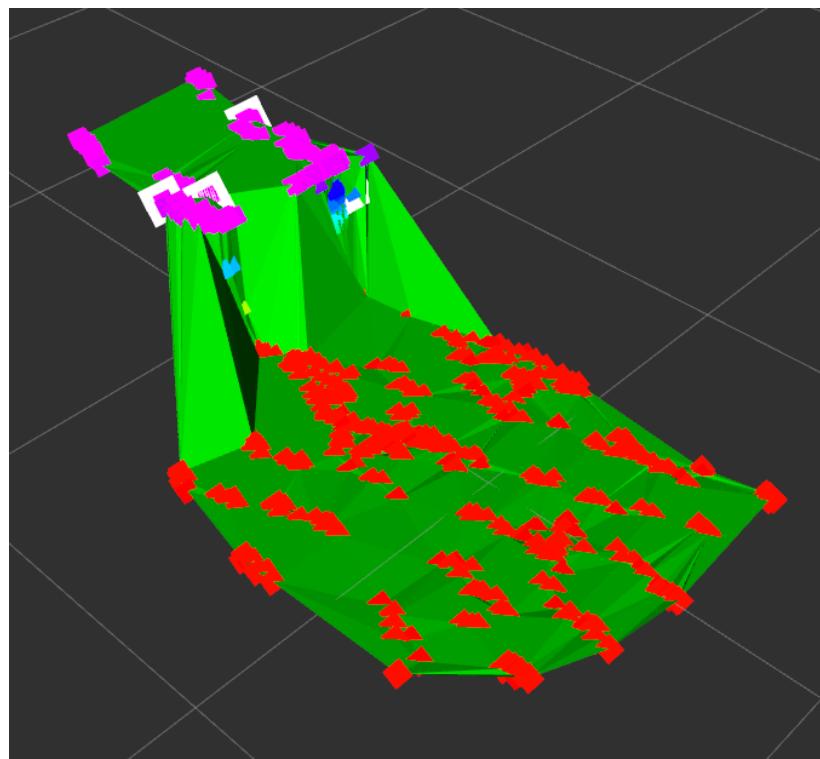


в) Наложенные облака точек

Рисунок 4.4 — Результат эксперимента



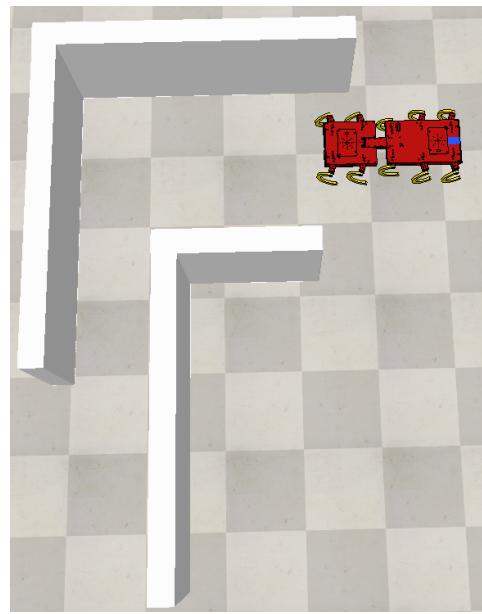
а) Результат эксперимента по построению карты постамента, симулятор



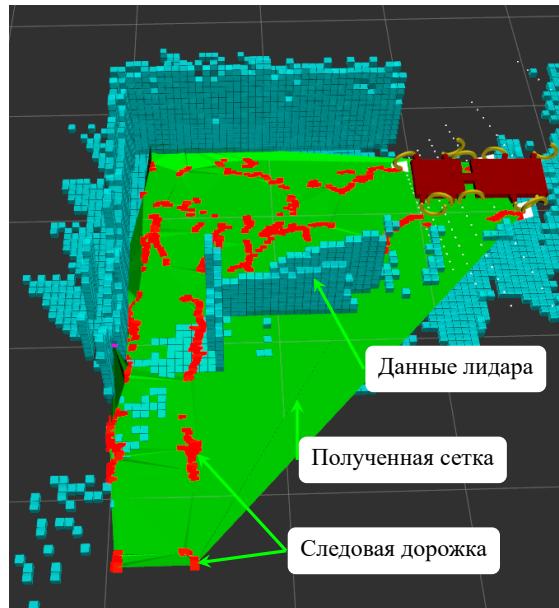
б) Результат эксперимента по построению карты постамента, Rviz, полигональная сетка

Рисунок 4.5 — Результат эксперимента по построению карты постамента

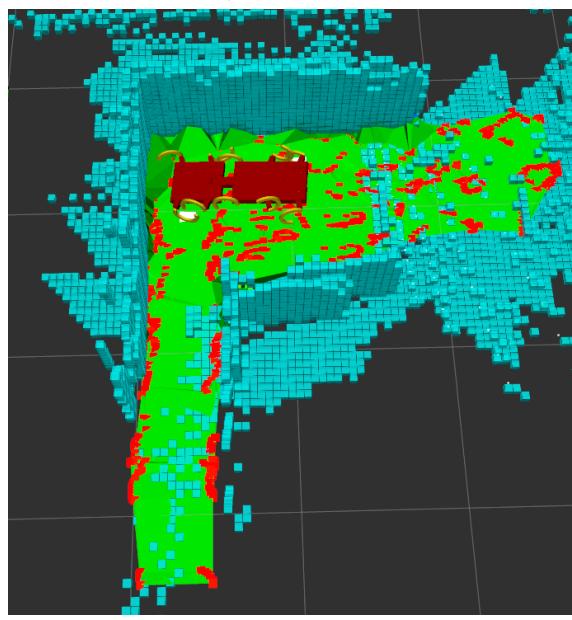
На рисунке 4.6 проиллюстрирована важность модификации триангуляции Делоне. Как можно заметить (рис. 4.6б) алгоритм построил карту местности неверно, расположив пройденную территорию там, где робот не перемещался и находится стена. При использовании вогнутой оболочки (рис. 4.6в) данная проблема не наблюдается.



а) Пример поля

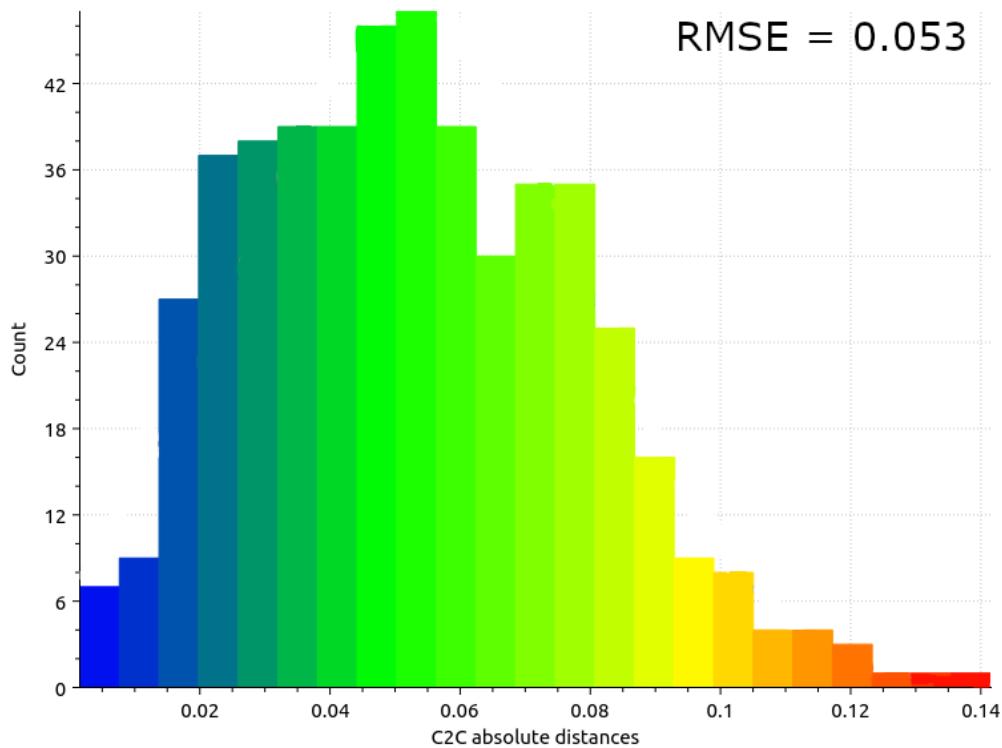


б) Выпуклая оболочка

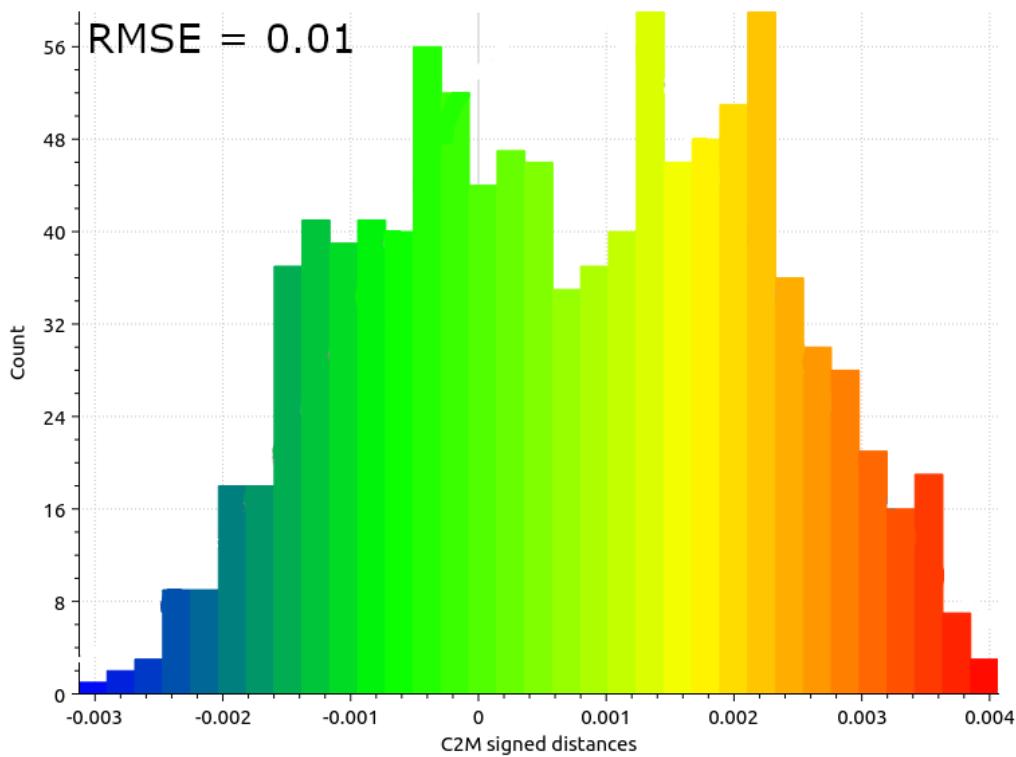


в) Вогнутая оболочка

Рисунок 4.6 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне

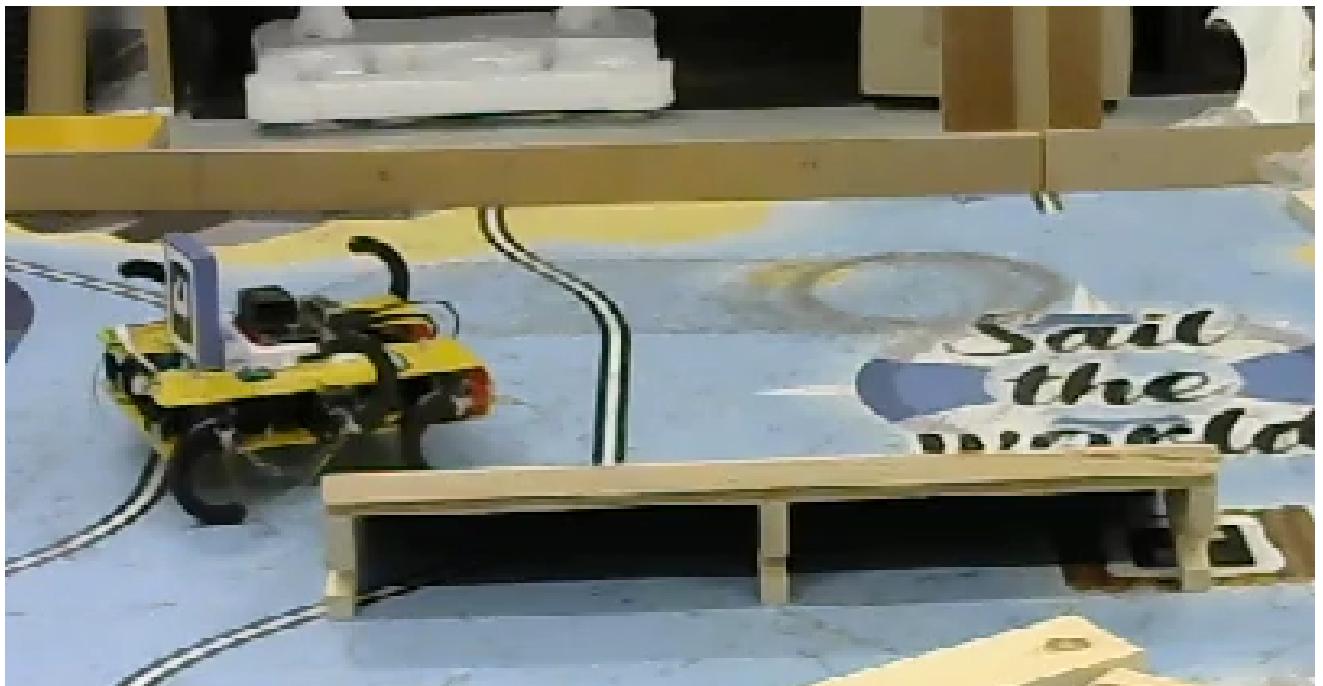


а) Метрика С2С: гистограмма ошибок (абсолютное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки)

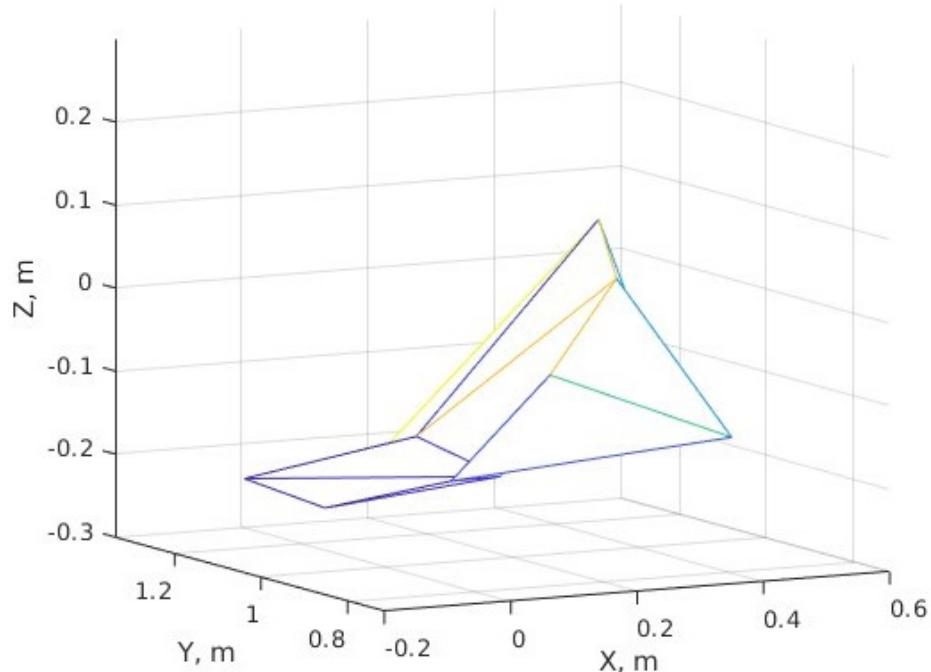


б) Метрика С2М: Гистограмма ошибок (относительное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки)

Рисунок 4.7 — Метрики оценки точности полученной карты



а) Робот проходит препятствие



б) Полученная полигональная сетка

Рисунок 4.8 — Пример натурного эксперимента

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

### 4.3 Определение физико-механических свойств опорной поверхности

Для определения физических свойств поверхности нужны данные с датчиков силы. Сильно улучшить показания помогут данные с гироскопов и акселерометров, а также момент с моторов. Определение физических свойств позволяет спелеологу узнать тип исследуемой поверхности, что важно для научных исследований и подбора оборудования. Также такое знание позволяет реализовать адаптивное управление роботом, что сильно увеличивает его активную проходимость по маршруту.

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

Вот основной подход к тому, как можно использовать данные датчика давления для определения физико-механических свойств поверхности:

**1. Размещение датчиков:** Установка датчиков давления в критических точках робота, где происходит контакт с землей. Для шагающих роботов они обычно располагаются на ступнях. Также возможно их установить на корпусе робота, когда робот двигается по узким территориям и где есть высокий шанс коснуться частью тела окружающих стен. Распределение и величина давления на каждую ногу может дать хорошее представление о типе поверхности, с которой имеет дело робот.

**2. Сбор данных:** Сбор данных о давлении при движении робота по различным поверхностям. Чтобы получить обширный набор данных, нужно использовать различные поверхности (например, бетон, песок, траву, гравий). Предложенные поверхности должны иметь разное процентное соотношение жестких, пластичных и упругих характеристик.

**3. Сбор данных о поверхности:** Собирая данные о давлении, также необходимо отметить фактический тип поверхности, по которой движется робот (это и есть "истинные данные"). Эти данные будут использоваться для обучения модели машинного обучения.

**4. Извлечение признаков:** Необработанные данные о давлении, скорее всего, не являются непосредственно полезными и нуждаются в определенной

обработке. Например, можно посмотреть дисперсию данных о давлении, максимальное и минимальное давление, среднее давление и т.д.

**5. Модель машинного обучения:** Обучить модель машинного обучения для классификации типа поверхности на основе характеристик, извлеченных из данных о давлении. Могут подойти алгоритмы контролируемого обучения, такие как машины опорных векторов, случайные леса или нейронные сети.

**6. Оценка модели:** Проведение оценки модели, используя отдельный тестовый набор данных, который модель не видела раньше. Необходимо проверить качество модели.

**7. Внедрение модели:** Следующим шагом является интегрирование созданной модели в систему управления робота. Робот может использовать встроенные датчики давления для оценки типа поверхности, на которой он находится, и соответствующим образом корректировать свое поведение.

Стоит отметить, что это относительно упрощенное описание процесса. На практике это сложная проблема, которая, скорее всего, потребует сложного решения с использованием дополнительных датчиков (например, тактильных датчиков, датчиков зрения или акселерометров) и передовых методов машинного обучения.

#### 4.4 Метод для классификации свойств поверхностей

Модель машинного обучения метод опорных векторов (SVM) был выбран для задачи классификации грунта благодаря ее эффективности и устойчивости при работе с высокоразмерными данными. Модель была реализована с помощью библиотеки Scikit-Learn в Python.

Входными данными для модели SVM были обработанные данные о давлении с датчика Velostat. Использовался подход скользящего окна, где каждое окно состояло из фиксированного числа последовательных показаний давления.

В процессе обучения собранные данные были разделены на обучающее и тестовое множества. Обучающее множество, составляющее 80% данных, использовалось для обучения модели SVM. Модель была обучена с использованием ядра радиальной базисной функции (RBF) с гиперпараметрами, оптимизированными с помощью поиска по сетке.

Затем для оценки эффективности модели использовался тестовый набор. Производительность измерялась с точки зрения точности классификации, точности, отзыва и F1-score.

SVM работает путем нахождения гиперплоскости в N-мерном пространстве, которая четко классифицирует точки данных. Для SVM-модели функция принятия решения задается следующим образом (4.3):

$$f(x) = w^T x + b \quad (4.3)$$

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

Модель SVM была обучена с использованием ядра радиальной базисной функции (RBF), которое преобразует входные данные в более высокие измерения, чтобы облегчить их разделение. Формула для ядра RBF (4.4) имеет следующий вид:

$$K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2) \quad (4.4)$$

где  $\gamma$  — коэффициент ядра, а  $\|x - y\|^2$  — квадратичное евклидово расстояние между точками данных.

Гиперпараметры модели SVM, включая штрафной параметр  $C$  и коэффициент ядра  $\gamma$ , были оптимизированы с помощью сеточного поиска. Поиск по сетке — это метод настройки гиперпараметров, который предполагает исчерпывающий поиск по заданному вручную подмножеству гиперпараметрического пространства алгоритма обучения.

Затем производительность модели была оценена с помощью тестового набора данных. Показателями оценки были точность классификации, точность, отзыв и F1-score, что позволило получить полное представление о работе модели.

Входной вектор из (4.3) представлен следующим образом:

- Элемент(1) — Частота движения ног
- (2) — Пиковая амплитуда давления с датчика силы
- (3) — Ширина давления с датчика силы. Это расстояние между началом и концом акта движения. Такие отрезки складываются и получается ширина.
- (4) — Площадь под кривой силы датчика
- (5) — Пиковая амплитуда крутящего момента двигателя
- (6) — Пиковый крутящий момент двигателя

- (7) — Среднее давление на сенсорах
- (8) — Средняя амплитуда крутящего момента
- (9) — Средний крутящий момент двигателя
- (10) — Ширина крутящего момента двигателя
- (11) — Площадь под кривой крутящего момента двигателя
- (12-16) — Индивидуальная пиковая амплитуда силы такселя

Для обучения и тестирования нашего классификатора мы объединили данные датчиков и крутящего момента двигателя с 6 местностей в 4 репрезентативных класса местностей, основанных на их свойствах трения и жесткости. на основе их физико-механических свойств.

Универсальное ядро на основе функции Пирсона VII (PUK) для SVM является важным методом в нелинейной классификации SVM. Это гибкий метод, который может создавать различные формы границ принятия решения путем изменения параметров, что делает его более адаптируемым к различным проблемам.

Универсальное ядро на основе функции Пирсона VII (4.5) определяется следующим образом:

$$K(x, y) = (1 + ((\|x - y\|^2)/\sigma^2)^\omega)^{(-1/\omega)} \quad (4.5)$$

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

PUK имеет два регулируемых параметра, сигма и омега, которые добавляют гибкости функции ядра.

Математически PUK может отражать целый ряд различных отношений между входными векторами. Когда параметр омега установлен на 1, PUK эквивалентен ядру радиальной базисной функции (RBF), широко используемой функции ядра. Изменяя параметр омега, PUK может создавать более гибкие границы принятия решений, чем ядро RBF, что делает его потенциально лучшим выбором для решения задач, где взаимосвязь между входами и выходами сложная.

Однако одним из недостатков PUK является то, что выбор параметров сигма и омега может оказаться значительное влияние на производительность SVM, и

поиск оптимальных значений этих параметров может потребовать больших вычислительных затрат.

Универсальное ядро на основе функции Пирсона VII (PUK) для SVM представляет собой интересную альтернативу более традиционным ядрам SVM, с потенциалом лучшей производительности при решении сложных, нелинейных задач классификации. Однако для полного понимания свойств этого ядра и типов задач, для которых оно лучше всего подходит, необходимы дополнительные исследования.

#### **4.5 Экспериментальная установка для обучения определения физико-механических свойств поверхности**

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

Все это было достигнуто благодаря разборному экспериментальному столу и двухступенчатому механизму, который ходит по окружности (рис. 4.9). Для бесконечного движения по кругу при малых скоростях был применен следующий инженерный приём. Были соединены две ноги робота в одну. На рисунке ниже (рис. 4.11) показаны как установлены сенсоры на получившейся ноге.

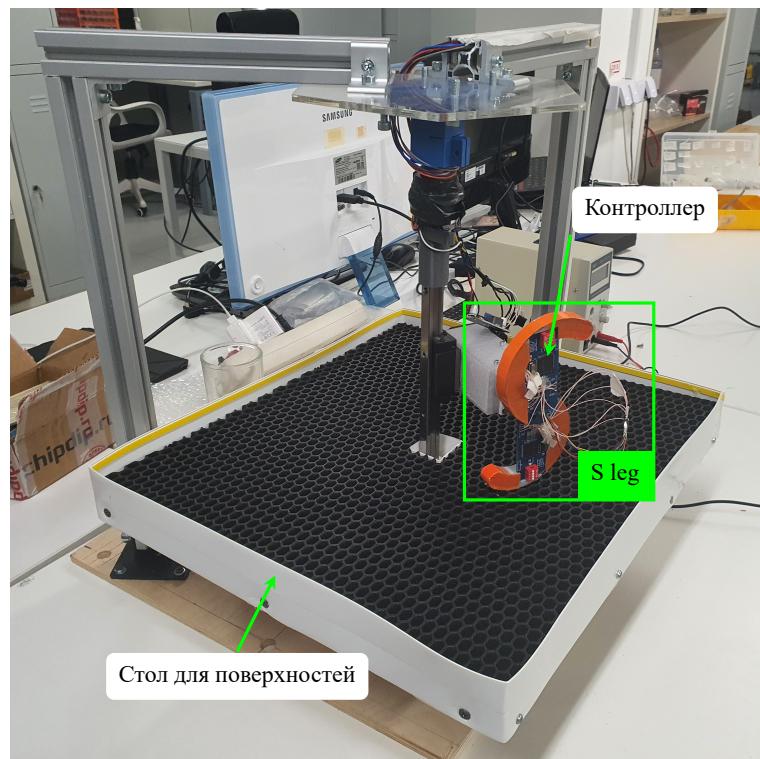


Рисунок 4.9 — Общий вид экспериментальной установки



Рисунок 4.10 — Расположение сенсоров на ноге робота

Были взяты 3 сильно разных поверхности и изучены необработанные данные. Резина (рис. 4.9) , камень (рис. 4.13б) , земля (рис. 4.13в).

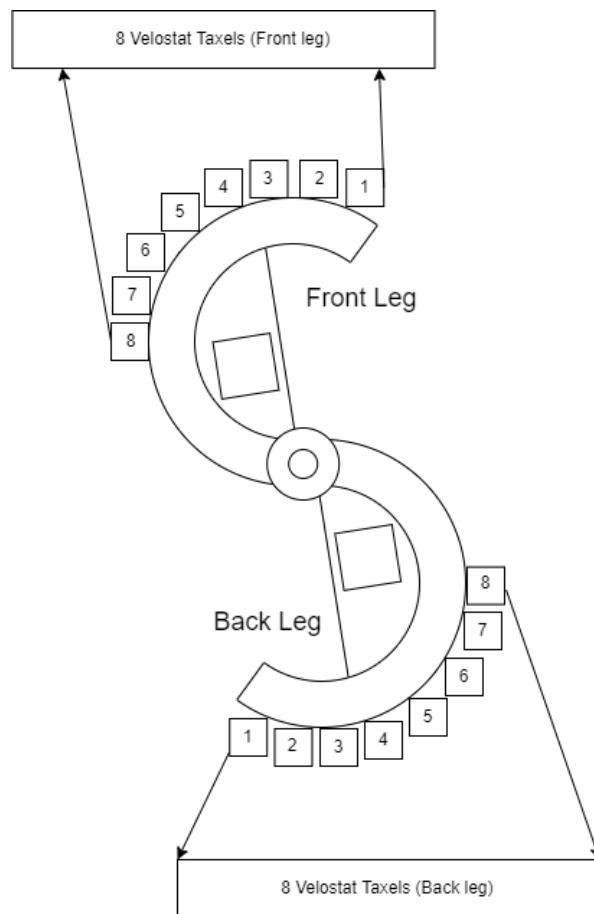


Рисунок 4.11 — Схематическое расположение сенсоров на ноге установки

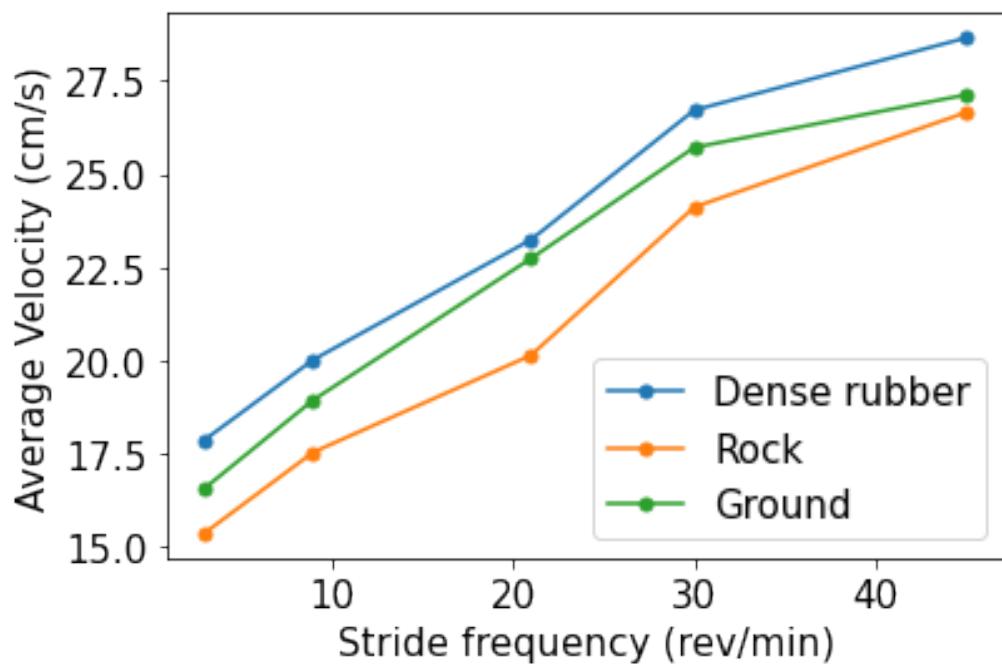
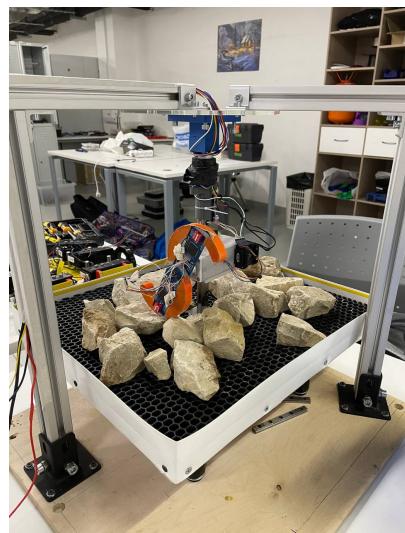


Рисунок 4.12 — Средняя линейная скорость робота



а) Резина



б) Каменистая поверхность



в) Земля

Рисунок 4.13 — Типы определяемых поверхностей

Были проведены замеры средней линейной скорости движения ноги на разных поверхностях при различных угловых скоростях (рис. 4.12). Возможно за-

метить нелинейную зависимость, что так же может указывать косвенно на тип поверхности.

Ниже (рис. 4.15) представлены необработанные данные с лапок робота. Сырые данные легко различить, но можно заметить, что абсолютные значения у разных сегментов различно. Поэтому при обучении необходимо их нормализовать.

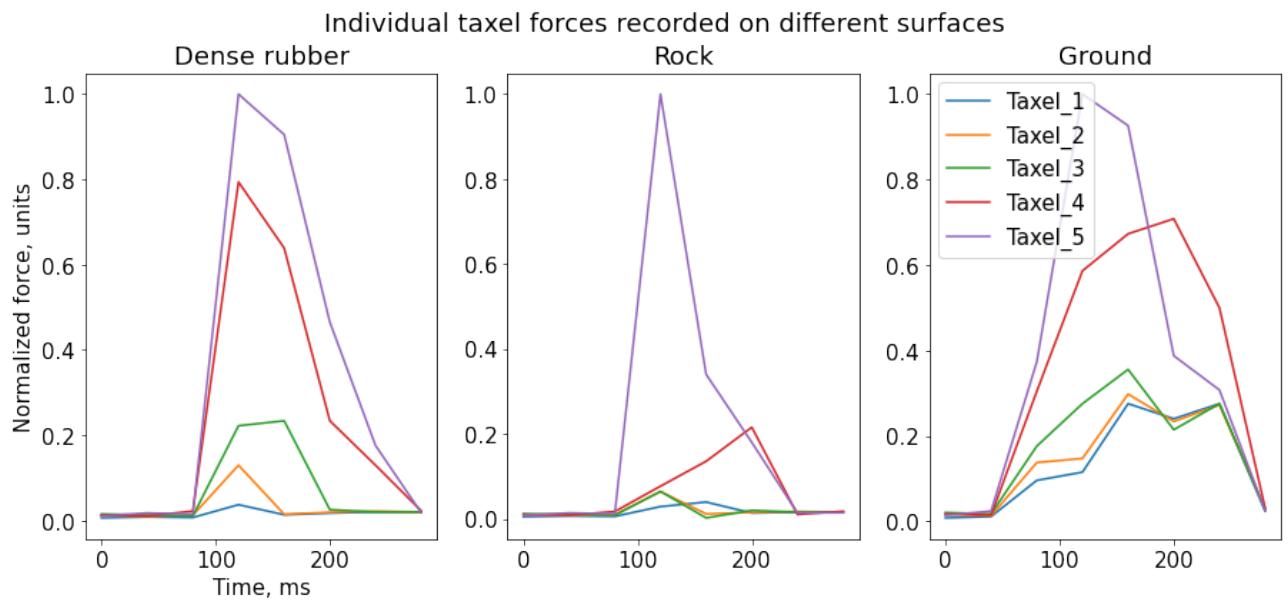


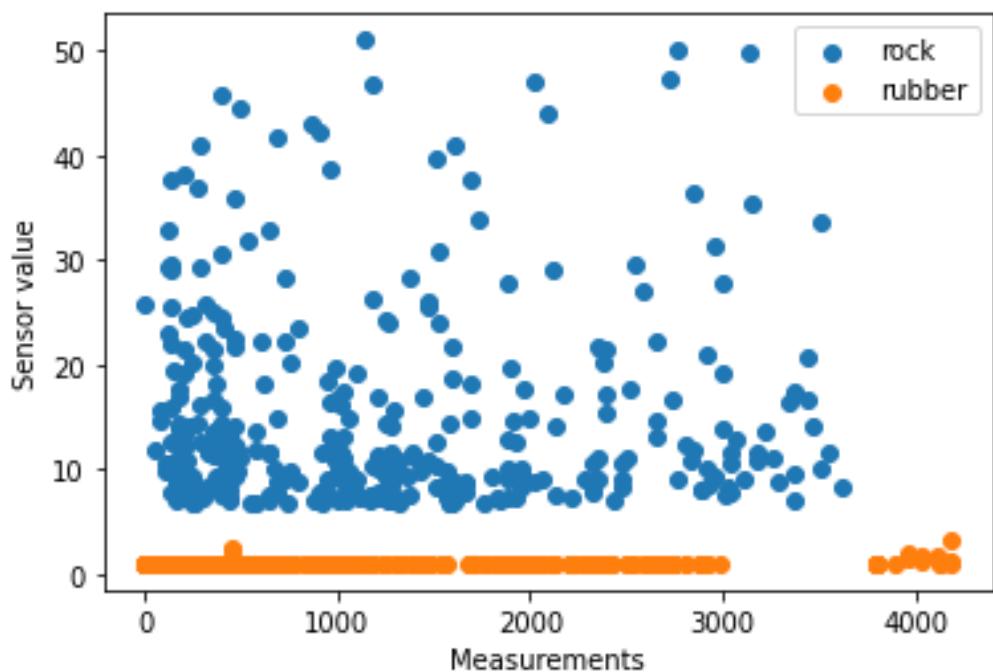
Рисунок 4.14 — Запись активных такселей на разных поверхностях

На рисунке выше (рис. 4.14) представлены запись касания ногой на разных поверхностях. Можно заметить пиковую нагрузку на пятом такселе, на который приходится самый большой вес. На земле, по причине гранулированности поверхности, нагрузка более распределена. Это так же является хорошим критерием для определения типа поверхности

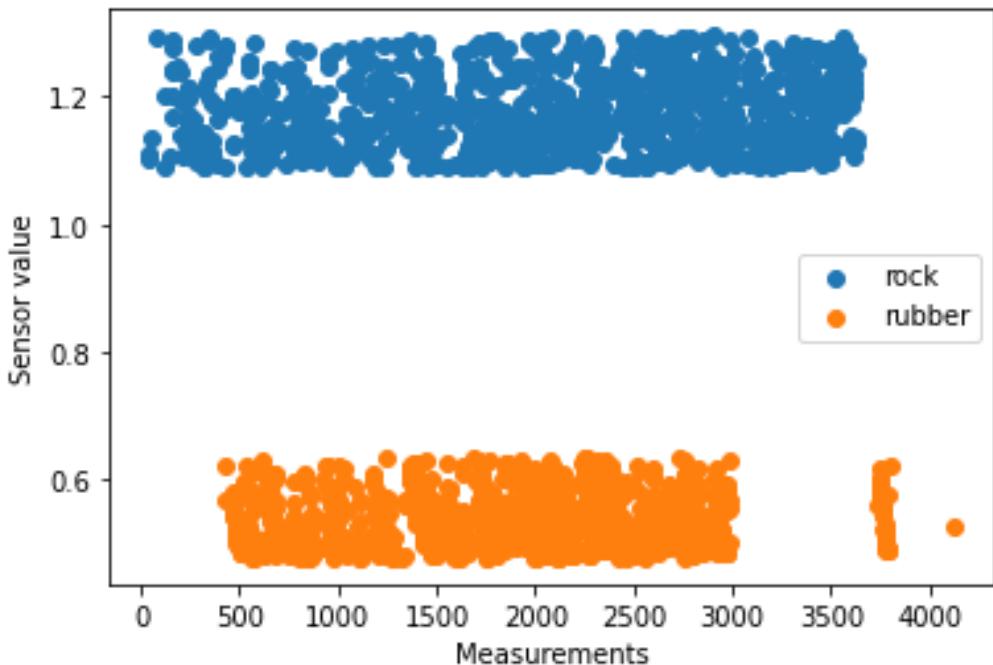
Применив предложенный алгоритм машинного обучения, данные с датчиков силы, а также массив угловых скорости были преобразованы с помощью Вейвлет-преобразования. Было проведено обучение, результатом которого получена таблица, представленная ниже (табл. 5).

Таблица 5 — Вероятность определения типа поверхности

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



а) Передняя часть ноги, 8ой сегмент



б) Передняя часть ноги, бой сегмент

Рисунок 4.15 — Сравнение сырых данных после эксперимента с разных сегментов ноги

Карта местности может быть построена с помощью 2D триангуляции Делоне (вогнутая оболочка). Входными данными для алгоритма является разреженное облако точек касаний робота поверхности, собранные 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 3 типа поверхности: резину, землю и каменистую гряду.

## Заключение

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

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

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

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

1. Был проведен обзор и анализ робототехнических систем и условия их применения. Обобщая, была проведена классификация машин, использующих ноги в качестве движителя. Наиболее полно были рассмотрены машины с циклическими движителями. В литературный обзор вошли роботы, которые могут быть использованы для исследования пещер. Была предложена их классификация. Более того, для понимания условий применений разрабатываемой робототехнической системы, было описаны параметры исследуемых пещер и их особенности. Для разработки системы, важной частью которой является сенсорные устройства, был проведен глубокий их обзор и классификация. Так же был проведен литературный обзор алгоритмической части работы с сенсорами, к примеру обзор алгоритмов по триангуляции.

Выводом обзора является описание применимости разработанной системы.

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

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

Помимо оптимизации конструкции по предложенным выше критериям, был разработан метод оптимизации конструкции робота для прохождения узких участков. Это важный концепт, так как по обзору пещер стало ясно, что пещеры имеют очень большую девиацию в ширину.

3. Изучив существующие тактильные сенсоры было решено разработать и исследовать преобразователь силы на основе Velostat. Для этого пришлось физические создать преобразователь, адаптировать его под конкретное применение. В течение разработки сенсора были найдена особенность, что при одинаковой силе нажатия на сенсор, возникают различные результаты, в зависимости от места нажатия и площади нажатия. Для исследования данного феномена был разработан автоматизированный экспериментальный стенд.

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

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

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

5. Для получения максимально полной информации о проходимой поверхности, необходимо знать еще и тип поверхности, по которой проходит робот. Это было реализовано с помощью методов машинного обучения, а все данные были

получены из натурных экспериментов. Как результат, точность определения примерно в 85 процентов (3 типа поверхности, земля, резина и камень), позволяет довольно эффективно использовать данные знания для реализации алгоритмов управления.

## Список сокращений и условных обозначений

$f_{1,2}$	значения сил трения вдоль осей $t_{1,2}$ соответственно, см. (2.12), стр. 46
$\alpha, \beta$	значения ориентации по крену и тангажу, см. (2.14), стр. 55
$\beta$	адаптивный параметр, см. (2.13), стр. 47
$\delta$	пройденная дистанция, см. (2.13), стр. 47
$\text{dist}_X: M \rightarrow \mathbb{R}$	обозначает функцию расстояния до множества $X$ , см. (4.2), стр. 83
$\mu$	коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью; см. (2.12), стр. 46
$\omega_i$	весовой коэффициент для направления движения, см. (2.14), стр. 55
$\phi$	обозначена функция связи, см. (2.8), стр. 45
$\phi_u(\vec{q})$	функция связи; см. (2.12), стр. 46
$\vec{\omega}_i$	вектор угловой скорости, см. (2.4), стр. 45
$\vec{F}_i, \vec{\tau}_i$	силы и моменты сил взаимодействия, см. (2.4), стр. 45
$\vec{g}$	вектор обобщённых сил, см. (2.4), стр. 45
$\vec{u}_i$	вектор обобщённых скоростей, см. (2.4), стр. 45
$\vec{v}_i$	вектор линейной скорости, см. (2.4), стр. 45
$\vec{x}_{1,2}, \vec{s}_{1,2}$	радиус-векторы, см. (2.12), стр. 46
$E$	единичная матрица, см. (2.4), стр. 45
$G(\vec{q}_i)$	обозначена матрица, вид которой зависит от выбранной системы координат и способа задания ориентации тела, см. (2.8), стр. 46
$i = \{1,2,3,4\}$	индекс, который определяет направление движения: 1 — вперед, 2 — влево, 3 — вправо, 4 — вращение, см. (2.14), стр. 55
$I_i$	тензор инерции, см. (2.4), стр. 45
$k$ —	коэффициент вязкого трения в шарнире ., см. (2.8), стр. 46
$M_i$	матрицы, содержащие массово-инерционные характеристики, см. (2.4), стр. 45
$m_i$	масса тела, см. (2.4), стр. 45
$p, A_i, B_i, \tau_{res}, k_i$	настраиваемые константы, см. (3.12), стр. 73

$q_j$	вектор обобщенных координат, включающий в себя координаты центра масс $\vec{x}_i$ и кватернион $\vec{Q}_i$ , описывающий ориентацию тела в пространстве, см. (2.8), стр. 45
$t$	время, см. (2.8), стр. 45
$t$	текущее время, см. (3.12), стр. 73
$t_0$	время начала нажатия, см. (3.12), стр. 73
$V_0$	начальное напряжение, см. (3.12), стр. 73
$X, Y$	непустые подмножества метрического пространства $M$ , см. (4.2), стр. 83
$Z$	координата по оси $Z$ , см. (2.14), стр. 55
$\omega_{1,2} \in [0..1]$	весовые коэффициенты, см. (2.13), стр. 47
$\omega_{z,roll,pitch}$	весовые коэффициенты, см. (2.14), стр. 55

## 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)

**GPU** : Graphical Processing Unit (Графический процессор)

**kNN** : k-nearest neighbors (метод ближайших соседей)

**SVN** : Support Vector Machine (Метод опорных векторов)

## Список литературы

1. *Белецкий В. В.* Двуногая ходьба модельные задачи динамики и управления [Текст] // Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. — 1984.
2. *Брискин Е. С., Шаронов Н. Г.* Об управлении движением механических систем с избыточным числом управляющих воздействий [Текст] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2019.
3. *Брискин Е. С., Леонард А. В., Малолетов А. В.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки [Текст] // Теория механизмов и машин. — 2011. — Т. 9, № 1. — С. 14—24.
4. Виброробот для вертикального движения по металлической шероховатой поверхности [Текст] / С. Яцун [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2010. — Т. 12, № 4—3.
5. *Волкова Л., Яцун С.* Моделирование движения многозвенного прыгающего робота и исследование его характеристик [Текст] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2013. — № 4. — С. 137—137.
6. *Градецкий В., Князьков М.* Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред [Текст] // Робототехника и техническая кибернетика. — 2014. — № 1. — С. 9—16.
7. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми двигателями [Текст] / Е. С. Брискин [и др.] // М.: Машиностроение. — 2009. — С. 192.
8. Карст и пещеры Пермской области [Текст] / Г. А. Максимович [и др.]. — Пермский государственный университет, 1992.
9. *Максимович Г. А.* Основы карстоведения: Том II. Вопросы гидрогеологии карста, реки и озера карстовых районов, карст мела, гидротермокарст (учебное пособие) [Текст]. — Книжная типография № 2. Пермь, 1969.
10. *Максимович Г. А., Лобанов Ю. Е.* Пещеры урала [Текст]. — Физкультура и спорт. — 1971.

11. *Максимович Г.* Основы карстоведения: Том I. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста [Текст]. — Книжная типография № 2. Пермь, 1963.
12. *Малолетов А. В.* Динамика и оптимизация структуры, параметров и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными шагающими двигателями [Текст] / Малолетов Александр Васильевич. — Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Волгоград, 2015.
13. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными двигателями [Текст] / Е. С. Брискин [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2014.
14. *Охочимский Д. Е.* Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата [Текст] // Москва. — 1984.
15. *Павловский В. Е.* О разработках шагающих машин [Текст] // Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. — 2013. — № 0. — С. 101—32.
16. *Петриашвили Б., Маргвелашвили В., Билашвили М.* К задаче организации движения опорных звеньев многоногих шагающих машин [Текст] // Мецниереба. — 1986.
17. Робототехника [Текст] / Ю. Д. Андрианов, Э. П. Бобриков, В. Н. Гончаренко [и др.] // М.: Машиностроение. — 1984.
18. *Рядчиков И., Мамелин Ю.* Очувствление робототехнических систем, методика распознавания поверхности [Текст] // Евразийский Союз Ученых. — 2015. — Т. 4, № 13. — С. 85—87.
19. *Юревич Е. И.* Сенсорные системы в робототехнике [Текст] // СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. — 2013.
20. A Brief Overview of a Novel, Highly-Integrated Hydraulic Servo Actuator with Additive-Manufactured Titanium Body [Text] / C. Semini [et al.] // IROS Workshop 2016. — 2016.
21. A Campaign in Autonomous Mine Mapping [Text] / C. Baker [et al.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2004.

22. A Concave Hull Algorithm for Scattered Data and Its Applications [Text] / J. Xu [et al.]. — 2010. — Nov. 29.
23. A Multi-Modal Mapping Unit for Autonomous Exploration and Mapping of Underground Tunnels [Text] / F. Mascarich [et al.] // IEEE Aerospace Conference Proceedings. — 2018.
24. A Prototype Climbing Robot for Inspection of Complex Ferrous Structures [Text] / G. Peters [et al.] // Emerging Trends in Mobile Robotics. — World Scientific, 2010. — P. 150—156.
25. A Survey on Terrain Assessment Techniques for Autonomous Operation of Planetary Robots [Text] / D. L. Sancho-Pradel [et al.]. — 2010. — May 1.
26. *Aurenhammer F.* Voronoi Diagrams—a Survey of a Fundamental Geometric Data Structure [Text] // ACM Computing Surveys. — 1991. — Sept. — Vol. 23, no. 3. — P. 345—405.
27. 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.
28. 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.
29. Border Samples Detection for Data Mining Applications Using Non Convex Hulls [Text] / A. L. Chau [et al.]. — 2011. — Nov. 26.
30. BORDER: Efficient Computation of Boundary Points [Text] / C. Xia [et al.] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. — 2006. — Mar. 1. — Vol. 18, no. 3. — P. 289—303.
31. *Borenstein J., Hansen M., Borrell A.* The OmniTread OT-4 Serpentine Robot - Design and Performance [Текст] // Journal of Field Robotics. — 2007.
32. *Brodal G. S., Jacob R.* Dynamic Planar Convex Hull [Text]. — 2002. — Nov. 16.
33. *Brooks D. G., Carroll S. S., Verdini W. A.* Characterizing the Domain of a Regression Model [Text] // The American Statistician. — 1988. — Aug. 1. — Vol. 42, no. 3. — P. 187—190.

34. Case Studies of a Borehole Deployable Robot for Limestone Mine Profiling and Mapping [Текст] / A. Morris [и др.] // Springer Tracts in Advanced Robotics. — 2006.
35. *Chan T. M.* Optimal Output-Sensitive Convex Hull Algorithms in Two and Three Dimensions [Text] // Discrete and Computational Geometry. — 1996. — Apr. 1. — Vol. 16, no. 4. — P. 361—368.
36. *Chen J. Y.* UAV-guided Navigation for Ground Robot Tele-Operation in a Military Reconnaissance Environment [Текст] // Ergonomics. — 2010.
37. *Cintra M., Llanos D. R., Palop B.* Speculative Parallelization of a Randomized Incremental Convex Hull Algorithm [Text]. — 2004. — May 14.
38. *Clarkson K. L.* Applications of Random Sampling in Computational Geometry, II [Text]. — 1988. — Jan. 6.
39. 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.
40. Comparing Cockroach and Whegs Robot Body Motions [Текст] / R. Schroer [и др.] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004. T. 4. April. — IEEE, 2004. — 3288—3293 Vol.4.
41. Control of Hexapod Walking-a Decentralized Solution Based on Biological Data [Текст] / H. Cruse [и др.] // Climbing and Walking Robots: From Biology to Industrial Applications. Proceedings of the Fourth International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2001). — 2001. — C. 79—86.
42. DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy [Text] / F.-A. Fortin [et al.] // Journal of Machine Learning Research. — 2012. — July. — Vol. 13. — P. 2171—2175.
43. DeepGait: Planning and Control of Quadrupedal Gaits Using Deep Reinforcement Learning [Текст] / V. Tsounis [и др.]. — 2019.
44. Design and Optimization of a Magnetic Wheel for a Grit-Blasting Robot for Use on Ship Hulls [Текст] / Z. Xu [и др.] // Robotica. — 2017.
45. Design of a Leg-Wheel Hybrid Mobile Platform [Text] / S.-Y. Shen [et al.] // 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. — IEEE, 10/2009. — P. 4682—4687.

46. 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.
47. Duckiefloat: A Collision-Tolerant Resource-Constrained Blimp for Long-Term Autonomy in Subterranean Environments [Текст] / Y.-W. Huang [и др.]. — 2019.
48. *Ebert T., Belz J., Nelles O.* Interpolation and Extrapolation: Comparison of Definitions and Survey of Algorithms for Convex and Concave Hulls [Text] // 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM) (2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM)). — Orlando, FL, USA : IEEE, 12/2014. — P. 310—314.
49. *Edelsbrunner H., Mücke E. P.* Three-Dimensional Alpha Shapes [Text]. — 1992. — Dec. 1.
50. Effects of Parameterization on the Performance of Empirical Models Used in ‘predictive Microbiology’ [Text] / J. Baranyi [et al.] // Food Microbiology. — 1996. — Feb. 1. — Vol. 13, no. 1. — P. 83—91.
51. Efficient Generation of Simple Polygons for Characterizing the Shape of a Set of Points in the Plane [Text] / M. Duckham [et al.] // Pattern Recognition. — 2008. — Oct. 1. — Vol. 41, no. 10. — P. 3224—3236.
52. *Ertoz L., Steinbach M., Kumar V.* A New Shared Nearest Neighbor Clustering Algorithm and Its Applications [Text]. — 2002. — Jan. 1.
53. Evolution Strategies as a Scalable Alternative to Reinforcement Learning [Text] / T. Salimans [et al.]. — 2017.
54. *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.
55. Field-Hardened Robotic Autonomy for Subterranean Exploration [Текст] / T. Dang [и др.]. — 2019.
56. Flying, Hopping Pit-Bots for Cave and Lava Tube Exploration on the Moon and Mars [Текст] / J. Thangavelautham [и др.]. — 2017. — 26 янв.
57. Free-Climbing with a Multi-Use Robot [Текст] / T. Bretl [и др.] // Springer Tracts in Advanced Robotics. — 2006.

58. *Germann D., Bruckmann T., Hiller M.* Joystick Force Feedback Based on Proximity to the Linearised Workspace of the Four-Legged Robot ALDUR0 [Текст] // Proceedings Fourth International Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR2001. Karlsruhe, Germany. — Citeseer. 2001.
59. *Graham R.* An Efficient Algorithm for Determining the Convex Hull of a Finite Planar Set [Text] // Information Processing Letters. — 1972. — June 1. — Vol. 1, no. 4. — P. 132—133.
60. 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.
61. *Haffner P.* Escaping the Convex Hull with Extrapolated Vector Machines [Text]. — 2001. — Jan. 3.
62. Hopping Mobility Concept for Search and Rescue Robots [Текст] / S. Dubowsky [и др.] // Industrial Robot. — 2008.
63. *Howard A., Seraji H.* Real-Time Assessment of Terrain Traversability for Autonomous Rover Navigation [Текст] // Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113). — 2000.
64. *Howe R., Cutkosky M.* Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing [Текст] // IEEE Transactions on Robotics and Automation. — 1993. — Апр. — Т. 9, № 2. — С. 140—151.
65. *Hung I.-K.* Advanced Digital Terrain Analysis Using Roughness-Dissectivity Parameters in GIS [Text]. — 2004. — Jan. 1.
66. 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.
67. *Jarvis R., Jarvis R. A.* On the Identification of the Convex Hull of a Finite Set of Points in the Plane. [Text] // Information Processing Letters. — 1973. — Mar. 1. — Vol. 2, no. 1. — P. 18—21.
68. 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.

69. *Khosravani H., Ruano A. E., Ferreira P. M.* A Simple Algorithm for Convex Hull Determination in High Dimensions [Text]. — 2013. — Nov. 7.
70. *King G., Zeng L.* The Dangers of Extreme Counterfactuals [Text] // Political Analysis. — 2006. — Mar. 20. — Vol. 14, no. 2. — P. 131—159.
71. *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.
72. Learning Approach to Study Effect of Flexible Spine on Running Behavior of a Quadruped Robot [Текст] / H. J. BIDGOLY [и др.] // Emerging Trends in Mobile Robotics. — World Scientific, 2010. — C. 1195—1201.
73. 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.
74. 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.
75. *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. — C. 907—919.
76. *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.
77. *Lynch D. J., Lynch K. M., Umbanhowar P. B.* The Soft Landing Problem: Minimizing Energy Loss by a Legged Robot Impacting Yielding Terrain [Текст]. — 2019. — Сент.
78. MAV Navigation through Indoor Corridors Using Optical Flow [Текст] / S. Zingg [и др.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2010.
79. *Miller L.* Extreme Makeover for a Heian-Era Wizard [Текст] // Mechademia. — 2008. — Т. 3, № 1. — C. 30—45.

80. Mine Tunnel Exploration Using Multiple Quadrupedal Robots [Текст] / I. D. Miller [и др.]. — 2019.
81. *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.
82. *Moreira A., Santos M. Y.* Concave Hull: A k-Nearest Neighbours Approach for the Computation of the Region Occupied by a Set of Points [Text]. — 2007. — Mar. 8.
83. *Mrva J., Faigl J.* Feature Extraction for Terrain Classification with Crawling Robots [Text]. — 2015.
84. *Nagakubo A., Hirose S.* Walking and Running of the Quadruped Wall-Climbing Robot [Текст] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 1994.
85. *Odenhal 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.
86. On the Shape of a Set of Points in the Plane [Text] / H. Edelsbrunner [et al.] // IEEE Transactions on Information Theory. — 1983. — July 1. — Vol. 29, no. 4. — P. 551—559.
87. Optimization-Based Full Body Control for the DARPA Robotics Challenge [Text] / S. Feng [et al.] // Journal of Field Robotics. — 2015. — Mar. 1. — Vol. 32, no. 2. — P. 293—312.
88. *Park J.-S., Oh S.-J.* A New Concave Hull Algorithm and Concaveness Measure for N-dimensional Datasets [Text] // Journal of Information Science and Engineering. — 2012. — May 1. — Vol. 28, no. 3. — P. 587—600.
89. *Patel M. H.* A Linear Program to Detect Extrapolation in Predicting New Responses of a Multiple Linear Regression Model [Text] // Computers & Industrial Engineering. — 1995. — Oct. 1. — Vol. 28, no. 4. — P. 787—791.
90. *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.

91. Quattroped: A Leg–Wheel Transformable Robot [Текст] / S.-C. Chen [и др.] // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. — 2014. — Апр. — Т. 19, № 2. — С. 730—742.
92. Recent Developments in Subterranean Robotics [Текст] / A. Morris [и др.] // Journal of Field Robotics. — 2006.
93. Reddy A. H., Kalyan B., Murthy C. S. Mine Rescue Robot System – a Review [Текст] // Procedia Earth and Planetary Science. — 2015.
94. Rejer I., Mikolajczyk M. A Hypertube as a Possible Interpolation Region of a Neural Model [Text] // Lecture Notes in Computer Science. — 2006. — Jan. 1. — P. 123—132.
95. RHex: A Biologically Inspired Hexapod Runner [Текст] / R. Altendorfer [и др.] // Autonomous Robots. — 2001.
96. Robotic Tactile Perception of Object Properties: A Review [Text] / S. Luo [et al.] // Mechatronics. — 2017. — Dec. — Vol. 48. — P. 54—67.
97. Rolling in the Deep – Hybrid Locomotion for Wheeled-Legged Robots Using Online Trajectory Optimization [Текст] / M. Bjelonic [и др.]. — 2019.
98. 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.
99. Saranli U., Buehler M., Koditschek D. E. RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot [Текст] // The International Journal of Robotics Research. — 2001. — 2 июля. — Т. 20, № 7. — С. 616—631.
100. 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. — С. 1—6.
101. 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.

102. 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.
103. *Sintov A., Avramovich T., Shapiro A.* Design and Motion Planning of an Autonomous Climbing Robot with Claws [Текст] // Robotics and Autonomous Systems. — 2011.
104. 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.
105. SMI 2012: Full GPU Accelerated Convex Hull Computation [Text] / M. Tang [et al.] // Computers & Graphics. — 2012. — Aug. 1. — Vol. 36, no. 5. — P. 498—506.
106. SpinybotII: Climbing Hard Walls with Compliant Microspines [Текст] / Sangbae Kim [и др.] // . — 2005.
107. 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.
108. *Tan N., Mohan R. E., Elangovan K.* Scorpio: A Biomimetic Reconfigurable Rolling-Crawling Robot [Текст] // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2016. — 8 сент. — Т. 13, № 5. — С. 172988141665818.
109. *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.
110. 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.
111. Terrain Trafficability Analysis and Soil Mechanical Property Identification for Planetary Rovers: A Survey [Текст] / S. Chhaniyara [и др.]. — 2012.
112. *Tlale N.* A Modular Design of a Wall-Climbing Robot and Its Mechatronics Controller [Text] // The South African Journal of Industrial Engineering. — 2012.

113. Траектория Оптимизация для Колесно-ноговых Квадрупедальных Роботов Используя Линеаризованные ZMP Ограничения [Текст] / Y. De Viragh [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2019.
114. Траектория Планирования для Лестничного Чемпиона в Гибридном Мобильном Роботе Quattroped [Текст] / Shen-Chiang Chen [и др.] // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. — IEEE, 05.2011. — С. 1229—1234.
115. TurboQuad: A Novel Leg–Wheel Transformable Robot with Smooth and Fast Behavioral Transitions [Текст] / W.-H. Chen [и др.] // IEEE Transactions on Robotics. — 2017. — Окт. — Т. 33, № 5. — С. 1025—1040.
116. *Tzeng S., Owens J. D.* Finding Convex Hulls Using Quickhull on the GPU [Text] // arXiv: Computational Geometry. — 2012. — Jan. 13.
117. 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.
118. Using Radial Basis Functions to Approximate a Function and Its Error Bounds [Text] / J.A. Leonard [et al.] // IEEE Transactions on Neural Networks. — 1992. — July 1. — Vol. 3, no. 4. — P. 624—627.
119. *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.
120. *Vehec I., Livovsky L.* Flexible Resistive Sensor Based on Velostat [Текст] // 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) (2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)). — Demanovska Valley, Slovakia : IEEE, 05.2020. — С. 1—6.
121. *Verleysen M.* Learning High-Dimensional Data [Text]. — 2001. — Jan. 1.
122. Vision-Controlled Micro Flying Robots [Текст] / B. D. Scaramuzza [и др.] // Robotics & Automation Magazine, IEEE. — 2014.
123. *Walas K., Kanoulas D., Kryczka P.* Terrain Classification and Locomotion Parameters Adaptation for Humanoid Robots Using Force/Torque Sensing [Текст] // 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). — IEEE, 11.2016. — С. 133—140.

124. Walking Posture Adaptation for Legged Robot Navigation in Confined Spaces [Текст] / R. Buchanan [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2019.
125. *Wei J., Ma H.-w.* Study on Mine Rescue Robot System [Текст] //. — 2009. — C. 1065—1072.
126. *Zhong J., Tang K., Qin A. K.* Finding Convex Hull Vertices in Metric Space [Text]. — 2014. — July 6.

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

#### **В изданиях из списка ВАК РФ**

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

#### **В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus**

3. *Bulichev O., Klimchik A.* Concept Development Of Biomimetic Centipede Robot StriRus [Text] // 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). — Bologna, 2018. — Nov. — P. 85—90.
4. *Bulichev O., Klimchik A., Mavridis N.* Optimization of Centipede Robot Body Designs through Evolutionary Algorithms and Multiple Rough Terrains Simulation [Text] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). — Macau, 2017. — Dec. — P. 290—295.

5. Sokolov M., Bulichev O., Afanasyev I. Analysis of ROS-based Visual and Li-dar Odometry for a Teleoperated Crawler-type Robot in Indoor Environment: [Text] // Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. — Madrid, Spain, 2017. — P. 316—321.

### **Зарегистрированные программы для ЭВМ**

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

12. Программа Ориентации Шагающего Робота Стрирус в Условиях Плохой Видимости [Текст] : пат. / О. В. Буличев, Д. В. Бураков. — Заявл. 21.11.2019, 2019664225 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019665262.
13. Программа Подбора Кинематических Параметров у Шагающих Роботов [Текст] : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 07.08.2019, 2019618753 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019660557.

### **В прочих изданиях**

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

## Список рисунков

1	Препятствия, встречающиеся в пещерах . . . . .	4
2	Примеры ситуаций, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту . . . . .	5
3	Прототип, на котором было сделано большинство экспериментов . . . . .	6
1.1	Механический слон . . . . .	12
1.2	Робот рикша . . . . .	12
1.3	Робот паровой человек . . . . .	13
1.4	Машина Чебышева . . . . .	14
1.5	Робот ВолгГТУ Кубань . . . . .	14
1.6	VNIITM . . . . .	15
1.7	Робот Alduro . . . . .	16
1.8	Робот Athlete . . . . .	17
1.9	BigDog . . . . .	17
1.10	Ползающий экскаватор Российского производства . . . . .	18
1.11	BrickWall робот . . . . .	19
1.12	Робот, взбирающийся по канату . . . . .	19
1.13	Boston Dynamics робот RHex . . . . .	23
1.14	Gakken Mechamo Centipede робот . . . . .	24
1.15	Quattroped семья роботов . . . . .	25
1.16	Whegs II . . . . .	26
1.17	Твердые поверхности . . . . .	28
1.18	Сыпучие грунты . . . . .	28
1.19	Водяные препятствия . . . . .	29
1.20	Скользящие поверхности . . . . .	29
1.21	Примеры карт некоторых пещер . . . . .	30
1.22	Задание на пересеченной местности в конкурсе виртуальной робототехники DARPA . . . . .	33
1.23	Пример карт местности: карта опасности местности и карта достоверности местности . . . . .	34
1.24	Рельеф с параметризованными ячейками . . . . .	34
1.25	Структурная схема разработанной системы . . . . .	38
2.1	Критерии оптимизации конструкции робота . . . . .	43

2.2	Отображение переменных для модели взаимодействия опорной поверхности и ноги робота . . . . .	46
2.3	Схема модели робота для генетического алгоритма . . . . .	47
2.4	Примеры сгенерированных территорий . . . . .	49
2.5	Три диапазона для оценки рельефа местности . . . . .	50
2.6	Робот с результирующими результатами . . . . .	53
2.7	Среднее значение фитнес-функции $\pm$ std на поколение Минимальное и максимальное значения фитнес-функции на поколение . . . . .	53
2.8	Зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией . . . . .	54
2.9	Данные о положении корпуса робота для движения прямо и в бок . . . . .	56
2.10	RMS из данных об ориентации для типа движения вперед . . . . .	57
2.11	STD из данных об ориентации для типа движения вперед . . . . .	57
2.12	из данных об ориентации для типа движения вбок . . . . .	58
2.13	Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоянии . . . . .	59
2.14	Итерации робота СтриРуса . . . . .	61
3.1	Примеры использования Velostat . . . . .	67
3.2	Электрическая схема преобразователя силы . . . . .	68
3.3	График зависимости прикладываемого веса от сопротивления . . . . .	69
3.4	Разработанный экспериментальный стенд . . . . .	70
3.5	Представление места нажатия инструментом сенсора и сам инструмент	71
3.6	Графики зависимости силы и позиции по $z$ от времени во время эксперимента по исследованию Velostat . . . . .	72
3.7	Результаты статического эксперимента . . . . .	74
3.8	Проверка чувствительности датчика. Слева - идеальные данные, справа - результат, полученный с помощью созданного датчика. . . . .	75
3.9	Динамический эксперимент . . . . .	76
4.1	Кинематическая схема для определения точки касания опорной поверхности роботом . . . . .	79
4.2	2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка) . . . . .	81
4.3	Эксперимент в симуляторе . . . . .	82
4.4	Результат эксперимента . . . . .	83
4.5	Результат эксперимента по построению карты постамента . . . . .	84
4.6	Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне . . . . .	85

4.7	Метрики оценки точности полученной карты . . . . .	86
4.8	Пример натурного эксперимента . . . . .	87
4.9	Общий вид экспериментальной установки . . . . .	93
4.10	Расположение сенсоров на ноге робота . . . . .	93
4.11	Схематическое расположение сенсоров на ноге установки . . . . .	94
4.12	Средняя линейная скорость робота . . . . .	94
4.13	Типы определяемых поверхностей . . . . .	95
4.14	Запись активных такселей на разных поверхностях . . . . .	96
4.15	Сравнение сырых данных после эксперимента с разных сегментов ноги	97

**Список таблиц**

1	Сравнительный анализ гексаподов . . . . .	26
2	Процентное соотношение между диапазонами и успешными попытками . . . . .	50
3	Зависимость между статистикой целевой функции и типами поверхности . . . . .	54
4	Сравнение итераций робота . . . . .	62
5	Вероятность определения типа поверхности . . . . .	96