

Оглавление

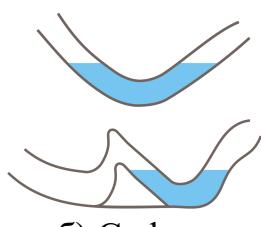
Введение

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

Движение по пещере часто происходит по опасными и труднопроходимыми участкам. К примеру таковыми являются сифоны (Рис. ??), сталактиты, обилие скользких грунтов (Рис. ???). В пещерах недостаток света, часто влажно.



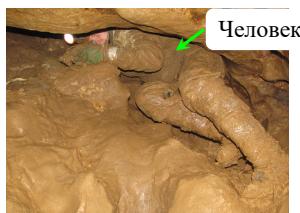
а) Соляные отложения



б) Сифон



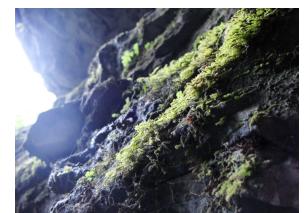
в) Ледяная пещера



г) Глина



д) Пещера, заполненная водой по колено



е) Мх

Рисунок 1 — Препятствия, встречающиеся в пещерах

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

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

Для полноценного функционирования робота в пещере необходимы сенсоры. Классическими внешними сенсорами являются камера и лидар.

В характерных для пещеры условиях сенсоры могут выйти из строя. К примеру грязь (Рис. ??) может закрыть обзор камере или лидару. Или водная гладь (Рис. ??) будет отражать лучи лазера лидара и искажать данные (Рис. ??).

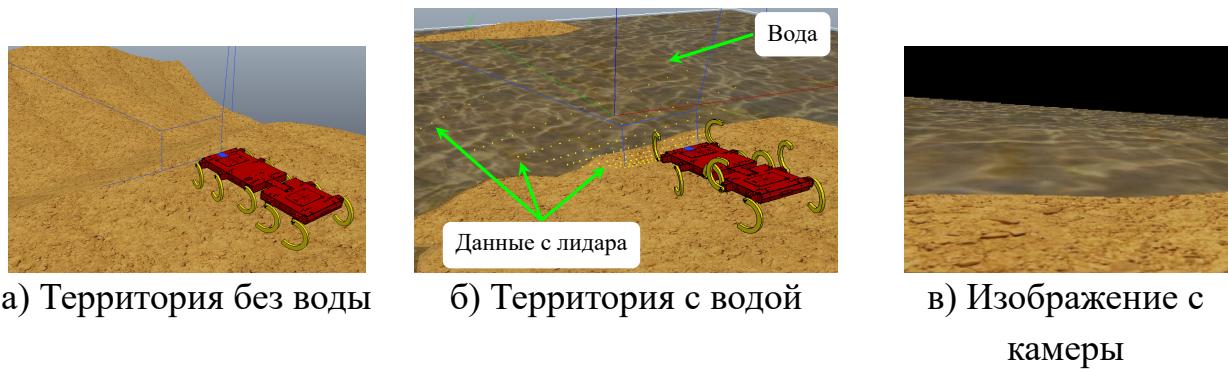


Рисунок 2 — Пример ситуации, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту

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

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

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

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

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

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

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

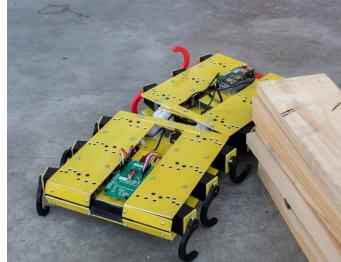


Рисунок 3 — Прототип, на котором было сделано большинство экспериментов

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

Особенность конструкции робота в том, что возможно изменять угол между лапкой и корпусом робота. Данное конструктивное изменение позволило сделать перемещение робота всенаправленным, то есть робот может двигаться во все стороны без смены ориентации корпуса робота.

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

Для экспериментального исследования применялось численное и стендовое моделирования.

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

Научная новизна: Сформулирована и решена задача построения карты местности с помощью тактильного ощущения шагающего робота с цикловыми движителями и датчиками силы, установленными на опорных поверхностях движителей. Разработан метод оптимизации конструкции многоногого шагающего

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

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

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

Предложено использовать преобразователь силы на основе полимерного материала Velostat. **Установлено**, что данный преобразователь можно рассматривать как единое тело, при площади нажатия больше 50% площади сенсора.

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

Основные положения, выносимые на защиту:

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

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

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

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

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

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

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов:

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

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, ?? глав, заключения и ?? приложен. Полный объём диссертации составляет ?? страниц, включая ?? рисунков и ?? таблиц. Список литературы содержит ?? наименований.

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Форматирование текста

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

1.2 Cave description

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

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

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

1.2.1 Cave dimensions

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

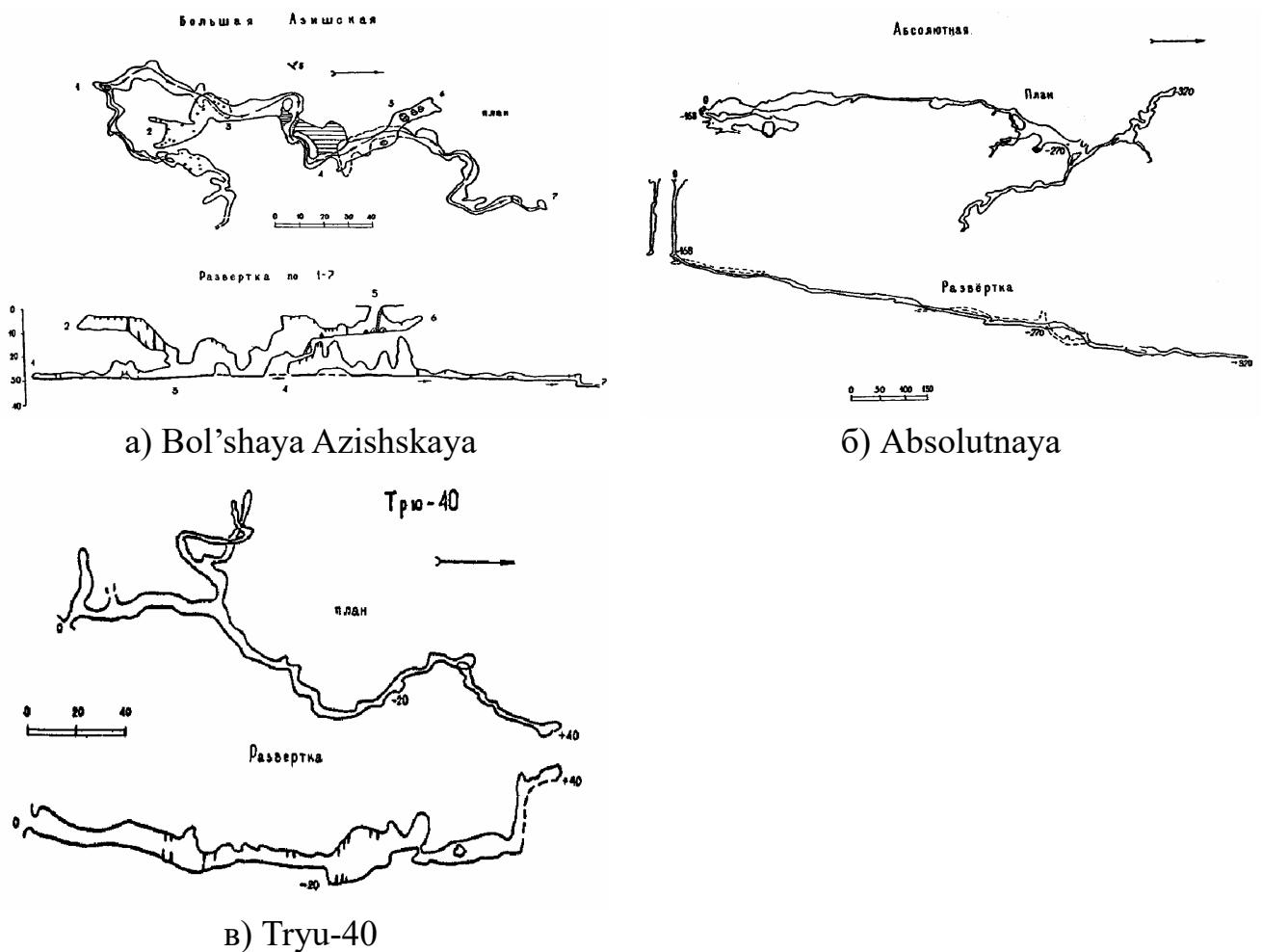


Рисунок 1.1 — Slippery surfaces

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

Исследование пещер естественного происхождения является комплексной задачей, сопряженная со множественными трудностями [Zhang2017a; Frumkin2019]. Деградация сенсоров [Huang2019], перебои в коммуникации между роботами из-за потери сигналов [Vaquero2018; Thangavelautham2017], сложный рельеф пещер [Thangavelautham2017], обилие грязи [Baker2004], жидких препятствий [Morris2006], требующие герметизацию корпуса, являются только малой частью встречаемых проблем в пещерах.

Для исследования пещер роботами необходимо вначале понять, что такое пещера, какие типы существуют и какие проблемы они несут. Для робототехников важно понимать типы препятствий (от этого зависит тип движителя робота), влияние окружения на алгоритмы навигации. В пещерах возможно встретить по-

чи все типы поверхностей, с которыми приходится сталкиваться роботам в мире. Это и твердые поверхности: мрамор, кварц, базальт. Сыпучие грунты, такие как: мел, гипс, соль, известняк. Часто встречаются водные препятствия — как лужи, так и целы залы, погруженные в воду. Особую опасность для человека вносят сифоны. Это пещера в виде параболы, где в локальном минимуме все затоплено. Скользкие поверхности: лед, мох, глина, а так же разрушающие поверхности — каменная грязь и паутина [1960; 1963; 1969; 1971]. Все это вносит свои корректировки на выбор сенсоров. Так же важно понимать габариты пещер. Это влияет на необходимую автономность робототехнической системы [Mascarich2018a].

Для преодоления сложного рельефа исследователи со всего мира предлагали различных роботов, робототехнические системы и типы движителей [Morris2006a]. Имеет смысл рассматривать, как возможных, так и реально применяющихся для исследования пещер. Разрушение пещер нежелательно, поэтому роботы, которые для перемещения ломают породу не будут рассматриваться [Semini2016]. В пещерах принято использовать, как наземных роботов, так и летающие аппараты, так и их комплексы. Из летающего транспорта это коптеры [Papachristos2019; Scaramuzza2014; Zingg2010] и дирижабли [Huang2019]. Дирижабль намного более автономен и может нести большую нагрузку. Наземных роботов очень много типов, но основными являются: шагающие [Tan2016; Lynch2019] колесные [Molyneaux2016; Vaquero2018], трековые [Reddy2015] и необычные. Необычные это роботы, которые не поддаются классификации, например змеевидные [Ye2007; Borenstein2007], шарообразные [Thangavelautham2017; Dubowsky2008; Dang2019] и другие.

Но самыми эффективными являются не одинокие роботы, но системы. В данных системах появляются дополнительные задачи, как архитектурного характера, телекоммуникационного и управляемого. Обычно системы состоят из нескольких одинаковых роботов [Vaquero2018], либо связка — коптер и шагающий [Chen2010; Cantelli2013].

Отдельным пластом роботов являются ползающие роботы [Schmidt2013], которые рассматриваются автором как перспективные в пещерах. К сожалению, пещерные роботы были найдены только для космических пещер [Parness2017]. Крепления для шагающих роботов устанавливают во всевозможных роботов, от шагающих и колесных, до специально разработанных под ползанье. Важным критерием для успешного робота, который может перемещаться по вертикальным поверхностям является способ адгезии с поверхностью. Существуют магнитный

[Lee2012; Tavakoli2012; Kotay1996; Xu2017], электрический [Li2017][33], негативного давления [Lee2012; Tavakoli2012; Papachristos2019], пневматический или помошью присосок [Nagakubo1994; Tlale2012], и с помощью когтей (механическая адгезия) [Parness2017; Bretl2006; SangbaeKim2005; Sintov2011]. Последний способ является самым применимым для пещер, так как стены очень рельефные.

Навигация в пещерах является нетривиальной задачей, поэтому необходимо рассмотреть какие сенсоры и алгоритмы, а также архитектурные решения использовались для преодоления проблем. Представленные статьи были взяты не только из прямой сферы, но также из смежных. К примеру, исследование трубопровода [Savin2017], завалов после техногенных катастроф. С точки зрения навигации основной проблемой является недостаток света, а также сильной неоднородности территории и обилия гранулированных поверхностей. На данный момент ученые мира стали стремиться решить данную проблему, благодаря проходящему соревнованию DARPA Subterranean Challenge. В данном направлении используются как лазерные дальномеры (лидары), так и визуальные SLAM алгоритмы [Mascarich2018a; Dang2019a; Fairfield2006; Chhaniyara2012]. С точки зрения архитектуры, наблюдается тенденция к модульности, а также к возможным защитам от потерь робота [Miller2019; Wei2009]. То есть, если робот был потерян, то остальные роботы все равно должны передавать друг другу данные. Очень важно уметь правильно передвигать робота по сыпучим грунтам, следующие работы посвящены этим проблемам. Основной критерий это решение задачи в настоящем времени [Tan2016; Savin2017; Chhaniyara2012; Tsounis2019; Li2009; Bjelonic2019; DeViragh2019; Buchanan2019].

Целью данной аспирантской работы является разработка метода, который поможет получить информацию по поверхности пещеры. Обычно под этим подразумевается только получения типа поверхности, эти статьи и были рассмотрены [Wu2016; Wu2020; Luo2017].

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

1.3 Классификация шагающих машин

Данная классификация основана на [Maloletov2015dinamica] работе. С помощью ног могут реализовываться локомоции различных типов. *Ходьбой* называется такой тип движения машины, при котором в каждый момент времени хотя бы один механизм шагания находится в опоре. Если существуют такие моменты времени когда ни одна из ног машины не контактирует с опорой, то такие движения называются *прыжками, скачками или бегом*. Если фаза движения машины с опорой на ноги перемежается фазой покоя, в которой машина неподвижно лежит на опорной поверхности, то такое движение называется *ползанием*. Ходьба, прыжки, скачки, бег и ползание предполагают что связи ног с опорной поверхностью являются неудерживающими. Однако ноги могут быть снабжены специальными устройствами — захватами, присосками и.т.п., позволяющими аппарату реализовывать удерживающие связи с опорной поверхностью. Тип движения такого аппарата называется *лазанием*.

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

1.4 Типы мобильных робототехнических комплексов

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

Мобильные робототехнические комплексы применяются при:

- боевом обеспечении спецопераций (заградительный огонь, разведка боем, разрушение заграждений и т. п.);
- проведении разведки;

- проведении взрывотехнических работ (поиск, извлечение, транспортирование и обезвреживание или уничтожение взрывоопасных предметов и неразорвавшихся боеприпасов; взрывные работы);
- обеспечении безопасности важных объектов.

По массе и основному назначению МРК можно разделить на четыре группы: сверхлегкие, массой до 35 кг; легкие, массой до 150 кг; средние, массой до 800 кг, и тяжелые, массой свыше 800 кг.

Разрабатываемый робот принадлежит к сверхлегким роботам.

1.5 Исследования с похожими роботами

Похожие роботы, такие как Boston Dynamics RHex [[altendorfer2001rhex](#)], Gakken Mechamo Centipede [[miller2008extreme](#)], Quattroped and TurboQuad [[chen2014quattroped](#); [chen2017turboquad](#)], а так же Whegs [[schroer2004comparing](#)] были рассмотрены. На основе данных было решено, что робот должен быть в длину меньше метра, в ширину — меньше 70 см (стандартная ширина дверного проема). Иметь меньше 32 лапок и высота лапки должна быть больше 10 см.

1.6 Оценка территории

Цель оценки территории это понять ее сложной. есть несколько подходов, но после аккуратного рассуждения было решено не оценивать территорию, а создавать ее самому, используя статистические функции. Мы рассматриваем территории с одинаковыми параметрами, как территории с одинаковой сложностью.

1.7 Оптимизация корпуса с использованием симуляции

В нашем случае мы не можем получить целевую функцию аналитически. Поэтому приходиться прибегнуть к симуляции. Есть различные методы симуля-

ции, но для нашей задачи робототехнический симулятор Gazebo подходит лучше всего. Его можно автоматизировать, он является бесплатным, и имеет открытый исходный код.

1.8 Классификация сенсорных устройств

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

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

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

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

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

Сенсорные устройства сверх ближнего действия используют для очувствления захватов и других частей манипуляторов, а также корпуса робота. Они позволяют фиксировать их контакт с объектами внешней среды (тактильные датчики),

измерять усилия, возникающие в месте взаимодействия (силометрические датчики), фиксировать проскальзывание объектов.

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

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

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

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

Глава 2. Оптимизация конструкции робота

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

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

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

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

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

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

Геометрическая модель робота представлена в виде трехмерного параллелепипеда. Количество движителей по каждому из бортов обозначается через γ . Разность фаз между соседними движителями обозначается через α (Рис. ??).

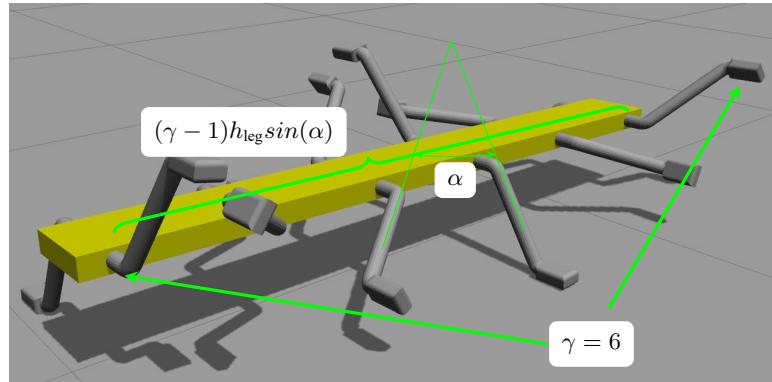


Рисунок 2.1 — Схема модели робота для генетического алгоритма

Эту задачу можно сформулировать как мультикритериальную задачу оптимизации, где необходимо максимизировать дистанцию, пройденную за фиксированное время, и минимизировать длину робота (??). Параметрами индивида являлись γ и α .

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

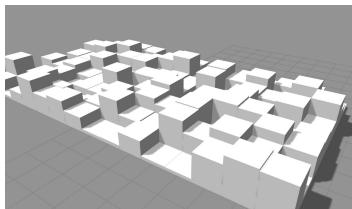
где δ дистанция, β адаптивный параметр, $\omega_{1,2} \in [0..1]$ весовые коэффициенты.

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

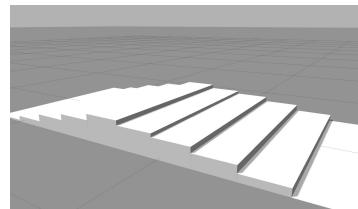
Было проведено два испытания. На первом испытании мы стремились найти только одного лучшего робота, только для местности T1 (Рис. ??). На втором этапе мы хотели видеть зависимость от разных типов ландшафтов при меньшем количестве индивидуальностей.

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

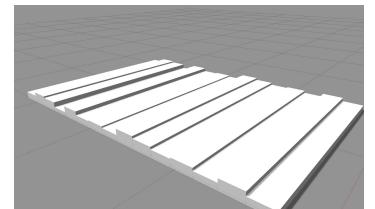
В соответствии с таблицей ?? (весовые коэффициенты равны 0.6 и 0.4 соответственно) видно, что мы имеем сходимость в параметрах. Видео прохождения препятствия лучшим индивидом



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



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



в) Т3: 2D-полосы с
гауссовской функции

Рисунок 2.2 — Примеры сгенерированных территорий

Таблица 1 — Зависимость между статистикой значения пригодности и типами ландшафта

Территория, популяция	Параметры	Среднее значение	Std целевая функция
Т1 (Рис. ??), 110	(6, 72)	2.38	0.34
Т2 (Рис. ??), 55	(5, 68)	1.95	0.35
Т3 (Рис. ??), 55	(6, 77)	2.08	0.33

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

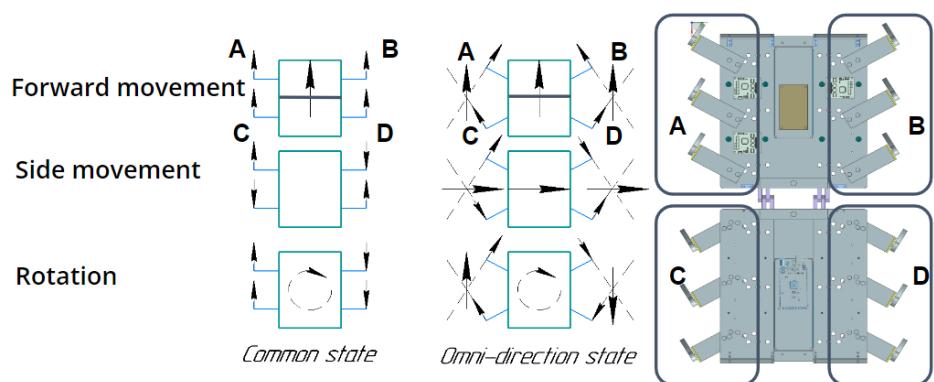


Рисунок 2.3 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоянии

На рисунке ?? 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. ???. Стрелка в центре робота — суперпозиция всех сил. Если изменить угол оси привода ноги в соответствии с предлагаемой концепцией, то возможно получить значения суперпозиции сил, представленные на рис. ?? в центре. То есть, чтобы переместить корпус робота направо, группы А и Д должны вращать ноги в одну сторону, а группы С и В — в противоположную. Правая часть рисунка иллюстрирует расположение групп ног на исследуемом роботе.

В рамках исследования было разработано четыре концепции робота СтриРус. В таблице ?? в строке недостатки объясняются основные причины перехода из одной итерации к другой. Концептуально было замечено, что высота ноги и наличие сегмента разительно влияет на проходимость конструкции.

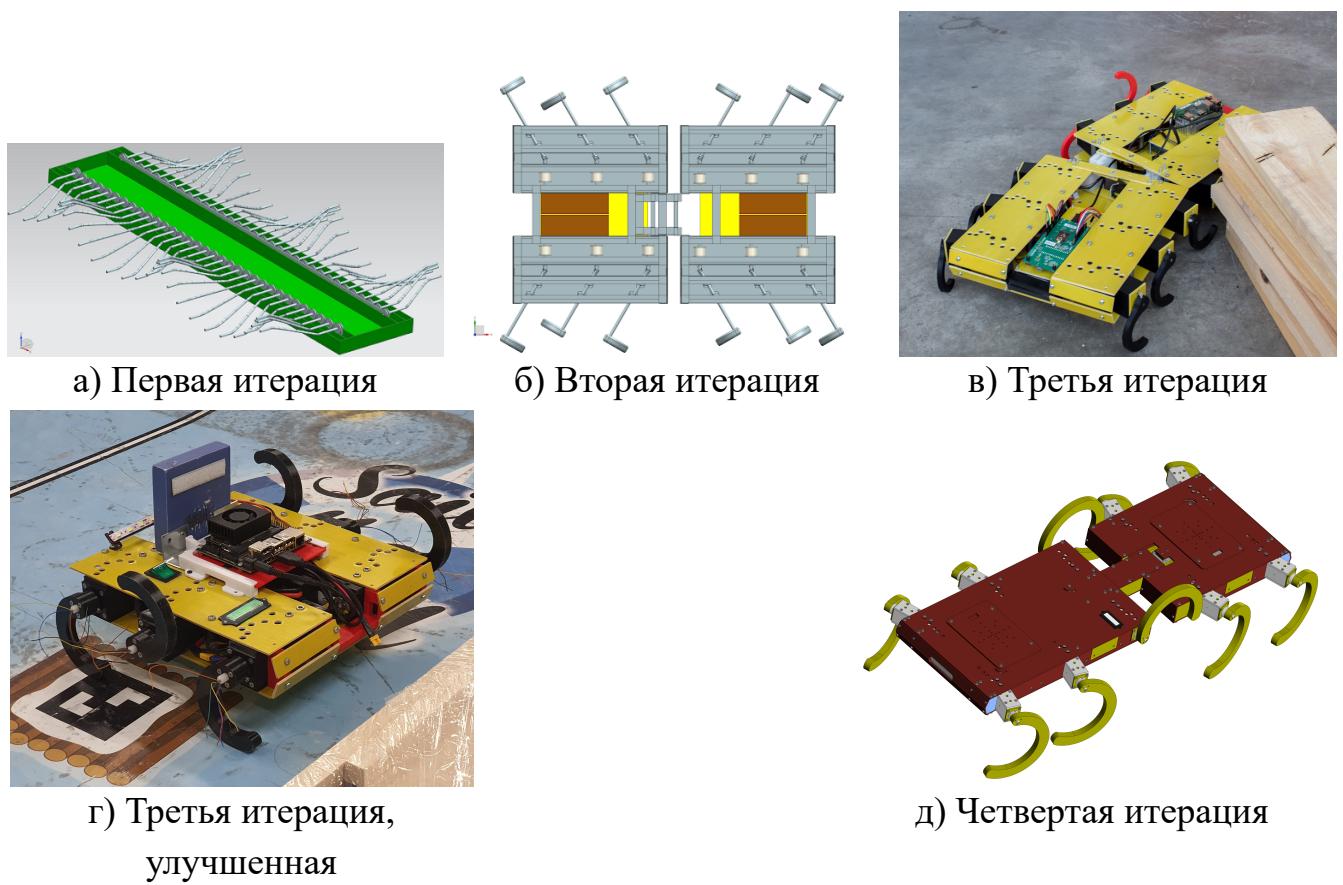


Рисунок 2.4 — Итерации робота СтриРуса

Таблица 2 — Сравнение итераций робота

Итерация	2 (Рис. ??)	3 (Рис. ??)	3+ (Рис. ??)	4 (Рис. ??)
Кол-во ног	12	12	6	10
Кол-во сегментов	2	2	1	2
Тип соединения	Тангаж	Тангаж, рыскание	—	Тангаж
Отн. угол телом — нога, градусы	0–45	0, 15, 30, 45	0	0, 15
Высота ноги, мм	60	60	90	170
Особенности	Механизм, который позволяет непрерывно изменять отн. угол	Двухстепенной узел, соединяющий сегменты	Большие ноги	Гигантские ноги
Недостатки	Слишком сложный механизм, изменяющий отн. угол	Мал. ноги. Избыточная вторая степень свободы в соединительном узле	1 сегмент. Маленькие ноги	—

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

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

Глава 3. Разработка и исследование преобразователя силы на основе Velostat

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

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

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

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

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



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 было решено характеризовать материал для случаев, когда нагрузка меньше, чем размер сенсора.

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

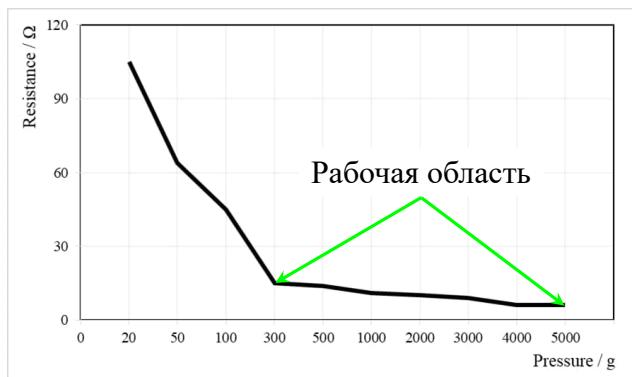


Рисунок 3.2 — График зависимости прикладываемого веса от сопротивления

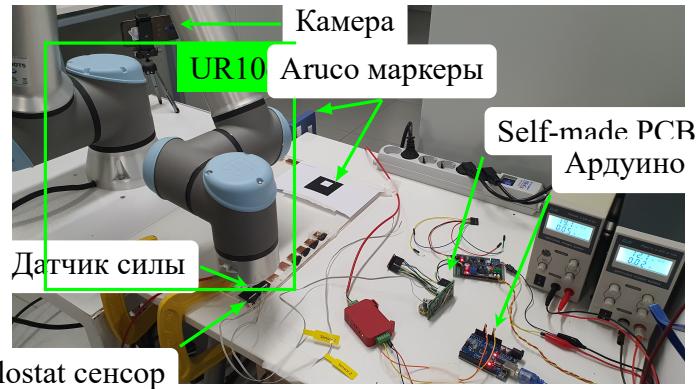
Исследования преобразователя Velostat, для случаев которых площадь нагрузки меньше, чем размер преобразователя, были проведены с помощью разработанного для этой цели исследовательского стенда. Среди требований к стенду можно отметить: необходимость контролировать силу нажатия и повторяемость эксперимента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

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

Видео работы стенда



Для касания только части объекта исследования были разработаны различные концевые инструменты. Такие размеры были выбраны из-за размеров преобразователя. Минимальный размер препятствия, которое может коснуться было



а) Общий вид экспериментального стенда



б) Способ нивелировать ошибку по углу
с помощью Aruco маркеров

Рисунок 3.3 — Разработанный экспериментальный стенд

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

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

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 4×4 . Размер преобразователя в эксперименте 15 на 15 мм. Манипулятор нажимает на преобразователь с одинаковым давлением на протяжении всех экспериментов в различ-



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

б) Сенсор представлен как 4×4 сетка

Рисунок 3.4 — Представление места нажатия инструментом сенсора и сам инструмент

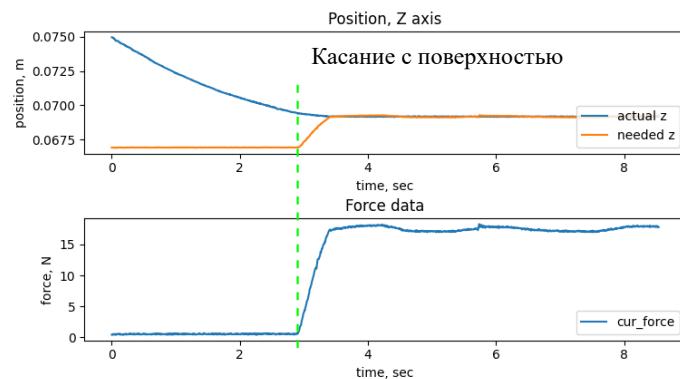


Рисунок 3.5 — Графики зависимости силы и позиции по z от времени во время эксперимента по исследованию Velostat

ные позиции на преобразователе, используя пять различных концевых эффекторов (диаметр окружности от 2 мм до 15 мм) (Рис. ??).

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

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{res}}})](1 - e^{-\frac{A}{p}}) \quad (3.1)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p}; \tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (3.2)$$

где, V_0 - начальное напряжение, p , A_i , B_i , τ_{res} , k_i - настраиваемые константы, t - текущее время, t_0 - время начала нажатия. Для решения задачи регрессии использовался робастный нелинейный алгоритм наименьших квадратов. Результат представлен ниже (Рис. ??).

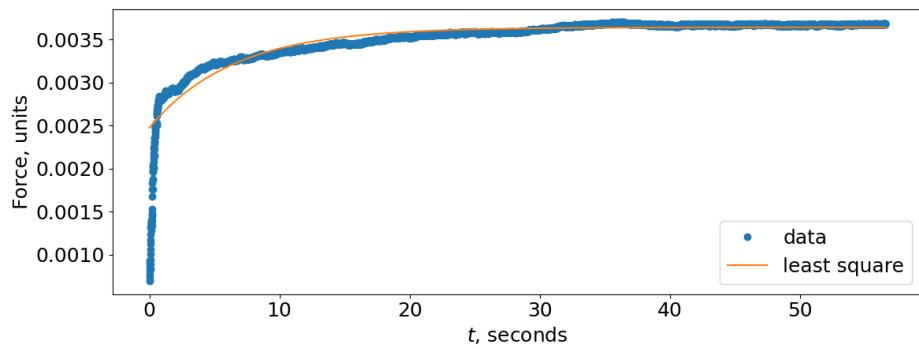
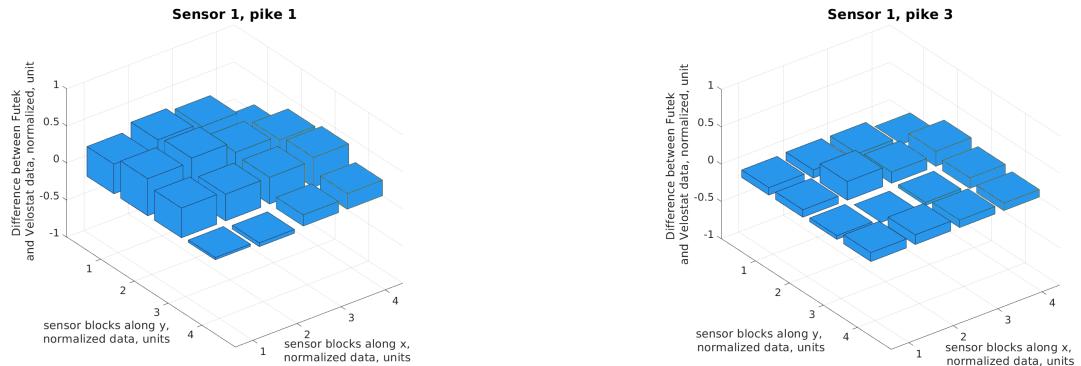


Рисунок 3.6 — Результаты статического эксперимента

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

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



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

Рисунок 3.7 — Динамический эксперимент

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

Глава 4. Разработка метода тактильного ощущения

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

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

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

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

Был реализован следующий алгоритм. Вначале необходимо очистить оригинальное облако точек от шумов и усреднить близлежащие точки с помощью Voxel grid. Потом из него генерируется полигональная сетка с помощью 2D Триангуляции Делоне (Рис. ??) (вогнутая оболочка (Рис. ??)). На ее основе получается необходимое плотное облако точек (Рис. ??).

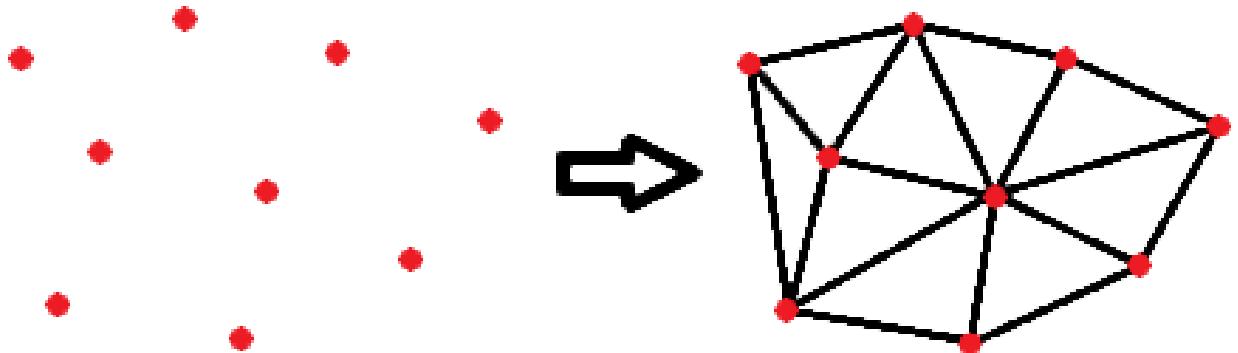
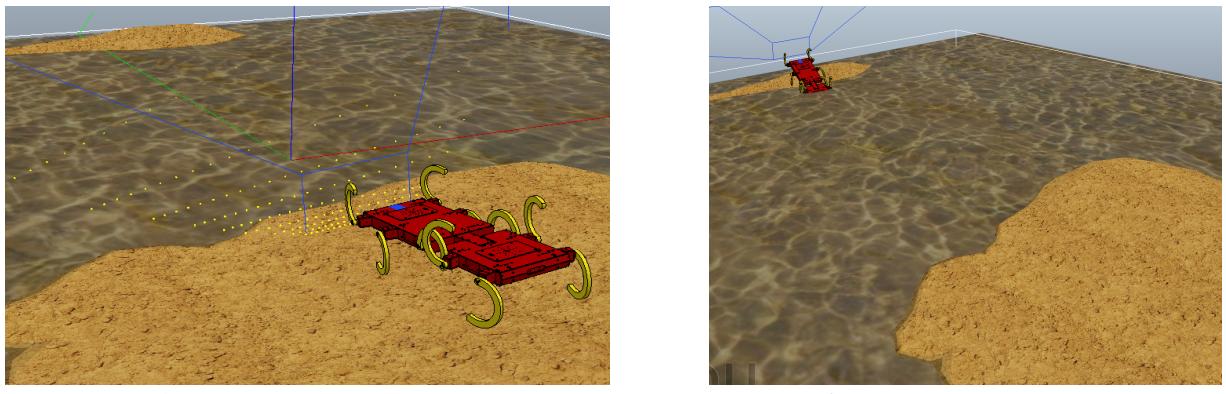


Рисунок 4.1 — 2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка)

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





а) Начало движения

б) Конец движения

Рисунок 4.2 — Эксперимент в симуляторе

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

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

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

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

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

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.

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

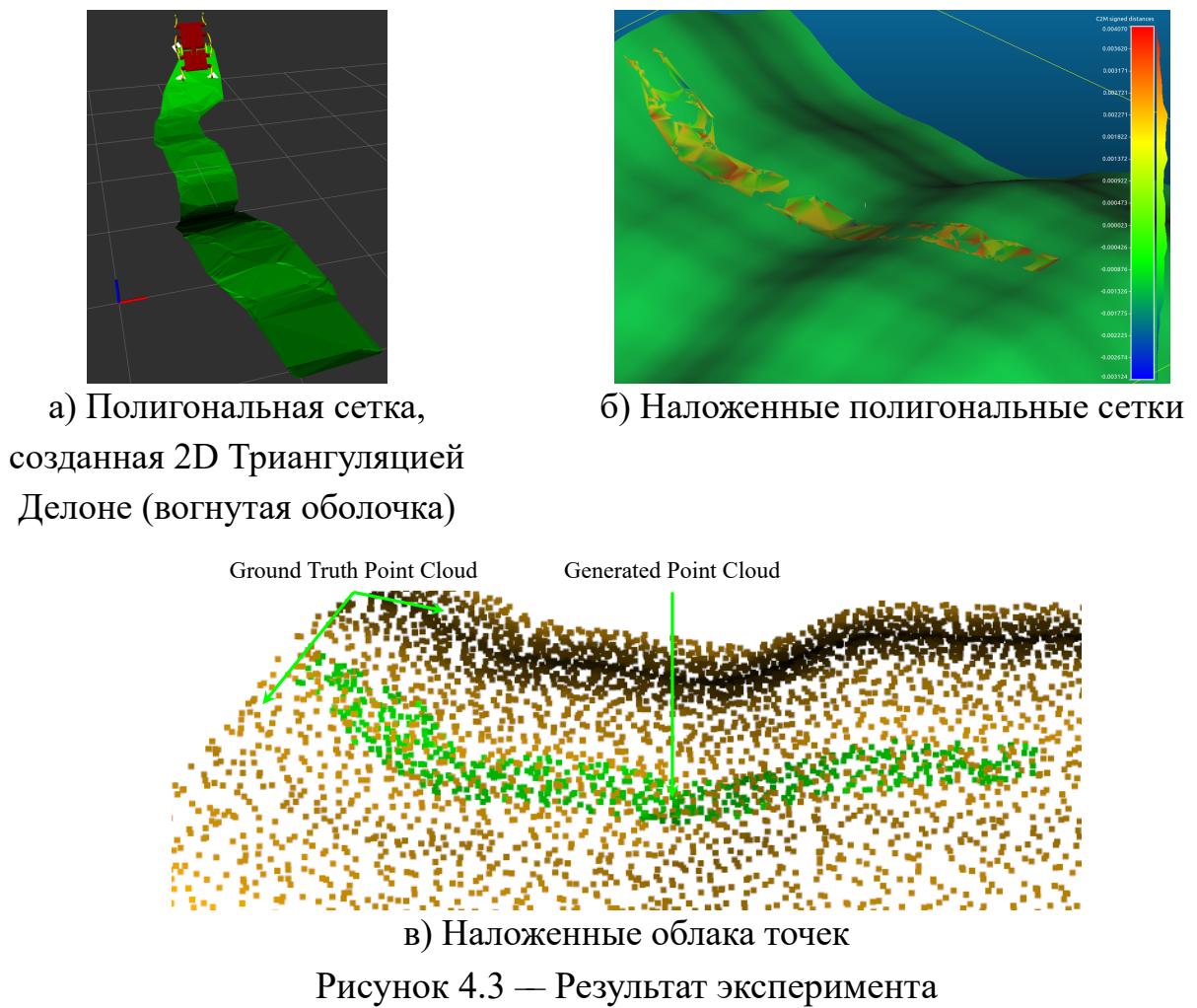


Рисунок 4.3 — Результат эксперимента

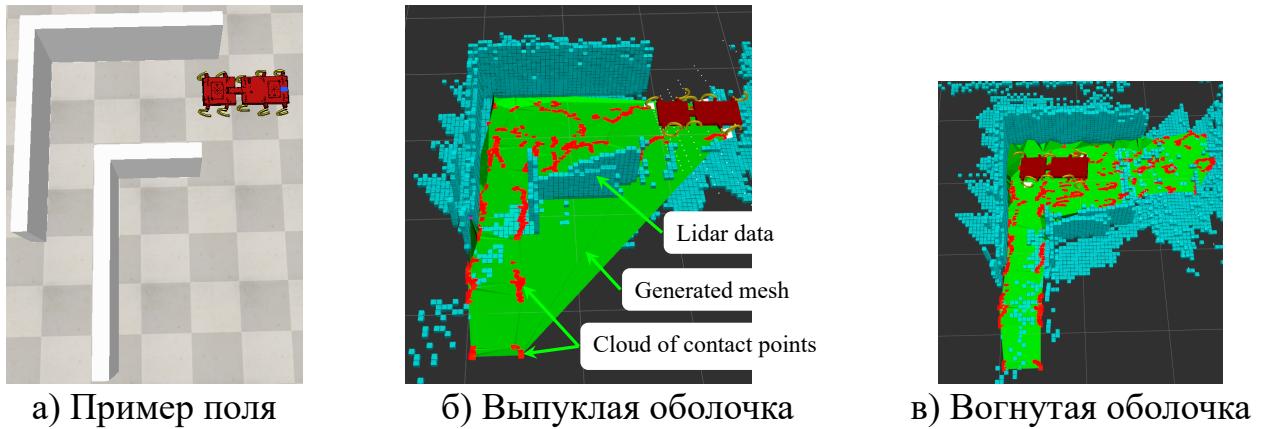
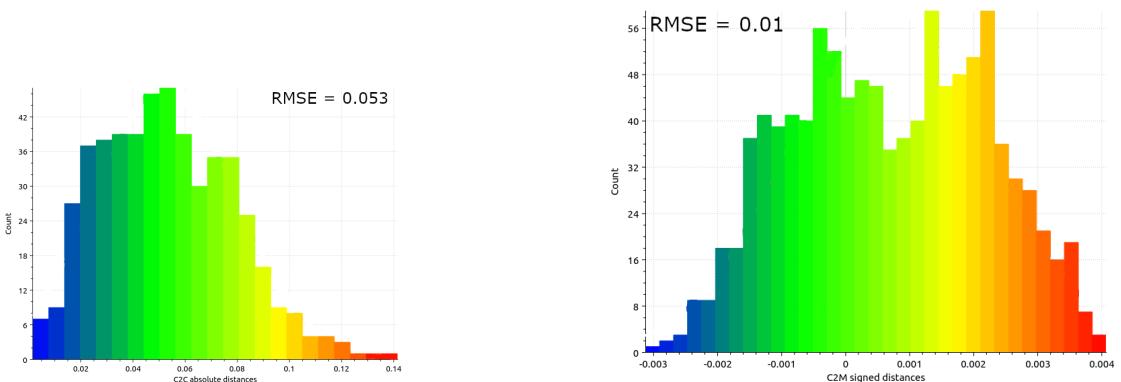


Рисунок 4.4 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне

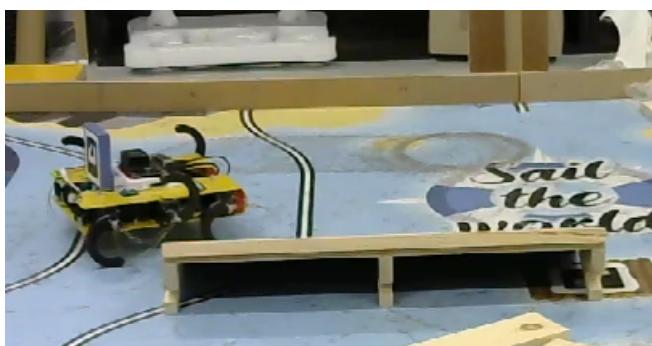
Все это было достигнуто благодаря разборному экспериментальному столу и 2ух степенному механизму, который ходит по окружности (Рис. ??). Для бесконечного движения пришлось соединить две ноги робота в одну. На рисунке ниже (Рис. ??) показаны как установлены сенсоры на получившейся ноге.



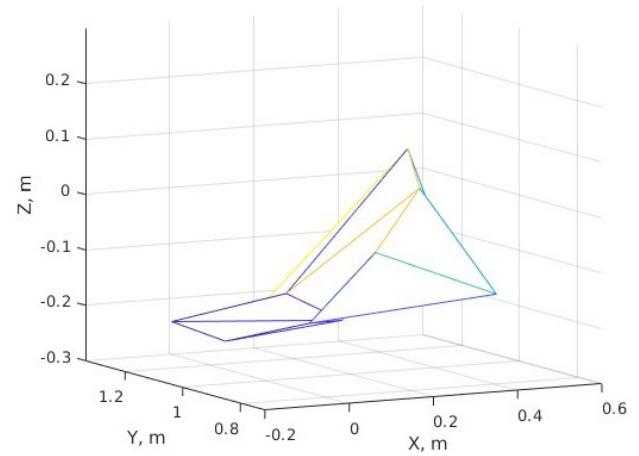
а) Метрика С2С: гистограмма ошибок (абсолютное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки)

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

Рисунок 4.5 — Метрики оценки точности полученной карты

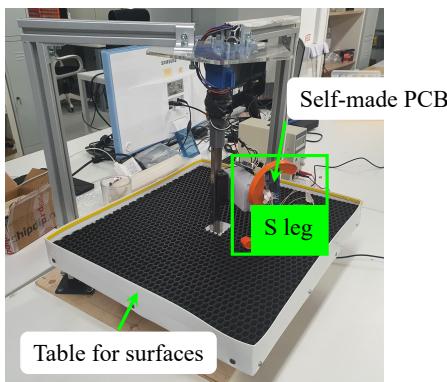


а) Робот проходит препятствие

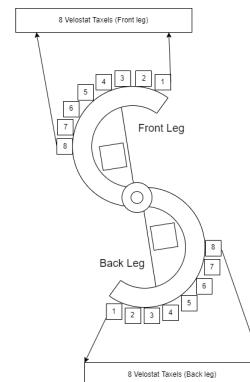


б) Полученная полигональная сетка

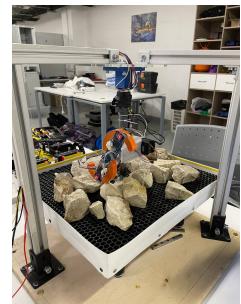
Рисунок 4.6 — Пример натурного эксперимента



а) Общий вид экспериментальной установки



б) Пояснение по расположению сенсоров на ноге робота



в) Каменистая поверхность

Рисунок 4.7 — Экспериментальная установка для определения типа поверхности

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

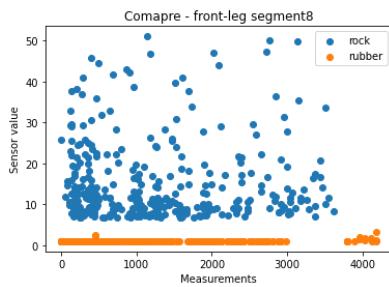
(Рис. ??)



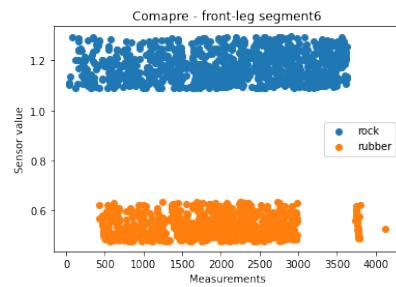
, камень (Рис. ??)



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



а) Передняя часть ноги, 8ой сегмент



б) Передняя часть ноги, бой сегмент

Рисунок 4.8 — 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. Они получены с помощью преобразователя силы на основе Velostat.

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

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

Заключение

Основной научный результат диссертации заключается в решении актуальной научной задачи, имеющей важное практическое значение: разработка метода тактильного очуствления для мобильного шагающего робота в закрытых пространствах естественного или искусственного происхождения.

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

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

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

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

Предложено использовать преобразователь силы на основе полимерного материала Velostat. **Установлено**, что данный преобразователь можно рассматривать как единое тело, при площади нажатия больше 50% площади сенсора.

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

Список сокращений и условных обозначений

a_n	и снова коэффициенты разложения Ми в дальнем поле соответствующие электрическим и магнитным мультиполям. Добавлено много текста, так что описание группы условных обозначений значительно превысило высоту этой группы...
b_n	
a_n	коэффициенты разложения Ми в дальнем поле соответствующие электрическим и магнитным мультиполям
b_n	сферические векторные гармоники
λ	длина волны электромагнитного излучения в вакууме
μ	магнитная проницаемость в вакууме
ω	частота падающей волны
$\hat{\mathbf{e}}$	единичный вектор
E_0	амплитуда падающего поля
j	тип функции Бесселя
k	волновой вектор падающей волны
L	общее число слоёв
l	номер слоя внутри стратифицированной сферы
n	порядок мультиполя
r, θ, ϕ	极坐标系下的极径、极角、方位角
ω	частота света, см. (1.7)
c	скорость света, стр. 13
k	модуль волнового вектора, см. (1.7), стр. 13
BEM	boundary element method, метод граничных элементов
CST MWS	Computer Simulation Technology Microwave Studio программа для компьютерного моделирования уравнен Максвелла
DDA	discrete dipole approximation, приближение дискретных диполей
FDFD	finite difference frequency domain, метод конечных разностей в частотной области

FDTD	finite difference time domain, метод конечных разностей во временной области
FEM	finite element method, метод конечных элементов
FIT	finite integration technique, метод конечных интегралов
FMM	fast multipole method, быстрый метод многополюсника
FVTD	finite volume time-domain, метод конечных объёмов во временной области
MLFMA	multilevel fast multipole algorithm, многоуровневый быстрый алгоритм многополюсника
MoM	method of moments, метод моментов
MSTM	multiple sphere T-Matrix, метод Т-матриц для множества сфер
PSTD	pseudospectral time domain method, псевдоспектральный метод во временной области
TLM	transmission line matrix method, метод матриц линий передач

Словарь терминов

TeX : Система компьютерной вёрстки, разработанная американским профессором информатики Дональдом Кнутом

панграмма : Короткий текст, использующий все или почти все буквы алфавита

Публикации автора по теме диссертации

Список рисунков

Список таблиц