



Разработка метода тактильного очувствления для мобильного шагающего робота

Соискатель: Олег Буличев

Руководитель: Александр Малолетов

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

Соискатель: Олег Буличев

Руководитель: Александр Малолетов

Вашему вниманию предлагается работа тема работы - Разработка метода тактильного ощущения для мобильного шагающего робота.



Исследование пещер

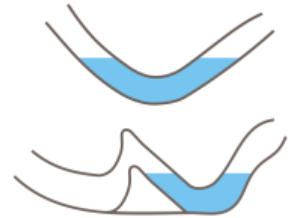
Цель — геологоразведка, изучение подземных экосистем.

Непроходимые места для человека

- Узкие галереи, огромные пропасти, обвалы, сифоны
- Скопление угарного газа
- Потеря ориентации в пространстве



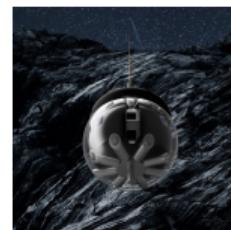
Могила в пещере



Сифоны

Зainteresованные стороны

1. Ученые — Горный институт Уральского отделения РАН, Университет Минас-Жерайса, Фонд Бруно Кесслера
2. Космические агентства — ESTEC (DAEDALUS), Роскосмос (FEDOR), NASA (CADRE)
3. Военные — Darpa Subterranean Challenge



DAEDALUS для исследования пещер на луне



DARPA
Subterranean
Challenge

└ Постановка задачи

└ Исследование пещер

Одним из способов нахождения новых минералов или форм жизни является исследование пещер спелеологами. Но данное мероприятие очень опасно, так как в пещерах можно встретить обвалы, сифоны *тык*, можно потеряться. Также возможно задохнуться от угарного газа.

Поэтому разные организации во всем мире пытаются начать применять робот при исследовании пещер. Это как и ученые из России, к примеру Горный институт Уральского отделения РАН, с которым Инополис подписал бумагу о совместных исследования, а также к примеру университет Минас-Жрелайса в Бразилии или фонд Бруно Кесслера в Италии.

Пещеры находятся не только на Земле, поэтому космические агентства всего мира также активно развиваю данную область. К примеру *тык* Европейское агентство собирается скоро отправить робота Дедала для исследования пещер на луне.

Нахождение новых минералов и форм жизни, а также способы автономной навигации в таких сложных местах, может помочь в развитии военной промышленности. Это понимает Американское Военное агентство — DARPA, проводя конкурс DARPA Subterranean Challenge *тык*, где работы в полностью автономном режиме должны исследовать различные виды пещер.

Исследование пещер

Цель — полигоризонтное, изучение подземных массивов.

Непрходимые места для человека

- Узкие галереи, ограниченные пространства, обвалы, сифоны
- Скопление угарного газа
- Потеря ориентации в пространстве



Могила в пещере



Сифоны

Занитесованные стороны

1. Ученые — Горный институт Уральского отделения РАН, Университет Минас-Жрелайса, Фонд Бруно Кесслера

2. Космические агентства — ESTEC (DADALUS), Roscosmos (FEDOR), NASA (CADE)

3. Военные — Опера Subterranean Challenge



DADALUS для исследования пещер на луне



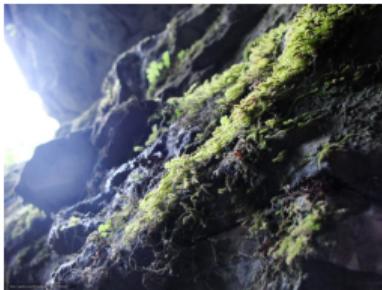
DARPA Subterranean Challenge



Характеристики пещер



(a) Лужа



(b) Мох

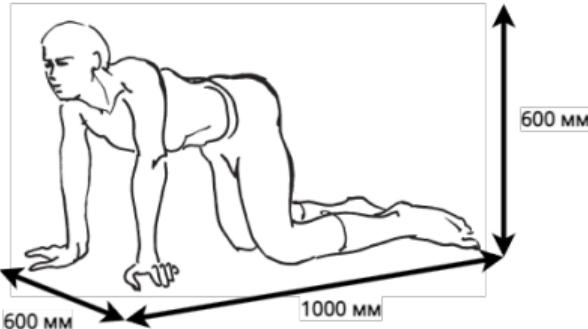


(c) Твердые породы

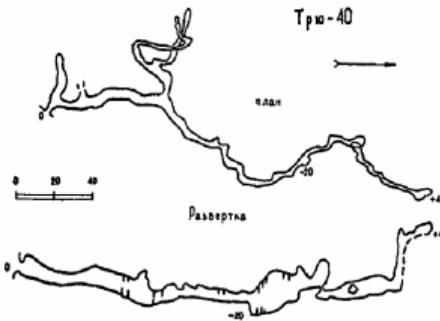


(d) Земля

Типы опорных поверхностей



Габариты пещеры (Свободная узость)



Протяженность пещер: 1-2 км

└ Постановка задачи

└ Характеристики пещер



Так как пещеры бывают абсолютно разными, я решил ограничить спектр пещер для которых решалась задача. Слева представлены типы опорных поверхностей, которые могут встречаться в пещерах *тык*. Это земляной грунт, малые водяные препятствия или лужи, твердые породы, а также мох.

Для разработки объекта исследования необходимо понимать также и габариты пещер, а также их протяженность. Изучив различные карты пещер, такие как на рисунке внизу *тык* было решено взять протяженность пещер в диапазоне от 1 до 2ух км.

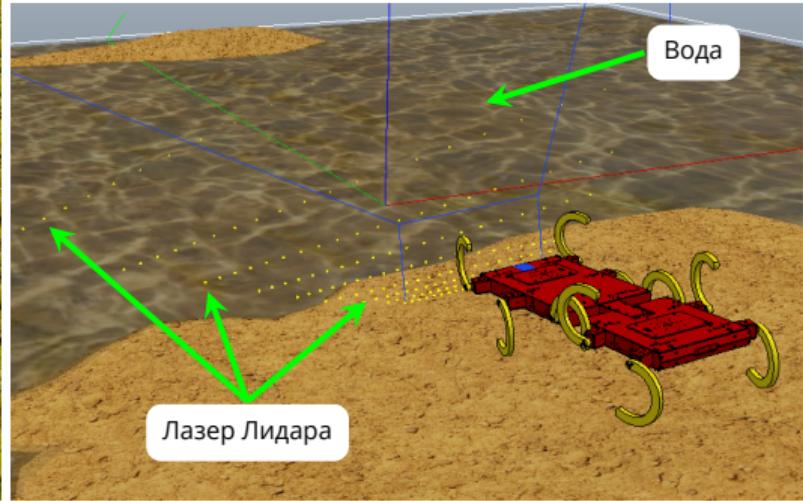
Основная задача это исследовать пещеры, которые не может исследовать человек физически из-за ограничения размеров. Человеку сложно долго ползать на четвереньках, поэтому я решил так, что робот должен быть как минимум меньше, чем средний мужчина в габаритах *тык*. А именно 600x1000x600 мм. Такой тип препятствий в спелеологии называется свободная узость.



Некорректные данные с оптических сенсоров



Мох приминается после ходьбы

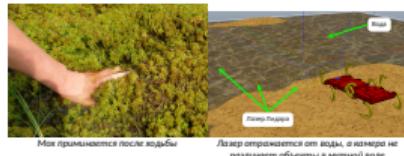


Лазер отражается от воды, а камера не различает объекты в мутной воде

└ Постановка задачи

└ Некорректные данные с оптических сенсоров

Некорректные данные с оптических сенсоров



Для исследования пещер роботу нужна система навигации. Классические системы навигации основаны на оптических сенсорах.

К сожалению, в пещерах встречаются случаи, когда оптические сенсоры: лидары, камеры, не смогут достоверно построить карту.

К примеру, мох *тык*. Он меняет свой объем при наступании на него и это возможно только измерить во время ходьбы. До или после будут уже другой рельеф.

Второй пример — построение опорной поверхности под лужей *тык*. Лидар будет отражаться от поверхности воды и построит гладкую поверхность, а камера не будет работать в мутной воде, как и зеленый лидар.

С использованием же разработанных методов, данная задача решаема, что и будет показано далее.

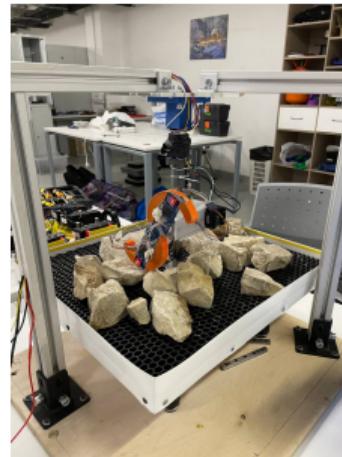


Цель работы

Разработать метод построения карты местности с определением геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности роботом с шагающими двигателями снабженными тактильными датчиками, без использования оптических сенсоров.



Определение геометрических свойств



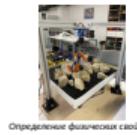
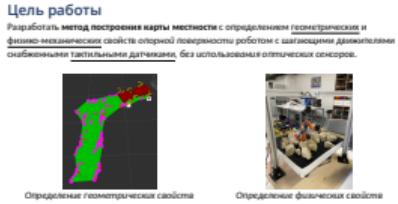
Определение физических свойств

└ Постановка задачи

└ Цель работы

Целью работы являлось разработать метод построения карты местности роботом с шагающими движителями, у которого на стопах установлены датчики силы. Задача должна решаться без использования оптических сенсоров.

Я разбил понятие построения карты на две задачи: определение геометрических свойств *тык* и физико - механических *тык*.



Определение физических свойств



"1, 2" Построение рельефа местности

Геометрические свойства:

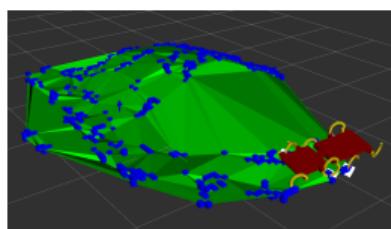
Входные данные: следовая дорожка, представленная в виде облака точек.

Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек.

Допустимая точность: 0.1 м



Исследуемая поверхность



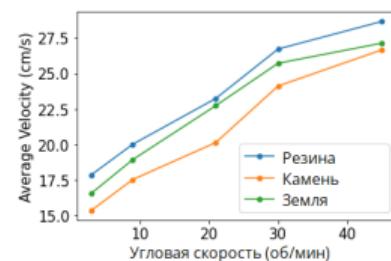
Следовая дорожка и полигональная сетка

Физико-механические свойства:

Входные данные: данные с внутренних датчиков робота.

Выходные данные: процентное соотношение упругих, твердых и пластичных свойств пройденной поверхности.

Допустимая ошибка: 20%



Данные для обучения Пример поверхности



└ Постановка задачи

└ "1, 2" Построение рельефа местности



Задачи 1 и 2 - определение геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности.

Хочу отметить, что задачи пронумерованы в порядке значимости, но не в порядке выполнения.

Рассматривая геометрические свойства, то входными данными я считаю следовую дорожку, которая представлена в виде облака точек, относительно абсолютных систем координат.

Результатом примененного метода решения должны получиться полигональная сетка пройденной поверхности, а также плотное облако точек. Эти представления являются типичными способами представления для работы с навигацией. *тык*. Синие точки — следовая дорожка, зеленым цветом — полигональная сетка

Целью же определения физико-механических свойств является определение какие свойства у пройденной поверхности превалируют: твердые, упругие или пластичные. Решение задачи основано на обучении модели машинного обучения на данных с внутренних датчиков робота *тык*. К примеру одним из примером данных является частота вращения ног.

Более точные формулировки задач с алгоритмом и принятыми предположениями будут далее.



Объект исследования

Класс многоногих шагающих роботов с

а) Цельным или сочленённым корпусом

б) Цикловыми движителями с
одной степенью свободы, управляемые
зависимо или независимо друг от друга.

Требования:

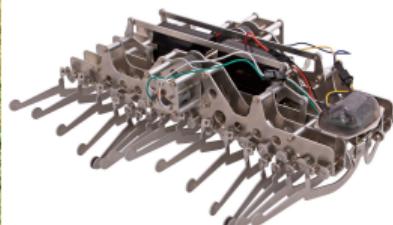
- Компактные размеры (меньше чем $1000 \times 600 \times 600$ мм)
- Залезать на препятствия высотой не меньше, чем $\frac{3}{4}$ длины корпуса
- Преодолевать представленные опорные поверхности



WHegs



Boston Dynamics RHex



Gakken Centipede

└ Постановка задачи

└ Объект исследования

Рассмотрев различные варианты роботов, было решено выбрать класс многоногих шагающих роботов с цельным или сочлененным корпусом и цикловыми движителями с одной степенью свободы, управляемые зависимо или независимо друг от друга.

Такой класс был выбран так как его представители показывают высокие показания профильной проходимости, что видно в видео справа *тык*. На рисунках представлены разные представители – вхегс, рхекс, сентипеде *тык*.

У вхегс 6 ног и 1 активное сочленение, у Рхекса также 6 ног, но один корпус. У обоих ноги управляются независимо. У Гаккен сентипеде же 32 ноги, нет сочленений, а движение одной ноги зависит от положения другой.

Данных класс роботов может соответствовать поставленным требованиям. Нужно, чтобы разработанный роботом меньше габаритов пещеры, мог залезать на препятствия высотой не меньше, чем $\frac{3}{4}$ длины корпуса, а также мог физически преодолевать препятствия, которые были заявлены как те, которые можно встретить в пещере.

Объект исследования

Класс многоногих шагающих роботов с

- а) Цельным или сочлененным корпусом
- б) Цикловыми движителями с одной степенью свободы, управляемые зависимо или независимо друг от друга.

Требования:

- Компактные размеры (меньше чем $1000 \times 600 \times 600$ мм)
- Залезать на препятствия высотой не меньше, чем $\frac{3}{4}$ длины корпуса
- Продолжать предоставленные открытые поверхности



WHegs



Boston Dynamics' RHex



Gakken Centipede

"З" Оптимизация кинематической схемы

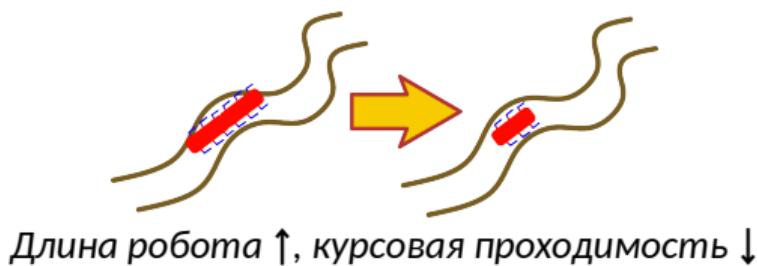
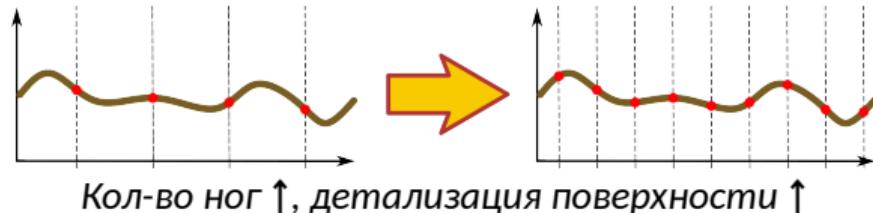
Решить задачу оптимизации

$$F = f(x) \rightarrow \max, \text{ где}$$

$f(x)$ — критерии: пройденная дистанция,
длина корпуса

(x) — параметр: **количество ног**

Количество ног имеет прямую
зависимость с длиной корпуса робота.



└ Постановка задачи

└ "3" Оптимизация кинематической схемы

У различных представителей этого класса, разное количество ног. Более того, количество ног также влияет и на построение карты, так как если у робота ног больше, то карта будет более детализированной *тык*, а следовательно - точнее.

Но с другой стороны, пещеры имеют много изгибов и при большой длине робот может застрять *тык*. То есть чем длиннее робот, тем хуже курсовая проходимость.

Более длинный робот может преодолевать больше препятствий, как это показано на рисунке *тык*. Он не провалится в яму, а из-за своей длины сможет ее пересечь.

Следовательно у нас возникает мультикритериальная задача оптимизации, где критерием является пройденная дистанция и длина корпуса. И задача - определить оптимальное количество ног.



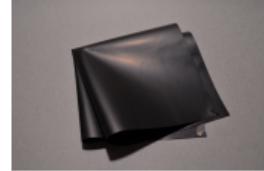
"4" Верификация преобразователя силы

Измерить характеристики материала для случаев,
когда площадь приложения силы меньше, чем
площадь активной части сенсора.

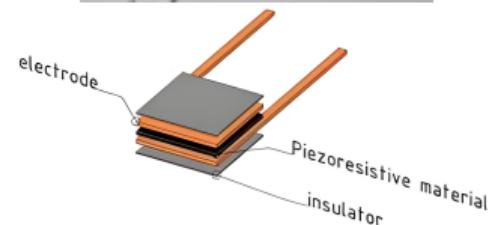
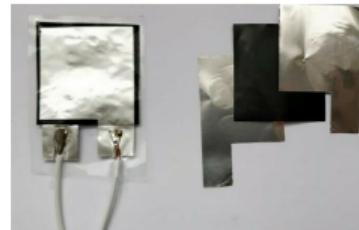
Входные данные: показания разработанного датчика и
значение реально приложенной нагрузки

Выходные данные: разница между нормализованным
значением с датчика и реальной нагрузкой

Допустимая ошибка: 10%



Материал Velostat



Преобразователь силы

└ Постановка задачи

└ "4" Верификация преобразователя силы

В первичной постановке задачи о построении карты, как для определения геометрических, так и физико-механических свойств, говорилось о том, что на роботе установлены датчики силы. После обзора различных решений, было решено разработать свой пьезорезистивный преобразователь силы на основе Velostat *тык*. Данный материал был выбран из-за его отличного соотношения цена/качество. Так как на робота нужно установить много датчиков на каждую ногу, это является важным фактором.

При изучения данного материала я заметил, что когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора, то при одинаковом давлении, показания будут разными. А это будет сильно влиять на работу алгоритмов. Примером является маленький камушек, на который робот наехал при ходьбе.

Поэтому было решено измерить характеристики преобразователя для таких случаев.

"4" Верификация преобразователя силы

Измерить характеристики материала для случая, когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

Входные данные: показания разработанного датчика и значение реально приложенной нагрузки

Выходные данные: разница между нормализованным значением с датчика и реальной нагрузкой

Допустимо ошибка: 10%



Пьезорезистивный преобразователь силы



Основные научные задачи исследования

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

└ Постановка задачи

└ Основные научные задачи исследования

Итого получаются следующие научные задачи. Это разработка двух методов — определение геометрических свойств и оптимизация кинематической схемы, методики по исследованию датчика силы, а также алгоритма определения физико-механических свойств опорной поверхности.

Основные научные задачи исследования

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



Положения, выносимые на защиту

1. **Метод построения карты местности**, состоящий в определении геометрической формы поверхности с помощью тактильного чувствования, 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 чувствования**, позволяющий различать материалы с упругими, жёсткими, пластичными свойствами.
3. **Критерий оптимизации** кинематической схемы многоногих шагающих роботов с цикловыми одностепенными движителями, включающий в себя показатели проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации. Определение на его основе габаритов и количества движителей шагающего робота.
4. **Зависимость** погрешности датчика силы на основе полимерного материала от площади пятна контакта относительно размеров датчика, применяемого для тактильного чувствования мобильного робота. **Методика** роботизированного исследования датчика силы.

└ Постановка задачи

└ Положения, выносимые на защиту

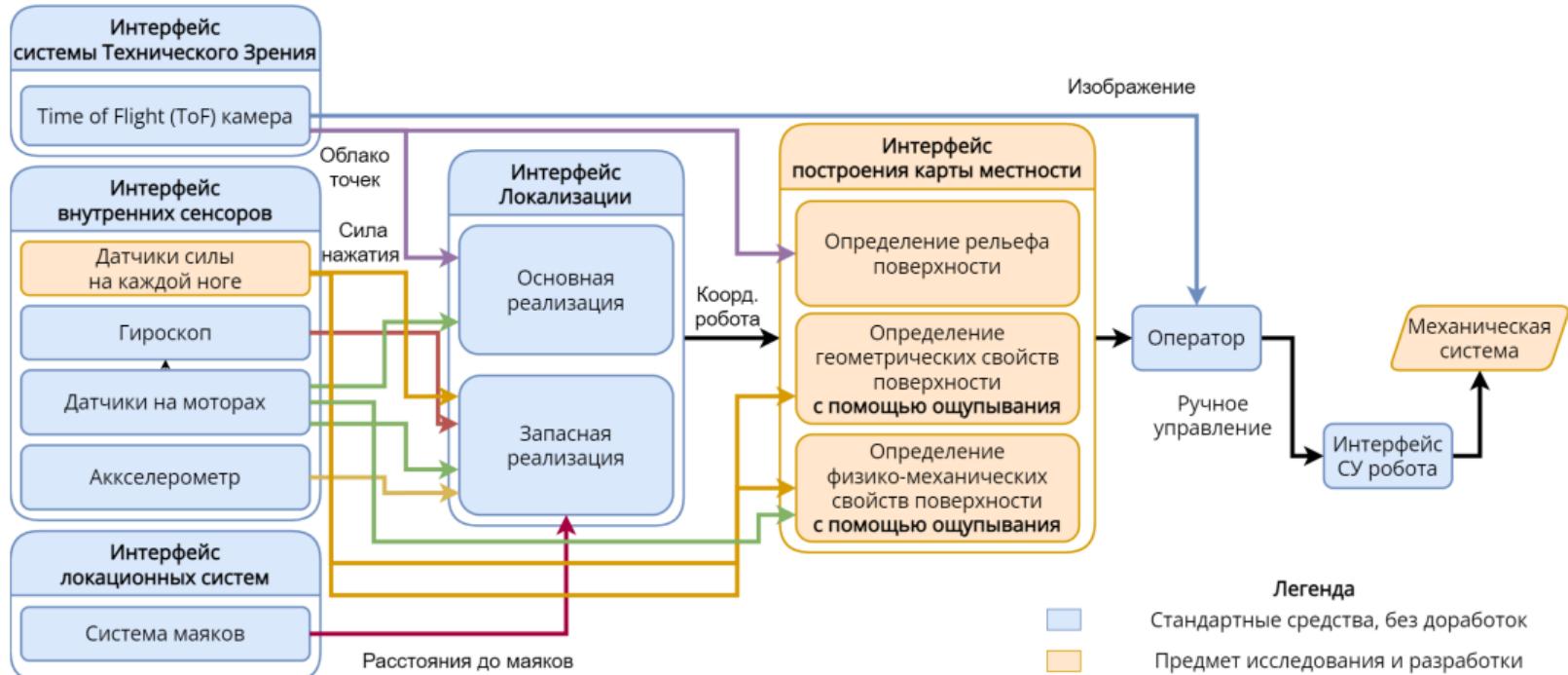
На защиту выносятся 2 метода, зависимость и критерий оптимизации кинематической схемы

Положения, выносимые на защиту

1. Метод построения карты местности, состоящий в определении геометрической формы поверхности с помощью тактильного сенсорирования, который позволяет решать задачу определения плана и профиля поверхности в условиях отсутствия видимости и при движении по поверхности, находясь под водой.
2. Метод определения физико-механических свойств открытой поверхности на основе тактильного сенсорирования, позволяющий различать материалы с упругими, жесткими, пластичными свойствами.
3. Критерий оптимизации кинематической схемы многоступенчатого шагающего робота с цикловыми единицами движениями. Использование в себе показателя преводимости, показателя спорной зависимости и её дифференциации. Определение на его основе габаритов и количества движителей шагающего робота.
4. Зависимость погрешности датчика силы на основе полиморфного нейрона от площади пятна контакта относительно размеров датчика, примененного для тактильного сенсорирования мобильного робота. Методика работоспособенного исследования датчика силы.

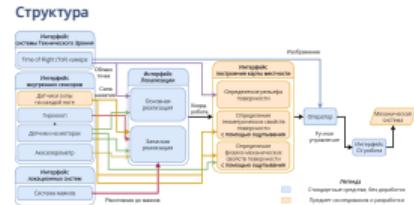


Структура



└ Обзор существующих решений

└ Структура



Робот — сложная система с множеством подсистем и большую часть подсистем я сам лично не делал. На слайде *тык* представлена структура проекта, где оранжевым цветом представлено то, что было разработано мной и где есть научная новизна, а синим - стандартные решения, которые были интегрированы с минимальными наработками.

Так как у целью было построение карты, то робот управлялся в ручном режиме, задача управления была решена максимально тривиально.

Если кратко, то из датчиков на роботе были установлены IMU, энкодеры и датчики силы. Задача локализации решается с помощью системы радио маяков или Aruco маркеров в лаборатории, а из системы технического зрения — камера, которая также дает и облако точек.



Обзор источников

- **Задача оптимизации конструкции:** Б. Петриашвили (СССР), Stefano Nolfi (Италия), Dario Sanch-Pradel (Италия), S. Feng (США) и др.
- **Шагающие цикловые роботы:** Е. С. Брискин (Россия), Ю. Д. Андриантов (СССР), Edward Z. Moore (Канада), Wei-Hsi Chen (Китай) и др.
- **Верификация Velostat:** Igor Vehec (Словакия), Robert Schroer (США) и др.
- **Определение геометрических свойств поверхности:** Tobias Ebert (Германия), Subodh Kumar (США), И. Рядчиков (Россия), Shan Luo (Британия) и др.
- **Определение физико-механических свойств поверхности:** X. Alice Wu (США), Krzysztof Walas (Польша), Hendrik Kolenbach (Швейцария) и др.

└ Обзор существующих решений

└ Обзор источников

Обзор источников

- Задача оптимизации конструкции: Б. Петриашвили (СССР), Stefano Nolfi (Италия), Dario Sanch-Prado (Испания), S. Feng (ЦУИА) и др.
- Шагающие цикловые роботы: Е. С. Брансден (Россия), Ю. Д. Андрианов (СССР), Edward Z. Moore (Канада), Wei-Hsi Chen (Китай) и др.
- Верификация Velostat: Igor Vehec (Словакия), Robert Schroer (США) и др.
- Определение геометрических свойств поверхности: Tobias Ebert (Германия), Subroth Kumar (США), И. Радинов (Россия), Shun Luo (Британия) и др.
- Определение физико-механических свойств поверхности: X. Alice Wu (США), Krzysztof Walas (Польша), Hendrik Kolverbach (Швейцария) и др.

При разработке своих подсистем я базировался на работах следующих ученых со всего мира.

При решении задачи оптимизации количества ног — на работы Петриашвили, СтефANO Нолфи, Feng и других.

Шагающими цикловыми роботами занимается половина этого диссертационного совета, поэтому я хочу выделить Эдварда Мура из канады и Wei Hsi из Китая.

В основном материал Велостат исследовал Игорь Вехец, но также были и другие ученые к примеру Роберт Шроер.

Для определения геометрических свойств поверхности, мне пришлось изучить работы ученых из Германии, США, России и Британии.

Мой алгоритм по определению физико-механических свойств в первую очередь базировался на работе пост дока Алисы Ву Стенфордского университета.



Определение количества ног

Решить $F = f(x) \rightarrow \max$, где

$f(x)$ — Критерии: пройденная дистанция, длина корпуса

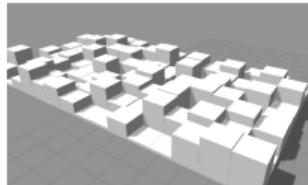
x — Параметры: количество ног, сдвиг фазы между соседними ногами

Метод решения: Генетический алгоритм: Open AI-ES

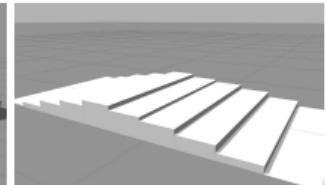
Алгоритм: генерируется множество особей, а также семейство территорий с одинаковой сложностью. За фиксированное время, с постоянной угловой скоростью на моторах, каждый робот проходит это семейство территорий и записываются данные.

Предположения: 1) есть только сухое трение между ногами и поверхностью. 2) Созданные поверхности с помощью одной функции и параметров имеют одинаковую сложность.

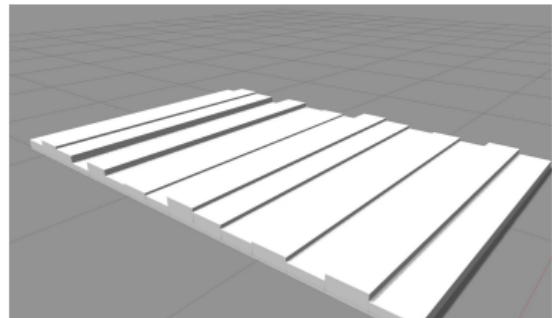
Утверждение: Количество ног имеет прямую зависимость с длиной корпуса робота.



Равномерное
распределение
ячеек



Гауссово
распределение
ячеек



└ "3" Оптимизация кинематической схемы

└ Определение количества ног

Так как детализация покрытия опорной поверхности зависит от количества ног, то я решил начать с разработки робота. Первым его этапом было определение количества ног.

Было решено оценивать проходимость с помощью экспериментов, где робот с конкретным количеством ног проходит по семейству территорий с одинаковой сложностью за фиксированное время. На моторы подается постоянная угловая скорость.

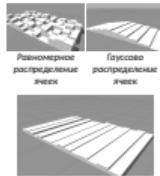
Семейства территорий с одинаковой сложностью - семейства, которые были сгенерированы с помощью одинаковых параметров. *тык* К примеру с помощью нормального распределения, где одинаковый параметр дисперсии.

Также было сделано предположение, что количество ног не сильно влияет на проходимость на гибридных поверхностях, такие как мох, поэтому рассматривается только сухое трение между ногами и поверхностью.

Задача решалась с использованием генетического алгоритма Open AI-Es.

Определение количества ног

Решение $F = f(x) \rightarrow \text{мин.}$, где
 $f(x)$ — Критерий проходимая дистанции, длина корпуса
 x — Параметры количества ног, каждые фазы между
 сокращения ногами
Метод решения: Генетический алгоритм: Open AI-Es
Алгоритм: генерируется множество особей, а также
 семейство территорий с одинаковой сложностью. За
 фиксированное время, с постоянной угловой скоростью на
 моторах, каждый робот проходит это семейство территорий и
 записывается данные.
Предположения: 1) есть только сухое трение между ногами и
 поверхностью; 2) Созданные поверхности с помощью
 одной функции и параметров имеют одинаковую сложность.
Утверждение: Количества ног имеет прямую зависимость с
 длиной корпуса робота.





Описание механической системы

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

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

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

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

где, M_i — матрица массово-инерционных характеристик; m_i — масса тела; I_i — тензор инерции; \ddot{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.

└ "3" Оптимизация кинематической схемы

└ Описание механической системы

Для симуляции работы робота необходимо описать его математическую модель. Рассматривалась механическая система из абсолютно твердых тел, состоящая из корпуса робота и некоторого количества ног. Так как количество ног меняется, то показаны обобщенные формулы.

Я расписал дифференциальные уравнения механической системы в известной форме *тык*. В английской литературе данный метод называется методом Ньютон Эйлера.

Описание механической системы

$$\dot{M}\ddot{\vec{q}} = \vec{F} \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_s \end{bmatrix}, \quad M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3x3} & 0 \\ 0 & l_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{q}^T = \begin{bmatrix} \vec{q}_1^T & \cdots & \vec{q}_s^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

где, M — матрица массово-инерционных характеристик; m_i — масса тела; l_i — линейные инерции; \vec{q}_i — вектор обобщенных координат; E — единичная матрица; \vec{F} — вектор обобщенных сил; \vec{v}_i — вектор линейной скорости; $\vec{\omega}_i$ — вектор угловой скорости; \vec{F}_i , $\vec{\tau}_i$ — силы и моменты сил взаимодействия.

$$\vec{F}^T = \{ \dots \vec{F}_1^T, (\vec{\tau}_1 - \vec{\omega}_1 \times l_1 \vec{q}_1)^T, \dots \} \quad (4)$$



Наложенные связи

Тела соединены цилиндрическими шарнирами:

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

$$\vec{q}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{x}_i^T & \vec{Q}_i^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

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

где ϕ — функция связи; t — время; \vec{q}_i — вектор обобщенных координат, включающий в себя координаты центра масс \vec{x}_i и кватернион \vec{Q}_i , описывающий ориентацию тела в пространстве; $G(\vec{q}_i)$ — матрица, вид которой зависит от выбранной системы координат; k — коэффициент вязкого трения в шарнире.

└ "3" Оптимизация кинематической схемы

└ Наложенные связи

Эти дифференциальные уравнения дополнены связями. Тела соединены цилиндрическими шарнирами. Ориентация описана кватернионами, так как робот может переворачиваться и может возникнуть складывание рамок, если будем использовать углы Эйлера.

Хочется отметить, что в шарнире учитывается коэффициент вязкого трения.

Наложенные связи

Тела соединены цилиндрическими шарнирами:

$$\phi(\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n, t) \geq 0 \quad (5)$$

$$\dot{q}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{Q}_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\ddot{q}_i = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{i,1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\ddot{y}_i = \tau_i^T \ddot{q}_{i,1} - k_i \dot{q}_i \quad (8)$$

где ϕ — функция связи; i — архив; \dot{q}_i — вектор обобщенных координат, включающий в себя координаты центра масс \dot{x}_i и кватернион \dot{Q}_i , определяющий ориентацию тела в пространстве; $G(\dot{q}_i)$ — матрица, вид которой зависит от выбранной системы координат; k — коэффициент вязкого трения в шарнире.

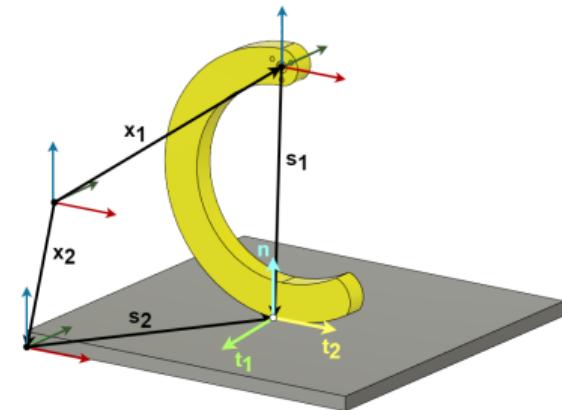
Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота

$$\phi_u(\vec{q}) \geq 0 \quad (9)$$

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

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

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



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

└ "3" Оптимизация кинематической схемы

└ Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота

Для шагающих роботов критично важно правильно описать взаимодействие с опорной поверхностью. Используется модель сухого трения, описанная конусом трения.

На рисунке *тык* предоставлено обозначение радиус векторов, для решения задачи направления сил реакции опоры и трения в общем виде.

Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота

$$\begin{aligned} \phi_n(\mathbf{z}) &\geq 0 \quad (9) \\ \phi_n(\mathbf{z}) = (\mathbf{x}_1 + \mathbf{z}_1 - \mathbf{x}_2 - \mathbf{z}_2) \cdot \mathbf{n} &= 0 \quad (10) \\ \frac{d}{dt} \phi_n(\mathbf{z}) = [\mathbf{n}^\top \ (\dot{\mathbf{x}}_1 \times \mathbf{n})^\top - \mathbf{n}^\top \ (-\dot{\mathbf{x}}_2 \times \mathbf{n})^\top] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{z}}_1 \\ \dot{\mathbf{z}}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_1 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} &= 0 \quad (11) \end{aligned}$$

(здесь $\phi_n(\mathbf{z})$ — функция слепан; μ — коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью; радиус-векторы $\mathbf{x}_{1,2}$, $\mathbf{z}_{1,2}$ и орты координатных осей $\mathbf{l}_{1,2}$ показаны на рисунке; $f_{1,2}$ — значения сил трения адольф осей $\mathbf{l}_{1,2}$;

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

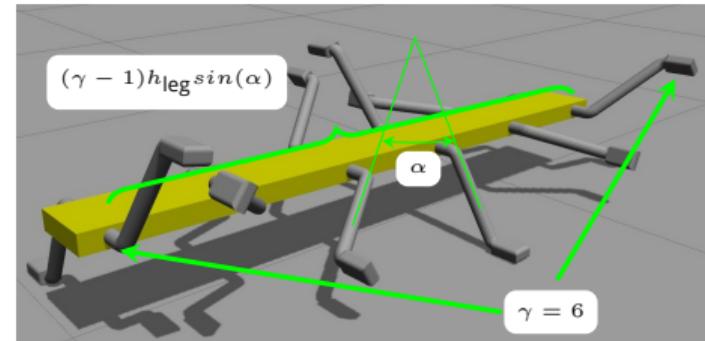


Целевая функция

$$F \rightarrow \max = \beta (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) + (1 - \beta) \delta^{\omega_1} (L)^{\omega_2} \quad (13)$$

$$L = \frac{1}{(\gamma - 1) h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \quad (14)$$

Где β – адаптивный параметр,
 $\omega_{1,2} \in [0..1]$ – весовые коэффициенты,
 δ – пройденный путь,
 L – упрощенная длина робота



Геометрическое представление особи

└ "3" Оптимизация кинематической схемы

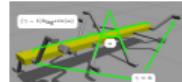
└ Целевая функция

Целевая функция

$$F \rightarrow \max = \beta (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) + (1 - \beta) \delta^{0.5} (L)^{0.5} \quad (13)$$

$$L = \frac{1}{(\gamma - 1) \omega_{\text{up}} \sin(\alpha)} \quad (14)$$

где β – аддитивный параметр,
 $\omega_{1,2} \in [0..1]$ – весовые коэффициенты,
 δ – пройденный путь,
 L – упрощенная длина робота



Геометрическое представление особы

Целевая функция выглядит следующим образом. В формуле делта это пройденный путь, а L – упрощенная длина робота, без лишних констант. Омеги – весовые коэффициенты, их можно воспринимать следующим образом. Сумма коэффициентов равна 1. Настраивая данные коэффициенты можно показать, что в конкретной оптимизации важнее: проходимость или размеры робота.

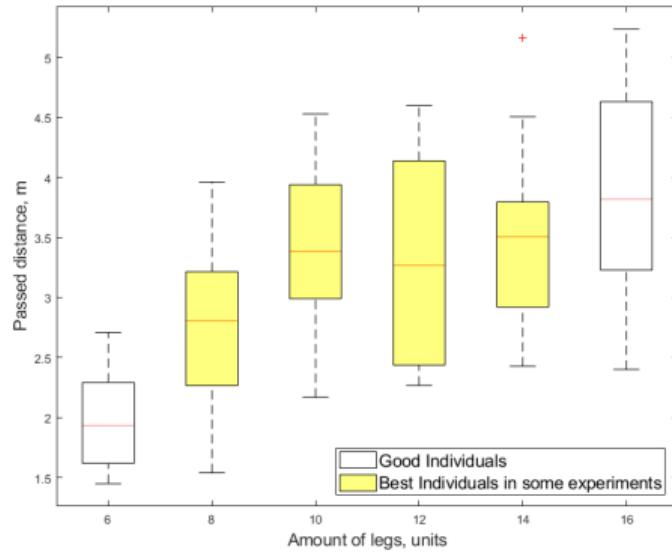
В данном прототипе подразумевалось, что ноги двигаются зависимо друг от друга, поэтому сдвиг фазы между соседними ногами влияет на длину робота. На рисунке объяснены компоненты формулы

тык



Закономерность

Лучшие роботы в экспериментах начинались с 10 до 14 ног для различных значений ω . Это объясняется критерием статического равновесия. В таком случае минимум 4 ноги всегда касаются поверхности.



Зависимость между кол-вом ног и
пройденной дистанцией

└ "3" Оптимизация кинематической схемы

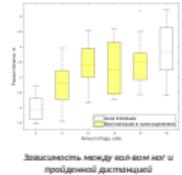
└ Закономерность

Результатом оптимизации получена зависимость количества ног робота в зависимости от различных весов. пары омега тоже менялись. Этот массив данных собирался и был представлен в виде блочной диаграммы с ограничителями выбросов, где *тык* показаны квартили каждой выборки.

Лучшие результаты были получены, когда ног было от 10, до 14и.

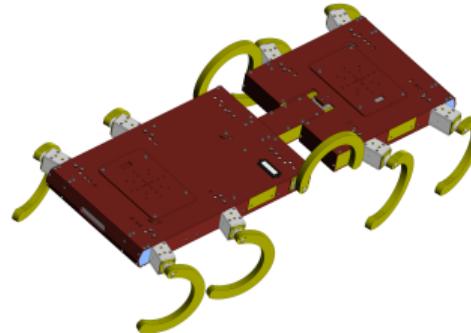
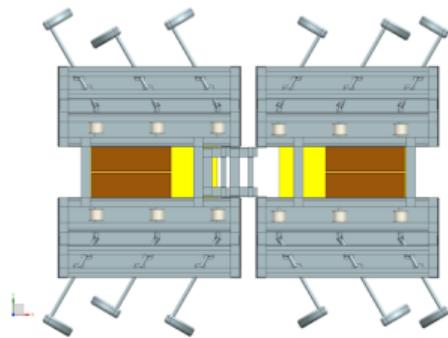
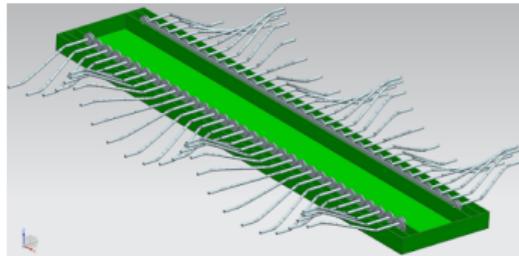
Закономерность

Лучшие работы в экспериментах начинались с 10 до 14 ног для различных значений ω . Это объясняется критерием статического равновесия. В таком случае минимум 4 ноги всегда касается поверхности.





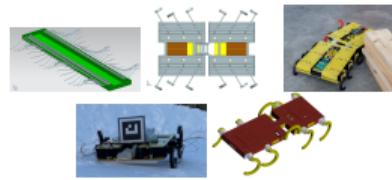
Прототипы робота



└ "3" Оптимизация кинематической схемы

└ Прототипы робота

Прототипы робота



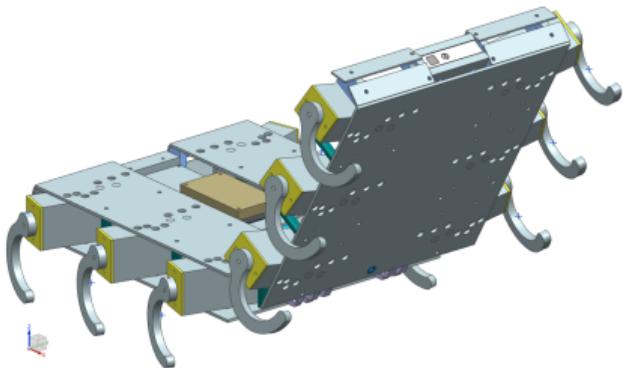
На основе полученной зависимости, разрабатывались различные прототипы. Можно выделить 5 прототипов, 2 из которых были собраны натурно. Более того, один был апробирован в приближенных к реальным условиям среде, в снегу *тык*.

Были роботы с одним и без сочленений, менялась длина ног.

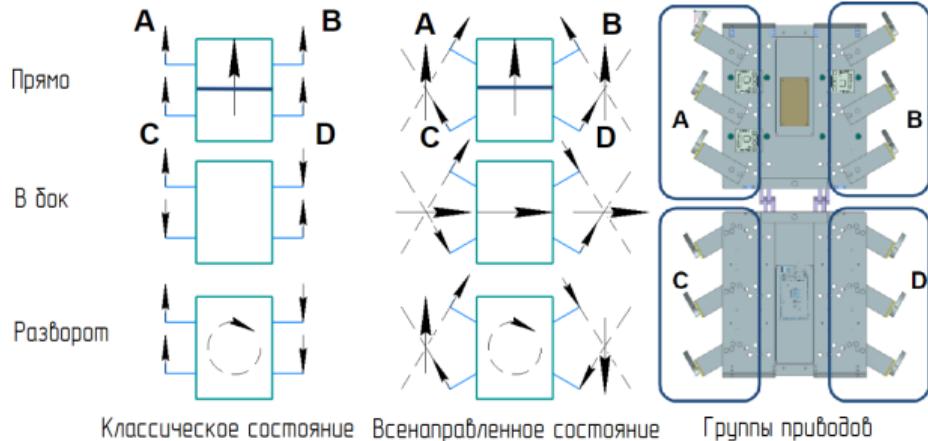
Экспериментально было выяснено, что 10 но лучше, чем 12, так как при той же длине корпуса, можно сильно увеличить длину ног, что сильно влияет на профильную проходимость.



Особенности конструкции



Одноступенчатый активный сегмент,
соединяющий 2 части робота

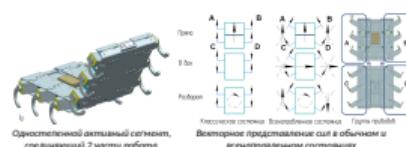


Векторное представление сил в обычном и
всеноправленном состояниях

└ "3" Оптимизация кинематической схемы

└ Особенности конструкции

Особенности конструкции

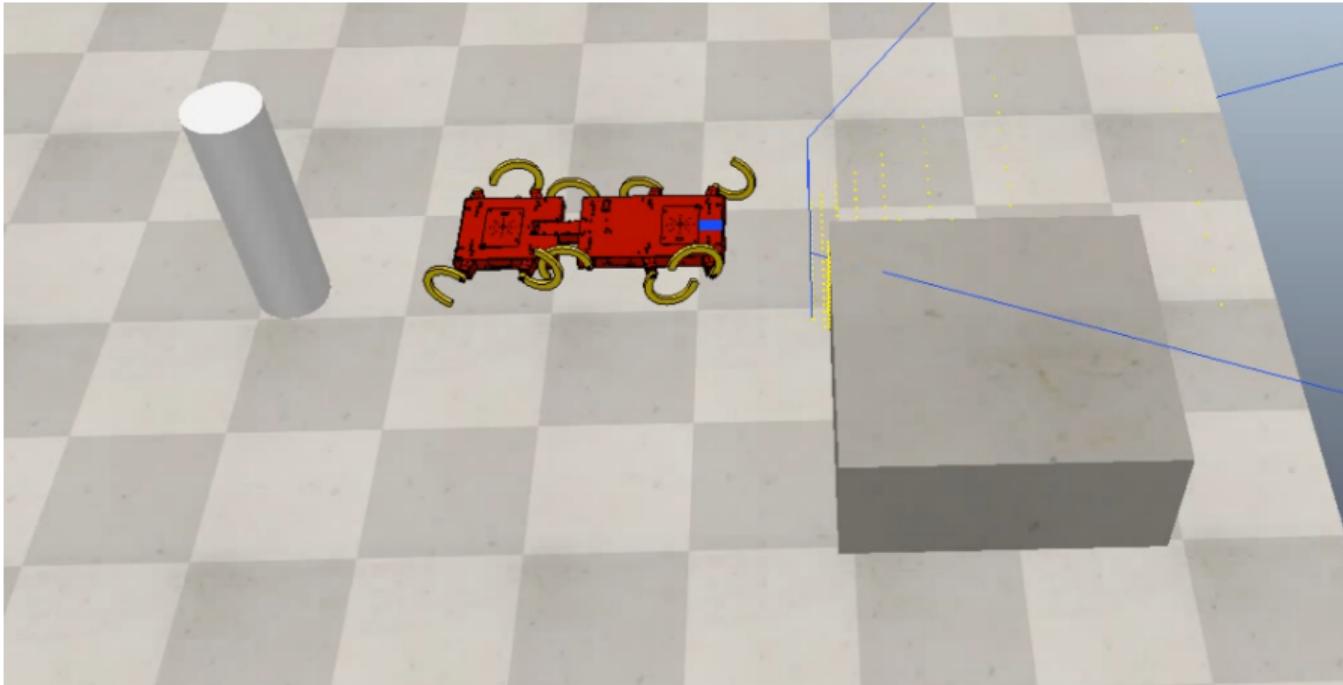


Особенности последнего прототипа в следующем. Во первых, был добавлен активный сегмент, соединяющий 2 части робота *тык*. Это позволяет добиться условия, чтобы робот мог забраться на препятствия выше себя ростом.

Также, была придуман концепт, позволяющий двигаться такому классу роботов без смены ориентации во все стороны. Я вдохновлялся омниколесом. Справа показано как это работает. Мы разбиваем ноги робота на группы и управляя направлением вращения, можем направлять робота во все стороны *тык*. Что и показано в следующем видео.



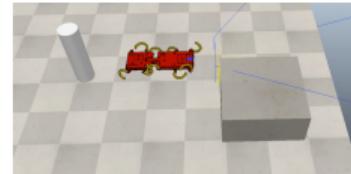
Четвертая итерация робота



- └ "3" Оптимизация кинематической схемы

- └ Четвертая итерация робота

Четвертая итерация робота



На видео представлено прохождение препятствий последним прототипом робота в симуляторе CoppeliaSim



Верификация преобразователя силы

Измерить характеристики материала для случаев, когда **площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.**

Алгоритм: 2 эксперимента:

1. Статический — прикладывается статический груз с размером в сенсор для калибровки.

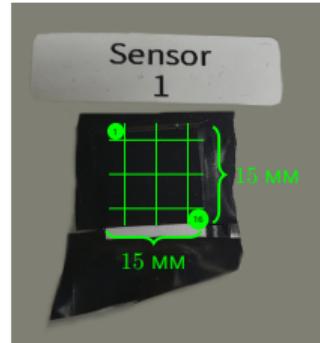
2. Динамический — чувствительная область представляется в виде сетки 4×4 . Происходит **касание каждой области с одинаковым давлением, но разной площадью контакта.**

Входные данные: показания разработанного датчика и значение реально приложенной нагрузки.

Выходные данные: разница между нормализованным значением с датчика и реальной нагрузкой.

Допустимая ошибка: 10%

Предположения: 1) материал обладает вязко-эластичными свойствами, поэтому надо учитывать гистерезис.



Поверхность
как 4×4 сетка



Все насадки

└ "4" Верификация преобразователя силы

└ Верификация преобразователя силы

Решив задачу номер 3, то есть имея конструкцию ноги, возможно разработать сенсор, подходящий для конкретной области применения. Как было сказано ранее, необходимо измерить характеристики материала для случаев когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

Для этого было разработано 2 эксперимента. Первый, статический, где на объект прикладывался статический груз с размером сенсора, нужен для калибровки. Таким образом я считал, что все сенсоры работают единообразно.

Второй, динамический, основной. Для этого сенсор представлялся в виде сетки 4x4, на картинке *тык*. С помощью эталонного датчика силы, на который была прикреплена насадка *тык*, обеспечивающую конкретную площадь контакта, проводилась касание каждой области сетки.

После эксперимента, нормализовались значения между эталонным датчиком (его значения принимались за 1), и откалиброванным исследуемым датчиком. Смотрелась разница.

Допустимой ошибкой я посчитал 10 процентов, такая ошибка принята в физических экспериментах.

Верификация преобразователя силы

Измерять характеристики материала для случаев, когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

Алгоритм 2 эксперимента:

1. Статический — происходит касание каждого **клетки** с одинаковым давлением.
2. Динамический — чувствительная область представляется в виде сетки 4 x 4. Тренируется касание каждой **клетки** с одинаковым давлением, но дважды площадью контакта.

Выходные данные: показания разработанного датчика и значение реально примененной нагрузки.

Выходные данные: разница между нормализованным значением с датчиком и реальной нагрузкой.

Допустимая ошибка: 10%.

Предупреждение: 1) сенсор обладает вязко-пластичными свойствами, поэтому надо учтывать гистерезис.





Статический эксперимент

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau_{res}}})(1 - e^{-\frac{A}{p}})] \quad (15)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p} \quad (16)$$

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

Где V_0 – начальное напряжение,

p – приложенное давление,

A_i , B_i , τ_{res} , k_i искомые параметры,

t – текущее время, t_0 – время начала нажатия.

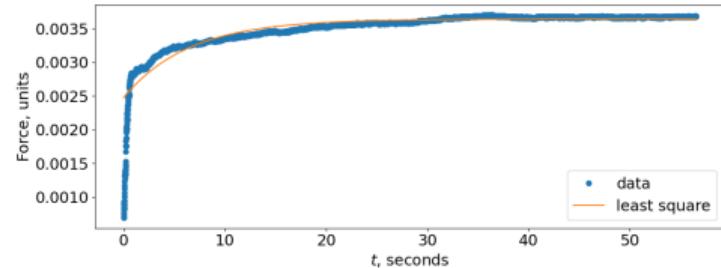
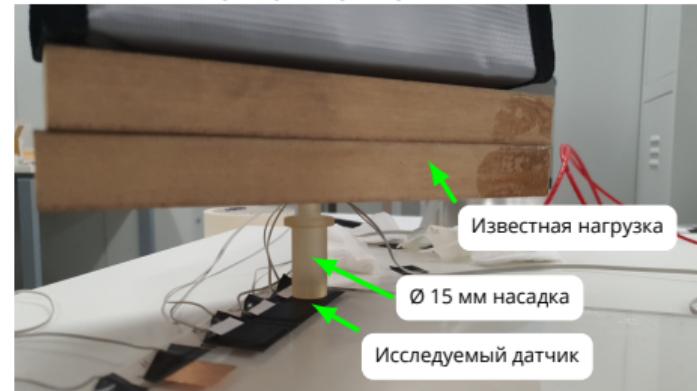


График регрессии



Экспериментальная установка

└ "4" Верификация преобразователя силы

└ Статический эксперимент

Статический эксперимент. Для калибровки использовался робастный метод наименьших квадратов, экспериментальная установка справа *тык*, формула для регрессии — слева *тык*. Она основана на знании того, что у нас вязко-эластичный материал, обладающий гистерезисом. Поэтому необходимо учитывать время контакта с поверхностью.

Экспериментальная установка показана ниже *тык*.

Как можно заметить по графику справа, эта формула подходит для калибровки.

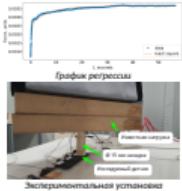
Статический эксперимент

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{T}}\right)] \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (15)$$

$$k_p = A_0 \mu^{cap} \quad (16)$$

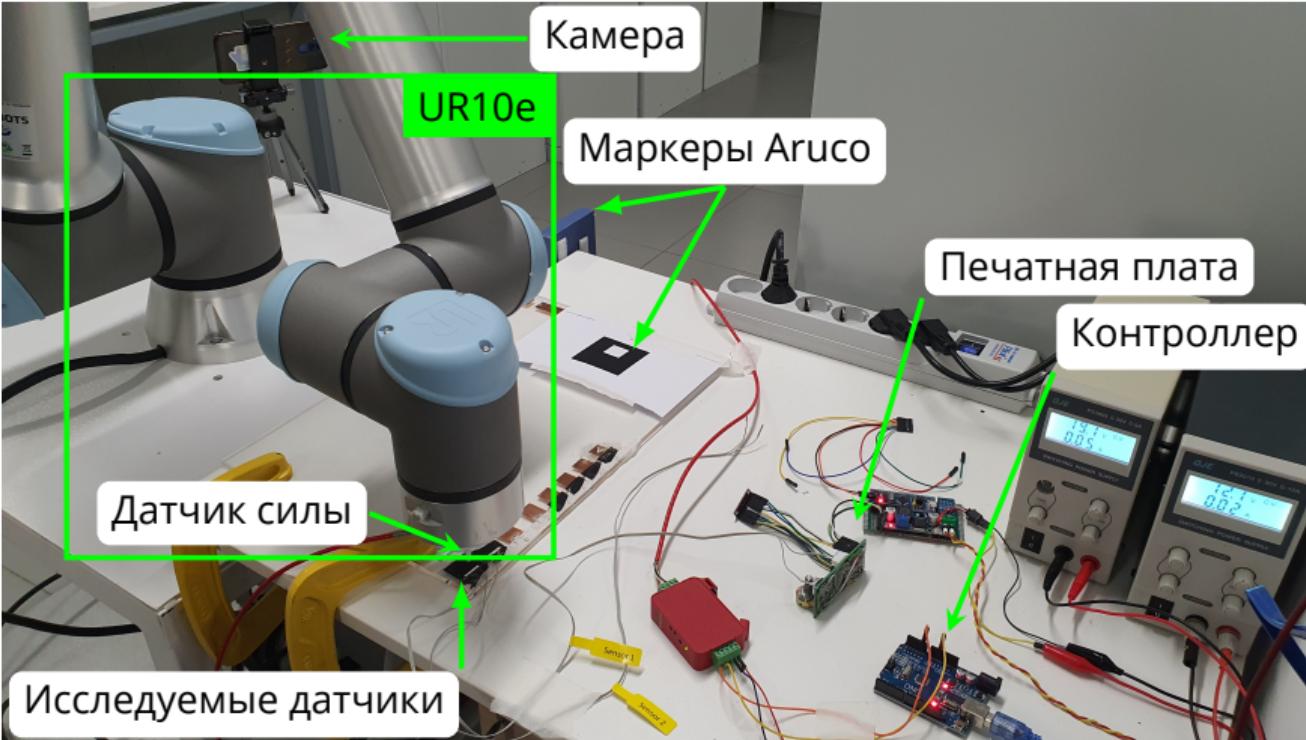
$$t_{out} = B_0 + B_1 e^{-\frac{t}{T}} \quad (17)$$

Где V_0 – начальное напряжение,
 p – приложенное давление;
 A_0 , B_0 , t_{out} , k_e – исходные параметры;
 t – текущее время, t_0 – время начала нажатия.





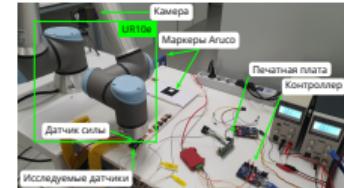
Динамический эксперимент: Установка



└ "4" Верификация преобразователя силы

└ Динамический эксперимент: Установка

Динамический эксперимент: Установка



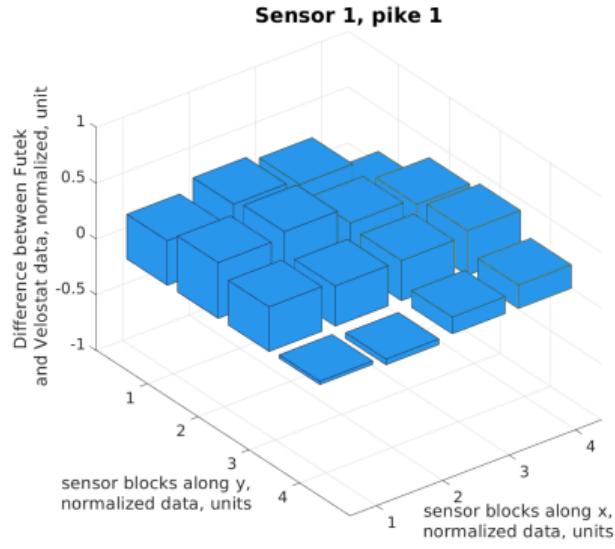
Так как динамический эксперимент требует многократное повторение действий, где важна точность силы нажатия, то было решено создать автоматизированную робототехническую установку *тык*.

Минимизация ошибки по установке манипулятора была реализована с помощью технического зрения.

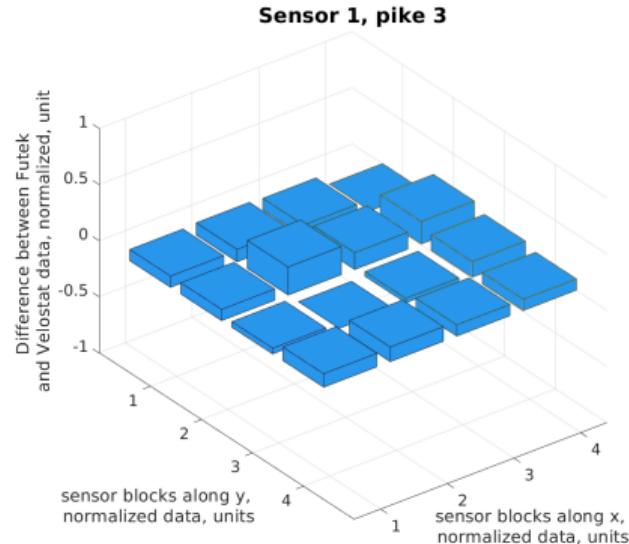
Манипулятор необходим, так данная установка позволяет проводить не только контактные эксперименты, но также и прокатывать вали по сенсору, что ближе к кинематике движения робота. Более того, мы можем проверять и калибровать сенсор уже установленный на ногу робота.



Результаты динамического эксперимента



2 мм диаметр насадки



8 мм диаметр насадки

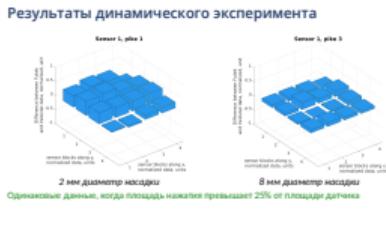
Однаковые данные, когда площадь нажатия превышает 25% от площади датчика

└ "4" Верификация преобразователя силы

└ Результаты динамического эксперимента

Результатом изысканий получилось, что можно использовать сенсор, когда площадь нажатия превышает 25 площади датчика.

На слайде можно увидеть 3д гистограмму *тык*, где представлена нормализованная разница между эталонным датчиком и исследуемым для каждого сегмента датчика. Слева при использовании насадки в 2 мм диаметром, а справа при 8 мм.





Определение физико-механических свойств

Определить процентное соотношение твердых, упругих и пластичных свойств пройденной поверхности

Метод решения: машинное обучение, Метод Опорных Векторов (SVM)

Алгоритм: Создается установка для обучения. Обучение: робот ходит по различным типам поверхностей фиксированное количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Модель обучается на 80% данных с помощью ядра PUK7. Тестирование: происходит на оставшихся 20%. Используются **метрики меткости, точности, полноты и F1-счета.**

Входные данные: данные с внутренних датчиков робота

Выходные данные: процентное соотношение упругих, твердых и пластичных свойств пройденной поверхности

Допустимая ошибка: 20% - точность

Предположения: 1) На рисунке.



Эталоны упругой, твердой и пластичной поверхностей

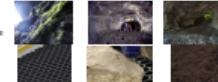
└ "2" Определение физико-механических свойств поверхности

└ Определение физико-механических свойств

Решив задачи 3 и 4, то есть имея разработанный сенсор и узел с ногой робота, возможно решать задачу определения физико-механических свойств поверхности. Для получения более точных результатов, было решено решать данную задачу натурно.

Любой материал можно описать с помощью вязко-упруго-пластичной модели, но их сложно измерить и еще сложнее интерпретировать. Поэтому более целесообразно классифицировать объекты, которые использовались как эталонно упругие, твердые и пластичные *тык*. Аналогом мха — эталона упругих свойств является резина, твердой — камень, а пластичной — земля. Результатом работы алгоритма получается процентное соотношение упругих, твердых и пластичных свойств.

Для решения задачи классификации используется метод опорных векторов (SVM). Данные собирались так. Робот ходит по различным типам поверхностей фиксированное количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Данные с внутренних датчиков, о которых будет разговор далее, собираются. Потом происходит обучение и тестирование. Использовались классические критерии для данного типа задачи: меткость, точность, полнота и F1-счет. Это классические метрики оценки точности обученной модели.

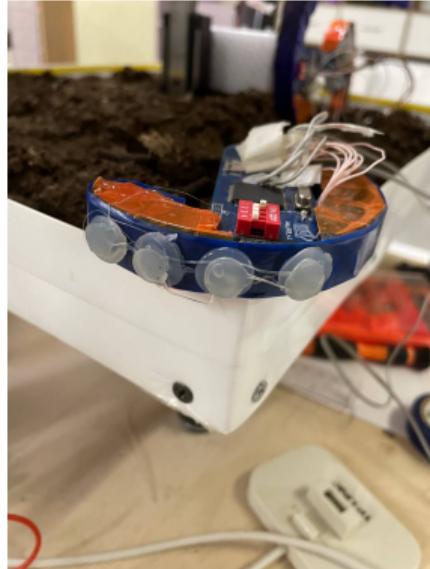
Определение физико-механических свойств
 Определить процентное соотношение твердых, упругих и пластичных свойств прибрежной поверхности
Метод решения: машинное обучение. Метод Опорных Векторов (SVM)
Алгоритм: Создается установка для обучения. Обучение: робот ходит по различным типам поверхности фиксированное количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Модель обучается на 80% данных с помощью ядра RLIBK. Тестирование: происходит на оставшихся 20%. Используются метрики меткости, точности, полноты и F1-счет.
Входные данные: данные с внутренних датчиков робота
Выходные данные: процентное соотношение упругих, твердых и пластичных свойств прибрежной поверхности
Допустимая ошибка: 20% - точность
Предположения: 1) На рисунке.

 Эталоны упругой, твердой и пластичной поверхностей



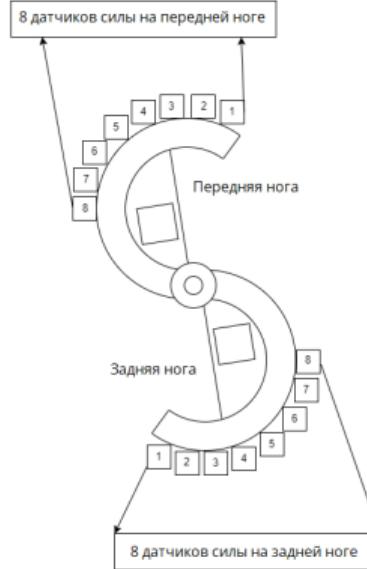
Стенд



Установка



Нога робота с
установленными сенсорами

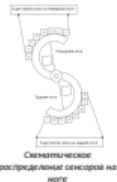


Схематическое
распределение сенсоров на
ноге

└ "2" Определение физико-механических свойств поверхности

└ Стенд

Стенд



На экране представлен стенд *тык*, нога робота, на которую установлены датчики силы *тык*, а также способ установки сенсоров на ногу *тык*.

Нужно отметить, что во время испытаний, пришел к выводу, что максимум нужно 5 сенсоров, а не 8, как указано на рисунке справа.

На видео показана работа стенда во время обучения.



Метод опорных векторов

$$f(x) = w^T x + b$$

(18) Ядро на основе функции Пирсона VII:

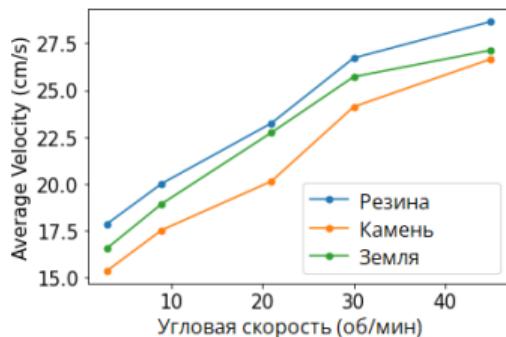
$$K(x, y) = (1 + ((|x - y|^2)/\sigma^2)^\omega)^{(-1/\omega)} \quad (19)$$

где w — весовой вектор, b — смещение,
 x — **входной вектор**:

(1) Частота движения ног

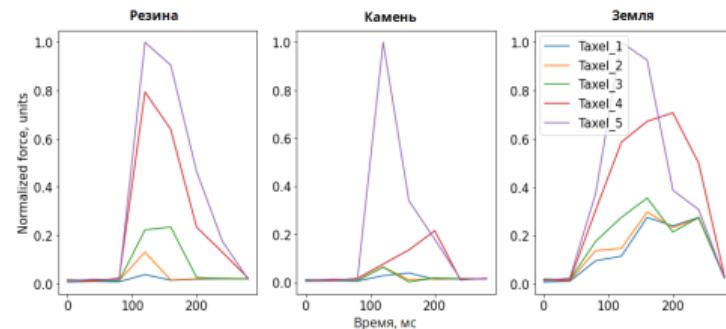
(2-12) Данные с датчика силы

(13-16) Данные крутящего момента двигателя



Зависимость угловой скорости от
линейного перемещения

Где x, y — векторы во входном пространстве,
 $\|x - y\|$ — евклидово расстояние между x и y , σ —
масштабный параметр; ω — это параметр формы.



Распределение силы нажатия на каждый
сенсор

"2" Определение физико-механических свойств поверхности

└ Метод опорных векторов

Метод опорных векторов — алгоритм обучения с учителем. описывается следующей формулой *тык*. Главная цель SVM как классификатора — найти уравнение разделяющей гиперплоскости.

Входной вектор включал в себя частоту движения ног *тык*, так как показано на рисунке справа - он может критерием определения, так как при одинаковой частоте вращения, линейное перемещение разное.

Информация с датчиков силы *тык*. На графиках одно нажатие ноги на резину, камень и землю. На оси x — время, на оси ординат — сила на каждом конкретном датчике силы. Как видно, разный характер распределения сил в зависимости от материала. также с мотора - основные показания.

Также снимались данные о моменте с мотора.

Так как у нас задача нелинейная, то использовался kernel trick. Функция ядра обычно преобразует обучающий набор данных таким образом, что нелинейная поверхность принятия решений способна преобразовываться в линейное уравнение в пространствах большего числа измерений. Для этого использовалась функция Пирсона VII.

(18) Ядро на основе функции Персона VII:

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

Где x, y — векторы в многомерном пространстве;
 $|x - y|$ — евклидово расстояние между x и y , a — масштабный параметр; b — это параметр формы.

Распределение ядра неизменено на конец



Результаты

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

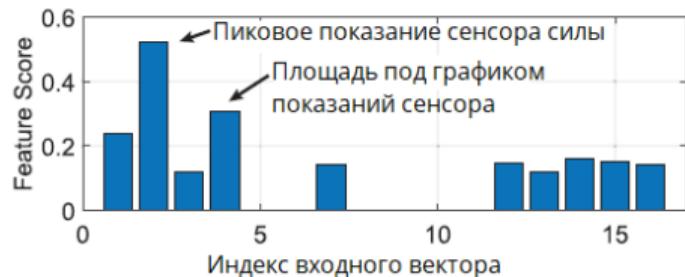
Таблица: Результаты обученного классификатора опорных поверхностей

Камень — эталон твердых свойств

поверхности;

Резина — эталон упругих свойств;

Земля — эталон пластичных свойств.



Гистограмма влияния входных данных на результат предсказания

└ "2" Определение физико-механических свойств поверхности

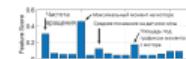
└ Результаты

Результаты

Предсказанный класс			
Истин. класс	Камень	Резина	Земля
Камень	84,0%	2,5%	13,4%
Резина	20,1%	67,8%	12,1%
Земля	1,0%	88,9%	80,0%

Таблица: Результаты обученного классификатора опорных поверхностей

Камень — атакон твердых свойств поверхности;
Резина — атакон упругих свойств;
Земля — атакон пластичных свойств.



Гистограмма влияния входных данных на результат предсказания

На слайде представлены результаты классификации опорных поверхностей *тык*.

Ее можно интерпретировать следующим образом. В камне 84 процента твердых свойств, 2.5 упругих и 13.44 пластичных. В резине — 20 процентов твердых, 67.8 упругих и 12.1 — пластичных.

Не менее важный вопрос, какие данные оказали самый весомый вклад в определении физико-механических свойств. Для этого была построенная гистограмма влияния входных данных *тык*.

Верхний график — когда брались все данные, нижний — без показаний с мотора.

На основе гистограммы можно увидеть, что момент на моторе и частота вращения имеют большее влияние на предсказание, чем данные о силе нажатия.



Определение геометрических свойств

С помощью **ощупывания** роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

Метод решения: Триангуляция Делоне с использованием альфа формы

Алгоритм: Решив задачу локализации, получить облако точек следовой дорожки. **Очистить шумное облако точек и его усреднить** с помощью Voxel Grid. Применить триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек,

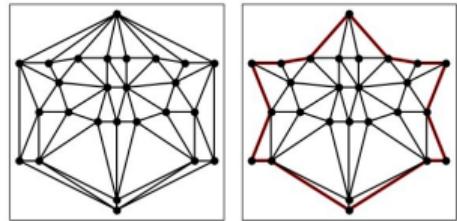
получив полигональную сетку. Сгенерировать новые точки из полигональной сетки с нужным разрешением.

Входные данные: следовая дорожка, в виде облака точек.

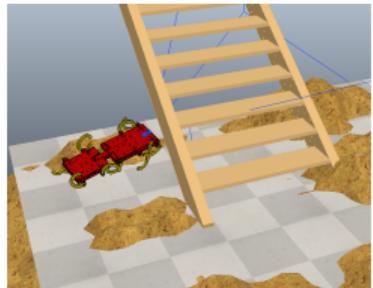
Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек

Допустимая точность: 0.1 м, оценки Cloud2Cloud и Cloud2Mesh

Предположения: 1) Имеется поверхность. Координаты задаются $z = f(x, y)$. 2) Расстояние между ногами робота мало относительно размеров поверхности, следовательно, поверхность между ногами считается плоскостью.



Триангуляция Делоне



Когда $z \neq f(x, y)$

└ "1" Определение геометрических свойств поверхности

└ Определение геометрических свойств

Решив задачу 3 и 4, также возможно стало решить и задачу по определению рельефа пройденной поверхности. Необходимо с помощью ощупывания роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

Для упрощения решения задачи я ввел два предположения. Во первых, у нас существуют поверхности, только где координата z уникальна для каждой пары координат x, y . Пример обратного предположения — место под лестницей на картинке *тык*.

Второе предположение — расстояние между ногами робота мало относительно размеров поверхности. Поэтому эта поверхность будет считаться плоскостью. Вокруг этого предположения и строится весь алгоритм.

Решив задачу локализации, о которой будет далее, мы знаем шумное облако точек следовой дорожки. Очистив и усреднив это облако точек, я применяю триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек *тык*, тем самым получая полигональную сетку. Из полигональной сетки генерируется плотное облако точек с нужным разрешением.

Определение геометрических свойств

С помощью алгоритма работы робота можно получить плотное облако точек с нужным разрешением.

Метод решения: Триангуляция Делоне с использованием алфа-формы

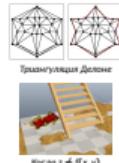
Алгоритм: Решив задачу локализации, получим облако точек следовой дорожки. Очистив шумное облако точек и его усреднив с помощью Voronoi Grid. Применив триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек, получим полигональную сетку. Сгенерировать новые точки из полигональной сетки с нужным разрешением.

Входные данные: следовая дорожка, в виде облака точек

Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек

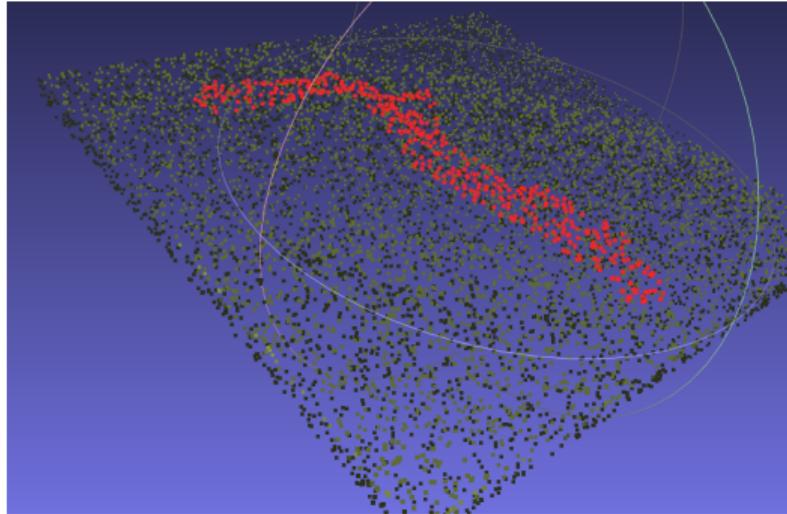
Допустимая точность: 0,1 м, оценки CloudCloud и CloudMesh

Предположения: 1) Имеется поверхность. Координаты задаются $z = f(x, y)$. 2) Расстояние между ногами робота мало относительно размеров плоскости, следовательно, поверхность между ногами считается плоскостью.

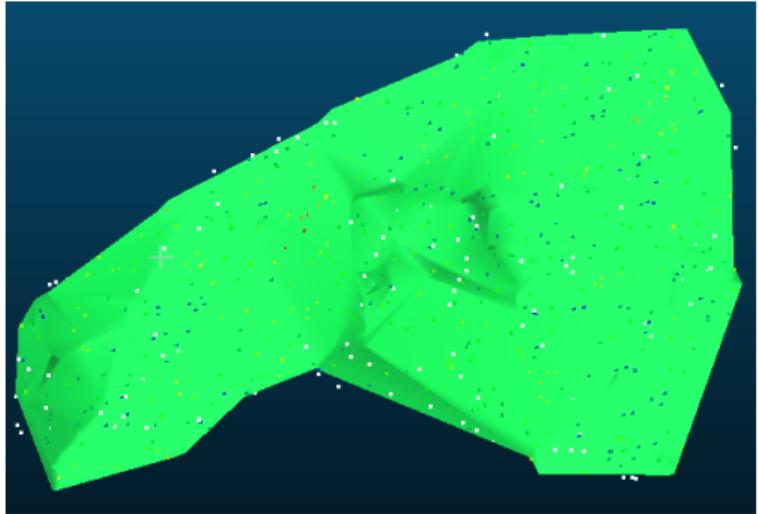


Триангуляция Делоне
Когда $z \neq f(x, y)$

Оценки C2C и C2M



Cloud to Cloud: высчитывается абсолютное
расстояние до ближайшей соседней точки

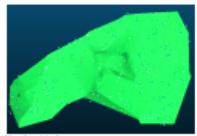
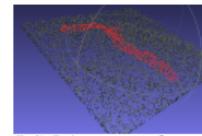


Cloud to Mesh: высчитывается расстояние с
учетом знания о векторе нормали
плоскости

└ "1" Определение геометрических свойств поверхности

└ Оценки C2C и C2M

Оценки C2C и C2M



Выбор максимальной допустимой точности является нетривиальной задачей. Так как во первых, ошибка сильно зависит от сложности территории и ее размеров. Более того, возникает вопрос как считать эту ошибку.

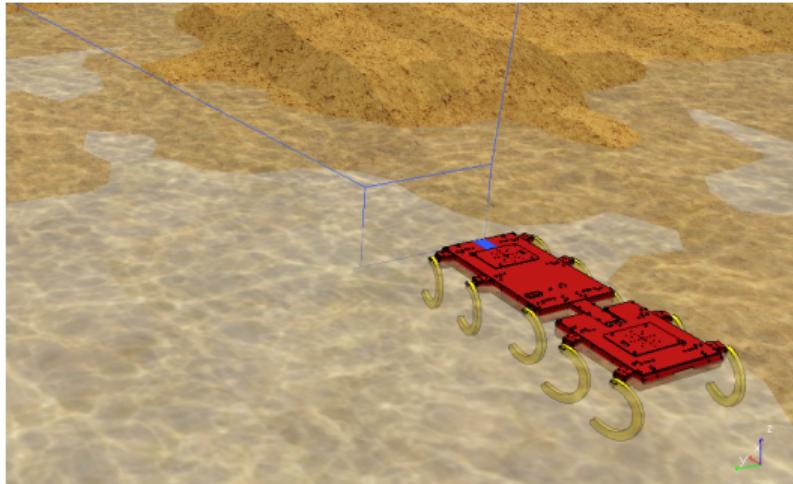
Мной было решено, что среднеквадратичная ошибка в 0.1 метр для пещер длиной в километр является приемлемой, так как данный метод нужен для предварительной оценки поверхности.

Критериями оценки были выбраны 2 подхода Cloud2Cloud и Cloud2Mesh. Это стандартные метрики для сравнения облаков точек в программных продуктах.

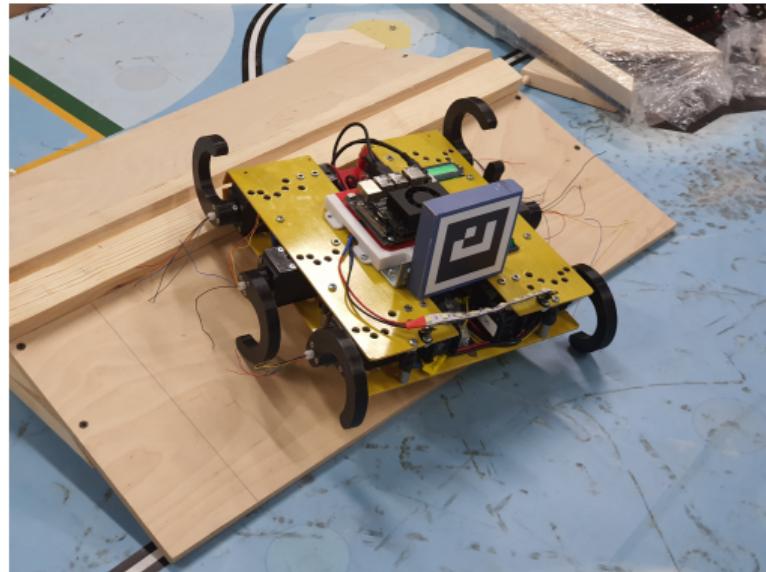
Идея в том, что C2C *тык* использует абсолютное расстояние до ближайшей соседней точки, а C2M *тык* учитывает еще в каком направлении идет отклонение от полигональной сетки.



Эксперименты



CoppeliaSim симулятор,
4е поколение СтриРус

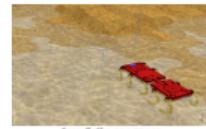


Натурные испытания,
Зе+ поколение СтриРус

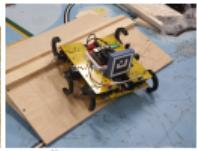
└ "1" Определение геометрических свойств поверхности

└ Эксперименты

Эксперименты



Скроллбат симулятор,
4е поколение Спирус



Натурные испытания,
3е поколение Спирус

Эксперименты проводились как в симуляторе, где использовался последний прототип робота, а также натурно.

Эксперимент выглядел следующим образом. Генерировалось семейство поверхностей и робот ходил с помощью ручного управления определенное время. Полученное облако точек сравнивалось либо с сгенерированным, либо с измеренным в реальной жизни.

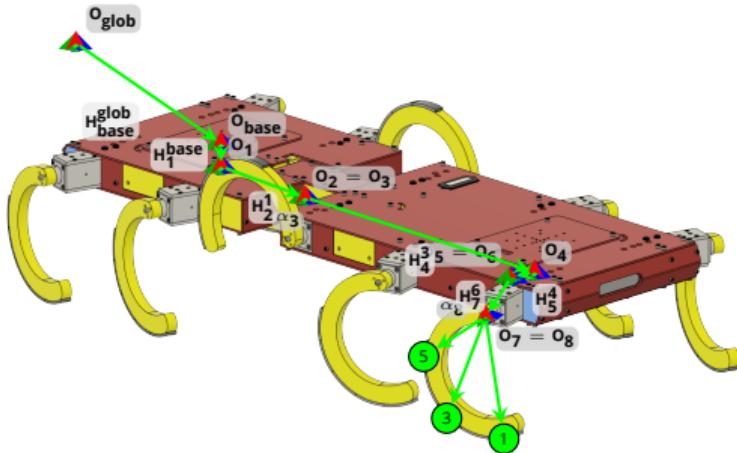


Задача локализации

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

(20)

Где $H = \begin{bmatrix} R & T \\ 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ 0 & 1 \\ 1 \times 3 & 1 \times 1 \end{bmatrix}$, R_i — матрица поворота, относительно одной из осей, T_i — вектор сдвига.



Пример решения задачи
локализации с помощью
Aruco маркера

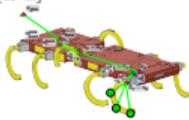
└ "1" Определение геометрических свойств поверхности

└ Задача локализации

Задача локализации

$$t_{\text{об}}^{\text{abs}} = H(x_{\text{раб}}, y_{\text{раб}}, z_{\text{раб}}, \sigma_{\text{раб}}, \beta_{\text{раб}}, \gamma_{\text{раб}}) T_r(l_1) T_s(l_2) R_s(o_2) T_s(l_3) T_r(l_4) R_r(l_5) \quad (20)$$

где $H = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, R_i — матрица поворота, относительно одной из осей, T_i — вектор сдвига.



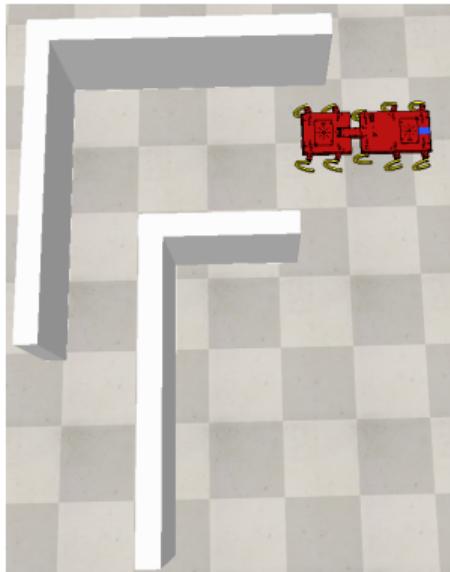
Пример решения задачи локализации с помощью Аруко маркеров

Для решения задачи локализации я решил задачу прямой кинематики для робота *тык*. Таким образом, зная каким сенсором коснулся робот и на какой угол была повернута нога, можно вычислить координату касания опорной поверхности в абсолютной системе координат.

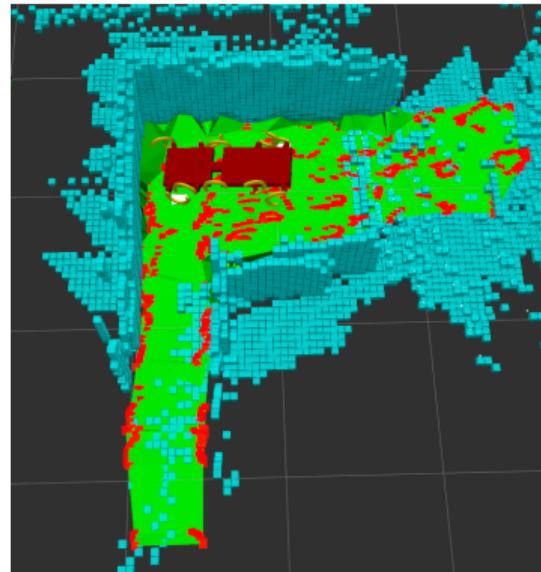
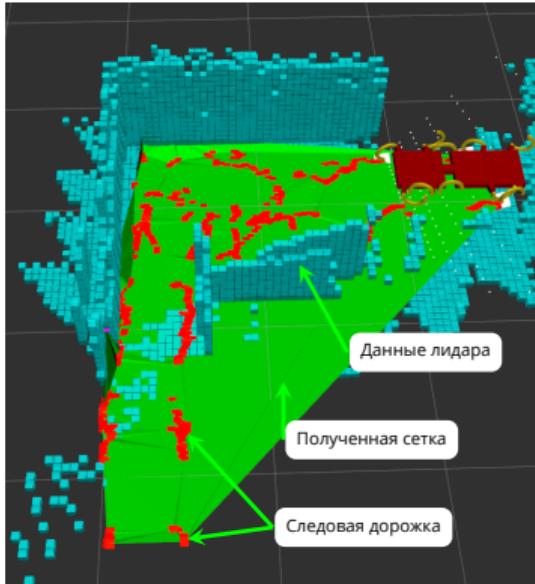
Матрица трансформации от начала абс. системы координат до робота решалась либо с помощью средств симуляции или с помощью маркеров Аруко, что представлено на картинке *тык*.



Триангуляция Делоне для вогнутых оболочек



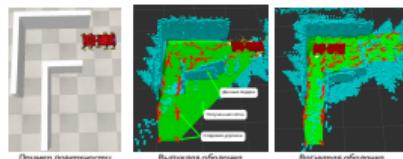
Пример поверхности



└ "1" Определение геометрических свойств поверхности

└ Триангуляция Делоне для вогнутых оболочек

Триангуляция Делоне для вогнутых оболочек



Хочется отметить важность использования триангуляции делоне для вогнутых оболочек с помощью данного примера.

Слева картинка поверхности, по которой должно пройти робот *тык*. Отсюда он начал свой путь, здесь он закончил *тык*.

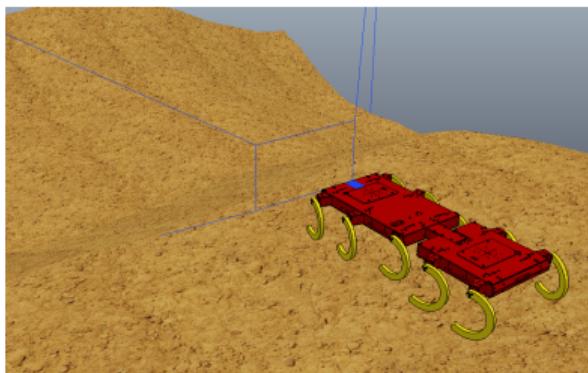
Если мы будем использовать классическую триангуляцию, то получится результат как на рисунке 2 *тык*. Красным отмечена следовая дорожка. Результатом является то, что там где невозможно пройти, карта была все равно построено, что не корректно.

Если же использовать модификацию алгоритма, то будет адекватный результат, как на рисунке справа *тык*

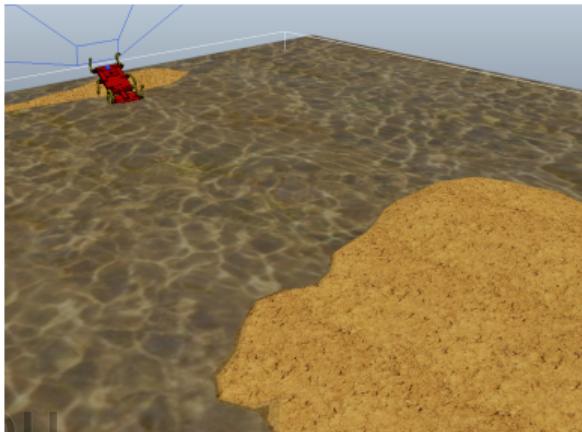


Определение геометрических свойств поверхности

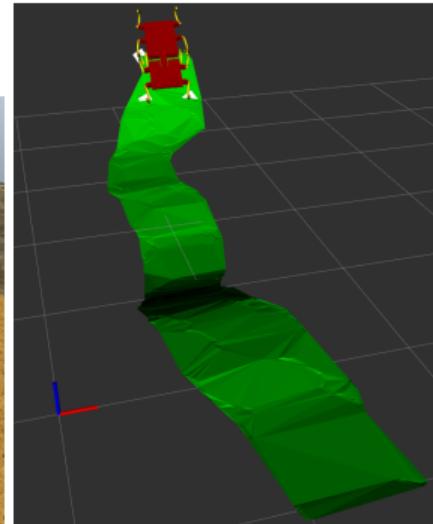
Результат: Маршрут, полигональная сетка



Начало маршрута



Конец маршрута



Созданная сетка

"1" Определение геометрических свойств поверхности

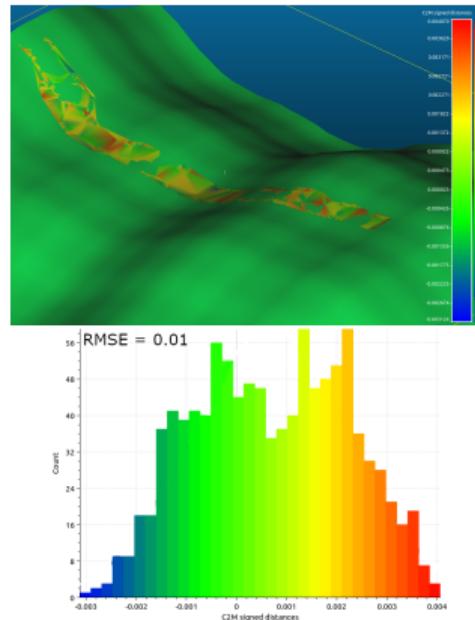
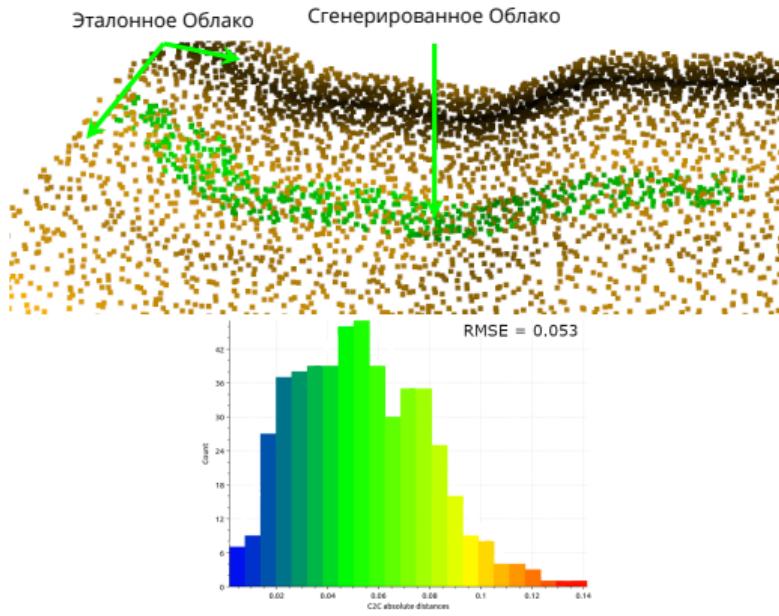
└ Определение геометрических свойств поверхности

На слайде представлен один из экспериментов. На рисунках показана поверхность по которой нужно пройти, начало и конец маршрута, а также полученная полигональная сетка *тык, тык и тык*



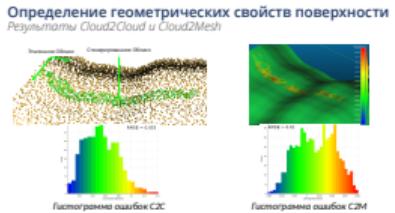
Определение геометрических свойств поверхности

Результаты *Cloud2Cloud* и *Cloud2Mesh*



└ "1" Определение геометрических свойств поверхности

└ Определение геометрических свойств поверхности



Результатами данного эксперимента получились облако точек и полигональная сетка, которые были сравнены с эталонными значениями.

На рисунках представлены гистограммы ошибок двух метрик *тык и тык*, а также наложенные сетки и облака точек *тык и тык*.

Среднеквадратичная ошибка для C2C равна 0.053 метра, а для C2M — 0.01 м

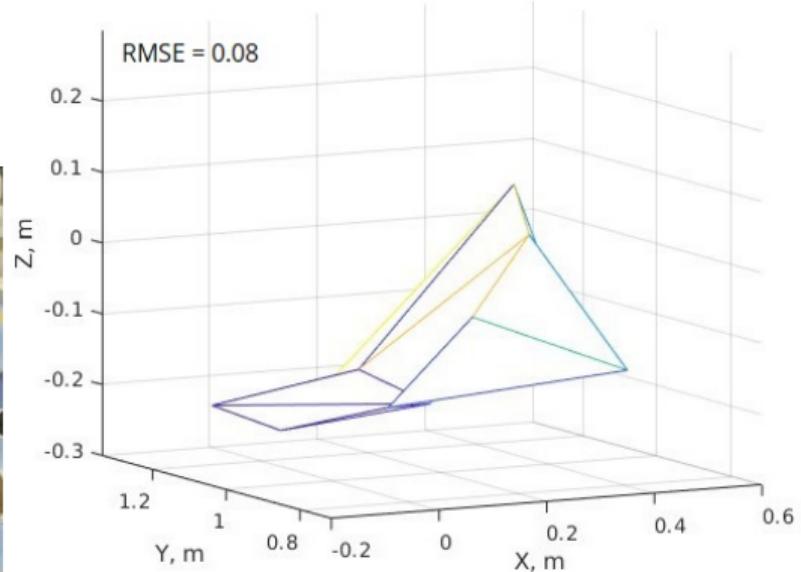


Определение геометрических свойств поверхности

Результат: Натурные испытания, Видео



Робот проходит препятствие



Полигональная сетка, полученная с помощью ног

└ "1" Определение геометрических свойств поверхности

└ Определение геометрических свойств поверхности

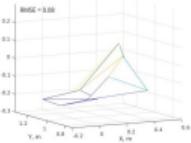
Подобный эксперимент проводился и натурно Слева видео прохождения роботом препятствия *тык*, а также полученная полигональная сетка *тык*. Среднеквадратичная ошибка вышла 0.08 м, что также соответствует допустимой точности.

Определение геометрических свойств поверхности

Результат: Натурные испытания; Выделен



Робот проходит препятствие



Полигональная сетка, полученная с помощью ног



Результаты

Научные задачи (научная новизна)

1. Метод подбора количества ног для шагающих цикловых движителей.
2. Методика характеризации датчика, когда площадь касания нагрузки меньше, чем размеры датчика.
3. Алгоритмы калибровки и определения физических свойств поверхности.
4. Метод определения геометрических свойств местности.

Экспериментальные разработки

1. Спроектированы и собраны 2 прототипа с **Шагающим цикловым движителем** с одной степенью свободы в ноге.
2. Разработана и создана **экспериментальная установка** для **автоматизированного исследования** датчика силы.
3. Разработана и создана **экспериментальная установка** для **определения типа поверхности**.

Выводы

Результаты

Подведя итог, было решено 4 научных задачи. Было разработано 2 метода — оптимизация кинематической схемы робота, а также определения геометрических свойств опорной поверхности. Это задачи 1 и 3.

Был разработана методика для определения характеристик преобразователя силы на основе Велостат, что являлось задачей 4.

А также разработан алгоритм калибровки и определения физико-механических свойств поверхности. Задача 2 и подзадача 4й задачи.

Для решения этих научных задач были собраны 2 прототипа робота, созданы 2 экспериментальных установки.

Результаты

Научные задачи (научные новизна)

1. Метод подбора количества ног для шагающих циклических движителей.
2. Методика характеризации датчика, когда площадь касания нагрузки меньше, чем размеры датчика.
3. Алгоритмы калибровки и определение физических свойств поверхности.
4. Метод определения геометрических свойств местности.

Экспериментальные разработки

1. Спроектированы и собраны 2 прототипа с шагающим циклическим движителем с одной степенью свободы в ноге.
2. Разработана и создана экспериментальная установка для автоматизированного исследования датчика силы.
3. Разработана и создана экспериментальная установка для определения типа поверхности.



Публикации

- Количество публикаций
 - 2 — журналы, рекомендованных ВАК
 - 3 — статьи, индексируемые в Scopus
 - 5 — РИНЦ
- 8 — Зарегистрированных программ для ЭВМ
- 3 — Работа сделана при грантовой поддержке ФСИ, ЦНТИ, РФФИ.

└ Выводы

└ Публикации

Мной были опубликованы работы в 2ух ваковских журналах, 3 статьи в Скопус и еще 5 работ в РИНЦ.

На мое имя зарегистрированы 8 программ для ЭВМ.

Работа делалась при поддержке Зех фондов ФСИ, ЦНТИ и РФФИ

Публикации

- Количество публикаций
 - 2 — журналы, рекомендованные ВАК
 - 3 — статьи, индексируемые в Scopus
 - 5 — РИНЦ
- 8 — Зарегистрированных программ для ЭВМ
- 3 — Работа сделана при грантовой поддержке ФСИ, ЦНТИ, РФФИ.



Соответствие паспорту специальности

2.5.4 Робототехника, Роботы, мехатроника и робототехнические системы

1. Развитие теоретических основ и методов анализа, структурного и параметрического синтеза и автоматизированного проектирования роботов и робототехнических систем.

7. Методы экспериментального исследования, создания прототипов и экспериментальных стендов и модульных платформ для разработки роботов, робототехнических и мехатронных систем.

9. Методы расчета и проектирования мехатронных сервоприводов, исполнительных, сенсорных и управляющих компонентов роботов, робототехнических и мехатронных систем.

└ Выводы

└ Соответствие паспорту специальности

Моя работа соответствует пунктам 1, 7 и 9 паспорта специальности

Соответствие паспорту специальности

2.5.4 Робототехника, Роботы, мекатроника и робототехнические системы

1. Развитие теоретических основ и методов анализа, структурного и параметрического синтеза и автоматизированного проектирования роботов и робототехнических систем.

7. Методы экспериментального исследования, создания прототипов и экспериментальных стендов и модульных платформ для разработки роботов, робототехнических и мекатронных систем.

9. Методы расчета и проектирования неэлектронных сервоприводов, исполнительных, сенсорных и управляющих компонентов роботов, робототехнических и мекатронных систем.

Спасибо за внимание!