



# 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

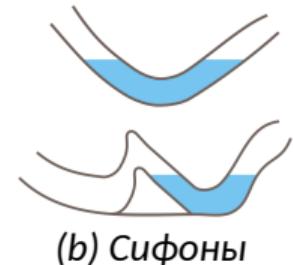
Цель — добыча природных минералов, поиск исторических и археологических находок.

## Непроходимые места для человека

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

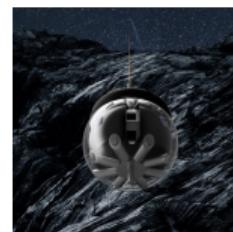


(a) Могила в пещере



## Заинтересованные стороны

1. Военные — *Darpa Subterranean Challenge*
2. Ученые — "Горный институт Уральского отделения РАН",
3. Космические агентства — ESTEC (DAEDALUS), Роскосмос (FEDOR), NASA (CADRE)



(c) DAEDALUS для исследования пещер на луне



(d) DARPA Subterranean Challenge

## └ Постановка задачи

### └ Исследование пещер

Текст

#### Исследование пещер

Цель — добыча природных минералов, поиск исторических и археологических находок.

##### Неподходящие места для человека

- Узкие галереи, огромные пространства, обвалы, сифоны
- Скопление угарного газа
- потеря ориентации в пространстве



##### Занятые интересованные стороны

1. Военные — Darpa Subterranean Challenge
2. Ученые — “Форум института Уральского отделения РАН”;
3. Космическое агентство — ESTEC (ESA/DAW15), Роскосмос (РДКБ), NASA (США).

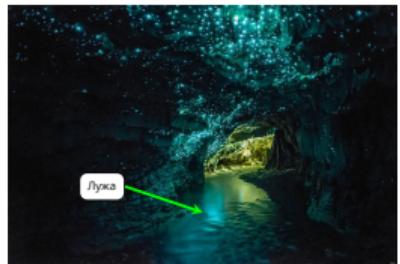


(c) DAEWHA  
Subterranean  
Challenge

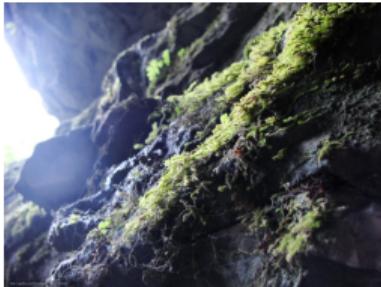
(d) DARPA  
Subterranean  
Challenge



# Предментная область: Пещеры



(a) Лужа



(b) Мх

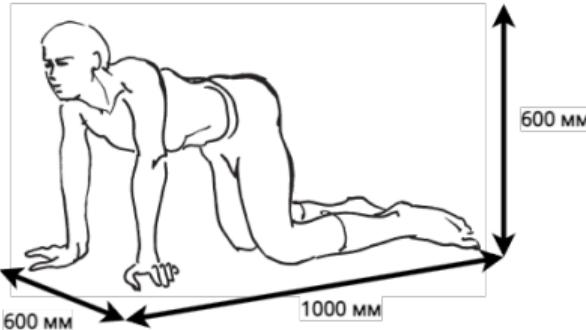


(c) Твердые породы

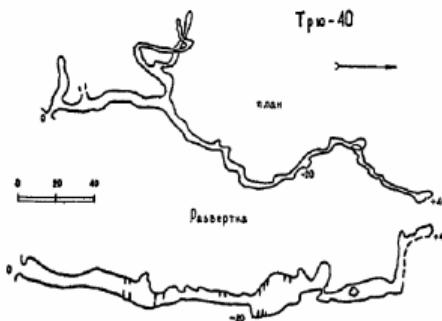


(d) Земля

Типы опорных поверхностей



Габариты пещеры (Свободная узость)



Протяженность пещер: 1-2 км

## └ Постановка задачи

### └ Предметная область: Пещеры

Предметной областью являются пещеры. Слева представлены типы опорных поверхностей, которые могут встречаться в пещерах и были рассмотрены в данной работе. 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 - было решено взять протяженность пещер в диапазоне от 1 до 2ух км.

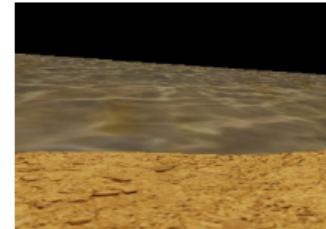
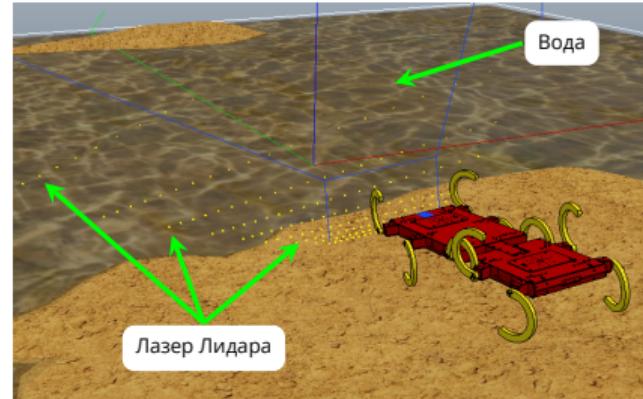
Так как наша основная задача это исследовать пещеры, которые не может исследовать человек физически из-за ограничения размеров. Человеку сложно долго ползать на четвереньках, поэтому я решил так, что робот должен быть как минимум меньше, чем средний мужчина в габаритах. А именно 600x1000x600 мм.

Теперь мы можем сделать первичную постановку задачи для методов.





# Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?

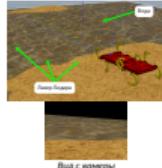


Вид с камеры

## └ Постановка задачи

### └ Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?

Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?



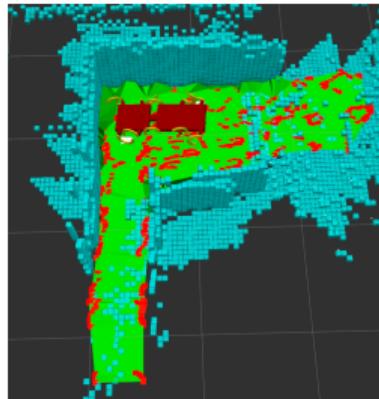
Несколько слов о преимуществе построения карты с помощью ощупывания, относительно оптических методов. Пример на слайде. Задача - построить карту поверхности, она на левой картинке. Но над поверхностью находится вода. Так вот, лидар будет отражаться от поверхности и построит гладую поверхность, а камера 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 и физико - механических.

Прежде чем говорить более конкретно об этих задачах, нужно вначале определить предметную область, так как она сильно влияет на постановку задачи.



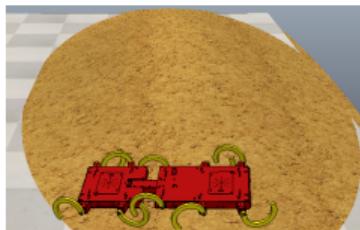
# "1, 2" Построение рельефа местности

## Геометрические свойства:

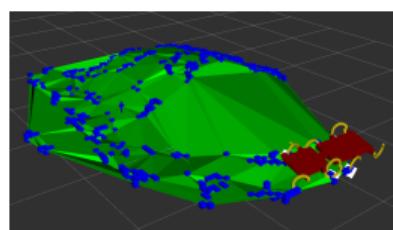
*Входные данные:* следовая дорожка, представленная в виде облака точек.

*Выходные данные:* полигональная сетка и плотное облако точек.

*Допустимая точность:* 0.1 м



(a) Исследуемая поверхность



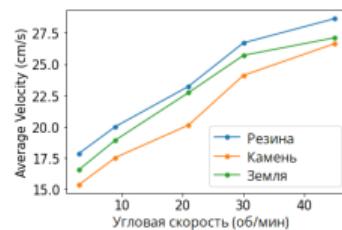
(b) Следовая дорожка и полигональная сетка

## Физико-механические свойства:

*Входные данные:* обученный классификатор поверхностей, данные с внутренних датчиков робота.

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

*Допустимая ошибка:* 20%



Пример данных для обучения



Пример поверхности

## └ Постановка задачи

### └ "1, 2" Построение рельефа местности

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.

Допустимой точностью является 5 сотых метра. Такая точность была взята из протяженности пещеры и осознанием того, что данный метод может предложить только первичное представление о поверхности и не может конкурировать с оптическими способами построения карты. На рисунке представлены примеры входных и выходных данных. Синим цветом отмечена следовая дорожка.

Целью же определения физико-механических свойств является получение процентного соотношения упругих, твердых и пластичных свойств пройденной поверхности, когда на вход метод получает данные только с проприоцептивных сенсоров. Для решения этой задачи необходимо обучить модель машинного обучения. На рисунках представлен одна из зависимостей, которую можно использовать для обучения, а также пример исследуемой поверхности. К примеру при одинаковой угловой скорости, робот движется с разной линейной скоростью, в зависимости от материала.

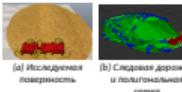
Ошибка в 20 процентов была взята из-за частого обновления результатов, так как робот будет заново выдавать результат каждые 200 шагов.

Более точные формулировки задач с идеей решения и принятыми предположениями будут далее.

### "1, 2" Построение рельефа местности

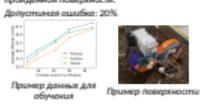
#### Геометрические свойства:

Входные данные: следовая дорожка, представленная в виде облака точек.  
Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек.  
Допустимая точность: 0.5 м



#### Физико-механические свойства:

Входные данные: обученный классификатор поверхности; данные из внутренних датчиков робота.  
Выходные данные: процентное соотношение упругих, твердых и пластичных свойств пройденной поверхности.  
Допустимая ошибка: 20%





# 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 к данному классу:

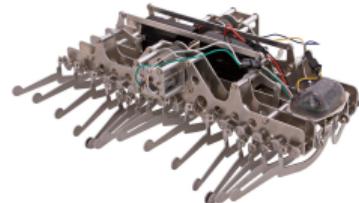
- Компактные размеры (меньше чем  $1000 \times 600 \times 600$  мм)
- Залезать на препятствия высотой меньше, чем  $\frac{3}{4}$  длины корпуса
- Преодолевать представленные опорные поверхности



(a) WHegs



(b) Boston Dynamics RHex



(c) 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. На рисунках представлены разные представители - вхегс, рхекс, сентипеде.

Нужно, чтобы разработанный роботом меньше габаритов пещеры, мог залезать на препятствия высотой 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 к данному классу:

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



(a) Whigg



(b) Boston Dynamics RHex



(c) Gokken Centipede

## "3" Оптимизация кинематической схемы

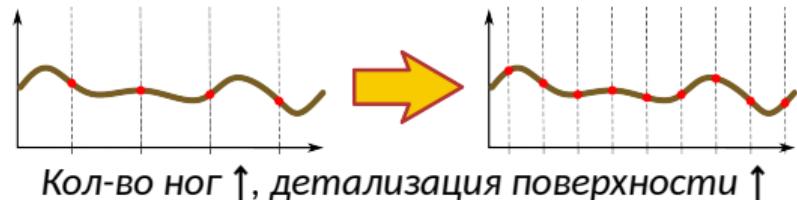
Решить  $F = f(x) \rightarrow \max$  критерий

оптимизации, где

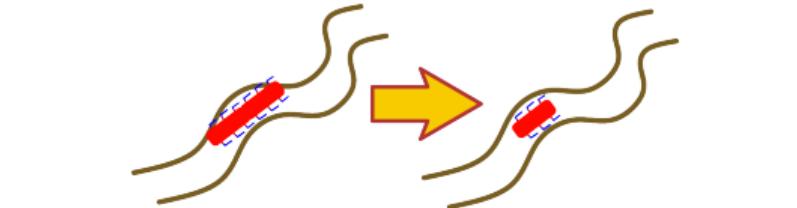
$f(x)$  — критерии: пройденная дистанция,  
длина корпуса

( $x$ ) — параметр: количество ног

Количество ног имеет прямую зависимость с  
длиной корпуса робота.



Кол-во ног  $\uparrow$ , детализация поверхности  $\uparrow$



Длина робота  $\uparrow$ , курсовая проходимость  $\downarrow$



Длина робота  $\uparrow$ , проходимость  $\uparrow$

## └ Постановка задачи

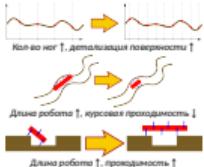
### └ "3" Оптимизация кинематической схемы

Как можно было заметить, 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, а следовательно - точнее. Но с другой стороны пещеры имеют много изгибов и при большой длине он может застрять. Более длинный робот может преодолевать больше препятствий, как это показано на рисунке. Нужно сделать remarку, что количество ног напрямую влияет на длину робота в данном классе движителя.

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

#### "3" Оптимизация кинематической схемы

Решить  $F = f(x) \rightarrow \text{max}$  критерий оптимизации, где  
 $f(x)$  – критерий: пройденная дистанция, длина корпуса  
 $(x)$  – параметр: количество ног  
Количество ног имеет прямую зависимость с длиной корпуса робота.



Длина робота ↑, курсовая пропадомость ↑  
Длина робота ↑, пройденная дистанция ↑



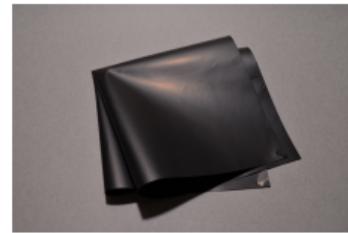
## "4" Верификация преобразователя силы

Охарактеризовать материал для случаев, когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

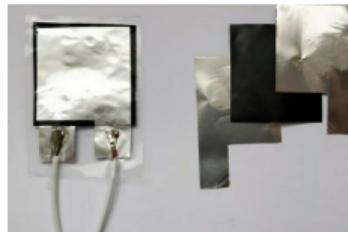
*Входные данные:* показания разработанного датчика и значение реально приложенной нагрузки

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

Допустимая ошибка: 10%



(a) Материал Velostat



(b) Простейший 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. 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 охарактеризовать преобразователь для данной задачи. Допустимая ошибка в 10 процентов взята из принятой ошибки в физических экспериментах.

#### "4" Верификация преобразователя силы

Спецпринесли материал для сенсора, 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%



(b) Простейший преобразователь силы



# Структура



## Легенда

- Синий фон (Blue background): Стандартные средства, без доработок (Standard tools, without modifications)
- Жёлтый фон (Yellow background): Предмет исследования и разработки (Subject of research and development)

## └ Постановка задачи

## └ Структура



Но вначале нужно ограничить мое место в разработке данной робототехнической системы. На экране 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.



# 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

Итогом - основные представлены задачи. Это разработка двух методов, методики, а также алгоритма.

#### Основные научные задачи исследования

1. Разработка метода построения карты местности и определения геометрических свойств поверхности с помощью тактильного чувствительства.
2. Реализация алгоритма, позволяющего определять физические свойства оторной поверхности.
3. Разработка метода оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми движителями с одной степенью свободы критериями проходимости, покрытия оторной поверхности и её детализации, длины пройденного пути.
4. Создание методики **исследования динамики силы**, когда площадь контакта нажатия 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 очуствления, 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 очуствления**, 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 очуствления 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 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 напряжены с упругими, эластичными, пластичными свойствами.
3. Критерий оптимизации кинематической схемы многоногих шагающих роботов с циклическим движением, имеющим в себе показатели проводимости, показателя спиральной поверхности и её деградации. Определение на его основе габаритов и количества движителей шагающего робота.
4. Зависимость погрешности датчика силы на основе полиметрического материала от площади пятна контакта относительно датчика датчика, примененного для тактильного чувствования мобильного робота. Методика лабораторированного исследования датчика силы.



# Литературный обзор

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

## └ Обзор существующих решений

### └ Литературный обзор

Был проведен всесторонний литературный обзор, посвященный и определению класса объекта исследования, какие датчики и роботы используются в пещерах и многое другое. На слайд я решил вынести ученых, на исследования которых я опирался при решения ряда задач. К примеру в \*перечисляю умных людей\*

## Литературный обзор

- Задача оптимизации конструкции: Б. Петриашвили (СССР), Stefano Nolfi (Италия), Dario Sandri-Praliol (Италия), S. Feng (США)
- Шагающие циклические роботы: Е. С. Брюсов (Россия), Ю. Д. Андроников (СССР), Edward Z. Moore (Канада), Wei-Hui Chen (Китай)
- Верификация Velostat: Igor Vehec (Чехословакия), Robert Schroer (США)
- Определение геометрических свойств поверхности: Tobias Ebert (Германия), Subodh Kumar (США), И. Родников (Россия), Shan Luo (Великобритания)
- Определение физико-механических свойств поверхности: X. Alice Wu (США), Krzysztof Walas (Польша), Hendrik Kolenbach (Швейцария)



# Определение количества ног

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

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

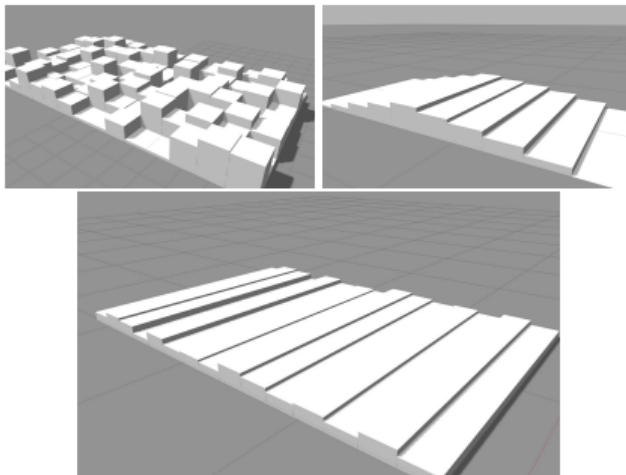
$(x)$  — Параметры: количество ног, сдвиг фазы между соседними ногами

**Метод решения:** Генетический алгоритм: Open AI-ES

**Идея решения:** 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.



Пример прохождения особью  
сгенерированной поверхности

## └ "3" Оптимизация кинематической схемы

### └ Определение количества ног

Так как эффективность метода зависит от количества ног, то было решено 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 генерированы с помощью одинаковых параметров. 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.

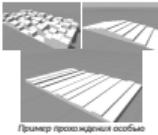
Задача решалась с использованием генетического алгоритма Open AI-ES.

#### Определение количества ног

Решение:  $f(x) \rightarrow$  минимизировать, где  
( $f(x)$ ) – время прохождения дистанции, длина корпуса  
( $x$ ) – Параметр: количество ног, сдвиги фазы между сокращением ноги

Метод решения: Генетический алгоритм: Open AI-ES  
Идея решения: 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 давление.

Предположения: 1) есть только сухое трение между ногами и поверхностью; 2) Созданные поверхности с помощью одной функции и параметров имеют одинаковую сложность.  
Утверждение: Изменение количества ног изменяет прямую зависимость с длиной шагового цикла.



Пример проходящейся особью генерированной поверхности



# Целевая функция

$$F \rightarrow \max = \beta (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) + \quad (1)$$

$$+ (1 - \beta) \delta^{\omega_1} (L)^{\omega_2}$$

$$L = \frac{1}{(\gamma - 1) h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \quad (2)$$

Где  $\beta$  – аддитивный параметр,

$\omega_{1,2} \in [0..1]$  – весовые коэффициенты,

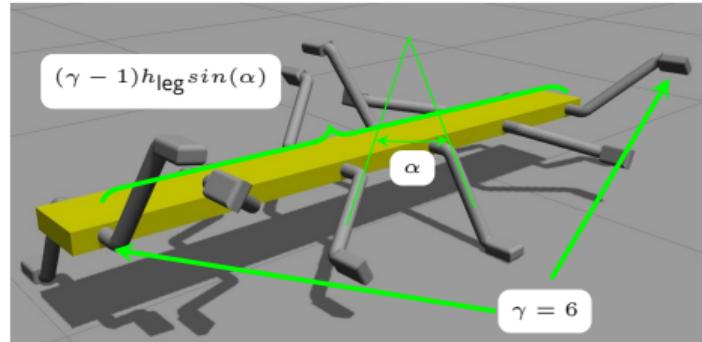
$\delta$  – пройденный путь,

$L$  – упрощенная длина робота

Для решения однокритериальной задачи

использовалась

аддитивно-мультипликативная свертка



## └ "3" Оптимизация кинематической схемы

### └ Целевая функция

Целевая функция выглядит следующим образом. Так как у нас мульти критериальная задача, а алгоритм умеет решать только однокритериальные задачи, я использовал аддитивно мультипликативную свертку. В формуле дельта это пройденный путь, а L - упрощенная длина робота, без лишних констант. Омеги - весовые коэффициенты, их можно воспринимать следующим образом. Сумма коэффициентов равна 1. То есть таким образом, можно показать, что в данной конкретной оптимизации нам важнее, проходимость или размеры робота.

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

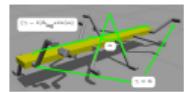
#### Целевая функция

$$F \rightarrow \max = \rho (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) +$$

$$+ (1 - \rho) \omega^{\alpha} (\zeta)^{\omega}$$

$$\zeta = \frac{(\gamma - 1) \omega_{\text{max}} \ln(\sigma)}{L}$$

где  $\rho$  - аддитивный параметр,  
 $\omega_{\text{max}} \in [0, 1]$  - весовые коэффициенты,  
 $\delta$  - пройденный путь,  
 $L$  - упрощенная длина робота  
 Для решения однокритериальной задачи использовалась  
 аддитивно-мультипликативная свертка





# Описание механической системы

$$M\ddot{\vec{u}} = \vec{g} \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}, \quad M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\vec{u}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{v}_i^T & \vec{\omega}_i^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\vec{g}^T = \left[ \cdots \vec{F}_i^T, \quad (\vec{\tau}_i - \vec{\omega}_i \times I_i \vec{\omega}_i)^T \cdots \right] \quad (6)$$

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

## └ "3" Оптимизация кинематической схемы

### └ Описание механической системы

Для симуляции работы робота необходимо описать его математическую модель. Рассмотрим механическую систему из абсолютно твердых тел, состоящую из корпуса робота и некоторого количества ног. Так как количество ног меняется, то показаны обобщенные формулы.

#### Описание механической системы

$$\dot{M}\ddot{\theta} = \ddot{g} \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}, \quad M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3x3} & 0 \\ 0 & l_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\ddot{a}_i^T = \begin{bmatrix} \ddot{r}_i^T & \ddot{\omega}_i^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

где,  $M_i$  — матрицы, содержащие массово-инерционные характеристики;  $m_i$  — масса тела;  $l_i$  — тензор инерции;  $\ddot{a}_i$  — вектор обобщенных скоростей;  $E$  — единичная матрица;  $\ddot{g}$  — вектор обобщенных сил;  $\ddot{r}_i$  — вектор линейной скорости;  $\ddot{\omega}_i$  — вектор угловой скорости;  $\ddot{F}_i$ ,  $\ddot{t}_i$  — силы и моменты сил взаимодействия.



## Геометрические связи

Тела соединены цилиндрическими шарнирами:

$$\phi(q_{j_1}, u_{j_1}, \dots, q_{j_k}, u_{j_k}, t) \geq 0 \quad (7)$$

$$\vec{q}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{x}_i^T & \vec{Q}_i^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\dot{\vec{q}}_i = \begin{bmatrix} E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & G(\vec{q}_i) \end{bmatrix} \vec{u}_i \quad (9)$$

$$\ddot{\vec{g}}_i = \tau_i^T \vec{z}_{i-1} - k_i \dot{\vec{q}}_i \quad (10)$$

где через  $\phi$  обозначена 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; через  $G(\vec{q}_i)$  обозначена матрица, вид которой зависит от выбранной системы координат;  $k$  — коэффициент вязкого трения в шарнире.

## └ "3" Оптимизация кинематической схемы

### └ Геометрические связи

Наложим геометрические связи между телами. 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.

#### Геометрические связи

Тела соединены цилиндрическими шарнирами:

$$\phi(q_1, u_1, \dots, q_n, u_n, t) \geq 0 \quad (7)$$

$$\dot{q}_i^T = \begin{bmatrix} \dot{x}_i^T & \dot{Q}_i^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\ddot{q}_i = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{i,1} & 0 \\ 0 & \ddot{Q}(q_i) \end{bmatrix} \ddot{q}_i \quad (9)$$

$$\beta = \tau_{i,2,-i} - k\dot{q}_i \quad (10)$$

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

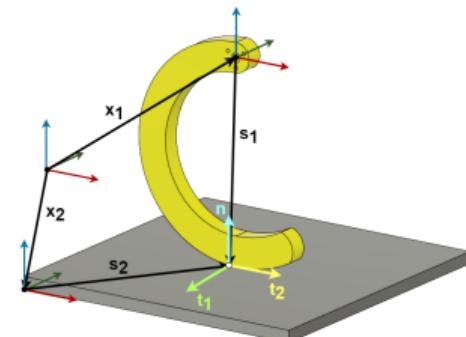
# Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота

$$\phi_u(\vec{q}) \geq 0 \quad (11)$$

$$\phi_u(\vec{q}) = (\vec{x}_1 + \vec{s}_1 - \vec{x}_2 - \vec{s}_2) \cdot \vec{n} \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_u(\vec{q}) \approx \begin{bmatrix} \vec{n}^T & (\vec{s}_1 \times \vec{n})^T & -\vec{n}^T & (-\vec{s}_2 \times \vec{n})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{\omega}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{\omega}_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

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



$$\begin{cases} \mu f_n \geq \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \\ \|\vec{v}_t\| (\mu f_n - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}) = 0 \\ \frac{\vec{f}_t}{\|\vec{f}_t\|} = -\frac{\vec{v}_t}{\|\vec{v}_t\|} \end{cases} \quad (14)$$

## └ "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.

#### Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота

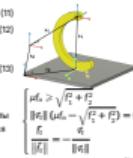
(11)

(12)

$$\frac{d}{dt}\phi_n(\dot{\boldsymbol{\theta}}) \approx \begin{bmatrix} \boldsymbol{n}^T & (\boldsymbol{\tau}_1 \times \boldsymbol{n})^T & -\boldsymbol{n}^T & (-\boldsymbol{\tau}_2 \times \boldsymbol{n})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_2 \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_3 \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_4 \end{bmatrix}$$

(13)  
 (14)

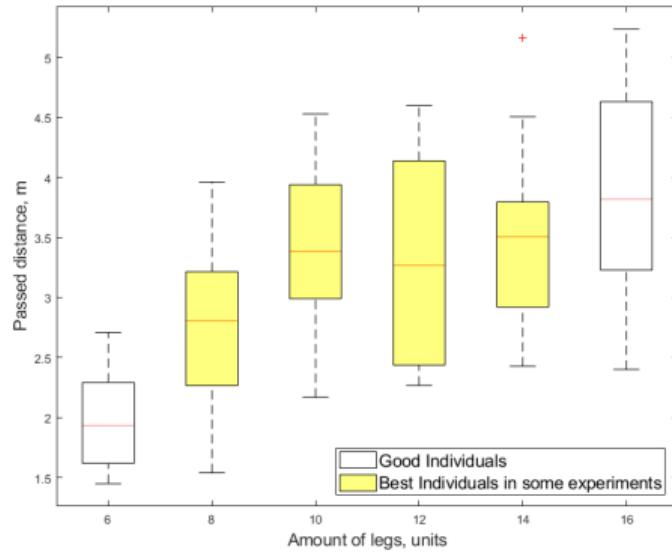
здесь,  $\phi_n(\dot{\boldsymbol{\theta}})$  — функция связи;  $\mu$  — коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью; радиус-векторы  $\boldsymbol{x}_{1,2}$ ,  $\boldsymbol{x}_{1,3}$  и орты координатных осей  $\boldsymbol{\tau}_{1,2}$ ,  $\boldsymbol{\tau}_{1,3}$  показаны на рисунке;  $f_{1,2}$  — значения сил трения вдоль осей  $\boldsymbol{\tau}_{1,2}$ .





# Закономерность

Лучшие роботы в экспериментах начинались с 8 до 14 ног для различных значений  $\omega$ . Это объясняется критерием статического равновесия. В таком случае минимум 4 ноги всегда касаются поверхности.



Зависимость между кол-вом ног и  
пройденной дистанцией

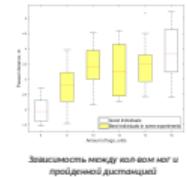
### └ "3" Оптимизация кинематической схемы

#### └ Закономерность

Результатом оптимизации получена зависимость количества ног робота в зависимости от различных весов. Лучшие результаты были получены, когда ног было от 8, до 14и.

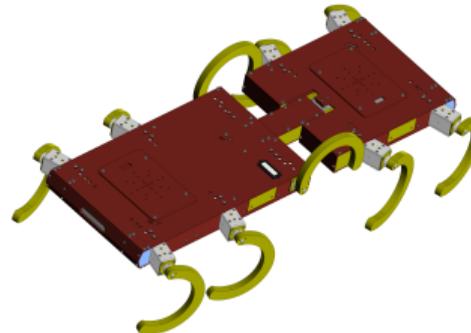
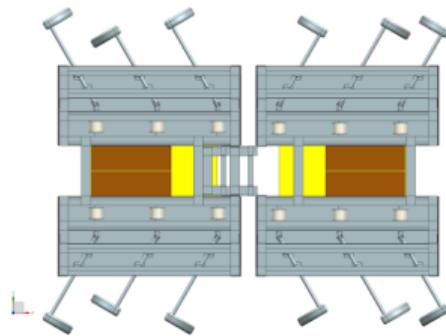
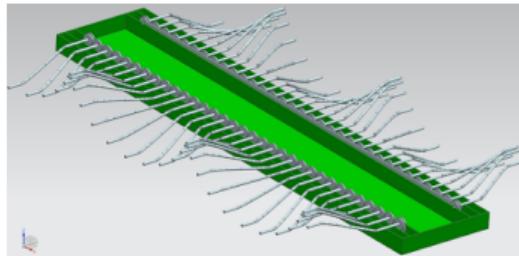
#### Закономерность

Лучшие работы в экспериментах начинались с 8 до 14 ног для различных значений  $\mu$ . Это объясняется критерием статического равновесия. В таком случае минимум 4 ноги всегда касается поверхности.





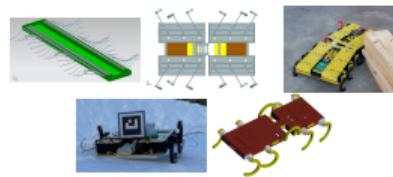
# Прототипы робота



### └ "3" Оптимизация кинематической схемы

#### └ Прототипы робота

Прототипы робота

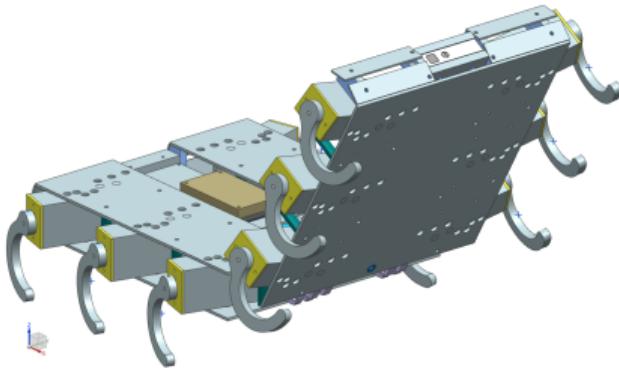


На основе полученных знаний разрабатывались различные прототипы данного робота. Можно выделить 5 прототипов, 2 из которых были собраны натурно. Более того, один был апробирован в приближенных к реальным условиям среде, в снегу.

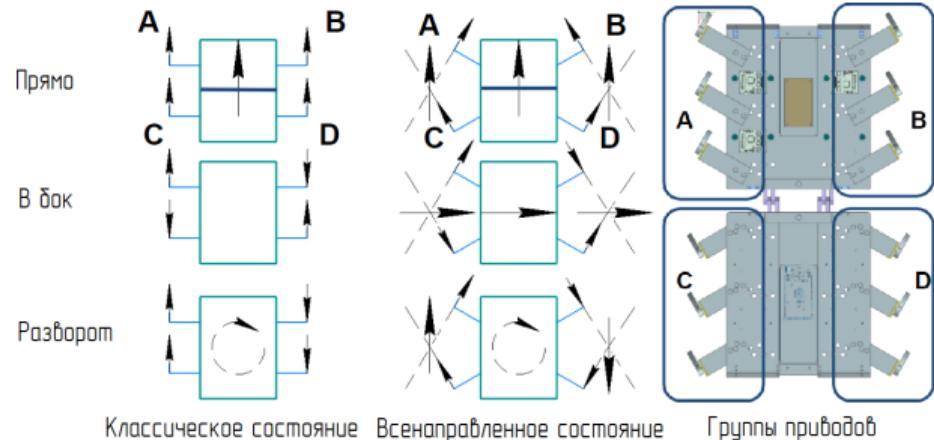
Экспериментально было выяснено, что 10 но лучше, чем 12, так как при той же длине корпуса, можно сильно увеличить длину ног, что сильно влияет на профильную проходимость.



# Особенности конструкции



(a) Одноступенчатой активный сегмент, соединяющий 2 части робота



(b) Векторное представление сил в обычном и  
всенаправленном состояниях

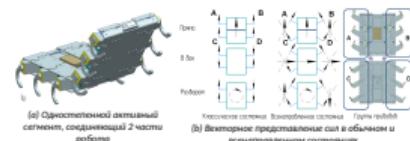
### └ "3" Оптимизация кинематической схемы

#### └ Особенности конструкции

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

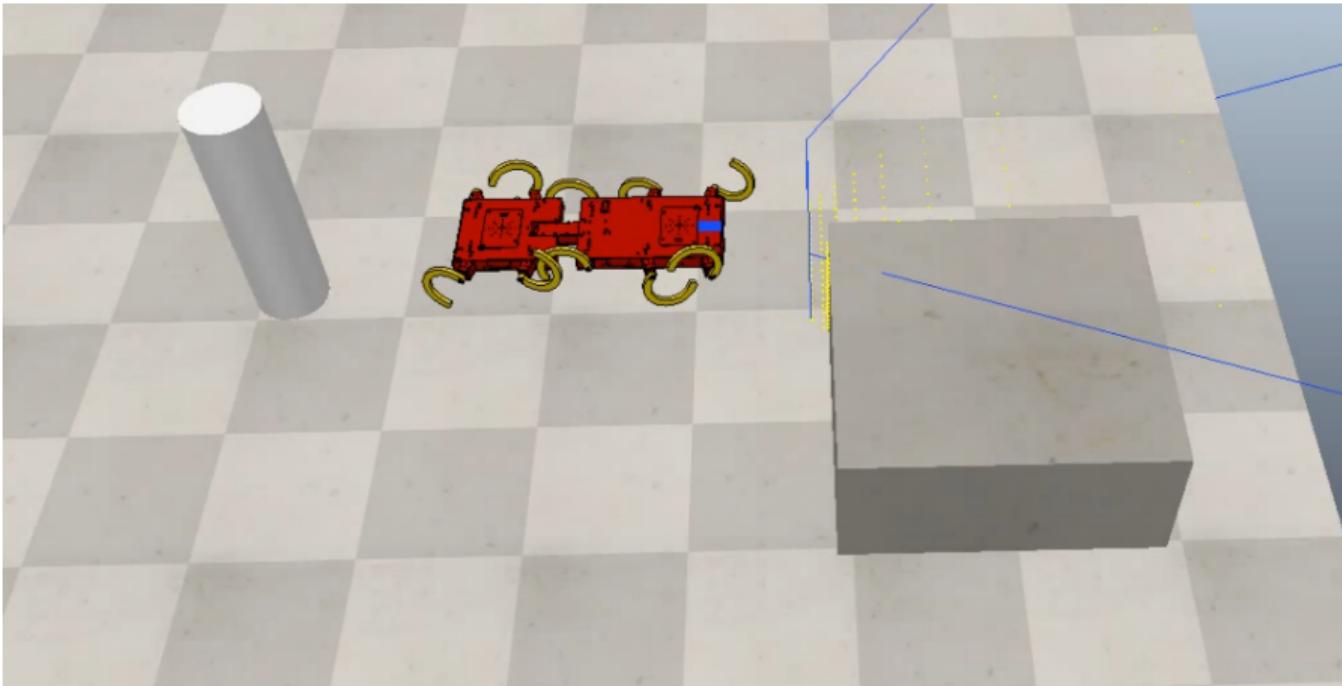
Также, была придуман концепт, позволяющий двигаться такому классу роботов без смены ориентации во все стороны. Я вдохновлялся омниколесом. Справа показано как это работает. Мы разбиваем ноги робота на группы и управляя направлением вращения, можем направлять робота во все стороны. Что и показано в следующем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

#### Особенности конструкции





## Четвертая итерация робота

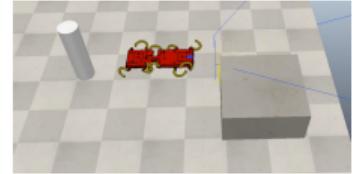


└ "3" Оптимизация кинематической схемы

└ Четвертая итерация робота

Видео

Четвертая итерация робота





# Верификация преобразователя силы

Охарактеризовать материал для случаев, когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

**Идея решения:** Разработка двух экспериментов:

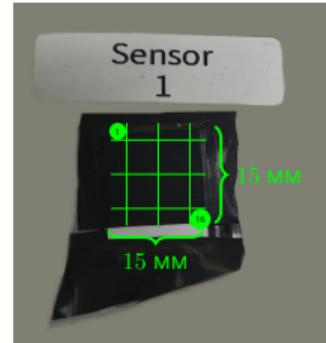
1. Статический — прикладывается статический груз с размером в сенсор для калибровки.
2. Динамический — чувствительная область представляется в виде сетки  $4 \times 4$ . Происходит касание каждой области с одинаковым давлением, но разной площадью контакта.

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

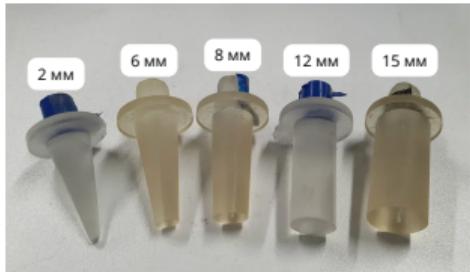
**Выходные данные:** разница между нормализованным значением с датчика и реальной нагрузкой.

**Допустимая ошибка:** 10%

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



Поверхность  
как  $4 \times 4$  сетка



Все насадки

## └ "4" Верификация преобразователя силы

### └ Верификация преобразователя силы

#### Верификация преобразователя силы

Однородная матрица для случаев, когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

**Цель решения:** Разработка двух экспериментов.

1. Статический — чувствительная область представляется в виде сетки 4x4. Проводится касание каждой области с одинаковым давлением, но разной площадью контакта.

2. Динамический — чувствительная область представляется в виде сетки 4x4. Проводится касание каждой области с одинаковым давлением, но разной площадью контакта.

**Входные данные:** показания разработанного датчика и значение реально примененной нагрузки.

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

**Допустимая ошибка:** 10%.

**Предварительные:** 1) матрица обладает винко-макетными свойствами, поэтому надо учитывать гистерезис.



Имея конструкцию ноги, возможно разработать сенсор, подходящий для конкретной задачи. Как было сказано ранее, необходимо охарактеризовать материал 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 разрмером 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. С помощью эталонного датчика силы, на который была прикреплена насадка, обеспечивающую конкретную площадь контакта, проводилась касание каждой области сетки.

Потом нормализовались значения между эталонным датчиком (он принимался за 1, и откалиброванным исследуемым датчиком и смотрелась разница. Допустимой ошибкой я посчитал 10 процентов.



# Статический эксперимент

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

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

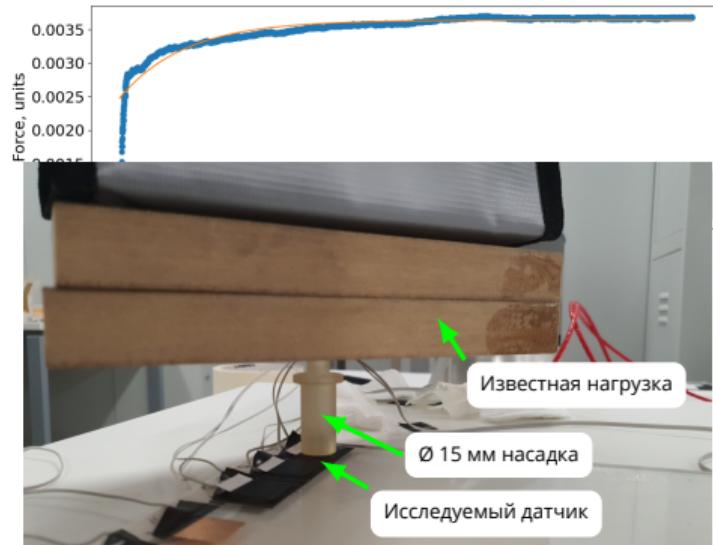
Где  $V_0$  – начальное напряжение,

$p$  – приложенное давление,

$A_i, B_i, \tau_{res}, k_i$  искомые параметры,

$t$  – текущее время,  $t_0$  – время начала нажатия.

Апробирована модель для калибровки датчика



## └ "4" Верификация преобразователя силы

### └ Статический эксперимент

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

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

#### Статический эксперимент

$$V_{act} = V_0 + p[k_0 + k_r(1 - e^{-\frac{t-t_0}{T}})](1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

$$k_0 = A_0 e^{-\lambda_0 t}, \quad t_{act} = B_0 + B_1 e^{-\frac{t}{T}}$$

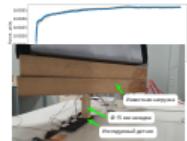
где  $V_0$  – начальное давление;

$p$  – приложенное давление;

$A_0, B_0, T, \lambda_0$  – исходные параметры;

$t$  – текущее время,  $t_0$  – время начала измерения;

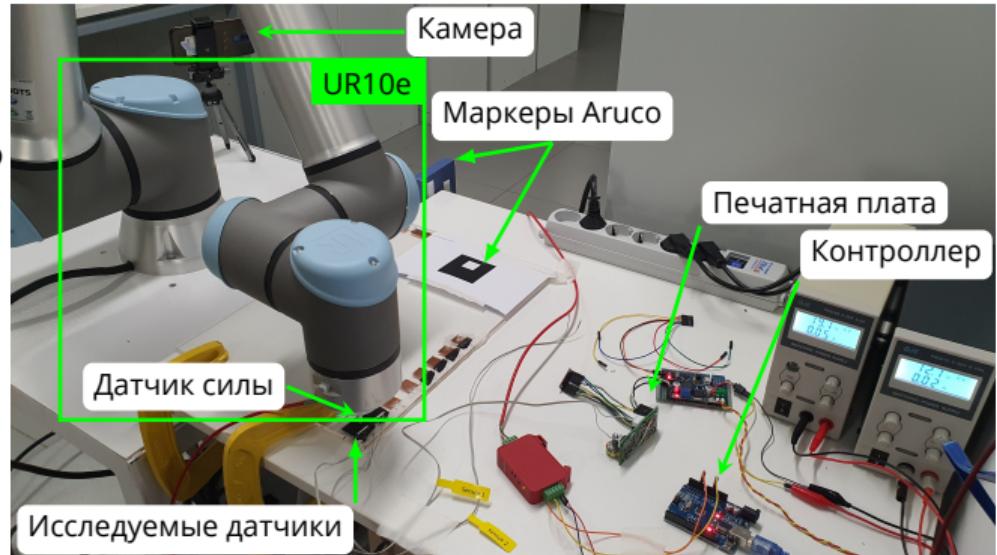
Алгоритмика настройки для калибровки датчика





# Динамический эксперимент: установка

- Управление силой нажатия  
**Импедансное управление**
- Повторяемость эксперимента по  
силе и позиции  
**Добавив манипулятор и камеру**
- Возможность нажимать только  
на часть сенсора  
**Насадки для манипулятора**



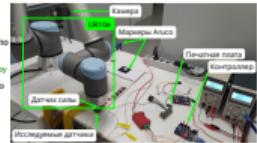
## └ "4" Верификация преобразователя силы

### └ Динамический эксперимент: установка

Так как динамический эксперимент требует многократное повторение действий, где важна точность силы нажатия, то было решено создать автоматизированную робототехническую установку. Управление силой нажатия было реализовано с помощью импедансного управления. Минимизация ошибки установки было реализовано с помощью технического зрения.

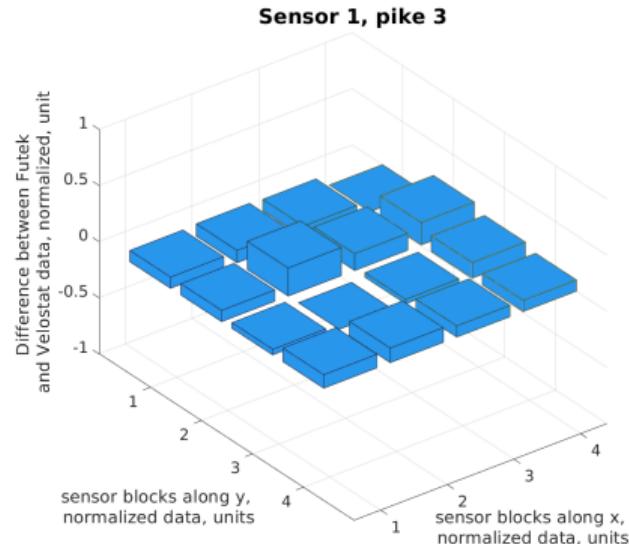
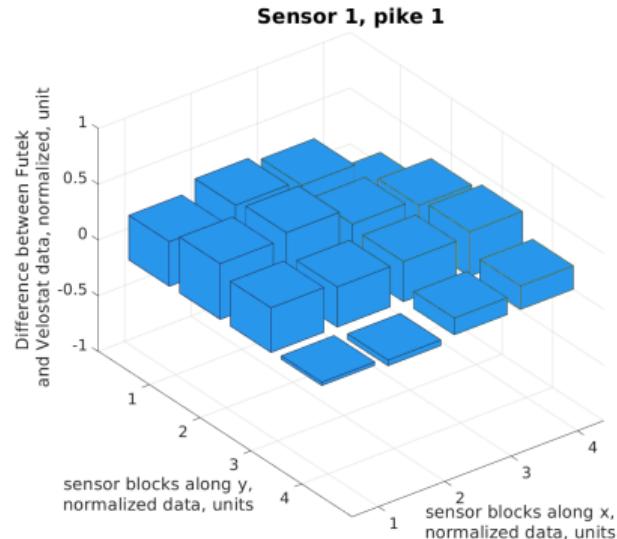
#### Динамический эксперимент: установка

- Управление силой нажатия
- Импедансное управление
- Повторяемость эксперимента по силе и позиции
- Добавлен манипулятор и камера
- Возможность нажимать только на часть сенсора
- Насадки для манипулятора
- Исследуемые датчики





# Результаты динамического эксперимента



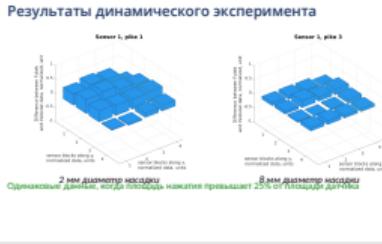
**2 мм диаметр насадки**  
Однаковые данные, когда площадь нажатия превышает 25% от площади датчика

## └ "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, где представлена нормализованная разница между эталонным датчиком и исследуемым. Слева при использования 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)

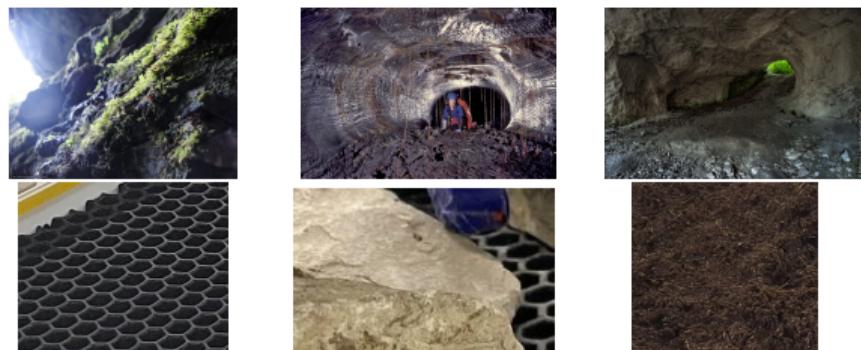
**Идея решения:** Создается установка для обучения. Обучение: робот ходит по различным типам поверхностей фиксированное количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Собранные данные разбиваются на 2 части 80% и 20%. Модель обучается на 80% с помощью ядра PUK7. Тестирование: происходит на оставшиеся 20%. Используются метрики меткости, точности, полноты и F1-счета.

**Входные данные:** обученный классификатор поверхностей, 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

**Определение физико-механических свойств**

Определить процентное соотношение твердых, упругих и пластичных свойств пройденной поверхности

**Метод решения:** машинное обучение. Метод Опорных Векторов (SVM)

**Идея решения:** Создается установка для обучения. Обучение: робот ходит по различным типам поверхности, фиксируя количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Собранные данные разбиваются на 2 части 80% и 20%. Модель обучается на 80% с помощью ядра РУК. Тестирование: проверяется на оставшемся 20%. Используются метрики меткости, точности, полноты и F1-счета.

**Входные данные:** обученный классификатор поверхности, 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.

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.

Для получения процентного соотношения упругих, твердых и пластичных свойств пройденной поверхности, необходимо обучить модель. Для этого было решено использовать метод опорных векторов (SVM). На рисунке представлены объекты, которые использовались как эталонные упругие, твердые и пластичные поверхности, а также их аналог в пещерах.

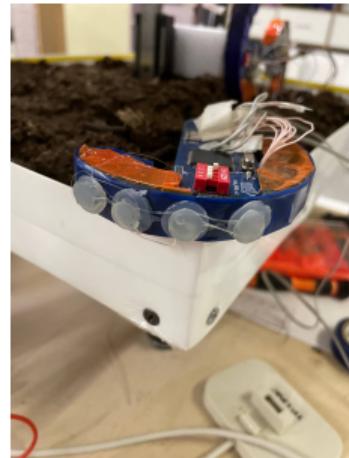
Данные для решения задачи классификации собирались так. Робот ходит по различным типам поверхностей фиксируя количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Данные с внутренних датчиков, о которых будет разговор далее, собираются. Когда были собраны данные для всех типов поверхностей, то они разбивались на 2 части. 80 процентов использовались для обучения, 20 - для тестирования. Использовались классические критерии для данного типа задачи: меткость, точность, полнота и F1-счет.



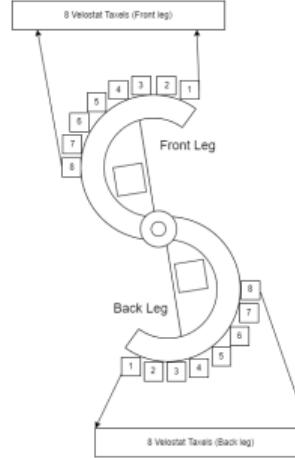
# Стенд



(a) Установка



(b) Нога робота с установленными сенсорами



(c) Схематическое распределение сенсоров на ноге

## └ "2" Определение физико-механических свойств поверхности

### └ Стенд

Стенд



(a) Установка



(b) Нога робота с установленными сенсорами



(c) Схематическое расположение сенсоров на ноге

На экране представлен стенд, нога робота, на которую установлены датчики силы, а также способ их установки. Нужно отметить, что во время испытаний, пришел к выводу, что максимум нужно 5 сенсоров, а не 8, как указано на рисунке справа.



# Метод опорных векторов

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

(15) Ядро на основе функции Пирсона VII:

$$K(x, y) = (1 + ((||x - y||^2)/\sigma^2)^\omega)^{(-1/\omega)} \quad (16)$$

где  $w$  — весовой вектор,  $b$  — смещение,

**х — входной вектор:**

(1) Частота движения ног

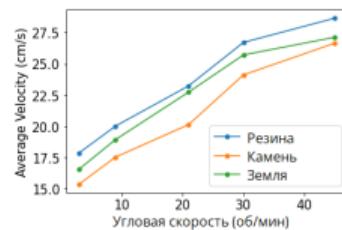
(2-6) Пиковая и средняя амплитуда, среднее значение, ширина, площадь под кривой давления с датчика силы

(7-11) Индивидуальная пиковая амплитуда силы для каждого датчика

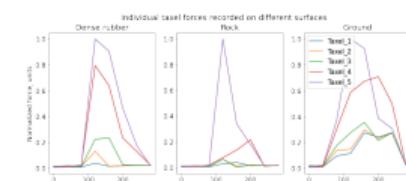
(12-15) Пиковая и средняя амплитуда, среднее значение, ширина, площадь под кривой крутящего момента двигателя

(16) Среднее давление на сенсорах

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



(a) График



(b) Таксель

## └ "2" Определение физико-механических свойств поверхности

### └ Метод опорных векторов

Метод опорных векторов описывается следующей формулой. Входной вектор включал в себя частоту движения ног, так как показано на рисунке справа - он может критерием определения. Информация с датчиков силы, а также с мотора - основные показания.

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.

#### Метод опорных векторов

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

(15) Ядро на основе функции Пирсона VII:

где  $w$  — весовой вектор,  $b$  — смещение,

$$k(x, y) = (1 + \|(x - y)\|^2/c^2)^{-1/2} \quad (16)$$

— вектор в евклидеском пространстве,

$$\|x - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

(1) Частота движений ног

Где  $x, y$  — векторы во входном пространстве,

(2-4) Пиковая и средняя амплитуда, среднее

расстояние между  $x$  и  $y$ ,  $c$  —

значение, ширина, площадь под кривой давления с

масштабным параметром, определяющим «разброс»

датчика силы

адд., ш — это параметр-формы, который влияет на

(7-11) Интегральная пиковая амплитуда силы датчика

форму границы приемки решения.

(12-15) Пиковая и средняя амплитуда, среднее

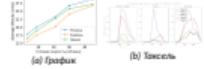
значение, ширина, площадь под кривой крутящего

момента движений

адд., ш — это параметр-формы, который влияет на

(M) Среднее давление на геносрамах

форму границы приемки решения.



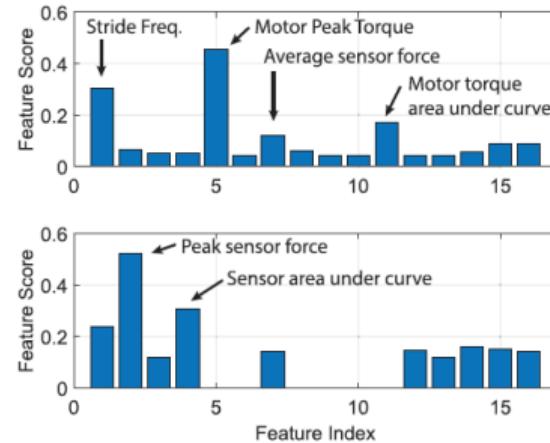
(a) график  
(b) Таксель



# Результаты

(a) Таблица

|              |        | 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%  |



(b) Feature score

## └ "2" Определение физико-механических свойств поверхности

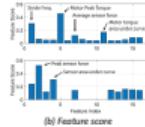
### └ Результаты

Справа представлено

#### Результаты

(a) Таблица

| Предсказанный класс |        |        |        |
|---------------------|--------|--------|--------|
| Истин. класс        | Камень | Резина | Дерево |
| Камень              | 84,0%  | 2,58%  | 12,44% |
| Резина              | 20,1%  | 67,8%  | 12,1%  |
| Дерево              | 1,0%   | 18,0%  | 80,0%  |





# Определение геометрических свойств

Необходимо с помощью ощупывания роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

**Метод решения:** Триангуляция Делоне с использованием альфа формы

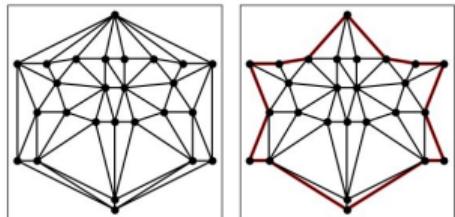
**Идея решения:** Решив задачу локализации, получить облако точек следовой дорожки. Очистить шумное облако точек и его усреднить с помощью Voxel Grid, применить триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек, получив полигональную сетку. Сгенерировать новые точки из полигональной сетки с нужным разрешением.

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

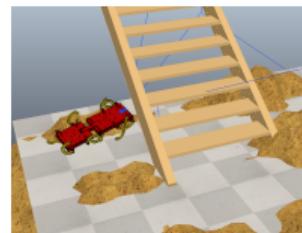
**Выходные данные:** полигональная сетка и плотное облако точек

**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.



(a) Пример Делоне



(b) Когда  $z \neq f(x, y)$

## └ "1" Определение геометрических свойств поверхности

### └ Определение геометрических свойств

Последняя задача, которая была решена - определение геометрических свойств пройденной поверхности. Необходимо с помощью ощупывания роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

**Определение геометрических свойств**

Необходимо с помощью ощупывания роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

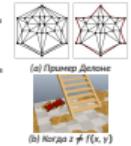
**Метод решения:** Триангуляция Делоне с использованием алгоритма формы Идея решения: Робот задаст звуковую волна, получить облако точек следящей дорожки. Очистить циркульное облако точек и его усреднить с помощью Voronoi Grid, применить триангуляцию Делоне для полученных облакочек, получить полигональную сетку. Сгенерировать новые точки из полигональной сетки с нужным разрешением.

**Входные данные:** следящая дорожка, в виде облака точек.

**Выходные данные:** полигональная сетка и плотное облако точек

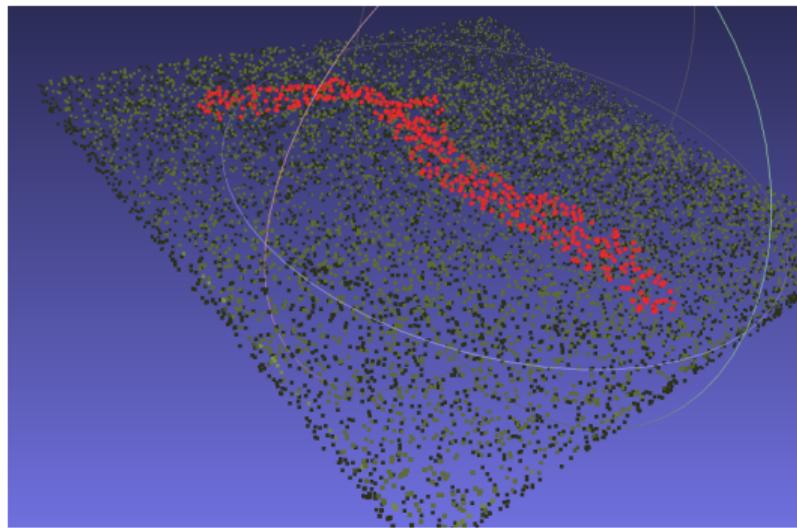
**Допустимая точность:** 0,1 м, сценарии Cloud2Cloud и Cloud2Mesh

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

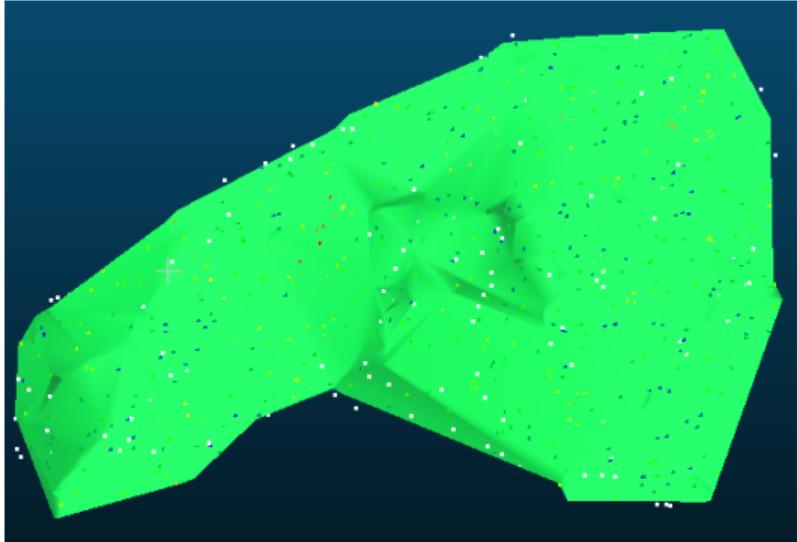




## Оценки C2C и C2M



(a) *Cloud to Cloud*

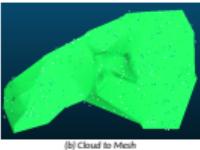
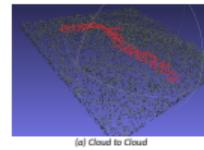


(b) *Cloud to Mesh*

## └ "1" Определение геометрических свойств поверхности

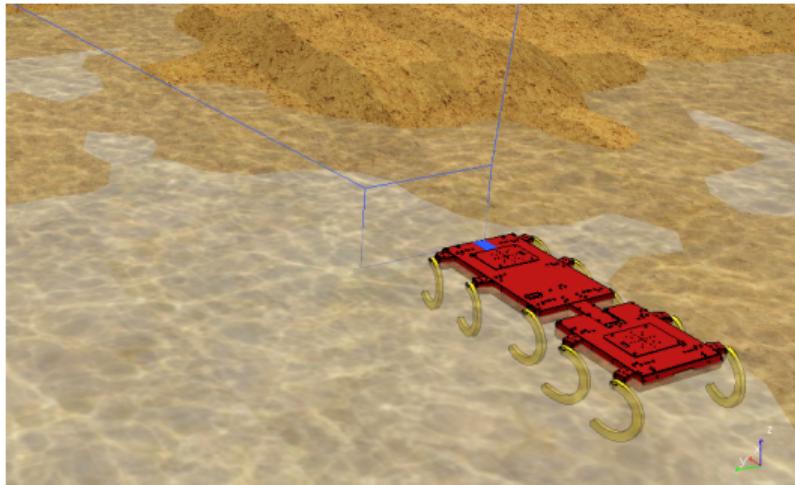
### └ Оценки C2C и C2M

Оценки C2C и C2M

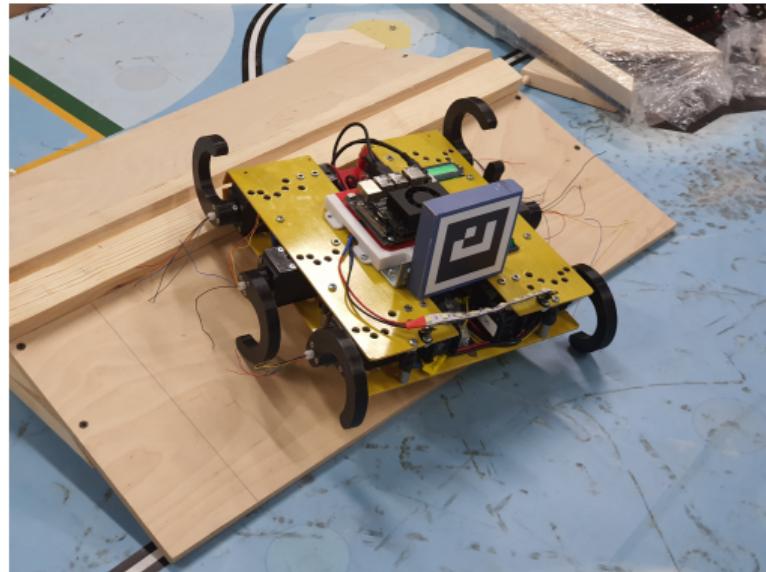




# Эксперименты



*CoppeliaSim* симулятор,  
**4ое поколение СтриРус**



*Натурные испытания,*  
**Зье + поколение СтриРус**

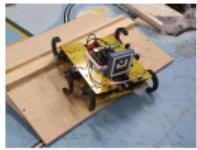
## └ "1" Определение геометрических свойств поверхности

### └ Эксперименты

#### Эксперименты



Сорелитон симулятор,  
4ое поколение Спирус



Настоящие испытательные  
Эье + поколение Спирус

a

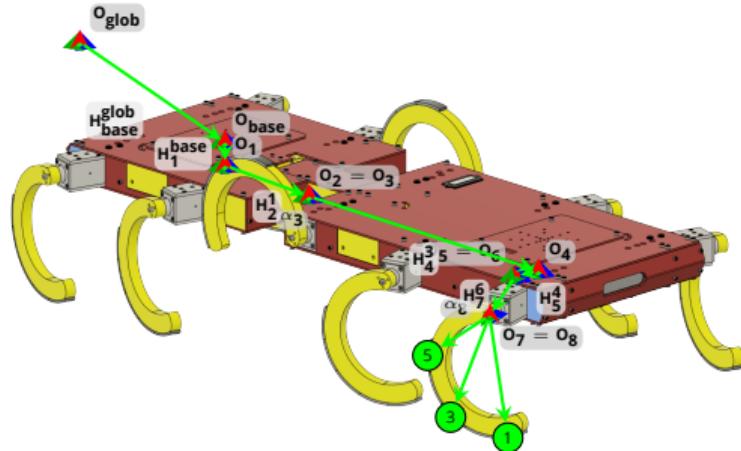


# Задача локализации

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

(17)

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

mm

#### Задача локализации

$$\mathbf{r}_{\text{up}}^{\text{abs}} = H(x_{\text{пл}}, y_{\text{пл}}, z_{\text{пл}}, \alpha_{\text{пл}}, \beta_{\text{пл}}, \gamma_{\text{пл}}) T_1(l_1) T_2(l_2) T_3(l_3) T_4(l_4) T_5(l_5) T_6(l_6)$$

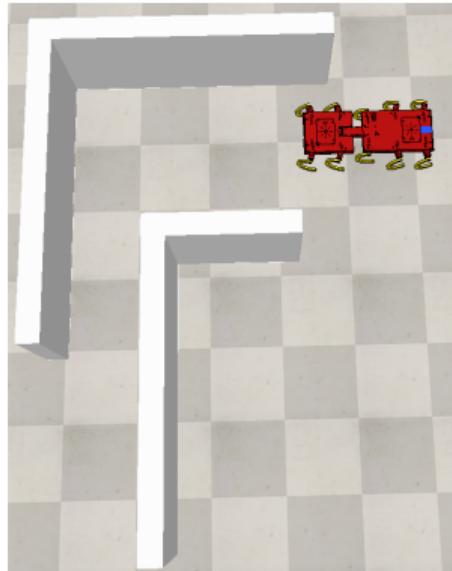
где  $H = \begin{bmatrix} R & \vec{t} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \end{bmatrix}$ ,  $R_i$  — матрица поворота, относительно одной из осей,  $\vec{t}_i$  — вектор сдвига.



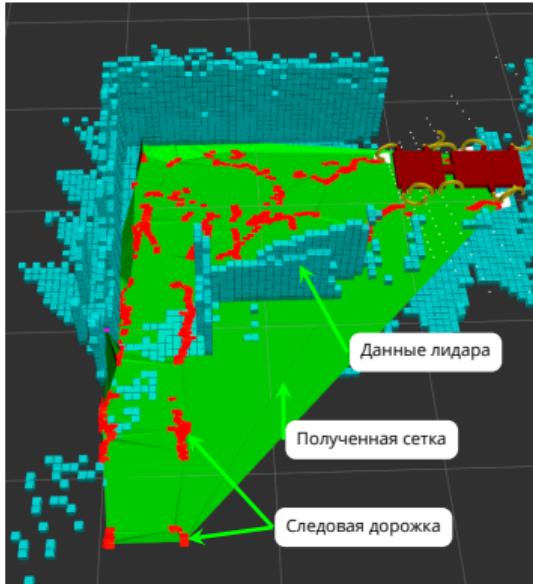
Пример решения задачи локализации с помощью Aruco маркера



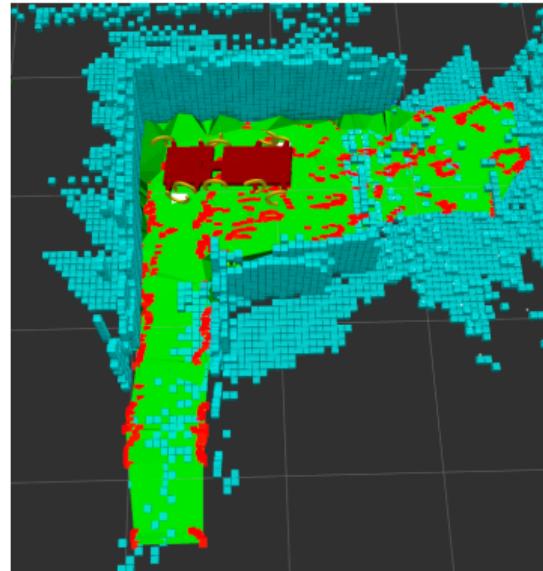
# Делоне для вогнутых оболочек



Пример поверхности



Выпуклая оболочка



Вогнутая оболочка

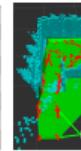
└ "1" Определение геометрических свойств поверхности

└ Делоне для вогнутых оболочек

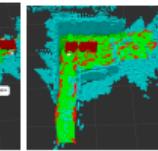
Делоне для вогнутых оболочек



Пример поверхности



Выпуклая оболочка



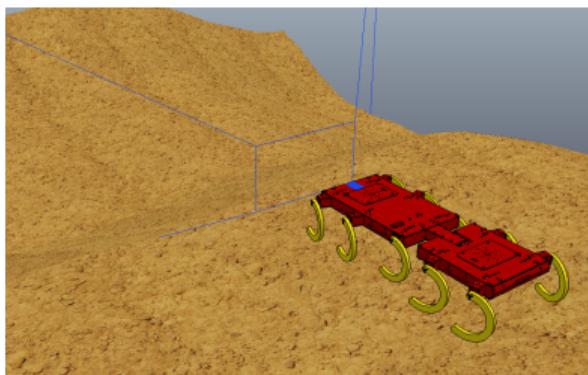
Вогнутая оболочка

a

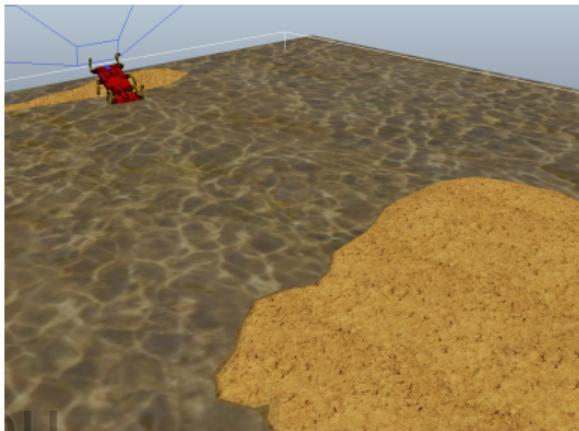


# Определение геометрических свойств поверхности

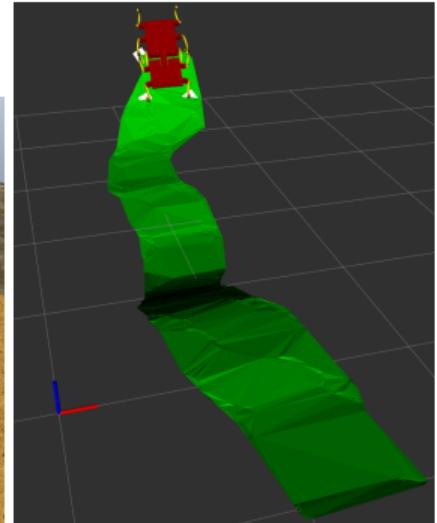
Результат: Маршрут, полигональная сетка



Начало маршрута



Конец маршрута



Созданная сетка

## └ "1" Определение геометрических свойств поверхности

### └ Определение геометрических свойств поверхности

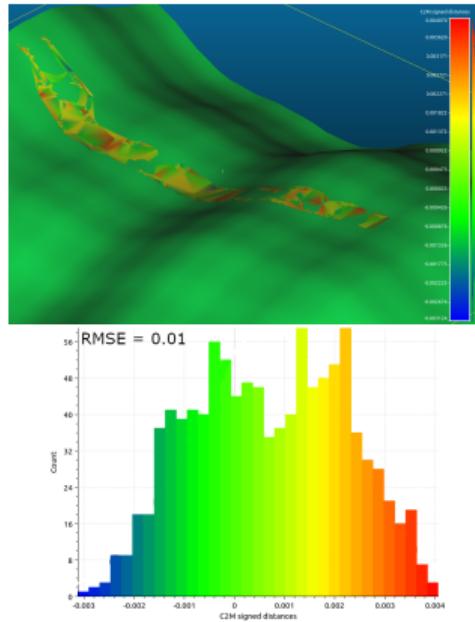
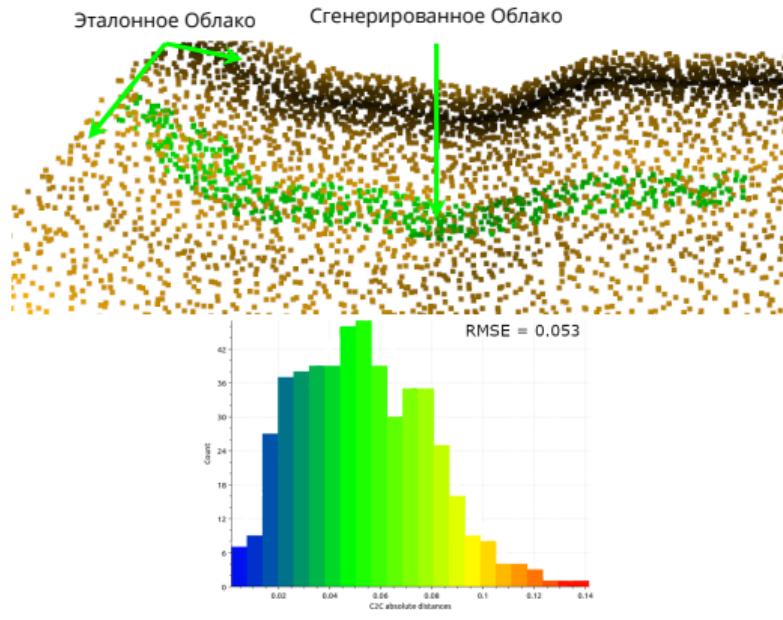


d



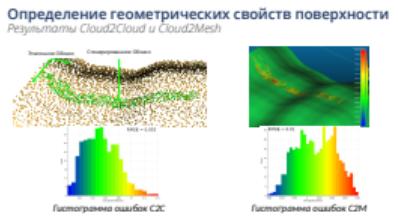
# Определение геометрических свойств поверхности

Результаты *Cloud2Cloud* и *Cloud2Mesh*



└ "1" Определение геометрических свойств поверхности

└ Определение геометрических свойств поверхности

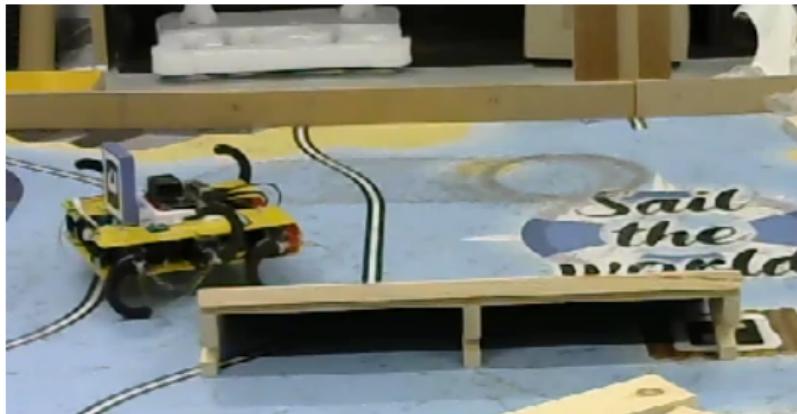


m

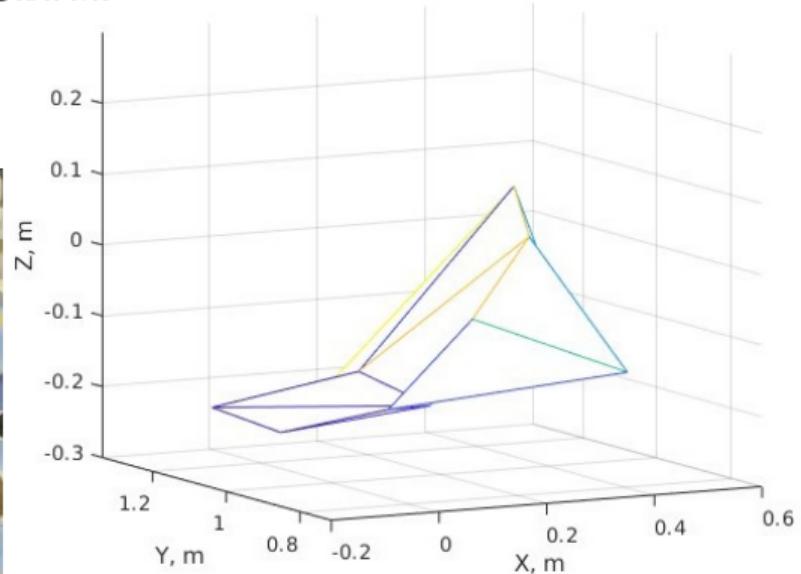


# Определение геометрических свойств поверхности

Результат: Натурные испытания, Видео



Робот проходит препятствие



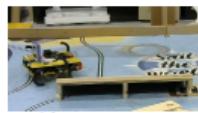
Полигональная сетка, полученная с помощью  
НОГ

## └ "1" Определение геометрических свойств поверхности

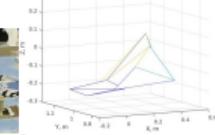
### └ Определение геометрических свойств поверхности

Определение геометрических свойств поверхности

Результаты: Натурные испытания; Выделен



Робот проводит пропитывание



Полигональная сеть, полученная с помощью нав

k



# Результаты решения задач

## Научных задач (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.

## Экспериментальных разработок

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 решения задач

результаты

#### Результаты решения задач

##### Научных задач (научная новизна)

1. Метод подбора количества ног для шагающих цикловых динокопелей.
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.

##### Экспериментальных разработок

1. Спроектированы и собраны 2 прототипа с Шагающим цикловым динокопелем 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.



# Результаты интеллектуальной деятельности

- Количество публикаций
  - 2 — журналы, рекомендованных ВАК
  - 3 — журналы, индексируемые в Scopus
  - 5 — РИНЦ
- 8 — Зарегистрированных программ для ЭВМ
- 3 — Выигранных гранта (Умник, 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.

*Спасибо за внимание!*