



# Разработка метода тактильного очуствления для мобильного шагающего робота

Аспирант: Олег Буличев

Руководитель: Александр Малолетов



# О себе

## Образование

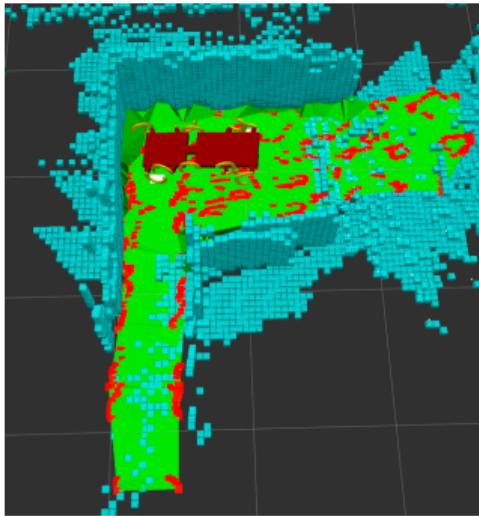
- Бакалавриат — МГТУ им. Н.Э. Баумана, РК6 (красный диплом)  
**Тема:** Разработка системы управления наведением МРК «Пластун»
- Магистратура — Университет Иннополис, Робототехника  
**Тема:** Development of biomimetic centipede robot «StriRus»
- Аспирантура — Университет Иннополис, Робототехника

## Текущие должности

- Старший преподаватель (Лин. Алг., Теор. Мех., МиМ)
- Инженер-исследователь

# Цель работы

Определить геометрические и физические свойства пройденной поверхности с помощью шагающего движителя, используя тактильное очущение.



Определение геометрических свойств

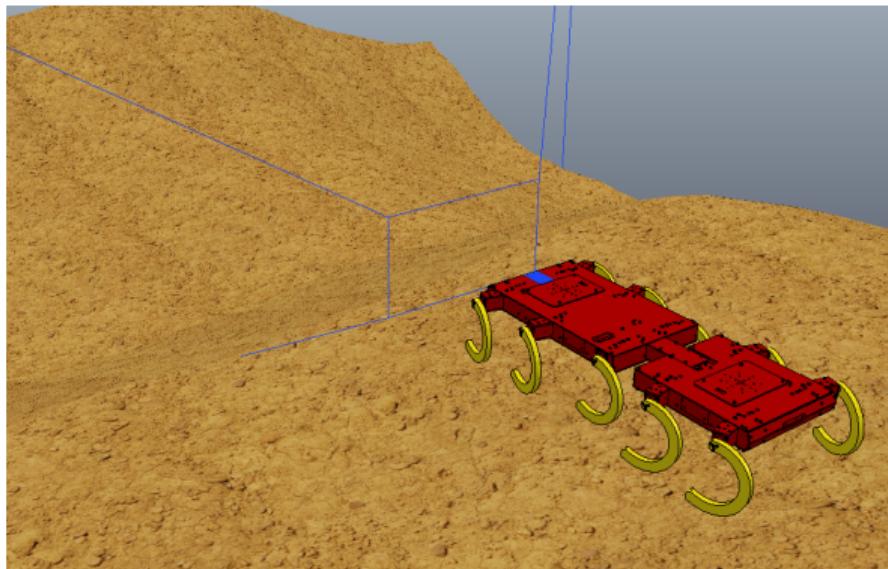


Определение физических свойств

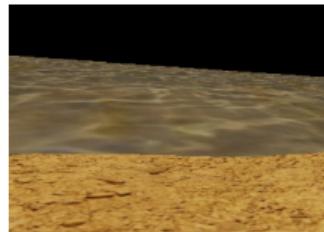
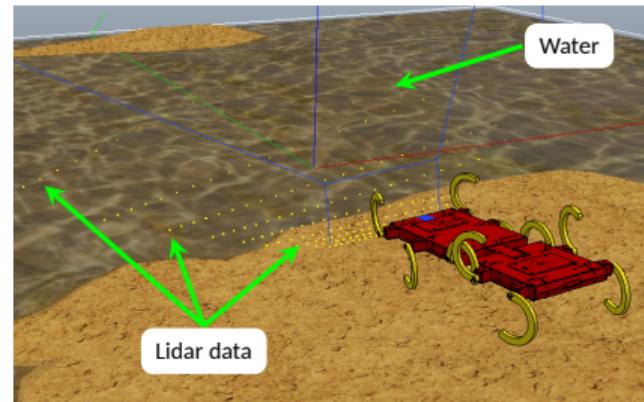


# Нерешаемая задача с помощью камеры или лидара

Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?



Поверхность без воды



Вид с камеры

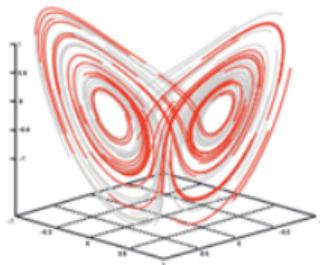


# Актуальность проблематики



**DARPA**  
**SUBTERRANEAN  
CHALLENGE**

Соревнование по  
автономному  
исследованию пещер



Национальная  
технологическая инициатива  
Спонсирование проекта  
по тематике



Грант по тематике



# Литературный обзор

- Пещеры: препятствия, размеры.
  - Классификация пещер и препятствий
  - Оценка сложности территории
- Роботы для исследования пещер: от дирижаблей, до шагающих.
  - Робототехнические системы для исследования свободных пещер
- Способы определения силы реакции опоры.
  - Неявные и явные способы. Классификация типов датчиков силы
- Методы распознавания типа поверхности.
  - С помощью машинного обучения, используя набор датчиков
- Методы построения карты: оптические и тактильные.
  - Построение поверхности с помощью датчика силы на манипуляторе
  - Построение карты с помощью лидаров и камер

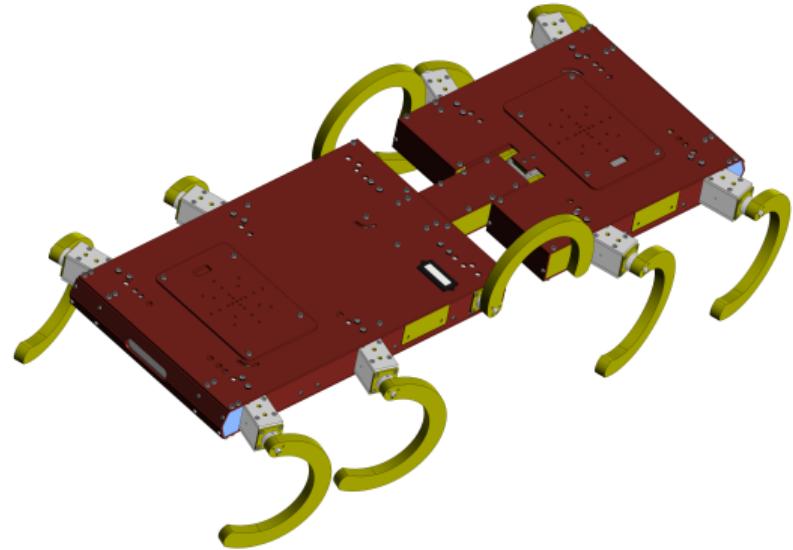


# Разработка робота

Требования к роботу

**Задача** – выбрать движитель. Робот должен:

- Иметь *малые размеры*, чтобы лазать и не застевать в щелях
- Обладать *проходимостью* для преодоления сыпучих грунтов
- Преодолевать *небольшие водные препятствия*
- Иметь возможность залезать на *большие валуны*

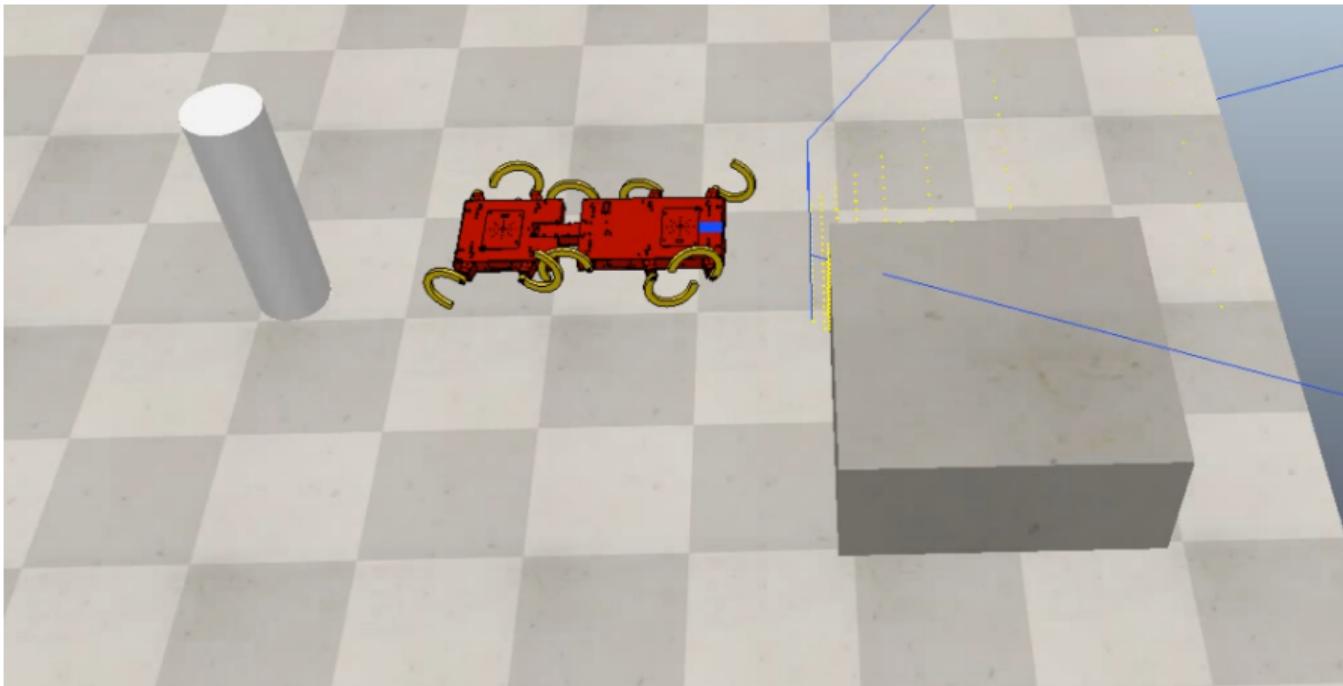


Шагающий цикловый движитель с 1 степенью свободы в ноге  
*СтриРус*, 4-ая итерация



# Разработка робота

Видео





# Разработка робота

## Структурный синтез

### Вопрос

Какое оптимальное количество ног должен иметь такой движитель?

### Ответ

Решив задачу структурного синтеза,  
результатом которого является движитель с **8—14 ногами**

# Разработка робота

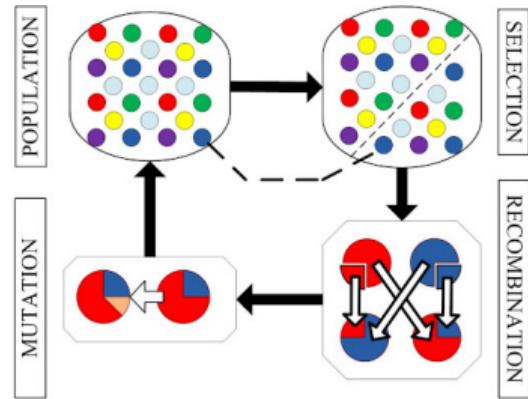
## Используемые технологии



Генерация поверхности  
(Параметризованная  
**искусственная территория**)  
Проблема формализации  
сложности поверхности



Робосимулятор  
(Неявная математическая  
модель)  
Громоздкость явной модели

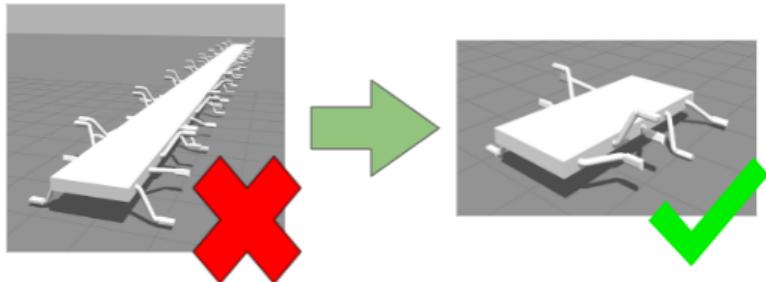


Генетический алгоритм  
Отличен для  
дискретной глобальной  
мультикритириальной задачи  
оптимизации

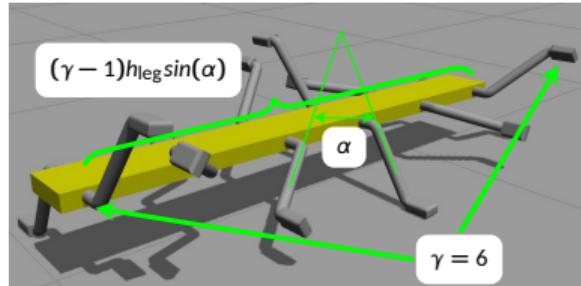


# Разработка робота

Предлагаемое решение



**Идея:** Минимизировать кол-во ног  
без потери проходимости



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

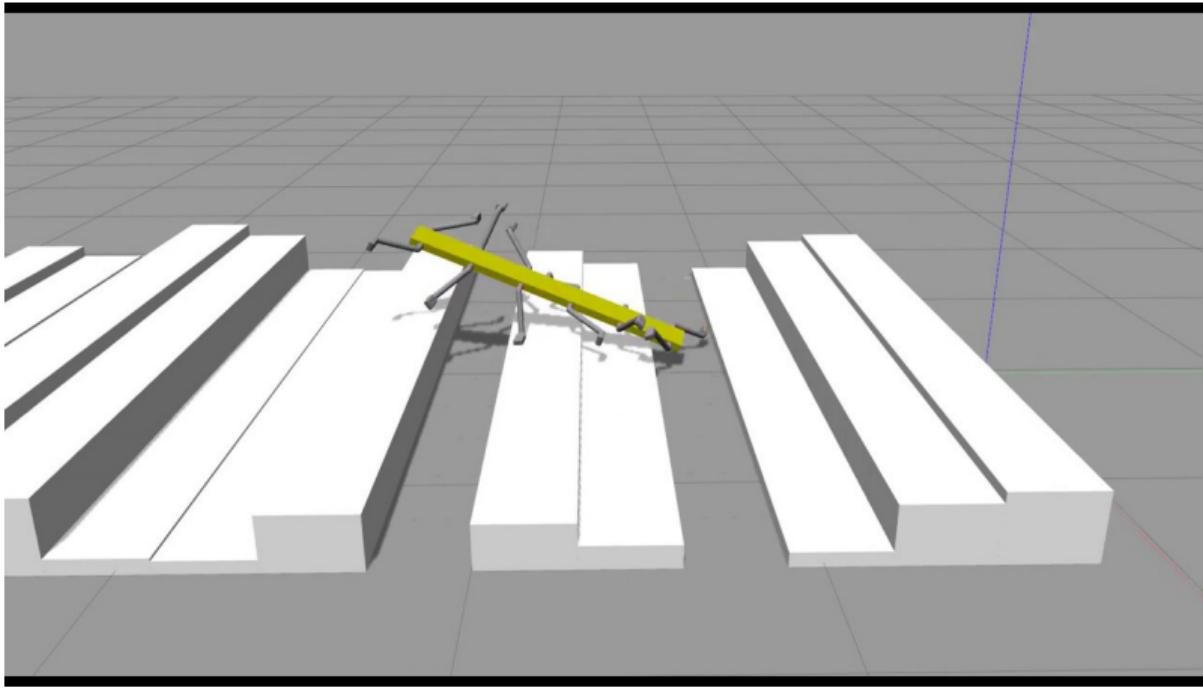
$\beta$  – адаптивный параметр,

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



# Разработка робота

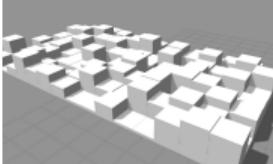
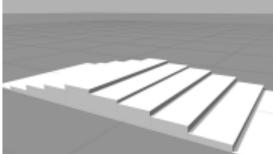
Видео: История одного сгенерированного робота





# Разработка робота

Конкретные результаты:  $\omega_1 = 0.6$ ,  $\omega_2 = 0.4$

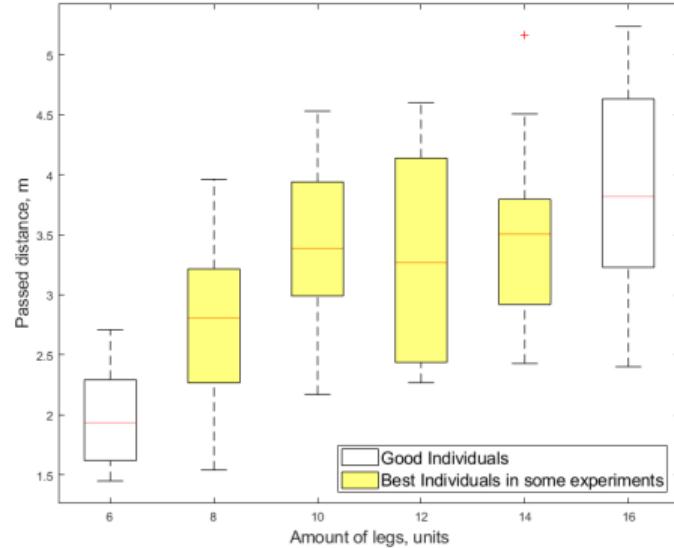
	Тип территории	Кол-во ног	Угол между соседними ногами	Кол-во индивидов
Этап 1		12	73	200
		12	72	
Этап 2		10	68	55
		12	77	



# Разработка робота

## 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



# Разработка преобразователя силы

## Вопрос

Как получить силу реакции опоры?

## Ответ

- Измерив ток/напряжение на моторе
- Установив датчик момента на вал мотора
- Установив датчик силы на ногу робота

**Пьезорезистивный датчик основанный на Velostat:** дешевый и надежный, но имеет проблемы с гистерезисом



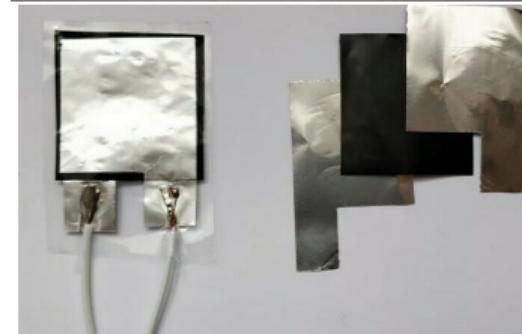
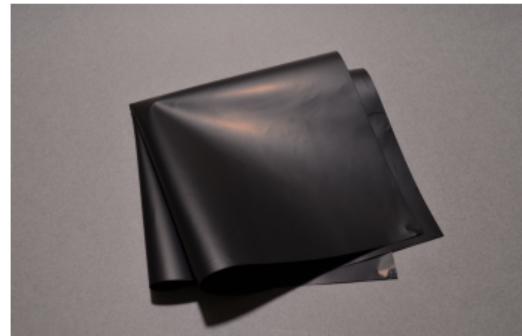
# Разработка преобразователя силы

## Velostat

Представляет собой полимерный материал, наполненный техническим углеродом.

### Встреченные проблемы:

- Гистерезис – зависимость от текущего и предыдущих состояний
- Нелинейность материала
- Малая точность при весе от 300 грамм
- Разность значений при одинаковом давлении, когда площадь нажатия меньше датчика →  
Научная задача – охарактеризовать материал для таких случаев



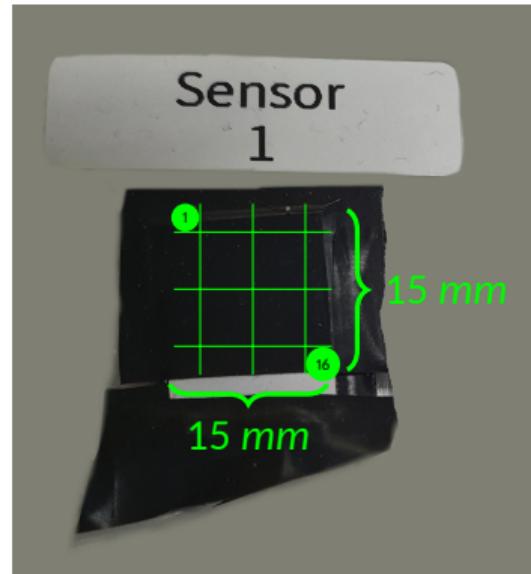
Простейший  
преобразователь силы



# Разработка преобразователя силы

## Эксперименты

- 1. Статический.** Прикладывается статический груз с размером в сенсор
- 2. Динамический.**
  - Преобразователь представляется в виде сетки  $4 \times 4$ . Мы касаемся с одинаковым давлением, используя все 5 насадок
  - Используются насадки только 2 и 15 мм. Происходит нажатие с силой 5, 10, 20, 30, 40 Н



Представление сенсора  
как  $4 \times 4$  сетки



# Разработка преобразователя силы

Результаты: 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,

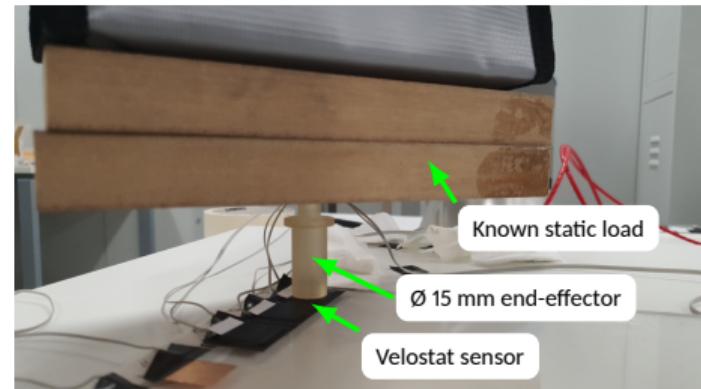
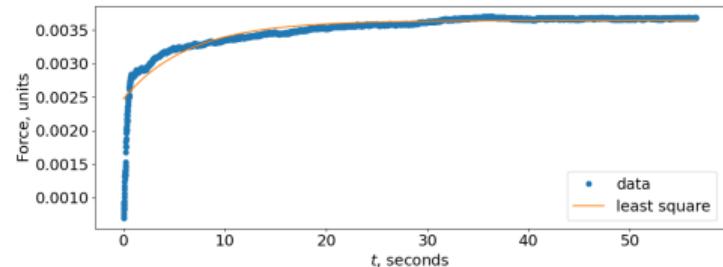
$p$  – приложенное давление,

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

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

Апробирована модель для калибровки

датчика

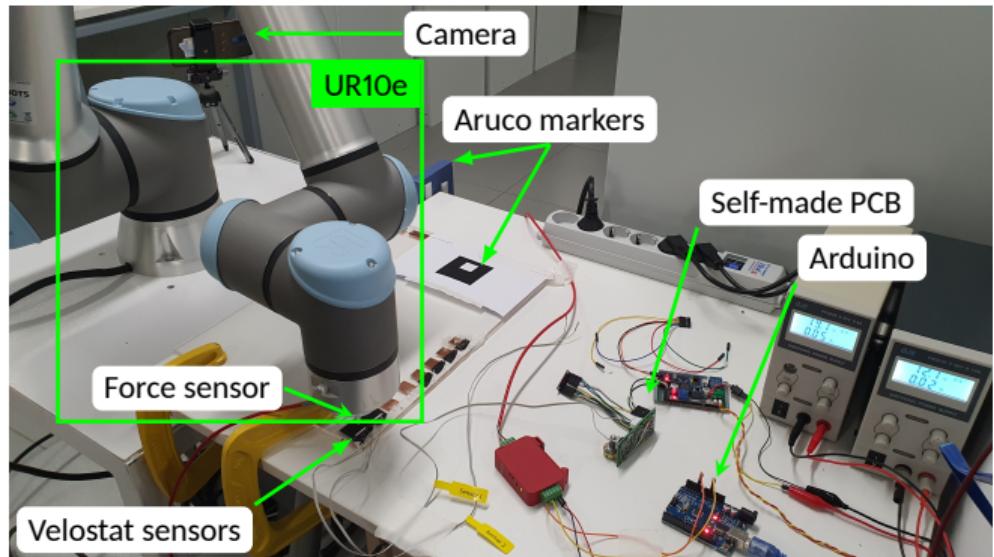




# Разработка преобразователя силы

## Требования к установке

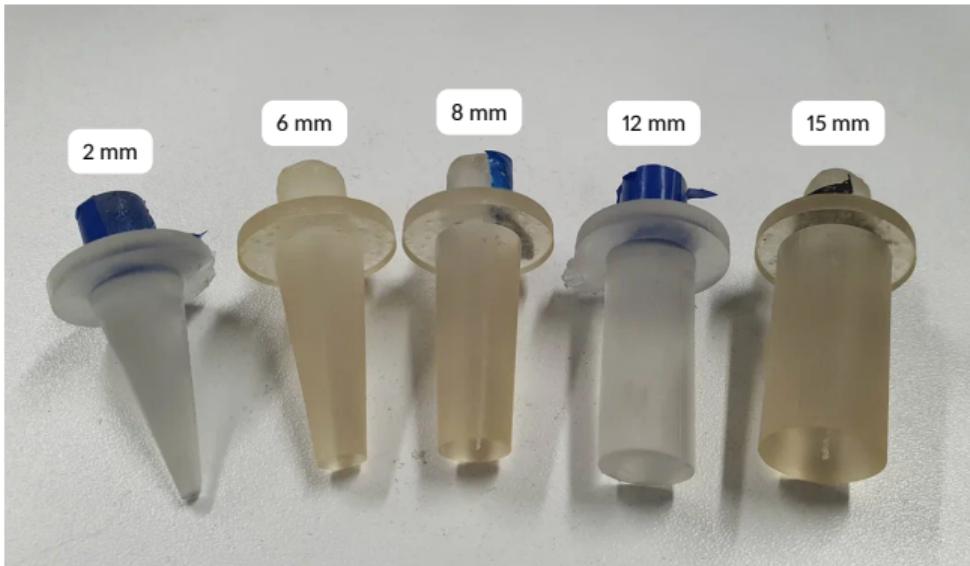
- Управление силой нажатия  
Импедансное управления
- Повторяемость  
эксперимента по силе и  
позиции  
Добавив манипулятор и  
камеру
- Возможность нажимать  
только на часть сенсора  
Насадки для манипулятора





# Разработка преобразователя силы

Установка: Насадки



Все насадки



Промышленный  
датчик силы

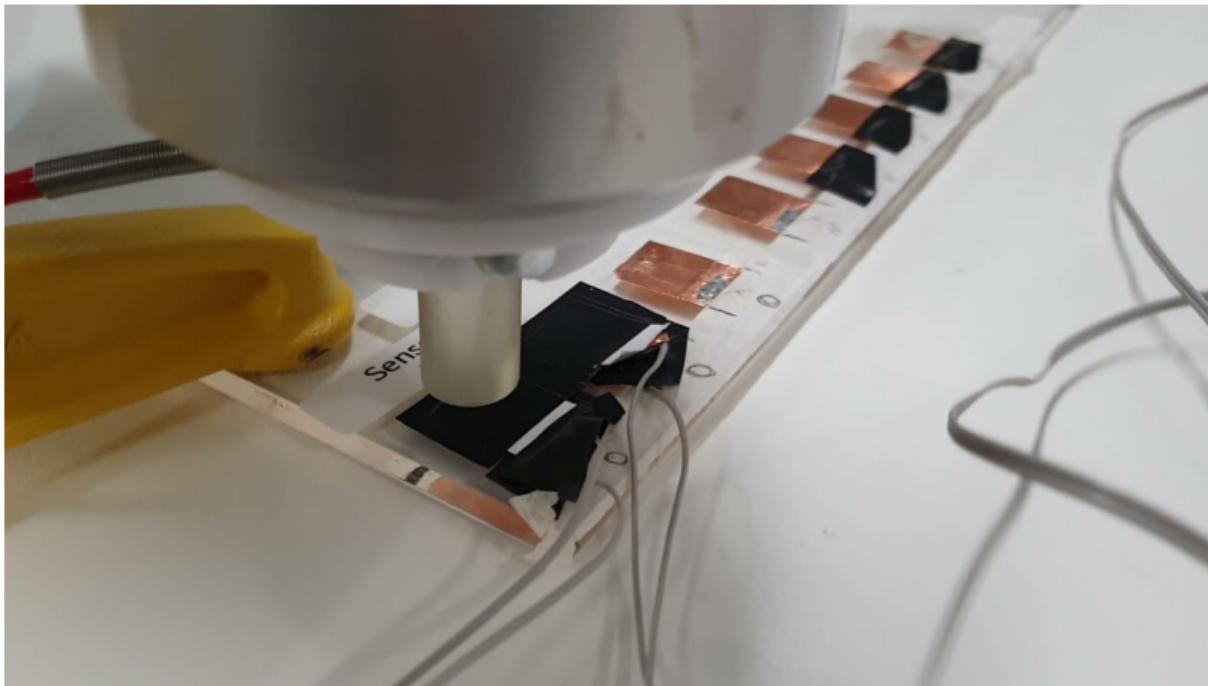


Насадка в сборке



# Разработка преобразователя силы

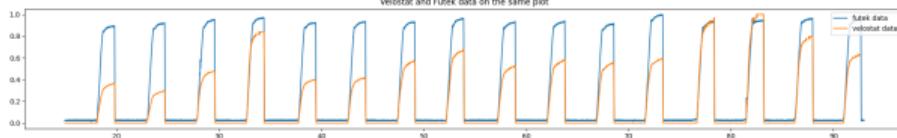
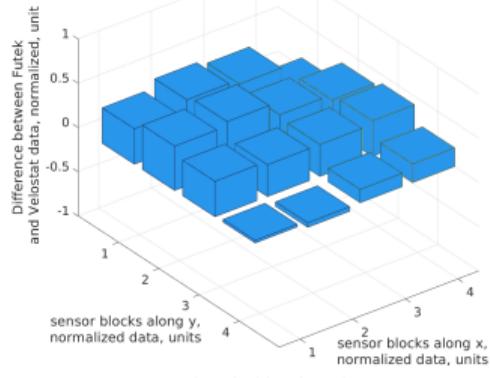
Установка: Видео



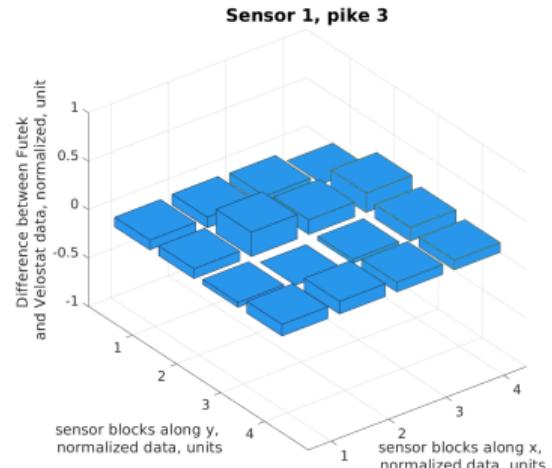


# Разработка преобразователя силы

Результаты: Динамический эксперимент



2 мм диаметр насадки



8 мм диаметр насадки

Однаковые данные, когда площадь нажатия превышает 50% от площади датчика



# Определение физических свойств поверхности

## Вопрос

Как определить тип местности во время движения по такой местности?

## Ответ

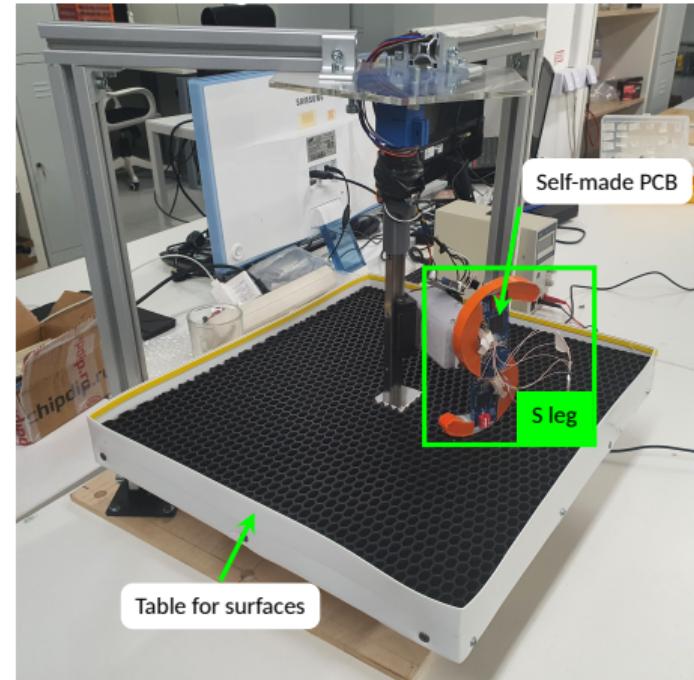
1. Подготовить для экспериментов различные поверхности.
2. Собрать датасет, состоящий из угловой скорости мотора и показаний датчиков с ног робота.
3. Представить их в виде вектора фич.
4. Решить задачу классификации данных с помощью SVM, используя метрику 10-fold cross validation.
5. Протестировать модель на собранных данных.



# Определение физических свойств поверхности

## Требования к установке

- Иметь возможность быстро менять используемые поверхности  
**Быстроразборный стол**
- Бесконечное движение робота  
**2-ух степенной механизм и нога S-образной формы**
- Узел движителя должен быть такой же как на СтриРусе  
**Создано крепление для узла ноги робота**



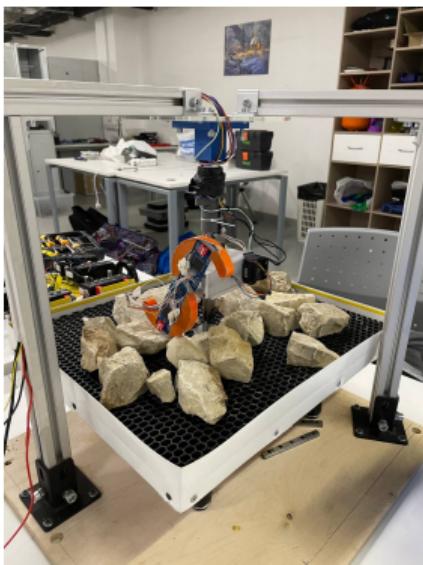


# Определение физических свойств поверхности

Установка: Типы поверхности, видео



Резина



Каменная грядка

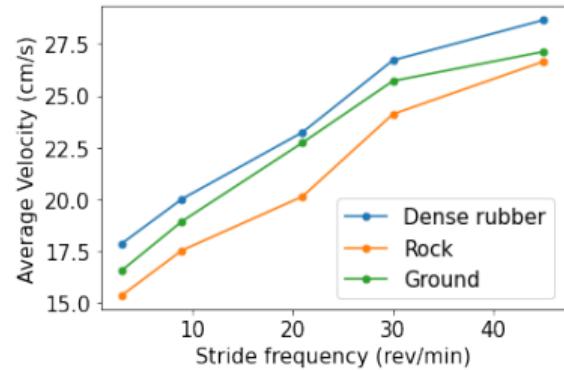
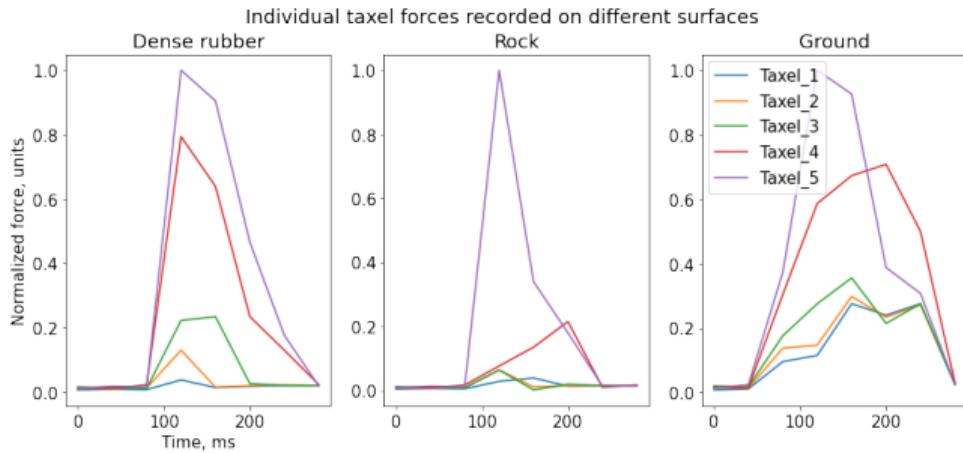


Земля



# Определение физических свойств поверхности

Данные с одного эксперимента



True class	Predicted Class		
	Rubber	Rock	Ground
Rubber	84.0%	2.56%	13.44%
Rock	20.1%	67.8%	12.1%
Ground	1.0%	18.9%	80.1%



# Определение геометрических свойств поверхности

## Вопрос

Как создать плотное облако точек, используя разреженные данные об точках касания ног?

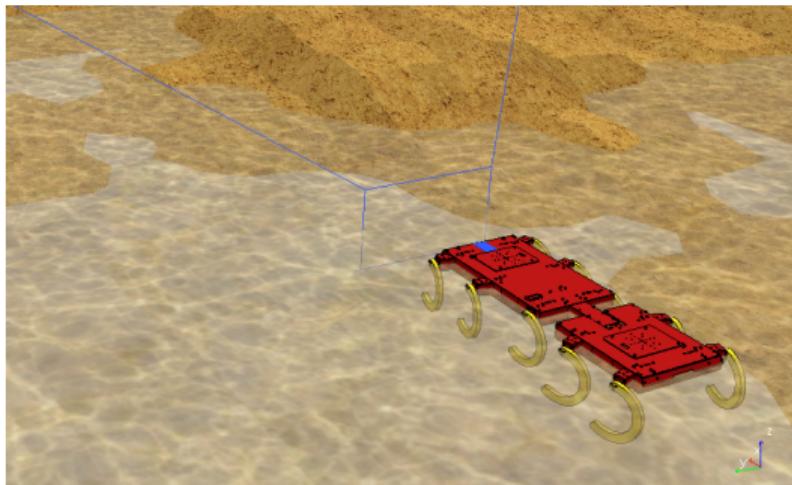
## Ответ

1. Создать полигональную сетку, используя 2D триангуляцию Делоне (вогнутая оболочка) с использованием разреженных данных
2. Сгенерировать новые точки из полигональной сетки
3. Вернуть плотное облако точек навигации навигации

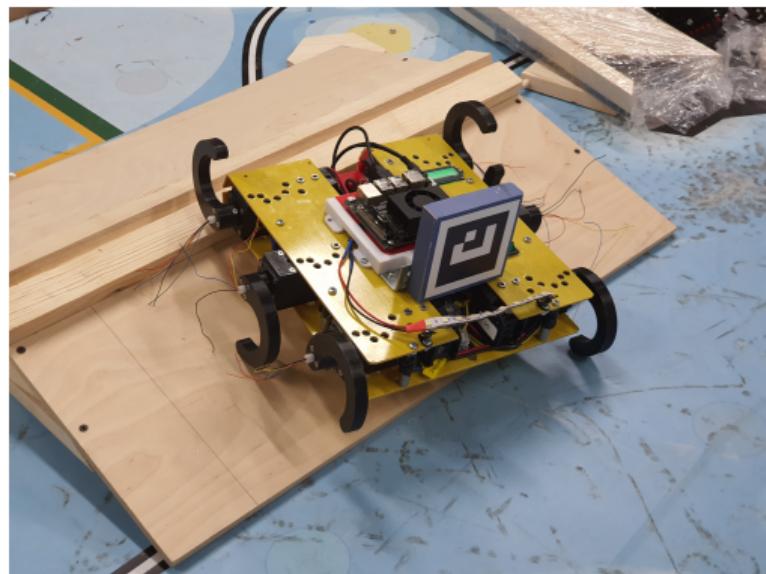


# Определение геометрических свойств поверхности

Места проведения экспериментов



CoppeliaSim симулятор,  
**4th gen** СтриРус

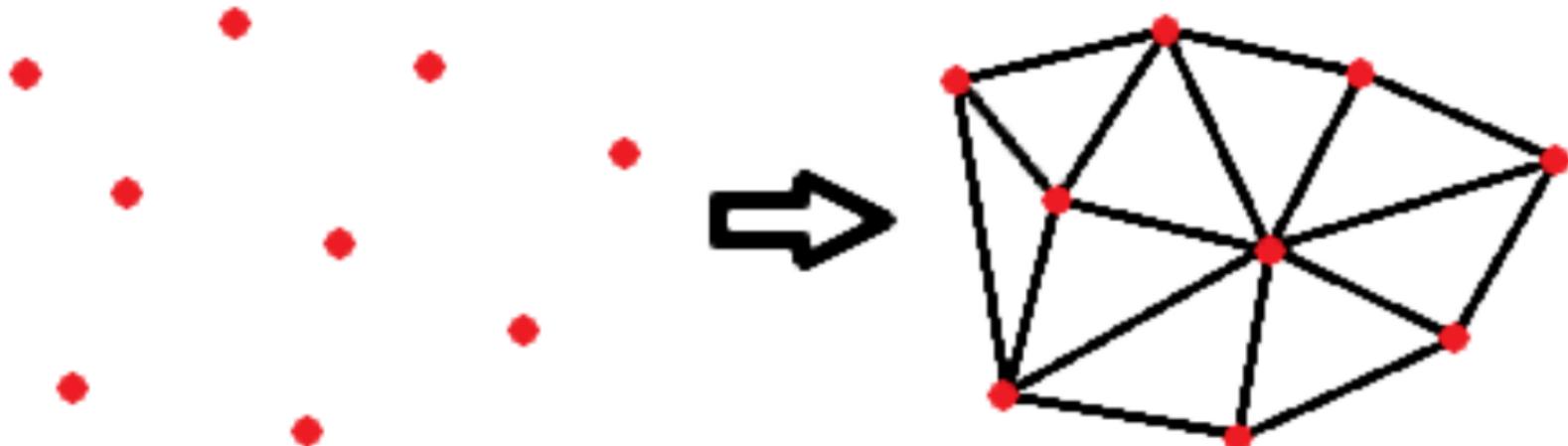


Натурные испытания,  
**3th+ gen** СтриРус



# Определение геометрических свойств поверхности

Триангуляция Делоне

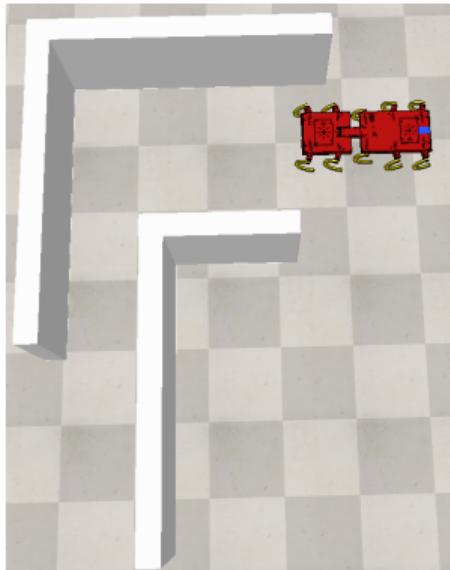


2D триангуляция Делоне (Выпуклая оболочка)  
От облака точек к полигональной сетке

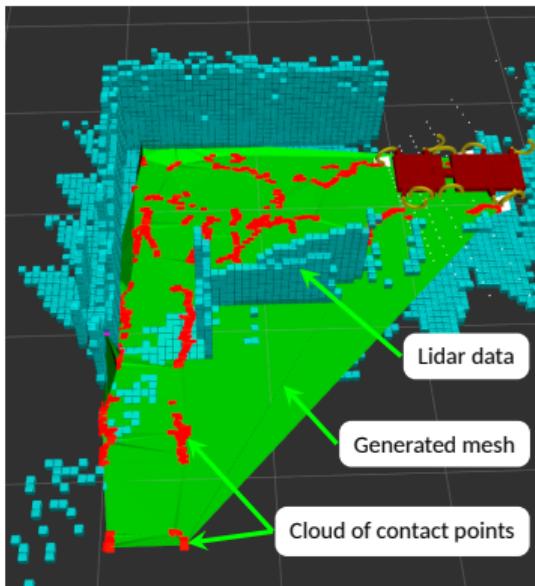


# Определение геометрических свойств поверхности

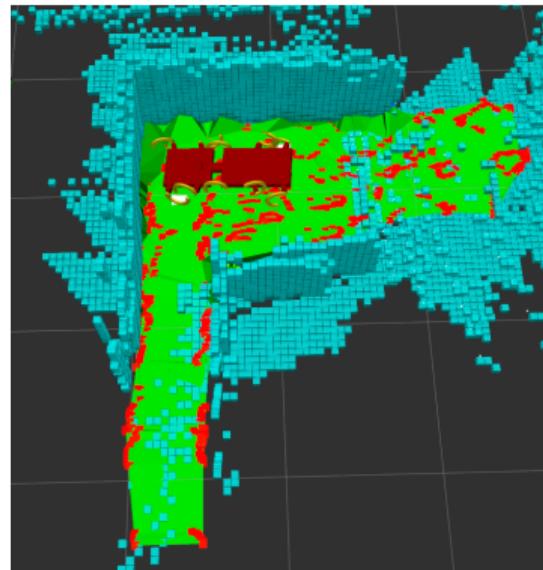
Почему важно использовать вогнутую оболочку (модификация Делоне)



Пример поверхности



Выпуклая оболочка

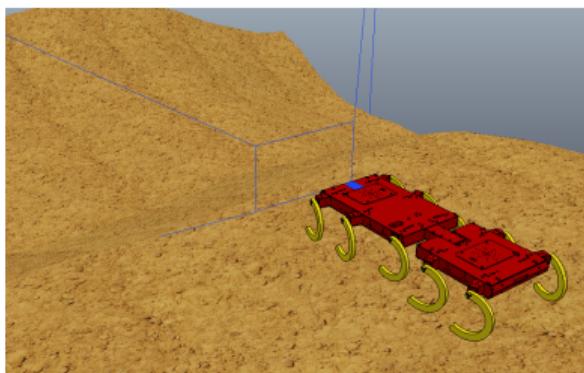


Вогнутая оболочка

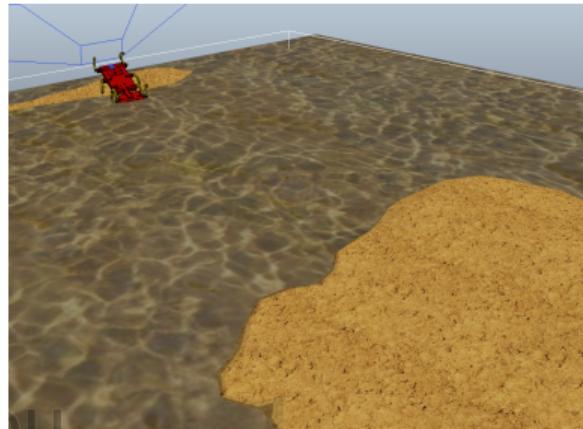


# Определение геометрических свойств поверхности

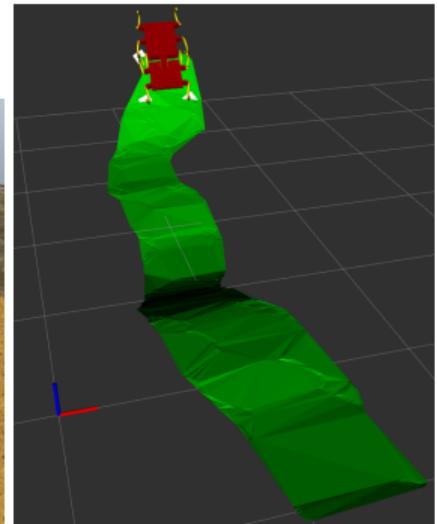
Результат: Маршрут, полигональная сетка



Начало маршрута



Конец маршрута

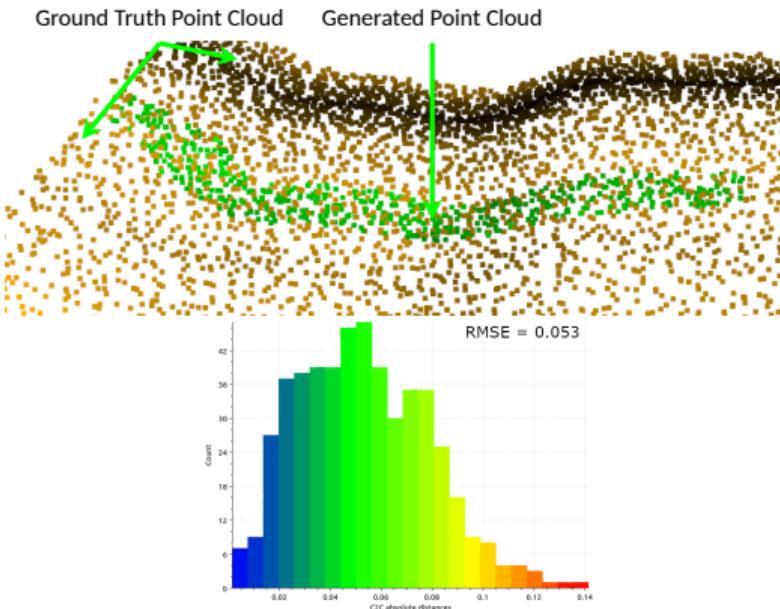


Созданная сетка

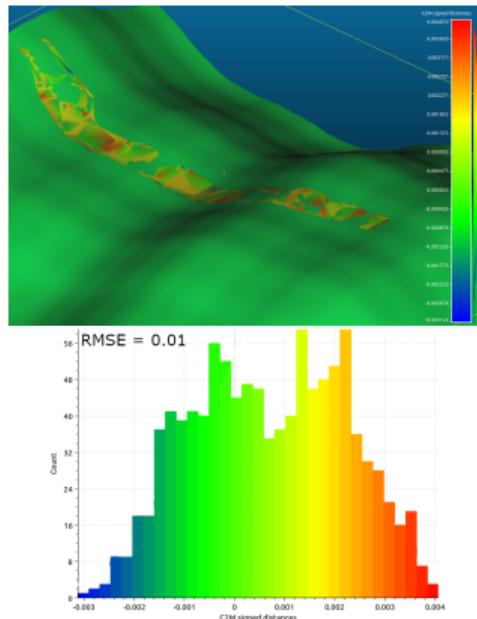


# Определение геометрических свойств поверхности

Метрики Cloud2Cloud и Cloud2Mesh



Гистограмма ошибок C2C

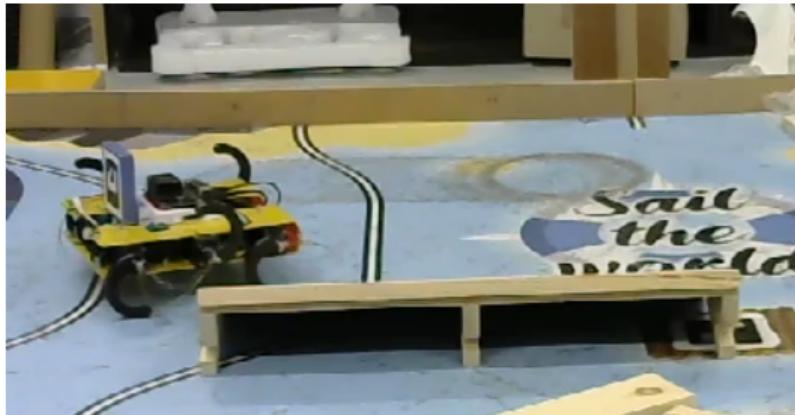


Гистограмма ошибок C2M

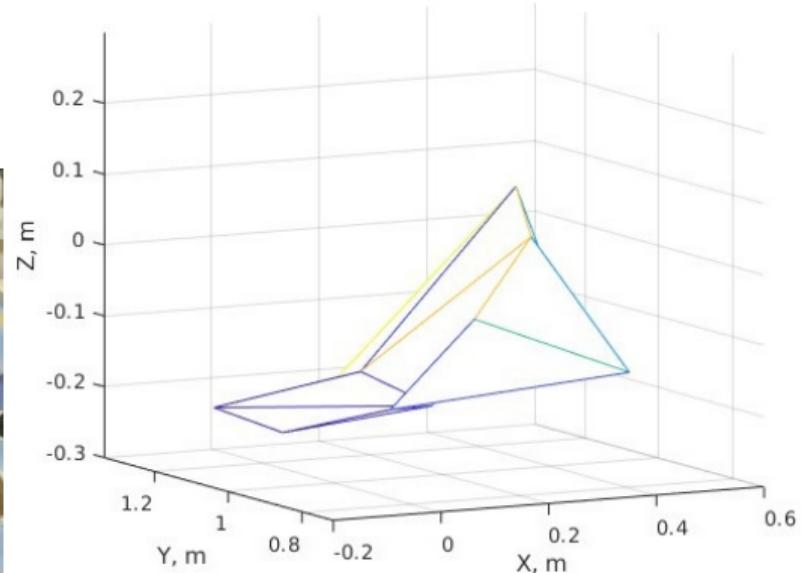


# Определение геометрических свойств поверхности

Результат: Натурные испытания, Видео



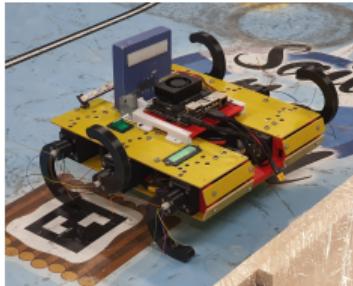
Робот проходит препятствие



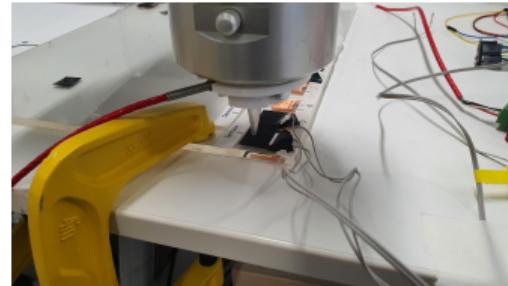
Полигональная сетка, полученная с помощью ног



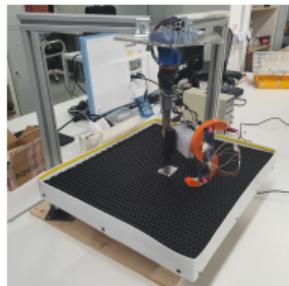
# Глобальный итог



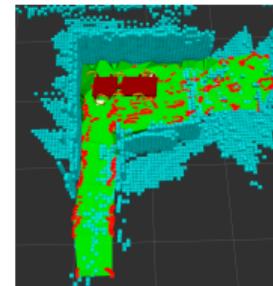
1. Структурный синтез



2. Датчик силы на основе Velostat



3. Определение поверхности



4. Ножное картографирование



# Результаты решения задач

## Научных задач (научная новизна)

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

## Инженерных задач

1. Шагающий цикловой движитель с одной степенью свободы в ноге.
2. Выбраны, откалиброваны и установлены не оптические сенсоры для определения свойств поверхности.
3. Алгоритм определения типа поверхности.
4. Алгоритм картографирования местности с помощью пальпирования ногами робота.



# Результаты интеллектуальной деятельности

- Количество публикаций
  - 1.5 — журналы, рекомендованных ВАК
  - 3 — журналы, индексируемые в Scopus (2 работы Q2)
  - 9 — РИНЦ
  - 2 — готовятся к публикации в Scopus
- 8 — Зарегистрированных программ для ЭВМ
- 3 — Выигранных гранта (Умник, ЦНТИ, РФФИ)