



# Разработка метода тактильного очуствления для мобильного шагающего робота

Соискатель: Олег Буличев

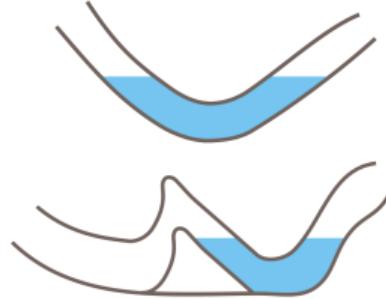
Руководитель: Александр Малолетов



# Необходимость исследования пещер роботами



Соляные отложения



Сифоны



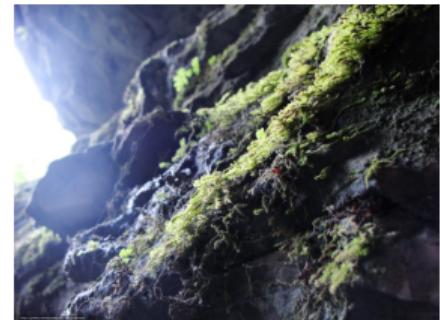
Ледяные пещеры



Глина



Лужа



Мх



# Проблематика

## Проблема

*Нет технологий для исследования узких пещер естественного происхождения*

Стандартное решение для автономной навигации не будет работать по следующим причинам:

- оптические сенсоры (лидары, камеры) могут покрыться грязью;
- камеры выдают некачественные данные при недостатке освещения;
- спутниковая навигация (GPS) не работает в замкнутых пространствах под землей.

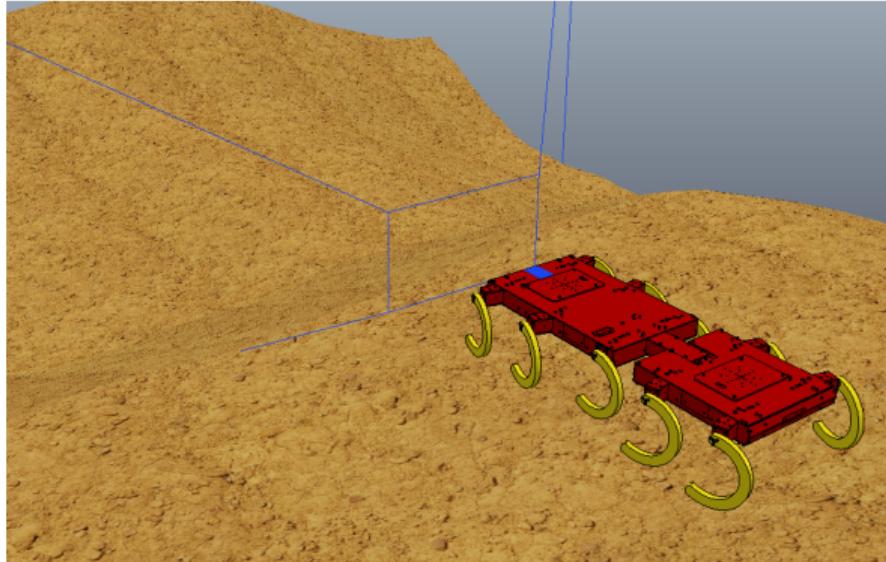


*DARPA Subterranean Challenge,  
свободная пещера*

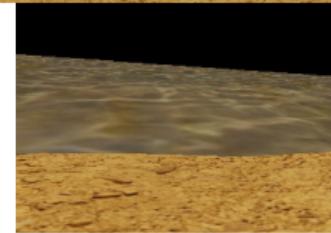
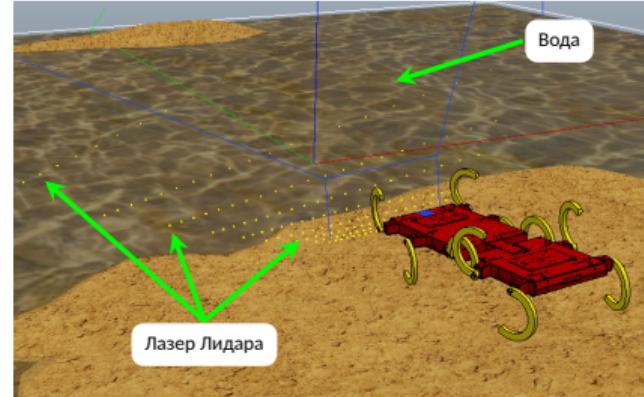


# Нерешаемая задача с помощью камеры или лидара

Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?



Поверхность без воды

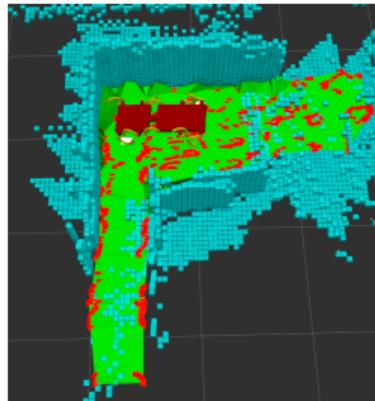


Вид с камеры



# Цель работы

Разработать метод для определения геометрических и физических свойств пройденной **поверхности** с помощью многоугольного шагающего робота с цикловыми двигателями, используя **тактильное** очущение, без использования оптических сенсоров.



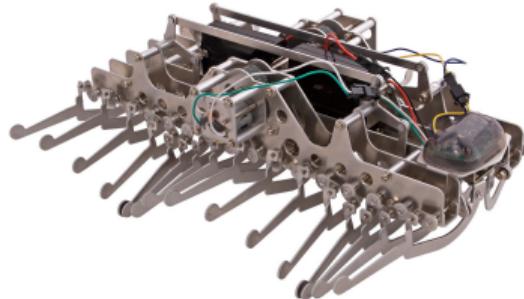
Определение геометрических свойств



Определение физических свойств

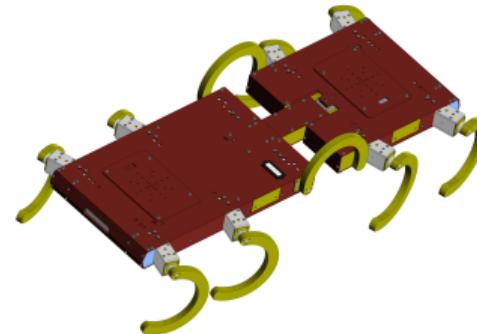
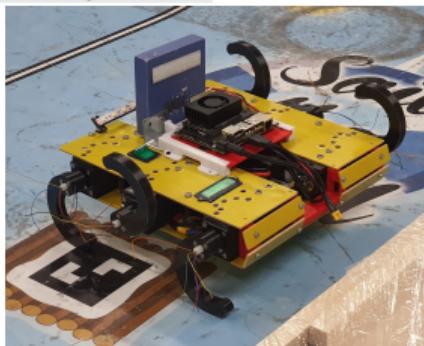
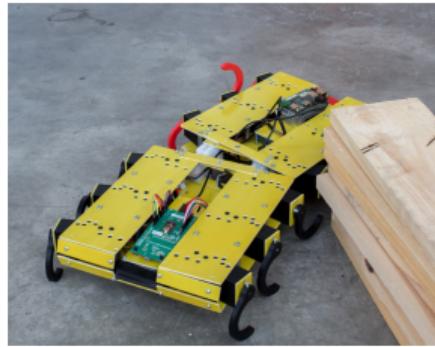
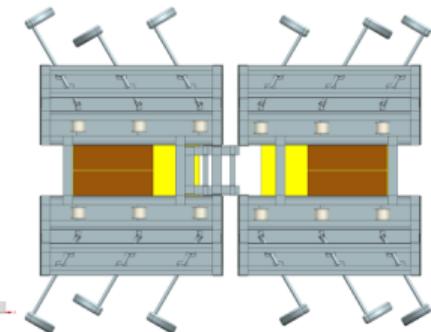
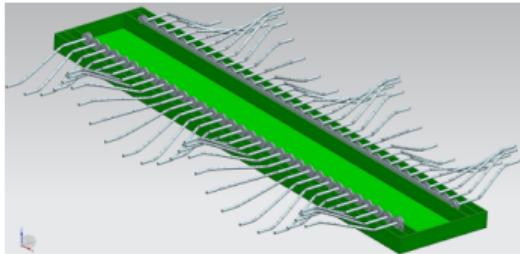
# Объект исследования

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





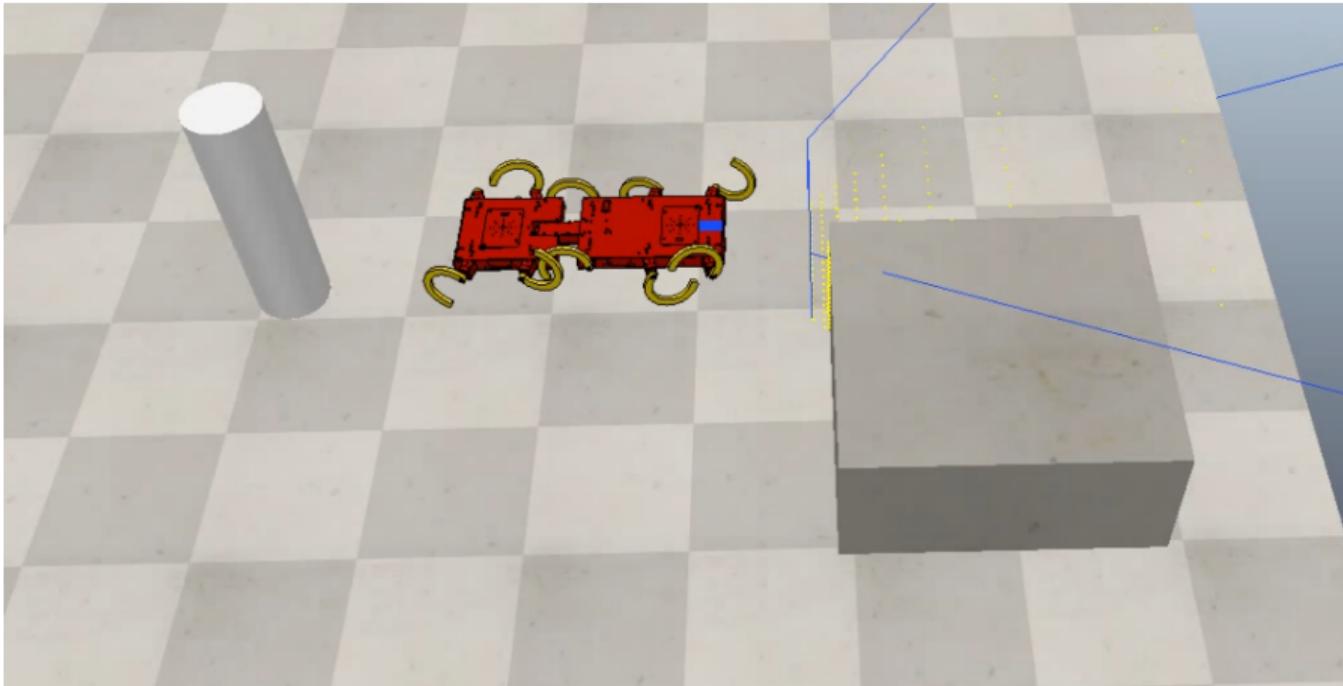
# Объект исследования





# Разработка робота

Видео





# Основные научные задачи исследования

1. 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.
2. Создание методики **исследования датчика силы**, когда площадь контакта нажатия на сенсор меньше чувствительной области самого сенсора.
3. Разработка метода **построения карты местности и определения геометрических свойств поверхности** с помощью тактильного ощущения.
4. Реализация алгоритма, позволяющего **определять физические свойства опорной поверхности**.



### Легенда

- Стандартные средства, без доработок
- Проект исследования и разработки



# Разработка робота



# Литературный обзор

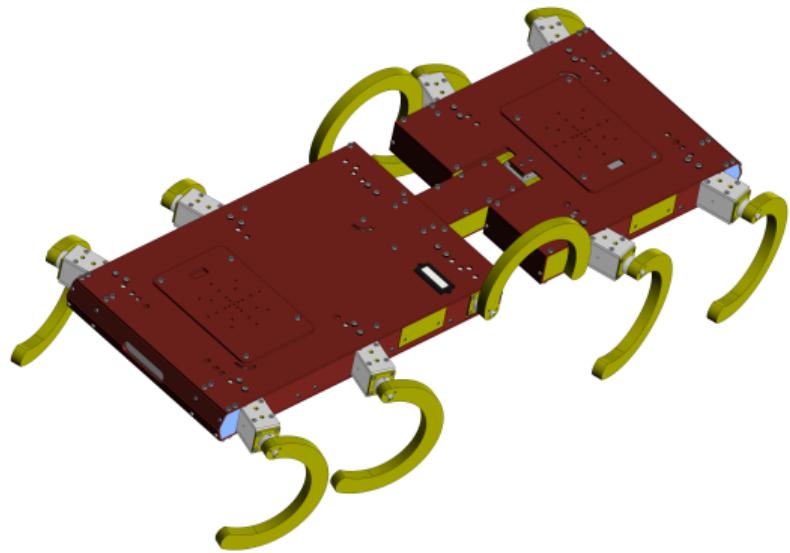
- Пещеры: препятствия, размеры.
  - Классификация пещер и препятствий
  - Оценка сложности территории
- Работы для исследования пещер: от дирижаблей, до шагающих.
  - Робототехнические системы для исследования свободных пещер
- Способы определения силы реакции опоры.
  - Неявные и явные способы. Классификация 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 и Задачи

1. Малые размеры для прохода в узких местах
  2. Проходить сыпучие грунты
  3. Преодолевать водные препятствия
  4. Залезать на большие валуны
- Смоделировать робота
  - Разработать критерий оптимизации конструкции
  - Решить задачу оптимизации
  - Спроектировать и собрать прототип



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



## Разработка робота

Математическая модель: Описание механической системы

$$M\ddot{u} = \vec{g}$$

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

$$\ddot{u}_i^T = \begin{bmatrix} \dot{v}_i^T & \dot{\omega}_i^T \end{bmatrix}$$

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

где,  $M_i$  — матрицы, содержащие массово-инерционные характеристики;  $m_i$  — 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;  $\vec{F}_i$ ,  $\vec{t}_i$  — силы и моменты сил взаимодействия.



# Разработка робота

## Геометрические связи

Тела соединены цилиндрическими шарнирами:

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

$$\vec{q}_i^T = [\vec{x}_i^T \quad \vec{Q}_i^T]$$

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

$$\ddot{\vec{q}}_i = \tau_i^T \vec{z}_{i-1} - k_i \dot{\vec{q}}_i$$

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.



# Разработка робота

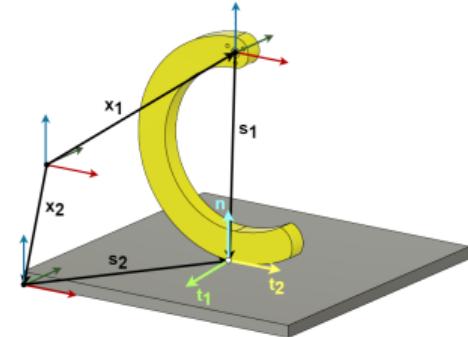
*Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота*

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

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

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

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  $t_{1,2}$ .



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



# Разработка робота

Структурный синтез

## Формальная задача

Оптимизировать количество ног у объекта исследования на основе критериев показателя проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации.

## Ответ

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

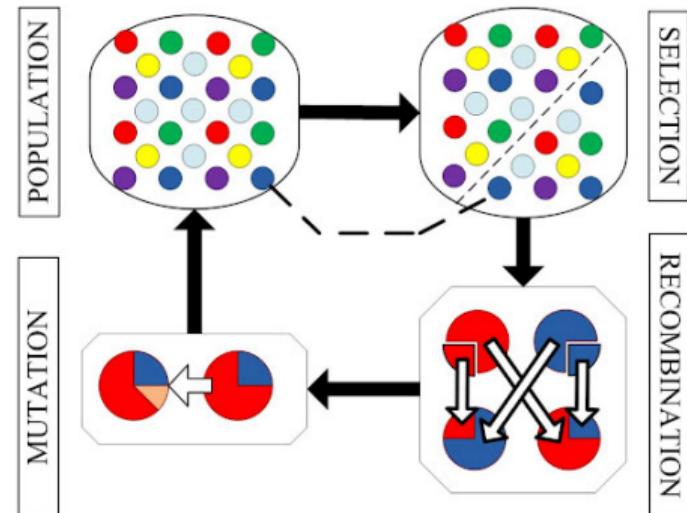


# Разработка робота

Используемые технологии



Генерация поверхности  
(Параметризованная  
искусственная территория)

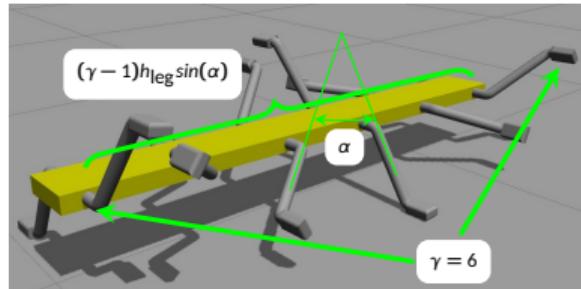
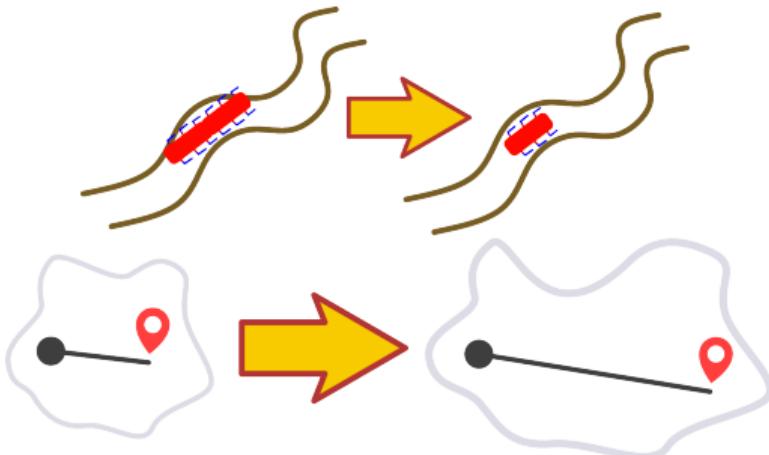


Генетический алгоритм



# Разработка робота

Предлагаемое решение



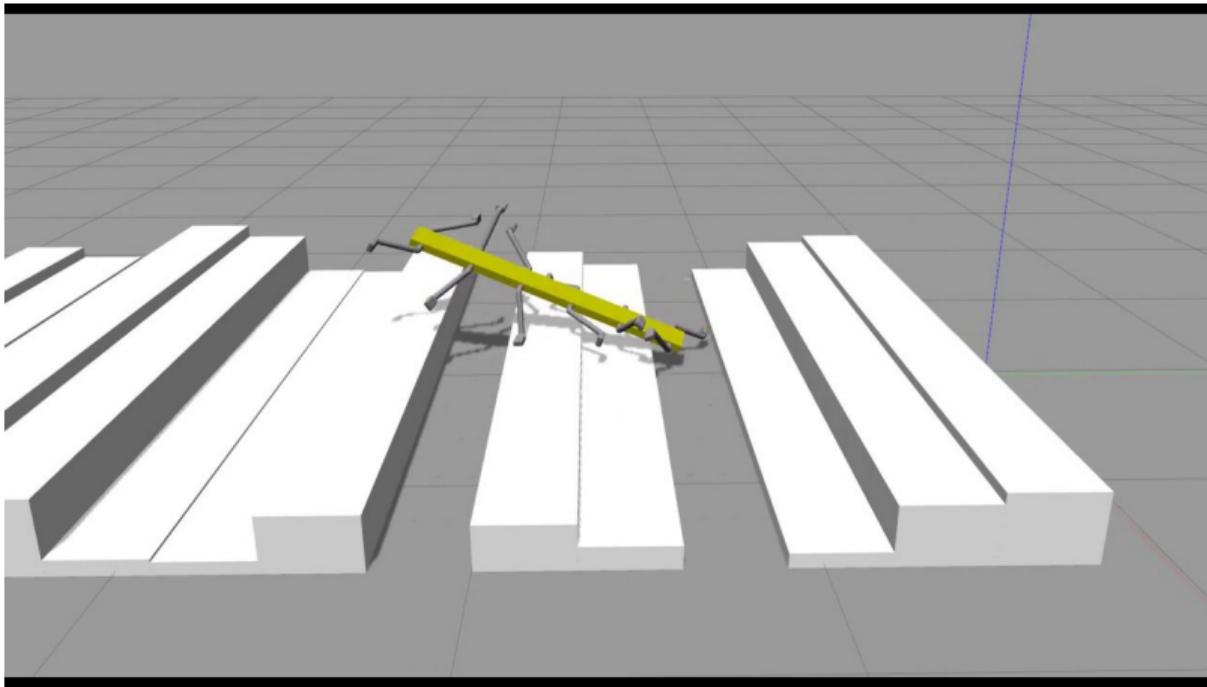
$$F \rightarrow \max = \beta (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) + \\ + (1 - \beta) \delta^{\omega_1} (L)^{\omega_2}$$
$$L = \frac{1}{(\gamma - 1)h_{leg} \sin(\alpha)}$$

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



# Разработка робота

Видео: История одного сгенерированного робота



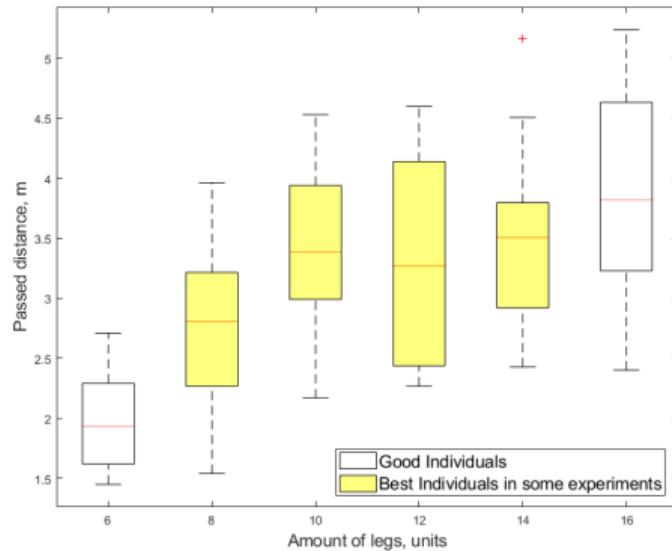


# Разработка робота

## 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 и исследование преобразователя силы



# Разработка преобразователя силы

## Вопрос

Как получить силу реакции опоры?

## Ответ

Разработать и исследовать преобразователь силы на основе Velostat собственного изготовления.



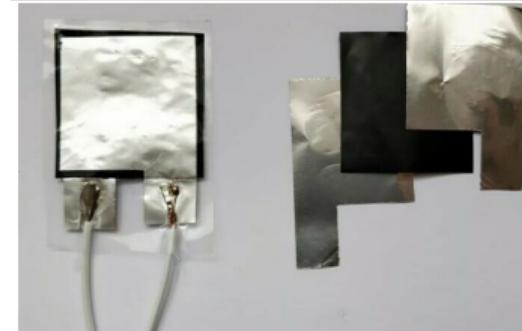
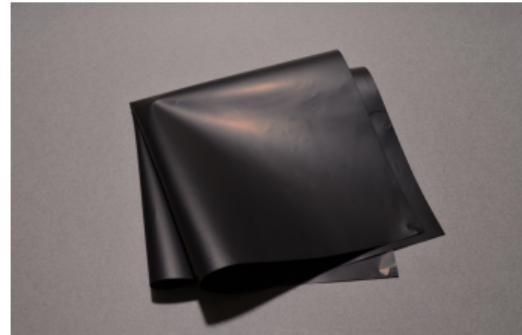
# Разработка преобразователя силы

## 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

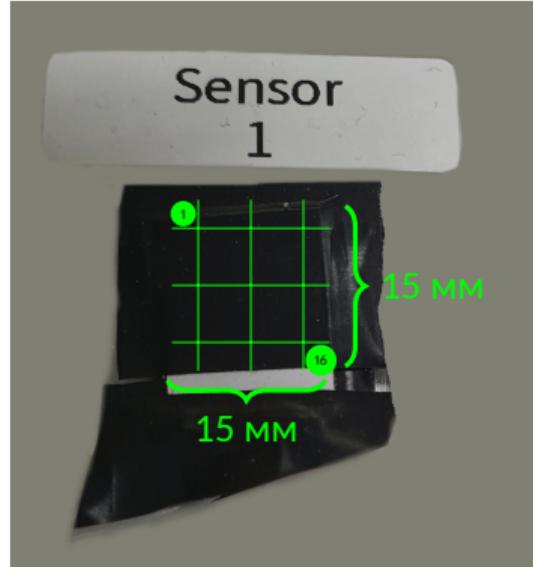


# Разработка преобразователя силы

## Эксперименты

- Статический.** Прикладывается статический груз с размером в сенсор
- Динамический.**

- Чувствительная область 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



Поверхность  
как  $4 \times 4$  сетка



# Разработка преобразователя силы

Результаты: Статический эксперимент

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

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

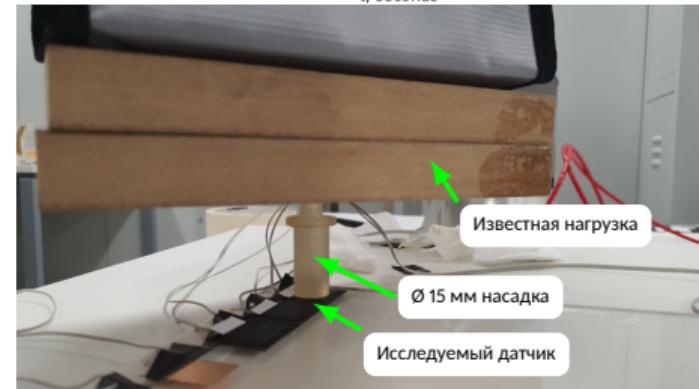
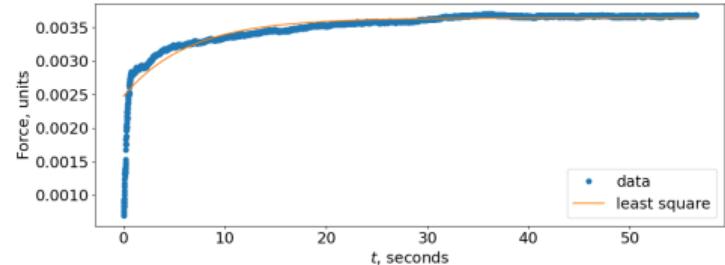
Где  $V_0$  – начальное напряжение,

$p$  – 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

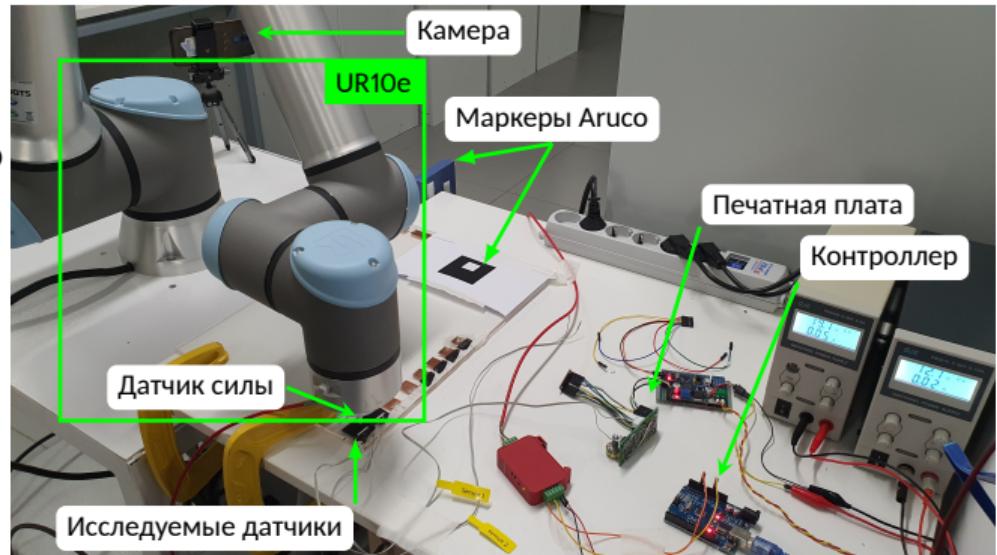




# Разработка преобразователя силы

## Требования к установке

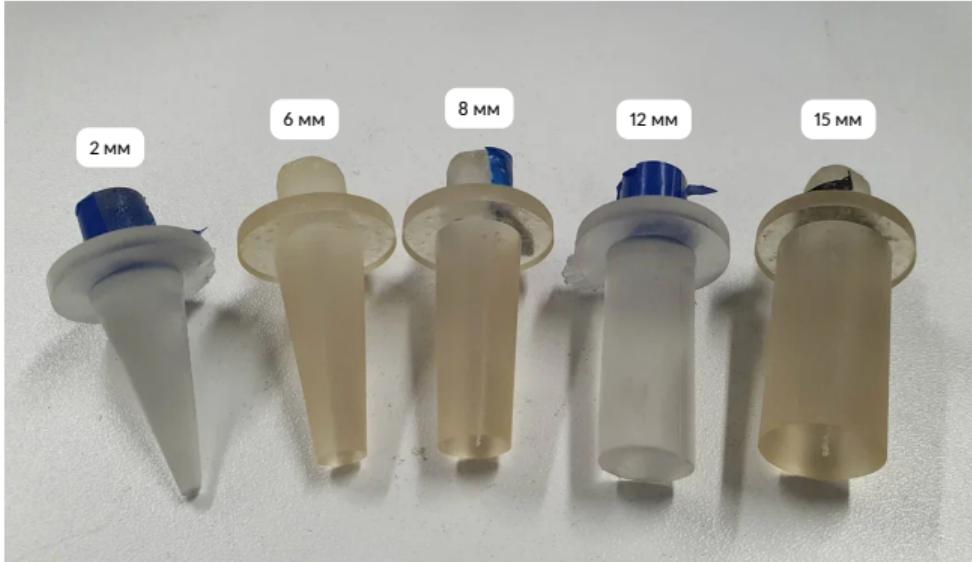
- Управление силой нажатия  
**Импедансное управление**
- Повторяемость эксперимента по  
силе и позиции  
**Добавив манипулятор и камеру**
- Возможность нажимать только  
на часть сенсора  
**Насадки для манипулятора**





# Разработка преобразователя силы

Установка: Насадки



Все насадки



Промышленный  
датчик силы

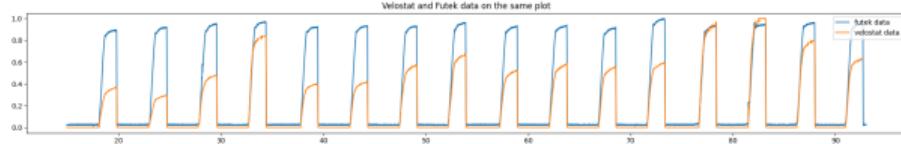
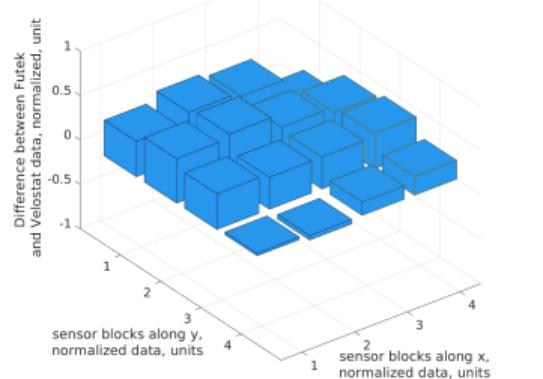


Насадка в сборке

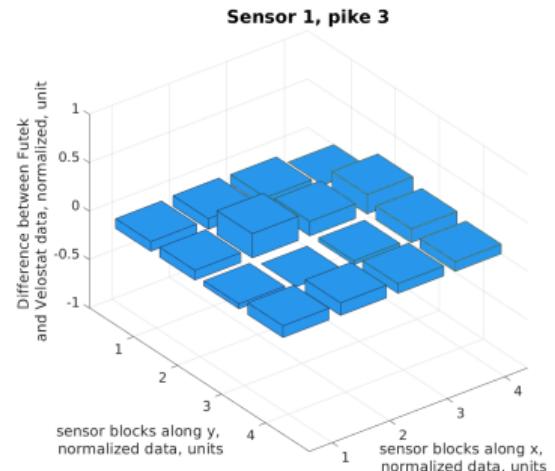


# Разработка преобразователя силы

Результаты: Ошибки показаний датчика в динамическом эксперименте



2 мм диаметр насадки



8 мм диаметр насадки

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



## Определение физических свойств поверхности



# Определение физических свойств поверхности

## Формальная задача

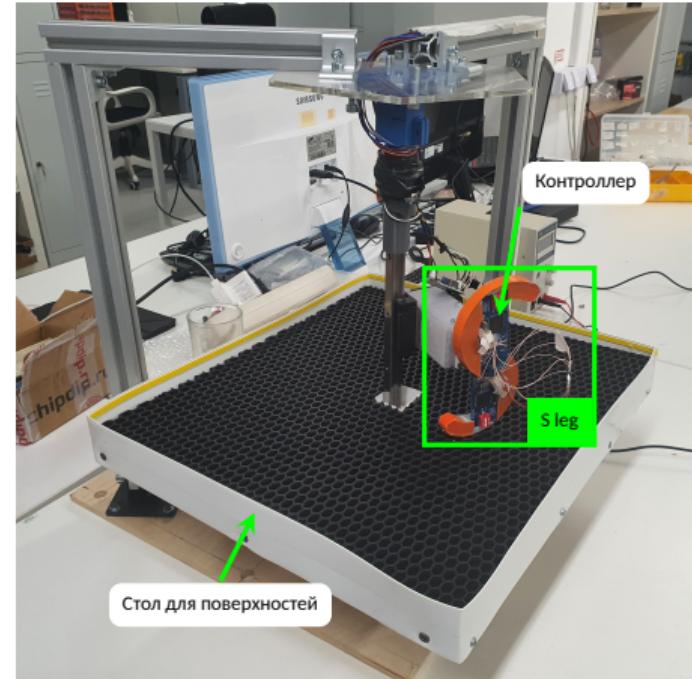
С точки зрения механики свойства поверхности сводятся к показателям упругости, вязкости и пластичности. Однако непосредственное измерение этих показателей затруднительно. В исследовании решалась задача классификации опорной поверхности с помощью искусственной нейронной сети. В качестве эталона жёсткой поверхности использовались крупные камни, эталоном упругой поверхности была принята резина, а эталоном поверхности с явно выраженным пластичными свойствами выступила песчаная почва.



# Определение физических свойств поверхности

## Требования к установке

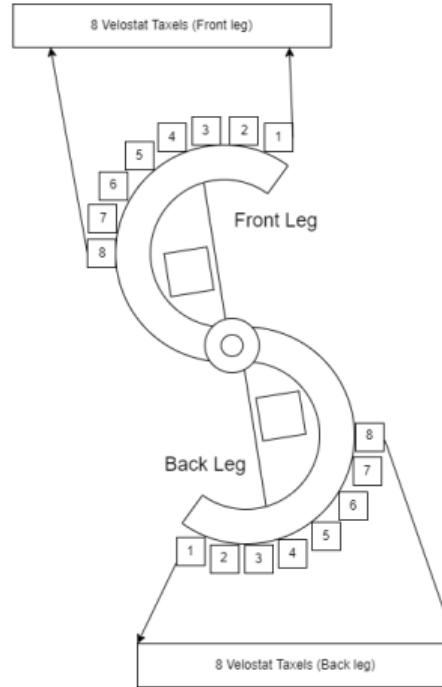
- Иметь возможность быстро менять используемые поверхности  
**Быстроуборочный стол**
- Бесконечное движение робота  
2-ух степенной механизм и нога S-образной формы
- Узел движителя должен быть такой же как на СтриРусе  
**Создано крепление для узла ноги робота**





# Определение физических свойств поверхности

Установка сенсоров на ногу



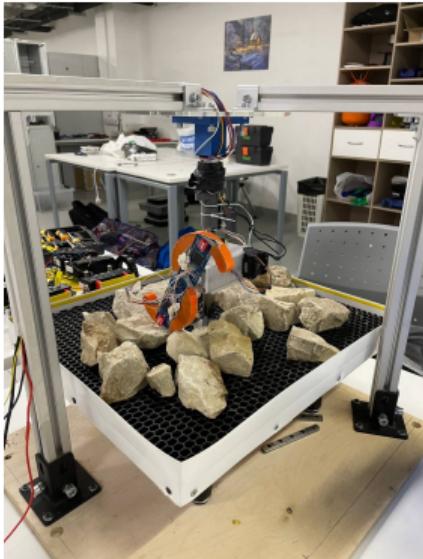


# Определение физических свойств поверхности

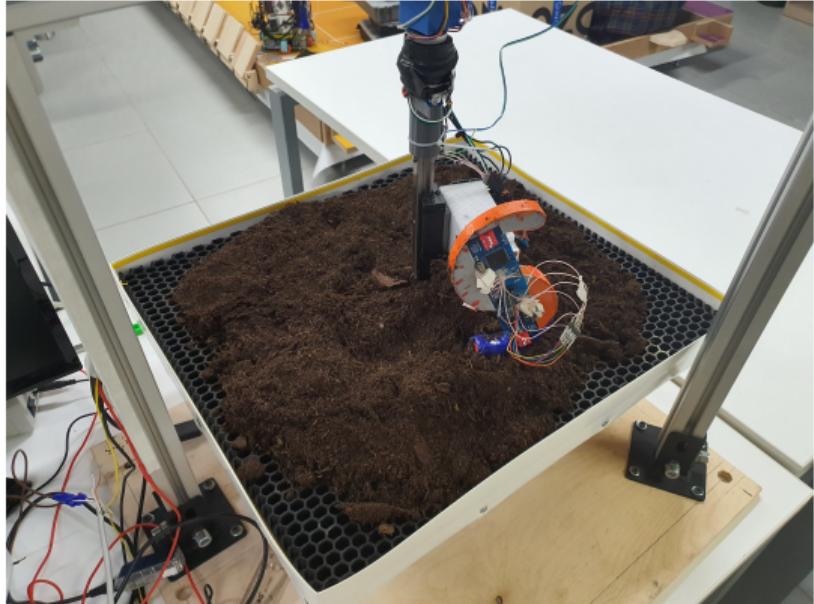
Установка: Типы поверхности, видео



Упругая



Твердая

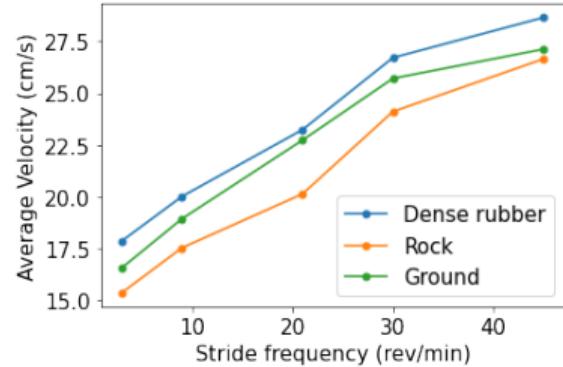
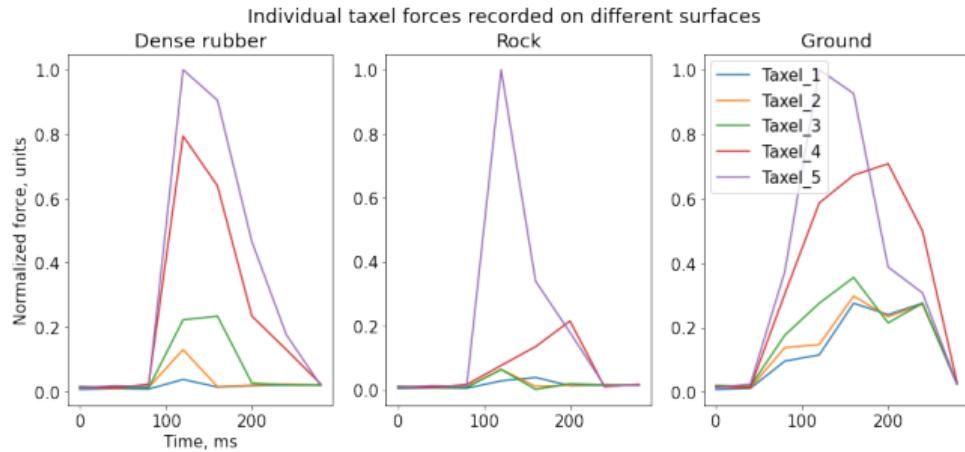


Пластичная



# Определение физических свойств поверхности

Данные с одного эксперимента



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



# Определение геометрических свойств поверхности



# Определение геометрических свойств поверхности

## Формальная задача

Имеется поверхность. Каждому набору координат  $x, y$  соответствует одно и только одно значение координаты  $z$ .

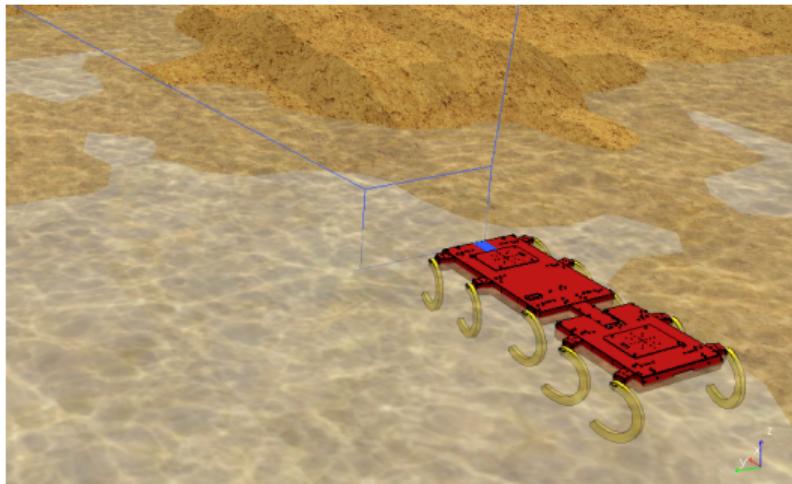
Необходимо с помощью ощупывания роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

Сделано предположение, что расстояние между ногами робота мало относительно размеров поверхности, следовательно, поверхность между ногами считается плоскостью.

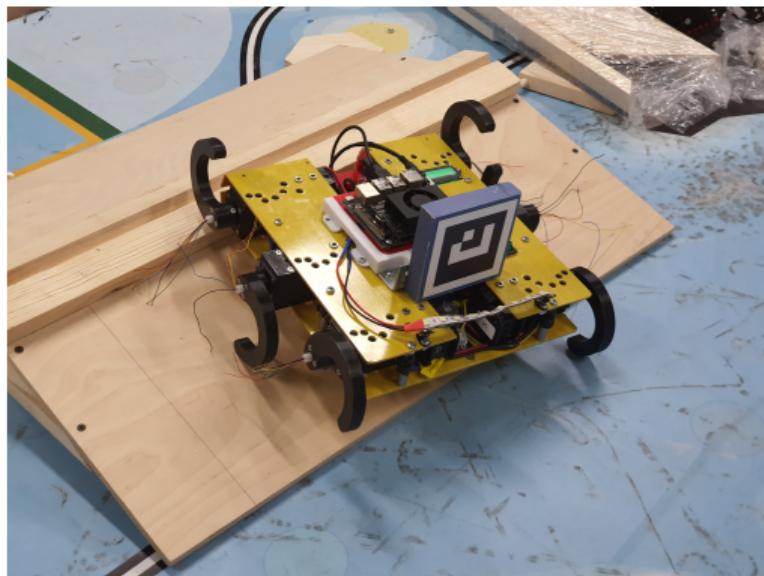


# Определение геометрических свойств поверхности

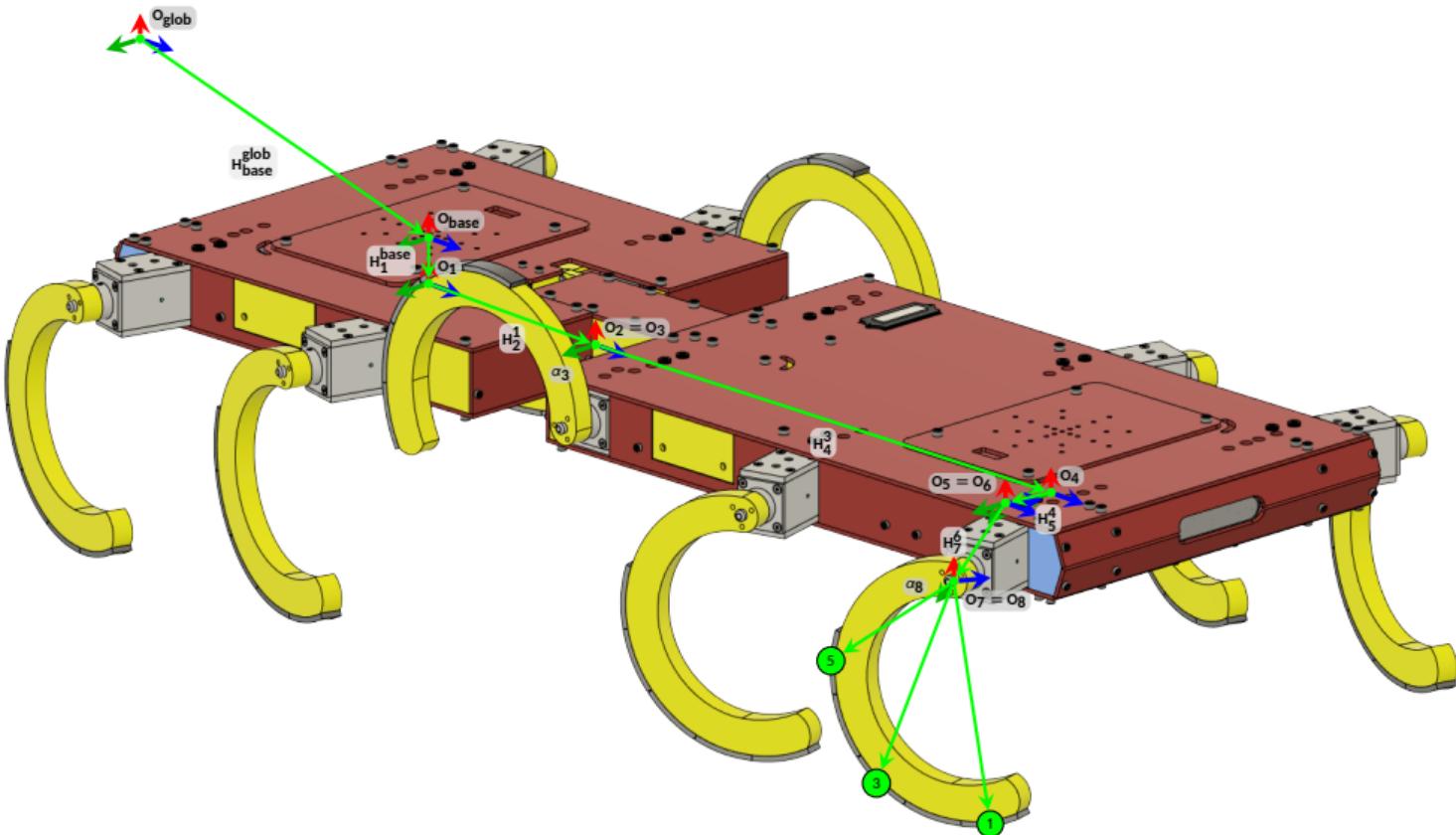
Места проведения экспериментов



CoppeliaSim симулятор,  
**4th gen CtrpRus**



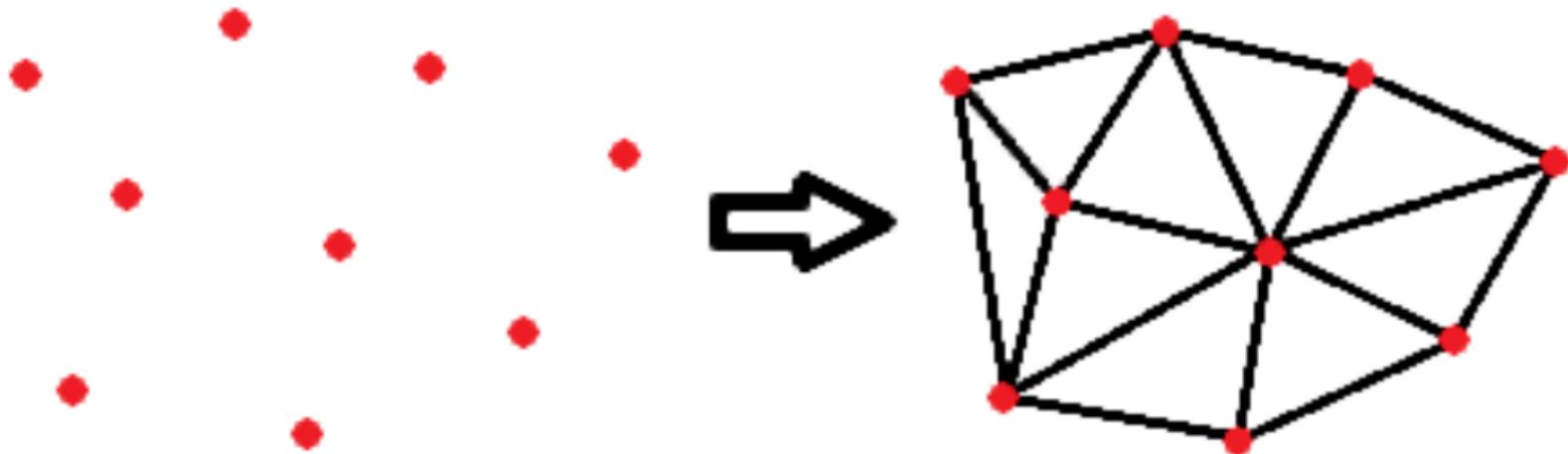
Натурные испытания,  
**3th+ gen CtrpRus**





# Определение геометрических свойств поверхности

Триангуляция Делоне

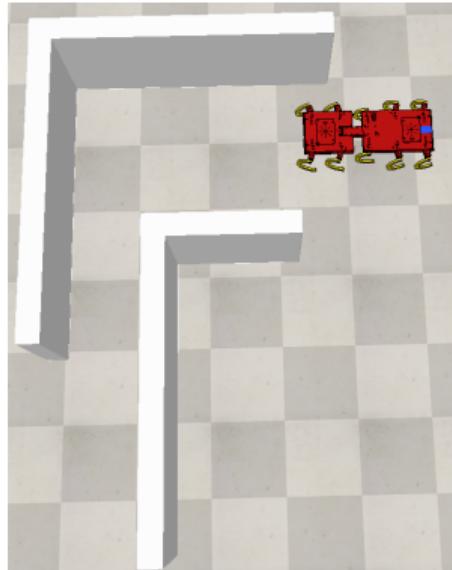


2D триангуляция Делоне (Выпуклая оболочка)  
От облака точек к полигональной сетке

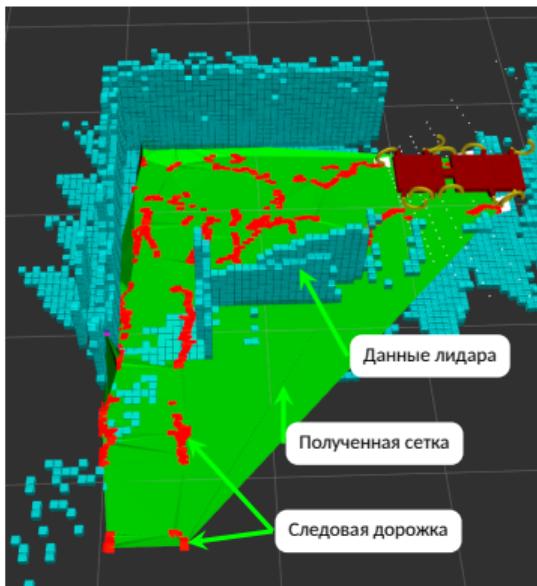


# Определение геометрических свойств поверхности

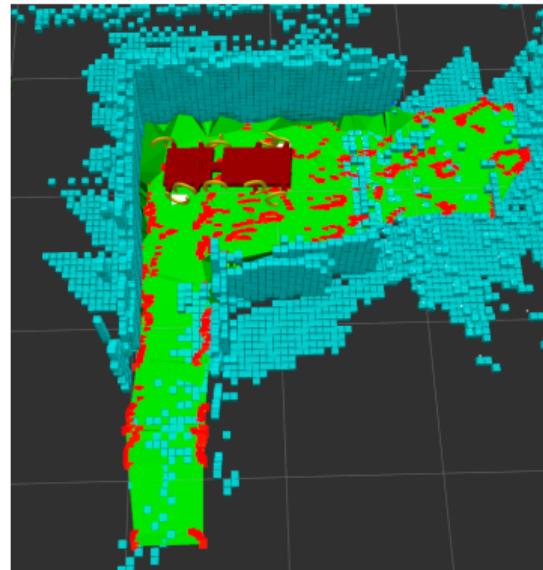
Почему важно использовать вогнутую оболочку (модификация Делоне)



Пример поверхности



Выпуклая оболочка

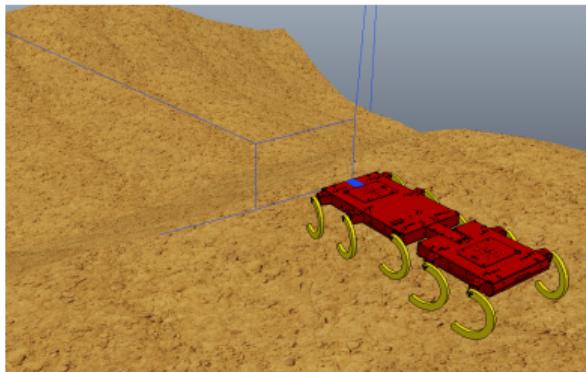


Вогнутая оболочка

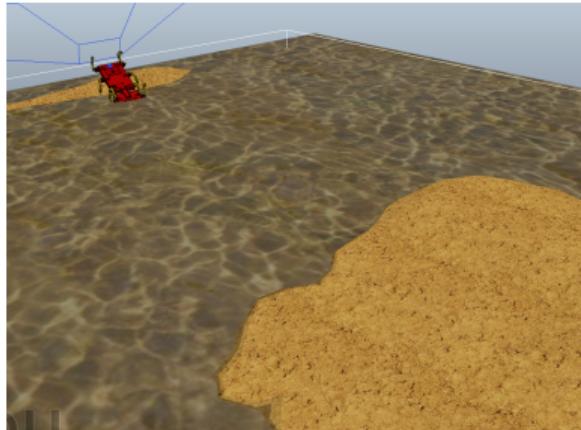


# Определение геометрических свойств поверхности

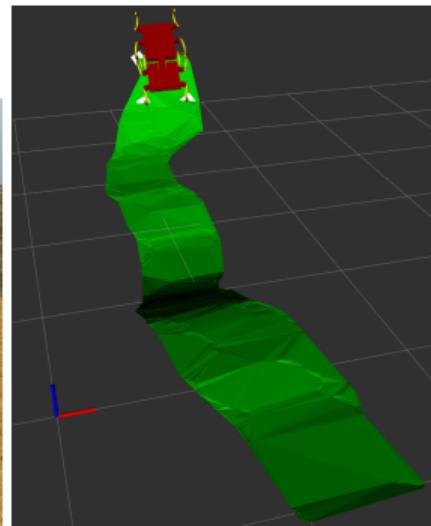
Результат: Маршрут, полигональная сетка



Начало маршрута



Конец маршрута

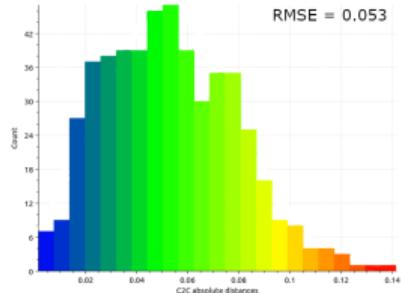
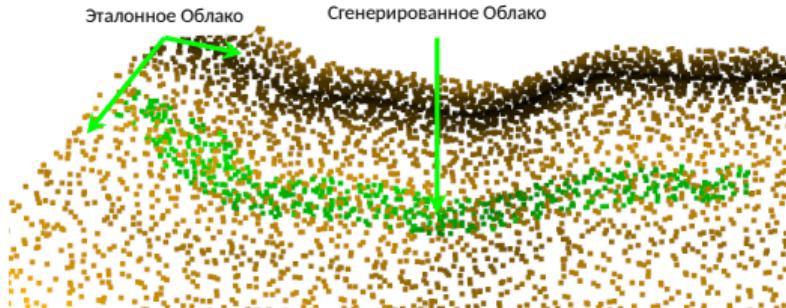


Созданная сетка

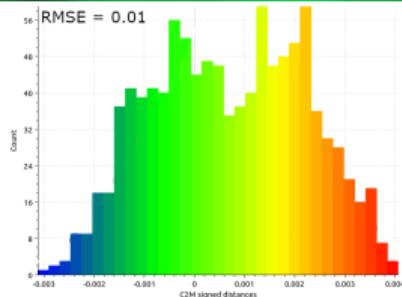
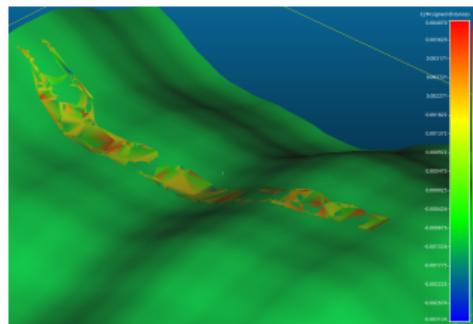


# Определение геометрических свойств поверхности

Результаты *Cloud2Cloud* и *Cloud2Mesh*



Гистограмма ошибок C2C

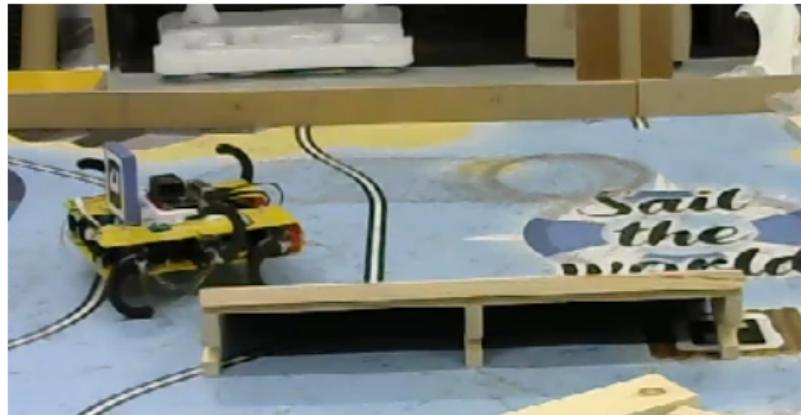


Гистограмма ошибок C2M

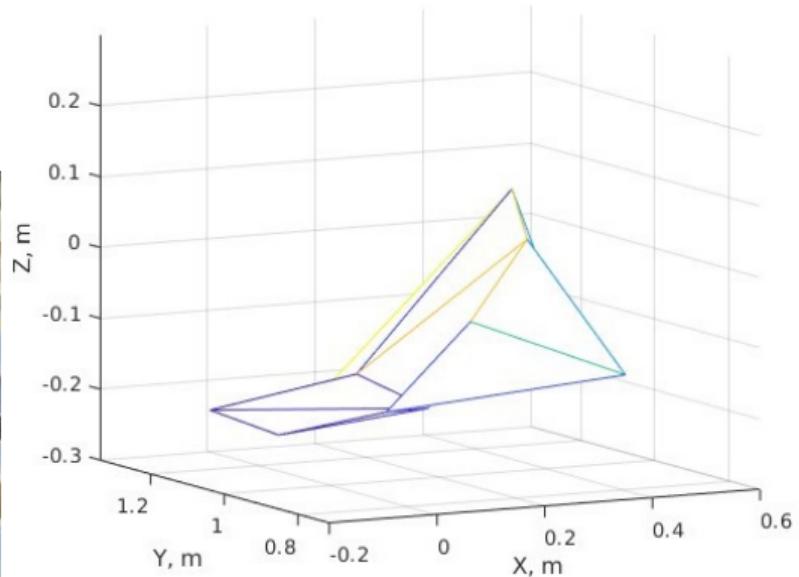


# Определение геометрических свойств поверхности

Результат: Натурные испытания, Видео



Робот проходит препятствие



Полигональная сетка, полученная с помощью ног



# 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**.



## Результаты интеллектуальной деятельности

- Количество публикаций
  - 2 — журналы, рекомендованных ВАК
  - 3 — журналы, индексируемые в Scopus (2 работы Q2)
  - 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.



# Приложения

# Deserve “A” grade!

– Oleg Bulichev

✉ o.bulichev@innopolis.ru

↗ @Lupasic

🚪 Room 105 (Underground robotics lab)