



# Разработка метода тактильного очуствления для мобильного шагающего робота

Соискатель: Олег Буличев

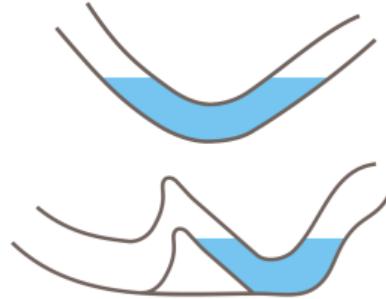
Руководитель: Александр Малолетов



# Необходимость исследования пещер роботами



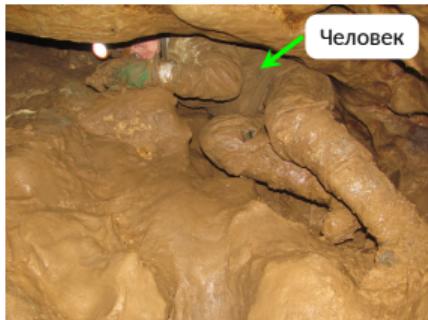
Соляные отложения



Сифоны



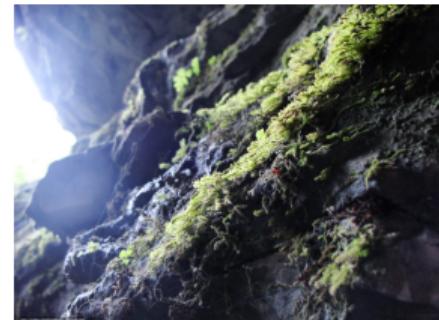
Ледяные пещеры



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.

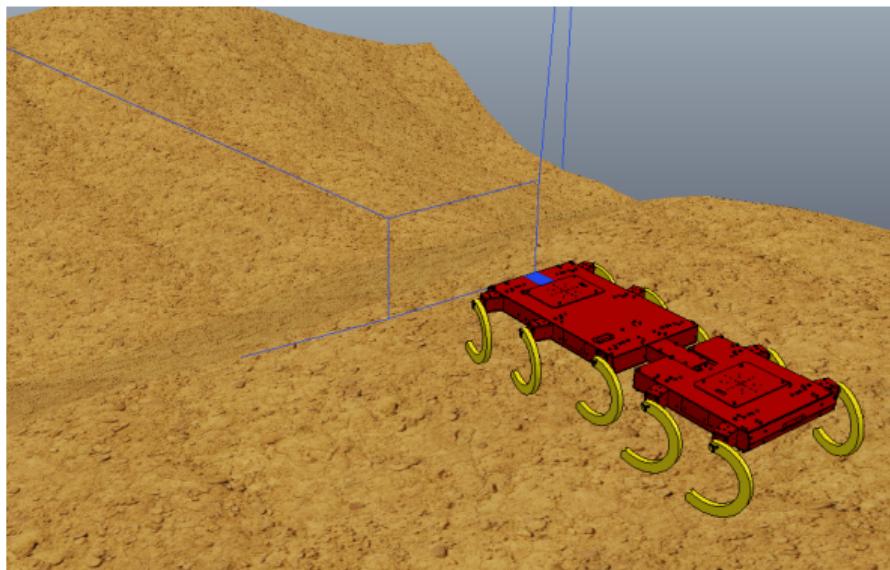


*DARPA Subterranean Challenge,  
свободная пещера*

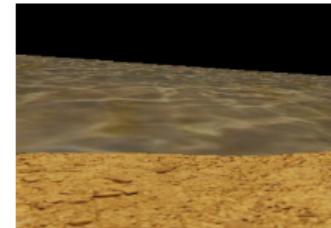


# Нерешаемая задача с помощью камеры или лидара

Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?



Поверхность без воды

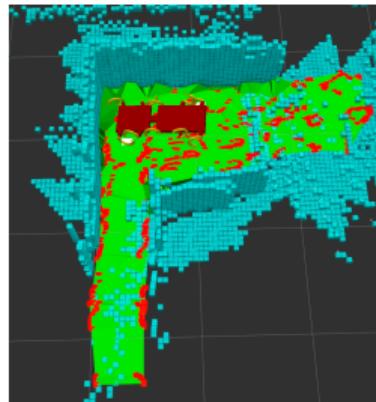


Вид с камеры



# Цель работы

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



Определение геометрических свойств

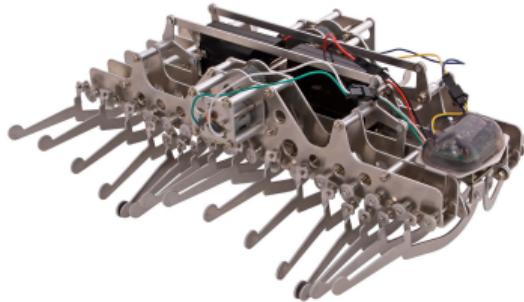


Определение физических свойств



## 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.**





# Основные научные задачи исследования

1. Разработка метода **оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов** с цикловыми движителями 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
- Предмет исследования и разработки



# Разработка робота



# Литературный обзор

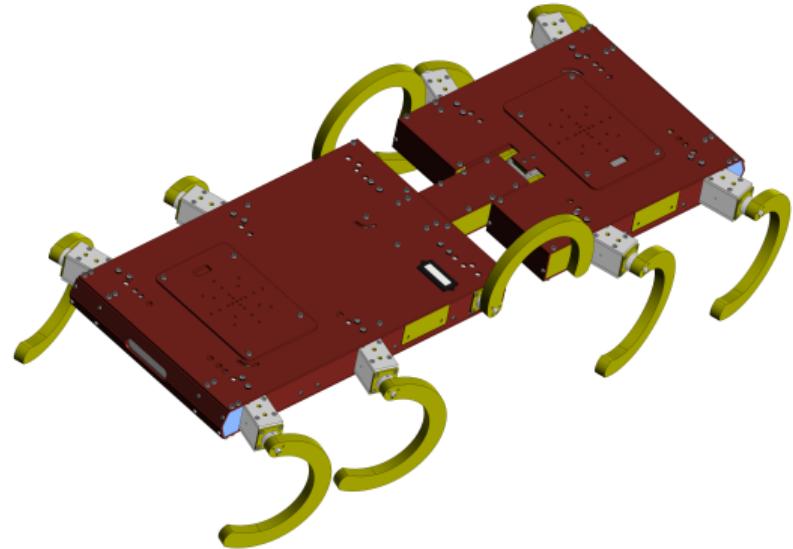
- Пещеры: препятствия, размеры.
  - Классификация пещер и препятствий
  - Оценка сложности территории
- Роботы для исследования пещер: от дирижаблей, до шагающих.
  - Робототехнические системы для исследования свободных пещер
- Способы определения силы реакции опоры.
  - Неявные и явные способы. Классификация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

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

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

$$\vec{u}_i^T = [\vec{v}_i^T \quad \vec{\omega}_i^T]$$

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

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.



# Разработка робота

Геометрические связи

Тела соединены цилиндрическими шарнирами:

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

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

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

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

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

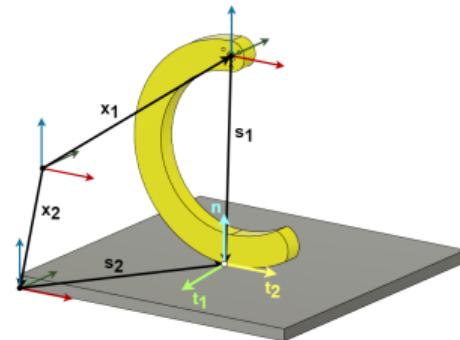
*Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота*

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

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

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

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

## Вопрос

Какое оптимальное количество ног должен иметь такой движитель?

## Ответ

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

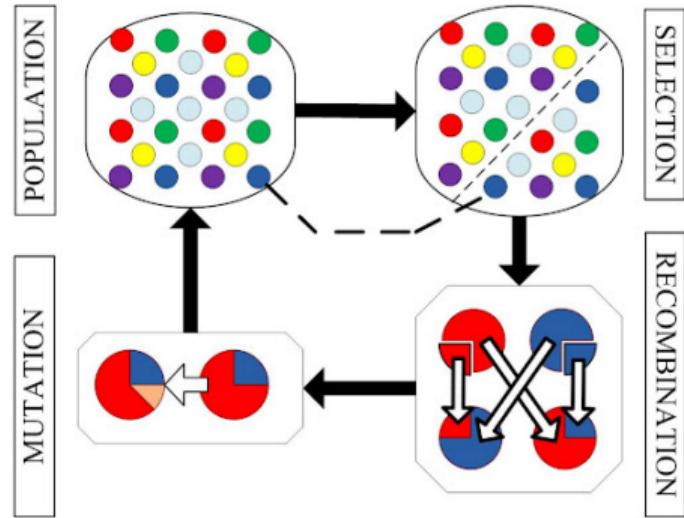


# Разработка робота

Используемые технологии



Генерация поверхности  
(Параметризованная  
искусственная территория)

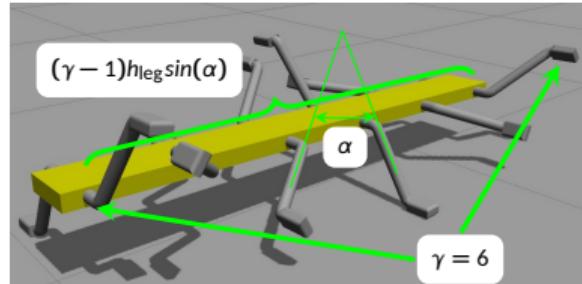
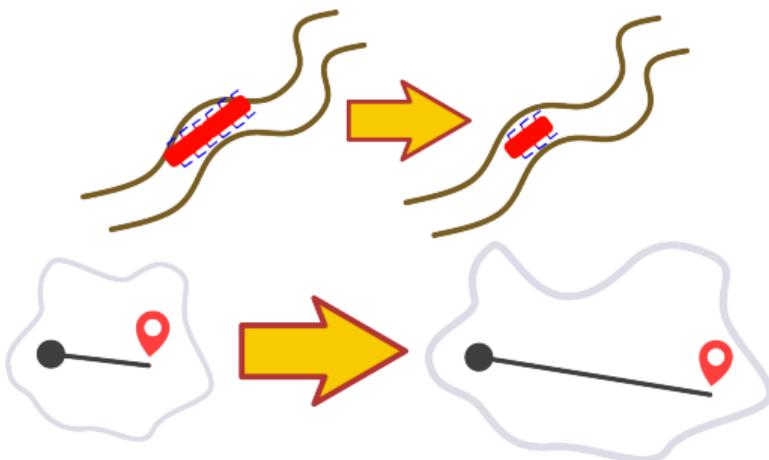


Генетический алгоритм



# Разработка робота

Предлагаемое решение



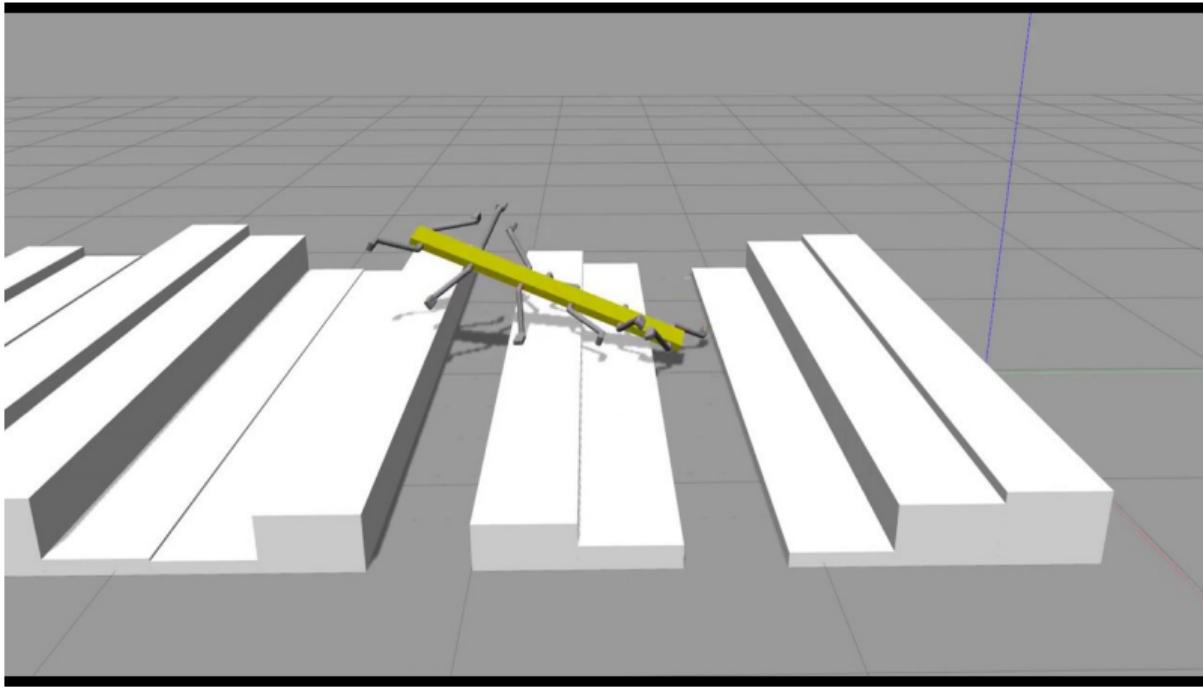
$$F \rightarrow \max = \beta \left( \omega_1 \cdot \overbrace{\delta}^{\text{Дистанция}} + \omega_2 \cdot \frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}}\sin(\alpha)} \right) + \\ + (1 - \beta)\delta^{\omega_1} \left( \frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}}\sin(\alpha)} \right)^{\omega_2}$$

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



# Разработка робота

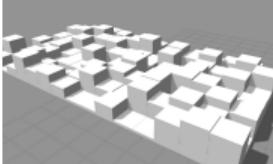
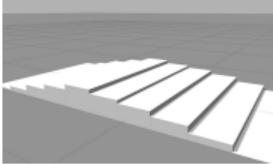
Видео: История одного сгенерированного робота





# Разработка робота

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

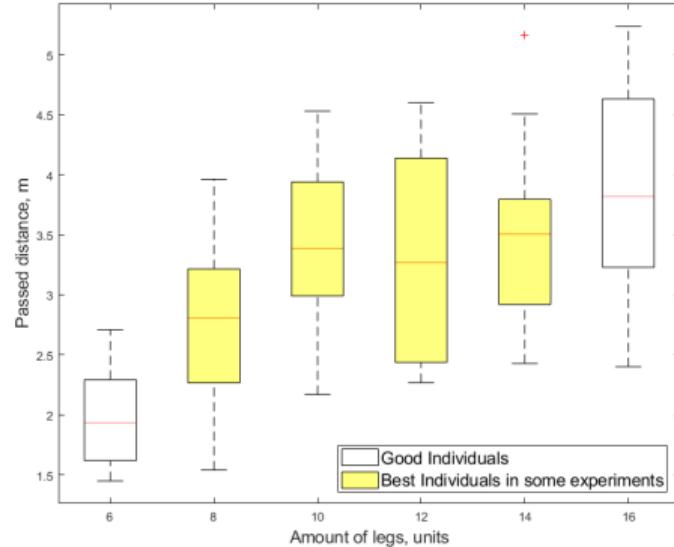
	Тип территории	Кол-во ног	Угол между соседними ногами	Кол-во индивидов
Этап 1		12	73	200
		12	72	
Этап 2		10	68	55
		12	77	



# 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.

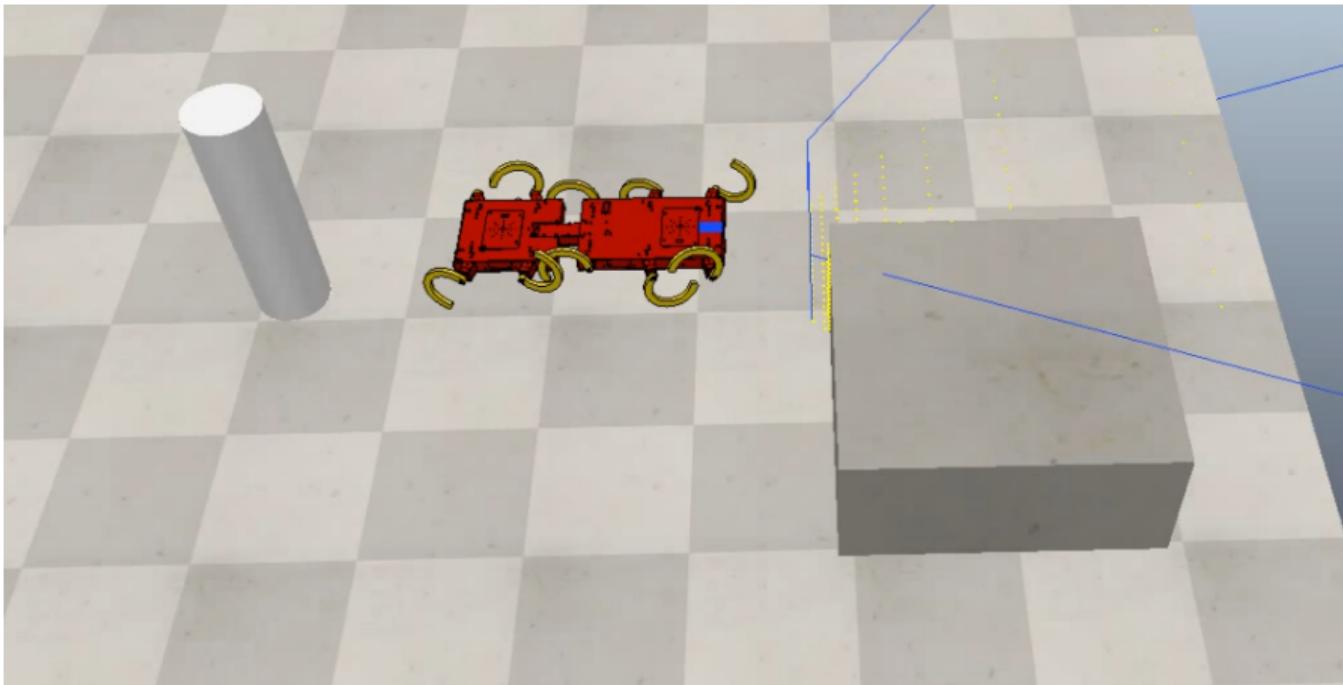


Зависимость между кол-вом ног и пройденной дистанцией



# Разработка робота

Видео





# Разработка и исследование преобразователя силы



# 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



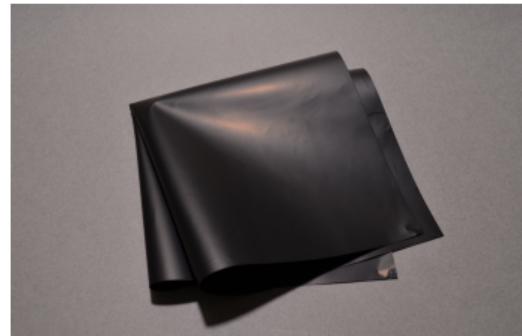
# Разработка преобразователя силы

## *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

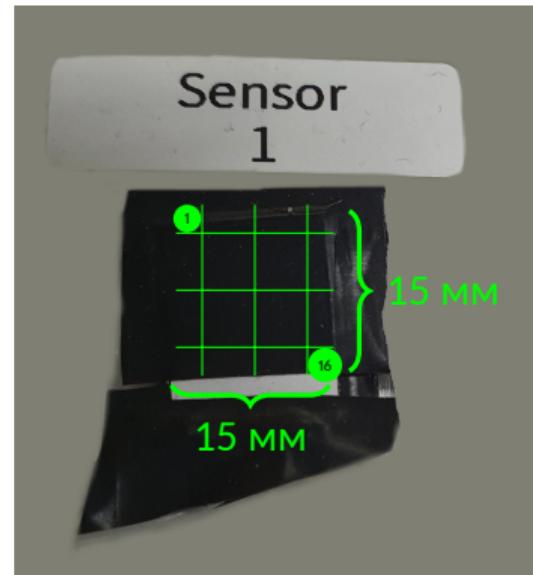


# Разработка преобразователя силы

## Эксперименты

1. **Статический.** Прикладывается статический груз с размером в сенсор
2. **Динамический.**

- 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,

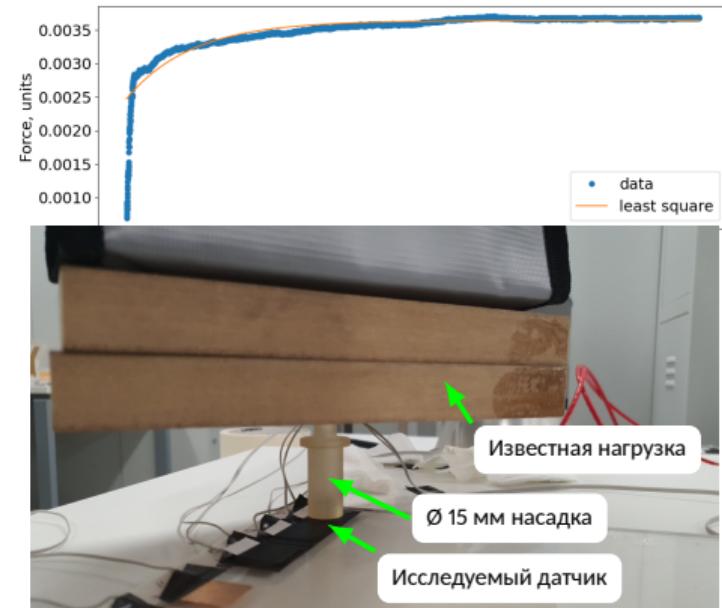
$p$  – приложенное давление,

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

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

Апробирована модель для калибровки

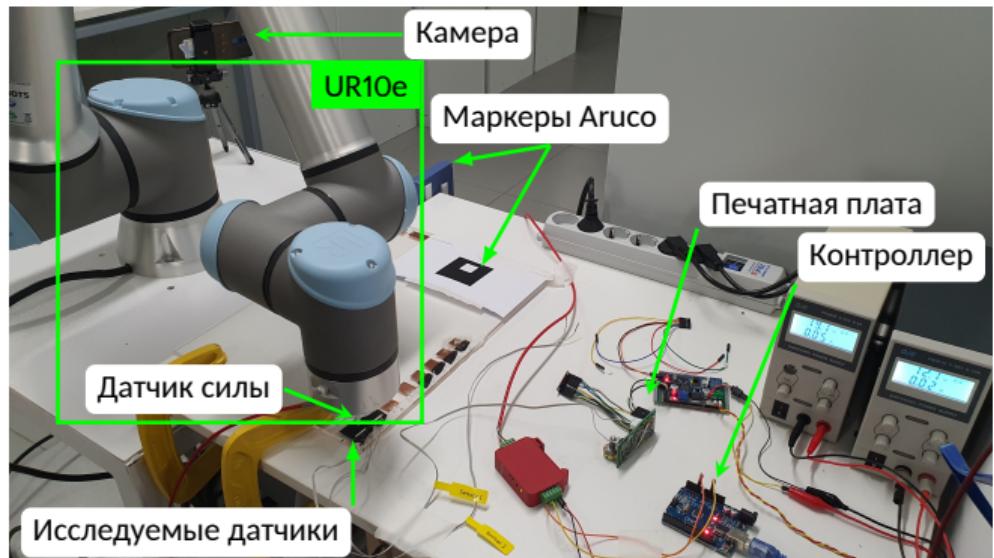
датчика



# Разработка преобразователя силы

## Требования к установке

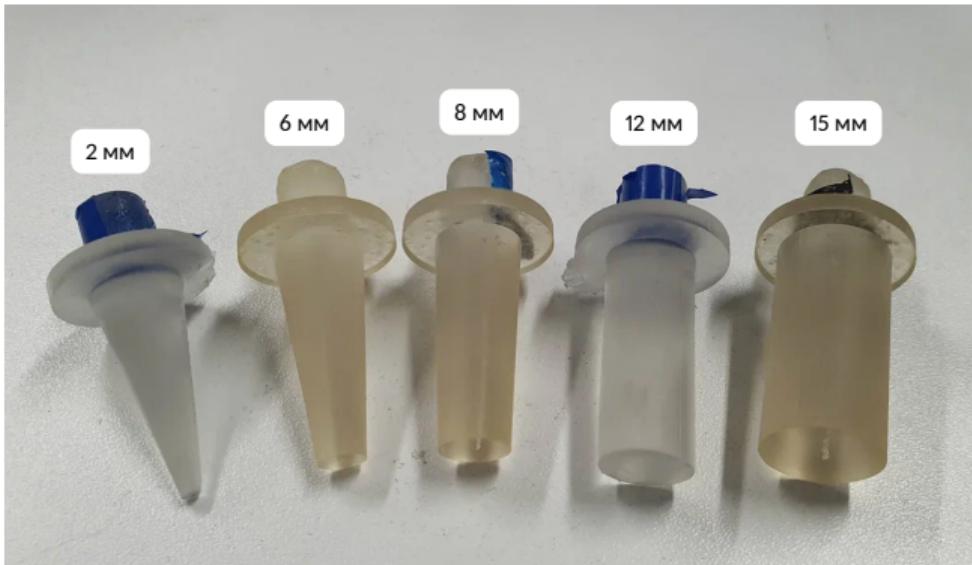
- Управление силой нажатия  
Импедансное управления
- Повторяемость  
эксперимента по силе и  
позиции  
Добавив манипулятор и  
камеру
- Возможность нажимать  
только на часть сенсора  
Насадки для манипулятора





# Разработка преобразователя силы

Установка: Насадки



Все насадки



Промышленный  
датчик силы



Насадка в сборке



# Разработка преобразователя силы

Импедансное управление

## Модификация траектории (Только ось z)

$X_s^0 = 0, \dot{X}_s^0 = 0, X_g^k, \dot{X}_g^k$  - целевое состояние

$$, X_s = X_g - X_d$$

$$X_g = X_g^0 + \frac{F_d}{\eta}$$

$$\dot{X}_s + \eta X_s = F^k$$

$$X_s^k = \text{odeint}(X_s^{k-1}, t, F^k), t = [0, dT]$$

$$X_s^{k-1} = X_s^k; \dot{X}_s = f(X_s, t, F^k)$$

$$X_d = X_g - X_s; \dot{X}_d = \dot{X}_g - \dot{X}_s$$

## Управление по скорости

$$X_d = \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_d \end{bmatrix}$$

$$U = \dot{X}_d + K(X_d - X),$$

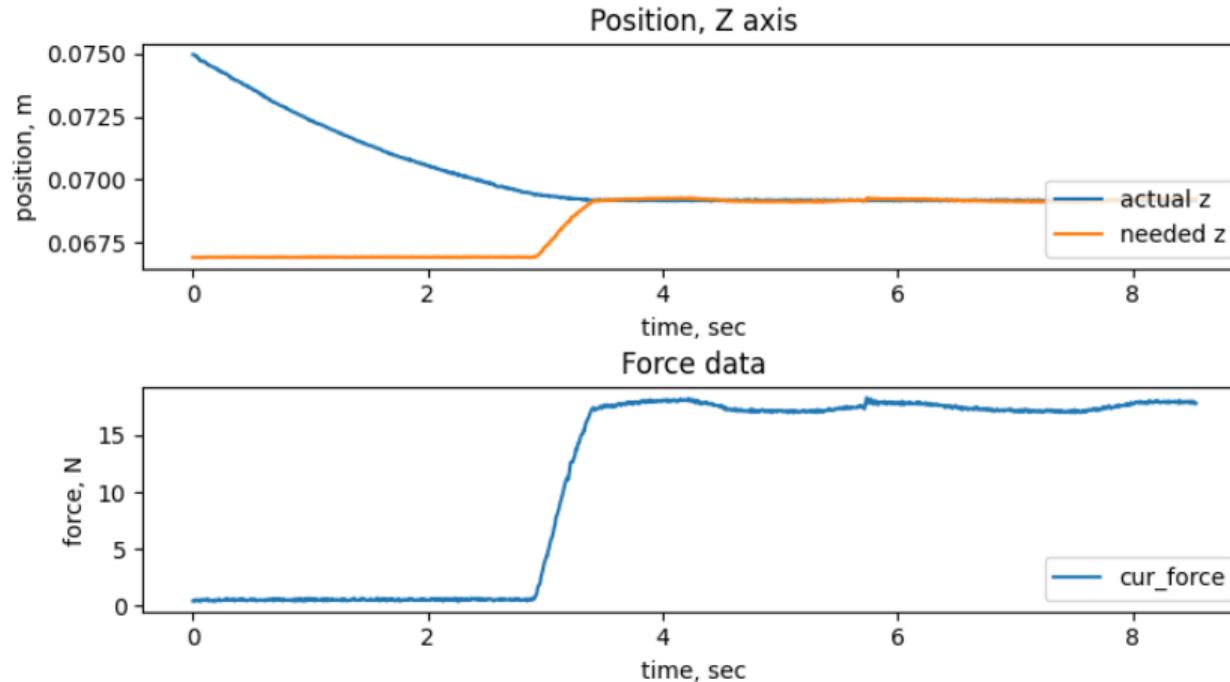
где  $X = \text{принять\_состояние}();$

$\text{установить\_скорость}(U)$



# Разработка преобразователя силы

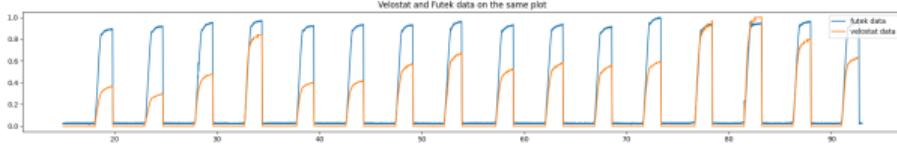
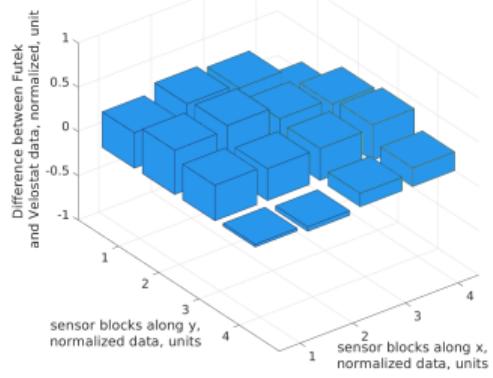
Импедансное управление: пример результата



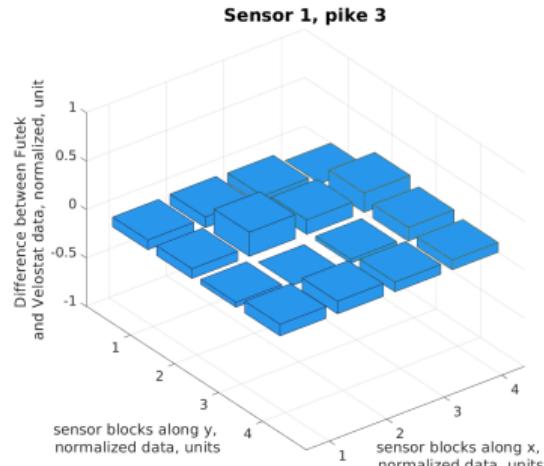


# Разработка преобразователя силы

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

## Вопрос

Как определить физические свойства местности во время движения по ней?

## Ответ

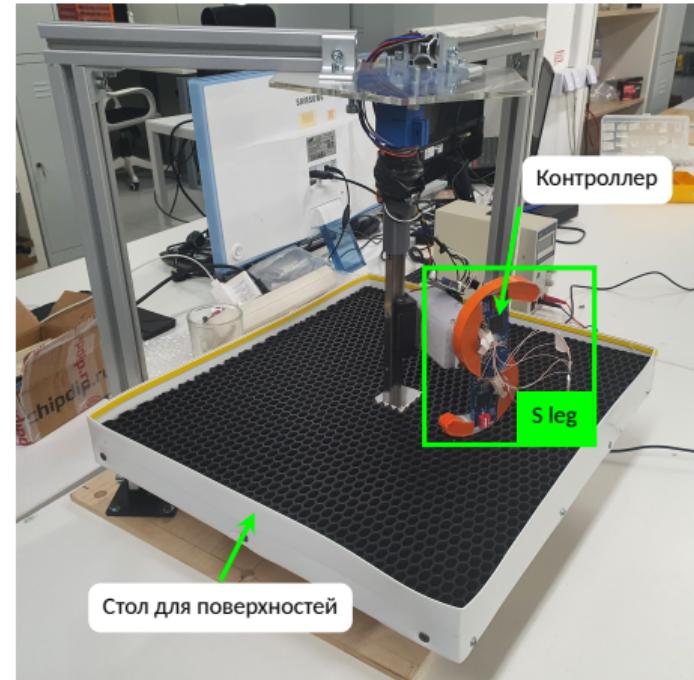
1. Подготовить для экспериментов различные поверхности.
2. Собрать датасет, состоящий из угловой скорости мотора и показаний датчиков с ног робота.
3. Представить их в виде вектора признаков.
4. Решить задачу классификации данных с помощью SVM, используя метрику 10-fold cross validation.
5. Протестировать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



# Определение физических свойств поверхности

## Требования к установке

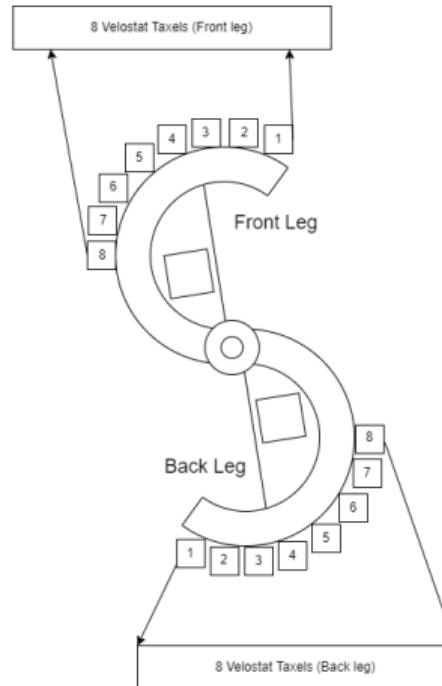
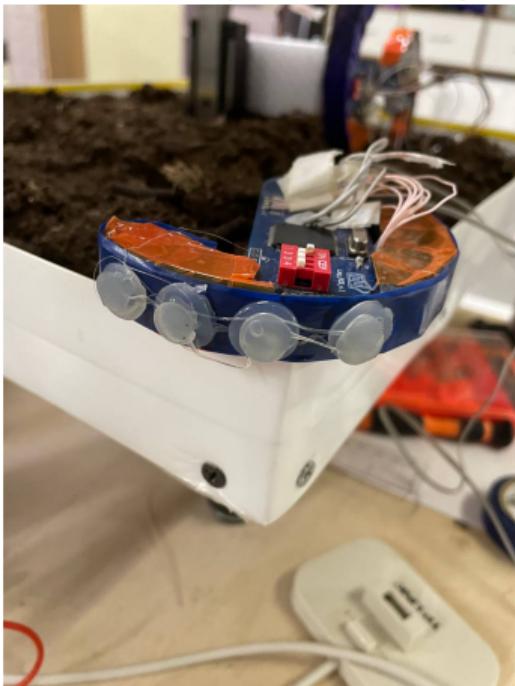
- Иметь возможность быстро менять используемые поверхности  
**Быстроразборный стол**
- Бесконечное движение робота  
**2-ух степенной механизм и нога S-образной формы**
- Узел движителя должен быть такой же как на СтриРусе  
**Создано крепление для узла ноги робота**





# Определение физических свойств поверхности

Установка сенсоров на ногу



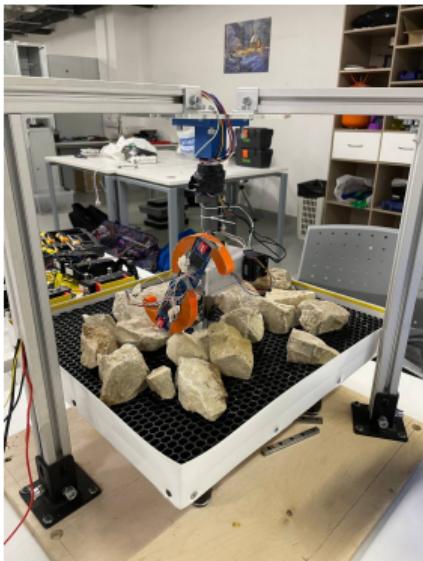


# Определение физических свойств поверхности

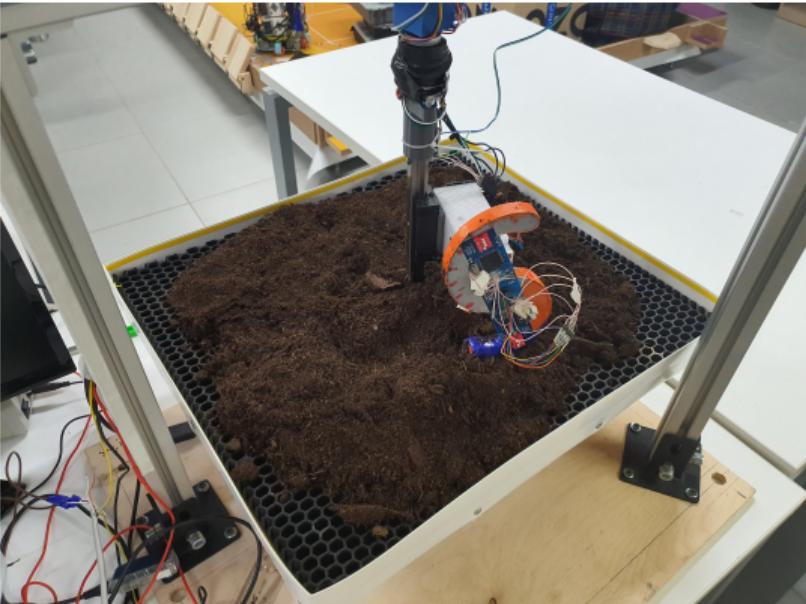
Установка: Типы поверхности, видео



Упругая



Твердая

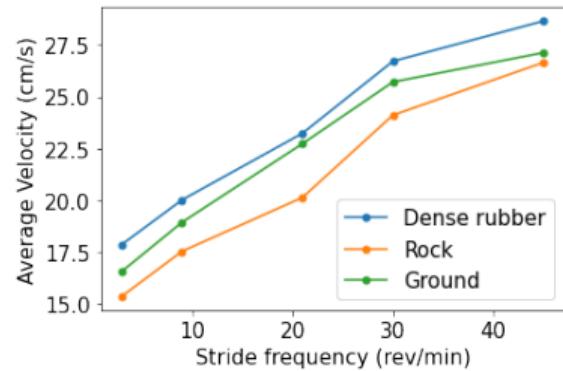
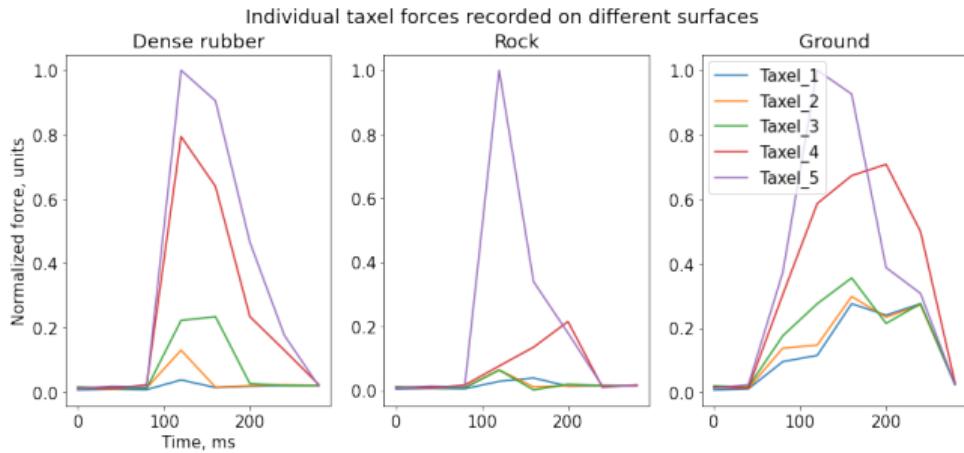


Пластичная



# Определение физических свойств поверхности

Данные с одного эксперимента



Предсказанный класс				
	Резина	Камень	Земля	
Истин. класс	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

## Вопрос

Как создать плотное облако точек, используя следовую дорожку?

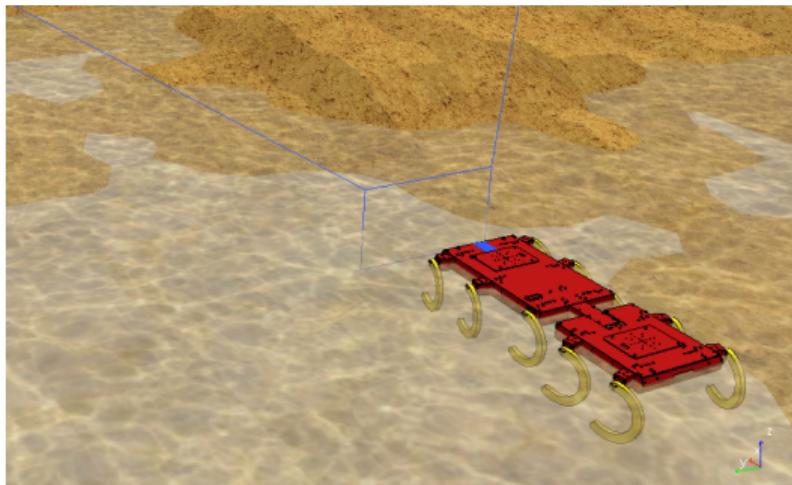
## Ответ

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

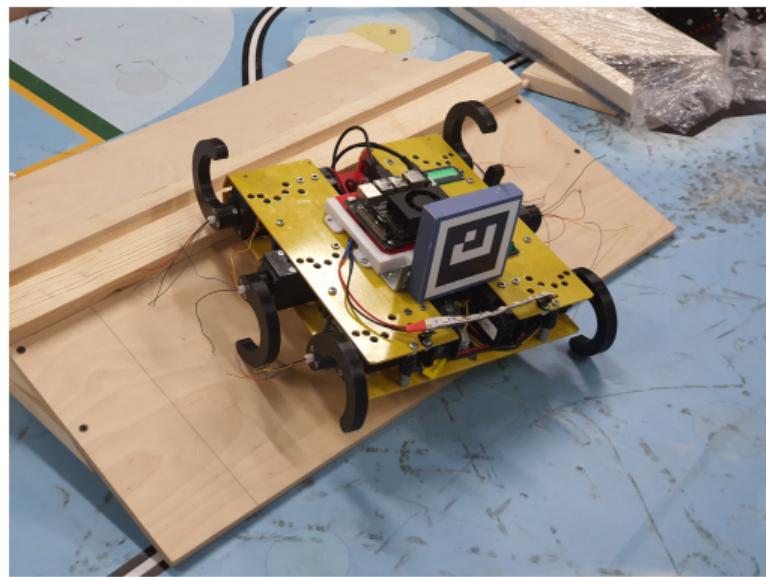


# Определение геометрических свойств поверхности

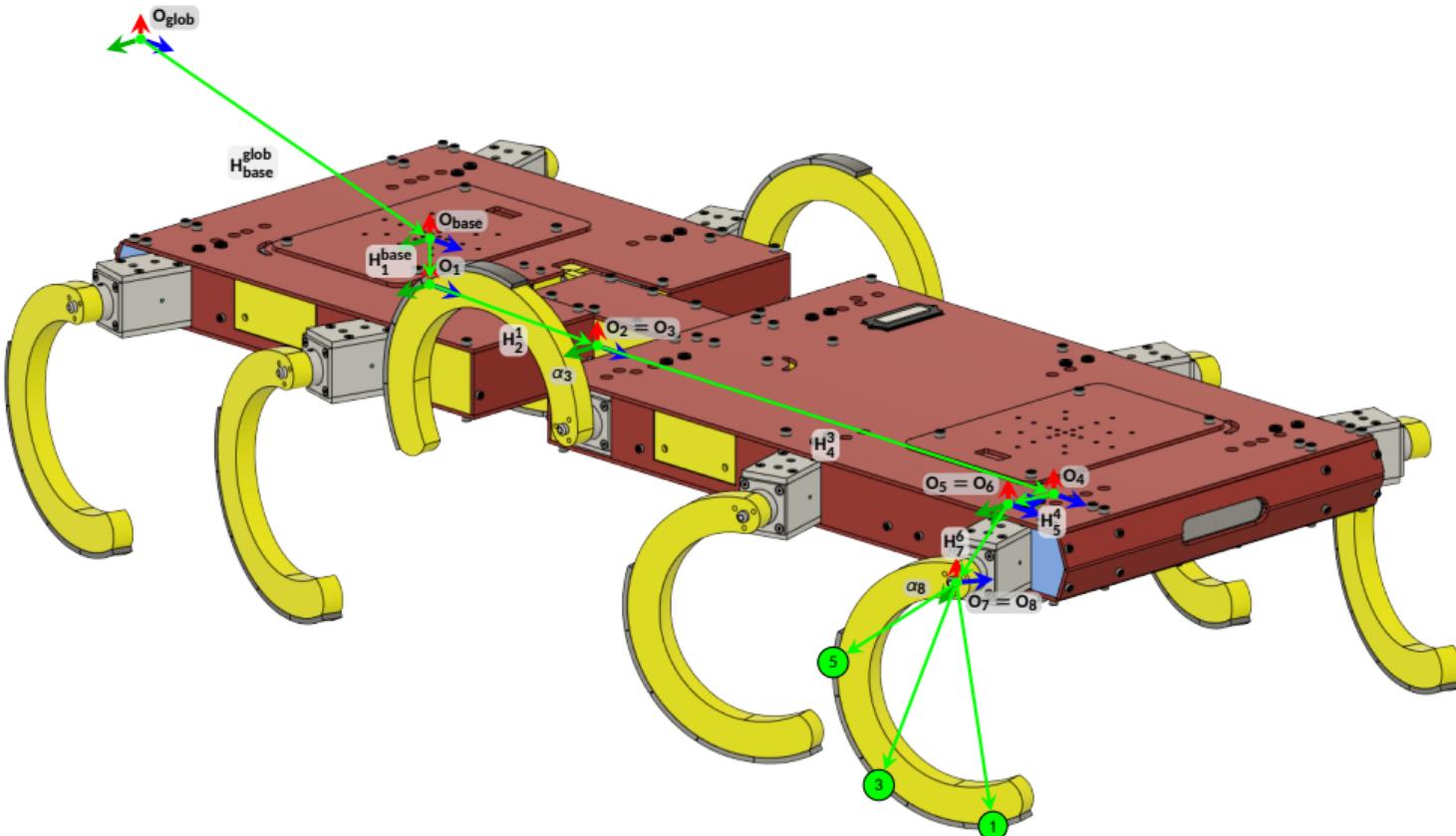
Места проведения экспериментов



CoppeliaSim симулятор,  
**4th gen** СтриРус



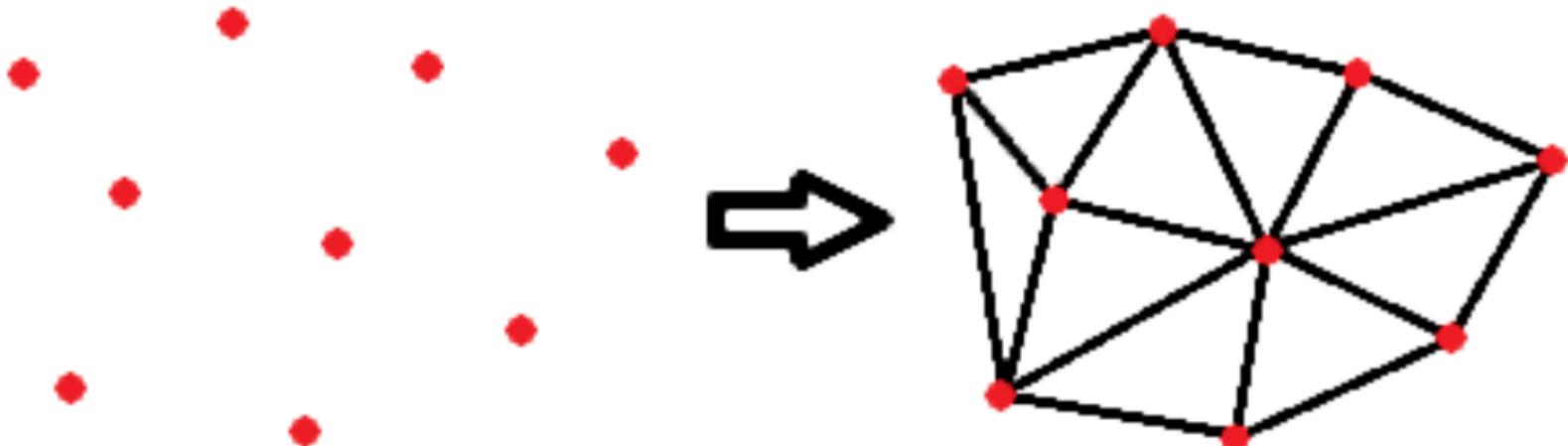
Натурные испытания,  
**3th+ gen** СтриРус





# Определение геометрических свойств поверхности

Триангуляция Делоне

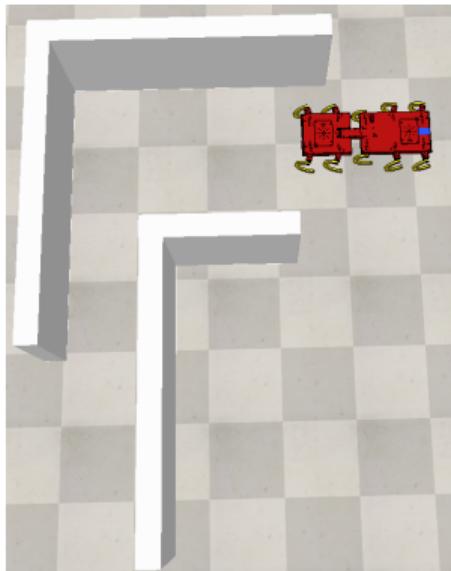


2D триангуляция Делоне (Выпуклая оболочка)  
*От облака точек к полигональной сетке*

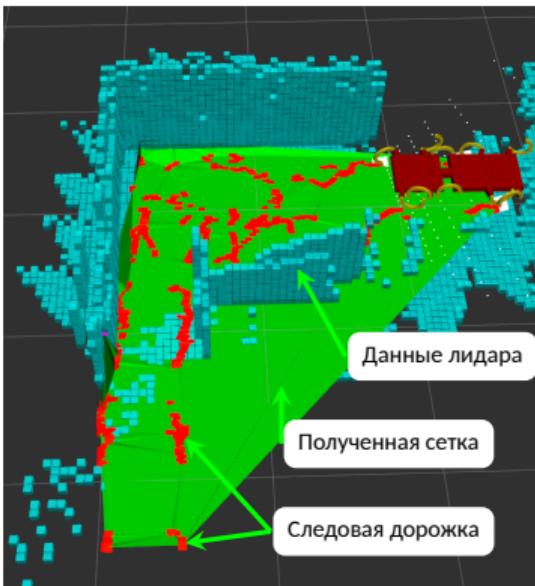


# Определение геометрических свойств поверхности

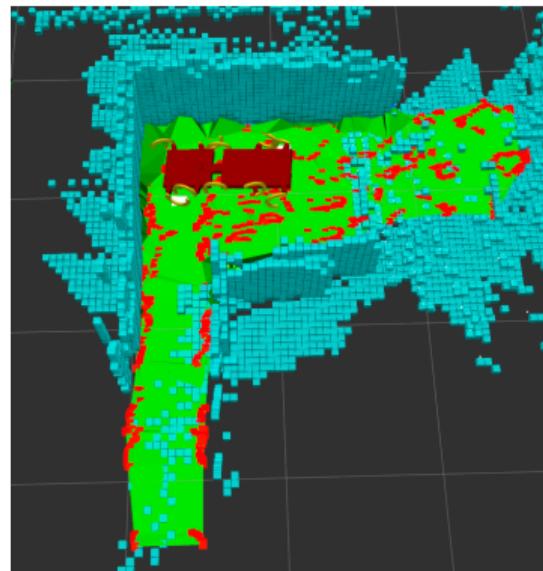
Почему важно использовать вогнутую оболочку (модификация Делоне)



Пример поверхности



Выпуклая оболочка

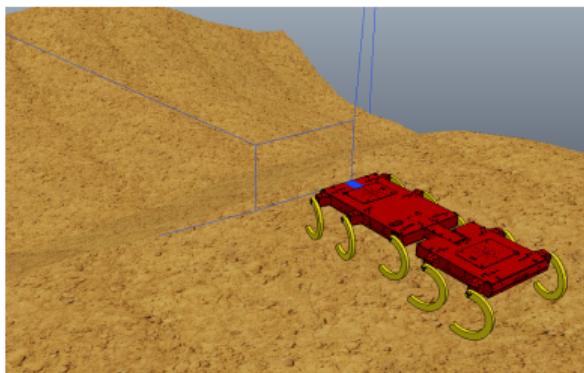


Вогнутая оболочка

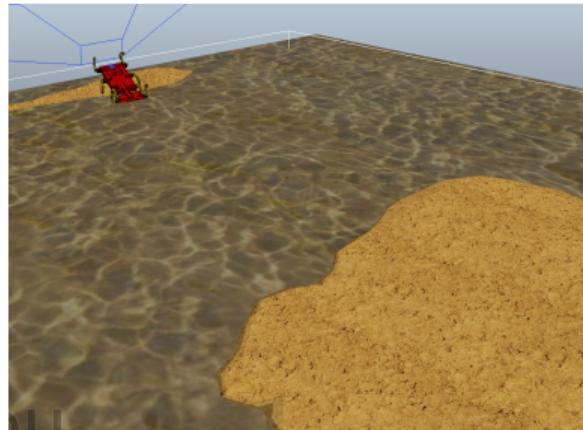


# Определение геометрических свойств поверхности

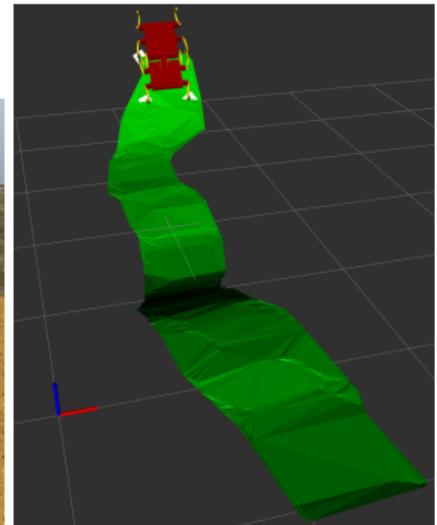
Результат: Маршрут, полигональная сетка



Начало маршрута



Конец маршрута

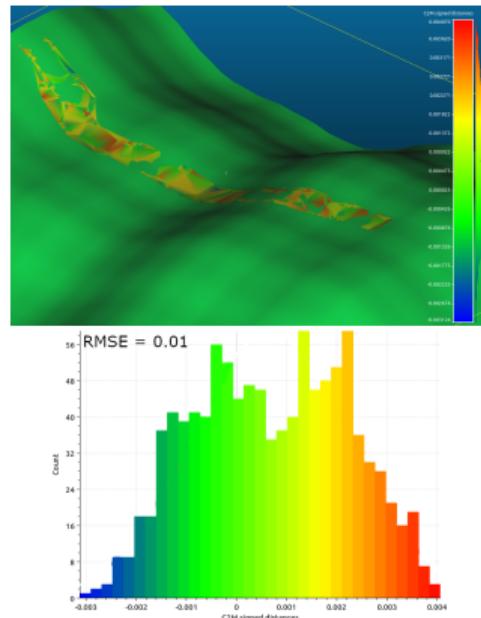
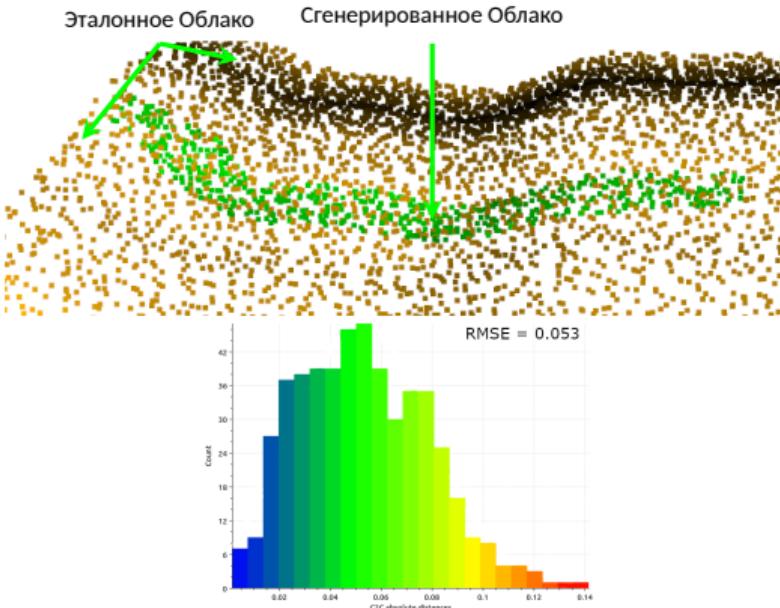


Созданная сетка



# Определение геометрических свойств поверхности

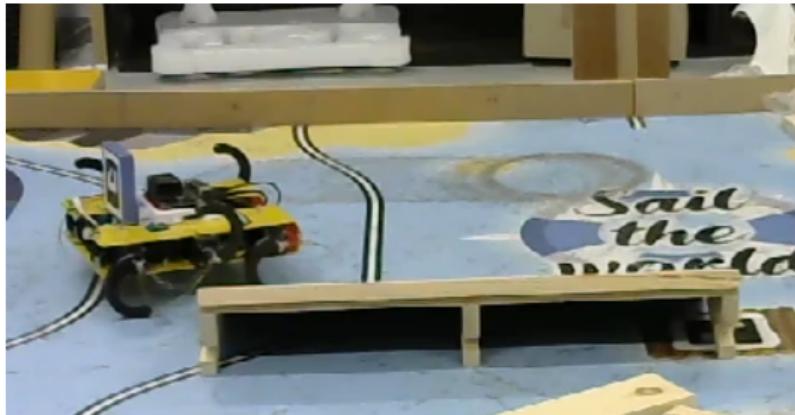
Результаты *Cloud2Cloud* и *Cloud2Mesh*



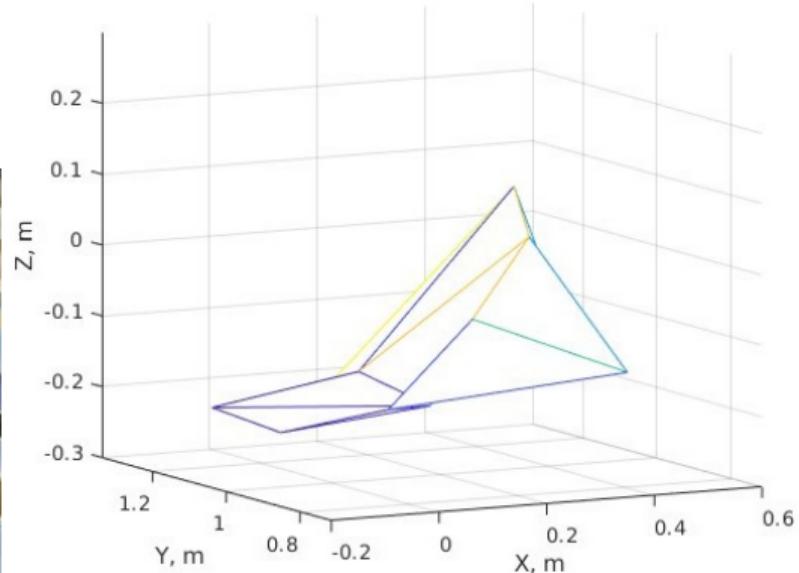


# Определение геометрических свойств поверхности

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 характеристизации 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.



# Апробация работы

*Статьи в периодических изданиях по перечню ВАК РФ*

1. Буличев О. В., Полёткин К. В., Малолетов А. В. Исследование характеристик датчика силы на основе материала «Velostat» для мобильного шагающего робота // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2022. № 4. С. 6–12.
2. Буличев О. В., Малолетов А. В. Метод оптимизации количества ног шагающего робота на основе эволюционного алгоритма // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2022. № 9. С. 12–19.



## 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



# Апробация работы

*В изданиях из списка Scopus*

1. Bulichev O., Klimchik A. Concept Development Of Biomimetic Centipede Robot StriRus // 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). 2018. C. 85–90.
2. Bulichev O., Klimchik A., Mavridis N. Optimization of Centipede Robot Body Designs through Evolutionary Algorithms and Multiple Rough Terrains Simulation // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2017. C. 290–295.



# Результаты интеллектуальной деятельности

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



# Определение геометрических свойств поверхности

Метрики *Cloud2Cloud* и *Cloud2Mesh*

Метрики *Cloud2Cloud* и *Cloud2Mesh*

основаны на метрике Хаусдорфа.

$$d_H(X, Y) = \sup_{m \in M} \{ |dist_X(m) - dist_Y(m)| \}$$

Где  $X, Y$  — непустые подмножества

метрического пространства  $M$ ;

$dist_X : M \rightarrow \mathbb{R}$  обозначает функцию  
расстояния до множества  $X$ .

