



# Разработка метода тактильного очуствления для мобильного шагающего робота

Автор: Олег Буличев



# 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  
**Тема:** Tactile perception method development for a mobile walking robot

## Текущие должности

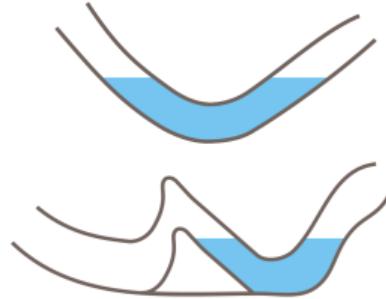
- Старший преподаватель (ЛинАл, Механизмы и Машины, ТеорМех)
- Тренер - преподаватель (Туризм, Историческое фехтование, Народные игры)



# Необходимость исследования пещер роботами



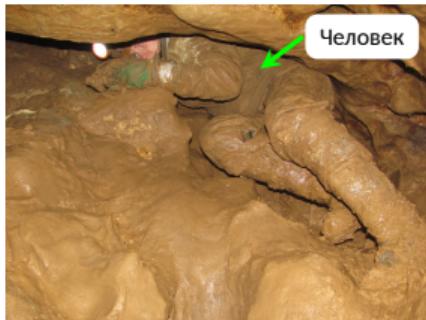
Соляные отложения



Сифоны



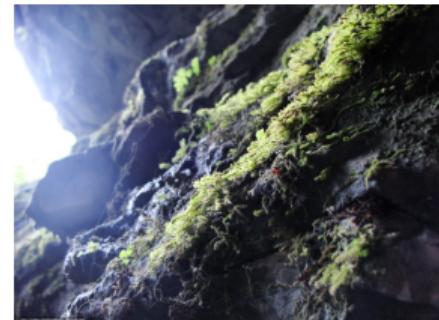
Ледяные пещеры



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.

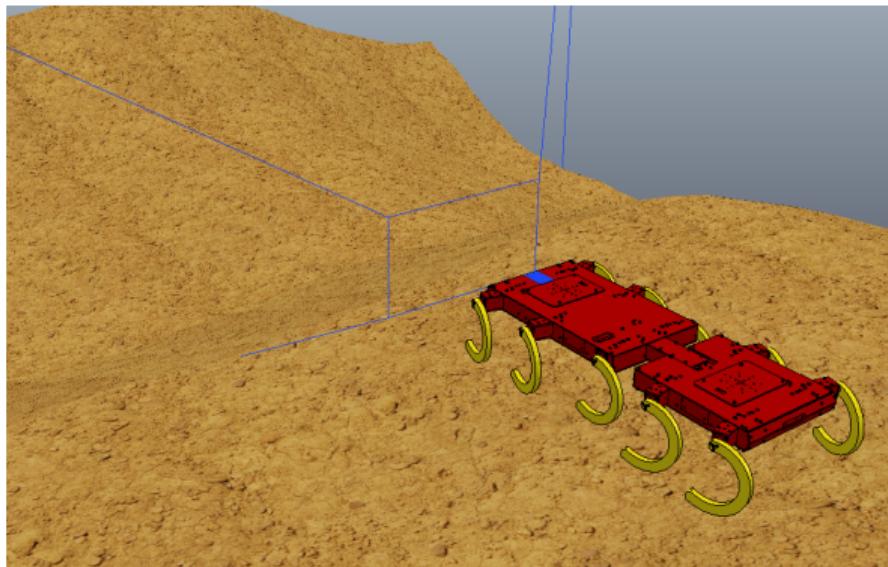


*DARPA Subterranean Challenge,  
свободная пещера*

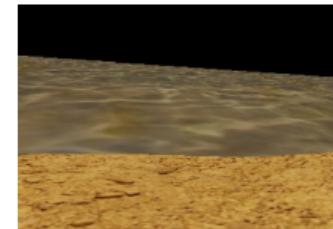


# Нерешаемая задача с помощью камеры или лидара

Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?



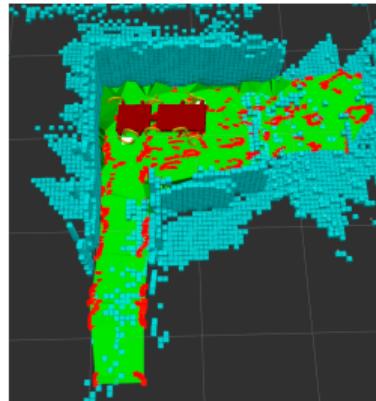
Поверхность без воды



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

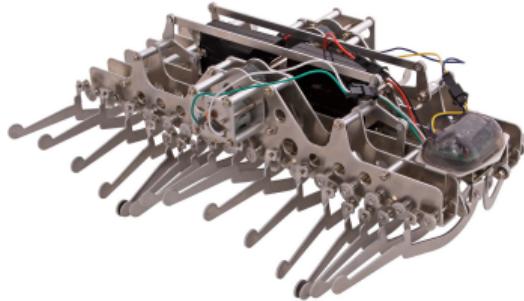


Определение физических свойств



## 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 очуствления.
4. Реализация алгоритма, позволяющего **определять физические свойства опорной поверхности**.



### Легенда

- Стандартные средства, без доработок
- Предмет исследования и разработки



# Разработка робота



# Литературный обзор

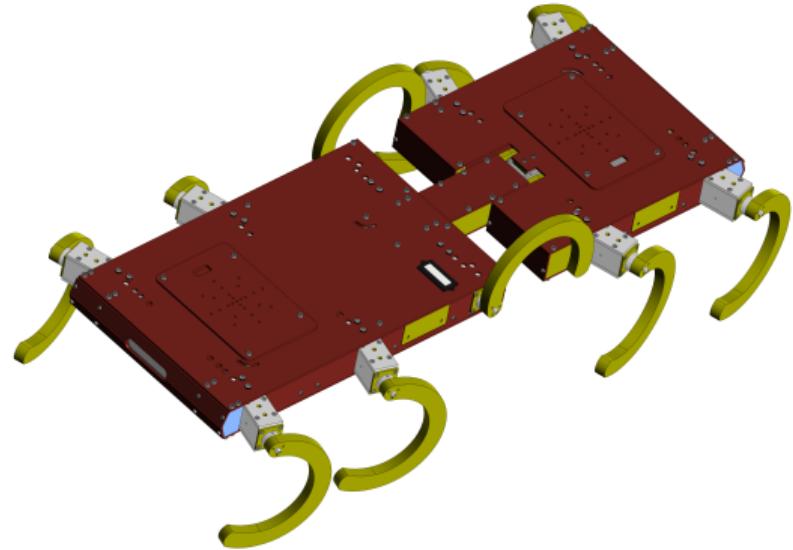
- Пещеры: препятствия, размеры.
  - Классификация пещер и препятствий
  - Оценка сложности территории
- Роботы для исследования пещер: от дирижаблей, до шагающих.
  - Робототехнические системы для исследования свободных пещер
- Способы определения силы реакции опоры.
  - Неявные и явные способы. Классификация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

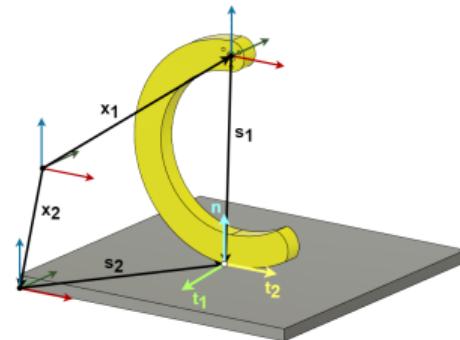
*Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота*

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

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

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

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**

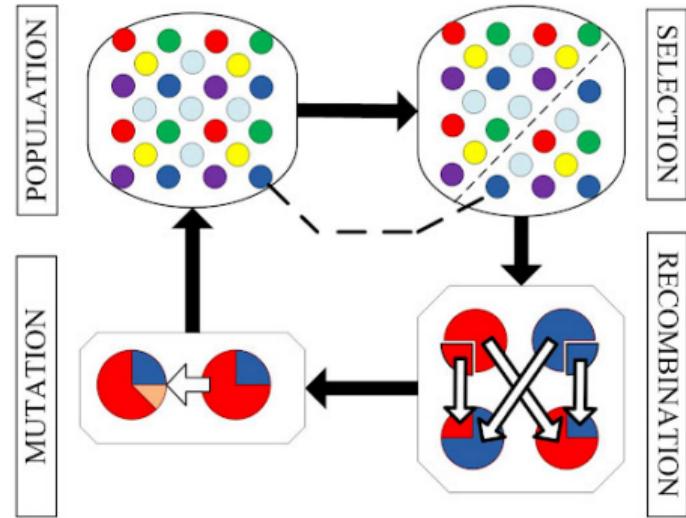


# Разработка робота

Используемые технологии



Генерация поверхности  
(Параметризованная  
искусственная территория)



Генетический алгоритм



# Разработка робота

## Предположения

- Сгенерированное семейство с одинаковыми константами имеет ту же сложность.

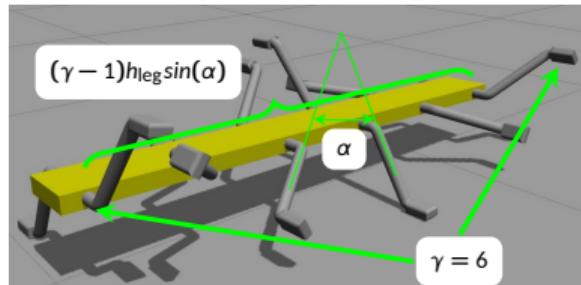
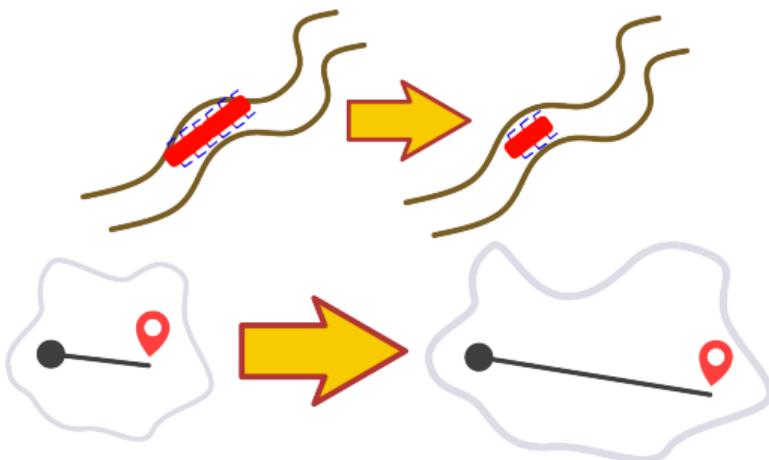
Параметры для генерации семейства поверхностей:

- Длина и ширина ячейки
- Диапазон высот ячейки
- Закон распределения



# Разработка робота

Предлагаемое решение



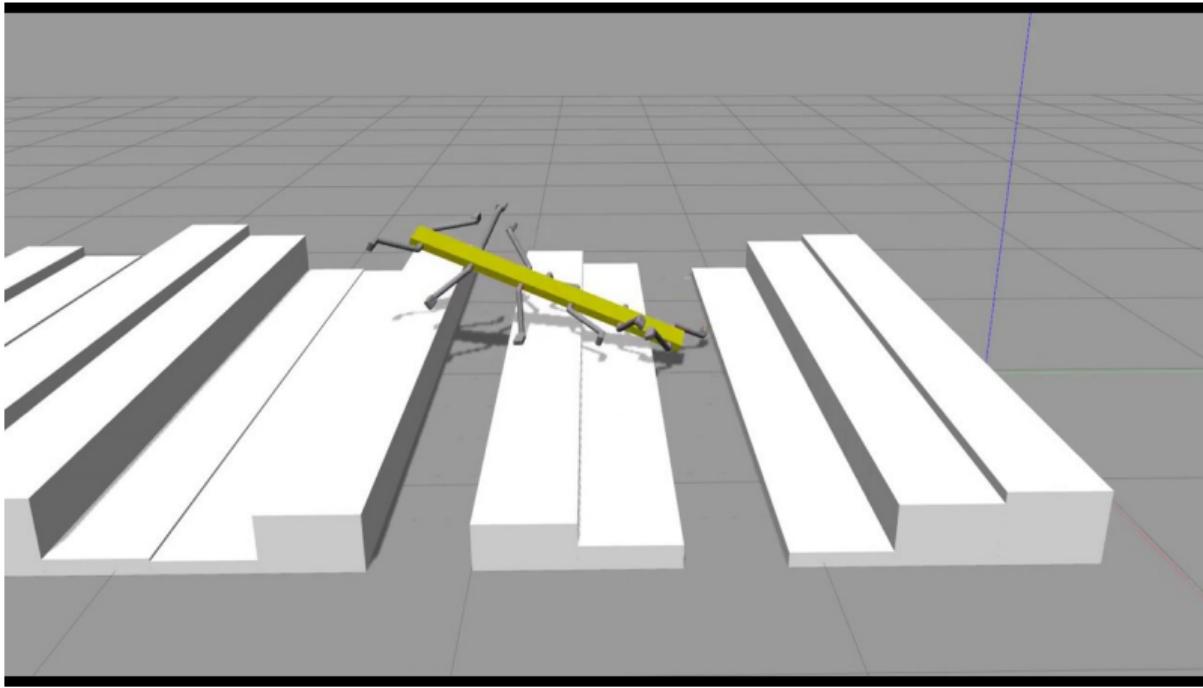
$$F \rightarrow \max = \beta \left( \omega_1 \cdot \overbrace{\delta}^{\text{Дистанция}} + \omega_2 \cdot \frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}}\sin(\alpha)} \right) + \\ + (1 - \beta)\delta^{\omega_1} \left( \frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}}\sin(\alpha)} \right)^{\omega_2}$$

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



# Разработка робота

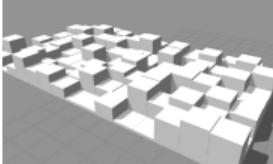
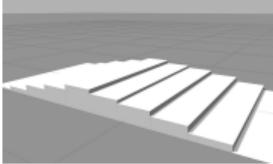
Видео: История одного сгенерированного робота





# Разработка робота

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

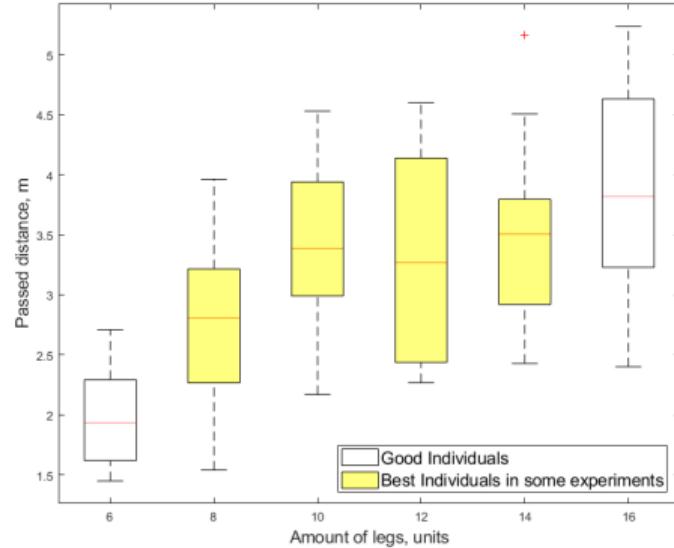
	Тип территории	Кол-во ног	Угол между соседними ногами	Кол-во индивидов
Этап 1		12	73	200
		12	72	
Этап 2		10	68	55
		12	77	



# 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

*Улучшение проходимости*

## Вопрос

1. Длинный робот может застрять в щели во время поворота. Как избежать это?
2. Как залезать на большие уступы?



# Разработка робота

Улучшение проходимости

## Вопрос

1. Длинный робот может застрять в щели во время поворота. Как избежать это?
2. Как залезать на большие уступы?

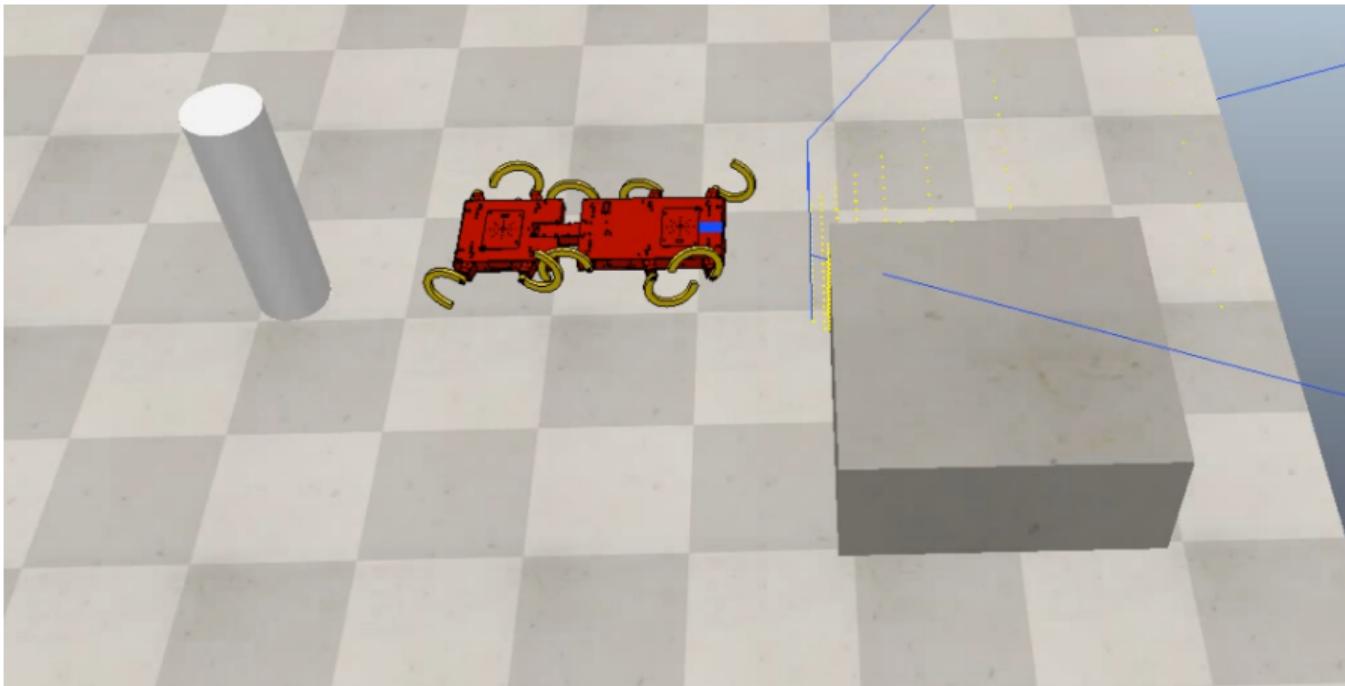
## Ответ

1. Добавить возможность двигаться вбок без смены ориентации.
2. Сделать сегментированное тело.



# Разработка робота

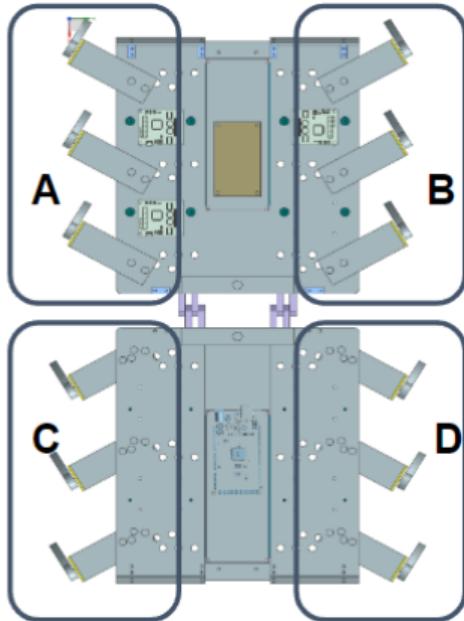
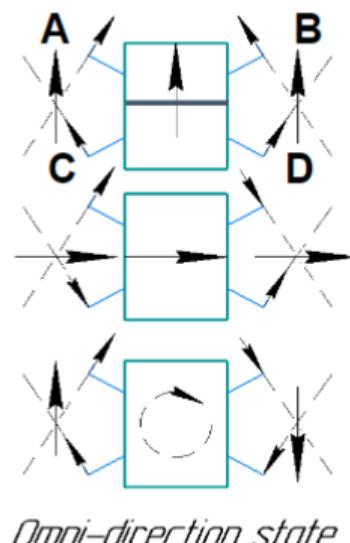
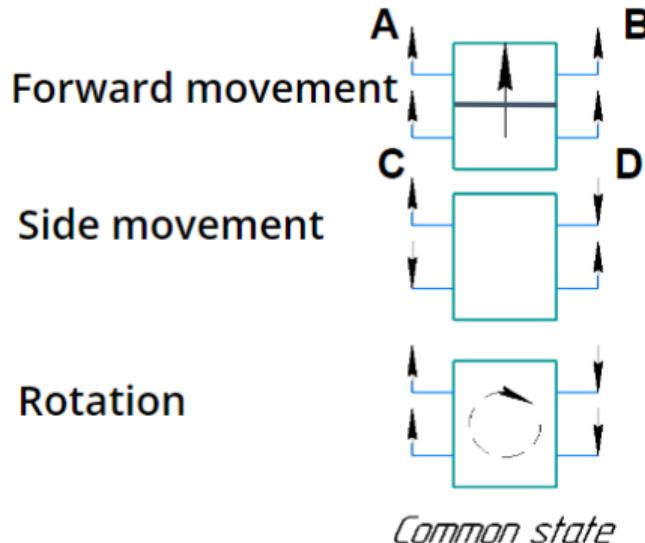
Видео





# Разработка робота

Предлагаемое решение

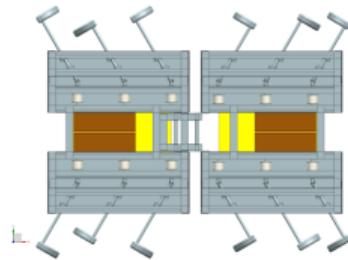
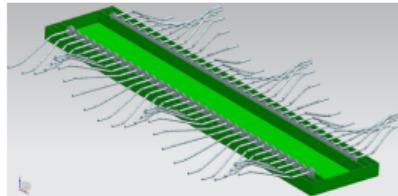


Векторное представление сил в стандартной и всенаправленной компоновке



# Разработка робота

## Проботипы робота СтриРус (1)

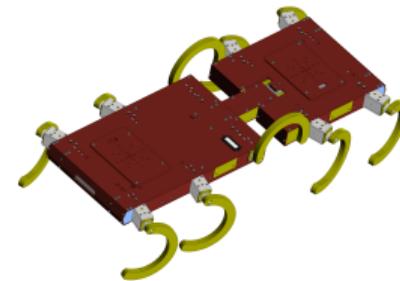
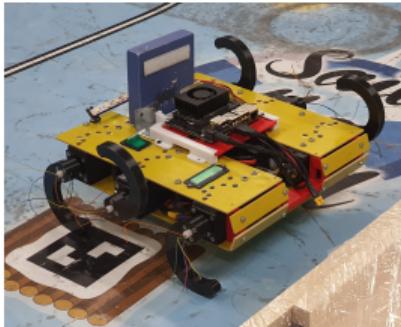


<b>Поколение</b>	1	2	3
<b>Кол-во ног</b>	54	12	12
<b>Кол-во сегм.</b>	1	2	2
<b>Соед. узел</b>	—	Тангаж	Тангаж, Рыскание
<b>Отн. угол нога-тело, град</b>	0	0-45	0, 15, 30, 45
<b>Высота ноги, мм</b>	54	60	60
<b>Особенности</b>	Волноход	Непрерывный механизм	2 DoF у соед. узла
<b>Недостатки</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Невозможно установить датчики силы</li> <li>- Малый КПД</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Сложный механизм изм. угла</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Маленькие ноги</li> <li>- Бесполезная возможность рыскания</li> </ul>



# Разработка робота

## Проботипы робота СтриРус (2)



Поколение	3+	4
Кол-во ног	6	10
Кол-во сегм.	1	2
Соед. узел	—	Тангаж
Отн. угол нога-тело, град	0	0, 15
Высота ноги, мм	90	180
Особенности	Удлиненные ноги	Гигантские ноги
Недостатки	- 1 Сегмент	-



# 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

## Типы датчиков силы

- **Силомоментный:** массивный и дорогой для маленьких роботов
- **Оптический:** очень габаритный
- **Магнитный:** очень габаритный
- **Емкостной:** дорогой, но лучший для данной задачи
- **Пьезорезистивный датчик основанный на чернилах или полимерах:** дешевый и надежный, но имеет проблемы с гистерезисом
- **Тензометрический:** влияние температуры и влажности на чувствительность



# Разработка преобразователя силы

## Типы датчиков силы

- Силомоментный: массивный и дорогой для маленьких роботов
- Оптический: очень габаритный
- Магнитный: очень габаритный
- Емкостной: дорогой, но лучший для данной задачи
- Пьезорезистивный датчик основанный Velostat: дешевый и надежный, но имеет проблемы с гистерезисом
- Тензометрический: влияние температуры и влажности на чувствительность



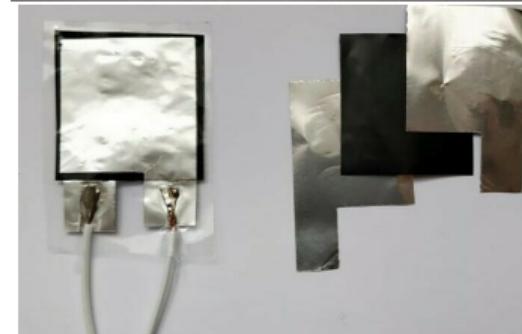
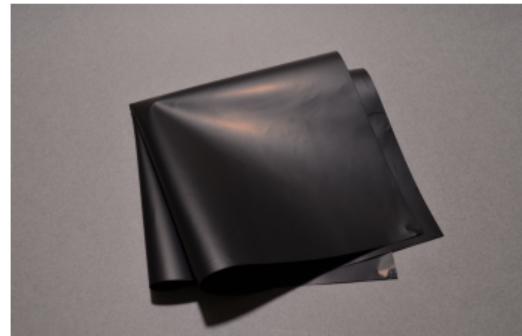
# Разработка преобразователя силы

## *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

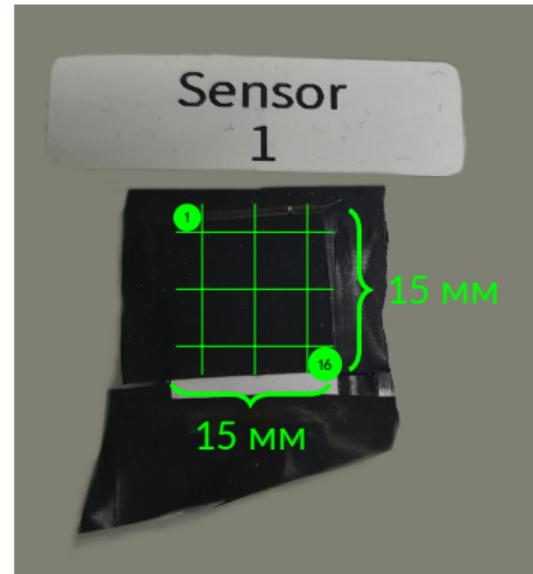


# Разработка преобразователя силы

## 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,

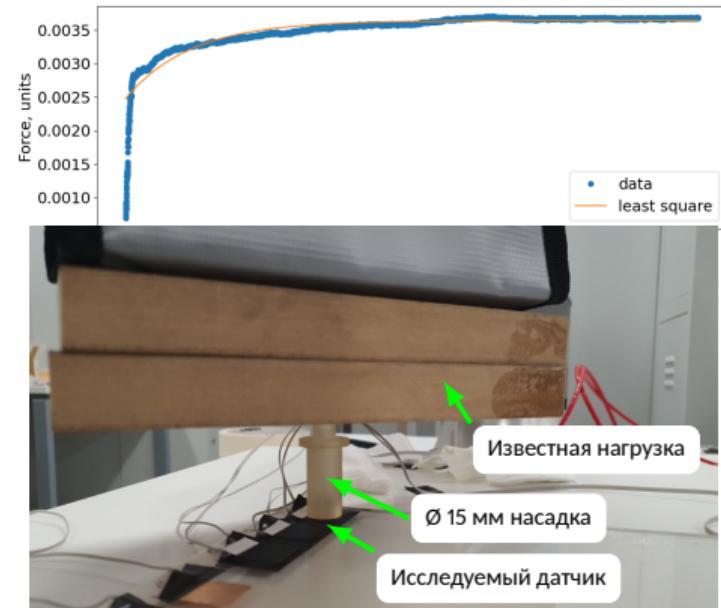
$p$  – приложенное давление,

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

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

Апробирована модель для калибровки

датчика

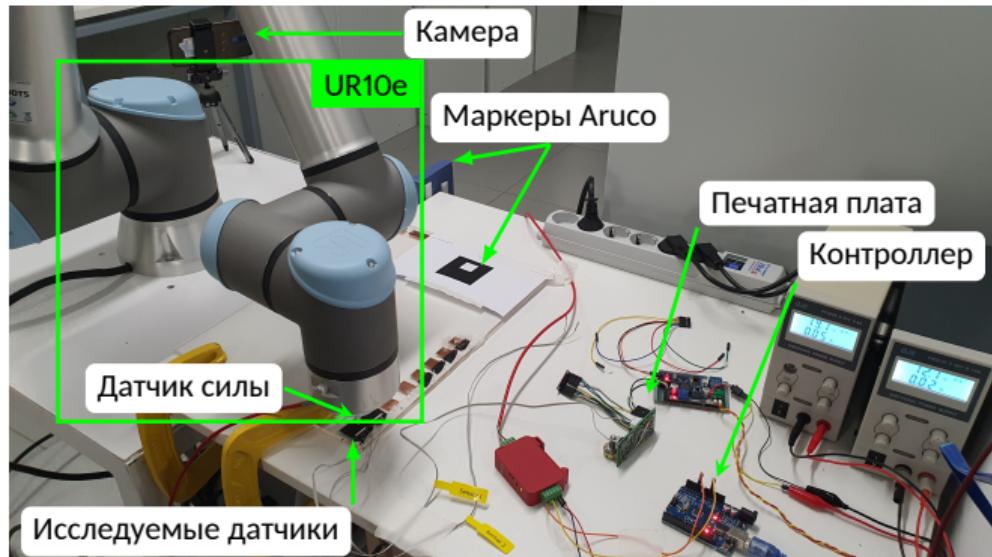




# Разработка преобразователя силы

## Требования к установке

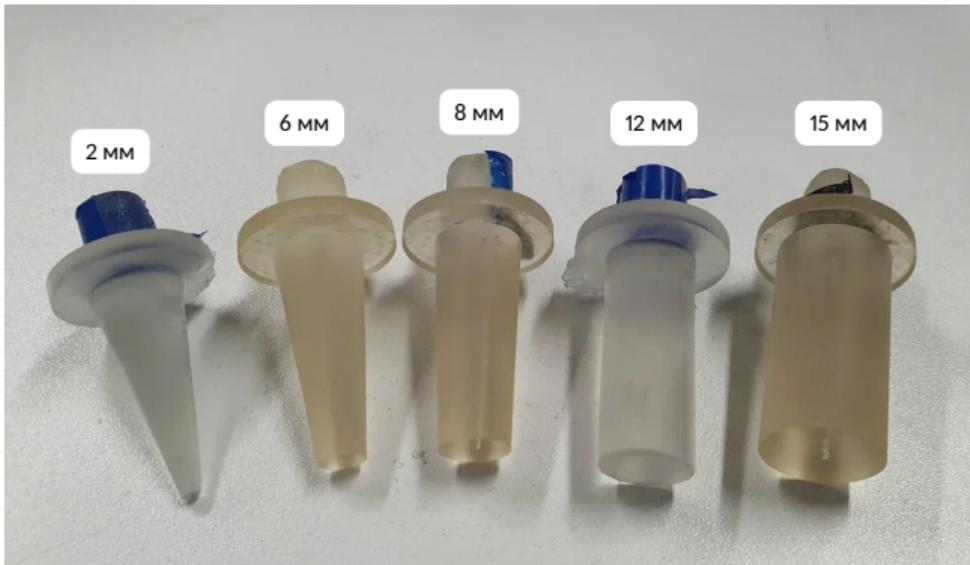
- Управление силой нажатия  
Импедансное управление
- Повторяемость  
эксперимента по силе и  
позиции  
Добавив манипулятор и  
камеру
- Возможность нажимать  
только на часть сенсора  
Насадки для манипулятора





# Разработка преобразователя силы

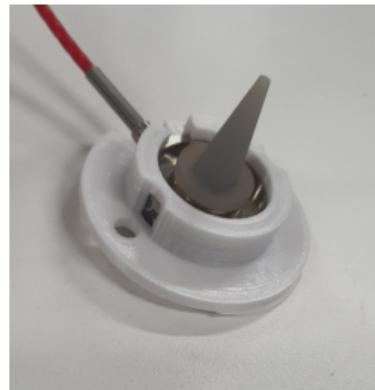
Установка: Насадки



Все насадки



Промышленный  
датчик силы

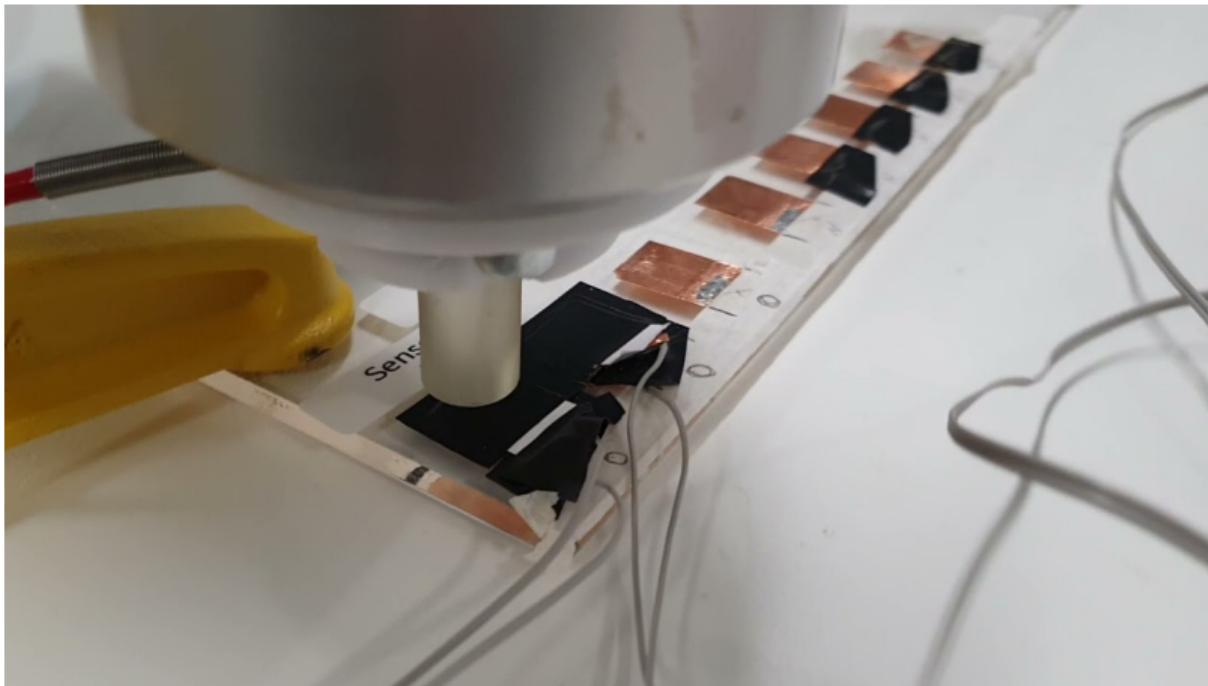


Насадка в сборке



# Разработка преобразователя силы

Установка: Видео





# 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

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

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

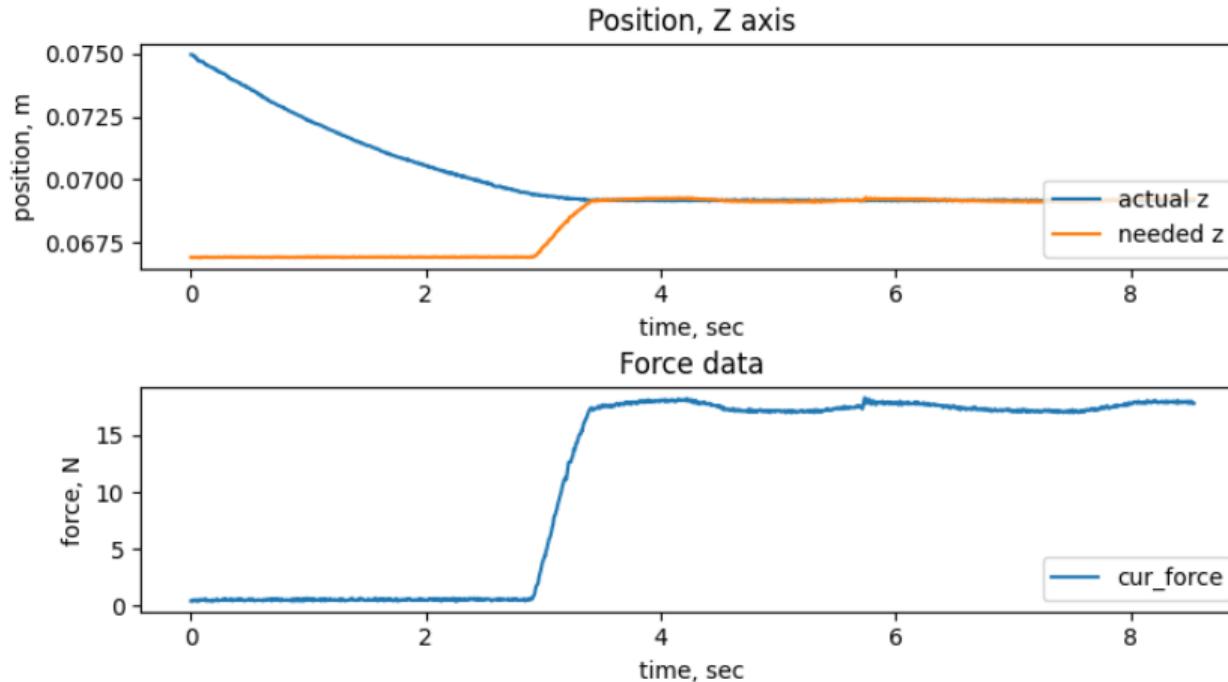
где  $X = \text{принять\_состояние}();$

$\text{установить\_скорость}(U)$



# Разработка преобразователя силы

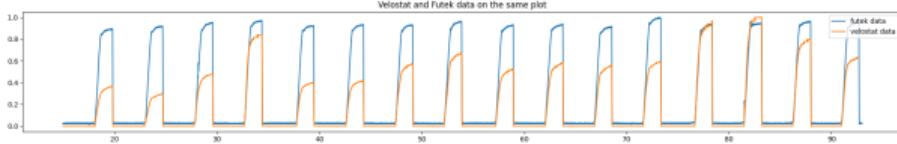
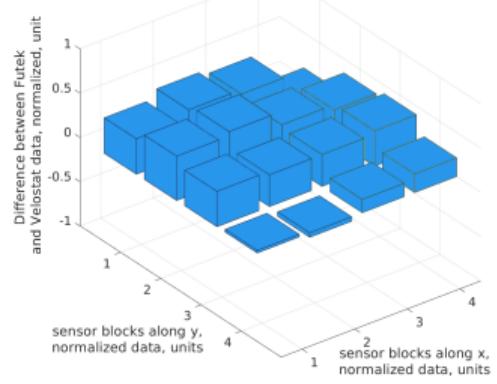
Импедансное управление: пример результата



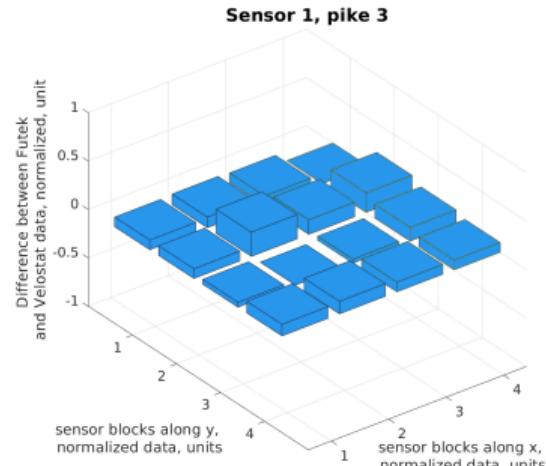


# Разработка преобразователя силы

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



# Разработка преобразователя силы

## Итог

1. Статический эксперимент: определены коэффициенты преобразователей  $p$ ,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $\tau_{res}$ ,  $k_i$ .
2. Динамический эксперимент: преобразователь может быть представлен как единое тело, если площадь давления 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

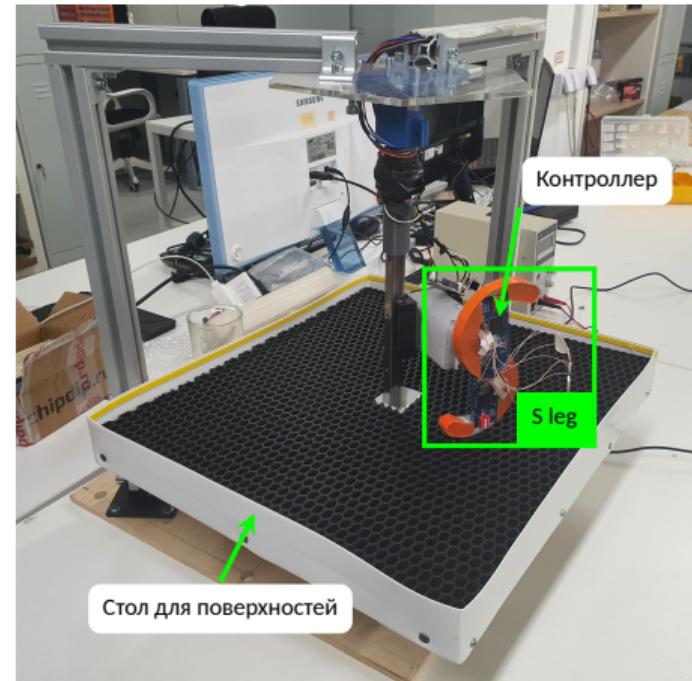
1. Подготовить для экспериментов различные поверхности.
2. Собрать датасет, состоящий из угловой скорости мотора и показаний датчиков с ног робота.
3. Представить их в виде вектора признаков.
4. Решить задачу классификации данных с помощью SVM, используя метрику 10-fold cross validation.
5. Протестировать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



# Определение физических свойств поверхности

## Требования к установке

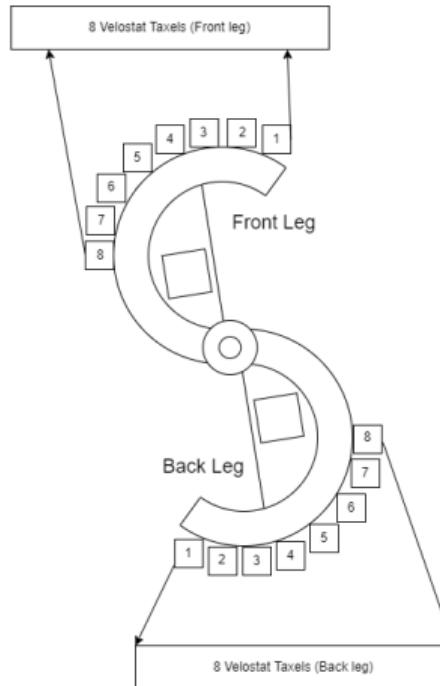
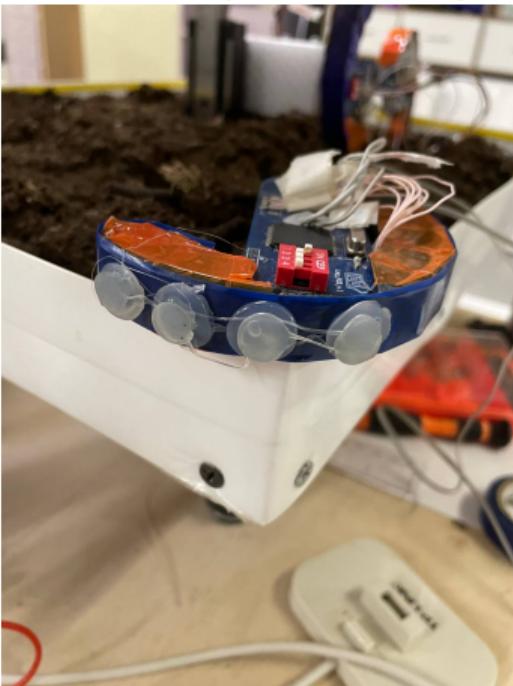
- Иметь возможность быстро менять используемые поверхности  
**Быстроразборный стол**
- Бесконечное движение робота  
**2-ух степенной механизм и нога S-образной формы**
- Узел движителя должен быть такой же как на СтриРусе  
**Создано крепление для узла ноги робота**





# Определение физических свойств поверхности

Установка сенсоров на ногу



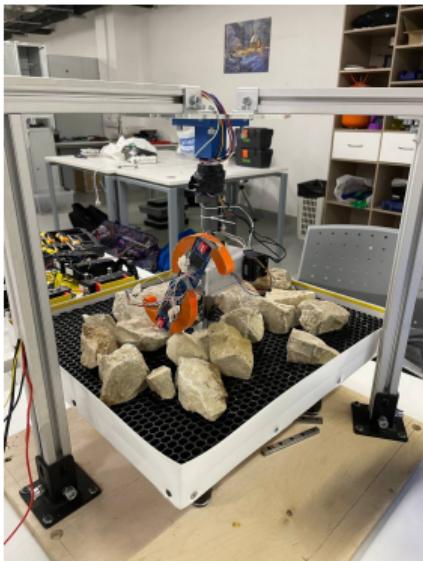


# Определение физических свойств поверхности

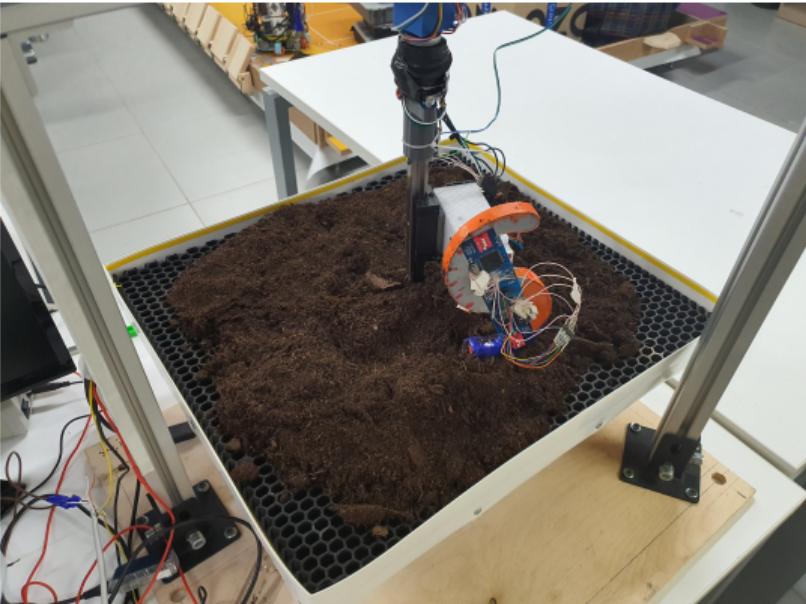
Установка: Типы поверхности, видео



Упругая



Твердая

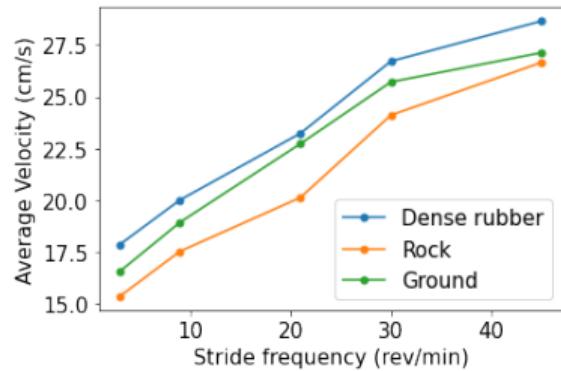
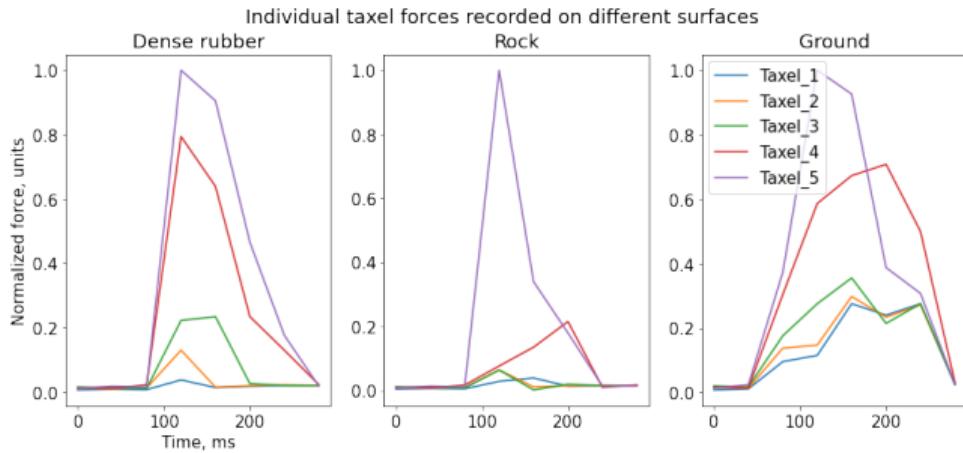


Пластичная



# Определение физических свойств поверхности

Данные с одного эксперимента



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 физических свойств поверхности

## Итог

- Возможность определять упругие, пластичные и твердые поверхности.
- Выбраны параметры классификации рельефа для машинного обучения:
  - Число оборотов в минуту
  - Крутящий момент двигателя
  - Ускорение от IMU
  - Данные о силе, которые представлены как значение датчика/сегмент, пиковая амплитуда, средняя амплитуда
- Velostat датчик силы доказал свою работоспособность.



# Определение геометрических свойств поверхности



# Определение геометрических свойств поверхности

## Вопрос

Как создать плотное облако точек, используя следовую дорожку?

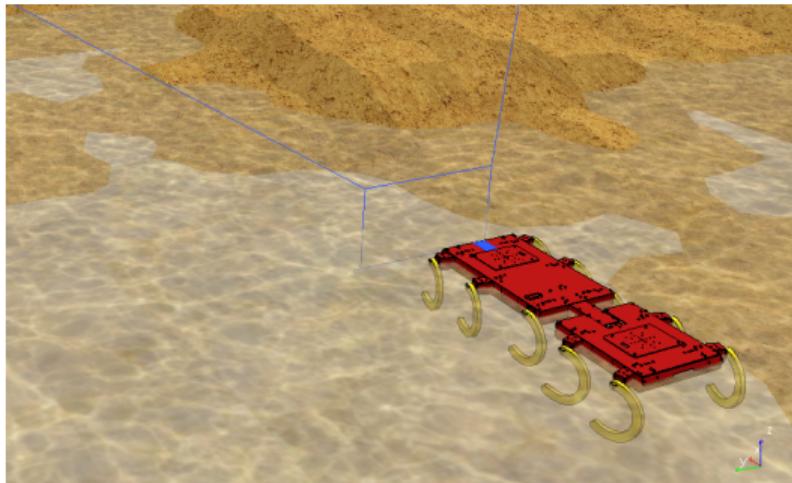
## Ответ

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

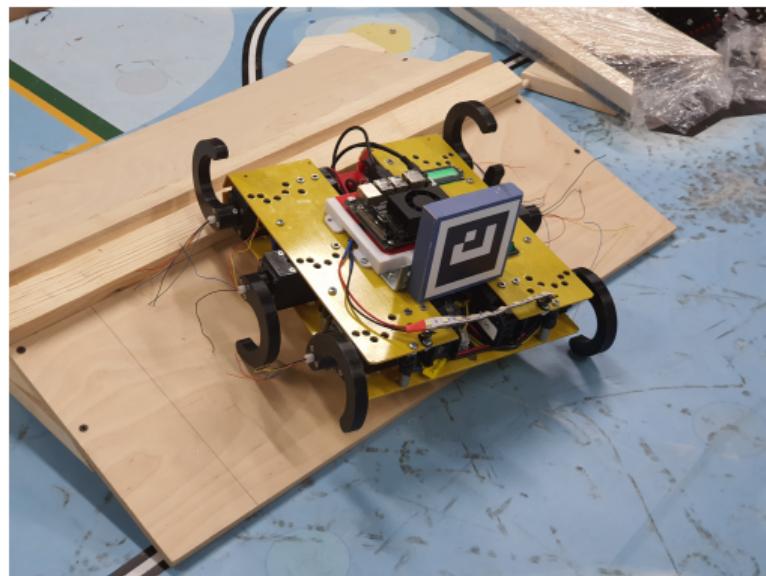


# Определение геометрических свойств поверхности

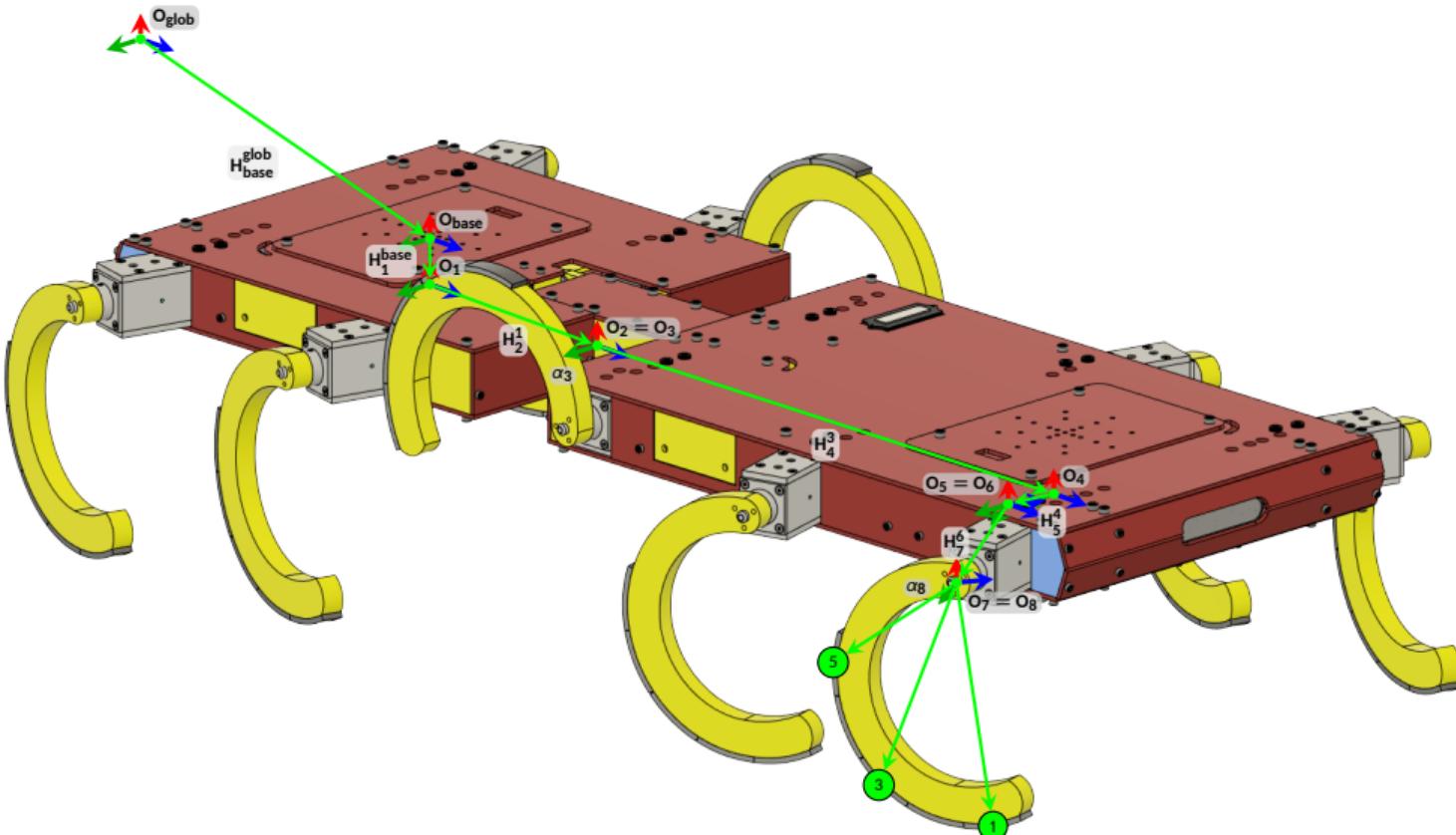
Места проведения экспериментов



CoppeliaSim симулятор,  
**4th gen** СтриРус



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





# Картографирование с помощью датчиков силы

## Предположения

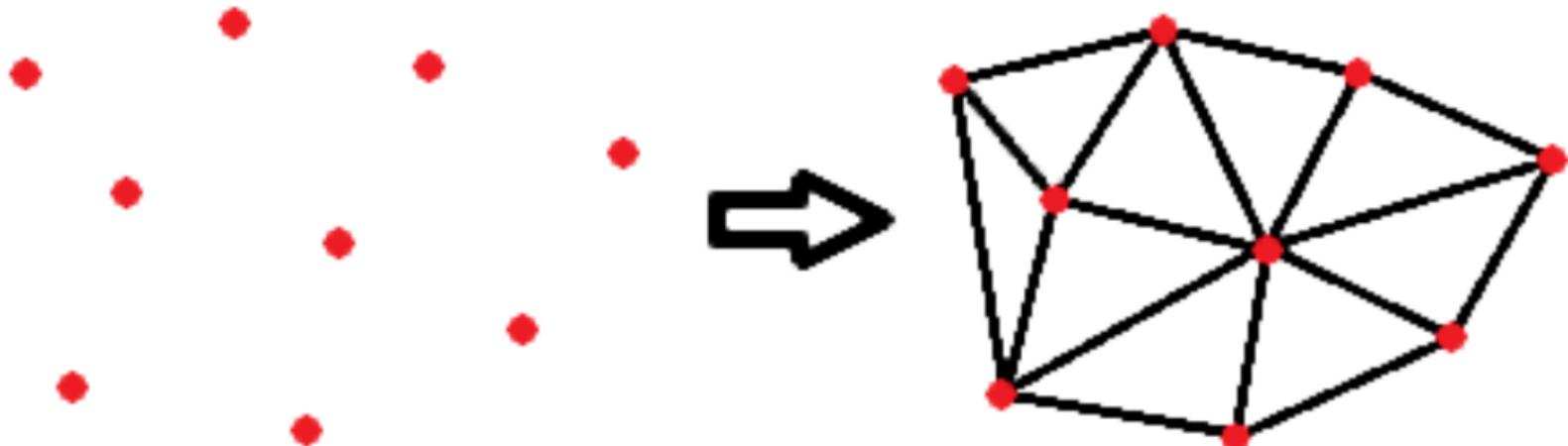
Текущее решение с учетом предположений:

- Наша местность может быть представлена  $z = f(x, y)$ . Поэтому используется 2D триангуляция Делоне (проецирование точек на плоскость)
- Все данные моделирования предварительно обрабатываются белым шумом



# Определение геометрических свойств поверхности

Триангуляция Делоне

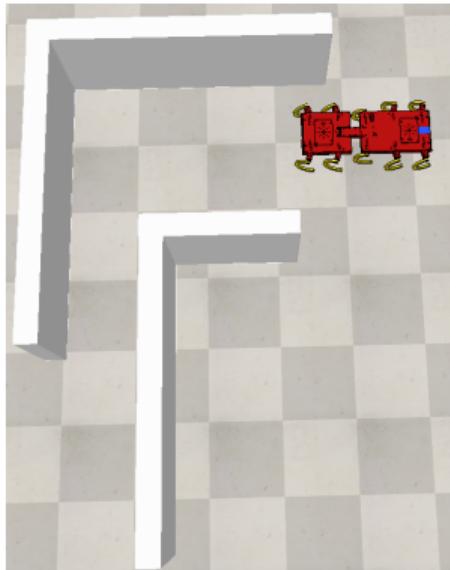


2D триангуляция Делоне (Выпуклая оболочка)  
От облака точек к полигональной сетке

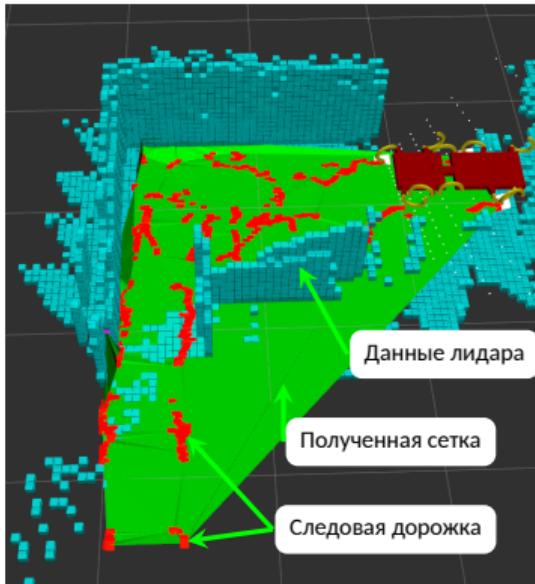


# Определение геометрических свойств поверхности

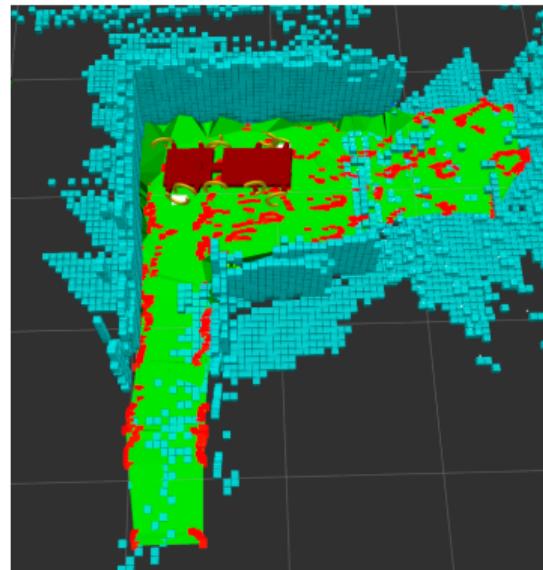
Почему важно использовать вогнутую оболочку (модификация Делоне)



Пример поверхности



Выпуклая оболочка

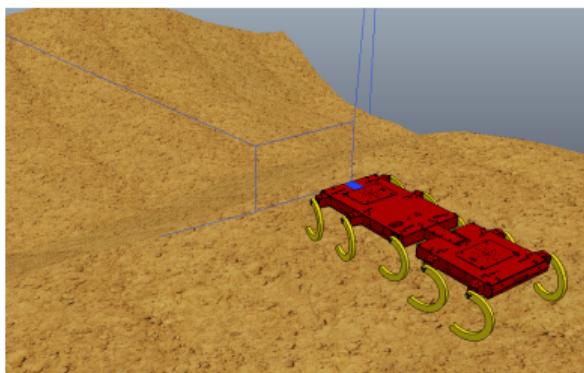


Вогнутая оболочка

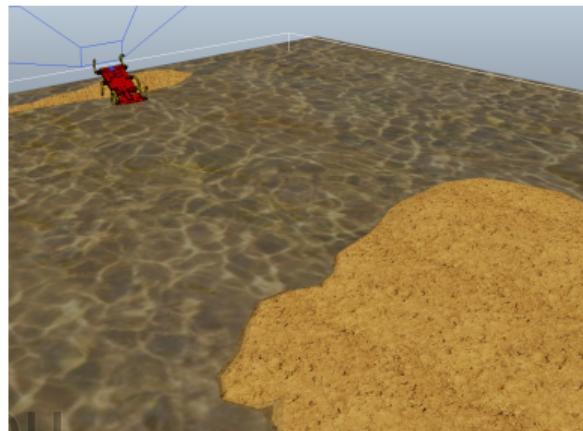


# Определение геометрических свойств поверхности

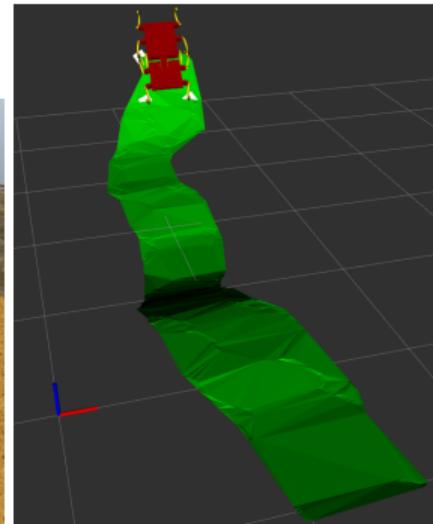
Результат: Маршрут, полигональная сетка



Начало маршрута



Конец маршрута

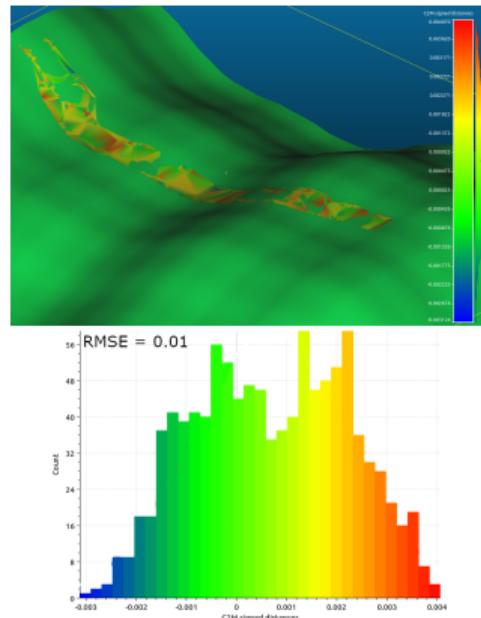
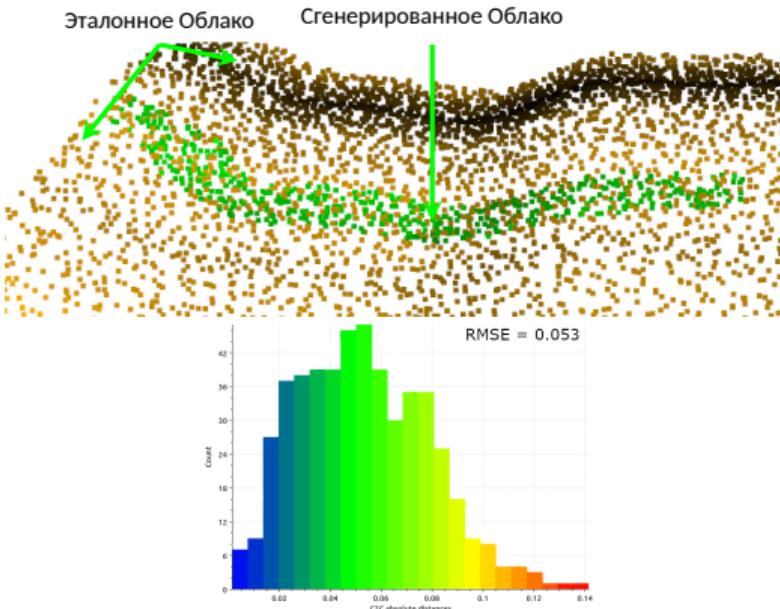


Созданная сетка



# Определение геометрических свойств поверхности

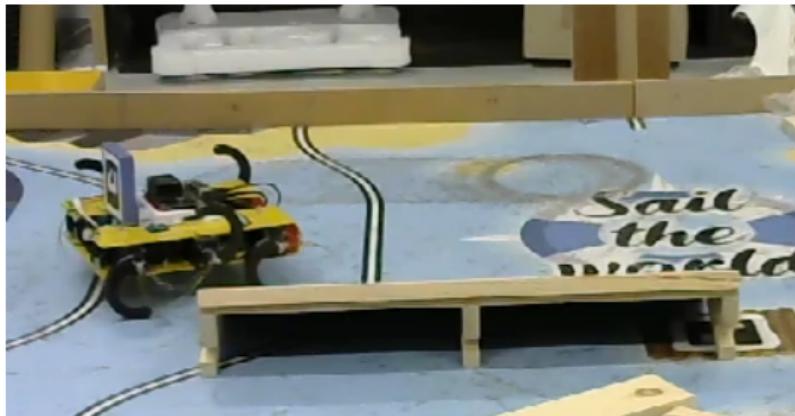
Результаты *Cloud2Cloud* и *Cloud2Mesh*



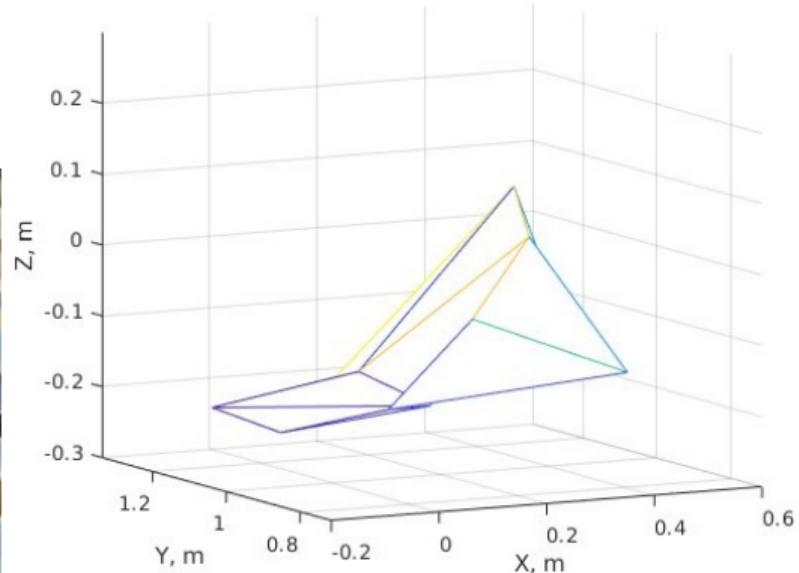


# Определение геометрических свойств поверхности

Результат: Натурные испытания, Видео



Робот проходит препятствие



Полигональная сетка, полученная с помощью ног



# Определение геометрических свойств поверхности

## Итог

- Карта может быть построена с помощью вогнутой оболочки 2D триангуляции Делоне, где входными данными являются точки касания, определенные датчиком силы.
- Симулятор (Среднее значение среднеквадратичной ошибки):
  - При сравнении облаков точек составляет около 5 см.
  - При сравнении сеток составляет около 1 см.
- Натурный эксперимент (—//—):
  - При сравнении облаков точек составляет около 8 см.

Это приемлемая точность для такой задачи.



# 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.



# 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)



# Приложения



# 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  $X$ .

