

2023-11-13

Разработка метода тактильного чувствования
для мобильного шагающего робота
Соискатель: Олег Буличев
Руководитель: Александр Малолетов

Разработка метода тактильного чувствования для мобильного шагающего робота

Соискатель: Олег Буличев

Руководитель: Александр Малолетов



Исследование пещер

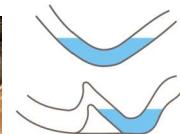
Назначение — геологоразведка, изучение подземных экосистем

Непроходимые места для человека

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



Могила



Сифоны

Заинтересованные стороны

1. Ученые — Горный институт Уральского отделения РАН, Университет Минас-Жерайса, Фонд Бруно Кесслера
2. Космические агентства — ESTEC (DAEDALUS), Роскосмос (FEDOR), NASA (CADRE)
3. Военные — Darpa Subterranean Challenge



DAEDALUS для
исследования
пещер на луне



DARPA
Subterranean
Challenge

Постановка задачи

Исследование пещер

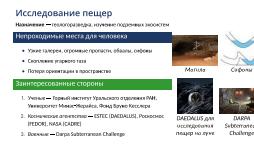
2023-11-13

Одним из способов нахождения новых минералов или форм жизни является исследование пещер спелеологами. Но данное мероприятие очень опасно, так как в пещерах можно встретить обвалы, сифоны *тык*, можно потеряться. Также возможно задохнуться от угарного газа.

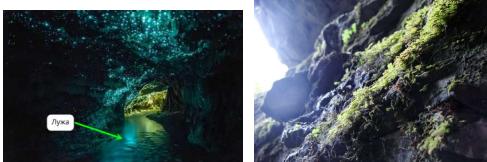
Поэтому разные организации во всем мире пытаются начать применять роботов при исследовании пещер. Это как и ученые из России, к примеру Горный институт Уральского отделения РАН, с которым Иннополис подписал бумагу о совместных исследованиях, а также к примеру университет Минас-Жерайса в Бразилии или фонд Бруно Кесслера в Италии.

Пещеры находятся не только на Земле, поэтому космические агентства всего мира также активно развиваются в данной области. К примеру *тык* Европейское агентство собирается скоро отправить робота Дедала для исследования пещер на луне.

Нахождение новых минералов и форм жизни, а также способы автономной навигации в таких сложных местах, может помочь в развитии военной промышленности. Это понимает Американское Военное агентство — DARPA, проводя конкурс DARPA Subterranean Challenge *тык*, где роботы в полностью автономном режиме должны исследовать различные виды пещер.



Характеристики пещер



(a) Лужа

(b) Мх



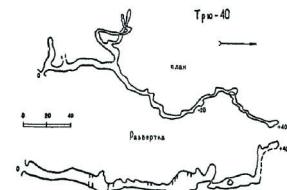
(c) Твердые породы

(d) Земля

Типы опорных поверхностей



Габариты пещеры (Свободная узость)



Протяженность пещер: 1-2 км

Олег Буличев

Постановка задачи

2

Некорректные данные с оптических сенсоров



Мх приминается после ходьбы



Лазер отражается от воды, а камера не различает объекты в мутной воде

Постановка задачи

Характеристики пещер

2023-11-13



Так как пещеры бывают абсолютно разными, я решил ограничить спектр пещер для которых решалась задача. Слева представлены типы опорных поверхностей, которые могут встречаться в пещерах *тык*. Это земляной грунт, малые водные препятствия или лужи, твердые породы, а также мох.

Для разработки объекта исследования необходимо понимать также и габариты пещер, а также их протяженность. Изучив различные карты пещер, такие как на рисунке внизу *тык* было решено взять протяженность пещер в диапазоне от 1 до 2х км.

Основная задача это исследовать пещеры, которые не может исследовать человек физически из-за ограничения размеров. Человеку сложно долго ползать на четвереньках, поэтому я решил так, что робот должен быть как минимум меньше, чем средний мужчина в габаритах *тык*. А именно 600x1000x600 мм. Такой тип препятствий в спелеологии называется свободная узость.



Постановка задачи

Некорректные данные с оптических сенсоров

2023-11-13

Для исследования пещер роботу нужна система навигации. Классические системы навигации основаны на оптических сенсорах.

К сожалению, в пещерах встречаются случаи, когда оптические сенсоры: лидары, камеры, не смогут достоверно построить карту.

К примеру, мох *тык*. Он меняет свой объем при наступании на него и это возможно только измерить во время ходьбы. До или после будут уже другой рельеф.

Второй пример — построение опорной поверхности под лужей *тык*. Лидар будет отражаться от поверхности воды и построит гладкую поверхность, а камера не будет работать в мутной воде, как и зеленый лидар.

С использованием же разработанных методов, данная задача решаема, что и будет показано далее.

Олег Буличев

Постановка задачи

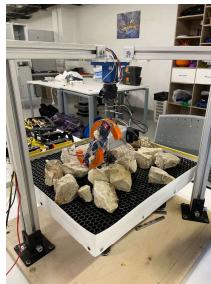
3

Цель работы

Разработать метод построения карты местности с определением геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности роботом с шагающими двигателями снабженными тактильными датчиками, без использования оптических сенсоров.



Определение геометрических свойств



Определение физических свойств

Олег Буличев

Постановка задачи

4

Постановка задачи

2023-11-13

Цель работы

Целью работы являлось разработать метод построения карты местности роботом с шагающими двигателями, у которого на стопах установлены датчики силы. Задача должна решаться без использования оптических сенсоров.

Я разбил понятие построения карты на две задачи: определение геометрических свойств *тык* и физико - механических *тык*.



"1, 2" Построение рельефа местности

Геометрические свойства:

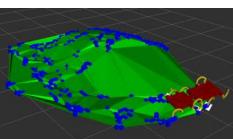
Входные данные: следовая дорожка, представленная в виде облака точек.

Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек.

Допустимая точность: 0.1 м



Исследуемая поверхность



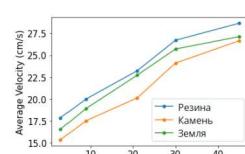
Следовая дорожка и полигональная сетка

Физико-механические свойства:

Входные данные: данные с внутренних датчиков робота.

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

Допустимая ошибка: 20%



Данные для обучения Пример поверхности



Олег Буличев

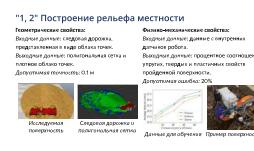
Постановка задачи

5

Постановка задачи

2023-11-13

"1, 2" Построение рельефа местности



Задачи 1 и 2 - определение геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности. Хочу отметить, что задачи пронумерованы в порядке значимости, но не в порядке выполнения.

Рассматривая геометрические свойства, то входными данными я считаю следовую дорожку, которая представлена в виде облака точек, относительно абсолютных систем координат.

Результатом примененного метода решения должны получиться полигональная сетка пройденной поверхности, а также плотное облако точек. Эти представления являются типичными способами представления для работы с навигацией. *тык*. Синие точки — следовая дорожка, зеленым цветом — полигональная сетка

Целью же определения физико-механических свойств является определение каких свойств у пройденной поверхности превалируют: твердые, упругие или пластичные. Решение задачи основано на обучении модели машинного обучения на данных с внутренних датчиков робота *тык*. К примеру одним из примеров данных является частота вращения ног.

Более точные формулировки задач с алгоритмом и принятыми предположениями будут далее.

Объект исследования

Класс многоногих шагающих роботов с

- а) Цельным или сочленённым корпусом
- б) Цикловыми двигателями с одной степенью свободы, управляемые зависимо или независимо друг от друга.

Требования:

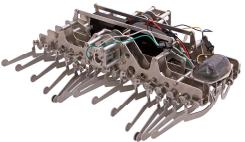
- Компактные размеры (меньше чем $1000 \times 600 \times 600$ мм)
- Залезать на препятствия высотой не меньше, чем $\frac{3}{4}$ длины корпуса
- Преодолевать представленные опорные поверхности



Whex



Boston Dynamics RHex



Gakken Centipede

Олег Буличев

Постановка задачи

6

"3" Оптимизация кинематической схемы

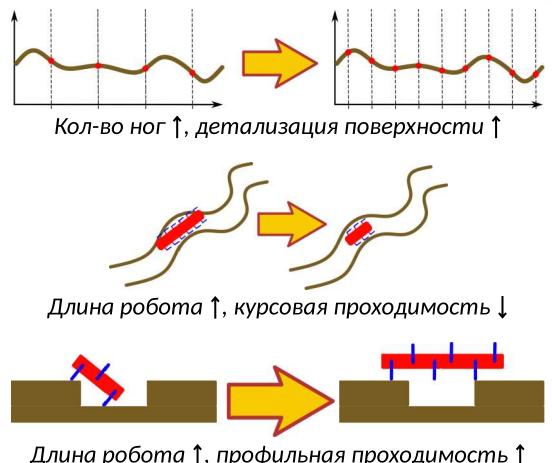
Решить задачу оптимизации

$$F = f(x) \rightarrow \max, \text{ где}$$

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

(x) — параметр: количество ног

Количество ног имеет прямую зависимость с длиной корпуса робота.



Олег Буличев

Постановка задачи

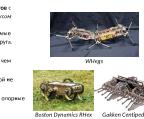
7

Постановка задачи

2023-11-13

Объект исследования

Объект исследования



Рассмотрев различные варианты роботов, было решено выбрать класс многоногих шагающих роботов с цельным или сочлененным корпусом и цикловыми двигателями с одной степенью свободы, управляемые зависимо или независимо друг от друга.

Такой класс был выбран так как его представители показывают высокие показания профильной проходимости, что видно в видео справа *тык*. На рисунках представлены разные представители — вхекс, рхекс, сентипеде *тык*.

У вхекс 6 ног и 1 активное сочленение, у Рхекса также 6 ног, но один корпус. У обоих ноги управляются независимо. У Гаккен сентипеде же 32 ноги, нет сочленений, а движение одной ноги зависит от положения другой.

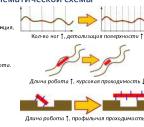
Данных класс роботов может соответствовать поставленным требованиям. Нужно, чтобы разработанный роботом меньше габаритов пещеры, мог залезать на препятствия высотой не меньше, чем $\frac{3}{4}$ длины корпуса, а также мог физически преодолевать препятствия, которые были заявлены как те, которые можно встретить в пещере.

Постановка задачи

2023-11-13

"3" Оптимизация кинематической схемы

"3" Оптимизация кинематической схемы



У различных представителей этого класса, разное количество ног. Более того, количество ног также влияет и на построение карты, так как если у робота ног больше, то карта будет более детализированной *тык*, а следовательно - точнее.

Но с другой стороны, пещеры имеют много изгибов и при большой длине робот может застрять *тык*. То есть чем длиннее робот, тем хуже курсовая проходимость.

Более длинный робот может преодолевать больше препятствий, как это показано на рисунке *тык*. Он не провалится в яму, а из-за своей длины сможет ее пересечь.

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

"4" Верификация преобразователя силы

Измерить характеристики материала для случаев, когда **площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора**.

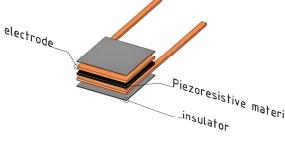
Входные данные: показания разработанного датчика и значение реально приложенной нагрузки

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

Допустимая ошибка: 10%



Материал Velostat



Преобразователь силы

Олег Буличев

Постановка задачи

8

Основные научные задачи исследования

1. Разработка метода **построения карты местности и определения геометрических свойств поверхности** с помощью тактильного чувствования.
2. Реализация алгоритма, позволяющего **определять физические свойства опорной поверхности**.
3. Разработка метода **оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми двигателями** с одной степенью свободы критериям проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации, длины пройденного пути.
4. Создание методики **исследования датчика силы**, когда площадь контакта нажатия на сенсор меньше чувствительной области самого сенсора.

Олег Буличев

Постановка задачи

9

Постановка задачи

2023-11-13

"4" Верификация преобразователя силы



В первичной постановке задачи о построении карты, как для определения геометрических, так и физико-механических свойств, говорилось о том, что на роботе установлены датчики силы. После обзора различных решений, было решено разработать свой пьезорезистивный преобразователь силы на основе Velostat *тык*. Данный материал был выбран из-за его отличного соотношения цена/качество. Так как на робота нужно установить много датчиков на каждую ногу, это является важным фактором.

При изучении данного материала я заметил, что когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора, то при одинаковом давлении, показания будут разными. А это будет сильно влиять на работу алгоритмов. Примером является маленький камушек, на который робот наехал при ходьбе.

Поэтому было решено измерить характеристики преобразователя для таких случаев.

Постановка задачи

2023-11-13

Основные научные задачи исследования



Итого получаются следующие научные задачи. Это разработка двух методов — определение геометрических свойств и оптимизация кинематической схемы, методики по исследованию датчика силы, а также алгоритма определения физико-механических свойств опорной поверхности.

Положения, выносимые на защиту

1. **Метод построения карты местности**, состоящий в определении геометрической формы поверхности с помощью тактильного ощущения, который позволяет решать задачу определения плана и профиля поверхности в условиях отсутствия видимости и при движении по поверхности, находящейся под водой.
2. **Метод определения физико-механических свойств опорной поверхности** на основе **тактильного ощущения**, позволяющий различать материалы с упругими, жёсткими, пластичными свойствами.
3. **Критерий оптимизации** кинематической схемы многоногих шагающих роботов с цикловыми одностепенными двигателями, включающий в себя показатели проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации. Определение на его основе габаритов и количества движителей шагающего робота.
4. **Зависимость** погрешности датчика силы на основе полимерного материала от площади пятна контакта относительно размеров датчика, применяемого для тактильного ощущения мобильного робота. **Методика** роботизированного исследования датчика силы.

Олег Буличев

Постановка задачи

10

Постановка задачи

2023-11-13

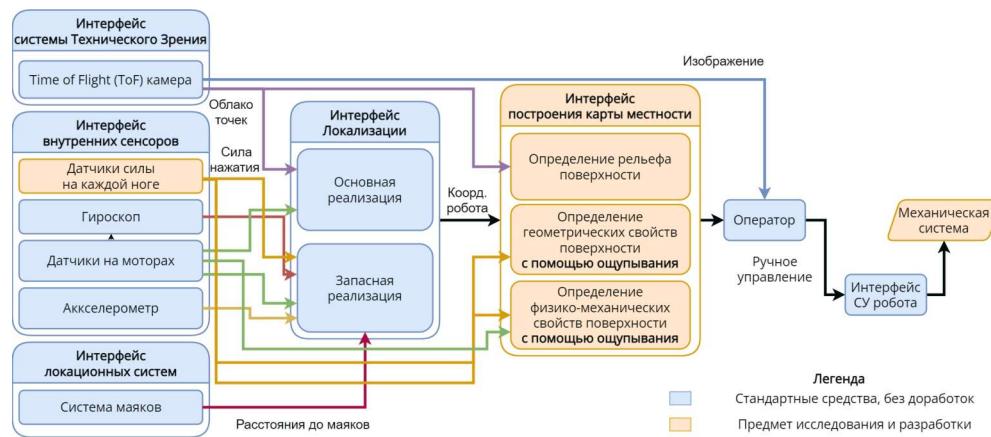
Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся 2 метода, зависимость и критерий оптимизации кинематической схемы

Положения, выносимые на защиту

1. Метод построения карты местности, состоящий в определении геометрической формы поверхности с помощью тактильного ощущения, который позволяет решать задачу определения плана и профиля поверхности в условиях отсутствия видимости и при движении по поверхности, находящейся под водой.
2. Метод определения физико-механических свойств опорной поверхности на основе тактильного ощущения, позволяющий различать материалы с упругими, жёсткими, пластичными свойствами.
3. Критерий оптимизации кинематической схемы многоногих шагающих роботов с цикловыми одностепенными двигателями, включающий в себя показатели проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации. Определение на его основе габаритов и количества движителей шагающего робота.
4. Зависимость погрешности датчика силы на основе полимерного материала от площади пятна контакта относительно размеров датчика, применяемого для тактильного ощущения мобильного робота. Методика роботизированного исследования датчика силы.

Структура



Олег Буличев

Обзор существующих решений

11

Обзор существующих решений

2023-11-13

Структура



Робот — сложная система с множеством подсистем и большую часть подсистем я сам лично не делал. На слайде *тык* представлена структура проекта, где оранжевым цветом представлено то, что было разработано мной и где есть научная новизна, а синим — стандартные решения, которые были интегрированы с минимальными наработками.

Так как у целью было построение карты, то робот управлялся в ручном режиме, задача управления была решена максимально тривиально.

Если кратко, то из датчиков на роботе были установлены IMU, энкодеры и датчики силы. Задача локализации решается с помощью системы радио маяков или Aruco маркеров в лаборатории, а из системы технического зрения — камера, которая также дает и облако точек.

Обзор источников

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

Олег Буличев

Обзор существующих решений

12

Определение количества ног

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

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

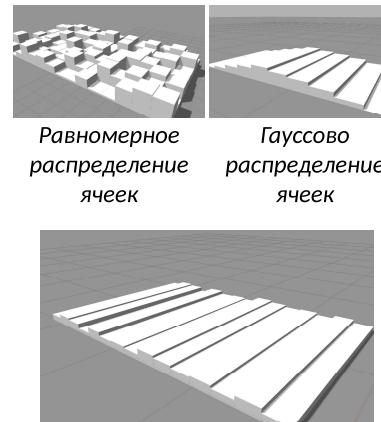
x — Параметры: количество ног, сдвиг фазы между соседними ногами

Метод решения: Генетический алгоритм: Open AI-EA

Алгоритм: генерируется множество особей, а также семейство территорий с одинаковой сложностью. За фиксированное время, с постоянной угловой скоростью на моторах, каждый робот проходит это семейство территорий и записываются данные.

Предположения: 1) есть только сухое трение между ногами и поверхностью. 2) Созданные поверхности с помощью одной функции и параметров имеют одинаковую сложность.

Утверждение: Количество ног имеет прямую зависимость с длиной корпуса робота.



Олег Буличев

"3" Оптимизация кинематической схемы

13

Обзор существующих решений

2023-11-13

Обзор источников

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

При разработке своих подсистем я базировался на работах следующих ученых со всего мира.

При решении задачи оптимизации количества ног — на работы Петриашвили, Стефано Нолфи, Feng и других.

Шагающими цикловыми роботами занимается половина это докторской совета, поэтому я хочу выделить Эдварда Мура из Канады и Wei Hsi из Китая.

В основном материал Велостат исследовал Игорь Вехец, но также были и другие ученые к примеру Роберт Шроер.

Для определения геометрических свойств поверхности, мне пришлось изучить работы ученых из Германии, США, России и Британии.

Мой алгоритм по определению физико-механических свойств в первую очередь базировался на работе пост дока Алисы Ву Стенфордского университета.

"3" Оптимизация кинематической схемы

2023-11-13

Определение количества ног



Так как детализация покрытия опорной поверхности зависит от количества ног, то я решил начать с разработки робота. Первым его этапом было определение количества ног.

Было решено оценивать проходимость с помощью экспериментов, где робот с конкретным количеством ног проходит по семейству территорий с одинаковой сложностью за фиксированное время. На моторы подается постоянная угловая скорость.

Семейства территорий с одинаковой сложностью - семейства, которые были сгенерированы с помощью одинаковых параметров. *тык* К примеру с помощью нормального распределения, где одинаковый параметр дисперсии.

Также было сделано предположение, что количество ног не сильно влияет на проходимость на гибридных поверхностях, такие как мох, поэтому рассматривается только сухое трение между ногами и поверхностью.

Задача решалась с использованием генетического алгоритма Open AI-EA.

Описание механической системы

$$M\ddot{y} = \ddot{g} \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}, \quad M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\ddot{u}_i^T = [\ddot{v}_i^T \quad \ddot{\omega}_i^T] \quad (3)$$

$$\ddot{g}^T = [\dots \ddot{F}_i^T, (\ddot{\tau}_i - \ddot{\omega}_i \times I_i \ddot{\omega}_i)^T \dots] \quad (4)$$

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

"3" Оптимизация кинематической схемы

2023-11-13

Описание механической системы

Описание механической системы

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}, \quad M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\ddot{g} = \begin{bmatrix} \ddot{F}_1^T & (\ddot{\tau}_1 - \ddot{\omega}_1 \times I_1 \ddot{\omega}_1)^T & \cdots \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

где M — матрица массово-инерционных характеристик; m_i — масса тела; I_i — тензор инерции; \ddot{u}_i — вектор обобщённых скоростей; \ddot{F}_i — вектор обобщённых сил; $\ddot{\tau}_i$ — вектор обобщённых моментов; $\ddot{\omega}_i$ — вектор угловой скорости; \ddot{v}_i , $\ddot{\omega}_i$ — вектора линейной и угловой скорости.

Для симуляции работы робота необходимо описать его математическую модель. Рассматривалась механическая система из абсолютно твердых тел, состоящая из корпуса робота и некоторого количества ног. Так как количество ног меняется, то показаны обобщённые формулы.

Я расписал дифференциальные уравнения механической системы в известной форме *тык*. В английской литературе данный метод называется методом Ньютона Эйлера.

Олег Буличев

"3" Оптимизация кинематической схемы

14

Наложенные связи

Тела соединены цилиндрическими шарнирами:

$$\phi(q_{j_1}, \dots, q_{j_k}, t) \geq 0 \quad (5)$$

$$\ddot{q}_i^T = [\ddot{x}_i^T \quad \ddot{Q}_i^T] \quad (6)$$

$$\dot{\ddot{q}}_i = \begin{bmatrix} E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & G(\ddot{q}_i) \end{bmatrix} \ddot{u}_i \quad (7)$$

$$\ddot{g}_i = \tau_i^T \ddot{z}_{i-1} - k_i \ddot{q}_i \quad (8)$$

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

"3" Оптимизация кинематической схемы

2023-11-13

Наложенные связи

Наложенные связи

$$\ddot{q}_i^T = [\ddot{x}_i^T \quad \ddot{Q}_i^T] \quad (6)$$

$$\dot{\ddot{q}}_i = \begin{bmatrix} \ddot{x}_i^T & \ddot{Q}_i^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\ddot{g}_i = \tau_i^T \ddot{z}_{i-1} - k_i \ddot{q}_i \quad (8)$$

где \ddot{q}_i — функция связи; \ddot{x}_i — координаты центра масс тела; \ddot{Q}_i — кватернион, описывающий ориентацию тела в пространстве; k — коэффициент, на который влияет от выбранной системы координат; \ddot{z}_i — вектор угловых координат тела.

Эти дифференциальные уравнения дополнены связями. Тела соединены цилиндрическими шарнирами. Ориентация описана кватернионами, так как робот может переворачиваться и может возникнуть складывание рамок, если будем использовать углы Эйлера.

Хочется отметить, что в шарнире учитывается коэффициент вязкого трения.

Олег Буличев

"3" Оптимизация кинематической схемы

15

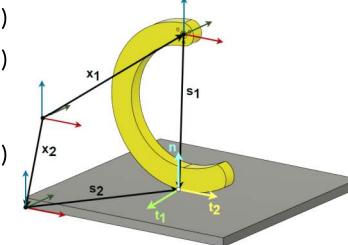
Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота

$$\phi_u(\vec{q}) \geq 0 \quad (9)$$

$$\phi_u(\vec{q}) = (\vec{x}_1 + \vec{s}_1 - \vec{x}_2 - \vec{s}_2) \cdot \vec{n} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_u(\vec{q}) \approx \begin{bmatrix} \vec{n}^T & (\vec{s}_1 \times \vec{n})^T & -\vec{n}^T & (-\vec{s}_2 \times \vec{n})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{\omega}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{\omega}_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

где, $\phi_u(\vec{q})$ — функция связи; μ — 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 $t_{1,2}$.



$$\begin{cases} \mu f_n \geq \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \\ \|\vec{v}_t\| (\mu f_n - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}) = 0 \\ \vec{f}_t = -\frac{\vec{v}_t}{\|\vec{v}_t\|} \end{cases} \quad (12)$$

Олег Буличев

"3" Оптимизация кинематической схемы

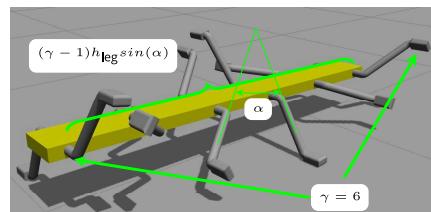
16

Целевая функция

$$F \rightarrow \max = \beta (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) + (1 - \beta) \delta^{\omega_1} (L)^{\omega_2} \quad (13)$$

$$L = \frac{1}{(\gamma - 1) h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \quad (14)$$

Где β — адаптивный параметр,
 $\omega_{1,2} \in [0..1]$ — весовые коэффициенты,
 δ — пройденный путь,
 L — упрощенная длина робота



Геометрическое представление особы

Олег Буличев

"3" Оптимизация кинематической схемы

17

"3" Оптимизация кинематической схемы

2023-11-13

Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота

$$\begin{aligned} & \text{Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота} \\ & \frac{d}{dt} \phi_u(\vec{q}) \approx \begin{bmatrix} \vec{n}^T & (\vec{s}_1 \times \vec{n})^T & -\vec{n}^T & (-\vec{s}_2 \times \vec{n})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{\omega}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{\omega}_2 \end{bmatrix} \quad (11) \\ & \text{где } \phi_u(\vec{q}) = \text{функция связи} \quad \mu = \text{коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью радиус-векторами } \vec{x}_{1,2} \text{ и ортами координатных осей } \vec{t}_{1,2}. \text{ И показаны на рисунке; } f_{1,2} = \text{значения сил трения вдоль осей } t_{1,2}. \end{aligned}$$

Для шагающих роботов критично правильно описать взаимодействие с опорной поверхностью. Используется модель сухого трения, описанная конусом трения.

На рисунке *тык* предоставлено обозначение радиус векторов, для решения задачи направления сил реакции опоры и трения в общем виде.

$$\begin{aligned} & \text{Целевая функция} \\ & F \rightarrow \max = \beta (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) + (1 - \beta) \delta^{\omega_1} (L)^{\omega_2} \quad (13) \\ & \text{где: } \beta = \text{адаптивный параметр}, \quad \omega_1, \omega_2 = \text{весовые коэффициенты}, \quad \delta = \text{пройденный путь}, \quad L = \text{упрощенная длина робота} \\ & \text{геометрическое представление особы} \end{aligned}$$

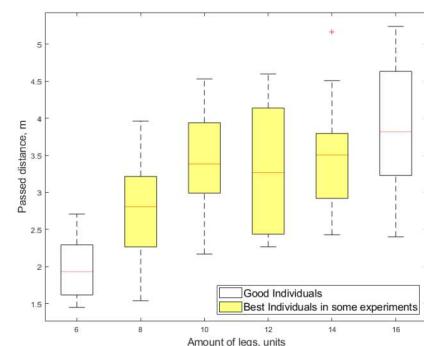
Целевая функция выглядит следующим образом. В формуле делта это пройденный путь, а L — упрощенная длина робота, без лишних констант. Омеги — весовые коэффициенты, их можно воспринимать следующим образом. Сумма коэффициентов равна 1. Настраивая данные коэффициенты можно показать, что в конкретной оптимизации важнее: проходимость или размеры робота.

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

Закономерность

Лучшие роботы в экспериментах начинались с 10 до 14 ног для различных значений ω .

Это объясняется критерием статического равновесия. В таком случае минимум 4 ноги всегда касаются поверхности.



Зависимость между кол-вом ног и пройденной дистанцией

Олег Буличев

"3" Оптимизация кинематической схемы

18

"3" Оптимизация кинематической схемы

2023-11-13

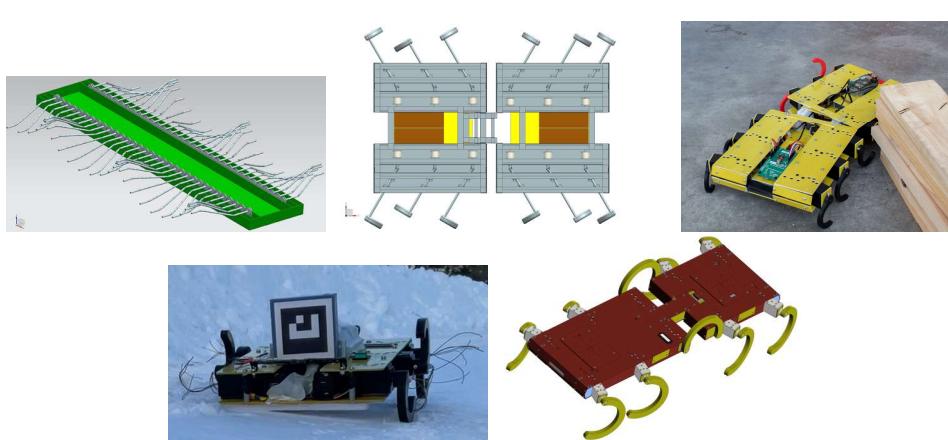
Закономерность

Результатом оптимизации получена зависимость количества ног робота в зависимости от различных весов. пары омега тоже менялись. Этот массив данных собирался и был представлен в виде блочной диаграммы с ограничителями выбросов, где *тык* показаны квартили каждой выборки.

Лучшие результаты были получены, когда ног было от 10, до 14и.



Прототипы робота



"3" Оптимизация кинематической схемы

2023-11-13

Прототипы робота

На основе полученной зависимости, разрабатывались различные прототипы. Можно выделить 5 прототипов, 2 из которых были собраны натурно. Более того, один был апробирован в приближенных к реальным условиям среде, в снегу *тык*.

Были роботы с одним и без сочленений, менялась длина ног.

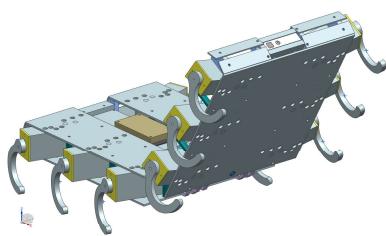
Экспериментально было выяснено, что 10 ног лучше, чем 12, так как при той же длине корпуса, можно сильно увеличить длину ног, что сильно влияет на профильную проходимость.

Олег Буличев

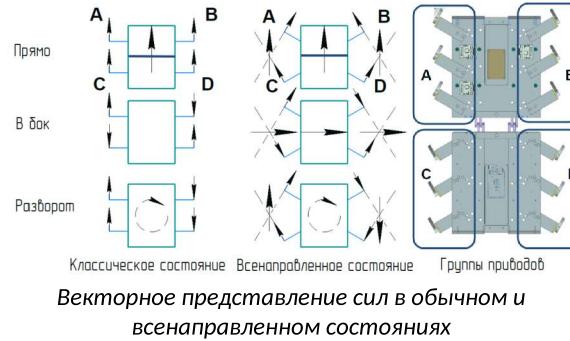
"3" Оптимизация кинематической схемы

19

Особенности конструкции



Одноступенчатый активный сегмент, соединяющий 2 части робота



Векторное представление сил в обычном и всенаправленном состояниях

"3" Оптимизация кинематической схемы

2023-11-13

Особенности конструкции

Особенности конструкции



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

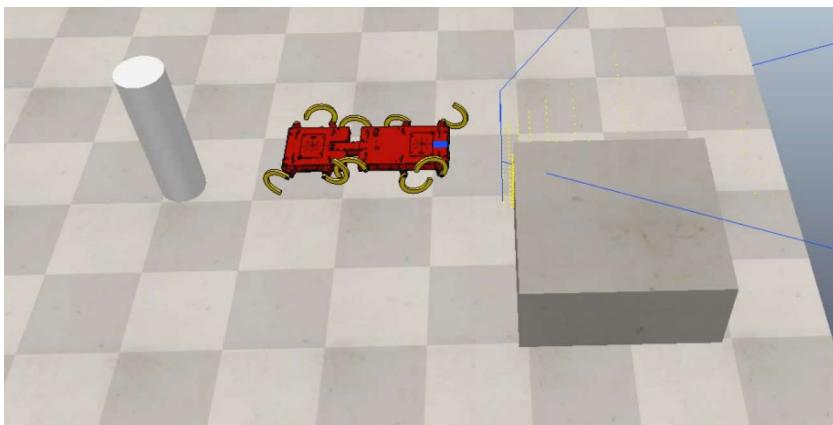
Также, была придуман концепт, позволяющий двигаться такому классу роботов без смены ориентации во все стороны. Я вдохновлялся омниколесом. Справа показано как это работает. Мы разбиваем ноги робота на группы и управляя направлением вращения, можем направлять робота во все стороны *тык*. Что и показано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

Олег Буличев

"3" Оптимизация кинематической схемы

20

Четвертая итерация робота



Олег Буличев

"3" Оптимизация кинематической схемы

21

"3" Оптимизация кинематической схемы

2023-11-13

Четвертая итерация робота

Четвертая итерация робота



На видео представлено прохождение препятствий последним прототипом робота в симуляторе CoppeliaSim

Верификация преобразователя силы

Измерить характеристики материала для случаев, когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

Алгоритм: 2 эксперимента:

1. Статический — прикладывается статический груз с размером в сенсор для калибровки.

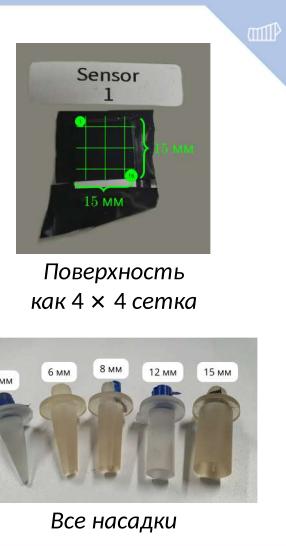
2. Динамический — чувствительная область представляется в виде сетки 4×4 . Происходит касание каждой области с одинаковым давлением, но разной площадью контакта.

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

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

Допустимая ошибка: 10%

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



Олег Буличев

"4" Верификация преобразователя силы

22

Статический эксперимент

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau_{res}}})](1 - e^{-\frac{A}{p}}) \quad (15)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p} \quad (16)$$

$$\tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (17)$$

Где V_0 – начальное напряжение,

p – приложенное давление,

A_i , B_i , τ_{res} , k_i искомые параметры,

t – текущее время, t_0 – время начала нажатия.

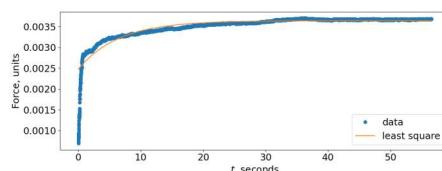
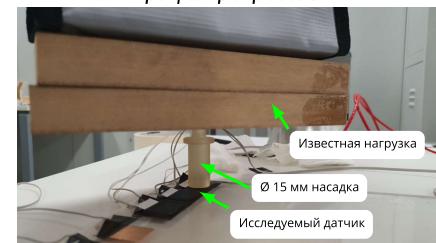


График регрессии



Экспериментальная установка

Олег Буличев

"4" Верификация преобразователя силы

23

"4" Верификация преобразователя силы

Верификация преобразователя силы

2023-11-13



Решив задачу номер 3, то есть имея конструкцию ноги, возможно разработать сенсор, подходящий для конкретной области применения. Как было сказано ранее, необходимо измерить характеристики материала для случаев когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

Для этого было разработано 2 эксперимента. Первый, статический, где на объект прикладывался статический груз с размером сенсора, нужен для калибровки. Таким образом я считал, что все сенсоры работают единообразно.

Второй, динамический, основной. Для этого сенсор представлялся в виде сетки 4×4 , на картинке *тык*. С помощью эталонного датчика силы, на который была прикреплена насадка *тык*, обеспечивающая конкретную площадь контакта, проводилась касание каждой области сетки.

После эксперимента, нормализовались значения между эталонным датчиком (его значения принимались за 1), и откалиброванным исследуемым датчиком. Смотрелась разница.

Допустимой ошибкой я посчитал 10 процентов, такая ошибка принята в физических экспериментах.

"4" Верификация преобразователя силы

Статический эксперимент

2023-11-13

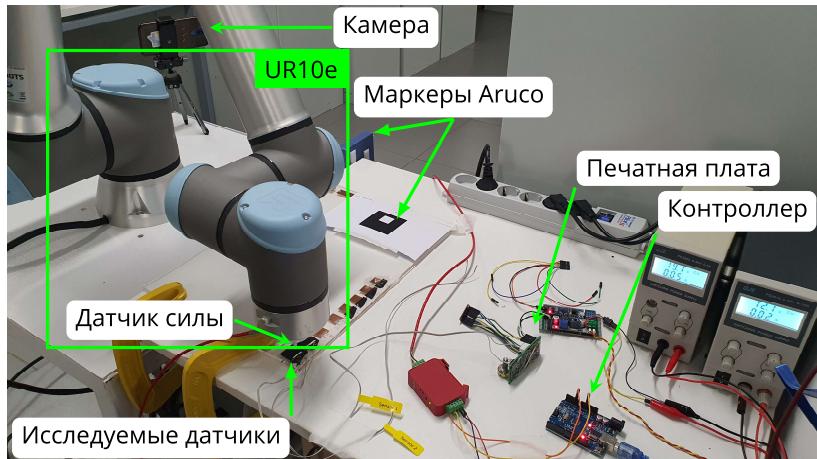


Статический эксперимент. Для калибровки использовался робастный метод наименьших квадратов, экспериментальная установка справа *тык*, формула для регрессии — слева *тык*. Она основана на знании того, что у нас вязко-эластичный материал, обладающий гистерезисом. Поэтому необходимо учитывать время контакта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

Экспериментальная установка показана ниже *тык*.

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

Динамический эксперимент: Установка



Олег Буличев

"4" Верификация преобразователя силы

24

2023-11-13
"4" Верификация преобразователя силы

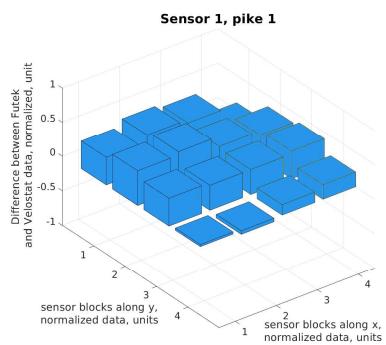
Динамический эксперимент: Установка



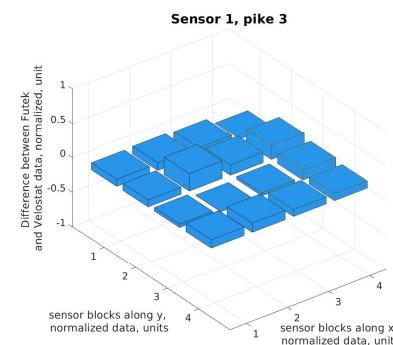
Так как динамический эксперимент требует многократное повторение действий, где важна точность силы нажатия, то было решено создать автоматизированную робототехническую установку *тык*. Минимизация ошибки по установке манипулятора была реализована с помощью технического зрения.

Манипулятор необходим, так данная установка позволяет проводить не только контактные эксперименты, но также и прокатывать вали по сенсору, что ближе к кинематике движения робота. Более того, мы можем проверять и калибровать сенсор уже установленный на ногу робота.

Результаты динамического эксперимента



2 мм диаметр насадки

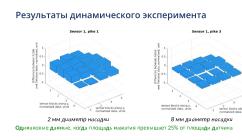


8 мм диаметр насадки

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

2023-11-13
"4" Верификация преобразователя силы

Результаты динамического эксперимента



Результатом изысканий получилось, что можно использовать сенсор, когда площадь нажатия превышает 25% от площади датчика.

На слайде можно увидеть 3д гистограмму *тык*, где представлена нормализованная разница между эталонным датчиком и исследуемым для каждого сегмента датчика. Слева при использовании насадки в 2 мм диаметром, а справа при 8 мм.

Олег Буличев

"4" Верификация преобразователя силы

25

Определение физико-механических свойств

Определить процентное соотношение твердых, упругих и пластичных свойств пройденной поверхности

Метод решения: машинное обучение, Метод Опорных Векторов (SVM)

Алгоритм: Создается установка для обучения. Обучение: робот ходит по различным типам поверхностей фиксированное количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Модель обучается на 80% данных с помощью ядра PUK7. Тестирование: происходит на оставшихся 20%. Используются метрики меткости, точности, полноты и F1-счета.

Входные данные: данные с внутренних датчиков робота

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

Допустимая ошибка: 20% - точность

Предположения: 1) На рисунке.



Эталоны упругой, твердой и пластичной поверхности

Олег Буличев

"2" Определение физико-механических свойств поверхности

26

2023-11-13 └ "2" Определение физико-механических свойств поверхности

└ Определение физико-механических свойств



Решив задачи 3 и 4, то есть имея разработанный сенсор и узел с ногой робота, возможно решать задачу определения физико-механических свойств поверхности. Для получения более точных результатов, было решено решать данную задачу натурно.

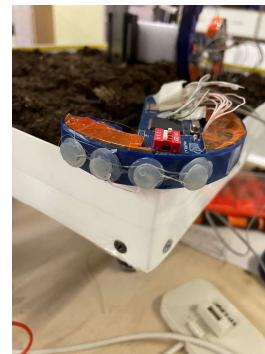
Любой материал можно описать с помощью вязко-упруго-пластичной модели, но их сложно измерить и еще сложнее интерпретировать. Поэтому более целесообразно классифицировать объекты, которые использовались как эталонно упругие, твердые и пластичные *тык*. Аналогом мха — эталона упругих свойств является резина, твердой — камень, а пластичной — земля. Результатом работы алгоритма получается процентное соотношение упругих, твердых и пластичных свойств.

Для решения задачи классификации используется метод опорных векторов (SVM). Данные собирались так. Робот ходит по различным типам поверхностей фиксированное количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Данные с внутренних датчиков, о которых будет разговор далее, собираются. Потом происходит обучение и тестирование. Использовались классические критерии для данного типа задачи: меткость, точность, полнота и F1-счет. Это классические метрики оценки точности обученной модели.

Стенд



Установка



Нога робота с установленными сенсорами



Схематическое распределение сенсоров на ноге

Олег Буличев

"2" Определение физико-механических свойств поверхности

27

2023-11-13 └ "2" Определение физико-механических свойств поверхности

└ Стенд



На экране представлен стенд *тык*, нога робота, на которую установлены датчики силы *тык*, а также способ установки сенсоров на ногу *тык*.

Нужно отметить, что во время испытаний, пришел к выводу, что максимум нужно 5 сенсоров, а не 8, как указано на рисунке справа.

На видео показана работа стенда во время обучения.

Метод опорных векторов

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

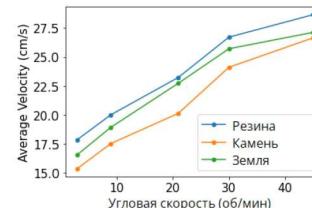
где w — весовой вектор, b — смещение,

x — входной вектор:

(1) Частота движения ног

(2-12) Данные с датчика силы

(13-16) Данные крутящего момента двигателя



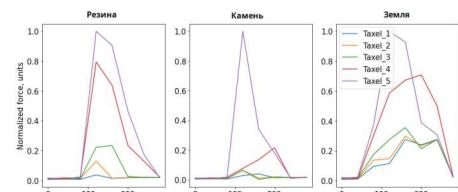
Зависимость угловой скорости от линейного перемещения

(18) Ядро на основе функции Пирсона VII:

$$K(x, y) = (1 + ((||x - y||^2)/\sigma^2)^\omega)^{(-1/\omega)} \quad (19)$$

Где x, y — векторы во входном пространстве,

$||x - y||$ — евклидово расстояние между x и y , σ — масштабный параметр; ω — это параметр формы.



Распределение силы нажатия на каждый сенсор

Олег Буличев

"2" Определение физико-механических свойств поверхности

28

Результаты

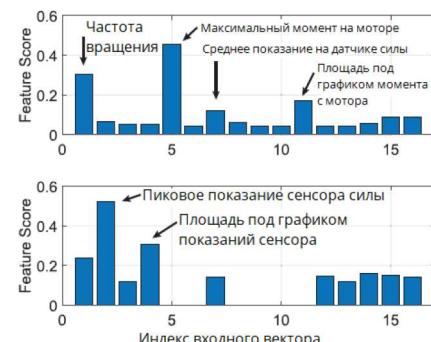
Предсказанный класс			
	Камень	Резина	Земля
Истин. класс	84.0%	2.56%	13.44%
	20.1%	67.8%	12.1%
	1.0%	18.9%	80.1%

Таблица: Результаты обученного классификатора опорных поверхностей

Камень — эталон твердых свойств поверхности;

Резина — эталон упругих свойств;

Земля — эталон пластичных свойств.



Гистограмма влияния входных данных на результат предсказания

Олег Буличев

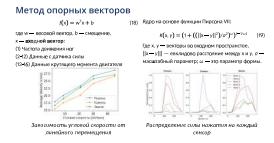
"2" Определение физико-механических свойств поверхности

29

"2" Определение физико-механических свойств поверхности

2023-11-13

Метод опорных векторов



Метод опорных векторов — алгоритм обучения с учителем. описывается следующей формулой *тык*. Главная цель SVM как классификатора — найти уравнение разделяющей гиперплоскости.

Входной вектор включал в себя частоту движения ног *тык*, так как показано на рисунке справа он может критерием определения, так как при одинаковой частоте вращения, линейное перемещение разное.

Информация с датчиков силы *тык*. На графиках одно нажатие ноги на резину, камень и землю. На оси x — время, на оси ординат — сила на каждом конкретном датчике силы. Как видно, разный характер распределения сил в зависимости от материала. также с мотора - основные показания.

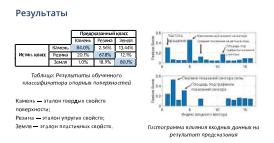
Также снимались данные о моменте с мотора.

Так как у нас задача нелинейная, то использовался kernel trick. Функция ядра обычно преобразует обучающий набор данных таким образом, что нелинейная поверхность принятия решений способна преобразовываться в линейное уравнение в пространствах большего числа измерений. Для этого использовалась функция Пирсона VII.

"2" Определение физико-механических свойств поверхности

2023-11-13

Результаты



На слайде представлены результаты классификации опорных поверхностей *тык*.

Ее можно интерпретировать следующим образом. В камне 84 процента твердых свойств, 2.5 упругих и 13.44 пластичных. В резине — 20 процентов твердых, 67.8 упругих и 12.1 — пластичных.

Не менее важный вопрос, какие данные оказали самый весомый вклад в определении физико-механических свойств. Для этого была построенная гистограмма влияния входных данных *тык*.

Верхний график — когда брались все данные, нижний — без показаний с мотора.

На основе гистограммы можно увидеть, что момент на моторе и частота вращения имеют большее влияние на предсказание, чем данные о силе нажатия.

Определение геометрических свойств

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

Метод решения: Триангуляция Делоне с использованием альфа формы

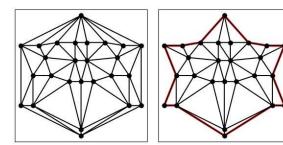
Алгоритм: Решив задачу локализации, получить облако точек следовой дорожки. Очистить шумное облако точек и его усреднить с помощью Voxel Grid. Применить триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек, получив полигональную сетку. Сгенерировать новые точки из полигональной сетки с нужным разрешением.

Входные данные: следовая дорожка, в виде облака точек.

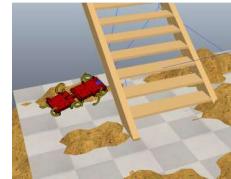
Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек

Допустимая точность: 0.1 м, оценки Cloud2Cloud и Cloud2Mesh

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



Триангуляция Делоне



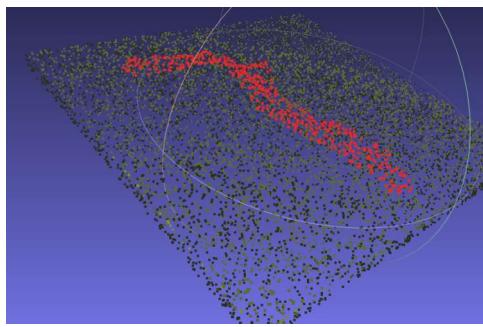
Когда $z \neq f(x, y)$

Олег Буличев

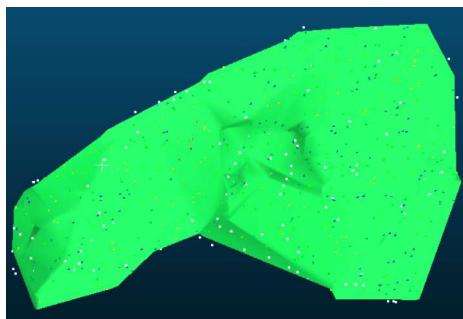
"1" Определение геометрических свойств поверхности

30

Оценки C2C и C2M



Cloud to Cloud: высчитывается абсолютное расстояние до ближайшей соседней точки



Cloud to Mesh: высчитывается расстояние с учетом знания о векторе нормали плоскости



2023-11-13 "1" Определение геометрических свойств поверхности

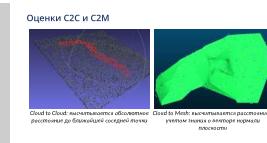
Определение геометрических свойств

Решив задачу 3 и 4, также возможно стало решить и задачу по определению рельефа пройденной поверхности. Необходимо с помощью ощупывания роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

Для упрощения решения задачи я ввел два предположения. Во первых, у нас существуют поверхности, только где координата z уникальна для каждой пары координат x, y . Пример обратного предположения — место под лестницей на картинке *тык*.

Второе предположение — расстояние между ногами робота мало относительно размеров поверхности. Поэтому эта поверхность будет считаться плоскостью. Вокруг этого предположения и строится весь алгоритм.

Решив задачу локализации, о которой будет далее, мы знаем шумное облако точек следовой дорожки. Очистив и усреднив это облако точек, я применяю триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек *тык*, тем самым получая полигональную сетку. Из полигональной сетки генерируется плотное облако точек с нужным разрешением.



2023-11-13 "1" Определение геометрических свойств поверхности

Оценки C2C и C2M

Выбор максимальной допустимой точности является нетривиальной задачей. Так как во первых, ошибка сильно зависит от сложности территории и ее размеров. Более того, возникает вопрос как считать эту ошибку.

Мной было решено, что среднеквадратичная ошибка в 0.1 метр для пещер длиной в километр является приемлемой, так как данный метод нужен для предварительной оценки поверхности.

Критериями оценки были выбраны 2 подхода Cloud2Cloud и Cloud2Mesh. Это стандартные метрики для сравнения облаков точек в программных продуктах.

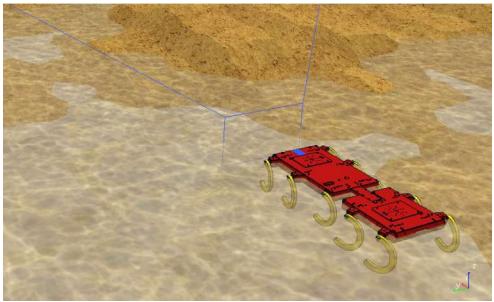
Идея в том, что C2C *тык* использует абсолютное расстояние до ближайшей соседней точки, а C2M *тык* учитывает еще в каком направлении идет отклонение от полигональной сетки.

Олег Буличев

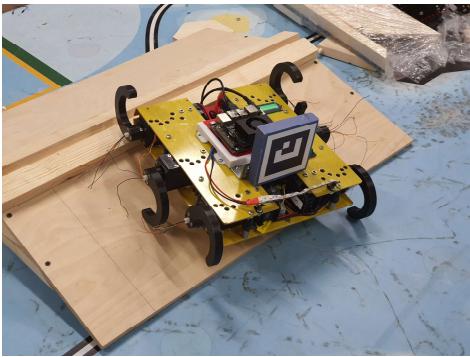
"1" Определение геометрических свойств поверхности

31

Эксперименты



CoppeliaSim симулятор,
4е поколение СтриРус



Натурные испытания,
Зе+ поколение СтриРус

2023-11-13

"1" Определение геометрических свойств поверхности

Эксперименты

Эксперименты



Сборка в симулятор.
4e поколение СтриРус.

Натурные испытания.
Зе+ поколение СтриРус.

Эксперименты проводились как в симуляторе, где использовался последний прототип робота, а также натурно.

Эксперимент выглядел следующим образом. Генерировалось семейство поверхностей и робот ходил с помощью ручного управления определенное время. Полученное облако точек сравнивалось либо с сгенерированным, либо с измеренным в реальной жизни.

Олег Буличев

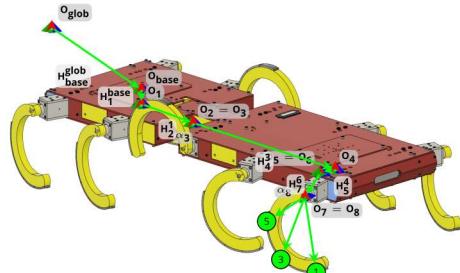
"1" Определение геометрических свойств поверхности

32

Задача локализации

$$H_{\text{leg}}^{\text{glob}} = H(x_{\text{glob}}, y_{\text{glob}}, z_{\text{glob}}, \alpha_{\text{glob}}, \beta_{\text{glob}}, \gamma_{\text{glob}}) T_z(l_1) T_x(l_2) R_y(\alpha_3) T_x(l_4) T_y(l_5) T_z(-15^\circ) T_y(l_7) R_y(\alpha_8) \quad (20)$$

Где $H = \begin{bmatrix} R & T \\ 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ 0 & 1 \\ 1 \times 3 & 1 \times 1 \end{bmatrix}$, R_i — матрица поворота, относительно одной из осей, T_i — вектор сдвига.



Пример решения задачи
локализации с помощью
Aruco маркера

2023-11-13

"1" Определение геометрических свойств поверхности

Задача локализации

Задача локализации



Для решения задачи локализации я решил задачу прямой кинематики для робота *тык*. Таким образом, зная каким сенсором коснулся робот и на какой угол была повернута нога, можно вычислить координату касания опорной поверхности в абсолютной системе координат.

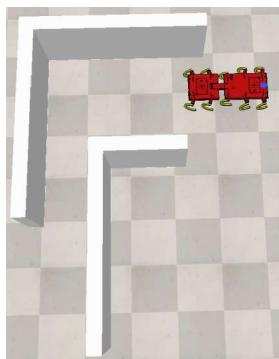
Матрица трансформации от начала абс. системы координат до робота решалась либо с помощью средств симуляции или с помощью маркеров Aruco, что представлено на картинке *тык*.

Олег Буличев

"1" Определение геометрических свойств поверхности

33

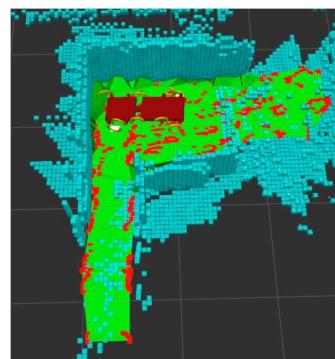
Триангуляция Делоне для вогнутых оболочек



Пример поверхности



Выпуклая оболочка



Вогнутая оболочка

2023-11-13 "1" Определение геометрических свойств поверхности

Триангуляция Делоне для вогнутых оболочек



Хочется отметить важность использования триангуляции делоне для вогнутых оболочек с помощью данного примера.

Слева картинка поверхности, по которой должно пройти робот *тык*. Отсюда он начал свой путь, здесь он закончил *тык*.

Если мы будем использовать классическую триангуляцию, то получится результат как на рисунке 2 *тык*. Красным отмечена следовая дорожка. Результатом является то, что там где невозможно пройти, карта была все равно построено, что не корректно.

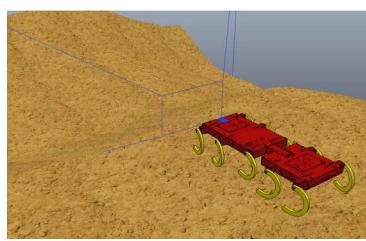
Если же использовать модификацию алгоритма, то будет адекватный результат, как на рисунке справа *тык*

Олег Буличев

"1" Определение геометрических свойств поверхности

34

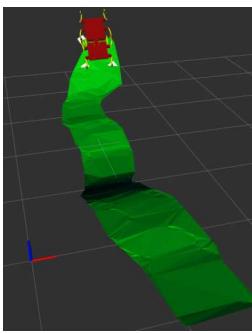
Симуляция: Пример опорной поверхности



Начало маршрута



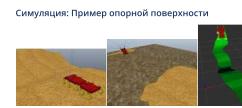
Конец маршрута



Созданная сетка

2023-11-13 "1" Определение геометрических свойств поверхности

Симуляция: Пример опорной поверхности



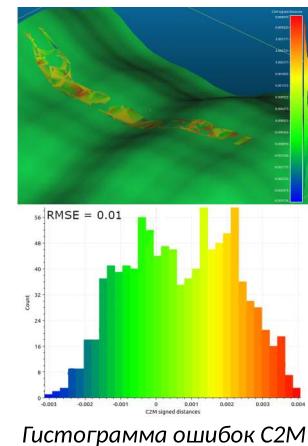
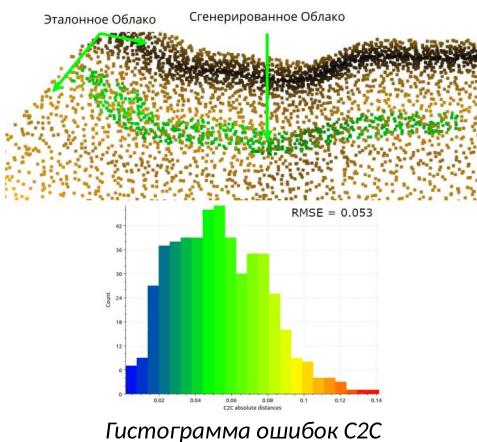
На слайде представлен один из экспериментов. На рисунках показана поверхность по которой нужно пройти, начало и конец маршрута, а также полученная полигональная сетка *тык, тык и тык*

Олег Буличев

"1" Определение геометрических свойств поверхности

35

Симуляция: Результат C2C и C2M критериев



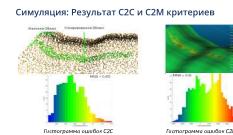
Олег Буличев

"1" Определение геометрических свойств поверхности

36

2023-11-13
"1" Определение геометрических свойств поверхности

Симуляция: Результат C2C и C2M критериев

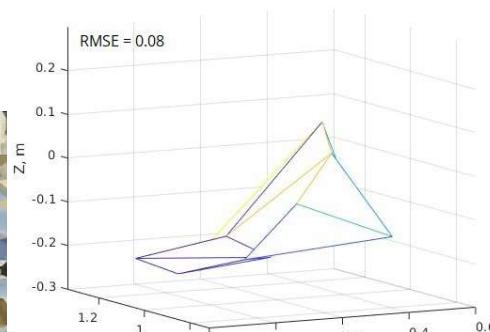


Результатами данного эксперимента получились облака точек и полигональная сетка, которые были сравнены с эталонными значениями.

На рисунках представлены гистограммы ошибок двух метрик *тык и тык*, а также наложенные сетки и облака точек *тык и тык*.

Среднеквадратичная ошибка для C2C равна 0.053 метра, а для C2M — 0.01 м

Натурные испытания: Пример и результат



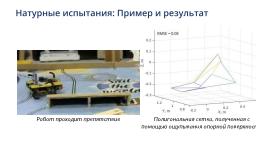
Олег Буличев

"1" Определение геометрических свойств поверхности

37

2023-11-13
"1" Определение геометрических свойств поверхности

Натурные испытания: Пример и результат



Подобный эксперимент проводился и натурно Слева видео прохождения роботом препятствия *тык*, а также полученная полигональная сетка *тык*. Среднеквадратичная ошибка вышла 0.08 м, что также соответствует допустимой точности.

Результаты

Научные задачи (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.

Экспериментальные разработки

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**.

2023-11-13
Выводы

Результаты

Научные задачи (научная новизна)	Экспериментальные разработки
1. Метод подбора количества ног для шагающих цикловых движителей.	1. Спроектированы и собраны 2 прототипа с Шагающим цикловым движителем с одной степенью свободы в ноге.
2. Методика характеризации датчика, когда площадь касания нагрузки меньше, чем размеры датчика.	2. Разработана и создана экспериментальная установка для автоматизированного исследования датчика силы.
3. Алгоритмы калибровки и определения физических свойств поверхности.	3. Разработана и создана экспериментальная установка для определения типа поверхности.
4. Метод определения геометрических свойств местности.	4. Метод определения геометрических свойств местности.

Подведя итог, было решено 4 научных задачи. Было разработано 2 метода — оптимизация кинематической схемы робота, а также определения геометрических свойств опорной поверхности. Это задачи 1 и 3.

Был разработана методика для определения характеристик преобразователя силы на основе Велостат, что являлось задачей 4.

А также разработан алгоритм калибровки и определения физико-механических свойств поверхности. Задача 2 и подзадача 4й задачи.

Для решения этих научных задач были собраны 2 прототипа робота, созданы 2 экспериментальных установки.

Олег Буличев

Выводы

38

Публикации

- Количество публикаций
 - 2 — журналы, рекомендованных ВАК
 - 3 — статьи, индексируемые в Scopus
 - 5 — РИНЦ
- 8 — зарегистрированных программ для ЭВМ
- 3 — Работа сделана при грантовой поддержке ФСИ, ЦНТИ, РФФИ.

2023-11-13
Выводы

Публикации

Публикации
• Количество публикаций
- 2 — журналы, рекомендованных ВАК
- 3 — статьи, индексируемые в Scopus
- 5 — РИНЦ
• 8 — зарегистрированных программ для ЭВМ
• 3 — Работа сделана при грантовой поддержке ФСИ, ЦНТИ, РФФИ

Мной были опубликованы работы в 2ух ваковских журналах, 3 статьи в Скопус и еще 5 работ в РИНЦ.

На мое имя зарегистрированы 8 программ для ЭВМ.

Работа делалась при поддержке Зех фондов ФСИ, ЦНТИ и РФФИ

Олег Буличев

Выводы

39

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.

Выводы

2023-11-13

Соответствие паспорту специальности

Моя работа соответствует пунктам 1, 7 и 9 паспорта специальности

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.
2. Методы экспериментального исследования, создания прототипов и экспериментальных стендов и модульных платформ для разработки роботов, робототехнических и мехатронных систем.
3. Методы расчета и проектирования мехатронных сервоприводов, исполнительных, сенсорных и управляющих компонентов роботов, робототехнических и мехатронных систем.

Олег Буличев

Выводы

40

Спасибо за внимание!