

Разработка мобильного четырехногого робота

Коломейцев А.А.

НИУ "МЭИ"

19 мая 2020 г.

АННОТАЦИЯ

В рамках работы рассматривается разработка шагающего четырехногого робота, с упором на проблему разработки конечностей, подбора электроприводов и их управления. Сравнены разные типы электроприводов, пригодных для создания конечностей для шагающих роботов. Рассчитаны соответствующие нагрузки, рассмотрены разные типы управления в зависимости от требований к качеству перемещения робота в режиме ходьбы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

АННОТАЦИЯ	1
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ШАГАЮЩИЕ РОБОТЫ	6
1.1 Задачи работы	6
1.2 Актуальность работы	6
1.3 Анализ	7
1.3.1 Рассчёт худшего статического случая	7
1.3.2 Подбор электроприводов	8
ГЛАВА 2 МЕХАНИЧЕСКАЯ КОНСТРУКЦИЯ	10
2.1 Проектирование ног	10
2.2 Проектирование корпуса	10
2.3 Подбор комплектующих	10
2.3.1 Статические детали	10
2.3.2 Силовая электроника	10
2.3.3 Логическая электроника	10
ГЛАВА 3 КИНЕМАТИКА КОНЕЧНОСТЕЙ РОБОТА	11
3.1 Общее положение	11
3.2 Общее решение четырёхзвенника	11
3.3 Прямая кинематика	11
3.4 Обратная кинематика	11
3.5 Оптимизация численного решения обратной задачи	11
ГЛАВА 4 ОРИЕНТАЦИЯ ТЕЛА РОБОТА	12
4.1 Кватернионы	12
4.2 Произвольные повороты тела в пространстве	12
4.3 Связь ориентации тела с конфигурацией ног	12

ГЛАВА 5	МОДЕЛИРОВАНИЕ ХОДЬБЫ	13
5.1	Траектории движения ног	13
5.2	Проблема выбора оптимальной траектории	13
ГЛАВА 6	ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА	14
6.1	Структура управления	14
6.2	Протокол передачи данных	14
6.3	Кинематические расчеты	14
6.4	Тестирование кода	14
6.5	Абстракция над вычислениями	14
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК		15
ПРИЛОЖЕНИЕ А: КОМПЛЕКТУЮЩИЕ		16
ПРИЛОЖЕНИЕ Б: КОД КЛАССА		18

ВВЕДЕНИЕ

Шагающие роботы - это класс роботов, имитирующих движения людей и животных. Миллионы лет эволюции показывают, что передвижение при помощи ног это наиболее эффективный способ быстро приспосабливаться к плохим, неровным поверхностям. Люди пытались описывать ходьбу шагающими механизмами, математическими формулами. На сегодняшний день понятно, что ни один из этих двух способов к результатам, применимым на практике, не приведет. От шагающей системы требуется приспособиться к тем условиям, в которых она раньше не была.

Рынок шагающих роботов

Классифицировать шагающие машины можно не только по количеству ног. Некоторые роботы комплектуются также и колесами, для увеличения скорости передвижения по ровным поверхностям.

На текущий момент можно найти огромное количество шагающих роботов. Гексаподы, робо-пауки и т.д. Но среди сотен моделей можно выделить всего несколько роботов, ходьба которых максимально приближена к животной.

Из четырёхногих роботов лучшие результаты показывают:

- Роботы Spot и Spot-Mini от компании Boston Dynamics
- Робот Mini-Cheetah от студентов MIT
- Робот ANYmal от студентов Цюрихского университета
- Робот HyQReal от ИИТ (Итальянского технологического института)
- Роботы LaikaGo и AlienGo от компании Unitree Robotics

Среди двуногих можно выделить такие проекты, как:

- Робот Digit от компаний Agility Robotics и Ford
- Робот Cassie от компании Agility Robotics
- Робот Atlas от компании Boston Dynamics

Всех выше перечисленных роботов объединяет одно важное свойство - они обучены ходить. Алгоритм их ходьбы не описан статическими константами в коде, он создан при помощи методов машинного обучения. Благодаря

этому все они показывают высокую степень мобильности и адаптивности к окружающей среде. Их перемещения похожи на то, как могли бы перемещаться животные со схожим механическим строением тела.

Будущее шагающих роботов именно за машинным обучением, а если быть точнее, за глубоким обучением с подкреплением (reinforcement learning). Модели, обученные в симуляции показывают более высокий КПД при перемещении и меньшее потребление тока, чем модели ходьбы, описанные человеком вручную [1].

ГЛАВА 1

ШАГАЮЩИЕ РОБОТЫ

1.1 Задачи работы

В рамках работы рассматривается разработка шагающего четырехногого робота, с упором на проблему разработки конечностей, подбора электроприводов и их управления. Сравняться будут два типа электроприводов: заводские микро-сервоприводы с редуктором и бесколлекторные синхронные двигатели (BLDC).

Требуется:

- Рассчитать худший (по нагрузке) статический случай для конечностей 4-х ногого робота.
- Подобрать два электропривода удовлетворяющих по крутящему моменту. Для двух типов электроприводов разработать модель конечностей.
- Собрать физическую модель конечностей двух типов.
- Сравнить управляемость и механические характеристики конечностей двух типов.
- Применить самую удачную конструкцию конечностей при сборке робота.
- Запрограммировать управление робота.

1.2 Актуальность работы

Задача разработки конечностей для шагающих роботов настолько же важная, как и задача навигации роботов. Сегодня она актуальна, как никогда ранее. Всё в большей степени людей стараются заменять шагающими роботами для работ вроде общего тех. осмотра помещений, исследования местности вдали от дорог и цивилизации, помощи в устранении последствий катастроф. Открытость методик, исходных кодов и готовых рассчитанных моделей приведет к массовой разработке шагающих роботов не только крупными предприятиями, но и мелкими разработчиками.

1.3 Анализ

Для поставленных ранее задач можно сформировать последовательность действий, которые приведут к их решению.

1.3.1 Рассчёт худшего статического случая

«Худшим» случаем называется такой, при котором одному или нескольким приводам нужно приложить максимальный момент для поворота звена конечности в нужную сторону.

Для того чтобы определить худший случай, нужно вообще определиться с кинематикой конечности. Оптимальной кинематикой можно считать конечность с 3 степенями свободы:

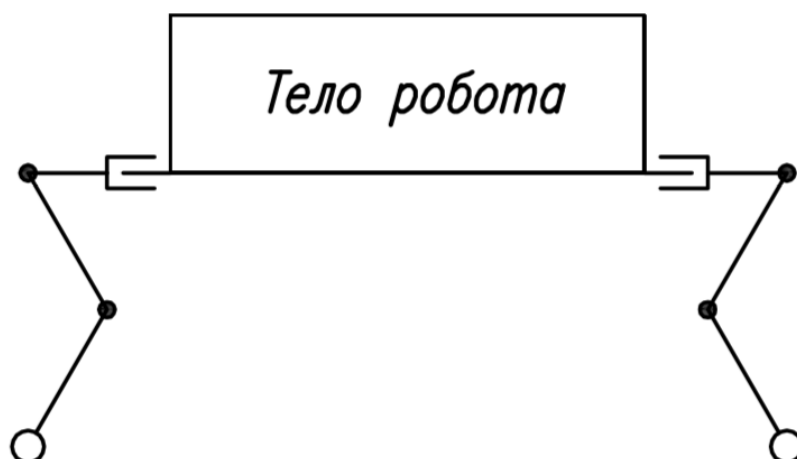


Рисунок 1.1 — Кинематика 4-х ногого робота, вид сбоку

Худшим случаем считается случай, в котором робот лежит на «животе» с выпрямленной конечностью. Чтобы подогнуть под себя конечность, нужно будет преодолеть момент $M_{\text{худш}}$ с учетом массы тела робота m .

При расчёте в первом приближении можно пренебречь трением и весами звеньев. Также можно учесть, что нагрузка, создаваемая массой тела робота будет распределена равномерно по всем 4-м ногам. Это значит что на одну ногу будет приходиться лишь $\frac{1}{4}m$ тела робота.

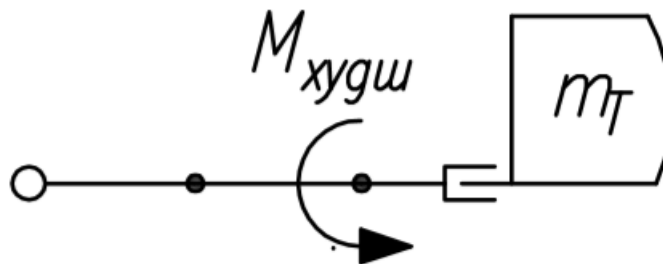


Рисунок 1.2 — Кинематика 4-х ногого робота, вид сбоку (худший случай)

Также, в первом приближении допустим, что тело робота может достигать 2-х килограмм. Большая часть веса придется на каркас конструкции, собранный из пластика. Меньшая часть веса придется на аккумулятор. Еще более маленькая часть придется на проводку и крепежи. Самыми легкими составляющими конструкции окажутся электронные компоненты.

При таком расчете можно считать что каждой ноге надо будет «поднять» около 0.25 кг веса. Тогда в худшем случае, приложенный момент вычислится просто:

$$M_{\text{худш}} = (l_1 + l_2)mg,$$

здесь l_1 и l_2 - длины звеньев.

Мы можем подобрать длины звеньев таким образом, чтобы они обеспечивали достаточную для задач ходьбы рабочую область и одновременно наименьший требуемый момент. Однако сначала нам нужно будет измерить реальные моменты на подобранных электроприводах.

1.3.2 Подбор электроприводов

Исходя из ожидаемых моментов и скоростей были выбраны два вида электроприводов:

- Заводской сервопривод DSSERVO RDS3225
- BLDC-мотор DYS BGM5208-200-12

Использовать паспортные данные двигателей для расчётов нельзя, нужно измерить их реальный момент вращения. Для измерения крутящих мо-

ментов были разработаны стенды, принцип действия которых можно описать следующей схемой:

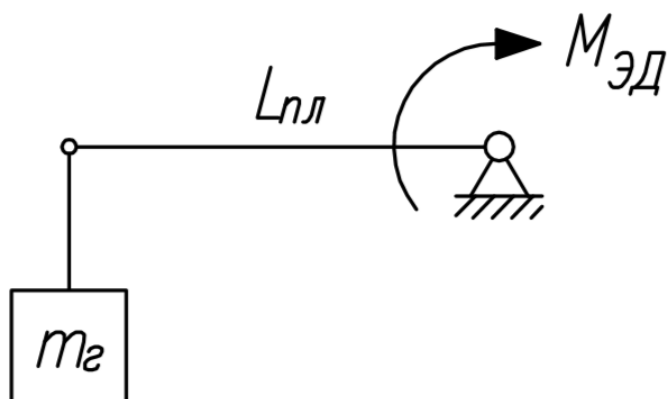


Рисунок 1.3 — Кинематика стенда для измерения крутящего момента

На изображении $m_г$ - масса груза, которая нам известна, и которую мы можем менять. $L_{пл}$ - длина плеча, также известная нам. Из приведенных величин можно легко найти экспериментально значение момента $M_{эд}$.

Чертеж стенда для BLDC двигателя:

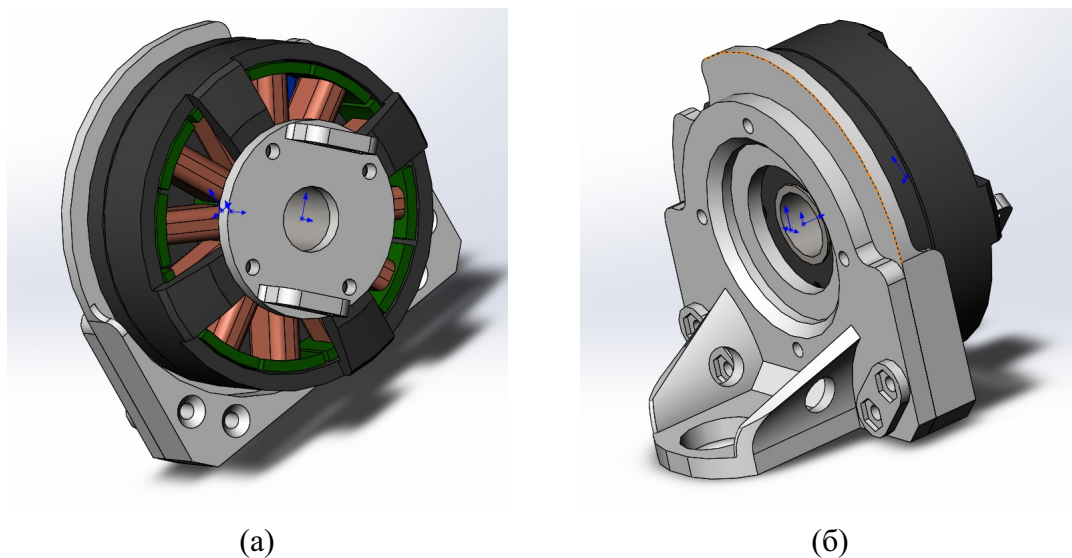


Рисунок 1.4 — (a) Стенд для измерения крутящего момента BLDC мотора, вид спереди; (б) Тот же стенд, вид сзади.

ГЛАВА 2

МЕХАНИЧЕСКАЯ КОНСТРУКЦИЯ

2.1 Проектирование ног

2.2 Проектирование корпуса

2.3 Подбор комплектующих

2.3.1 Статические детали

2.3.2 Силовая электроника

2.3.3 Логическая электроника

ГЛАВА 3

КИНЕМАТИКА КОНЕЧНОСТЕЙ РОБОТА

- 3.1 Общее положение**
- 3.2 Общее решение четырёхзвенника**
- 3.3 Прямая кинематика**
- 3.4 Обратная кинематика**
- 3.5 Оптимизация численного решения обратной задачи**

ГЛАВА 4

ОРИЕНТАЦИЯ ТЕЛА РОБОТА

4.1 Кватернионы

4.2 Произвольные повороты тела в пространстве

4.3 Связь ориентации тела с конфигурацией ног

ГЛАВА 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХОДЬБЫ

5.1 Траектории движения ног

5.2 Проблема выбора оптимальной траектории

ГЛАВА 6

ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА

- 6.1 Структура управления**
- 6.2 Протокол передачи данных**
- 6.3 Кинематические расчеты**
- 6.4 Тестирование кода**
- 6.5 Абстракция над вычислениями**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Learning agile and dynamic motor skills for legged robots / Jemin Hwangbo, Joonho Lee, Alexey Dosovitskiy et al. // Science Robotics. — 2019. — jan. — Vol. 4, no. 26. — P. eaau5872.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

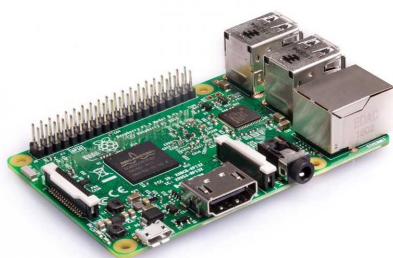
КОМПЛЕКТУЮЩИЕ

Бесколлекторный двигатель BGM5208-200-12



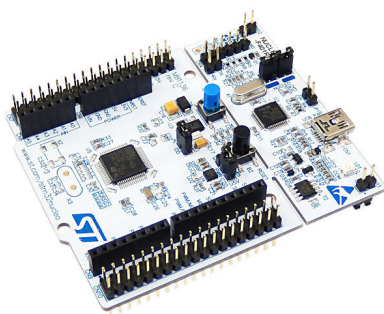
Количество полюсов:	12
Внутренний диаметр:	12мм
Вес:	85г
Размер:	63x24мм
Внутр. сопротивление:	15 Ом

Микрокомпьютер Raspberry Pi 3B



Процессор:	Broadcom BCM2837
Количество ядер:	4
Частота процессора:	1.2ГГц
Разрядность:	64 бита
Оперативная память:	1 ГБ
Интерфейсы:	4xUSB, Ethernet
Напряжение питания:	5В

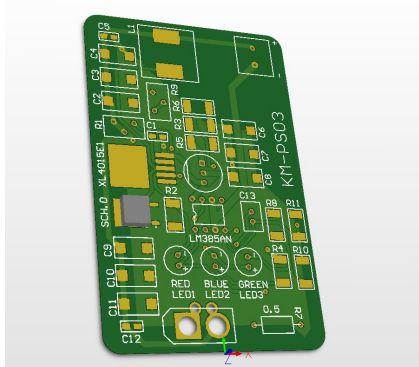
Микроконтроллер STM32 Nucleo F429ZI



Ядро:	Cortex M4
Рабочая частота:	84 МГц
Разрядность:	32 бита
Цифровых пинов:	81 шт.
Кол-во шин:	3xI2C, 4xSPI
Напряжение питания:	5В

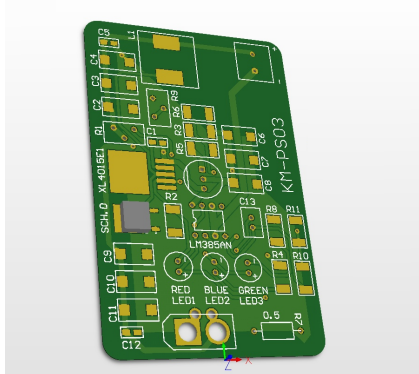
Продолжение приложения А на следующей странице...

Блок питания KMPS05



Ядро: Cortex M4
Рабочая частота: 84 МГц
Разрядность: 32 бита
Цифровых пинов: 81 шт.
Кол-во шин: 3xI2C, 4xSPI, 3xUART
Напряжение питания: 5В

Драйвер бесколлекторных двигателей KMBD01



Ядро: Cortex M4
Рабочая частота: 84 МГц
Разрядность: 32 бита
Цифровых пинов: 81 шт.
Кол-во шин: 3xI2C, 4xSPI, 3xUART
Напряжение питания: 5В

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

КОД КЛАССА

```
14 class TaskPool():
15
16     def __init__(self, serial_wrapper):
17         self.serial_wrapper = serial_wrapper
18         self.running = True
19         self.main_thread = None # thread that processes incoming messages and
20                                 # tasks
21         self.tasks = list() # tasks queue
22         self.subscribers = dict() # (CODE -> LISTENER) where CODE is code of
23                                 # the Task for which the response is expected
24         self.task_lock = Lock()
25         self.inbox = dict() # for messages which nobody waited
26
27     def push_task(self, task):
28         """ Add task to perform and run main thread """
29         self.task_lock.acquire()
30         self.tasks.append(task)
31         # run thread if it is not alive
32         if not self.main_thread or not self.main_thread.isAlive():
33             self.main_thread = Thread(target=self.main_loop, daemon=False) #
34                                     # daemon=True for force terminating
35             self.main_thread.start()
36         self.task_lock.release()
```