

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО»



Отчет по практической работе №4

По дисциплине: Имитационное моделирование
робототехнических систем

На тему: «Моделирование системы с приводом в среде MuJoCo»

Студент:

Мирошниченко А. М.

Группа:

R4134c

Преподаватель:

Ракшин Е.А.

Санкт-Петербург, 2025

Цель работы: К модели, созданной в предыдущем задании добавить приводы. Для тензорного механизма — два привода (q_1 и q_2).

Исходные данные:

Схема моделируемой системы представлена на рисунке 1:

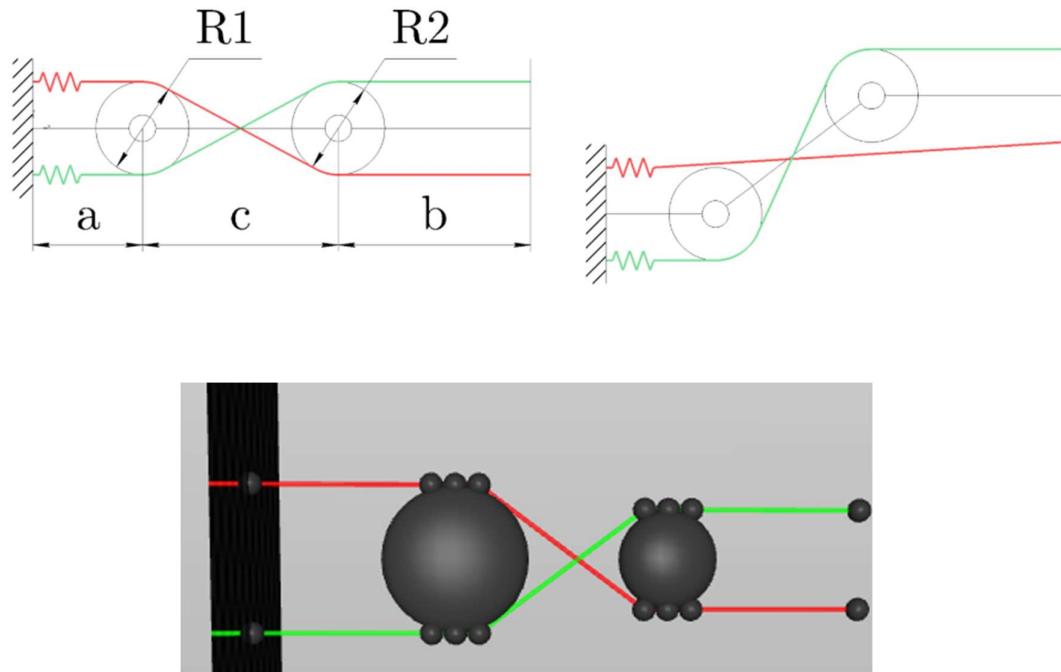


Рисунок 1 – tendon connected 2R planar mechanism

В таблице 1 приведены параметры моделируемой установки.

Таблица 1. Параметры установки.

R1, m	R2, m	a, m	b, m	c, m
0.038	0.023	0.072	0.089	0.03

В таблице 2 приведены параметры синусоидальной волны.

Таблица 2. Параметры синусоидальной волны.

q1			q2		
AMP, deg	FREQ, Hz	BIAS, deg	AMP, deg	FREQ, Hz	BIAS, deg
16.1	3.78	7.1	26.8	2.5	11.3

Ход работы:

На рисунке 2 приведен фрагмент файла Task3.xml, в котором описана структура модели с параметрами, заданными в таблице 1.

```
<mujoco>
    <option timestep="1e-4"/>
    <option gravity="0 0 -9.8"/>

    <asset>
        <texture type="skybox" builtin="gradient" rgb1="1 1 1" rgb2="0.5 0.5 0.5" width="265" height="256"/>
        <texture name="grid" type="2d" builtin="checker" rgb1="0.1 0.1 0.1" rgb2="0.6 0.6 0.6" width="300" height="300"/>
        <material name="grid" texture="grid" texrepeat="10 10" reflectance="0.2"/>
    </asset>
    -----
    <worldbody>

        <camera name="upper view" pos="0 0 1" euler="90 0 0"/>

        <body name = "wall" pos = "0 0 1" euler = "0 90 0">
            <geom type="plane" size="0.2 0.1 0.2" material="grid"/>
            <site name = "beginning1" pos = "0.015 0 0"/>
            <site name = "beginning2" pos = "-0.015 0 0"/>
            <site name = "end1" pos = "0.0115 0 0.03"/>
            <site name = "end2" pos = "-0.0115 0 0.03"/>
        </body>

        <body name = "R1" pos="0.072 0 1">
            <joint name = "jointR1" type="slide" axis = "0 0 1"/>
            <geom type = "ellipsoid" size = "0.038 0.01 0.038"/>
            <site name="R1_site" pos="0 0 0"/>

            <site name = "cornerlup" pos = "0 0 0.038" size = "0.005"/>
            <site name = "cornerlupleft" pos = "-0.01 0 0.038" size = "0.005"/>
            <site name = "cornerlupright" pos = "0.01 0 0.038" size = "0.005"/>

            <site name = "cornerldown" pos = "0 0 -0.038" size = "0.005"/>
            <site name = "cornerldownleft" pos = "-0.01 0 -0.038" size = "0.005"/>
            <site name = "cornerldownright" pos = "0.01 0 -0.038" size = "0.005"/>
        </body>

        <body name = "R2" pos="0.161 0 1">
            <joint name = "jointR2" type="slide" axis = "0 0 1"/>
            <geom type = "ellipsoid" size = "0.023 0.01 0.023"/>
            <site name="R2_site" pos="0 0 0"/>

            <site name = "corner2up" pos = "0 0 0.023" size = "0.005"/>
            <site name = "corner2upleft" pos = "-0.01 0 0.023" size = "0.005"/>
            <site name = "corner2upright" pos = "0.01 0 0.023" size = "0.005"/>

            <site name = "corner2down" pos = "0 0 -0.023" size = "0.005"/>
            <site name = "corner2downleft" pos = "-0.01 0 -0.023" size = "0.005"/>
            <site name = "corner2downright" pos = "0.01 0 -0.023" size = "0.005"/>
        </body>
    </worldbody>
```

Рисунок 2 – Конфигурация модели

К этой модели, в соответствии с заданием, добавим `<actuator>` – `q1` и `q2`, а также `<sensor>` и `<tendon>`. Модификация модели представлена на рисунке 3.

```

<tendon>
  <spatial name="ten1" width="0.004" rgba="1 0 0 0.8">
    <site site="base_ten1"/>
    <site site="ten1_sitel"/>
    <site site="ten1_site2"/>
  </spatial>

  <spatial name="ten2" width="0.004" rgba="0 1 0 0.8">
    <site site="base_ten2"/>
    <site site="ten2_sitel"/>
    <site site="ten2_site2"/>
  </spatial>
</tendon>

<actuator>
  <motor joint="j1" name="motor1"/>
  <motor joint="j2" name="motor2"/>
  <general tendon="ten1" name="q1" gear="2" ctrllimited="true" ctrlrange="-1 1"/>
  <general tendon="ten2" name="q2" gear="2" ctrllimited="true" ctrlrange="-1 1"/>
</actuator>

<sensor>
  <jointpos name="j1_pos" joint="j1"/>
  <jointpos name="j2_pos" joint="j2"/>
  <jointvel name="j1_vel" joint="j1"/>
  <jointvel name="j2_vel" joint="j2"/>
  <tendonpos name="ten1_pos" tendon="ten1"/>
  <tendonpos name="ten2_pos" tendon="ten2"/>
  <framepos name="ee_pos" objtype="site" objname="ee_site"/>
</sensor>

```

Рисунок 3 – Модификация модели

Мы добавили секции `<actuator>`, `<sensor>` и `<tendon>` для создания полнофункциональной биомеханической системы, которая имитирует работу реальных мышц и сухожилий в живом организме.

Секция `<tendon>` создает виртуальные "мышцы" или "тросы" — красный и зеленый, которые соединяют различные части нашей модели через контрольные точки. Эти сухожилия не просто визуально связывают компоненты, но и физически передают усилия между ними, создавая дополнительный способ управления помимо обычных суставов.

Секция `<actuator>` добавляет "мышцы" нашей системе — то, что приводит модель в движение. Мы используем два типа приводов: моторы для прямого управления суставами и общие актуаторы для управления через натяжение сухожилий. Это похоже на то, как в реальном организме мы можем двигать конечностью либо напрямую через суставы, либо через натяжение мышц и сухожилий. Ограничения контроля и передаточные отношения позволяют точно настраивать воздействие этих "мышц".

Секция `<sensor>` выступает в роли "нервной системы" модели — она собирает информацию о состоянии системы в реальном времени. Датчики

отслеживают позиции и скорости суставов, измеряют натяжение сухожилий и следят за положением конечного эффектора. Эти данные необходимы для создания обратной связи — без них мы были бы как человек без чувствительности, не знающий, в каком положении находится его собственные конечности.

Вместе эти три компонента создают замкнутую систему: приводы приводят модель в движение, сухожилия передают усилия между частями системы, а датчики предоставляют информацию для точного контроля и обучения. Эта архитектура позволяет создавать сложные биомеханические системы, которые могут обучаться и адаптироваться подобно живым организмам.

```
model = mujoco.MjModel.from_xml_path(f2)
data = mujoco.MjData(model)

# Параметры для q1 из таблицы
AMP_q1 = np.deg2rad(16.1)      # Амплитуда в радианах
FREQ_q1 = 3.78                 # Частота в Гц
BIAS_q1 = np.deg2rad(7.1)       # Смещение в радианах

# Параметры для q2 из таблицы
AMP_q2 = np.deg2rad(26.8)      # Амплитуда в радианах
FREQ_q2 = 2.5                  # Частота в Гц
BIAS_q2 = np.deg2rad(11.3)     # Смещение в радианах

KP = 10.0
KD = 1.0

SIMEND = 10
Timestep = 0.001
STEP_NUM = int(SIMEND / Timestep)

EE_position_x = []
EE_position_z = []
```

Рисунок 4

На рисунке 4 изображено использование ПД-регулятора для отслеживания синусоидальных траекторий. Целевые значения углов суставов задаются гармоническим законом $q_{\text{des}} = \text{AMP} \cdot \sin(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t) + \text{BIAS}$, где

параметры амплитуды, частоты и смещения берутся из таблицы с предварительным преобразованием угловых величин из градусов в радианы.

Стабильность работы системы достигается методом итеративного подбора параметров регулятора до получения удовлетворительных динамических характеристик.

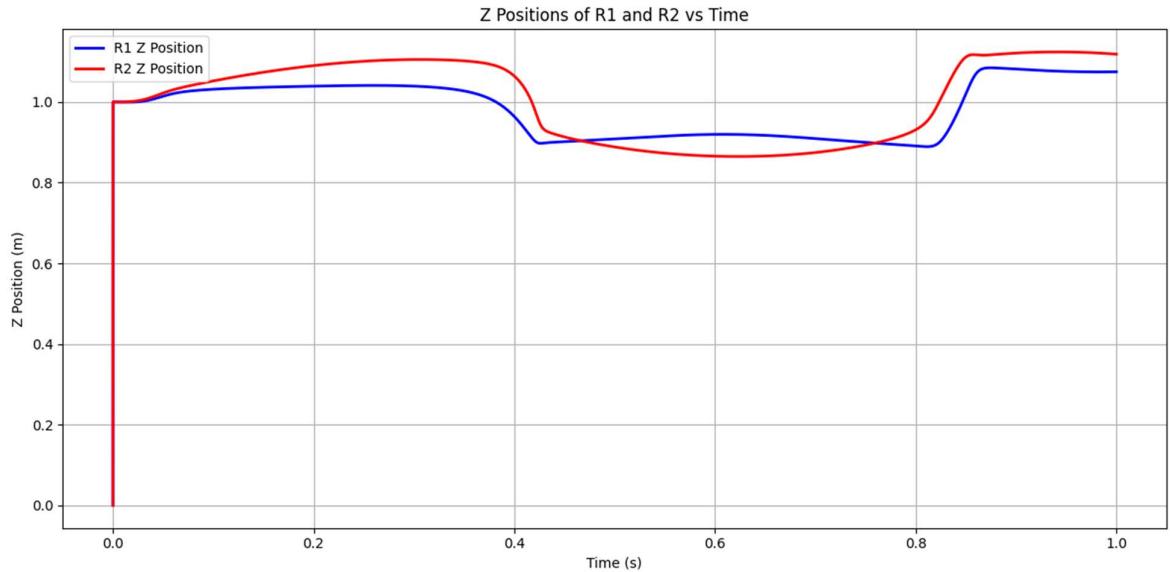


Рисунок 5 – изменение положения системы в зависимости от времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа по моделированию сухожильного двухзвенного планарного механизма в среде MuJoCo показала успешное достижение поставленных целей. Была разработана и реализована механическая система, состоящая из двух эллипсоидных тел, соединенных перекрестной сухожильной структурой с неподвижной стенкой. Моделирование подтвердило возможность создания управляемого гармонического движения с использованием позиционных актуаторов и ПД-регулятора.

Однако анализ выявил существенные ограничения в механическом взаимодействии через сухожильные соединения. Несмотря на визуально правильную конфигурацию сухожилий, их фактическое влияние на динамику системы оказалось минимальным из-за геометрических особенностей крепления, при которых сухожилия проходят сквозь тела, не создавая эффективного рычага. Это привело к тому, что движение звеньев определяется преимущественно актуаторами, а сухожилия выполняют в основном декоративную функцию.