

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО»



Факультет Систем Управления и Робототехники

ОТЧЕТ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ №3

Вариант №30

ПО ДИСЦИПЛИНЕ: «ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Выполнил:

Мищенко И. А.,
336835, гр. Р4150

Проверил:

Ракшин Е. А.,
ассистент ФСУиР

Санкт-Петербург,
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Цель работы	3
2 Задачи, решаемые при выполнении работы	3
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	5
ХОД РАБОТЫ	6
1 Реализация MJCF модели механизма	6
2 Моделирование механизма в среде MuJoCo.....	9
3 Результаты моделирования.....	10
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	13

ВВЕДЕНИЕ

1 Цель работы

Цель данной работы — изучить основы моделирования тросовых механических систем в среде MuJoCo, построить модель двухзвенного 2R-планарного механизма с перекрёстной системой сухожилий (tendon actuation), задать его геометрию в формате MJCF (XML), воспроизвести кинематическое поведение механизма и исследовать влияние геометрии роликов, натяжения тросов и положения опор на динамику системы.

2 Задачи, решаемые при выполнении работы

1. Проанализировать структуру 2R-планарного механизма с тросовым приводом.
 - a. Изучить схему варианта №1: два ролика с радиусами R_1 и R_2 , фиксированные расстояния a, c, b , система перекрещённых тросов.
 - b. Определить геометрическое расположение роликов, точек крепления тросов и опорных стенок.
2. Сформировать MJCF-модель механизма.
 - a. Создать XML-файл с телами (body), суставами (joint), геометрическими примитивами (geom) и точками крепления (site).
 - b. Задать координаты роликов в соответствии с параметрами варианта (R_1, R_2, a, c, b).
 - c. Убедиться в корректной структуре worldbody.
3. Смоделировать систему тросов.
 - a. Создать два пространственных троса (tendon/spatial) с перекрёстной прокладкой.
 - b. Настроить параметры тросов: жёсткость (stiffness), демпфирование (damping), ширину визуализации (width).
 - c. Связать концы тросов с роликами и стенками через site.
4. Проверить кинематические ограничения.
 - a. Использовать элементы <equality> (connect) для жёстких связей между роликом и подвижной стенкой.

- b. Убедиться, что перемещения ограничены корректно и система собирается без ошибок.
5. Запустить симуляцию в MuJoCo Viewer.
 - a. Загрузить модель через `mjoco.viewer.launch_passive`.
 - b. Проверить корректность отображения механизма, тросов и роликов.
 - c. Проанализировать поведение тросов при перемещении роликов и стенки.
 6. Провести анализ результатов работы.
 - a. Оценить визуальное соответствие модели исходной схеме.
 - b. Проверить натяжение и траекторию тросов.
 - c. Выполнить качественный анализ влияния геометрических параметров на движение механизма.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Вариант №1: Tendon connected 2R planar mechanism

Переменная	Значение
R_1, m	0.021
R_2, m	0.048
a, m	0.084
b, m	0.039
c, m	0.073

Таблица 1: Параметры согласно варианту

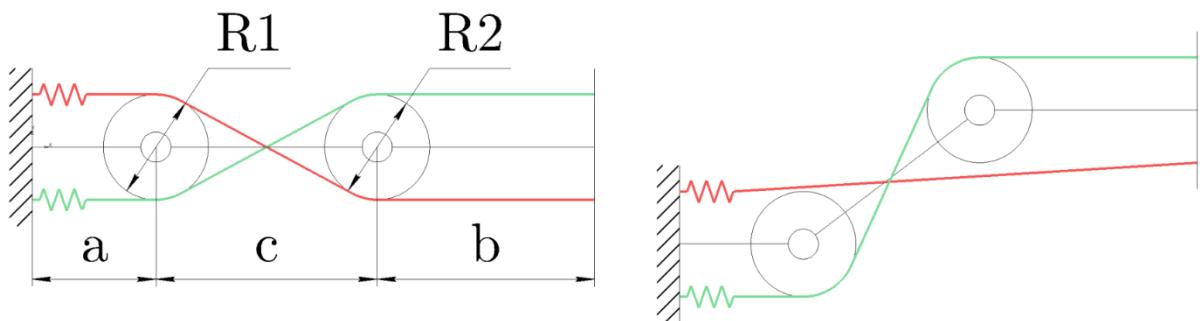


Рисунок 1: Модель двухзвенного 2R-планарного механизма

ХОД РАБОТЫ

1 Реализация MJCF модели механизма

Ниже приведен листинг описания модели механизма в формате XML.

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<mujoco model="2R_tendon_planar">

    <option timestep="1e-4"/>
    <option integrator="RK4"/>
    <option gravity="0 0 0"/>

    <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>
        <light pos="0 0 10"/>

        <camera name="side view" pos="0.1 -1.5 1.0" euler="90 0 0" fovy="60"/>
        <camera name="upper view" pos="0 0 1.5" euler="0 0 0"/>

        <body name="wall" pos="0 0 0" euler="0 90 0">
            <geom type="plane" size="0.05 0.05 0.01" material="grid"/>
            <site name="t1_wall" pos="0.0105 0 0" type="sphere" size="0.002"/>
            <site name="t2_wall" pos="-0.0105 0 0" type="sphere" size="0.002"/>
        </body>

        <body name="mid_body_t1" pos="0.1205 0 0">
            <site name="t1_mid" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>
            <joint name="mid_joint_x_t1" type="slide" axis="1 0 0"/>
            <joint name="mid_joint_y_t1" type="slide" axis="0 0 1"/>
            <geom type="sphere" size="0.002" mass="0.0001" rgba="0.86 0.43 0.54 0.5"
contype="0"/>
        </body>

        <body name="mid_body_t2" pos="0.1205 0 0">
            <site name="t2_mid" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>
            <joint name="mid_joint_x_t2" type="slide" axis="1 0 0"/>
            <joint name="mid_joint_y_t2" type="slide" axis="0 0 1"/>
            <geom type="sphere" size="0.002" mass="0.0001" rgba="0.86 0.43 0.54 0.5"
contype="0"/>
        </body>

        <body name="effector_link" pos="0.196 0 0">
            <site name="effector_world" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>
            <joint name="effector_x" type="slide" axis="1 0 0"/>
            <joint name="effector_y" type="slide" axis="0 0 1"/>
            <geom type="sphere" size="0.002" mass="0.0001" rgba="0.86 0.43 0.54 0.5"
contype="0"/>
        </body>

        <body name="link1" pos="0 0 0" euler="0 0 0">
            <geom type="cylinder" pos="0.042 0 0" size="0.002 0.042" euler="0 90 0" rgba="0.21
0.32 0.82 0.5" contype="0"/>
        <body name="link2" pos="0.084 0 0" euler="0 0 0">
            <joint name="A" type="hinge" axis="0 1 0" stiffness="0" springref="0"
damping="0"/>
            <geom type="cylinder" pos="0.0365 0 0" size="0.002 0.0365" euler="0 90 0"
rgba="0.42 0.32 0.12 0.5" contype="0"/>
            <geom name="pulley1" type="cylinder" size="0.0105 0.001" pos="0 0 0" euler="90
0 0" rgba="0.42 0.32 0.12 0.5" contype="0"/>
            <site name="side_r1_t1" pos="0 0 -0.0125" type="sphere" size="0.001"/>
        </body>
    </body>
</worldbody>
</mujoco>
```

```

<site name="side_r1_t2" pos="0 0 0.0125" type="sphere" size="0.001"/>
<site name="pulley1_side" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>

<body name="link3" pos="0.073 0 0" euler="0 0 0">
    <joint name="B" type="hinge" axis="0 1 0" stiffness="0" springref="0"
damping="0"/>
    <geom type="cylinder" pos="0.0195 0 0" size="0.002 0.0195" euler="0 90 0"
rgba="0.34 0.65 0.84 0.5" contype="0"/>
    <geom type="box" pos="0.039 0 0" size="0.002 0.002 0.024" rgba="0.34 0.65
0.84 0.5" mass="0" contype="0"/>

    <site name="t1_end" pos="0.039 0 0.024" type="sphere" size="0.002"/>
    <site name="t2_end" pos="0.039 0 -0.024" type="sphere" size="0.002"/>

    <geom name="pulley2" type="cylinder" size="0.024 0.001" pos="0 0 0"
euler="90 0 0" rgba="0.34 0.65 0.84 0.5" contype="0"/>
    <site name="side_r2_t1" pos="0 0 0.026" type="sphere" size="0.001"/>
    <site name="side_r2_t2" pos="0 0 -0.026" type="sphere" size="0.001"/>
    <site name="pulley2_side" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>

    <site name="effector" pos="0.039 0 0" type="sphere" size="0.001"/>
</body>
</body>
</worldbody>

<tendon>
    <spatial name="tendon1_1" width="0.001" stiffness="100" damping="10"
springlength="0.005">
        <site site="t1_wall"/>
        <geom geom="pulley1" sidesite="side_r1_t1"/>
        <site site="t1_mid"/>
        <geom geom="pulley2" sidesite="side_r2_t1"/>
        <site site="t1_end"/>
    </spatial>
</tendon>

<tendon>
    <spatial name="tendon2_1" width="0.001" stiffness="100" damping="10"
springlength="0.005">
        <site site="t2_wall"/>
        <geom geom="pulley1" sidesite="side_r1_t2"/>
        <site site="t2_mid"/>
        <geom geom="pulley2" sidesite="side_r2_t2"/>
        <site site="t2_end"/>
    </spatial>
</tendon>

<equality>
    <weld site1="effector" site2="effector_world" torquescale="100"/>

    <connect site1="t1_mid" site2="pulley1_side"/>
    <connect site1="t1_mid" site2="pulley2_side"/>
    <connect site1="t2_mid" site2="pulley1_side"/>
    <connect site1="t2_mid" site2="pulley2_side"/>
</equality>

<actuator>
    <motor name="motor_t1" tendon="tendon1_1" gear="1" ctrlrange="-20 20"/>
    <motor name="motor_t2" tendon="tendon2_1" gear="1" ctrlrange="-20 20"/>
</actuator>

<sensor>
    <framepos objtype="site" objname="effector"/>
</sensor>
</mujoco>

```

Листинг 1: Модель двухзвенного 2R-планарного механизма

XML-файл, используемый в среде MuJoCo, содержит структурированное описание всей механической системы и определяет её геометрию, кинематику,

физические свойства и параметры визуализации. Каждый раздел выполняет строго определённую функцию, обеспечивая корректную сборку и работу модели. В данной работе XML-файл состоит из следующих ключевых частей:

1. Заголовок и глобальные параметры (`<mjoco>`, `<option>`)

В первых строках задаются общие настройки симуляции: шаг интегрирования, гравитация, численные параметры и формат данных. Эти настройки определяют, как будут рассчитываться движения механизма во времени. В данной модели гравитация отключена, что позволяет исследовать чистую кинематику тросов без влияния веса звеньев.

2. Ресурсы и материалы (`<asset>`)

В блоке ресурсов описываются текстуры и материалы, используемые в визуализации сцены. Например, текстура «checker» формирует фон-сетку, а материал «grid» применяется к плоскости в качестве опорной поверхности. Этот раздел отвечает только за внешний вид и не влияет на физику модели.

3. Основная геометрия сцены (`<worldbody>`)

Это центральный раздел XML-файла. В нём описываются все элементы механизма: звенья, ролики, стены, точки крепления и суставы. Каждый объект представлен как `<body>`, содержащий:

- `joint` – тип и параметры подвижного соединения (например, шарнир для роликов);
- `geom` – геометрическую форму (цилиндры для роликов, параллелепипеды для стенок);
- `site` – специальные точки, используемые для привязки тросов.

В этом разделе задаётся фактическая пространственная структура механизма, включая положения роликов, расстояния между ними и координаты опор.

4. Кинематические связи (<equality>)

Этот блок задаёт жёсткие геометрические связи между элементами модели.

В рассматриваемой системе связь типа `connect` используется для привязки точек роликов к подвижной правой стенке. Такие связи ограничивают движение системы, обеспечивая согласованность положения элементов и корректную реакцию тросов.

5. Описание тросов (<tendon>)

Раздел является ключевым для моделирования сухожильного привода. Здесь создаются пространственные тросы (<spatial>), каждый из которых последовательно перечисляет `site` — точки, через которые проходит линия натяжения. Параметры `stiffness`, `damping` и `width` регулируют механические свойства тросов. Перекрёстная последовательность `site`-ов формирует характерную «Х-образную» конфигурацию тросовой системы.

2 Моделирование механизма в среде MuJoCo

Ниже приведен листинг программного кода на Python для запуска и моделирования механизма в среде MuJoCo.

```
import time
import mujoco
import mujoco.viewer

# --- Глобальный флаг для остановки симуляции ---
stop_simulation = False

def keyboard_callback(keycode):
    global stop_simulation

    # Преобразуем код в символ
    try:
        key = chr(keycode).lower()
    except:
        return

    if key == 'q':
        stop_simulation = True

# ---- Загрузка модели ----
model = mujoco.MjModel.from_xml_path(
    "SRS\\practice_3\\submissions\\336835_MischenkoIvan_Task3\\task3_model.xml"
)
data = mujoco.MjData(model)
```

```

# ---- Запуск viewer с обработчиком клавиш ----
with mujoco.viewer.launch_passive(model, data,
                                   key_callback=keyboard_callback) as viewer:
    last_time = time.time()
    sim_dt = model.opt.timestep
    while viewer.is_running() and not stop_simulation:
        mujoco.mj_step(model, data)
        now = time.time()
        elapsed = now - last_time
        if elapsed < sim_dt:
            time.sleep(sim_dt - elapsed)
        last_time = now
        viewer.sync()

```

Листинг 2: Программный код для моделирования

Программный код, приведённый в листинге, реализует запуск модели механизма в среде MuJoCo Viewer и обеспечивает удобное взаимодействие пользователя с симуляцией. На первом этапе загружается модель в формате MJCF (XML), после чего создаются структуры MjModel и MjData, содержащие параметры системы и текущее состояние механизма. Далее реализуется функция обратного вызова keyboard_callback, позволяющая пользователю завершить симуляцию при нажатии клавиши Q. Это обеспечивает удобную и безопасную остановку процесса моделирования без принудительного завершения окна визуализации.

Основной цикл симуляции работает внутри контекстного менеджера mujoco.viewer.launch_passive, который создаёт окно визуализации и обеспечивает синхронизацию состояния модели с интерфейсом. Каждая итерация цикла вызывает функцию mj_step, выполняющую один шаг интегрирования динамики. Для обеспечения реалистичности моделирования введена задержка времени: если вычисления происходят быстрее заданного шага симуляции, программа делает паузу, чтобы синхронизировать виртуальное время с реальным. Такой подход обеспечивает стабильную частоту кадров и достоверное отображение движения тросов и звеньев. Код является минималистичным, но в то же время полностью функциональным решением для тестирования и анализа поведения разработанного механизма.

3 Результаты моделирования

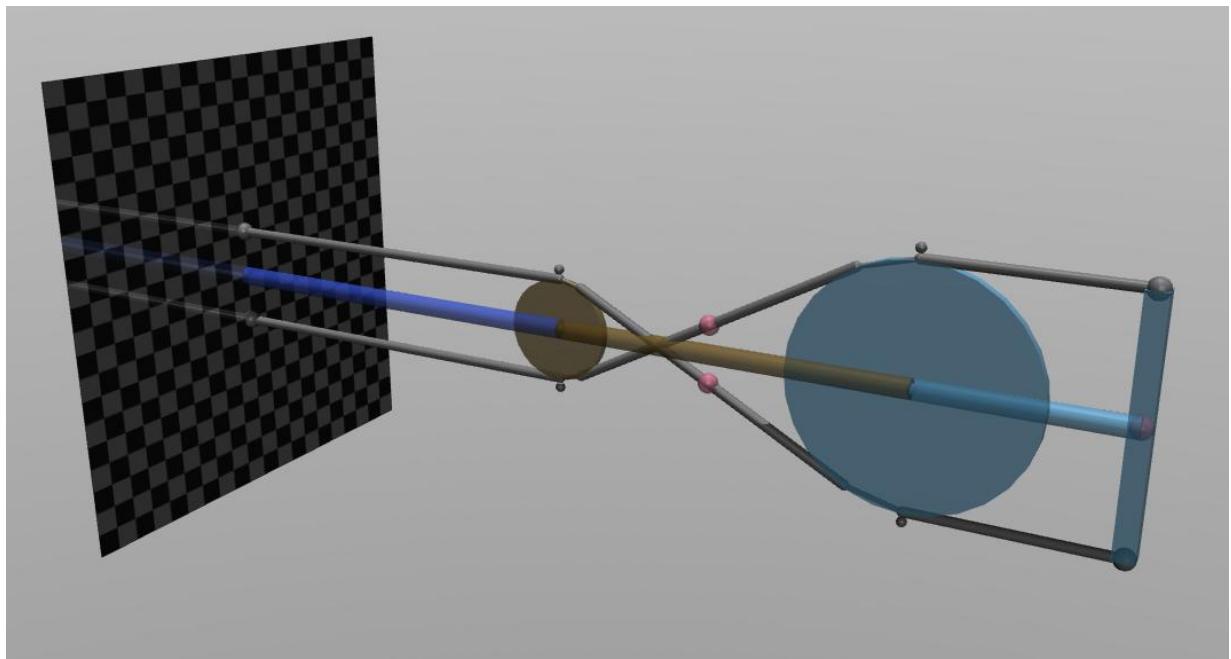


Рисунок 2: Расположение элементов механизма в момент старта симуляции

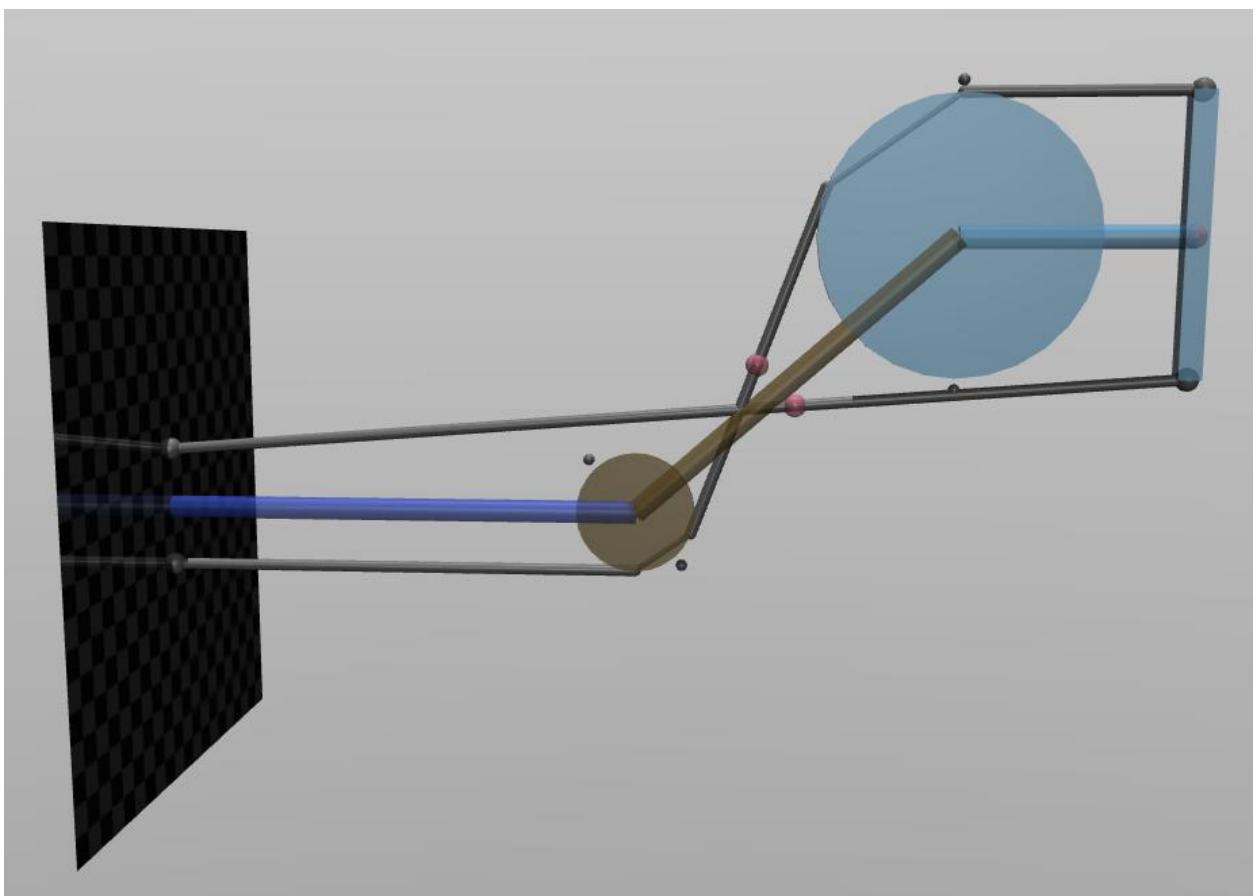


Рисунок 3: Расположение элементов механизма при произвольном
воздействии

На рисунке 2 представлено стартовое положение механизма. В этом состоянии тросы находятся в расслабленной конфигурации, а система располагается в нейтральном положении, заданном в XML-модели. Ролики двух звеньев ориентированы таким образом, что перекрещённые тросовые линии формируют симметричную структуру. Начальная геометрия соответствует схеме варианта №1: расстояния между роликами равны сумме параметров a и c , а положение конечной стенки согласовано с величиной b . Визуальное расположение элементов демонстрирует корректность загрузки и сборки модели: тросы соединены с роликами через соответствующие контакты, точки крепления «wall» и «end» привязаны к геометрическим сайтам, а суставы позволяют свободное вращение звеньев.

На рисунке 3 показано поведение системы при произвольном внешнем воздействии. При изменении положения механизма тросы начинают перераспределять натяжение в соответствии с изменёнными углами звеньев. Наблюдается характерная для тросовых приводов динамика: при вращении одного звена траектории тросов меняются, обеспечивая согласованное движение соседних участков. Перекрёстная конструкция тросов приводит к асимметричному изменению их длины, что соответствует кинематике реальных механизмов передачи усилия через ролики. Также можно отметить, что благодаря жёстким связям (equality connect) система сохраняет геометрическую непрерывность: точки контактов и сайды роликов остаются согласованными, а механизм движется плавно и без разрывов. Визуальный результат подтверждает правильность формирования MJCF-модели и отсутствие ошибок в структуре тросов и суставов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы была разработана и протестирована модель двухзвенного 2R-планарного механизма с перекрёстной системой сухожильного привода. На основе параметров, заданных по варианту, была сформирована корректная XML-модель в формате MJCF, включающая геометрию роликов, опорные элементы, сайты, суставы и тензоры. Реализованный Python-скрипт позволил провести динамическое моделирование и визуализировать работу системы в среде MuJoCo Viewer. Анализ поведения механизма показал, что тросы корректно огибают ролики, а движение звеньев согласуется с заданной кинематикой.

Полученные результаты подтверждают правильность построения модели и демонстрируют характерные особенности тросовых приводов: зависимость натяжения от угловых положений, перекрёстное взаимодействие тросов и плавные непрерывные изменения конфигурации системы. Работа позволила закрепить навыки формирования структур MJCF, настройки динамических элементов и проведения имитационного моделирования механических систем в MuJoCo.