

АНАЛИЗ URDF: РАСПОЛОЖЕНИЕ И НАКЛОНЫ JOINTS ОТНОСИТЕЛЬНО ДРУГ ДРУГА, ДЛИНЫ ЗВЕНЬЕВ

Ограничения по значениям принимаемых углов для каждого сустава

Эти ограничения указаны в [официальной документации от Unitree](#).

Общая структура описания звена и его фрейма

Фрейм — это система координат. Каждый *link* в ROS2 автоматически становится фреймом, связанным жёстко с частью робота. Также существуют фреймы, не связанные с роботом, например, *base_footprint* — в нашем случае это проекция таза (*pelvis*) на плоскость, на которой стоит робот.

1. Звено (Link *<link>*)

Тег *<link>* описывает жёсткий сегмент робота, его физические и визуальные свойства. У каждого звена должно быть уникальное имя (*name*).

Компоненты внутри *<link>*:

- ***<inertial>* (Инерционные параметры):** Определяет массу и момент инерции звена. Критически важно для точного физического моделирования в симуляторах (например, Gazebo).
 - ***<origin>*:** Задаёт смещение и поворот центра инерции (Center of Mass) относительно геометрического центра звена.
 - ***<mass>*:** Масса звена в килограммах.
 - ***<inertia>*:** Тензор инерции, представляющий собой симметричную матрицу 3x3. Он описывает, как масса распределена вокруг осей координат. Параметры *ixx*, *iyy*, *izz* — это моменты инерции, а *ixy*, *ixz*, *iyz* — произведения инерции.

- **<visual> (Визуальное представление):** Описывает, как звено выглядит в инструментах визуализации (таких как RVIZ2).
 - **<origin>:** Смещение и поворот визуальной геометрии относительно центра звена.
 - **<geometry>:** Определяет форму. Это может быть *<box>*, *<cylinder>*, *<sphere>* или сложная *<mesh>* (обычно файл в формате .dae или .stl).
 - **<material>:** Определяет цвет (*<color>*) или текстуру звена.
- **<collision> (Коллизионная геометрия):** Описывает форму, используемую движком физики для расчёта столкновений. Эта геометрия часто бывает более простой, чем визуальная, для повышения производительности.
 - **<origin>:** Смещение и поворот коллизионной геометрии.
 - **<geometry>:** Форма для столкновений (аналогично визуальной).

Важно: Визуальная и коллизионная геометрии не обязаны совпадать. Упрощение коллизионной модели — стандартная практика.

2. Соединение (*Joint <joint>*)

Тег *<joint>* описывает, как два звена связаны друг с другом, и определяет тип их относительного движения.

Атрибуты и компоненты внутри *<joint>*:

- **<name>:** Уникальное имя соединения.
- **<type>:** Тип соединения, определяющий степени свободы:
 - **revolute** — вращательное соединение (с ограниченным углом).
 - **continuous** — вращательное соединение (без ограничений, как колесо).
 - **prismatic** — линейное (поступательное) соединение.
 - **fixed** — жёсткое соединение (без движения).
 - **floating** — соединение с полной свободой движения.
 - **planar** — движение в плоскости.

- **<origin>**: Задаёт смещение и поворот от системы координат родительского звена к системе координат дочернего звена. Это преобразование, которое помещает дочернее звено в пространстве относительно родителя.

Атрибут тега **<origin>** xyz — перемещение (translation)

- **Формат**: "x y z" в метрах
- **Значения по умолчанию**: "0 0 0"
- **Расшифровка**:
 - **x** — смещение по оси X (вперёд/назад)
 - **y** — смещение по оси Y (влево/вправо)
 - **z** — смещение по оси Z (вверх/вниз)

Атрибут тега **<origin>** rpy — поворот (rotation)

- **Формат**: "roll pitch yaw" в радианах
- **Значения по умолчанию**: "0 0 0"
- **Расшифровка**:
 - **roll** — крен (вращение вокруг оси X)
 - **pitch** — тангаж (вращение вокруг оси Y)
 - **yaw** — рыскание (вращение вокруг оси Z)
- **<parent>**: Ссылка на родительское звено (*link*) в иерархии робота.
- **<child>**: Ссылка на дочернее звено, которое присоединяется к родительскому.
- **<axis>**: Определяет ось, вокруг которой (или вдоль которой) происходит движение. Задаётся единичным вектором в локальных координатах соединения. Например, xyz="1 0 0" означает ось X.
- **<limit>**: Обязателен для соединений типа **revolute** и **prismatic**. Определяет рабочий диапазон соединения.
 - **lower** — нижний предел (в радианах или метрах).
 - **upper** — верхний предел.

- **effort** — максимальное усилие (крутящий момент для **revolute** или сила для **prismatic**), которое может приложить привод.
- **velocity** — максимальная скорость движения.

Разбор примера левого голеностопного сустава

URDF-описание лежит по относительному адресу:

```
unitree_h1_visualization_ws/src/h1_description/urdf/h1.urdf
```

или по [этой ссылке](#) в репозитории *unitree_h1_visualization_ws*.

Рассмотрим левый голеностопный сустав, описанный в *h1.urdf*:

```
<link name="left_ankle_link">
  <inertial>
    <origin xyz="0.042575 -0.000001 -0.044672" rpy="0 0 0" />
    <mass value="0.474" />
    <inertia
      ixx="0.000159668"
      ixy="-0.000000005"
      ixz="0.000141063"
      iyy="0.002900286"
      iyz="0.000000014"
      izz="0.002805438" />
    </inertial>
  <visual>
    <origin xyz="0 0 0" rpy="0 0 0" />
    <geometry>
      <mesh filename="package://h1_description/meshes/left_ankle_link.dae"
/>
    </geometry>
    <material name="">
      <color rgba="0.1 0.1 0.1 1" />
    </material>
  </visual>
  <collision>
```

```

    <origin xyz="0.05 0.0 -0.05" rpy="0 0 0" />
    <geometry>
      <box size="0.28 0.03 0.024"/>
    </geometry>
  </collision>
</link>

<joint name="left_ankle_joint" type="revolute">
  <origin xyz="0 0 -0.4" rpy="0 0 0" />
  <parent link="left_knee_link" />
  <child link="left_ankle_link" />
  <axis xyz="0 1 0" />
  <limit
    lower="-0.87"
    upper="0.52"
    effort="40"
    velocity="9" />
</joint>

```

Общая структура иерархии

Робот в URDF представляется в виде дерева звеньев, соединенных суставами. Дерево начинается с “корневого” звена (*base_link*), которое не имеет родителя. Каждое последующее звено присоединяется к уже существующему в дереве с помощью сустава.

Посмотреть дерево соединений можно командой (если происходит публикация TF-преобразований т.е. публикуются сообщения в /tf топики — см. [методический материал 14](#)):

```
ros2 run tf2_tools view_frames.py
```

Эта команда генерирует PDF-файл с отображением всех звеньев и соединений в виде дерева.

Команда для открытия файла в системе Linux:

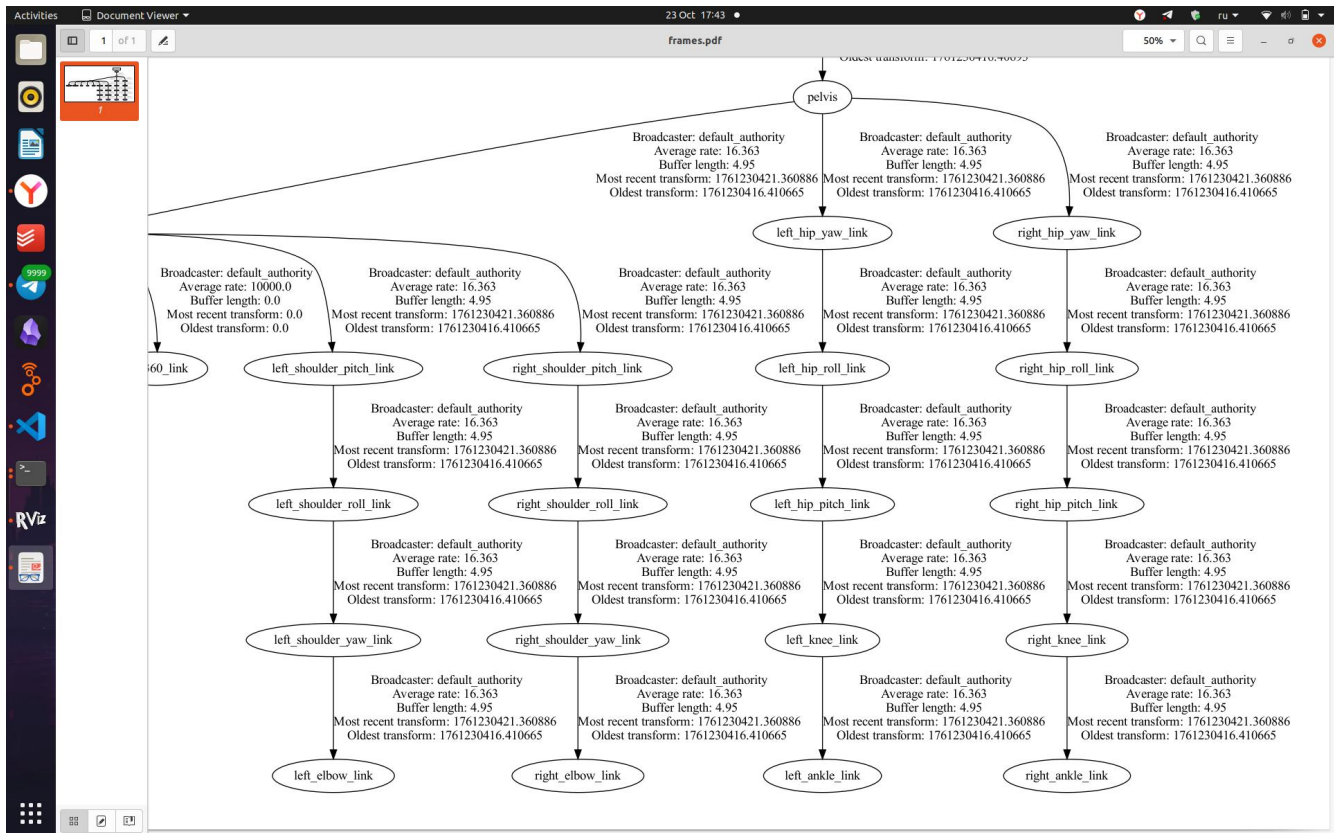


Рисунок 1 — Дерево TF-преобразований.

В нашем примере:

- **left_knee_link** является родителем.
- **left_ankle_link** является ребенком.
- **left_ankle_joint** определяет, как именно ребёнок соединён с родителем (включая смещение, ориентацию и ось вращения).

Полное дерево TF-преобразований можно посмотреть по [ссылке](#).

Блок соединения (Joint) — left_ankle_joint

Для определения нужных параметров достаточно рассмотреть блок `<joint>`.

Основные параметры соединения

```
<joint name="left_ankle_joint" type="revolute">
```

Что это значит:

- `name="left_ankle_joint"` — уникальное имя соединения.
- `type="revolute"` — вращательный тип соединения (как шарнир).

Геометрия соединения

```
<origin xyz="0 0 -0.4" rpy="0 0 0" />
```

Что это значит:

- Соединение расположено со смещением **-0.4 м (40 см)** по оси Z относительно родительского звена.
- Это означает, что голеностоп находится на 40 см ниже коленного сустава.
- Голеностоп не повернут ни по одной из осей относительно коленного сустава.

Иерархия соединений

```
<parent link="left_knee_link" />
<child link="left_ankle_link" />
```

Что это значит:

- Родительское звено: *left_knee_link* (звено колена).
- Дочернее звено: *left_ankle_link* (звено лодыжки).

Ось вращения и ограничения

```
<axis xyz="0 1 0" />
<limit lower="-0.87" upper="0.52" effort="40" velocity="9" />
```

Что это значит:

- `<axis xyz="0 1 0">` — ось вращения направлена по оси Y.
- `<limit>`:
 - `lower="-0.87"` — минимальный угол = **-0.87 радиан** ($\approx -50^\circ$).
 - `upper="0.52"` — максимальный угол = **0.52 радиан** ($\approx +30^\circ$).
 - `effort="40"` — максимальный крутящий момент = **40 Н·м**.
 - `velocity="9"` — максимальная скорость = **9 рад/с** ($\approx 515^\circ/\text{с}$).

Физический смысл всей конструкции описания

Это описание голеностопного сустава робота:

- Звено представляет собой часть ноги в области лодыжки.
- Соединение позволяет совершать движения типа “сгибание-разгибание” стопы.
- Ограничения угла позволяют двигаться от подъёма стопы (50°) до опускания (30°).

Анализ URDF: длины звеньев

Проанализируем **right_hip_pitch_joint** из URDF:

```
<!-- right_hip_roll → right_hip_pitch -->
<joint name="right_hip_pitch_joint" type="revolute">
  <origin xyz="0 -0.11536 0" rpy="0 0 0" />
  <parent link="right_hip_roll_link" />
  <child link="right_hip_pitch_link" />
  <axis xyz="0 1 0" />
  <limit
    lower="-3.14"
    upper="2.53"
    effort="200"
    velocity="23" />
</joint>
```

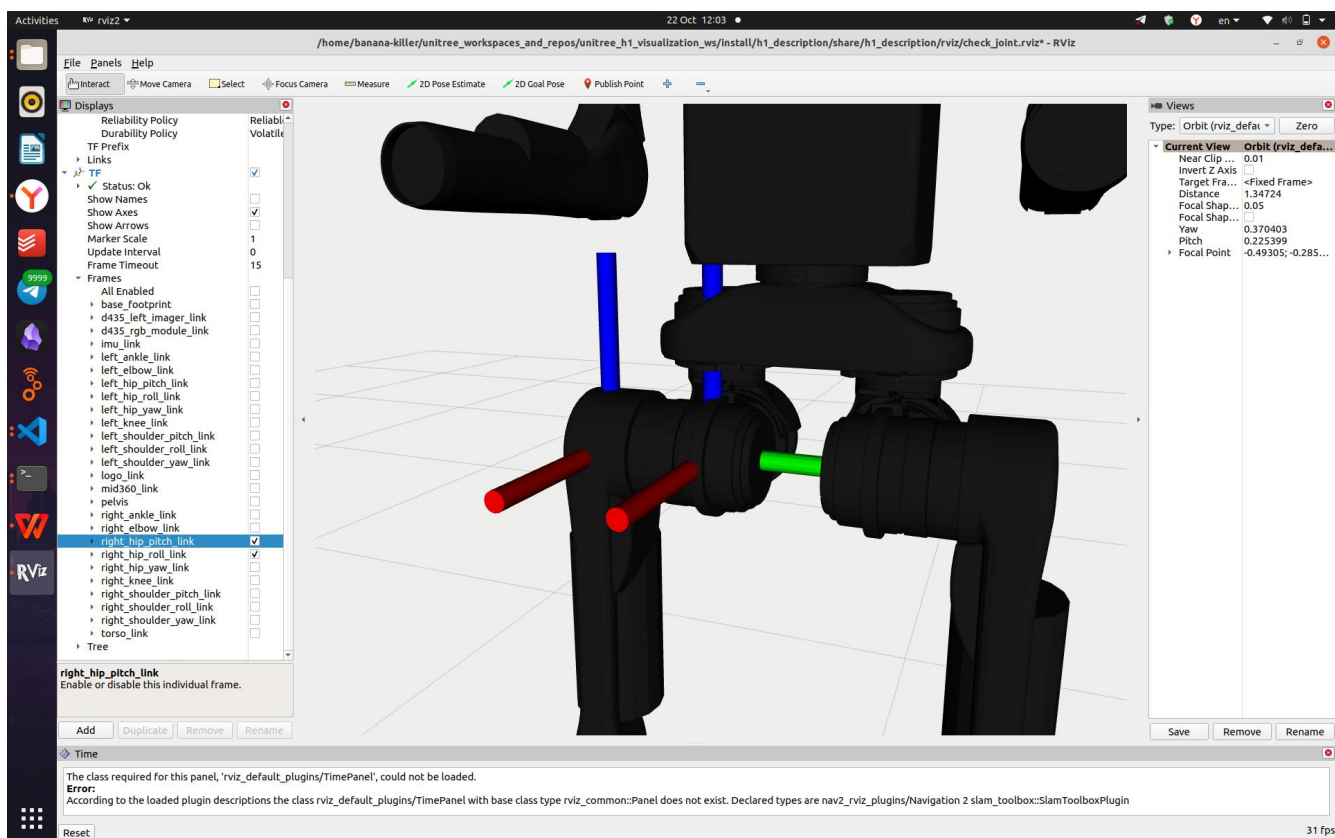



Рисунок 2 - Система координат *right_hip_roll_link* (справа) и *right_hip_pitch_link* (слева)

Расчёт длины звена

В данном случае длина звена равна расстоянию между центрами систем координат *right_hip_roll_link* и *right_hip_pitch_link*.

Смещение между ними задано вектором $xyz="0 \ -0.11536 \ 0"$. Поскольку смещение присутствует только по оси Y, длина звена рассчитывается просто как модуль этого значения:

$$\text{Длина} = | -0.11536 | = 0.11536 \text{ метра.}$$

В общем случае, если бы смещение было по нескольким осям, длина находилась бы по формуле:

$$l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$