ROKEY BOOT CAMP

ROS-2 프로그래밍 실습 강의자료

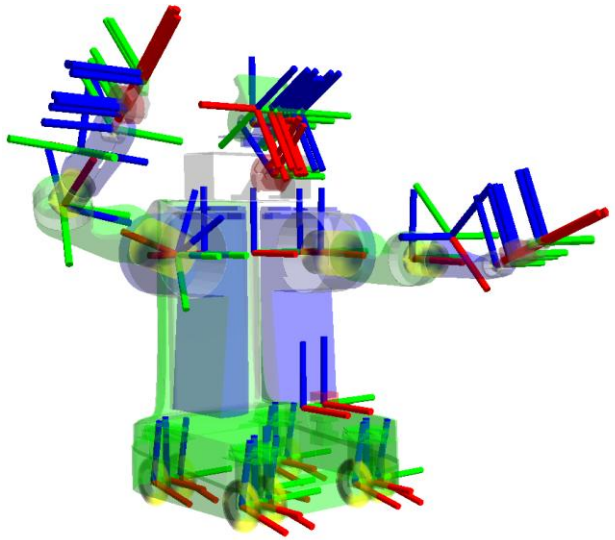
4 ~ 5 차시

Contents

Transformations(좌표 변환)
tf2 소개

tf2

- **tf2: ROS2에서 여러 좌표 프레임 간의 변환과 관계를 추적하고 관리하는 라이브러리**
  - 로봇 시스템은 일반적으로 세계 프레임, 기본 프레임, 그리퍼 프레임, 헤드 프레임 등과 같이 시간에 따라 변경되는 많은 3D 좌표 프레임을 가짐
  - tf2는 시간에 따른 이러한 모든 프레임을 추적하고 다음과 같은 질문을 할 수 있도록 함
    - Q1. 5초 전 world frame 대비 head frame은 어디에 있는가?
    - Q2. Gripper에 있는 물체의 포즈는 내 base에 비해 어떤가?
    - Q3. Map frame에서 base frame의 현재 포즈는 어떤가?



활용 분야	
	▪ **로봇 위치 추적 (Localization)** : map → odom → base_link 변환을 통해 로봇 위치 확인 ▪ **센서 데이터 정렬 (Sensor Fusion)** : LiDAR, 카메라, IMU 데이터를 로봇 본체 좌표계로 변환 ▪ **로봇 암(Arm) 조작** : 다관절 로봇의 각 관절 간 변환을 사용하여 위치 계산 ▪ **드론 및 이동 로봇** : GPS 데이터 변환, IMU 데이터 보정

Transformations(좌표 변환)
tf2 소개

✓ World Frame

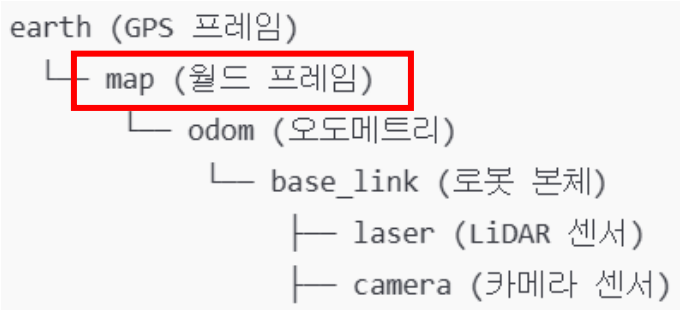
- World Frame은 좌표계에서 가장 기본이 되는 기준 좌표계(Reference Frame)
- 절대 좌표계(Fixed Coordinate System)
- 다른 모든 프레임(로봇의 위치, 센서 데이터 등)이 world frame을 기준으로 상대적 표현됨
- 로봇의 동작에 따라 여러 종류의 world frame이 존재(SLAM → map, 바퀴 기반 → odom, GPS → earth)

✓ World Frame의 종류

- Map : SLAM, Localization에서 사용되는 대표적인 world frame. 자율주행 로봇의 경로계획(Path Planning)
- Odom : 바퀴 기반 이동(Odometry)에서 사용되는 world frame. 시간이 지나면서 누적 오차 발생(Drift). 단기적 위치 변화 추적에 유용
- World : Gazebo 같은 시뮬레이션에서 사용됨. Map과 비슷하지만 물리적 환경에서 존재하는 것은 아님.
- Earth : GPS데이터를 사용할 때 적용되는 글로벌 좌표계. 위도/경도 데이터를 변환하여 로봇 위치를 추적. 자율주행 드론, 자동차 등
- Base_link : 로봇 본체 프리임

✓ 다른 프레임 간 관계

- Earth → Map : GPS 기반 위치 추적. 고정된 월드 프레임
- Map → Odom : Localization 을 통해 Odometry 보정
- Odom → base_link : 로봇의 현재 위치



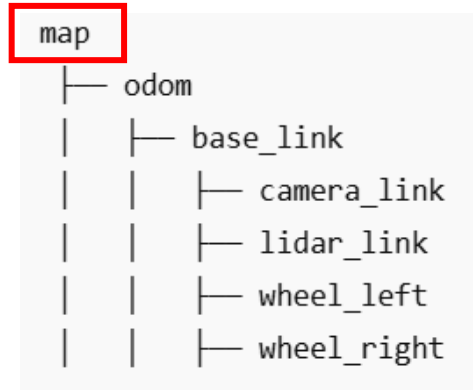
Transformations(좌표 변환)
tf2 소개

tf2

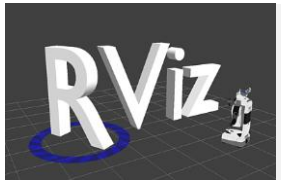
- **tf 기본 개념**
  - Frame : 좌표계(예, map, odom, base_link, camera_link)
  - Transform :한 프레임에서 다른 프레임으로의 변환 관계(회전 + 이동)
  - TF Tree : 여러 프레임이 계층적으로 연결된 구조

- **tf 핵심 기능**
  - TF 브로드캐스터 : 프레임 간의 변환을 주기적으로 브로드캐스트
  - TF 리스너 : 다른 노드에서 TF정보를 구독하여 변환을 확인
  - TF 변환 적용 : 특정 프레임 간 좌표 변환 수행

[tf tree 예]



- map → odom 변환 : SLAM이나 Localization에서 로봇의 위치 제공
- odom → base_link : 변환 : 로봇의 본체 중심 좌표
- base_link → camera_link, lidar_link 변환 : 센서 위치



- RViz2에서 TF를 시각화하여 디버깅 가능
- 센서 데이터 정렬, 로봇 네이게이션, 로봇 암 조작등에 필수적
- Broadcaster와 Listener를 사용하여 변환 데이터를 송수신

Turtlesim 예제

- view_frames 및 tf2_echo 도구를 사용하여 프레임 간의 관계를 시각적으로 분석하는 방법과, rviz2를 사용하여 프레임을 시각화하기
- View_frames는 현재 tf에 존재하는 모든 프레임과 그 연결 관계를 시각화해주는 도구(좌표계 지도)

✓ Turtlesim 예제

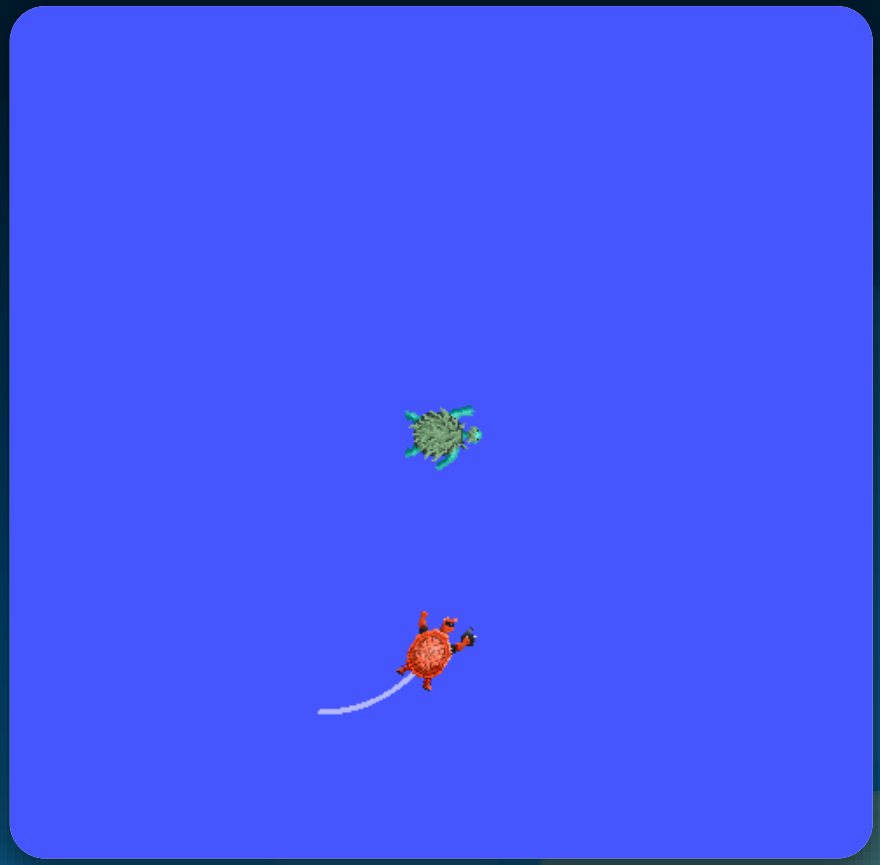
1. 데모 패키지와 종속 파일들 설치

```
sudo apt-get install ros-humble-rviz2 ros-humble-turtle-tf2-py
ros-humble-tf2-ros ros-humble-tf2-tools ros-humble-turtlesim
```

✓ Turtlesim 예제

2. 터미널에서 다음 명령어 실행

```
ros2 launch turtle_tf2_py turtle_tf2_demo.launch.py
```



✓ Turtlesim 예제

3. 두번째 터미널을 열어 teleopkey를 실행시켜 거북이를 움직이면 거북이가 따라오는 것을 관찰 가능

```
ros2 run turtlesim turtle_teleop_key
```

✓ Turtlesim 예제

1. tf2 라이브러리를 사용하여 세 개의 좌표 프레임(world frame, turtle1 frame, turtle2 frame)을 생성
2. tf2 브로드캐스터를 통해 거북이 좌표 프레임을 게시하고, tf2 리스너를 이용해 거북이 프레임 간의 차이를 계산한 뒤, 한 거북이가 다른 거북이를 따라가도록 설정
3. 지금부터 3가지 방법(view_frame, tf2_echo, rviz)을 통해 이 데모를 만드는데 tf2가 어떻게 사용되었는지 확인해보자

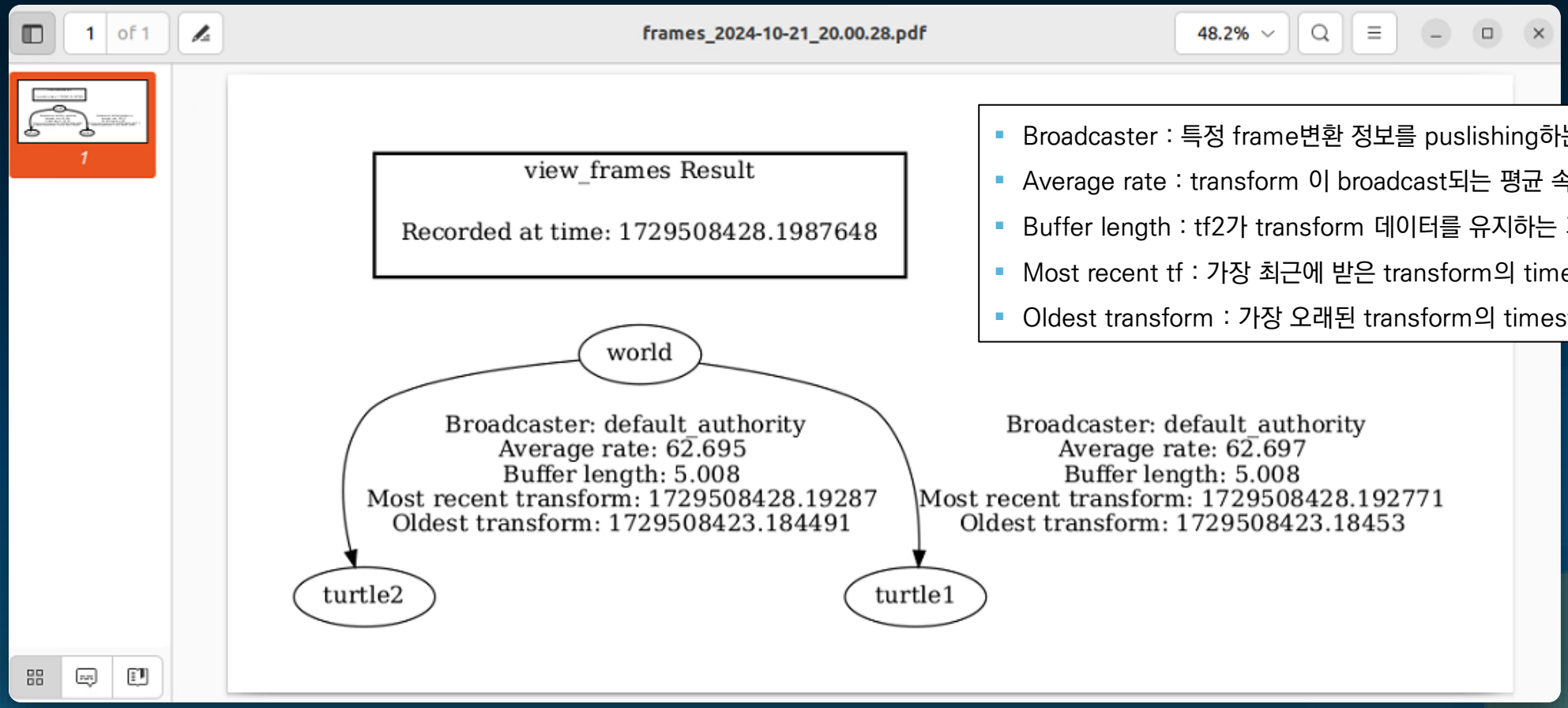
✓ Turtlesim 예제 – view_frames

1. view_frames는 ROS를 통해 tf2가 브로드캐스트하는 프레임의 다이어그램을 생성
2. 다음 명령어를 이용하여 tf2가 브로드캐스트하는 프레임의 다이어그램을 생성

```
ros2 run tf2_tools view_frames
```

✓ Turtlesim 예제– view_frames

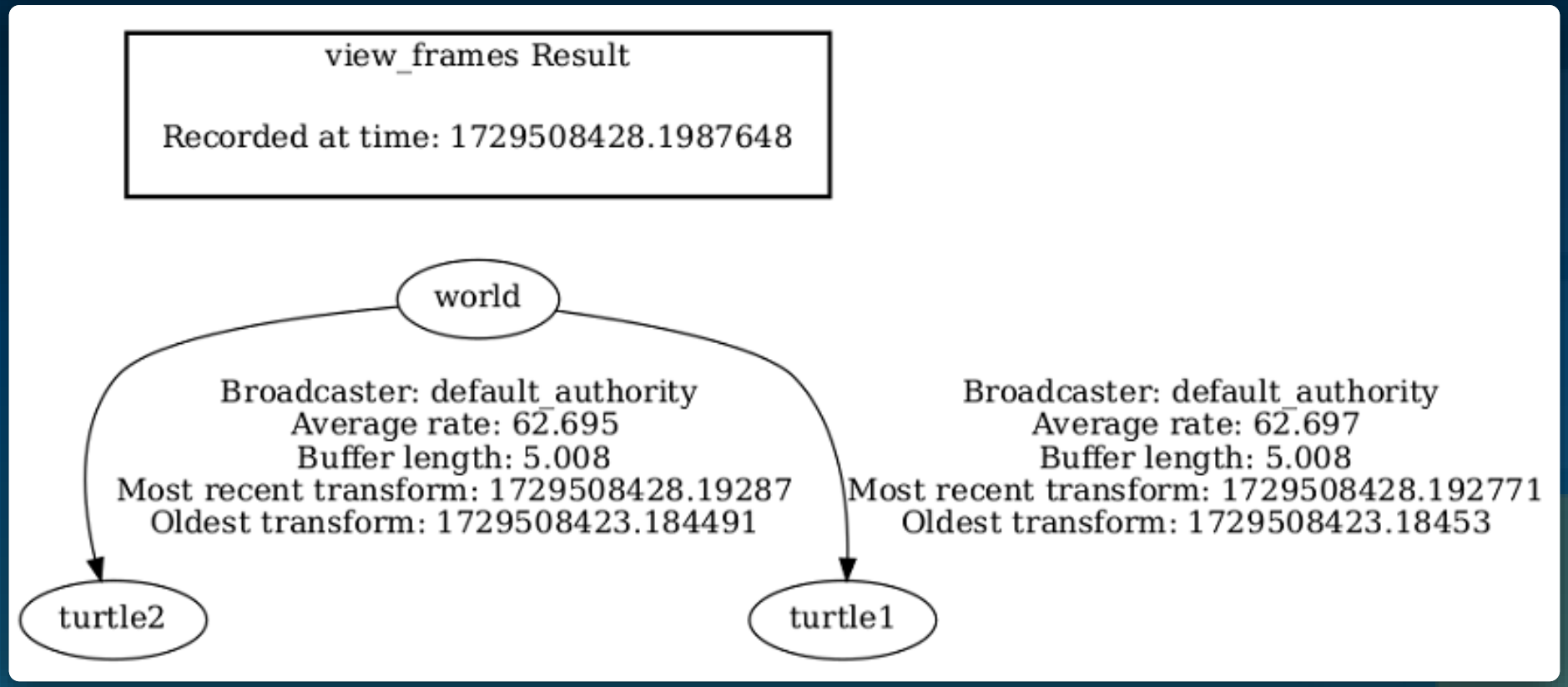
3. 생성된 “frames_2024–10–*****.pdf” 파일 열기



- Broadcaster : 특정 frame변환 정보를 puslishing하는 노드
- Average rate : transform 이 broadcast되는 평균 속도(hz)
- Buffer length : tf2가 transform 데이터를 유지하는 기간(초)
- Most recent tf : 가장 최근에 받은 transform의 timestamp
- Oldest transform : 가장 오래된 transform의 timestamp

✓ Turtlesim 예제– view_frames

4. 해당 파일을 통해 tf2에서 브로드캐스트하는 세 개의 프레임을 확인 가능
   - World frame: turtle1과 turtle2 frame의 부모 frame
   - view_frames는 가장 오래되고 가장 최근의 프레임 변환이 수신된 시기와 디버깅 목적으로 tf2 프레임이 tf2에 게시되는 속도에 대한 진단 정보를 보고함



✓ Turtlesim 예제– tf2_echo

1. tf2_echo는 ROS를 통해 브로드캐스트된 두 프레임 간의 변환을 보고함
2. 다음 명령어를 이용하여 tf2_echo 실행(turtle2 기준으로 turtle1의 위치좌표를 보여줌)

```
ros2 run tf2_ros tf2_echo turtle2 turtle1
```

✓ Turtlesim 예제– tf2_echo

3. 다음과 같은 출력을 통해 tf2_echo 리스너가 ROS2를 통해 broadcasting 된 프레임을 수신할 때 transform이 표시되는 것을 관찰 가능

```
At time 1729511402.418714435
- Translation: [0.000, 0.000, 0.000]
- Rotation: in Quaternion [0.000, 0.000, -0.482, 0.876]
- Rotation: in RPY (radian) [0.000, 0.000, -1.005]
- Rotation: in RPY (degree) [0.000, 0.000, -57.577]
- Matrix:
  0.536  0.844  0.000  0.000
 -0.844  0.536 -0.000  0.000
 -0.000  0.000  1.000  0.000
  0.000  0.000  0.000  1.000
```

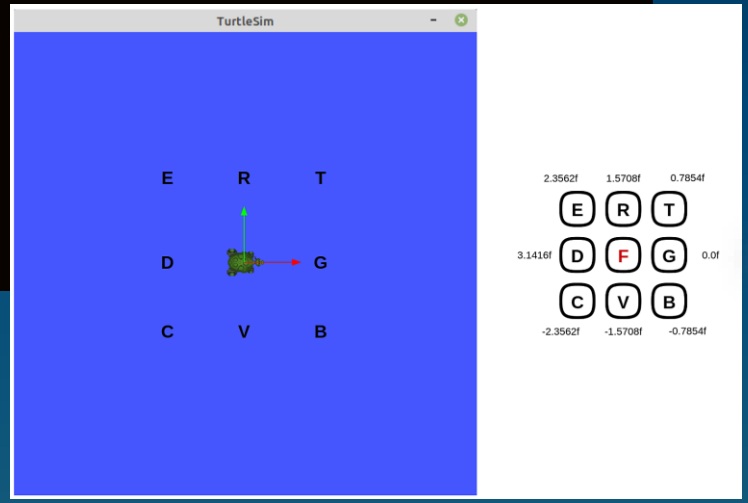
← (x, y, z) 좌표

← Quaternion 좌표(x, y, z, w)

← RPY : Roll(x축 중심), Pitch(y축 중심), Yaw(z축 중심)

← Yaw(z축 중심)의 경우 평면에서는 방향 틀기

- Timestamp
- Turtle2 좌표계 기준으로 turtle1위치(m 단위)
- Turtle2 기준으로 turtle1이 어떤 방향으로 회전되어 있는지



✓ Turtlesim 예제– rviz

1. Rviz2 역시 tf2 프레임을 검사하는 데 유용한 시각화 도구로 사용 가능
   - -d 옵션을 사용하여 구성 파일로 시작하여 rviz2를 사용하여 거북이 프레임을 관찰 가능

2. 앞의 상태를 계속 유지한 상태에서 다른 터미널창에서 다음 명령어를 통해 rviz2 실행

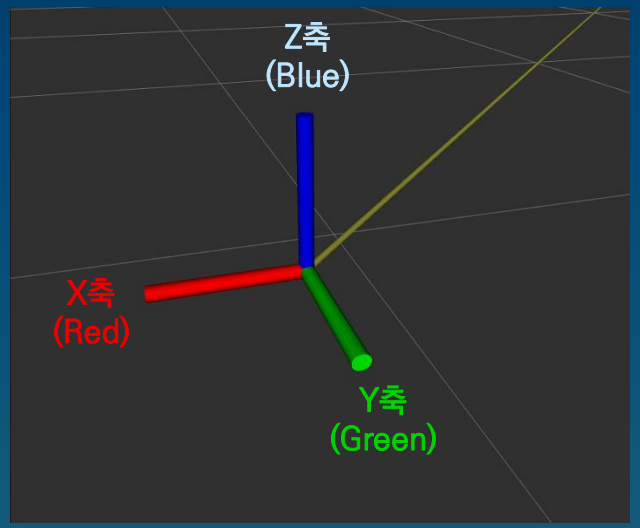
```
ros2 run rviz2 rviz2 -d $(ros2 pkg prefix --share turtle_tf2_py)/rviz/turtle_rviz.rviz
```

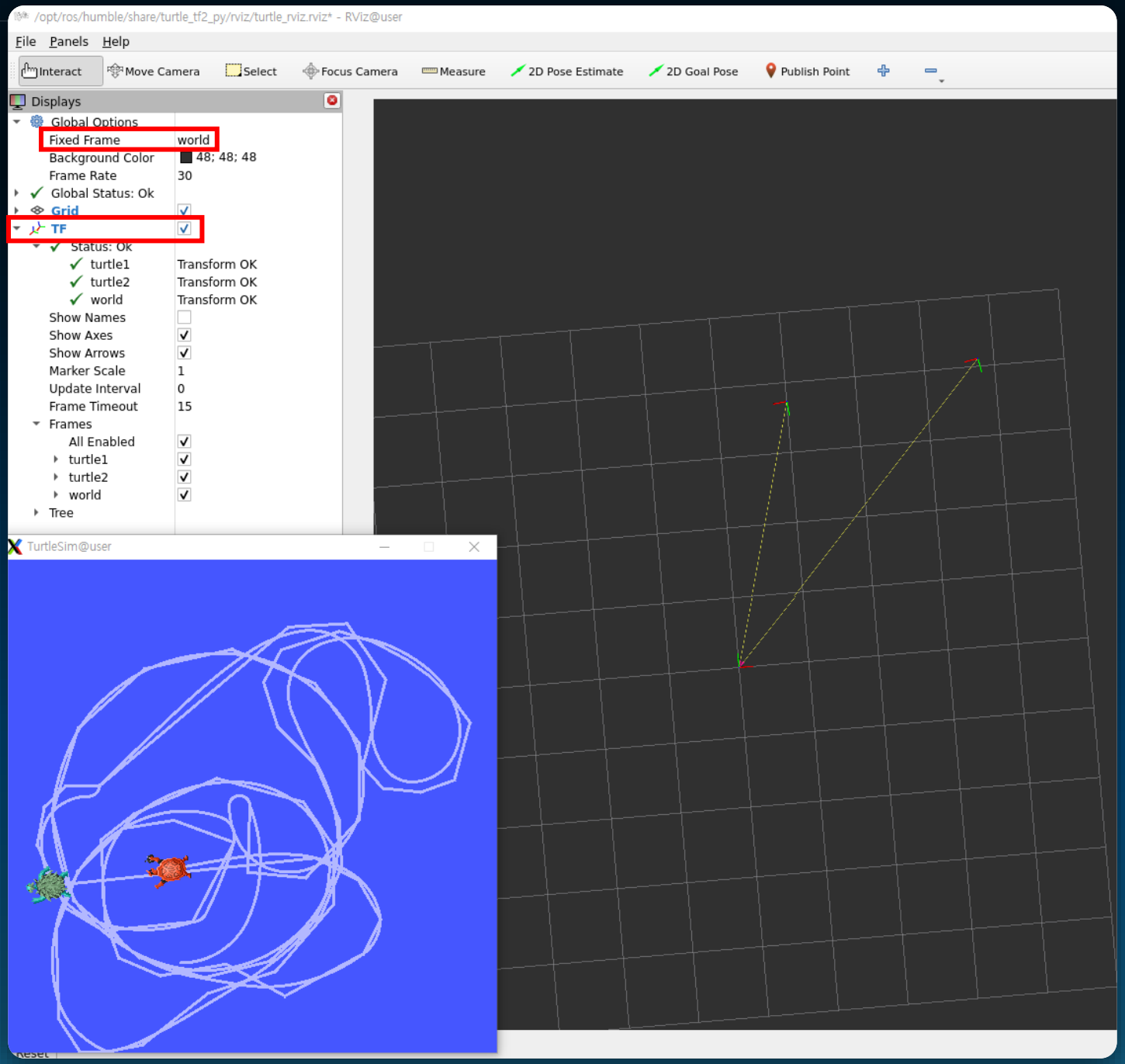
✓ Turtlesim 예제– rviz

3. 사이드 바를 통해 tf2에서 broadcast 된 frame을 관찰 가능하며, 거북이를 움직이면 rviz에서도 frame이 움직이는 것을 관찰 가능

[실습해보기]

- Show Names : check box 체크 → 이름보기
- Marker Scale 값 바꿔보기 : 1 → 5
- Teleop_key 움직이며 Rviz에서 turtle 움직임 관찰하기(World좌표)

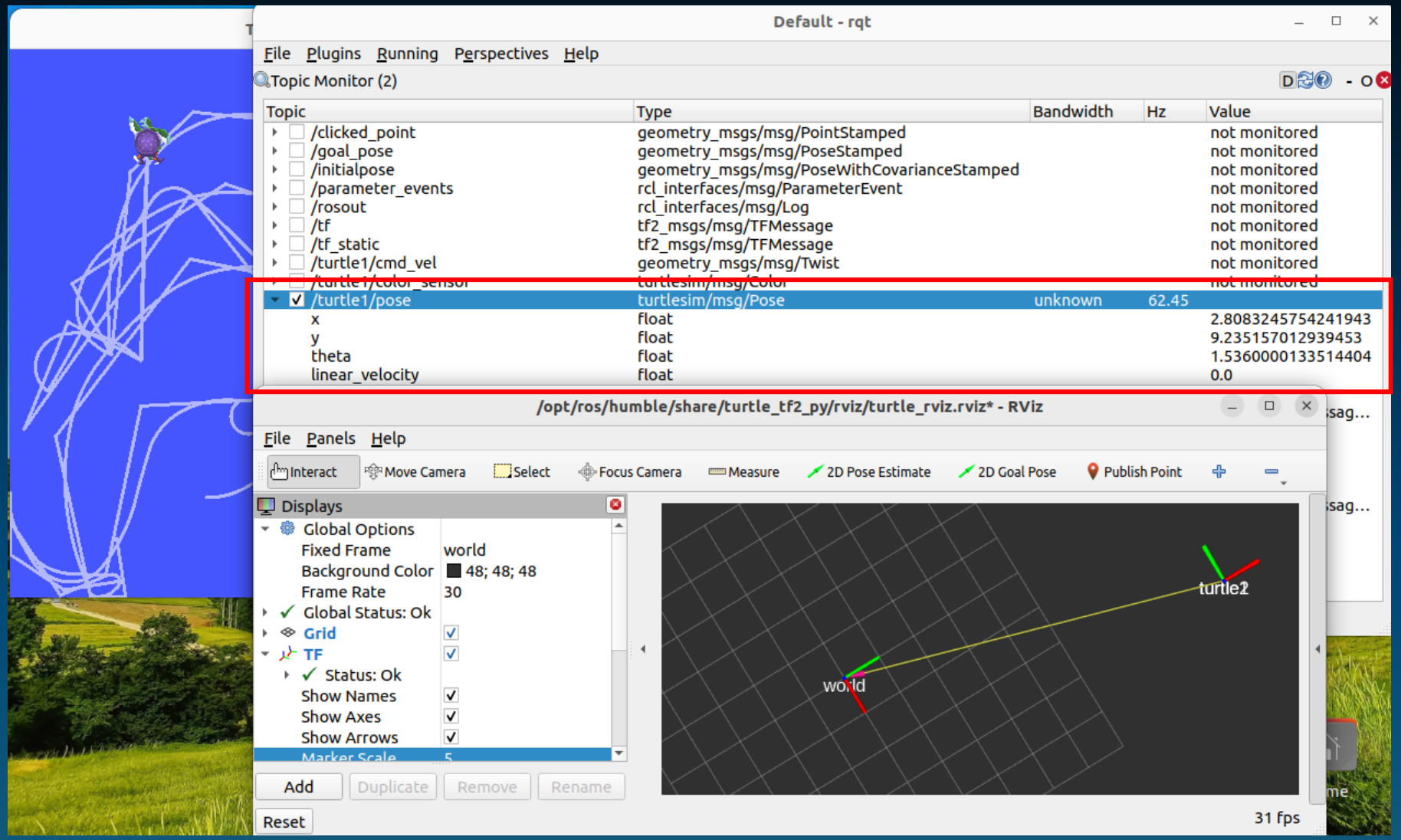




✓ Turtlesim 예제– rviz

[실습해보기]

- RQT의 pose에서 turtle1과 2의 좌표 확인해보기
- ros2 topic echo turtle1/pose

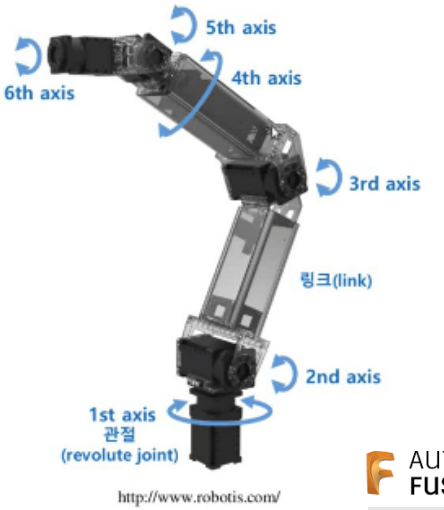


URDF

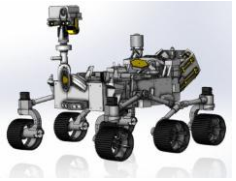
URDF

URDF

- URDF(Universal Robot Description Format)는 ROS에서 로봇의 형상과 구성을 지정하기 위한 파일 형식
- 로봇의 링크(link), 조인트(joint), 센서, 액추에이터 등의 물리적 요소들을 정의하여 로봇의 3D 모델을 시뮬레이션하거나 실제 로봇 제어 시스템에서 사용할 수 있게 도와줌
- 주요 구성 요소는 다음과 같음
  - **링크(link)** : 로봇의 물리적인 부분을 나타내며, 고체 물체로 이해할 수 있음. 각 링크는 모양, 관성, 마찰 특성 등과 같은 속성들을 가짐.
  - **조인트(joint)** : 두 링크를 연결하여 로봇이 움직일 수 있게 하는 연결점. 회전 운동이나 직선 운동을 정의할 수 있음
  - **재질 및 텍스처** : 로봇의 각 링크에 적용할 재질이나 텍스처를 정의하여 외형을 시뮬레이션에서 표현할 수 있음
  - **센서 및 액추에이터** : URDF 파일을 확장하여 센서나 액추에이터와 같은 로봇의 기능적 요소들을 정의할 수 있음



AUTODESK® FUSION 360™



SOLIDWORKS

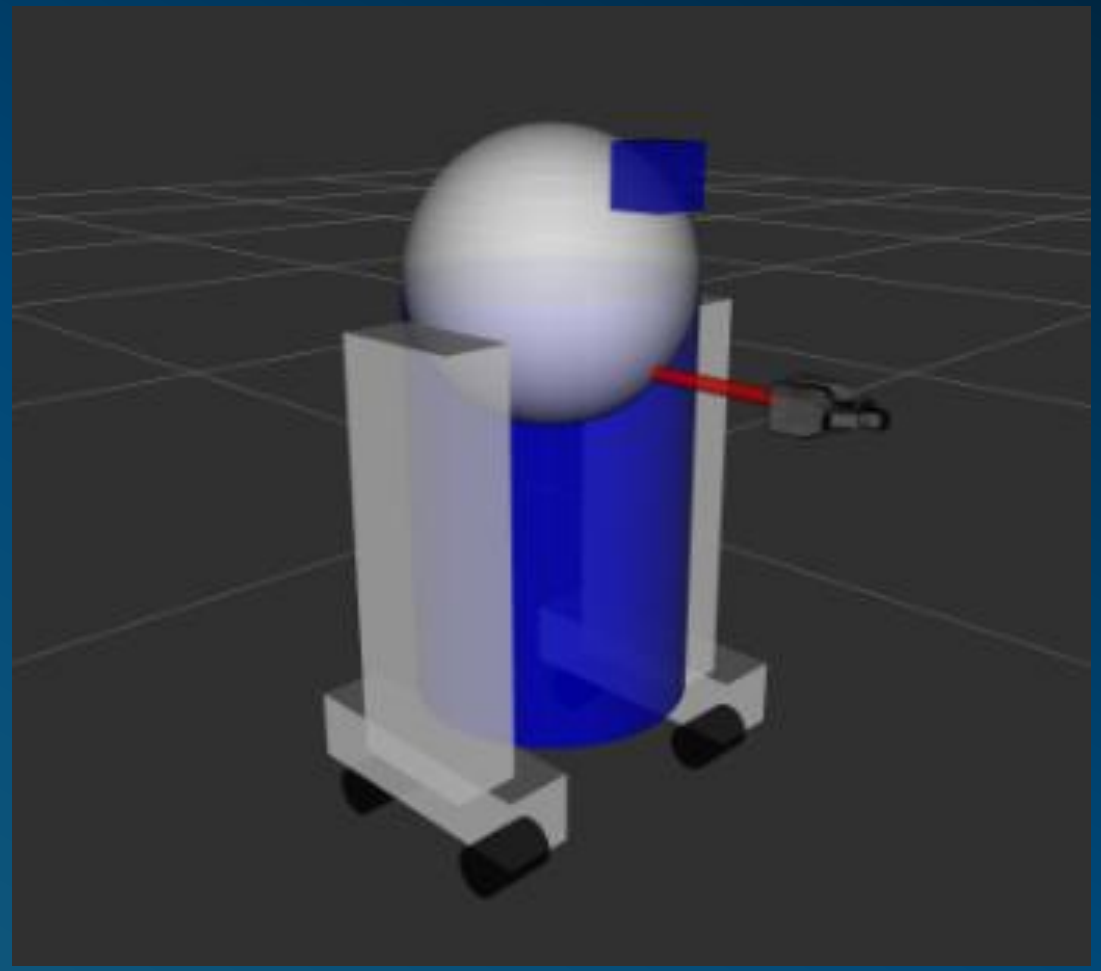
```
victor@victor-VirtualBox:~$ sudo apt install gazebo
Reading package lists... Done
Building dependency tree... Done
Reading state information... Done
The following additional packages will be installed:
```

로봇의 시각적 모델 만들기

- rviz를 통해 확인 가능한 로봇의 시각적 모델 만들기

✓ 로봇의 시각적 모델 만들기

- 본 섹션에서는 아래와 같이 생긴 로봇을 URDF를 이용하여 만들 예정



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 1

1. 다음 명령어를 이용하여 urdf-tutorial 설치

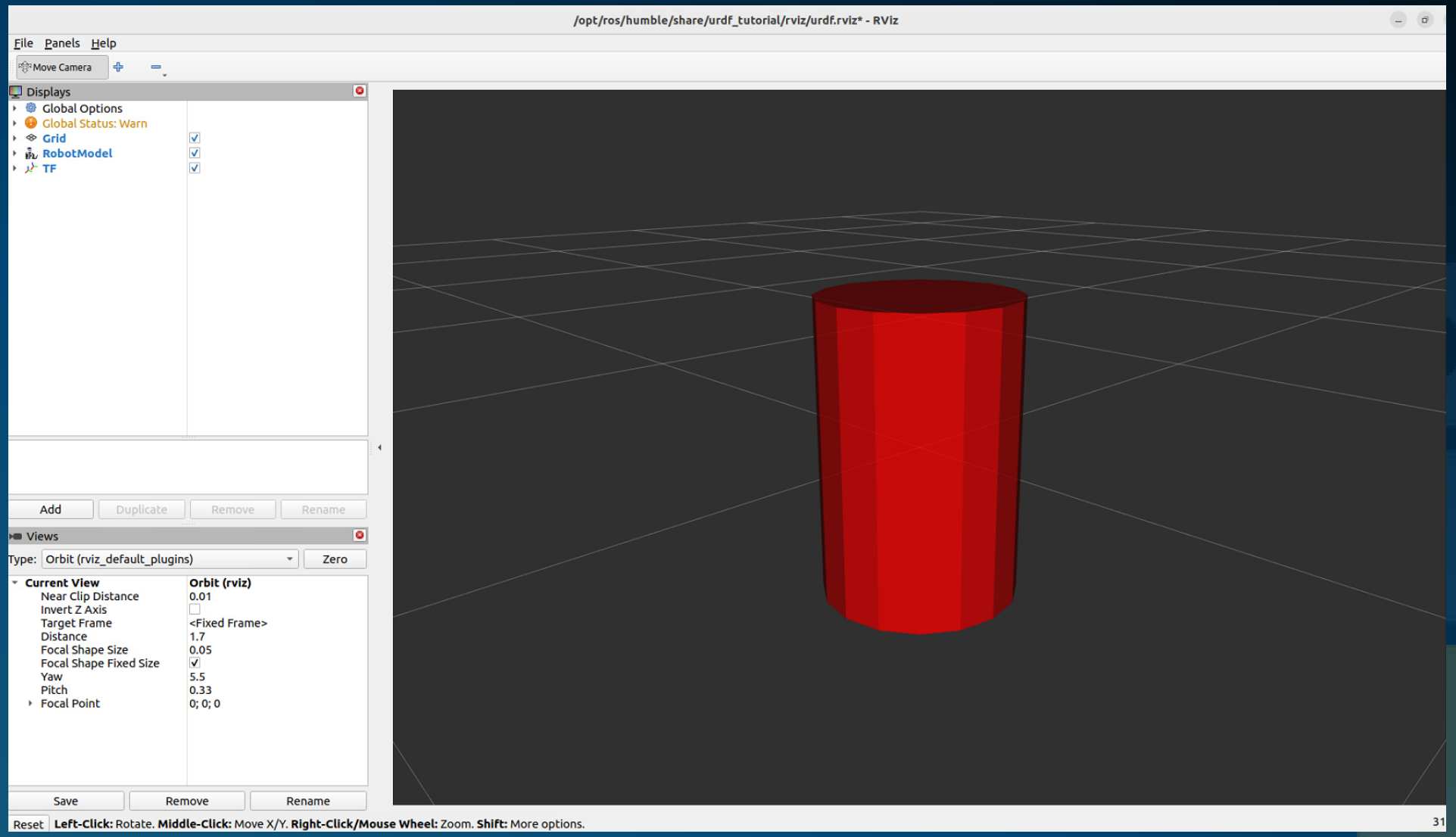
```
sudo apt install ros-humble-urdf-tutorial
```

2. 다음 명령어를 이용하여 urdf 파일 실행

```
ros2 launch urdf_tutorial display.launch.py model:=urdf/01-myfirst.urdf
```

✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 1

3. 실행 결과



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 1 – 코드

- 다음 명령어를 이용하여 urdf 파일의 코드 확인(아래 링크를 통해서도 확인 가능)

```
cat /opt/ros/humble/share/urdf_tutorial/urdf/01-myfirst.urdf
```

GitHub https://github.com/ros/urdf_tutorial/blob/ros2/urdf/01-myfirst.urdf

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="myfirst">
  <link name="base_link">
    <visual>
      <geometry>
        <cylinder length="0.6" radius="0.2"/>
      </geometry>
    </visual>
  </link>
</robot>
```

✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 1 – 코드

- XML 버전 선언

```
<?xml version="1.0"?>
```

- Robot 태그: URDF 파일을 사용할 때 로봇을 구별할 수 있는 이름 선언

```
<robot name="myfirst">
```

- 링크 선언: 링크의 이름 선언 후 geometry 태그 안에서 cylinder 태그를 사용해 길이 0.6m, 반지름 0.2m의 원기둥을 선언

```
  <link name="base_link">
    <visual>
      <geometry>
        <cylinder length="0.6" radius="0.2" />
      </geometry>
    </visual>
  </link>
</robot>
```

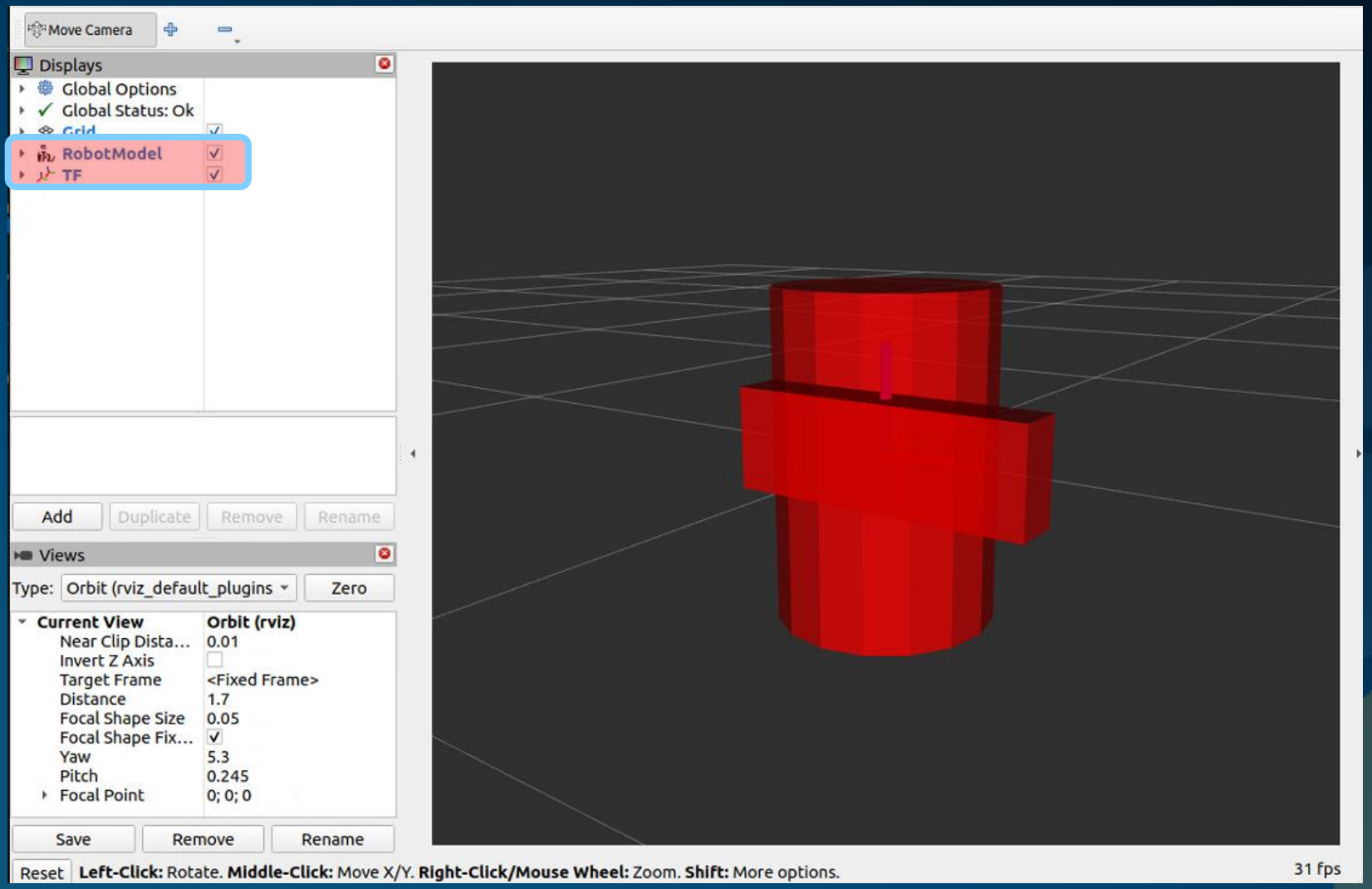
✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 2

- 다음 명령어를 이용하여 두 번째 urdf 파일 실행

```
ros2 launch urdf_tutorial display.launch.py model:=urdf/02-multipleshapes.urdf
```

✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 2

- 실행 결과(왼쪽의 tf 혹은 RobotModel등의 체크박스 해제 유무에 따라 다소 다르게 보일 수도 있습니다)



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 2 - 코드

- 다음 명령어를 이용하여 urdf 파일의 코드 확인(링크를 통해서도 확인 가능)

```
cat /opt/ros/humble/share/urdf_tutorial/urdf/02-multipleshapes.urdf
```

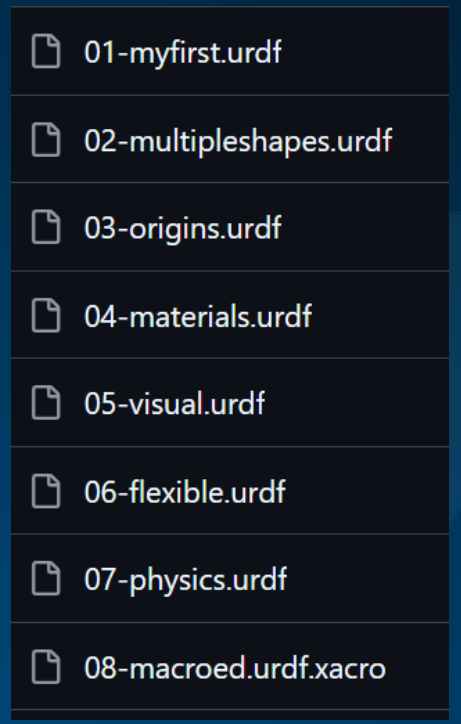
```xml
<?xml version="1.0"?>
<robot name="multipleshapes">
  <link name="base_link">
    <visual>
      <geometry>
        <cylinder length="0.6" radius="0.2"/>
      </geometry>
    </visual>
  </link>

  <link name="right_leg">
    <visual>
      <geometry>
        <box size="0.6 0.1 0.2"/>
      </geometry>
    </visual>
  </link>

  <joint name="base_to_right_leg" type="fixed">
    <parent link="base_link"/>
    <child link="right_leg"/>
  </joint>

</robot>
```

← 크기정보(X=0.6, Y=0.1, Z=0.2)

← Joint 정의

GitHub

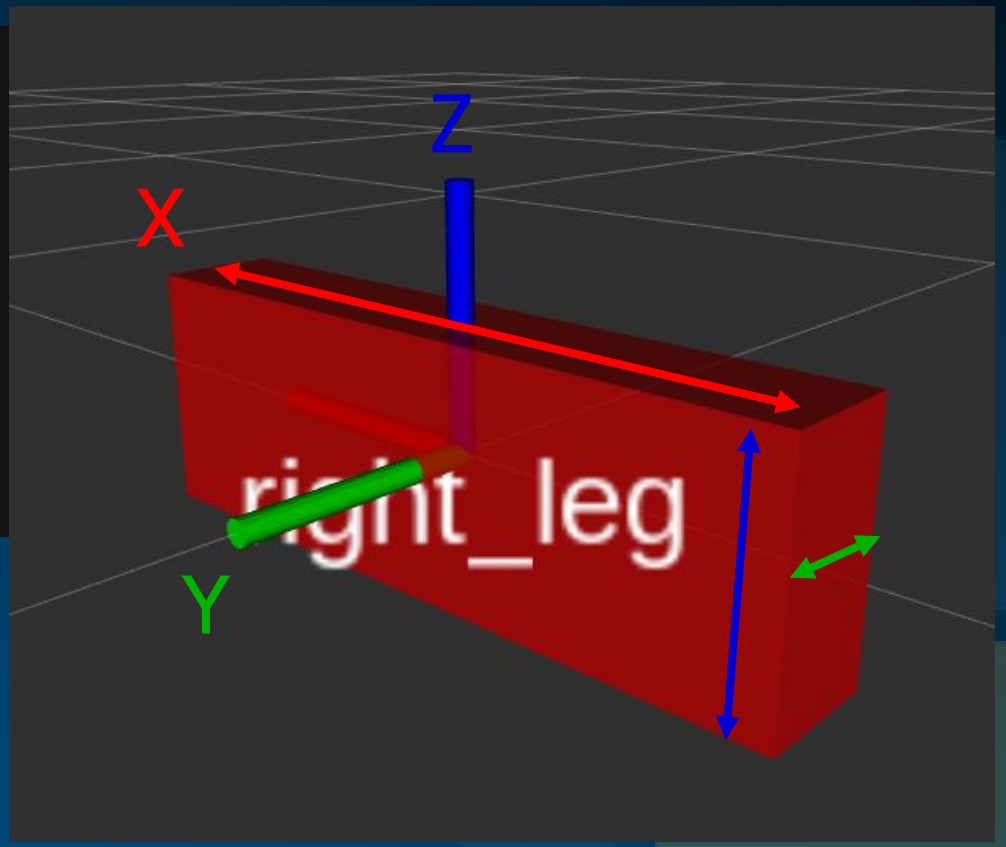
https://github.com/ros/urdf_tutorial/tree/ros2/urdf



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 2 – 코드

- right_leg 링크 : 링크의 이름 선언 후 geometry 태그 안에서 box 태그를 사용해 x, y, z의 크기가 각각 0.6, 0.1, 0.2인 박스 선언

```
<link name="right_leg">
  <visual>
    <geometry>
      <box size="0.6 0.1 0.2"/>
    </geometry>
  </visual>
</link>
```



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 2 – 코드

- base와 right_leg를 연결하는 조인트: 조인트 이름 선언 후 type="fixed"를 통해 고정 조인트임을 선언
- Parent link와 child link를 통해 어느 링크가 부모이고 어느 링크가 자식임을 선언
  - Parent link(부모 링크) : 특정 joint를 기준으로 상위에 위치하는 링크로, Joint가 연결되는 주체 링크이며, joint의 움직임에 따라 child link를 제어하거나 지원
  - Child link(자식 링크) : 특정 joint를 기준으로 하위에 위치하는 링크로, Parent link로부터 동역학적 영향을 전달받음

```
<joint name="base_to_right_leg" type="fixed">
  <parent link="base_link"/>
  <child link="right_leg"/>
  <origin xyz="0 -0.22 0.25"/>
</joint>
```

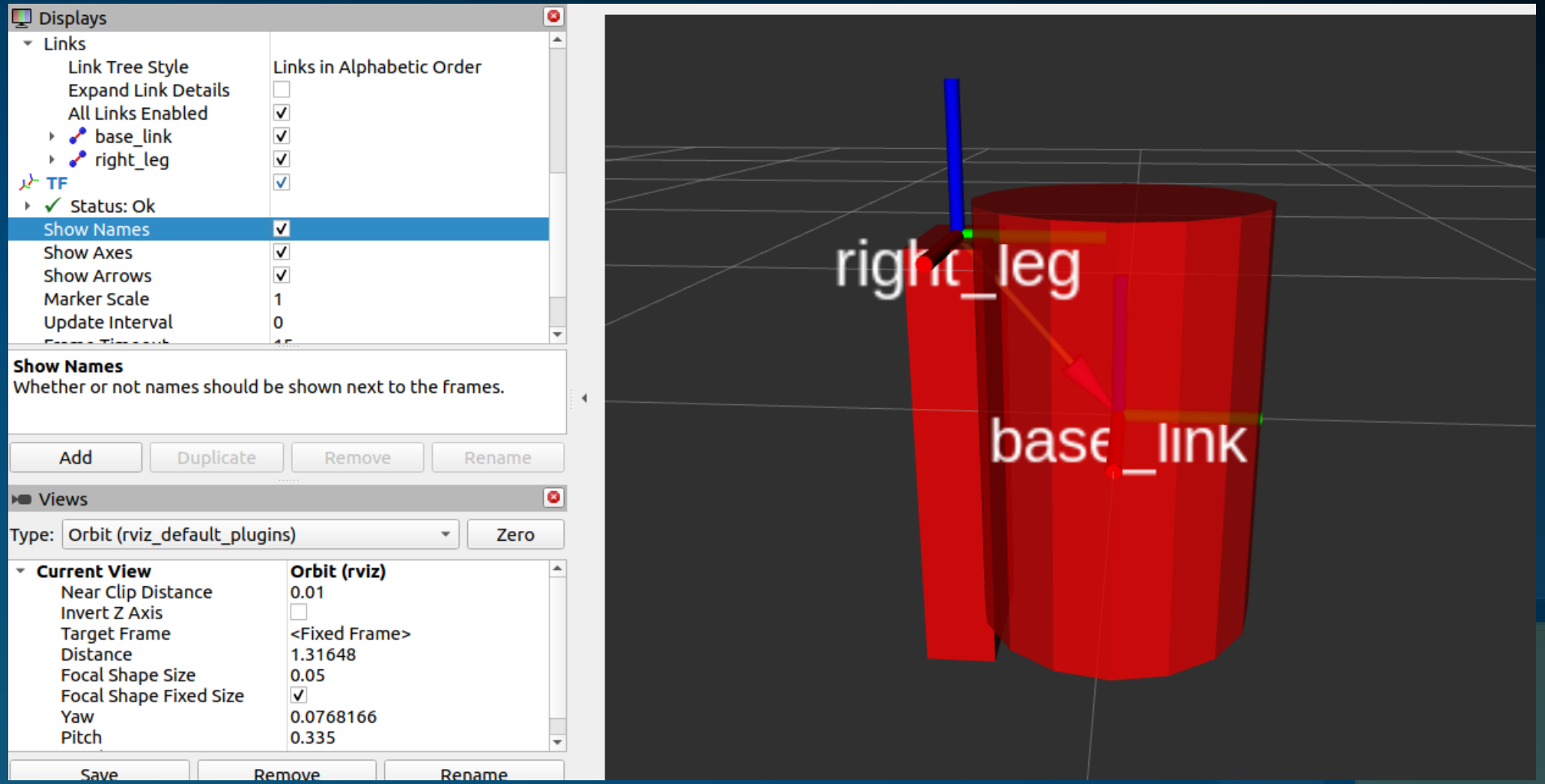
✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 3

1. 다음 명령어를 이용하여 세 번째 urdf 파일 실행: 다리의 위치를 알맞게 조정해준 파일

```
ros2 launch urdf_tutorial display.launch.py model:=urdf/03-origins.urdf
```

✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 3

2. 실행 결과(왼쪽의 tf 혹은 RobotModel등의 체크박스 해제 유무에 따라 다소 다르게 보일 수도 있습니다)

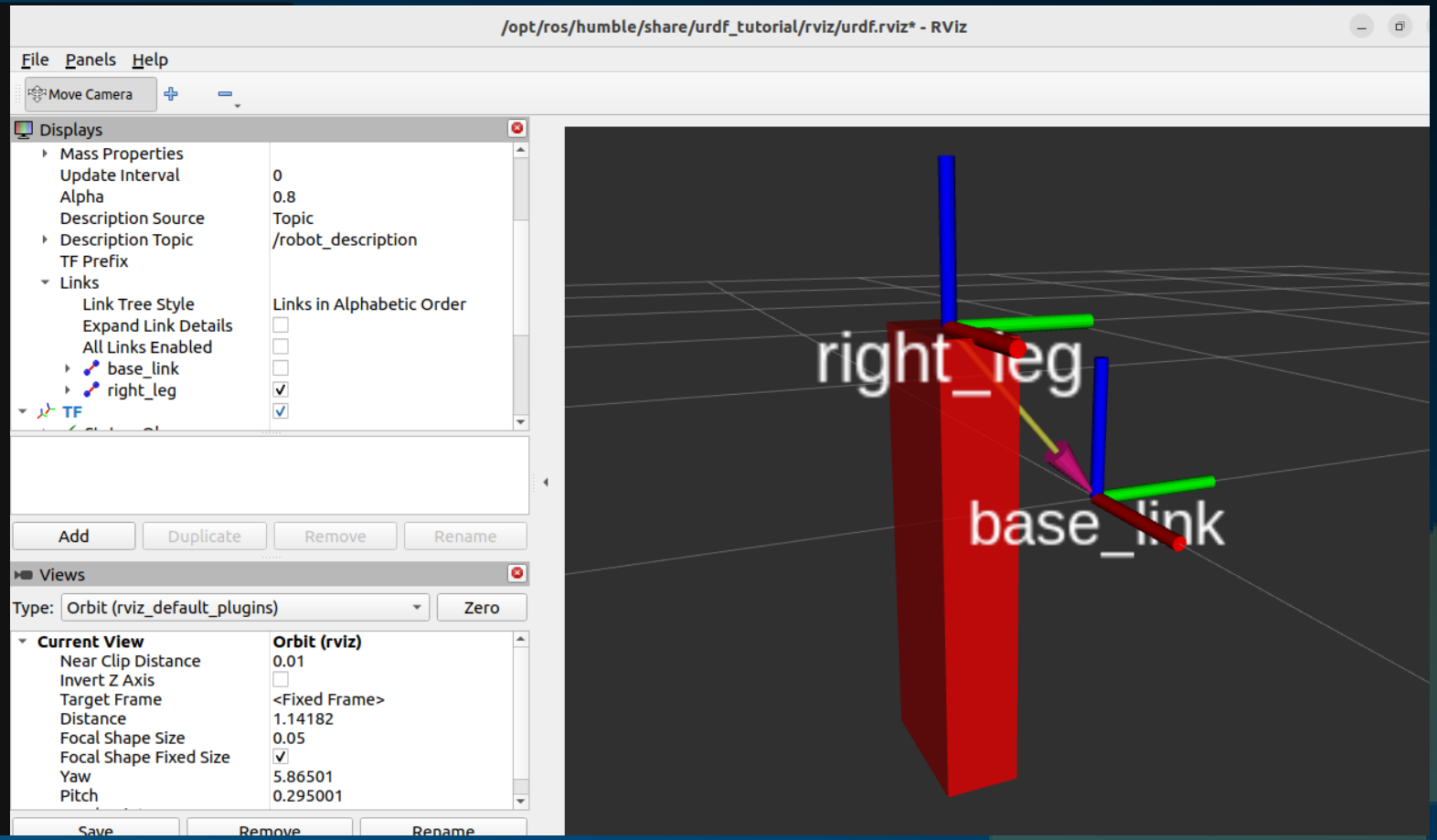


✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 3 – 코드

- 다음 명령어를 이용하여 urdf 파일의 코드 확인(링크를 통해서도 확인 가능)

```
cat /opt/ros/humble/share/urdf_tutorial/urdf/03-origins.urdf
```

```xml
<?xml version="1.0"?>
<robot name="origins">
  <link name="base_link">
    <visual>
      <geometry>
        <cylinder length="0.6" radius="0.2"/>
      </geometry>
    </visual>
  </link>

  <link name="right_leg">
    <visual>
      <geometry>
        <box size="0.6 0.1 0.2"/>
      </geometry>
      <origin rpy="0 1.57075 0" xyz="0 0 -0.3"/>
    </visual>
  </link>

  <joint name="base_to_right_leg" type="fixed">
    <parent link="base_link"/>
    <child link="right_leg"/>
    <origin xyz="0 -0.22 0.25"/>
  </joint>

</robot>
```



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 3 – 코드

- Origin 추가 : 기존 링크에 origin을 통해 해당 부분이 공간상에서 어디에 위치하고 어떻게 회전되어 있는 지를 선언

```
…
<link name="right_leg">
  <visual>
    <geometry>
      <box size="0.6 0.1 0.2"/>
    </geometry>
    <origin rpy="0 1.57075 0" xyz="0 0 -0.3"/>
  </visual>
</link>

<joint name="base_to_right_leg" type="fixed">
  <parent link="base_link"/>
  <child link="right_leg"/>
  <origin xyz="0 -0.22 0.25"/>
</joint>
…
```

Y축으로 90도(1.57rad) 회전, Z방향으로 −0.3만큼 이동

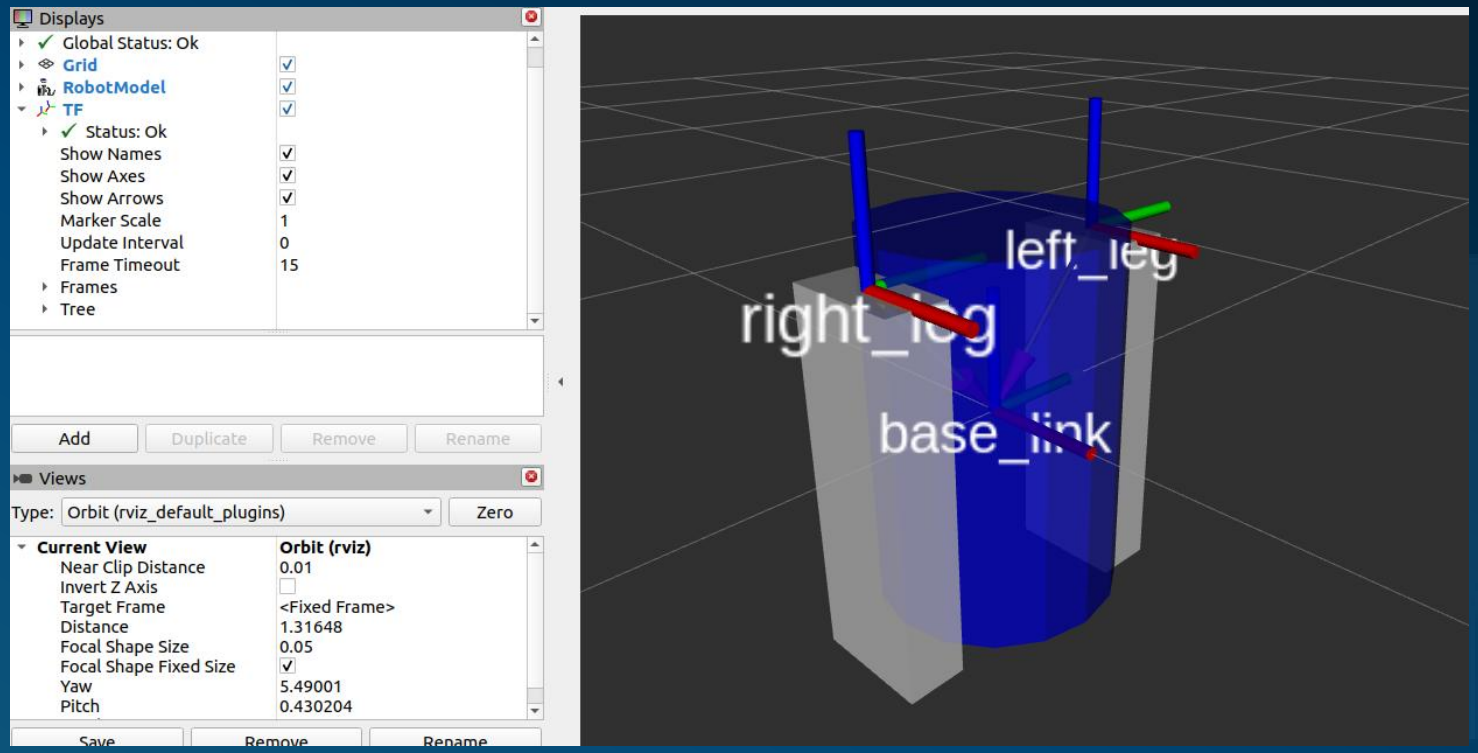
Base좌표계 기준으로
Y방향으로 −0.22(왼쪽), Z방향으로 0.25 만큼 이동

1. link에서의 origin
   - 링크의 좌표계를 기준으로 시각적 요소(박스 형태의 다리)의 위치와 자세를 정의
   - 링크의 좌표계는 부모 링크의 좌표계에서 조인트를 통해 정의됨
2. joint에서의 origin :
   - 자식 링크(child link)의 좌표계가 부모 링크의 좌표계에서 어떻게 배치되는지 정의

✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 4

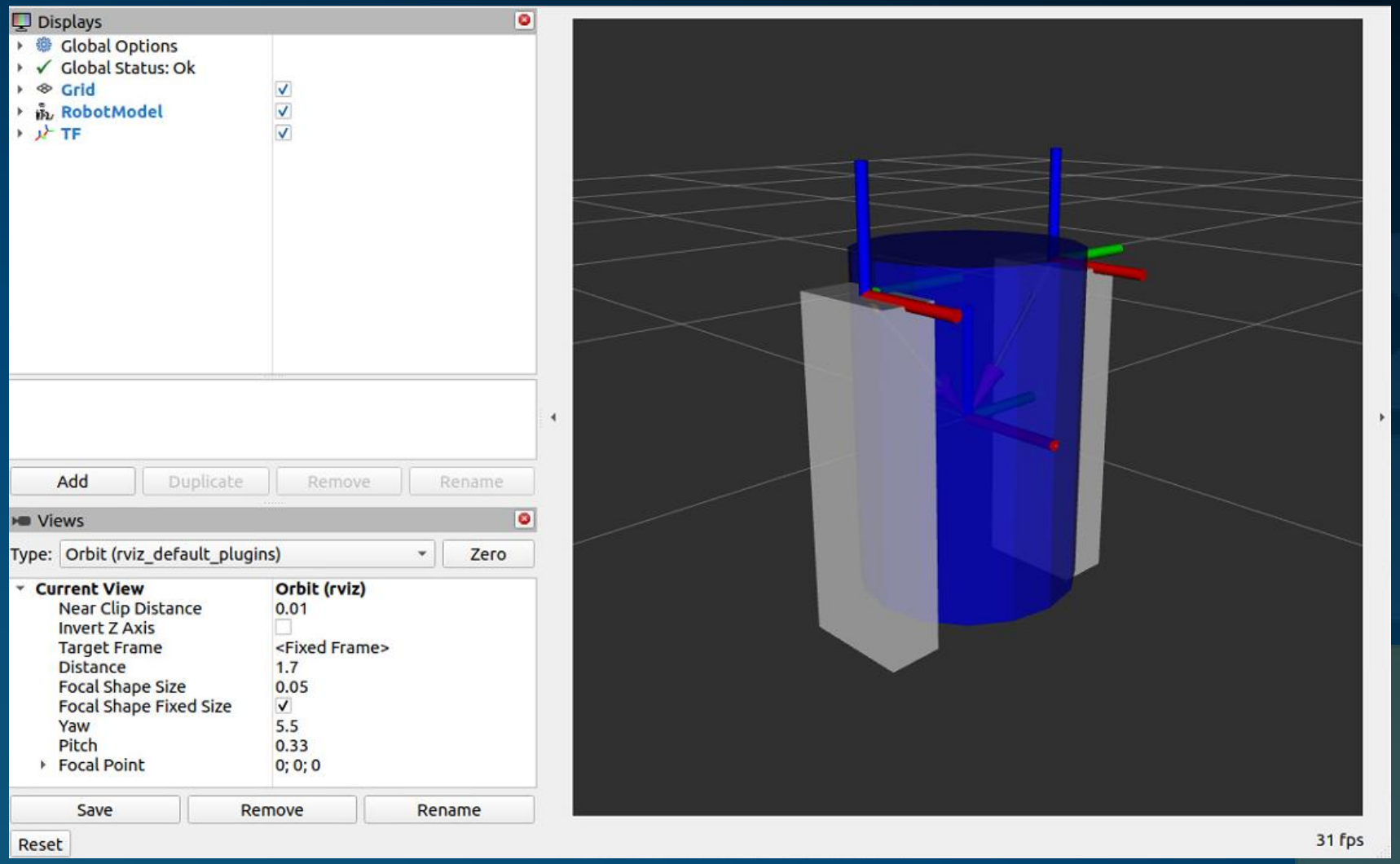
1. 다음 명령어를 이용하여 네 번째 urdf 파일 실행: 로봇에 색 정보와 오른쪽 다리를 추가한 파일

```
ros2 launch urdf_tutorial display.launch.py model:=urdf/04-materials.urdf
```



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 4

2. 실행 결과(왼쪽의 tf 혹은 RobotModel등의 체크박스 해제 유무에 따라 다소 다르게 보일 수도 있습니다)

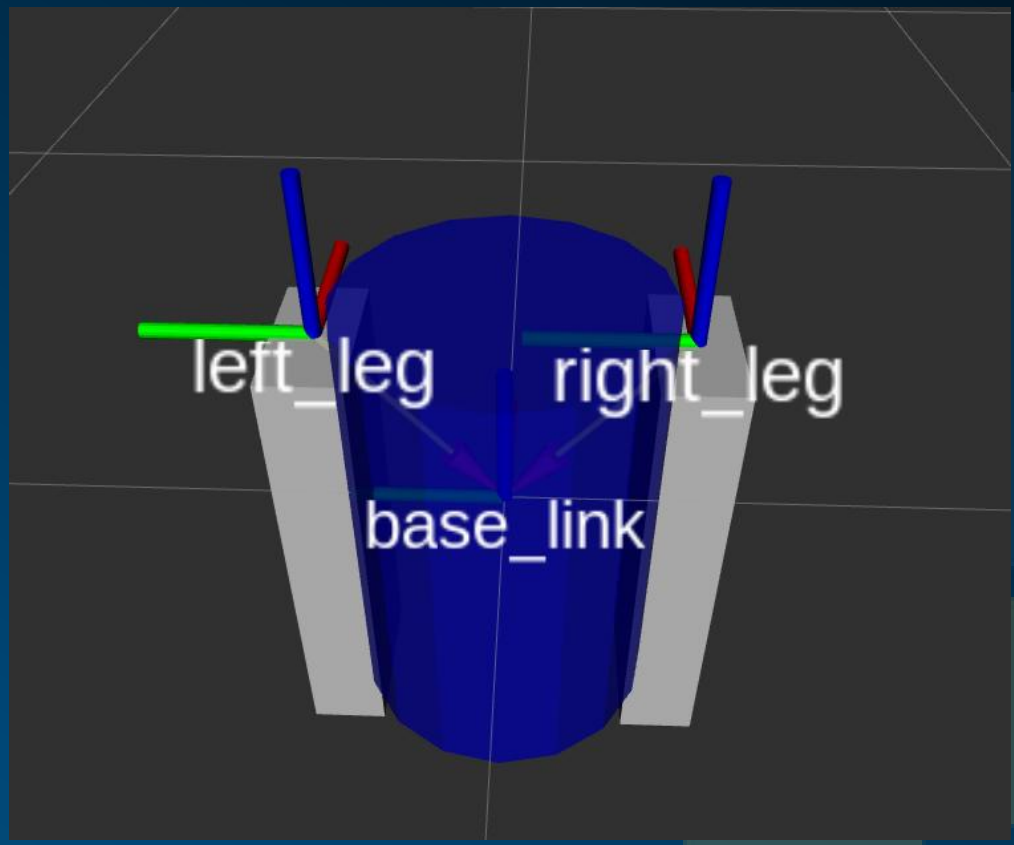


✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 4

- 다음 명령어를 이용하여 urdf 파일의 코드 확인(링크를 통해서도 확인 가능)

```
cat /opt/ros/humble/share/urdf_tutorial/urdf/04-materials.urdf
```

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="materials">

  <material name="blue">
    <color rgba="0 0 0.8 1" />
  </material>

  <material name="white">
    <color rgba="1 1 1 1" />
  </material>

  <link name="base_link">
    <visual>
      <geometry>
        <cylinder length="0.6" radius="0.2" />
      </geometry>
      <material name="blue" />
    </visual>
  </link>
  ...
```



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 4 – 코드

- 재질(material) 정의 : 파란색 재질과 빨간색 재질 선언. 값은 rgba로 빨강, 초록, 파랑, 투명도 순으로 나열되어 있음

```
<material name="blue">
   <color rgba="0 0 0.8 1"/>    ← 0 : 투명, 1 : 불투명
 </material>

 <material name="white">
   <color rgba="1 1 1 1"/>
 </material>
```

✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 4 – 코드

- 왼쪽, 오른쪽 동일하게 선언

- Base_link(원통) 위쪽에 두 개의 다리(right_leg, left_leg)가 고정됨
- Right_leg는 오른쪽(−0.22, 0.25), left_leg는 왼쪽(0.22, 0.25)에 위치
- 두 다리는 Y축 기준 90도(1.57rad) 회전하여 긴 면이 Z축을 바라보게 됨

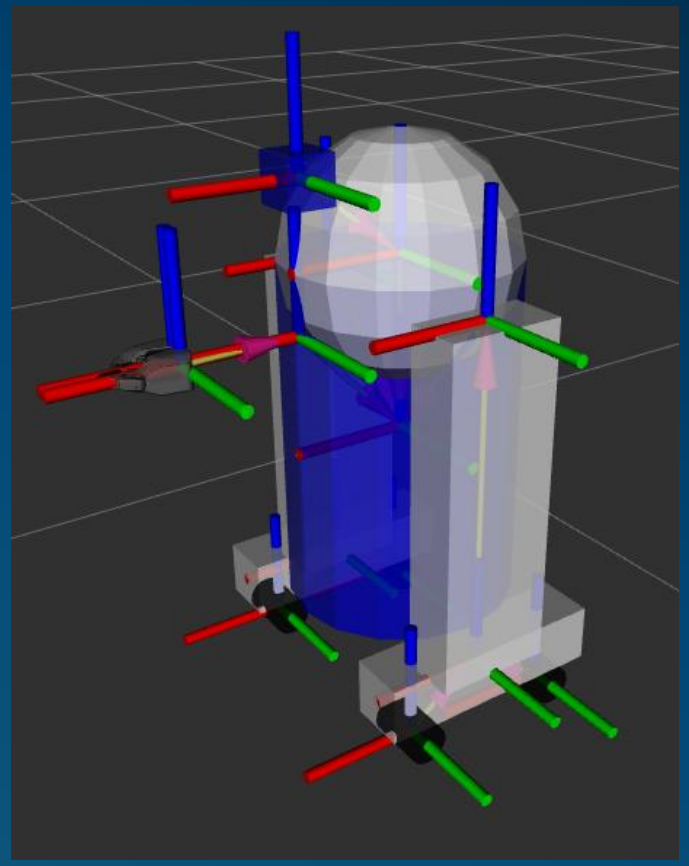
```
<link name="left_leg">
  <visual>
    <geometry>
      <box size="0.6 0.1 0.2"/>
    </geometry>
    <origin rpy="0 1.57075 0" xyz="0 0 -0.3"/>
    <material name="white"/>
  </visual>
</link>

<joint name="base_to_left_leg" type="fixed">
  <parent link="base_link"/>
  <child link="left_leg"/>
  <origin xyz="0 0.22 0.25"/>
</joint>
```

```
<link name="right_leg">
  <visual>
    <geometry>
      <box size="0.6 0.1 0.2"/>
    </geometry>
    <origin rpy="0 1.57075 0" xyz="0 0 -0.3"/>
    <material name="white"/>
  </visual>
</link>

<joint name="base_to_right_leg" type="fixed">
  <parent link="base_link"/>
  <child link="right_leg"/>
  <origin xyz="0 -0.22 0.25"/>
</joint>
```

✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 5

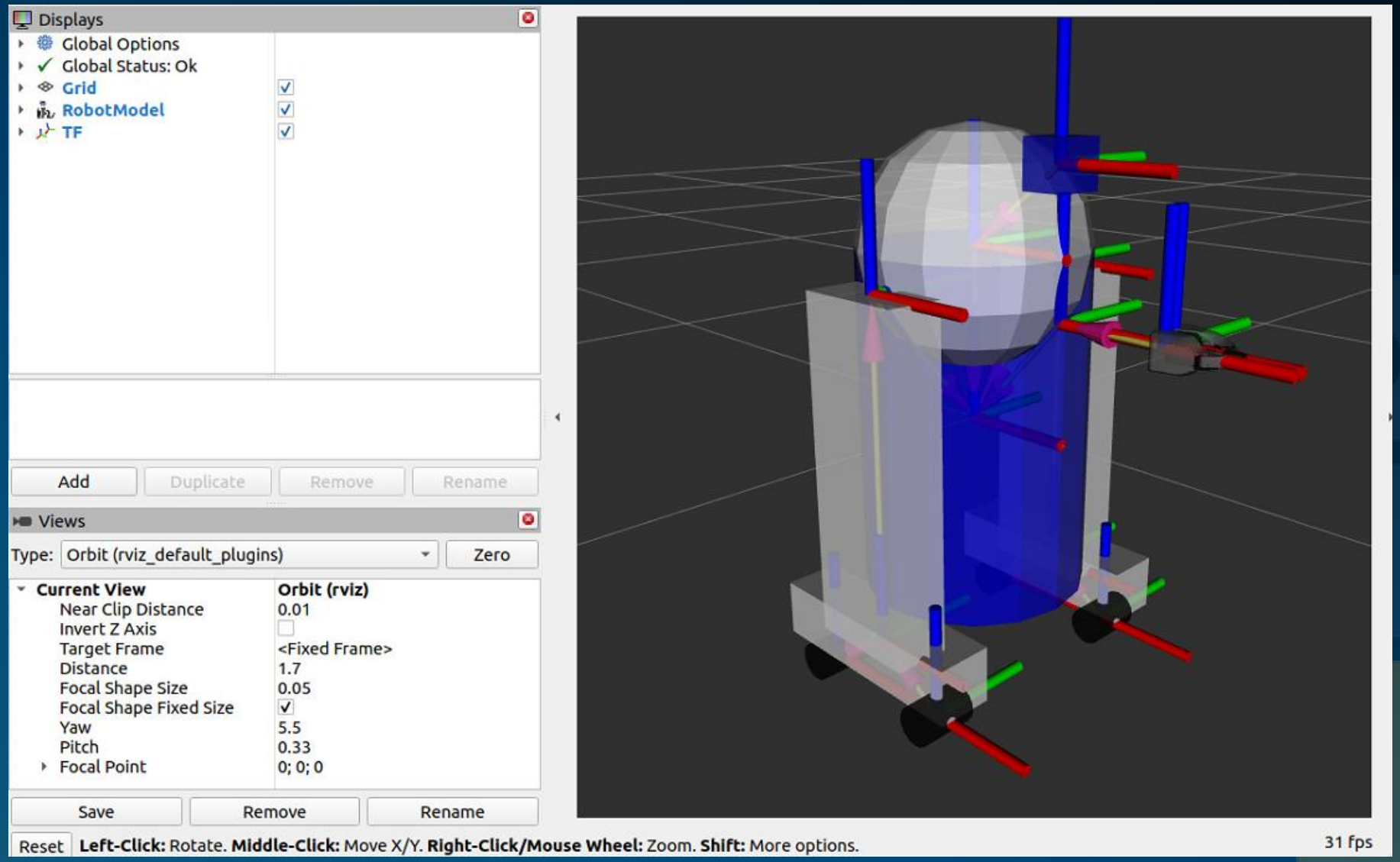
1. 다음 명령어를 이용하여 다섯 번째 urdf 파일 실행: 로봇에 여러 부속품들 추가

```
ros2 launch urdf_tutorial display.launch.py model:=urdf/05-visual.urdf
```



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 5

2. 실행 결과(왼쪽의 tf 혹은 RobotModel등의 체크박스 해제 유무에 따라 다소 다르게 보일 수도 있습니다)

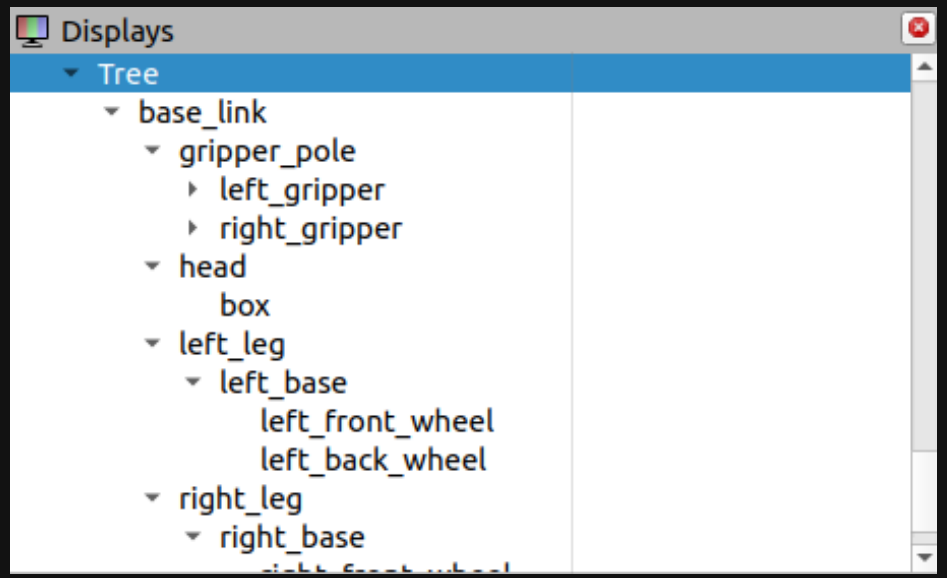


✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 5 – 코드

- 다음 명령어를 이용하여 urdf 파일의 코드 확인(링크를 통해서도 확인 가능)

```
cat /opt/ros/humble/share/urdf_tutorial/urdf/05-visual.urdf
```

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="materials">

  <material name="blue">
    <color rgba="0 0 0.8 1"/>
  </material>

  <material name="white">
    <color rgba="1 1 1 1"/>
  </material>

  …
```



✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 5 – 코드

- 다음과 같이 그리퍼, 머리 등 여러 부속이 추가되어 있음

```
…
 <link name="right_gripper">
    <visual>
      <origin rpy="-3.1415 0 0" xyz="0 0 0"/>
      <geometry>
        <mesh filename="package://urdf_tutorial/meshes/l_finger.dae"/>
      </geometry>
    </visual>
  </link>
…
 <link name="head">
    <visual>
      <geometry>
        <sphere radius="0.2"/>
      </geometry>
      <material name="white"/>
    </visual>
  </link>
…
```

DAE파일(COLLADA)

- Digital Asset Exchange. 3D 모델 파일
- XML형식으로 저장되어 3D소프트웨어간 데이터 교환을 쉽게 해 줌
- 기하학적 정보 외 재질, 조명, 애니매이션 등도 포함
- URDF와 함께 사용하며 화려한 시각모델을 표현
- COLLAborative Design Activity

STL파일(STereoLithography)

- 3D 프린팅 및 CAD프로그램에서 널리 사용되는 파일 형식
- 재질, 색상, 애니매이션 정보는 없고 오직 기하학적 정보만 있음
- 3D프린팅에서 가장 많이 사용되고 COLLADA파일보다 단순함
- Gazebo에서 사용

✓ 로봇의 시각적 모델 만들기 – CAD

1. 실제 현업에서는 손으로 일일이 URDF 파일을 만드는 경우는 적음
2. URDF에는 3D모델이 없고 외부 참조만 함
3. CAD 및 모델링 프로그램에서 URDF 모델을 Export 해서 사용함
4. ROS 핵심 유지 관리자는 이러한 패키지를 유지 관리하지 않으므로 본 수업에서는 다루지 않음
5. 다만, 아래 링크를 참조하면 더 자세한 정보를 얻을 수 있음

https://docs.ros.org/en/humble/Tutorials/Intermediate/URDF/Exporting-an-URDF-File.html

목적	추천프로그램
로봇 부품, 기계 구조	FreeCAD. Fusion360
복잡한 모양. 텍스쳐까지 표현	Blender
가볍게 초보용 모델링	TinkerCAD(STL만)
건축물 모델, 구조물 표현	SketchUp

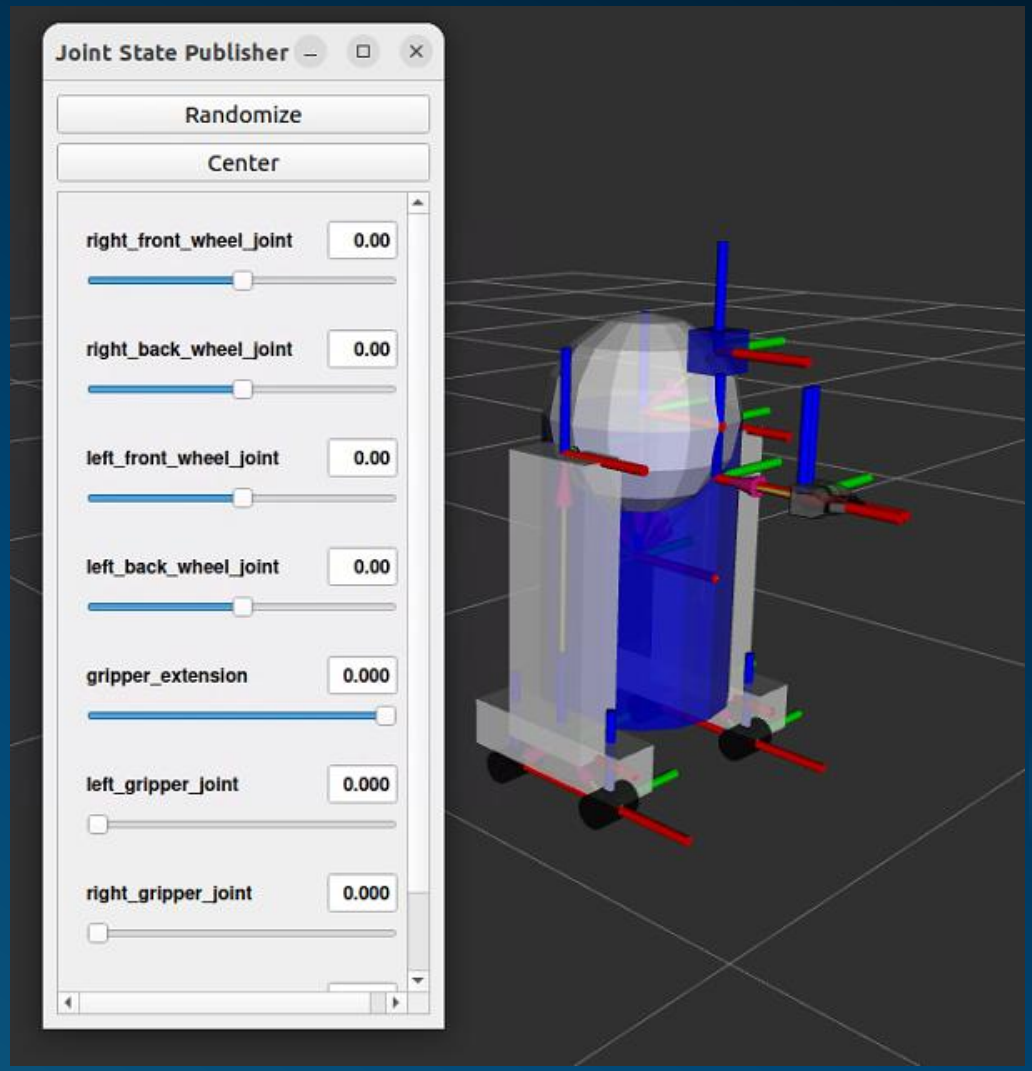
STL	DAE
Blender	Blender
FreeCAD	SkechUp
Fusion360	Maya
SolidWorks	3ds Max
ThinkerCAD	FreeCAD
MeshLab	

움직일 수 있는 로봇 모델 만들기

- 이동식 조인트 만들기

✓ 움직일 수 있는 로봇 모델 만들기

- 본 섹션에서는 이전 튜토리얼에서 만들었던 로봇이 움직일 수 있도록 만들 예정



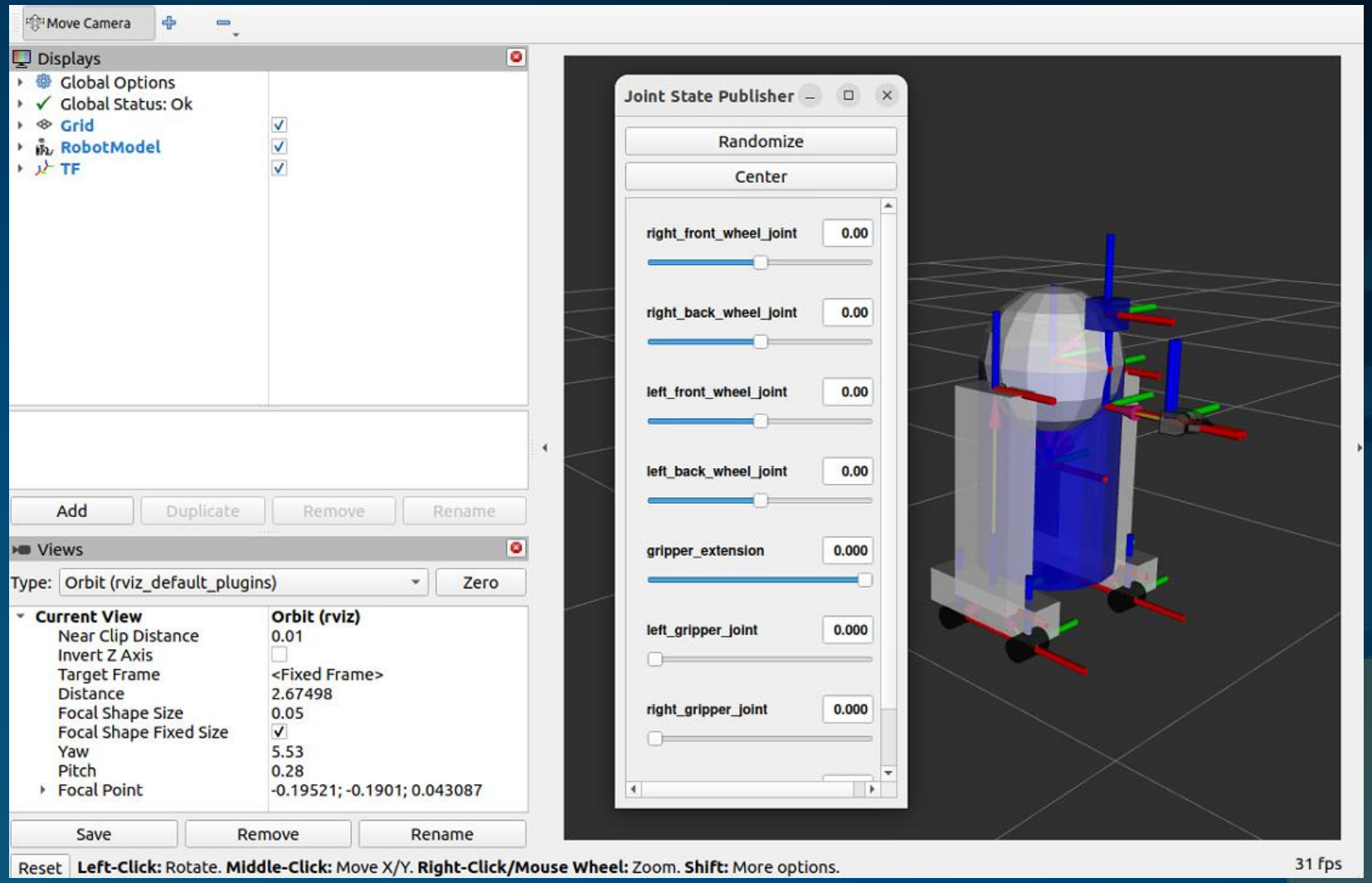
✓ 움직일 수 있는 로봇 모델 만들기

1. 다음 명령어를 이용하여 urdf 파일 실행

```
ros2 launch urdf_tutorial display.launch.py model:=urdf/06-flexible.urdf
```

✓ 움직일 수 있는 로봇 모델 만들기

2. 실행 결과(왼쪽의 tf 혹은 RobotModel등의 체크박스 해제 유무에 따라 다소 다르게 보일 수도 있습니다)



✓ 움직일 수 있는 로봇 모델 만들기 - 코드

- 다음 명령어를 이용하여 urdf 파일의 코드 확인(링크를 통해서도 확인 가능)

```
cat /opt/ros/humble/share/urdf_tutorial/urdf/06-flexible.urdf
```

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="visual">

<material name="blue">
    <color rgba="0 0 0.8 1"/>
  </material>
  <material name="black">
    <color rgba="0 0 0 1"/>
  </material>
  <material name="white">
    <color rgba="1 1 1 1"/>
  </material>

  …
```

✓ 움직일 수 있는 로봇 모델 만들기 – 코드

- joint type: 다음과 같이 joint의 type을 지정해주어야 함

```
…
<joint name="base_to_right_leg" type="fixed">
…

<joint name="right_base_joint" type="fixed">
…
<joint name="right_front_wheel_joint" type="continuous">
…
<joint name="right_back_wheel_joint" type="continuous">
…
<joint name="base_to_left_leg" type="fixed">
…
<joint name="left_base_joint" type="fixed">
…
<joint name="left_front_wheel_joint" type="continuous">
…
<joint name="left_back_wheel_joint" type="continuous">
…
<joint name="gripper_extension" type="prismatic">
…
```

✓ 움직일 수 있는 로봇 모델 만들기 – 코드

- 머리
  - 머리의 경우 연속 조인트(continuous joint)로 모델링 됨
  - 연속 조인트의 경우 모든 각도를 취할 수 있으므로 상세한 제한은 기록하지 않음

```
<joint name="head_swivel" type="continuous">
  <parent link="base_link"/>
  <child link="head"/>
  <axis xyz="0 0 1"/>
  <origin xyz="0 0 0.3"/>
</joint>
```

continuous joint

✓ 움직일 수 있는 로봇 모델 만들기 – 코드

- 그리퍼
  - 그리퍼의 경우 회전 조인트(revolute joint)로 모델링 됨(limit가 있음)
  - 조인트의 토크(effort), 하한(lower), 상한(upper) 그리고 최대 속도(velocity) 등을 정의함

```
<joint name="left_gripper_joint" type="revolute">
  <axis xyz="0 0 1" />
  <limit effort="1000.0" lower="0.0" upper="0.548" velocity="0.5" />
  <origin rpy="0 0 0" xyz="0.2 0.01 0" />
  <parent link="gripper_pole" />
  <child link="left_gripper" />
</joint>
```

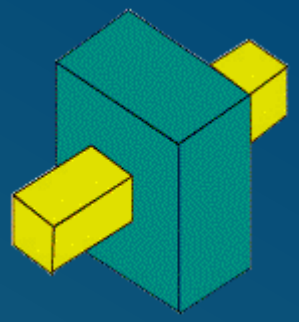
revolute joint

✓ 움직일 수 있는 로봇 모델 만들기 – 코드

- 그리퍼 암
  - 그리퍼 암의 경우 축을 따라 직선 운동을 하는 프리스메틱 조인트(prismatic joint)로 모델링 됨
  - limit에 사용되는 단위로 revolute joint와 달리 미터 사용

```
<joint name="gripper_extension" type="prismatic">
  <parent link="base_link"/>
  <child link="gripper_pole"/>
  <limit effort="1000.0" lower="-0.38" upper="0" velocity="0.5"/>
  <origin rpy="0 0 0" xyz="0.19 0 0.2"/>
</joint>
```

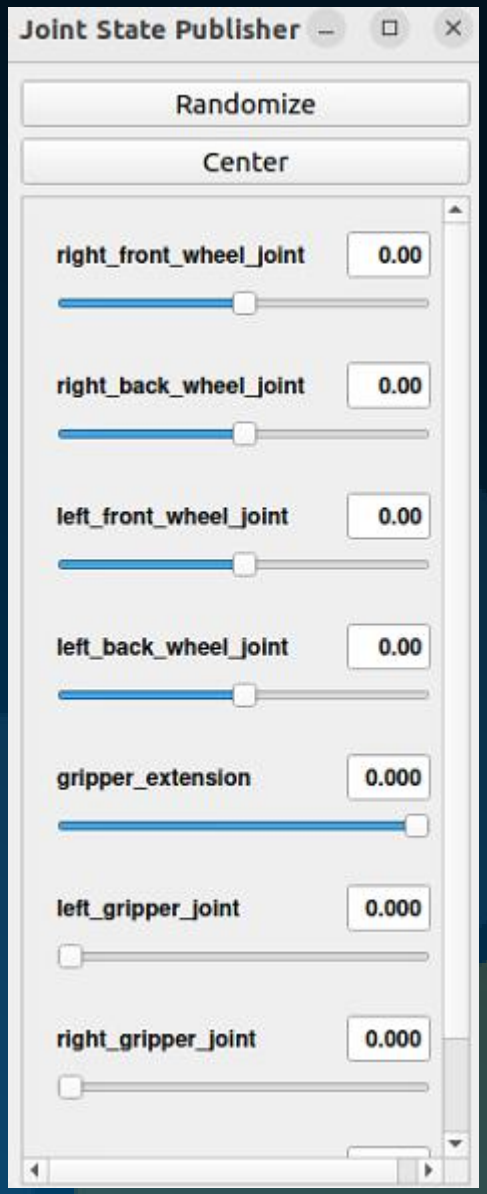
← 0.38m 안쪽(마이너스 방향)으로 들어가도록 설계



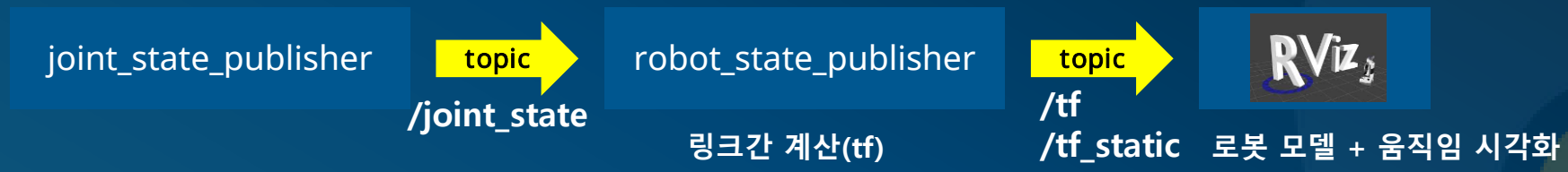
prismatic joint

✓ 움직일 수 있는 로봇 모델 만들기

- GUI 슬라이더: GUI 슬라이더는 다음과 같은 원리로 동작됨
  - GUI가 URDF를 구문 분석하고 고정되지 않은 모든 조인트와 제한값(limit)을 찾음
  - 슬라이더의 값을 사용하여 'sensor_msgs/msg/JointState' 메시지를 발행
  - 발행된 메시지는 robot_state_publisher 패키지에 의해 처리됨(각 관절값에 따라 로봇의 트랜스폼 계산)
  - 변환 트리(transform tree)를 사용하여 Rviz에서 로봇의 모든 파트를 시각적으로 표시



구분	Joint State Publisher	Robot state Publisher
역할	로봇의 모든 관절(Joint) 상태(위치)를 Publishing	/joint_states를 받아서 링크들 사이의 좌표 변환(TF)를 계산해서 Publishing
발행하는 토픽	각 Joint의 Position값을 담은 메시지를 생성하고 발행 /joint_states Sensor_msgs/msg/JointState	/tf → 움직이는 변환 정보 tf/_static → 고정된 링크간 변환 Tf2_msgs/msg/TFMessage
구독하는 토픽		/joint_states
Robot_description	robot_description 파라메터(joint 이름, 타입, 제한)를 읽어서(URDF) 슬라이더(gui) 생성	/joint_states를 받고 UDRF읽고 Link-Joint 구조(Tree)를 Parsing TF 계산 후 /tf Publishing
기타	Sensor_msgs/msg/JointState Header : 시간, frame_id Name : 조인트들의 이름 Position : 각 조인트의 현재 위치 Velocity : 각 조인트의 속도 Effort : 각 조인트에 걸리고 있는 힘(토크)	robot_state_publisher는 robot_description parameter(URDF 담고 있는 문자열)를 읽음link-joint tree 저장 /joint_states 토픽 구독(각 조인트의 현재 위치 값) 조인트 값을 기준으로 3D위치와 방향(TF)계산 각 링크에 대해 /tf 토픽 발행



※ 만약 mobile robot처럼 base_link가 움직인다면?

→ Robot_state_publisher는 base_link만 관리. Localization(map) 또는 Odometry(odom)가 TF를 publishing 함

충돌 및 관성 속성 추가

- 링크에 충돌 및 관성 속성을 추가하기
- 조인트에 조인트 역학(joint dynamics)를 추가하기

✓ 충돌 및 관성 속성 추가

- URDF 모델에 기본적인 물리적 속성을 추가하는 방법과 충돌 속성을 지정하는 방법을 알아보자
- 충돌(collision)은 일반적으로 관성 태그(inertial tag)를 추가하여 사용

✓ 충돌 및 관성 속성 추가 - 코드

- 다음 명령어를 이용하여 urdf 파일의 코드 확인(링크를 통해서도 확인 가능)

```
cat /opt/ros/humble/share/urdf_tutorial/urdf/07-physics.urdf
```

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="visual">

<material name="blue">
    <color rgba="0 0 0.8 1"/>
  </material>
  <material name="black">
    <color rgba="0 0 0 1"/>
  </material>
  <material name="white">
    <color rgba="1 1 1 1"/>
  </material>

  …
```

✓ 충돌 및 관성 속성 추가 - 코드

- geometry: 링크의 충돌 영역의 기하학적 형태를 정의
  - cylender: 원기둥 형태 사용
- inertia: 관성 텐서를 정의
  - mass: 질량(kg)
  - ixx, iyy, izz : 각각 x, y, z축을 중심으로 하는 회전 저항
  - ixy, ixz, iyz : 관성 곱(product of inertia)으로, 링크가 주축 이외의 축에 대해 어떻게 회전하는지를 나타냄(대칭물체는 모두 0)
  - 관성 텐서는 링크의 회전 운동 방정식을 결정하는 데 사용됨.
  - 정확한 관성 값을 제공함으로써 시뮬레이션에서 링크의 회전 움직임이 현실적으로 표현 할 수 있음

```
<link name="base_link">
   ...
   <collision>
     <geometry>
       <cylinder length="0.6" radius="0.2"/>
     </geometry>
   </collision>
   <inertial>
     <mass value="10"/>
     <inertia ixx="1e-3" ixy="0.0" ixz="0.0" iyy="1e-3" iyz="0.0" izz="1e-3"/>
   </inertial>
```

Using Xacro

- Xacro를 사용하여 URDF 코드를 단순화하기

  - XACRO (XML Macros)는 **URDF파일**을 더 효율적으로 작성할 수 있도록 도와주는 XML 기반의 매크로 언어
  - **ROS2에서 로봇 모델을 생성**할 때 URDF를 직접 작성하는 대신,
  - XACRO를 사용하면 **재사용 가능한 코드 블록**을 정의하고
  - 이를 통해 코드의 중복을 줄이며 유지보수성을 높일 수 있음
  - Xacro, URDF, SRDF 알아보기

✓ Using Xacro

- 본 섹션에서는 Xacro를 이용하여 코드를 단순화하는 방법을 진행할 예정
- Xacro는 다음과 같은 장점을 가짐
  - **재사용성 향상** : 공통된 요소를 매크로로 정의하여 여러 곳에서 재사용 가능
  - **가독성 향상** : 파일의 구조를 더 명확하게 만들어 이해하기 쉬움
  - **유지 보수 용이** : 변경 사항을 한 곳에서 수정하면 전체에 반영되므로 관리가 편리

- Xacro는 다음 명령어로 설치 가능(대부분의 경우 이미 설치되어 있을 가능성이 높음)

```
sudo apt-get install ros-humble-xacro
```

✓ Using Xacro

1. Xacro는 XML용 매크로 언어
2. 일반적으로 *.xacro 파일을 작성 후 다음의 명령어를 이용하여 urdf로 변환 후 사용

URDF	SRDF	XACRO
Universal Robot Description Format	Semantic Robot Description Format	XML Macro
로봇의 물리적 구조(모델) 정의	로봇의 의미론적(운동학적) 정보 정의	URDF의 확장버전(코드 재사용성 증가)
링크, 조인트, 관성, 충돌 모델 등	운동학 그룹, 충돌 회피 설정, 엔드 이펙터 설정	URDF
Gazebo, Rviz, Moveit!	Moveit!	Gazebo, Rviz, Moveit!
로봇의 구조를 정의하는 기본 파일	URDF를 기반으로 Moveit!을 위한 의미론적 설정을 추가하는 파일	URDF를 생성하는 도구
URDF	URDF를 SRDF로 변환 불가능. 수작업	Xacro파일을 URDF로 변환해야 Gazebo, Rviz, Movtit!등에서 사용가능
URDF 시뮬레이션은 가능하지만 경로계획 수행불가	Moveit!같은 경로 계획 도구 사용하려면 SRDF필요	Xacro는 URDF를 생성하는 도구 실제 사용되는 로봇모델파일은 아님

※ 예, SolidWorks등 CAD 소프트웨어 로봇모델 생성 → Xacro (변환) → URDF (수작업 변환) → SRDF

※ 파일 변환관계 : xacro → urdf 명령어로 파일 변환 가능한 반면 urdf → xacro 수동 변환 가능

✓ Using Xacro - Constants

- 본 섹션에서는 Xacro에서 상수를 어떻게 다루는지 알아볼 예정
- 이전 R2D2 예제에서는 다음과 같이 중복이 일어남(ex: cylinder의 길이와 반지름을 두 번 지정함). 이러한 경우 하나의 값을 변경하려면 다른 하나도 같이 변경해 주어야 함
- 따라서 왼쪽의 코드를 변경하여 상수 역할을 하는 속성을 지정한 오른쪽 코드와 같이 변경하는 것이 좋음

```
<link name="base_link">
  <visual>
    <geometry>
      <cylinder length="0.6" radius="0.2" />
    </geometry>
    <material name="blue" />
  </visual>
  <collision>
    <geometry>
      <cylinder length="0.6" radius="0.2" />
    </geometry>
  </collision>
</link>
```

```
<xacro:property name="width" value="0.2" />
<xacro:property name="bodylen" value="0.6" />
<link name="base_link">
    <visual>
        <geometry>
            <cylinder radius="${width}"
length="${bodylen}" />
        </geometry>
        <material name="blue" />
    </visual>
    <collision>
        <geometry>
            <cylinder radius="${width}"
length="${bodylen}" />
        </geometry>
    </collision>
</link>
```

✓ Using Xacro - Constants

- 상수의 경우 처음 두 줄에 지정되며, 이 값은 거의 모든 곳에서 어떤 수준에서든 사용 전이나 후에 정의 가능
- 상수는 "${}"의 중괄호 안에 상수를 집어넣는 방식으로 사용 가능

```
<link name="base_link">
  <visual>
    <geometry>
      <cylinder length="0.6" radius="0.2"/>
    </geometry>
    <material name="blue"/>
  </visual>
  <collision>
    <geometry>
      <cylinder length="0.6" radius="0.2"/>
    </geometry>
  </collision>
</link>
```

```
<xacro:property name="width" value="0.2" />
<xacro:property name="bodylen" value="0.6" />
<link name="base_link">
    <visual>
        <geometry>
            <cylinder radius="${width}"
length="${bodylen}"/>
        </geometry>
        <material name="blue"/>
    </visual>
    <collision>
        <geometry>
            <cylinder radius="${width}"
length="${bodylen}"/>
        </geometry>
    </collision>
</link>
```

✓ Using Xacro - Constants

- 본 섹션에서는 Xacro에서 수식을 다루는 방법에 대하여 알아볼 예정
- Xacro에서는 기본 사칙연산, 부호 반전(unary minus), 괄호(parenthesis)등을 사용하여 복잡한 표현식 작성 가능

```
<cylinder radius="${wheeldiam/2}" length="0.1" />
<origin xyz="${reflect*(width+.02)} 0 0.25" />
```

- 반지름 = 실린더의 직경 / 2
- xyz중 x값은 reflect * (width + 0.02)

✓ Using Xacro - Macros

- 본 섹션에서는 Xacro 매크로를 다루는 방법에 대하여 알아볼 예정
- Xacro 매크로는 '<xacro:macro>' 태그를 사용하여 정의되며, 특정 기능을 수행하는 코드 블록으로, 필요할 때마다 매크로를 호출하여 해당 코드를 재사용이 가능하도록 하는 것
- 즉 매크로는 python의 함수와 비슷한 역할을 한다고 볼 수 있음
- 단순한 매크로의 예시:
  1. 다음 제공된 것은 단순한 Xacro 매크로로, default_origin이라는 이름을 가진 매크로를 정의한 것.
  2. '<xacro:default_origin />'를 호출 시 '<origin xyz="0 0 0" rpy="0 0 0"/>'가 해당 위치에 삽입 됨

```
<xacro:macro name="default_origin">
    <origin xyz="0 0 0" rpy="0 0 0" />
</xacro:macro>
<xacro:default_origin />
```

✓ Using Xacro - Macros

- 더 나아가 매크로에 파라미터를 넣고자 할 경우 다음과 같은 방법 사용 가능
  1. 파라미터를 사용하고자 할 때 매크로 이름 뒤에 'params'를 추가 가능
  2. 이 경우 `<xacro:default_inertial mass="10"/>`를 호출 시 해당 위치에 오른쪽 코드가 삽입됨

```
<xacro:macro name="default_inertial" params="mass">
    <inertial>
            <mass value="${mass}" />
            <inertia ixx="1e-3" ixy="0.0" ixz="0.0"
                iyy="1e-3" iyz="0.0"
                izz="1e-3" />
    </inertial>
</xacro:macro>
```

```
    <inertial>
            <mass value="10" />
            <inertia ixx="1e-3" ixy="0.0" ixz="0.0"
                iyy="1e-3" iyz="0.0"
                izz="1e-3" />
    </inertial>
```

Using URDF with robot_state_publisher

- URDF에서 모델링된 보행 로봇을 시뮬레이션하고 Rviz에서 확인하기
- robot_state_publishe는 URDF(Xacro)로 정의된 로봇 모델의 상태를 퍼블리시하는 ROS2 패키지
- 로봇의 링트와 조인트 상태를 기반으로 TF 트리를 자동으로 생성하여 다른 ROS2 노드들이 알 수 있도록
- ROS2에서 로봇을 시뮬레이션하고 TF트리를 구성하려면 필수

[역할]

- **URDF기반으로 TF정보 Publishing**
- **로봇의 조인트 상태를 받아 TF 트리 업데이트**
- **Rviz에서 로봇 모델을 시각화**
- **다른 ROS 패키지에서 로봇의 위치와 자세를 참조할 수 있도록 함**

✓ Using URDF with robot_state_publisher

- 본 섹션에서는 걷는 로봇을 모델링하고, 상태를 tf2 메시지로 게시하고, Rviz에서 시뮬레이션을 관찰할 예정
- 진행 과정은 다음과 같음
  1. 로봇 어셈블리를 설명하는 URDF 모델 생성
  2. 동작을 시뮬레이션하고 JointState와 변환을 게시하는 노드 작성
  3. robot_state_publisher를 사용하여 전체 로봇 상태를 /tf2에 게시
     - robot_state_publisher: URDF 파일을 사용하여 로봇의 상태(특히 조인트 상태)를 퍼블리시하는 노드로, 로봇의 각 조인트 상태와 링크 간의 변환을 계산한 하여 TF 프레임으로 퍼블리시함

※ 필요한 파일 : urdf_revolution.zip

urdf_revolution.zip을 우측과 같이 디렉토리에 압축풀고 복사 →

```
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws/src$ cd urdf_tutorial_r2d2/
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws/src/urdf_tutorial_r2d2$ tree
.
├── launch
│   └── demo.launch.py
├── LICENSE
├── package.xml
├── resource
│   └── urdf_tutorial_r2d2
├── setup.cfg
├── setup.py
├── test
│   ├── test_copyright.py
│   ├── test_flake8.py
│   └── test_pep257.py
├── urdf
│   ├── r2d2.rviz
│   └── r2d2.urdf.xml
└── urdf_tutorial_r2d2
    ├── __init__.py
    ├── __pycache__
    │   ├── __init__.cpython-310.pyc
    │   └── state_publisher.cpython-310.pyc
    └── state_publisher.py

6 directories, 15 files
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws/src/urdf_tutorial_r2d2$
```

실제 패키지 생성할 경우에만 진행

✓ Using URDF with robot_state_publisher

1. 폴더 생성 후 src 폴더 안에서 패키지 생성

```
mkdir -p second_ros2_ws/src
cd second_ros2_ws/src
ros2 pkg create --build-type ament_python --license Apache-2.0
urdf_revolution         --dependencies rclpy
cd urdf_revolution
```

2. URDF 파일 생성(wget 뒤의 링크가 너무 길어 입력하기 어려우면 별도 제공받은 파일을 이용해보자)

```
mkdir -p urdf
cd urdf
wget https://docs.ros.org/en/humble/_downloads/872802005223ffdb75b1ab7b25ad445b/r2d2.urdf.xml
wget https://docs.ros.org/en/humble/_downloads/96d68aef72c4f27f32af5961ef48c475/r2d2.rviz
```

※ urdf_revolution.zip을 ros2_ws/src아래 폴더에 압축을 풀었다면 이 과정은 생략하고 colcon build만 진행하면 됨

✓ Using URDF with robot_state_publisher

3. src/urdf_revolution/urdf_revolution/state_publisher.py 파일에 다음 코드 작성

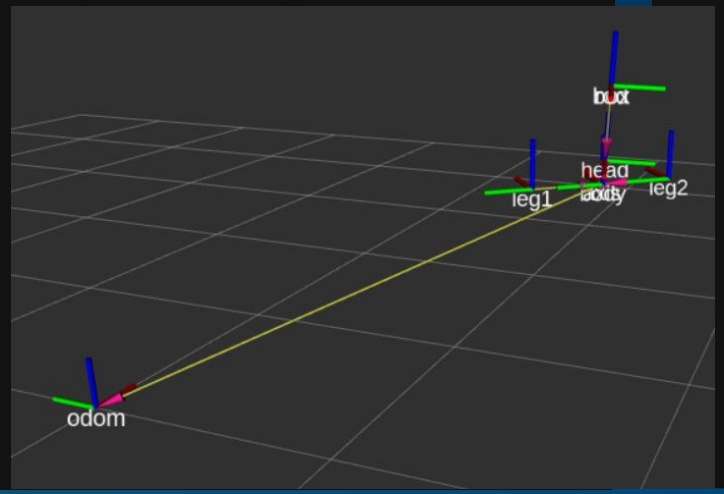
[실습]

※ tilt, height, swivel, angle 각각 주석처리 후 build해서 동작 확인해보기

```
from math import sin, cos, pi
import rclpy
from rclpy.node import Node
from rclpy.qos import QoSProfile
from geometry_msgs.msg import Quaternion
from sensor_msgs.msg import JointState
from tf2_ros import TransformBroadcaster, TransformStamped

class StatePublisher(Node):

    def __init__(self):
        rclpy.init()
        super().__init__('state_publisher')

        qos_profile = QoSProfile(depth=10)
        self.joint_pub = self.create_publisher(JointState, 'joint_states', qos_profile)
        self.broadcaster = TransformBroadcaster(self, qos=qos_profile)
        self.nodeName = self.get_name()
        self.get_logger().info("{0} started".format(self.nodeName))

        degree = pi / 180.0
        loop_rate = self.create_rate(30)

        # robot state
        tilt = 0.
        tinc = degree
        swivel = 0.
        angle = 0.
        height = 0.
        hinc = 0.005

        # message declarations
        odom_trans = TransformStamped()
        odom_trans.header.frame_id = 'odom'
        odom_trans.child_frame_id = 'axis'
        joint_state = JointState()
```

로봇의 위치를 원형 궤도로 이동하도록 x, y 좌표를 업데이트 →

yaw(회전각) 값을 쿼터니언으로 변환 →




```
        try:
            while rclpy.ok():
                rclpy.spin_once(self)

                # update joint_state
                now = self.get_clock().now()
                joint_state.header.stamp = now.to_msg()
                joint_state.name = ['swivel', 'tilt', 'periscope']
                joint_state.position = [swivel, tilt, height]

                # update transform
                # (moving in a circle with radius=2)
                odom_trans.header.stamp = now.to_msg()
                odom_trans.transform.translation.x = cos(angle)*2
                odom_trans.transform.translation.y = sin(angle)*2
                odom_trans.transform.translation.z = 0.7
                odom_trans.transform.rotation = \
                    euler_to_quaternion(0, 0, angle + pi/2) # roll,pitch,yaw

                # send the joint state and transform
                self.joint_pub.publish(joint_state)
                self.broadcaster.sendTransform(odom_trans)

                # Create new robot state
                tilt += tinc
                if tilt < -0.5 or tilt > 0.0:
                    tinc *= -1
                height += hinc
                if height > 0.2 or height < 0.0:
                    hinc *= -1
                swivel += degree
                angle += degree/4

                # This will adjust as needed per iteration
                loop_rate.sleep()

        except KeyboardInterrupt:
            pass
```

← joint_state, 좌표변환 정보 퍼블리시

← Tilt : 앞으로 숙이는 반복 동작

← Sphere 상단 높이 왕복

← Swivel : sphere 자체 회전

← Angle : sphere가 odom기준 공전

실제 패키지 생성할 경우에만 진행

✓ Using URDF with robot_state_publisher

3. src/urdf_revolution/urdf_revolution/state_publisher.py 파일에 다음 코드 작성

```
def euler_to_quaternion(roll, pitch, yaw):
    qx = sin(roll/2) * cos(pitch/2) * cos(yaw/2) - cos(roll/2) * sin(pitch/2) * sin(yaw/2)
    qy = cos(roll/2) * sin(pitch/2) * cos(yaw/2) + sin(roll/2) * cos(pitch/2) * sin(yaw/2)
    qz = cos(roll/2) * cos(pitch/2) * sin(yaw/2) - sin(roll/2) * sin(pitch/2) * cos(yaw/2)
    qw = cos(roll/2) * cos(pitch/2) * cos(yaw/2) + sin(roll/2) * sin(pitch/2) * sin(yaw/2)
    return Quaternion(x=qx, y=qy, z=qz, w=qw)

def main():
    node = StatePublisher()

if __name__ == '__main__':
    main()
```

실제 패키지 생성할 경우에만 진행

✓ Using URDF with robot_state_publisher

4. src/urdf_revolution/launch/demo.launch.py 파일에 다음 코드 작성

```python
import os
from ament_index_python.packages import get_package_share_directory
from launch import LaunchDescription
from launch.actions import DeclareLaunchArgument
from launch.substitutions import LaunchConfiguration
from launch_ros.actions import Node

def generate_launch_description():

    use_sim_time = LaunchConfiguration('use_sim_time', default='false')

    urdf_file_name = 'r2d2.urdf.xml'
    urdf = os.path.join(
        get_package_share_directory('urdf_tutorial_r2d2'),
        urdf_file_name)
    with open(urdf, 'r') as infp:
        robot_desc = infp.read()

    return LaunchDescription([
        DeclareLaunchArgument(
            'use_sim_time',
            default_value='false',
            description='Use simulation (Gazebo) clock if true'),
        Node(
            package='robot_state_publisher',
            executable='robot_state_publisher',
            name='robot_state_publisher',
            output='screen',
            parameters=[{'use_sim_time': use_sim_time, 'robot_description': robot_desc}],
            arguments=[urdf]),
        Node(
            package='urdf_tutorial_r2d2',
            executable='state_publisher',
            name='state_publisher',
            output='screen'),
    ])
```

실제 패키지 생성할 경우에만 진행

✓ Using URDF with robot_state_publisher

5. setup.py에 필요한 모듈 가져오기

```
import os
from glob import glob
from setuptools import setup
from setuptools import find_packages
```

6. data_files에 다음 코드 추가

```
data_files=[
   ...
  (os.path.join('share', package_name, 'launch'), glob(os.path.join('launch', '*launch.[pxy][yma]*'))),
  (os.path.join('share', package_name), glob('urdf/*')),
],
```

7. console_scripts에 다음 코드 추가

```
'console_scripts': [
    'state_publisher = urdf_revolution.state_publisher:main'
],
```

✓ Using URDF with robot_state_publisher

8. 패키지 설치

```
cd second_ros2_ws
colcon build --symlink-install --packages-select urdf_revolution
```

9. 설정 파일 가져오기

```
source install/setup.bash
```

ros2 topic echo /tf | grep -A 10 "child_frame_id: body"

✓ Using URDF with robot_state_publisher

10. launch파일 실행

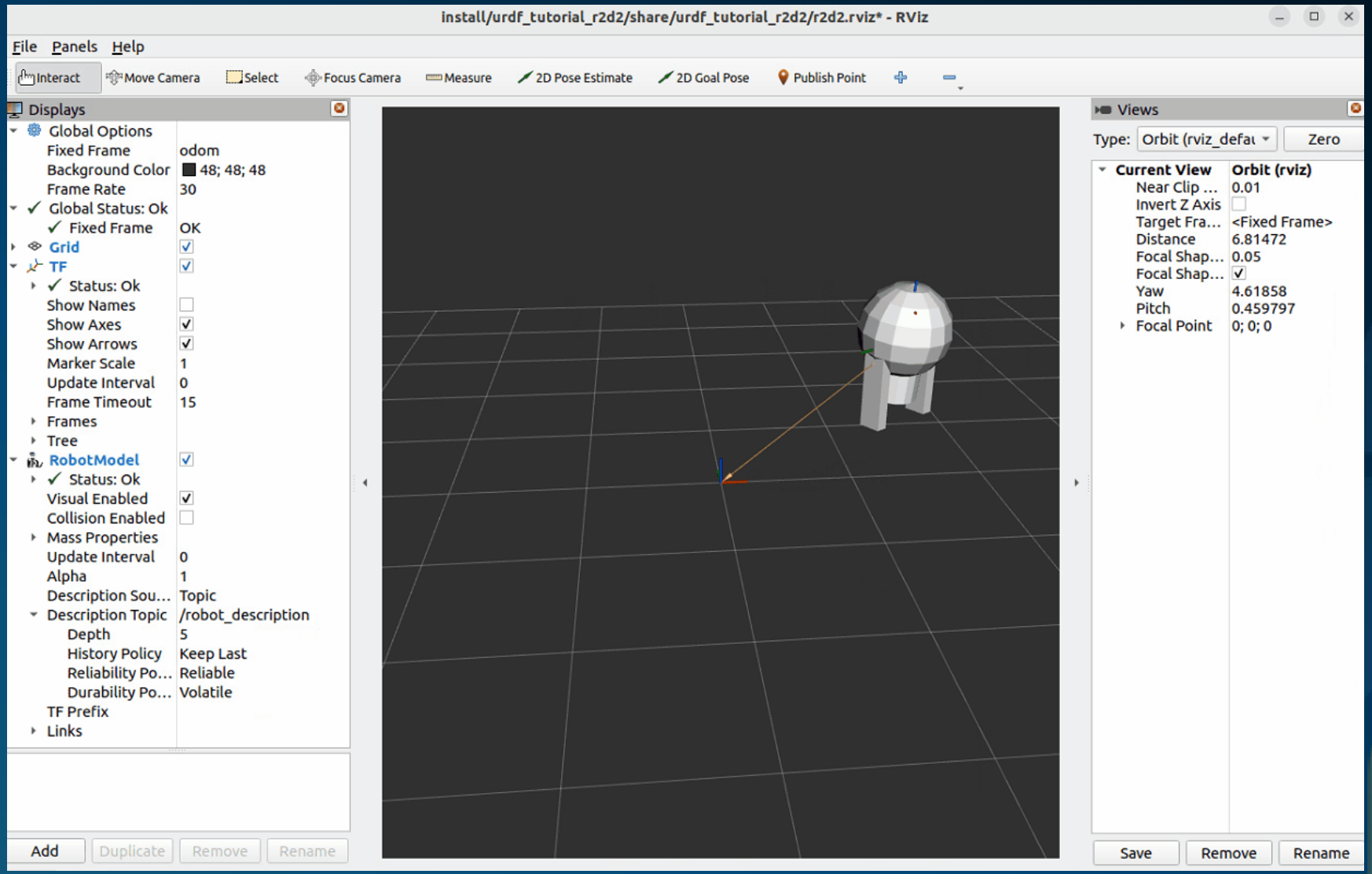
```
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws$
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws$
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws$
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws$
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws$
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws$
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws$ rviz2 -d install/urdf_revolution/share/urdf_revolution/r2d2.rviz
Warning: Ignoring XDG_SESSION_TYPE=wayland on Gnome. Use QT_QPA_PLATFORM=wayland to run on Wayland anyway.
[INFO] [1745412798.088146912] [rviz2]: Stereo is NOT SUPPORTED
[INFO] [1745412798.088205580] [rviz2]: OpenGl version: 4.6 (GLSL 4.6)
[INFO] [1745412798.099312007] [rviz2]: Stereo is NOT SUPPORTED
```

11. 새로운 터미널을 열어 rviz 실행 (뒤에 나오는 파일 경로는 사용자마다 다를 수 있습니다)

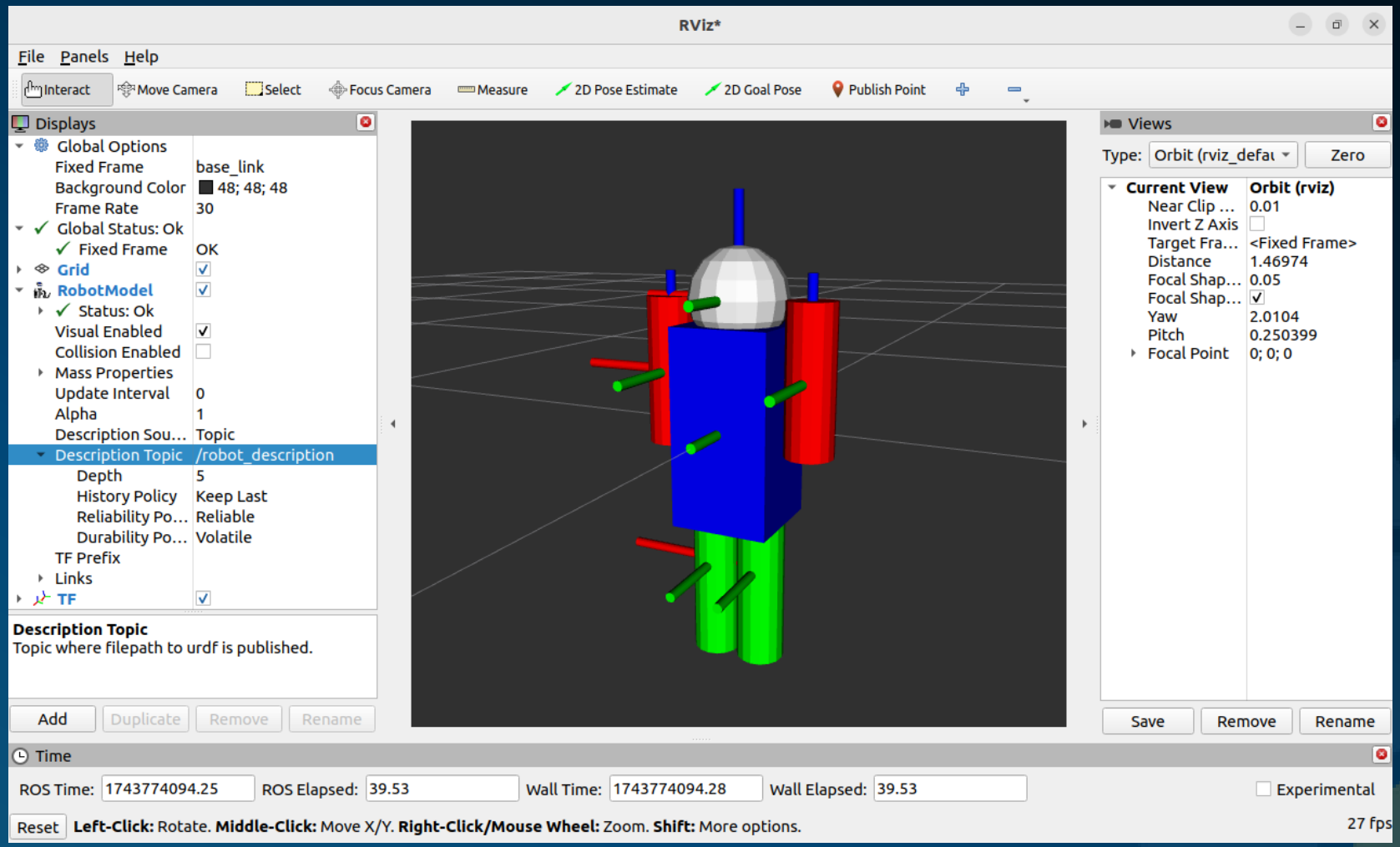
```
sparkx@sparkx-550XDA: ~/ros2_ws 122x16
ROS2 humble is activated!
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws$ . install/setup.bash
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws$ ros2 launch urdf_revolution demo.launch.py
[INFO] [launch]: All log files can be found below /home/sparkx/.ros/log/2025-04-23-21-52-30-209062-sparkx-550XDA-18623
[INFO] [launch]: Default logging verbosity is set to INFO
[INFO] [robot_state_publisher-1]: process started with pid [18624]
[INFO] [state_publisher-2]: process started with pid [18626]
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1745412750.295378052] [robot_state_publisher]: got segment axis
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1745412750.295466420] [robot_state_publisher]: got segment body
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1745412750.295471758] [robot_state_publisher]: got segment box
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1745412750.295475206] [robot_state_publisher]: got segment head
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1745412750.295478467] [robot_state_publisher]: got segment leg1
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1745412750.295481722] [robot_state_publisher]: got segment leg2
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1745412750.295484668] [robot_state_publisher]: got segment rod
[state_publisher-2] [INFO] [1745412750.558259521] [state_publisher]: state_publisher started
```

✓ Using URDF with robot_state_publisher

12. 실행 결과



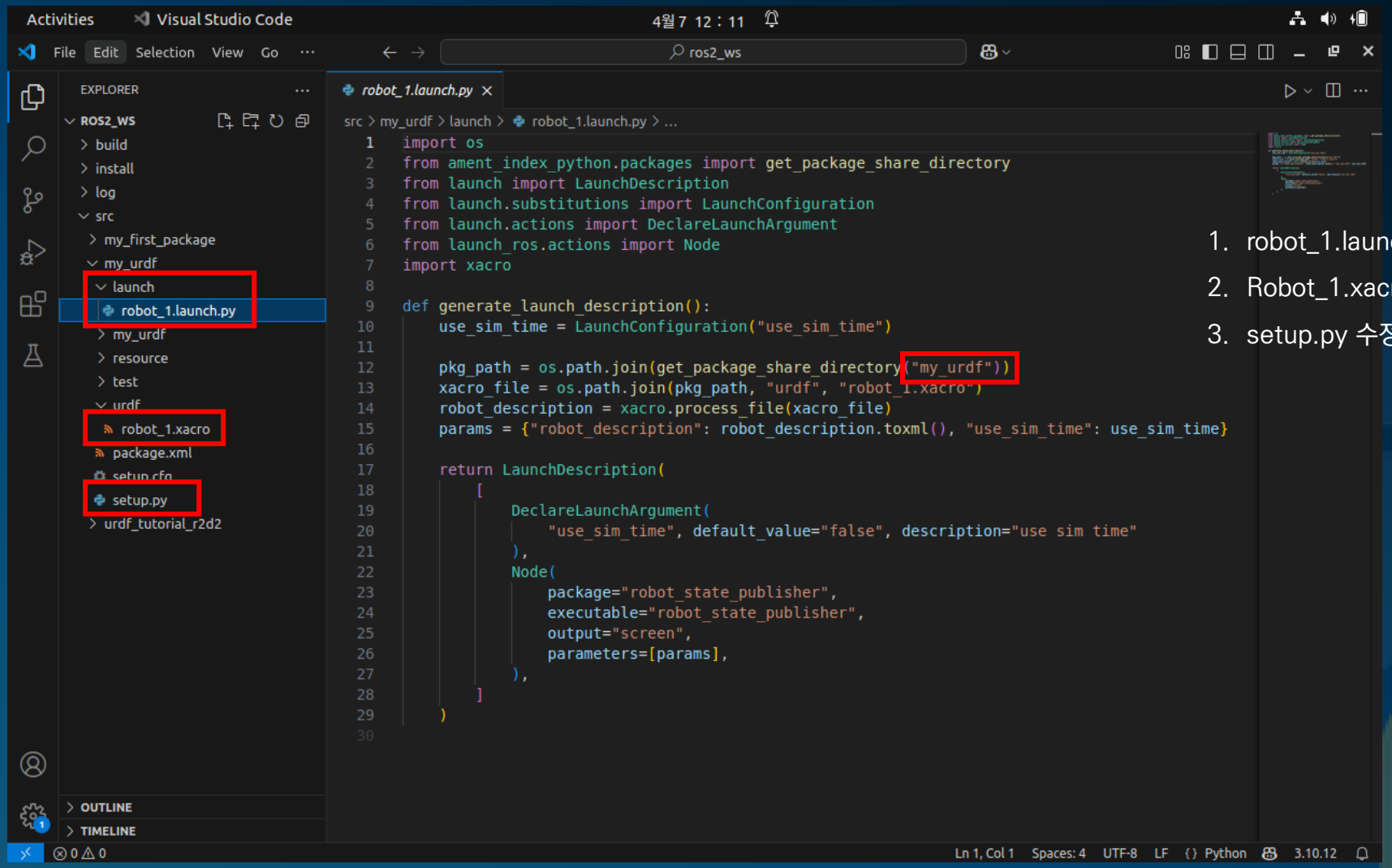
✓ My_URDF 패키지 생성해서 Humanoid 만들어보기



※ 필요한 파일 : my_urdf.zip

✓ URDF 패키지 수정하기

```
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws/src$
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws/src$ ros2 pkg create --build-type ament_python my_urdf
```



1. robot_1.launch.py : 폴더 및 파일 만들기
2. Robot_1.xacro 복사하기
3. setup.py 수정하기

✓ URDF 패키지 수정하기

setup.py

src > my_urdf > setup.py > ...

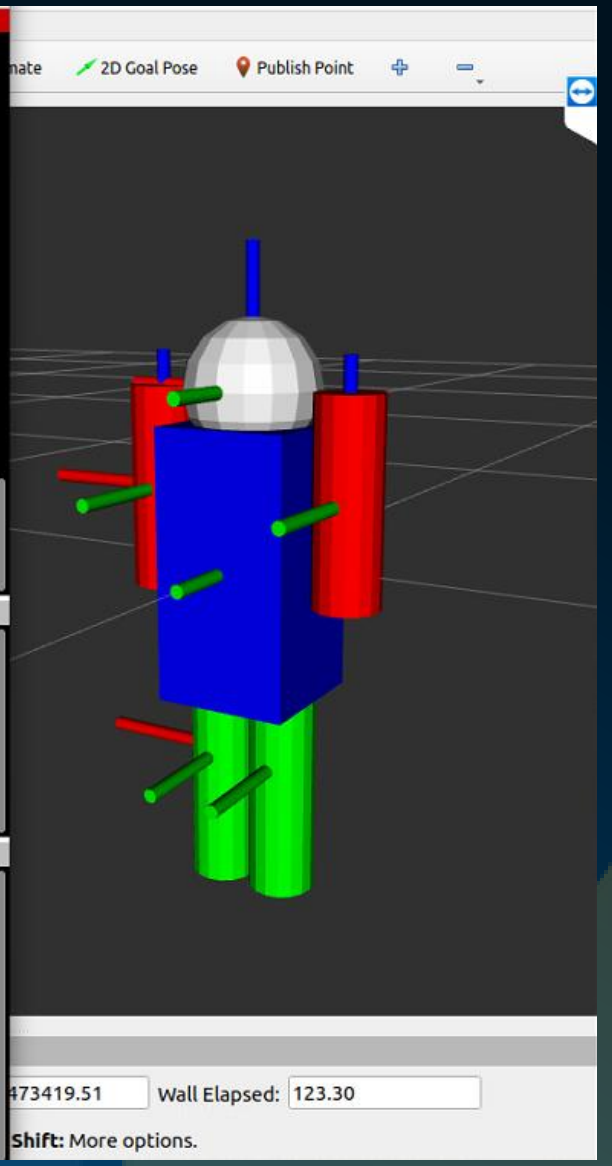
```python
import os
from glob import glob
from setuptools import find_packages, setup

package_name = 'my_urdf'

setup(
    name=package_name,
    version='0.0.0',
    packages=find_packages(exclude=['test']),
    data_files=[
        ('share/ament_index/resource_index/packages',
            ['resource/' + package_name]),
        ('share/' + package_name, ['package.xml']),
        (os.path.join('share', package_name, 'launch'), glob('launch/*.launch.py')),
            (os.path.join('share', package_name, 'urdf'), glob('urdf/*.xacro')),
    ],
    install_requires=['setuptools'],
    zip_safe=True,
    maintainer='victor',
    maintainer_email='victor@todo.todo',
    description='TODO: Package description',
    license='TODO: License declaration',
    tests_require=['pytest'],
    entry_points={
        'console_scripts': [
        ],
    },
)

```

✓ Build 후 실행해보기

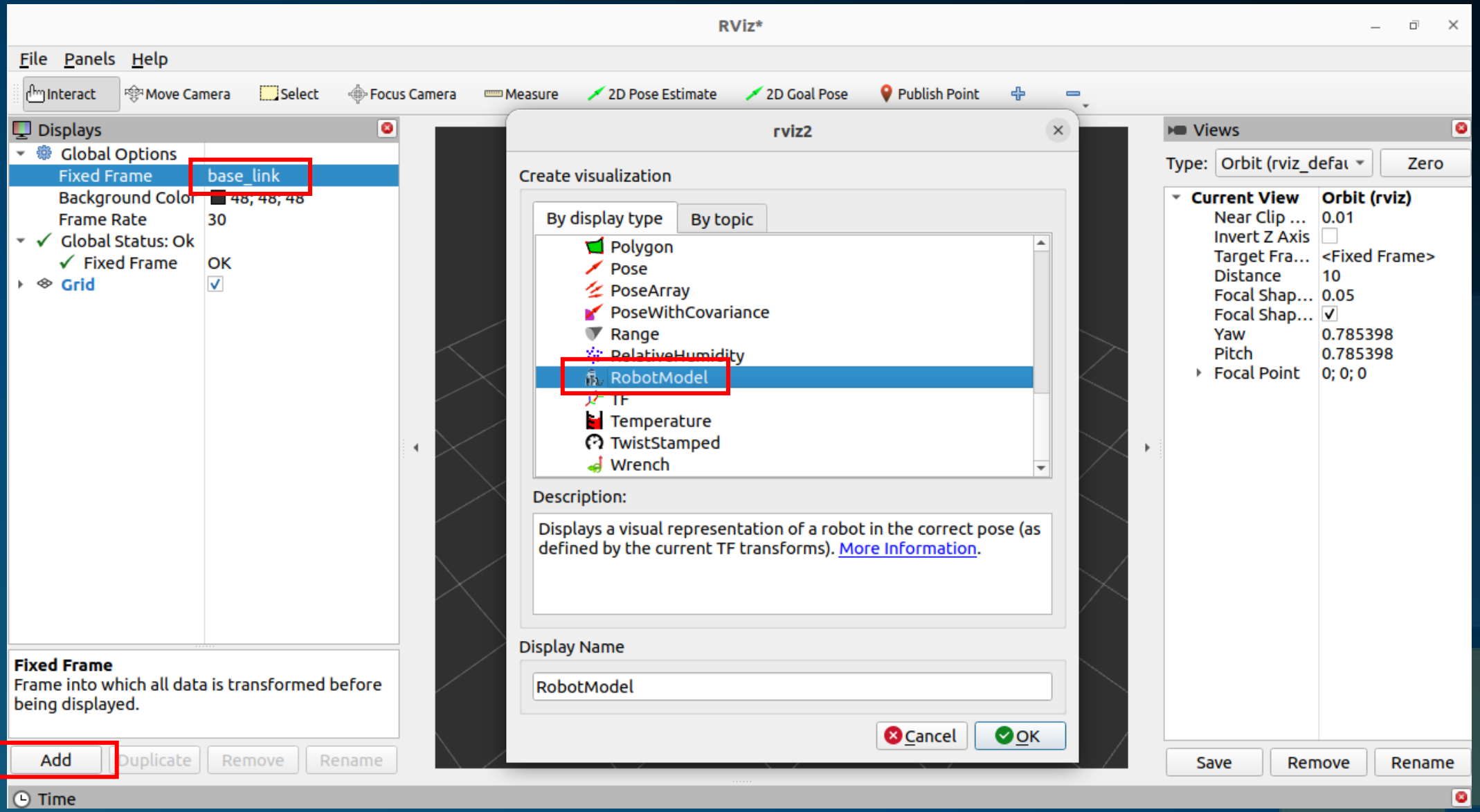
```
sparkx@sparkx-550XDA: ~/ros2_ws/src/my_urdf/urdf 116x16
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws/src/my_urdf/urdf$ ll
total 12
drwxrwxr-x 2 sparkx sparkx 4096 Apr  7 11:57 ./
drwxrwxr-x 7 sparkx sparkx 4096 Apr  7 11:56 ../
-rw-rw-r-- 1 sparkx sparkx 2266 Apr  7 11:57 robot_1.xacro
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws/src/my_urdf/urdf$ ros2 run robot_state_publisher robot_state_publisher robot_1.xacro
[WARN] [1745473223.015427139] [robot_state_publisher]: No robot_description parameter, but command-line argument ava
ilable.  Assuming argument is name of URDF file.  This backwards compatibility fallback will be removed in the futur
e.
[INFO] [1745473223.046102560] [robot_state_publisher]: got segment base_link
[INFO] [1745473223.046157008] [robot_state_publisher]: got segment head
[INFO] [1745473223.046162850] [robot_state_publisher]: got segment left_arm
[INFO] [1745473223.046168725] [robot_state_publisher]: got segment left_leg
[INFO] [1745473223.046174716] [robot_state_publisher]: got segment right_arm
[INFO] [1745473223.046180554] [robot_state_publisher]: got segment right_leg
```

```
sparkx@sparkx-550XDA: ~/ros2_ws/src/my_urdf/urdf 116x6
ROS2 humble is activated!
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws/src/my_urdf/urdf$ ros2 run joint_state_publisher joint_state_publisher
[INFO] [1745473279.486279193] [joint_state_publisher]: Waiting for robot_description to be published on the robot_de
scription topic...
```

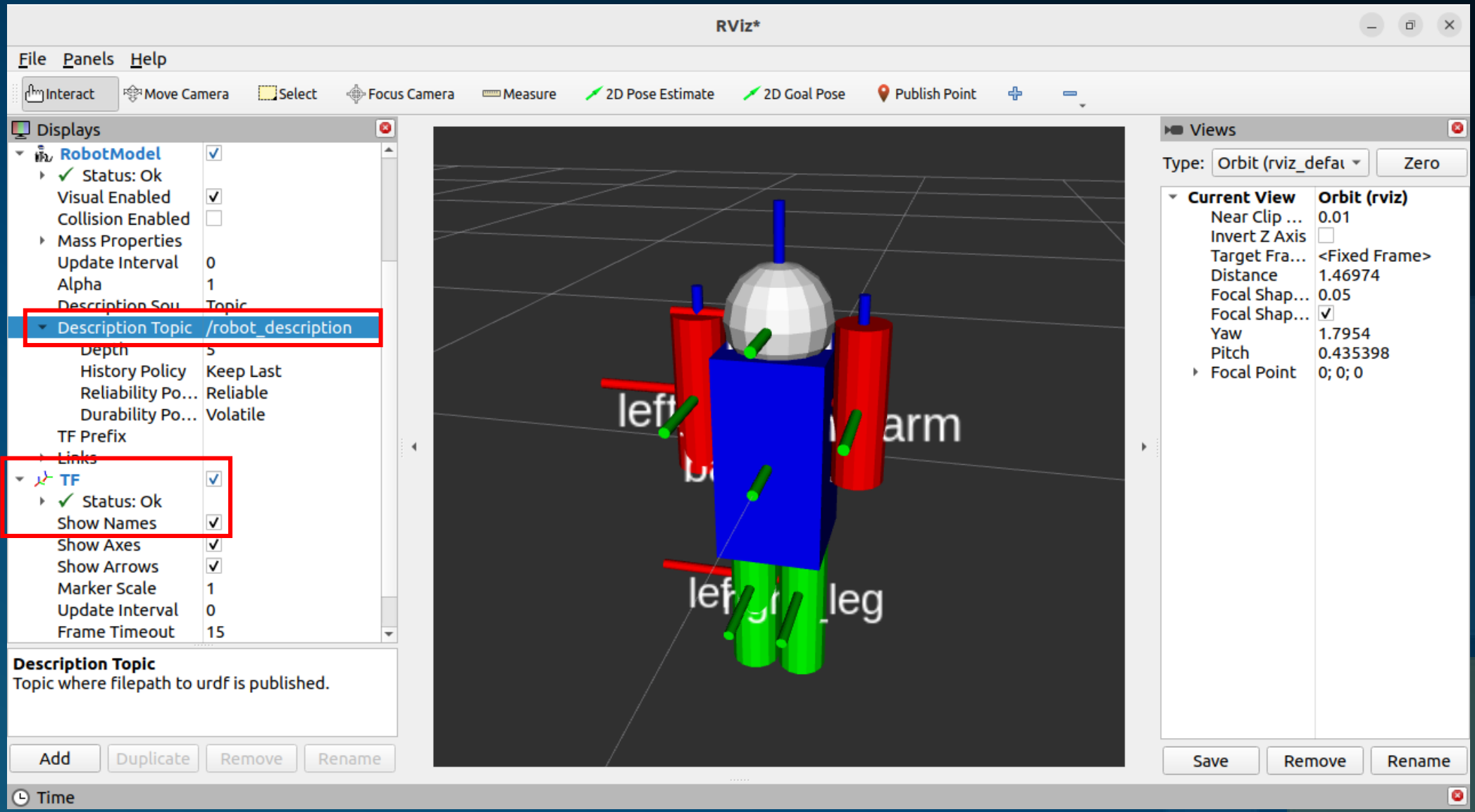
```
sparkx@sparkx-550XDA: ~/ros2_ws/src/my_urdf/urdf 116x8
ROS2 humble is activated!
sparkx@sparkx-550XDA:~/ros2_ws/src/my_urdf/urdf$ ros2 run rviz2 rviz2
Warning: Ignoring XDG_SESSION_TYPE=wayland on Gnome. Use QT_QPA_PLATFORM=wayland to run on Wayland anyway.
[INFO] [1745473296.046943632] [rviz2]: Stereo is NOT SUPPORTED
[INFO] [1745473296.046999887] [rviz2]: OpenGl version: 4.6 (GLSL 4.6)
[INFO] [1745473296.063831807] [rviz2]: Stereo is NOT SUPPORTED
```



✓ RViz에서 설정하기


RViz*
File Panels Help
Interact Move Camera Select Focus Camera Measure 2D Pose Estimate 2D Goal Pose Publish Point
Displays
Global Options
Fixed Frame base_link
Background Color 48; 48; 48
Frame Rate 30
Global Status: Ok
Fixed Frame OK
Grid
Fixed Frame
Frame into which all data is transformed before being displayed.
Add Duplicate Remove Rename
rviz2
Create visualization
By display type By topic
Polygon
Pose
PoseArray
PoseWithCovariance
Range
RelativeHumidity
RobotModel
TF
Temperature
TwistStamped
Wrench
Description:
Displays a visual representation of a robot in the correct pose (as defined by the current TF transforms). More Information.
Display Name
RobotModel
Cancel OK
Views
Type: Orbit (rviz_defa
Zero
Current View Orbit (rviz)
Near Clip ... 0.01
Invert Z Axis
Target Fra... <Fixed Frame>
Distance 10
Focal Shap... 0.05
Focal Shap...
Yaw 0.785398
Pitch 0.785398
Focal Point 0; 0; 0
Save Remove Rename
Time

✓ RViz에서 Humanoid Robot 확인하기



✓ robot_1.launch.py로 실행하기

robot_1.xacro

src > my_urdf > urdf > robot_1.xacro

```
<?xml version="1.0"?>
<robot xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro" name="urdf_test" >

  <!-- 몸통 -->
  <link name="base_link">
    <visual>
      <geometry>
        <box size="0.2 0.2 0.4"/>
      </geometry>
      <material name="blue">
        <color rgba="0 0 1 1"/>
      </material>
    </visual>
  </link>

  <!-- 머리 -->
  <link name="head">
    <visual>
      <geometry>
        <sphere radius="0.1"/>
      </geometry>
      <material name="white">
        <color rgba="1 1 1 1"/>
      </material>
    </visual>
  </link>

  <joint name="neck" type="fixed">
    <parent link="base_link"/>
    <child link="head"/>
    <origin xyz="0 0 0.25"/>
  </joint>

  <!-- 왼쪽 팔 -->
  <link name="left_arm">
```

victor@victor-VirtualBox: ~/ros2_ws 140x19

```
drwxrwxr-x  5 victor victor 4096  4월  7 12:11 src/
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws$ colcon build --packages-select my_urdf
Starting >>> my_urdf
Finished <<< my_urdf [0.62s]

Summary: 1 package finished [0.80s]
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws$ . install/setup.bash
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws$
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws$ ros2 launch my_urdf robot_1.launch.py
[INFO] [launch]: All log files can be found below /home/victor/.ros/log/2025-04-07-12-18-30-836698-victor-VirtualBox-7898
[INFO] [launch]: Default logging verbosity is set to INFO
[INFO] [robot_state_publisher-1]: process started with pid [7899]
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1743995910.908508232] [robot_state_publisher]: got segment base_link
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1743995910.908638178] [robot_state_publisher]: got segment head
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1743995910.908656127] [robot_state_publisher]: got segment left_arm
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1743995910.908661861] [robot_state_publisher]: got segment left_leg
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1743995910.908666618] [robot_state_publisher]: got segment right_arm
[robot_state_publisher-1] [INFO] [1743995910.908671420] [robot_state_publisher]: got segment right_leg
```

victor@victor-VirtualBox: ~/ros2_ws 140x19

```
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws$
victor@victor-VirtualBox:~/ros2_ws$ rviz2
Warning: Ignoring XDG_SESSION_TYPE=wayland on Gnome. Use QT_QPA_PLATFORM=wayland to run on Wayland anyway.
[INFO] [1743995922.401024813] [rviz2]: Stereo is NOT SUPPORTED
[INFO] [1743995922.401129946] [rviz2]: OpenGl version: 4.5 (GLSL 4.5)
[INFO] [1743995922.452293441] [rviz2]: Stereo is NOT SUPPORTED
```

robot_1.launch.py

my_urdf > launch > robot_1.launch.py > ...

```python
from launch_ros.actions import Node
import xacro

def generate_launch_description():
    use_sim_time = LaunchConfiguration("use_sim_time")

    pkg_path = os.path.join(get_package_share_directory("my_urdf"))
    xacro_file = os.path.join(pkg_path, "urdf", "robot_1.xacro")
    robot_description = xacro.process_file(xacro_file)
    params = {"robot_description": robot_description.toxml(), "use_sim_time": use_sim_time}

    return LaunchDescription(
        [
            DeclareLaunchArgument(
                "use_sim_time", default_value="false", description="use sim time"
            ),
            Node(
                package="robot_state_publisher",
                executable="robot_state_publisher",
                output="screen",
                parameters=[params],
            ),
            Node(
                package="joint_state_publisher",
                executable="joint_state_publisher",
                output="screen",
                parameters=[params],
            ),
            Node(
                package="rviz2",
                executable="rviz2",
                output="screen",
                parameters=[params],
            ),
        ]
    )
```

Gazebo

- Gazebo는 로봇 시뮬레이션을 위한 강력한 도구
- ROS2 Humble과 함께 사용하는 Gazebo 버전은 Gazebo-Ignition
- Gazebo 설치

```
# Gazebo 설치
sudo apt update
sudo apt install ros-humble-gazebo-ros-pkgs


# Gazebo 실행 확인
gazebo
```

sudo apt install ros-humble-gazebo*

ROS2 시뮬레이션

Gazebo

Gazebo

- ROS2와 통합하면 실제 로봇 하드웨어 없이도 다양한 로봇 시스템을 개발, 테스트, 디버깅 할 수 있는 강력할 시뮬레이션 환경을 제공
- Gazebo의 주요 기능
  1. 물리 엔진 제공(ODE, Bullet, DART)
  2. 센서 시뮬레이션
  3. 3D환경
  4. 로봇 모델 시뮬레이션
- ROS2와 Gazebo 통합 패키지
  - Gazebo_ros_pkgs

Open Dynamics Engine

Bullet Real-Time Physics Simulation

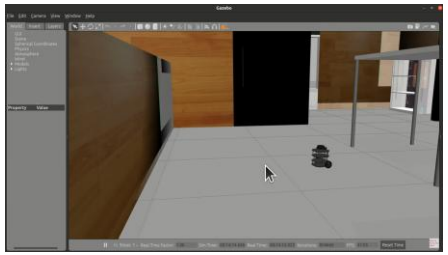
Simbody: Multibody Physics API

DART

Physics Engine	Gazebo Version	Availability
ODE	1.9+	Binary,Source
Bullet	3.0+	Source
Simbody	3.0+	Source
DART	3.0+	Source

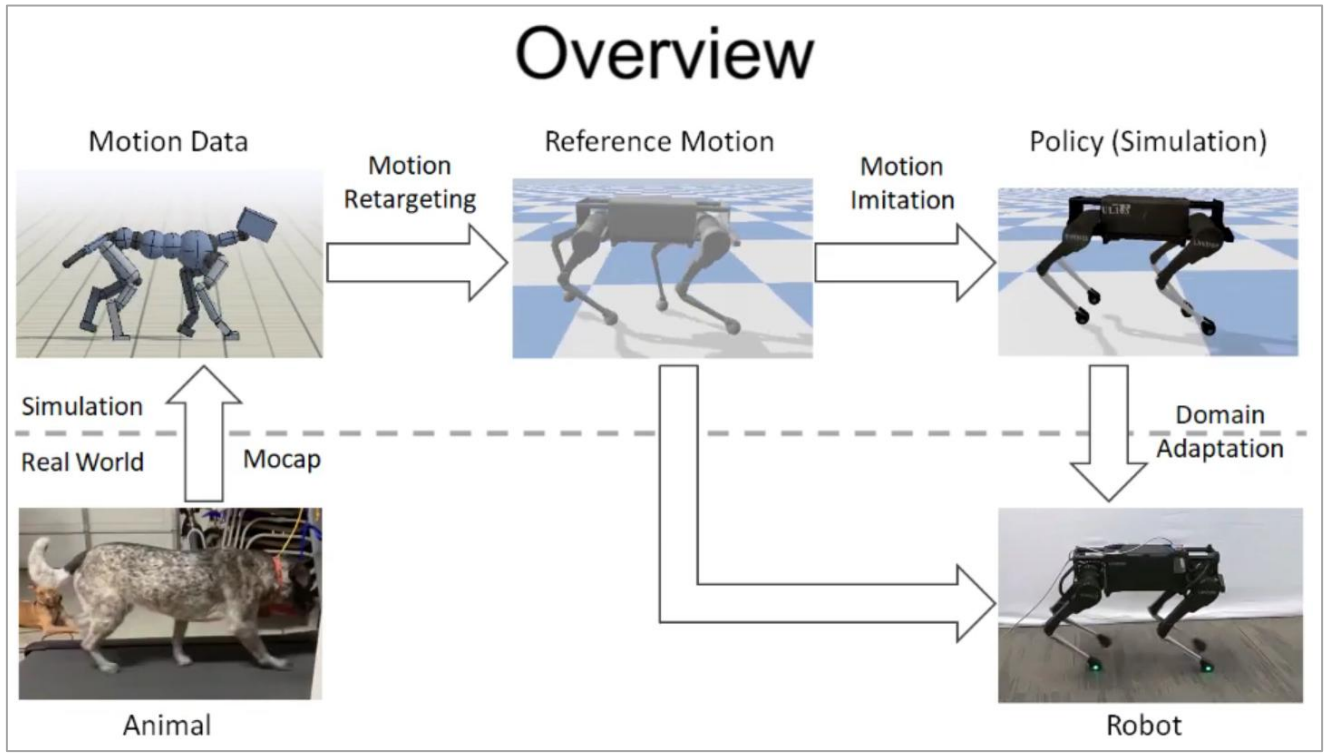
GAZEBO

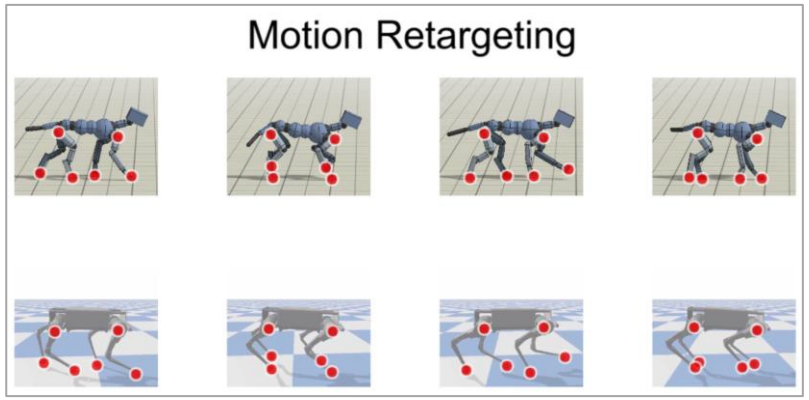
ROS



ROS2 시뮬레이션

Gazebo 폴더에 있는 world 로딩해보기





Bullet Real-Time Physics Simulation

ROS2 시뮬레이션

Gazebo

- **ROS2와 Gazebo 연동 테스트**

```
gazebo --verbose /opt/ros/humble/share/gazebo_plugins/worlds/gazebo_ros_diff_drive_demo.world
```

```
# 터미널 2: 로봇 제어
ros2 topic pub /demo/cmd_demo geometry_msgs/msg/Twist "{linear: {x: 0.1, y: 0, z: 0},
angular: {x: 0, y: 0, z: 0.1}}" -r 10
```

```
# 터미널 3: 로봇 위치 정보 확인
ros2 topic echo /demo/odom_demo
```

[Gazebo –verbose 옵션]

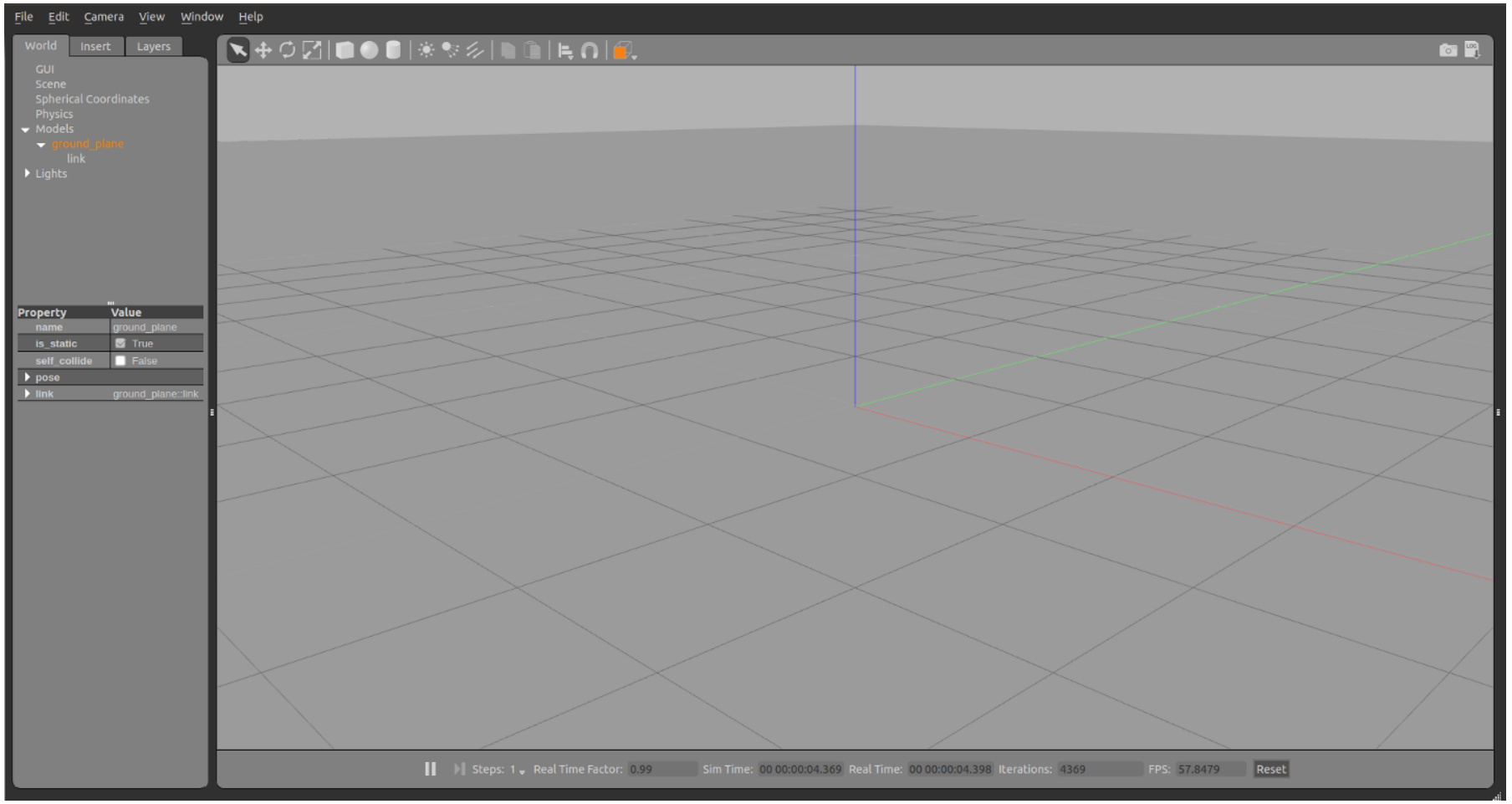
더 많은 로그와 내부 상태 정보를 터미널에 출력해주는 옵션이며 기본 실행(gazebo)과 비교해서 **백엔드에서 어떤 일이 일어나고 있는지**를 알 수 있도록 도와 주는 옵션. 1차 디버깅 도구

```
victor@victor-VirtualBox:~$ gazebo --verbose
Gazebo multi-robot simulator, version 11.10.2
Copyright (C) 2012 Open Source Robotics Foundation.
Released under the Apache 2 License.
http://gazebosim.org

[Msg] Waiting for master.
Gazebo multi-robot simulator, version 11.10.2
Copyright (C) 2012 Open Source Robotics Foundation.
Released under the Apache 2 License.
http://gazebosim.org
```

ROS2 시뮬레이션

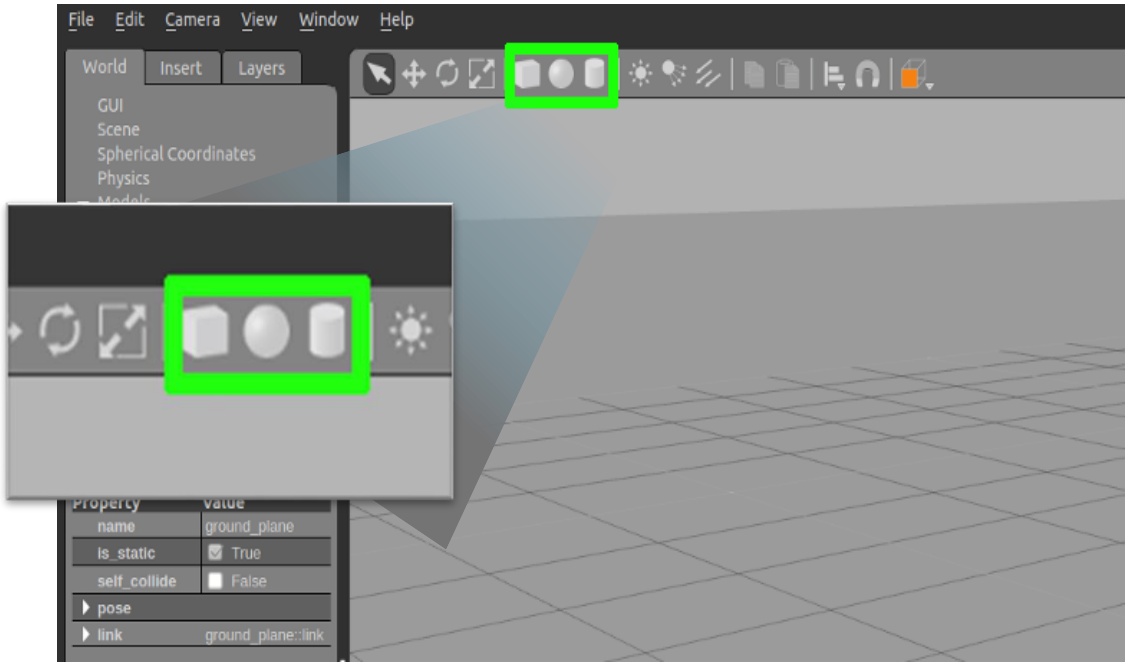
Gazebo

1. 가제보를 시작하면 접지면만 있는 세상

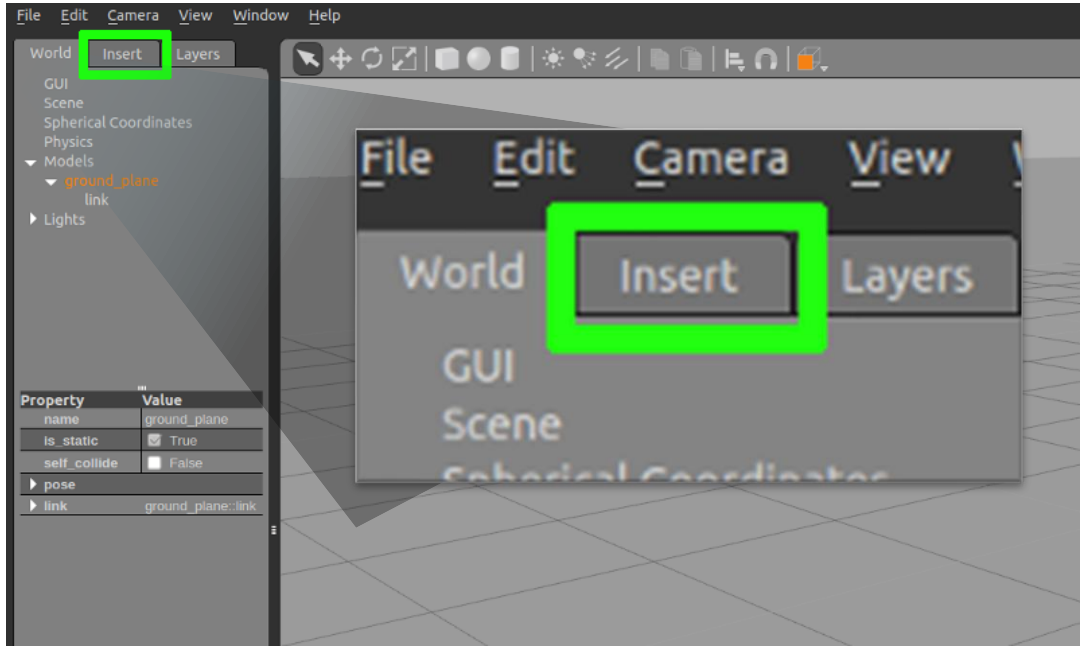


ROS2 시뮬레이션
Gazebo 객체 추가

Gazebo는 Gazebo에 객체를 추가하기 위한 두 가지 메커니즘을 제공



1. 렌더 창 위에 있는 간단한 모양의 집합

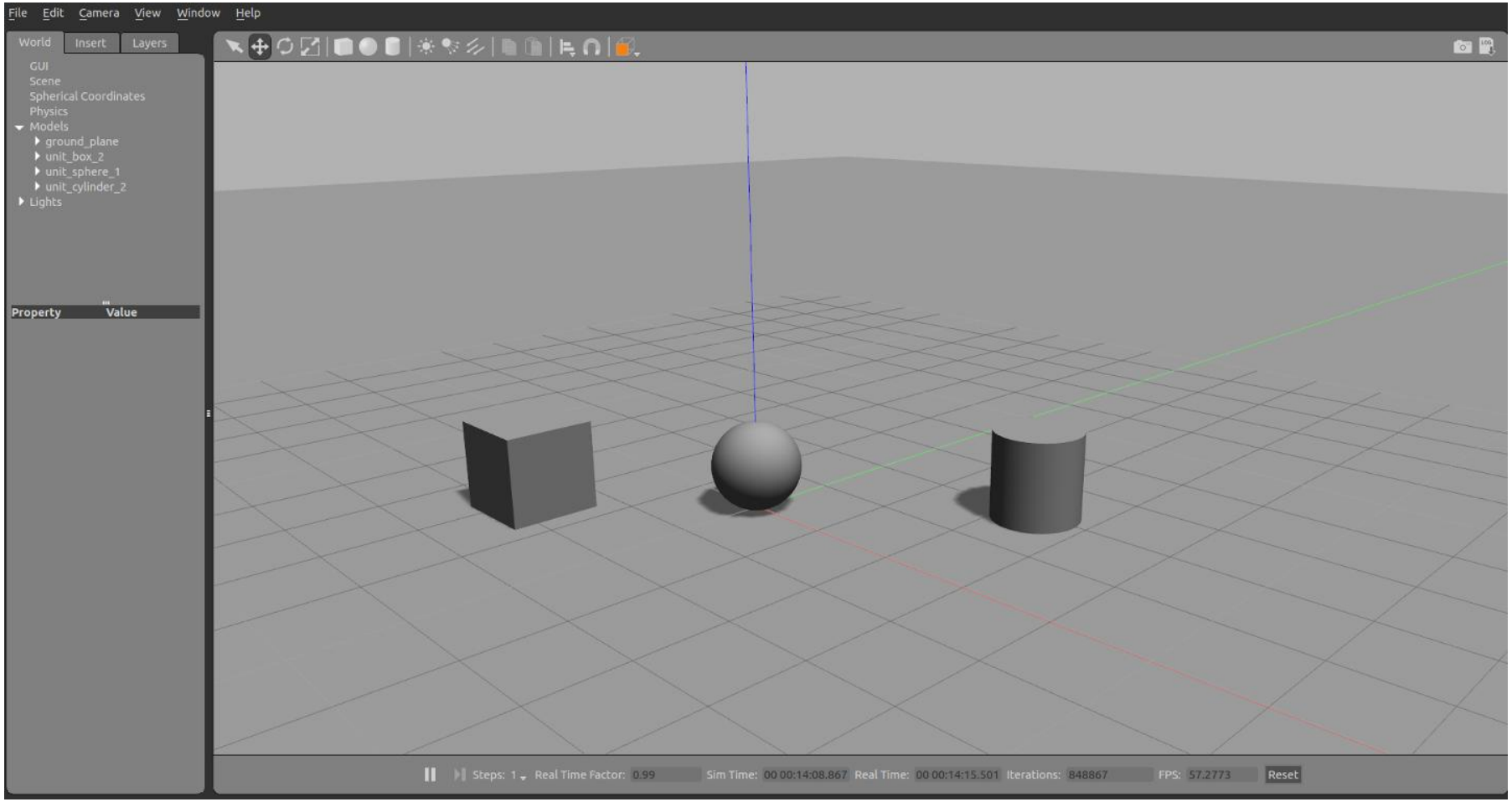


2. 모델 데이터베이스를 Insert 통하는 방법으로,
왼쪽 상단 모서리에 있는 탭

ROS2 시뮬레이션

Gazebo

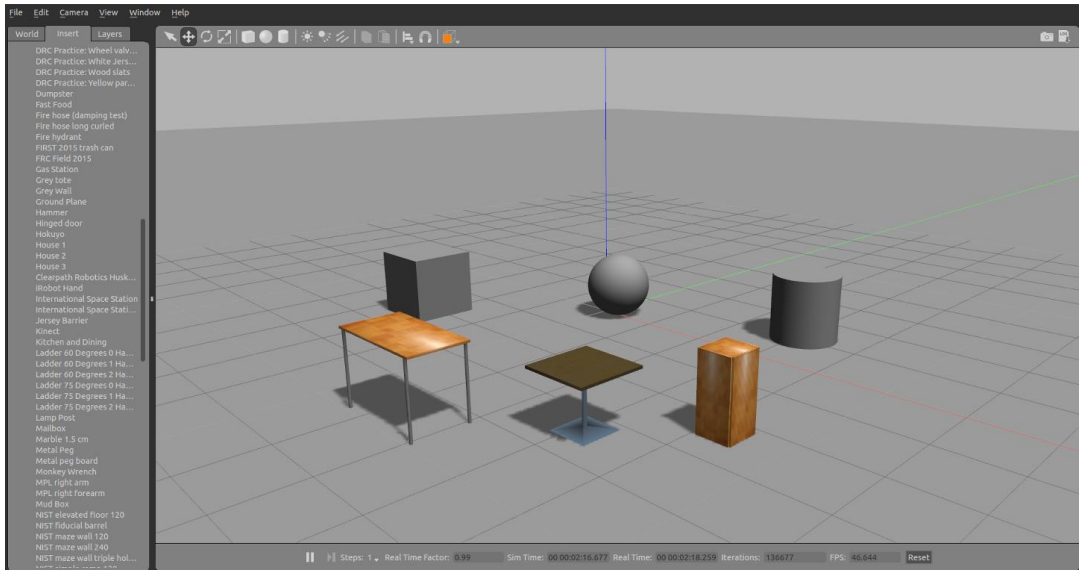
3. 렌더 창 위의 적절한 아이콘을 클릭하면 상자, 구, 원통을 월드에 추가



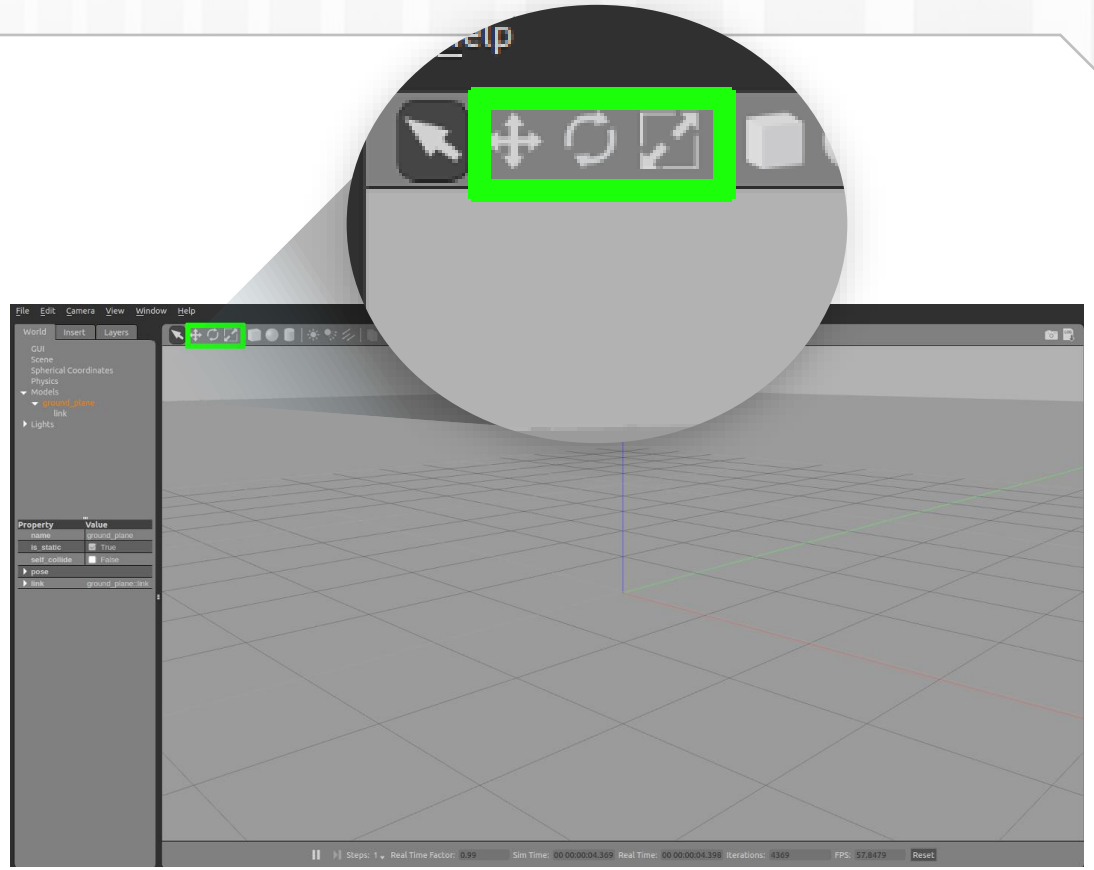
ROS2 시뮬레이션

Gazebo

4. 모델 데이터베이스에서 모델 추가



Insert 모델 데이터베이스에 접근하려면 왼쪽 상단 모서리에 있는 탭



각 모델의 포즈는 이동 및 회전 도구를 통해 변경

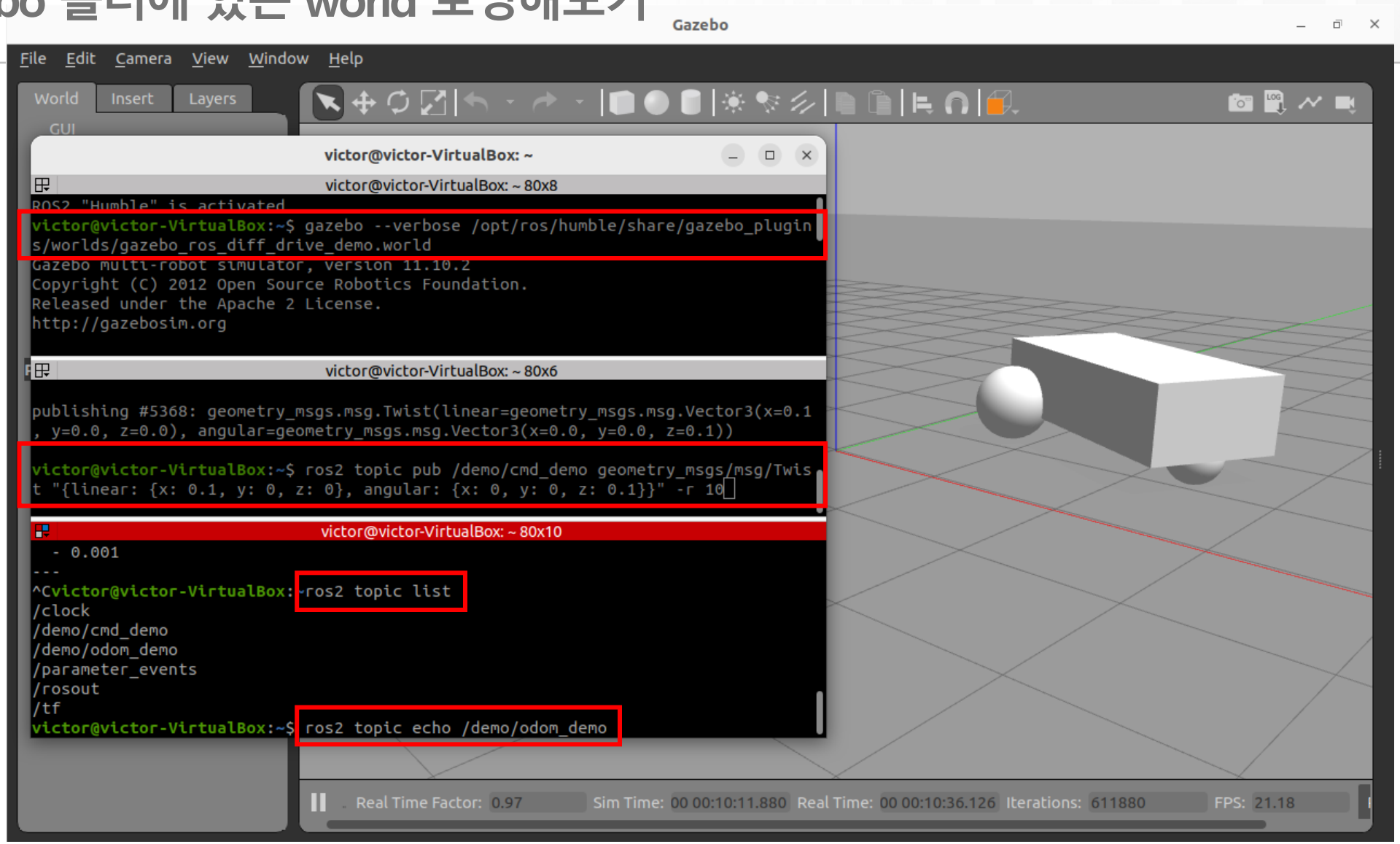
5. 마음에 드는 세계를 완성하면 **File** 메뉴를 통해 저장
   - **지금 메뉴를 선택 File하고, Save World As 새 파일 이름을 입력하라는 팝업**
   - **my_world.sdf 입력 하고 확인을 클릭**
6. 저장된 world는 명령줄에서 로드
   - **gazebo my_world.sdf**

SDF(Simulation Description Format)

- 시뮬레이션 world와 로봇의 물리적 특성, 외형, 동작 등을 정의하는데 사용되는 표준 포맷
- URDF는 로봇 자체를 중심으로 정의하는 반면, SDF는 world 전체, 센서, 플러그인, 조명등 더 많은 요소 포함
- World, model, link, joint, sensor, plugin등의 주요 요소가 있음
- Odom → base_link : 변환 : 로봇의 본체 중심 좌표
- URDF는 Gazebo에서 사용할때 변환이 필요하지만 SDF는 직접 사용 가능

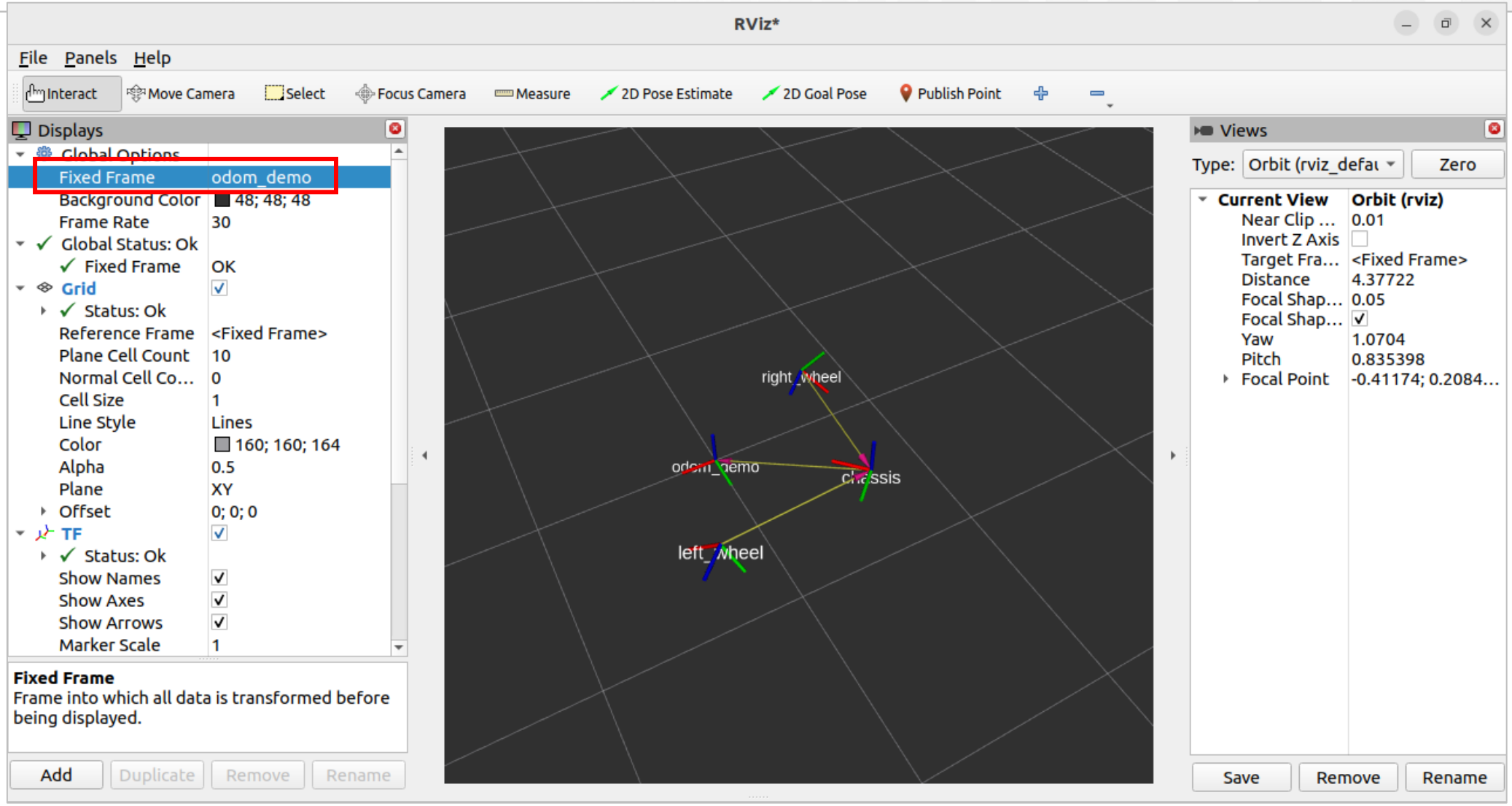
ROS2 시뮬레이션

Gazebo 폴더에 있는 world 로딩해보기



ROS2 시뮬레이션

Gazebo 폴더에 있는 world 로딩해보기



ROS2와 로봇 시뮬레이션

로봇 시뮬레이션

- **로봇 시뮬레이션**

  컴퓨터 상에서 가상의 환경을 이용하여
  로봇의 동작, 센서 데이터, 환경을 개발하고 테스트하는 기술

- **Gazebo**

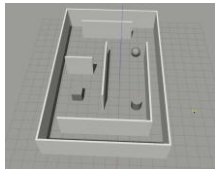
  ROS2를 활용할 수 있는 로봇 시뮬레이션
  물리엔진과 3D 그래픽을 지원함

- **장점**
  - 비용 절감 : 로봇 프로토타입을 제작하거나 테스트하는 비용 절감
  - 안전성 : 사람이나 장비에 대한 사고 위험 경감
  - 개발 효율 : 여러 대의 로봇을 테스트하거나 개발하여 효율 증가
  - 유연성 : 날씨, 지형, 장애물 등 다양한 시나리오 실험

▪ Gazebo 시뮬레이션의 구성요소

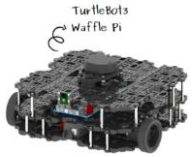
GAZEBO

World



시뮬레이션 환경을 정의하는 파일
환경의 지형, 조명, 물리 엔진 설정 등이 포함됨

로봇 모델



로봇 모델을 정의하는 파일
urdf나 sdf 확장자로 표현됨
링크, 조인트, 센서 등을 구성할 수 있음

플러그인

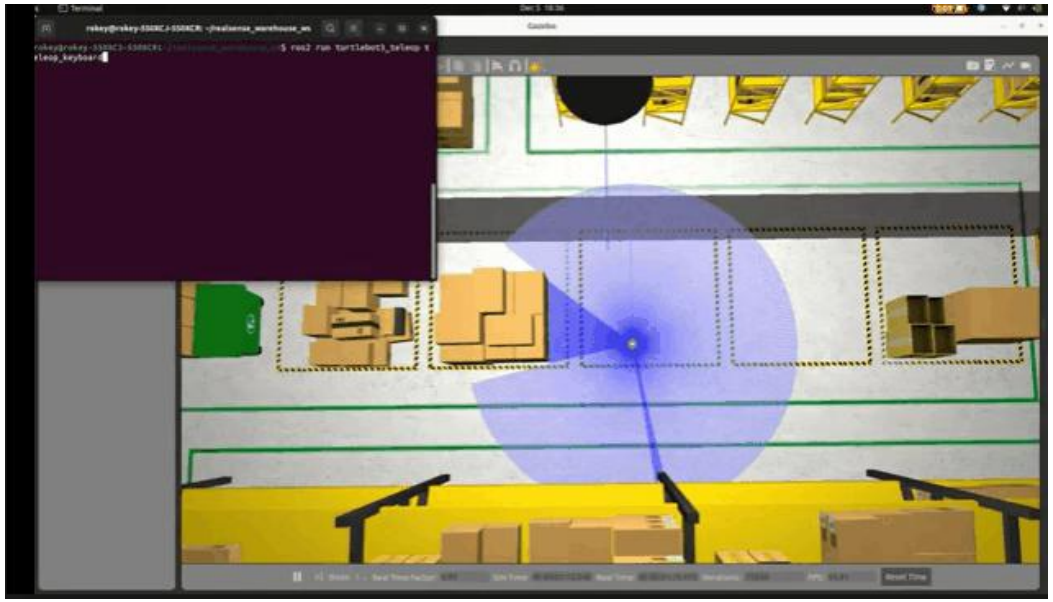
Gazebo에서 제공하는 로봇 제어 API를 이용할 수 있음
(World Plugin, Model Plugin, Sensor Plugin, System Plugin)

launch.py

Gazebo를 포함한 여러 구성 요소를 한꺼번에 실행하기 위해
주로 launch파일을 통해 프로젝트를 설정하고 실행함

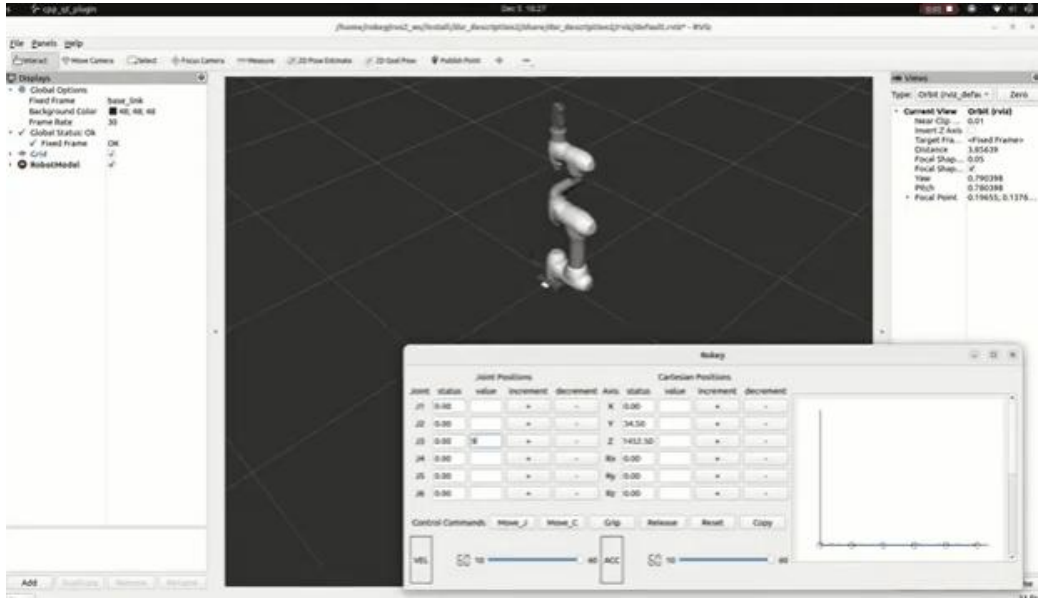
ROS2와 로봇 시뮬레이션

- Turtlebot3



Fulfillment Center

- 두산 로봇 팔

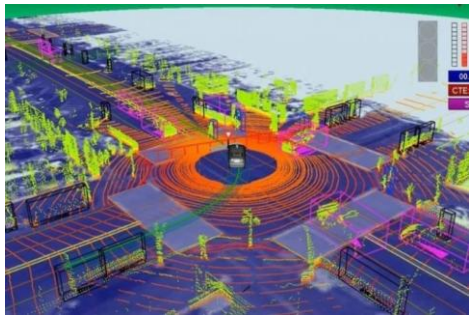


Doosan Robot Simulation 실습

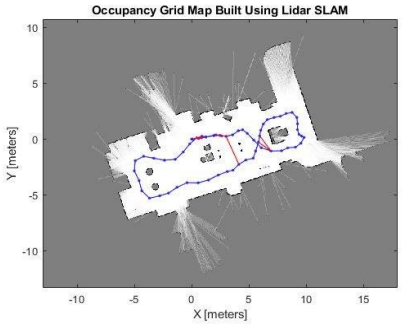
Gazebo Simulation과 SLAM

SLAM

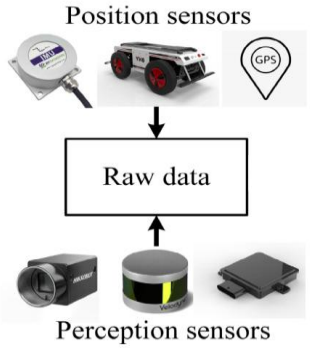
- **SLAM은...**
  - Simultaneous Localization and Mapping의 약자로 동시적 위치 추적 및 지도 생성이라는 뜻
- **사용 기술**
  - **Localization** : 로봇이 현재 위치를 추정하는 과정
  - **Mapping** : 주변 환경에 대해 지도를 생성하는 과정
  - **Sensor Fusion** : 라이다, 카메라, IMU 센서, GPS, 적외선, 초음파 센서 등 다양한 센서 데이터를 통합하여 정확도를 높이는 기술



Localization



Mapping



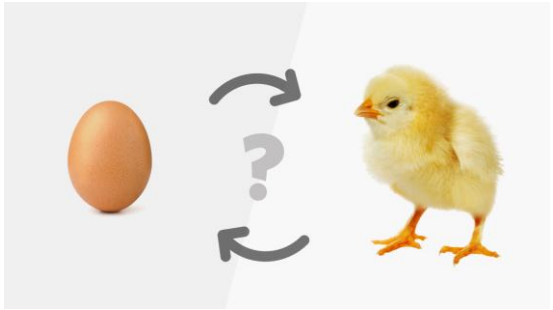
Sensor Fusion

Gazebo Simulation과 SLAM

SLAM

Simultaneous Localization : 로봇의 자세(position + orientation)를 획득하는 것

- Mapping: 환경정보(지도)를 획득하는 것
- 로봇의 자세(위치+ 방향)와 환경지도를 동시에 획득하는 기술
- SLAM에서는 아무것도 주어지지 않음
- 로봇의 자세· 지도Landmark의 위치 모두 오차를 갖게 됨
- 오차를 어떻게든 보정해가면서 로봇의 자세와 환경정보를 모두 정확하게 알아내는 것



Chicken and Egg Problem

Localization

- Localization에서는 환경정보(지도)가 주어져야 함
- 주어진 지도 안에서 로봇이 '어디에 위치'하고 '어떤 방향'을 바라보고 있는지 알아내는 것
- 지도로부터 획득된 센서 관측데이터를 이용하여 오차를 보정해가면서 로봇의 위치와 방향을 정확하게 알아내는 것

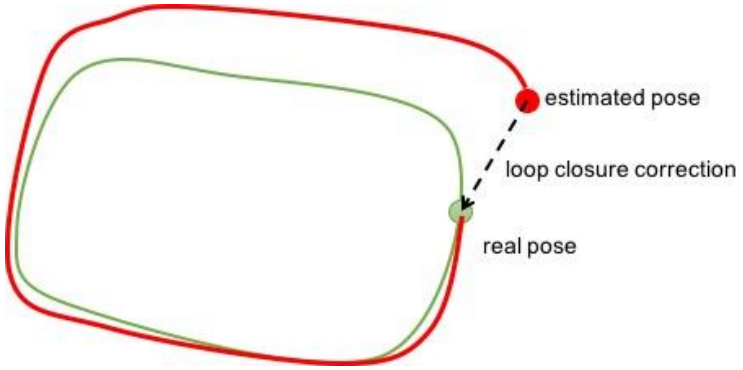
Mapping

- Mapping에서는 로봇의 자세(위치와 방향)이 주어져야 함
- 주어진 로봇의 위치와 방향을 기반으로 '주변환경에 대한 정보'를 알아내는 것
- 센서 관측 데이터와 주어진 로봇 자세를 이용하여 오차를 보정해가면서 환경 정보를 정확하게 알아내는 것

Gazebo Simulation과 SLAM

Loop Closure

- 로봇은 계속 움직이면서 오차 누적됨
- 어느 순간 예전에 왔던 장소로 다시 되돌아오게 도는데
- 이때 그 장소를 알아보지 못하면 지도는 점점 더 오류가 커짐
- 돌아온 장소를 인식하고 과거와 현재의 지도를 연결(정합)하는 작업



이전의 이미지와 특징점을 매칭하여 유사도가 높으면 같은 지점이라고 판단하고 누적된 오차를 보정하여 정확도를 개선해야 함

Kidnapped Robot Problem

로봇이 갑작스럽게 다른 위치로 납치(이동)되었을 때 자신의 위치를 파악하지 못하는 상황

Why?
- 물리적 이동(부딪힘이나 인위적인 이동)
- 센서 오류
- 껐다 켰을 때
- 여러 공간이 비슷한 경우

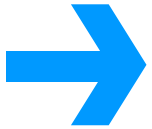
지도를 작성할 때는 kidnapped problem이 발생하지 않도록 주의를 기울여야 함

- 좋은 초기 위치 추정 제공 → Cartographer는 초기 위치 추정에 크게 의존
- 센서 구성 최적화(센서 품질 및 다양한 센서 조합) → Sensor Fusion(LiDAR + IMU + Odom)
- LIDAR scan match 품질 높이기
- Loop closure 및 submap 파라미터 조정, Global localization Trigger
- 위와 같은 방법으로 위치 유실 감지 및 회복 전략 구현

Gazebo Simulation과 SLAM

SLAM은 어떻게 해결?

- Localization : 먼저 주변 환경에 대한 정보를 알아야 함
- Mapping : 먼저 현재 로봇의 위치와 방향에 대한 정보를 알아야



추정과 반복을 사용해서 해결

위치와 지도를 동시에 " 조금씩" 추정하면서 점점 더 정확하게 만들어 감

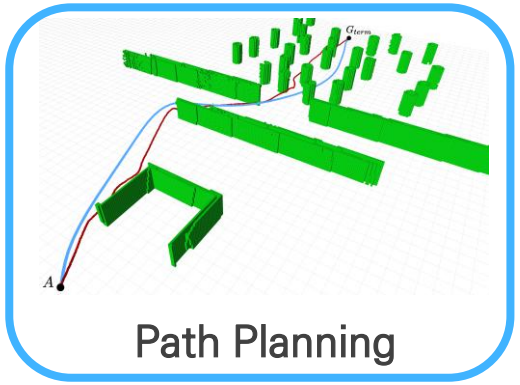
SLAM의 일반적인 해결 방식

1. 초기화(Initialization) : 로봇이 임의의 위치에서 시작. 센서 데이터(LiDAR, 카메라) 수집
2. 동시 추정(Simultaneous Estimation) : 현재 센서 데이터를 기반으로 자기 위치 추정 동시에 주변 지도 업데이트
3. 루프 클로징(Loop Closing) : 전에 방문한 위치를 다시 방문하면 과거의 지도와 현재의 지도를 정렬해 오류를 줄임
4. **루프 클로징은 오류 누적을 정정하는 핵심 단계**
5. 최적화(Graph Optimization) : 시간에 따라 쌓인 위치와 맵 데이터를 그래프 형대로 모델링하고 그래프 최적화를 통해 위치와 맵을 동시에 정제

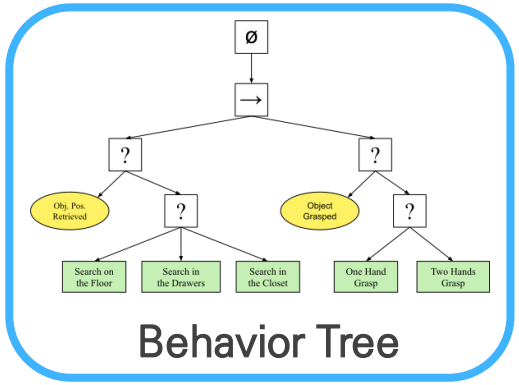
Gazebo Simulation과 SLAM

NAV

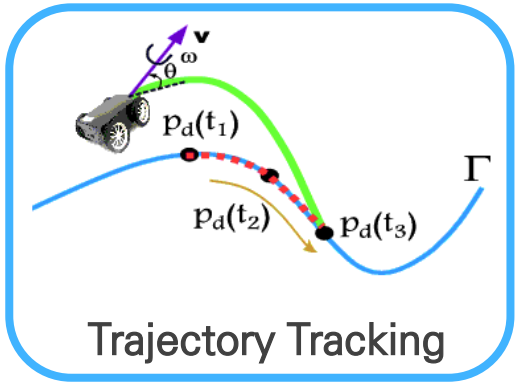
- **NAV는...**
  - Navigation은 SLAM을 활용하여 로봇을 원하는 위치까지 자동으로 도달하게 제어하는 것
- **사용 기술**
  - **Path Planning** : 목표 지점까지 최적의 경로를 찾는 과정
  - **Behavior Tree** : 로봇의 동작을 트리 형태로 구성하여 유동적으로 관리하고 제어하는 알고리즘
  - **Trajectory Tracking** : 계획된 경로를 따라 로봇을 제어하는 기술



Path Planning



Behavior Tree



Trajectory Tracking

Path : 어디를 지나갈지를 결정한 경로(좌표) 목록

Trajectory : 어디를 언제, 어떤 속도로 지나갈지 실제 움직임 궤적

Gazebo Simulation과 SLAM

SLAM & NAV

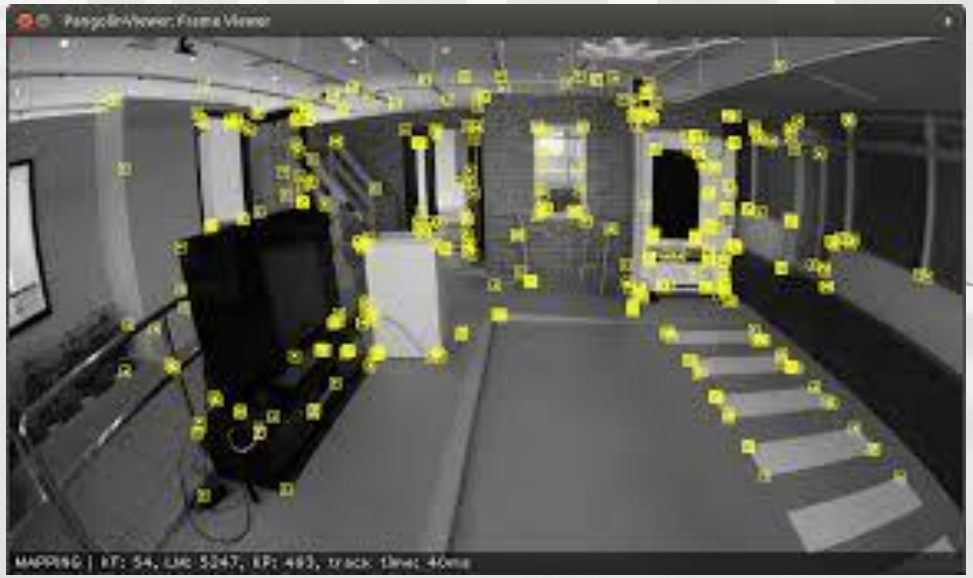
	SLAM (Simultaneous Localization & Mapping)	Nav2 (Navigation)
역할	맵을 생성하며 로봇의 위치를 추정	이미 존재하는 맵에서 경로를 계획하고 이동
입력 데이터	센서 정보(LiDAR, IMU등)	맵, 로봇 위치, 목표 위치
출력 결과	2D맵, 로봇 위치(/map, /tf)	이동 경로, 속도 명령(/cmd_vel)
실행 시점	맵이 없는 환경에서 최초 탐색에 사용	맵이 준비된 이후 목표 지점으로 이동할 때 사용
대표 패키지	slam_toolbox, cartographer, gmapping	nav2_bringup, bt_navigator, planner_server

SLAM : Visual

- 카메라에서 얻은 2D, 3D 이미지 데이터를 사용하여 환경의 고유한 특징점을 추출하는 SLAM
  특징점을 다른 프레임(이미지)에서 다시 찾아내고, 이를 비교해 로봇의 상대적 위치를 계산

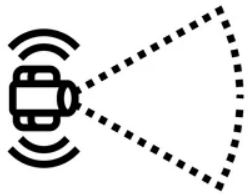
- 장점 : 카메라만으로 저비용 시스템 구현 가능
- 한계 : 조명, 기상, 텍스처없는 평면에서 정확도 감소

관련 영상
https://www.youtube.com/watch?v=yi-y8qTgtiw



SLAM : LiDAR

Light Detection and Ranging : 레이저 빛을 쏴서 물체에 반사되어 돌아오는 시간(Time of Flight)을 측정해서 거리(depth)를 계산하는 센서



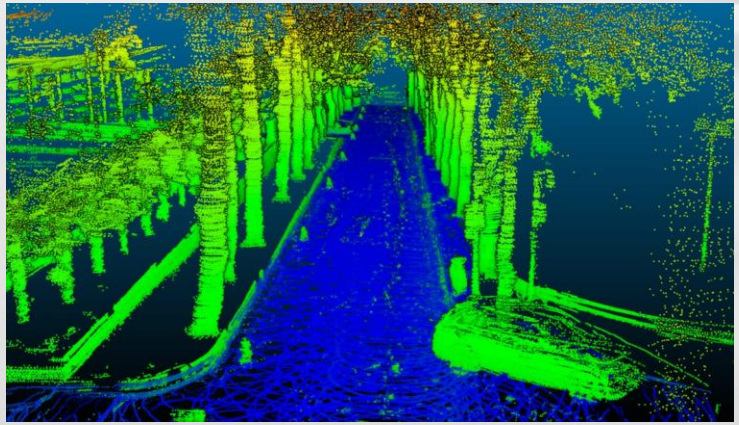
- 라이다에서 거리 데이터를 통해 3D 점 구름, point cloud를 생성하는 SLAM

이전 프레임과 현재 프레임에서 얻은 포인트 클라우드 데이터를 비교하여,
로봇의 상대적 위치와 환경 지도를 동시에 계산

- 장점 : 어두운 환경에서 정확한 거리를 측정
- 한계 : 비용이 높고 외부 노이즈에 민감함

항목	2D Lidar	3D Lidar
스캔방식	단일 평면(수평 또는 수직)	수직 및 수평 방향 모두에서 거리 측정
동작방식	한 개의 레이저가 일정한 각도로 2D 평면을 스캔	여러 개의 레이저가 다양한 각도에서 공간을 스캔하여 3D데이터 생성
출력 데이터	거리 및 각도 정보를 포함한 2D포인트(2D 맵)	거리, 각도 고도 정도를 포함한 3D 포인트 클라우드(3D맵)
메시지 타입, 토픽	sensor_msgs/LaserScan, /scan	sensor_msgs/PointCloud2, /points or /velodyne_points
스캔범위	수m ~ 수십m(보통 360° 수평 스캔)	수m ~ 수백m(30°~120°수직 + 360°수평)
적용분야	실내 자율주행, SLAM, 충돌방지	실외 자율주행 차량 드론 등에서 정밀 공간 인식
적용 사례	실내, 저비용 로봇, 간단한 SLAM, 단순한 장애물 회피	복잡한 공간 인식 필요, 정밀한 3D맵, 구조물 인식

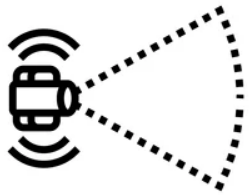
참고영상



SLAM : LiDAR

- LiDAR SLAM의 종류

※ 이번 실습에서는 Cartographer를 사용할 예정



특징	GMapping	Cartographer
호환성	주로 ROS1	ROS1 & ROS2 모두 호환
맵 환경	2D, static한 상황에 유리	2D & 3D
정확도	센서나 Odometry 오류에 민감함	오류에 대해 비교적 강건하고 정확함
로컬라이제이션	대략적인 위치 추정	더 정확한 위치 추정
적용 분야 / 환경	저사양 하드웨어 / 단순한 실내 환경	고정밀 맵이 필요한 복잡한 환경 / 정밀 지도
개발자	OpenSLAM Give your algorithm to the community	Google이 개발한 실시간 SLAM
성능	기본적인 환경에서 충분	복잡하고 넓은 환경에서도 우수

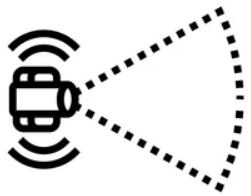
오도메트리(Odometry)

- 로봇이 센서 데이터를 기반으로 자신의 **이동 거리와 방향을 추정**하는 기술
- 주로 바퀴의 회전 정도(Wheel Encoder)를 기준으로 측정(바퀴가 회전한 거리)
- 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 이동거리를 비교 → 직선, 회전, 곡선인지 계산
- 바퀴의 미끄러짐이나 로봇의 회전 오차(Drift) 등으로 인해 누적 오차가 발생할 수 있음
- GPS는 실내에서 불가. IMU의 경우 자세는 잘 측정하지만 오차가 빠르게 누적
- 단독 사용 어려움. 복잡한 환경에서는 IMU, SLAM과 보완 필요. Kalman Filter는 비선형 상태추정 알고리즘(확률적으로 정확한 상태 추정)
- Odometry는 로봇 바퀴 회전량 IMU등을 이용해 자기 위치 추정 → Kalman Filter로 더 정밀하고 신뢰도 높은 상태(속도, 위치 등)를 추정

※ Kalman Filter

1. Prediction(예측 단계) : 이전상태로 부터 현재 상태를 예측
   (속도가 이 정도니까 지금쯤 이 위치에 있을 것 같다)
2. Correction(업데이트 단계) : 실제 센서로 측정된 값을 바탕으로 예측값 보정
   (GPS값과는 약간 다르니 중간쯤으로 값을 조정)

SLAM : LiDAR



Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 지도 업데이트

- 수행하고자 하는 과제와 환경에 따라 라이다 센서의 파라미터 초기화

[라이다 센서의 주요 파라미터]

Angle parameters(각도)

- Angular Resolution : 한 스캔 회전에서 연속된 두 포인트 간의 각도 차이(작을 수록 더 정밀)
- Field of View(FOV) : 시야각. LiDAR가 커버할 수 있는 전체 회전 각도(270°FOV는 뒤쪽 90°는 못 봄)
- Vertical Angle : 수직각도. 3D LiDAR의 경우 여러 개의 수직 레이저 빔이 있고 수직각도 범위도 중요함

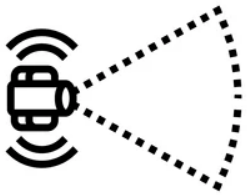
Time parameters(시간)

- Scam Rate : 1초에 몇 번 전체 스캔을 수행하는지? 10Hz → 10회/초당
- Timestamp : 각 포인트나 스캔이 언제 수집되었는지 기록. 움직이는 로봇의 위치보정을 위해 동기화 필요
- Time of Flight : 빛이 물체에 반사되어 돌아오는데 걸린 시간. 이 값으로 거리를 계산

Range parameters(거리)

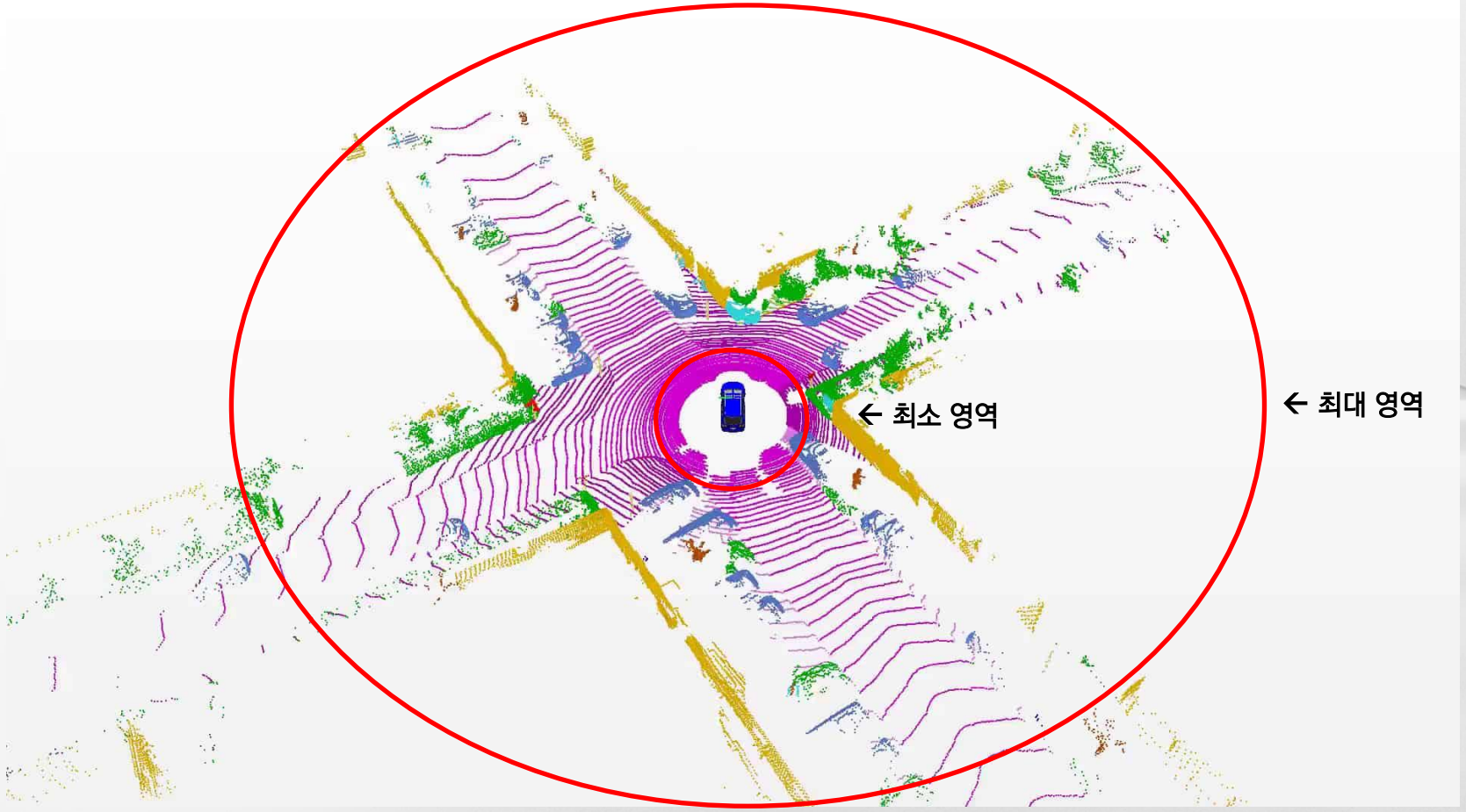
- Minimum Range, Maximum Range : 감지 가능한 최소 및 최대거리(ex, 0.3m ~ 100m, ±2cm)
- Accuracy / Precision : 거리 측정의 오차. 정밀도가 높을 수록 안정적인 맵 생성
- Noise, Signal Strength : 먼 거리나 어두운 물체에서 측정 신호가 약할 수 있어 노이즈가 커질 수 있음

SLAM : LiDAR

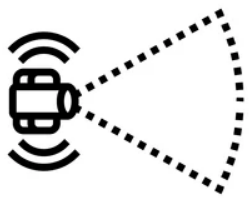


- 라이다 센서로 distance 정보 수집
- 2D, 3D 포인트 클라우드 형태로 들어옴.
- Topic으로 퍼블리시되며 SLAM Node가 구독함

Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 지도 업데이트



SLAM : LiDAR



Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 지도 업데이트

- 수집한 정보(Point Cloud)에 대해 의미 있는 특징점 추출(코너, 평면, 경계선 등)
  - 전체 점을 다 쓰면 계산량이 너무 많고, 모든 점이 의미 있는 정보를 담고 있지는 않음
  - 그러므로 의미 있는 **지형적 정보**가 담긴 점들만 선택하는 전략

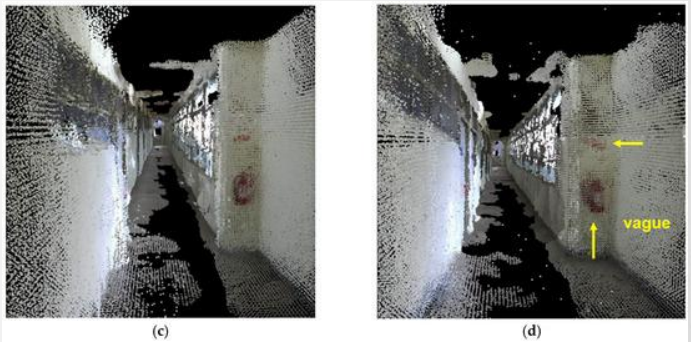
특징점을 찾는 방법 : 곡률 분석(Curvature)

- Edge Features : 모서리, 경계선, 급격한 고도 변화가 있는 부분. 즉, 곡률이 높은 점. 평면에 해당하는 점은 특징점에서 제외
- Planar Features : 평평한 바닥, 벽 등 주변보다 곡률이 낮음 점

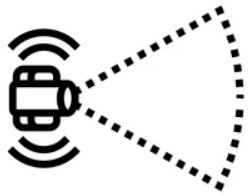
$$C = \frac{\|p_i - Mean(p)\|}{n}$$

곡률 C는 다음과 같이 p_i(현재위치)에 대한 주변 점들의 평균값의 차이로 계산

즉, 특정점이 주변 점들에 비해 구분되는 값을 가진다면 곡률 C는 커짐



SLAM : LiDAR



Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 지도 업데이트

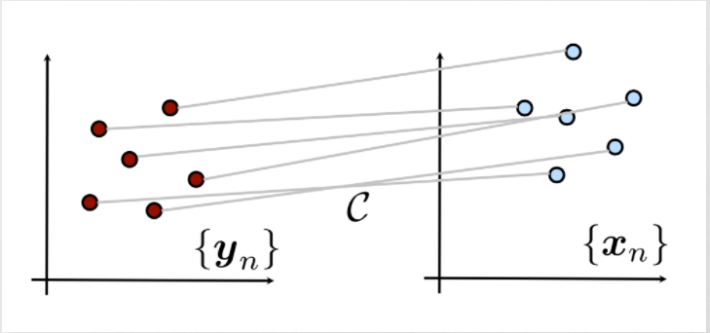
- Point Cloud Registration과 ICP를 이용하여 특징점 매칭
  - 현재 프레임의 특징점과 이전 프레임에 있는 특징점 계산(2개 스캔간 위치 차이를 보정)
  - 즉, 서로 다른 시점에서 얻은 포인트 클라우드 데이터 간의 공통적인 구조(특징)을 찾아서 상대위치를 계산하는 과정
  - ICP, NDT등 매칭 알고리즘 사용
  - 이 과정을 통해 로봇의 현재 위치(Pose)를 추정하고 전체 지도를 점점 정밀하게 업데이트 수행

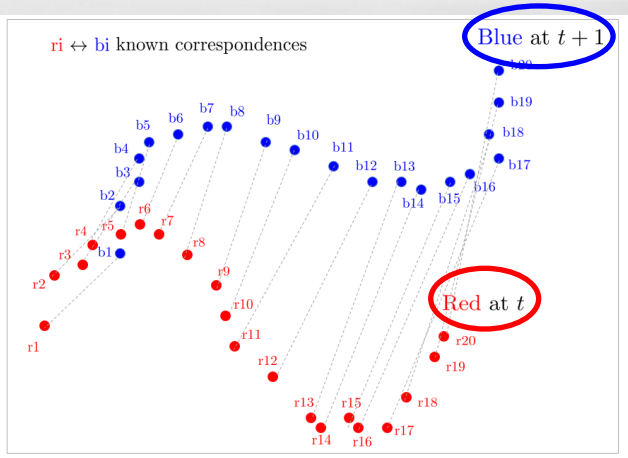
ICP란?(Iterative Closest Points)

- 두 개의 포인트 클라우드 간의 위치 및 자세를 맞추기 위해 반복적으로 가장 가까운 점끼리 매칭한 뒤 변환 행렬을 계산해 정렬하는 알고리즘
- 라이다가 이동하며 수집한 어떤 Point Cloud를 다른 Point Cloud의 공간으로 변환하는 과정

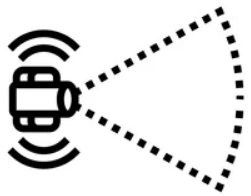
  $P_1 = Q \times P_2 + r$ → P_2를 P_1으로 변환(Q는 회전 행렬, r은 이동 행렬)
- 이때 Point to Point ICP의 경우 점과 점 사이의 유클리드 거리를 최소화하는 방향으로 변환 행렬을 찾는 것으로 가장 기본적인 알고리즘
- 한계 : 두 포인트 클라우드가 충분히 가깝지 않거나 점의 수가 많으면 계산 비용이 커질 수 있음

※ Loop Closure : 로봇이 예전 위치로 되돌아 왔을때 사용 → 장기 누적 오차 보정





SLAM : LiDAR



- 포인트 클라우드 데이터를 시간순으로 누적하여 점진적으로 지도를 작성

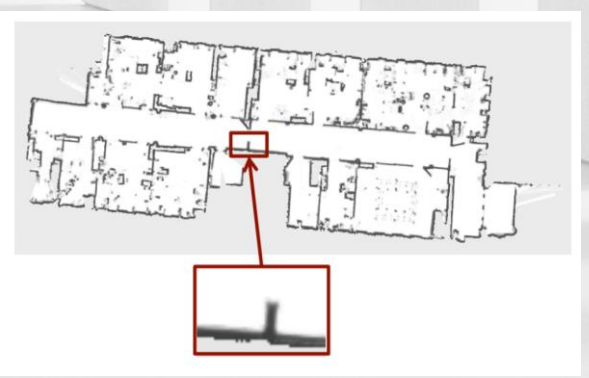
  추정된 위치를 기준으로 새로운 센서 데이터를 기존 맵에 통합

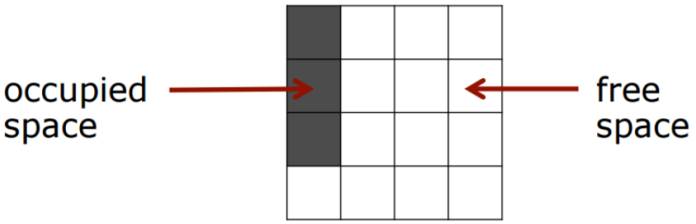
  이때 지도의 신뢰도를 높이기 위해 Occupancy Grid Mapping 알고리즘을 사용

Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 지도 업데이트

Occupancy Grid Mapping

- 로봇이 주변 환경을 2D격자지도(Grid Map)형태로 표현할 때 사용하는 방법
- 지도를 다수의 cell 단위(2차원 배열)로 쪼개서 각 셀의 점유 확률을 계산
- 점유 확률은 해당 cell을 장애물이 점유하고 있을 확률을 뜻하며
- 센서 데이터와 로봇의 위치에 따라 결정됨
- 맵이 다 완성되면 cell에 지정된 확률에 따라 Occupied/Free로 결정됨

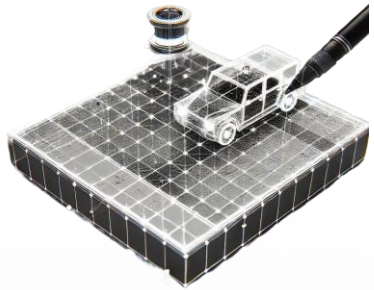


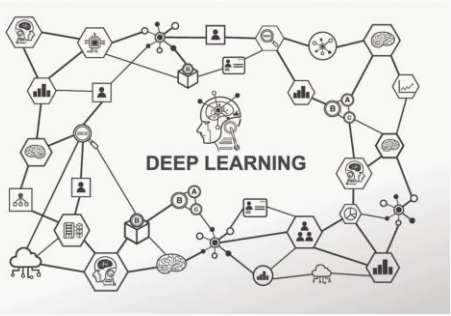


Occupancy Grid Mapping의 3가지 기본 가정

1. Cell을 구성하는 영역은 Occupied이거나 Free 둘 중 하나의 상태만을 가짐(binary variable)
2. Cell은 정적이며 시간이 지나도 변하지 않음
3. 각 셀은 독립적으로 처리됨

SLAM : Sensor Fusion

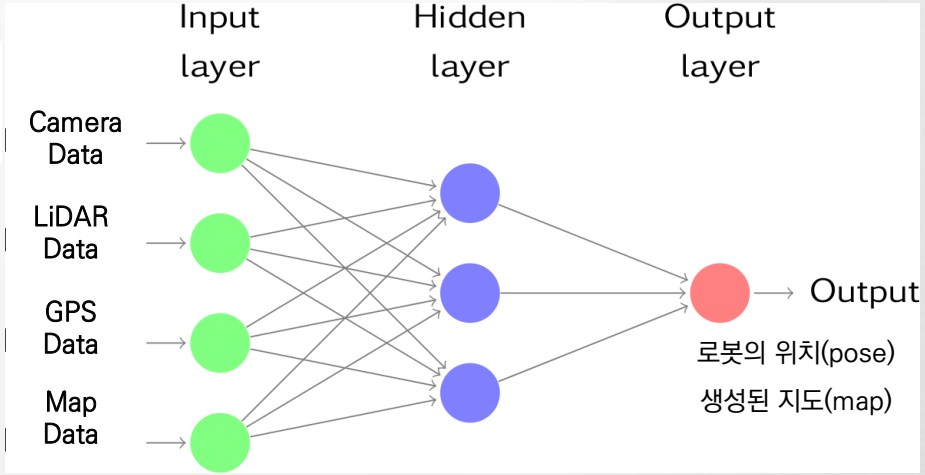




- 카메라와 라이다 그리고 다른 센서들의 데이터를 융합하여 상호 보완적으로 SLAM을 수행
  - 특히 딥러닝 모델로 여러 데이터를 직접 결합하여 지도를 작성하는 End-to-end 모델에 사용
  - 필요한 이유
    1. 정확도 향상 : 센서 단독 정보보다 융합정보가 신뢰도 높음
    2. 강건성 : 하나의 센서가 오류발생해도 다른 센서로 보완 가능
    3. 다양한 정보 수집 : 위치, 방향, 거리, 속도, 형태 등 복합 정보 처리
  - 장점 : 조명 변화, 외부 환경에 더 강건한 시스템
  - 한계 : 데이터 처리량 증가로 실시간 구현 문제(각 센서들을 어떻게 동기화시킬것인가?)
  - 대표적인 알고리즘 : Kalman Filter, Particle Filter, Graph-based Optimization, Deep Learning기반 Fusion

[전통적인 Sensor Fusion 방식]

1. 각각의 센서 전처리
2. 각각의 센서 데이터 특징 추출
3. Feature Fusion(특징 결합)
4. 위치 추정 / 지도 작성(SLAM)



센서	역할
LiDAR	고정밀 거리 측정, 장애물 인식
Camera	차선, 신호등, 객체 분류
IMU	차량 자세, 회전 정보
GPS	전역 위치

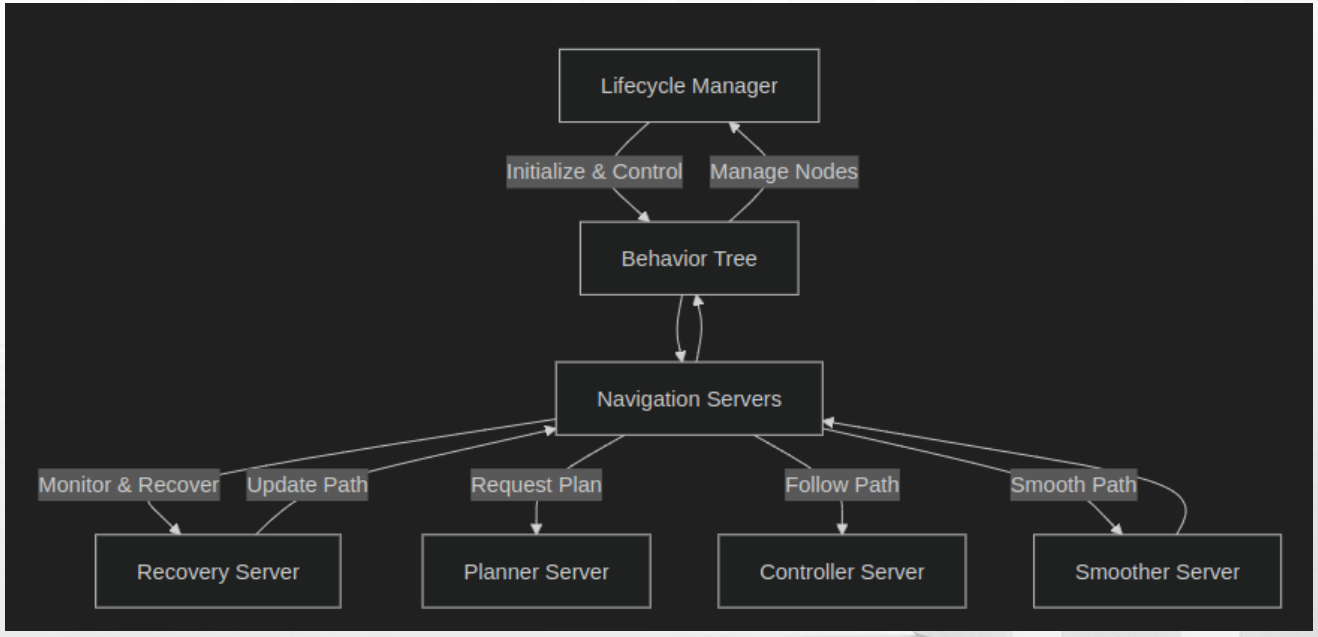
정보통신용어사전

※ 위 센서들을 융합해서 정확한 차량 위치 및 주변 인식 수행

활용 분야 : 자율주행 차량, 무인 항공기, 산업용 로봇 등

예, Tesla, Waymo, NViDIA DriveWorks, Baidu Apollo

Navigation



Nav2는 ROS2기반의 자율 네비게이션 모듈

- 모듈형 소프트웨어 프레임워크
- 자율주행(Autonomous navigation)을 가능하게 해줌

※ 주요 기능 3가지

- 로봇의 현재 위치를 파악(Localization)
- 목표 위치까지 갈 수 있는 경로를 계획(Path Planning)
- 그 경로를 따라 로봇을 실제로 움직임(Path Execution / Control)

※ 주요 구성 요소

- **LifeCycle Manager(수명 주기 관리)**
  - Nav2의 모든 노드의 상태를 제어
  - Behavior Tree의 노드를 초기화하고 관리
- **Behavior Tree**
  - 전체 navigation 행동을 조율하는 노드
  - Nav2의 핵심 제어 로직이 구현된 부분(목표 수신 → 경로 계획 → 이동)
  - 논리 흐름을 트리형태로 구성하고 Navigation server와 통신하며 여러 작업을 제어함
- **Navigation Servers**
  - Recovery server : 경로 재설정이나 비상 상황에서 로봇을 복구함
  - Planner server : 지도 정보를 기반으로 경로를 생성
  - Controller server : 로봇이 경로를 따라 주행하도록 실시간 제어
  - Smoother server : 경로의 급격한 변화에 대해 로봇의 움직임을 최적화
- **기타 노드**
  - amcl : Adaptive Monte Carlo Localization
  - waypoint_follower : 여러 지점을 따라가는 방식의 경로 지원

Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

- Behavior Tree는 어떤 대상의 상태를 제어하는 알고리즘으로 주로 게임에서 NPC를 자율적으로 제어하기 위해 사용

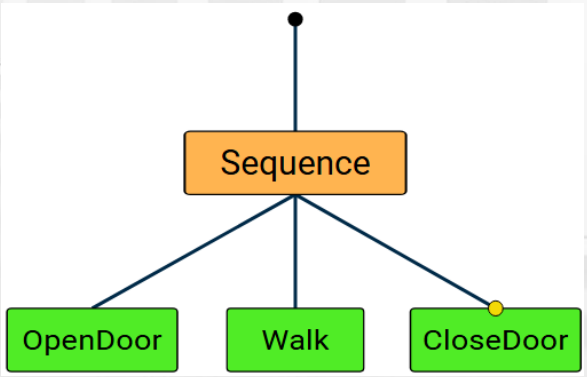
- Step1 : Behavior Tree 관련 파일 다운받기

  아래 링크에서 Nav2에서 default로 불러오는 BT(behavior tree) 파일 다운(xml 형식)

  https://github.com/ros-navigation/navigation2/blob/main/nav2_bt_navigator/behavior_trees/navigate_to_pose_w_replanning_and_recovery.xml

  아래 링크에서 nav2의 behavior tree의 속성을 정의해주는 xml파일 다운

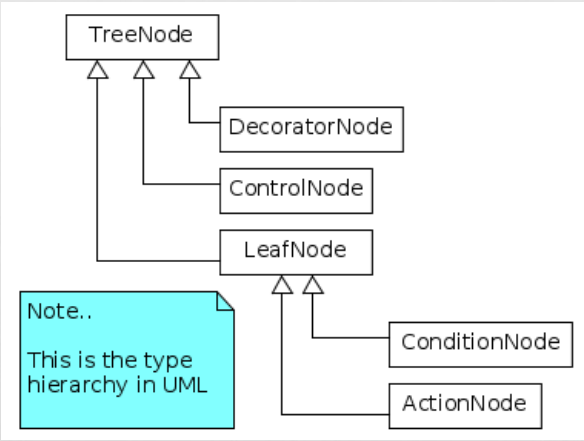
  https://github.com/ros-navigation/navigation2/blob/main/nav2_behavior_tree/nav2_tree_nodes.xml



BehaviorTree

https://www.behaviortree.dev/

https://github.com/behaviortree/behaviortree.CPP



py_trees

https://py-trees.readthedocs.io/en/devel/index.html

https://github.com/splintered-reality

Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

- Step2 : Groot 다운받기

의존성 설치

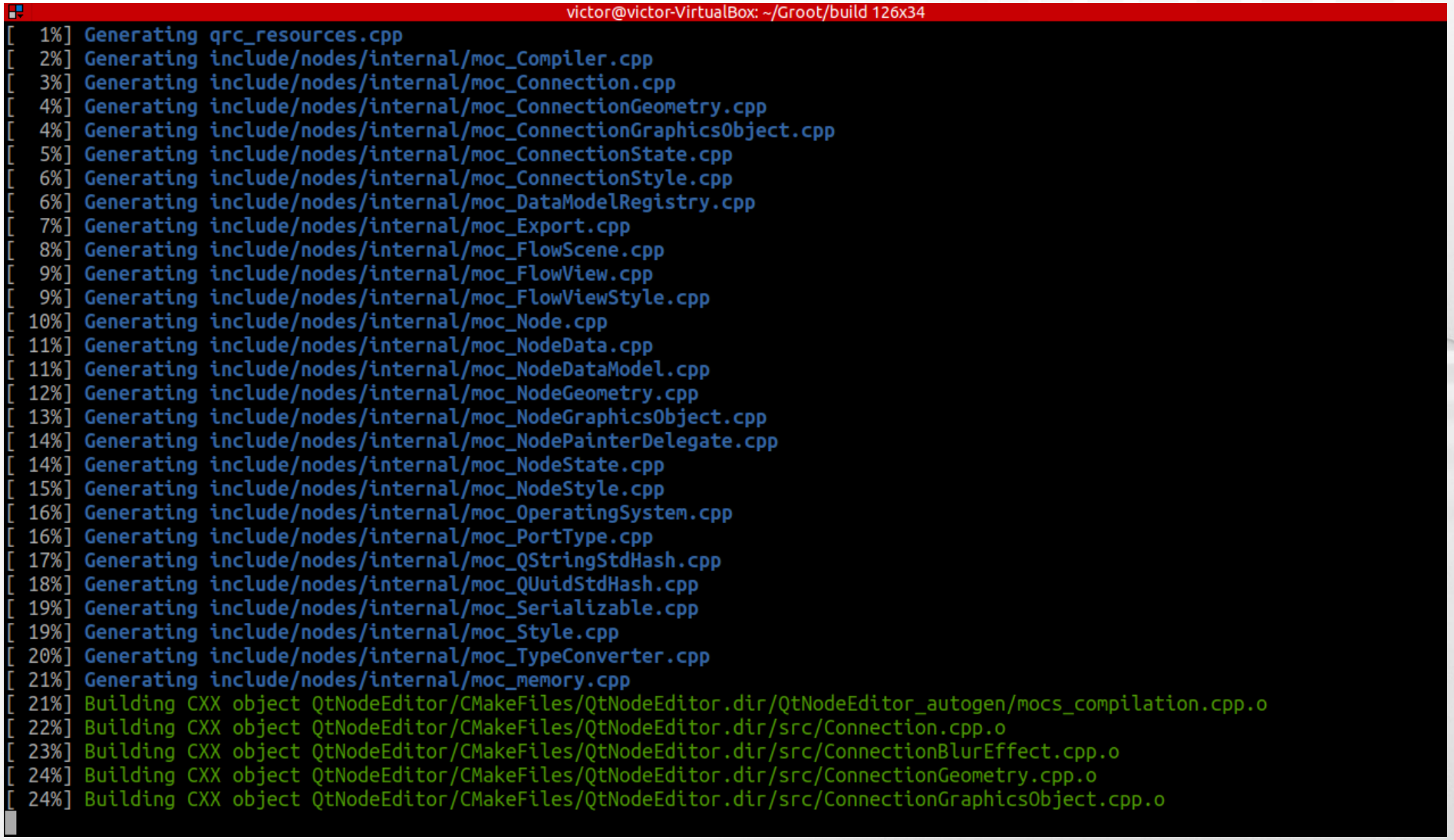
```
sudo apt install qtbase5-dev libqt5svg5-dev libzmq3-dev libdw-dev
```

Groot설치

```
git clone https://github.com/BehaviorTree/Groot.git
cd Groot
git submodule update --init --recursive
mkdir build
cd build
cmake ..
make
```

Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

맨 마지막 줄 make 입력 후 엔터키 누르면 아래와 같이 진행되는 화면이 나옴



Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

cmake 입력 후 엔터키 눌렀는데 아래와 같이 에러가 표시되면 우측화면 설치 후 다시 cmake 진행하면 됨

```
victor@victor-VirtualBox: ~/Groot/build 126x34
victor@victor-VirtualBox:~/Groot/build$ cmake ..
-- The C compiler identification is GNU 11.4.0
-- The CXX compiler identification is GNU 11.4.0
-- Detecting C compiler ABI info
-- Detecting C compiler ABI info - done
-- Check for working C compiler: /usr/bin/cc - skipped
-- Detecting C compile features
-- Detecting C compile features - done
-- Detecting CXX compiler ABI info
-- Detecting CXX compiler ABI info - done
-- Check for working CXX compiler: /usr/bin/c++ - skipped
-- Detecting CXX compile features
-- Detecting CXX compile features - done
-- Found Python3: /usr/bin/python3 (found version "3.10.12
-- Found ament_index_cpp: 1.4.0 (/opt/ros/humble/share/ame
CMake Error at CMakeLists.txt:27 (find_package):
  By not providing "Findbehaviortree_cpp_v3.cmake" in CMAK
  project has asked CMake to find a package configuration
  "behaviortree_cpp_v3", but CMake did not find one.

  Could not find a package configuration file provided by
  "behaviortree_cpp_v3" with any of the following names:

    behaviortree_cpp_v3Config.cmake
    behaviortree_cpp_v3-config.cmake

  Add the installation prefix of "behaviortree_cpp_v3" to
  or set "behaviortree_cpp_v3_DIR" to a directory containi
  files.  If "behaviortree_cpp_v3" provides a separate dev
  SDK, be sure it has been installed.


-- Configuring incomplete, errors occurred!
See also "/home/victor/Groot/build/CMakeFiles/CMakeOutput.log".
```

```
victor@victor-VirtualBox: ~/Groot/build 126x3
victor@victor-VirtualBox:~$ sudo apt-get install ros-humble-behaviortree-cpp-v3
Reading package lists... Done
Building dependency tree... Done
Reading state information... Done
The following additional packages will be installed:
  libncurses-dev
Suggested packages:
  ncurses-doc
The following NEW packages will be installed:
  libncurses-dev ros-humble-behaviortree-cpp-v3
0 upgraded, 2 newly installed, 0 to remove and 10 not upgraded.
Need to get 665 kB of archives.
After this operation, 3,690 kB of additional disk space will be used.
Do you want to continue? [Y/n] y
Get:1 http://kr.archive.ubuntu.com/ubuntu jammy-updates/main amd64 libncurses-dev amd64 6.3-2ubuntu0.1 [381 kB]
Get:2 http://packages.ros.org/ros2/ubuntu jammy/main amd64 ros-humble-behaviortree-cpp-v3 amd64 3.8.7-1jammy.20250325.211251 [
284 kB]
Fetched 665 kB in 4s (156 kB/s)
Selecting previously unselected package libncurses-dev:amd64.
(Reading database ... 303135 files and directories currently installed.)
Preparing to unpack .../libncurses-dev_6.3-2ubuntu0.1_amd64.deb ...
Unpacking libncurses-dev:amd64 (6.3-2ubuntu0.1) ...
Selecting previously unselected package ros-humble-behaviortree-cpp-v3.
Preparing to unpack .../ros-humble-behaviortree-cpp-v3_3.8.7-1jammy.20250325.211251_amd64.deb ...
Unpacking ros-humble-behaviortree-cpp-v3 (3.8.7-1jammy.20250325.211251) ...
Setting up libncurses-dev:amd64 (6.3-2ubuntu0.1) ...
Setting up ros-humble-behaviortree-cpp-v3 (3.8.7-1jammy.20250325.211251) ...
Processing triggers for man-db (2.10.2-1) ...
victor@victor-VirtualBox:~$ cd Groot/
victor@victor-VirtualBox:~/Groot$ cd build/
victor@victor-VirtualBox:~/Groot/build$ ll
total 52
drwxrwxr-x  6 victor victor  4096  4월 13 22:25 ./
drwxrwxr-x 13 victor victor  4096  4월 13 22:25 ../
```

sudo apt-get install ros-humble-behaviortree-cpp-v3

Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

다시 cmake 와 make 입력 후 엔터키 누르면 아래와 같이 build가 진행됨

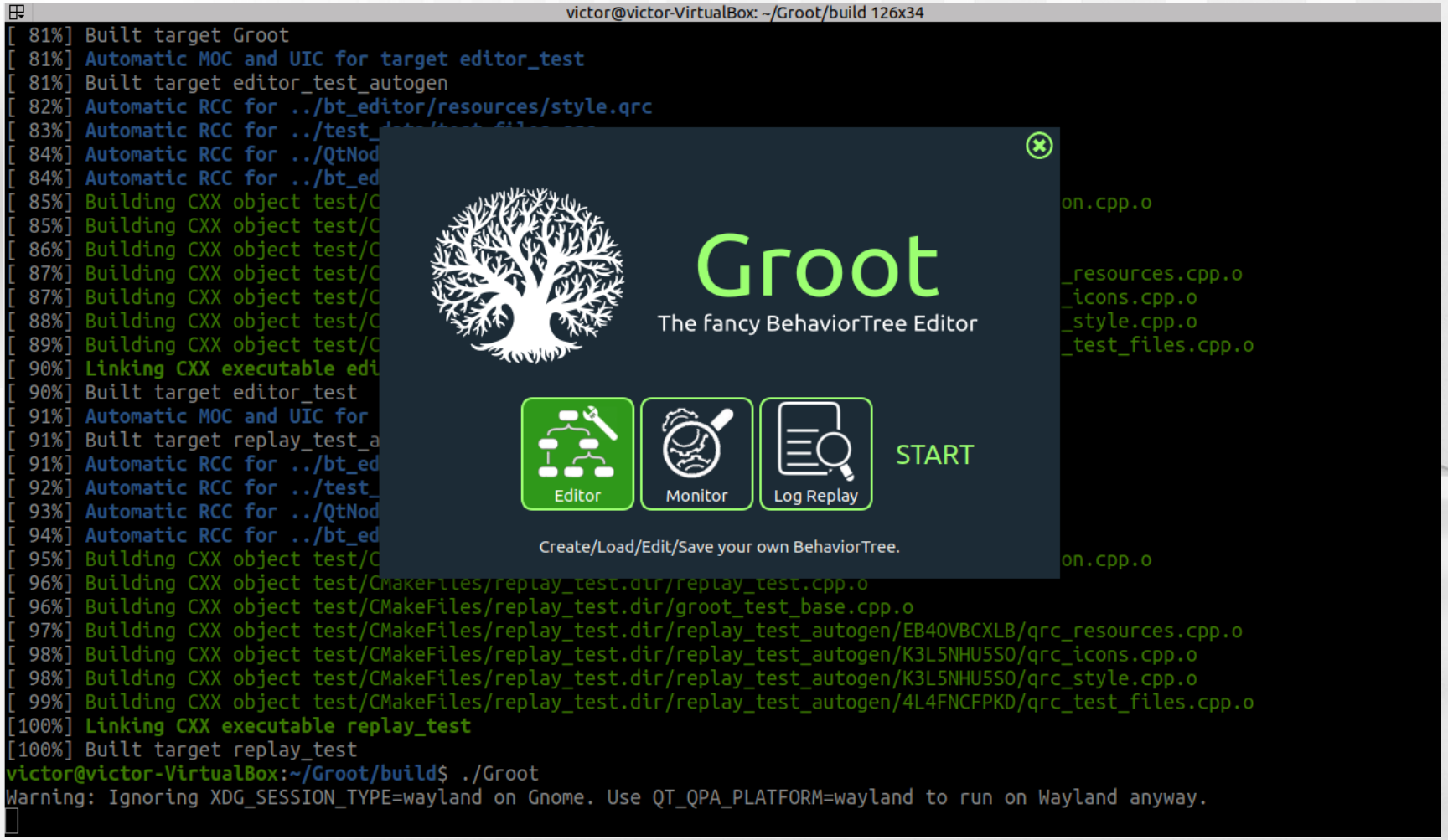
```
victor@victor-VirtualBox: ~/Groot/build 126x34
-rw-rw-r--  1 victor victor   104  4월 13 22:25 CTestCustom.cmake
victor@victor-VirtualBox:~/Groot/build$ cmake ..
-- Found ament_index_cpp: 1.4.0 (/opt/ros/humble/share/ament_index_cpp/cmake)
-- --------------------
-- Compiling with AMENT.
-- --------------------
-- Found ZMQ: /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libzmq.so
-- ZeroMQ found.
-- Configuring done
-- Generating done
-- Build files have been written to: /home/victor/Groot/build
victor@victor-VirtualBox:~/Groot/build$ make
[  1%] Automatic MOC and UIC for target QtNodeEditor
[  1%] Built target QtNodeEditor_autogen
[  1%] Generating qrc_resources.cpp
[  2%] Generating include/nodes/internal/moc_Compiler.cpp
[  3%] Generating include/nodes/internal/moc_Connection.cpp
[  4%] Generating include/nodes/internal/moc_ConnectionGeometry.cpp
[  4%] Generating include/nodes/internal/moc_ConnectionGraphicsObject.cpp
[  5%] Generating include/nodes/internal/moc_ConnectionState.cpp
[  6%] Generating include/nodes/internal/moc_ConnectionStyle.cpp
[  6%] Generating include/nodes/internal/moc_DataModelRegistry.cpp
[  7%] Generating include/nodes/internal/moc_Export.cpp
[  8%] Generating include/nodes/internal/moc_FlowScene.cpp
[  9%] Generating include/nodes/internal/moc_FlowView.cpp
[  9%] Generating include/nodes/internal/moc_FlowViewStyle.cpp
[ 10%] Generating include/nodes/internal/moc_Node.cpp
[ 11%] Generating include/nodes/internal/moc_NodeData.cpp
[ 11%] Generating include/nodes/internal/moc_NodeDataModel.cpp
[ 12%] Generating include/nodes/internal/moc_NodeGeometry.cpp
[ 13%] Generating include/nodes/internal/moc_NodeGraphicsObject.cpp
[ 14%] Generating include/nodes/internal/moc_NodePainterDelegate.cpp
[ 14%] Generating include/nodes/internal/moc_NodeState.cpp
[ 15%] Generating include/nodes/internal/moc_NodeStyle.cpp
```

Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

- Step3 : Groot 실행

Groot 실행(editor mode 선택)

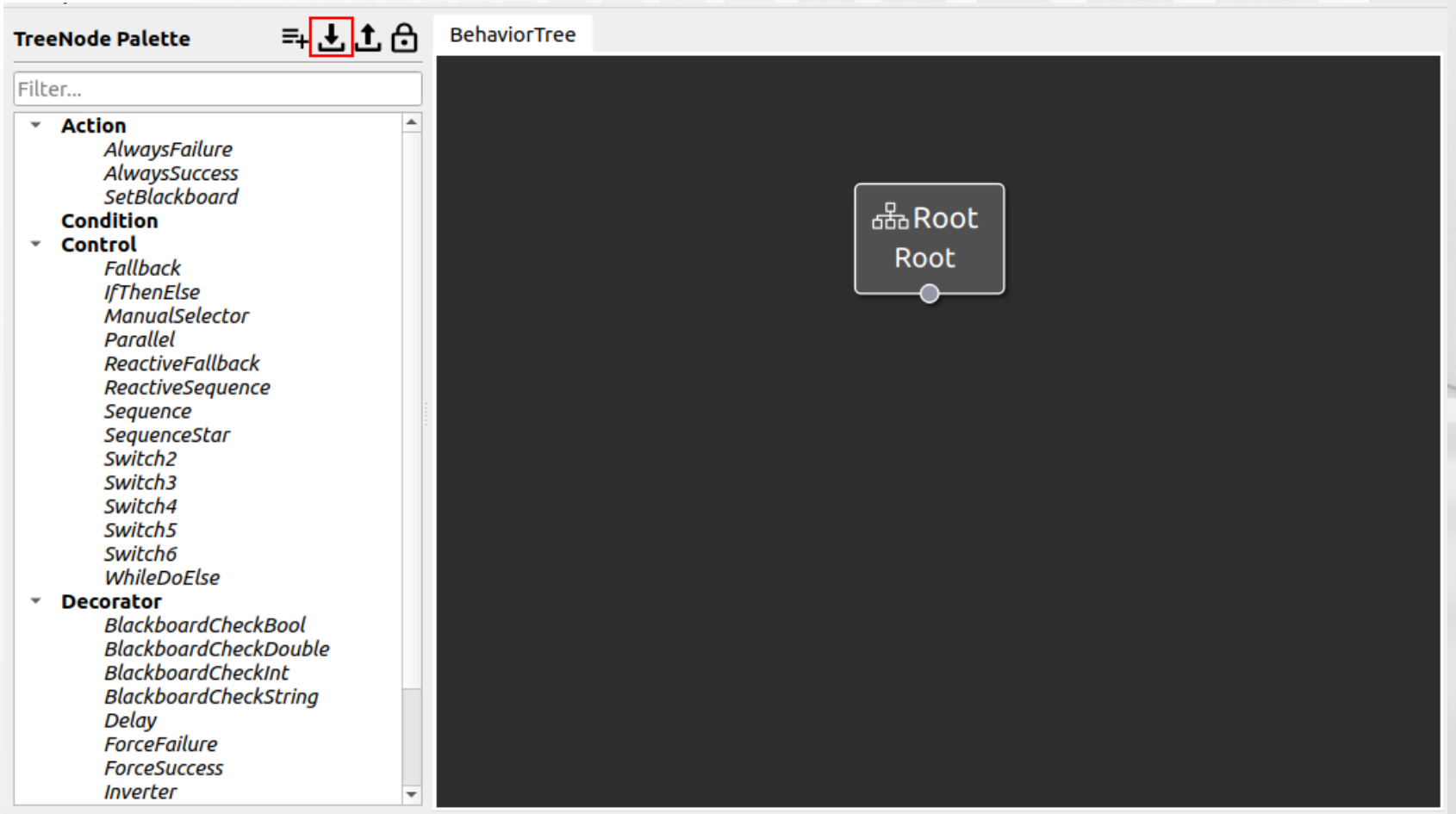
```
cd ~/Groot/build
./Groot
```



Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

- Step3 : Groot 실행

내려받기 버튼을 누르고 nav2_tree_nodes.xml를 선택

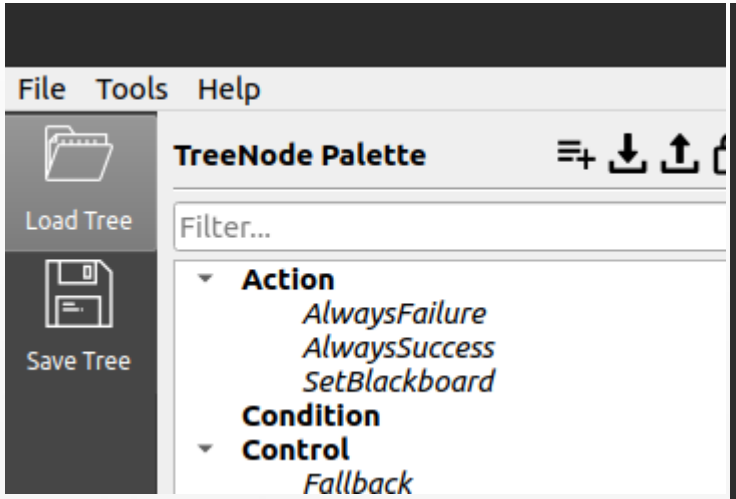


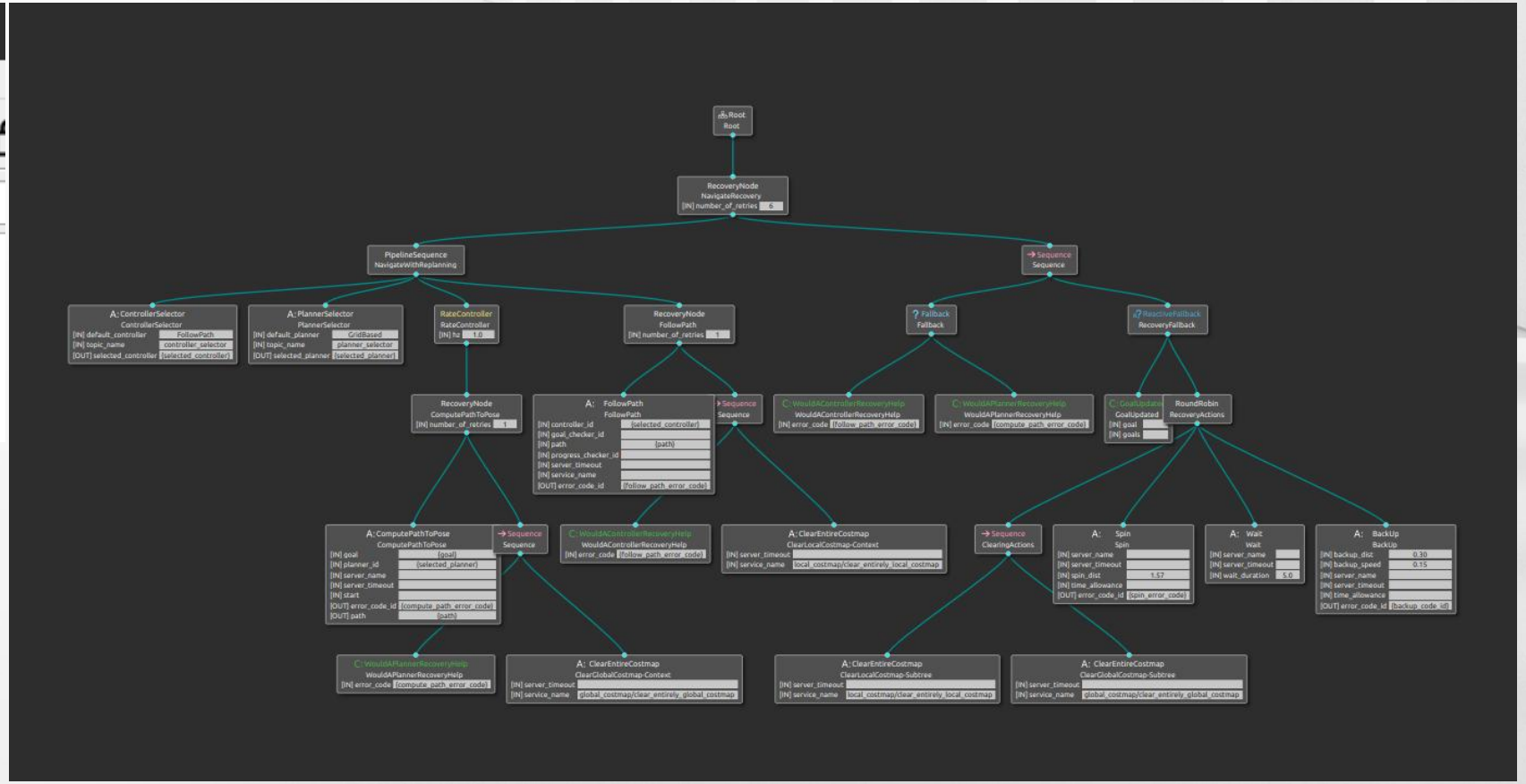
Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

- Step3 : Groot 실행

Load Tree버튼을 누르고 navigate_to_pose ⋯ and_recovery.xml 선택

실행 결과



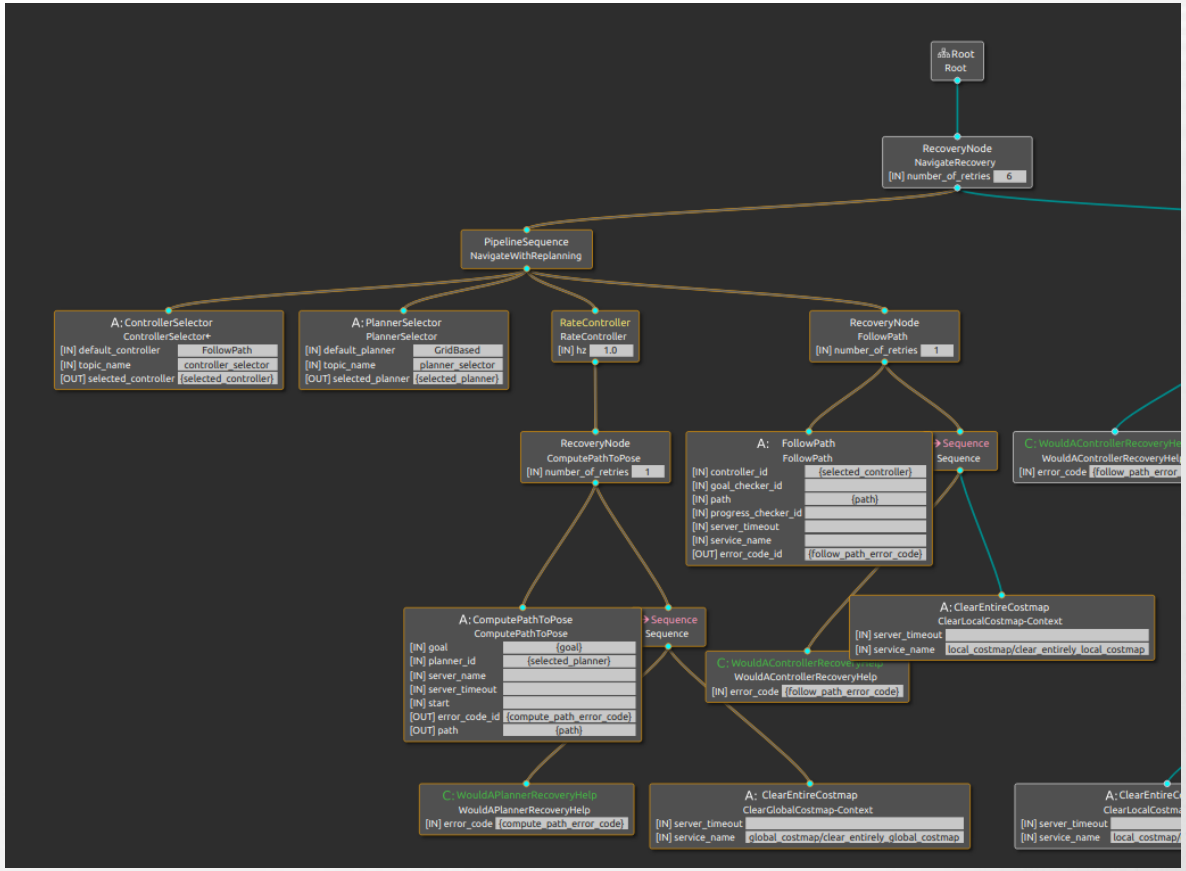


Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

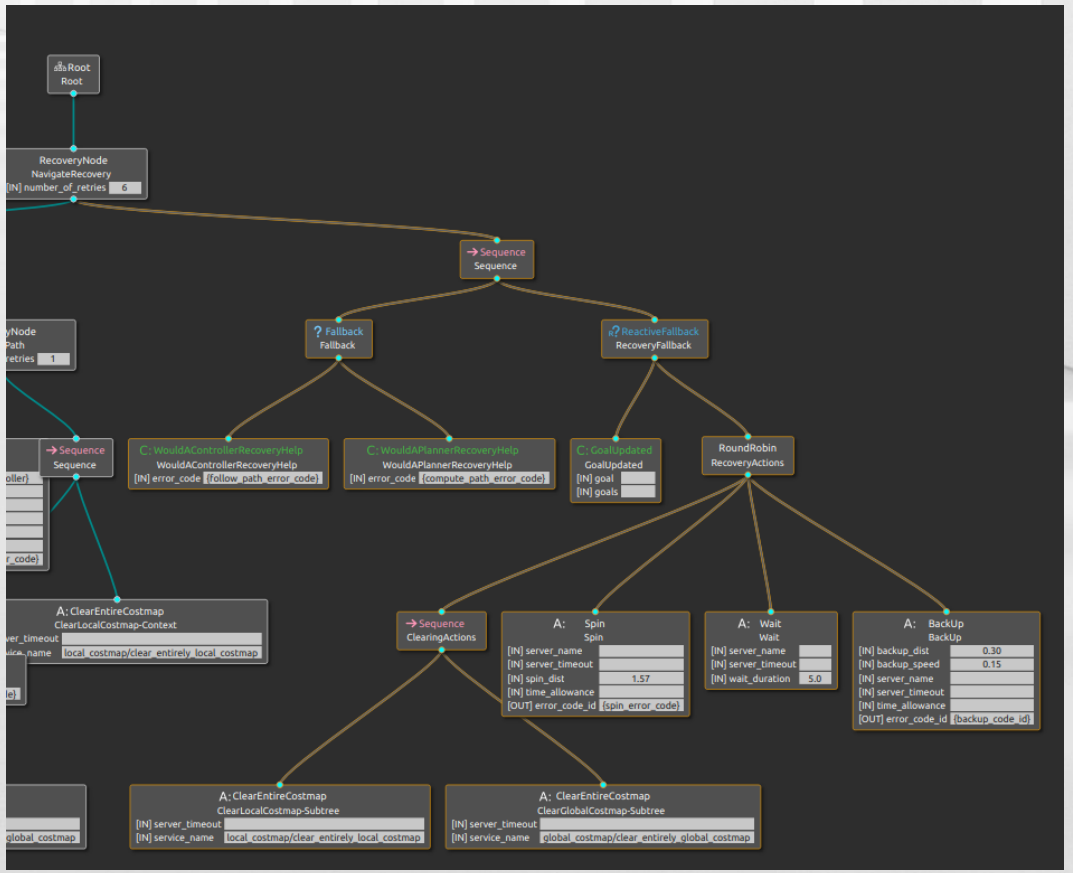
- Step4 : Groot로 BT 분석

  Nav2의 BT는 크게 2개의 서브트리로 나눌 수 있음

왼쪽(액션 트리 : 로봇의 동작을 수행)



오른쪽(복구 트리 : 동작 실패 시 대응)



Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

- Step4 : Groot로 BT 분석

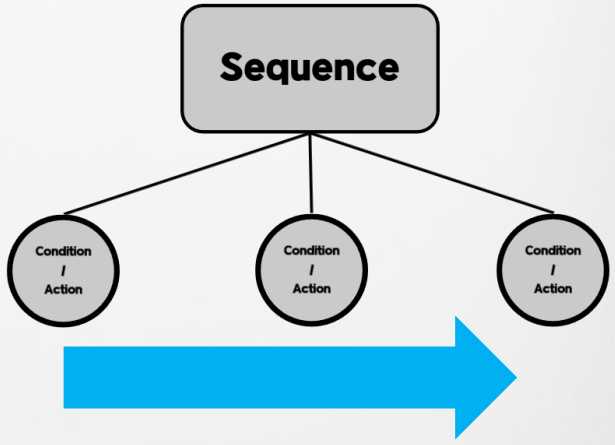
BT의 Node 종류는 다음과 같다.

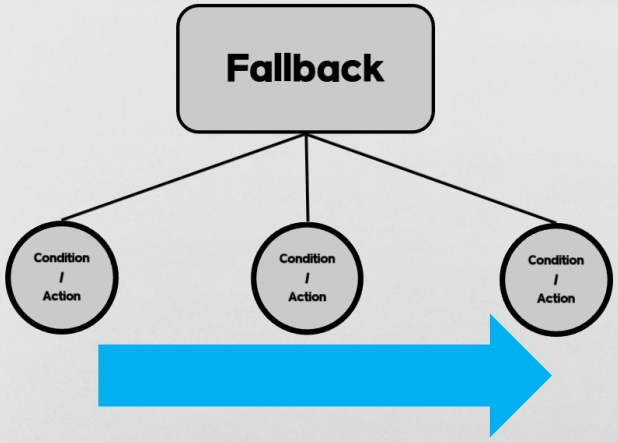
Control node – 하위 노드의 flow를 제어

- Sequence : 하위 노드의 동작을 순차적으로 실행하는데 하나라도 실패하면 false를 반환(To Do List)
- Fallback : 하위 노드의 동작이 실패하더라도 계속 다음 동작을 수행하며 하나라도 true면 true를 반환(Plan A → B → C)

Leaf node – BT의 말단 노드로서, 실제 로직을 수행하는 실질적인 동작(액션)이나 상태 확인(조건) 역할을 함

- Action Node – 동작을 실행하고 true(동작 완료), false(동작 실패), running(동작 수행 중)등을 반환
- Condition Node – 동작을 실행하지는 않고 상태를 check하여 true(조건 만족), false(조건 만족하지 않음)을 반환(장애물/배터리가 있는가?)





Navigation – Nav2의 Behavior Tree를 시각화하기

- Step4 : Groot로 BT 분석

MainTree

네비게이션 작업을 실행함

PipelineSequence(왼쪽 서브트리)

(1) Controller와 Planner를 선택

(2) 주어진 목표에 따라 경로 계산(ComputePathToPose)

(3) 계산된 경로를 따라 이동(FollowPath)

→ 실패시 코스트 맵을 초기화(ClearEntireCostMap)

ReactiveFallback(오른쪽 서브트리)

(1) PipelineSequence수행 도중 문제가 발생하면 실행됨

(2) Controller나 Planner의 복구가 필요한지 판단

(WouldController/PlannerRecoveryHelper)

(3) 상황에 따라 코스트맵 초기화, Spin(회전), Wair(대기), Backup(후진)을 수행

Navigation – Nav2의 주요 서버

Nav2의 주요 작업을 수행하는 4가지 서버

- **Planner Server :** Dijkstra나 A*(경로 탐색 알고리즘)등을 사용하여 로봇 위치에서 목표 지점까지의 최적 경로 계산
- **Controller Server** : DWA 알고리즘을 사용하여 경로를 따라가기 위한 local planning을 구함(cmd_vel 생성)
- **Smoother Server :** Planner가 생성한 경로를 입력으로 받아, 로봇 주변 환경 정보를 나타내는 costmap을 기반으로 경로를 더 부드럽게 변경
- **Recovery Server :** 네비게이션 실패 시 clear costmap이나 회전, 후진 등의 복구 동작을 실행

Dijkstra(다익스트라) → 다음 page에 A*와 함께 설명

- 최단 경로 탐색 알고리즘
- 인공위성 GPS 소프트웨어 등에서 가장 많이 사용됨
- 특정한 하나의 정점에서 다른 모든 정점으로 가는 최단 경로를 알려주는 탐색 알고리즘

Costmap

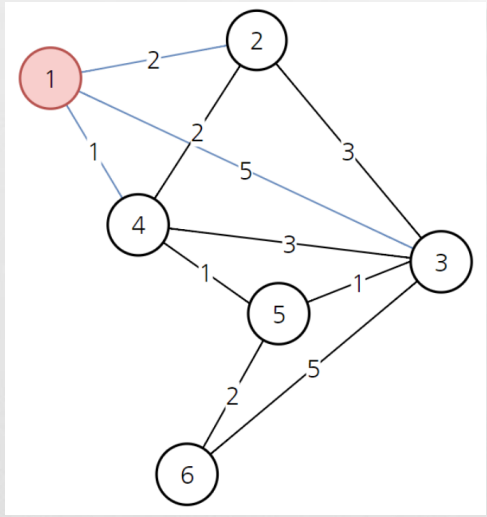
- Map에 비용을 표시하여 robot이 이동할 때 참고할 수 있게 구성한 것
- 고비용 : 장애물과 가까움
- 저비용 : 장애물 없음, 자유롭게 움직일 수 있는 영역

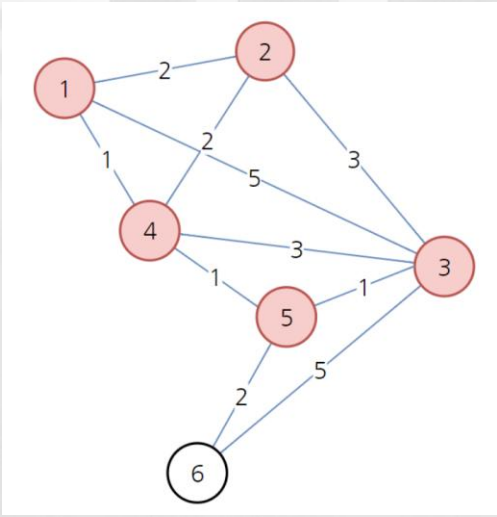
DWA(Dynamic Window Approach) → 다음 page 설명

- 로봇의 동역학 제약(속도, 가속도)을 고려하여 로컬에서
  최적의 속도 명령을 선택하는 알고리즘
- 로봇이 실시간으로 충돌없이 주변 장애물을 피하면서 목적지를 향해
  안정적으로 이동할 수 있도록 선속도, 각속도 조합을 매 순간 계산하는 방식

경로 생성 → 경로 보정 → 경로 추종 → 장애 회복

Plan → Controller → Smoother → Recovery





※ cost function : 어떤 시스템이나 모델의 출력이 정답과 얼마나 차이가 있는지 수치적으로 나타내는 함수

→ 함수 : MSE, MAE, Binary Cross Entropy, Categorical Cross Entropy)

→ 모델의 성능 기준, 학습 방향을 결정하는 기준, 학습이 제대로 되고 있는지 판단하는 지표

Navigation – Nav2의 주요 서버

Planner Server : A*

A*(A-star)는 출발 꼭짓점에서 목표 꼭짓점까지의 경로를 찾기 위해 고안된 알고리즘으로, 각 꼭짓점에 대한 평가 함수 $f(x)$는 다음과 같음:

$$f(x) = g(x) + h(x)$$

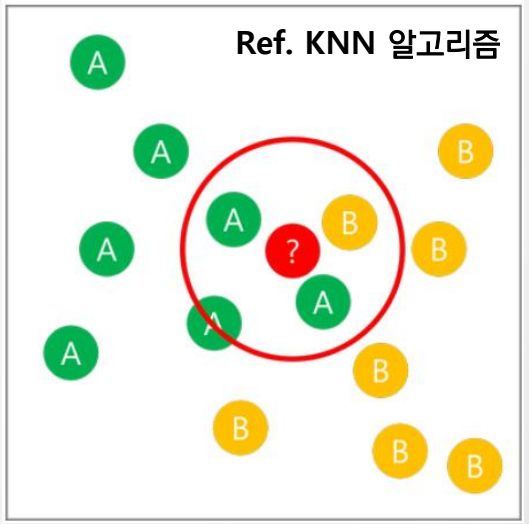
- $g(x)$: 출발점에서 현재점(x)까지의 거리
- $h(x)$: 현재점(x)에서 목적지까지의 예상 거리

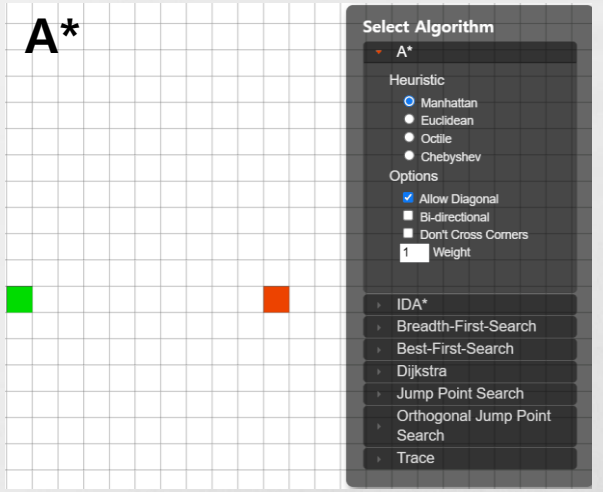
A*는경로를 생성 시 $f(x)$가 최소화되는 방향으로 경로를 생성한다.

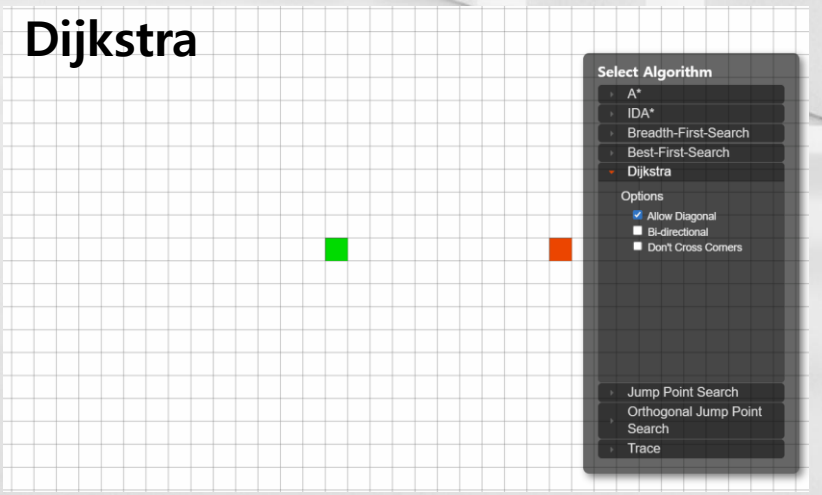
즉 목적지 방향으로의 탐색을 우선시하며, 그로 인해 모든 경로를 탐색하는 Dijkstra에 비해 빠른 성능을 보인다.

아래 링크에 가서 직접 경로 찾아보기(실습해보기)

https://qiao.github.io/PathFinding.js/visual/







A* vs Dijkstra

Navigation – Nav2의 주요 서버

▪ Controller server : DWA(Dynamic Window Approach)

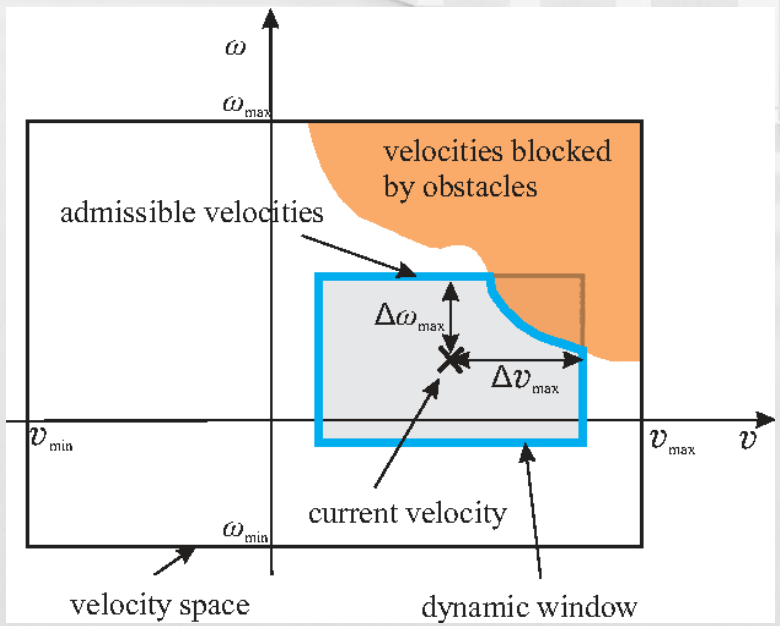
DWA는 2D 평면상의 로봇을 제어하여 실시간으로 장애물을 회피하고 목적지에 도달하는 알고리즘
로봇이 가질 수 있는 최대의 선속도(v)와 최대의 각속도(w)를 이용하여 다음 time step까지 이동할 수 있는 영역을 만들고
이 영역을 dynamic window라고 함

이 영역 내에서

(1) 로봇의 방향을 목표 방향과 최대로 일치시키고

(2) 장애물과 부딪히지 않고

(3) 최대의 속도로 운행할 수 있게 로봇을 제어



[핵심 개념]

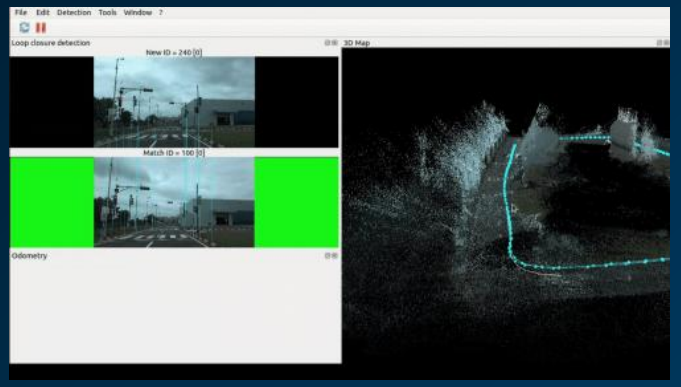
1. 속도 샘플링 : 로봇의 선, 각속도에서 가능한 후보 샘플링(Dynamic Window)
2. 모션 시뮬레이션 : 각 후보 속도 조합에 대해 시뮬레이션(어디로 움직이는지 예측)
3. 평가 함수 : 각 시뮬레이션 궤적을 평가해서 점수화
4. 최적 궤적 선택 : 가장 높은 점수를 받은 궤적의 선속도(v), 각속도(w)를 로봇에 적용

✓ 3D Camera & SLAM

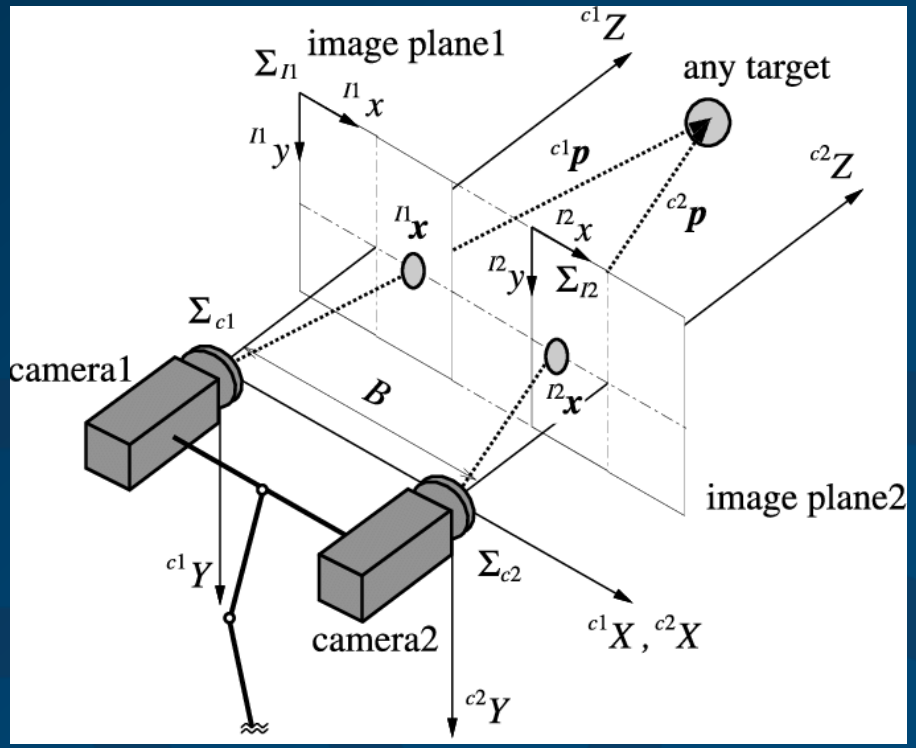
※ 개인 PC의 사양에 따라 작동 안되는 경우가 있음

스테레오 카메라(Link)

RTAB-Map (Real-Time Appearance-Based Mapping)
OpenCV 및 PCL(Point Cloud Library) 기반으로 구현된 그래프 기반 SLAM 알고리즘



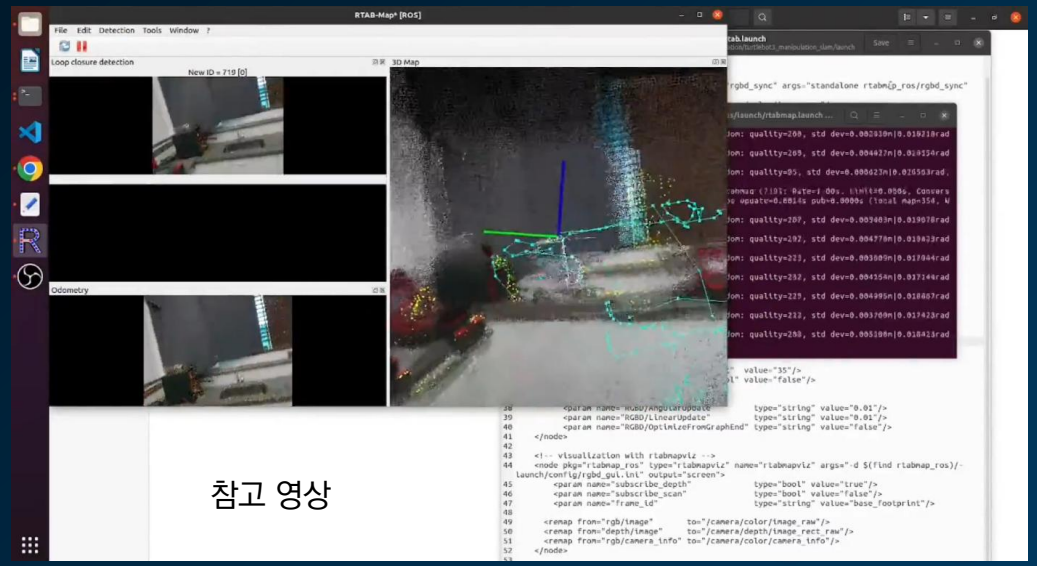
Using rtabmap visual slam using zed2i camera



[동작방식]

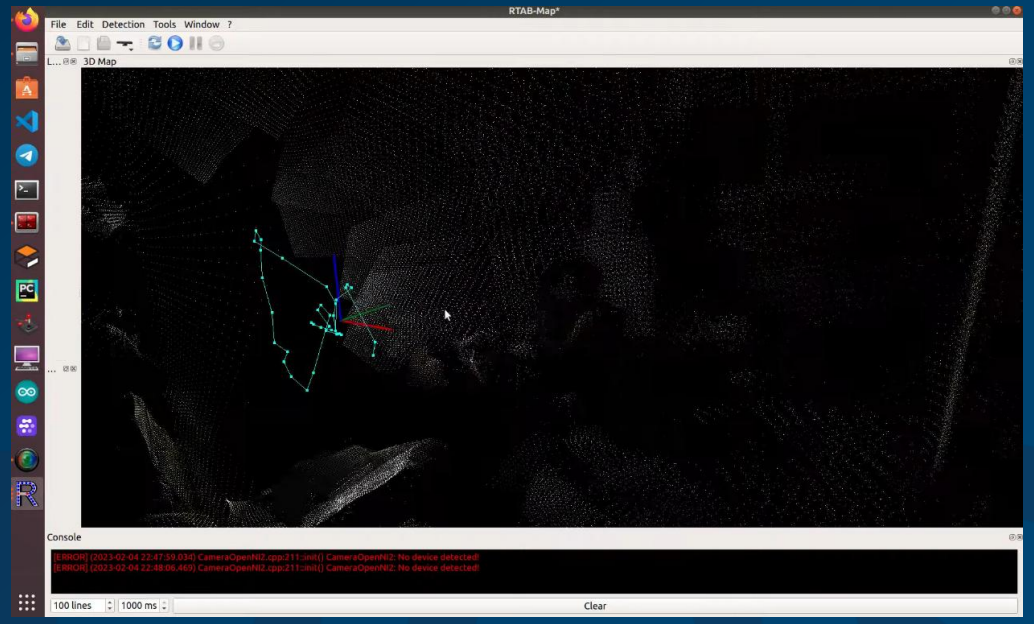
1. 센서 입력 처리 : 카메라, LiDAR등 데이터 수신 후 프레임 처리
2. 루프 클로징 : 새 프레임 입력때마다 이전 프레임과 유사도 비교 후 장면 재인식
3. 포즈 그래프 최적화 : 노드 간의 상대 위치 정보는 엣지로 표현되고 그래프 정렬 및 지도 수정
4. 지도 구성 : 최적화된 포즈 그래프를 바탕으로 포인트 클라우드 데이터를 통합하여 3D 맵 작성

✓ 3D Camera & SLAM



참고 영상

- Sky blue Color : 위치 인식
- Yellow Color : 특징점 인식
- Sky blue Point : 앞 뒤 이미지 매칭되었을때
- Sky blue Line : 이동 경로



RTAB iPhone 영상(iPhone으로 맵그리기)

✓ 실습환경 구축

1 Gazebo 패키지 설치

```
sudo apt install ros-humble-gazebo-*
```

2 Turtlebot3 패키지 설치

```
sudo apt install ros-humble-turtlebot3
sudo apt install ros-humble-turtlebot3-gazebo
```

3 Cartographer 패키지 설치

```
sudo apt install ros-humble-cartographer
sudo apt install ros-humble-cartographer-ros
```

4 Navigation2 패키지 설치

```
sudo apt install ros-humble-navigation2
```

5 다운 받은 realsense_warehouse_ws.zip 압축풀기 및 build

Downloads 폴더에 있는 압축파일을 home 디렉토리에 그대로 압축풀기

/home/victor/realsense_warehouse_ws

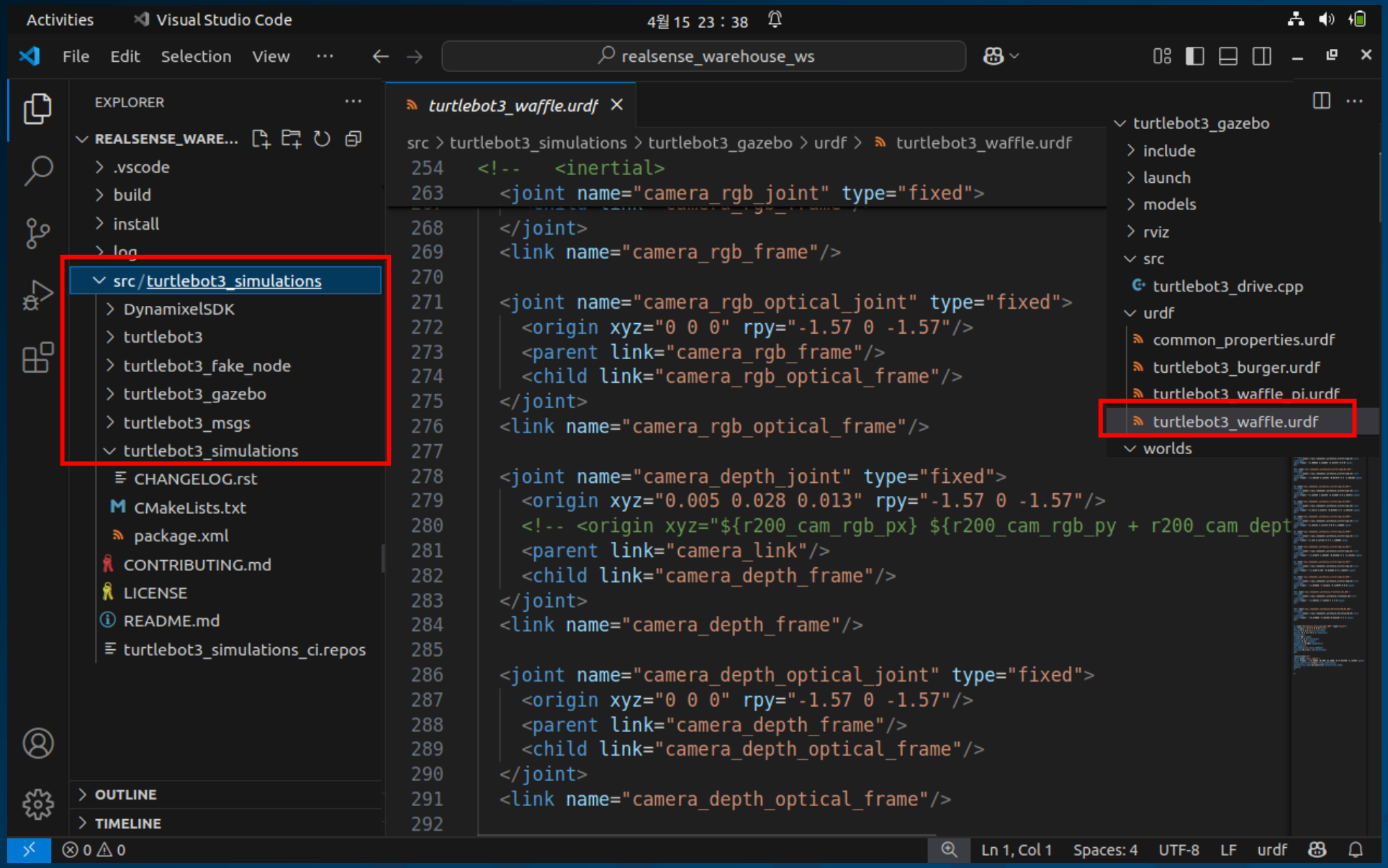
6 의존성 확인 및 설치

realsense_warehouse_ws$ 위치에서 아래 명령어 실행!!!

```
rosdep update
rosdep install --from-paths src --ignore-src -r -y
```

- --from-paths src : src/ 아래의 패키지들을 분석함
- --ignore-src : 소스 코드는 건드리지 않고 시스템 패키지만 설치
- -r : 오류가 발생해도 계속 진행(retry)
- -y : 설치할 건지 물어보지 않고 자동으로 yes

✓ 실습환경 구축


Activities
Visual Studio Code
4월 15 23 : 38
File Edit Selection View
realsense_warehouse_ws
EXPLORER
REALSENSE_WARE...
.vscode
build
install
log
src/turtlebot3_simulations
DynamixelSDK
turtlebot3
turtlebot3_fake_node
turtlebot3_gazebo
turtlebot3_msgs
turtlebot3_simulations
CHANGELOG.rst
CMakeLists.txt
package.xml
CONTRIBUTING.md
LICENSE
README.md
turtlebot3_simulations_ci.repos
OUTLINE
TIMELINE
turtlebot3_waffle.urdf
src > turtlebot3_simulations > turtlebot3_gazebo > urdf > turtlebot3_waffle.urdf
254 <!-- <inertial>
263 <joint name="camera_rgb_joint" type="fixed">
268 </joint>
269 <link name="camera_rgb_frame"/>
270
271 <joint name="camera_rgb_optical_joint" type="fixed">
272 <origin xyz="0 0 0" rpy="-1.57 0 -1.57"/>
273 <parent link="camera_rgb_frame"/>
274 <child link="camera_rgb_optical_frame"/>
275 </joint>
276 <link name="camera_rgb_optical_frame"/>
277
278 <joint name="camera_depth_joint" type="fixed">
279 <origin xyz="0.005 0.028 0.013" rpy="-1.57 0 -1.57"/>
280 <!-- <origin xyz="${r200_cam_rgb_px} ${r200_cam_rgb_py + r200_cam_dept
281 <parent link="camera_link"/>
282 <child link="camera_depth_frame"/>
283 </joint>
284 <link name="camera_depth_frame"/>
285
286 <joint name="camera_depth_optical_joint" type="fixed">
287 <origin xyz="0 0 0" rpy="-1.57 0 -1.57"/>
288 <parent link="camera_depth_frame"/>
289 <child link="camera_depth_optical_frame"/>
290 </joint>
291 <link name="camera_depth_optical_frame"/>
292
turtlebot3_gazebo
include
launch
models
rviz
src
turtlebot3_drive.cpp
urdf
common_properties.urdf
turtlebot3_burger.urdf
turtlebot3_waffle_pi.urdf
turtlebot3_waffle.urdf
worlds
0 0
Ln 1, Col 1 Spaces: 4 UTF-8 LF urdf

✓ 실습환경 구축

```
.
└── realsense_warehouse_ws/src/turtlebot3_simulations
    └── turtlebot3_gazebo
        ├── CMakeLists.txt
        ├── include
        │   └── turtlebot3_gazebo
        │       └── turtlebot3_drive.hpp
        ├── launch
        │   ├── empty_world.launch.py
        │   ├── robot_state_publisher.launch.py
        │   ├── ...
        │   ├── ...
        │   ├── turtlebot3_house.launch.py
        │   ├── turtlebot3_no_roof_aws.launch.py
        │   └── turtlebot3_world.launch.py
        ├── models
        │   ├── aws_robomaker_warehouse_Bucket_01
        │   ├── aws_robomaker_warehouse_ClutteringA_01
        │   ├── aws_robomaker_warehouse_ClutteringC_01
        │   ├── ...
        │   ├── ...
        │   ├── turtlebot3_waffle
        │   ├── turtlebot3_waffle_pi
        │   └── turtlebot3_world
        ├── package.xml
        ├── rviz
        │   └── tb3_gazebo.rviz
        ├── src
        │   └── turtlebot3_drive.cpp
        ├── urdf
        │   ├── common_properties.urdf
        │   ├── ...
        │   ├── ...
        │   └── turtlebot3_waffle.urdf
        └── worlds
            ├── empty_world.world
            ├── no_roof_small_warehouse.world
            ├── small_warehouse.world
            ├── ...
            ├── ...
            ├── turtlebot3_house.world
            └── turtlebot3_world.world
```

realsense_warehouse_ws.zip을 풀면 이와 같은 파일을 확인할 수 있음

[주요 파일에 대한 설명]

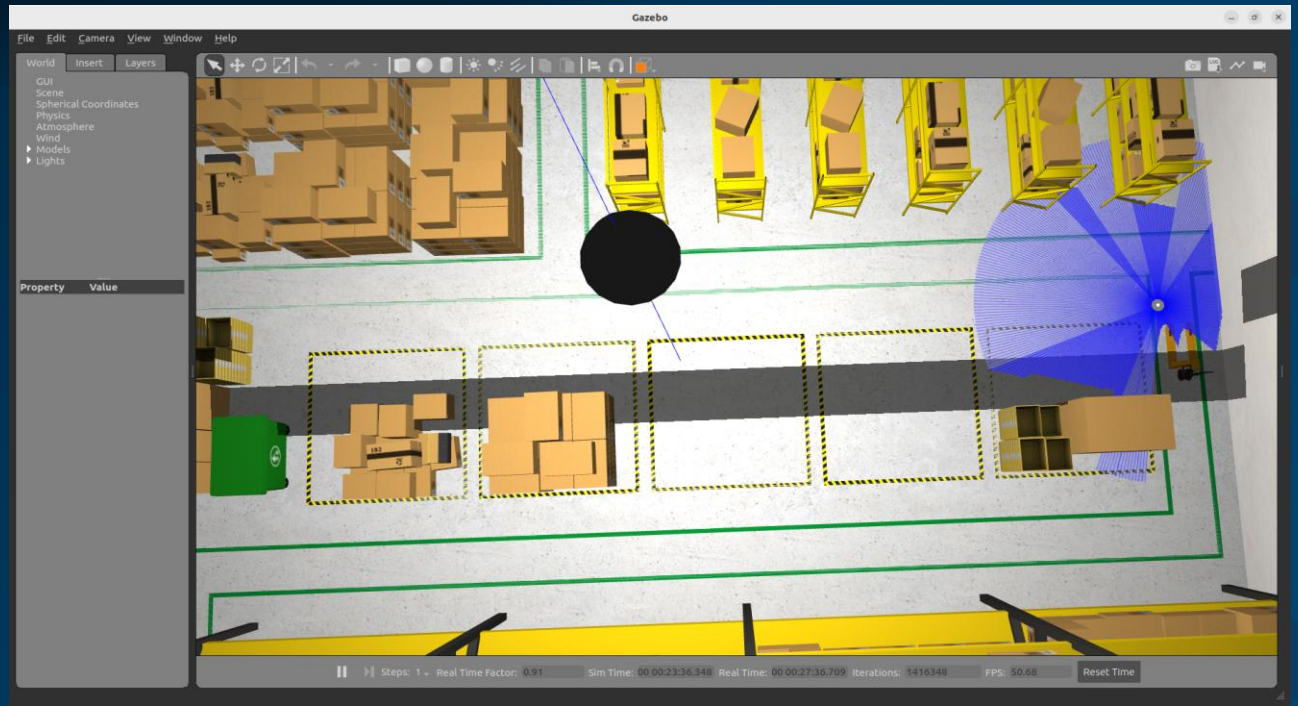
- Launch : gazebo를 시뮬레이션할 런치파일
- Models : 맵을 구성할 모델이 저장된 파일
- Rviz : rviz설정이 저장된 파일
- Urdf : 로봇 모델의 링크와 조인트 정보 등이 저장된 파일
- Worlds : 맵을 구성하는 파일

✓ 런치파일 실행

Gazebo World와 Turtlebot Waffle을 불러옴

```
export TURTLEBOT3_MODEL=waffle
```

```
ros2 launch turtlebot3_gazebo turtlebot3_no_roof_aws.launch.py
```



✓ 실습환경 구축

모델을 불러올 수 없다는 오류 발생 시

```
gazebo_model_path = os.path.join(
    get_package_share_directory('turtlebot3_gazebo'),
    'models'
    )
os.environ['GAZEBO_MODEL_PATH'] = f"{gazebo_model_path}:{os.environ.get('GAZEBO_MODEL_PATH', '')}"
```

turtlebot3_no_roof_aws.launch.py에 해당 코드를 추가

Gazebo world를 구성할 때 필요한 model들의 경로를 설정하는 코드임

```
sudo cp -r ~/realsense_warehouse_ws/src/turtlebot3_simuations/turtlebot3_gazebo/models /usr/share/gazebo-11/models/
```

만약 위 코드가 정상적으로 작동하지 않는다면 해당 명령어로 직접 모델 파일을 추가해야 함

✓ 런치파일 실행

Error Control

```
[spawn_entity.py-3] [ERROR] [1686047965.672993729] [spawn_entity]: Service %s/spawn_entity unavailable.
Was Gazebo started with GazeboRosFactory?
```

```
source /usr/share/gazebo/setup.bash
echo "source /usr/share/gazebo/setup.bash" >> ~/.bashrc
ros2 launch turtlebot3_gazebo turtlebot3_no_roof_aws.launch.py
```

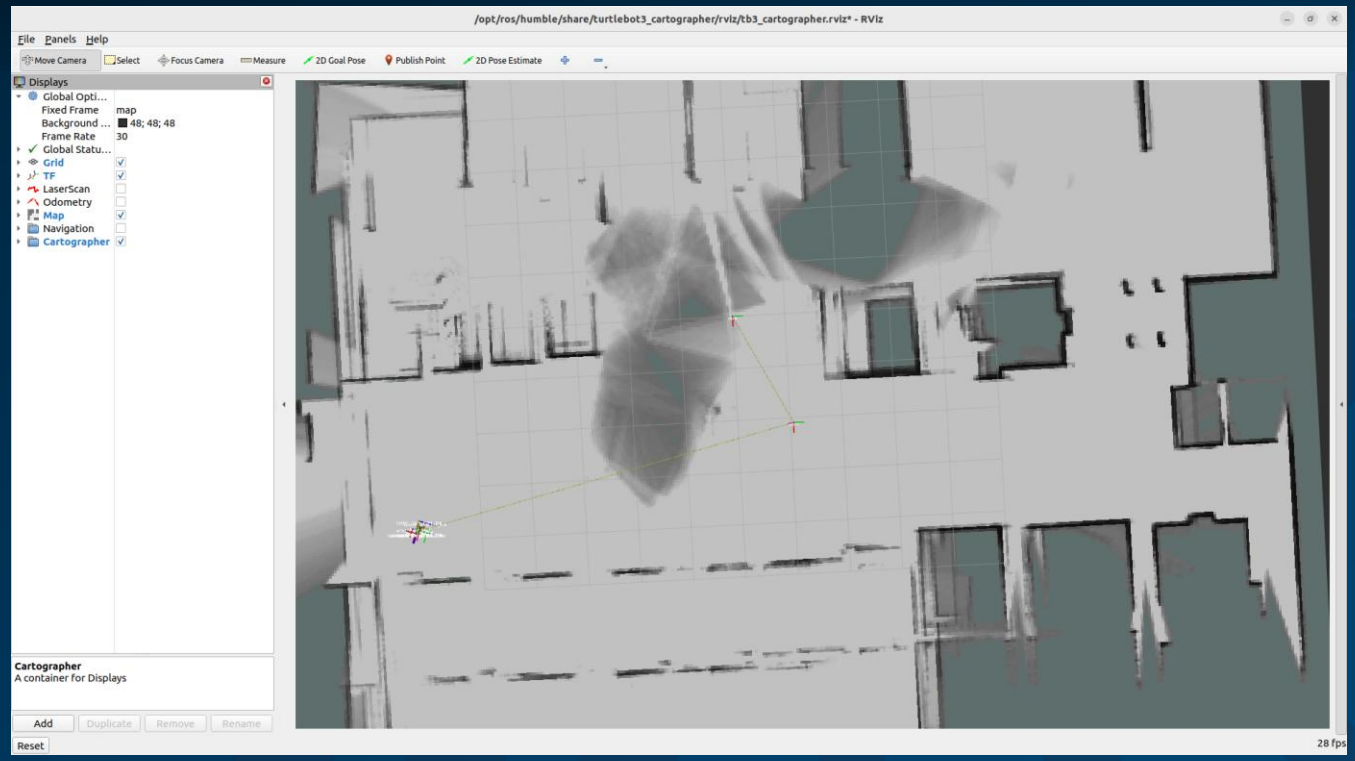
```
[E] : Gazebo does not terminate properly.
```

```
killall -9 gzserver
killall -9 gzclient
```

✓ Cartographer실행

SLAM 라이브러리 중 하나

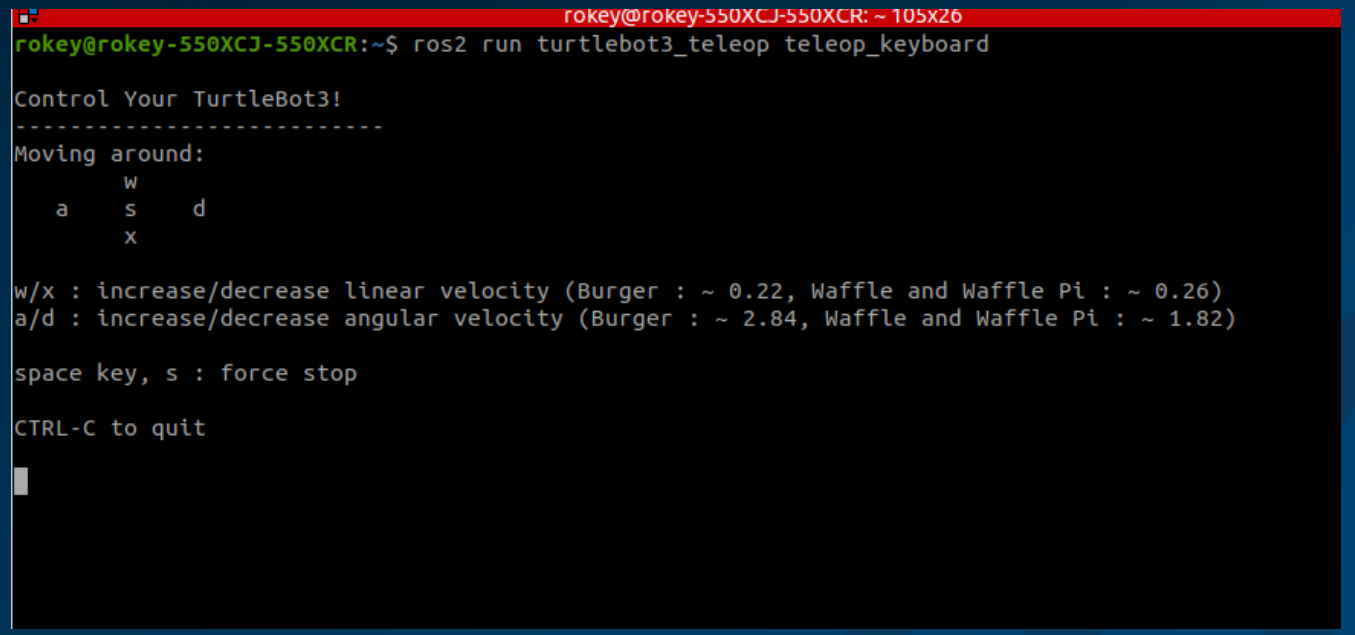
```
ros2 launch turtlebot3_cartographer cartographer.launch.py use_sim_time:=True
```



✓ Keyboard Controller실행

키보드로 로봇을 조종해서 지도를 탐색할 수 있음

```
ros2 run turtlebot3_teleop teleop_keyboard
```



✓ Keyboard Controller실행

1. 자동으로 맵을 탐색하는 명령어
2. 로봇이 탐색한 영역에 대해 지도 생성

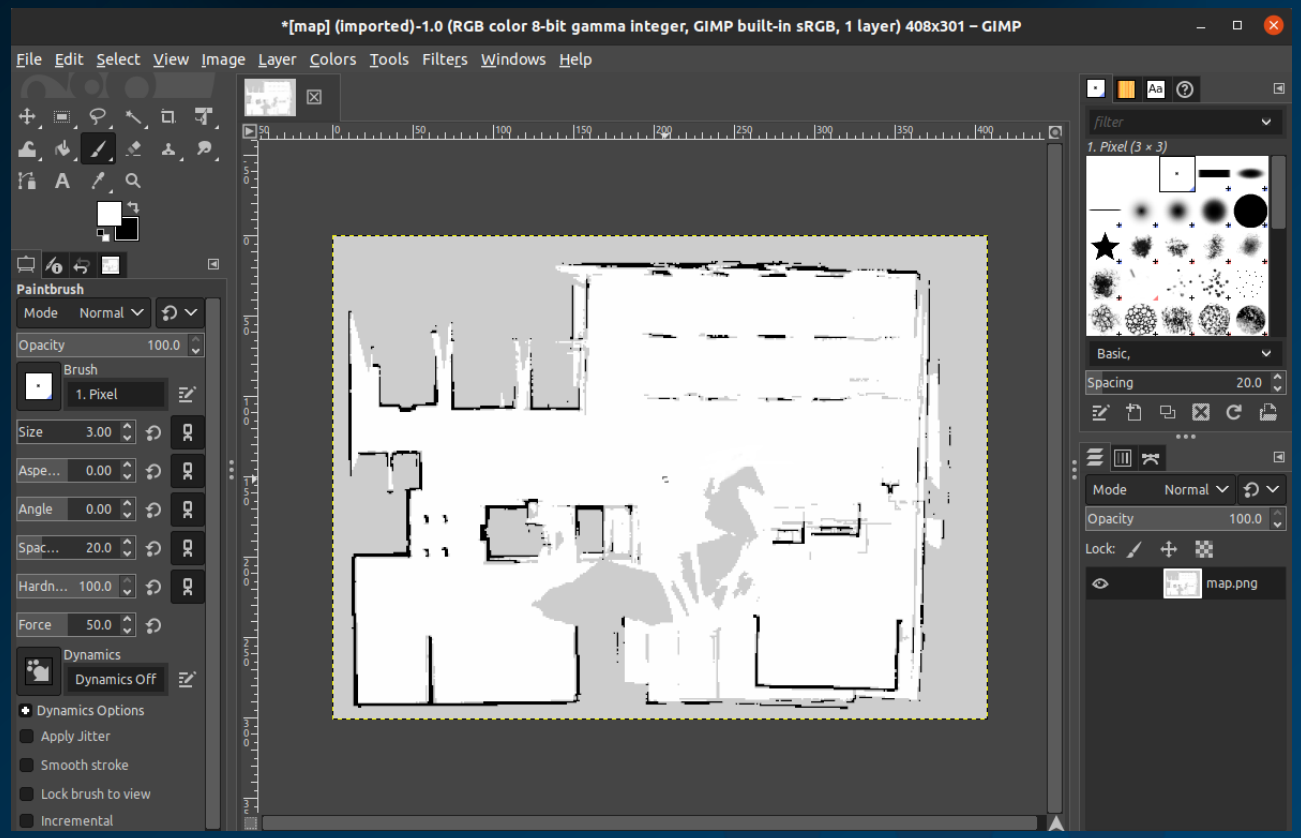
```
ros2 run turtlebot3_gazebo turtlebot3_drive
```

```
ros2 run nav2_map_server map_saver_cli -f ~/map
```

✓ GIMP로 map 편집

부정확한 부분에 대해 수작업으로 편집할 수 있음
GIMP는 .pgm파일 편집을 지원함

```
sudo apt install gimp
```



GIMP(GNU Image Manipulation Program)

- 맵 이미지(.pgm)를 편집하거나, 직접 지도를 만들거나 수정하는 보조 도구
- 그 후 .pgm과 .yaml파일을 함께 ROS에서 사용

Trinary(세가지 상태)

개념 : 맵을 저장할 때 픽셀 값을 세가지 상태로만 구분할지 설정하는 옵션

- 0(검정색) : 비어 있음
- 127(회색) : Unknown(알 수 없음)
- 255(흰색) : Occupied(장애물 있음)
- True = 단순 3단계, False = grayscale

Negate

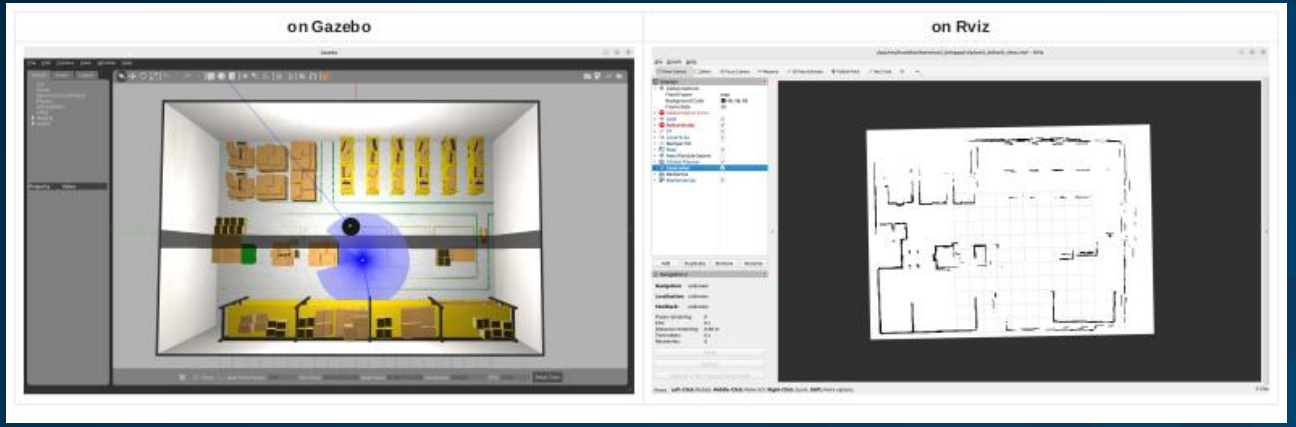
개념 : 맵 이미지의 색상을 반전할지 여부를 설정하는 옵션

- 흰색(255) : Free(비어 있음)
- 검정색(0) : Occupied(장애물)

✓ NAV2 실행

생성된 Map을 바탕으로 Nav2 실행

```
ros2 launch turtlebot3_navigation2 navigation2.launch.py use_sim_time:=True map:=$HOME/map.yaml
```



✓ NAV2 실행

2D Pose Estimate를 이용하여 로봇의 초기 위치와 방향 설정

```
ros2 launch turtlebot3_navigation2 navigation2.launch.py use_sim_time:=True map:=$HOME/map.yaml
```

Result : Costmap

Result에 표시된 화면은 Costmap으로

로봇의 입장에서 map을 다양한 영역으로 나눈 것

검정색 선 : 장애물

하늘색 영역 : 로봇이 장애물에 부딪히지 않기 위해 확보하는 안전거리

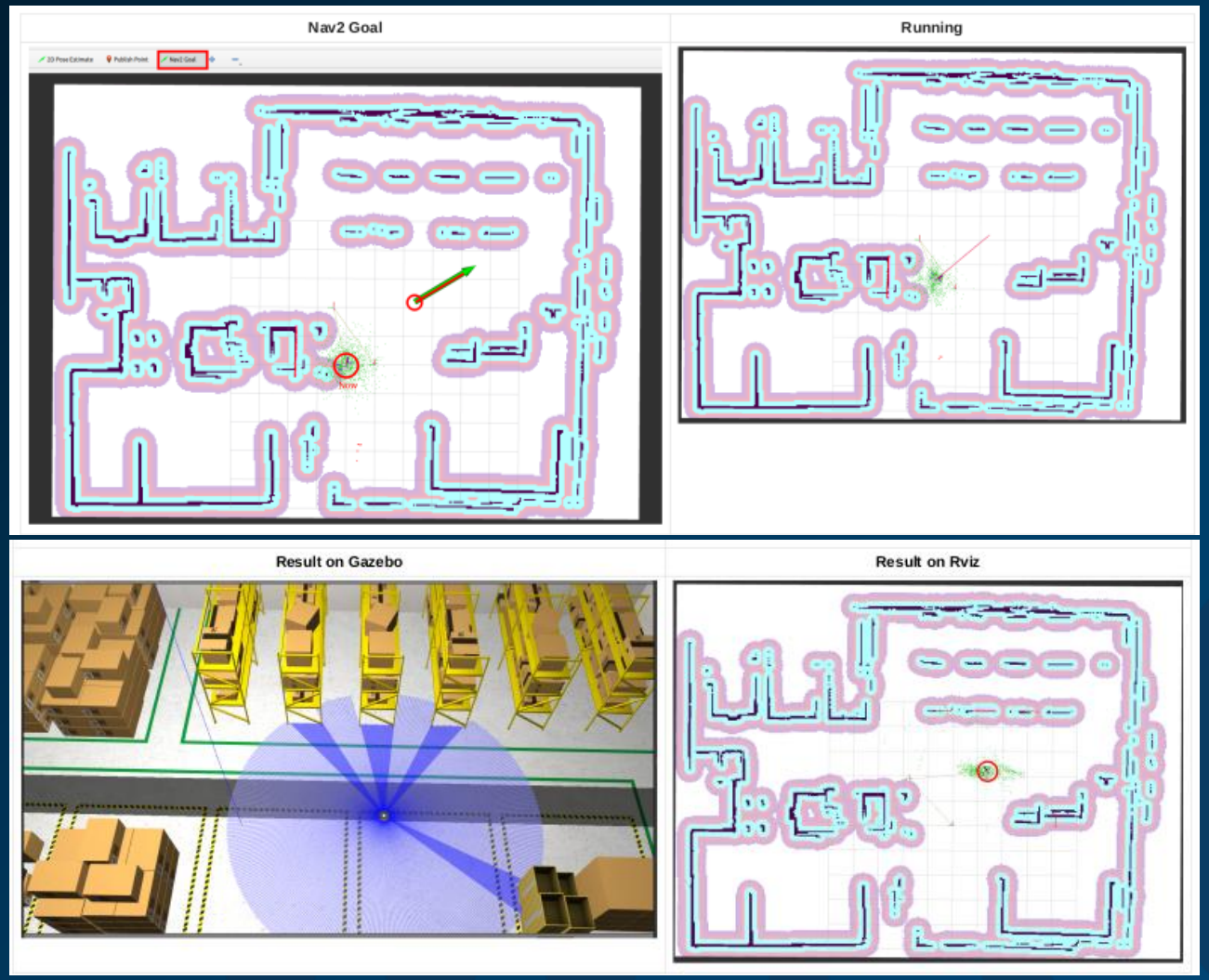
붉은색 영역 : 로봇이 가지 않으려는 경향을 보이는 영역(무조건 가지 않는 것은 아님)

이 영역들은 로봇의 회전 반경과 같은 물리적 속성에 의해 결정됨

✓ NAV2 실행

Nav2 Goal을 설정하면 로봇이 해당 위치와 방향에 맞게 도착함

Rviz에서 Nav2Goal 버튼을 선택한 뒤 원하는 위치와 방향을 지정



Visual Slam

SLAM : Visual

- Visual SLAM의 종류

특징	ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF)	RTAB (RealTime Appearance-Based Mapping)
사용 카메라	주로 단안(모노) 카메라 또는 Stereo Camera	RGB-D카메라 혹은 양안(스테레오) 카메라
깊이 감지	깊이 감지 범위가 짧음	깊이 정보를 더 잘 감지함
병렬 처리	작업을 병렬적으로 처리	단계별 수행으로 상대적으로 처리시간이 오래 걸림
맵 생성과 최적화	중요한 위치(키프레임)를 선택, 맵을 만들고 수정	더 밀도 있는 3D 매핑을 수행하여 정확도를 높임
정확도	야외 환경에서 정확도 감소	야외 환경에서도 강건함
기타	정밀한 위치 추정과 맵핑이 필요한 경우	실시간 처리와 대규모 환경에서의 확장성이 중요한 경우
활용사례	연구 개발, 정밀 네비게이션	실시간 로봇 내비게이션, 3D맵핑
ROS통합	가능하지만 복잡할 수 있음	매우 용이(ROS2 package제공)하고 주로 많이 사용함

이번 실습에서는 RTAB-MAP을 사용할 예정

RGB-D Camera란?

: 깊이(Depth)와 컬러(RGB) 데이터를 모두 실시간으로 받아들이는 카메라

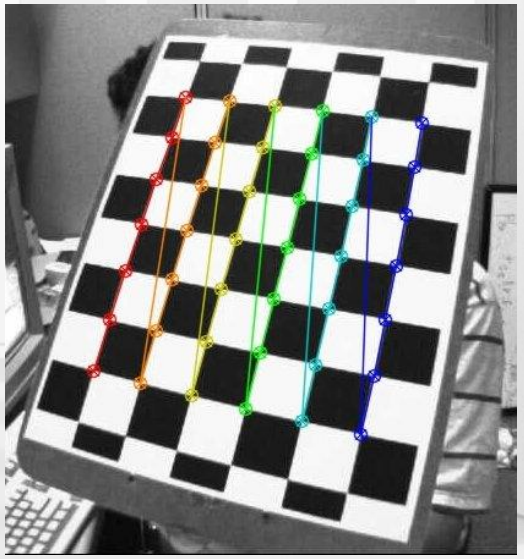
SLAM : Visual

Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 카메라 포즈 추정
Step5. 지도 업데이트

카메라의 파라미터를 초기화시키기 위해 카메라 캘리브레이션을 수행

Camera Calibration

카메라의 파라미터를 추정하는 과정



카메라의 내부/외부 파라미터를 정확히 알아야
2D이미지를 3D공간으로 변환할 때 왜곡 없이 계산할 수 있음
정확한 카메라 캘리브레이션은 SLAM의 정확도를 높임

내부 파라미터 : 카메라의 초점거리, 왜곡 계수 등
외부 파라미터 : 카메라가 대상을 촬영하고 있는 자세(위치나 방향)

SLAM : Visual

Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 카메라 포즈 추정
Step5. 지도 업데이트

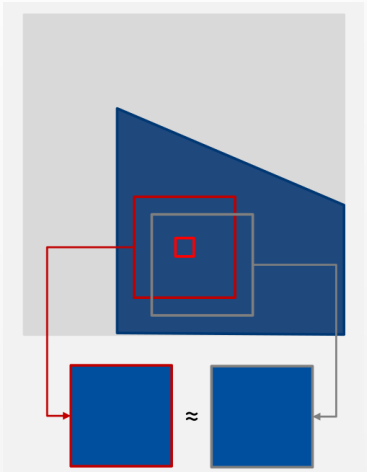
카메라로 이미지 수집

SLAM : Visual

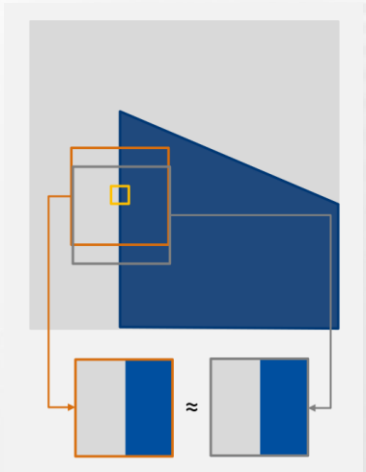
Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 카메라 포즈 추정
Step5. 지도 업데이트

특징점 : 이미지에서 다른 지점과 달리 고유하게 인식 가능한 지점(uniquely recognizable)

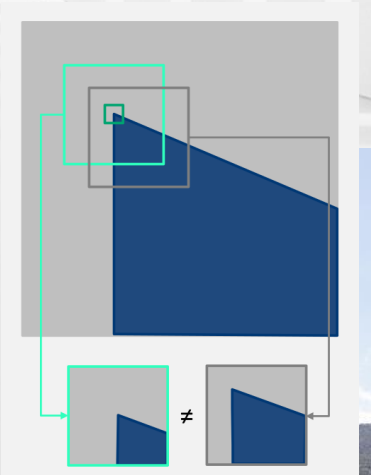
특징점(Feature Point)을 찾는 방법 : Self-similarity
이미지 내에서 작은 영역을 지정하여 각각의 위치에서의 유사도를 분석하는 것



1. 균일한 영역
영역을 이동시켜도
픽셀의 변화가 거의 없음



2. 경계선 영역
수직 혹은 수평 방향 중 하나
의 이동 방향에 대해서만
픽셀 변화가 존재함



3. 코너 영역
모든 이동 방향에 대해서
픽셀 변화가 존재함
강한 특징점으로 간주

※ Self-Similarity : Visual SLAM에서 특정 장면이나 환경 내에서 서로 다른 위치에 유사한 시각적 패턴이 반복되는 현상

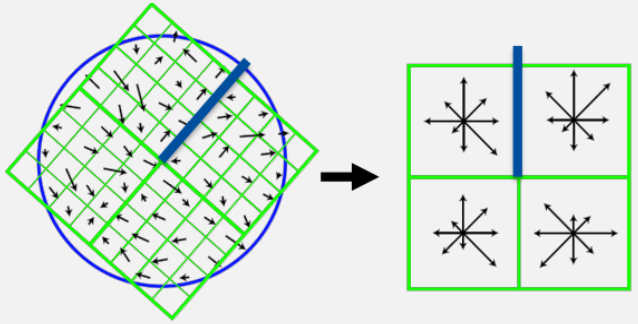
SLAM : Visual

- Step0. 센서 초기화
- Step1. 데이터 수집
- Step2. 특징점 추출
- **Step3. 특징점 매칭**
- Step4. 카메라 포즈 추정
- Step5. 지도 업데이트

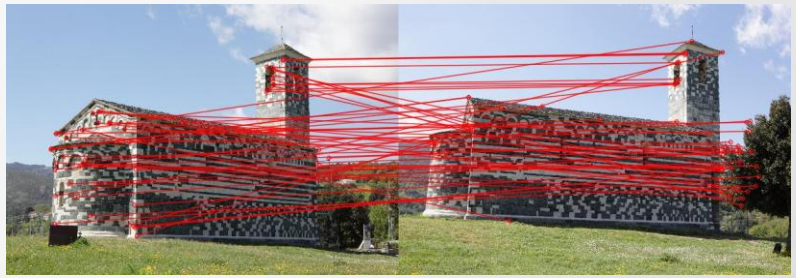
Feature Description → Feature Matching(특징 매칭, descriptor 비교)

- 이미지의 특징점을 검출한 후 그 주변의 시각적 정보를 정형화된 벡터로 표현(모서리, 경계선, 텍스처 패턴 등)
- 서로 다른 프레임에서 같은 지점을 찾기 위해 사용(matching)
- 구성요소 : Feature Detector(특징점 찾고), Feature Descriptor 계산(해당 위치 주변을 수치적으로 표현)
- 확대/축소/조명/회전 등의 변화에 강건해야 함

SIFT Descriptor(Scale-Invariant Feature Transform)



- Feature Descriptor중의 하나
- 크기(Scale)와 회전(Rotation) 변화에 강인한 특징을 가짐
- 특징점 주변으로 16x16 영역을 설정
- 그래디언트 방향 히스토그램을 기반으로 특징을 표현(128차원 벡터)
- 해당 영역을 4개의 블록으로 분할 → 각 블록마다 8개의 방향 벡터를 분석 → 이를 이용하여 유사도가 높은 특징점끼리 짝을 지음



P.S. 잘못 매칭된 특징점을 거르는 작업이 중요함

※ Feature Detection → Feature Description → Feature Matching → Pose Estimation / Mapping
(피처 검출) (ORB, SIFT, BRIEF) (가장 비슷한 쌍 찾음) (카메라 위치 및 맵 생성)

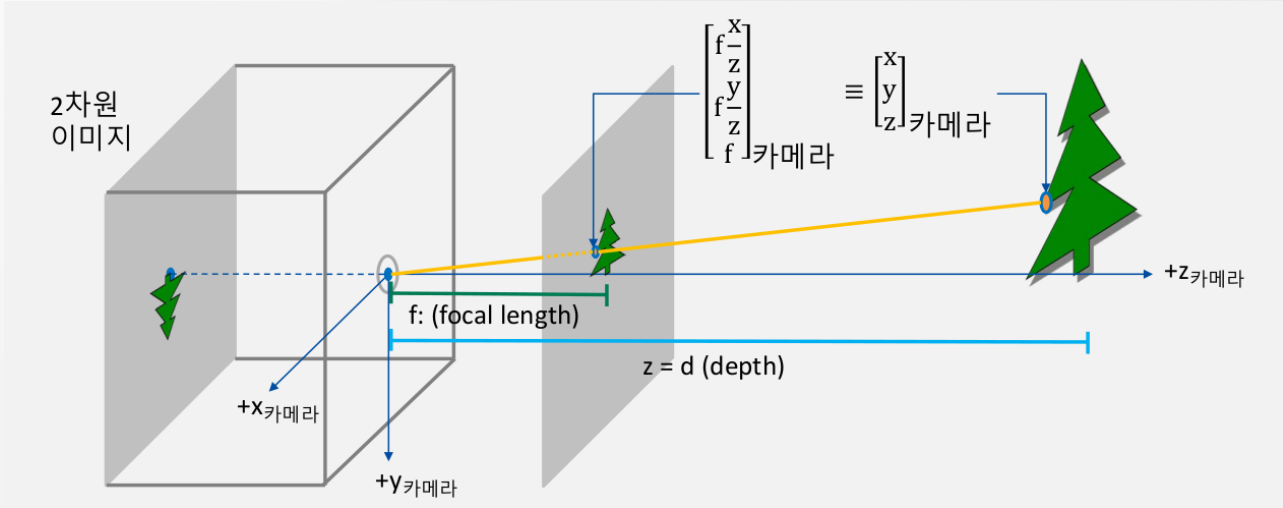
SLAM : Visual

이미지의 정보를 통해 카메라의 내,외부 파라미터와 자세를 추정

카메라의 초점거리를 알고 싶을 때 다음과 같이 행렬 연산을 통해 구할 수 있음
이러한 방식을 통해 카메라 캘리브레이션을 수행

$$\begin{pmatrix} \frac{f}{z}x \\ \frac{f}{z}x \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

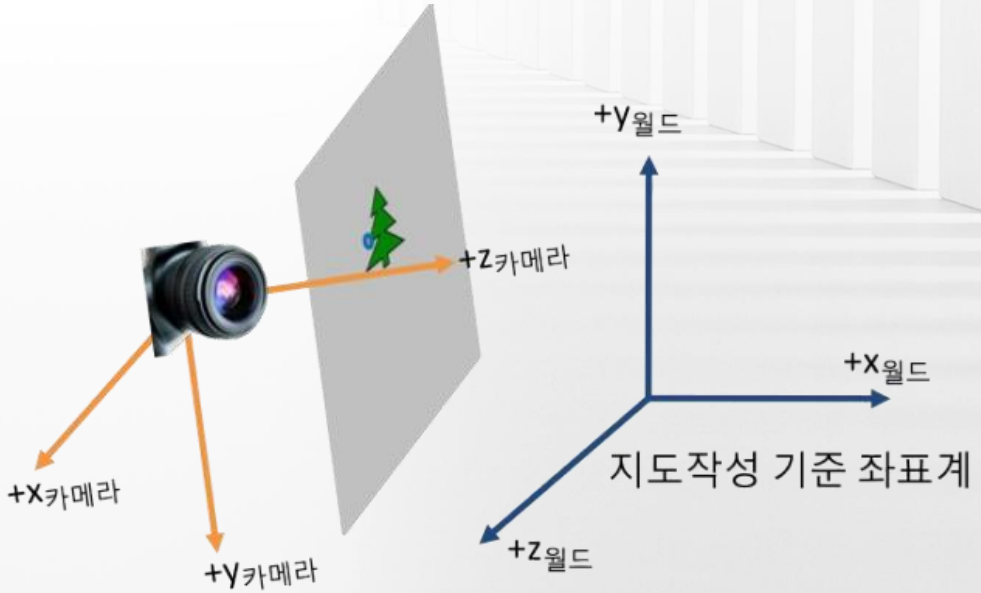
Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 카메라 포즈 추정
Step5. 지도 업데이트



SLAM : Visual

Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 카메라 포즈 추정
Step5. 지도 업데이트

카메라가 실제 물리 세상에 어떤 자세(position, orientation)로 놓여있는지 알면
피사체의 실제 물리 좌표계 추정 가능



$$\begin{bmatrix} X_{\text{world}} \\ Y_{\text{world}} \\ Z_{\text{world}} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^\top & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{camera}} \\ Y_{\text{camera}} \\ Z_{\text{camera}} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_{\text{world}} \\ Y_{\text{world}} \\ Z_{\text{world}} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_{\text{camera}} \\ Y_{\text{camera}} \\ Z_{\text{camera}} \end{bmatrix} + \mathbf{t}$$

정리
내부 파라미터를 통해 이미지 상의 좌표를
카메라 기준 좌표계로 바꾸고
외부 파라미터를 통해 카메라 기준 좌표를
월드 기준 좌표계로 변환함

행렬 R (회전행렬)
카메라를 월드 좌표계로 변환하기 위해
얼마나 회전시킬지 정의

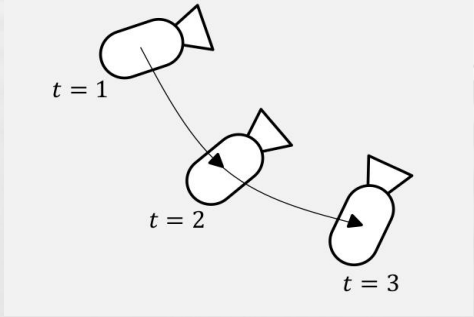
행렬 t (이동행렬)
카메라를 월드 좌표계로 변환하기 위해
얼마나 이동시킬지 정의

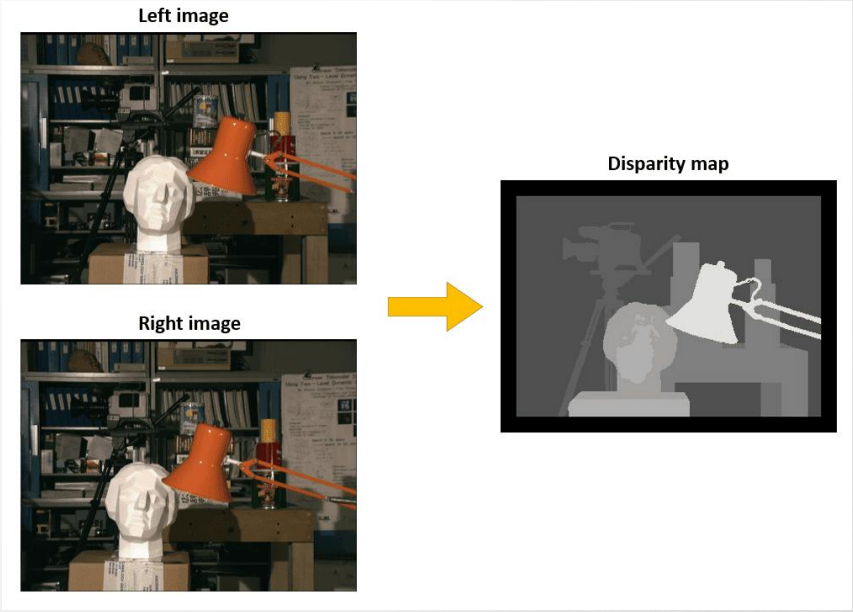
SLAM : Visual

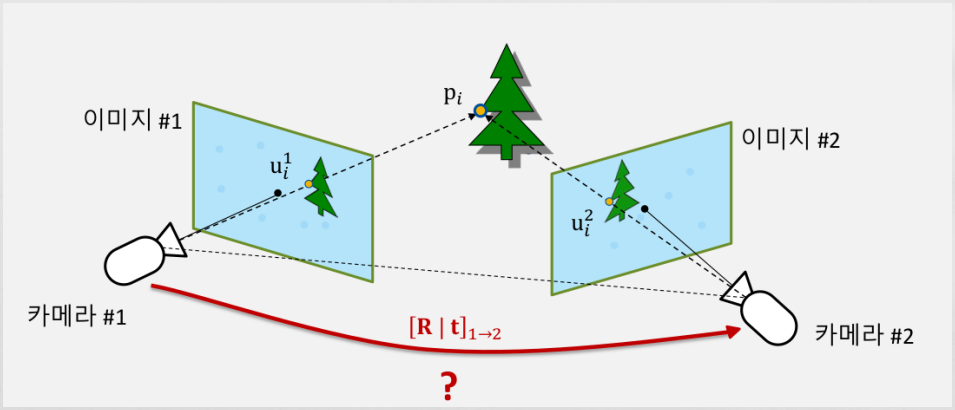
두 개의 이미지에 나타난 동일한 특징점의 삼차원 위치를 추정
인간의 두 눈을 이용한 깊이 추정과 유사한 동작 원리

렌즈가 하나인 단안 카메라의 경우 시간에 따라
여러 장의 사진을 찍고 그것을 분석하여
삼차원의 위치를 추정함

- Step0. 센서 초기화
- Step1. 데이터 수집
- Step2. 특징점 추출
- Step3. 특징점 매칭
- **Step4. 카메라 포즈 추정**
- Step5. 지도 업데이트







SLAM : Visual

Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 카메라 포즈 추정
Step5. 지도 업데이트

이 식을 통해 두 이미지의 같은 지점에 대한
상대적 위치를 표현하는 기본 행렬 F를 구할 수 있음

$$(u_i^1)^T F u_i^2 = 0$$

기본 행렬 F에 대해 카메라의 내부 행렬 K를 고려한
필수 행렬 E를 구하기

$$E = K_2^T F K_1$$

또한 필수 행렬 E는 카메라의 한 시점을
다른 카메라의 시점으로 이동하고 회전시킨 것이기 때문에
이동 행렬과 회전 행렬의 곱으로 표현될 수 있음

$$E = [t] \times R$$

필수 행렬 E를 특이값 분해(SVD)하여 회전과 이동 추출하여
두 카메라의 상대적 위치 계산

※ 특이값 분해(SVD, Singular Value Decomposition)

선형대수에서 아주 중요한 개념

Visual SLAM에서도 많이 쓰임(카메라 Pose추정, 차원 축소, 노이즈 제거)

임의의 m x n 실수 행렬 A를 세 개의 행렬로 분해

벡터 u=[x,y,1]

이미지 평면 상의 좌표

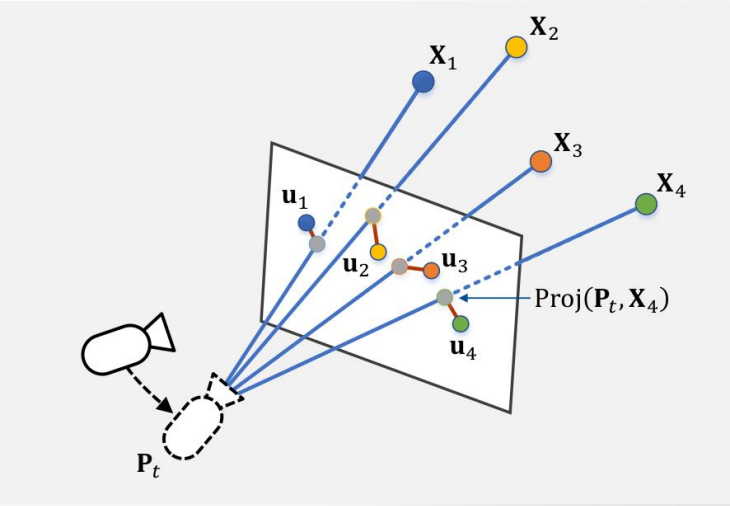
행렬 R (회전행렬)
카메라를 월드 좌표계로 변환하기 위해
얼마나 회전시킬지 정의

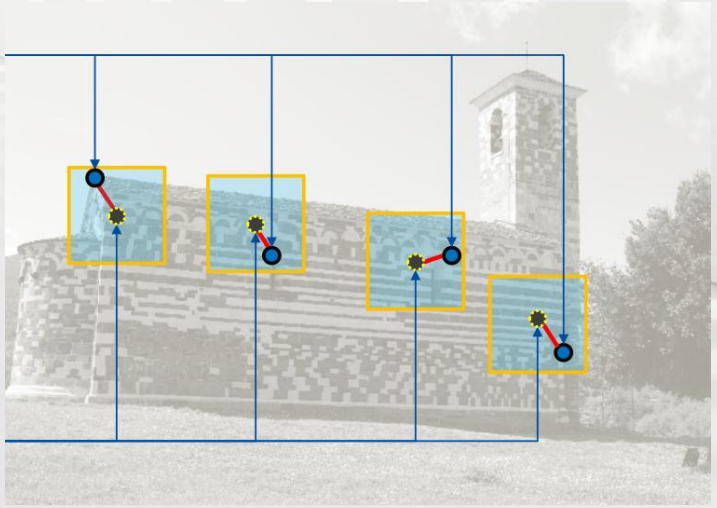
행렬 t (이동행렬)
카메라를 월드 좌표계로 변환하기 위해
얼마나 이동시킬지 정의

SLAM : Visual

카메라를 이동시키면서 자세를 추정하고
이미지의 특징점을 추적하면서 지도를 작성함

Step0. 센서 초기화
Step1. 데이터 수집
Step2. 특징점 추출
Step3. 특징점 매칭
Step4. 카메라 포즈 추정
Step5. 지도 업데이트



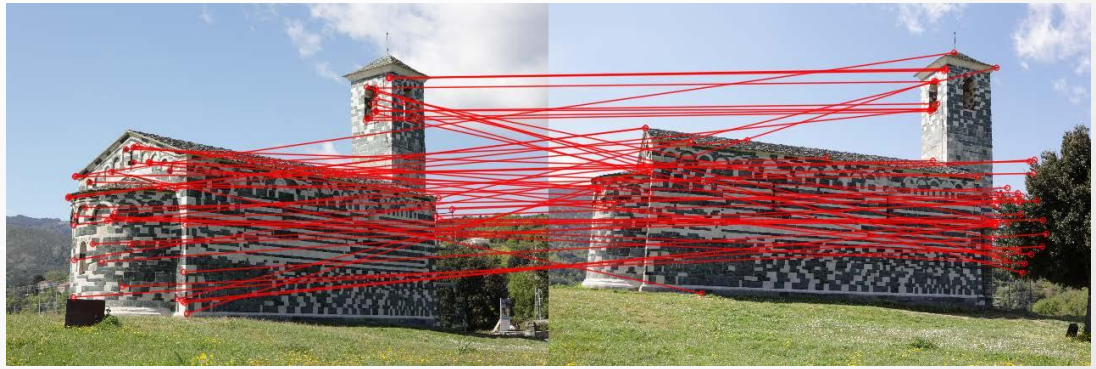


SLAM : 정확도 향상

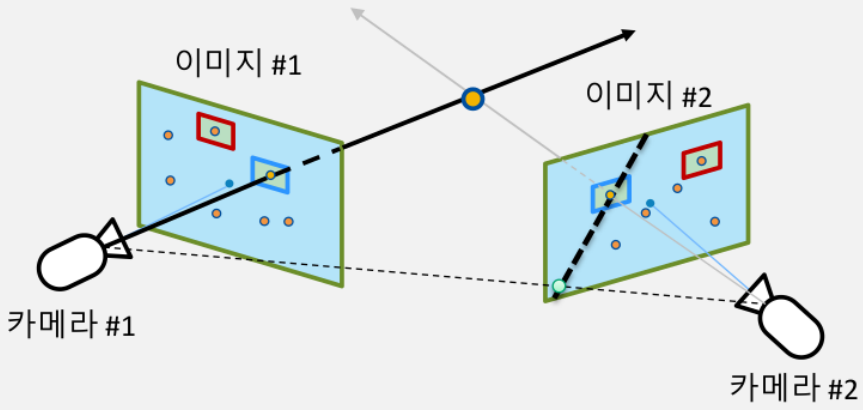
Cycle Consistency

이미지#1 → 이미지#2 → 이미지#3 → 이미지#1

위 경우 원래의 피처로 정확히 돌아와야 함



Epipolar Constraint



카메라 #1이 대상을 바라보는 직선을

카메라 #2의 평면에 project했을 때

그 직선 위에 카메라 #2가 바라보는 대상이 위치해야 함

(삼각 측량에 의한 제약)

불일치 Feature 제거

✓ 실습환경 구축

- RTAB_MAP 설치

```
sudo apt install ros-humble-rtabmap-ros
```

vslam_ws.zip의 압축을 풀고 해당 폴더로 이동한 뒤 다음 명령어 실행

```
cd vslam_ws
```

git clone --branch humble-devel https://github.com/introlab/rtabmap_ros.git src/rtabmap_ros

```
git clone https://github.com/introlab/rtabmap.git src/rtabmap
git clone --branch ros2 https://github.com/introlab/rtabmap_ros.git src/rtabmap_ros
```

```
export ROSDEP_SSL_VERIFY=0
rosdep update && rosdep install --from-paths src --ignore-src -r -y
```

※ PC의 사양에 따라 작동 안되는 경우가 있음

✓ 실습환경 구축

```
export MAKEFLAGS="-j6”
colcon build --symlink-install --executor sequential --cmake-args -DCMAKE_BUILD_TYPE=Release
```

패키지 빌드하기
시간이 오래 걸릴 수 있음

빌드 에러 발생 시
기타 파일들을 지우고 다시 실행

```
rm -rf /build /log /install
```

✓ 실습환경 구축

```
export TURTLEBOT3_MODEL=burger
ros2 launch turtlebot3_gazebo turtlebot3_no_roof_aws.launch.py
```

런치 파일 실행

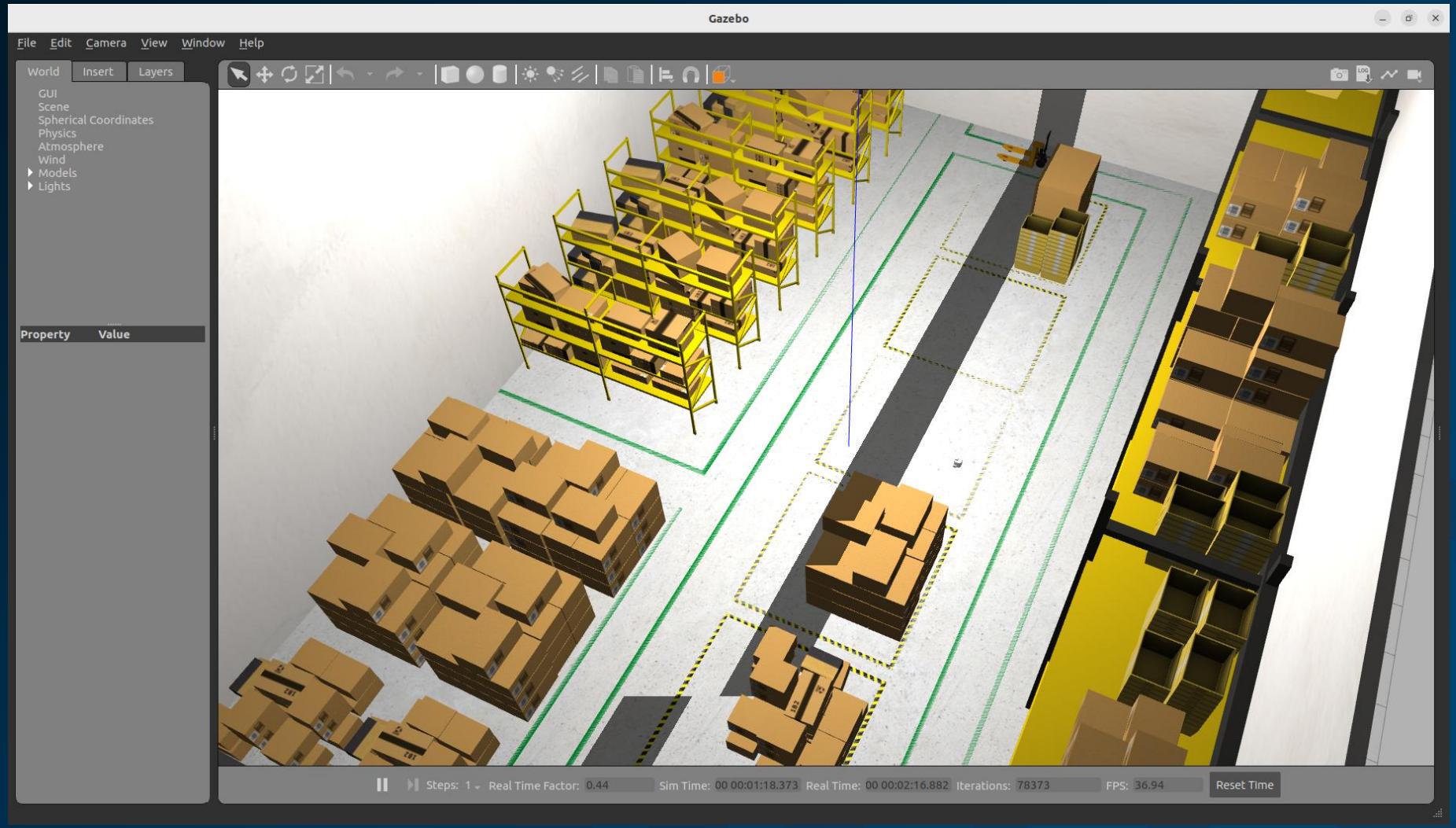
실행 에러 발생 시

Gazebo관련 프로세스 종료 후 재시도

```
killall -9 gzclient
killall -9 gzserver
```

✓ 실습환경 구축

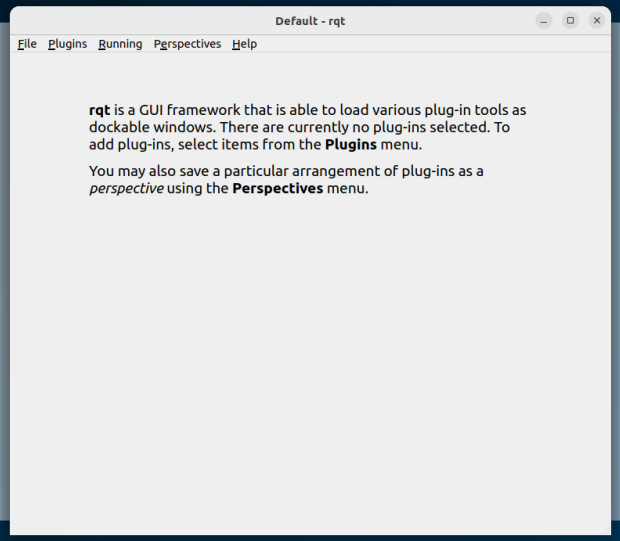
실행 결과

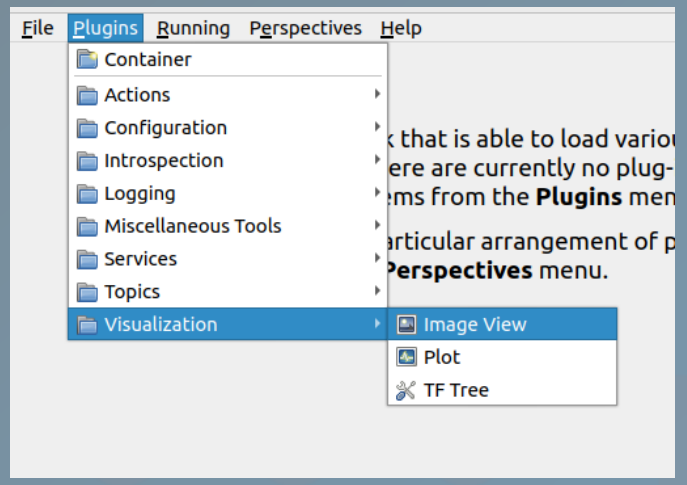

Gazebo
File Edit Camera View Window Help
World Insert Layers
GUI
Scene
Spherical Coordinates
Physics
Atmosphere
Wind
Models
Lights
Property Value
Steps: 1 Real Time Factor: 0.44 Sim Time: 00 00:01:18.373 Real Time: 00 00:02:16.882 Iterations: 78373 FPS: 36.94
Reset Time

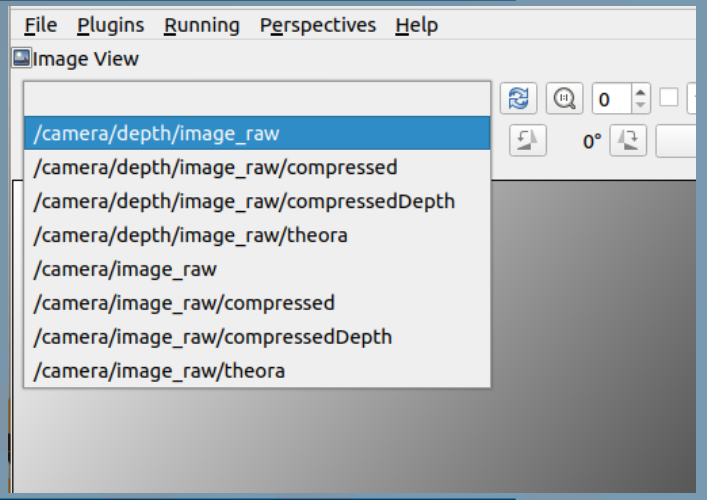
✓ 실습환경 구축

```
rqt
```

RQt로 토픽 데이터 확인하기

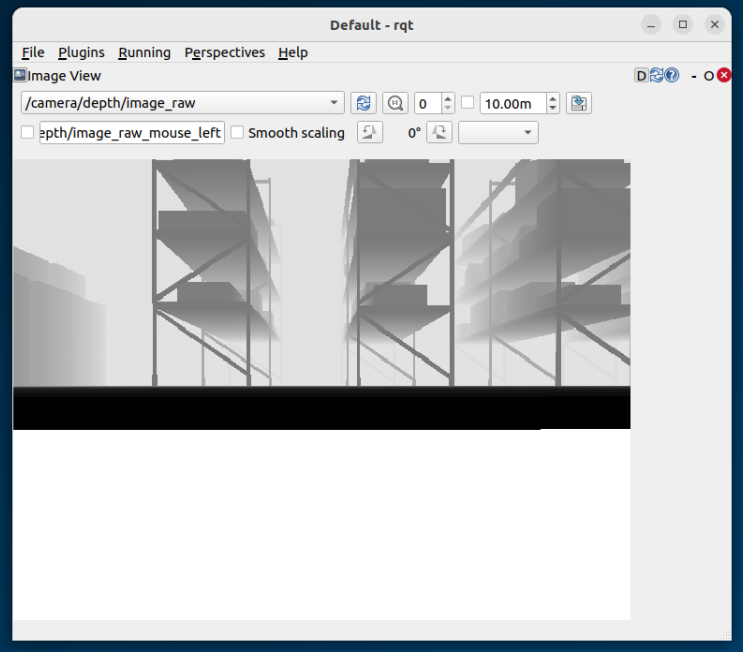






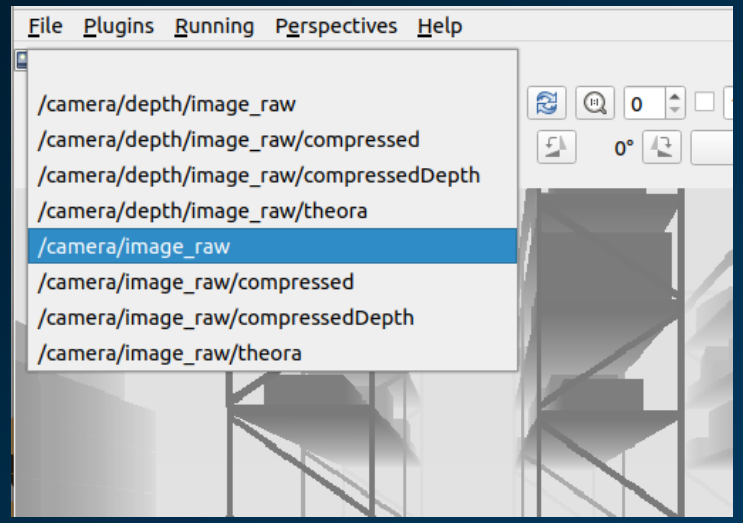
Plugins → visualization → ImageView선택 → camera/depth/image_raw 선택

✓ 실습환경 구축

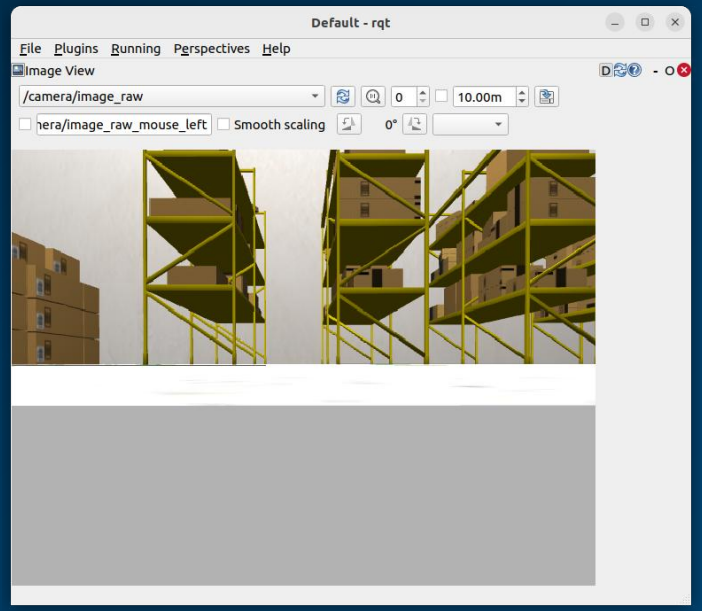


depth camera 결과

✓ 실습환경 구축



/camera/image_raw선택

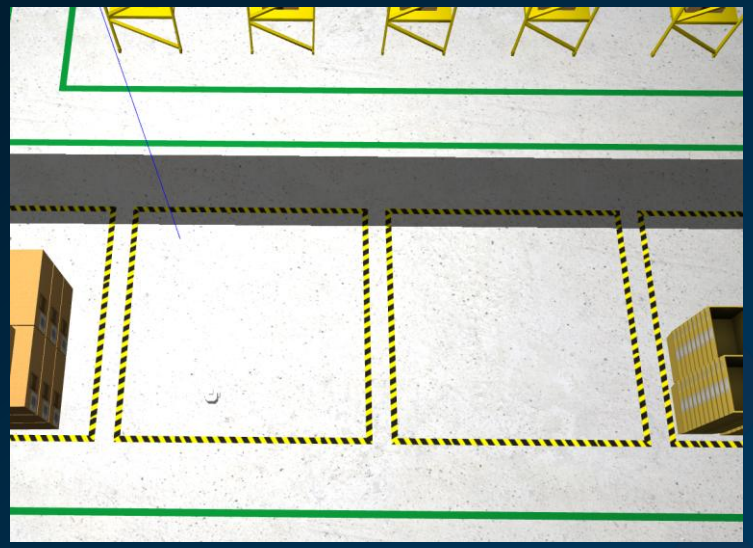


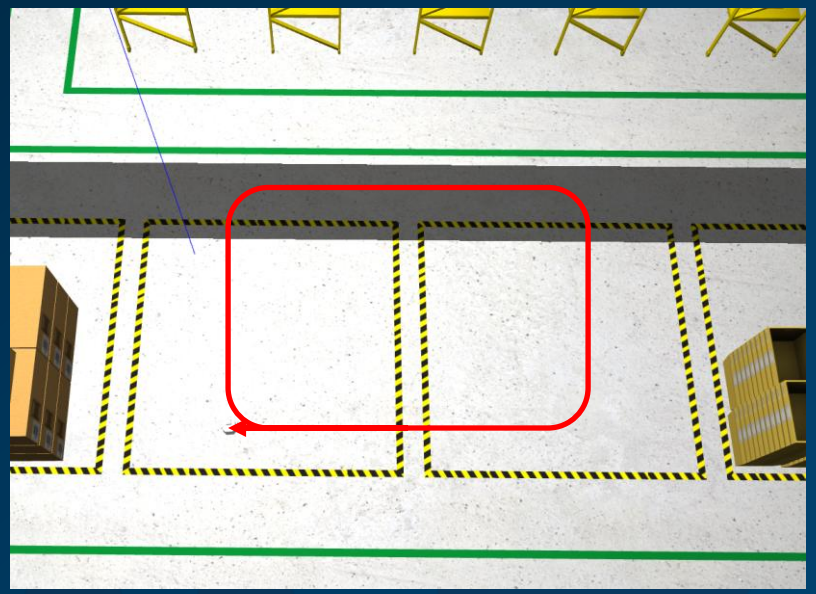
rgb 카메라 결과

✓ 실습환경 구축

키보드로 터틀봇 제어

```
ros2 run turtlebot3_teleop teleop_keyboard
```



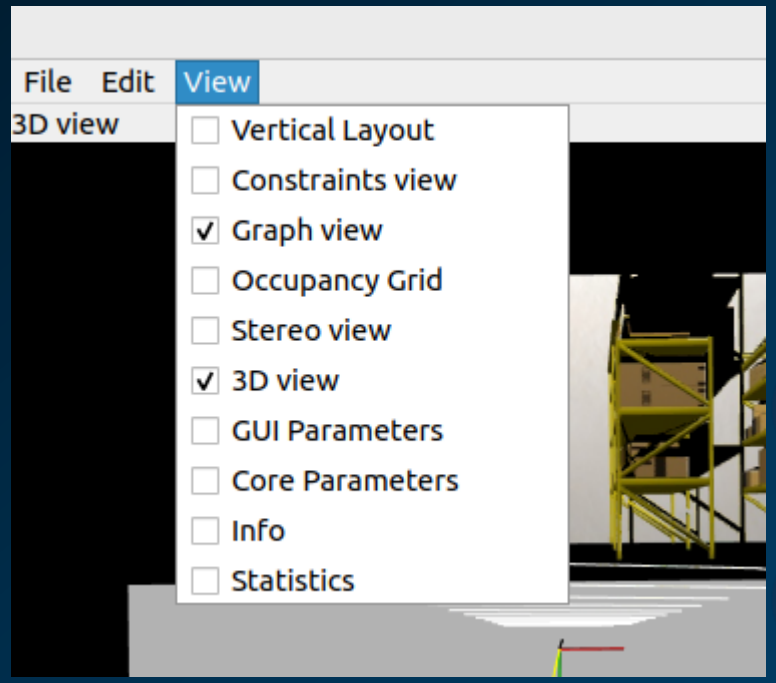


Loop Closure를 위해 터틀봇을 이동시키며
원래 자리로 되돌아옴

✓ 실습환경 구축

터미널을 종료하면 자동으로 데이터가 저장되며 다음의 명령어로 확인할 수 있음

```
rtabmap-databaseViewer ~/.ros/rtabmap.db
```

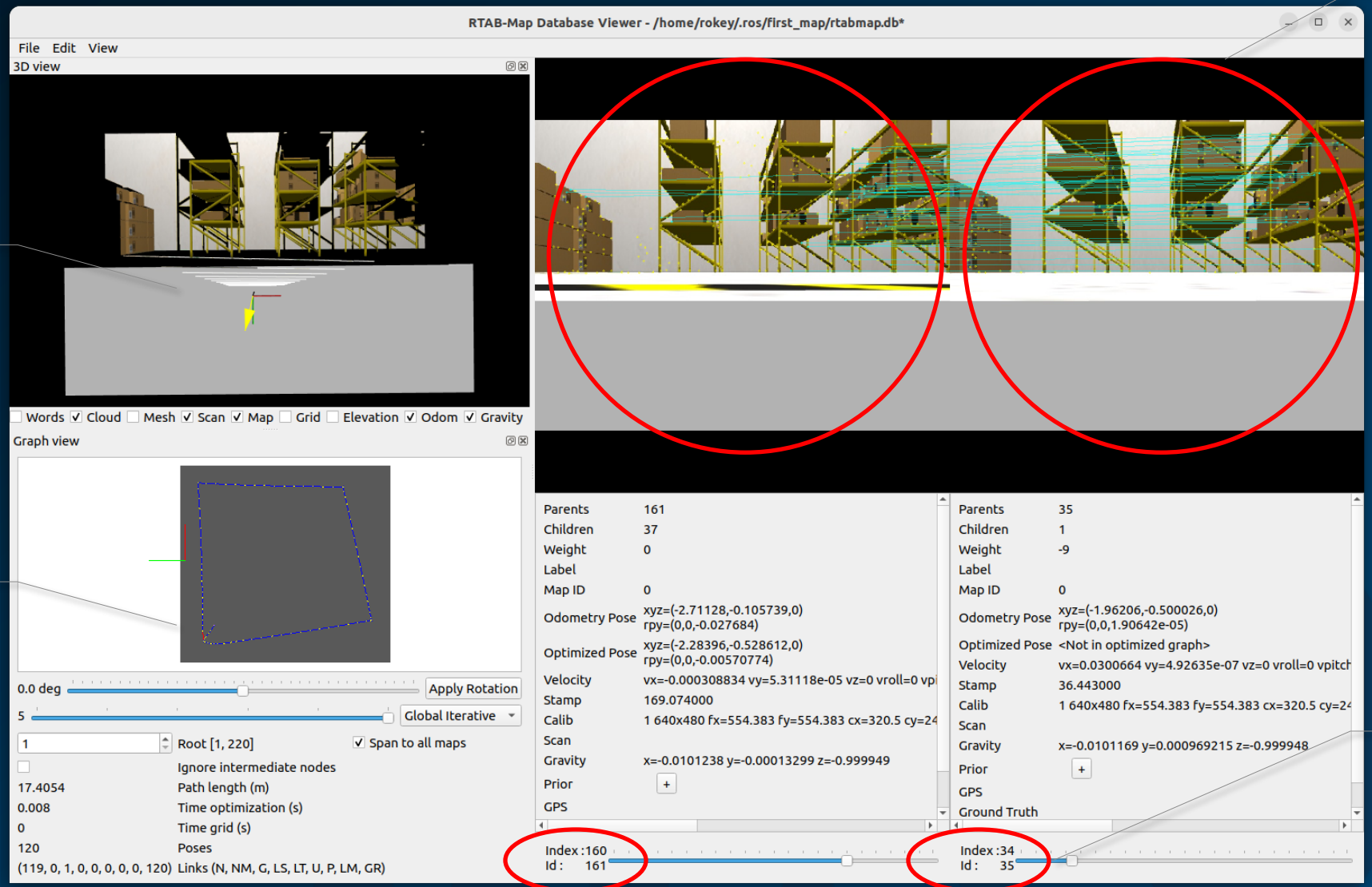


View 옵션을 조정

✓ 실습환경 구축

3D로 depth를 시각화 (3D view는 리소스 로딩 등의 이유로 잘 보이지 않을 수 있음)

로봇의 자취를 그림



두 이미지의 특징점을 찾고 매칭함

매칭된 특징점이 가장 많은 pair를 감지하면 loop closure로 판단

LoopClosure를 감지하고 인덱스를 짝지어 보여줌

ROKEY BOOT CAMP

수고하셨습니다.