

# SLAM과 내비게이션

**ROBOTIS**

Open Source Team

Yoonseok Pyo



[온라인강좌](#)

**You Tube**

 Subscribe

교재

P. 327~377

# Contents

---

I. 내비게이션과 구성 요소

II. SLAM 실습편

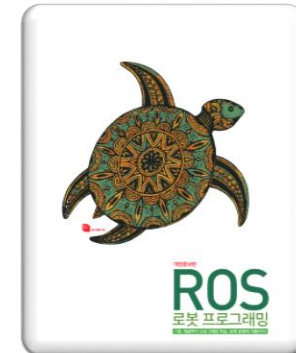
III. SLAM 응용편

IV. SLAM 이론편

V. 내비게이션 실습편

VI. 내비게이션 응용편

VII. 내비게이션 이론편



[온라인강좌](#)

**You Tube**

 Subscribe

교재  
P. 327~377

자~ 이번 주제는  
SLAM, Navigation  
입니다!

# Simultaneous Localization And Mapping & Navigation

뭔 말이야?

———  
//

동시적 위치 추정 및 지도 작성  
&  
차량 자동 항법 장치

뭐야? OTL...  
더 어려워 보이잖아!

———  
//

좀~ 쉽게 갑시다!

길 찾기

어때요?



# 길...



## 길 「명사」

1. 사람이나 동물 또는 자동차 따위가 지나갈 수 있게 땅 위에 낸 일정한 너비의 공간.
2. 물 위나 공중에서 일정하게 다니는 곳.
3. 걸거나 탈것을 타고 어느 곳으로 가는 노정(路程).

-국립국어원 표준국어대사전-

# 길 찾기...



## 길 「명사」

1. 사람이나 동물 또는 자동차 따위가 지나갈 수 있게 땅 위에 낸 일정한 너비의 공간.
2. 물 위나 공중에서 일정하게 다니는 곳.
3. 걸거나 탈것을 타고 어느 곳으로 가는 노정(路程).

-국립국어원 표준국어대사전-

여행의 오랜 동반자

나침반과 지도

나침반도 없고  
지도도 없다면?



여긴 어디? 나는 누구?



# 나는 여기에 있다.

---

- 해, 달, 별의 위치만으로 떠나는 여행자
- 중국 4대 발명 나침반
- 나침반 진화
  - 자기 나침반
  - 전륜 나침반
  - GPS
- 지도



Big Dipper, by Magnus Manske, Public Domain



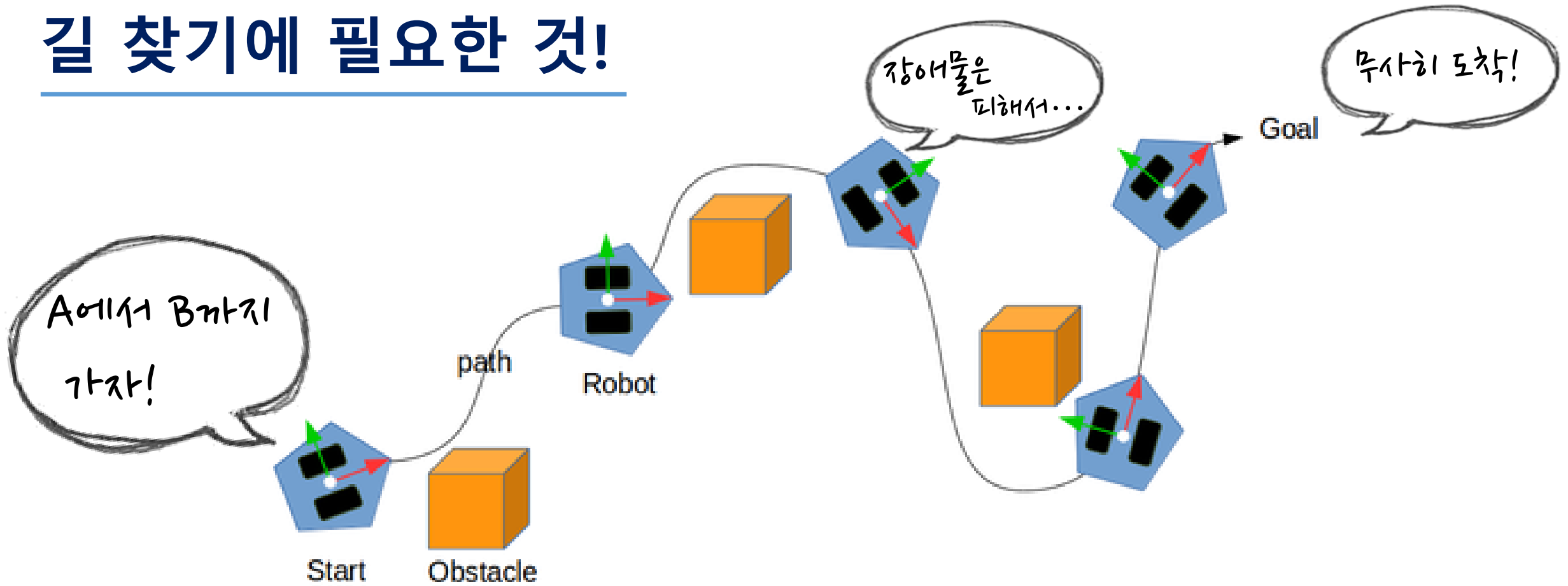
pixabay.com, CC0

상상해 보세요!  
어둠 속 길 찾기

# 로봇의 길 찾기

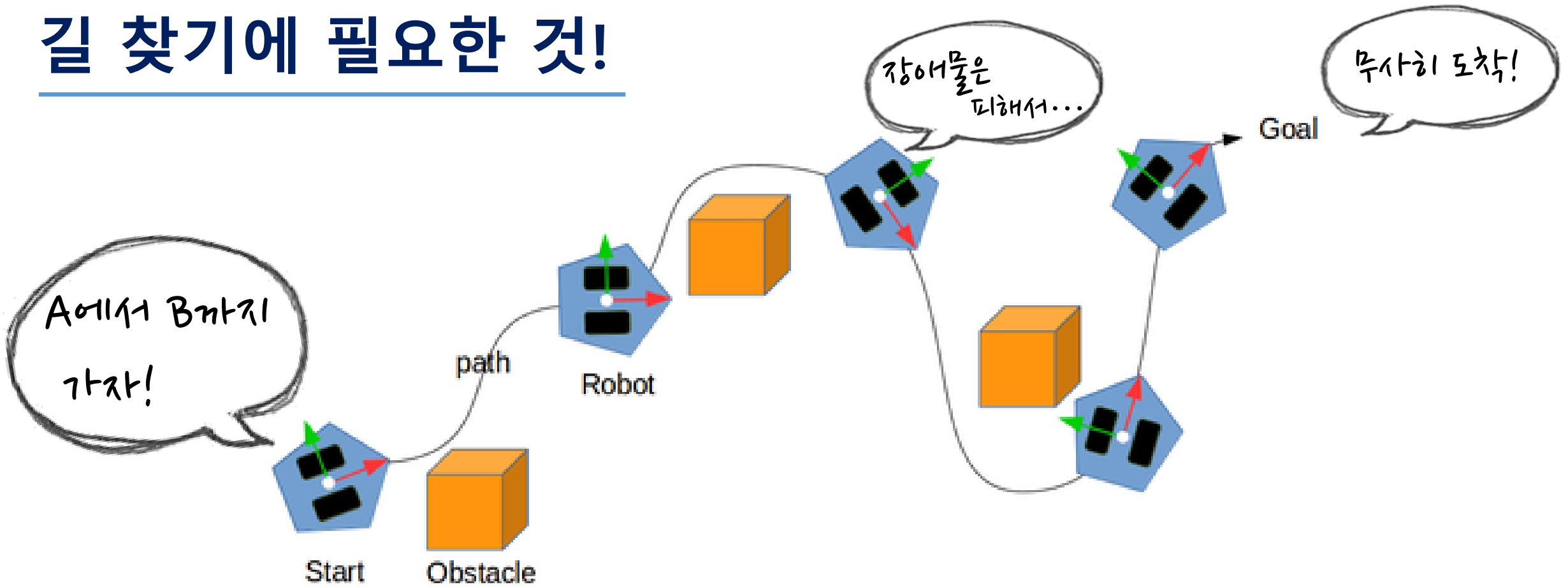
(이제부터는 열심히 풀어가 볼게요.)

# 길 찾기에 필요한 것!





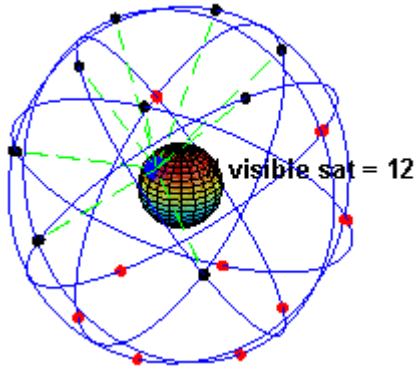
# 길 찾기에 필요한 것!



- ① **위치**: 로봇의 위치 계측/추정하는 기능
- ② **센싱**: 벽, 물체 등의 장애물의 계측하는 기능
- ③ **지도**: 길과 장애물 정보가 담긴 지도
- ④ **경로**: 목적지까지 최적 경로를 계산하고 주행하는 기능

# ① 위치: 로봇의 위치 계측/추정하는 기능

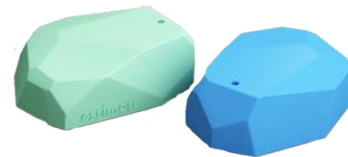
## ■ GPS (Global Positioning System)



- 오차
- 날씨
- 실외

## ■ Indoor Positioning Sensor

- Landmark (Color, IR Camera)
- Indoor GPS
- WiFi SLAM
- Beacon



Estimote (Beacon)



StarGazer

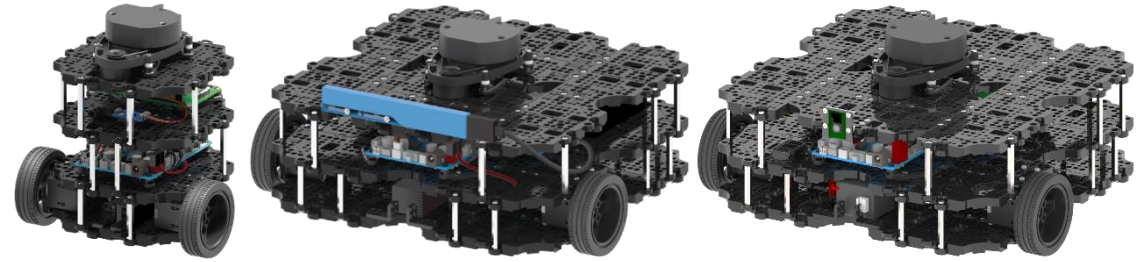


Vicon MX

# ① 위치: 로봇의 위치 계측/추정하는 기능

## ■ 추측 항법(dead reckoning, 데드레커닝)

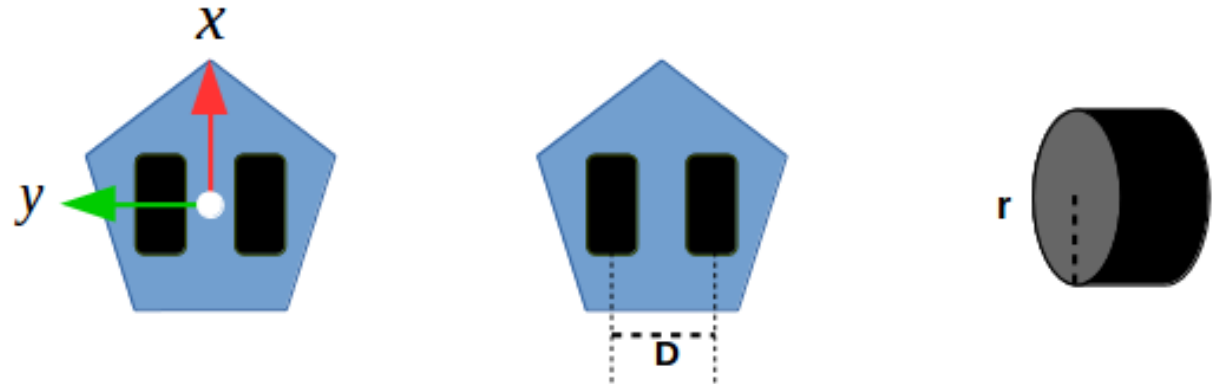
- 양 바퀴 축의 회전 값을 이용
- 이동 거리와 회전 값을 계산, 위치 측정
- 바닥 슬립, 기계적, 누적 오차 발생
- IMU 등의 관성 센서, 필터로 위치 보상
- 칼만필터 시리즈...



TurtleBot 3

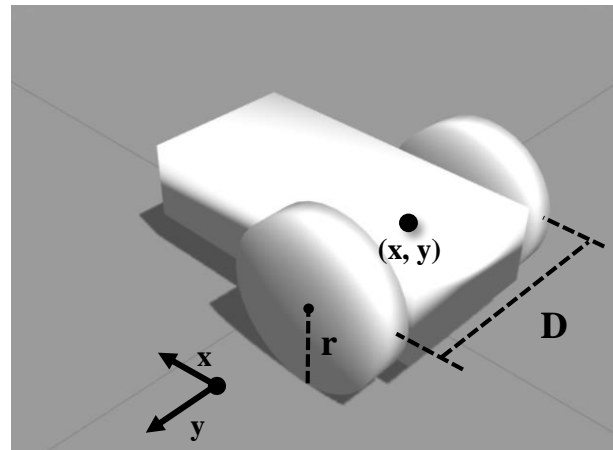
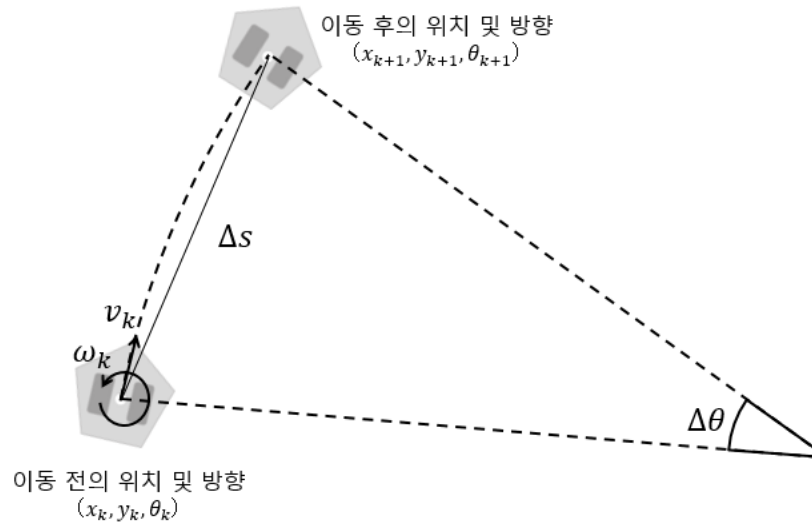
## ■ 필요한 정보

- 양 바퀴 축의 엔코더 값  $E$   
(모터 축인 경우 기어비로 재계산)
- 바퀴 간 거리  $D$
- 바퀴 반지름  $r$



# ① 위치: 로봇의 위치 계측/추정하는 기능

- 데드레커닝 계산
  - 선속도(linear velocity:  $v$ )
  - 각속도(angular velocity:  $w$ )
- Runge-Kutta 공식 이용
  - 이동한 위치의 근사 값  $x, y$
  - 회전 각도  $\theta$



$$v_l = \frac{(E_{lc} - E_{lp})}{T_e} \cdot \frac{\pi}{180} \text{ (radian/sec)}$$

$$v_r = \frac{(E_{rc} - E_{rp})}{T_e} \cdot \frac{\pi}{180} \text{ (radian/sec)}$$

$$V_l = v_l \cdot r \text{ (meter/sec)}$$

$$V_r = v_r \cdot r \text{ (meter/sec)}$$

$$v_k = \frac{(V_r + V_l)}{2} \text{ (meter/sec)}$$

$$\omega_k = \frac{(V_r - V_l)}{D} \text{ (radian/sec)}$$

$$\Delta s = v_k T_e \quad \Delta \theta = \omega_k T_e$$

$$x_{(k+1)} = x_k + \Delta s \cos\left(\theta_k + \frac{\Delta \theta}{2}\right)$$

$$y_{(k+1)} = y_k + \Delta s \sin\left(\theta_k + \frac{\Delta \theta}{2}\right)$$

$$\theta_{(k+1)} = \theta_k + \Delta \theta$$

## ② **센싱**: 벽, 물체 등의 장애물의 계측하는 기능

### ■ 거리센서

- LRF, 초음파센서, 적외선 거리센서(PSD)



### ■ 비전센서

- 스테레오 카메라, 모노 카메라, 전 방향 옴니 카메라

### ■ Depth camera

- SwissRanger, Kinect-2
- RealSense, Kinect, Xtion, Carmine(PrimeSense), Astra



### ③ 지도: 길과 장애물 정보가 담긴 지도

---

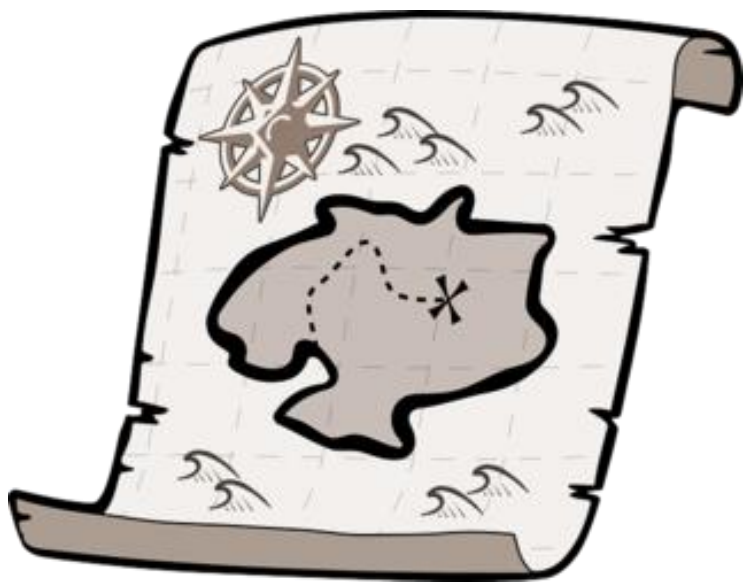
- 로봇은 길을 찾아가기 위해 **지도**가 필요하다!



- 지도
  - 도로와 같은 기반 시설의 경우 디지털 지도 OK!
  - 병원, 카페, 회사, 가정집의 지도?
  - 탐사, 붕괴된 위험지역의 지도?



### ③ 지도: 길과 장애물 정보가 담긴 지도



- 로봇은 길을 찾아가기 위해 **지도**가 필요하다!
- 지도
  - 도로와 같은 기반 시설의 경우 디지털 지도 OK!
  - 병원, 카페, 회사, 가정집의 지도?
  - 탐사, 붕괴된 위험지역의 지도?

▪ **지도?** 없으면 만들자!

▪ **SLAM**

(Simultaneous Localization And Mapping)

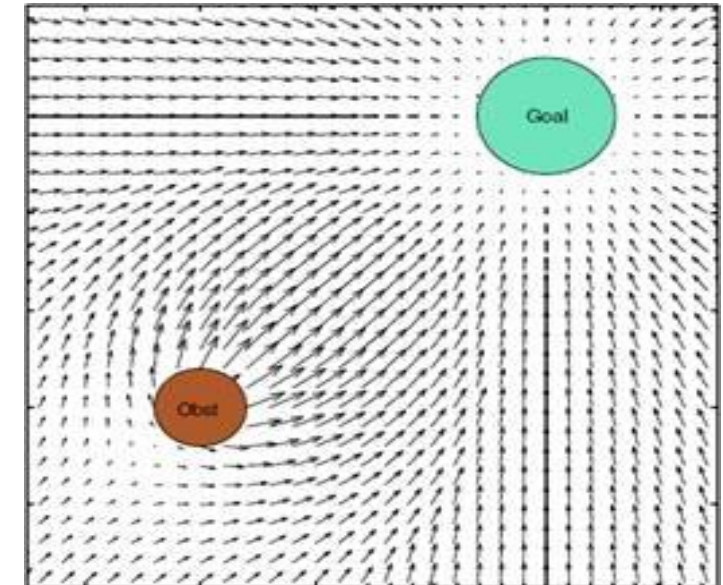
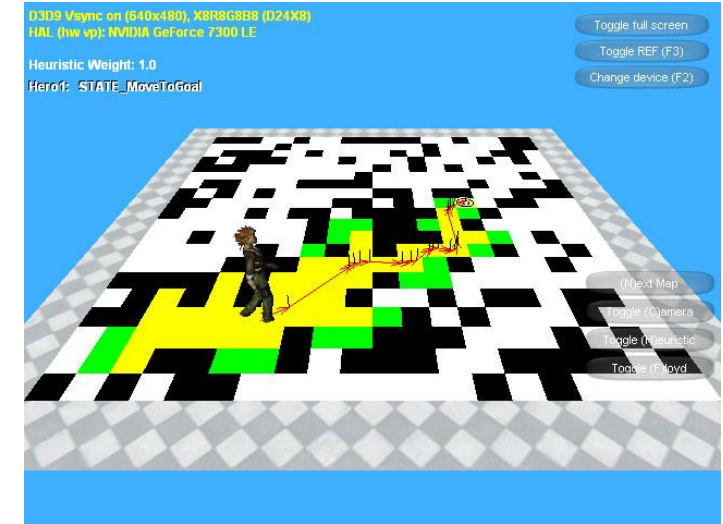
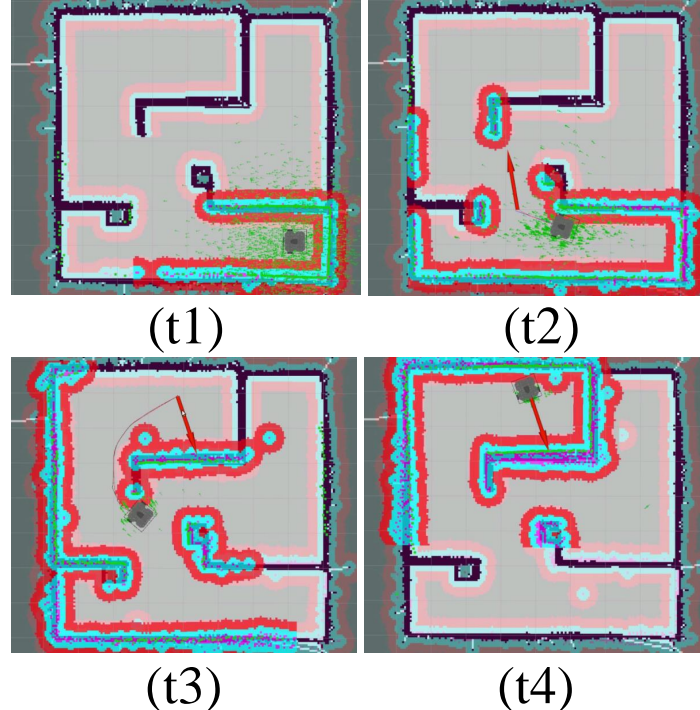
같이

여긴 어디?

지도 만들자

## ④ 경로: 목적지까지 최적 경로를 계산하고 주행하는 기능

- 내비게이션(Navigation)
- 위치 추정 (Localization / Pose estimation)
- 경로 탐색/계획 (Path search and planning)
- Dynamic Window Approach (DWA)
- A\* 알고리즘 (A Star)
- 포텐셜 장(Potential Field)
- 파티클 필터 (Particle Filter)
- 그래프 (Graph)





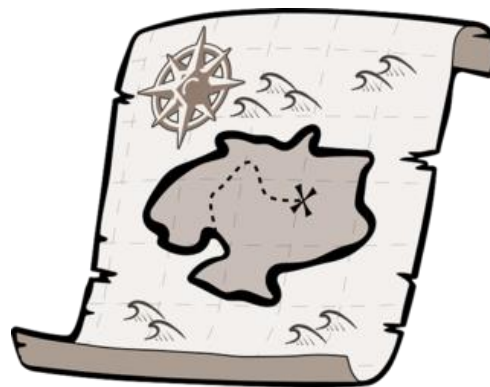
① 위치



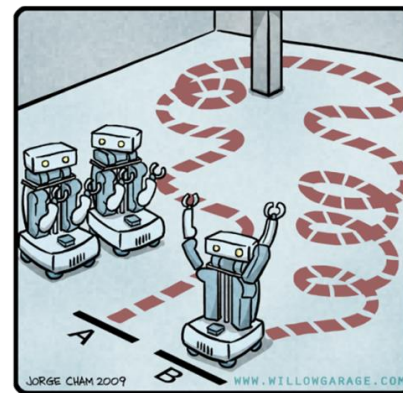
② 센싱



③ 지도



④ 경로



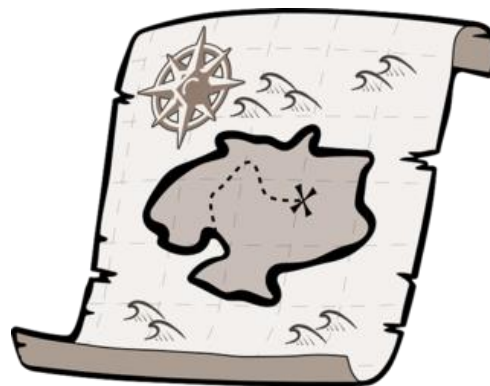
① 위치



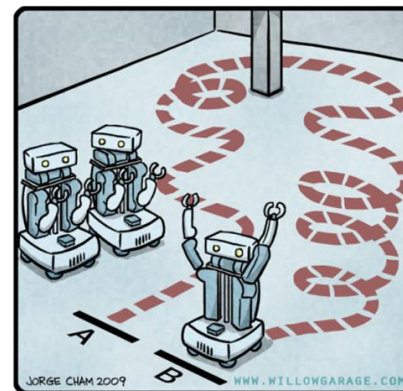
② 센싱



③ 지도



④ 경로



위치 + 센싱 → 지도

**SLAM**

위치 + 센싱 + 지도 → 경로

**Navigation**

SLAM

# Gmapping

---

- OpenSLAM에 공개된 SLAM 의 한 종류, ROS에서 패키지로 제공
- 저자: G. Grisetti, C. Stachniss, W. Burgard
- 특징: Rao-Blackwellized 파티클 필터, 파티클 수 감소, 그리드 맵
- 하드웨어 제약 사항
  - **X, Y, Theta 속도 이동 명령**
    - 차동 구동형 모바일 로봇(differential drive mobile robot)
    - 전 방향 이동 로봇 (omni-wheel robot)
  - **주행기록계 (Odometry)**
  - **계측 센서: 2차 평면 계측 가능 센서( LRF, LiDAR, Kinect, Xtion 등)**
  - 직사각형 및 원형의 로봇

# 지도작성: Gmapping + TurtleBot3

---

- 소프트웨어 준비

- [http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/pc\\_setup/](http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/pc_setup/)
- [http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/sbc\\_setup/](http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/sbc_setup/)
- [http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/opencr\\_setup/](http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/opencr_setup/)

- Turtlebot3 패키지

- <https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3>
- [https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3\\_msgs](https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3_msgs)
- [https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3\\_simulations](https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3_simulations)
- [https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3\\_applications](https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3_applications)

# 지도작성: Gmapping + TurtleBot3

---

- <http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/slam>
- 마스터 실행 (Remote PC)

```
$ roscore
```

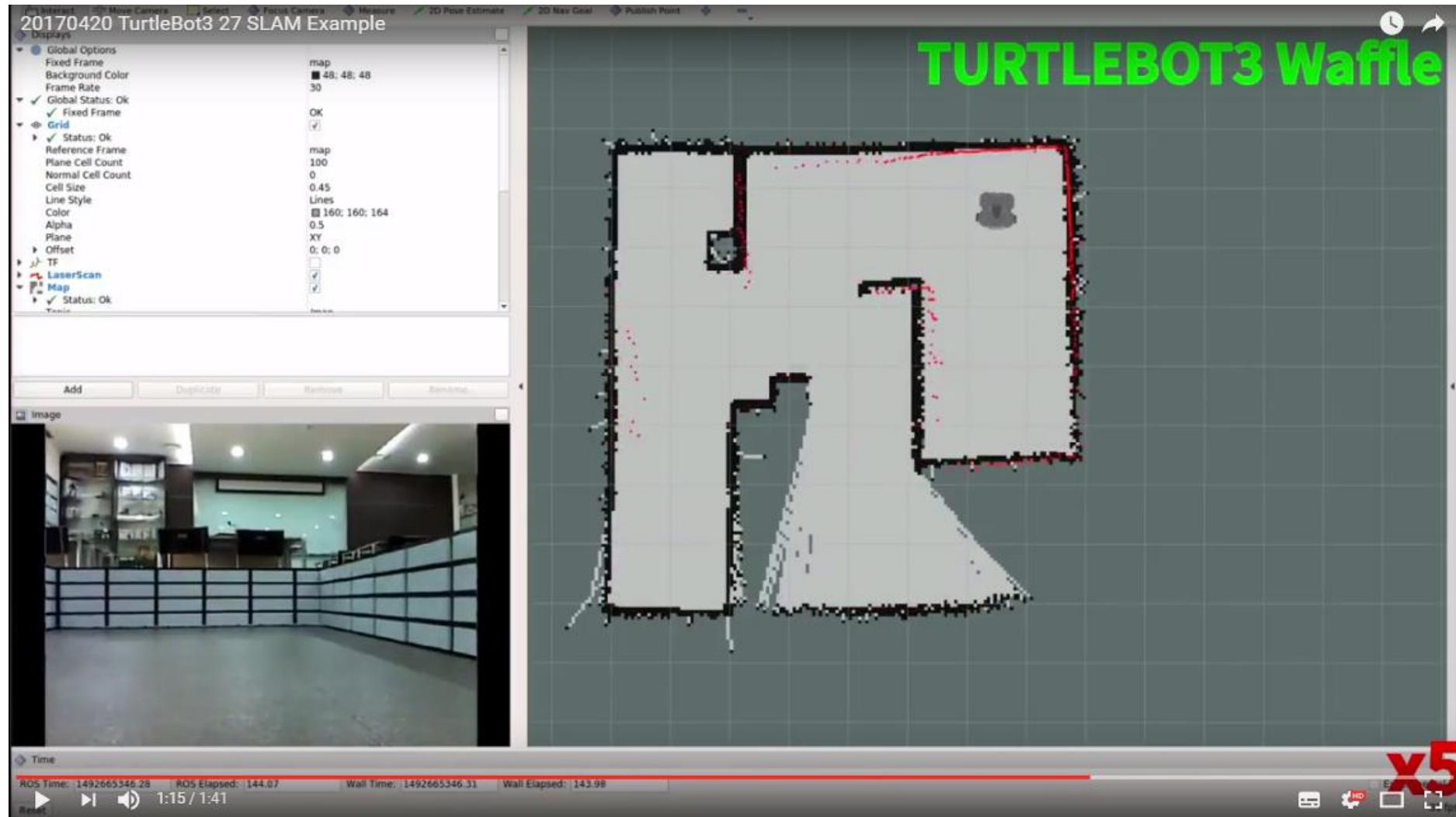
- 터틀봇 및 센서 구동 (SBC)

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=burger (또는 waffle, waffle_pi)  
$ roslaunch turtlebot3_bringup turtlebot3_robot.launch
```

- RViz, 터틀봇 원격 조종, 지도 작성 (Remote PC)

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=burger (또는 waffle, waffle_pi)  
$ roslaunch turtlebot3_slam turtlebot3_slam.launch  
$ rosrn rviz rviz -d `rospack find turtlebot3_slam`/rviz/turtlebot3_slam.rviz  
$ roslaunch turtlebot3_teleop turtlebot3_teleop_key.launch  
$ rosrn map_server map_saver -f ~/map
```

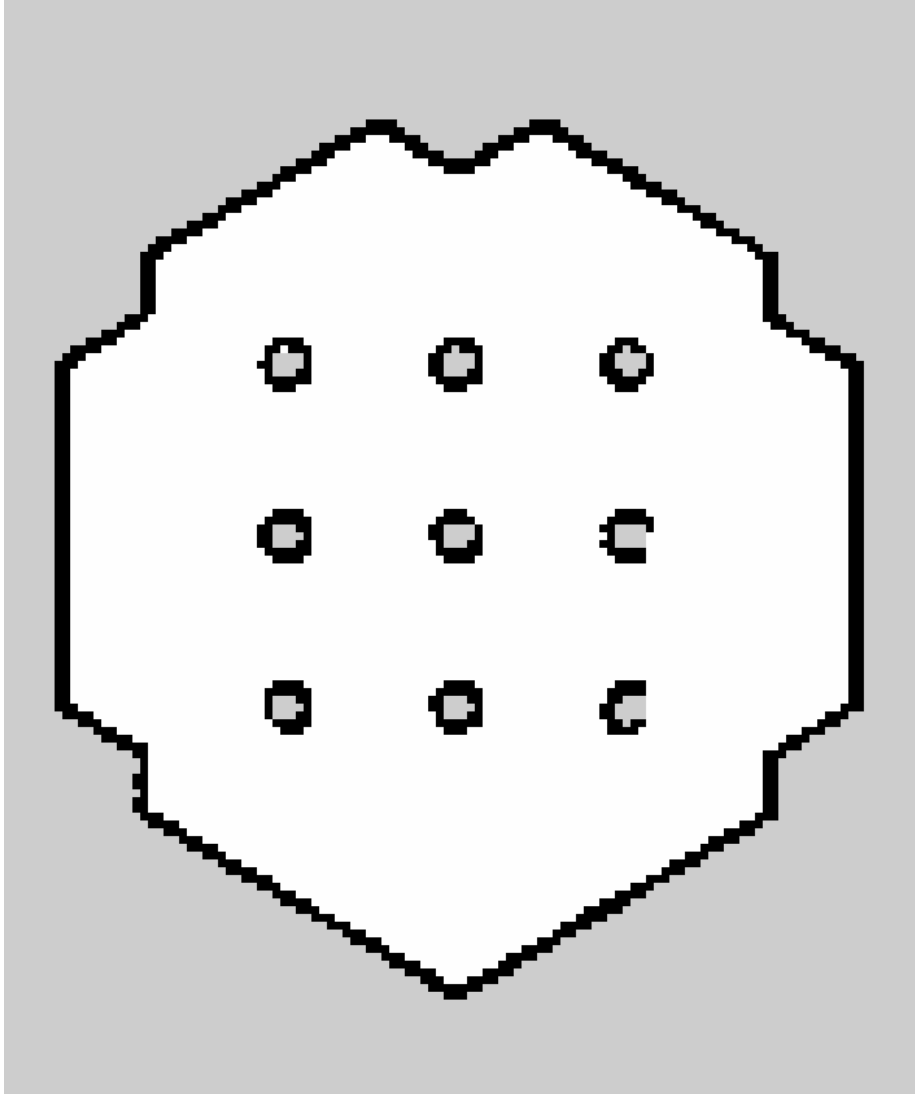
# 지도작성: Gmapping + TurtleBot3



[https://youtu.be/7mEKrT\\_cKWI](https://youtu.be/7mEKrT_cKWI)

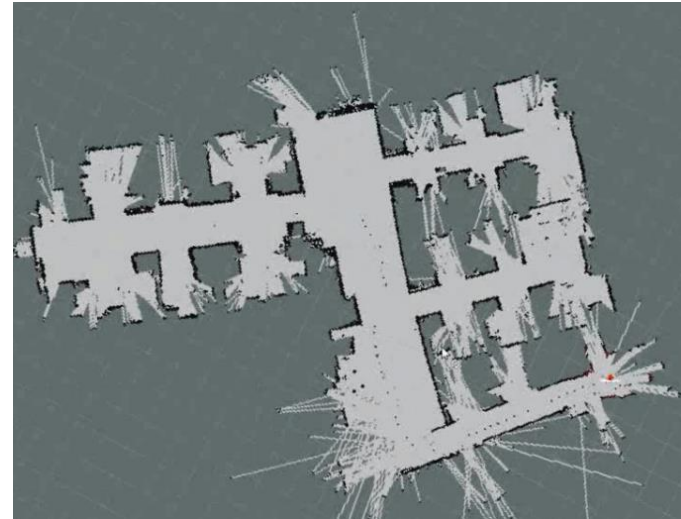
# 지도작성: Gmapping + TurtleBot3

- 완성된 지도



## 2차원 점유 격자 지도 (OGM, Occupancy Grid Map)

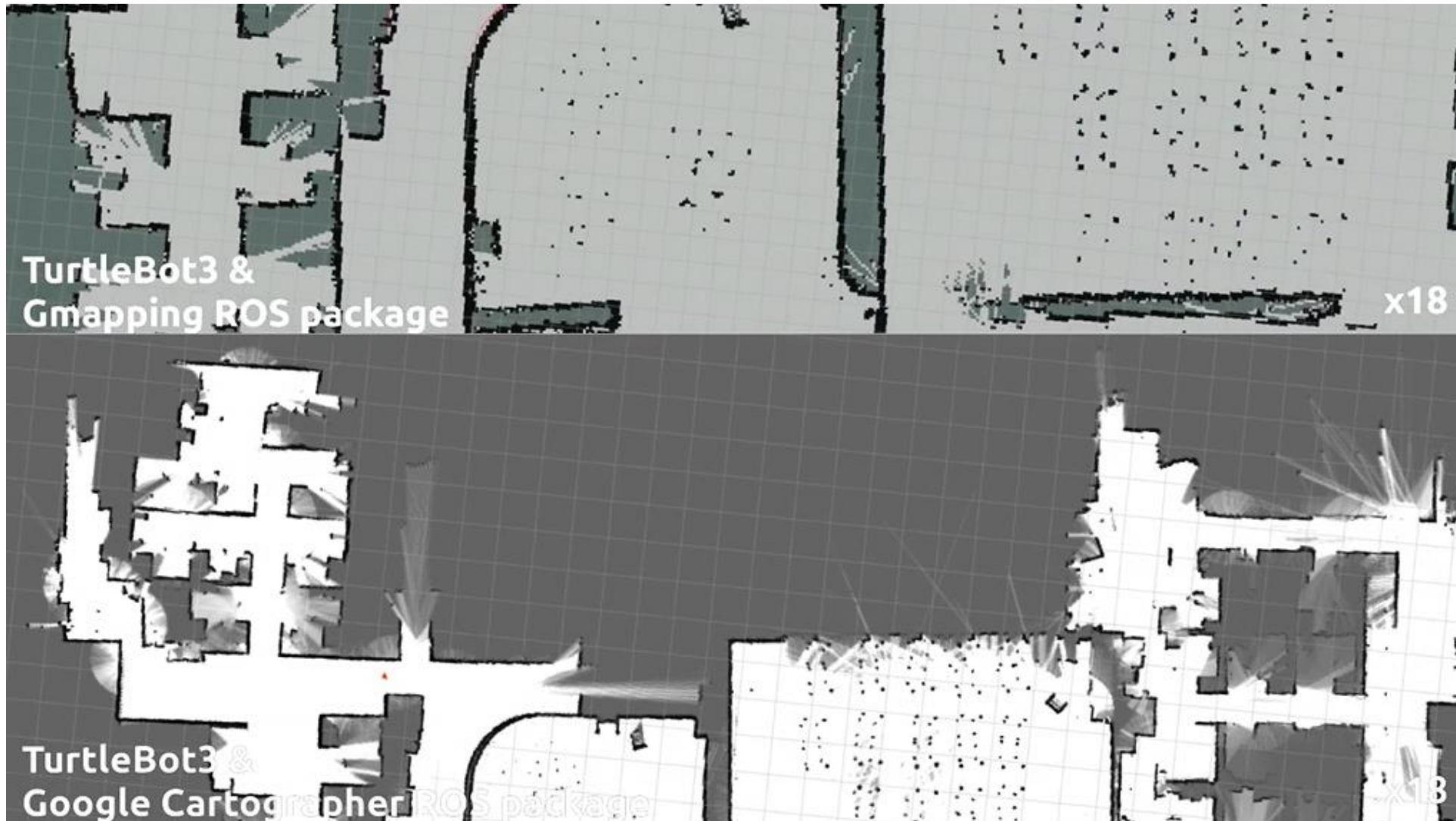
- 흰색 = 로봇이 이동 가능한 자유 영역 (free area)
- 흑색 = 로봇이 이동 불가능한 점유 영역 (occupied area)
- 회색 = 확인되지 않은 미지 영역 (unknown area)






# 지도작성: Gmapping & Cartographer + TurtleBot3

---



<https://youtu.be/lkW4-dG2BCY>

# 지도작성: Gmapping & Cartographer + TurtleBot3



The central part of the slide features a white SLAM map on a dark grey background, showing a complex corridor layout. Red arrows point from several small camera view images to specific locations on the map. The images include a classroom with desks, a hallway with a 'ROBOTIS' sign, and various perspectives of the corridor. In the top right corner, the TurtleBot3 logo is displayed, consisting of a green hexagonal pattern with a black center and the text 'TURTLEBOT3' in green and black.

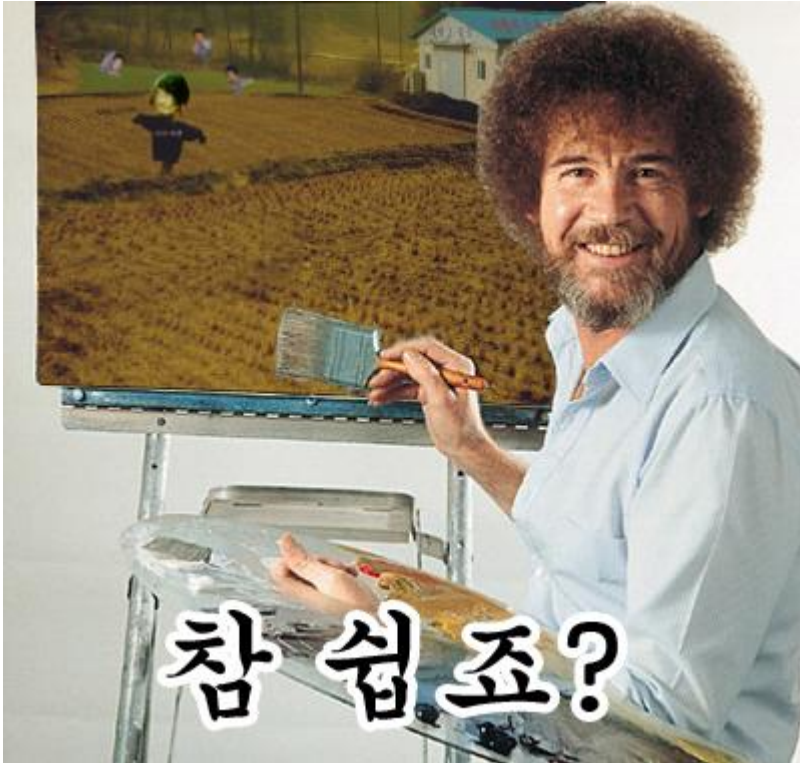
**SLAM  
with TurtleBot3**

Date: 2016.11.29  
Robot: TurtleBot3 basic model  
Sensor: Laser Distance Sensor  
ROS package for SLAM: Gmapping / Cartographer  
Place: ROBOTIS Labs & HQ, 15th floor corridor  
Duration: 55 minutes  
Total travel distance: 351 meters

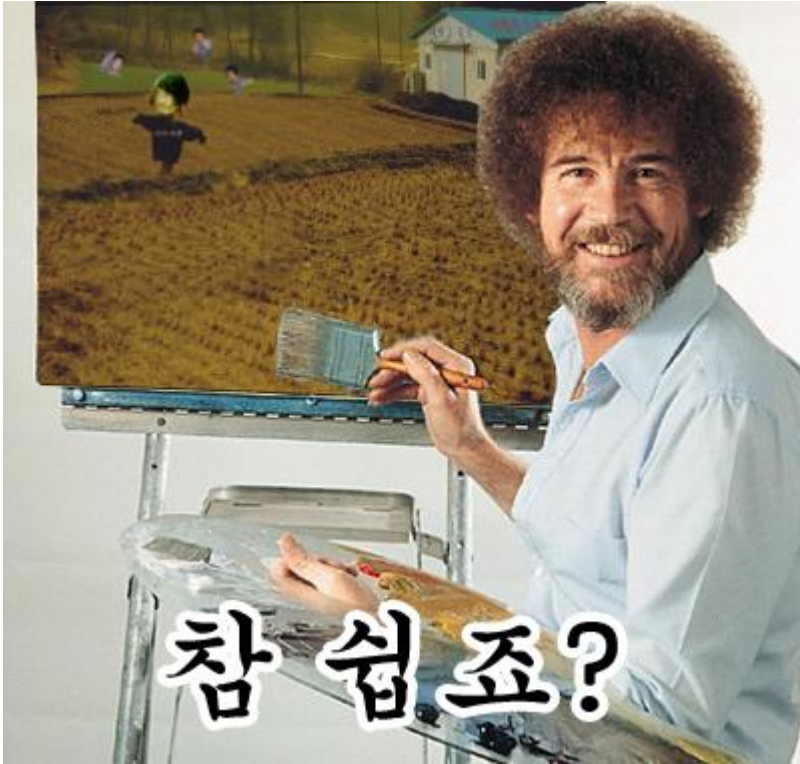
<https://youtu.be/lkW4-dG2BCY>

# 지도작성

---



# 지도작성



참 쉽죠?

SLAM, Navigation 은 기본 기능이고  
상위에 서비스 또는 모바일 로봇 자체를 하고 싶다고요?  
그렇다면 SLAM, Navigation 은 그대로 쓰시고  
좀 더 시간을 원하시는 부분에 투자하세요.  
세상에 없는 유니크한 당신만의 로봇을 기대해 봅니다.



# 지도작성

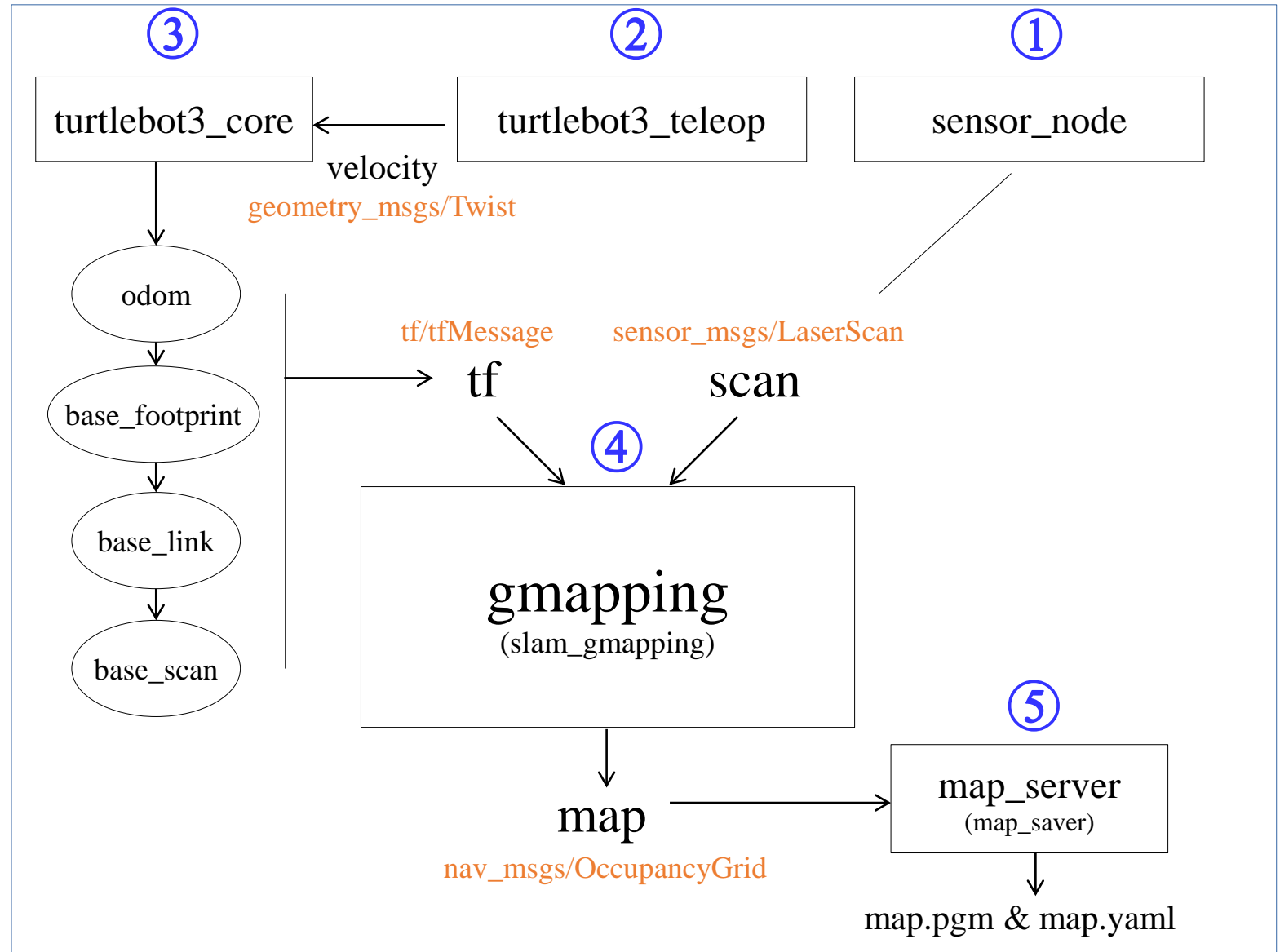


SLAM, Navigation 은 기본 기능이고  
상위에 서비스 또는 모바일 로봇 자체를 하고 싶다고요?  
그렇다면 SLAM, Navigation 은 그대로 쓰시고  
좀 더 시간을 원하시는 부분에 투자하세요.  
세상에 없는 유니크한 당신만의 로봇을 기대해 봅니다.

SLAM, Navigation 을 더 공부하고 싶다고요?  
모든 소프트웨어는 오픈 소스 입니다.  
마음껏 보고, 이해해 보고, 기능도 추가하며  
공부해 보세요. 이보다 더 좋은 교과서는 없습니다.

# SLAM 관련 노드들의 처리 과정

- ① sensor\_node
- ② turtlebot3\_teleop
- ③ turtlebot3\_core
- ④ slam\_gmapping
- ⑤ map\_server



# 위치 추정(localization) | Kalman filter, Particle filter, Graph, Bundle adjustment

## • 칼만 필터 (Kalman filter)

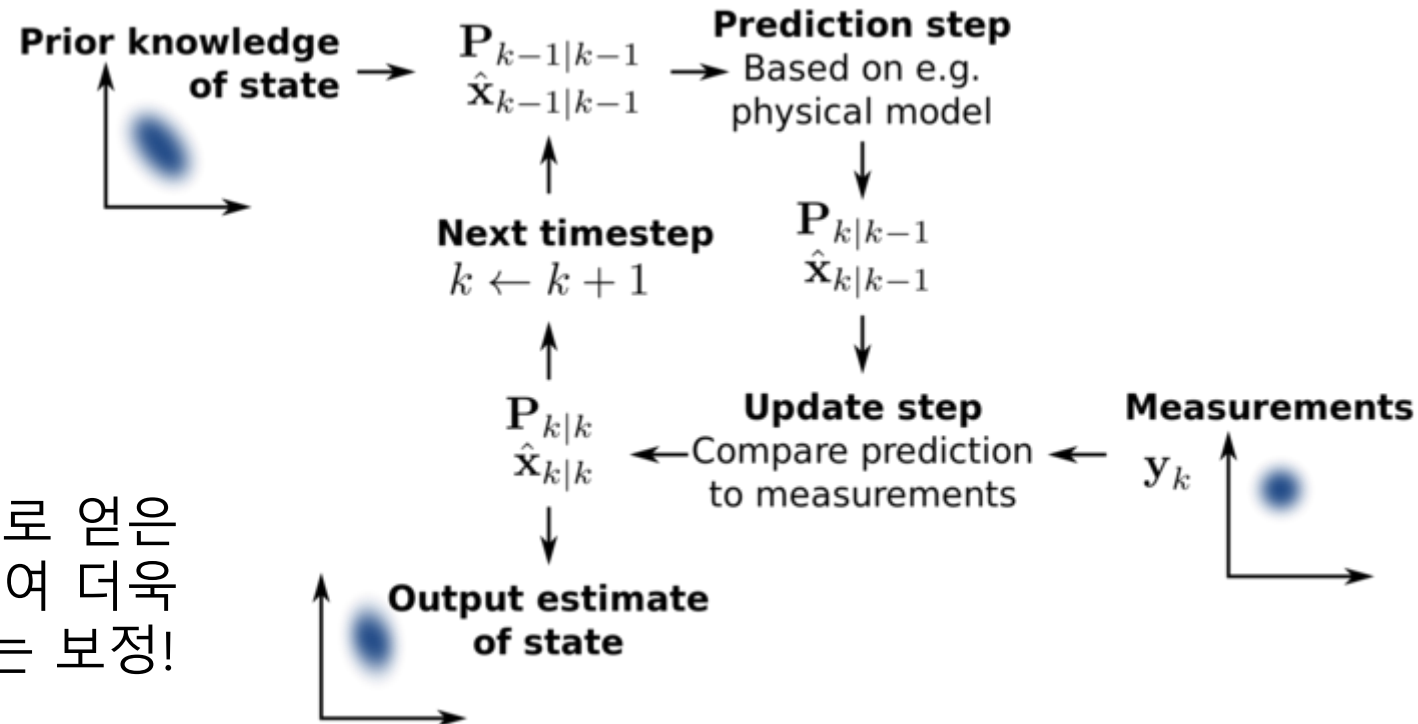
- 잡음이 포함되어 있는 선형 시스템에서 대상체의 상태를 추적하는 재귀 필터
- 베이지 확률 기반

### • 예측(Prediction)

- 모델을 상정하고 이 모델을 이용하여 이전 상태에서부터 현재 시점의 상태를 예측

### • 보정(update)

- 앞 단계의 예측 값과 외부 계측기로 얻은 실제 측정 값 간의 오차를 이용하여 더욱 정확한 상태의 상태 값을 추정하는 보정!



# 위치 추정(localization)

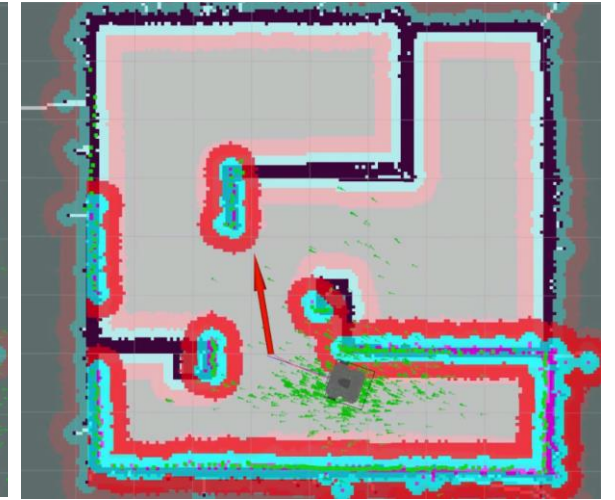
Kalman filter, Particle filter, Graph, Bundle adjustment

- 파티클 필터(Particle Filter)
- 파티클 필터는 시행 착오(try-and-error)법을 기반으로 한 시뮬레이션을 통하여 예측하는 기술으로 대상 시스템에 확률 분포로 임의로 생성된 추정값을 파티클(입자) 형태로 나타낸다.

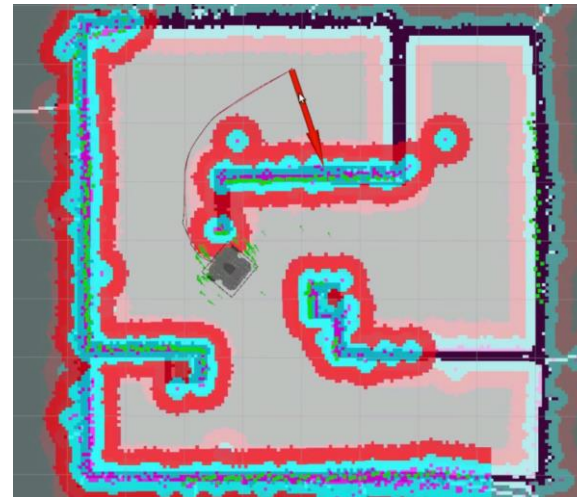
- 1) 초기화(initialization)
- 2) 예측(prediction)
- 3) 보정(update)
- 4) 위치 추정(pose estimation)
- 5) 재추출(Resampling)



(t1)



(t2)



(t3)



(t4)



네비게이션

# 내비게이션: Navigation + TurtleBot3

---

- <http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/navigation/>
- 마스터 실행 (Remote PC)

```
$ roscore
```

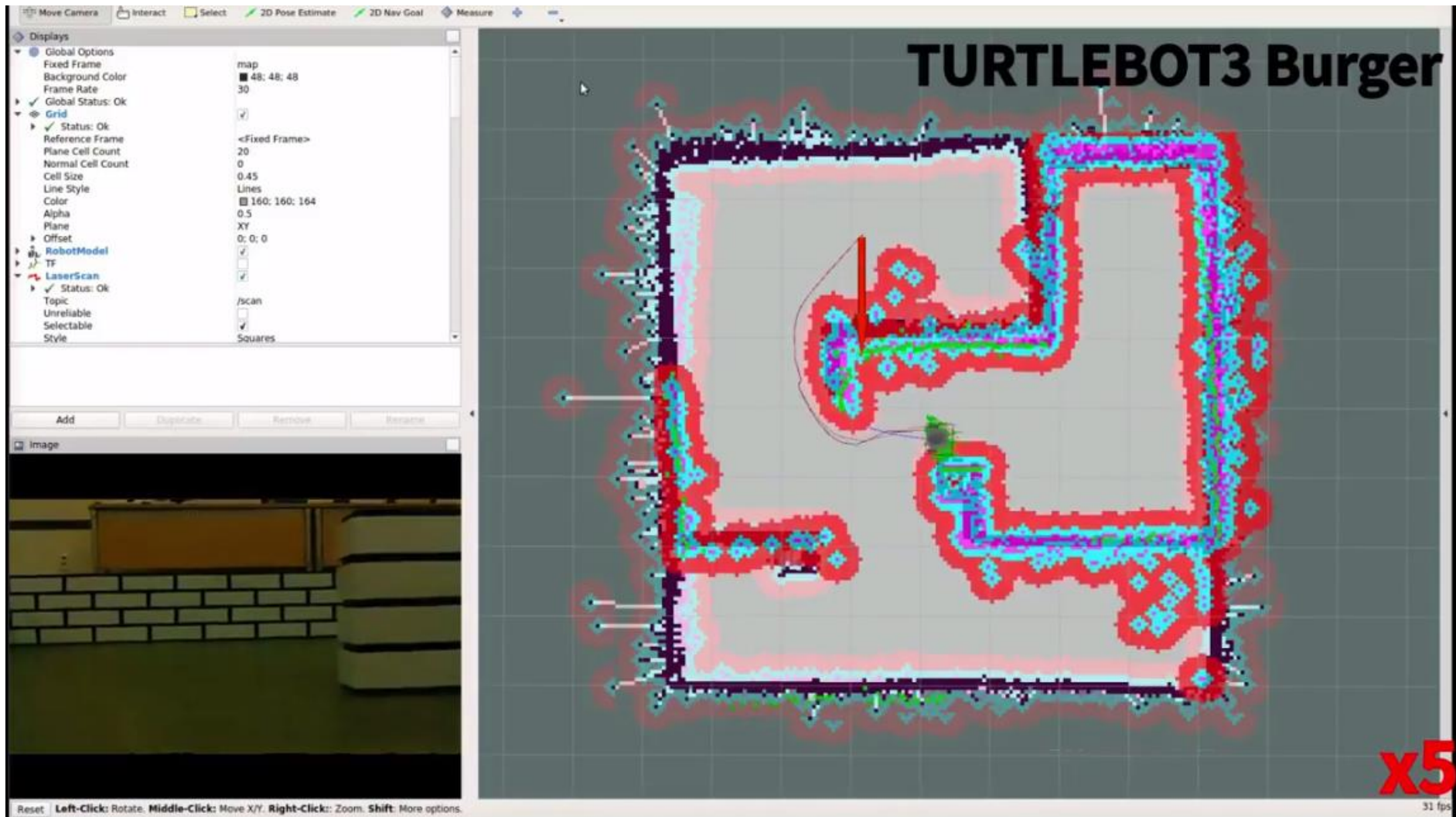
- 터틀봇 및 센서 구동 (SBC)

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=burger (또는 waffle, waffle_pi)  
$ roslaunch turtlebot3_bringup turtlebot3_robot.launch
```

- RViz, 터틀봇 원격 조종, 내비게이션 (Remote PC)

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=burger (또는 waffle, waffle_pi)  
$ roslaunch turtlebot3_navigation turtlebot3_navigation.launch map_file:=$HOME/map.yaml  
$ rosrn rviz rviz -d `rospack find turtlebot3_navigation`/rviz/turtlebot3_nav.rviz
```

# 내비게이션



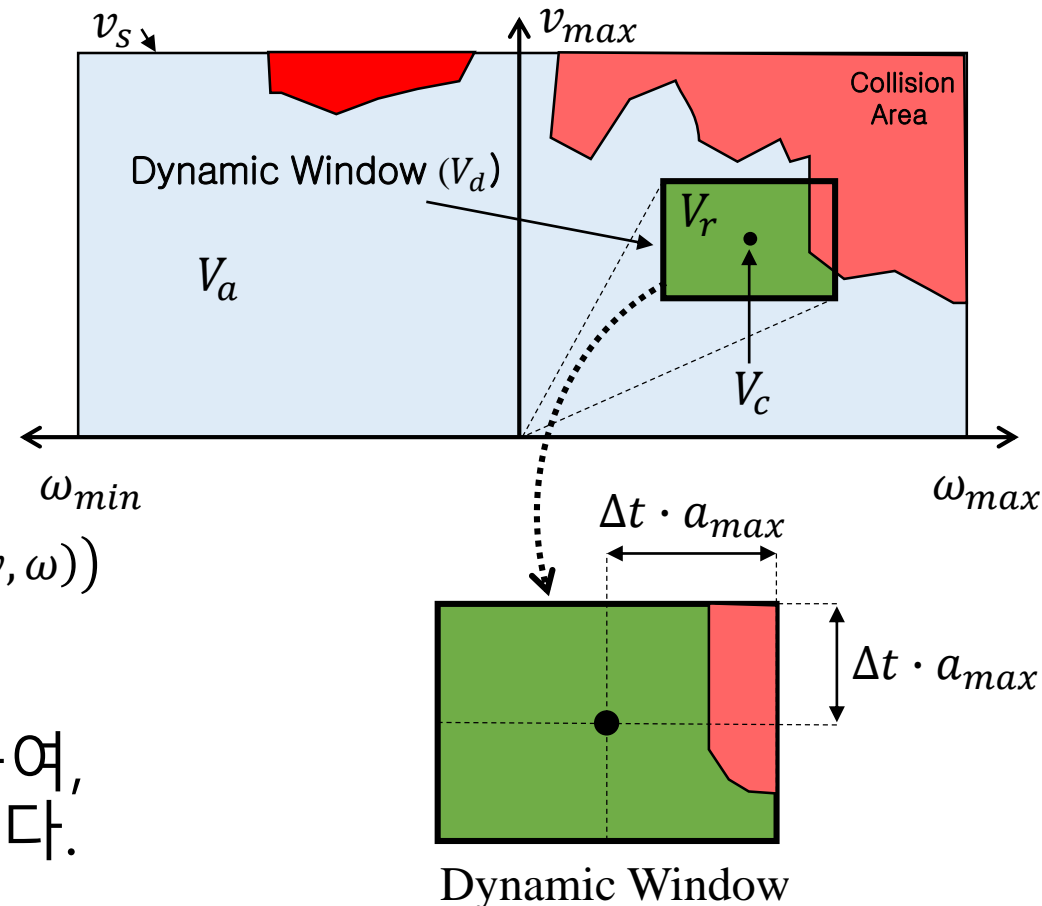
<https://youtu.be/VYIMywwYALU>

# 내비게이션

- **Dynamic Window Approach** (local plan에서 주로 사용)
- 로봇의 속도 탐색 영역(velocity search space)에서 로봇과 충돌 가능한 장애물을 회피하면서 목표점까지 빠르게 다다를 수 있는 속도를 선택하는 방법

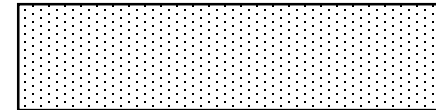
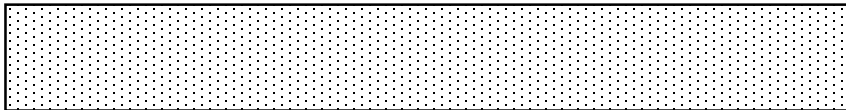
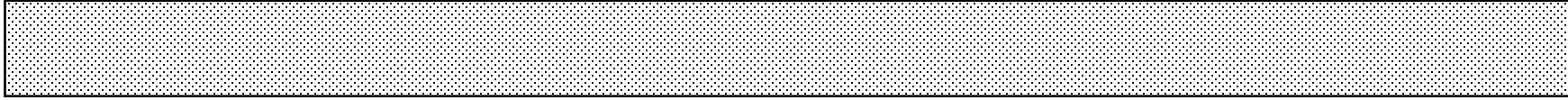
- $v$  (병진속도),  $\omega$  (회전속도)
- $V_s$ : 가능 속도 영역
- $V_a$ : 허용 속도 영역
- $V_r$ : 다이내믹 윈도우 안의 속도 영역
- $G(v, \omega) = \sigma(\alpha \cdot \text{heading}(v, \omega) + \beta \cdot \text{dist}(v, \omega) + \gamma \cdot \text{velocity}(v, \omega))$

- 목적함수  $G$ 는 로봇의 방향, 속도, 충돌을 고려하여, 목적함수가 최대가 되는 속도  $v, \omega$  를 구하게 된다.

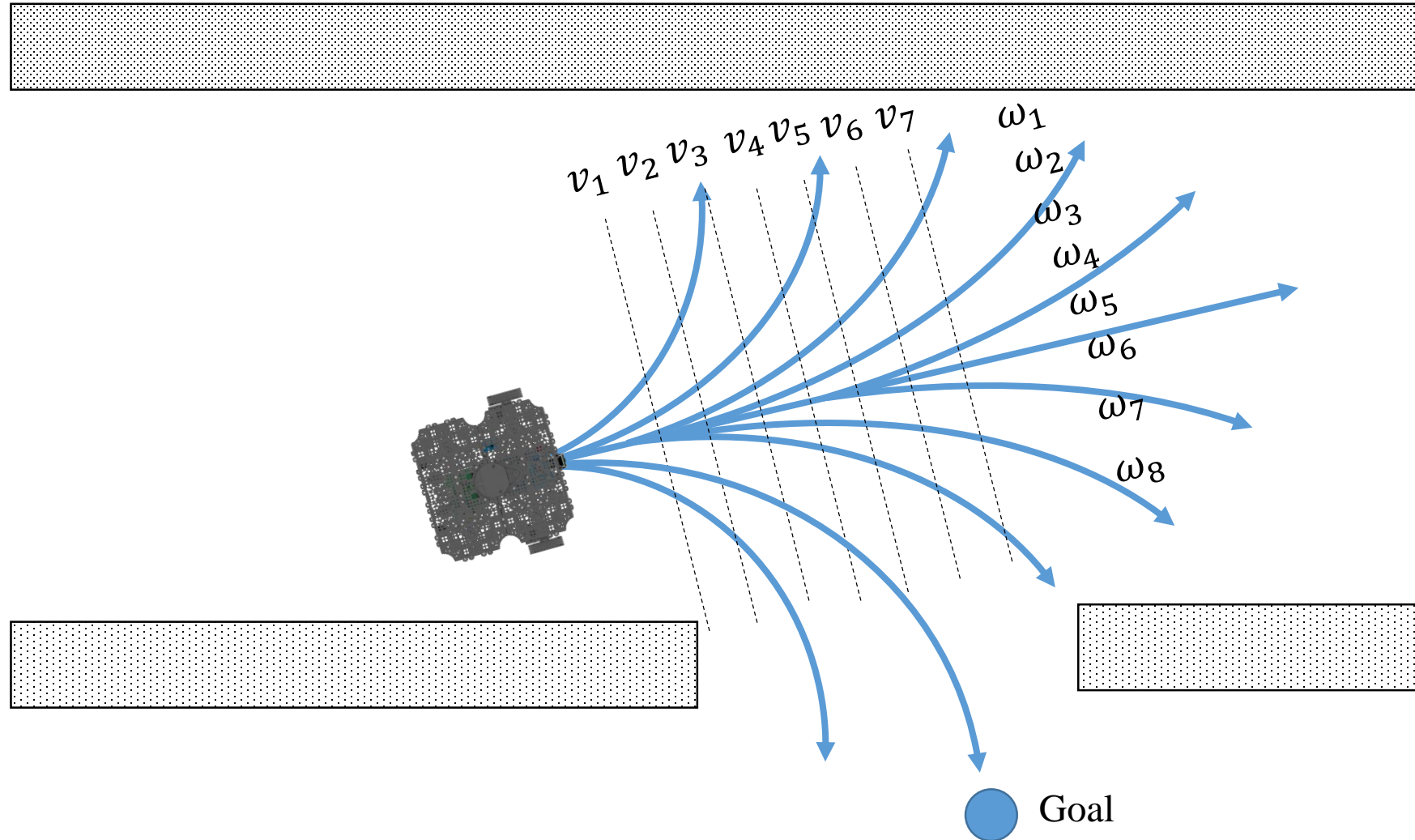


# Dynamic Window Approach (DWA)

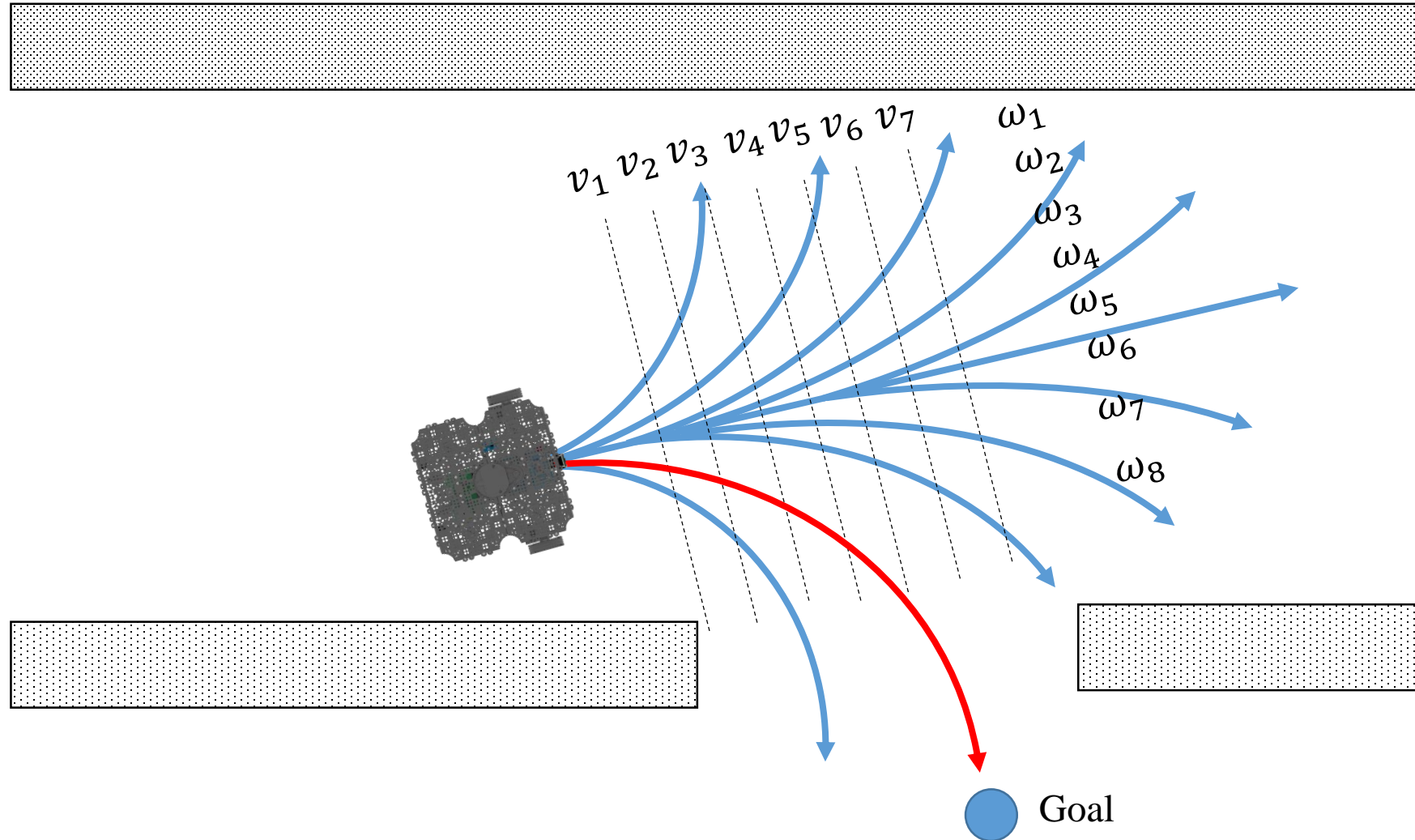
---



# Dynamic Window Approach (DWA)



# Dynamic Window Approach (DWA)



# 마지막으로... 다시 한번!



SLAM, Navigation 은 기본 기능이고  
상위에 서비스 또는 모바일 로봇 자체를 하고 싶다고요?  
그렇다면 SLAM, Navigation 은 그대로 쓰시고  
좀 더 시간을 원하시는 부분에 투자하세요.  
세상에 없는 유니크한 당신만의 로봇을 기대해 봅니다.

SLAM, Navigation 을 더 공부하고 싶다고요?  
모든 소프트웨어는 오픈 소스 입니다.  
마음껏 보고, 이해해 보고, 기능도 추가하며  
공부해 보세요. 이보다 더 좋은 교과서는 없습니다.



실습 시간!

“SLAM / 내비게이션”

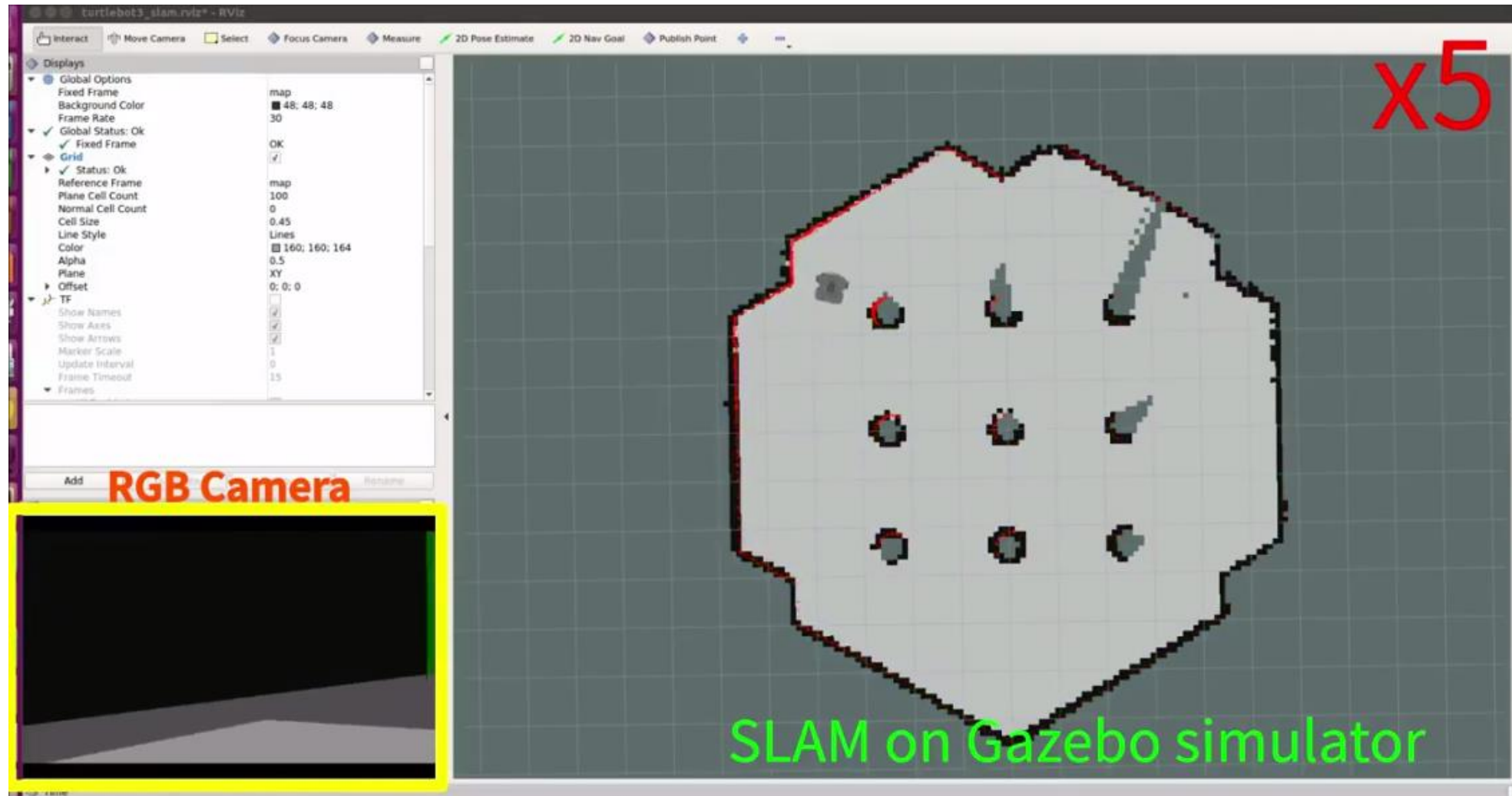
# TurtleBot3 시뮬레이션 개발환경 준비

- 공식 터틀봇3 위키 참조
  - <http://turtlebot3.robotis.com>
- 기본 설치 패키지 (3차원 시뮬레이터 Gazebo를 이용하기 위한 준비)

```
$ sudo apt-get install ros-kinetic-joy ros-kinetic-teleop-twist-joy ros-kinetic-teleop-twist-keyboard ros-kinetic-laser-proc ros-kinetic-rgbd-launch ros-kinetic-depthimage-to-laserscan ros-kinetic-rosserial-arduino ros-kinetic-rosserial-python ros-kinetic-rosserial-server ros-kinetic-rosserial-client ros-kinetic-rosserial-msgs ros-kinetic-amcl ros-kinetic-map-server ros-kinetic-move-base ros-kinetic-urdf ros-kinetic-xacro ros-kinetic-compressed-image-transport ros-kinetic-rqt-image-view ros-kinetic-gmapping ros-kinetic-navigation
```

```
$ cd ~/catkin_ws/src/  
$ git clone https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3.git  
$ git clone https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3_msgs.git  
$ git clone https://github.com/ROBOTIS-GIT/turtlebot3_simulations.git  
$ cd ~/catkin_ws && catkin_make
```

# TurtleBot3 in Gazebo



[https://youtu.be/xXM5r\\_SVkWM](https://youtu.be/xXM5r_SVkWM)

# 가상 로봇 실행 with Gazebo

---

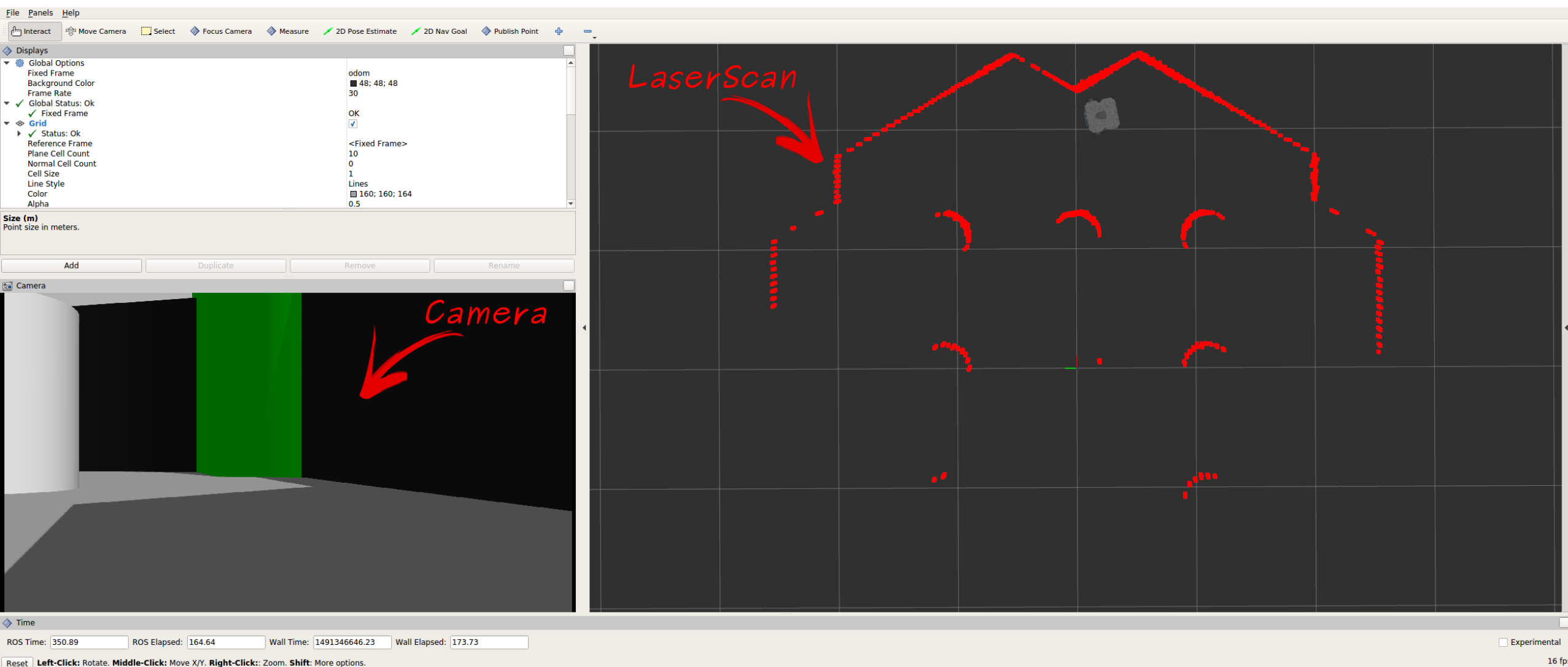
- 3차원 시뮬레이터 Gazebo 상에서 가상의 로봇을 구동
  - Turtlebot3\_teleop\_key 노드를 통해 로봇 이동 가능
  - Rviz를 통해 Gazebo 상의 로봇에 장착된 센서 값 확인 가능
    - 2D Laser Range Sensor, Camera, Depth Camera, IMU 등

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=waffle_pi  
$ roslaunch turtlebot3_gazebo turtlebot3_world.launch
```

```
$ roslaunch turtlebot3_teleop turtlebot3_teleop_key.launch
```

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=waffle_pi  
$ roslaunch turtlebot3_gazebo turtlebot3_gazebo_rviz.launch
```

# 가상 로봇 실행 with Gazebo



# 가상 SLAM with Gazebo

---

- Gazebo 실행

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=waffle_pi  
$ roslaunch turtlebot3_gazebo turtlebot3_world.launch
```

- SLAM 실행

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=waffle_pi  
$ roslaunch turtlebot3_slam turtlebot3_slam.launch
```

- RViz 실행

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=waffle_pi  
$ rosrun rviz rviz -d `rospack find turtlebot3_slam`/rviz/turtlebot3_slam.rviz
```

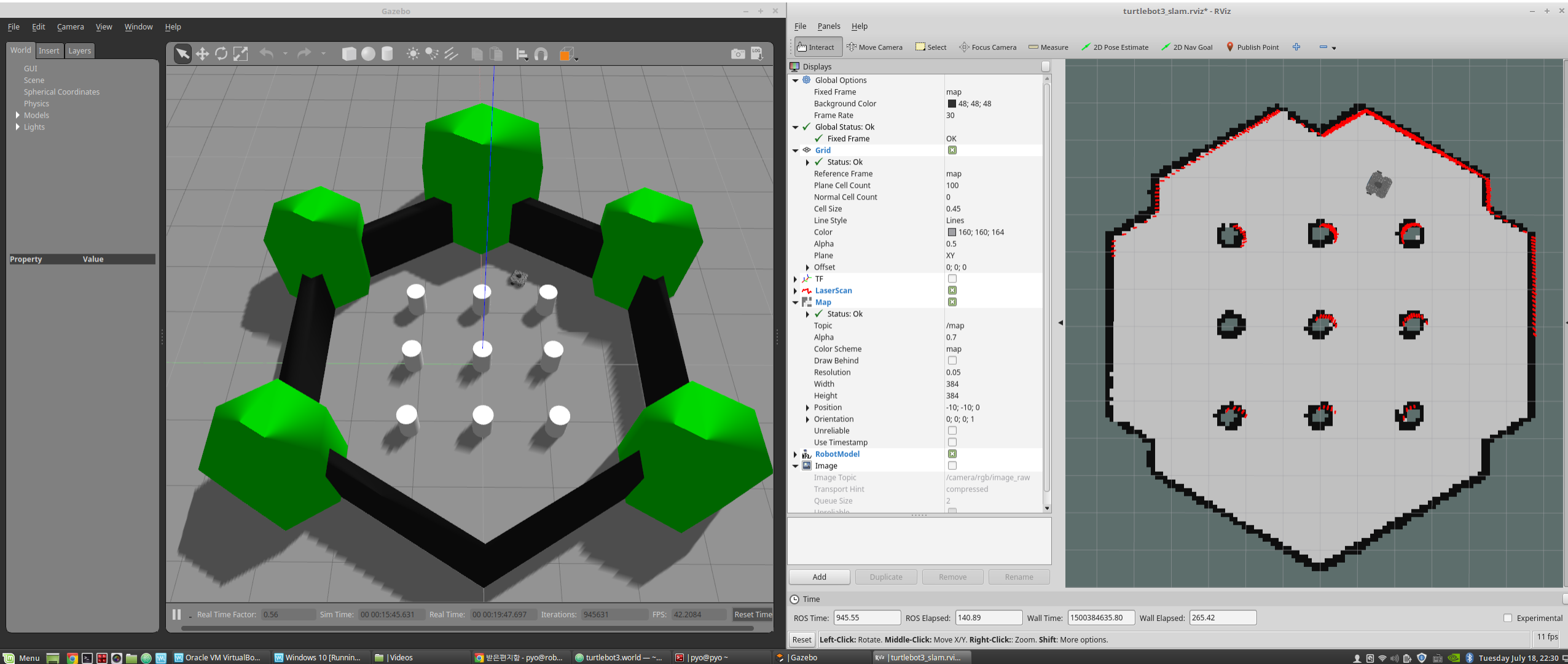
- 터틀봇 원격 조종

```
$ roslaunch turtlebot3_teleop turtlebot3_teleop_key.launch
```

- 지도 출력

```
$ rosrun map_server map_saver -f ~/map
```

# 가상 SLAM with Gazebo



# 가상 내비게이션 with Gazebo

---

- Gazebo 실행

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=waffle_pi  
$ roslaunch turtlebot3_gazebo turtlebot3_world.launch
```

- 내비게이션 실행

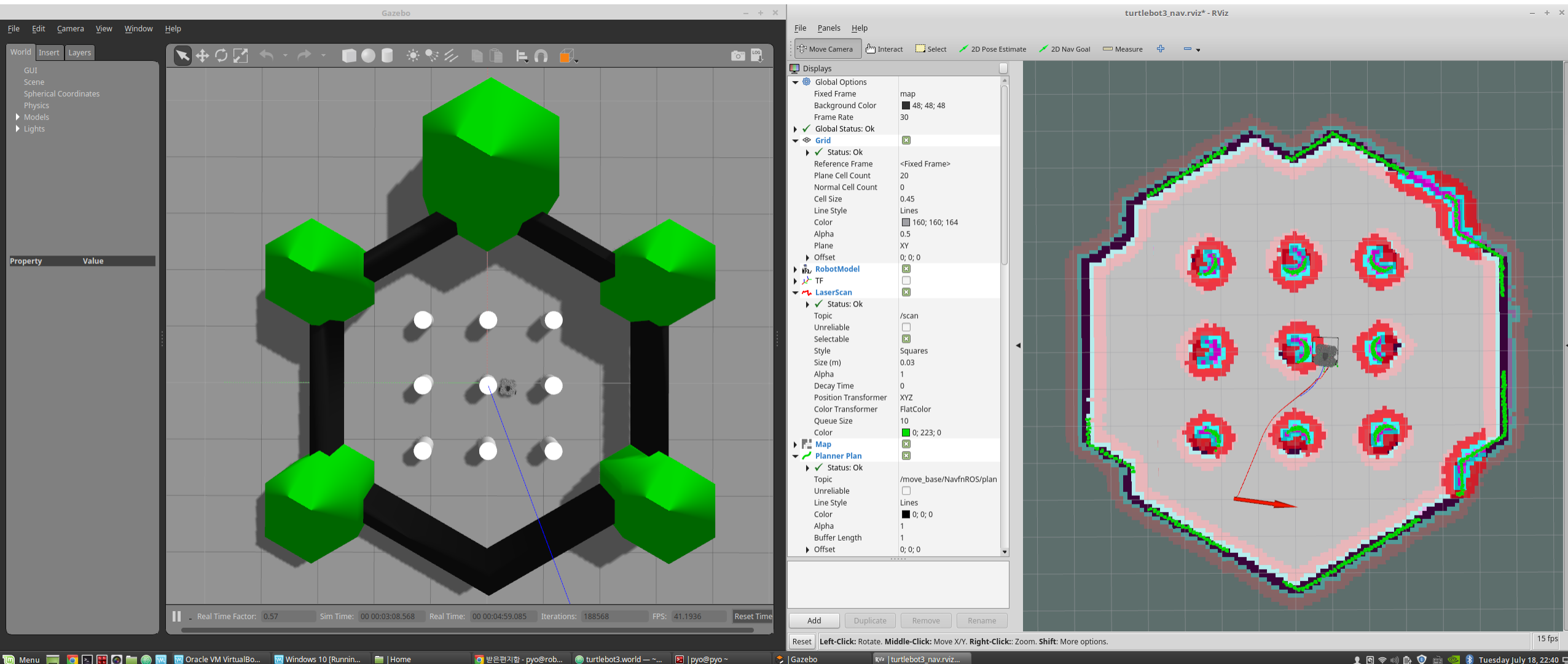
```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=waffle_pi  
$ roslaunch turtlebot3_navigation turtlebot3_navigation.launch map_file:=$HOME/map.yaml
```

- RViz 실행 및 목적지 설정

```
$ export TURTLEBOT3_MODEL=waffle_pi  
$ roslaunch rviz rviz -d `rospack find turtlebot3_navigation`/rviz/turtlebot3_nav.rviz
```



# 가상 내비게이션 with Gazebo



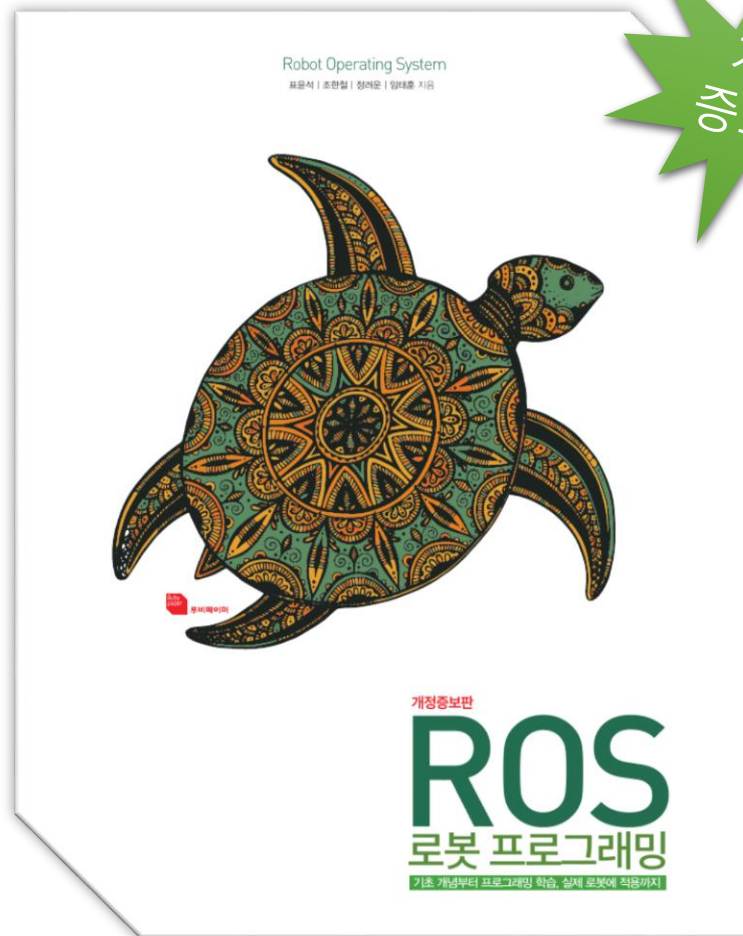
---

# 질문 대환영!

---

\* 온라인 상의 질문이라면  
오로카 및 로열로즈를 이용해주세요!

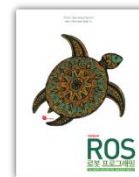
여기서! 광고 하나 나가요~



개정  
증보판

✓ 한국어판 구매 링크

✓ 4개 언어로 출판!



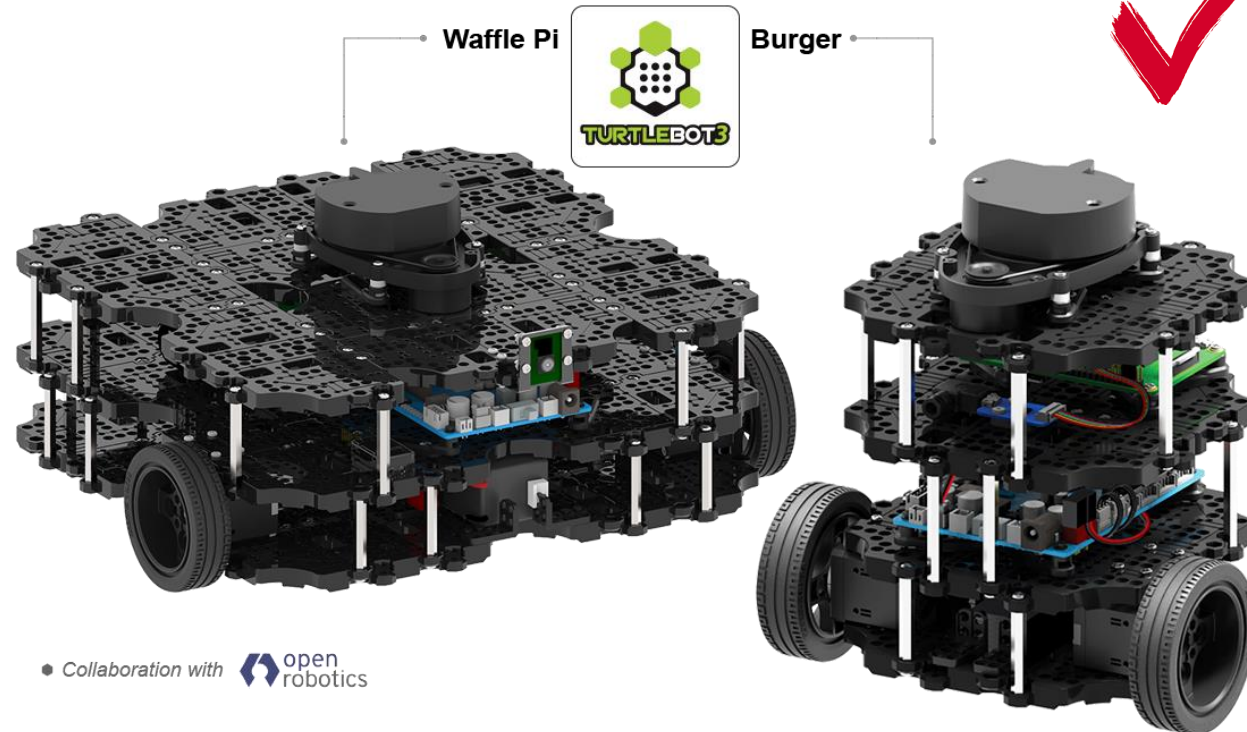
국내 유일! 최초! ROS 참고서!  
ROS 공식 플랫폼 **TurtleBot3** 개발팀이  
직접 저술한 바이블급 ROS 책

여기서! 광고 둘 나가요~

# TURTLEBOT3

인공지능(AI) 연구의 시작,  
ROS 교육용 공식 로봇 플랫폼

터틀봇3는 ROS기반의 저가형 모바일 로봇으로  
교육, 연구, 제품개발, 취미 등 다양한 분야에서  
활용할 수 있습니다.



✓ [Direct Link](#)

여기서! 광고 셋 나가요~



- 오로카
- [www.oroqa.org](http://www.oroqa.org)
- 오픈 로보틱스 지향
- 풀뿌리 로봇공학의 저변 활성화
- 공개 강좌, 세미나, 프로젝트 진행

- 로봇공학을 위한 열린 모임 (KOS-ROBOT)
- [www.facebook.com/groups/KoreanRobotics](https://www.facebook.com/groups/KoreanRobotics)
- 로봇공학 통합 커뮤니티 지향
- 일반인과 전문가가 어울러지는 한마당
- 로봇공학 정보 공유
- 연구자 간의 협력

- RobotSource
- [www.robotsource.org](http://www.robotsource.org)
- 글로벌 로보틱스 커뮤니티 지향
- 로봇공학 정보 공유
- 자신의 로봇 프로젝트 공유
- DIY 로봇 프로젝트 진행

혼자 하기엔 답답하시다고요?

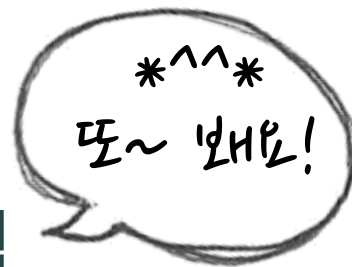
커뮤니티에서 함께 해요~

# 끝.

---

표윤석

Yoonseok Pyo  
pyo@robotis.com  
www.robotpilot.net



[www.facebook.com/yoonseok.pyo](https://www.facebook.com/yoonseok.pyo)