

LiDAR 및 UWB 기반 자율주행 모드 자동 전환 기법

김성훈*, 옥승호**

LiDAR and UWB-based Autonomous Driving Mode Switching Techniques

Sunghoon Kim*, Seung-Ho Ok**

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성 (Grand ICT연구센터) 사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2024-2020-0-01791, 50%)

“본 논문은 부산광역시 및 (재)부산테크노파크의 BB21plus 사업으로 지원된 연구임” (50%)

요 약

자율주행 로봇은 주로 LiDAR 기반 SLAM 알고리즘을 이용하여 맵을 생성하며, 생성된 맵과 센서값의 매칭을 통해 위치 추정 및 경로를 생성하여 자율주행한다. 자율주행에 주로 사용되는 2D LiDAR의 경우 전방 충돌 물체 검출은 가능하지만, 노면 파손 및 침식 등 위험 구간 감지에 사용하기는 어려운 단점이 있다. UWB 센서는 광대역 및 낮은 전력과 다른 무선 기술에 간섭이 없고 높은 위치 추정 정확도를 제공하여 실내 이동 로봇의 위치 추정 기술에 사용된다. 본 논문에서는 LiDAR 기반 자율주행과 UWB 기반 특정 경로 주행을 통합한 자율주행 모드 자동 전환 기법을 제안한다. 실험 결과, 로봇이 자율주행 모드 전환 구역 내에 진입하였을 때 LiDAR 또는 UWB 기반 자율주행 전환 동작이 실행되고, UWB 기반 자율주행에서는 지면 상에 위험 구간을 회피하여 사전에 설정된 경로로 주행하는 것을 확인하였다.

Abstract

Autonomous robots mainly use LiDAR-based SLAM algorithms to generate maps, and by matching the generated maps with sensor data, the robots can estimate their location and generate routes for autonomous driving. 2D LiDAR, which is mainly used for autonomous driving, can detect collision objects in front of it, but it is difficult to detect dangerous areas such as road damage and erosion. UWB sensors are used in positioning technology for indoor mobile robots due to their wide bandwidth, low power, lack of interference with other wireless technologies, and high position estimation accuracy. In this paper, we propose an automatic autonomous driving mode switching technique that integrates LiDAR-based autonomous driving and UWB-based specific path driving. As a result of the experiment, it was confirmed that when the robot entered the autonomous driving mode conversion area, LiDAR or UWB-based autonomous driving switching operation was executed, and in UWB-based autonomous driving, it drove on a preset path while avoiding dangerous sections on the ground.

Keywords

ROS, autonomous driving robot, UWB, LiDAR, self-driving switching

* 동의대학교 로봇-자동화공학전공 학사과정

- ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6800-0940>

** 동의대학교 로봇-자동화공학전공 부교수(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9036-0872>

• Received: Nov. 21, 2023, Revised: Jan. 01, 2024, Accepted: Jan. 04, 2023

• Corresponding Author: Seung-Ho Ok

Dept. of Robot Automation Engineering, Dong-eui University, Korea

Tel.: +82-51-890-2265, Email: osh@deu.ac.kr

1. 서 론

자율주행 로봇의 위치 추정을 위해 LiDAR(Light Detection and Ranging) 센서가 주로 사용되며 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 알고리즘을 통해 자율주행을 수행한다[1]. LiDAR 기반 자율주행의 경우 SLAM 알고리즘을 이용하여 맵을 생성한 뒤 센서 값과 생성된 맵 정보의 매칭을 통해 로봇의 위치 추정 및 자율주행을 수행한다[2]. 일반적으로 2D LiDAR 기반 자율주행 로봇의 경우 SLAM을 사용하여 맵을 생성 후 Navigation을 통해 전방 충돌 가능성이 있는 물체를 검출할 수 있지만, 노면 파손 및 침식 등 지면 상에 위험 구간을 검출하기 어려운 단점이 있다. 따라서 2D LiDAR SLAM을 통해 제작한 2D 맵을 사용하여 지면상에 위험 구간을 주행 할 경우 키보드 또는 조이스틱 등을 사용하여 일부 구간을 수동 조작해야 하는 단점이 있다[3]. 최근 RGB-D 카메라, 3D LiDAR 센서를 사용하여 로봇의 자율주행 성능을 향상하기 위한 연구가 진행되고 있지만 3D 맵을 생성하기 위해 고성능 라이다 및 많은 연산이 필요한 단점이 있다[4].

UWB는 Wi-Fi, Bluetooth 등 기존 무선 통신보다 정밀한 방향성, 위치, 거리 측정 등의 공간 인식과 우수한 다중 경로 해상도를 제공한다[5]. 그리고 광

대역, 고속 데이터 전송이 가능하고 낮은 전력과 다른 무선 기술에 간섭이 없어 높은 위치 추정 정확도를 제공하는 특징을 활용하여 실내 이동 로봇의 위치 추정 기술에 사용되고 있다[6]. 본 논문에서는 기존 연구에서 제시한 노면 침식 및 파손 위험구역을 회피 주행 가능한 UWB 기반 특정 경로 주행 기법[7]과 LiDAR 기반 전방 충돌 검출 자율주행 기법을 통합한 로봇의 자율주행 모드 자동 전환 기법을 제시한다.

그림 1은 LiDAR 및 UWB 기반 로봇 주행 모드 자동 전환 기법 활용 예시이다. 그림 1(a)는 일반적인 LiDAR 기반 자율주행 구역을 나타낸다. 그림 1(b)는 자율주행 모드 자동 전환 구역을 나타내며, 지정한 구역의 범위 좌표 내에 로봇이 도달하면 자동으로 자율주행 모드 전환이 실행된다. 그림 1(c)는 위험 구역을 회피 가능하도록 설정된 특정 경로를 주행하는 UWB 좌표 기반 주행 구역을 나타낸다. 본 논문에서는 UWB를 사용하여 로봇의 주행 경로 좌표 데이터를 수집하였으며, UWB 좌표를 기반으로 로봇이 사전에 설정된 특정 영역에 진입할 때 자율주행 모드 자동 전환 기법이 실행된다. 그리고 주행 환경에 따라 LiDAR 기반 자율주행 또는 UWB 기반 특정 경로 주행이 가능하도록 구현하였다.

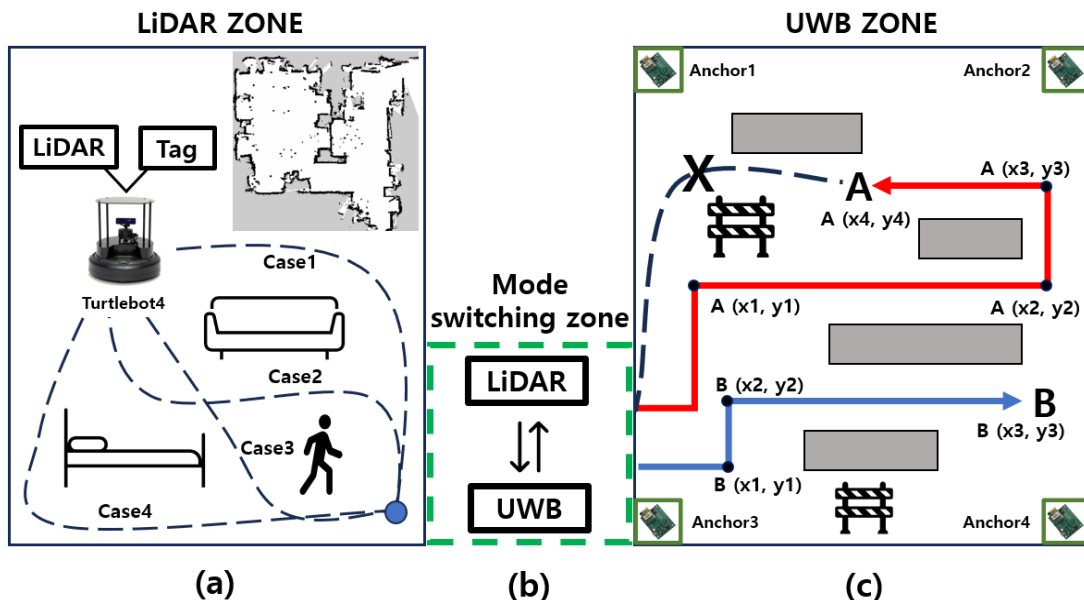


그림 1. LiDAR 및 UWB 기반 로봇 자율주행 모드 자동 전환 기법 예시
 Fig. 1. Example of LiDAR and UWB-based robot autonomous mode switching techniques

II. 로봇 자율주행 모드 자동 전환 기법

2.1 자율주행 및 UWB 위치 추정 환경

UWB는 3.1~10.6 GHz의 넓은 주파수 대역을 사용하여 다른 주파수의 간섭을 피해 정밀한 위치 측정이 가능하다. UWB는 고정된 위치에 설치된 Anchor들과 로봇에 설치된 Tag 사이의 거리를 ToF(Time of Flight) 및 삼각측량법을 통해 위치를 측정한다[8]. 그림 2는 본 논문에서 제안하는 LiDAR 및 UWB 기반 자율주행 모드 자동 전환 기법을 실험하기 위해 구축한 실제 환경으로써 UWB 기반 특정 경로 주행 구역에는 A1 ~ A6까지 총 6개의 Anchor가 설치되어 있다. 그리고 LiDAR 및 UWB 주행 구역 사이에 위치한 모드 전환 구간(Mode switching zone)은 자율주행 모드 자동 전환 구역을 나타낸다. LiDAR 구역에서 점선은 LiDAR 기반으로 로봇이 자율주행 가능한 경로 예시를 나타내며, UWB 구역에서 실선은 UWB 기반 자율주행 시 사전에 설정된 좌표를 따라 주행하는 경로를 나타낸다.

2.2 UWB 기반 특정 경로 주행 기법

자율주행을 위한 모바일 로봇은 ROS(Robot Operating System) 기반 TurtleBot 4를 사용하였다. 로봇의 좌표 데이터 수집을 위해 로봇에 UWB Tag를 설치하였으며, 좌표 데이터 수집 및 출력을 위해 Tag를 USB 통신으로 로봇에 연결하였다. 로봇에서 Tag 좌표 데이터는 소켓 통신을 통해 출력하였다. 그리고 로봇이 UWB 기반 주행을 위한 경로를 사전에 저장하기 위해 UWB가 설치된 환경 내에서 사용자 또는 로봇이 Tag를 소지하고 노면 파손 및 침식 구간을 피해 이동하며 주행 경로의 좌표 데이터를 수집하였다. Tag 좌표 데이터는 시작점부터 도착점까지의 모든 Tag의 x, y 좌표들이 Serial 통신을 통해 200ms 시간 간격으로 자동 저장된다. 이후 UWB 기반 특정 경로 주행을 위해 저장된 파일의 x, y 좌표 데이터를 활용하여 미리 저장된 특정 경로 중 주행할 경로를 선택하면 해당 경로의 좌표를 사용하여 로봇이 UWB 기반 특정 경로로 주행한다.

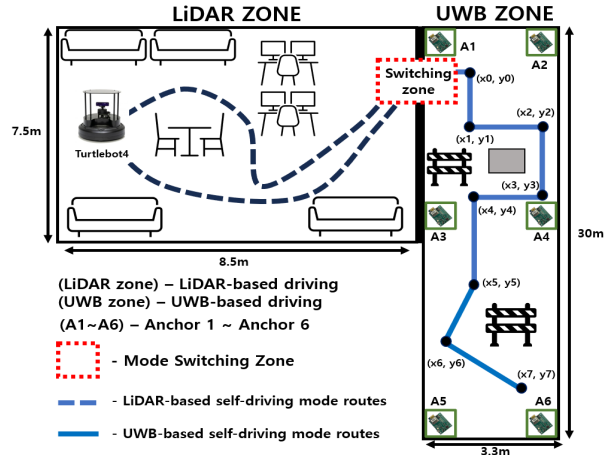


그림 2. LiDAR 및 UWB 기반 자율주행 모드 자동 전환 기법 실험 환경

Fig. 2. Experimental environment for LiDAR and UWB-based autonomous mode switching technique

2.3 자율주행 모드 자동 전환 기법

그림 3은 본 논문에서 제안하는 자율주행 모드 자동 전환 기법 알고리즘 흐름도이다. 일반적인 LiDAR 기반 자율주행 로봇의 경우 SLAM을 통해 맵을 생성하고 Navigation을 수행할 수 있지만 본 연구에서는 로봇이 사전에 설정된 자율주행 모드 자동 전환 구역 내에 진입 시 LiDAR 기반 SLAM 또는 Navigation 주행과 UWB 기반 특정 경로 주행 기법을 전환할 수 있는 알고리즘을 구현하였다. 로봇이 자율주행 모드 자동 전환 구역으로 설정된 좌표 범위 내에 들어오면 그림 3과 같이 자율주행 모드 전환을 수행하며 ① UWB 기반 자율주행, ② LiDAR 기반 SLAM 및 ③ LiDAR 기반 Navigation 세 가지 모드 중 하나를 선택 후 실행한다. ①의 경우 UWB 기반 특정 경로 자율주행을 위해 저장된 노면 침식 및 파손 구간 우회 경로를 주행한다. ②는 LiDAR 기반 SLAM을 이용한 새로운 Map을 생성하고 ③은 생성된 Map 기반으로 Navigation 자율주행을 한다. 그리고 로봇이 자율주행 모드 전환 구역에 재진입하면 자율주행 모드 자동 전환 알고리즘이 재실행 된다. Anchor와 Tag의 통신을 통해 200ms 시간 간격으로 로봇의 Tag x, y 좌표를 수집하며 식 (1) 및 (2)를 활용하여 로봇의 Tag와 Anchor와의 직선거리 계산을 수행한다. 식 (1)의 tof (time-of-flight)에서 T_{pool} 은 Tag에서 전파를 송신하고

응답받을 때까지의 시간 차이이며, T_{reply} 은 Anchor가 Tag에서 송신한 신호를 수신 받고 응답할 때까지의 시간 차이이다. 이후 직선거리를 활용한 3차원 상의 삼각측량법 식 (3), (4), (5)를 활용하여 Tag의 x, y, z 좌표를 계산한다. d_1, d_2, d_3 는 3개의 각 노드 사이 거리를 의미하며 각 노드의 위치는 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) 이다.

$$tof = \frac{T_{poll} - T_{reply}}{2} \quad (1)$$

$$Distance = 2.997 \times 10^8 \times tof \quad (2)$$

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \quad (3)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2 \quad (4)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = d_3^2 \quad (5)$$

III. 실험 환경 및 결과

3.1 센서 및 좌표 데이터 수집

본 논문에서는 LiDAR 기반 자율주행과 UWB 기반 특정 경로 주행을 위한 실험 환경을 구축하였다.

UWB 위치 추정 환경에서 얻은 로봇의 좌표 데이터 수집을 통해 자율주행 모드 자동 전환을 수행하는 스위칭 구역을 설정하였다. 실험에 사용된 LiDAR는 2D RPLIDAR AIM8 센서이며, UWB는 DWM1001-DEV 모듈이다. 표 1은 그림 2의 실험 환경에서 로봇이 주행하며 수집한 로봇의 Tag 좌표 값의 일부이다. 로봇의 Tag 좌표 값이 사전에 설정된 자율주행 모드 자동 전환 구역의 x, y 좌표 범위 내에 진입하였을 시 자율주행 모드 전환 알고리즘이 동작한다.

3.2 Odometry 및 UWB Tag 좌표 값 비교

본 논문에서는 로봇이 LiDAR 기반 자율주행 후 UWB 기반 특정 경로로 주행하는 실험을 수행하였으며 로봇의 Odometry 값과 UWB Tag의 좌표 값을 비교하였다. 그림 4는 LiDAR Zone에서 자율주행하며 자율주행 모드 자동 전환 구역에 진입 시 모드 전환 동작을 하는 실험 과정이다. 그림 5는 표 1과 같은 형식으로 출력되는 로봇의 Tag 좌표가 전환 구역의 좌표 범위인 x 좌표 $-2.95 \sim -2.45$ 와 y 좌표 $6.95 \sim 7.45$ 내에 진입하면 자동으로 실행되는 자율주행 모드 선택 터미널이다. 그림 3에서와 같이 주행 구역에 따른 주행 모드 ①, ②, ③ 중 하나의 모드를 입력하면 해당 자율주행 모드로 전환된다.

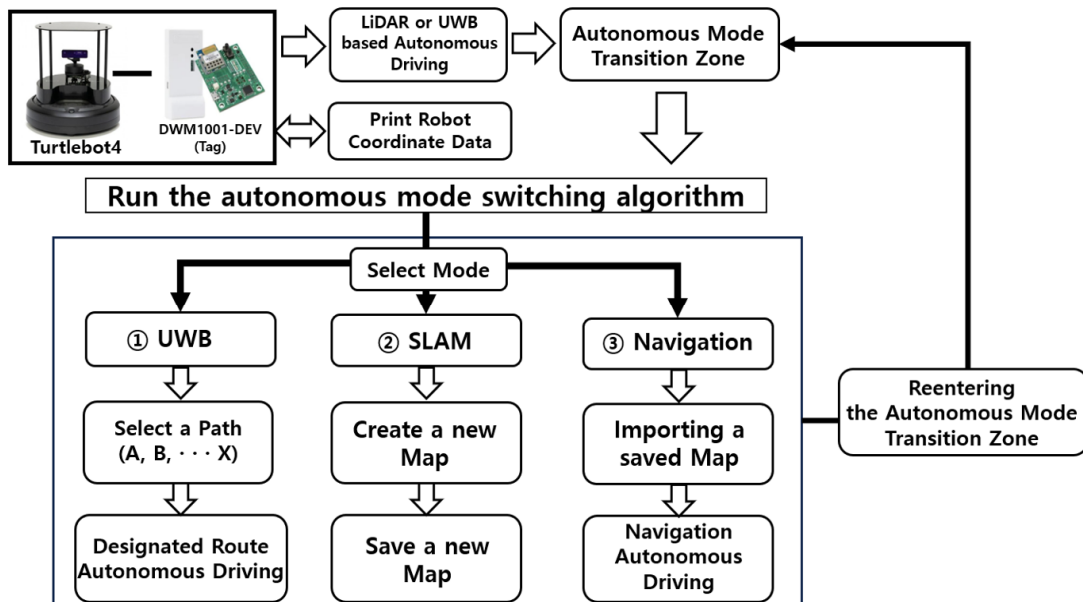


그림 3. 로봇 자율주행 모드 자동 전환 기법 흐름도

Fig. 3. Flowchart of techniques for automatically switching robot autonomous driving modes

표 1. 로봇이 주행하며 수집한 Tag의 좌표 값
Table 1. Coordinate values of tags collected by the robot as it travels

	x-coordinates	y-coordinates
Tag Point 1	0.17	0.03
Tag Point 2	0.36	0.18
Tag Point 3	0.74	0.53
Tag Point 4	1.50	0.98
...		
Tag Point n	2.44	8.42

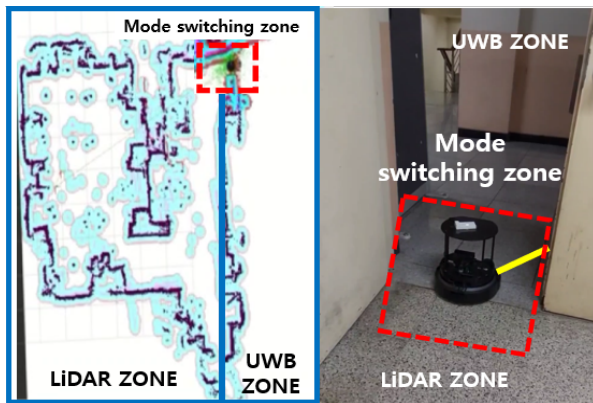


그림 4. 로봇의 자동 전환 구역 진입 시 모드 전환 실험 과정

Fig. 4. Experimenting with mode switching when a robot enters an auto-switching zone

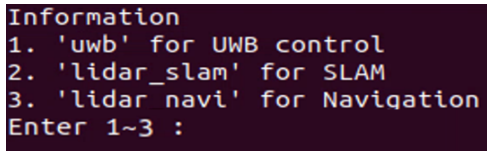


그림 5. 자율주행 모드 선택 터미널

Fig. 5. Mode selection terminal of the autonomous driving mode

그림 6은 그림 3의 전환 기법 모드 중 UWB 특정 경로 주행 모드를 선택하여 2D LiDAR로 검출하지 못하는 위험 경로를 회피하여 UWB 기반 특정 경로를 따라 주행하는 과정이다. UWB 주행 알고리즘을 통해 특정 경로 좌표를 읽어 Odometry와 경로 상 주요 포인트 좌표가 일치할 때까지 주행하며 200 ms 간격으로 수집한 46개의 경로 좌표 데이터 중 일정 좌표를 추출하여 해당 좌표에 도착했을 때 Odometry와 UWB Tag 좌표를 비교하였다.

표 2는 그림 6에서 로봇이 사전에 설정된 46개의

좌표를 따라 주행할 때 주행 방향이 변경되는 특정 지점인 Check Point 1~4에서의 로봇 Odometry 및 현재 로봇의 위치를 나타내는 UWB Tag 좌표 값의 오차를 나타낸다. 음수에 해당하는 좌표 값은 그림 7과 같이 로봇의 시작점 Odometry 좌표 0, 0를 기준으로 x축은 세로, y 축은 가로로 설정되어 있으며 설정한 UWB 위치 추정 환경 내에서의 시작점보다 아래로 이동하면 음수의 x 값이, 우측으로 이동하면 음수의 y 값이 출력된다. 로봇의 Odometry와 UWB Tag의 값을 비교하였을 때 주행 방향이 변경되는 Check Point 1~4에서 x 좌표는 평균 약 -16.5cm, y 좌표는 평균 약 -7.7cm 값의 오차가 발생하였다. Odometry 값과 Tag의 오차는 로봇의 주행 방향 변경 시 슬립(slip) 현상 때문에 발생한다.

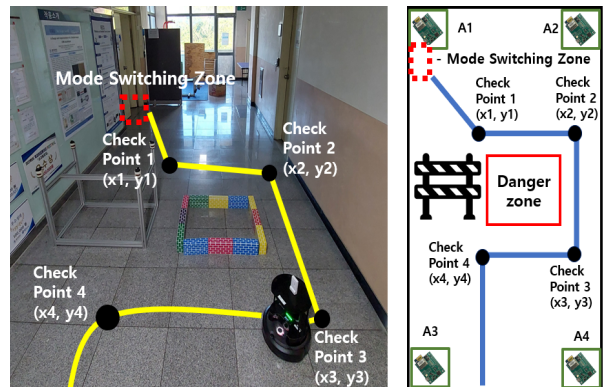


그림 6. 2D LiDAR 검출 불가 장애물 회피 UWB 기반 특정 경로 주행 과정

Fig. 6. 2D LiDAR non-detectable obstacle avoidance UWB-based specific route driving process

표 2. 특정 경로 좌표 도착 시 로봇의 Odometry와 UWB Tag의 좌표 값 및 오차

Table 2. Coordinate values and errors of the robot's odometry and UWB tag when arriving at specific path coordinates

	Arrival coordinates	Odometry	UWB Tag	Diff. (Odom-Tag)
Point 1(m)	-0.98, 8.55	-1.01, 8.56	-0.82, 8.60	-0.19, -0.04
Point 2(m)	-0.77, 10.03	-0.76, 10.03	-0.65, 10.02	-0.11, 0.01
Point 3(m)	1.33, 10.10	1.34, 10.09	1.47, 10.19	-0.13, -0.10
Point 4(m)	1.27, 8.60	1.28, 8.60	1.51, 8.76	-0.23, -0.16

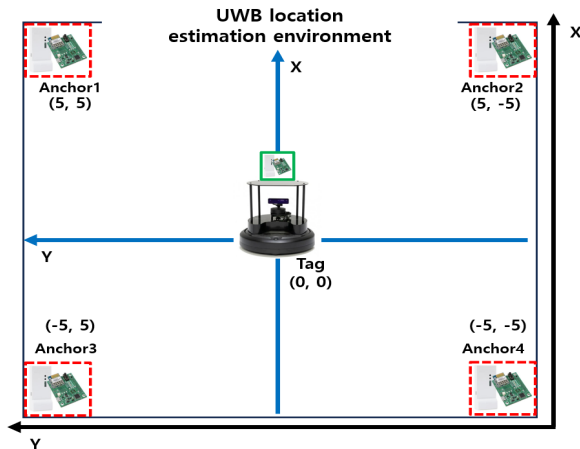


그림 7. 로봇 시작점 Odometry 기준의 UWB 위치추정 환경

Fig. 7. UWB localization environment based on robot starting point odometry

IV. 결론 및 향후 과제

기존 2D LiDAR 기반 자율주행 로봇의 경우 노면 파손 및 특정 위험 구간 주행 시에 키보드 또는 조이스틱 등으로 로봇을 수동 조작해야 하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 UWB를 활용하여 위치 추정 환경 및 자율주행 모드 전환 구간을 설정하였으며, UWB를 통해 노면 침식 및 파손 구간을 우회 주행 가능한 특정 경로 설정 및 로봇 좌표 데이터를 수집하였다. TurtleBot 4를 사용한 실제 주행 환경에서의 실험 결과 로봇이 자율주행 모드 전환 구역에 진입 시 LiDAR 기반 자율주행에서 UWB 기반 특정 경로 주행으로 변경되고, 자율주행 모드 전환 구역 재진입 시 자율주행 모드 전환이 다시 구동되는 것을 확인하였다. UWB 기반 특정 경로 주행 과정 중 로봇의 Odometry와 Tag의 위치 좌표 결과를 통해 x 좌표는 평균 약 -16.5cm, y 좌표는 평균 약 -7.7cm 값의 오차가 발생함을 확인하였다. 그러나 이는 로봇 주행 시 슬립 현상에 의해 발생하는 문제이며, 전환 동작 및 실험 환경에서의 사전에 Tag를 통해 저장한 46개 특정 경로에 따른 UWB 기반 특정 경로 주행이 정상 동작함을 확인하였다. 향후 본 연구 내용을 바탕으로 로봇의 슬립 현상에 의한 Odometry와 UWB Tag의 오차를 UWB, IMU, LiDAR 등의 센서 데이터 융합을 통해 주행 오차 보정 성능 향상에 관한 연구를 수행할 계획이

다. 그리고 군집 로봇 환경에서 로봇이 위험구역을 회피 주행하며 얻은 좌표를 후속 주행 로봇에 전송할 수 있는 자율주행 시스템을 개발할 예정이다.

References

- [1] S. Lee and D. Park, "Efficient Power Control Using Variable Resolution Algorithm for LiDAR Sensor-based Autonomous Vehicle", 2021 18th International SoC Design Conference (ISOC), Jeju Island, Korea, pp. 341-342, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1109/ISOC53507.2021.9613857>.
- [2] G. Park, S. Jang, and S. Jang, "Design and Analysis of the Integrated Navigation System Based on INS/UWB/LiDAR Considering Tunnel Environment", The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 47, No. 12, pp. 2147-2155, Dec. 2022. <https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.12.2147>.
- [3] S. Kim, S. Nam, and H. Lee, "Directionally-Exploring Random Trees for Efficient Robot Path Planning in Corridor Environments", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 57-68, Apr. 2022. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.4.57>.
- [4] H. Jeong, D. Lee, and J. Kim, "Analysis of Visual Localization Technology Using Visual-SLAM LiDAR Fusion based SLAM", Proc. of the Korea Communications Society Summer Conference, pp. 241-242, Jun. 2022.
- [5] J.-H. Lim, J.-H. Shim, and H. Jung, "IMU/UWB Sensor Fusion Using Moving Average Filter for Indoor Positioning of Mobile Robot", The Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 242-248, Apr. 2020. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2020.20.0019>.
- [6] G. Shin and G. Kim, "Indoor Mobile Robot Localization Using Error-State Extended Kalman Filter in UWB-IMU Sensor Fusion", Proc. of the Domestic Conference of the Society of Control

and Robotics Systems, pp. 147-148, Jun. 2023.

- [7] S. Kim, D. Jang, W. Kim, and S. Ok, "Research on UWB-based Mapless Autonomous Driving Techniques", The Proc. of the 2022 KIIT Summer Conference, Jeju Island, Korea, pp. 540-543, Jun. 2023.
- [8] S.-J. Park, H. Kim, S.-H. Kang, E.-J. Kim, J.-W. Song, and Y.-H. Kim, "Positioning Technique Considering the Trajectory of the UWB Mobile Anchor", Autumn Annual Conference of IEIE, pp. 599-602, Nov. 2022.

저자소개

김 성 훈 (Sunghoon Kim)



2018년 3월 ~ 현재 : 동의대학교
로봇·자동화공학전공 학사과정
관심분야 : 자율주행로봇, UWB

옥 승 호 (Seung-Ho Ok)



2008년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학석사)
2014년 2월 : 경북대학교
전자공학부(공학박사)
2014년 3월 ~ 2017년 8월 :
삼성전자 책임연구원
2017년 9월 ~ 현재 : 동의대학교

로봇·자동화공학전공 부교수

관심분야 : 로봇비전, SoC, VLSI