

IEEE 802.15.4z UWB와 마이컴을 이용한 이동로봇의 자율주행

Autonomous Driving of Mobile Robot Using IEEE802.15.4z UWB and Micom

정동윤 · 김민서 · 김지영 · 강세진 · 장병준

Dong-Yun Jeong · Min-Seo Kim · Jiyoung Kim · Se-Jin Kang · Byung-Jun Jang

요 약

본 논문에서는 UWB 최신 표준인 IEEE 802.15.4z UWB 기술과 마이컴을 이용하여 이동로봇의 자율주행 시스템을 구현한 결과를 제시하였다. 먼저, 최근 대중화된 IEEE 802.15.4z 표준의 HRP UWB 기술에 대해 소개하고, 해당 표준에서 제안한 거리측정 방법에 대해 설명한다. 표준에서 제안한 SS-TWR 방식을 이용하면 고정된 UWB Anchor 3개로부터 UWB Tag가 부착된 이동로봇의 2차원 위치를 임베디드 환경에서 계산할 수 있음을 확인하였다. 계산된 위치정보를 바탕으로 2륜 구동의 이동로봇이 가고자 하는 목표 지점까지 나아갈 수 있도록, Unicycle Model의 Inverse Kinematic을 사용하여 이동로봇의 바퀴를 구동하였다. 이러한 모든 과정은 실시간으로 동작하도록 마이컴으로 구현하였고, 이동로봇이 정해진 궤도를 자율주행할 수 있음을 확인하였다. 이로부터 카메라나 레이다, Lidar 및 관성 센서 없이 UWB와 마이컴만으로 이동로봇의 자율주행이 가능함을 확인하였다.

Abstract

This study entailed the implementation of a mobile robot autonomous driving system comprising a microprocessor with IEEE 802.15.4z UWB technology, which is the latest ultra-wideband (UWB) standard. First, the high-rate pulse (HRP) UWB technology of the recent IEEE 802.15.4z standard, as well as the distance measurement method outlined therein, was examined. This study considered a mobile robot equipped with an attached UWB tag in an embedded environment. Its two-dimensional position was calculated on the basis of data from three fixed UWB anchors by using the single-sided two-way ranging (SS-TWR) method outlined in the standard. On the basis of the calculated location information, the wheels of the mobile robot were driven using the inverse kinematics of the unicycle model such that the two-wheel-drive mobile robot could move to the desired destination. All these processes were implemented using a microcomputer to achieve real-time operate, and the mobile robot successfully realized autonomous driving on a set trajectory. Thus, autonomous driving of a mobile robot was demonstrated using only UWB and a microcomputer, obviating cameras, radar, lidar, and inertial sensors.

Key words: UWB, Mobile Robot, Two Way Ranging, IEEE 802.15.4z, HRP UWB

I. 서 론

최근 다양한 분야에서 이동로봇에 대한 사용이 늘어나고 있다. 이러한 이동로봇은 정해진 경로를 스스로 움직

이는 자율주행 기능이 반드시 필요하다. 예를 들어 식당의 서빙로봇은 주방에서 손님이 앉아있는 테이블까지 주문한 음식을 가져다 줄 때 미리 정해진 경로를 따라 스스로 움직인다. 이러한 이동로봇에 필요한 요구사항은 자신

「이 연구는 2018년도 삼성전자 미래기술육성센터 연구비(SRFC-IT1801-51)의 지원으로 연구되었음.」

국민대학교 전자공학부(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received January 15, 2024 ; Revised January 28, 2024 ; Accepted January 29, 2024. (ID No. 20240115-006)

· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

의 현재 위치를 정확히 파악하고, 정해진 궤도를 일정한 속도로 이동할 수 있도록 이동로봇의 바퀴를 실시간으로 제어할 수 있어야 한다. 따라서 현재 상용화된 대부분의 이동로봇의 자율주행 시스템은 카메라 등을 이용한 측위 기술, 경로 계산을 위한 컴퓨터, 모터제어모듈, 무선통신 모듈 등이 상호 연결된 매우 복잡하고 가격이 비싼 시스템이다^{[1],[2]}.

먼저, 자율주행의 중요한 기능인 현재의 위치를 정확히 파악하는 측위(positioning) 기술을 살펴보면, 현재 대부분의 이동로봇은 실외에서는 GPS(global positioning system) 위성을 이용한다. 하지만 실내에서 동작하는 이동로봇은 GPS를 사용한 위치 정보의 획득이 불가능하므로 라이다(lidar)나 카메라를 이용하여 주변 환경정보로부터 자신의 현재 위치를 파악하는 SLAM(simultaneous localization and mapping) 기반의 측위 기술을 사용한다. 하지만 SLAM 기술은 가격이 비싸고 계산량이 많으므로 성능이 좋은 컴퓨터를 필요로 한다. 따라서 실내 이동로봇의 대중화를 위해서는 GPS를 대체할 수 있는 저가의 무선통신 기반의 측위기술이 필요하다. 무선통신 기반의 다양한 측위기술의 현황을 살펴보면 가상 GPS, Wi-Fi, Bluetooth, RFID 등 다양한 기술이 연구되어 왔으나 최근에는 UWB(ultra-wideband) 기반의 측위 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. UWB 기술은 다른 무선통신 기반의 측위 기술이 갖는 주파수 대역폭보다 넓은 500 MHz의 대역폭을 사용하는 것이 특징이다. 따라서 미터(m) 단위의 해상도를 갖는 Wi-Fi, Bluetooth, RFID 등의 다른 기술에 비해 cm 단위의 고정밀 측위가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 다중 경로 페이딩이나 비가시선 환경에서도 위치를 파악할 수 있는 장점을 갖는다. 또한, 영상처리 기술을 사용할 수 없는 어두운 저조도의 환경에서도 UWB를 이용하면 저가격으로 정확한 위치 측위가 가능하다^{[3]~[5]}.

다음으로 이동로봇은 측정된 위치를 바탕으로 경로를 계산하고, 이에 따라 이동로봇의 바퀴를 구동하는 모터를 실시간으로 제어할 수 있어야 한다. 현재 이동로봇의 모터 제어기술은 모터 제어를 위한 별도의 마이크로컴퓨터(이하 '마이크'으로 표기)를 사용한다. 이러한 바퀴제어 마이크는, 측위정보를 처리하는 메인 컴퓨터와 통신을 통해 바퀴를 제어해야 하므로 그 구성이 복잡하다^[6].

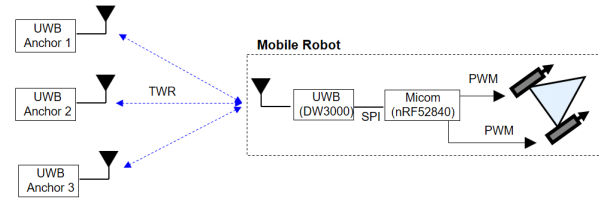


그림 1. UWB 측위와 자율주행 기능을 갖는 이동로봇의 구성도

Fig. 1. Configuration of mobile robot using UWB-based positioning and autonomous driving function.

만약 UWB를 이용하여 cm 수준의 위치를 파악할 수 있고, 경로의 계산 및 바퀴 제어를 하나의 마이크만으로 구현할 수 있다면 이동로봇의 자율주행 기능은 저가로 구현될 수 있을 것이고 보급도 확대될 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 측위기술과 모터제어기술을 모두 하나의 마이크로 처리할 수 있는 저가의 자율주행 시스템의 목표를 하였다. 목표로 한 이동로봇 자율주행 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 위치를 제공하는 UWB Anchor 3개는 지정된 위치에 설치되어 있으며, 바퀴가 2개 달린 이동로봇은 모형차로 구현하였다. 이동로봇은 UWB 모듈 1개와 SPI로 연결된 nRF52840 마이크와 마이크에 연결된 모터제어모듈로 구성된다. 마이크는 UWB통신, 거리측정, 위치계산, 바퀴제어 등을 하나의 nRF52840 마이크의 임베디드 프로그램으로 구현하였고, 실시간으로 정해진 궤도를 움직이도록 구현하였다. 본 연구를 통해 UWB 측위기술과 저가의 마이크 하나만으로도 이동로봇이 자율주행할 수 있음을 확인하였다는 점에서 의의가 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 UWB 표준과 거리 측정 방식에 대해 살펴보고, III장에서는 주행을 위한 모터 제어 방법에 대해 설명한다. IV장에서는 구현된 시스템으로 자율주행한 결과를 보여주고, V장에서 결론을 맺도록 한다.

II. UWB 포지셔닝

2-1 SS-TWR를 사용한 측위

UWB에서 거리 측정은 UWB 기기들끼리의 패킷을 교환할 때 MAC 계층에서 시간을 기록하고 전파 왕복 시간

을 기준으로 거리를 측정한다. 이를 TWR(two way ranging)이라 한다. TWR의 거리측정은 패킷을 2번 교환하는 SS(single sided)-TWR과 패킷을 3번 교환하는 DS(double sided)-TWR이 있는데, DS-TWR의 경우 Anchor가 Tag의 위치를 알게 되므로 Tag에게 위치를 알려주는 과정이 한번 더 필요하므로 SS-TWR보다 시간이 늦어지게 된다^[7]. 게다가 2차원에서 움직이는 이동로봇의 자율주행을 위해서는 3개의 고정된 지점과의 거리를 이동로봇에서 빠르게 측정할 필요가 있으므로 본 연구에서는 그림 2와 같은 Sequential SS-TWR 방식을 사용하였다.

그림 2에서 고정된 UWB 기기를 Anchor, Anchor에 움직이는 이동로봇에 부착된 UWB기기를 Tag라 한다. 예를 들어 UWB Anchor A는 UWB Tag로부터 Poll 메시지를 송신하고 이때 송신 시작 시간 t_1 을 기록한다. 시간기록은 타임스탬프(timestamp)라 하는데 시간을 나타내는 문자열을 의미한다. 메시지를 수신한 UWB Anchor A 기기는 t_{reply} 시간 후에 응답메시지를 보낸다. 이제 UWB Tag는 이 메시지를 수신한 타임스탬프 t_3 을 기록한다. 이제 UWB Anchor A와 UWB Tag간의 거리는 전파 도달시간 ToF (time of flight)의 1/2이므로 식 (1)로 주어진다.

$$R = c \times \frac{t_3 - t_0 - t_{reply}}{2} \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도를 의미한다. 마찬가지로 UWB

Anchor B와 Anchor C도 응답하는데 응답시간을 조금씩 다르게 하여 순차적으로 응답하게 되면 빠르게 거리를 계산할 수 있다. 왼쪽에 UWB Server는 위치 계산과는 무관하게 UWB Tag가 계산된 위치를 모니터링하기 위해 임의의 위치에 놓여있는 UWB 기기로서 삼각법으로 계산된 UWB Tag의 위치를 ACK 메시지의 데이터 프레임에 실어 보내면 된다.

실제 구체적인 동작 방법을 설명하면 다음과 같다. 예를 들어 Tag와 Anchor의 거리가 3 m일 때, 기록된 타임스탬프로부터 거리 측정 사례는 다음과 같다. UWB에서 사용되는 시간인 타임스탬프는 클럭속도에 의해 결정되는데 사용된 UWB3120 IC의 타임스탬프의 단위는 15.65 psec이며, 기록된 $t_{reply} (= t_2 - t_1)$ 시간은 $41,550,012 \times 15.65 = 650,257,687.8$ psec가 되고, $t_3 - t_0$ 시간은 $41,551,446 \times 15.65 = 650,280,129.9$ psec가 계산되었다. 여기서 빛의 속도는 $c = 3 \times 10^8$ m/sec이므로 따라서 Tag와 Anchor 사이의 거리는 식 (1)에 의해 3.3 m가 계산되고 실제 거리 3 m에 근사한 값이 출력된다.

제한한 방식을 사용하는 경우 거리를 한 번 산출하는데 $t_3 - t_0$ 만큼의 시간인 0.65 msec가 걸리며, 3개의 Anchor와 통신하는 데는 약 2 msec 정도가 걸리게 된다. 따라서 저속으로 주행하는 이동로봇의 위치를 계산하는데 충분한 빠른 시간이라 할 수 있다. 따라서 UWB 서버와의 통신시간을 포함하고, 데이터 교환 사이의 지연시간을 포함하여 구현하였다^[8].

2.2 삼각측량법을 사용한 위치 계산

각 Anchor로부터 UWB 패킷교환을 통해 Anchor와 Tag 사이의 거리들을 수신한 UWB Tag는 삼각측량법을 통해 자신의 위치 좌표를 마이컴 프로그램으로 계산하여야 한다. 삼각측량법은 좌표를 알고 있는 세 개 이상의 Anchor로부터 Tag까지의 거리를 반지름으로 하는 원을 그렸을 때, Tag의 좌표는 3개의 원의 교점과 동일하므로 Tag의 좌표를 계산하는 것이다. 일반적인 삼각측량법은 2차원에서 사용 가능한 알고리즘이지만, 실험을 진행한 공간은 Anchor가 Tag보다 높은 위치에 놓여있는 3차원 공간이므로 보다 정밀한 좌표를 추정하기 위해서는 Anchor가 설

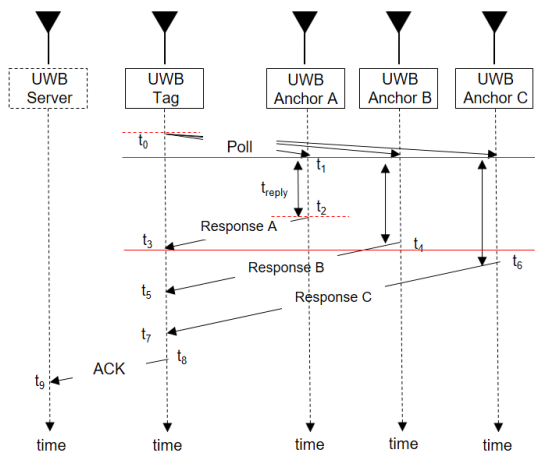


그림 2. Sequential SS-TWR의 동작원리
Fig. 2. Operating procedure of sequential SS-TWR.

치된 높이까지 고려한 계산이 필요하다. Anchor의 좌표계를 직각좌표계에서 각각 $(0,0,h)$, $(a,0,h)$, 및 $(0,b,h)$ 로 정의하고, Tag의 좌표를 $(x,y,0)$ 이라 하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

그림 3에서 Anchor들의 높이를 h 라고 하면, 각 거리 값과 이 높이 값을 이용하여 피타고라스 정리를 통해 Tag의 위치 좌표를 산정할 수 있게 된다. Anchor에서 Tag까지의 3차원 상의 거리가 각각 $D1, D2, D3$ 일 때, 식 (2)에서 식 (4)까지를 통해 이를 $d1, d2, d3$ 의 2차원 상의 거리로 매핑할 수 있다.

$$d1^2 = D1^2 - h^2 \quad (2)$$

$$d2^2 = D2^2 - h^2 \quad (3)$$

$$d3^2 = D3^2 - h^2 \quad (4)$$

이렇게 얻은 거리를 다시 보편적인 삼각측량법에 적용하면 식 (7)~식 (9)를 통하여 Tag의 좌표 $(x,y,0)$ 을 구할 수 있다.

$$x^2 + y^2 = d1^2 \quad (5)$$

$$(x - a)^2 + y^2 = d2^2 \rightarrow x = \frac{d1^2 - d2^2 + a^2}{2a} \quad (6)$$

$$x^2 + (y - b)^2 = d3^2 \rightarrow y = \frac{d1^2 - d3^2 + b^2}{2b} \quad (7)$$

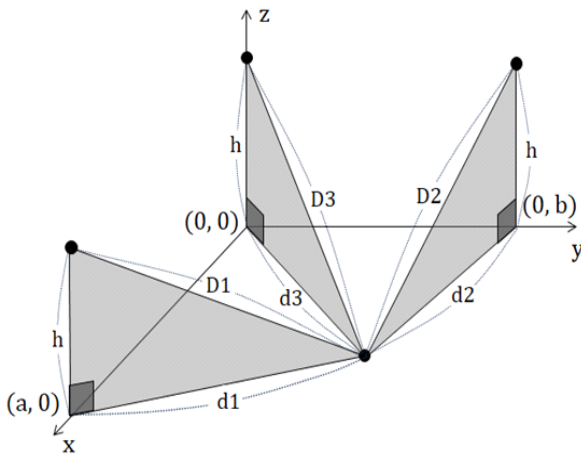


그림 3. 3차원 공간에서의 삼각측량법 계산 과정
Fig. 3. Triangulation calculation process in 3D space.

III. 자율주행 기능 구현

3-1 측위정보 갱신 알고리즘

실내 이동로봇의 자율주행은 2가지 기능이 필요하다. 먼저, 정해진 궤도를 움직일 수 있도록 바퀴를 회전시켜야 하며, 만약 궤도를 이탈하면 계획된 궤도로 다시 돌아와야 한다. 마지막으로 궤도 중에 사람과 같은 장애물이 있으면 정지해야 한다. 이러한 모든 기능은 이동로봇을 구성하는 바퀴의 회전수를 적절히 제어함으로써 이루어진다. 바퀴의 회전수는 보통 마이컴에서 바퀴의 회전수에 비례하는 PWM(pulse width modulation) 제어신호를 이용한다. 보통 전기모터는 큰 전류를 필요로 하므로 별도의 모터제어모듈이 필요한데, 이 모터제어모듈은 마이컴의 PWM 제어신호를 전류신호로 바꾸는 역할을 한다.

본 연구에서 사용된 이동로봇은 2개의 바퀴와 앞면에 중심을 잡아주는 쇠 구슬을 갖는 구조의 모형차를 사용하였다. 실제 이동로봇은 물건을 옮길 수 있도록 크기가 크고 무게도 많이 나가므로 별도의 대용량 모터 드라이버 회로와 큰 용량의 배터리가 필요하지만 본 연구에서는 학교 레벨에서 간단히 학생들이 실습할 수 있는 수준으로 만들 수 있도록 간단한 소용량 모터 드라이버 모듈이 이용하는 구조를 사용하였다. 이러한 작은 이동로봇을 사용함에 따라 다음과 같은 문제가 발생하게 되었다. 실제 UWB 측위의 정확도는 cm 단위이므로 크기가 큰 이동로봇에서는 정확도가 큰 문제가 되지 않지만 이동로봇이 작아지게 되면 UWB로 계산된 위치의 작은 오차로도 자신의 위치를 정확히 파악하지 못하게 된다. 따라서 매 순간 자신의 위치를 찾는 것보다 이전에 계산된 위치와 현재 측정된 위치와의 오차를 줄이는 것이 매우 중요하다. 이러한 고려를 하지 않으면 이동로봇은 위치오차에 따라 자율주행 시 매우 부자연스러운 움직임을 만들게 된다. 이를 극복하기 위하여 그림 4와 같은 측위 정보 갱신 알고리즘을 고안하였다.

측위정보는 UWB 통신을 통해 2 msec의 속도로 빠르게 갱신되지만 측위정보를 데이터 수신할 때마다 자신의 위치를 확인하지 않고 일정한 시간 주기마다 자신의 위치를 확인하고 위치에 관한 오류를 확인할 수 있도록 하였다. 이렇게 함으로써 RC카의 자연스러운 움직임을 만

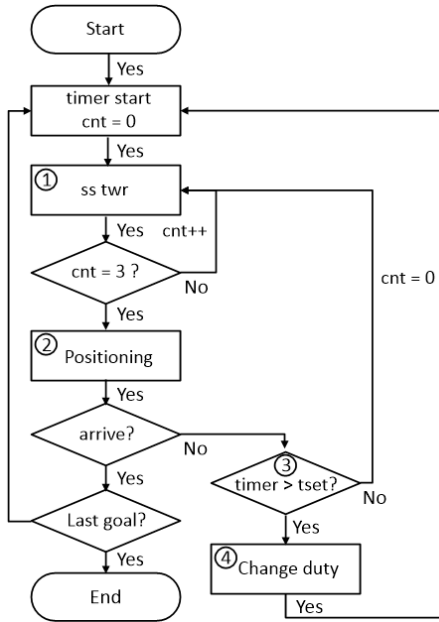


그림 4. 소형 로봇을 위한 측위 정보 갱신 알고리즘
Fig. 4. Position information update algorithm for small mobile robot.

들어낼 수 있었다. 구현 방법은 거리 측정은 지속적으로 진행되지만 별도의 타이머(timer)를 이용하여 일정한 시간(t_{set})마다 인터럽트(interrupt) 함수를 통해 거리 좌표를 출력하여 이전 좌표와 현재 좌표를 비교하도록 하였다. 이러한 t_{set} 시간은 이동로봇의 바퀴의 크기, 이동로봇의 속도에 따라 적절한 trade-off가 필요하다.

3-2 Inverse Kinematic을 이용한 바퀴 제어

앞에서 고안한 알고리즘을 사용하여 t_{set} 마다 주기적으로 거리 정보를 갱신하고 평균을 이용하더라도 오차는 발생한다. 이에 대한 설명은 그림 5와 같다. 그림 5에서 이전 위치의 좌표(previous position)에서 좌표를 계산하여 바퀴를 회전시켜 목표 위치(target position)까지 이동로봇이 주행하게 하였다. 하지만 지면의 마찰이나 모터의 상태에 따라 측정된 현재의 위치(current position)로 이동하였다고 하자. 이 경우 이동로봇의 조향각을 목표지점까지 회전시켜 목표지점으로 움직이게 하여야 한다. 이를 위해서는 3개의 좌표로부터 조향각(steering angle) Φ 를 계산한다. 다음으로 조향각으로 이동로봇이 향하도록 두 바퀴의

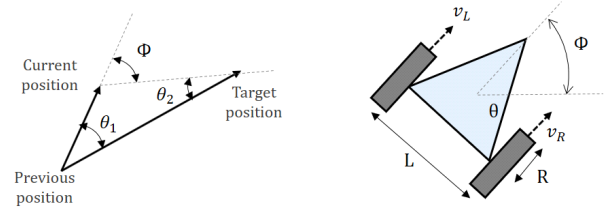


그림 5. Inverse Kinematic을 이용한 이동로봇의 조향각 추정
Fig. 5. Steering angle estimation of mobile robot using inverse Kinematic.

회전수를 다르게 조정하여 원하는 목표위치로 이동하게 한다.

이러한 문제는 모형로봇의 현재 위치와 조향각을 알 경우 두 바퀴의 각속도(v_L 과 v_R)를 계산해야 하는데, 본 연구에서는 Inverse Kinematic 제어 이론을 사용하였다. 관련 그림은 그림 5의 오른쪽과 같다. 참고로 Kinematic 제어 이론이란 바퀴의 각속도를 알 경우 위치를 계산하는 것인데 Inverse Kinematic은 이와 반대의 의미라 Inverse라는 이름이 붙었다. 조향각의 식 (8)로 주어진다.

$$\phi = \frac{R}{L}(v_R - v_L) \quad (8)$$

여기서, v_L 은 왼쪽 바퀴의 각속도(rad/sec), v_R 은 오른쪽 바퀴의 각속도, L 은 차량의 길이, R 은 바퀴의 반지름이다. 현재 차량의 방향과 목표 지점을 도달하기 위한 방향의 차이를 계산한 후 각 바퀴에 PWM duty를 설정하여 차량 방향을 회전시켜 궤도를 바꾸어 궤도를 수정하게 된다. 실제 각 바퀴의 PWM duty와 바퀴의 각속도 관계는 실험을 통해 값을 구하여 C-프로그램으로 구현하였다.

IV. 실험 및 결과

앞에서 설명한 이론을 바탕으로 자율주행이 가능한 이동로봇을 구현하였다. 구현된 UWB 기반의 이동 로봇의 사진은 그림 6과 같다. 먼저, UWB 측위를 위해서는 UWB IC가 필요한데 현재 시중에서 쉽게 구할 수 있는 UWB IC로는 Qorvo의 DW1000과 DW3000의 두 종류가 가능하다. 이 중 DW1000은 이전 UWB 표준인 IEEE 802.15.4a를 따르며, DW3000이 최신 표준인 IEEE 802.15.4z를 따

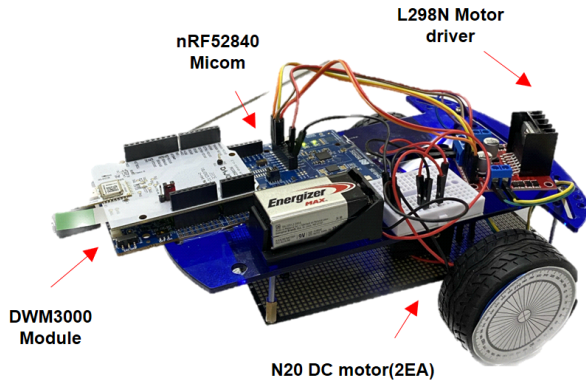
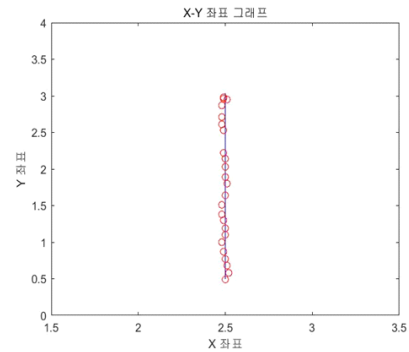


그림 6. 구현된 UWB 기반 이동 로봇의 사진
Fig. 6. Photograph of implemented mobile robot using UWB.

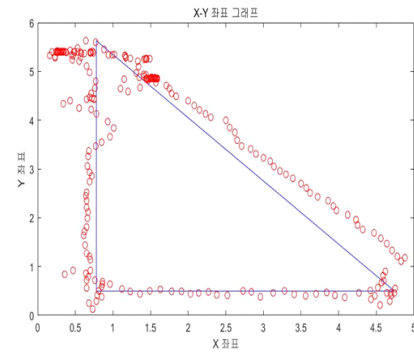
르므로 본 연구에서는 DW3000 IC를 이용하였다^[9].

마이컴 보드로는 Nordic 사의 nRF-52840 보드를 사용하였고, Segger Embedded Studio 프로그램을 이용하여 임베디드 프로그램을 구현하였다. DW3000 모듈이 지원하는 CH5번(중심주파수 6.4896 GHz)과 CH9번(중심주파수 7.9872 GHz)의 2개 주파수 중 CH9번을 사용하였고 주어진 경로를 얼마나 잘 따라가는지 확인하기 위해 UWB Tag가 주행하며 실시간으로 위치 정보를 컴퓨터와 연결된 UWB Anchor에게 ACK 메시지로 송신하도록 하였다. 컴퓨터와 연결된 Anchor는 이 ACK 메시지를 수신하여 UART 통신을 통해 컴퓨터로 전송하고 이를 MATLAB 프로그램을 이용해 궤적을 그렸다. 실험환경은 복도공간에서 5×7 m 크기의 공간에 UWB Anchor 3개를 위치한 후 사전에 입력된 직선, 삼각형, 사각형의 정해진 궤도를 따라 이동로봇이 위치인식과 판단, 제어를 통한 실시간 자율주행이 가능한지를 확인하였다^[10].

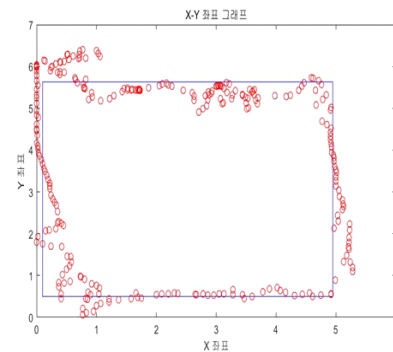
실험결과는 그림 7과 같다. 먼저 직선 자율주행의 결과는 큰 어려움 없이 자율주행이 됨을 알 수 있었다. 지면과 바퀴의 마찰 등의 궤도에 흔들림이 있을 수 밖에 없음을 확인하였고, 이러한 오차를 실시간으로 파악하여 오차가 생긴 경우 조향각을 바꾸어 원하는 궤도로 이동하면서 진행함을 알 수 있었다. 다음으로 삼각형과 직사각형을 궤도를 자율주행토록 하였으나 직선구간에서는 큰 문제가 없이 주행하였으나 각도가 꺾어지는 지점에서 조향각을 바꾸는 과정에서 최대 40 cm 정도의 위치오차가 발생



(a) 직선 궤도 주행
(a) Straight line path autonomous driving



(b) 삼각형 궤도 주행
(b) Triangular path autonomous driving



(c) 사각형 궤도 주행
(c) Square path autonomous driving

그림 7. 이동로봇의 자율주행 궤적 실험 결과
Fig. 7. Measured results of autonomous driving of mobile robot.

하였다. 위치오차는 원래궤도에서의 이격된 거리를 의미하여 위치오차가 크면 자율주행 성능이 떨어짐을 의미한

다. 이는 UWB 측위의 오차, 삼각형과 사각형의 꼭지점에서 조향각을 90° 이상 변화시킬 때 완벽하지 않은 바퀴의 회전 특성의 문제로 오차가 커진 것으로 보인다. UWB 측위의 오차는 수 cm 이상 존재하므로 발생할수밖에 없으나, 바퀴와 차체의 문제는 무게중심이 안정되고, 조금 더 큰 정밀한 바퀴를 갖는 이동로봇을 사용한다면 오차가 줄어들 것으로 보인다. 해당 시연 동영상은 온라인에 공개되어 있다^[11].

V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4z UWB 표준을 기반으로 하여 SS-TWR 방식의 UWB Positioning을 이용하여 이동로봇의 자율주행을 구현한 결과를 제시하였다. 실험 결과, 주어진 경로에 대해 최대 40 cm의 오차를 보이며 안정적인 주행을 보여주었고, 최대 초당 166번의 빠른 속도로 위치 추적이 가능함을 확인하였다. 장애물 탐지를 위한 초음파 센서와 본 연구의 결과를 결합한다면 장애물이 있는 경우 멈춰서는 기능을 포함한 실내 환경에서 자율주행이 가능할 것이라 기대된다. 물론 본 연구가 실제 다양한 산업분야에 응용되기 위해서는 이동로봇의 구조, 실내 앵커의 설치 환경 등을 고려한 추가적인 연구가 필요하지만, 본 연구는 UWB 기술을 활용한 Positioning, 측위와 자율주행 산업 분야에서 응용 가능성을 제시하는데 의의가 있다고 생각된다.

References

- [1] S. Park, J. So, H. Ko, H. Jeong, and I. Yun, "Development of safety evaluation scenarios for autonomous vehicle tests using 5-layer format(case of the community road)," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 114-128, Feb. 2019.
- [2] I. S. Jeong, J. Kang, J. Lee, and S. Park, "A study of the trend analysis of national automated vehicle research using NTIS data," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport System*, vol. 22, no. 2, pp. 147-163, Feb. 2023.
- [3] B. J. Jang, "Principles and trends of UWB positioning technology," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2022.
- [4] X. Yuan, Y. Bi, M. Hao, Q. Ji, Z. Liu, and J. Bao, "Research on location estimation for coal tunnel vehicle based on ultra-wide band equipment," *Energies*, vol. 15, no. 22, p. 8524, Nov. 2022.
- [5] M. G. Li, H. Zhu, S. Z. You, and C. Q. Tang, "UWB-based localization system aided with inertial sensor for underground coal mine applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 12, pp. 6652-6669, Jun. 2020.
- [6] H. Joo, K. Lee, "Changes in path tracking performance of autonomous vehicle according to design feedback gain and look-ahead distance of pure-pursuit algorithm," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 29, no. 9, pp. 839-846, Sep. 2021.
- [7] B. Kwon, H. Yoo, S. Han, and B. J. Jang, "Implementation of high-speed indoor positioning system based on IEEE802.15.4z UWB," in *CEUR Workshop Proceedings*, Hannover, Sep. 2023.
- [8] *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Nnetworks*, IEEE Std 802.15.4z-2020, Jul. 2020.
- [9] P. Sedlacek, M. Slanina, and P. Masek, "An overview of the IEEE 802.15.4z standard its comparison and to the existing UWB standards," in *2019 29th International Conference Radioelektronika(RADIOELEKTRONIKA)*, Pardubice, Apr. 2019, pp. 1-6.
- [10] Decawave, "DW3000 user manual," 2021. Available: <https://www.qorvo.com/products/d/da008154>
- [11] B. Jang, "UWB positioning demo: Indoor autonomous driving," 2023. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=badDHlxLt1M>

정 동 윤 [국민대학교/공학사]

<https://orcid.org/0009-0002-4620-1687>



2024년 2월: 국민대학교 전자공학부 공학사
[주 관심분야] 차량 SW, 무선시스템

강 세 진 [국민대학교/공학사]

<https://orcid.org/0009-0005-1046-7581>



2024년 2월: 국민대학교 전자공학부 공학사
[주 관심분야] 차량 SW, 무선시스템

김 민 서 [국민대학교/공학사]

<https://orcid.org/0009-0002-5132-9132>



2024년 2월: 국민대학교 전자공학부 공학사
[주 관심분야] 차량 SW, 무선시스템

장 병 준 [국민대학교/교수]

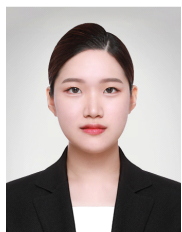
<https://orcid.org/0000-0002-5295-6050>



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1999년 1월: LG전자(주)
1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소
2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원
2013년 9월~2015년 8월: 미래창조과학부 민간전문가(CP)
2005년 9월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용

김 지 영 [국민대학교/공학사]

<https://orcid.org/0009-0008-6534-2227>



2024년 2월: 국민대학교 전자공학부 공학사
[주 관심분야] 차량 SW, 무선시스템