

UWB 기반 실내 측위 기술을 활용한 루프 클로징 기법

(A loop closing scheme using UWB based indoor positioning technique)

유현우*, 이정균*, 남소미*, 이주연*, 이윤서*, 김민성*, 민홍**

(Hyunwoo You, Jungkyun Lee, Somi Nam, Juyeon Lee, Yoonseo Lee, Minsung Kim, Hong Min)

요약

UWB는 실내 측위를 위해 사용되는 기술의 일종으로 RSSI 기반의 기법들보다 정확도가 높은 특징이 있다. ROS(Robot Operating System) 기반으로 동작하는 이동체 장비는 라이다와 카메라를 사용하여 장비 주변의 환경을 모니터링할 수 있다. 이러한 모니터링 과정에서 처음 시작하는 위치를 파악하는 루프 클로징 기법 적용 시 기존의 방법은 영상 상에 특징점이 있어야 클로징 작업이 일어나기 때문에 정확도가 낮은 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 이동체 장비에 UWB 태그를 탑재하여 위치 정보를 제공함으로써 루프 클로징 작업의 정확도를 높이는 시스템을 설계하였다. 또한 실험을 통해서 UWB 기반 실내 측위 시스템의 정확도를 평가하였고 이를 루프 클로징 기법에 활용할 수 있는지 검증하였다.

■ 중심어 : 실내 측위 ; 루프 클로징 ; 정확도

Abstract

UWB is a type of technology used for indoor positioning and is characterized by higher accuracy than RSSI-based schemes. Mobile equipment operating based on ROS can monitor the environment around the equipment using lidar and cameras. When applying the loop closing technique to determine the starting position in this monitoring process, the existing method has a problem of low accuracy because the closing operation occurs only when there are feature points on the image. In this paper, to solve this problem, we designed a system that increases the accuracy of loop closing work by providing location information by mounting a UWB tag on a mobile device. In addition, the accuracy of the UWB-based indoor positioning system was evaluated through experiments, and it was verified that it could be used for loop closing techniques.

■ keywords : Indoor positioning ; Loop closing ; Accuracy

I. 서론

실내 측위 시스템(Indoor Positioning System, IPS)는 GPS와 같은 위성 기반 위치 측정 시스템이 실내에서 사용될 수 없기 때문에 BLE, Wi-Fi, UWB(Ultra-WideBand) 등의 무선 기술을 활용하여 실내 상에서 좌표 정보를 추출하는 임무를 수행한다[1]. BLE[2]와 Wi-Fi[3] 기반의 실내 측위 시스템의 경우 RSSI(Received Signal Strength

Indicator)를 통해 대상의 위치를 예측하기 때문에 정확도가 떨어지는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해서 UWB 기반의 실내 측위 시스템에서는 TDoA(Time Difference of Arrival) 방식을 사용하여 정확도를 높였다[4]. TDoA 방식은 앵커(Anchor)라는 수신기들을 모니터링할 지역에 배치하고 시간을 동기화한 후에 태그(송신기)에서 전송하는 신호의 ToA(Time of Arrival)을 위치 계산 서버에 전송한다. 위치 계산 서버에서는 앵커로부터 전달받은 ToA 값을 활용하여 태그의 위치를

* 비회원, 가천대학교 AI·소프트웨어학부

** 정회원, 가천대학교 AI·소프트웨어학부

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1F1A1055408).

접수일자 : 2023년 05월 09일

게재확정일 : 2023년 05월 일

교신저자 : 민홍 e-mail : hmin@gachon.ac.kr

추정한다.

SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)은 영상이나 라이다와 같은 센서로부터 수집된 정보를 기반으로 주변 지도와 탐지 대상의 현재 위치를 추출하는 기법이다[5]. 지도 이미지를 생성하는 과정에서 탐지 장치가 이미 방문했던 위치를 재방문하는 것을 인식하고 이를 통해 오차를 줄이는 기법인 루프 클로징(loop closing)이 활용된다. 영상이나 센서 데이터 기반 루프 클로징의 경우 탐지기기의 위치와 각도에 따라 탐지 정확도가 급격하게 변화하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이동체를 사용하여 SLAM을 진행하는 과정에서 UWB 기반의 실내 측위 시스템의 측위 정보를 전달하여 루프 클로징 작업의 정확도를 향상하는 기법에 대해 설계하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장의 서론을 시작으로 2장에서는 기존의 관련 연구를 살펴본다. 3장에서는 제안된 루프 클로징 기법에 대한 설계에 대해 설명한다. 4장에서는 UWB 기반의 실내 측위 시스템의 정확도에 관한 실험 결과에 대해 분석하고 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 관련연구

1. UWB 기반 실내 측위 기법

Li 등은 장애물이 있는 경우와 없는 경우의 UWB 실내 정확도 측위를 측정하고 실제 환경에서 실험 데이터를 반영하였다[6]. 이를 통해 실험실 데이터를 반영하지 않을 경우보다 실험실에서 측정한 데이터를 반영하면 측위 정확도를 최대 28% 정도 향상하였으며 UWB 기술과 IMU 기술을 연동하여 실내 측위와 내비게이션 기능을 제공하였다.

Barbieri 등은 UWB 앵커를 스마트 공장 천장에 4대 설치하고 장애물의 위치에 따른 오차를 파악하고 잡음을 줄이는 기법을 적용하였다[7]. 실제 측정된 위치와 4가지 정확도 향상 알고리즘이 적용된 위치 예측 결과 비교를 통해 장애물에 효과적인 알고리즘을 도출하였고 스마트 공장과 같이 복잡한 실

내 환경에서 UWB 기반 추적 기술을 적용하였다.

Xianjia 등은 UWB 기술이 다양한 산업 영역에 활용될 수 있다는 것을 다수의 실험 결과를 통해 검증하였다[8]. 이를 통해 UWB 기술이 산업현장 모니터링, 위치 추적, 감시 시스템 등 다양한 응용에 활용 가능하다는 것을 제안하였다.

Yang 등은 UWB 장치의 위치 측정 정확도, 데이터 전송률, 송수신 성공률 등의 사양을 분석하고 실험실에서 측정한 결과와 실제 현장에서 측정한 결과를 비교 분석하였다[9]. UWB 장치의 사양을 실험실에서 검증하고 실제 환경에서 어느 정도의 성능 감소가 있는지를 확인했고 이론을 바탕으로 연구실 단에서 수행한 결과와 실제 결과가 다를 수 있다는 것을 제안하였다.

2. 루프 클로징

SLAM에서 중요한 기능 중의 하나는 이전에 맵핑된 장소를 인식하는 루프 클로징이다. 루프 클로징을 통해서 중복된 장소의 재탐지나 잘못된 맵의 확장을 막을 수 있고 동일 장소에 대한 오류를 보정하는데 활용할 수 있다. 이러한 루프 클로징 방식은 이미지와 이미지를 매칭하는 비전에 기반하는 방식과 라이다 등의 센서 데이터의 수치 정보를 활용하여 유사도를 측정하는 방법으로 나눌 수 있다. 최근에는 딥러닝 기술을 비전과 센서 기반 데이터에 적용하여 정확도를 높이는 연구도 진행되고 있다[10].

III. UWB 기반 루프 클로징 기법 설계

1. 시스템 구성

그림 1은 제안된 UWB 기반 실내 측위 기술을 활용한 루프 클로징 시스템의 구성도를 보여준다. 모니터링 영역 주변으로 UWB 앵커(A)를 설치하고 이동체에는 UWB 태그(T)를 부착한다. 이동체의 절대적 위치는 UWB 기반 위치 측위 서버에서 계산된다. 계산된 정보를 SLAM 서버에 전송하면 지도를 생성하는 과정에서 이동체의 현재 위치를 반영한 루프 클로징 기법 적용이 가능하다.

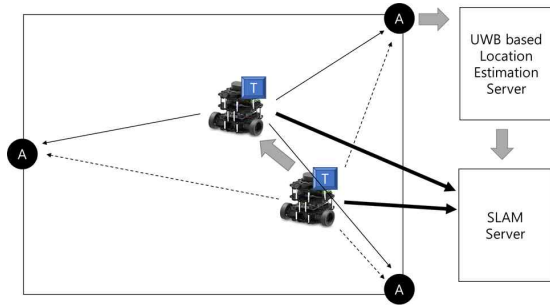


그림 1. 제안된 시스템의 구성도

TDoA 기반의 측위 기법은 그림 2와 같은 원리로 위치 정보를 추출한다[11].

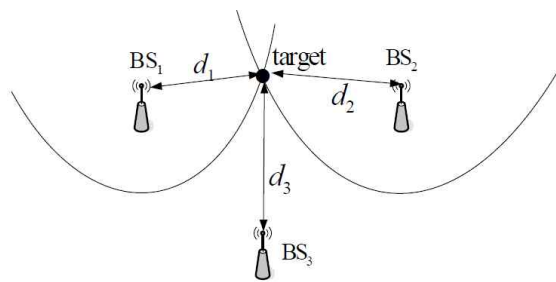


그림 2. TDoA 기반 위치 측위

3개의 베이스 스테이션(Base Station, BS)이 태그로부터 신호를 받는 시간은 거리에 따라 각각 다르다. i 번째 베이스 스테이션의 좌표가 (x_i, y_i) 이고 태그(target)의 좌표를 (x, y) , c 는 전파의 속도, t_i 와 Δt_i 를 각각 메시지 도착 시간과 전파 송출 시간이라고 하면 두 지점 사이의 거리는 수식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} = c(t_i - \Delta t_i) \quad (1)$$

2. 작업 절차

그림 3은 제안기법의 작업 절차를 보여준다. 먼저 TDoA 방식으로 위치를 추정하기 때문에 UWB 앵커들의 로컬 타임을 모두 동기화 시킨다. UWB 앵커들은 Wi-Fi를 사용하여 데이터 통신 및 동기화를 진행한다. 다음으로 앵커들 중에서 위치 측위 서버에 데이터를 전송할 마스터 앵커를 선정하고 서버로 데이터를 전송할 주기를 설정한다. UWB 태그는

주기적으로 앵커에서 신호를 송출하며 각 앵커는 태그로부터의 전달받은 신호를 받을 때마다 ToA를 계산한다. 각 앵커들은 계산된 ToA를 마스터 앵커에게 전달하고 마스터 앵커는 위치 측위 서버에 수집된 ToA값들을 전달한다. 위치 측위 서버에서는 이동체의 위치를 TDoA 기법을 통해 계산하고 결과를 SLAM 서버로 전송한다. SLAM 서버에서는 전달된 UWB의 정보와 현재까지 생성된 지도의 위치 정보를 매칭하여 오차 범위 내에서 동일한 위치로 확인되면 루프 클로징 기법을 수행한다.

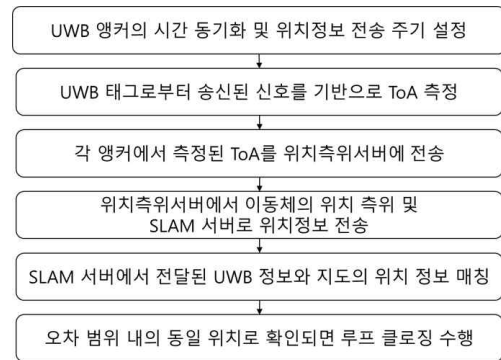


그림 3. 작업 절차

IV. 실험 및 결과 분석

1. 실험 환경

그림 3과 그림 4는 실험에 사용된 앵커와 태그의 외관과 사양을 보여준다.

앵커의 UWB 관련 사양은 3.25GHz에서 6.75GHz 사이에 최대 5개의 채널을 500MHz 간격으로 지원하며 데이터 전송률은 최대 6.8Mbps이다.

Item	Description
Outline	
Product name	UA-220
Standard	IEEE802.15.4a IEEE802.11 AN IEEE802.3af
Interface	DC power interface (Ø 2.0 mm) RJ45 10/100Mbps
Input voltage	DC 12~57V
Average power waste	< 10W
Installation mode	Ceiling, wall hanging

그림 4. 앵커의 외관과 사양

태그의 UWB 관련 사양은 1번 채널은 3.25GHz~3.74GHz, 2번 채널은 3.77GHz~4.24GHz, 5번 채널은 6.24GHz~6.74GHz으로 동작하며 상온에

서 -41.3dBm/MHz 정도의 신호 강도로 전파를 송신할 수 있다.

Item	Description
Model	UT-241-C
Specification	IEEE 802.15.4a IEEE 802.15.1
Chargeable interface	4pin Magnetic attraction
Charge voltage	DC 5V
Instantaneous power	< 1W
Standby time	> one month
Refresh rate	0.1~20Hz (adjustable)



그림 5. 태그의 외관과 사양

2. 측위 기법 구현 결과

그림 6과 7은 3개의 앵커와 1개의 태그가 설치된 10m X 5m 실험 공간을 이동하면서 모니터링용 프로그램에 출력된 결과를 보여준다.

그림 6은 태그가 이동한 경로를 화면상의 도면에 출력한 결과를 보여준다. 장애물을 피해서 가는 태그의 이동 경로에 따라서 추적된 위치가 표시되는 것을 확인할 수 있다.

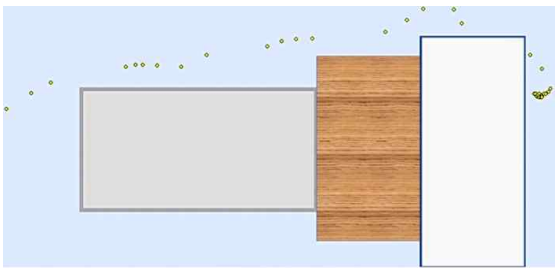


그림 6. 태그의 이동 경로 추적 화면1

그림 7은 출발지와 목적지 사이에 이동 경로를 생성하고 태그가 해당 경로에 따라 이동하는지를 모니터링한 결과를 보여주는 화면이다. 태그가 경로를 따라 이동하는지와 이탈하는지를 확인할 수 있다.

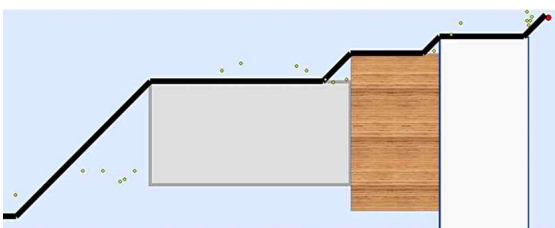


그림 7. 태그의 이동 경로 추적 화면2

3. 정확도 분석 결과

그림 8과 9는 UWB 기반 실내 측위 시스템의 정확도를 보여주는 실험 결과이다. 10m 구간에서 1m 간격으로 10번씩 측정하였고 측정된 값들의 평균값으로 측정 거리를 산출하였다. 앵커와 태그의 거리가 가까울수록 정확도가 높아지고 거리가 멀어질수록 정확도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

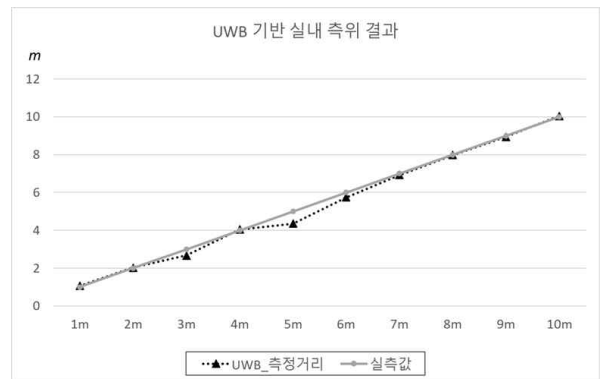


그림 8. UWB 기반 실내 측위 결과

그림 9는 구간별로 오차의 크기를 분석한 결과이다. 최소 오차는 5cm 이하이며 최대 오차는 65cm 정도로 SLAM 환경에서 루프 클로징 탐지에 사용하기 적합하다는 것을 알 수 있다.

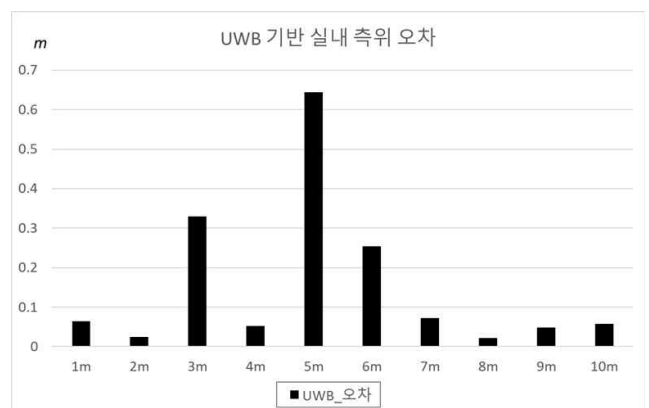


그림 9. UWB 기반 실내 측위 오차

V. 결 론

실내 측위 시스템은 위성 기반의 실외 측위 기술이 실내에서 동작하지 않는 문제를 해결하기 위해 제안되었다. 다양한 무선 기술을 사용하여 실내 측

위를 수행하는데 UWB 기반의 실내측위시스템의 경우 정확도가 높은 장점이 있다. 본 논문에서는 UWB 기술을 이동체를 활용한 실내 SLAM 제작에서 루프 클로징 시점을 결정하기 위한 용도로 활용하는 방법에 대해 설계하였다. 향후 설계된 내용을 기반으로 실제 시스템을 구현하여 제안된 시스템이 기존의 영상이나 센서 기반의 루프 클로징 기법들에 비해서 우수한 성능을 보인다는 것을 검증할 계획이다.

REFERENCES

- [1] P. S. Farahsari et al., "A Survey on Indoor Positioning Systems for IoT-Based Applications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9 no. 10, pp. 7680-7699, 2022.
- [2] F. J. Aranda, F. Parralejo, F. J. Alvarez, J. A. Paredes, "Performance analysis of fingerprinting indoor positioning methods with BLE," *Expert Systems with Applications*, vol. 202, pp. 1-17, 2022.
- [3] H. Rizk, A. Elmogy, H. Yamaguchi, "A Robust and Accurate Indoor Localization Using Learning-Based Fusion of Wi-Fi RTT and RSSI," *Sensors*, vol. 22, no. 7, pp. 1-22, 2022.
- [4] W. Zhao, A. Goudar, A. P. Schoellig, "Finding the Right Place: Sensor Placement for UWB Time Difference of Arrival Localization in Cluttered Indoor Environments," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 6075-6082, 2022.
- [5] Y. Wang, B. Xu, W. Fan and C. Xiang, "A Robust and Efficient Loop Closure Detection Approach for Hybrid Ground/Aerial Vehicles," *Drones*, vol. 7, no. 3, pp. 1-20, 2022.
- [6] B. Li, Z. Hao and X. Dang, "An indoor location algorithm based on Kalman filter fusion of ultra-wide band and inertial measurement unit," *AIP Advances*, vol. 9, no. 8, pp.1-19, 2019.
- [7] L. Barbieri, M. Brambilla, A. Trabattoni, S. Mervic and M. Nicoli, "UWB Localization in a Smart Factory: Augmentation Methods and Experimental Assessment," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-18, 2021.
- [8] Y. Xianjia, L. Qingqing, J. P. Queralta, J. Heikkonen and T. Westerlund, "Applications of UWB Networks and Positioning to Autonomous Robots and Industrial Systems," *Proc. of the 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing*, pp. 1-6, 2021.
- [9] J. Yang and Z. Chunhua, "Research on UWB Indoor Positioning System Based on TOF Combined Residual Weighting," *Sensors*, vol. 23, no. 3, pp.1-11, 2023.
- [10] A., Saba and G. Kim, "Role of Deep Learning in Loop Closure Detection for Visual and Lidar SLAM: A Survey," *Sensors*, vol. 21, no. 4, pp.1-17, 2021.
- [11] T. Zhou and Y. Cheng, "UWB Indoor Positioning Algorithm based on TDOA Technology," *Proc. of the the 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education*, pp. 777-782, 2019.

저자 소개



유현우(비회원)

2018년~현재 가천대학교 AI·소프트웨어학부 학부 과정 재학 중

<주관심분야 : 사물인터넷, 임베디드 시스템, 무인 로봇, 무선 센서 네트워크>



이정균(비회원)

2019년~현재 가천대학교 AI·소프트웨어학부 학부 과정 재학 중

<주관심분야 : 사물인터넷, UWB, 실내 측위, 네트워크>



남소미(비회원)

2021년~현재 가천대학교 AI·소프트웨어학부 학부 과정 재학 중

<주관심분야 : 사물인터넷, UWB, 실내 측위>



이주연(비회원)

2020년~현재 가천대학교 AI·소프트웨어학부 학부 과정 재학 중

<주관심분야 : 사물인터넷, UWB, 실내 측위>



이윤서(비회원)

2019년~현재 가천대학교 AI·소프트웨어학부 학부 과정 재학 중

<주관심분야 : 사물인터넷, UWB, 실내 측위>



김민성(비회원)

2019년~현재 가천대학교 AI·소프트웨어학부 학부 과정 재학 중

<주관심분야 : 사물인터넷, UWB, 실내 측위, 데이터 통신>



민홍(정회원)

2004년 한동대학교 전산과학과 학사 졸업

2011년 서울대학교 컴퓨터공학부 석박통합과정 졸업

2012년 Northwestern University Postdoc

2013년~2020년: 호서대학교 컴퓨터정보공학부 조교수

2021년~현재: 가천대학교 AI·소프트웨어학부 부교수
<주관심분야 : 운영체제, 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 결합허용 시스템, 자율형 IoT>