

# 이동형 앵커와 확장 칼만 필터 융합을 활용한 UWB 기반 로봇 위치 측위 기술

윤정현, 김승구\*

충북대학교

thera9234@chungbuk.ac.kr, \*kimsk@cbnu.ac.kr

## UWB-based Robot Positioning Technique Using Mobile Anchors and Extended Kalman Filter Fusion

Yoon Jeong Hyeon, Kim Seung Ku\*

\*Chungbuk National Univ.

### 요약

GNSS 사용이 불가능한 스마트 팩토리 내부는 매우 복잡한 구조를 가졌으며 자율이동로봇이 공장 내에서 안전하게 주행하려면 오차가 수 cm 이내인 정밀한 실내 위치 측위 기술이 요구된다. 본 연구는 이러한 요구를 충족하기 위해 두 개의 이동형 UWB 송신기와 하나의 수신기만으로 삼각측량이 가능하도록 구성하고, 이동형 앵커 로봇의 속도 정보를 확장 칼만 필터에 융합한 위치 측위 기법을 제안한다. 50 m X 30 m 규모의 실험 공간에서 평가한 결과, 제안 방식은 기존 고정형 앵커 기반 위치 측위 기술 대비 평균 위치 오차를 10 cm에서 최대 5.9 cm까지 감소시켜 약 41%의 성능 개선을 이루었다.

### I. 서론

스마트 팩토리는 공정 자동화·디지털 트윈·AI 기반 공정 최적화를 통합한 차세대 제조 플랫폼[1]으로, 생산 설비뿐 아니라 자재 운반로봇(AMR, Autonomous Mobile Robot), 협동 로봇, 웨어러블 안전 장비까지 실시간 위치 정보의 공유가 필수적이다. 특히 넓은 공장동 내부에서는 GNSS (Global Navigation Satellite System)를 사용할 수 없고, 설비가 복잡하게 얹히거나 수시로 내부 구조가 바뀌는 등의 이유로 인해 높은 위치 정밀도를 충족하기가 어렵다. 이를 보완하기 위한 실내 위치 인식 기술로서 LiDAR-SLAM(Simultaneous Localization and Mapping), 비전 기반 V-SLAM, 마커 인식 등 다양한 방법이 연구되었으나, 장비 비용·조도 민감도·계산 부하와 같은 한계로 인해 경량용 산업 로봇이나 대규모 IoT(Internet of Things) 태그 네트워크에 적용하기 어렵다. 그에 반해 최근 수 cm 내외의 거리 측정 정밀도와 전파의 짧은 펄스 특성에 기반한다 중경로 내성을 가진 UWB(Ultra Wide Band) 기술은 유력한 대안으로 주목받고 있다. 그러나 기존의 UWB를 활용한 위치 추정 시스템은 고정 비콘을 천장이나 벽면에 수십 개 단위로 설치해야 하는 문제점으로 인해 초기 인프라 구축 비용과 유지보수 부담이 크다. 한편 UWB 앵커와 노드가 한 쌍뿐인 최소 구성에서는 단일 거리 정보만 제공되기 때문에 추가적인 측정 과정 없이 2차원 이상의 절대 좌표를 직접 계산하는 것이 불가능하다는 구조적 단점이 있다. 특히 공장 내부처럼 복잡한 구조로 인해 장애물이 많은 환경에서는 거리 측정이 일시적으로 끊기는 순간 로봇의 이동 궤적 추적이 봉괴될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 이동형 UWB 앵커 로봇 한 대가 두 개의 UWB 송신기를 탑재하고, 이동 로봇이 단일 UWB 수신기를 갖추는 새로운 토폴로지를 제안한다. 이동형 앵커 로봇에서 전파된 UWB 신호를 이동 로봇이 수신하여 Two-Way Ranging(TWR)을 수행해 두 송신기와 수신기 사이 거리를 동시에 측정하며, 이동형 앵커 로봇 내부의 IMU(Imertial Measurement Unit)가 제공하는 속도 정보를 확장 칼만 필

터(EKF, Extended Kalman Filter) 상태벡터에 융합해 거리 오차 누적을 최소화한다. 이동 로봇의 위치를 최종적으로 결정하는 EKF에 이동형 앵커 로봇의 IMU로 계산된 속도 정보를 융합시킴으로써 앵커가 이동 중에도 이동 로봇의 거리 및 위치 추정을 안정화할 수 있다는 장점이 있다. 제안한 구조는 고정 비콘 인프라를 사실상 제거하면서도 기존의 고정형 앵커 기반 위치 추정 기술 대비 평균 위치 오차를 10 cm에서 5.9 cm로 약 41% 감소시키는 성능을 보였다.

### II. 본론

본 절에서는 제안하고자 하는 이동형 UWB 앵커 기반 위치 보정 시스템의 거리 측정 절차, 확장 칼만 필터 설계, 그리고 실험 환경과 평가 방법을 순차적으로 상세히 서술한다. 우선 시스템 하드웨어는 이동형 앵커 로봇과 피측정 로봇 두 부분으로 나뉜다. 이동형 앵커 로봇에는 Decawave DW1000 송신기 두 개를 40 cm 간격으로 대칭 배치하였다. 두 송신기는 동일 채널로 동기화되며, 동일 GPSDO(10 MHz)에서 파생된 38.4 MHz 시스템 클럭을 공유해 전송 타임스탬프 오차를 15 ps 이하로 억제한다. 이동형 앵커 로봇 내부에는 IMU가 장착되며, 센서 데이터는 SPI 통신을 통해 라즈베리파이 4B로 전송된다. 피측정 로봇 측 수신기는 동일 모델 DW1000 모듈 한 기와 라즈베리 4 B로 구성된다. TWR 기반 거리 측정은 이동형 앵커 로봇에 장착된 송신기 1과 송신기 2가 100  $\mu$ s 간격으로 Burst Request를 전송하고, 수신기가 단일 Acknowledgement Response로 응답하는 시분할 방식으로 수행된다. 각 왕복 시간  $T_{r,i}$  ( $i = 1, 2$ )에서 오프셋과 안테나 지연을 교정해 얻은 왕복 시간  $\tilde{T}_{r,i}$ 를 이용해 두 거리를 다음 수식 (1)을 통해 계산한다.

$$d_i = c \tilde{T}_{r,i} / 2 \quad (1)$$

두 송신기 간 기하학적 기준이 고정돼 있으므로, 동일 프레임에서  $d_1$ 과  $d_2$ 를 동시에 확보하면 이동 로봇의 수신기 좌표  $(x, y)$ 를 삼각측량으로

즉시 추정할 수 있다. TWR은 전파가 부분적으로 가려져도 나머지 경로로 보정할 수 있어 단일 송신기 대비 NLOS 구간 견고성이 크게 향상된다. 장점 또한 확보할 수 있다. 이동 중인 피측정 로봇의 위치 추정은 EKF 구조로 구현된다. 상태 벡터는  $x = [x, y, \dot{x}, \dot{y}]^T$ 이고, 예측 단계는 이동형 앵커의 IMU로부터 계산된 속도  $(\dot{x}, \dot{y})$ 를 활용하여 다음 수식 (2)를 통해 업데이트된다.

$$x_{k|k-1} = x_{k+1} + T[\dot{x}, \dot{y}, 0, 0]^T \quad (2)$$

예측 공분산  $P_{k|k-1}$ 에는 IMU의 화이트 노이즈  $\sigma_a^2$ 가 입력되며, 본 실험에서는  $\sigma_a = 0.05m/s^2$ 를 사용했다. 추정 단계에서는 두 송신기의 좌표  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 는 항상 앵커 프레임 원점과 거리를 기준으로 다음 수식 (3)을 통해 재계산된다.

$$h(x) = \begin{cases} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}, \\ \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \end{cases}^T \quad (3)$$

거리 측정 공분산  $R = \sigma_d^2 I_2$ 는 실내 전파 환경을 고려해  $\sigma_d = 0.1m$ 로 설정하였다.

실험 환경은 길이 50m, 너비 30m의 공간에서 수행되었다. 이동형 앵커로봇은 지게차 동선을 묘사하기 위해 사전에 설정된 사각형 트랙을 반복 주행하며 속도는 0.4 m/s로 고정한 뒤 실험했다. 피측정 로봇은 실험 공간을 0.3 m/s로 등속 운동하거나 S자 경로를 자율 주행하면서 10 Hz마다 자신의 위치를 추정했다. 총 30분 동안 18000 프레임에 대한 데이터를 수집했고 패킷 손실률은 0.3%로 나타났다.

표 1. 기존 UWB 위치 추정 기술과의 성능 비교

| 지표           | Weyer et al. [2] | Wang et al. [3] | Proposed |
|--------------|------------------|-----------------|----------|
| 평균 오차        | 23.4 cm          | 10 cm           | 5.9 cm   |
| 중앙값 오차       | 19.7 cm          | 8.2 cm          | 4.8 cm   |
| 95% 오차       | 41.2 cm          | 18.3 cm         | 9.7 cm   |
| 최대 오차        | 87 cm            | 52 cm           | 26 cm    |
| 패킷 손실 대비 재수령 | 1.84 s           | 0.97 s          | 0.46 s   |

표 1은 단일 UWB 앵커와 노드를 사용한 방식[2]과 고정형 앵커 3기를 사용한 방식[3], 마지막으로 본 논문에서 제안하고자 하는 방식을 동일한 환경에서 실험하여 비교한 값을 나타낸다. 지표의 수치는 각 방식에 따라 위치를 추정한 값과 Ground truth 값을 비교한 절대 거리 오차 통계를 나타내며 마지막 패킷 손실 대비 재수령 지표는 UWB 신호가 장애물로 인해 수신기로 도달하지 못해 패킷이 5번 연속으로 손실된 이후 EKF가 정상 오차 범위로 복귀하는 데 걸린 시간을 의미한다. 먼저, 본 논문에서 제안하고자 하는 방식은 단일 TX-RX 방식 및 고정 앵커 3기 방식과 비교하여 각각 75%, 41%의 성능 향상이 이루어졌고 중앙값 오차 역시 같은 폭으로 감소하여 일반적인 상황에서도 제안하는 방식이 훨씬 더 밀집된 분포를 보인다. 또한 극단적인 상황을 나타내는 95% 오차 결과는 단일 구성 대비 76%, 고정 앵커 대비 47% 줄어들어 다중경로나 NLOS 같은 악조건에서도 위치 오차가 안정적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 최대 오차의 경우에도 87 cm에서 26 cm로 70% 이상 감소했는데, 이는 두 송신기

가 제공하는 기하학적 여유와 EKF의 NLOS 탐지 및 배제 알고리즘이 최악의 상황을 완화한 결과로 해석된다. 마지막으로 장애물로 인해 UWB 패킷이 연속으로 다섯 번 손실된 이후 필터가 정상 오차 범위로 복귀하는데 걸린 시간 역시 제안하는 방식이 0.46초로 가장 짧았다. 단일 TX-RX 방식과 고정 앵커 방식이 각각 1.84초, 0.97초였던 점을 감안하면, IMU를 기반으로 한 예측 단계와 이중 거리의 입력 구조가 거리 측정이 잠시 끊겨도 피측정 로봇의 이동 궤적을 빠르게 복원하는 데 효과적임을 보여준다. 종합하면 본 논문에서 제안하고자 하는 이동형 앵커와 EKF 융합을 활용한 UWB 기반 로봇 위치 측위 기술은 센터미터 급 평균 오차와 짧은 EKF 재수령 시간을 달성하여 스마트 팩토리와 같은 동적이고 복잡한 환경에서 요구되는 실시간 정밀 위치 추정 요건을 효율적으로 달성할 수 있다.

### III. 결론

본 연구는 스마트 팩토리와 같이 GNSS가 차단된 실내 환경에서, 두 개의 UWB 송신기가 탑재된 이동형 앵커와 하나의 수신기만으로 센터미터 급 위치 정밀도를 실현하는 위치 추정 기법을 제안 및 검증하였다. 송신기 쌍이 제공하는 TWR 정보와 IMU 속도값을 확장 칼만 필터에 융합함으로써 단일 송수신기 구조의 좌표 계산 불가 및 오차 누적 문제를 근본적으로 해소했으며, 고정 비콘을 사실상 제거하면서도 평균 위치 오차 5.9 cm, 95% 한계 오차 9.7 cm를 달성하였다. 약 1800 m<sup>2</sup> 실험 구역에서 패킷 손실률이 0.3 %에 불과했고, 일시적 NLOS가 발생해도 EKF가 0.46초 이내에 재수령하여 연속 추적이 가능함을 확인했다. 이는 고정 인프라 비용과 레이아웃 제약을 크게 줄이면서도 스마트 팩토리가 요구하는 실시간 정밀 위치 서비스를 제공할 수 있음을 실증적으로 보여준다. 향후 연구에서는 전파 손실 계수의 공간적 변화가 위치 정확도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 해당 계수를 실시간 추정·보정하는 기법을 개발할 예정이다. 예를 들어, DW1000의 RSSI를 이용해 구역별 전파 손실 계수를 추정한 뒤 EKF 측정 공분산이나 거리 보정 인자에 동적으로 반영하면, 작업 환경이 주기적으로 바뀌거나 장애물이 새로 추가되더라도 오차 누적을 더욱 억제할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 다층 공장이나 고층 창고를 위한 3-차원 확장, 다중 이동형 앵커 협업, 저전력 펌웨어 통합 등으로 연구를 확대함으로써 상업적 적용성을 한층 강화할 계획이다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A5A8026986). 본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 지원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0020536, 산업혁신인재성장지원사업) 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업임(IIITP-2025-RS-2020-II201462)

### 참 고 문 헌

- [1] S. Weyer, M. Schmitt, M. Ohmer, D. Gorecky, "Towards Industry 4.0 – Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems," IFAC-PapersOnLine, vol. 48, no. 3, pp. 579 - 584, 2015.
- [2] Wang, T.; Zhao, H.; Shen, Y. "An Efficient Single-Anchor Localization Method Using Ultra-Wideband Systems." Applied Sciences, 10(1): 57, 2020. DOI: 10.3390/app10010057
- [3] Bao, L. et al. "An Enhanced Indoor 3-D Localization System with Sensor Fusion Based on Ultra-Wideband Ranging and Dual Barometer Altimetry." Sensors, 24(11): 3341, 2024. DOI: 10.3390/s24113341