

Development of a UWB-Based Indoor Positioning RTLS System

Hoeteak Jung*, Seungmin Oh**

*M.S. Student, Dept. of Computer Engineering, Kongju National University, Chungnam, Korea

**Professor, Dept. of Computer Engineering, Kongju National University, Chungnam, Korea

[Abstract]

In this study, we developed an Ultra-Wideband (UWB)-based indoor positioning RTLS (Real-Time Location System) for indoor environments where GNSS signals are difficult to reach. The proposed system measures the distance between fixed anchor nodes and tag nodes attached to mobile objects using Time of Flight (ToF). This method provides high-resolution distance information. A trilateration algorithm is used to calculate two-dimensional positioning in real time. The experimental environment was constructed by arranging three anchors in a triangular shape in a $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ indoor space, and data were collected 300 times from 10 measurement points. The experimental results showed an average position error of 12.2 cm, demonstrating higher accuracy than conventional RSSI-based indoor positioning methods. This study demonstrates the potential applications of UWB-based RTLS technology in areas such as indoor autonomous mobility, smart logistics systems, and safety monitoring.

▶ **Key words:** UWB, RTLS, Indoor Positioning, Time of Flight(ToF), Trilateration, Localization Accuracy, GNSS(Global Navigation Satellite System)

[요 약]

본 연구에서는 GNSS 신호가 도달하기 힘든 실내 환경에서 활용 가능한 UWB(Ultra-Wideband) 기반 실내 위치추적 RTLS(Real-Time Location System)를 개발하였다. 제안된 시스템은 고정된 앵커 노드와 이동체에 부착된 태그 노드 간의 거리를 ToF(Time of Flight) 기반으로 측정했다. 이러한 방식으로 고해상도 거리 정보를 획득했다. 삼변측량(trilateration) 알고리즘을 이용해 2차원 위치를 실시간으로 계산한다. $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 규모의 실내 공간에 세 개의 앵커를 삼각형 형태로 배치하여 실험 환경을 구축하였으며, 총 10개 측정 지점에서 300회의 데이터를 수집하였다. 실험 결과 평균 위치 오차는 12.2 cm로 나타났으며, 이는 기존 RSSI 기반 실내 측위 방식에 비해 높은 정확도를 제공함을 의미한다. 본 연구는 UWB 기반 RTLS 기술이 실내 자율주행 모빌리티, 스마트 물류 시스템, 안전 모니터링 등의 분야에서 활용될 수 있음을 확인하였다.

▶ **주제어:** UWB, RTLS, 실내 위치 추적, Time of Flight(ToF), 삼변측량, 위치 정확도, GNSS(Global Navigation Satellite System)

• First Author: Hoeteak Jung, Corresponding Author: Seungmin Oh
*Hoeteak Jung (hoeteak2@naver.com), Dept. of Computer Engineering, Kongju National University
**Seungmin Oh (smoh@kongju.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Kongju National University
• Received: 2026. 01. 06, Revised: 2026. 01. 14, Accepted: 2026. 02. 19.

I. Introduction

최근 실내 물류 자동화, 자율주행 로봇, 스마트 팩토리, 실내 내비게이션 등 다양한 분야에서 정밀한 실내 위치추적 기술의 중요성이 빠르게 증가하고 있다. 실외 환경에서는 GPS 및 GNSS가 안정적인 위치 정보를 제공하지만, 실내 환경에서는 전파 감쇠, 다중경로(Multipath) 발생, 구조물 간섭 등의 요인으로 인해 GNSS 기반 측위가 사실상 불가능하다. 이러한 한계로 인해 실내 위치추적을 위한 대체 기술로 무선 통신 방식(Wi-Fi, RFID, Bluetooth, ZigBee 등)이 제안됐다. RSSI(Received Signal Strength Indicator)는 거리를 추정하는 방식을 사용하는 무선 통신 방식 기술이기 때문에 낮은 시간 해상도와 환경 변화에 따른 측정값 변동이 생긴다. 그로 인해 높은 정확도를 확보하기 어렵다.[10]

UWB(Ultra-Wideband)는 확장된 주파수 대역을 활용하여 짧은 시간 간격으로 펄스를 방출하는 무선 기술방식이다. 이러한 특성 덕분에 신호 도달 시간을 세밀하게 구분하여 실내 환경에서도 거리 오차를 센티미터 수준으로 줄일 수 있다.[1] 예를 들어 금속 구조물이나 기둥이 많은 실내 공간에서도 ToF(Time of Flight) 기반 측정은 비교적 안정적인 값을 제공한다. 이는 다른 무선 방식에서 흔히 발생하는 세기 변화나 반사 신호의 영향보다 훨씬 적다.

최근에는 정확도가 필요한 산업·물류 자동화, 병원 장비 관리, 군사용 장비 위치 모니터링 등 다양한 영역에서 RTLS(Real-Time Location System)의 핵심 기술로 활용되면서 UWB의 실용성이 더욱 강조되고 있다.[2] 기존 연구 흐름을 보면, UWB 모듈의 거리 측정 오차를 줄이기 위한 다양한 보정 기법이 제안됐다.[5] 또한 IMU를 함께 활용하여 이동체의 자세나 방향 정보를 보완하는 방식도 연구된 바 있다.[8] 그밖에 제한된 실내 환경을 대상으로 기본적인 위치 측정 성능만을 확인한 실험적 연구도 일부 보고되었다.[3]

그리고 앵커 공간적 배치와 거리 산출 과정, 좌표 계산 절차에서부터 최종 위치 정보를 시각적으로 표시하는 단계까지 전체 RTLS 구성 요소를 하나의 시스템으로 통합하여 실제 환경에서 검증한 사례가 적다.[6]

뒤 따라서서 여러 위치 지점을 설정 후 반복 측정을 수행하여 지점별 평균 오차나 분산을 정량적으로 비교하는 방식은 RTLS의 안정성과 활용 가능성을 평가하는 데 핵심적인 절차에도 불구하고 기존 문헌에서는 앞과 같은 실험 설계가 충분히 다뤄지지 않았다.[7]

본 연구에서는 실내 환경에서 이동체의 위치를 실시간

으로 추적하기 위한 UWB 기반 RTLS 시스템을 직접 설계·구현했다. 고정된 세 개의 앵커와 이동형 태그로 구성된 시스템 구조를 기반으로 하여 ToF 기반 거리 측정 알고리즘과 삼변측량(Trilateration) 알고리즘을 적용해 2차원 위치를 계산했다. 또한 6 m × 6 m 크기의 실내 실험 공간을 구축하여 총 300회의 측정 데이터를 수집했고 측정된 위치 오차를 정량적으로 분석하여 시스템의 성능을 평가했다.

본 논문의 구성은, 2장에서는 UWB 기반 실내 위치추적 기술에 관한 기존 연구와 핵심 기술 요소를 소개한 후 3장에서는 제안하는 RTLS 시스템의 전체 구조와 거리 측정·위치 계산 알고리즘을 설명한다. 4장 서는 실험 측정 결과 및 환경 구성을 제시하며, 5장에서는 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

II. Preliminaries

2.1 Overview of Indoor Location Tracking Technology

실내 환경에서 이동체 및 객체의 위치를 정확하게 추정하는 기술은 여러 산업 분야에서 중요한 기반 기술로 인식되고 있다. 실내 위치추적을 위해 Wi-Fi 기반으로 사용되는 기법인 ZigBee, BLE, RFID, RSSI 기법을 비롯해, 카메라를 이용한 비전 기반 방식과 초음파를 활용한 측위 방식 등 다양한 접근이 제안되어 왔다.[6] 그러나 RSSI 기반 방식은 전파 세기 감쇠에 영향을 받기 때문에 환경 변화에 취약하며, 벽체 구조·사람의 움직임·전파 반사 등에 따라 측정값 변동이 심해 높은 정밀도를 확보하기 어렵다.[10] 이미지 기반 측위 방식은 조명 조건, 카메라 시야각, 장애물 등의 문제로 인해 범용적인 적용이 제한적이다. 이러한 이유로, 실내 위치추적 기술은 높은 시간 해상도와 환경 변화에 대한 강건성을 갖춘 기술이 필요하며, 이에 따라 UWB 기반 RTLS 기술이 대안으로 주목받고 있다.[1]

2.2 Ultra-Wideband Positioning Technology

UWB(Ultra-Wideband)는 매우 짧은 펄스를 넓은 대역폭으로 송출하는 무선 통신 방식이다. 이러한 UWB는 기존 기술 대비 수십 배 높은 시간 분해능을 제공한다.[1] 이로 인해 거리 측정 정확도가 뛰어나며, 실내 환경에서 발생하는 다중경로(multipath) 신호의 간섭을 막을 수 있다.[2] 이러한 특성은 UWB가 실내 거리 측정 분야에서 가장 높은 정확도를 확보한 기술로 평가되는 이유이다.[4]

UWB 기반 거리 측정 방식의 핵심은 TDoA(Time Difference of Arrival)과 ToF(Time of Flight) 방식이 있다. 특히 ToF 방식은 각 앵커와 태그 간의 신호 도달 시간을 직접 측정하여 거리를 계산한다. 그로인해 RSSI 기반 방식보다 안정적이며 환경 변화에 따른 민감도가 낮다.[3] 거리 계산식은 $D=C*T$ 와 같다. 여기서 D 는 거리(m)를 뜻하고 C 는 전파속도를 뜻하고 T 는 신호 도달 시간을 뜻한다. [4] UWB 기술은 수십 cm 이하의 오차 범위를 달성할 수 있어서 실내 물류, 의료 장비 추적, 공장 자동화, 로봇 네비게이션 등의 분야에서 활발히 활용되고 있다.[5]

2.3 Position Computation Algorithms: Trilateration and Localization Models

UWB 기반 RTLS 시스템은 거리 측정 후 위치 정보를 계산하기 위해 일반적으로 삼변측량(Trilateration) 기법을 사용한다.[7] 삼변측량은 최소 세 개의 앵커에서 측정된 거리인 d_1, d_2, d_3 를 기반으로 태그의 좌표 (x, y) 를 계산하는 방식이다. 삼변측량기법은 실시간 위치 계산이 가능하다. 그렇기에 구현이 단순하다는 장점이 있다.[9]

$$\begin{aligned}(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= d_1^2 \\(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= d_2^2 \\(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= d_3^2\end{aligned}$$

Equation 1. Trilateration equations for 2D position estimation using three anchor nodes

삼변측량 모델은 계산량이 적기에 실시간 시스템에 적합하다. 그러나 앵커 간 배치가 부적절하면 정확한 위치가 나오지 못하고 오차가 증가할 수 있다. 앵커 위치 선정 역시 실내 RTLS 성능에 중요한 요소로 알려져 있다.

최근 일부 연구에서는 삼변측량 기반 위치 계산과 IMU라는 관성 측정 장치를 결합한 센서 융합 기법을 적용하여 이동체의 방향·가속도 정보를 추가로 활용하는 방식도 제안되고 있다.

2.4 Current Research Trends in UWB-Based Indoor Positioning

(1) 거리 측정 정확도 향상 연구

UWB 모듈의 하드웨어 특성 및 ToF 데이터 신뢰도 향상을 목표로 한 연구들이 진행되었다. 일부 연구에서는 NLOS(Non-Line-of-Sight) 기술을 활용하여 오차 보정을 위한 필터링 알고리즘(파티클 필터, 칼만 필터 등)을 적용

하였다.[3]

(2) RTLS 시스템 구현 연구

RTLS 시스템을 실제 공간에 구축하여 실험한 연구도 다수 보고되었다. 그러나 대부분 시스템 구조의 일부 요소만 다루거나, 소규모 실험 환경에서 제한적으로 실행되어 실증적 활용성이 부족한 경우가 많다.[5]

(3) 응용 분야 확장 연구

응용 분야 확장 연구로 스마트 물류, 병원 자산 추적, 공장 자동화, 로봇 위치추적 등 실제 산업 환경에 적용한 연구들이 등장하고 있다. 최근에는 다중 태그 동시 추적, 3차원 위치추정 등 고도화된 기능 연구도 진행되고 있다.[6]

2.5 Differentiation of this study

연구의 차별성으로는 기존 연구가 부분적 기능 실험 또는 제한된 환경에서의 분석에 머물렀던 한계를 보완하고자 한다. 본 시스템은 앵커-태그-서버로 구성된 RTLS 구조를 통합적으로 구현한 후 정삼각형 기반 앵커 배치를 적용하여 측위 안정성을 확보했다.[1] 또한 $6m \times 6m$ 규모의 실내 환경에서 총 300회의 측정 실험을 수행하여 평균 12.2cm의 위치 오차를 정량적으로 제시했다. 아울러 위치 계산 결과를 실시간으로 시각화하는 기능을 포함하여 실내 위치추적 시스템의 실증적 활용 가능성을 검증했다.

III. System Design

3.1 Overall System Architecture

제안된 RTLS 시스템은 실내 공간에 고정적으로 배치된 세 개의 UWB 앵커(Anchor)와 이동체에 부착된 태그(Tag), 그리고 위치 계산을 수행하는 서버(Server)로 구성된다. 앵커는 태그로부터 수신한 신호 도달 시간을 기반으로 거리 값을 계산한다. 서버는 앵커 간의 거리 정보를 활용하여 태그의 2차원 위치를 추정한다.[1] 앵커-서버 간의 통신은 Wi-Fi 또는 Serial 통신 방식으로 설계되었고 모든 데이터는 실시간으로 수집·처리된다.[5]

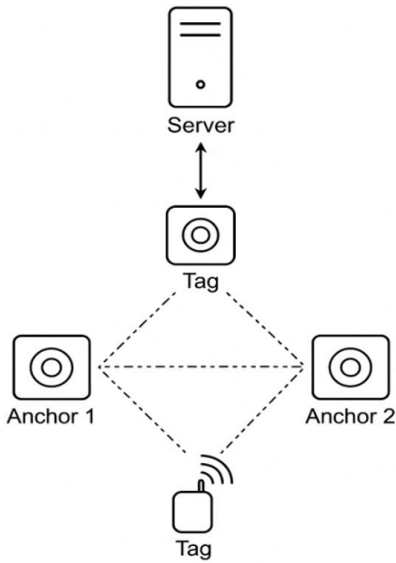


Fig. 1. Configuration of anchor, tag, and server in the UWB RTLS

3.2 ToF-based distance data processing

앞서 2장에서 ToF 기반으로 거리 측정의 이론적 배경을 제시했다. 본 절에서는 제안된 RTLS 시스템에서 UWB 모듈로부터 획득한 ToF 데이터를 실제로 어떻게 처리하는지를 설명한다.

본 연구에서 사용한 태그 장치는 약 10 Hz의 주기로 UWB 신호를 송신한다. 각 앵커는 수신된 신호를 타임스탬프(Time Stamp) 기반으로 태그까지의 거리를 계산한다.[4] 측정된 거리 값은 원시 형태로는 잡음과 순간 변동에 취약하다. 그로 인해 서버에서 다음의 전처리 과정을 수행하도록 설계했다. 첫째는 단기 변동을 완화하기 위해 3회 이동평균 필터를 적용하여 측정값의 안정성을 확보하였다. 둘째는 거리 값의 급격한 변동을 감지할 경우 Outlier 제거 절차를 적용하여 비정상적인 측정값을 필터링 했다. 셋째로는 전처리된 거리 값은 서버 전송을 위해 정의된 구조체 기반의 데이터 패킷 형태로 재구성했다.

이와 같은 처리 과정을 종합한 흐름은 Fig. 2에 제시되어 있으며, 서버는 해당 데이터를 기반으로 위치 계산 알고리즘을 실행한다.

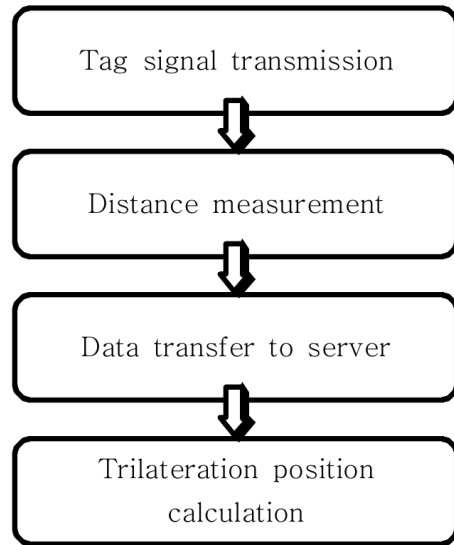


Fig. 2. Flow of distance measurement and position calculation

3.3 How to apply the location calculation algorithm

연산의 효율성과 실시간성을 확보하기 위하여 삼변측량의 연립방정식을 선형화하여 적용하였다. 먼저 3개의 거리식 중 2개를 선택하여 차분(differential) 형태의 선형 방정식으로 변환하였다. 이를 통해 비선형으로 된 항을 제거한 다음 2x2 행렬 연산을 통하여 태그의 2차원 좌표(x, y)를 도출했다. 이후 계산된 위치 정보는 서버 내부의 시각화 모듈로 전달되어 실시간으로 갱신된다. 그로 인해 최적화 연산 구조는 처리량을 감소시키며, 제안된 시스템이 10 Hz 이상의 갱신 속도로 안정적인 위치 추정을 수행할 수 있도록 한다.

IV. Experiment and Results

제안된 UWB 기반인 RTLS 시스템 성능을 평가하고자 수행된 측정 절차, 실험 환경, 위치 추정 결과 및 오차 분석 내용을 제시하였다. 실험은 6 m x 6 m의 실내 공간에서 총 300회 측정으로 이루어졌으며, 실제 좌표와 추정 좌표 간의 차이를 기반으로 시스템의 정량적 정확도를 분석하였다.[5]

4.1 Experimental environment structure

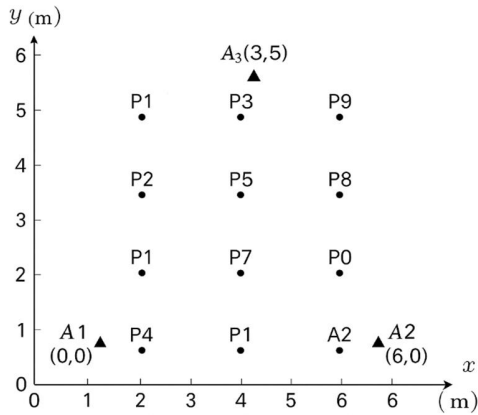


Fig. 3. Experimental setup in the indoor testbed

실험은 Fig. 3와 같이 6 m × 6 m의 사각형 실내 공간에서 수행되었다. 세 개의 UWB 앵커(A1, A2, A3)는 정삼각형 형태로 배치하여 삼변측량(Trilateration) 알고리즘의 계산 기하학적 안정성을 확보하였다.[9] 태그(Tag)는 총 10개의 측정 지점(P1-P10)에 순차적으로 배치되었으며, 각 지점에서 30회씩 반복 측정하여 총 300개의 데이터 샘플을 수집하였다. 실험 중 외부 간섭을 최소화하기 위해 금속 물체를 제거하고, 동일한 높이에서 측정이 이루어지도록 환경을 조정하였다. 앵커의 좌표는 “A1 = (0.0,0.0), A2 = (6.0,0.0), A3 = (3.0,5.2)” 설정 후 태그의 실제 위치는 실험 공간 내에서 균등하게 분포되도록 설정하였다.

4.2 Location estimation results

각 측정 지점에서 획득된 30회의 거리 값은 3회 이동평균 필터를 통과한 후 서버로 전달되었으며, 선형화된 삼변측량 알고리즘을 통해 태그의 추정 좌표가 계산되었다.[7] Fig. 4는 실제 좌표(Actual Position)와 추정 좌표(Estimated Position)를 비교한 산점도이다.

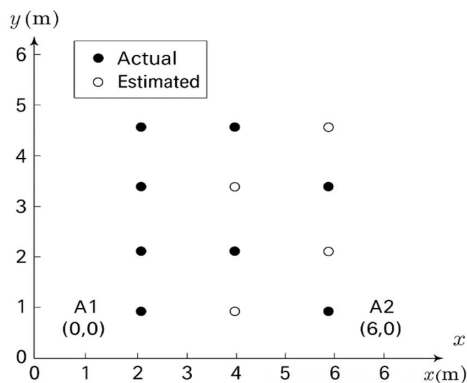


Fig. 4. Actual vs. estimated tag positions in the indoor testbed

그림에서 확인할 수 있듯이, 추정 위치는 전체적으로 실제 위치 근처에 분포하나 일부 지점에서는 오차 벡터가 일정 방향으로 편향(Bias)되는 경향을 보였다. 특히 외곽 지점(P7 및 P9)에서 상대적으로 큰 오차가 발생하였다.[3]

4.3 Mean Error and RMSE Analysis

각 지점의 평균 위치 오차를 나타내는 MEAN ERROR(M)와 예측한 값과 실제 값 차이의 대한 평균 크기를 나타내는 RMSE(M)에 대한 결과를 Table 1에 정리했다. 또한 RMSE(M)에 대한 공식을 Equation (2)에 제시했다.

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2]}$$

Equation 2. Root Mean Square Error (RMSE) calculation formula

Table 1. Localization performance summary (mean error & RMSE)

지점 (Point)	Mean Error (m)	RMSE (m)
P1	0.14	0.16
P2	0.19	0.21
P3	0.16	0.19
P4	0.19	0.22
P5	0.12	0.14
P6	0.17	0.18
P7	0.24	0.26
P8	0.18	0.21
P9	0.26	0.28
P10	0.18	0.19

평균 오차(전체): 18.3 cm (0.183 m)

평균 RMSE: 20.4 cm (0.204 m)

분석 결과, 실험 공간 중앙에 위치한 지점(P5)에서 가장 낮은 오차가 관찰됐다. 이는 앵커 배치의 중앙 영역이 삼변측량 계산의 조건수(Condition number)를 가장 안정적으로 유지하기 때문으로 해석된다. 반면 외곽 지점(P7, P9)에서는 상대적으로 큰 오차가 발생했다. 이는 앵커와 태그 간 거리 불균형, 신호 다중경로 현상(Multipath), 앵커 배치의 기하학적 한계에 기인한다.

4.4 Error distribution and characteristic analysis

전체 300회의 측정값을 기반으로 한 오차 분포는 다음과 같은 특성을 보였다. 첫 번째 실험 결과로 오차의 68%가 0.1~0.2m 범위에 존재했다. 이는 시스템 절반 이상이 20cm 이내의 측위 정확도를 유지 했다는 걸 증명한다. 두

번째 실험에서 95% 오차가 0.1~0.28m 범위 내에 존재한다는 사실이 확인됐다. 이는 안정적인 UWB 기반 위치 추정 성능을 나타낸다. 일부 지점에서 방향성 편향(Bias)이 관찰됐다. P7에서는 y축 방향으로 지속적인 편차가 발생했다. 이는 실내 반사 환경의 구조적 특성으로 판단된다.

실측 기반 UWB RTLS 성능과 기존 연구 정확도 비교를 했다. 평균 오차 18.3cm로 기존 Wi-Fi/BLE 방식의 RSSI 기반 평균적인 오차인 1m에서 3m에 비해 높은 정확도를 달성한 수치이다. 또한, 기존 UWB 기반 연구 평균인 15cm에서 30cm와 유사한 수준의 성과를 보인다.

4.5 Summary of Experimental Results

제안된 UWB 기반 RTLS 시스템은 중앙 영역에서 높은 측위 성능을 보였다. 외곽에서도 평균 20 cm 내외의 오차를 유지했다. 전체적으로 안정적이고 일관된 위치추정 성능을 나타냈다. 본 시스템은 실내 물류 이동체, 자율주행 로봇, 안전 모니터링, 애완견 이동 경로 파악 등의 실시간 위치 추적하는 서비스에 적용 가능성을 확인하였다.

V. Conclusion

본 연구에서는 UWB를 기반으로 실내 위치추적 시스템(RTLS)을 설계 후 구현하여 6 m × 6 m 규모의 실내 환경에서 실험하여 시스템의 정확도와 안정성을 평가하였다. 제안된 시스템은 3개의 앵커를 정삼각형으로 배치한다. ToF을 기반으로 거리 측정과 선형화된 삼변측량 알고리즘을 적용함으로써 평균 18.3 cm의 위치 추정 오차라는 목표에 달성하였다. 이는 기존 RSSI 기반 실내 측위 방식에 비해 높은 정확도를 제공함과 동시에 UWB 기반 RTLS의 실질적 활용 가능성을 뒷받침하는 보여주는 결과이다.[1][2][10]

실험 분석 결과로는 실험 공간 중앙부에서는 안정성이 높은 위치 추정 성능이 나타났다. 반대로 외곽 지점에서는 상대적으로 큰 오차가 나타났다. 이는 삼변측량의 기하학적 구조와 앵커 간 거리 불균형으로 인한 조건수 악화이다. 그리고 실내 환경에서의 다중경로(Multipath) 영향으로 비롯하는 것으로 해석된다. 이러한 특성은 UWB 기반 RTLS 설계 시 앵커 배치 전략의 중요성을 다시 강조하고 있다. 또한 본 연구에서는 거리 데이터의 전처리(평균 필터 및 Outlier 제거), 실시간 좌표 계산, 시각화 기능을 포함하고 있는 통합형 RTLS 시스템을 하나의 구조로 구현한 점에서 기존의 연구와 차별되는 실증적 기여를 가진다.

개발된 시스템은 실내 물류 이동체 추적, 자율주행 로봇 네비게이션, 안전 모니터링 등 다양한 실시간 위치 기반 서비스에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다. 향후 뒤와 같은 확장이 필요하다. 첫 번째로는 IMU 센서 융합을 통해 측위 안정성과 방향성 추정 성능을 향상하는 연구가 요구된다. [8] 두 번째로는 다중 태그(Multi-tag)로 동시 추적 기능을 추가하여 실제 산업 환경에서의 활용성을 높일 필요성이 있다. 세 번째로는 3차원 위치 추정(높이 포함) 및 복잡한 실내 구조에서 NLOS 환경 대응 알고리즘 개발이 필요로 할 뿐 아니라 실제 동적 환경에서 태그가 이동할 때의 경로 추적 성능을 검증하는 추가적인 실험이 요구된다.

본 연구에서 설계한 RTLS 시스템은 향후 다양한 실내 환경을 바탕으로 위치 기반 서비스 기술로 활용될 수 있으며, 실시간 정밀 위치추적 분야의 발전에 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] Z. Zhang, "UWB-Based Indoor Localization Techniques: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2392-2418, 2020. DOI: 10.1109/COMST.2020.3019151
- [2] S. Alarifi, M. Al-Salman, M. Alsaleh, A. Alnafessah, S. Al-Hadhrani, M. A. Al-Ammar, and H. S. Al-Khalifa, "Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances," *Sensors*, vol. 16, no. 5, pp. 1-36, 2016. DOI: 10.3390/s16050707
- [3] J. Lee and K. Pahlavan, "Performance Comparison of ToF and RSS-Based Indoor Localization," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 14439-14450, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2892968
- [4] D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, and M. Z. Win, "Ranging and Localization for UWB Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 404-426, 2009. DOI: 10.1109/JPROC.2008.2008845
- [5] M. Ridolfi, S. Van de Velde, J. Goovaerts, and E. De Poorter, "Experimental Evaluation of UWB Indoor Positioning for High Accuracy Applications," *Sensors*, vol. 18, no. 7, pp. 1-21, 2018. DOI: 10.3390/s18072077
- [6] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, 2019. DOI: 10.1109/COMST.2019.2911558
- [7] S. Gezici, "A Survey on Wireless Position Estimation," *Wireless Personal Communications*, vol. 44, no. 3, pp. 263-282, 2008. DOI: 10.1007/s11277-007-9373-1

- [8] H. Wymeersch, S. Maranò, W. M. Gifford, and M. Z. Win, "A Bayesian Approach to Positioning Using UWB Signals," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 3, pp. 1527–1535, 2008. DOI: 10.1109/TVT.2007.907582
- [9] C. Gentner, M. Ulmschneider, S. Sand, and A. Dammann, "Multipath Assisted Positioning for UWB," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 7, pp. 3797–3811, 2015. DOI: 10.1109/TWC.2015.2416205
- [10] P. Barsocchi, "Evaluating RSSI-Based Indoor Localization with Different Devices," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 12, pp. 3351–3366, 2014. DOI: 10.1109/TMC.2014.2322324

Authors



Hoeteak Jung entered the M.S. program in Computer Engineering at Kongju National University, Korea, in 2025 and has completed his second semester. His research interests focus on artificial intelligence and Internet of

Things (IoT) technologies, particularly in the development of intelligent systems and data-driven applications. He is interested in applying AI techniques to real-world automation and smart environments.



Seungmin Oh received the B.S. and Ph.D. degrees in computer engineering from Chungnam National University, Republic of Korea, in 2009 and 2015, respectively. From 2016 to 2019, he was a Postdoctoral

Researcher with the Network Research Laboratory, University of California at Los Angeles, Los Angeles, CA, USA. Since 2019, he has been an Associate Professor with the Department of Computer Science and Engineering, Kongju National University. His research interests include routing protocols and applications for sensor networks, the Internet of Things (IoT), and the Internet of Vehicles (IoV).