

IMU-Free UWB 기반 단일 앵커 측위 시스템

오 은 섭*, 박 지 웅*, 고 영 배^o

IMU-Free UWB-Based Single Anchor Localization System

Eunseob Oh*, Jiwoong Park*, Young-Bae Ko^o

요 약

무선 기술 기반의 측위 시스템은 최근 모바일 및 IoT 환경을 포함한 다양한 분야에서의 위치 측정과 서비스 제공에 중요한 역할을 하고 있다. 특히, Ultra-Wideband(UWB) 기술은 정밀한 측위 성능을 제공할 수 있는 능력으로 주목을 받고 있다. 일반적으로 측위 시스템은 다중 앵커를 기반으로 하지만, 최근의 연구는 단일 앵커 시스템의 가능성에 대해 연구가 진행되고 있다. 대다수의 연구에서는 추가적인 센서를 통해 태그의 움직임을 추적하고 위치를 결정하는 데 중점을 둔다. 본 논문은 추가적인 센서 없이 단일 앵커만 사용한 방법을 제안한다. 제안 방법은 거리 데이터 기반으로 태그의 속도를 추정하여 Angle of Arrival(AoA) 오차를 보정하고 위치를 결정한다. 실험 결과, 제안 방법이 추가적인 센서 없이 단일 앵커만으로 보정된 AoA로 태그의 위치 측위한 결과 IMU를 사용한 방법보다 좋은 측위 성능을 보여준다.

키워드 : UWB, AoA, 통신, 측위, 단일 앵커, 확장 칼만 필터

Key Words : UWB, AoA, Communication, Localization, Single Anchor, EKF

ABSTRACT

Wireless technology-based positioning systems have become integral in location measurement and service provision across various sectors, including mobile and IoT environments. In particularly, Ultra-Wideband (UWB) technology is noted for its capacity to deliver accurate positioning performance. Positioning systems generally rely on multiple anchors; however, recent studies are investigating the feasibility of single-anchor systems. Most research in this area concentrates on using additional sensors to track the movement of tags and ascertain their locations. This paper suggests a novel approach that utilizes only a single anchor without the need for extra sensors. This method calculates the velocity of the tag using distance data, compensates for Angle of Arrival (AoA) inaccuracies, and determines its position. The experimental results indicate that this approach, employing a single anchor and no additional sensors to correct AoA, outperforms techniques that use Inertial Measurement Units (IMUs) in terms of positioning accuracy.

※ 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020R1A2C1102284)

♦ First Author : Ajou University Department of AI Convergence Network, zking2@ajou.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Ajou University Department of AI Convergence Network, youngko@ajou.ac.kr, 종신회원

* Ajou University Department of AI Convergence Network, z7080z@ajou.ac.kr

논문번호: 202311-149-C-RE, Received November 21, 2023; Revised December 27, 2023; Accepted December 29, 2023

I. 서론

높은 정확도로 측위할 수 있는 기술은 네비게이션^[1], 응급 구조 상황^[2], Internet of Things(IoT)^[3]를 포함한 다양한 분야에 도움이 된다. 측위 기술은 오랫동안 다양한 환경에서 연구되어 왔다. 신뢰할 수 있고 정확도가 높은 위치 서비스를 제공하기 위해, 무선 주파수 기반의 다양한 측위 기술들이 연구가 진행되었다.

현재 측위 방법 중 Bluetooth^[4], Wi-Fi^[5], Radio Frequency Identification(RFID)^[6] 등 무선 기술 기반 방식들이 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 무선 기술들을 사용하여 통신 가능 거리가 길고, cm 단위의 측위 정확도를 달성하는 것은 어렵다.

UWB(Ultra-Wideband) 기술이 실내 측위 시스템을 위해 새로운 무선 기술로 채택되고 있다. UWB 기술은 매우 낮은 듀티 사이클을 사용하여 큰 대역폭에 걸쳐 매우 짧은 펄스를 전송하기 때문에, 짧은 시간 간격으로 신호를 구별할 수 있어 centimeter 단위 높은 정확도로 거리 측정이 가능하다. 또한 다중 경로에 대한 내성도 강한 이점을 가지기 때문에 다양한 환경의 측위 어플리케이션에 활용할 수 있다^[7].

이러한 UWB 기반 측위 시스템은 대부분 앵커가 3개 이상 설치된 환경에서는 일반적으로 Time Difference of Arrival(TDoA)^[8]와 다변 측량(Trilateration)^[9]을 사용한다. TDoA 방식은 각 앵커에 신호가 도달하는 데 걸리는 시간 차이를 기반으로 태그의 위치를 결정하는 방법이다. 앵커 간 통신의 충돌이 발생할 경우를 없애기 위해, 앵커간 동기화와 스케줄링 과정이 필요하다. 다변 측량은 태그와 앵커까지의 거리를 측정하여 태그의 위치를 결정하는 방법이다. 여기서 거리는 신호가 앵커까지 도달하는데 걸리는 시간을 측정하여 거리를 계산한다. 이 방법은 태그의 위치를 한 지점으로 특정하기 위해서는 최소 3개의 앵커로부터의 거리가 필요하다. 간단하게 구현이 가능하지만, 앵커가 최소 3개가 필요하다.

이러한 문제들을 해결하기 위하여, 단일 앵커 측위만 존재하는 환경에서의 연구들이 존재한다. 단일 앵커 환경에서는 다중 앵커에서 얻지 못하는 부족한 데이터를 얻기 위해 Inertial Measurement Unit(IMU) 같은 추가적인 센서를 태그에 장착하여 데이터를 퓨전하여 위치를 얻을 수 있다. 다른 방법들로는 가상 앵커를 사용하여 다중 앵커가 있는 환경처럼 태그의 위치를 측정하거나, 앵커에 추가적인 안테나를 장착하여 다양한 신호 데이터를 기반으로 태그 위치 추정 연

구가 있다. 선행 연구들은 추가적인 센서를 사용함으로써 데이터 보정과 시스템 복잡도가 증가하는 단점이 존재한다.

재난 상황, 축제로 인한 일시적인 서비스 제공을 위해서는 간단하게 구현할 수 있고, 저렴한 비용으로 사용자들이 사용할 수 있는 어플리케이션이 필요하다. 본 논문에서는 간단하고 저렴한 단일 UWB 앵커 측위 시스템 방법을 제안한다. 단일 UWB 앵커만으로도 거리와 AoA를 측정해 태그의 위치를 찾아낼 수 있다. 하지만, AoA의 오차로 인하여 태그의 위치를 높은 정확도로 찾기 어렵다. 따라서, 거리 값을 활용해 태그의 속도를 추정하고 EKF를 활용하여 움직이는 태그의 AoA 오차를 보정하고 실내에서의 측위 정확도를 향상시킨다. 본 논문에서 제안하는 기법을 통해 단일 앵커로 인한 전체적인 비용 절감과 추가적인 센서 없이도 추가적인 센서가 있는 시스템보다 좋은 성능으로 태그의 위치를 측위할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 UWB 단일 앵커 시스템의 정의와 특성, 단일 앵커 시스템 연구에 관한 설명 및 한계점을 서술하고, 3장에서는 제안하는 기법의 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 제안 알고리즘을 실제 환경에서 실험하고 성능을 분석한다. 마지막으로, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

기존 UWB 측위 시스템은 적어도 세 개의 앵커가 필요했지만, 앵커 수의 증가는 비용과 시스템의 복잡도가 증가하게 된다. 이러한 단점을 해결하고자 비용을 줄이고 시스템을 단순화하기 위해 연구가 진행되었다.

2.1 Virtual Anchor기반 UWB 측위

[11]에서는 무선 통신에서 발생하는 Multi-Path Component(MPC)를 사용한다. 다른 반사된 신호를 가상 앵커에서 발생한 신호로 하여 거리 계산을 하고, 가상 앵커와 실제 앵커의 데이터를 통해 여러 개의 앵커가 있는 것과 비슷하게 태그의 위치를 계산한다. [12]에서는 비용 감소와 시스템 간소화를 위해 SALMA 기법을 제안했다. SALMA는 [11]과 비슷하게 다중 경로를 신호에서 CIR 정보를 사용하여 다중 앵커 UWB 시스템과 비슷한 정확도를 보여준다. [11],[12]는 시스템에 가상 앵커를 구축하여 앵커에서 전송된 신호가 벽에 의한 굴절로 인해 생긴 다중경로 신호를 가상 앵커에서 발생한 신호로 한다. 가상 앵커

를 사용할 경우 8cm 미만의 오차를 얻을 수 있다. 가상 앵커를 사용하기 위해서는 시스템을 구현하는 곳의 지도 정보를 사전에 필요하다. 또한, 신호의 특성을 통한 가상 앵커의 위치를 정확하게 지정해야만 위와 같은 낮은 오차를 결과를 얻을 수 있다. 또한, 움직이지 태그의 경우 가상 앵커와의 위치가 항상 반사된 신호의 일직선상에 있지 않을 경우 낮은 정확도로 측위한다. [13]에서는 앵커가 Hilbert curve를 따라 이동하며 태그를 찾는 방법을 제안했다. 움직이는 앵커에서 항상 일정한 위치의 가상 앵커가 6개를 사용하여 태그를 측위한다.

2.2 IMU와 UWB 혼합 측위

[10]에서는 단일 UWB 센서와 IMU를 결합한 방법을 제안하였다. UWB는 거리 측정과 속도 계산을 위해 사용하고 IMU는 로봇의 방향을 알고 위해 사용했다. EKF를 활용해 데이터를 결합하여 로봇을 계속 추적할 수 있는 것을 보여준다. [14]에서는 단일 UWB 앵커와 많은 태그들의 정보를 활용해 협력 측위 방법을 제안하였다. 모든 태그의 IMU 장치가 장착되어 있고, 시간 정보를 기반으로 측정 데이터를 통해 태그의 위치를 예측하고 주변 태그의 상대적인 위치도 측위한다. IMU와 UWB 센서가 같이 사용된 시스템에서는 IMU 센서의 오차를 보정하고 데이터를 합치기 위해 필터링 알고리즘이 필수적이다. 그로인한 시스템의 복잡도와 추가적인 센서로 인해 하드웨어 비용이 증가하게 된다.

2.3 AoA 기반 UWB 측위

[15],[16]에서는 다 수의 안테나를 장착한 단일 UWB 앵커 시스템을 제안한다 [15]는 8개의 안테나를 4개씩 2개의 층에 설치하여 안테나 배열을 사용한다. 고정된 안테나 간 거리를 기반으로 신호의 AoA를 측정하여 3D 측위 시스템을 제안했다. [16]에서는 단일 앵커 시스템에서 딥러닝 방식을 사용해 오차를 줄이는 방법을 제안했다. 8개의 안테나를 일정한 간격을 두고 원형으로 설치하여 NLOS 오차를 줄이고 측위 정확도가 향상된다. 안테나가 많이 설치되어 있으면 AoA 정확도가 높아지는 것을 보여준다. 그러나, Multi Antenna 앵커는 안테나가 많은 설치로 인해 넉넉한 공간이 필요하고, 앵커 주변이 벽으로 막혀 있으면 정확도가 낮아진다.

III. 제안 기법

3.1 시스템 개요

단일 앵커 측위 알고리즘들은 UWB와 추가적인 센서를 구성하여 시스템을 설계한다. 센서를 사용한 시스템은 UWB 측정 데이터와 센서 데이터를 합치기 위해 시스템의 복잡도와 비용이 증가하게 된다.

본 논문에서는 추가적인 센서 없이 단일 UWB 앵커 측위 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템의 구조는 그림 1과 같다. 안테나를 통해 AoA 값도 측정할 수 있고, 거리를 측정할 수 있다. 거리와 AoA로 삼각함수 공식을 활용해 태그의 위치를 측위할 수 있다. AoA를 측정할 때 다양한 환경적 요인으로 인해 오차가 발생하여 위치 정확도가 낮아진다. 이를 보정하고자 거리 값을 통해 태그의 속도를 추정하고, EKF를 활용해 측정된 속도, 거리, AoA 값을 기반으로 AoA 오차를 보정하여 태그의 위치를 찾는다.

즉, 추가적인 센서가 없는 단일 UWB 앵커 측위 시스템은 기존 추가적인 센서를 사용한 연구들이 가지고 있던 데이터를 합치는 과정이 필요한 시스템의 복잡도를 단순화하고 비용을 줄인다.

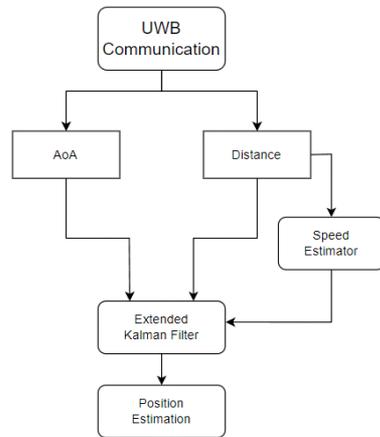


그림 1. 시스템 구조
Fig. 1. System Architecture

3.2 속도 추정

그림 2와 같이, 태그가 이동할 때 속도는 측정된 거리와 시간 값을 기반으로 추정한다. 태그가 앵커에게 UWB 통신을 시작하며 각 지점에 대해 A, B, C, D 지점에서 측정된 거리와 시간 값의 쌍이 (D_0, t_0) , (D_1, t_1) , (D_2, t_2) , (D_3, t_3) 라고 가정한다. $D_0 = \overline{OA}$ 는 앵커와 A 지점의 직선 거리이다. $r = \overline{AB}$ 는 A와 B 지점

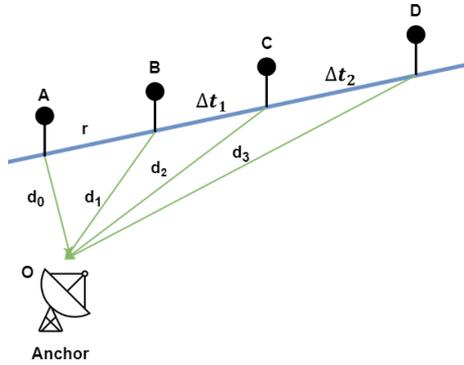


그림 2. 속도 추정 모델
Fig. 2. Speed Estimator Model

사이의 거리이다. 피타고라스 방정식을 사용하여 움직이는 태그의 속도를 계산할 수 있다. D 지점에서 태그의 속도(v)를 아래의 방정식을 통해 계산할 수 있다¹⁰⁾.

$$\begin{bmatrix} D_1^2 \\ D_2^2 \\ D_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_0^2 + r^2 \\ D_0^2 + (r + v * \Delta t_1)^2 \\ D_0^2 + (r + v * \Delta t_2 + v * \Delta t_3)^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서

$$\Delta t_1 = t_2 - t_1; \Delta t_2 = t_3 - t_2$$

위의 2개의 방정식에서, v 에 대해서 정리하면 다음과 같이 정리된다.

$$v = \frac{\sqrt{(D_3^2 - D_2^2) - \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot (D_2^2 - D_1^2)}}{\Delta t_1^2 + \Delta t_1 * \Delta t_2}$$

계산된 v 값을 현재 태그의 속도로 한다. 거리와 시간 값을 배열로 저장하여 움직이는 태그의 속도를 지속적으로 계산한다. 계산된 속도는 오차를 최소화하기 위하여 윈도우 필터를 통해 평균 속도를 구하여 AoA 오차 보정을 위해 사용된다.

3.3 EKF를 활용한 태그 위치 추정

본 논문에서 제안하는 추가적인 센서 없이 단일 UWB 앵커만을 사용한 측위 시스템은 EKF를 활용한다. 필터링 알고리즘 중 하나인 EKF는 로봇 공학, 내비게이션 시스템, 신호 처리 등 다양한 분야에서 널리 사용되는데, 선형 시스템의 상태를 추정하기 위한 칼만 필터에서 비선형 시스템의 상태를 추정하 위해 확

장되었다. EKF는 시스템의 현재 추정 상태에서 비선형 함수를 통해 선형화를 하여 비선형 시스템에 대한 상태 추정이 가능해진다. 비선형 함수를 통해 다음 상태를 예측하고 실제 측정된 값과 비교하여 보정하며 오차 공분산을 업데이트함으로써 태그의 위치를 추정할 수 있게 된다. 따라서, 태그에 대한 속도, 거리, AoA 값을 측정하고, EKF를 활용해 AoA를 보정하며 태그의 위치를 추정할 수 있다.

EKF는 2가지 단계를 거치면서 태그의 위치를 추정한다. 첫번째 단계는 예측 단계이다. 태그의 현재 상태와 제어 입력을 사용하여 다음 상태를 예측한다. 다음으로 두번째 단계에서 실제로 측정된 값과 예측된 측정값을 비교하여 보정을 하고 최종적인 상태를 업데이트 한다. 이러한 과정을 통해 EKF는 새로운 측정 데이터를 기존의 상태 추정에 통합하여, 시스템의 상태를 보다 정확하게 추정할 수 있다.

제안 시스템의 알고리즘은 먼저 태그의 상태 벡터를 초기화한다. EKF의 예측 단계에서 태그의 위치를 예측하기 위해 상태 벡터를 입력값으로 한다. 상태 벡터와 상태 전이 모델을 사용하여 태그의 다음 위치를 예측하고 예측된 상태의 불확실성을 나타내는 공분산 행렬도 함께 계산한다. 업데이트 단계는 측정된 데이터와 상태 벡터를 통해 상태 추정치를 보정한다. 계산된 공분산 행렬과 상태 추정치를 기반으로 칼만 이득을 계산한다. 측정값과 예측된 상태 간의 차이를 이용해 상태 벡터와 공분산 행렬을 업데이트 한다. 위의 단계들을 시스템이 종료될 때까지 반복하면서 태그의 위치 계산한다. 이 알고리즘은 태그의 위치를 추정하기 위한 시스템적 접근 방식을 제공하며, EKF를 사용하여 불확실성을 최소화하고 정확도를 높인다.

Algorithm 1. Extended Kalman Filter Algorithm for AoA error correction

```

input :  $x, y, AoA, v$ 
output :  $x, y$ 
Initialize :  $x_k$ 
While True do:
    Distance, AoA, time = UWB Communication
    Speed = SpeedEstimator(Distance, time)
    averVel = AverageSpeed.append(Speed)
     $x_{k+1} = EKF.predict(x_k)$ 
     $x_{k+1|k+1} = EKF.update(x_k, AoA, Distance, averVel)$ 
end
    
```

3.3.1 EKF Predict

예측 단계에서 사용되는 상태 벡터(\bar{x}_k)는 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{x}_k = [x_k, y_k, AoA_k, v_k] \quad (2)$$

여기서, x_k, y_k 는 태그의 좌표를 나타내고, AoA_k 는 AoA를 나타내며, 마지막으로 v_k 는 태그의 평균 속도를 나타낸다. 좌표는 태그의 상대적 위치 추적에 필수적이며, AoA는 UWB 신호의 방향성 정보를 제공하여 위치 추정을 도와준다. 속도 정보는 태그의 움직임과 위치 변화를 예측하는데 사용된다. 상태 전이 모델(F)는 현재 상태에 기반하여 다음 시간 단계의 태그 상태를 예측하는 모델이다. F는 단일 UWB 앵커 시스템에서 태그의 움직임을 효과적으로 추정할 수 있는 간단하면서도 효율적인 행렬을 제공한다. 이는 추가 센서 없이도 위치를 추정이 가능하다.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t \cdot \cos(AoA_k) \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \cdot \sin(AoA_k) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, Δt 는 측정된 시간 차를 나타낸다. 이 모델은 태그의 위치와 속도, 그리고 AoA간의 관계를 선형적으로 근사화한다.

v_k 는 해당 단계에서의 프로세스 노이즈를 나타낸다. 상태 전이 모델은 AoA에 의해 계산되는 x 축과 y 축을 따라 태그의 이동을 반영하여 태그의 위치를 예측할 수 있다.

3.3.2 EKF Update

업데이트 단계에서는 예측된 상태와 실제 측정값 간의 차이를 분석하여 시스템의 상태 추정치와 추정 불확실성을 보정한다. 이 과정에서 칼만 이득(Kalman Gain)이 핵심적인 역할을 한다. 칼만 이득은 예측된 상태의 불확실성과 측정 노이즈를 고려하여 계산되며, 이를 계산하기 위해서는 먼저 측정 모델을 정의해야 한다. 측정 모델(H)은 시스템의 상태 변수와 실제 측정값 간의 관계를 나타내는 중요한 요소이다. 이 모델은 상태 변수를 측정 벡터로 변환하는 기능을 수행하며, 본 시스템에서의 측정 벡터는 거리, AoA, 속도를 포함한다. 측정 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} & \frac{y_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서 첫 번째 행은 태그의 예측된 위치를 사용하여 앵커와의 거리를 계산한다. 이는 거리 측정이 x_k 와 y_k 에 대한 관계를 나타낸다. AoA 측정은 태그가 현재 바라보고 있는 방향에 따른 앵커와의 각도를 나타내며, 이는 상태 변수 \bar{x}_k 의 AoA_k 와 연관되어 있다. 마지막으로, 속도 추정은 상태 변수 \bar{x}_k 의 v_k 와 관련이 있다.

IV. 성능 검증

이 장에서는 제안된 시스템의 성능을 검증하기 위한 실험 및 결과를 상세히 설명한다.

4.1 실험 구성

제안된 시스템을 평가하기 위해 먼저 실험에 사용된 장비를 그림 3과 같이 구성하였다. 먼저, 실내에서 사람들이 많이 사용하는 스마트폰을 태그로 하여 알고리즘을 구현하고 검증하고자 Apple사의 iPhone 12 Pro를 사용하였다. 해당 장비는 UWB 통신이 가능한 Apple의 자체 개발 U1 Chip이 장착되어 있다. 통신 주기는 0.1초 주기로 하였다. 앵커는 Qorvo 사의 상용 제품인 DWM 3001CDK를 사용하였다. 해당 Chip은 UWB 통신을 통해 거리와 AoA 측정이 가능하고 제안 알고리즘에서 사용하는 모든 데이터를 측정할 수 있다. 또한, 제안 알고리즘의 측위 정확도를 측정하고자 Apple사의 iPhone 11 Pro Max를 사용하였다. 카메라와 IMU 장치를 기반으로 정확도 높은 VIO(Visual-Inertial Odometry)를 구현하여 제안 알고리즘과 비교한다.

실험은 사무실과 개방된 홀 2가지 형태의 실내에서



그림 3. 실험 장비
Fig. 3. Experiment Device

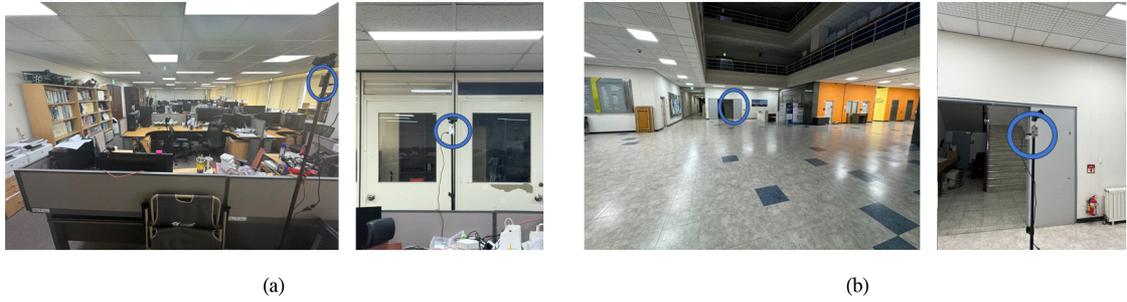


그림 4. 실험 장소 (a) 사무실 환경, (b) 실내 개방된 홀
Fig. 4. Experimental Place (a) office environment, (b) indoor open hall

실제로 들고 움직이고 Stella N1 로봇으로 수행하였다. 실험 환경에서 태그와 앵커는 삼각대와 짐벌을 사용해 항상 같은 높이를 유지할 수 있도록 하였다. 그림 4은 실험환경을 보여주고, 파란색 원의 있는 것이 앵커이다.

4.2 UWB AoA 성능 평가

알고리즘 검증에 앞서 UWB의 AoA에 대한 특성과 오차를 분석하였다. 그림 5는 하나의 UWB 앵커와 태그의 위치 10곳을 그림으로 보여준다. A1 ~ A5는 앵커로부터 y축 값이 540cm 떨어진 곳에 위치하며, 각 위치는 90cm 간격으로 떨어져 있다. A6 ~ A10은 A1 ~ A5의 y값 좌표보다 360cm 멀리 떨어진 곳에 위치하며, 간격은 똑같이 90cm로 일정하게 떨어져 있다. 해당 실험에서 높은 정확도로 거리 값과 AoA를 측정하기 위해 태그와 앵커는 같은 높이를 유지하고 모두 정지상태로 측정하였다. 각 위치에서 앵커와의 실제 거리를 기반으로 각도를 구하고 제안 알고리즘에서 계산된 AoA와 AoA를 측정한다. 실제 각도와 측정된 각 AoA와의 오차를 계산한 결과가 그림 6에 보여진다. 파란 막대 그래프는 측정된 AoA와 실제 각도의 차이를 나타내고, 주황색은 제안 알고리즘을

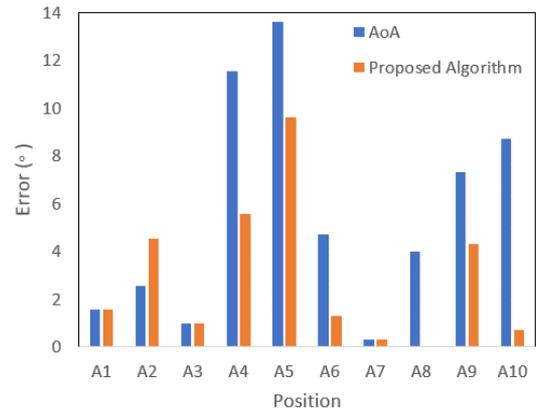


그림 6. AoA 오차 결과
Fig. 6. AoA Error Result

통해 보정된 AoA와 실제 각도의 차이를 나타낸다. 기존의 AoA 측정 방식은 +θ 값에서는 오차가 낮은 것을 확인할 수 있고, -θ 값에서 오차가 크게 늘어난 것을 확인할 수 있다. 두 그래프를 비교한 결과, 제안 알고리즘으로 보정된 AoA가 실제 각도와의 오차가 적은 것을 확인할 수 있다.

4.3 제안 알고리즘 측위 성능 평가

제안 알고리즘의 보정된 AoA와 측정되는 AoA를 통해 태그의 위치 측위 정확도를 실험하였다. 그림 7은 각 환경에서 태그의 이동 경로를 보여준다. 삼각형은 앵커를 나타내고, 마지막으로, 주황 선은 태그의 이동 경로이다. 실험에는 선과 비슷한 경로를 수동으로 움직이며 실험하였다. 또한, 로봇을 활용해 IMU를 사용한 알고리즘을 구현하여 제안 알고리즘과의 성능을 비교를 진행하였다. 실내에서는 실제 이동 경로를 정확하게 측정하기 어렵다. 이동경로를 계산하고 성능을 비교하는 지표를 얻기 위해 VIO를 사용한다.

VIO는 카메라와 IMU 데이터를 분석하여 3D 공간

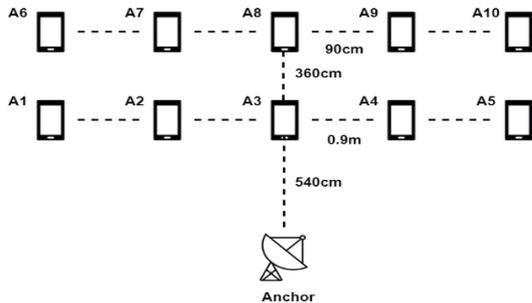


그림 5. UWB AoA 성능 실험
Fig. 5. UWB AoA Performance Experiment

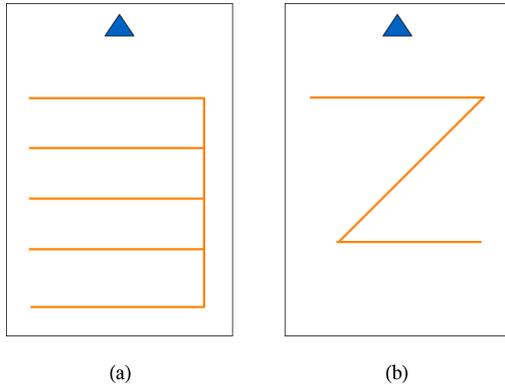


그림 7. 실험 환경 (a) 사무실 환경, (b) 개방 홀
Fig. 7. Experimental Environment (a) Office, (b) hall

에서 위치 및 방향을 결정하는 기술이다.

가장 대표적인 VIO 시스템은 Apple의 ARKit, Google의 ARCore, Intel의 RealSense, Stereolabs의 ZED가 있다. 까다로운 실제 실내 및 실외 시나리오 환경에서 평가된 결과 Appgle의 ARKit이 가장 안정적이고 높은 정확도를 보여주며, 상대적인 오차는 초당 대략 2cm의 drift 오차를 보여준다^[17]. 본 논문에서는 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하고 평가하기 위해 ARKit을 사용한 어플리케이션을 개발하여 Ground Truth 좌표, AoA만으로 계산된 좌표, 제안 기법 추정 좌표를 비교하여 성능을 검증하였다.

그림 8에서 (a)는 사무실 환경에서 오차 결과를 보여준다. (b)는 개방된 홀에서 (a)와 마찬가지로 오차 결과를 보여준다. 제안 알고리즘이 동작할 때 항상 AoA가 측정되어야 하고 LoS가 유지되어야 한다. 태그는 앵커가 있는 x축을 평행으로 바라보게 유지하는

데, 즉 Heading이 고정되어야 한다. 제안 알고리즘은 주황 실선, 비교 기법은 파란 실선으로 표시하였다. (a)에서는 책상들과 사무실 가구들이 있어 직선 운동을 많이 하였다.

제안 알고리즘은 AoA를 보정하여 태그의 위치 오차가 줄어든 것을 보여준다. 결과를 분석할 때, 제안된 알고리즘이 AoA 오차를 보정하여 측위 정확도가 개선된 것을 확인할 수 있다. 수치적으로 보았을 때, 누적 분포 함수에서 80%까지에서 2m 오차 내로 태그 위치를 추정할 수 있다. 그림 9는 IMU를 사용한 EKF 위치 추정 알고리즘과 제안한 알고리즘의 위치 추정 결과를 보여준다. 본 실험은 높이가 낮은 로봇을 이용하였기 때문에 사무실 환경에서는 LoS 유지하는 것이 어려워 개방된 홀에서만 진행하였다. 제안 알고리즘이 이동경로를 따라 추정되는 결과를 보여준다. 하지만, 태그의 위치가 자연스럽게 연결되지 않고 끊기는 것을 볼 수 있다. IMU를 사용한 알고리즘은 로봇의 움직임의 변화로 커브를 돌 때 오차가 발생하여 이동 경로와 다른 추정 결과를 확인할 수 있다. 그렇지만, 태그의 위치 결과가 자연스럽게 이어지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 제안 알고리즘은 위치 추정 정확도가 높고 태그가 방향전환이나 로봇의 움직임 변화가 생겨도 이동 경로를 따라가는 모습을 볼 수 있다. IMU를 사용한 알고리즘은 위치 추정 결과가 연속적으로 이어지는 것을 보여준다. 하지만, 초기 위치에서 보정되는 동안의 위치 추정 결과가 진행되지 않고, 움직임의 변화가 생길 때 오차가 발생한 이후 누적된 오차로 인해 이동경로와 떨어진 곳에 위치를 추정하는 것을 확인하였다.

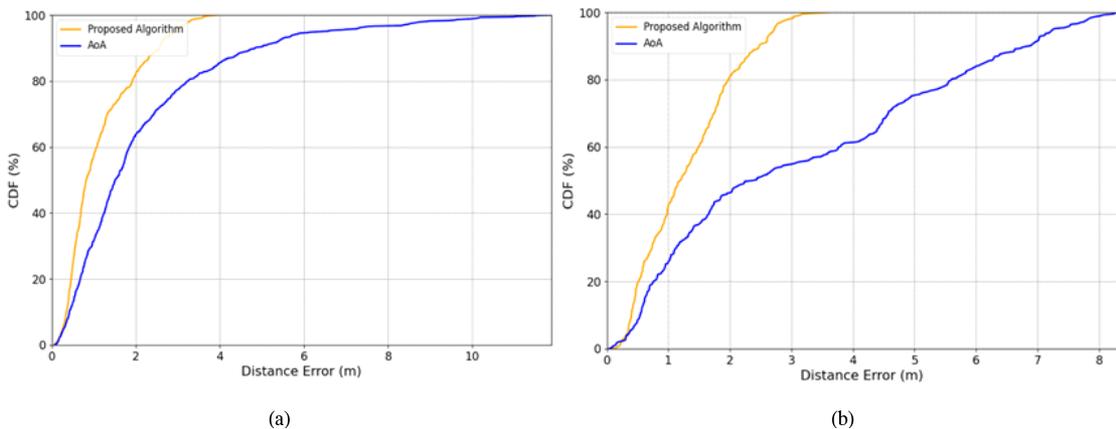


그림 8. 거리 오차 결과 (a) 사무실 환경, (b) 실내 개방된 홀
Fig. 8. Distance Error Result (a) office environment, (b) indoor open hall

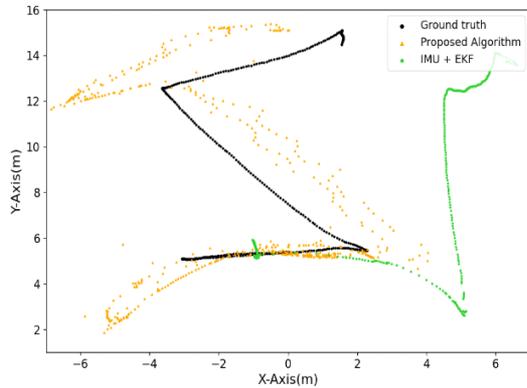


그림 9. 측위 결과 비교
Fig. 9. Comparison of Positioning Result

V. 결 론

본 논문에서는 단일 UWB 앵커만을 사용한 측위 알고리즘을 제안하였다. 거리와 AoA, 속도를 측정하고 EKF를 활용해 AoA를 보정하였다. 먼저 AoA의 오차 성능을 분석하였고, 제안 알고리즘의 AoA 보정 성능을 검증하기 위해 실험을 진행하였다. 실험을 통해 위치 추정 정확도가 개선된 것이 확인되었다. 또한 일정한 속도가 IMU를 사용한 알고리즘과의 측위 결과를 비교함으로써 제안 알고리즘의 측위 성능이 조금 더 좋은 것을 확인하였다. 실제 사람이 들고 이동하는 환경에서는 Heading과 높이가 고정하는 것은 어렵기 때문에, 고정되지 않은 시스템을 고려하여 연구가 필요하다.

References

[1] D. Feng, C. Wang, C. He, Y. Zhuang, and X.-G. Xia, "Kalman-filter-based integration of IMU and UWB for high-accuracy indoor positioning and navigation," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 7, no. 4, pp. 3133-3146, Apr. 2020. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2965115>)

[2] T. Adame, J. Igual, and M. Catalan, "Fast deployment of a UWB-Based IPS for emergency response operations," *Sensors*, vol. 23, no. 9, p. 4193, 2023. (<https://doi.org/10.3390/s23094193>)

[3] S. Mohanty, A. Tripathy and B. Das, "An overview of a low energy UWB localization

in IoT based system," *2021 Int. Symp. Asian Contr. Assoc. IRIA*, pp. 293-296, Goa, India, 2021.

(<https://doi.org/10.1109/IRIA53009.2021.9588718>)

[4] Y. Zhuang, C. Zhang, J. Huai, Y. Li, L. Chen, and R. Chen, "Bluetooth localization technology: Principles, applications, and future trends," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 9, no. 23, pp. 23506-23524, Dec. 2022. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3203414>)

[5] C. Yang and H. R. Shao, "WiFi-based indoor positioning," in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 3, pp. 150-157, Mar. 2015. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7060497>)

[6] T. Sanpechuda and L. Kovavisaruch, "A review of RFID localization: Applications and techniques," *2008 5th Int. Conf. Electr. Eng./Electr., Comput., Telecommun. and Inf. Technol.*, pp. 769-772, Krabi, Thailand, 2008. (<https://doi.org/10.1109/ECTICON.2008.4600544>)

[7] L. Zwirello, et al., "UWB localization system for indoor applications: Concept, realization and analysis," *J. Electr. and Comput. Eng.*, pp. 1-11, 2012. (<https://doi.org/10.1155/2012/849638>)

[8] Y. Cheng and T. Zhou, "UWB indoor positioning algorithm based on TDOA technology," *2019 10th Int. Conf. ITME*, pp. 777-782, Qingdao, China, 2019. (<https://doi.org/10.1109/ITME.2019.00177>)

[9] O. Onalaja, M. Adjrada, and M. Ghavami, "Ultra wideband based multilateration technique for indoor localisation," *IET Commun.*, vol. 8, no. 10, pp. 1800-1809, 2014. (<https://doi.org/10.1049/iet-com.2013.0815>)

[10] Y. Cao, C. Yang, R. Li, A. Knoll, and G. Beltrame, "Accurate position tracking with a single UWB anchor," *2020 IEEE ICRA*, pp. 2344-2350, Paris, France, 2020. (<https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197345>)

[11] M. H. Jespersen, et al., "An indoor multipath-assisted single-anchor UWB localization

method,” *2018 IEEE MTT-S IISWS*, pp. 1-3, Chengdu, China, 2018.

(<https://doi.org/10.1109/IEEE-IWS.2018.8400983>)

[12] B. Großwindhager, et al., “SALMA: UWB-based single-anchor localization system using multipath assistance,” in *Proc. 16th ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.*, pp. 132-144, 2018.

(<https://doi.org/10.1145/3274783.3274844>)

[13] P. Singh, A. Khosla, A. Kumar, and M. Khosla, “Optimized localization of target nodes using single mobile anchor node in wireless sensor network,” *AEU - Int. J. Electr. and Commun.*, vol. 91, pp. 55-65, 2018, ISSN 1434-8411.

(<https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.04.024>)

[14] Y. Liu, R. Yan, B. Lian, and H. Zhao, “Hybrid IMU/UWB cooperative localization algorithm in single-anchor networks,” in *IEEE Geosci. and Remote Sensing Lett.*, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 3511605.

(<https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3165933>)

[15] F. Ge and Y. Shen, “Single-anchor ultra-wideband localization system using wrapped PDoA,” in *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 21, no. 12, pp. 4609-4623, Dec. 2022.

(<https://doi.org/10.1109/TMC.2021.3083613>)

[16] T. Wang, Y. Li, J. Liu, and Y. Shen, “A learning-based NLOS mitigation method for single-anchor SLAM,” *2022 16th EuCAP*, pp. 1-5, Madrid, Spain, 2022.

(<https://doi.org/10.23919/EuCAP53622.2022.9769439>)

[17] P. Kim, et al., “A benchmark comparison of four off-the-shelf proprietary visual - inertial odometry systems,” *Sensors*, vol. 22, no. 24, p. 9873, 2022.

(<https://doi.org/10.3390/s22249873>)

오 은 섭 (Eunseob Oh)



2022년 2월 : 동서울대학교 정보통신과 졸업

2022년 3월~현재 : 아주대학교 대학원 AI융합네트워크학과 석사과정

<관심분야> 정보통신, 통신공학, 인공지능, 사물인터넷(IoT)

[ORCID:0009-0002-2706-5536]

박 지 웅 (Jiwoong Park)



2016년 2월 : 아주대학교 소프트웨어융합과 학사

2016년 3월~현재 : 아주대학교 AI융합네트워크학과 석박통합과정 중

<관심분야> 사물인터넷(IoT), 무선 네트워크, 인공지능

[ORCID:0000-0001-9286-9376]

고 영 배 (Young-Bae Ko)



1996년 9월~2000년7월 : Texas A&M University (College Station) 컴퓨터공학 박사

2000년 8월~2002년 8월 : IBM T.J Watson Research Center (New York) 전임연구원

2002년 9월~현재 : 아주대학교 정보통신대학 소프트웨어학과/AI융합네트워크학과 교수

<관심분야> 차세대 초지능 통신네트워크(6G), 지능형 사물인터넷(IoT), 고신뢰 저지연 네트워크 (URLLC), 지능형 에지컴퓨팅(Edge Intelligence), 고정밀 실시간 측위 기술 및 서비스 등

[ORCID:0000-0002-8799-1761]