

참조 태그 기반 UWB 신호의 거리 측정 성능 분석

이훈열, 박성현, 신상규, 노동진, 김석찬*

부산대학교, 부산대학교, 부산대학교, 부산대학교, *부산대학교

hylee98@pusan.ac.kr, shpark24@pusan.ac.kr, 09sinsangkyu@pusan.ac.kr, rst007@pusan.ac.kr,
*sckim@pusan.ac.kr

Performance Analysis of UWB-Based Ranging Using a Reference Tag

Hunyoul Lee, Seonghyeon Park, Sangkyu Sin, Dongjhin Rho, Suk Chan Kim*

Pusan National Univ., Pusan National Univ., Pusan National Univ., Pusan National Univ., *Pusan National Univ.

요약

본 논문에서는 UWB 기반 실내 거리 측정에서 발생하는 공통 채널 오차를 보정하기 위해, 참조 태그를 활용한 거리 추정 기법을 제안하고 성능을 분석하였다. Qorvo사의 DW1000 칩셋을 기반으로 보정 전후의 거리 오차를 비교하였으며, 동일 채널 가정하에서 참조 태그를 활용하여 이동 태그의 거리 오차를 보정하는 구조를 구현하였다. 실험 결과, 제안한 방법은 평균적인 거리 추정 정확도를 향상시키는 효과를 보였으며, 이는 UWB 환경에서의 신뢰성 있는 측위를 위한 하나의 대안이 될 수 있음을 확인하였다. 그러나 보정 과정에서 발생하는 오차 성분의 중첩으로 인해 분산이 증가하는 현상이 나타났으며, 향후 이를 보완할 수 있는 추가적인 필터링 및 다중 참조 기반 구조에 대한 연구가 필요하다.

I. 서론

최근 Ultra-Wideband(UWB) 기술은 다양한 사물인터넷(IoT) 분야에서 높은 주목을 받고 있다. UWB는 넓은 대역폭과 낮은 전력 소모라는 물리적 특성을 바탕으로, 특히 정밀한 거리 측정이 요구되는 실내 위치추정 분야에서 핵심 기술로 자리 잡고 있다. 기존의 Wi-Fi나 Bluetooth 기반 기술과 비교할 때, UWB는 수십 cm 이내의 거리 오차를 제공할 수 있어 고정밀 위치 기반 서비스에 적합하다는 장점을 가진다.

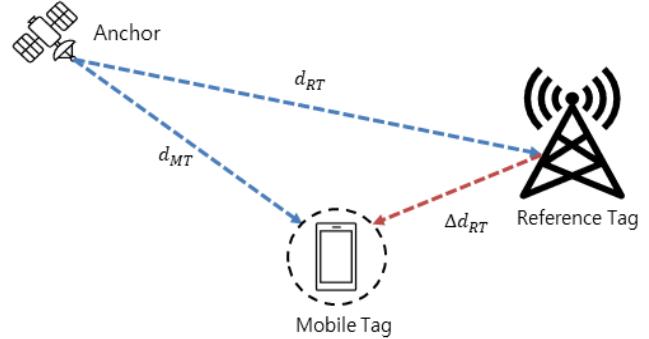
그러나 복잡한 실내 환경에서는 Non-Line-of-Sight (NLoS) 경로의 비중이 커짐에 따라 Line of Sight (LoS)가 차단되고, 이로 인해 거리 측정 오차가 증가하며, 전반적인 측위 정확도가 크게 저하되는 문제가 발생한다. 특히 NLoS 환경에서는 수 미터 이상의 편향이 발생할 수 있어 단순한 거리 기반 추정만으로는 안정적인 측위가 어렵다.

이를 해결하기 위한 방안으로 참조 태그를 활용한 다양한 연구가 제안되었다. 본 논문에서는 Qorvo사의 DW1000 칩셋을 기반으로 하여 참조 태그 기반 거리 추정 기법을 구현하고자 한다. 보정 전·후의 거리 추정 성능을 정성적 및 정량적으로 분석함으로써, 참조 태그 기반 거리 보정의 유효성을 평가한다..

II. 참조 태그 기반 UWB 거리 추정

참조 태그 기반 UWB 거리 추정 시스템은 [그림 1]과 같이 구성할 수 있다. 이때, 참조 태그(RT)와 이동 태그(MT)는 같은 채널 상황이라 가정한다.

참조 태그의 거리 추정치 및 이동 태그의 거리 추정치 \hat{d}_{RT} , \hat{d}_{MT} 는 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다. (1), (2)에서 d_{RT} , d_{MT} 는 각각 참조 태그 및 이동 태그의 실제 거리이며, Δd 는 두 태그 간 공통으로 발생하는 채널 오차를 의미한다. 이때 채널 오차 Δd 는 (3)과 같이 다시 표현할 수 있다.



[그림 1] 참조 태그 기반 UWB 거리 추정 시스템의 개요도

$$\hat{d}_{RT} = d_{RT} + \Delta d \quad (1)$$

$$\hat{d}_{MT} = d_{MT} + \Delta d \quad (2)$$

$$\Delta d = \hat{d}_{RT} - d_{RT} = \hat{d}_{MT} - d_{MT} \quad (3)$$

(1), (2), (3)에서 d_{RT} 는 사전에 알고 있는 값이지만, d_{MT} 는 미지의 값이다. 이에 따라 공통 채널 오차 Δd 를 보정하면, 보정된 이동 태그의 거리 \tilde{d}_{MT} 는 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\tilde{d}_{MT} = \hat{d}_{MT} - \Delta d = \hat{d}_{MT} - (\hat{d}_{RT} - d_{RT}) \quad (4)$$

따라서 (4)와 같이 참조 태그의 거리 정보를 활용하면, 이동 태그의 거리 추정값 \tilde{d}_{MT} 에서 공통 채널 오차 성분 Δd 를 제거할 수 있다. 이와 같은 보정 과정을 통해 이동 태그의 거리 추정 정확도를 높일 수 있다.

III. 실험 및 결과분석

본 실험은 Qorvo사의 DW1000 칩셋을 기반으로 구성하였다. [그림 2]와 같이 실내 환경에 앵커, 참조 태그, 이동 태그를 배치하였다. 참조 태그



[그림 2] 실험 환경 내 앵커 및 태그(참조, 이동) 배치

와 앵커 간 거리는 3.04m이며, 이동 태그와 앵커 간 거리는 2.8m로 설정하였다.

[그림 3]과 [그림 4]는 실험 결과에 대한 정성적 분석을 나타낸다. [그림 3]은 보정 전/후의 이동 태그의 거리 추정 오차에 대한 누적 분포 함수를 나타내며, [그림 4]는 보정 전/후의 이동 태그의 거리 오차 분포를 시각화한 것이다. [그림 3]과 [그림 4]에서 알 수 있듯 보정 후 평균적인 거리 추정 성능은 개선되었으나, [그림 4]에서는 오차에 대한 분산이 증가한 현상이 관측된다. 이는 (4)에서 추정치 \hat{d}_{RT} 와 \hat{d}_{MT} 가 모두 고유의 오차를 포함하고 있어, 보정 과정에서 오차가 증폭되었기 때문으로 분석된다.

[표 1]은 실험 결과에 대한 정량적 지표를 요약한 것으로, 보정 전/후의 평균 오차, 표준편차, 중앙값을 비교하여 나타낸다. [표 1]에서도 확인할 수 있듯, 보정 후 평균 오차는 감소하였으나, 오차 분산은 오히려 증가하였다.

이러한 결과를 통해 참조 태그를 통한 공통 채널 오차 Δd 제거기법은 거리 추정의 정확도 개선에 기여함을 확인할 수 있다. 다만, 보정 과정에서의 오차 증폭으로 인해 분산이 증가하는 문제에 대해서는 향후 추가적인 보완이 필요하다.

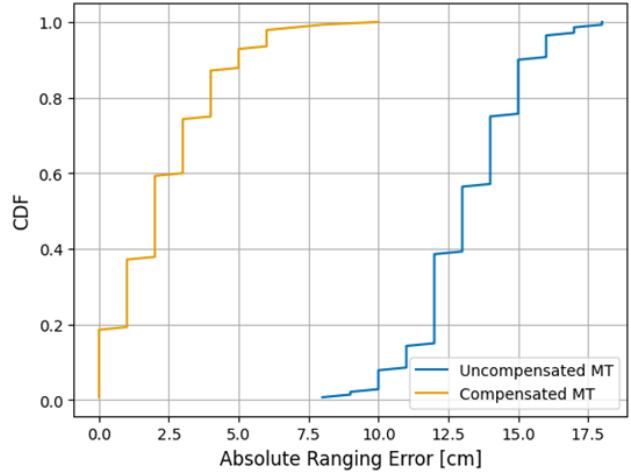
IV. 결론

본 논문에서는 Qorvo사의 DW1000 칩셋을 기반으로, 참조 태그를 활용한 거리 보정 기법의 성능을 비교·분석하였다. 제안된 구조는 동일 채널 가정하에서 참조 태그와 이동 태그 간에 공동으로 발생하는 채널 오차를 제거하는 방식으로, 실험을 통해 해당 기법의 유효성을 검증하였다. 실험 결과, 참조 태그 기반 보정을 통해 이동 태그의 평균적인 거리 추정 정확도는 향상되었음을 확인할 수 있었다.

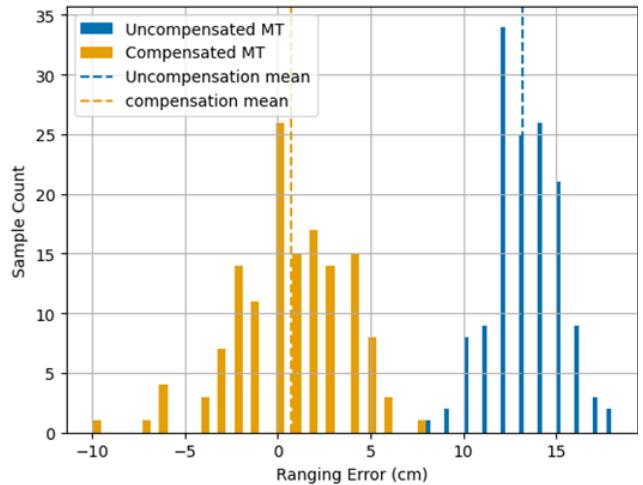
만약, 보정 과정에서 각 추정값에 포함된 개별 오차가 함께 반영되면서 전체적인 분산이 증가하는 문제가 나타났다. 이에 따라, 향후 오차 보정으로 인한 분산 증가 문제를 완화할 수 있는 정밀한 필터링 기법이나 다중

[표 1] 이동 태그의 거리 오차 성능 비교 (보정 전/후)

| Compensation | Mean | Standard Deviation | Median |
|------------------|---------|--------------------|--------|
| Uncompensated MT | 13.2 cm | 1.86 cm | 13 cm |
| Compensated MT | 0.71 cm | 2.95 cm | 1 cm |



[그림 3] 이동 태그의 거리 추정 오차에 대한 누적 분포 함수 (보정 전/후)



[그림 4] 이동 태그의 거리 오차 분포 비교 (보정 전/후)

참조 기반의 보정 구조에 관한 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (00144500)

“이 논문은(또는 교재는) 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업으로 지원되었습니다.”

참 고 문 헌

- [1] Che, F., Ahmed, Q. Z., Lazaridis, P. I., Sureephong, P., & Alade, T. (2023). Indoor Positioning System (IPS) Using Ultra-Wide Bandwidth (UWB)–For Industrial Internet of Things (IIoT). *Sensors*, 23(12), 5710.
- [2] S. Bottiglieri, D. Milanesio, M. Saccani and R. Maggiora, "A Low-Cost Indoor Real-Time Locating System Based on TDOA Estimation of UWB Pulse Sequences," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–11, 2021
- [3] Decawave. Decawave DWM1001 Module. Accessed: Mar. 9, 2022. [Online]. Available: <https://www.decawave.com/dwm1001/datasheet/>