

상대 위치 측정을 위한 모바일 기기 간 근거리 통신 기술에 대한 연구

김채원, 장우준, 차명준, 김용강*

국립공주대학교

won082005@naver.com, junfor31513@gmail.com, chamj0215@gmail.com, ygkim@kongju.ac.kr

Research on Short-Range Mobile Inter-Device Communication Technologies for Relative Position Estimation

Chae Won Kim, Woo Jun Jang, Myeong Jun Cha, and Yonggang Kim*
Kongju National University

요약

본 연구는 고정된 인프라가 구축되지 않은 환경에서도 모바일 기기 간의 정밀한 위치 파악이 가능하도록, 안드로이드 기반의 Ultra-Wide Band(UWB)와 Bluetooth Low Energy(BLE) 기술을 융합한 측위 시스템을 설계하고 성능을 정량적으로 분석한다. 기존 RSSI 기반 BLE 측위 방식은 주변 간섭에 취약하여 실시간 측위에 한계를 보인다. 이를 극복하기 위해 BLE로 기기를 탐색하고 UWB의 DS-TWR 및 AoA 기술로 정밀 측위를 수행하는 시스템을 구현한다. 실험 결과, UWB 기반 측위는 전 구간에서 약 0.2m 내외의 MAE를 유지하며 높은 정확도와 신뢰성을 입증하였다. 또한, 모바일 기기의 파지법이 수직에 가까울수록 방위각 및 고도각 측정의 정밀도가 향상됨을 확인하였다.

I. 서론

1. 연구 동기

스마트폰, 웨어러블 컴퓨터 및 IoT 기기의 보급 확대로 근거리 무선 통신 기반 측위 기술은 중요한 연구 분야로 부상하고 있으며, 기기 간 거리 및 방향 정보를 활용한 실내 내비게이션, 증강현실, 위치 기반 사용자 추천 등 다양한 위치 기반 서비스 제공이 가능하다. 기존 RSSI 기반 방식은 환경 변화에 취약하고 비콘 기반 방식은 고정 인프라 구축이 필요하다는 한계를 가진다. 이에 본 연구는 모바일 기기에 내장된 UWB와 BLE 기술을 융합하여 별도의 고정 인프라 없이 기기 간 정밀한 상대 위치 측정이 가능한 기술을 살펴보고자 한다.

본 연구에서는 고정 인프라 설치가 어려운 환경에서도 모바일 기기 간 정밀한 위치 파악이 가능한 안드로이드 기반 UWB-BLE 융합 측위 시스템을 구현하고자 한다. Android 표준 API를 활용한 D2D 통신 모듈을 설계하고, BLE의 저전력 탐색과 UWB의 ToF 기반 측위 기술을 결합하여 거리 및 방향 정보를 실시간으로 수집하고, 상용 단말을 활용한 실험을 통해 측위 정밀도와 신뢰성을 검증한다.

II. 관련 기술

1. BLE 기반 거리 추정

BLE는 수신 신호 강도(RSSI; Received Signal Strength Indicator)의 감쇠 특성을 이용해 거리를 역산한다. 실내 전파 손실을 모델링하는 로그 거리 경로 손실(Log-distance Path Loss Model)에 따라 거리 d 는 다음의 [수식 1]과 같이 도출된다.

$$d = 10^{\frac{A - \text{RSSI}}{10 \cdot n}} \quad \text{[수식 1]} \quad \begin{array}{l} A: 1\text{m 거리의 기준 RSSI,} \\ n: \text{경로 상실 계수} \end{array}$$

단, RSSI 방식은 주변 환경에 의해 다중 경로 페이딩(Multipath Fading) 및 전파 간섭에 취약하여 오차가 발생한다.

2. UWB 기반 정밀 측위

UWB는 수 나노초(ns) 단위의 초광대역 펄스를 사용하여 높은 시간 분해능을 가진다. 본 연구에서는 저전력 Bluetooth(BLE)를 이용한 방식으로 기기 간 연결을 수립하고 UWB의 DS-TWR 방식과 AoA(Angle of Arrival) 방식을 융합하여 정밀 측위를 수행한다 [1].

2.1. DS-TWR 기반 거리 측정

송수신 기기 간의 클록 오차를 보정하기 위해 두 번의 왕복 통신을 수행하는 DS-TWR(Doubled-Sided Two-Way Ranging) 알고리즘을 사용한다. 신호의 전파 시간(T_{prop})은 [수식 2]와 같이 산출된다.

$$T_{prop} = \frac{T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}} \quad \text{[수식 2]}$$

이를 통해 클록 오프셋을 상쇄하여 cm 단위의 정확도를 보장한다 [2].

2.2. 위상차(PDoA) 기반 도래각(AoA) 측정

두 개의 안테나에 신호의 위상차(PDoA)를 이용하여 입사각 θ 를 측정한다. 안테나 간격(d)과 파장(λ)의 관계를 이용한 산출식은 다음 [수식 3]과 같다.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda \Delta \phi}{2\pi d}\right) \quad \text{[수식 3]}$$

안테나를 파장의 절반($\lambda/2$) 이하의 간격으로 배치되어, 위상 모호성(Phase Ambiguity) 없이 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 범위를 정밀하게 측정한다 [3].

III. 실험 및 결과

1. 실험 방법

실험은 일반적인 생활 공간에서 진행하였으며, UWB 칩이 내장된 Galaxy S23 Ultra와 Galaxy Fold 7의 안드로이드 환경에서 진행하였다. 고정 기기(기기 1)를 중심으로 이동기기(기기 2)를 0° (정면)부터 180° 까지 오른쪽으로 45° 간격으로 배치하여 실험을 수행하였다. 측정 거리는 1m, 3m, 5m의 세 가지 조건을 설정하였으며, 기기 2의 전면이 기기 1을 향하도록 배치하였다. 또한, 모바일 기기의 실사용 환경을 반영하기 위해 [그림 1]과 같이 모바일 기기를 들고 있는 기울기에 따라 일반, 수직, 수평의 세 가지 파지법을 적용하여 측정값을 수집하였다.



[그림 1] 기기 파지법 예시(왼쪽부터 일반, 수직, 수평)

2. 실험 결과

2.1. 거리 측정 정확도 분석

[표 1]은 두 기기가 마주 보고 있는 환경에서 거리에 따른 측정 데이터를 분석한 결과이다. UWB 기반 측정 기술이 BLE 기반 측정 기술 대비 압도적인 정확도와 신뢰성을 보였다. UWB의 경우, 실제 거리(1m, 3m, 5m)와 평균 측정값의 차이가 매우 적었으며, MAE(평균 절대 오차)가 모든 구간에서 약 0.2m 내외의 높은 정밀도를 보였다. 특히 표준편차가 0.06~0.12 수준으로 낮아, 거리와 관계없이 측정값의 일관성이 우수함을 알 수 있다. BLE의 경우, 거리가 멀어질수록 오차가 급격히 증가하였다. 5m 거리에서 MAE가 3.856m에 달하며, 이는 실제 거리 대비 약 77% 이상의 오차이다. RSSI 측위 기술의 다중 경로 페이딩 등의 문제와 실시간 위치 측정 기술로서 BLE의 한계를 명확히 알 수 있다.

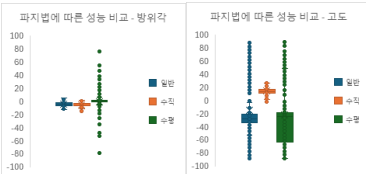
| | UWB 측정 거리(m) | | | BLE 측정 거리(m) | | |
|------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| | 1m | 3m | 5m | 1m | 3m | 5m |
| 평균 | 1.195 | 3.219 | 5.182 | 0.405 | 0.943 | 1.144 |
| 최대 | 1.74 | 4.08 | 5.43 | 1.585 | 2.754 | 3.631 |
| 최소 | 0.84 | 2.61 | 4.87 | 0.174 | 0.398 | 0.525 |
| 표준편차 | 0.124 | 0.126 | 0.063 | 0.132 | 0.257 | 0.365 |
| MAE | 0.201 | 0.227 | 0.182 | 0.596 | 2.057 | 3.856 |

[표 1] 각도(0°, 정면), 파지법(전체), 거리 측정 정확도 분석

2.2. 파지법에 따른 성능 비교

[표 2], [그림 2], [그림 3]은 기기 파지법에 따른 측정 데이터를 분석한 결과이다. 모든 파지법에 대해 UWB는 0.2m 내외의 MAE를, BLE는 0.53~0.63 수준의 MAE를 보여 파지법은 거리 측정 정밀도에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다. 방위각 및 고도 모두 공통으로 수직 파지법이 가장 안정적인 값을 보이고, 수평 파지법으로 기기의 기울기를 기울일수록(수직→일반→수평) 측정 데이터가 불안정함을 확인할 수 있었다.

| | UWB | | BLE | |
|----|-----|----------|-----|----------|
| | 파지 | 거리 MAE | 파지 | 거리 MAE |
| 일반 | | 0.201599 | | 0.631449 |
| 수직 | | 0.206404 | | 0.536061 |
| 수평 | | 0.196323 | | 0.618086 |

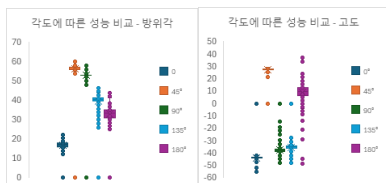


[표 2][그림 2][그림 3] 각도(0°, 정면), 거리(1m), 파지법에 따른 성능 비교

2.3. 각도에 따른 성능 비교

[표 3], [그림 4], [그림 5]은 UWB 기기의 방위각 측정 유효 범위인 -90°~+90° 밖의 위치에서의 측정 안정성을 확인해 보기 위해 측정한 데이터이다. 이 데이터는 거리 측정의 정밀성은 UWB와 BLE 모두 앞선 테스트와 동일한 결과를 보였다. 반면 방위각의 경우 90° 이후의 위치에서는 입력 신호의 안정성 및 측정값의 정밀성이 저하됨을 확인하였다.

| | UWB | | | BLE | |
|------|-----|-----------|----------|----------|-----------|
| | 각도 | 측정 거리 MAE | 방위각 표준편차 | 고도 표준편차 | 측정 거리 MAE |
| 0° | | 0.030398 | 1.329204 | 1.001923 | 0.848262 |
| 45° | | 0.06089 | 0.964095 | 0.664736 | 0.708879 |
| 90° | | 0.119528 | 0.822604 | 2.158631 | 0.822083 |
| 135° | | 0.221693 | 3.365089 | 1.90212 | 0.871398 |
| 180° | | 0.283981 | 2.720475 | 6.381061 | 0.798486 |



[표 3][그림 4][그림 5] 파지법(일반), 거리(1m), 각도에 따른 성능 비교

IV. 결론

본 연구에서는 고정된 인프라가 없는 환경에서도 모바일 기기 간의 정밀 측위를 실현하기 위해 BLE와 UWB 기술을 융합한 시스템을 구현하고 그 성능을 정량적으로 검증하였다.

실측 거리 1m, 3m, 5m에서의 실험 결과, 기존 BLE RSSI 기반 방식은 거리가 멀어질수록 오차가 급격히 증가하여 5m 지점에서 MAE(평균 절대 오차)가 실측 거리의 약 77%인 3.856m를 기록하며 실시간 정밀 측위의 한계를 드러냈다. 반면, UWB 기술을 적용한 제안 시스템은 전 구간에서 MAE 0.2m 내외의 오차를 유지하며 BLE 대비 압도적인 정확도와 데이터 일관성을 입증하였다. UWB의 표준편차는 0.06~0.12 수준으로, BLE의 표준편차는 0.13~0.36 수준으로 두 기술 입력 신호 모두 안정적인 값을 보였다.

또한, 기기의 파지법 및 각도를 다르게 하여 실험을 수행한 결과, 파지법은 거리 측정 정밀도에는 유의미한 영향을 주지 않으나 방위각 및 고도 각 측정 정밀도에서는 파지 각도가 수직에 가까울수록 높은 안정성이 나타남을 확인하였다. 각도는 UWB 유효 측정 범위(-90°~+90°) 내에서는 신호의 신뢰성이 우수하지만, 그 외의 범위에서는 크게 저하되는 기술적 특성을 확인하였다.

본 연구는 실제 상용 모바일 기기에서 다양한 파지법이나 조건에서도 cm 단위의 D2D 정밀 측위가 가능함을 데이터로 입증했다는 데 의의가 있으나 다음과 같은 기술적 과제가 남아있다. 첫째, 실험 변수(각도, 고도, 파지법 등)의 정밀한 제어와 더 다양한 실험 조건을 통해 더 실용적인 상황을 고려할 필요가 있다. 둘째, 정적인 상태에서의 정밀 측위의 신뢰성을 확인하였지만, 동적인 상태에서도 동일한 신뢰성을 유지하는지 확인할 필요가 있다. 따라서, 향후 연구에서는 더 다양한 실험 변수와 동적 환경을 설정하여 실사용 환경과 유사한 환경에서의 정밀성을 확인하고 칼만 필터(Kalman Filter) 등의 노이즈 보정 알고리즘을 적용하여 시스템의 실용성을 더욱 고도화할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 결과물은 2025년도 교육부 및 충청남도의 재원으로 충남RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과임(2025-RISE-12-003).

참고 문헌

- [1] C. Powell, B. A. Rolfe, D. Neiryneck, and J. Lansford, "IEEE 802.15.4 IR-UWB - A Technology Precisely Positioned for Adoption," IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2025.
- [2] Y. Jiang and V. C. M. Leung, "An Asymmetric Double Sided Two-Way Ranging for Crystal Offset Compensation," in IEEE International Symposium on Signals, Systems and Electronics, 2007, pp. 525-528.
- [3] Z. Sahinoglu, S. Gezici, and I. Guvenc, Ultra-wideband Positioning Systems: Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2011, pp. 130-140.