

단일 채널을 활용한 1 cm 이하의 고정밀 UWB 구현 및 응용

Implementation and Application of High-Precision UWB Localization with Sub-Centimeter Accuracy Using a Single Channel

장 윤 석 · 한 수 민 · 장 병 준

YunSeok Jang · Sumin Han · Byung-Jun Jang

요 약

UWB를 이용한 쌍방향 거리 측정 시 거리가 떨어진 송신기와 수신기 간의 위상오차로 인해 수 cm 정도의 거리측정오차가 발생하게 된다. 이는 cm 이하의 고정밀도를 요구하는 게임, AR/VR 등의 UWB 응용에 어려움을 일으킨다. 다행히 최근 거리 측정 시 교환하는 패킷의 공통 위상을 제거하여 정밀도를 높이는 연구가 발표된 바 있다. 하지만 2개의 주파수 채널을 사용하는 문제가 있었다. 이에 본 연구에서는 단일채널만을 이용하여 공통 위상을 제거하고 적절한 필터링을 사용하여 랜덤한 레인징 오차를 제거하여 1 cm 이하의 고정밀 UWB의 구현이 가능한지 확인하였고, DW3000 UWB 모듈을 이용하여 구현한 결과 약 1 cm 이내로 거리 측정의 정밀도가 가능함을 확인하였다. 또한, 실제 4개의 UWB 모듈을 이용한 실시간 게임을 구현하여 그 적용가능성을 확인하였다.

Abstract

In two-way ranging using ultra-wideband (UWB) technology, distance-measurement errors on the order of several centimeters is observed owing to phase errors between the transmitter and receiver, which are often spatially separated. These errors result in significant challenges for UWB applications, such as gaming and AR/VR, which require a high precision of less than 1 cm. Recent studies have proposed improving ranging accuracy by eliminating the common phase offset in exchanged packets. However, this approach encountered limitations when employing two frequency channels. The present study investigates the feasibility of achieving high-precision UWB of less than 1 cm utilizing a single channel, with the common phase removed via appropriate filtering to mitigate random ranging errors. Implementation with the DW3000 UWB module demonstrated that the precision of distance measurements was within approximately 1 cm. Additionally, its applicability was validated via development of a real-time game using four UWB modules.

Key words: UWB, TWR, High Precision, Location, Positioning, Phase Error

I. 서 론

IEEE 802.15.4z 표준 기반의 HRP(high rate pulse repetition

frequency) UWB(UltraWideBand) 기술은 500 MHz의 넓은 주파수 대역을 활용하여 UWB 디바이스 간 거리 측정(레인징)이 가능하다는 장점으로 인해 최근 다양한 분

「본 논문은 2024년 루미르 장학금 일부를 지원 받아 수행되었습니다.」

국민대학교 전자공학부(Department of Electronic Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received April 26, 2025 ; Revised June 4, 2025; Accepted June 6, 2025. (ID No. 20250426-044)

· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

야에서 상용화되었다. 특히, 스마트폰에 내장됨에 따라 주변 물건 찾기, 자동차 스마트키, 물건 찾기, 실내 포지셔닝 등의 다양한 위치 기반 서비스에 사용되고 있다^{[1]-[3]}.

하지만 현재 상용화된 HRP UWB 기술의 정확도는 최대 10 cm 까지도 레인징 오차를 갖는다고 알려져 있다^[4]. 만약 레인징 정밀도가 이보다 개선되어 1 cm 이내의 오차 범위를 갖는다면 기존의 응용을 넘어 게임이나 모션 캡처, AR/VR 등으로 UWB 응용이 확장될 것이다. 이에 HRP UWB 기술의 정밀도를 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다^{[4]-[7]}. 현재까지의 UWB의 고정밀도를 위한 연구는 안테나 배열을 이용하는 방법^{[4],[5]}, UWB와 관성센서를 결합하는 방법^[6] 등이 있는데 이 경우 하드웨어가 복잡해지는 문제가 있다. 이러한 연구 중에서 하드웨어의 추가 없이도 두 개의 UWB 디바이스 간의 고주파국부발진기의 차이에 의해서 발생하는 위상오차를 제거하는 연구가 2024년 발표되어 관심이 집중되고 있다^[7]. 해당 방법은 거리 측정 시 교환되는 패킷의 위상에서 공통 위상 오차를 제거하고 채널 3 (4,492.8 MHz)과 채널 5 (6,489.6 MHz)의 2개의 주파수를 이용하여 위상모호성을 제거하는 방식이다. 하지만 국내 UWB 기술기준은 스마트폰의 경우 채널 9 (7,987.2 MHz)만 사용하도록 규정되어 있으므로 국내 기술기준에 맞지 않는다^[1]. 이에 본 연구에서는 채널 9에서 동작하는 UWB 모듈인 DW3000 HRP UWB 모듈을 이용하여 참고문헌 [7]에서 제시한 방법을 바탕으로 위상오차가 제거된 고정밀 UWB 거리측정 방식을 구현하였다. 단, 주파수가 하나밖에 사용되지 못하므로 위상모호성은 완벽하게 제거할 수 없지만 반복 측정을 통한 필터링을 통해 개선될 수 있음을 확인하여 1 cm 내외의 정밀도를 제공할 수 있음을 확인하였다. 또한, 연구결과의 실효성을 검증하기 위하여 본 연구의 결과를 이용하여 4개의 UWB 앵커를 이용한 풍선떠트리기 게임을 실시간으로 구현하여 활용 가능성을 검증하였다.

II. 고정밀 UWB 거리측정 원리 및 구현

2-1 DS-TWR 거리 측정 원리와 위상 특성

UWB에서 거리를 측정하는 원리로는 DS-TWR(double-sided

two-way ranging) 방식이 주로 사용된다. DS-TWR은 2개의 UWB 기기(initiator와 responder라 각각 명함) 사이에 3번의 패킷 교환을 통해 UWB 기기 간의 전파도달 시간인 ToF(time of flight)를 계산한다. 특히, DS-TWR 방식은 3개의 패킷 교환으로 클럭 오프셋(clock offset)을 보정할 수 있어, 2개의 패킷을 교환하는 SS-TWR 방식보다 거리 측정 정밀도가 높은 장점이 있다. 그림 1은 DS-TWR 방식의 원리를 보여 주며, 식 (1)을 통해 전파 도달 시간을 계산할 수 있다^{[8],[9]}.

$$\hat{T}_{prop} = \frac{(T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2})}{(T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2})} \quad (1)$$

DS-TWR 방식에서 사용되는 패킷에서 국부발진기의 위상특성은 다음과 같이 기저대역 신호에 영향을 준다. 먼저 Initiator를 구성하는 DW3000 UWB IC에서는 기저대역에서 생성된 펄스 신호에 IC 내부의 국부발진기에서 발생한 UWB 채널 9 주파수인 7.9872 GHz의 반송파 주파수를 곱하여 실수 송신신호를 생성하게 된다. 이 신호가 Responder에 의해 주파수는 같지만 위상오차가 있는 7.9872 GHz 주파수와 곱해져 송신기와 수신기의 국부발진기의 위상 특성이 기저대역으로 변환된다. DW3000 UWB IC 내부의 수신기는 직교복조기 구조를 가지므로 I(inphase) 신호와 Q(quadrature) 신호의 복소수 형태로 출력된다. 이때 송신 후 다시 수신하기까지, 또는 수신 후 송신하기까지의 과정에서 지연시간이 필연적으로 발생한다. 이로 인해, 시간에 따른 위상의 변화가 발생하는데 이러한 위상 변화에는 국부발진기의 주파수 오프셋(frequency offset)과 초기 위상 오프셋(initial phase offset)이 포함된다.

이제 DW3000 UWB IC에서 DS-TWR 거리측정과 함께 제

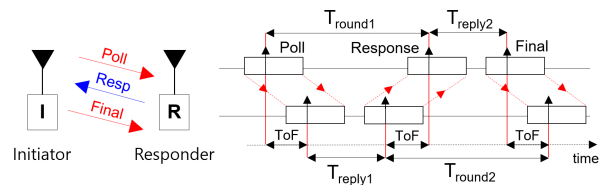


그림 1. UWB DS-TWR 거리 측정 원리
Fig. 1. Principle of UWB DS-TWR.

공하는 두 UWB 기기 사이의 무선채널의 특성을 알려주는 CIR(channel impulse response) 데이터를 이용하면 가시선(line-of-sight) 환경에서 수신된 패킷의 첫 번째 도착한 전파의 순시 위상을 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (2)$$

이제 UWB DS-TWR 방식에서 거리 측정을 수행하고 이때 사용되는 3개의 패킷 사이의 위상 특성을 살펴보았다. 먼저, DW3000 UWB IC를 임베디드 프로그래밍하여 DS-TWR 방식을 구현하고 이때 CIR 데이터로부터 첫 번째 도착한 전파의 순시 위상을 계산하였다^{[10]-[14]}. 그림 2는 고정된 거리에서 DS-TWR 방식으로 거리를 500회 측정하기 위해 Poll, Response, Final 패킷을 교환하고 이때 함께 측정되는 CIR을 저장한 후 식 (2)를 통해 계산된 각각의 패킷의 첫 번째 도착한 펄스의 위상값의 측정 결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 위상의 시간적인 변화(가로축)는 패킷이 발생 시점이 랜덤하게 변화되므로 랜덤하게 변화되지만 거리측정에 사용된 3개의 패킷은 정해진 시간에 교환되므로 패킷의 위상 특성에는 유사성이 있음을 알 수 있다. 또한, poll과 final 패킷의 위상 특성과 response 패킷의 위상 특성을 비교하면 전파의 전달 방

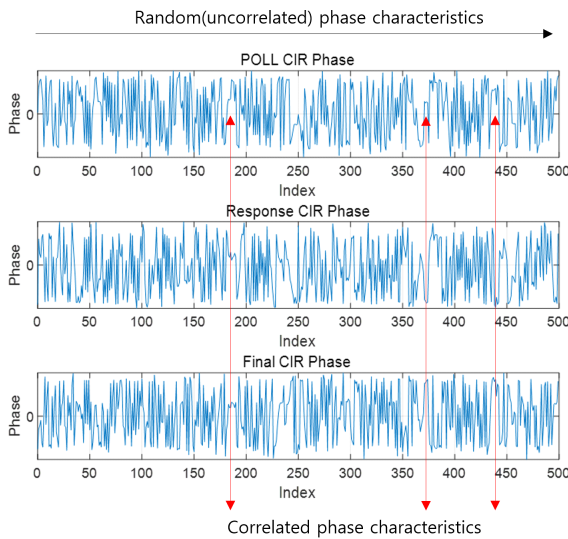


그림 2. Poll, response, final 패킷의 위상 변화
Fig. 2. Phase variation of poll, response, final packet.

향에 따라 180°의 위상차가 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 참고문헌 [7]에서 제시된 결과와 일치하며 이를 통해 DW3000 IC에서도 패킷 간의 순시 공통 위상 오차를 제거할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

2-2 위상 정보를 활용한 고정밀 DS-TWR 원리

DS-TWR 방식에서 initiator와 responder는 그림 3과 같이 동일한 전파 경로를 갖지만, 패킷의 전송 방향이 서로 반대이다. 따라서, initiator와 responder 각각의 기기에서 발생하는 시간에 따른 위상의 변화량은 서로 부호가 반대인 형태로 표현될 수 있다. 이는 그림 3과 같다. 먼저 initiator에서 responder 방향의 패킷의 위상은 그림 3(a)와 같이 표현할 수 있고, 그 반대 방향은 그림 3(b)와 같이 표현 된다. initiator와 responder 사이 LOS 환경에서 그림 3의 표현은 CIR에 대한 식 (3)으로 정리된다.

$$h(t) = \alpha e^{-j[2\pi f_c \tau - 2\pi \Delta f_c t + (\phi_i^{tx} - \phi_i^{rx})]} \quad (3)$$

여기서 $2\pi f_c \tau$ 는 경로시간 τ 에 의해 발생하는 실제 위상(actual phase), $2\pi \Delta f_c$ 는 CFO(carrier frequency offset), ϕ_i^{tx} 와 ϕ_i^{rx} 는 각각 송신기와 수신기 국부발진기의 초기위상을 의미한다. 이때 Δf_c 는 송신기와 수신기 간의 PLL(phase locked loop)의 미세한 주파수 차이에 의해 발생한

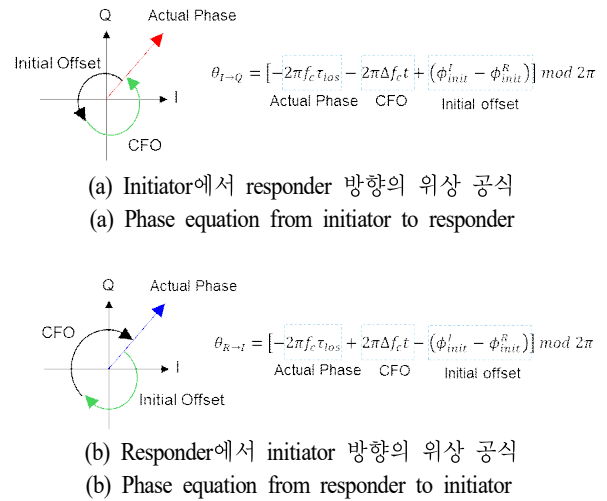


그림 3. 패킷 전송 방향을 고려한 위상 공식
Fig. 3. Phase equations considering packet direction.

다. Initiator에서 responder 방향으로 향하는 poll 패킷의 CIR에 의한 위상은 식 (4)와 같이 주어진다.

$$\theta_{Poll}(t) = [-2\pi f_c \tau - 2\pi \Delta f_c t + (\phi_i^I - \phi_i^R)] \bmod 2\pi \quad (4)$$

다음으로 responder에서 initiator 방향으로 향하는 Response 패킷의 위상은 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\theta_{Resp}(t) = [-2\pi f_c \tau + 2\pi \Delta f_c t - (\phi_i^I - \phi_i^R)] \bmod 2\pi \quad (5)$$

식 (4) 및 식 (5)를 비교하면 송신기와 수신기의 CFO와 초기위상의 부호가 반대이므로 이를 더하게 되면 CFO와 초기위상을 제거할 수 있음을 알 수 있다.

이제 기존의 DS-TWR 방식에서 responder가 final 패킷을 수신 후 식 (1)로 거리 계산을 마치고, 시간에 따른 위상 변화량을 없애기 위해 post final 패킷을 하나 더 주고 받는다. post final 패킷은 다른 패킷과 다르게 payload 부분에 ToF 정보가 존재하지 않는다. post final 패킷으로 정보를 주고 받는 것이 아닌 UWB IC의 위상오차를 제거하기 위해 기존의 DS-TWR 방식의 마지막에 추가되는 것이다⁷⁾. 이러한 과정은 그림 4와 같고 이를 고정밀 DS-TWR 방식이라 부르도록 한다. 단, post_final 패킷을 추가한 고정밀 DS-TWR 방식에서 각 기기의 송신 후 수신까지의 지연시간, 수신 후 송신까지의 지연시간을 동일하게 설정해야 한다. 이러한 방식으로 패킷의 전송방향을 고려하여

poll 패킷과 response 패킷의 위상정보를 더하면 식 (6)이 되고, final 패킷과 post final 패킷을 빼면 식 (7)이 된다.

$$\theta_{Poll} + \theta_{Resb} = [-4\pi f_c \tau - 2\pi \Delta f_c (T_2 - T_4)] \bmod 2\pi \quad (6)$$

$$\theta_{Final} - \theta_{Post} = [2\pi \Delta f_c (T_8 - T_6)] \bmod 2\pi \quad (7)$$

이제 식 (6)에서 식 (7)을 빼면 식 (8)과 같이 CFO가 제거된 최종 위상을 구할 수 있다.

$$\theta = (\theta_{Poll} + \theta_{Resb}) - (\theta_{Final} - \theta_{Post}) = [-4\pi f_c \tau] \bmod 2\pi \quad (8)$$

식 (8)의 최종 위상 계산식은 반송파 주파수의 2배인 주파수와 Initiator와 Responder가 떨어진 거리에 비례하여 2π 주기로 반복되는 위상값을 얻을 수 있다. 이제 DS-TWR 방식으로 구한 거리 측정값을 사용하여 식 (8)을 보정하게 된다. 식 (10)의 정수값 N은 측정된 거리인 $D_{measured}$ 와 식 (9)와 같이 반송파 주파수의 2배인 주파수의 파장으로 나누어 구할 수 있다. 이제 식 (8) 및 식 (10)을 이용하여 보정된 거리값 D_{adj} 을 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_{2f_c} = \frac{c}{2f_c} \quad (9)$$

$$N = \frac{D_{measured}}{\lambda_{2f_c}} \quad (10)$$

$$D_{adj} = \left(\frac{\theta}{2\pi} + N\right) \lambda_{2f_c} \quad (11)$$

이상의 방식을 통해 구현된 고정밀 UWB의 정밀도를 확인하기 위하여 기존의 DS-TWR 방식의 결과와 비교한 결과가 그림 5에 보여진다. 이를 위하여 initiator와 responder를 바닥에서 1 m 높이의 삼각대로 고정하고 두 기기 사이 간격을 1 m로 고정하여 설치하였고, 서로 마주 보는 LOS 환경에서 거리 측정을 500회 실시하였다. 그림 5(a)는 기존의 DS-TWR 거리 측정 정확도를 보여주며 그림 5(b)는 고정밀 DS-TWR 거리 측정 정확도를 나타낸다. 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이 기존의 DS-TWR 방식은 실제 거리값 1 m를 중심에 두고 거리 측정 500회 동안 최대는 약 103 cm까지, 최소는 94 cm로 최대 10 cm의 오차범위를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 그림 6(b)와 같이 고정밀 UWB 방법으로 위상오차를 제거하면 오차 범위

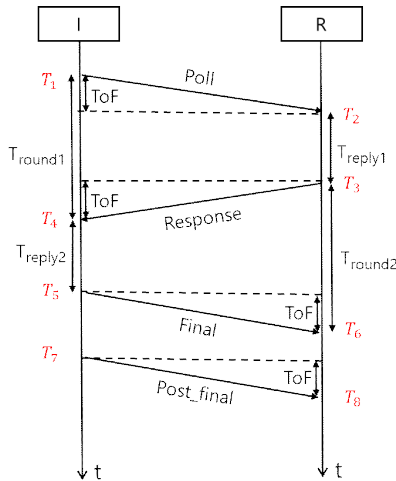
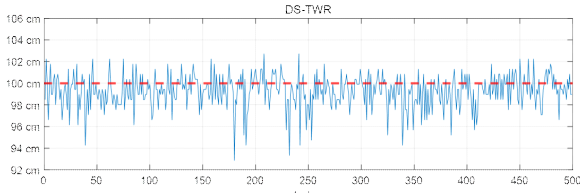
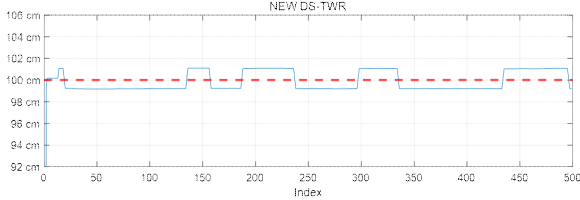


그림 4. 고정밀 DS-TWR를 위한 패킷 교환
Fig. 4. Packet exchange for high-precision DS-TWR.



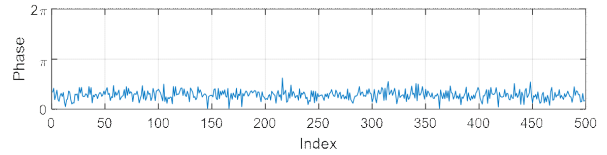
(a) 기존 DS-TWR 거리 측정값
(a) Ranging results of Conventional DS-TWR



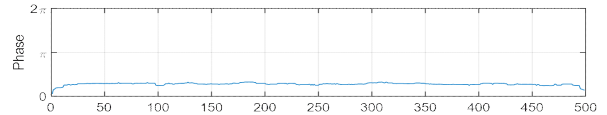
(b) 고정밀 DS-TWR 거리 측정값
(b) Ranging results of high precision UWB

그림 5. DS-TWR과 고정밀 DS-TWR 거리 측정값
Fig. 5. DS-TWR and high precision DS-TWR distance measurements.

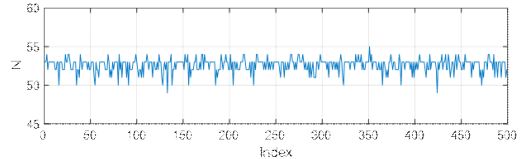
가 1 cm 이내로 개선되었음을 확인할 수 있다. 하지만 위상모호성에 의해 실제 측정 시 거리값 $D_{measured}$ 에도 파장의 2배 만큼씩 거리 오차가 가끔 발생하게 된다. 참고문헌 [7]에서는 이를 2개의 주파수를 고정밀 TWR을 수행하고 이 둘의 차이를 이용하여 보상하는 방식으로 해결하였으나 국내 기술기준에서는 적용이 불가능한 방식이다. 따라서 본 연구에서는 움직임이 상대적으로 적어 거리 측정을 여러 번 할 수 있다면 간단한 중위값(median) 필터를 사용하는 방식을 사용하는 방식을 제안하였다. 즉, DS-TWR 방식에서 측정된 거리의 변화가 없다면 움직임이 없다고 보고 여러번 측정하여 위상모호성에 의해 거리 측정값이 튀는 값을 필터링하는 방법을 사용하는 것이다. 중위값 필터가 적용되는 부분은 식 (8)의 위상값과 식 (10)의 N값에 해당한다. 제한한 방법의 타당성을 보기 위하여 500번 측정된 결과에서 중위값 필터를 적용해 보았다. 그림 6은 그 결과를 보여준다. 먼저 그림 6(a)와 그림 6(c)는 고정밀 DS-TWR 방식으로 500번 거리 측정 후 식 (8)로 구한 위상 정보의 변화와 식 (10)에서 구한 N값의 변화를 보여준다. 거리가 고정되어 있음에도 불구하고



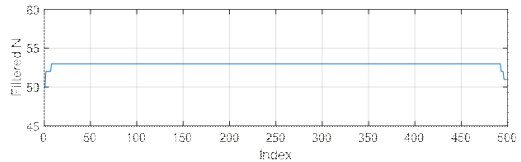
(a) 식 (8)의 위상값의 변화
(a) Phase variation of Eq. (8)



(b) 중위값 필터를 이용한 식 (8)의 위상 안정화
(b) Phase variation with filter of Eq. (8)



(c) 식 (10)의 정수값의 변화
(c) Number variation of Eq. (10)



(d) 중위값 필터를 씌운 식 (10)의 정수값
(d) Number variation with filter of Eq. (10)

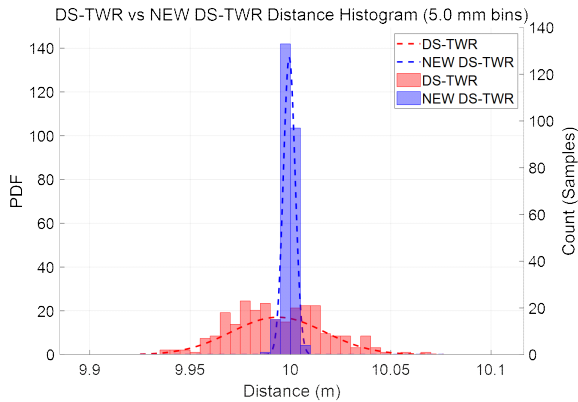
그림 6. 중위값 필터(크기 25)를 적용한 위상값과 N값
Fig. 6. Phase and N value with median filter.

고 위상과 정수 N값이 위 아래로 흔들림을 알 수 있다. 이제 크기가 25인 중위값 필터를 적용한 결과는 그림 6(b) 및 그림 6(d)와 같다. 이 결과를 통해 식 (8) 및 식 (10)에서 발생하는 오차를 최소화하여 정밀한 거리측정이 가능함을 확인할 수 있었다. 단, 빠른 움직임이 있어 같은 거리에도 여러번 측정이 어려운 경우에는 불가능한 방식이라는 단점은 존재한다. 하지만 거리측정이 1 msec 이내에 이루어지므로 속도가 적은 손의 움직임 등을 추적할 때는 적용이 가능할 것으로 판단된다.

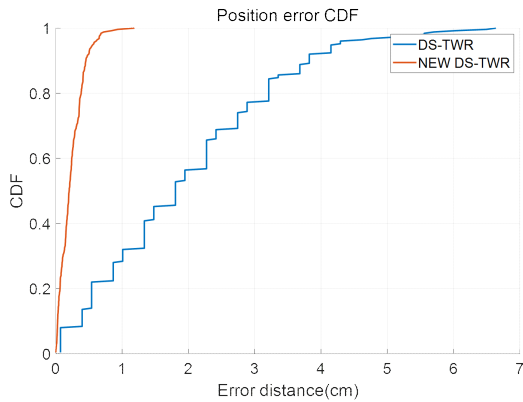
2-3 고정밀 DS-TWR 거리 측정 성능 분석

2-2절에서 국내 기술기준을 만족하는 고정밀 DS-TWR 방식을 제안하였다. 본 절에서는 제안한 방식을 이용하여 구현한 고정밀 DS-TWR 방식과 기존 DS-TWR 방식의 성능 분석 결과를 제시한다. 특히, 위상 기반 거리 측정의 특성상, 장거리로 갈수록 위상 정보의 변동성이 커지고 위상 래핑(phase wrapping) 현상이 반복적으로 발생하므로 실험에서는 10 m 거리 환경에서 수행하여, 제안된 고정밀 거리 측정 보정 기법의 유효성을 검증하였다.

그림 7(a)는 기존 DS-TWR 거리 측정값과 고정밀



(a) 두 방식의 레인지 히스토그램 비교 결과
(a) Histogram of two ranging results



(b) 레인지 CDF 비교결과
(b) CDF of ranging results

그림 7. 기존 DS-TWR와 고정밀 DS-TWR의 성능 비교
Fig. 7. Performance Comparison of Ranging: DS-TWR vs High-Precision DS-TWR.

DS-TWR 레인지 방법의 히스토그램을 비교한 결과를 보여준다. 고정밀 가능성을 확인하기 위하여 initiator와 responder 사이 간격을 10 m로 고정하여 설치하였고, 서로 마주보는 LOS 환경에서 거리 측정을 500회 실시하였다. 그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 기존의 DS-TWR 방식은 실제 거리값 10 m를 중심에 두고 거리 측정 500회 동안 최대는 약 10.04 m까지, 최소는 9.94 m로 최대 10 cm의 오차범위를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 본 연구에서 구현한 고정밀 UWB 방법으로 위상오차를 제거하면 오차 범위가 1 cm 내외로 개선되었음을 확인할 수 있다. 이를 확률분포로 표현하면 그림 7(b)와 같다. 기존 DS-TWR 방식과 제안된 고정밀 DS-TWR 방식을 비교한 결과, 그림 7(a)에서 제안 기법은 오차 분포가 매우 좁은 구간에 집중되어 기존 방식 대비 정밀도가 현저히 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 그림 7(b)의 CDF 분석에서는 1 cm 이하의 오차 구간에서 누적 확률이 급격히 증가하며, 전체 샘플의 90 % 이상이 1 cm 이내의 오차 범위에 포함되는 것으로 나타났다. 기존 TWR 방식은 누적 확률 10 % 기준 오차가 3.82 cm였던 반면, 제안된 방식은 동일 기준에서 0.45 cm로 나타나, 오차의 분산이 효과적으로 개선되었음을 입증하였다. 이는 제안한 보정 기법이 위상 오차와 정수값 N의 보정 및 중위값 필터링을 통해 거리 정확도가 향상됨을 확인할 수 있었다.

Ⅲ. 고정밀 UWB 응용 데모 구현

Ⅱ장에서 설명한 고정밀 DS-TWR 방식은 initiator 1개와 responder 1개 사이의 거리 측정에 해당되므로 고정밀 실시간 위치기반 시스템을 구현하기 위해서는 최소 3개 이상의 고정된 앵커(anchor)와 위치를 계산할 움직이는 태그(tag)가 필요하다. 이제 태그를 initiator로 정하고, N개의 anchor가 2차원 평면에 위치한 경우를 가정하자. 먼저 2차원 평면 상에 N개의 responder가 있다고 가정하면 그 좌표는 식 (12)와 같다.

$$Anchor = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)] \quad (12)$$

이제 태그가 고정밀 DS-TWR 방식으로 앵커까지의 거리를 측정한다면 N개의 거리값이 식 (13)과 같이 계산된다.

$$D_{measured} = [d_1, d_2, \dots, d_n] \quad (13)$$

이제 측정할 태그의 위치를 (x, y) 라고 한다면 식 (14)와 같이 2개의 행렬 A, B 를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} A[i] &= [2(x_i - x_1), 2(y_i - y_1)] \\ B[i] &= d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \\ A \cdot [x, y]^T &= B \end{aligned} \quad (14)$$

이제 식 (14)로부터 2차원 (x, y) 좌표는 최소자승법(least squares method)을 이용하여 식 (15)와 같이 계산될 수 있다.

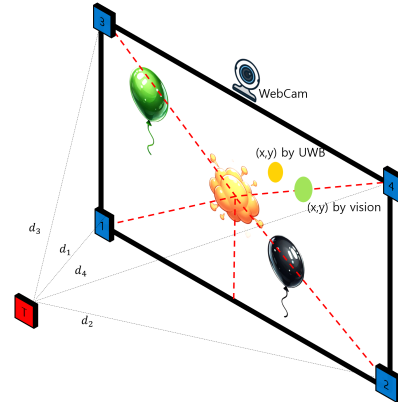
$$[x, y]^T = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (15)$$

제안된 고정밀 DS-TWR 방식이 실제 실시간 위치기반 시스템에 적용하였을 때의 동작 안정성과 실효성을 확인하기 위해 설 ‘풍선 터뜨리기 게임’을 구현하였다.

데모시스템은 대형 디스플레이의 모서리에 4개의 UWB 앵커를 부착하고 화면에 정면에 위치한 사람이 UWB 태그를 손에 들고 디스플레이의 아래에서 위쪽 방향으로 올라가는 풍선에 UWB 태그를 위치시키면 풍선이 터지는 게임을 하도록 하였다. 게임이 지속될수록 풍선이 빠르게 움직이므로 실시간으로 위치를 정확히 계산할 수 있음을 보였다. UWB 방식의 장점을 시각적으로 보이기 위해 TV 상단에 카메라(WebCam)로 UWB 태그를 들고 있는 손을 인식해서 초록색 좌표로 손의 움직임을 확인할 수 있다. 게임을 진행하다가 카메라를 가리면 초록색 좌표의 움직임은 멈추게 되고, UWB에 의한 노란색 좌표만 계속 움직이는 것을 확인할 수 있도록 하였다. 카메라 시야가 가려져도 위치인식이 가능하다는 비전기술 대비 UWB 기술의 장점을 극대화한 것이다.

데모 시스템의 개념도는 그림 8(a)와 같고 사진은 그림 8(b)와 같다. 4개의 앵커는 순차적으로 4개의 패킷을 주고 받아 위상보정된 거리값을 마이크로에서 계산하며 이 결과는 USB 허브를 통해 라즈베리 파이 PC로 보내져, 2차원 좌표가 계산된다. 비교를 위한 비전기술에 의한 위치계산은 PC의 리눅스 기반 오픈소스를 이용하여 파이썬 프로그램을 이용하여 구현하였다.

위치 계산 시 식 (15)로 계산한 x, y 좌표에 각각 크기가 30인 중위값 필터를 씌워 좌표값을 안정화했다. 실시간 위치 인식 시스템을 구현하기 위해 initiator와 res-



(a) 데모 시스템 개념도
(a) Conceptual diagram of demo system



(b) 데모 시스템 사진
(b) Photograph of demo system

그림 8. 고정밀 UWB 데모 시스템 개념도 및 사진
Fig. 8. Configuration and Photograph of high precision UWB demo system.

ponder에서 모두 $1,650 \mu s$ 로 동일하게 지연시간을 설정하여 시연하였다^[15].

IV. 결 론

본 논문에서는 종래의 UWB DS-TWR 거리측정 방식보다 정밀도가 향상된 고정밀 UWB 거리 측정 방식을 제안하였다. 제안한 고정밀 DS-TWR 방식을 구현하여 검증한 후 이를 활용하여 실시간 위치 인식 게임 데모도 구현하였다. 단, 거리 측정 과정에서 오차가 있으면 $(N-1)$ 파장

이나 (N+1) 과장으로 출력될 수 있는 문제가 있어 N값에 대한 필터를 적용하였다. 이에 따라 약간의 시간지연이 존재하지만 게임 데모를 하는데는 큰 문제가 없음을 확인하였다. 하지만 좀 더 빠른 움직임을 추적하기 위하여 Kalman 필터를 사용하거나 IMU 센서 등을 이용하여 측정값의 모호성을 해결하려고 추가 연구 중에 있다. 본 연구결과는 국내 기술기준을 만족하면서도 고정밀 거리측위나 포지셔닝의 가능성을 확인하였다는데 의미가 있다고 생각된다.

References

- [1] B. J. Jang, "Principles and trends of UWB positioning technology," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2022.
- [2] M. F. R. Al-Okby, S. Junginger, T. Roddelkopf, and K. Thurow, "UWB-based real-time indoor positioning systems: a comprehensive review," *Applied Sciences*, vol. 14, p. 11005, Nov. 2024.
- [3] G. Lee, S. An, B. J. Jang, and S. Lee, "Deep learning for counting people from UWB channel impulse response signals," *Sensors*, vol. 23, no. 16, p. 7093, Aug. 2023.
- [4] A. Arun, S. Saruwatari, S. Shah, and D. Bharadia, "XRLoc: Accurate UWB localization to realize XR deployments," in *SenSys 23: Proceedings of the 21st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, New York, NY, Nov. 2023, pp. 459-473.
- [5] M. Zhao, T. Chang, A. Arun, R. Ayyalasamayajula, C. Zhang, and D. Bharadia, "ULoc: Low-power, scalable and cm-accurate UWB-tag localization and tracking for indoor applications," in *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, New York, NY, Sep. 2021, pp. 1-31.
- [6] R. Armani, C. Holz, "Accurately tracking relative positions of moving trackers based on UWB ranging and inertial sensing without anchors," in *2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, Abu Dhabi, Oct. 2024, p. 12505.
- [7] J. Ma, F. Zhang, B. Jin, C. Su, S. Li, Z. Wang, and J. Ni, "Push the limit of highly accurate ranging on commercial UWB devices," in *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, New York, NY, May 2024, pp. 1-27.
- [8] IEEE, *IEEE Standard of Low-Rate Wireless Networks*, IEEE Std 802.15.4-2020, 2020.
- [9] IEEE, *IEEE Standard of Low-Rate Wireless Networks – Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband(UWB) Physical Layers(PHYs) and Associated Ranging Techniques*, IEEE Std 802.15.4z-2020, Aug. 2020.
- [10] Y. S. Jang, S. Han, and B. J. Jang, "Optimization of ranging accuracy and measurement time duration for IEEE 802.15.4z UWB," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 3, pp. 274-282, Mar. 2025.
- [11] Qorvo, "DW3000 User Manual: How to Use, Configure and Control the DW3000 UWB Transceiver," Qorvo, 2019.
- [12] Decawave, "DW1000 User Manual: How to Use, Configure and Program the DW1000 USB Transceiver," Decawave, 2017.
- [13] Qorvo, "DWM3000 API Software and API Guide: Using API Functions to Configure and Program the DW3000 UWB Transceiver," Qorvo, 2019.
- [14] Qorvo, "DecaRangeRTLS_ARM_Source_Code_Guide: Understanding and using the DecaRangeRTLS ARM Source code - Version 2.2," Qorvo, 2015.
- [15] UWB, "Enhanced UWB ranging," 2025. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=zzRW9kg5rde>

장 윤 석 [국민대학교/학부생]

<https://orcid.org/0009-0008-2251-6135>



2019년 3월~현재: 국민대학교 전자공학
부 학부생

[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, 무선
시스템, 전파응용

장 병 준 [국민대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5295-6050>



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학
사)

1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학
석사)

1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학
박사)

1995년 3월~1999년 1월: LG전자(주)

1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소

2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원

2013년 9월~2015년 8월: 미래창조과학부 민간전문가(CP)

2005년 9월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수

[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, 무선 시스템, 전파응용

한 수 민 [국민대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2074-2867>



2022년 2월: 국민대학교 전자공학부 (공학
사)

2023년 9월~현재: 국민대학교 전자공학
부 석사과정

[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, 무선
시스템, 전파응용