

LOS 환경에서 오프라인 오프셋 보정에 따른 Decawave PDOA1000 성능 및 한계 분석

서재희*, 허문범*, 이상우^o

Analysis of Performance and Limits of Decawave PDOA1000 Using an Offline Offset Calibration in an LOS Environment

Jae-Hee Seo*, Moon-Beom Heo*, Sangwoo Lee^o

요약

본 논문에서는 LOS (line-of-sight) 환경 실험을 통해 Decawave사의 UWB (ultra-wideband) 기반 측위 키트인 PDOA1000의 성능 및 한계를 분석한다. PDOA1000은 UWB 단말 간 일련의 메시지 교환 과정을 통해서 단말 간 거리(TWR; two-way ranging)를 측정하고, 상대각도 정보를 포함한 배열안테나 소자 간 위상차(PDOA; phase difference of arrival)를 측정하여 위치를 추정한다. 상대거리 및 상대각도 정보를 동시에 획득할 수 있어 1대의 기준단말만으로도 UWB 단말의 위치를 추정할 수 있으나, 센티미터급 측위 정확성을 위해서는 배열안테나의 오프셋(offset) 보정이 필수적이다. Decawave사는 측위과정(online)에 앞서 오프라인(offline) 과정에서 두 개의 단말을 정확한 위치에, 서로의 안테나가 직접 바라보도록 설치한 후, TWR/PDOA 측정치와 실제 값의 차이를 통해 오프셋을 추정하고, 측위과정의 측정치에서 오프셋 추정치를 차감하는 오프라인 오프셋 보정을 권고하고 있다. 본 논문에서는 오프라인 오프셋 보정에 따른 PDOA1000의 성능 및 오차 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 오프라인 보정의 한계를 분석한다. LOS 환경 실험을 통해 상대각도별 배열안테나의 오프셋이 상이하고, 이로 인해 오프라인 보정 이후 잔여오차, 즉 오프셋 잔차(residual)로 인해 0.26m 내외의 측위 오차가 발생함을 보인다.

키워드 : 초광대역 측위, 위상차, 오차 모델링, 오프라인 오프셋 보정, 오프셋 잔차

Key Words : UWB Localization, PDOA, Error Modeling, Offline Offset Calibration, Offset Residual

ABSTRACT

This paper analyzes the performance and limits of Decawave PDOA1000, which is a UWB (ultra-wideband) localization kit equipped with a two-element array antenna, through experiments in a LOS (line-of-sight) environment. PDOA1000 employs a localization method based on TWR (two-way ranging) and PDOA (phase difference of arrival) measurements, which contain relative distance and angle information between two nodes. Due to the offset from the array antenna, PDOA1000 requires an offset calibration for achieving a centimeter-level localization accuracy and Decawave recommends an offline offset calibration, which estimates the offset in TWR and PDOA measurements with perfect knowledge on locations and face-to-face antenna orientation for a pair of UWB nodes in the offline phase and removes the offset estimates from the measurements in the online phase. In this paper, we analyze the performance, error characteristics, and limits

* First Author : KPS Technology Team, Korea Aerospace Research Institute, meccha@kari.re.kr, 정희원

^o Corresponding Author : KPS Technology Team, Korea Aerospace Research Institute, lswoo@kari.re.kr, 정희원

* GNSS R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, hmb@kari.re.kr

논문번호 : 202101-008-0-SE, Received January 2, 2021; Revised January 27, 2021; Accepted January 27, 2021

of PDOA1000 using the offline calibration to show its validity. Through LOS experiments, we showed that offset residuals, which are remaining errors in the calibrated measurements, can cause localization errors of around 0.26m.

1. 서 론

자율로봇, 재난구조, 위치추적, 스마트홈 서비스 등과 같이 고정밀 위치정보를 기반으로 하는 실내 위치 기반서비스의 실현기술(enabling technology)로서 센티미터급 정확도의 UWB(ultra-wideband) 기반 측위 기술이 대두되고 있다^[1]. 불과 수년 전만해도, 높은 비용부담으로 인해 UWB 기반 측위 기술은 일부 전문 산업분야에만 국한되어 활용되어 왔다^[2]. 그러나 최근 삼성전자, Qualcomm, Bosch, Decawave(現 Qorvo) 등으로 구성된 FiRa 컨소시엄을 필두로 관련 산업계는 UWB 생태계 확장에 박차를 가하고 있으며^[3], UWB 기능을 탑재한 스마트기기의 출시를 통해 UWB 상용화 시대의 시작을 알렸다^[4,5]. 이러한 변화에 따라 UWB 기반 측위 기술의 활용분야도 점차 일반 민간시장으로 확대되고 있다.

특히, 연구·개발분야를 중심으로 UWB 기반 측위 기술의 활용범위가 급속도로 확장 중이며, 이는 확장성과 편의성이 높은 개발 키트 및 솔루션의 보급을 통한 연구개발 및 시제품 제작의 용이성 개선에 따른 것이다. 대표적인 키트로는 Decawave사의 EVK1000이 있다^[6]. EVK1000은 한 쌍의 UWB 단말이 비동기식 메시지 교환에 소요되는 시간, 즉 RTT(round-trip time)을 산출하여 두 단말 간 거리를 측정하는 TWR(two-way ranging) 방식에 기반을 두며, 복수 개의 기준단말(참조위치)과의 거리 측정 후, 삼변측량을 수행함으로써 사용자 단말의 위치를 추정한다. 10cm 수준의 상대거리 측정을 통해 센티미터급 측위 정확도를 달성할 수 있으며^[7], 사용자의 수가 증가함에 따라 패킷 충돌 확률이 증가하는 비동기식 메시지 교환의 단점으로 인하여^[8] 동시 이용 가능한 사용자의 수가 제한된다.

이러한 한계를 극복하기 위해 Decawave사는 2소자(two-elements) 배열안테나(array antenna)를 탑재한 PDOA1000 키트를 개발하였다^[9]. PDOA1000은 기존 TWR 방식의 거리 측정과 동시에 두 단말 간 상대각도 정보를 포함하는 배열안테나 소자 간 위상차인 PDOA (phase difference of arrival)를 측정함으로써 하나의 기준단말만으로도 측위가 가능하다^[10]. 이는 결과적으로 일반 환경뿐만 아니라, 다수의 기준단

말 설치·운용의 제약이 높은 가정, 복도 등의 환경에서도 사용자 측위 가용성을 향상시키기 때문에 보다 폭넓은 활용을 기대할 수 있다^[10].

다만, PDOA1000을 비롯한 배열안테나 기반 시스템은 근본적으로 안테나 상호결합(mutual coupling) 효과 및 위치오차, 선로 길이 등 하드웨어 이슈로 인하여 발생하는 오프셋(offset)으로 인해 성능열화를 겪는다^[11]. 오프셋에 따른 성능열화를 방지하기 위해 오프셋 보정은 필수적이며, Decawave社에서는 실제 측위과정(online)에 앞서 오프라인(offline) 과정을 통해 오프셋을 추정하고, 측위과정의 측정치에서 오프셋 추정치를 차감함으로써 오프셋을 보정하는 오프라인 오프셋 보정 방법을 권고하고 있다^[12].

아직까지 PDOA1000은 정식(상용) 출시에 앞서 베타버전으로 출시되어 신뢰성 평가가 요구되고 있으며, 이에 현재는 PDOA1000 성능 평가 중심의 연구가 진행 중이다^[13,14]. Castel-Anta는 NLOS (non-line-of-sight) 환경에서 두 단말의 거리를 3m 이내로 제한하고, 단말 간 상대거리/각도를 변경해가며 측위 정확도를 평가하였으며, 실험을 통해 단말 간 상대각도 ± 60 도 이내에서 0.40m 내외 정확도 달성이 가능함을 보였다^[13]. Diagne et al.은 LOS (line-of-sight) 및 NLOS 환경에서 두 단말 간 거리를 3m로 유지한 채, 배열안테나 소자 간 위상차인 PDOA를 통해 추정된 단말 간 상대각도 측정치의 정확도를 분석하였다^[14]. 단말 간 상대각도가 ± 70 도 이내일 때, LOS 환경에서는 최대 10도 수준의 오차가 발생하고, NLOS 환경에서는 LOS 환경에 비해 오차가 평균 5도 증가, 즉 15도 내외의 오차가 발생함을 보였다. 이는 위치 도메인에서 0.52m (LOS 환경), 0.79m (NLOS 환경) 수준의 오차가 발생함을 의미한다.

앞선 연구에서는 실험을 통해 오프라인 오프셋 보정에 따른 PDOA100의 정확성만을 제시할 뿐, 오차의 원인에 대해서는 전혀 논의, 분석하고 있지 않다. 사실 배열안테나의 오프셋은 소자 간 빔패턴의 차이, 변화로 인해 상대각도(방향)별 오프셋이 상이할 수 있다^[11]. 그러나 오프라인 오프셋 보정은 모든 방향에 대해 오프셋이 동일하다는 가정을 전제로 한다. 그렇기 때문에 오프라인 오프셋 보정 이후의 측정치에는 보정 잔여오차인 오프셋 잔차(residual)가 포함될 수 있

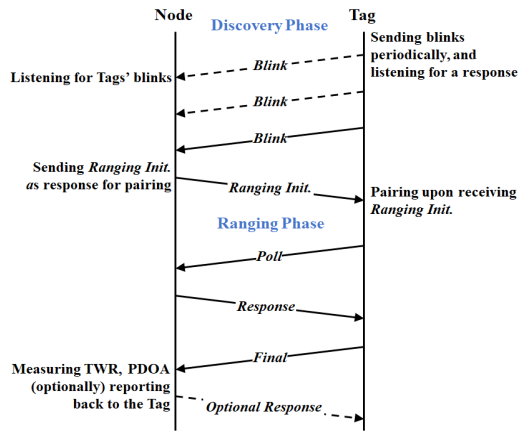


그림 1. PDOA1000의 TWR/PDOA 측정 절차
 Fig. 1. Procedure for measuring TWR/PDOA of Decawave PDOA1000

으며, 이로 인해 오프셋 보정 이후의 PDOA1000 성능이 제한될 수 있다.

본 논문에서는 오프라인 오프셋 보정 후, PDOA1000 측정치 내 포함된 오프셋 잔차 수준과 그에 따른 영향을 분석하며, 이를 바탕으로 오프라인 보정의 한계를 분석한다. 기타 오차요인의 영향을 최소화하기 위해 LOS 환경에서 실험을 진행하였다. 먼저 오프라인 보정의 효과를 분석하기 위해 보정 유무에 따른 PDOA1000의 TWR/PDOA 측정치 및 측위 정확도를 비교, 분석한다. 보정 이후 TWR 및 PDOA 측정치의 오차 특성 분석과 방향별 오프셋 추정치 간 차이 비교를 통해 오프셋 잔차 수준을 확인하며, 이를 토대로 방향별 TWR/PDOA 측정치 및 측위 정확도와 더불어 측위 가용성 관점에서 오프라인 오프셋 보정의 한계를 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 PDOA1000의 구성과 TWR/PDOA 측정 절차를 설명하고, 3장은 오프라인 보정에 따른 오프셋 잔차 수준 및 영향을 분석하기 위한 성능지표와 실험환경을 설명한다. 4장에서는 LOS 환경 실험을 통한 PDOA1000의 성능 및 오차 특성, 그리고 오프라인 오프셋 보정의 한계를 분석한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. Decawave PDOA1000 개요

2.1 PDOA1000 구성 및 TWR/PDOA

측정 절차

PDOA1000은 기본적으로 노드와 태그로 구성된다. 태그는 단일 안테나를, 노드는 2소자 배열안테나를 탑재

하며, 두 단말은 일련의 메시지를 교환함으로써 TWR 및 PDOA를 측정한다. 노드는 2소자 배열안테나를 사용하기 때문에 근본적으로 안테나 기준 수평 방위각(azimuth)에 의한 PDOA 측정이 가능하며, 단말 간 안테나 높이 차이로 인해 PDOA 측정치뿐만 아니라 TWR 측정치에 오차가 더해질 수 있다. 본 논문의 목적은 오프라인 오프셋 보정의 한계 분석에 있음에 따라, 본 논문에서는 노드와 태그 간 안테나 높이 차는 고려하지 않는다.

TWR/PDOA 측정 절차는 그림 1과 같이 크게 탐색 단계와 측정 단계로 나뉜다^[12]. 탐색 단계는 측정치 획득에 앞서 태그와 노드 간 페어링을 수행하기 위한 단계이며, 측정 단계는 페어링된 노드와 태그가 메시지 교환을 통해 TWR 및 PDOA를 측정하고 나아가 위치를 추정한다. 일반적으로 시스템 구성 시, 노드를 기준단말(참조위치)의 역할을 수행하고, 태그가 사용자의 역할을 수행하며 위치를 추정한다^[15]. 그러나 시스템 구성, 운용 시나리오 등에 따라 그 역할이 바뀔 수 있다. 본 논문에서는 태그를 측위 대상으로 가정한다.

탐색 단계는 태그가 자신의 존재를 알리는 동시에 페어링 대상을 탐색하기 위해 Blink 메시지를 송신하는 것으로 시작한다. 태그는 Blink 메시지를 노드와 페어링되기 전까지 일정한 주기로 송신하며, Blink 메시지를 수신한 노드는 이에 대한 응답으로 Ranging Init. 메시지를 해당 태그에게 다시 송신한다. 태그가 Ranging Init. 메시지를 수신하면서 두 단말 간 페어링은 완료되며, 다음 단계인 측정 단계로 넘어간다. 탐색 단계는 최초 한 번만 수행하고, 이후 페어링이 완료된 노드와 태그는 측정 단계만 반복 수행하여 TWR 및 PDOA를 측정한다.

측정 단계는 페어링을 맺은 태그와 노드 간 이뤄지며, 태그의 Poll 메시지, 노드의 Response 메시지, 태그의 Final 메시지를 순차적으로 교환하며 TWR 및 PDOA를 측정한다. 근본적으로 TWR 및 PDOA 측정은 Poll과 Response 메시지 교환만으로도 가능하나, 추가적으로 Final 메시지를 전송함으로써 클럭 표류율(clock drift)로 인해 발생하는 오차를 줄일 수 있다^[16]. 최종적으로 Final 메시지를 수신한 노드가 태그와의 TWR 및 PDOA를 측정하며, 태그 또는 노드 자신의 위치를 추정한다. 위치 추정의 주체가 태그인 경우, 노드는 Optional Response 메시지를 통해 TWR 및 PDOA 측정치를 태그에 전달할 수 있다.

2.2 TWR 및 PDOA 측정 모델

측정 단계의 n 번째 Poll/Response/Final 메시지 교

환 주기에 획득한 TWR과 PDOA 측정치를 각각 $\hat{r}[n]$, $\hat{\phi}[n]$ 이라 할 때, 각 측정치는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{r}[n] &= r[n] + q_r + v_r[n] \\ \hat{\phi}[n] &= \phi[n] + q_\phi + v_\phi[n] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $r[n]$ 과 $\phi[n]$ 은 실제 값을 의미하며, $q_{(\cdot)}$ 는 안테나 상호결합의 영향, 안테나 위치오차, 선로 길이차이 등으로 인해 발생하는 오프셋(offset)을 나타낸다. 본 논문에서는 오프라인 오프셋 보정을 고려하며, 오프라인 오프셋 보정은 노드와 태그 간 거리/방향, 시간에 관계없이 일정하다는 가정을 전제로 한다. 따라서 식 (1)에서 측정치의 오프셋은 상수(constant)로 가정한다. 그리고 $v_{(\cdot)}[n]$ 는 평균이 0인 임의 잡음(random noise)을 나타낸다.

Decawave社에서 권고^[12]하는 오프라인 오프셋 보정 방법은 다음과 같다. 먼저, 오프라인 오프셋 보정은 측위과정(online)에 앞서 오프라인(offline) 과정을 통해 측정치에 포함된 오프셋을 추정한다. 오프셋은 이미 알려진 위치, 그리고 동일한 높이에 노드와 태그를 설치한 후, 획득한 총 N_C 개의 측정치와 실제 값 간 차이의 평균으로 추정하며, 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{q}_r &= \frac{1}{N_C} \sum_{n=1}^{N_C} (\hat{r}[n] - r[n]) \\ \hat{q}_\phi &= \frac{1}{N_C} \sum_{n=1}^{N_C} (\hat{\phi}[n] - \phi[n]) \end{aligned} \quad (2)$$

Decawave社에서는 오프라인 오프셋 보정 환경으로 노드와 태그 간 거리는 $r[n] = 3\text{m}$, 노드와 태그의 안테나가 서로 마주보는 환경(노드와 태그 간 상대 각 0도, $\phi[n] = 0\text{rad}$)을 권고하고 있다^[12].

이후, 측정과정에서 사용자는 위치 추정을 위해 획득한 측정치에서 오프셋 추정치를 차감하여 오프셋을 보정하며, 오프셋 보정에 따른 측정치 $\tilde{r}[n]$ 과 $\tilde{\phi}[n]$ 는 식 (3)을 통해 보인다. 단, $n > N_C$ 이다.

$$\begin{aligned} \tilde{r}[n] &= \hat{r}[n] - \hat{q}_r \\ \tilde{\phi}[n] &= \hat{\phi}[n] - \hat{q}_\phi \end{aligned} \quad (3)$$

최종적으로 태그의 위치는 기하학에 따라 식 (4)와

같이 근사화할 수 있다^[12].

$$\begin{aligned} \hat{x}[n] &= \left(\tilde{r}[n] - \frac{\tilde{\phi}[n]\lambda}{4\pi} \right) \frac{\tilde{\phi}[n]\lambda}{2\pi d} + \frac{d}{2} \\ \hat{y}[n] &\approx \pm \left(\tilde{r}[n] - \frac{\tilde{\phi}[n]\lambda}{4\pi} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\tilde{\phi}[n]\lambda}{2\pi d} \right)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, λ 는 신호의 파장(wavelength)을 의미하며, d 는 노드의 안테나 소자 간 물리적 이격 거리를 의미한다. PDOA1000의 중심주파수는 6.4896GHz로 $\lambda = 0.0462\text{m}$ 이며^[17], $d = 0.0208\text{m}$ 이다^[12].

III. 성능지표 및 실험환경

오프라인 오프셋 보정 이후, PDOA1000의 TWR 오차, PDOA 오차, 측위 오차는 각각 $e_r[n]$, $e_\phi[n]$, $e_p[n]$ 로 표기하며, 식 (5)와 같이 정의한다. 오차 성분으로는 실제 오프셋과 추정치 간 차이인 오프셋 잔차와 임의 잡음 $v_{(\cdot)}[n]$ 가 포함되나, 임의 잡음은 평균이 0이므로 통계분석 과정을 통해 무시할 수 있다. 본 논문에서는 통계분석의 대푯값인 평균(mean), 중앙값(median), 사분위 범위(25백분위수, 75백분위수), 최대값(Max.), 최소값(Min.)을 성능지표로 사용한다.

$$\begin{aligned} e_r[n] &= \tilde{r}[n] - r[n] \\ e_\phi[n] &= \tilde{\phi}[n] - \phi[n] \\ e_p[n] &= \sqrt{(\hat{x}[n] - x[n])^2 + (\hat{y}[n] - y[n])^2} \end{aligned} \quad (5)$$

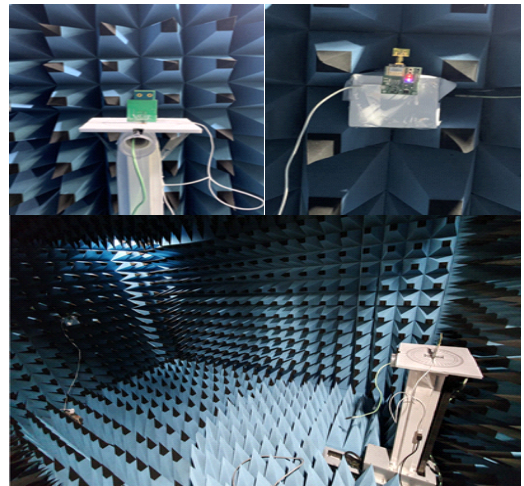


그림 2. LOS 실험 환경
Fig. 2. An environment for LOS experiments

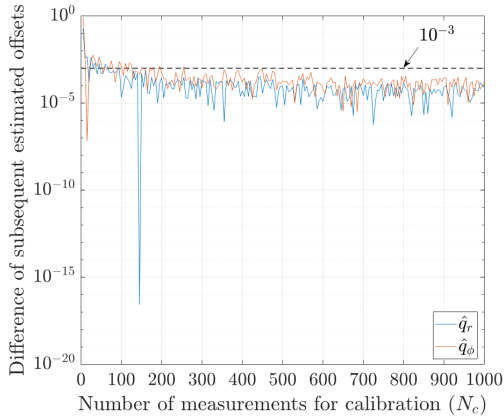


그림 3. 측정치 개수에 따른 오프셋 추정치 변화
 Fig. 3. Changes of offset estimates with respect to the number of measurements

$x[n]$ 과 $y[n]$ 은 태그의 실제 위치를 의미한다. 본 논문의 목적은 TWR/PDOA 측정치의 오프셋 잔차에 따른 PDOA1000 측위 성능 및 한계를 분석하는 것으로, 이를 위해 TWR/PDOA 측정치의 성능평가 및 분석은 벡터 공간에서 수행한다. 이에 따라, 본 논문에서는 각 측정치 오차의 크기에 대한 통계 분석은 고려하지 않으나, 그림 4를 통해서 그 결과를 쉽게 가늠할 수 있다.

이 외에도 시스템 레벨에서의 성능 평가를 위해 측위 요구성능 대비 가용성을 평가한다. 특정 시스템 또는 서비스의 측위 요구성능(허용 오차)을 ϵ 이라 할 때, 측위 가용성 $Availability_\epsilon$ 은 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$Availability_\epsilon(\%) = \frac{|S_\epsilon|}{N_T} \times 100 \quad (6)$$

위 식에서 $N_T > N_C$ 는 전체 위치추정 개수를 나타내며, S_ϵ 는 요구성능을 만족하는 유효 샘플의 집합으로 식 (7)과 같다.

$$S_\epsilon = \{n \mid e_p[n] \leq \epsilon, n > N_C\} \quad (7)$$

그리고 $|\cdot|$ 는 집합의 원소 개수(cardinality)를 나타내는 연산자를 의미한다.

본 논문은 오프라인 오프셋 보정에 따른 PDOA1000의 성능 및 오차 특성을 분석하고, 오프라인 오프셋 보정의 한계를 분석하기 위해서 LOS 환경 실험을 수행한다. Decawave의 오프라인 오프셋 보정 조건을 충족시키기 위해 크기가 4.0m(길이)×2.5m(폭)×2.0m(높이)인 전자파 무반사실에서 실험을 수행하였으며, 실험환경은 그림 2에서 보인다. 각도별 성능 분석을 위해 노드와 태그 간 상대각을 -90도부터 +90도까지 5도씩 회전해가며 10Hz 주기 측정치를 획득하였으며, 상대각별 $N_T = 3000$ 개 측정치를 이용하여 성능을 분석하였다. 별도로 $N_C = 200$ 개의 측정치를 이용하여 오프셋을 추정하였다. 그림 3은 측정치 개수에 따른 오프셋 추정치의 변화(이전 값과의 차이)를 보이는 결과로서, 200개 이상의 측정치 이용 시, 오프셋 추정치의 변화가 10^{-3} 이하로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

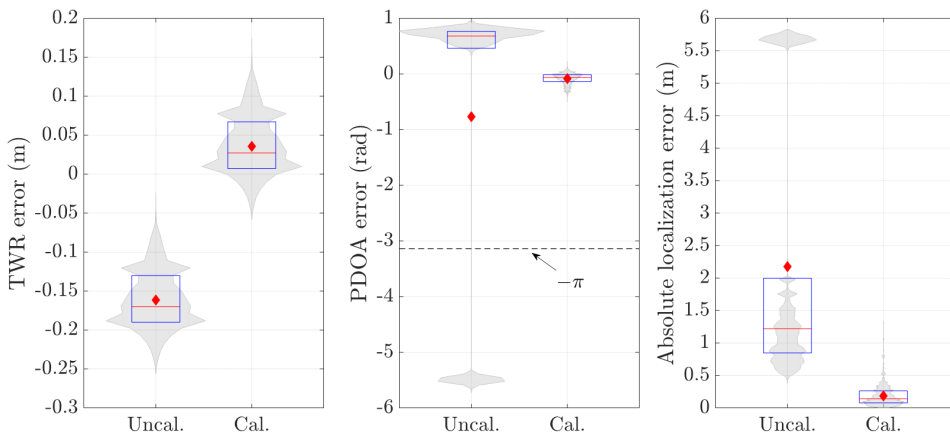


그림 4. 보정 유무에 따른 TWR, PDOA, 측위 오차 비교
 Fig. 4. Comparisons of TWR, PDOA, and localization errors without and with the offset calibration

IV. 오프셋 잔차 영향 및 오프라인 오프셋 보정의 한계 분석

본 장에서 LOS 환경 실험을 통해 획득한 측정치를 이용하여 오프라인 오프셋 보정의 효과를 분석하며, 오프셋 보정 이후 PDOA1000의 측정치에 포함된 오프셋 잔차 수준 및 영향과 오프라인 오프셋 보정의 한계를 분석한다.

그림 4는 오프라인 오프셋 보정 유무에 따른 TWR 및 PDOA 측정치 오차와 측위 오차를 보인다. 그림에서 회색은 오차의 분포를 나타내며, 가로축은 빈도수를, 세로축은 오차 값을 의미한다. 파랑색 사각형은 사분위 범위(interquartile range)를 나타내고, 빨강색 선은 중간값을, 빨강색 다이아몬드는 평균을 나타낸다. 각 통계치는 표 1을 통해서도 보인다.

TWR 측정치는 오프셋 보정 전 실제 거리에 비해 평균 0.16m 정도 짧게 측정되었으나, 오프셋 보정을 통해 측정치 평균 오차가 0.04m 수준까지 감소하였

다. 보정 이전의 PDOA 측정치 오차는 0.77rad 부근과 -5.50rad 부근으로 양분화된 결과를 보였다. 이는 PDOA의 유효범위($\phi[n] \in [-\pi, \pi]$)를 벗어난 측정치에 대해 나머지 연산(modulo) 수행을 통해 유효범위로 천이하는 과정에서 나타나는 위상 반전에 따른 결과이다. 위상 반전으로 인해 태그는 노드 안테나 축의 반대 지점으로 위치를 추정하며, 이로 인해 최대 측위 오차가 노드와 태그 간 실제 거리의 2배 수준에 이를 수 있다. 하지만 보정 이후에는 PDOA의 평균 오차가 -0.08rad 수준까지 감소하였고, 그 결과 평균 측위 오차는 0.18m 수준까지 감소하였다.

그림 5와 6은 오프셋 보정 이후의 TWR/PDOA 측정치에 포함된 오차의 히스토그램(histogram)과 경험적(empirical) 누적분포함수(CDF; cumulative distribution function), 그리고 모델링을 통한 이론적(theoretical) 누적분포함수를 보인다. 본 논문에서는 LOS 환경을 가정함에 따라 측정치 오차의 분포는 식 (8)의 가우시안(Gaussian)으로 가정할 수 있다²⁾.

표 1. 보정 유무에 따른 TWR, PDOA, 측위 오차 통계치

Table 1. Statistics of TWR, PDOA, and localization errors without and with the offset calibration

Statistics	TWR Error (m)		PDOA Error (rad)		Absolute localization Error (m)	
	Uncalibrated	Calibrated	Uncalibrated	Calibrated	Uncalibrated	Calibrated
Mean	-0.162	0.036	-0.768	-0.083	2.176	0.185
Median	-0.170	0.027	0.681	-0.062	1.221	0.142
75%	-0.130	0.067	0.765	-0.012	1.998	0.262
25%	-0.190	0.007	0.463	-0.136	0.848	0.077
Max.	-0.020	0.177	1.005	0.231	5.858	1.329
Min.	-0.260	-0.063	-5.748	-0.496	0.372	0.003

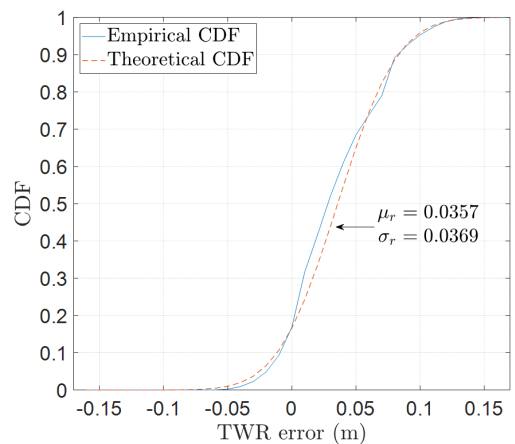
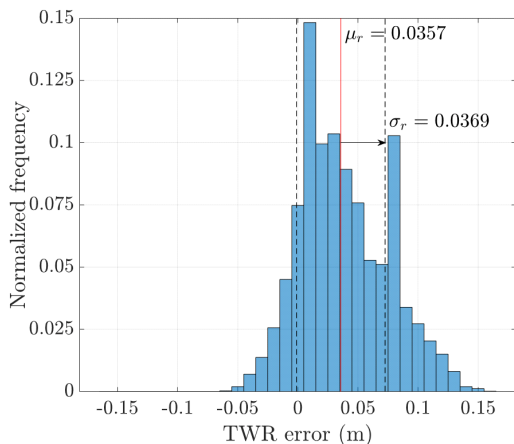


그림 5. 오프셋 보정 후 TWR 측정치의 오차 히스토그램(좌)과 누적분포함수(우)

Fig. 5. Normalized histogram(left) and CDF(right) of errors contained in the calibrated TWR measurements

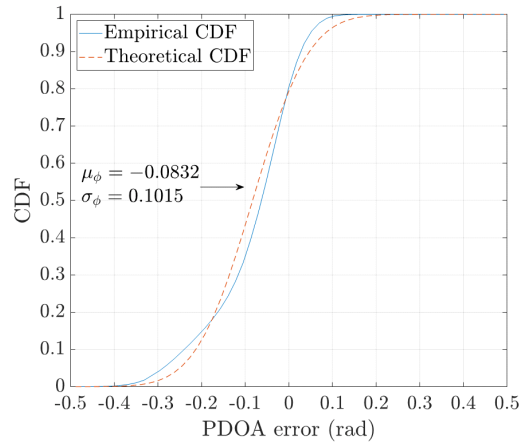
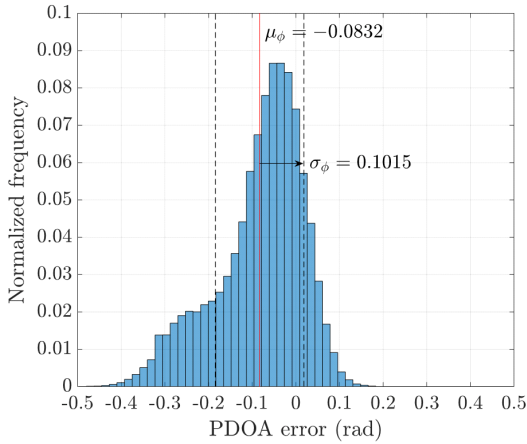


그림 6. 오프셋 보정 후 PDOA 측정치의 오차 히스토그램(좌)과 누적분포함수(우)
 Fig. 6. Normalized histogram(left) and CDF(right) of errors contained in the calibrated PDOA measurements

$$f(e_{(\cdot)}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{(\cdot)}^2}} \exp\left[-\frac{(e_{(\cdot)} - \mu_{(\cdot)})^2}{2\sigma_{(\cdot)}^2}\right] \quad (4)$$

위 식에서 $e_{(\cdot)}$ 는 각 측정치의 오차를 나타내는 확률변수(random variable)를 나타내며, $\mu_{(\cdot)}$ 와 $\sigma_{(\cdot)}$ 는 각 오차의 평균과 표준편차를 나타낸다. 여기서, 각 경험적 누적분포함수의 평균 및 표준편차는 최소자승법(least square method)을 통해 추정한다. 실험에 따른 보정 이후 측정치의 μ_r 은 0.0357m, σ_r 은 0.0369m, μ_ϕ 는 -0.0832rad, σ_ϕ 는 0.1015rad이다. 그림을 통해서 보정 이후의 TWR/PDOA 측정치 오차는 전반적으로 가우시안 분포와 유사한 형태를 따르나, 일부 오차구간에서 빈도수가 이론적 수치와 상이한 것을 확인하였다.

이러한 차이는 실제 오프셋과 추정치 간 차이, 즉 오프셋 잔차(residual)에 의한 것으로, 보다 자세하게는 안테나 방사 패턴의 비등방성으로 인해 수신하는 신호의 방향마다 서로 다른 오프셋이 발생한다^{11,18)}, Decawave社에서 권고하는 오프라인 오프셋 보정은 단방향을 기준으로 획득한 오프셋 추정치를 모든 방향에 동일하게 적용하여 오프셋을 제거하기 때문이다. 여기서, 비등방성은 방사 패턴이 전 방향에 대해 고르지 못함을 의미하며, 배열안테나의 경우 하드웨어 오차, 상호결합 효과 등의 불확실성이 비등방성의 주요 원인이다^{11,18)}. 특히, 비등방성은 방향에 따라 위상의 극심한 변화를 야기하며, 이로 인해 TWR 측정치에 비해 상대적으로 PDOA 측정치의 경험적, 이론적 분포 간 불일치성이 높게 나타난다. 오프셋 잔차의 영향

에 대해서는 그림 7부터 그림 9까지의 결과를 통해 자세히 설명한다.

그림 7은 노드와 태그 간 상대각도가 0도인 환경에서 추정한 오프셋(Decawave 권고¹²⁾)과 상대각도마다 추정한 오프셋의 차이인 오프셋 잔차(residual)를 보인다. 각 방향의 오프셋을 추정하기 위해 사용한 측정치 개수는 $N_C = 200$ 개로 모두 동일하다. 그림을 통해서 TWR 오프셋 잔차로 인해 최대 0.1108m의 오차가 야기하고, PDOA 오프셋 잔차로 인해 최대 0.0291rad의 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 특히, PDOA 오프셋 잔차는 -35도에서 -10도 사이에서 극심하게 나타났다으며, 해당 구간에서의 오프셋 잔차는 각도 도메인에서 5도 내외의 오차를, 위치 도메인에서는 0.26m

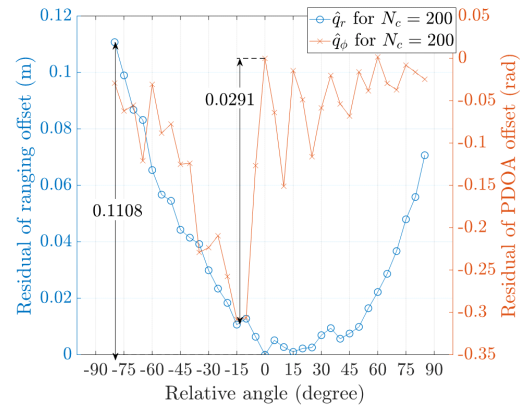


그림 7. 노드와 태그 간 상대각도에 따른 TWR/PDOA 측정치 오프셋 잔차
 Fig. 7. Offset residuals in TWR and PDOA measurements with respect to relative angles of a node-tag pair

내외의 오차를 야기한다.

그림 8은 오프셋 보정 유무에 따른 측위 결과로, 노드를 원점에 두고 3m 떨어진 거리에서 태그의 위치를 15도 간격으로 변화했을 시의 측위 결과를 보인다. 원은 태그의 실제 위치를 나타내고, 복수의 작은 마커는 측위 결과를 나타낸다. 실제 위치에 비해 짧은 거리에 표시된 마커는 오프셋 보정 이전의 측위 결과로서, 기본적으로 실제 위치에 비해 15도 정도 회전한 지점에 분포하는 양상을 보였다. 반면, 오프셋 보정 이후의 측위 결과는 실제 위치를 중심으로 좌우로 분포하는 양상을 보였다. 다만, 앞서 그림 7을 통해 보였듯이, PDOA 오프셋 잔차가 극심한 -35도에서 -10도 사이 구간에서는 보정 이후에도 실제 위치와 평균 5도 내외의 차이를 보였다.

그림 9는 측위 허용 오차 ∞ , 1.00m, 0.50m, 0.25m에 따른 상대각도별 측위 가용성을 보인다. 90%의 신뢰도를 기준으로 허용 오차가 ∞ , 1.00m인 경우에는 -75도에서 75도, 0.50m인 경우에는 -65도에서 75도, 0.25m인 경우에는 -60도에서 -50도, 그리고 -5도에서 60도 사이 구간에서 가용함을 확인하였다. 앞선 결과를 통해 보였듯이, TWR 및 PDOA 오프셋 잔차로 인해 -35도에서 -10도 사이 구간에서 0.26m 내외의 오차가 발생함에 따라 해당 구간에서의 측위 허용 오차 0.25m의 가용성이 극심하게 저하되었다. 따라서 Decawave社에서 권고하는 오프라인 오프셋 보정으로 0.25m 이내의 정확도 달성이 제한되며, 보다 높은 정확성을 위해서는 오프셋 잔차의 영향을 최소화할 수 있어야 한다.

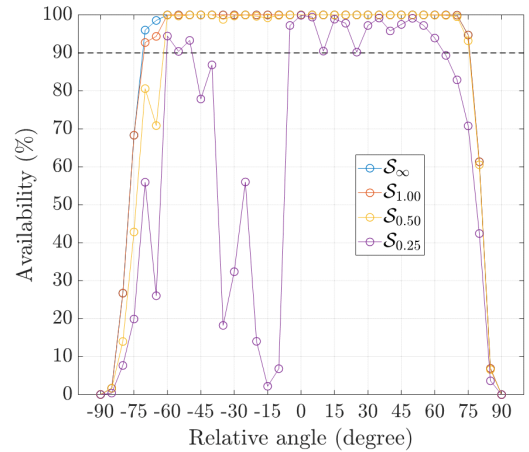


그림 9. 측위 요구 성능에 따른 상대각도별 측위 가용성
Fig. 9. Localization availability given the target accuracy with respect to relative angles of a node-tag pair

V. 결론

본 논문에서는 PDOA1000의 오프라인 오프셋 보정 이후 나타나는 오프셋 잔차에 대한 수준 및 영향과, 이를 바탕으로 오프셋 보정의 한계를 분석하기 위해 LOS 환경에서 오프라인 오프셋 보정에 따른 측정치 성능 및 오차 특성과 이에 따른 가용성을 분석하였다. 보정 유무에 따른 TWR 및 PDOA 측정치, 측위 성능 비교를 통해 오프라인 보정 시 각각 평균적으로 0.126m, 2.291rad, 1.991m만큼 향상이 가능함을 확인하였다. 또한, 노드와 태그 간 상대각도별 오프셋 잔차 및 TWR/PDOA/측위 성능 분석을 통해서 TWR 및 PDOA 오프셋 잔차로 인해 0.26m 내외의 측위 오

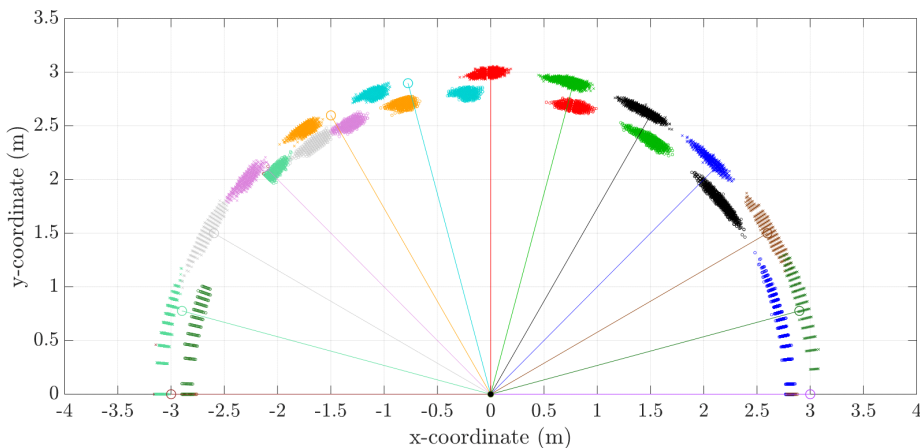


그림 8. 보정 유무에 따른 PDOA1000 측위 결과
Fig. 8. Localization results of PDOA1000 without and with the offset calibration

차가 발생할 수 있음을 보였으며, 90% 신뢰도 기준 상대각도 -65도에서 75도 사이 구간에서 0.50m의 측위 정확성을 달성할 수 있음을 확인하였다. 따라서 PDOA1000을 활용하여 0.25m 이상의 측위 정확도를 요구하는 시스템을 개발하기 위해서는 보다 세분화된 오프셋 보정 또는 오프셋 잔차 추정 등 오프셋 잔차의 영향을 최소화하기 위한 방법이 추가적으로 연구되어야 한다. 이에 대한 연구는 후속연구를 통해 진행하고자 한다.

References

- [1] D. Minoli and B. Occhiogrosso, "Ultrawideband (UWB) technology for smart cities IoT applications," in *Proc. 2018 IEEE Int. Smart Cities Conf.*, pp. 1-8, Kansas City, MO, USA, Sep. 2018.
- [2] A. R. Jimenez Ruiz and F. Seco Granja, "Comparing Ubisense, BeSpoon, and DecaWave UWB location systems: Indoor performance analysis," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 8, pp. 2106-2117, Aug. 2017.
- [3] FiRa Consortium, "Our Members," *FiRa The Power to Be Precise*, <https://www.firaconsortium.org/about/members> (accessed Dec. 31, 2020).
- [4] Samsung, "[인포그래픽] 갤럭시 노트20, 일상을 더 큰 세상과 연결하다," Samsung Newsroom, <https://news.samsung.com/kr/인포그래픽-갤럭시-노트20-일상을-더-큰-세상과-연결> (accessed Dec. 31, 2020).
- [5] Apple, "Apple, 듀얼 카메라 iPhone 11 발표," Newsroom, <https://www.apple.com/kr/newsroom/2019/09/apple-introduces-dual-camera-iphone-11/> (accessed Dec. 31, 2020).
- [7] B. Silva, Z. Pang, J. Akerberg, J. Neander, and G. Hancke, "Experimental study of UWB-based high precision localization for industrial applications," in *Proc. 2014 IEEE Int. Conf. Ultra-WideBand*, pp. 280-285, Paris, France, Sep. 2014.
- [8] S. Lee, S. Chun, J. H. Seo, S. H. Im, M. Shin, and M. B. Heo, "Analysis of collision probability in TWR-based localization over a half-duplex channel," in *Proc. 2016 KGS Conf.*, pp. 443-447, Jeju Island, Korea, Dec. 2016.
- [9] Decawave, "Product Brief: Beta PDoA Kit v1.0," 2014.
- [10] M. Heydariaan, H. Dabirian, and O. Gnawali, "AnguLoc: Concurrent angle of arrival estimation for indoor localization with UWB radios," in *Proc. 2020 16th Int. Conf. Dist. Comp. Sensor Syst.*, pp. 112-119, Marina del Rey, CA, USA, May 2020.
- [11] T. Su and H. Ling, "On modeling mutual coupling in antenna arrays using the coupling matrix," *Microwave and Optical Technol. Lett.*, vol. 28, no. 4, pp. 231-237, Feb. 2001.
- [12] Decawave, "PDOA Primer: Calculating Position Directly from Range and Phase Difference of Arrival at Two Antennas v1.0," 2014.
- [13] B. Castel-Anta, "Evaluation of location systems based on RF-technology for the safety of AGVs," Bachelor Thesis, Dept. Telecommun. Syst. Eng., Univ. of Navarra, Donostia-San Sebastián, Spain, 2020. [Online]. Available: <https://dadun.unav.edu/handle/10171/59577/>
- [14] S. Diagne, T. Val, A. K. Farota, B. Diop, and O. Assogba, "Performances analysis of a system of localization by angle of arrival UWB radio," *Int. J. Commun., Netw. and Syst. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 15-27, 2020.
- [15] Decawave, *APS011 Application Note - Sources of Error in DW1000 Based Two-Way Ranging (TWR) Schemes v1.1.* (2014). Accessed: Dec. 31, 2020. [Online]. Available: <https://www.decawave.com/application-notes/>
- [16] J. H. Seo, S. Chun, and M. B. Heo, "ANN based indoor localization method using the movement pattern of indoor user," *J. Advanced Navig. Technol.*, vol. 23, no. 6, pp. 526-534, Dec. 2019.
- [17] Decawave, *DW1000 User Manual - How to Use, Configure and Program the DW1000 UWB Transceiver v2.18.* (2017). Accessed: Dec. 31, 2020. [Online]. Available: <https://>

www.decawave.com/product-documentation/

- [18] T. Lindgren and J. Borg, "A measurement system for the position and phase errors of the elements in an antenna array subject to mutual coupling," *Int. J. Antennas and Propag.*, vol. 2012, Article ID 526121, Feb. 2012.

서 재 희 (Jae-Hee Seo)



2013년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 학사

2015년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 석사

2016년 6월~현재 : 한국항공우
주연구원 연구원

<관심분야> 실내항법, 위성항법, 실시간 시스템
[ORCID:0000-0003-2084-6487]

허 문 범 (Moon-Beom Heo)



1992년 2월 : 경희대학교 기계
공학과

1997년 12월 : Illinois Institute
of Technology 항공기계공
학과 석사

2004년 12월 : Illinois Institute
of Technology 항공기계공
학과 박사

2005년 10월~현재 : 한국항공우주연구원 위성항법사
업부장

<관심분야> 위성항법, 정밀항법, 항행시스템

[ORCID:0000-0001-9674-9937]

이 상 우 (Sangwoo Lee)



2009년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 학사

2011년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 석사

2016년 2월 : 한양대학교 전자
컴퓨터통신공학과 박사

2016년 4월~현재 : 한국항공우
주연구원 선임연구원

<관심분야> 무선측위, 위성항법시스템, 실내항법

[ORCID:0000-0002-0642-5064]