

LOS 환경에서 Decawave PDOA1000 오프셋 영향 분석

서재희, 허문범, 이상우*
한국항공우주연구원

{meccha, hmb, lswoo}@kari.re.kr

Analysis of Offset Effects of Decawave PDOA1000 in a LOS Environment

Jae-Hee Seo, Moon-Beom Heo, Sangwoo Lee*
Korea Aerospace Research Institute

요 약

본 논문에서는 LOS (line-of-sight) 환경에서 Decawave社의 UWB (ultra-wideband) 기반 측위 솔루션인 PDOA1000의 성능을 분석한다. PDOA1000은 2소자 배열안테나를 탑재한 노드와 단일 안테나의 태그로 구성되며, 노드가 태그와의 메시지 교환을 통해 획득한 TWR (two-way ranging) 및 PDOA (phase-difference-of-arrival) 측정치를 이용하여 태그의 위치를 추정한다. 그러나 측정치에는 안테나 상호결합(mutual coupling) 및 하드웨어 오차 등에 따른 오프셋이 포함되며, 이는 측위 성능을 저하시키는 주요 요인이다. 본 논문에서는 오프셋에 따른 영향을 분석하기 위해 무반사실에서 수행한 실험을 바탕으로 오프셋 보정(calibration) 전후에 대한 측정치 및 측위 정확도를 비교, 분석한다.

I. 서 론

증강현실(augmented reality) 기반 실내 어플리케이션 등에 대한 사용자 수요 증가와 함께 실내측위 정확도 제고에 대한 필요성이 지속적으로 증가하고 있다[1]. 이에 따라 서브미터(sub-meter) 혹은 센티미터 수준의 정확도를 제공할 수 있는 UWB (ultra-wideband) 기반 측위 기술에 대한 관심이 고조되고 있으며, 산업체 또한 다양한 어플리케이션에 활용할 수 있는 일반/보급용 솔루션 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

특히, Decawave社(現 Qorvo)는 UWB 측위 칩셋/모듈 외에도 개발 키트(development kit) 개발/판매를 통해 연구개발 측면의 편의성을 높여 많은 분야에서 이를 활용하고 있다. Decawave社 측위 솔루션은 기본적으로 두개의 단말 간 메시지 교환 과정에서 RTT(round-trip time)를 계산하여 거리를 측정하는 TWR (two-way ranging) 방식에 기반하고 있다. 최근에는 2소자 배열안테나를 이용하여 안테나 간 입사신호의 위상차(PDOA, phase-difference-of-arrival)를 추가적으로 측정함으로써 기존 TWR 기반 측위의 정확도 및 가용성 제고가 가능한 PDOA1000을 발표하였다. 다만, 소형화에 따른 안테나 상호결합(mutual coupling), 생산 과정의 하드웨어 오차 등으로 인해 발생하는 측정치 오프셋은 PDOA1000 성능 열화의 주요 요인이 된다.

본 논문에서는 Decawave社의 PDOA1000 측정치에 포함된 오프셋의 영향을 분석한다. 실험은 LOS (line-of-sight) 환경을 모사하기 위해 전자파 무반사실에서 수행하였으며, 본 논문에서는 실험 측정치를 바탕으로 오프셋 보정(calibration) 전후에 대한 TWR/PDOA 측정치 및 측위 정확도를 비교, 분석한다.

II. PDOA1000 개요

PDOA1000은 태그(tag)와 노드(node)로 구성된다. 태그는 위치를 추정하는 대상이며, 노드는 태그의 위치를 추정하기 위한 기준점(reference)의 역할을 하는 동시에 태그와 메시지를 주고받으며 태그와의 TWR 및 PDOA를 측정하고, 태그의 위치를 추정한다. 보다 명확하게는, TWR은 노드의 주(master) 안테나와 태그의 안테나 간 거리 측정치이며, PDOA는 노드의 주 안테나와 부(slave) 안테나에 도달하는 신호의 위상차를 의미한다. 또한, 태그의 위치는 노드의 주 안테나로부터의 상대 위치를 의미한다.

n 번째 주기에 노드와 태그 간 일련의 메시지 교환을 통해 획득한 TWR 및 PDOA 측정치를 각각 $\hat{r}[n]$, $\hat{\phi}[n]$ 이라 할 때, 각 측정치에 대한 정의는 다음과 같다.

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

여기서, $r[n]$ 과 $\phi[n]$ 은 노드와 태그 배치에 따른 실제 거리 및 위상차를 나타낸다. q_r 과 q_ϕ 은 안테나 상호결합, 안테나 위치 오차, 선로 길이 차이 등으로 인해 발생하는 측정치 오프셋(offset)을 나타내며, $v_r[n]$ 과 $v_\phi[n]$ 은 임의 잡음(random noise)을 나타낸다.

측정치 오프셋은 보정 절차를 통해 추정이 가능하며, Decawave社에서는 오프라인(offline) 보정을 권장하고 있다[2]. 오프라인 보정은 측위(online) 단계에 앞서 노드와 태그를 이미 알려진 지점에 위치하여 획득한 N_c 개 측정치로부터 오프셋을 추정하고, 측위 단계에서 측정치에서 오프셋 추정치를 차감하여 오프셋의 효과를 완화하는 방식이다. TWR 및 PDOA 측정치 내 임의

잡음의 평균이 0이라는 가정 하에 오프셋은 다음과 같이 단순 평균으로 추정 가능하다.

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

오프셋 추정치를 측정치에서 차감함으로써 보정된 측정치를 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

기하학에 따라, 2차원 공간에서 태그의 위치는 보정된 TWR 및 PDOA 측정치를 결합하여 다음과 같이 계산할 수 있다[2].

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

여기서, λ 은 신호의 파장(wavelength)이며, d 는 노드의 안테나 간 이격 거리를 의미하며, PDOA1000의 경우 $\lambda = 0.0462\text{m}$, $d = 0.0208\text{m}$ 이다.

III. 성능 분석

측정치 오프셋에 대한 영향을 분석하기 위해 전자파 무반사실에서 실험을 수행하였다. 무반사실의 크기는 $4.0\text{m} \times 2.5\text{m} \times 2.0\text{m}$ (length \times width \times height)이며, 태그와 노드는 동일한 높이에 3m 이격을 유지하도록 설치하고, 노드를 -90° 부터 $+90^\circ$ 까지 5도씩 회전시켜 가며 데이터를 획득했다. 각 회전각에 대해 10Hz의 데이터 획득율로 5분씩 수집하여, 회전각별 최소 3,000개 이상의 데이터를 획득하고, 획득한 데이터를 통해 오프셋 보정 유무에 따른 TWR, PDOA, 측위 정확도를 분석하였다. 오프셋 보정은 Decawave社 권고[2]에 따라, $r[n] = 3\text{m}$, $\phi[n] = 0\text{rad}$ 조건에서 진행하였으며, 총 $N_c = 200$ 개의 데이터를 이용하였다.

그림 1은 보정 유무에 따른 TWR, PDOA, 측위 오차를 보인다. 그림에서 회색은 오차의 분포로서, 가로축의 길이는 빈도수를 의미한다. 파랑색 사각형은 25%~75% 구간을 나타내며, 빨강색 선은 중간값(median)을, 빨강색 다이아몬드는 평균(mean)을 나타낸다. TWR 측정치는 보정 전 실제 거리에 비해 평균 0.16m 정도 짧게 측정되었으나, 오프셋 보정을 통해 TWR 오차는 0.04m 수준까지 줄어들었다. 보정 전 PDOA 오차는 양수와 음수 범위에 모두 분포하는 것을 볼 수 있다. 음의 오차는 PDOA의 유효범위($\phi[n] \in [-\pi, \pi]$)를 벗어난 측정치에 대해 나머지 연산(modulo)을 통해 유효범위로 천이하는 과정에서 위상 반전에 따른 결과이다. 위상 반전으로 인해 태그의 위치를 주 안테나를 축으로 반대 방향으로 추정하게 되며, 이로 인해 최대 측위 오차는 노드와 태그 간 거리의 2배 수준까지 증가하게 된다. 반면, 보정 이후에는 PDOA 평균 오차가 -0.08rad 수준까지 감소하여, 측위 평균 오차가 0.18m까지 감소하였다.

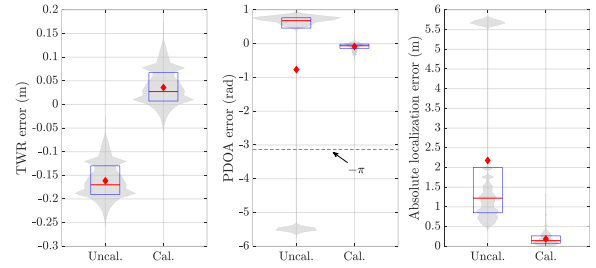


그림 1. 보정 유무에 따른 TWR, PDOA, 측위 오차

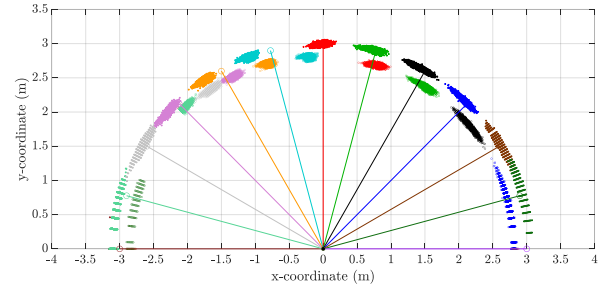


그림 2. 보정 유무에 따른 측위 결과

그림 2는 보정 유무에 따른 노드(원점)를 중심으로 태그의 위치 추정치를 도식화한 그림으로, 이해의 편의를 위해 회전각(상대각) 15도 간격에 대한 결과만을 보인다. 원점으로부터 3m 떨어진 지점의 원점은 태그의 실제 위치를 나타내며, 마커는 측위 결과를 보인다. 그림 1을 통해 알 수 있듯이, 보정 전 측위 결과는 오프셋에 의해 실제 거리보다 짧고, 시계방향으로 약 15도 정도 회전한 지점에 분포하며, 오프셋 보정을 통해 측위 결과가 개선되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 보정 후에도 상대각 -60° 이하, 60° 이상 범위에서 정밀도가 낮았으며, -45° 부터 -15° 사이의 범위에서 다른 범위에 비해 상대적으로 오차가 증가한 결과를 보였다.

IV. 결론

본 논문에서는 LOS 환경에서 Decawave PDOA1000 성능 및 오프셋에 따른 영향을 분석하였다. 무반사실에서 실험을 진행하고, 오프라인 오프셋 보정 유무에 따른 TWR, 측위 오차를 비교, 분석하였다. 오프셋 보정 미수행 시, PDOA 오프셋에 의해 위치 추정치가 실제 위치에서 15도 정도 틀어지고, 위상 반전 시 측위 오차가 노드와 태그 간 거리의 2배 수준까지 증가함을 확인하였다. 오프셋 보정을 통해 측위 평균 오차는 0.18m 수준까지 감소하였으나, 일부 범위에서 정확도 및 정밀도가 저하되는 것을 확인하였다. 이는 안테나 배치 및 패턴에 따른 한계로, 이를 개선하기 위한 멀티 빈(bin) 기반 오프셋 보정 등에 대한 연구는 후속 연구로 남는다.

참고 문헌

- [1] Report on Location-Based Services User Needs and Requirements: Outcome of the European GNSS' User Consultation Platform, GSA, Jul. 2019, version 2.0.
- [2] PDOA Primer: Calculating Position Directly from Range and Phase Difference of Arrival at Two Antennas, Decawave, Jul. 2018, version 1.3.