

LOS 환경에서 Decawave PDOA1000 측정치 오차 분석

서재희, 허문범, 이상우*
한국항공우주연구원

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

Analysis of Decawave PDOA1000 Measurement Errors 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 PDOA1000 측정치의 오차를 분석한다. PDOA1000은 노드와 태그 간 상대적 거리 및 각도 정보에 기반한 측위 솔루션으로, 상대적 거리는 노드와 태그 간 메시지 왕복 소요시간에 따른 TWR(two-way ranging)을 통해 측정하며, 상대각은 배열안테나를 탑재한 노드의 안테나 간 입사신호의 위상차(PDOA, phase-difference-of-arrival)를 통해 측정한다. 실제 측정치에는 안테나 상호결합 등에 따른 오프셋이 포함되며, 오프셋은 보정(calibration) 절차를 통해 필수적으로 제거가 필요하다. 본 논문에서는 가장 기본적인 단방향 오프셋 보정 기법을 적용하여, LOS 환경에서 보정된 측정치 내 포함된 오차의 특성을 분석한다.

I. 서 론

Decawave社(現 Qorvo)의 UWB (ultra-wideband) 측위 솔루션은 확장성 및 편의성이 높아 많은 분야에서 연구개발 및 시제품 개발을 위해 활용되고 있다[1]. 기본적으로 단말 간 메시지 왕복 소요시간(round-trip time)을 측정을 통한 거리측정 TWR (two-way ranging) 기법에 기반을 두고 있으며, 최근에는 배열안테나 기술을 적용한 입사신호의 위상차인 PDOA(phase-difference-of-arrival)를 추가적으로 이용하는 PDOA1000을 발표한 바 있다. PDOA 측정치는 단말 간 상대각에 대한 함수로, PDOA1000은 2차원(단말 간 상대 거리 및 각도) 정보를 이용함으로써 TWR 기반 솔루션에 비해 측위 정확도뿐만 아니라, 측위 가용성 향상을 가능하게 하였다. 단적인 예로, 2차원 공간에서 태그의 위치 추정을 위해서는 TWR 기반 솔루션은 기준점/참조점 역할의 노드가 최소 3개 이상, PDOA1000은 최소 1개가 필요하다.

다만, PDOA1000은 소형화 및 보급화에 따른 안테나 상호결합(mutual coupling), 안테나 위치 오차, 안테나 선로 길이 차이 등에 따라 측정치에 오프셋이 포함되며, 보정(calibration)을 통한 오프셋 보정이 필수적으로 요구된다. Decawave社는 이를 위해 노드와 태그의 안테나 평면이 일직선으로 바라보는 방향(face-to-face orientation)을 기준으로 전 방향에 대한 오프셋을 보정하는 단방향 보정을 권장하고 있다[2].

본 논문에서는 LOS (line-of-sight) 환경에서 단방향 보정을 통해 획득한 TWR 및 PDOA 측정치의 오차 특성을 분석하며, 분석결과를 측위 알고리즘 개발 및 시스템 설계를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

II. PDOA1000 측정치 모델

노드와 태그가 n 번째 주기에 메시지 교환을 통해 획득한 TWR 및 PDOA 측정치를 각각 $\hat{r}[n]$, $\hat{\phi}[n]$ 으로 표기하며, 다음과 같이 정의할 수 있다[3].

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

여기서, $r[n]$ 과 $\phi[n]$ 은 노드와 태그 배치에 따른 실제 거리(range) 및 위상차(PDOA)를 나타내며, q_r 과 q_ϕ 은 안테나 상호결합 등에 의한 오프셋(offset)을 나타낸다. 그리고 $v_r[n]$ 과 $v_\phi[n]$ 은 임의 잡음(random noise)이다.

단방향 오프셋 보정에 따른 각각의 보정된 측정치 $\tilde{r}[n]$ 과 $\tilde{\phi}[n]$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\tilde{r}[n] &= \hat{r}[n] - \hat{q}_r \\ \tilde{\phi}[n] &= \hat{\phi}[n] - \hat{q}_\phi\end{aligned}\quad (2)$$

\hat{q}_r 과 \hat{q}_ϕ 은 Decawave社의 권고[2]에 따라, $r[n] = 3m$, $\phi[n] = 0rad$ 조건에서 추정된 TWR 및 PDOA의 오프셋이다. 이에 따라, 최종 측정치의 오차는 다음과 같으며, 오차 성분으로는 임의잡음 $v_{(i)}[n]$ 과 실제 오프셋과 추정치 간 차이인 오프셋 잔차(residual)가 포함된다.

$$\begin{aligned}e_r[n] &= \tilde{r}[n] - r[n] \\ e_\phi[n] &= \tilde{\phi}[n] - \phi[n]\end{aligned}\quad (3)$$

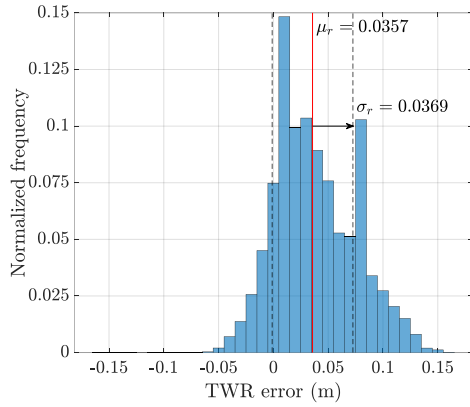


그림 1. 보정된 TWR 측정 오차의 히스토그램

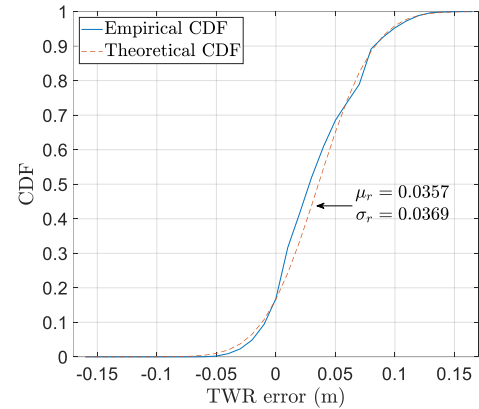


그림 3. 보정된 TWR 측정 오차의 누적분포함수

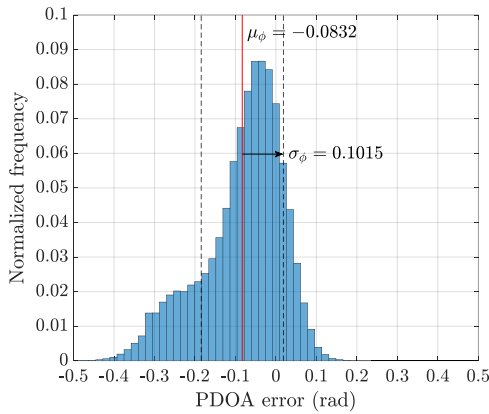


그림 2. 보정된 PDOA 측정 오차의 히스토그램

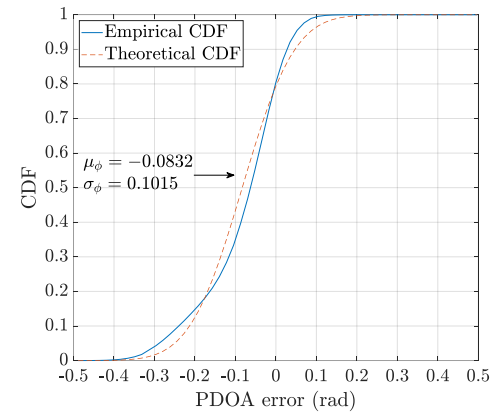


그림 4. 보정된 PDOA 측정 오차의 누적분포함수

III. TWR 및 PDOA 오차 분석

오차 분석을 위한 실험은 4.0m × 2.5m × 2.0m (length × width × height) 크기의 무반사실에서 PDOA1000 노드와 태그의 안테나가 동일한 높이에 위치하고, 이격거리를 3m로 유지한 상태에서 노드의 각도를 -90도부터 +90도까지 5도 간격으로 회전시키며 진행하였다[3]. 오프셋 추정을 위해 사용한 측정치는 총 200개이며, 각 회전각에서 최소 3,000개 이상의 측정치를 획득하였다.

무반사실의 무선채널은 LOS 환경으로 가정함에 따라, 측정치의 오차 분포는 정규분포(Gaussian)로 가정할 수 있다[1].

$$f(e_{(i)}) = \frac{1}{\sigma_{(i)}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(e_{(i)} - \mu_{(i)})^2}{2\sigma_{(i)}^2}} \quad (4)$$

$e_{(i)}$ 는 각 측정치의 오차를 나타내는 확률변수(random variable)이며, $\mu_{(i)}$ 와 $\sigma_{(i)}$ 는 각 오차의 평균과 표준편차를 나타낸다.

그림 1과 2는 $e_r[n]$ 과 $e_\phi[n]$ 의 히스토그램을 보이며, 오차의 경험적(empirical) 누적분포함수(CDF, cumulative distribution function)와 정규분포에 적합(fitting) 수행한 이론적(theoretical) CDF는 그림 3과 4에서 보인다. TWR 측정 오차의 평균은 0.0357m, 표준편차는 0.0369m이며, PDOA 측정 오차의 평균은 -0.0832rad, 표준편차는 0.1015rad이다. 전반적으로 오차는 정규분포와 유사한 형태로 분포하나, 일부 구간에서 빈도수가 이론적 수치에 비해 높게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 입사신호의

방향별 오프셋이 상이하여 발생하는 오프셋 잔차에 의한 것이다[3].

IV. 결론

본 논문에서는 LOS 환경에서 Decawave社 UWB 측위 솔루션인 PDOA1000의 측정치 오차를 분석하였다. 단방향 오프셋 보정을 통한 측정치 오차는 전반적으로 정규분포와 유사한 형태를 보였으나, 오프셋 잔차에 의해 이론적 모델(정규분포)과 다소 상이한 결과를 보였다. 후속연구를 통해 오프셋 잔차를 고려한 오차 모델을 개발하고, 신규 모델을 바탕으로 측위 알고리즘을 개발하고자 한다.

참고 문헌

- [1] A. R. Jiménez 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.
- [2] *PDOA Primer: Calculating Position Directly from Range and Phase Difference of Arrival at Two Antennas*, Decawave, Jul. 2018, version 1.3.
- [3] 서재희, 허문범, 이상우, "LOS 환경에서 Decawave PDOA1000 성능 분석," *2020년도 한국통신학회 하계종합학술발표회*, 2020년 8월.