

LS 기반 무선 시각 동기 기법을 활용한 UAV TDoA 측위 성능 분석

김성엽¹, 윤성권¹, 정홍석¹, 박철순², 나선필², 전종화³, 주형준³, 김선우^{1*}

¹한양대학교 융합전자공학과, ²국방과학연구소, ³한화시스템

{sy981222, ysk37, hssjung, remero}@hanyang.ac.kr¹

²{csun1402, sp2025}@add.re.kr³, {jongwha.jeon, junie.ju}@hanwha.com³

LS-based Wireless Clock Synchronization for UAV TDoA Localization Performance Analysis

Seongyeop Kim¹, Seongkwon Yoon¹, Hongseok Jung¹, Cheolsun Park², Sunphil Nah²,

Jongwha Jeon³, Hungjun Ju³ and Sunwoo Kim^{1*}

Hanyang University¹, Agency for Defense Development², Hanwha System³

요약

본 논문은 LS (least square) 기반 무선 시각 동기화 기법을 적용한 TDoA(time difference of arrival)-LS 기반 UAV (unmanned aerial vehicle) 측위 기법의 성능을 정량적으로 분석하였다. 앵커 간 시각 오차를 고려하여 clock drift와 offset을 LS로 추정하고 이를 보정하는 절차를 제안하였다. 보정된 시각 정보를 바탕으로 UAV를 측위하고, 시각 동기 주기에 따른 측위 성능을 RMSE(root mean square error)를 통해 분석하였다. 실험 결과, 동기 주기와 측위 주기가 일치할 때 가장 높은 측위 성능을 보이는 것을 확인하였다.

1. 서 론

전장 환경에서 GNSS (global navigation satellite system) 기반 측위 기법은 재밍 등의 전자기 공격으로 인해 측위 신뢰성이 저하된다 [1]. 이러한 제한 속에서, TDoA (time difference of arrival) 방식은 단말과 앵커 간의 직접적인 시각 동기화를 필요로 하지 않고, 신호의 수신 시간 차이만을 활용해 측위할 수 있다는 구조적 특성으로 인해 전장 환경에 적합한 기술로 평가된다 [2]. 그러나 앵커 간 시각 오차는 TDoA 측위의 정밀도에 직접적인 영향을 미치며, 이를 극복하기 위해 앵커 간 무선 기반 시각 동기화 기법이 필수적이다 [3]. 특히, 시각 동기화의 주기 설정은 측위 성능과 연산 복잡도 간의 trade-off를 결정짓는 핵심 요소임에도 불구하고, 이에 대한 정량적 분석은 아직 부족하다. 본 논문은 상용 UWB (ultra-wideband) 모듈의 시각 오차 모델의 파라미터를 통해 시각 동기화 주기 변화에 따른 TDoA-LS 기반 UAV 측위 성능을 정량적으로 분석한다.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 3차원 공간에서 UAV의 위치를 추정하는 TDoA (time difference of arrival) 기반 측위 시나리오를 고려한다. $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ 에 위치한 UAV는 총 N 개의 고정된 앵커 $\mathbf{s}_i \in \mathbb{R}^3$, $i = 1, \dots, N$ 로부터 송신된 ToA (time of arrival) 측정값 t_i 를 수신한다. 이때, 서로 다른 두 앵커 i 와 j 에 대해 TDoA 측정값 Δt_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta t_{ii} = t_i - t_i \quad (1)$$

각 앵커 간 시각동기가 되어 있지 않으면 식 (1)에서 정의한 TDoA 측정값에는 시각 오차가 포함되며, 이는 측위 정확도를 저하시킬 수 있다. 따라서 실제 측위를 위해서는 앵커 간 시각 차를 보정하는 절차가 선행되어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 k 번째 측정 시점에서 구한 SA(slave anchor)의 시각 $t_{SA,k}$ 가 시각동기 기준 앵커인 MA(master anchor)의 시각 $t_{MA,k}$ 에 대해 그림 1과 같이 선형적인 시각 오차 모델을 따른다고 가정하며, 다음과 같이 표현된다.

$$t_{SA,k} = f \cdot t_{MA,k} + \theta \quad (2)$$

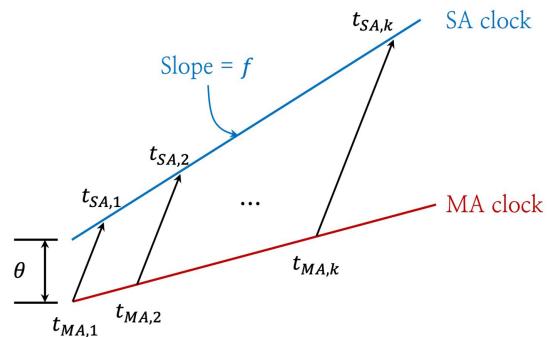


그림 1. 기준 앵커 MA 대비 SA의 시각 모델
이때 f 는 SA의 clock drift이며, θ 는 clock offset이다.

3. TDoA-LS 기반 측위를 위한 무선 시각동기 및 측위 기법

식 (2)의 시각 오차 모델을 기반으로, MA와 SA로부터 복수의 시각 측정값을 수집하여 least square 기법을 통해 clock drift \hat{f} 와 offset $\hat{\theta}$ 를 추정한다.

MA에서 수집된 기준 시각 측정값 $t_{MA,k}$ 와 SA의 시각값 $t_{SA,k}$ 를 기반으로 선형 회귀 모델을 구성하면 독립 변수 행렬 \mathbf{G} 와 종속 변수 벡터 \mathbf{b} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} t_{MA,1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_{MA,k} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} t_{SA,1} \\ \vdots \\ t_{SA,k} \end{bmatrix} \quad (3)$$

위 행렬식을 바탕으로 clock drift와 offset에 대한 추정 벡터 $\hat{\mathbf{y}} = [\hat{f}, \hat{\theta}]^\top$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{\mathbf{y}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{b} \quad (4)$$

추정된 clock drift와 offset을 바탕으로, SA의 측정값은 다음과 같이 MA를 기준으로 동기화된 시각값으로 변환된다.

$$\hat{t}_{SA,k} = \frac{t_{SA,k} - \hat{\theta}}{\hat{f}} \quad (5)$$

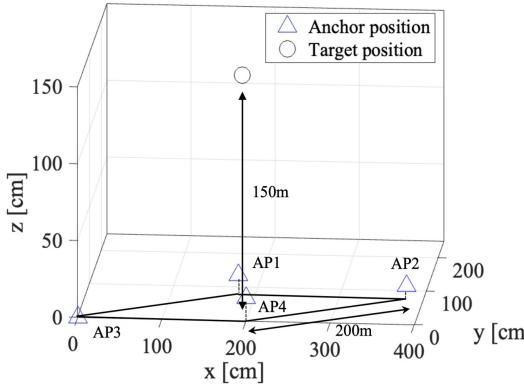


그림 2. 시각 동기화된 4개의 앵커 및 UAV 측위 시나리오

위 식을 통해 보정된 시각값은 TDoA-LS 기반 측위에 활용되며, 해당 보정 과정을 통해 TDoA 계산 및 측위 시 정확한 시간 정보를 제공할 수 있게 된다.

동기화된 시각을 이용하여 보정된 TDoA를 계산하면 다음과 같다.

$$\hat{\Delta t}_{ij} = \hat{t}_i - \hat{t}_j \quad (6)$$

여기서 \hat{t}_i 와 \hat{t}_j 는 보정을 마친 도달 시각이다. 이러한 방식으로 모든 앵커 쌍에 대해 보정된 TDOA 측정값을 계산하며, TDOA-LS 기반 알고리즘으로 UAV의 위치를 추정할 수 있다 [4].

4. 시뮬레이션 환경 구성 및 결과

A. 시뮬레이션 환경 구성

본 논문에서는 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 면적에서 4개의 앵커가 UAV의 위치를 추정하는 3차원 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 각 AP는 [5]에서 제안한 최적의 앵커 배치에 따라 그림 2와 같이 $\text{AP}_1 = [178.2, 90.7, 15]^\top$, $\text{AP}_2 = [378.2, 90.7, 10]^\top$, $\text{AP}_3 = [0, 0, 0]^\top$, $\text{AP}_4 = [200, 0, 5]^\top$ 로 배치를 하였으며, UAV는 $\text{UE} = [189.1, 45.4, 150]^\top$ 에 위치한다. TDoA 측정값 오차의 표준편차 σ_n^2 는 3cm 로 설정하였으며, clock drift은 0.5ppm , clock offset은 [6]에 따라 0.02ppm 으로 설정하였다. 측위 성능을 분석하기 위해 200ms 주기로 측위를 수행하였다. 측위 성능은 RMSE(root mean square error)를 통해 분석되었으며, 0초부터 1000초 까지의 시간 범위에서 총 5000회 (200ms 간격)의 측위를 수행한 결과값을 기반으로 산출되었다.

B. 시뮬레이션 결과 및 분석

시각동기 주기 1, 3, 5, 10Hz에 따른 TDoA-LS 기반 측위 성능을 비교한 결과를 그림 3에 나타내었다. LS 알고리즘을 통한 시각 오차 보정 시 clock drift와 offset 두 파라미터를 추정하기 위해 최소 2회의 동기 주기가 필요하다. 초기 2회의 동기 주기 동안 파라미터 추정이 완료되면, 이후부터는 drift에 의한 누적 오차가 제거된다. 결과적으로 2회의 동기 주기 이후에는 clock offset에 의한 오차만 남게 되어 0.02ppm 에 해당하는 매우 작은 측위 오차로 수렴한다.

표 1은 0초부터 1000초 까지의 시간 범위에서 측정된 측위 오차의 RMSE 분석 결과를 나타낸다. 1Hz의 경우 1.09m 로 가장 큰 오차를 보이는 반면, 3Hz에서는 0.31m 로 오차가 약 71% 감소하였다. 시각 동기 주기가 5Hz 및 10Hz인 경우, 측위 주기(5Hz)와 동기화 주기가 일치함에 따라 누적 오차 없이 시각 정보가 보정되었으며, 결과적으로 측위 오차가 10cm 이하로 유지되어 정밀한 측위가 가능함을 확인하였다.

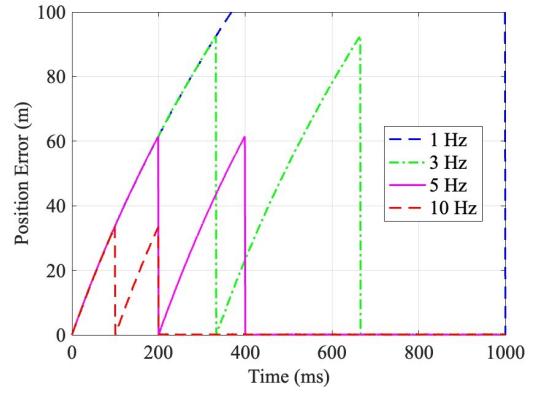


그림 3. 시각동기 주기에 따른 TDoA-LS 기반 측위 오차 변화

표 1. 시각동기 주기에 따른 TDoA-LS 기반 측위 RMSE 분석 결과

| 시각동기 주기 | RMSE |
|---------|---------|
| 1 Hz | 1.09 m |
| 3 Hz | 0.31 m |
| 5 Hz | 0.098 m |
| 10 Hz | 0.096 m |

5. 결론

본 논문에서는 무선 시각동기 주기에 따라 TDoA-LS 기반 UAV 측위 성능을 정량적으로 분석하였다. 앵커 간의 clock drift와 offset을 LS를 통해 추정하고 이를 보정하는 절차를 정립하였으며, 이 보정된 시각 정보를 바탕으로 위치 추정을 수행하였다. 실험 결과, 최소 2회의 동기 주기가 소요된 이후부터는 clock drift에 의한 오차가 효과적으로 제거되어 안정적인 측위가 가능함을 확인하였다. 특히, 5Hz 및 10Hz의 시각 동기 주기에서는 측위 주기와의 시간 간격이 일치하여 시각 보정의 누적 오차가 발생하지 않기 때문에, 측위 오차가 10cm 이하로 유지되어 정밀한 측위가 가능함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 미래도전국방기술과제 (No.915087201)를 통해 연구가 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] Z. B. Tariq, et al., "Non-GPS positioning systems: A survey," *ACM Comput. Surv.*, 2017.
- [2] H. Chen, et al. "A joint TDOA-PDOA localization approach using particle swarm optimization," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, 2020.
- [3] F. Zhang, et al. "Ultrawideband-based real-time positioning with cascaded wireless clock synchronization method." *IEEE Internet Things J.*, 2024.
- [4] Y. Weng, et al., "Total least squares method for robust source localization in sensor networks using TDOA measurements." *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, 2011.
- [5] 김성업 외, "앵커 배치에 따른 무인이동체의 TDoA 측위 성능 해석," 2025년 한국전자파학회 동계종합학술대회 논문집, 2025.
- [6] C. McElroy, "Comparison of wireless clock synchronization algorithms for indoor location systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, 2014.