

AR 환경에서 UWB 비콘의 정밀 위치 추정을 위한 DoP 고려 가상 앵커 선택 기법

김장연, 박지웅, 고영배
아주대학교 소프트웨어학과

jangyoun02@ajou.ac.kr, z7080z@ajou.ac.kr, youngko@ajou.ac.kr

DoP-Aware Virtual Anchor Selection Method for Precise Localization of Wall-Attached UWB Beacons in AR Environment

Jang-Yeon Kim, Ji-Woong Park, Young-Bae Ko
Department of Software, Ajou University

요약

AR(Augmented Reality) 환경에서, 매 시점의 사용자 위치와 사용자-비콘 간 UWB(Ultra-Wide Band) 거리값의 쌍을 가상 앵커(Virtual Anchor, VA)로 활용하여 인프라 없이 비콘과의 상대 위치를 측정하는 VA 기반 측위가 활발히 연구되고 있다. 그런데 비콘이 벽면에 설치된 경우, VA의 기하학적 분포에 따라 거리 오차가 증폭되는 DoP(Dilution of Precision) 문제로 인해 측위 정밀도가 저하되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 비콘의 위치를 임시 추정한 뒤, 해당 지점을 기준으로 DoP를 고려해 VA를 재선택하는 방식의 VA 선택 기법을 제안한다. 제안 기법은 벽면 설치 환경에서 기존 알고리즘에 비해 평균 40.9% 낮은 DoP를 통해 52.9% 향상된 측위 정확도를 달성하였다.

I. 서론

증강현실(AR) 서비스에서는, 사용자가 비콘과의 거리나 방향에 따라 가상 객체를 활성화하거나 상호작용을 수행하는 기능이 자주 활용된다. 이를 위해서는 별도의 인프라 없이, 비콘과의 상대 위치를 정밀하게 추정하는 기술이 요구된다. 이러한 요구에 맞춰, 이동 중인 기기가 각 시점에서 VIO로 추정한 위치 좌표와 UWB 거리값의 쌍을 가상 앵커(VA)로 이용해 비콘의 상대 위치를 추정하는 VA 기반 측위방식이 활발히 연구되고 있다[1][2]. VA 기반 측위에서는 연산 복잡도를 고려하여, 모든 VA가 아니라 일부 VA를 선택하여 사용하는 방식이 일반적이다.

이러한 AR 환경에서의 UWB 비콘은 벽면에 설치되는 경우가 많다. 그런데 벽면에 설치된 비콘의 위치를 추정하는 경우, 측위 정확도가 낮아지는 문제가 발생하며, 이는 DoP 문제에 기인한다. DoP는 선택된 VA의 기하학적 구조에 따라 거리 오차가 위치 추정 결과에 반영되는 비율로, DoP가 높을수록 거리 오차가 증폭되어 측위 정확도가 떨어진다.

본 논문에서는 거리오차 σ_r 에 따른 (x, y) 의 위치오차를 고려하므로, DoP와 위치오차 σ_{pos} 는 다음과 같다.

$$DoP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \quad \sigma_{pos} = DoP \times \sigma_r$$

일반적으로 VA가 비콘을 중심으로 잡았을 때, 분포하는 방위각이 넓을수록 DoP는 낮아진다[3].

기존의 VA선택 알고리즘은 그림1에서 선택한 VA와 같이 선택된 VA가 공간 전역에 최대한 넓고 고르게 분포하도록 선택하여, 대부분의 영역에 대해 낮은 DoP를 보인다. 이는 그림1에서 푸른 영역으로 나타난다. 그러나 벽면과 모서리 부근에서는 DoP가 높아지고, 이는 기존

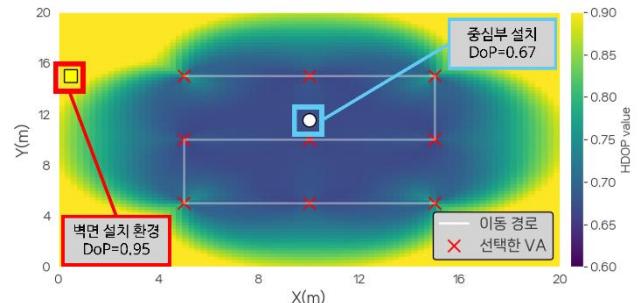


그림 1. 일반적인 VA 선택에서 비콘 위치별 DoP
VA 선택 알고리즘이 벽면 환경에서 취약하다는 것을 보인다. 실제로 각 지점의 값을 살펴보았을 때, 비콘을 중심부에 설치한 경우 DoP는 0.67로 낮지만, 벽면에 설치한 경우 41.8% 높은 0.95의 DoP를 보인다.

이러한 취약점은 개별 비콘의 실제 위치를 고려하지 못하고 공간 상의 분포 만으로 VA를 선택하는 것에서 기인한다. 그런데 비콘의 실제 위치는 우리가 얻고자 하는 값이므로, 이를 알고서 VA를 선택하는 것은 불가능하다. 따라서 본 논문에서는, 초기 위치를 임시 추정하여 보정한 뒤, 해당 위치에서 DoP가 낮은 VA를 고르는 방식으로 비콘의 실제 위치에서 낮은 DoP를 갖는 VA를 선택하는 방식을 제안한다.

II. 제안 기법

그림 2의 (a)~(g)는 제안 기법의 과정에서 설명하는 각 요소를 표현한 것이다.

가상앵커 집합 정의

앵커가 이동하면서 생성한 (a)가상 앵커(VA) 집합 \mathcal{V} 를 다음과 같이 정의한다:

$$\mathcal{V} = \{(p_i, r_i)\}_{i=1}^N, \quad p_i = (x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2, \quad r_i > 0$$

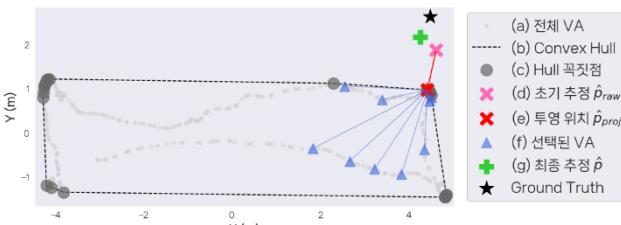


그림 2. 제안 기법의 과정별 요소

여기서 N 은 VA의 개수, p_i 는 i 번째 VA의 2차원 좌표, r_i 는 i 번째 VA에서 측정된 비콘과의 거리값이다. 최종적으로 선택할 VA 개수는 k ($k \leq N$)로 설정한다.

Convex Hull 정의

\mathcal{V} 의 좌표 집합 $\{p_i\}_{i=1}^N$ 에 대해 (b) 2차원 Convex Hull $\mathcal{H} \subset \mathbb{R}^2$ 을 계산한다. \mathcal{H} 는 전체 VA를 포함하는 최소 볼록 다각형이며, 그 꼭짓점을 v_j , (c) 꼭짓점의 순서 집합을 $\partial\mathcal{H} = \{v_j\}_{j=1}^h$ 라 한다.

Convex Hull 꼭짓점을 이용한 초기 위치 추정

\mathcal{H} 의 꼭짓점 $\partial\mathcal{H}$ 에 위치한 VA들은 전체 공간에 대해 가장 넓게 분포하여, 전역적으로 낮은 DoP 분포를 형성한다. 따라서 이들만을 이용해 비콘의 임시 위치를 추정하면 초기 추정의 정확도를 높일 수 있다. 비콘의 (d) 초기 추정 위치 $\hat{p}_{\text{raw}} \in \mathbb{R}^2$ 는 다음의 비선형 최소 제곱 문제(LMS, Least Mean Square)로 계산한다.

$$\hat{p}_{\text{raw}} = \underset{p}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^h (\|p - v_j\| - r_j)^2 \quad (1)$$

여기서 r_j 는 꼭짓점 VA인 v_j 에서 측정된 거리값이다.

공간 제약에 따른 추정 위치 보정

그림과 같이 벽면에 설치한 비콘은 \mathcal{H} 내부로 위치할 수 없는데, 만약 \hat{p}_{raw} 가 \mathcal{H} 내부에 위치할 경우 실제 위치와 간극이 커진다. 따라서 \hat{p}_{raw} 를 \mathcal{H} 다각형의 변 중 가장 가까운 위치로 수직 투영하여 보정하고, 이를 (e) 최종 기준점 \hat{p}_{proj} 로 사용한다.

$$\hat{p}_{\text{proj}} = \underset{q \in \text{Segments}(\partial\mathcal{H})}{\operatorname{argmin}} \|q - \hat{p}_{\text{raw}}\|$$

여기서 $\text{Segments}(\partial\mathcal{H})$ 는 \mathcal{H} 의 꼭짓점들을 순서대로 연결하여 이루어진 \mathcal{H} 다각형의 변들의 집합을 의미한다. 각도 기반 VA 재선택

낮은 DoP를 확보하기 위해서는 기준점을 중심으로 VA가 방향별로 고르게 분포해야 한다[3]. 따라서 \hat{p}_{proj} 를 중심으로 방향 다양성이 확보되도록 VA를 선택한다. 기준점 $\hat{p}_{\text{proj}} = (\hat{x}, \hat{y})$ 에 대해, 각 VA $p_i = (x_i, y_i)$ 와의 벡터 방향을 방위각 θ_i 로 정의한다:

$$\theta_i = \text{atan2}(y_i - \hat{y}, x_i - \hat{x}), \quad \theta_i \in (-\pi, \pi]$$

이 방위각의 분포 $\{\theta_i\}_{i=1}^N$ 를 정렬하여, 가장 큰 간격을 갖는 구간 $[\theta_s, \theta_e]$ 를 찾고, 이를 k 개로 균등 분할한다. 각 구간의 중심 방위각 θ_c^j 는 다음과 같이 계산된다:

$$\theta_c^j = \theta_s + \left(j - \frac{1}{2}\right) \frac{\theta_e - \theta_s}{k}, \quad j = 1, \dots, k$$

이 중심각 θ_c^j 와 가장 가까운 방위각을 갖는 VA를 하나씩 선택하여, (f) 최종 VA 집합 \mathcal{V}^* 를 구성한다:

$$\mathcal{V}^* = \left\{ \underset{(p_i, r_i) \in \mathcal{V}}{\operatorname{argmin}} \left\| \theta_i - \theta_c^j \right\| \right\}_{j=1}^k$$

최종 비콘 좌표 산출

v_j 대신 \mathcal{V}^* 로 식(1)을 풀어 (g) 최종 추정 \hat{p} 를 산출한다.

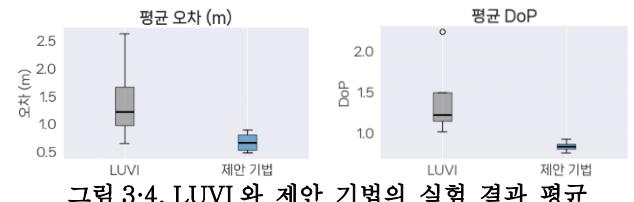


그림 3-4. LUVI 와 제안 기법의 실험 결과 평균

III. 실험 및 성능평가

본 연구에서는 $5.5 \times 12m$ 크기의 사무실 공간에서 4개의 UWB 비콘을 각 벽면에 부착하여 4개의 비콘의 위치를 동시에 측정하는 실험을 수행하였다. 비콘 장비로는 Qorvo DWM30010CDK를, 가상 앵커 생성 장비로는 Apple iPhone 12 Pro를 사용하였다. UWB 거리 측정과 VIO 좌표 수집을 동시에 진행하기 위해 Apple의 NearbyInteraction과 ARKit 프레임워크를 활용한 자체 개발 앱을 사용하였다. 벽면 설치 환경에서 제안 기법의 성능을 검증하기 위해, 일반적인 설치 환경을 가정한 기존 연구인 LUVI[1]와 비교 평가하였다. 선택된 VA 간의 간격이 지나치게 가까운 경우 거리값은 중복되어 의미가 없지만 DoP 감소에는 기여하기 때문에, 임계거리 이하로 가까운 VA들은 하나로 간주하고 DoP를 계산하였다. 실험에 사용한 k 값은 9이다.

그림 3과 4는 LUVI와 제안 기법을 통해 선택된 VA로 4개의 비콘을 동시에 측위했을 때 각 비콘에서의 오차와 DoP를 평균낸 결과를 비교한 것이다. 제안 기법의 평균 오차는 0.67m로, LUVI의 1.42m에 비해 약 52.9% 낮은 값을 보인다. 평균 DoP는 LUVI는 1.42, 제안 기법은 0.84로 제안 기법이 약 40.9% 더 낮다. 이를 통해 제안 기법이 벽면 환경에서 더 낮은 DoP를 갖는 VA를 선택하여 측위 오차를 줄인 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 벽면 설치 환경에서 가상 앵커 기반 UWB 측위 시 발생하는 DoP 악화 문제를 완화하기 위한 VA 선택 기법을 제안하였다. 실험 결과, 제안 기법은 기존 범용 알고리즘에 비해 벽면 환경에서 평균 40.9%의 DoP 감소를 통해 평균 52.9%의 위치 오차 감소를 이끌어내었다. 후속 연구로는 실제 벽면의 위치 정보를 활용하여 벽면에 설치된 비콘의 정확한 위치를 찾는 방법으로 본 기법을 확장할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업의 연구결과로 수행되었음(2022-0-01077)

참고 문헌

- [1] Choi, Hong-Beom, et al. "LUVI: Lightweight UWB-VIO based relative positioning for AR-IoT applications." *Ad Hoc Networks* 145 (2023): 103132.
- [2] Luo, Haolong, et al. "Visual-inertial navigation assisted by a single UWB anchor with an unknown position." *Satellite Navigation* 6.1 (2025): 1.
- [3] Xue, Shuqiang, and Yuanxi Yang. "Positioning configurations with the lowest GDOP and their classification." *Journal of Geodesy* 89 (2015): 49-71.