

UAV 측위를 위한 DOP 기반 앵커 배치 최적화

윤성권¹, 양두희¹, 정홍석¹, 박철순², 나선필², 전종화³, 주형준³, 김선우^{1*}

한양대학교¹, 국방과학연구소², 한화시스템³

{ysk37, yangdh95, hssjung, remero}@hanyang.ac.kr¹

{csun1402, sp2025}@add.re.kr²

{jonghwa.jeon, junie.ju}@hanwha.com³

DOP-Based Anchor Placement Optimization for UAV Localization

Seongkwon Yoon¹, Duhui Yang¹, Hongseok Jung¹, Cheol-Sun Park², Sun-Phil Nah²,

Jonghaw Jeon³, Hyung-Jun Ju³ and Sunwoo Kim^{1*}

Hanyang University¹, Agency for Defense Development², Hanwha Systems³

요약

본 논문은 고도 150 m에 고정된 UAV(unmanned aerial vehicle)의 3 차원 위치 추정을 위해 TDoA (time difference of arrival) 기법을 활용하고, 앵커 배치를 기하학적 정밀도 저하율(DOP)로 최적화한다. 4 개의 앵커를 배치하여 앵커 간격을 100 m, 150 m, 200 m로 변화시키면서 배치 구성을 달리하여 수평 정밀도(HDOP)를 평가하고, 최적 배치 형태를 도출하였다. 이후 선정된 최적 수평 배치에서 앵커의 고도를 변경하며 수직 정밀도(VDOP)를 최소화하는 최적 높이를 도출하였다. 제안된 방법은 UAV 측위 정확도를 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

최근 UAV (unmanned aerial vehicle)의 활용이 증가함에 따라 UAV 위치 추정 기술의 중요성이 부각되고 있다 [1]. 본 연구에서는 TDoA (time difference of arrival) 기법을 활용한 UAV의 3 차원 위치 추정 기법을 제안한다. 앵커의 배치에 따른 측위 성능을 고려하기 위해 이상적인 LOS(line-of-sight) 환경이며, 시각오차 및 거리오차는 발생하지 않는다고 가정했다. 지상에 4 개의 앵커를 100 m 간격으로 고정 배치하였다. 수평 평면에서 HDOP(horizontal dilution of precision)를 활용해 최적 앵커 배치를 찾았으며, z 축 방향은 VDOP(vertical dilution of precision)를 이용해 앵커 배치를 최적화하고 이때 측위 정확도가 향상된 것을 확인하였다. 본 논문은 시스템 모델 제시, DOP 기반 배치 최적화, 성능 분석 순으로 구성된다.

II. HDOP 기반 평면 배치 최적화

본 논문에서는 UAV의 측위 정확도를 높이기 위해 먼저 수평 위치에서의 앵커 배치를 최적화했다. HDOP는 위치 측위에서 앵커들의 기하학적 배치가 수평 위치 오차에 미치는 영향을 나타내는 지표다 [2]. HDOP를 수학적으로 표현하기 위해 먼저 UAV와 각 앵커 사이의 거리를 고려한다. UAV의 수평 위치를 (x, y) , i 번째 앵커의 위치를 (x_i, y_i) 라 할 때 두 점 사이의 거리는 다음과 같다.

$$\rho_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 ρ_i 는 UAV의 위치 s^{UAV} 와 i 번째 앵커 s_i 간의 거리이다.

$$s^{UAV} = [x, y, z]^T, \quad s_i = [x_i, y_i, z_i]^T \quad (2)$$

이 거리 측정치가 UAV의 수평 위치 변화에 따라 어떻게 달라지는지를 알아보기 위해 ρ_i 를 x 와 y 에 대하여 편미분 한다. 편미분 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial x} = \frac{x - x_i}{\rho_i}, \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial y} = \frac{y - y_i}{\rho_i} \quad (3)$$

식 (3)는 i 번째 앵커로부터 태그까지의 거리 변화율을 나타내며, 거리변화율을 통해 수평면 상의 위치 변화에 따른 상관관계를 알 수 있다. 이를 통해 자코비안 행렬

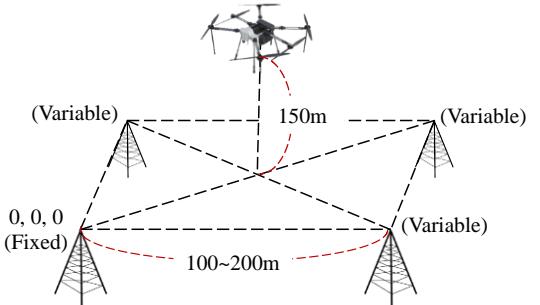


그림 1 앵커 배치에 따른 DOP 분석 시나리오

(Jacobian matrix) \mathbf{H} 를 구성할 수 있으며, 평면상의 i 개의 앵커에 대한 행렬 \mathbf{H} 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} & \frac{\partial \rho_1}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial x} & \frac{\partial \rho_i}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

행렬 \mathbf{H} 는 UAV와 앵커들의 기하학적 관계를 선형화하여 나타낸 것으로, 위치 추정 문제에서 중요한 역할을 한다. 이때 \mathbf{H} 로부터 $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ 에 해당하는 행렬 \mathbf{G} 를 정의하면, 이는 위치 오차 공분산 행렬에 비례하는 기하학 행렬이다. 특히 \mathbf{G} 의 대각 성분은 G_{xx}, G_{yy} 로 각각 x 와 y 방향의 분산을 나타낸다. HDOP는 이 두 성분합의 제곱근으로 정의되며 식 (5)와 같다.

$$\mathbf{G} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}, \quad \text{HDOP} = \sqrt{G_{xx} + G_{yy}} \quad (5)$$

식 (4)는 HDOP의 정의를 수식으로 표현한 것으로, 수평 위치 오차의 기하학적 희석 정도를 의미한다. HDOP 값이 작을수록 동일한 측정 오차 하에서 수평 위치 정확도가 높아지며, 이는 앵커 배치가 그만큼 이상적임을 뜻한다. 따라서 HDOP를 최소화하는 것은 곧 최적의 앵커 배치를 찾는 것과 같다.

III. VDOP 기반 높이 최적화

VDOP는 기하구조로 인한 수직 방향 위치 정확도 저하 정도를 나타내는 지표이다. 일반적으로 모든 앵커가

동일 평면에 위치하면 수직방향으로는 기하구조가 불리하고 VDOP 값이 크게 나타난다. 따라서 수직 정밀도를 향상시키기 위해서는 앵커들의 높이 분포를 조정하여 기하학적 구성을 최적화할 필요가 있다. VDOP은 앞서 정의한 **G** 행렬의 수직 성분을 이용하여 계산하며 아래와 같이 정의된다.

$$VDOP = \sqrt{G_{zz}} \quad (6)$$

G_{zz} 는 위치 오차 공분산에서 수직 방향의 분산에 해당하는 요소이다. 수식 (6)의 VDOP 값이 작을수록 UAV의 고도 방위 추정 정밀도가 높음을 의미한다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 UAV의 위치는 고정시키고 앵커의 위치를 이동하며 HDOP 통해 앵커의 평면배치 최적화를 진행했다. 기준 앵커로 사용된 앵커는 영점에 고정하고, 나머지 앵커들은 인접 앵커 간 거리가 최대 100 m, 150 m, 200 m 이내가 되도록 위치를 조정했다.

그림 2는 앵커 간격이 200 m 일 때 수평/수직 커버리지 영역에 따른 HDOP 그래프이다. 그림에서 앵커의 커버리지 영역이 같을 때 낮은 HDOP 가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 앵커들이 충분하게 일정하게 분포된 배치에서 태그의 측위 정확도가 높아짐을 의미한다. 그래프에서 수직 커버리지 영역이 최소이며 수평 커버리지 영역이 최대인 경우 HDOP 값이 5 까지 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 앵커들이 한 줄로 늘어선 경우로서 기하학적으로 열악한 배치로써 위치 오차가 크게 증폭됨을 의미한다 [3]. 수평/수직 커버리지 영역이 모두 최대에 가까운 배치에서 HDOP는 1 수준의 최적 성능을 확인할 수 있었으며, 이는 앵커 분포의 균형과 범위가 측위 정확도에 대한 영향을 정량적으로 보여준다.

위 분석을 기반한 앵커간 각도를 변경하며 정사각형과, 평행사변형 모양으로 앵커를 배치했다. 이때 공통적으로 약 105.5° 및 74.5°의 내각을 갖는 기울어진 평행사변형 배치가 가장 낮은 HDOP 를 나타냈다. 이는 정사각형 또는 직사각형 배치보다 우수한 성능으로, 특히 앵커 간격 100 m에서 HDOP 값이 약 1.8로 나타나 정사각형 대비 약 20% 향상된 수평 정밀도를 달성했다. 또한 150 m 와 200 m 간격의 경우에도 동일한 형태의 배치가 최적을 보였으며, 표 1 에서처럼 앵커 간격이 커질수록 HDOP 값은 1.8에서 1.1로 감소하며 HDOP 가 향상되는 경향이 확인되었다. 앵커 배치의 기울기 각도를 0°에서 15°까지 증가시킬 때 HDOP 가 감소 후 증가하는 양상을 보여 최적 각도가 존재함을 확인할 수 있었다.

HDOP 를 통해 얻어진 최적화 배치를 기준으로 앵커의 높이를 조절하여 VDOP 를 최소화했다. 각 앵커의 높이는 0 m에서 3 m 사이에서 조정 가능하며, 0.1 m 간격으로 변화시켜 가면서 최적의 높이 조합을 탐색하였다. 이때 UAV의 고도는 여전히 150 m로 고정되어 있으며, 앵커는 앞서 선정된 최적의 배치로 유지된다. 이때 x와 y좌표는 최적화된 상태에서, 앵커들의 상대적인 높이 차로 수직 정밀도를 향상시켰다.

표 1. 앵커 배치 최적화 성능 분석

앵커간격	θ	HDOP	VDOP
100 m	15.5	1.8	18.0
150 m	15.5	1.3	10.8
200 m	15.5	1.1	8.6

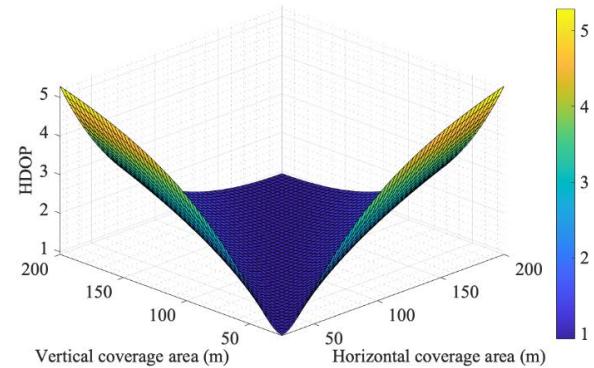


그림 2. 앵커의 커버리지 영역에 따른 HDOP 분석

앵커의 배치를 0.1 m 간격으로 모든 높이 조합을 탐색한 결과, 대각으로 마주보는 두 개의 앵커를 최대 높이로 올리고 나머지 두 개는 지면에 둔 구성에서 VDOP 가 최소로 나타났다. 최적 고도 배치 시 각 앵커 간격 조건에 대한 VDOP 값은 표 1 과 같이 앵커 간격이 100 m 일 때 18.0 으로 가장 VDOP 를 보였고, 200 m 일 때 8.6 으로 앵커 간 거리가 넓을수록 VDOP 도 함께 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 다만 최적화 후에도 VDOP 값 자체는 여전히 HDOP 에 비해 큰 편인데, UAV 가 지상 기반 앵커들 위 높은 고도에 위치한 환경적 특성상 수직 방향으로는 기하학적 이득을 얻기 어렵기 때문이다. 앵커들을 서로 다른 높이에 배치하여 UAV 와 형성하는 입체적인 기하구조가 증가되면 수직 방향 측위 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 최적의 앵커배치를 찾기 위해 HDOP 와 VDOP 를 사용했다. HDOP 와 VDOP 를 통해 앵커 배치에 따른 수평 및 수직 방향의 측위 정확도에 대한 기하학적 영향을 평가했으며, 앵커 배치를 최적화할 수 있었다. 최적화를 했을 때 HDOP 는 약 1.1 이었으며, 앵커의 높이 제한에도 불구하고 VDOP 또한 평면 배치 대비 크게 개선됨을 확인하였다. 향후 연구에서는 앵커 간격의 제한을 없애고 보다 유연한 배치를 모색함으로써, 군집 UAV 의 정밀 측위로 연구 범위를 확대할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] DH. Shin and TK. Sung, "Comparisons of error characteristics between TOA and TDOA positioning," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 38, no. 1, pp. 307–311, Jan. 2002.
- [2] LC Chu, PH Tseng, KT Feng, "GDOP-assisted location estimation algorithms in wireless location systems," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2008*, New Orleans, LA, USA, Nov.–Dec. 2008, pp. 1–5.
- [3] M. Wang, Y. Zhang, J. Chen, Z. Liu, and Y. Wang, "Analysis of the applicability of dilution of precision in the base station configuration optimization of ultrawideband indoor TDOA positioning system," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 225076–225087, 2020.