

# 기지국 개수에 따른 3차원 UAM 측위 성능에 대한 연구

지오근, 김성철

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소

{wldhrms, sckim} @maxwell.snu.ac.kr

## A Study on the Effect of Number of Base Station in 3 Dimensional UAM Localization

Ohgeun Jee, Seong-Cheol Kim

Department of Electrical and Computer Engineering and INMC,  
Seoul National University.

### 요약

본 논문에서는 지상의 기지국을 활용하여 UAM (Urban Air Mobility)의 위치를 추정할 때 기지국의 개수에 따른 3차원 UAM 측위 성능에 대한 분석을 진행하였다. 헤론의 공식을 이용하여 UAM의 높이를 계산하였으며 기지국들이 이루는 평면 상에서 선형 행렬식을 통해 UAM의 평면 상의 위치를 추정하였다. UAM의 기지국과의 상대적 위치를 3가지 경우로 구분하여 시뮬레이션을 진행했을 때 각 경우에 따라 고도, 기지국이 이루는 평면, 3차원 상에서의 측위 오차를 분석하였다. 그 결과, UAM의 위치에 따라 기지국이 많은 것이 좋은 성능을 보일 때도 있었으며 그 반대의 경우도 있음을 확인하였다.

### I. 서론

최근 도심에서의 교통혼잡 해결과 교외 지역과 도심 지역 간의 이동시간 단축 등을 위해서 UAM (Urban Air Mobility)에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [1]. UAM의 안전한 운행을 위해서는 정밀 측위 기술이 필요하지만, GPS 등과 같은 인공위성을 이용한 측위가 불가능한 경우 UAM의 위치 확보에 어려움이 있다. 이런 경우에 지상 기지국 (Base Station; BS)을 통해 UAM의 위치를 추정할 수 있는데 기지국 설치 개수가 인프라 구축 비용과 직접적인 연관이 있기에 기지국 개수와 측위 정확도 간의 관계를 분석하는 것이 필요하다.

본 논문은 UAM 3차원 측위 정확도와 기지국 개수 간의 상관관계에 대한 수식화 및 실측을 통한 검증 이전에 진행된 선행 연구이며 기지국의 개수가 정확도에 미치는 영향에 대해 UAM의 위치에 따라 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

### II. 본론

#### 가) 시스템 모델

본 논문에서 UAM은 그림 1과 같이 세 구역에 위치할 수 있다고 가정하였으며 나머지 구역들은 기지국들의 대칭성 등을 통해 표현할 수 있다. UAM의 실제 위치는  $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ 로 나타낼 수 있다.  $i$ 번째 기지국  $BS_i$ 의 위치는  $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 이며  $i \in \{1, 2, \dots, 6\}$ 이다. 이때, 모든 기지국은 같은 평면  $z=0$ 에 위치하며 인접한 두개의 기지국들은  $x$  방향 또는  $y$  방향으로 일정한 거리만큼 떨어져 있다 가정한다.  $\mathbf{p}_i$ 와  $\mathbf{p}$  사이의 거리  $d_i$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_i = \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_i\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}. \quad (1)$$

본 논문에서는 TOA (Time of Arrival)를 사용하여  $BS_i$ 와 UAM 사이의 거리를 측정한다. 가정하고 측정된 거리  $\hat{d}_i$ 는 편의상 다음과 같이 표현된다고 가정한다 [2].

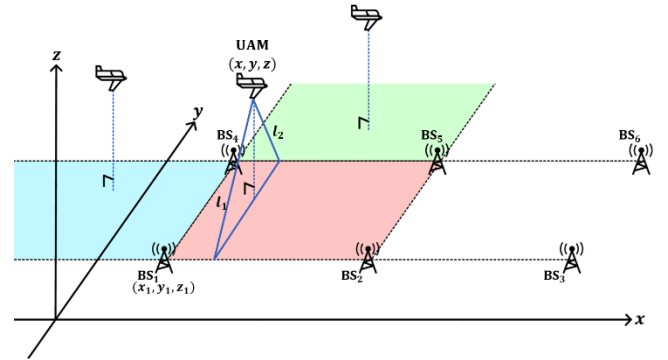


그림 1. 기지국들의 위치와 UAM이 위치할 수 있는 3가지 경우

$$\hat{d}_i = d_i + n_i \quad n_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2), \quad (2)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{\text{SNR}_0} \left( \frac{d_i}{d_0} \right)^\gamma. \quad (3)$$

이때  $n_i$ 는 측정 오차,  $\text{SNR}_0$ 는 reference 거리  $d_0$ 에서의 SNR (Signal-to-Noise Ratio),  $\gamma$ 는 path-loss 지수이다.

#### 나) 기지국 개수에 따른 측위 정확도

UAM은 정해진 회랑을 따라 이동하기에 진행 방향이 정해져 있는 경우가 많아 기지국들을 차도의 가로등과 같이 두 줄로 배치하였다. UAM의 고도는 헤론의 공식을 이용하여 추정하였다. 예를 들어 4개의 기지국  $BS_1, BS_2, BS_4, BS_5$ 을 이용할 때는  $BS_1, BS_2$  그리고 UAM이 이루는 삼각형의 높이  $l_1$ 를 구하고  $BS_4, BS_5$  그리고 UAM이 이루는 삼각형에 대해서도 동일하게  $l_2$ 를 계산한다. 그 후  $l_1, l_2, y$ 축 상 기지국이 떨어진 거리에 대해 다시 헤론의 공식을 적용하여 UAM의 추정 고도  $\hat{z}$ 를 결정하였다. 기지국 6개의 상황에서는  $[BS_1, BS_2, BS_4, BS_5]$ ,  $[BS_2, BS_3, BS_5, BS_6]$ ,  $[BS_1, BS_3, BS_4, BS_6]$ 와 같이 3가지 경우로 나누어 앞서의 방식과 동일하게 각각  $\hat{z}$ 를 추정한 후 그것들의 평균을 최종 추정 고도로 결정하였다.

기지국들이 이루는 2차원 평면 상에 정사영한 UAM의 위치를  $\mathbf{p}' = [x, y]^T$ 이라 하면  $\hat{d}_i$ 와  $\hat{z}$ 을 이용해  $\mathbf{p}_i$ 와  $\mathbf{p}'$

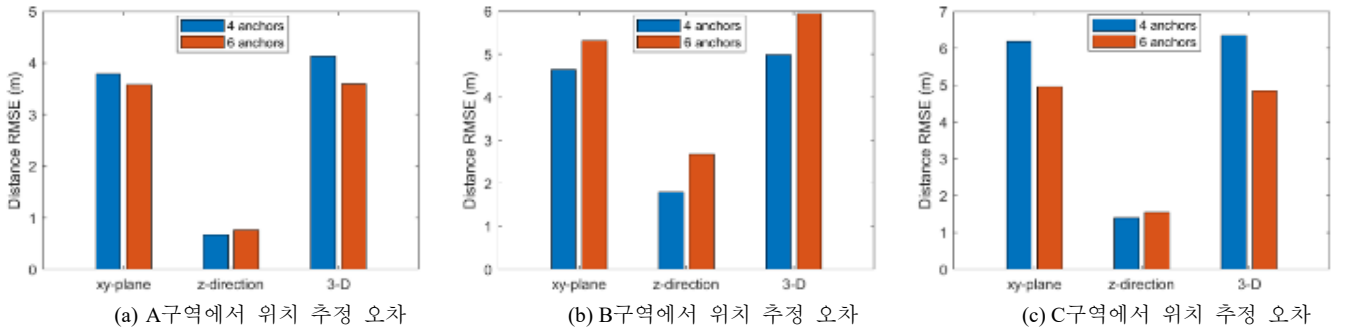


그림 2. 기지국의 개수에 따라 (4개, 6개)  $xy$ 평면,  $z$ 방향, 3차원 상에서의 위치 추정 오차를 RMSE로 나타낸 막대 그래프

의 거리  $d_i = \sqrt{\hat{d}_i^2 - \hat{z}^2}$ 를 구한다. 이 값과 이미 알고있는 기지국들의 위치를 이용해서 유도한 LLS (Linear Least Square)을 통해 추정된 기지국 4개 상황에서의 UAM의 평면 상의 위치  $\hat{\mathbf{p}}$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{A}\mathbf{p}' = \mathbf{b}, \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{b}. \quad (5)$$

이때  $\mathbf{A}$ 와  $\mathbf{b}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = 2 \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \hat{d}_1^2 - \hat{d}_2^2 - (x_1^2 + y_1^2) + (x_2^2 + y_2^2) \\ \hat{d}_1^2 - \hat{d}_3^2 - (x_1^2 + y_1^2) + (x_3^2 + y_3^2) \\ \hat{d}_1^2 - \hat{d}_4^2 - (x_1^2 + y_1^2) + (x_4^2 + y_4^2) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$$\arg \min_i \{d_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

(6)의 경우는 기준 기지국은  $BS_1$ 인 상황이며, 기준 기지국은 (7)과 같이 UAM과의 거리  $d_i$ 가 가장 짧은 기지국으로 설정하였다 [3]. 이렇게  $\hat{\mathbf{p}} = [\hat{x}, \hat{y}]^T$ 과  $\hat{z}$ 을 통해 UAM의 추정 위치  $\hat{\mathbf{p}} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T$ 를 구할 수 있다.

#### 다) 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서 배치된 기지국의 개수는 6개이며, 기지국의 좌표는 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100\text{m} & 300\text{m} & 500\text{m} & 100\text{m} & 300\text{m} & 500\text{m} \\ 100\text{m} & 100\text{m} & 100\text{m} & 300\text{m} & 300\text{m} & 300\text{m} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

이때, 기지국이 4개인 상황은 그림 1의  $BS_1, BS_2, BS_4, BS_5$ 을 활용하는 경우이며 6개 기지국인 상황은 나)에서 설명한 바와 같이  $BS_1, BS_2, BS_3, BS_4, BS_5, BS_6$ 을 모두 활용하는 경우이다.

UAM이 위치할 수 있는 구역은 그림 1의 빨간색, 파란색, 초록색으로 칠해진 부분을 각각 A, B, C 구역이라고 하였다. UAM의 좌표  $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ 에서,  $z \sim \mathcal{N}(300, 2^2)$ 로 설정하였다. (3)의 parameter들 중  $d_0 = 1\text{m}$ ,  $\text{SNR}_0 = 50\text{dB}$ 이며  $\gamma = 2$ 라 가정하였다.

그림 2는 UAM의 실제 위치와 추정 위치 간의 RMSE (Root Mean Square Error)를 나타낸 결과이다. 파란색 막대는 기지국 4개, 주황색 막대는 기지국 6개 상황을 나타낸다. 그림 2(a)는 A구역에서의  $xy$ 평면 상의 오차, UAM 고도인  $z$ 방향으로의 오차, 3차원 상의 오차를 표현하였다. 이때, 기지국 6개일 때가 (5)에서 더 많은 정보를 이용할 수 있기에  $xy$ 평면에 대한 오차가 더 작게 나타났지만,  $z$ 방향에 대해서는  $[BS_2, BS_3, BS_5, BS_6]$ 를 이용해 구한  $\hat{z}$ 로 인해 더 큰 오차를 나타냈다. 그림에도 불구하고 3차원 상에서의 오차는 기지국의 수가 많을수록 작게 나타났다.

그림 2(b)는 B구역에서의 오차인데 A구역과는 다르게  $xy$ 평면 상의 오차 또한  $BS_3, BS_5$ 를 포함한 기지국 6개일 때의 상황이 더 크게 나타났다. 이는 B구역과 더 멀리

떨어져있는  $BS_3, BS_5$ 로 인해 (5)의 값의 정확도가 낮아졌기 때문이다.  $z$ 방향에서 RMSE값의 차이는 A구역에서와 같은 이유로 인해 동일한 양상을 보인다. 기지국 6개인 경우에서 두 가지의 RMSE값이 모두 더 크기 때문에 자연스럽게 3차원 상에서의 RMSE값도 6개인 경우가 더 크다.

그림 2(c)는 C구역에서의 오차이며 이는 A구역과 비슷한 결과를 보인다. 다만  $xy$ 평면에서 RMSE 값 차이가 커지는 이유는 기지국 4개일 때 LLS를 통해 구한  $\hat{\mathbf{p}}$ 의 값의 정확도가 6개일 때에 비해 더 급격하게 떨어지기 때문이다. 그림 2 (a), (b), (c)를 통해서 모든 구역에서 더 많은 기지국, 즉, 주변의 기지국까지 개입된 경우에  $z$ 방향의 RMSE값은 더 커짐을 확인할 수 있다. 우리는 이를 통해 비교적 낮은 고도로 비행하는 UAM에 대해 A와 C구역에서 기지국이 6개일 때가  $xy$ 평면 상의 성능 향상을 통해  $z$ 방향 상의 성능 열화를 극복하여 전체 측위 성능을 향상시킬 수 있으며, 이와 반대로 높은 비행 고도를 갖는 UAM을 측위할 시  $z$ 방향 위치 추정 성능 열화로 인해 주변 기지국의 개입이 없는 것이 더 나은 결과를 보일 수 있음을 확인하였다.

### III. 결론

본 논문에서는 기지국 개수와 UAM 3차원 위치 추정 정확도에 대한 시뮬레이션을 하였다. 이를 통해 UAM에 위치에 따라 기지국 개수와 측위 정확도 간의 경향성이 달라짐을 확인하였다. 우리는 이 결과를 바탕으로 향후 실측과 수식화를 통해 실제 환경에서 기지국 개수에 따른 측위 성능 변화를 연구할 계획이다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 삼성전자의 지원(I0210202-08366-01)을 받아 수행된 결과임.

### 참고 문헌

- [1] 홍아름, 박안선, 김민선, "도심항공모빌리티(UAM) 관련 정책·산업 동향 및 이슈," 한국전자통신연구원, vol. 38, no. 4, pp. 36-46, Aug. 2023.
- [2] Y. Wang, F. Zheng, M. Wiemeler, W. Xiong and T. Kaiser, "Reference Selection for Hybrid TOA/RSS Linear Least Squares Localization," 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, 2013
- [3] I. Guvenc, S. Gezici, F. Watanabe and H. Inamura, "Enhancements to Linear Least Squares Localization Through Reference Selection and ML Estimation," 2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, NV, USA, 2008, pp. 284-289