

# UAM 간 통신을 통한 UAM 3차원 협력 측위 기법

김근우, 조완제, 김성철

서울대학교 전기 정보 공학부, 뉴미디어 통신 공동 연구소

{kimkeunwoo15, wjc1423, sckim} @ maxwell.snu.ac.kr

## UAM 3D cooperative localization using inter-UAM communication

Keunwoo Kim, Wanjei Cho, Seong-Cheol Kim

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

### 요 약

300m 이상의 고고도에서 고속으로 고밀도 운행을 하는 Urban Air Mobility (UAM)는 UAM 간 충돌이 발생하면 인명사고로 이어질 가능성이 상당히 높으므로 이를 방지하기 위한 안전 장치가 필요하다. 그 중 하나가 짧은 주기로 정밀하게 UAM 의 3 차원 위치를 추정하는 UAM 3 차원 측위 기법이다. 하지만, 기존 UAM 3 차원 측위 기법은 UAM 운행에 필요한 측위 정확도를 확보하는데 어려움이 있으므로 더 높은 정확도를 가지는 3차원 측위 기법이 필요하다. 본 논문에서는 UAM간 통신을 통해 UAM간의 거리를 알아낼 수 있는 경우 적용 가능한 UAM 3 차원 협력 측위 기법을 제시하였고 모의 실험을 통해 측위 성능을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

### I. 서론

300m 이상의 고고도에서 고속으로 고밀도 운행하는 Urban Air Mobility (UAM)은 UAM 간 충돌이 발생하면 인명사고로 이어질 가능성이 높으므로 이를 방지하기 위한 안전 장치가 필요하다. 그 중 하나가 짧은 주기로 정밀하게 UAM 의 3 차원 위치를 추정하여 UAM간 충돌을 방지하는 것이다. 하지만, 기존 UAM 3차원 측위 기법 [1]은 UAM 운행에 필요한 정확도를 확보하는데 어려움이 있으므로 더 높은 정확도를 가지는 3 차원 측위 기법이 필요하다. 본 논문은 UAM 의 사전에 정해진 이동 경로 정보를 활용한 측위 기법 [2]을 기반으로 작성된 논문으로써 경로를 따라 움직이는 여러 UAM 간 거리를 UAM 간 통신을 통해 알아낼 수 있는 경우 적용 가능한 UAM 3차원 협력 측위 기법을 제시하였다.

### II. 본론

#### 가. 시스템 모델

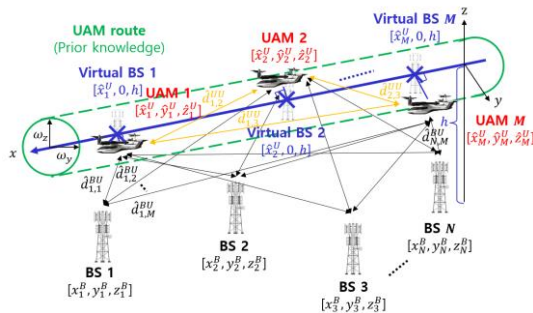


그림 1. UAM 3차원 협력 측위 시스템 모사도

본 절에서는  $M$  개의 UAM 과  $N$  개의 기지국 (Base station, BS)이 있는 환경에 대한 시스템 모델링을 진행한다.  $M$  개의 UAM 이 사전에

지정된 경로를 따라 움직인다 가정하였고 이때  $m$  번째 UAM 의 위치는  $[x_m^U, y_m^U, z_m^U]$ ,  $m \in \{1, 2, \dots, M\}$  로 표현된다.  $N$  개 기지국의 위치를 각각  $[x_n^B, y_n^B, z_n^B]$ ,  $n \in \{1, \dots, N\}$  이라 하면  $m$  번째 UAM 과  $n$  번째 기지국 간의 거리는

$$d_{n,m}^{BU} = \sqrt{(x_m^U - x_n^B)^2 + (y_m^U - y_n^B)^2 + (z_m^U - z_n^B)^2}$$

로 표현되고  $m$  번째 UAM 과  $m'$  번째 UAM 간의 거리는

$$d_{m,m'}^{UU} = \sqrt{(x_m^U - x_{m'}^U)^2 + (y_m^U - y_{m'}^U)^2 + (z_m^U - z_{m'}^U)^2},$$

$$m, m' \in \{1, 2, \dots, M\}, m \neq m'$$

로 표현된다. UAM 과 기지국 간 측정된 거리  $\hat{d}_{m,n}^{BU}$  와 UAM 과 UAM 간 통신을 통해 측정된 거리  $\hat{d}_{m,m'}^{UU}$  의 측정 오차를  $\omega \sim N(0, \sigma^2)$  이라 하면 측정된 거리  $\hat{d} \in \{\hat{d}_{n,m}^{BU}, \hat{d}_{m,m'}^{UU}\}$  는  $\hat{d} = d + \omega$  로 표현된다. 이때  $N(0, \sigma^2)$  은 평균이 0 이고 분산이  $\sigma^2$  인 가우시안 분포이다.

본 논문에서는 편의상  $M$  개의 UAM 이 일정 고도  $z = h$  상에서  $x$  축을 따라 움직이도록 지정되었다고 가정하였고 따라서 각 UAM 의 사전에 정해진 3 차원 위치는  $[x_m^U, 0, h]$  로 표현된다. 하지만, 각 UAM 은 운전자의 운행 능력 및 센서 오차 등에 의해 지정된 경로를 벗어나 움직일 수 있으며 이때의  $y, z$  축으로 벗어난 정도를 각각  $\omega_y \sim N(0, \sigma_y^2)$ ,  $\omega_z \sim N(0, \sigma_z^2)$  로 모델링 할 경우 각 UAM 의 실제 위치는  $[x_m^U, \omega_y, h + \omega_z]$  로 표현된다 [2].

#### 나. UAM 간 거리 정보를 사용한 3차원 협력 측위 기법

각 UAM 은 기지국 간 통신을 통해 측정된 거리  $\hat{d}_{n,m}^{BU}$  을 이용하여 초기 위치를 추정한다. 이때, 임의의 3 차원 측위 함수를  $f, f$  를 통해 추정된  $m$  번째 UAM 의 위치를  $[\hat{x}_m^U, \hat{y}_m^U, \hat{z}_m^U]$  라 하면  $[\hat{x}_m^U, \hat{y}_m^U, \hat{z}_m^U] = f(\hat{d}_{1,m}^{BU}, \dots, \hat{d}_{N,m}^{BU})$  로 표현된다. 우리는 이렇게 추정

$[\hat{x}_m^U, \hat{y}_m^U, \hat{z}_m^U]$ 과  $m$ 번째 UAM이  $[x_m^U, 0, h]$ 로 표현되는 지정된 경로를 따라 움직인다는 prior knowledge, 그리고 UAM과 UAM 간 통신을 통해 측정된 거리 정보  $\hat{d}_{m,m}^{UU}$ 를 이용한 협력 측위 기법을 제안한다.

$m$ 번째 UAM의 지정 경로 상에 가상 기지국을 생성하고 이를  $N + m$ 번째 기지국이라 생각한다. 이때, 해당 가상 기지국의 위치는  $[\hat{x}_m^U, 0, h]$ 이다. 본 논문은 앵커가 있는 MDS 기반 측위 기법 [3]을 응용하였고 추정된 각 UAM과 기지국의 3차원 위치를 나타내는 행렬  $\mathbf{X}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_t \mathbf{X}_a]^T = \begin{bmatrix} \hat{x}_1^U & \hat{x}_M^U & x_1^B & x_N^B & \hat{x}_1^U & \hat{x}_M^U \\ \hat{y}_1^U & \dots & \hat{y}_M^U & y_1^B & \dots & y_N^B & 0 & \dots & 0 \\ \hat{z}_1^U & \dots & \hat{z}_M^U & z_1^B & \dots & z_N^B & h & \dots & h \end{bmatrix}^T$$

이때,  $\mathbf{X}_t = \begin{bmatrix} \hat{x}_1^U & \hat{x}_M^U \\ \hat{y}_1^U & \dots & \hat{y}_M^U \\ \hat{z}_1^U & \dots & \hat{z}_M^U \end{bmatrix}^T$ ,  $\mathbf{X}_a = \begin{bmatrix} x_1^B & x_N^B & \hat{x}_1^U & \hat{x}_M^U \\ y_1^B & \dots & y_N^B & 0 & \dots & 0 \\ z_1^B & \dots & z_N^B & h & \dots & h \end{bmatrix}^T$ 는 각각  $M$ 개 UAM의 추정된 위치 및  $N + M$ 개 기지국의 실제 및 추정된 위치를 나타낸다.  $d(\mathbf{X})$ 가  $\mathbf{X}$ 를 통해 구한  $M$ 개의 UAM과  $N$ 개의 실제 기지국 그리고  $M$ 개의 가상 기지국 간 거리라 하면 우리는 비용 함수  $S(\mathbf{X})$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S(\mathbf{X}) = \sum w (\hat{d} - d(\mathbf{X}))^2.$$

이때,  $w \geq 0$ 은 각 거리에 대한 가중치이다. 우리는 모든 가중치 가운데 가장 큰 값을  $w_{max}$ 라 하면 가중치  $w$ 을 아래와 같이 표현하기로 한다. 기지국 간 거리에 대한 가중치는 1로 동일하다.

$$w = \begin{cases} \frac{1}{\sigma w_{max}}, & \text{(for UAM to UAM, BS)} \\ \frac{1}{\sqrt{\sigma_y \sigma_z w_{max}}}, & \text{(for UAM to Virtual BS)} \end{cases}$$

우리는 비용 함수  $S(\mathbf{X})$ 를 최소화하는 행렬  $\mathbf{X}$ 를 찾고자 하며 이는 SMACOF with anchors 알고리즘 [3]을 통해 구할 수 있다.  $k$ 번째로 추정된  $m$ 번째 UAM의 위치를  $\mathbf{x}_t^{(k)} = [\hat{x}_m^{U,(k)}, \hat{y}_m^{U,(k)}, \hat{z}_m^{U,(k)}]$ 라 하면  $\mathbf{x}_t^{(0)} = [\hat{x}_m^U, \hat{y}_m^U, \hat{z}_m^U]$ 이며  $\mathbf{x}_t^{(k+1)}$ 은 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{x}_t^{(k+1)} = \frac{1}{\sum w} \left( \sum \frac{w \hat{d}}{d(\mathbf{X})} \mathbf{x}_t^{(k)} + \mathbf{B} * \mathbf{X}_a \right).$$

이러한 추정을  $K$ 번 반복한 뒤 최종 결과값을 UAM의 추정 위치로 삼는다.

#### 다. 모의 실험 설정

우리는 제안한 UAM 3차원 협력 측위 기법의 측위 정확도를 분석하기 위해 다음과 같은 모의 실험을 진행하였다. 우선  $M = 8$ 개 UAM의  $x$ 축 좌표는 각각 0 ~ 600 m 사이에서 임의로 정해진다 가정하며  $h = 450$  m라 한다. 기지국의 개수는  $N = 8$ 이며 각 기지국의  $x$ 축 및  $y$ 축 위치는 UAM의 경로를 따라 나열된 300 m \* 300 m 간격의 8개 블록 내에서 임의로 정해진다고 가정하며 기지국의 높이는  $z_N^U = 0$  m로 동일하다 가정한다.  $m$ 번째 UAM와  $n$ 번째 기지국 간 통신을 통한 거리 측정 오차의 표준편차는  $\sigma = \frac{3d_{h,m}^{BU}}{16\sqrt{2\pi}\sqrt{\text{SNR}_0}}$ 라 가정하며  $\sigma_y = \sigma_z = 5$  m라 가정한다. 이때 UAM 간

통신 Signal to noise ratio (SNR)은 20 dB라 가정한다. 본 논문에서는 [1]에서 정의한 3차원 측위 함수  $f$ 를 통해  $M$ 개의 UAM의 초기 위치를 구하였다. SMACOF with anchors 알고리즘의 반복 횟수는  $K = 10$ 으로 설정하였고 각 모의 실험은 각  $10^4$ 번의 몬테 카를로 방법을 통해 진행되었다. 측위 오차는 모의 실험에서 나온 추정된 UAM 위치의 Root mean squared error (RMSE) 값으로 설정하였다.

#### 라. 모의 실험 결과

모의 실험 결과는 그림 2와 같다. 우리는 기지국에서 UAM으로 송신한 신호의 1 m 지점에서의 SNR 값인  $\text{SNR}_0$  (dB)를 변화시켜가며 측위 정확도를 분석하였고 그 결과 3차원 측위 함수  $f$  [1]만 사용할 경우 약 1 m 가량의 RMSE 값을 보이고 이동 경로에 대한 Prior knowledge 만을 사용한 경우 [2] 약 0.55 m 가량의 RMSE 값을 보인 반면, 제시한 협력 측위 알고리즘을 적용한 경우 최대 0.49 m 가량의 RMSE 값을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

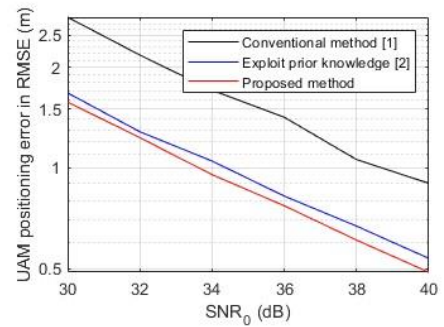


그림 2.  $\text{SNR}_0$  (dB)에 따른 제시한 알고리즘 적용 전/후 3차원 측위 오차 비교

### III. 결론

본 논문에서는 경로를 따라 움직이는 다수의 UAM 간 거리를 알아낼 수 있는 경우 적용 가능한 UAM 3차원 협력 측위 기법을 제시하였고 모의 실험을 통해 제시한 알고리즘으로 3차원 측위 성능을 향상시킬 수 있다는 사실을 확인하였다. 우리는 이 결과를 바탕으로 추후 UAM들의 속도 정보 등도 활용 가능한 경우 적용 가능한 알고리즘 개발 및 측위 성능 향상 여부에 대한 연구를 이어가고자 한다.

#### ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2021-0-02048)

#### 참고 문헌

- [1] J. Lee, K. Kim, Y. Lee and S. C. Kim, "An efficient three-dimensional localization scheme using trilateration in wireless sensor networks," in IEEE Communications Letters, vol. 18, no. 9, pp. 1591-1594, 2014
- [2] 김근우, 지오근, 이은지 and 김성철, "Prior knowledge를 사용한 UAV 3D 측위 기법," 한국통신학회 학술대회논문집 2022.6(2022): 471-472.
- [3] Di Franco, C., Bini, E., Marinoni, M., & Buttazzo, G. C., "Multidimensional scaling localization with anchors," 2017 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), pp. 49-54, 2017