

6G 이동통신을 활용한 드론의 동시적 위치 추정 및 맵핑

양현호, 정방철, 고형호, 김효원
충남대학교 전자공학과

e-mail: hyunho.yang00@o.cnu.ac.kr, {bcjung, hhko, hyowon.kim}@cnu.ac.kr

Drone-SLAM for 6G Communication Systems

Hyunho Yang, Bang Chul Jung, Hyongho Ko, and Hyowon Kim
Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract

In this paper, we investigate the simultaneous localization and mapping (SLAM) framework for 6G systems. We present the Kalman filter (KF)-SLAM algorithm in the 3 dimensional (3D) environment. We consider a 3D drone and a single target, where the drone communicates with the base station, and the target is detected by the 3D drone. Our results demonstrate that 3D drone-SLAM is feasible with 6G systems.

I. 서론

위치의 중요성이 증대됨[1]에 따라 동시적 위치 추정 및 지도 생성(SLAM: simultaneous localization and mapping)은 로봇공학 뿐 아니라 이동통신 시스템에서도 연구되고 있다[2]. 이에 확장 칼만 필터(EKF: extended Kalman filter) SLAM[3], FastSLAM[4] 등 여러 알고리즘이 제시되었다. 또한, 위성 네트워크와 결합한 통신 시스템을 제시하고 있으며[5], 이를 활용하여 3차원 환경에서 드론 및 주변 물체의 위치를 동시에 추정할 수 있다[6]. 본 논문에서는 6G 이동통신 기술을 활용하여 드론의 위치 추정 및 주변 물체를 탐지하고, 6G 이동통신 사용 유무에 따른 3차원 드론 SLAM의 성능을 평가한다.

II. 본론

드론은 GPS 수신기, 레이더, 그리고 6G 안테나 모듈을 장착하고 있으며, 등속도 운동을 한다. 다음은 시간 k 에서 드론의 상태벡터(위치와 속도)와 주변 물체의 위치벡터 $\mathbf{x}_d^k = [x_d^k, y_d^k, z_d^k, v_x^k, v_y^k, v_z^k]^\top$ 와 $\mathbf{x}_m^k = [x_m^k, y_m^k, z_m^k]$ 이다. 주변 물체와 6G 기지국(BS: base station)은 지상에 위치하고, 고정되어 있다.

시간 k 에서 드론의 동적 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_d^{k+1} = \mathbf{F}_1 \mathbf{x}_d^k + \mathbf{n}_d, \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta t \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$\mathbf{n}_d \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}_{6 \times 1}, \Sigma_1)$ 는 추정 오차이다.

시간 k 에서 드론의 GPS 수신기를 통해 드론의 위치를 얻을 수 있고, 해당 측정모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_G^k = \mathbf{H}_1 \mathbf{x}_d^k + \mathbf{n}_G, \quad (3)$$

$\mathbf{H}_1 = [\mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times 3}]$ 이고, $\mathbf{n}_G \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}_{3 \times 1}, \Sigma_2)$ 는 측정 오차이다. 시간 k 에서 기지국으로부터 드론이 수신한 신호를 통해 상대적 위치를 얻을 수 있고, 해당 측정모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_{BS}^k = \mathbf{x}_{BS}^k - \mathbf{H}_2 \mathbf{x}_d^k + \mathbf{n}_{BS}, \quad (4)$$

$\mathbf{H}_2 = [\mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times 3}]$ 이고, $\mathbf{n}_{BS} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}_{3 \times 1}, \Sigma_3)$ 는 측정 모델의 오차이다. 시간 k 에서 레이더를 통해 드론과 주변 물체 간의 상대적 위치 측정이 가능하고, 해당 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_m^k = \mathbf{x}_m^k - \mathbf{H}_3 \mathbf{x}_d^k + \mathbf{n}_m, \quad (5)$$

$\mathbf{H}_3 = [\mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times 3}]$ 이고, $\mathbf{n}_m \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}_{3 \times 1}, \Sigma_4)$ 는 측정 오차이다.

위 이동 및 측정모델을 기반으로 칼만 필터의 예측과 갱신 알고리즘을 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_d^{k+1} \\ \hat{\mathbf{x}}_m^{k+1} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_2 \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_d^k \\ \hat{\mathbf{x}}_m^k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\Sigma_{k+1}^- = \mathbf{F}_2 \Sigma_k \mathbf{F}_2^\top + \mathbf{Q}_k, \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_k = \Sigma_k \mathbf{H}_k^\top (\mathbf{H}_k \Sigma_k \mathbf{H}_k^\top + \mathbf{R}_k)^{-1}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_d^{k+1} \\ \hat{\mathbf{x}}_m^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_d^k \\ \hat{\mathbf{x}}_m^k \end{bmatrix} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{x}_{BS}^{k+1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} - \mathbf{H}_k \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_d^{k+1} \\ \hat{\mathbf{x}}_m^{k+1} \end{bmatrix}) \quad (9)$$

$$\Sigma_{k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \Sigma_{k+1}^-, \quad (10)$$

수식 (6-7)은 칼만 필터의 예측 단계로써, 다음과 같은 결합 행렬 $\mathbf{F}_2 = \text{diag}(\mathbf{F}_1, \mathbf{I}_{3 \times 3})$, $\Sigma_k = \text{diag}(\Sigma_{d,k}, \Sigma_{m,k})$, $\mathbf{Q}_k = \text{diag}(\Sigma_{1,k}, \mathbf{0}_{3 \times 3})$ 로 나타낸다. 수식 (8-10)은 칼만 필터의 갱신 단계로써 결합 행렬 $\mathbf{H}_k = [\mathbf{H}_1^\top, \mathbf{H}_2^\top, \mathbf{H}_3^\top]^\top$, $\mathbf{R}_k = \text{diag}(\Sigma_{2,k}, \Sigma_{3,k}, \Sigma_{4,k})$ 및 측정값들의 결합 벡터 $\mathbf{z}_k = [\mathbf{z}_1^\top, \mathbf{z}_2^\top, \mathbf{z}_3^\top]^\top$ 로 나타낸다.

III. 성능 평가

성능 평가를 위해 다음과 같이 시뮬레이션 매개변수를 설정하였다. 시스템 모델의 오차 공분산은 $\Sigma_1 = \text{diag}(\sigma_p^2 \mathbf{I}_{3 \times 3}, \sigma_v^2 \mathbf{I}_{3 \times 3})$, $\Sigma_2 = \sigma_G^2 \mathbf{I}_{3 \times 3}$, $\Sigma_3 = \sigma_{BS}^2 \mathbf{I}_{3 \times 3}$, 그리고 $\Sigma_4 = \sigma_m^2 \mathbf{I}_{3 \times 3}$ 이다.

드론은 $k=1, \dots, 100$ 동안 수식 (1)을 따라 움직인다. 시간 간격 $\Delta k=0.5$ s, 그리고 σ_p , σ_v 는 각각 1.5m, 1m/s로 설정한다. 측정모델의 매개변수 σ_G , σ_{BS} , σ_m 을 바꾸며 MATLAB으로 성능을 확인하였다. 몬테카를로 $I=1000$ 개의 샘플을 평균한 결과를 통해 성능평가를 하였다.

드론과 물체의 상대적 위치 추정값 노이즈의 표준편차(σ_m)가 작아질수록, 주변 물체의 위치는 드론의 위치의 상관관계가 커지고, σ_m 이 클수록 두 위치의 상관관계는 작아진다.

그림 1과 2는 $\sigma_m = 1$ m, $\sigma_G = \sigma_{BS} = 3$ m에서의 SLAM 결과이며, 오차 제곱 평균(MSE: mean squared error)을 이용하여 성능을 평가하였다. 드론 및 물체의 오차 제곱 평균은 각각 약 2.5m^2 , 0.7m^2 에 수렴한다. 또한 6G 이동통신을 사용하였을 때가 각각 약 0.5m^2 , 0.3m^2 정확한 결과가 나온다. 하지만 σ_{BS} 을 σ_G 보다 크게 설정한다면, 오차가 증가하게 된다. 따라서 BS의

성능이 적어도 GPS와 비슷하다면 6G 이동통신을 사용했을 때 더 정확한 결과가 나오게 된다.

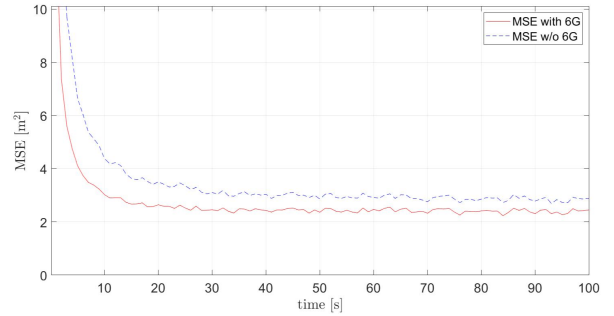


그림 1 드론의 오차 제곱 평균

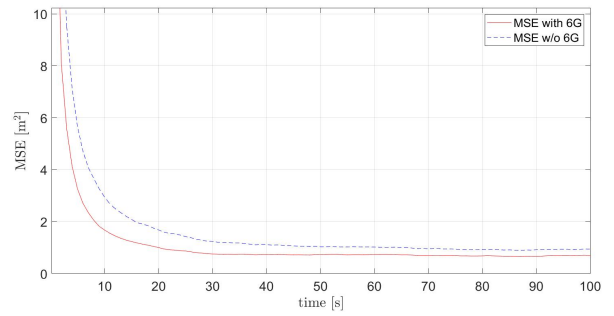


그림 2 물체의 오차 제곱 평균

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문은 KF를 이용하여 3차원 환경에서의 드론의 위치 및 주변 물체의 위치에 대해 추정을 하였다. 6G 이동통신 측정값 사용 유무에 따른 SLAM의 성능 비교를 통해 GPS 및 레이더와 6G-SLAM의 결합 및 구현 가능성을 확인하였다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 (No.2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 그리고 사단정찰 무인기(RQ-102k)용 통합 대기 자료 센서(IADP) 과제(C230021)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] H. Soganci *et al.*, "Accurate positioning in ultra wideband systems," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 18, no. 2, pp. 19 - 27, Apr. 2011.
- [2] G. Bresson *et al.*, "Simultaneous localization and mapping: A survey of current trends in

- autonomous driving,” *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 2, no. 3, pp. 194–220, Sep. 2017.
- [3] S. Huang and G. Dissanayake, “Convergence and consistency analysis for extended Kalman filter based SLAM,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 23, no. 5, pp. 1036–1049, Oct. 2007.
- [4] T. Bailey *et al.*, “Consistency of the FastSLAM algorithm,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2006, pp. 424–429.
- [5] Y. Rahmat-Samii and A. C. Densmore, “Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 4, pp. 1191–1204, Apr. 2015.
- [6] D. Mishra *et al.*, “Drone networking in the 6G era: A technology overview,” *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 88–95, Dec. 2021.