

칼만 필터를 활용한 무인 항공기의 위치와 속도 추정

김경렬, 정방철, 고흥호, 김효원
충남대학교 전자공학과

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

Kalman Filter-based Position and Velocity Estimates for Unmanned Aerial Vehicle

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

Abstract

This paper presents the Kalman filter (KF)-based approach to estimate the position and velocity of the unmanned aerial vehicle (UAV). The method tracks the 3D trajectory of the UAV by the presented KF-based state estimation method. Simulation results show the performance of the position and velocity estimates, measured by the mean squared error (MSE).

I. 서론

무인 항공기(UAV: unmanned aerial vehicle)의 위치를 예측하는 것은 자율 운행 분야에서 중요한 연구 주제이다[1]. UAV의 위치를 제어하기 위해서는 UAV의 위치에 대해 신뢰할 수 있는 추정 결과가 있어야 한다[2], [3]. 칼만 필터(KF: Kalman filter)는 신뢰할 수 있는 추정 결과에 오차의 분산을 최소화하는 필터이다[4]. 본 논문에서는 UAV의 3차원 궤적을 칼만 필터[5]를 활용한 위치추정 방법을 설명한다. 3차원 궤적을 생성하고 추정하여, 추정된 위치와 실제 위치 사이의 오차 제곱 평균(MSE: mean squared error)을 이용하여 필터의 성능을 평가한다.

II. 본론

3차원 공간을 등속도로 운동하는 이동하는 무인 항공기의 상태벡터 $\mathbf{x}_k = [\mathbf{p}_k^T, \mathbf{v}_k^T]^T$ 로 표현된다. 이는

UAV의 3차원 공간에서의 위치 $\mathbf{p}_k = [x_k, y_k, z_k]^T$ 와 속도 $\mathbf{v}_k = [v_{x,k}, v_{y,k}, v_{z,k}]^T$ 를 나타낸다. 시간 k 에서 UAV의 상태 변화는 다음과 같이 동적 모델로 나타낸다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{q}_k, \quad (1)$$

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

상태 전이 행렬은 $\mathbf{F}$ 로 표현하고, $\mathbf{q} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q})$ 는 프로세스 노이즈이다. 시간 k 에서 UAV에 장착된 GPS 센서를 통해 측정값을 얻을 수 있고[6], 측정모델은 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{r}_k, \quad (3)$$

$\mathbf{H} = \mathbf{I}_{6 \times 6}$ 이고, $\mathbf{r} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R})$ 은 센서 측정 노이즈이다.

UAV의 위치 및 속도의 사후확률밀도 계산을 위한 칼만 필터(KF)는 예측(prediction) 및 갱신(correction) 과정으로 구성된다[5]. 예측 과정 이후의 상태변수는 가우시안 분포를 따른다. 해당 분포의 평균과 공분산은 다음과 같이 각각 계산한다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k|k}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}. \quad (5)$$

갱신 과정 이후 상태변수 또한 가우시안 분포를 따르고, 해당 분포의 평균과 공분산은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}), \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\mathbf{P}_{k+1|k}, \quad (7)$$

$\mathbf{K}_k$ 은 칼만 이득이고 다음과 같이 계산한다.

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k+1|k}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_{k+1|k}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}. \quad (8)$$

III. 성능 평가

본 논문에서는 UAV의 위치 및 속도 추정을 위해 칼만 필터를 활용하여 MATLAB 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 실제 위치 및 속도와 추정된 값을 비교하고, 오차 제곱 평균을 통해 필터의 성능을 분석하였다.

노이즈의 공분산 행렬은 다음과 같이 표현한다.

$$\mathbf{Q} = \text{diag}([\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_{v,x}^2, \sigma_{v,y}^2, \sigma_{v,z}^2]), \quad (9)$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}([\sigma_{m,x}^2, \sigma_{m,y}^2, \sigma_{m,z}^2, \sigma_{m,v,x}^2, \sigma_{m,v,y}^2, \sigma_{m,v,z}^2]), \quad (10)$$

성능 평가를 위해 다음과 같이 시뮬레이션의 매개변수를 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 5\text{m}$, $\sigma_{v,x} = \sigma_{v,y} = \sigma_{v,z} = 3\text{m/s}$, $\sigma_{m,x} = \sigma_{m,y} = \sigma_{m,z} = 3\text{m}$, $\sigma_{m,v,x} = \sigma_{m,v,y} = \sigma_{m,v,z} = 2\text{m/s}$, $K = 100$, $\Delta k = 0.5\text{초}$ 로 설정했다. 각 시간 단계에서 MSE를 다음과 같이 계산한다.

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2 + (\hat{z}_i - z_i)^2), \quad (11)$$

N은 몬테카를로 시뮬레이션 횟수이다. 몬테카를로 (Monte Carlo) 시뮬레이션을 통해 100회 동안 샘플들을 평균한 결과를 분석하였다.

그림 1은 UAV의 실제 궤적과 칼만 필터로 추정된 궤적을 3차원 공간에서 나타낸 결과이다. UAV가 초기 위치에서 설정한 시간 동안 이동하면서 실제 궤적과 추정된 궤적이 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 그림 2는 시간에 따른 위치 오차 제곱 평균을 나타낸 그래프이다. 시뮬레이션 초기에 비교적 높은 오차가 발생하였으나, 칼만 필터가 동작함에 따라 빠르게 오차가 줄어들어 안정적인 추정 결과를 보였다. 시간 4초 이후에는 오차가 일정하게 유지되며 10m^2 이하로 수렴하였다. 이 결과는 칼만 필터가 UAV의 궤적을 정확하게 추정하는 데 효과적임을 보여주며, 초기 오차가 감소하고 필터가 수렴하는 것을 확인하였다.

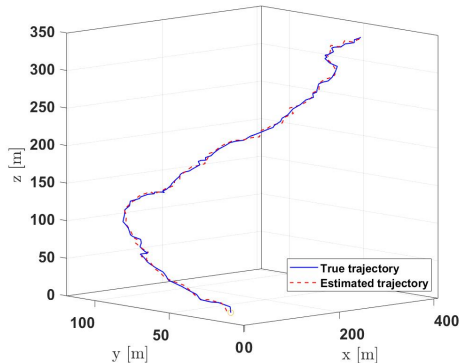


그림 1. UAV의 3차원 이동 및 추정 경로

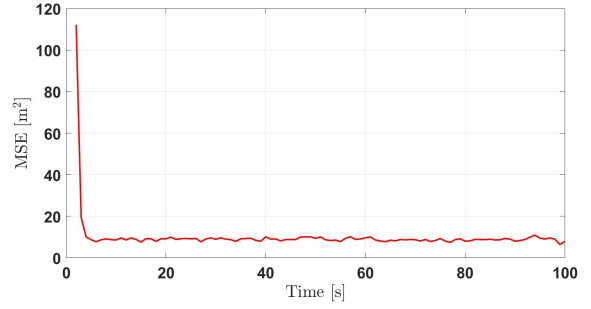


그림 2 시간에 따른 UAV 위치추정 MSE

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 UAV의 위치와 속도를 추정을 위한 칼만 필터 기법을 나타내었다. 시뮬레이션 성능분석을 통해 UAV의 상태 추정이 가능함을 확인하였다. 향후 6G 이동통신 표준에 발맞춰 센싱 및 통신, 그리고 레이더와 결합한 UAV 상태추정 연구가 필요하다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(No.2021-0-00486, ABC-MIMO: 중강 범 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] C. Barrios and Y. Motai, "Improving estimation of vehicle's trajectory using the latest global positioning system with Kalman filtering," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 12, pp. 3747-3755, Dec. 2011.
- [2] J. Ueki *et al.*, "Development of vehicular-collision avoidance support system by inter-vehicle communications," in *Proc. IEEE 59th Veh. Technol. Conf.*, May. 2004, pp. 2940-2945.
- [3] R. Miller and Q. Huang, "An adaptive peer-to-peer collision warning system," in *Proc. IEEE 55th Veh. Technol. Conf.*, May. 2002, pp. 317-321.
- [4] D. Simon, "Kalman filtering," *Embed. Syst. Program.*, vol. 14, no. 6, pp. 72-79, Jun. 2001.
- [5] M. B. Rhudy *et al.*, "A Kalman filtering tutorial for undergraduate students," *Int. J. Comput. Sci. Eng. Surv.*, vol. 8, no. 1, pp. 1-18, Feb. 2017.
- [6] B. Hofmann-Wellenhof *et al.*, *Global Positioning System: Theory and Practice*. 4th ed. New York: Springer Wien, 2012.