

측위를 위한 DOP 기반 UAV 제어

이주현, 이재복, 김선우

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과

{psorstroll, ok7393, remero}@hanyang.ac.kr

UAV control Based on DOP for Localization

Joohyun Lee, Jaebok Lee, and Sunwoo Kim

Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 측위 정확도를 높이기 위해 DOP (dilution of precision)가 최소인 방향으로 비행하는 UAV (unmanned aerial vehicle) 제어 알고리즘을 제안한다. UAV는 거리 측정 모델에 따라 타겟과의 거리를 측정하고 파티클 필터를 사용하여 타겟의 다음 위치를 예측한다. 타겟의 예측 위치와 UAV 동적 모델의 모든 조합을 고려해 DOP가 최소인 동적 모델을 따라 UAV가 이동한다. MATLAB 시뮬레이션을 진행하여 DOP가 낮아질수록 MSE (mean square error)도 같이 감소하는 것을 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

I. 서 론

UAV (unmanned aerial vehicle) 기술의 발달과 측위 기술의 발전이 맞물려 드론을 이용한 측위 연구가 활발히 진행되고 있다 [1][2]. 앵커가 고정되어 있어야 하는 기존의 측위 방식과 비교하여 이동 가능한 UAV를 앵커로 활용한 측위는 NLoS (non-line of sight) 상황이 많은 지역에서도 NLoS를 최소화하면서 측위할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 UAV를 동적 앵커로 사용하여 타겟을 정확도 높게 측위하기 위해 DOP (dilution of precision)가 최소인 방향으로 UAV를 제어하는 알고리즘을 제안한다. MATLAB 시뮬레이션을 진행하여 본 알고리즘을 통해 DOP가 최소인 방향으로 이동함에 따라 감소하는 UAV의 DOP 및 타겟의 예측 위치와 실제 위치와의 MSE (mean square error)를 확인한다.

II. DOP 기반 UAV 제어 알고리즘

UAV의 위치 벡터는 $\mathbf{s}_t^i = [s_x^i, s_y^i, s_z^i]_{t-1}^T \in \mathbb{R}^3$ 이며 s_x^i, s_y^i, s_z^i 는 t 초에서 i 번째 UAV의 x, y, z 좌표를 의미한다. UAV의 동적 모델은 아래와 같다.

$$\dot{\mathbf{s}}_t^i = \mathbf{s}_{t-1}^i + \begin{cases} \left[\begin{array}{c} \Delta_R(l_1) \sin(l_2 \Delta_\phi) \cos(l_3 \Delta_\theta) \\ \Delta_R(l_1) \sin(l_2 \Delta_\phi) \sin(l_3 \Delta_\theta) \\ \Delta_R(l_1) \cos(l_2 \Delta_\phi) \end{array} \right], & l_1 = 1, \dots, |\Delta_R| \\ \left[\begin{array}{c} \Delta_R(l_1) \sin(l_2 \Delta_\phi) \sin(l_3 \Delta_\theta) \\ \Delta_R(l_1) \cos(l_2 \Delta_\phi) \end{array} \right], & l_2 = 0, \dots, N_\phi, \\ \left[\begin{array}{c} \Delta_R(l_1) \cos(l_2 \Delta_\phi) \end{array} \right], & l_3 = 1, \dots, N_\theta \end{cases}, \quad (1)$$

$\Delta_R, \Delta_\phi, \Delta_\theta$ 는 각각 드론이 움직일 수 있는 거리, 양각, 방위각의 단위 크기를 의미하며 $|\Delta_R|, N_\phi, N_\theta$ 는 UAV가 움직일 수 있는 행동의 수를 결정한다.

타겟의 상태 벡터는 $\mathbf{x}_t = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]_t^T$ 이며 x, y, z 는 타겟의 x, y, z 좌표를, $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 는 x, y, z 방향으로의 속력을 의미한다. $\mathbf{v}_t \sim N(0, \Sigma_v)$ 는 타겟의 속력 잡음으로 공분산이 쓰였고 σ_v^2 이 속력의 잡음 분산이다. 타겟의 동적 모델은 아래와 같다.

$$\mathbf{x}_t = \Phi \mathbf{x}_{t-1} + \Gamma \mathbf{v}_t, \quad (2)$$

$$\sum \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \Delta T \cdot \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} 0.5(\Delta T)^2 \cdot \mathbf{I}_3 \\ \Delta T \cdot \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

ΔT 는 시간 간격을 의미하고, \mathbf{I}_3 은 3×3 단위 행렬, $\mathbf{0}_3$ 은 3×3 영행렬을 의미한다.

UAV는 노이즈가 더해진 거리 측정 장비를 사용하여 타겟과의 거리를 측정한다. 시간 t 에서 측정된 i 번째 UAV와 타겟 사이의 거리 측정 모델은 아래와 같다.

$$y_t^i = \|H\mathbf{x}_t - \mathbf{s}_t^i\| + w_t^i, \quad (4)$$

H 는 타겟의 x, y, z 좌표를 추출하는 행렬이며 w_t^i 는 거리 측정 오차로 LoS (line of sight) 및 NLoS을 모두 고려한 가우시안 혼합 모델로 아래와 같다.

$$w_t^i \sim [\lambda_i N(0, \sigma_{LoS}^2) + (1 - \lambda_i) N(\mu_{NLoS}, \sigma_{NLoS}^2)], \quad \lambda_i = \frac{1}{1 + ae^{-b\vartheta_i - a}}, \quad (5)$$

λ_i 는 i 번째 UAV와 타겟 사이의 LoS 확률이며, ϑ_i 는 UAV와 타겟과의 고각, a 와 b 는 환경적 요인을 나타내는 파라미터이다 [3].

DOP는 UAV 간의 배치가 타겟의 위치 추정에 어느 정도의 영향을 주는지를 나타내는 수치로 DOP 값이 낮을수록 UAV 간 배치 상태가 좋아 측위 성능이 좋아진다. DOP는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [4].

$$DOP = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}^\top \mathbf{A}^{-1})},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{(s_x^1 - x)}{r_1} & \frac{(s_y^1 - y)}{r_1} & \frac{(s_z^1 - z)}{r_1} \\ \frac{(s_x^2 - x)}{r_2} & \frac{(s_y^2 - y)}{r_2} & \frac{(s_z^2 - z)}{r_2} \\ \frac{(s_x^3 - x)}{r_3} & \frac{(s_y^3 - y)}{r_3} & \frac{(s_z^3 - z)}{r_3} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

r_i 는 i 번째 UAV와 타겟과의 거리 측정값이다.

타겟 측위로는 파티클 필터를 사용되었다 [5]. UAV와 타겟과의 거리 측정 값이 입력으로 들어가며 학습된 타겟의 운동 모델과 2000개의 파티클을 이용해 타겟의 다음 시간 동작의 위치를 예측한다.

DOP 기반 UAV 제어는 타겟의 예측 위치를 다음 시간 동작에서 높은 정확도로 측위하기 위해 DOP가 최소가 되는 방향으로 UAV를 이동시킨다. j 대의 UAV가 동적 모델에 따라 이동할 수 있는 모든 경우의 수에 대해 DOP를 계산해 가장 낮은 DOP를 갖는 동적 모델을 찾아 이동하며, 아래와 같다.

$$\mathbf{P}_t^* = \arg \min_{\mathbf{P}_t} DOP(\alpha), \quad (7)$$

\mathbf{P}_t 는 t 초에서의 모든 UAV들의 위치 벡터, k 는 한 대의 UAV가 이동할 수 있는

표 1. 실험에 사용된 파라미터

Parameter	Value	Parameter	Value
σ_{LoS}^2	0.5 m ²	α	0.5
μ_{NLoS}	10 m	b	15
σ_{NLoS}^2	5 m ²	ΔT	1 sec
σ_v^2	3		

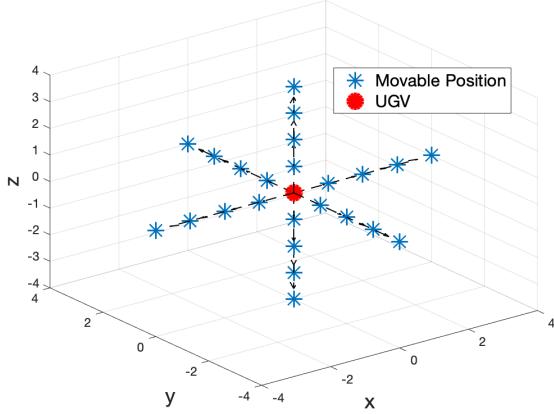


그림 1. 실험에 사용된 UAV 동적 모델

모든 경우의 수이고 α 는 j 대의 UAV가 가질 수 있는 동적 모델 조합의 모든 경우의 수이다. 실험에 사용된 파라미터 값들은 표 1에 정리하였다.

III. 실험 결과

본 실험에서는 3대의 UAV가 3차원 공간에서 이동하는 상황을 가정하였다. UAV는 동적 모델에 따라 하나의 시간 동작에 움직일 수 있는 방향과 거리가 24가지로 제한되어 있다. 한 동작에 움직일 수 있는 방향은 그림 1과 같이 동, 서, 남, 북과 위, 아래로 총 6가지이고 움직일 수 있는 거리는 1m, 2m, 3m, 4m로 총 4가지이다. 3대의 UAV는 각각 [0m, 0m, 3m], [0m, 0m, 5m], [0m, 0m, 7m]에서 출발한다.

1개의 타겟이 $z=0$ m인 지상에서 이동하는 상황을 가정했다. 타겟은 [15m, 15m, 0m]에서 동적 모델에 따라 x축 방향으로 2m/s의 속도로 10sec 동안 이동해 [35m, 15m, 0m]에 도착한다. 다시 새로운 동적 모델로 y축 방향으로 2m/s의 속도로 10초동안 이동해 [35m, 15m, 0m]에 도착하고 같은 방법으로 [35m, 35m, 0m], [15m, 35m, 0m]을 지나 초기위치인 [15m, 15m, 0m]로 돌아온다.

시뮬레이션은 3대의 UAV가 1개의 타겟의 위치를 측정하는 상황을 가정했다. 한 번의 시뮬레이션은 40초 동안 진행되었고 총 1000회의 시뮬레이션을 통해 결과를 확인하였다.

그림 2는 시간에 따른 UAV의 DOP를 나타낸 것으로 DOP가 시간에 따라 감소함을 알 수 있다. 그림 3은 파티클 필터를 이용해 예측한 위치와 실제 위치와의 오차를 MSE로 나타낸 것이다. DOP 값이 낮을수록 타겟 측위 성능이 좋아지므로 DOP와 MSE는 비슷한 경향을 보여야 하고 시뮬레이션 결과로도 비슷한 경향을 보이며 감소한다. 10초부터 40초사이에 MSE가 상승하는 구간은 타겟이 이동 방향을 바꿀 때 파티클 필터의 관성으로 예측 위치가 벗어나 생기는 오차이다. 시뮬레이션을 통해 DOP가 최소인 방향으로 UAV가 비행하며 타겟을 측위하면 시간에 따른 타겟의 위치 추정 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있다.

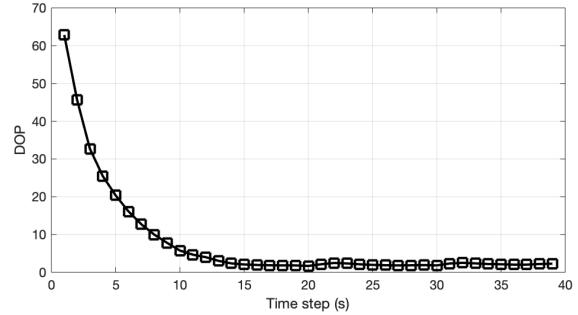


그림 2. 배치된 UAV와 타겟의 시간에 따른 DOP

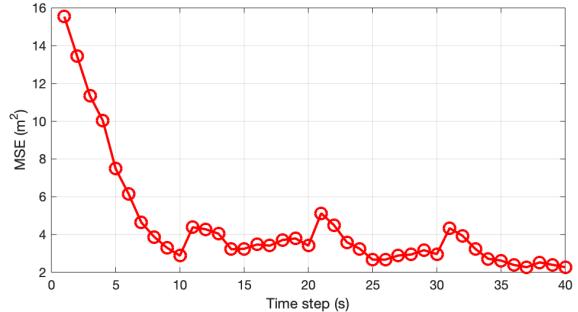


그림 3. 시간에 따른 타겟 예측 위치의 MSE

IV. 결론

본 논문에서는 측위를 위한 DOP 기반 UAV 제어 알고리즘을 제안한다. UAV가 타겟에 대한 높은 측위 성능을 유지하면서 비행하기 위해 DOP 개념을 적용했다. 매 시간동작마다 3대의 UAV가 움직일 수 있는 동적 모델의 모든 조합에서의 DOP를 계산하고 DOP가 가장 낮은 동적 모델을 선택해 비행한다. 진행한 시뮬레이션에서 시간에 따라 DOP와 MSE가 감소하는 것을 통해 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2020년도 상업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20194010201860).

참 고 문 헌

- [1] 양현수, 이동준, “ICRA 2014 UAV 연구동향,” *한국로봇학회*, pp. 13–21, Oct. 2014.
- [2] A. Nemra and N. Aouf, “Robust INS/GPS sensors fusion for UAV localization using SDRE nonlinear filtering,” *IEEE Sens. J.*, pp. 789–798, Apr. 2010.
- [3] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, “Optimal lap altitude for maximum coverage,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, pp. 569–572, Jul. 2014.
- [4] P.J.G. Teunissen and D. Odijk, “Ambiguity Dilution Of Precision:Definition, properties and application,” *Proc. ION GPS*, pp. 891–899, Sep. 1997.
- [5] Lee Sangwoo, Choi Jaehoon, Kim Sunwoo, “Joint TOA/DOA Estimation Using Particle Filtering in GNSS Receivers with Uniform Linear Array”. *한국통신학회 학술대회논문집*, pp. 890–891, Feb. 2012.