

# 무인항공기 기반 통신 시스템에서 복잡한 다각형 비행금지구역을 침범하지 않기 위한 수학적 모델링

허강현, 이기송

동국대학교

heoganghyeon63@gmail.com, kslee851105@gmail.com

## A Mathematical Modeling to Avoid Violating Complex Polygonal No-Fly-Zone in UAV-Enabled Communication Systems

Kanghyun Heo, Kisong Lee

Dongguk Univ.

### 요약

본 논문에서는 무인항공기의 궤적 최적화에서 고려할 수 있는 복잡한 다각형 비행금지구역을 침범하지 않기 위한 수학적 모델링을 제안한다. 이를 반영하여 다수의 지상 노드에게 높은 전송률을 공평하게 제공하기 위한 무인항공기 전송 전력과 궤적을 동시에 최적화하고자 한다. 무인항공기의 궤적과 관련된 최적화는 복잡한 다각형 비행금지구역으로 인해 비볼록 제약조건을 포함하고 있지만, 선형 근사 기반의 새로운 수학적 방식을 사용해 이를 해결하였다. 시뮬레이션 결과에서 제안한 수학적 모델링을 이용하면 무인항공기가 복잡한 다각형 비행금지구역을 완전히 피하면서 효율적인 통신 서비스를 제공할 수 있음을 확인했다.

### I. 서론

최근 자율주행 자동차, 무인항공기 경찰, 재난현장의 로봇 등 이동성을 가진 물체들이 산업 현장에서 활발하게 활용되고 있다. 특히, 통신 시스템에서는 기존의 고정 되어있는 기지국과 달리 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)가 이동 기지국으로써 트래픽에 따른 유연한 통신 서비스를 제공할 수 있고 초기 설치 비용이 적다는 장점으로 인해 큰 각광을 받고 있다. 이러한 UAV의 장점을 활용해 다중 UAV의 비행 궤적과 전송 전력을 동시에 최적화하는 연구가 진행되었다 [1]. 해당 연구에서는 UAV의 궤적 최적화의 비볼록성(Nonconvexity) 문제를 해결하기 위해, 선형 근사 또는 보조 변수 등을 이용한 수학적 방식을 통해 비볼록 문제를 볼록 문제(Convex Problem)로 변형하여 최적화를 진행했다. 또한, UAV의 접근이 허용되지 않는 원형 비행금지구역(No-Fly-Zone, NFZ)을 고려한 UAV 최적화 연구도 진행되었다 [2-3]. UAV의 NFZ 제약조건 역시 비볼록 집합(Nonconvex Set) 이므로 이를 해결하기 위해 선형 근사를 사용했다. 하지만 실제 환경에서는 원형의 NFZ 뿐만 아니라 빌딩과 같은 사각형 혹은 복합형 형태의 구조물과 같은 다각형 등 다양한 형태의 NFZ가 존재한다. 따라서 이러한 NFZ를 고려하기 위한 수학적 모델링이 필요하다.

본 논문에서는 UAV 기반 통신 시스템을 최적화할 때 고려해야 하는 다각형 NFZ를 침범하지 않기 위한 제약조건에 대한 수학적 모델링을 제안하고, 이를 반영하여 다수의 지상 노드에게 높은 전송률을 공평하게 제공하기 위한 UAV의 전송 전력과 궤적을 동시에 최적화하고자 한다.

### II. 본론

그림 1과 같이 한 대의 UAV가 고도  $H$ 에서  $T$ 초동안 비행하며  $K$ 개의 지상 노드에 데이터를 전송하는 상황을 고려한다. 연속적인 시간을 다루기 위해  $T$ 를 충분히 큰  $N = T/\delta$ 개의 타임슬롯으로 나누어 고려한다.

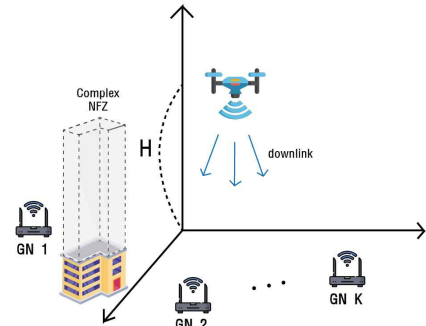


그림1. 복잡한 NFZ를 고려한 UAV 통신 시스템.

Fig. 1. UAV-assisted communication system with complex NFZ.

타임슬롯  $n$ 일 때, UAV와  $k$ 번째 노드의 좌표는 각각  $q[n] = (x[n], y[n])^T$  와  $w_k = (x_k, y_k)^T$ 로 표기한다. 또한,  $L$ 개의 NFZ가 존재하며, 각각은 2차원 좌표평면에서 집합  $C_l$ 로 표현된다. UAV는 이 구역에서의 비행이 제한되기 때문에 다음과 같은 제약조건을 갖는다.

$$q[n] \notin C_l, \forall n, l \quad (1)$$

또한, UAV의 물리적인 속도에 대한 제약조건은 다음과 같다.

$$\|q[n] - q[n-1]\| \leq V\delta, \forall n \quad (2)$$

UAV는 한 타임슬롯과 총 서비스 시간 동안 사용할 수 있는 전력이 제한되기 때문에 다음과 같은 전력 제약조건을 갖는다.

$$0 \leq p[n] \leq P_{\max}, \forall n \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N p[n] \leq P_{avg} \quad (4)$$

UAV는 충분히 높은 고도에서 서비스하고 있다고 가정하여 UAV와 지상 노드와의 채널은 LoS (Line of Sight) 채널로 모델링한다.

$$h_k[n] = \frac{\beta_0}{\|q[n] - w_k\|^2 + H^2} \quad (5)$$

여기서  $\beta_0$ 는 기준 거리에서의 채널 전력 이득이다. 따라서 지상 노드  $k$ 가 달성하는 평균 전송률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\bar{R}_k &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log\left(1 + \frac{p[n]h_k[n]}{\sigma^2}\right) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log\left(1 + \frac{p[n]\beta_0}{\sigma^2(\|q[n] - w_k\|^2 + H^2)}\right)\end{aligned}\quad (6)$$

UAV의 궤적과 전송 전력을 최적화 해  $L$  개의 NFZ를 피하면서 지상 노드들에게 높은 전송률을 공평하게 제공하기 위해  $K$  개의 노드들 중 가장 낮은 전송률을 최대화하는 것을 목표로 한다. 따라서 최적화 문제는 다음과 같다.

$$(P0): \max_{q[n], p[n]} r \quad (7)$$

$$s.t. \bar{R}_k \geq r, \forall k \quad (8)$$

$$q[1] = [N], \quad (1) - (4)$$

위의 문제는 변수  $p[n]$ 에 대해서는 블록 문제이지만  $\bar{R}_k$ 과 NFZ 제약조건 (1)로 인해 변수  $q[n]$ 에 대해서는 비블록 문제이다. 여기서  $\bar{R}_k$ 은  $\|q[n] - w_k\|^2$ 에 대해서 볼록 함수이기 때문에 1차 테일러 전개를 통해 목적 함수의 하한을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{R}_k &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[ \frac{\log_2(e)p[n]\beta_0}{\sigma^2 + \frac{(\|q^r[n] - w_k\|^2 + H^2)^2}{p[n]\beta_0}} \right. \\ &\quad \times (\|q[n] - w_k\|^2 - \|q^r[n] - w_k\|^2) \\ &\quad \left. + \log_2\left(1 + \frac{p[n]\beta_0}{\sigma^2(\|q^r[n] - w_k\|^2 + H^2)}\right) \right]\end{aligned}\quad (9)$$

변형된 식  $\hat{R}_k$ 는  $q[n]$ 에 대해 concave 함수이기 때문에 제약조건 (7)을 볼록 집합으로 만들 수 있다.

또한, 2차원 좌표평면에서 모든 볼록 다각형은 표기와 같이 유한개의 선형 부등식의 교집합으로 표현할 수 있다.

$$P = \{x | a_j^T x \leq b_j, j = 1, \dots, m\} \quad (10)$$

여기서  $a_j, x \in \mathbb{R}^2, b_j \in \mathbb{R}$ 이다. 볼록 다각형  $P$  외부의 점  $q[n]$ 에서  $P$ 까지의 최소 거리는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(P1): \min_x \|q[n] - x\| \quad s.t. x \in P \quad (11)$$

이 문제는 볼록 문제이므로 CVX를 통해 전역해를 찾을 수 있고, 수렴성 역시 보장된다 [4]. 또한,  $l$ 번째 복잡한 비블록 다각형은 다음과 같은  $W$ 개의 볼록 다각형의 합집합으로 표현할 수 있다.

$$C_l = \bigcup_{w=1}^W P_{l,w} \quad (12)$$

$q[n]$ 과  $P_{l,w}$ 에 대해 (P1)을 풀어서 나온 값을  $\Omega_{n,l,w}$ 라고 한다면  $\min_w \Omega_{n,l,w}$ 의 해는  $q[n]$ 에서  $l$ 번째 비블록 다각형까지의 최소 거리를 나타낸다. 따라서 NFZ를 침범하지 않는 주어진 값  $q^r[n]$ 을 기준으로 최적화 변수  $q[n]$ 의 업데이트 범위를  $\Omega_{n,l}$ 로 제한하면 제약조건 (1)을 만족할 수 있다.

$$\|q[n] - q^r[n]\| \leq \Omega_{n,l}, \forall n, l \quad (13)$$

또한, 연속적인 궤적에서 NFZ를 침범할 수 있기 때문에  $\Omega_{n,l}$ 을

$\hat{\Omega}_{n,l} = \max(0, \Omega_{n,l} - V\delta)$ 로 조정한다 [3].

$$\|q[n] - q^r[n]\| \leq \hat{\Omega}_{n,l}, \forall n, l \quad (14)$$

최종적으로 최적화 문제 (P0)는 다음과 같은 볼록 최적화 문제로 변형되며, P(1)과 비슷하게 CVX를 통해 최적값을 얻을 수 있다.

$$(P2): \max_{Q, P} r \quad (15)$$

$$s.t. \hat{R}_k \geq r \quad (2) - (4), (8), (14)$$

제안방안의 성능을 검증하기 위해  $K=3, V=30m/s, T=120, \delta=0.5, \sigma^2=10^{-7}$ 의 파라미터를 사용했다. 제안 알고리즘의 수학적 특징에 의해 UAV가 복잡한 다각형 NFZ를 피해 지상 노드에게 순차적으로 가까워지면서 서비스를 하며 최소 평균 전송률은 4.9013 bps/Hz를 달성하는 것을 확인했다. 또한, 지상 노드와 가까워질수록 전송 전력을 높여 서비스 효율을 높이는 것을 확인했다.

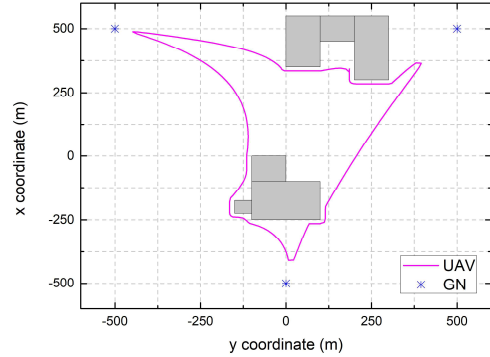


그림2. 제안방안의 UAV 동선.

Fig. 2. UAV trajectory of proposed algorithm.

### III. 결론

본 논문에서는 복잡한 다각형 NFZ를 침범하지 않기 위한 제약조건에 대한 수학적 모델링을 제안했다. 또한, 이를 반영하여 다수의 지상 노드에게 높은 전송률을 공평하게 제공하기 위한 UAV의 전송 전력과 궤적을 동시에 최적화하는 방안을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 제안 방안의 성능을 검증했다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00343262).

### 참고 문헌

- [1] Q. Wu et al., "Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks," IEEE Transactions on Wireless Commun. vol. 38, pp.2109-2121, 2018.
- [2] R. Li et al., "Joint Trajectory and Resource Allocation Design for UAV Communication Systems," 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6.
- [3] 허강현, 박기태, & 이기승. (2023). 확장된 비행금지지역을 고려한 무인항공기 경로 최적화. 한국통신학회 학술대회논문집, 280-281.
- [4] Boyd, S. P., & Vandenberghe, L. (2004). Convex optimization. Cambridge university press.