

# UAV 경로 최적화를 위한 최적 제어 연구

김대광, 최민수, 정동준, 정종문\*

연세대학교 전기전자공학과, 연세대학교 전기전자공학과, 연세대학교 전기전자공학과,  
\*연세대학교 전기전자공학과

kdk0111@yonsei.ac.kr, slau1019@yonsei.ac.kr, dongjunjun@yonsei.ac.kr, \*jmc@yonsei.ac.kr

## A Study on the optimal control method for UAV trajectory optimization

Daekwang Kim, Minsu Choi, Dongjun Jung, Jong-Moon Chung\*

Yonsei Univ Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ Electrical and  
Electronic Engineering, Yonsei Univ Electrical and Electronic Engineering,

\*Yonsei Univ Electrical and Electronic Engineering

### 요 약

본 논문은 UAV(Unmanned aerial vehicle)의 최적화 경로 생성 시 기존 방식으로 얻은 최적화 경로는 실제 UAV로 구현 시 운동 역학적으로 따를 수 없는 한계가 있으며, 최적 제어를 통해 얻은 최적화 경로는 실제 UAV로 구현이 가능하다는 것을 중점으로 UAV 최적화 경로 계산에서의 최적 제어 필요성을 연구하였다.

### I. 서 론

차세대 통신 네트워크에서는 높은 전송률이 필수이며 이를 해결하기 위해 여러 방식의 통신 경로가 고려되고 있다.

여러 통신 수단 중 한 방법으로 UAV(Unmanned aerial vehicle)를 통한 통신이 활발하게 연구되고 있고 UAV를 사용한 통신 전송률 최대화를 위해 효율적인 배치와 비행경로를 최적화하고 있다. 또한 UAV는 지상 통신과 다르게 비행을 위한 에너지를 고려해야 하며 최적화시 이를 추가 반영하여야 한다.

이전 UAV의 비행경로를 최적화하는 방식은 목적 함수를 만드는데 UAV의 kinematic 요소만 고려하여 질량에 대한 영향을 고려하지 않았고, 이를 통해 나온 최적화 경로는 실제 UAV가 이 경로를 따라 비행할 수 없게 되는 결과가 나온다.[2]

이런 문제를 해결하기 위해 동역학적 요소를 고려한 UAV의 최적 경로 계산이 필요하며 이 방법에 대해 소개한다.

### II. 본론

[1]에서는 UAV의 경로 최적화가 kinematic 요소만을 적용하여 거리에 따른 전송률과 에너지 소모를 고려하여 수행하였다. [2]에서는 [1]의 방법을 통해 나온 최적 비행경로를 실제 UAV로 비행 구현이 가능한지 검증 수행하였고 이때 UAV의 질량에 따른 항공 역학적 요소들로 인해 최적 비행경로를 따르지 못한다는 것을 보였다.

[1]에서 나온 기존의 방식으로 최적 비행경로를 구한다면 경로 중간 급격하게 꺾이는 부분이 나오기도

하며 이를 실제 UAV 비행에 적용했을 때 이 구간 통과 중 경로를 벗어나는 경우가 생긴다. 이러한 문제를 해결하기 위해 [2]에서는 최적 제어를 사용하였고 최적 제어를 사용하여 나온 최적 비행경로가 실제 UAV로 구현이 가능하다는 것을 보였다.

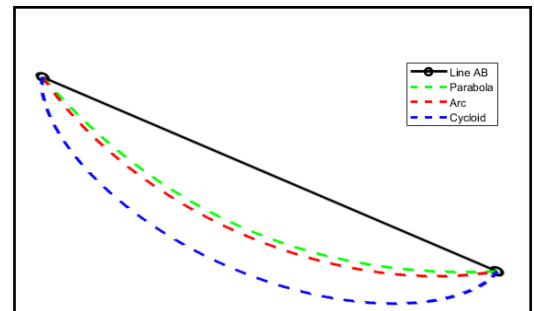


그림 1. the brachistochrone(최단시간 곡선)

최적 제어의 개념은 1638년 갈릴레오가 제시하였던 the brachistochrone에서 시작되었으며 이는 높이가 다른 두 지점 사이 중 높은 곳에서 낮은 곳으로 최단시간 도달할 수 있는 경로를 구하는 문제이다. 그림 1은 the brachistochrone을 구하기 위한 여러 경로를 나타낸 것인데 중력을 제어변수로 생각하고 위치를 상태로 적용하여 문제를 해결하고자 하였다. 추후 요한 베르누이는 당시 뉴턴을 포함한 6명의 수학자들에게 the brachistochrone의 해법을 제시해보도록 하였고 이 해법들을 추후 오일러와 라그랑주가 하나의 식으로 정의하였으며 이를 Euler-Lagrange equation이라 한다. 이렇게 나온 Euler-Lagrange equation을 사용하여 the

brachystochrone 을 계산하면 수식적으로 Cycloid 의 경로가 최소 시간이 걸리는 경로로 나오게 된다.

위와 같이 이 최적 제어는 제어와 상태를 통하여 변하는 목적함수를 최적화하는 개념이며 식에 상태와 제어변수 둘 다 들어간다.[3]

$$J = \int_a^b L(x(t), u(t), t) dt \quad (1)$$

여기에서  $x(t)$  와  $u(t)$  는 상태와 제어변수를 나타내고 이때 순간적인 상태 변화는 현재의 상태와 제어변수에 따라 변하며 이는 다음과 같다.[3]

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad (2)$$

(2)는 최적 제어에서 사용하기 위해 각 상태요소들의 순간 변화를 운동역학식을 적용하여 사용한다. 이렇게 나온 (2)를 (1)의 목적함수와 결합하여 하나의 식으로 만든 것을 Hamiltonian 이라고 정의한다.[3]

$$H(x(t), u(t), \lambda, t) = L(x(t), u(t), t) + \lambda f \quad (3)$$

여기에서  $\lambda$  는 라그랑주 승수이고 Hamiltonian 안에 있는  $\lambda$  는 상태에 대응되는 요소라고 해서 co-state 라고 한다. 이렇게 구해진 Hamiltonian 을 처음 (1)에 대입하면 다음과 같은 식이 나오며 이걸 가지고 변분법(the calculus of variations)을 사용하여 최적의 해를 구한다[3].

$$J = \int_a^b [H(x(t), u(t), t) - \lambda \dot{x}] dt \quad (4)$$

이렇게 구한 해는 목적함수가 최적의 값이 나오도록 하는 제어 변수이며 이를 바로 실제 UAV 제어에 적용하면 최적의 경로로 UAV 가 비행한다. 그림 2 에서 보이듯 이전 최적화 방식은 경로만 먼저 생성되고 그 경로를 따를 수 있도록 하는 제어 값을 따로 계산해야 했던 반면 최적 제어로 구한 최적의 비행경로는 경로와 제어가 한 번에 나오며 이 제어는 최적의 비행경로를 UAV 가 완전하게 따르도록 한다.

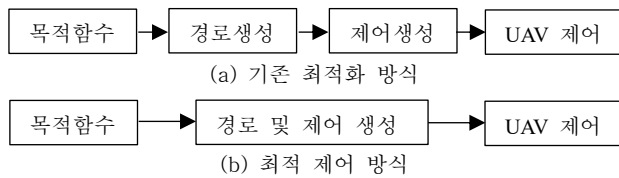


그림 2. 기존 최적화와 최적 제어 방식 비교

### III. 결론

최적 제어를 사용하여 나온 UAV 의 최적 경로는 이전 방식과 다르게 계산부터 운동역학적 요소가 고려되고 최적의 제어를 바로 구하기 때문에 실제 UAV 가 계산으로 나온 최적의 경로를 바로 따를 수 있다. 추후 다수 UAV 이동과 배치의 최적화 그리고 위성의 배치나 궤도 최적화, 더 나아가 UAV-위성 간의 배치와 이동 그리고 궤도의 최적화를 위해서 이 최적 제어 방법을 통해 계산하는 것이 필수적이다.

### 참고 문헌

- [1] Y. Zeng, J. Xu and R. Zhang, "Energy Minimization for Wireless Communication With Rotary-Wing UAV," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 4, pp. 2329-2345, April 2019
- [2] B. Li, Q. Li, Y. Zeng, Y. Rong and R. Zhang, "3D Trajectory Optimization for Energy-Efficient UAV Communication: A Control Design Perspective," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 21, no. 6, pp. 4579-4593, June 2022
- [3] Donald E. Kirk, "Optimal Control Theory: an introduction" Courier Corporation, 2004