

엔진성을 고려한 무인비행체의 고도전이 궤적 설계

황익호*, 조성진, 최동균, 상대규
국방과학연구소

Height Transition Trajectory Design for Considering Engine Performance

Ick-Ho Whang, Sung-Jin Cho, Dong-Gyun Choe, Dae-Kyu Sang
Agency for Defense Development

Abstract - In mission planning of UAV applications, especially for the missions requiring height transitions, it is required to generate reference flight trajectories considering the performances of the engine installed in the UAV. Even though the vertical line following guidance based height transition trajectory generation method has been developed to build reference height transition trajectories easily, it is not adequate for considering engine performances effectively since many engine characteristics and performances have conventionally been described in the V-H(speed-height) plane which is not the very space where the UAVs are actually flying. In this paper, we derive the trajectories in V-H plane for the vertical line following flights. And based on the results, a new algorithm to design the reference height transition trajectories for UAV applications. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm is very effective and easily applicable.

1. 서 론

무인비행체 운용에 있어서 양항비를 고려한 최적 비행궤적 운용, 임무를 위하여 가장 적절한 비행고도로의 전이 및 순항은 매우 중요한 필수 기능중의 하나이다. 실제로 이를 위하여 고도평면에서의 경로점을 설정하고 이 경로점을 잇는 직선을 따라 무인비행체를 비행시키는 방법이 연구되었다 [1-4]. 이 방법을 이용하면 경로점을 이용하여 원하는 비행 궤적을 따라 비행시킬 수 있는 수직면 직선추종유도루프를 손쉽게 설계할 수 있을 뿐 아니라, 고도, 상승각 및 속도 변화 등에 따라 적절한 이득계획(gain scheduling)이 가능하고, 충분한 수준의 강인성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 이 뿐 아니라, 비행체의 비행성능에 따라 설정되는 조종루프의 성능을 감안하여 전체 직선추종유도루프의 밴드폭을 설정하고, 이에 따라 설계 파라미터를 설정할 수 있는 체계적인 접근이 가능한 장점이 있다.

한편, 엔진을 장착한 무인비행체인 경우에는 엔진이 작동 가능한 영역을 감안하여 비행체를 운용하여야 하므로 이러한 제한조건을 효과적으로 고려하여 수직면 경로점을 선정하는 것이 필요하다. 일반적으로 엔진의 운용 영역은 마하-고도 평면에서 표현되므로, 실제로 비행체가 비행하는 공간과의 차이점을 고려하여 경로점을 선정하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 고려하기 위하여 수직면 직선추종비행을 수행하는 경우 나타나는 비행궤적이 속도-고도 평면에서 어떠한 형태의 미분방정식으로 표현되는지를 살펴보고, 그 특성을 감안하여 기준고도전이 궤적을 설계하는 방법을 연구하였다.

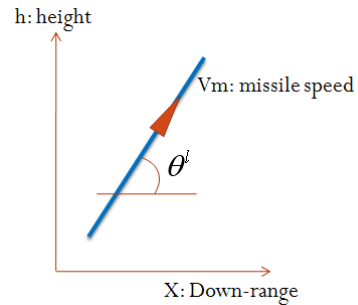
2. 속도-고도평면에서의 고도변화 비행궤적

2.1 수직면 경로점 직선을 따르는 고도궤적의 관계식

본 절에서는 경로점 직선을 따라 비행하는 비행체의 비행궤적이 속도-고도 평면에서 어떻게 변화하는가를 살펴보았다. 그림 1은 down-range와 고도를 X-축과 Y축으로 하는 수직평면에서 비행체가 경로점 직선을 따라 비행하는 것을 도시한 것이다. 여기서 경로점 직선은 수평면에 대하여 θ^l 만큼 기울어져 있으며, 비행체의 속력은 V_m 이라 하자. \dot{V}_m 를 V_m 의 시간에 대한 순간변화율이라 하면, 비행체의 속력은 다음과 같이 계산된다.

$$V_m(t) = \int_0^t \dot{V}_m dt + V_0 \quad (1)$$

여기서 V_0 는 비행체 초기속력이다.



<그림 1> 수직면 경로점 직선을 따르는 고도 전이

한편, 그림 1에서 고도의 시간에 대한 변화율 \dot{h} 은

$$\dot{h} = V_m \sin \theta^l \quad (2)$$

이므로, 시간에 대한 고도 궤적은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h(t) = \sin \theta^l \int_0^t V_m(\tau) dt + h_0 \quad (3)$$

여기서 h_0 은 시각 0일 때 초기 고도이다. $\dot{V}_m = \frac{dV_m}{dt}$ 이므로 식(3)을 변형하면 다음과 같이 속도-고도 평면에서의 고도 변화 궤적을 구할 수 있다.

$$h(V_m) = \sin \theta^l \int_0^{V_m(t)} \frac{V_m}{\dot{V}_m} dV_m + h_0 \quad (4)$$

특히, 속도-고도 평면에서의 기울기는 수평면에 대한 기울기 θ^l 과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{dh}{dV_m} = \frac{V_m}{\dot{V}_m} \sin \theta^l \quad (5)$$

위의 결과를 이용하여 \dot{V}_m 가 상수(constant)인 경우의 고도 궤적을 검토해 보자. 이 경우 식(1), (3)으로 부터 속도 및 고도의 변화는 다음과 같이 구해진다.

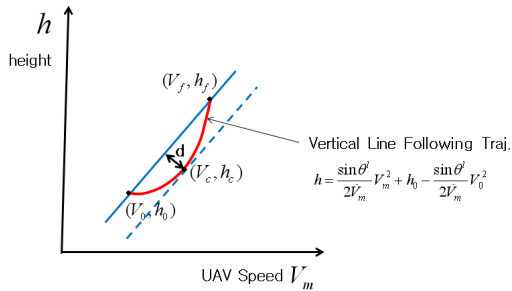
$$V_m(t) = \dot{V}_m t_f + V_0 \quad (6)$$

$$h(t) = \frac{\sin \theta^l}{2} \dot{V}_m t_f^2 + \sin \theta^l V_0 t_f + h_0 \quad (7)$$

이 고도변화 궤적을 속도-고도 평면에서 구하면, 식(4)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$h = \frac{\sin \theta^l}{2 \dot{V}_m} V_m^2 + h_0 - \frac{\sin \theta^l}{2 \dot{V}_m} V_0^2 \quad (8)$$

식(8)의 궤적은 속도-고도 평면에서 2차 함수 꼴이므로 그림 2와 같이 시작점 (V_0, h_0) 과 고도전이 종료점 (V_f, h_f) 를 지나는 포물선 궤적이 됨을 알 수 있다. 특히, 그림 2의 속도-고도 평면에서 시작점 (V_0, h_0) 과 고도전이 종료점 (V_f, h_f) 를 지나는 직선과 가장 멀리 떨어진 점 (V_c, h_c) 의 위치와 그 거리 d 는 다음과 같이 계산할 수 있다.



〈그림 2〉 속도-고도 평면에서의 고도 전이

우선, 점 (V_c, h_c) 에서의 기울기는 시작점 (V_0, h_0) 과 종료점 (V_f, h_f) 를 잇는 직선의 기울기와 같으므로 $\frac{V_c}{V_m} \sin \theta^l = \frac{h_f - h_0}{V_f - V_0}$ 라 할 수 있고, 이로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$V_c = \frac{(h_f - h_0) \dot{V}_m}{(V_f - V_0) \sin \theta^l} \quad (9)$$

식(9)를 식(8)에 대입하면 h_c 를 구할 수 있다.

$$h_c = \frac{(h_f - h_0)^2 \dot{V}_m}{2(V_f - V_0)^2 \sin^2 \theta^l} + h_0 - \frac{\sin \theta^l}{2 \dot{V}_m} V_0^2 \frac{(h_f - h_0) \dot{V}_m}{(V_f - V_0) \sin \theta^l} \quad (10)$$

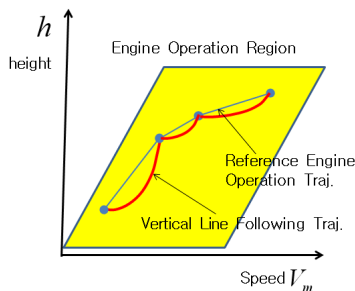
따라서 시작점 (V_0, h_0) 과 종료점 (V_f, h_f) 를 잇는 직선과의 거리 d 는 다음과 같다.

$$d = \frac{|(V_f - V_0)(h_c - h_0) - (h_f - h_0)(V_c - V_0)|}{\sqrt{(V_f - V_0)^2 + (h_f - h_0)^2}} \quad (11)$$

식(8)-(11)을 이용하면 속도-고도 평면에서 나타나는 경로점 직선 추종 고도전이 궤적을 결정할 수 있다.

2.2 엔진 성능을 고려한 속도-고도 평면에서의 고도변화 궤적 설계

2.1절의 결과를 이용하여 속도-고도 평면에서 고도궤적을 설계할 수 있다. 그림 3은 이 과정을 보인 것으로서 정리하면 다음과 같다.



〈그림 3〉 속도-고도 평면에서의 고도 전이 궤적 설계

Step 1) 엔진의 운용 가능 영역 및 엔진 효율을 고려하여 속도-고도 평면에 그림 3과 같이 기준 엔진 운용 궤적을 선정한다. 또, 엔진의 추진 능력 및 비행체의 공기저항 등 관련요소를 고려하여 가속력 \dot{V}_m^i 를 결정한다.

Step 2) 기준 궤적의 구간직선(line segment)들의 시작점과 종료점에서의 속도와 고도를 만족하도록 비행 상승각 θ^l 및 구간직선 종료 시각 t_f^i 를 구한다. 이 파라미터들은 식(6), (7)로부터 다음과 같이 계산

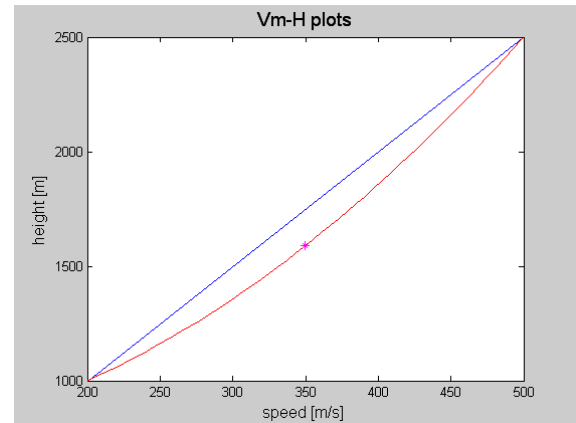
된다.

$$\begin{cases} t_f^i = (V_f - V_0) / \dot{V}_m^i \\ \theta^l = \sin^{-1} \left\{ (h_f - h_0) / \left(\frac{1}{2} \dot{V}_m^i (t_f^i)^2 + V_0 t_f^i \right) \right\} \end{cases} \quad (12)$$

Step 3) step 2에서 구해진 파라미터들을 이용하여 식(11)을 계산함으로써 구해진 파라미터에 의한 수직면 직선추종 경로점 비행이 엔진 운용 구간을 벗어나지 않는지 확인한다.

3. 시뮬레이션 예

본 장에서는 시뮬레이션을 통하여 2장에서 제시한 방법을 검토하였다. 비행체의 초기 고도와 속도는 각각 1.0km, 200m/s이고, 목표 고도와 속도는 각각 2.5km, 500m/s라 가정한다. 비행체를 가속력 $\dot{V}_m^i = 10\text{m/s}^2$ 으로 가속할 경우, 식(12)로부터 $t_f^i = 10\text{sec}$ 이고, $\theta^l = 8.2132\text{deg}$ 임을 구할 수 있다.



〈그림 4〉 속도-고도 평면에서의 고도 전이 시뮬레이션 결과

그림 4는 이와 같이 구한 파라미터를 이용하여 수직면 직선추종 유도 기법을 이용하여 고도전이 비행을 수행한 결과를 도시한 것으로서, 의도하였던 고도전이가 이루어졌음을 알 수 있다. 그림에서 *로 표시된 지점은 (V_c, h_c) 점이고, 시작점과 종료점을 잇는 직선과의 거리는 $d = 31.5185$ 이다. 이 값은 비행체의 엔진의 운용 영역 내에서 고도전이가 이루어졌는지를 판단하기 위한 가장 기본적인 값이 된다.

4. 결 론

엔진을 장착한 무인 비행체를 운용하는 경우, 엔진의 성능을 고려하여 임무비행궤적을 설계하여야 한다. 일반적으로 엔진의 성능은 속도-고도 평면에서 표시되므로 실제로 비행이 이루어지는 공간에서의 비행궤적을 속도-고도 평면에서의 궤적으로 변환시켜 그 성능을 알아보아야 한다. 본 논문에서는 경로점 직선 추종유도[1]를 통하여 고도전이 비행을 수행하는 비행체에 대하여, 속도-고도 평면에서의 고도전이궤적을 연구하였으며, 이 결과에 기반하여 엔진의 성능을 고려한 고도전이 임무비행궤적을 설계하는 방법을 제안하였다. 전형적인 고도전이 궤적 설계 상황에 대한 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘이 유용하게 이용될 수 있음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 황익호, 조성진, 최동균, 나원상, "수직면 직선추종유도법칙 설계", 2009년 정보 및 제어 학술대회(CICS '09) 논문집, pp.295-296, 2009.
- [2] 황익호, 조성진, 최동균, "수직면 직선추종유도 성능을 고려한 추종 직선 전환 방법", 2010년도 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1722-1723, 2010.
- [3] 조성진, 황익호, 최동균, "수직면 직선추종유도성능을 고려한 가속도 조종루프 설계", 국방과학연구소 창설 40주년 기념 종합학술대회 논문집, pp.유도무기-149~유도무기-152, 2010.
- [4] I. H. Whang, and S. J. Cho, "LQR gain-schedule controller for vertical line following," IET Electronics Letters, vol. 46, Issue 14, pp. 991-992, July 2010,