

## 論文

## 지형 회피를 위한 최적 경로점 자동 생성 알고리즘 연구

박정진\*, 박상혁\*, 유창경\*\*, 신성식\*\*\*

## A Study on the Algorithm for Automatic Generation of Optimal Waypoint with Terrain Avoidance

Jung-Jin Park\*, Sanghyuk Park\*, Chang-Kyung Ryoo\*\* and Sung-Sik Shin\*\*\*

## ABSTRACT

In the low altitude, mission of the aircraft is restricted by a variety of threats such as anti-air missiles and terrain obstacles. Especially, aircraft have always a risk of ground collision near terrain. In this study, to effectively solve this problem, we developed the flight path generation algorithm that is considered the terrain avoidance. In this flight path generation algorithm, waypoints that should be passed by the UAV are selected first. The waypoints are located in the middle of the terrain obstacles. Then, physically meaningful waypoints sets are classified by Dijkstra algorithm. The optimal waypoint guidance law based on the optimal control theory is applied to produce trajectory candidates. And finally the minimum control energy trajectory is determined.

## 초 록

항공기는 저고도에서 임무를 수행할 때, 대공 미사일과 지형 장애물 같은 다양한 위협들에 제약을 받는다. 특히, 항공기는 지면 근처에서 항상 지형과의 충돌 위험을 갖는다. 본 연구에서는 이 문제에 효과적으로 대비하기 위하여, 지형 회피가 고려된 비행경로 생성 알고리즘을 개발하였다. 비행경로 생성 알고리즘에서는 먼저 등고선의 그룹화를 통해 경로점을 생성하고, Dijkstra 알고리즘을 이용하여 적절한 경로점 조합을 구성한다. 구성된 경로점 조합에 대해서는 최적제어 이론을 기반으로 한 최적 경로점 유도법칙을 적용하여, 제어에너지를 최소로 하는 최적의 비행경로를 제시한다.

**Key Words** : Terrain Avoidance(지형회피), Flight Path(비행경로), Waypoint(경로점), The Optimal Waypoint Guidance Law(최적 경로점 유도법칙)

## I. 서 론

무인 항공기의 주요 기본 임무는 군사적 대공 위협이나 산과 같은 지형 장애물을 적절히 회피 하면서 관심지역의 감시 및 정찰을 수행하는 것이다. 특히, 지면에 근접하여 감시 및 정찰을 수행하는 경우, 인공 장애물이나 자연 장애물로 인하여 지상충돌의 문제가 발생할 수 있다. 이러한 위협이나, 충돌 문제를 해결하기 위해 다양한 경

† 2009년 7월 31일 접수 ~ 2009년 10월 26일 심사완료

\* 정회원, 인하대학교 항공우주공학과

\*\* 정회원, 인하대학교 기계항공공학부  
교신처, E-mail : ckryoo@inha.ac.kr

인천광역시 남구 용현동 인하대학교 4-103

\*\*\* 정회원, 대한항공기술연구원

로계획 기법이 연구되어 왔다. 관련 연구로 참고 문헌[1]에서는 최적화 기법을 이용하여 비실시간으로 다수 위협을 회피하기 위한 경로를 생성하였고, 참고문헌[2]에서는 파면전과법 및 항법함수를 이용하여 실시간 회피가 가능한 경로생성 기법을 제시하였다. 하지만 이러한 대부분의 연구들은 무인항공기의 경로 자체를 제시한다.

무인항공기에 경로 전체를 탑재하게 되면, 비행제어컴퓨터의 자원소모도 크고, 비행 중에 경로를 변경하기도 어렵기 때문에, 실제 운용에서는 경로점 유도가 많이 이용된다. 따라서 경로가 아닌 경로점을 생성해서 무인항공기에 탑재해 주는 것이 유리하다. 경로를 생성한 후, 경로상의 몇 점을 경로점으로 선택할 수도 있지만, 어떠한 점을 경로점으로 선택할 것인가라는 문제가 다시 발생한다.

본 연구에서는 다양한 지형 회피 상황 중에서도 특히 그림 1과 같이 산악지형에서 그물망을 이용하여 무인항공기를 회수하는 경우의 지형 회피를 고려하였다. 이러한 비행조건하에서는 지형 지물을 효과적으로 회피하면서 그물망의 방향에 맞추어 무인항공기를 유도하기 위한 정밀하면서도 실용적인 비행경로 생성 방법이 요구된다. 따라서 경로점 유도 기법의 하나이면서, 비행 방향을 정확하게 유도할 수 있는 최적제어 기반의 최적 입사각제어 유도 기법을 사용하여 무인항공기의 경로를 생성하였다. 이렇게 생성된 경로는 무인항공기의 운동방정식이 고려되어 산출된 경로이기 때문에 물리적 타당성에 대한 별도의 검증이 요구되지 않는다.

단, 최적 입사각제어를 이용한 경로점 유도는 비행 중에 실시간으로 가능하나, 경로점 자동 생성은 지상에서 지형 정보를 이용하여 비실시간으로 이루어진다. 경로점 자동 생성에서는 등고선을 그룹화하여 등고선들의 사이에 경로점을 위치시키고, 최단경로 탐색 알고리즘인 Dijkstra 알고리즘을 이용하여 경로점들의 조합을 구성하는 일

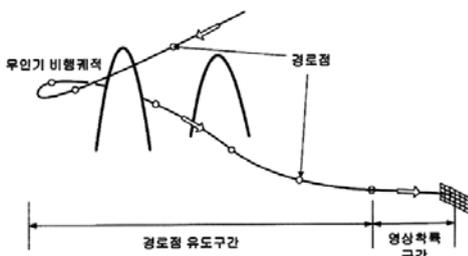


그림 1. 무인항공기 착륙유도과정

등이 자동으로 이루어진다. 마지막으로 각 경로점 조합에 대해서는 최적 입사각제어를 적용하여 시뮬레이션 함으로써 타당성을 확인하고, 최적의 경로점 및 비행경로를 자동으로 제시한다.

## II. 최적 입사각제어 유도 기법[3]

최적 입사각제어 유도 기법은 경로점 유도 기법으로 널리 알려진 비례항법과 달리 비행궤적의 자유로운 성형이 가능하여 본래의 최적 임무비행궤적을 정밀하게 추종할 수 있다. 또한 최적 입사각 제어 기법에 의해서 얻어진 비행궤적은 제어에너지 관점에서 최적성을 보장한다는 장점을 갖는다.

최적 입사각제어 유도 기법은 정지하였거나 천천히 움직이는 목표물에 대해서 그림 2와 같은 유도 기하를 갖는다. 이 그림에서  $V$ ,  $\theta$ 와  $\theta_f$ 는 각각 항공기의 속도, 비행궤적의 각도, 그리고 미리 설정한 입사각을 나타낸다. 또한  $a$ 는  $\theta$ 의 변화에 따른 항공기 속도 벡터에 대한 법선 방향의 가속도를 의미한다. 운동 방정식은 식 (1) ~ (2)와 같이 주어진다.

$$\dot{z}(t) = V(t)\sin\theta(t), \quad z(0) = 0 \tag{1}$$

$$V(t)\dot{\theta}(t) = a(t), \quad \theta(0) = \theta_0 \tag{2}$$

시스템 응답지연을 무시하면, 조종 입력은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$u(t) = a(t) \tag{3}$$

$V$ 가 상수이고,  $\theta$ 가 매우 작다고 가정하면,

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= A\xi + Bu, \quad \xi(0) = \xi_0 \\ \xi &= [z \ v]^T, \quad \xi_0 = [0 \ v_0 (= V\theta_0)]^T \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = [0 \ 1]^T \end{aligned} \tag{4}$$

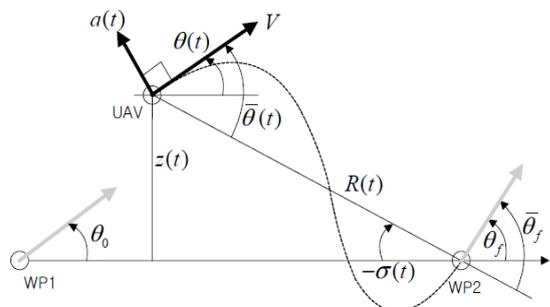


그림 2. 유도 기하

식 (4)와 같은 선형 상태공간의 미분방정식을 얻을 수 있다. 여기서,  $v(t) = V\theta(t)$ 이다.

이제  $J$ 를 최소로 하는  $u(t)$ 를 찾는 다음과 같은 최적제어문제를 고려한다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} u^T(\tau)u(\tau)d\tau \quad (5)$$

종말 구속조건:

$$D\xi(t_f) = E$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, E = [0 \quad v_f]^T \quad (6)$$

위 최적제어문제의 해는 Sweep method에 의해서 아래와 같이 주어진다.

$$u^*(t) = B^T F G^{-1} (F^T \xi(t) - E) \quad (7)$$

여기서

$$\dot{F} = -A^T F, F(t) = D^T \quad (8)$$

$$\dot{G} = F^T B B^T F, G(t_f) = 0 \quad (9)$$

위 미분방정식을 풀어 얻은 최적 입사각제어 유도 명령은 식 (10)과 같다.

$$u^* = -\frac{V}{t_{go}^2} \left\{ \frac{6z(t)}{V} + 4t_{go}\theta(t) + 2t_{go}\theta_f \right\} \quad (10)$$

여기서  $t_{go}$ 는 Time-to-go로 식 (11)과 같이 주어진다.

$$t_{go} = t_f - t \quad (11)$$

이때, 식 (10)의 유도 명령을 적용하기 위해서는 무인항공기에 관성항법시스템이 탑재되어 있어야 한다.

### III. 경로점 생성

#### 3.1 경로점 자동 생성 절차

경로점 자동 생성은 사용자가 두 점, 즉 시작점과 종료점을 선택하여 설정했을 때, 등고선들의 중간점(경로점)을 산출하며 최단경로 탐색 알고리즘 및 최적 입사각제어 유도 기법을 이용하여 경로를 찾게 되는 절차를 거친다.

그림 3은 최적 경로점 및 경로를 자동으로 생성하고, 그에 따른 가시화된 결과를 보여주는 자동 경로점 생성 프로그램에 대한 흐름도를 나타낸다.

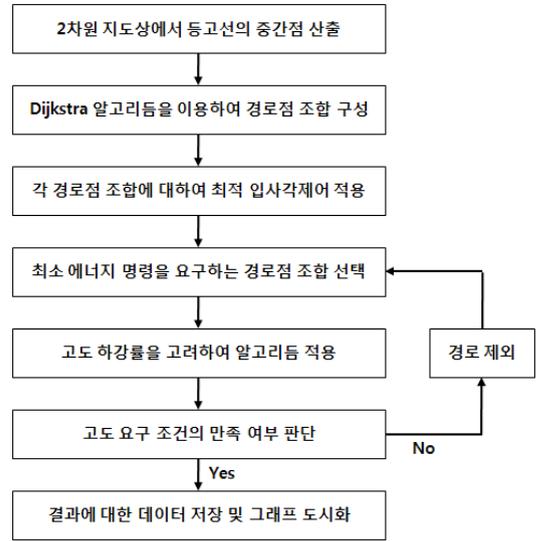


그림 3. 경로점 자동 생성 절차

#### 3.2 등고선 및 경로점 생성

비행 전 항공기의 임무 계획 단계에서 이동 경로에 따른 경로점의 생성 시 항공기의 안전성은 매우 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 특히 지형을 안전하게 회피하여 원하는 지점까지 이동하기 위해서는 현재 비행 구역의 지형 정보를 같은 등고선으로 그룹화 할 필요가 있다.

본 연구에서는 특정 해발 고도의 등고선을 하나의 집단(group)으로 분류하고 다시 하나의 그룹을 각각의 폐곡선 그룹으로 분류한 후, 각 폐곡선 그룹의 중간점을 경로점으로 선택하는 방법을 사용하였다.

그림 4와 같은 가상의 지형을 예로 들면, 먼저 원하는 고도를 기준으로 이진화를 시키고, 집단을 분류(Labelling)한 후, 윤곽선을 검출(Edge

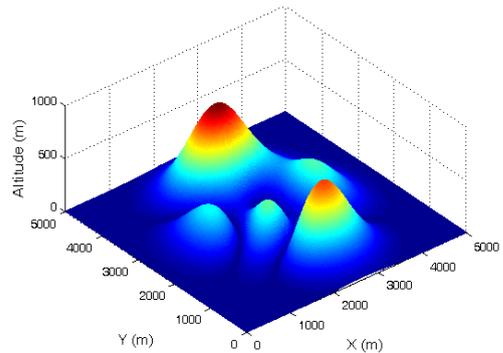


그림 4. 가상의 지형

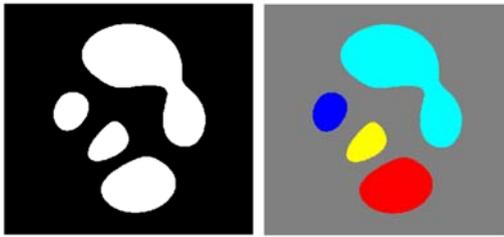


그림 5. 이진화

그림 6. 그룹 분류

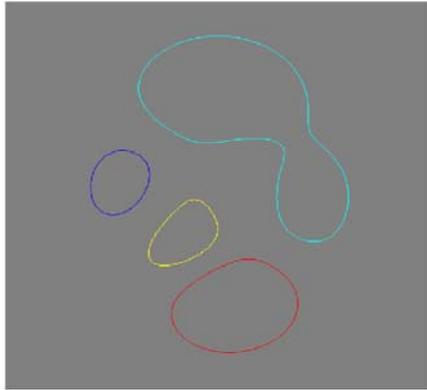


그림 7. 윤곽선 검출

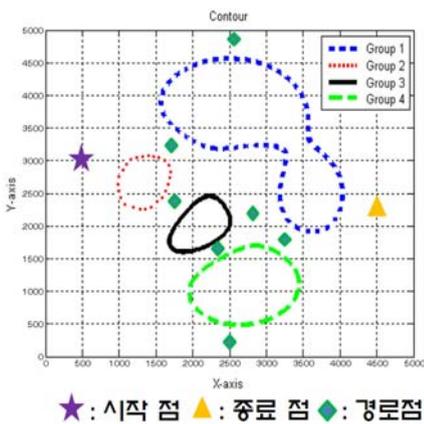


그림 8. 특정 고도의 경로점 생성

detection)함으로써, 각 집단으로 분류된 특정 고도의 등고선을 생성할 수 있다[4]. 이 과정을 그림 5~7에서 보인다. 이러한 지형 처리 방법은 영상 처리에서 많이 이용되는 알고리즘이기에 구체적인 방법은 언급하지 않는다.

그림 8은 얻어진 등고선의 각 폐곡선 중간점을 찾아 경로점으로 선택한 그림이다. 또한 시작점 및 종료점에 수직인 방향에 지형 외곽 경계선과 등고선 사이 두 점을 추가로 선택하여 외곽으로 돌아서 비행하는 경우도 고려하였다.

### 3.3. 경로점 조합

앞에서 생성된 경로점들에 유도 기법을 적용하기 위해서는 경로점의 조합이 필요하다. 하지만 경로점들은 다양한 조합을 가질 수 있고, 복잡한 지형일수록 그 경우의 수는 급격히 증가한다. 따라서 적절한 방법에 의하여 경로점의 조합을 구성할 필요가 있다. 본 연구에서는 이를 위하여 Dijkstra 알고리즘을 사용하였다.

Dijkstra 알고리즘은 보통 두 정점 간의 최단 경로는 그 안에 다른 최단 경로를 포함한다는 특성을 이용하여 최단 경로를 찾는다. 또한 Dijkstra 알고리즘은 현재 위치에서 전 방향을 탐색하기 때문에 다소 연산이 오래 걸리는 단점이 있으나 최단경로 알고리즘의 기본이 되는 알고리즘이다[5].

Dijkstra 알고리즘은 그리드 알고리즘의 일종이기에 각 간선의 비용이 주어져야한다. 본 연구에서는 간선의 비용을 다음과 같이 계산하여 이용하였다.

$$J = A \times distance^2 + B \times height^2 \quad (12)$$

비용함수 J는 거리와 고도의 제곱에 가중치 A, B를 적용하여 정의하였다. 상황에 따라 가중치를 달리 설정함으로써 생성되는 경로의 형태도 달라진다. 그림 9는 비용함수 J의 기본 개념을 나타내고 있고, 그림 10은 산출된 비용함수 그래프를 나타내고 있고, 그림 11은 Dijkstra 알고리즘을 적용하여 최적 경로를 생성한 결과를 나타내고 있다. 그림 11과 같이 다양한 경로점 조합을 얻기 위해서 경로점 중 하나를 반드시 경유하는 방법을 사용하였다.

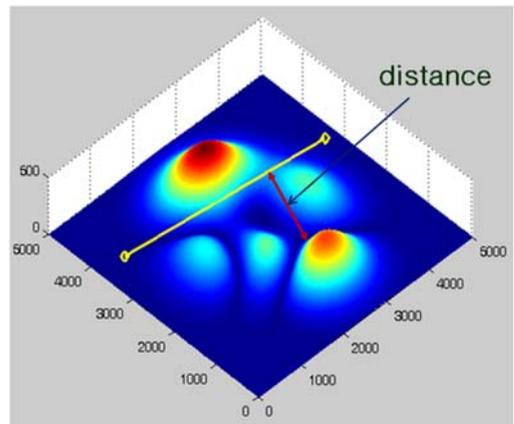


그림 9. 비용함수의 기본 개념

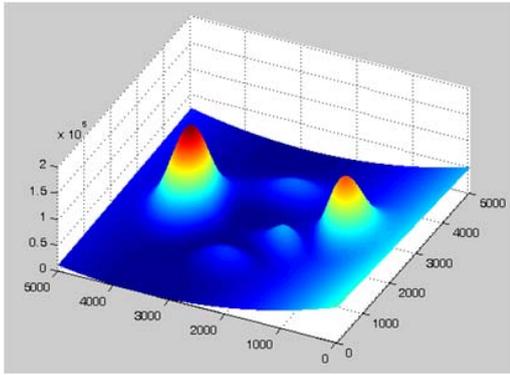


그림 10. 비용함수 그래프

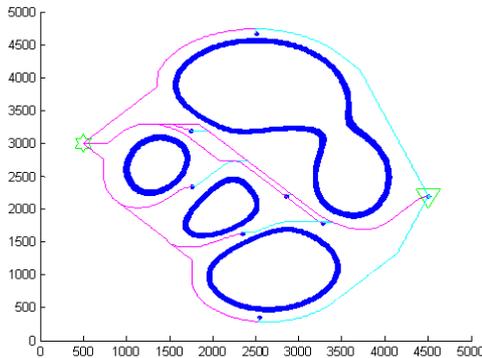


그림 11. Dijkstra 알고리즘을 이용한 경로 생성

### 3.4 경로점 간소화

비행 영역의 지형이 복잡하면 할수록, 등고선의 폐곡선 개수가 많아진다. 즉, 필요 이상의 경로점이 생성된다는 것을 의미하며, 이는 결국 연산 시간이 크게 증가함을 의미한다. 이런 군집화(clustering) 되는 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 K-means 군집화 알고리즘을 이용하여 불필요한 경로점을 제거하였다.

#### 3.4.1 K-means 군집화 알고리즘[6]

K-means(MacQueen, 1967) 알고리즘은 유명한 군집화 문제를 해결하는 가장 간단한 자율학습(Unsupervised Learning) 알고리즘 중 하나이다. 사전에 정해진 임의의 개수의 군집을 통해서 주어진 데이터 집합을 분류하는 간단하고 쉬운 방법으로, k-means는 부분 군집화에 속하며 핵심은 각 군집에 대해서 한 개의 중심점 K를 정의하는 것이다. 각 중심점들이 가능한 서로 멀리 위치할수록 군집화가 더 잘 이루어진다. 다음 단계는 주어진 데이터 집합의 각 점을 가까운 중심점에

포함시키는 것이다. 어떠한 점도 더 이상 포함하지 않을 때, 처음 단계는 완료되며 쉽게 그룹화를 마치게 된다. 이때, 이전 단계에서 나온 중심점과 새로운 중심점 K가 다시 계산되어야 한다. 새로운 중심점 K를 생성한 후에, 새로운 구속조건은 주어진 데이터 집합과 가장 가까운 중심점 사이에서 작용하게 된다. 더 이상 K값이 변화하지 않을 때까지 위 과정을 반복한다. 이 알고리즘의 최종 목표는 두 점사이의 거리 자승의 총합, 즉 목적함수를 최소화 시키는 것이다. 식은 다음과 같다.

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (13)$$

$x_i^{(j)}$ 는 주어진 데이터 집합의 원소이며,  $c_j$ 는 군집의 중심점이다. 식  $\|x_i^{(j)} - c_j\|^2$ 은 이 두 점간의 거리를 의미한다.

알고리즘은 다음과 같은 단계로 구성이 되어 있다.

- 1) 군집의 객체로 표현되는 공간상에 K라고 생각 되는 점들을 위치시킨다. 이 점들은 초기 그룹에 대한 중심점이 될 것이다.
- 2) 가까운 중심점을 가지는 그룹에 대해서 각 객체를 할당한다.
- 3) 모든 객체가 할당 되었다면, 중심점 K에 대해서 다시 위치를 계산한다.
- 4) 중심점이 더 이상 움직이지 않을 때까지 2번과 3번 과정을 반복한다.

#### 3.4.2 K-means 군집화 알고리즘 적용

K-means 군집화 알고리즘은 몇 개의 점들을 뿌리고 그 점에서 인접해 있는 점들을 찾아 평균값을 취하여 더 이상 값의 변화가 없을 때까지 반복하는 것이다. 하지만, 임의의 점들을 적절한 위치에 뿌리지 못하면 군집화가 잘 이루어지지 않는 문제점을 가지고 있다.

그러므로 본 연구에서는 그림 12와 같이 지도를 총 16등분하고, 그 범위 안에 임의의 점을 중심점으로 선택하여, K-means 군집화 알고리즘을 적용하였다. 그림 13은 K-means 군집화 알고리즘 적용 전을 나타내고 있으며, 이 경로점을 이용하여 최적 경로점 생성 알고리즘을 실행 시킬 경우 컴퓨터 성능에 따라 적게는 9분에서 많게는 15분의 연산 시간이 소요되었다. 그림 14는 K-means 군집화 알고리즘을 적용한 후의 모습으로, 그림 13과 비교하면 경로점이 34개에서 10개로 크게 감소하였다.

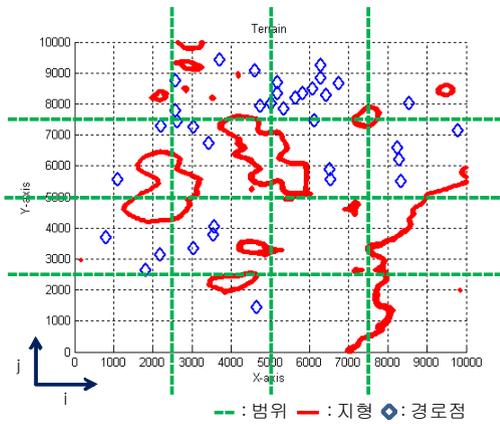


그림 12. 영역 분할

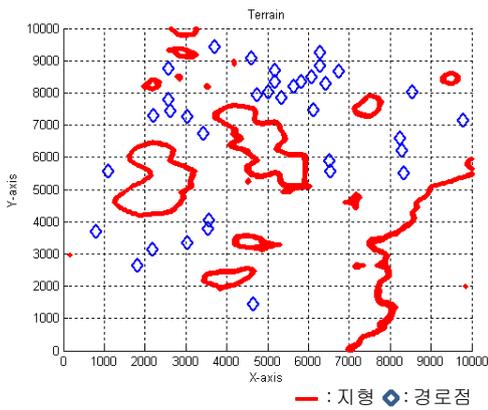


그림 13. K-means 군집화 알고리즘 적용 전

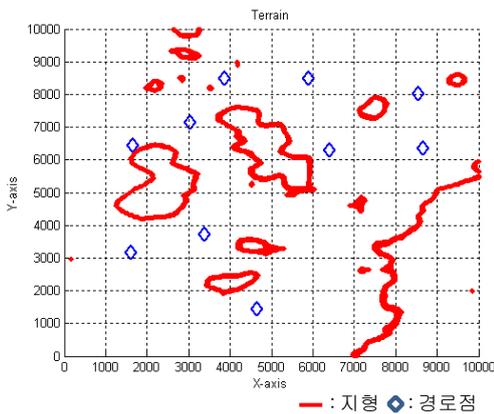


그림 14. K-means 군집화 알고리즘 적용 후

IV. 경로 선택

앞에서 구성된 경로점 조합에 최적 입사각 제어 유도 기법을 적용하면, 각 경로점 조합별로

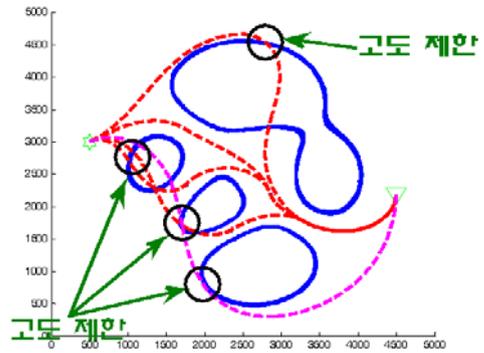


그림 15. 지형충돌 확인

최적 경로가 생성된다. 그리고 각 경로의 총 제어에너지가 함께 산출된다. 따라서 총 제어에너지가 가장 적은 경로가 최적의 비행경로로 선택된다.

하지만 제어에너지가 가장 적은 경로가 항상 선택되는 것은 아니다. 그림 15와 같이 경로점 사이의 궤적이 비행 고도보다 높은 지형을 지나치는 경우가 발생하기 때문에 이들 경우는 제외시키고 다음 최저의 제어에너지를 갖는 경로를 최적 비행경로로 선택해야 한다.

본 연구에서는 2차원 문제에서 3차원 문제로 확장할 때, 특정 상황을 가정하였다. 자동 착륙을 위한 유도 단계라는 상황이다. 착륙을 위한 비행 방법에는 여러 가지가 있겠지만, 여기서는 그림 16과 같이 일정한 고도로 비행하다가 착륙 위치로부터 일정 거리에 도달하는 순간, 하강을 시작하는 것으로 문제를 단순화 시켰다. 하강률이 일정하다고 가정하는 경우, 착륙 전에 최소한 어느 거리 이상에서 하강을 시작해야 하는지가 아래와 같은 간단한 식에 의해서 얻어진다.

$$\Delta t = \Delta h / \dot{h} \tag{14}$$

$$\Delta x = V \times \Delta t \tag{15}$$

고도 하강을 적용한 후에도 마찬가지로 지형과 충돌이 발생하면 경로에서 제외된다. 그림 17은 그림 15에서 선택된 최적 경로이다. 선택된 경로의 A, B, C 구간에서는 고도를 일정하게 유지하며, D에서는 고도 하강 비행을 한다.

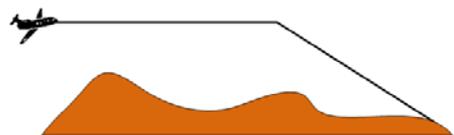


그림 16. 하강 계획

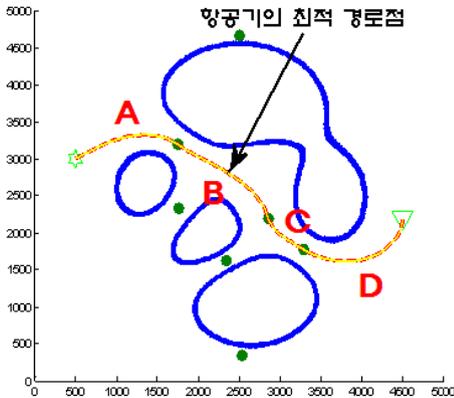


그림 17. 고도 하강률 적용

### V. 경로 생성 예제

다음은 자동 경로 생성 알고리즘을 임의의 지형이 아닌 실제 지형에 적용하여 얻은 결과이다. 지형 데이터는 강화도 지역의 일부분을 사용하였고, 초기 비행 고도가 200m, 목표점에서의

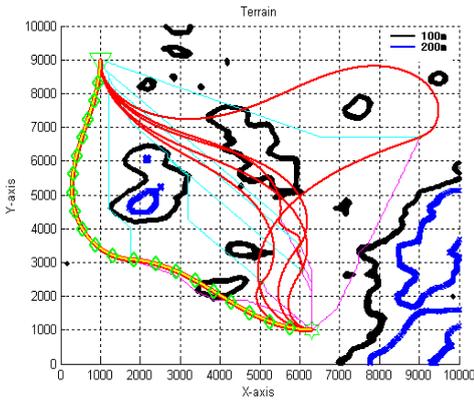


그림 18. 고도 200m에서의 비행 시 궤적 생성

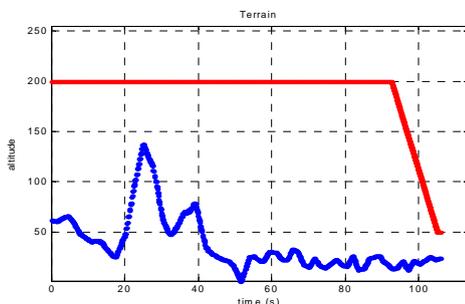


그림 19. 선택 경로의 시간-고도 그래프

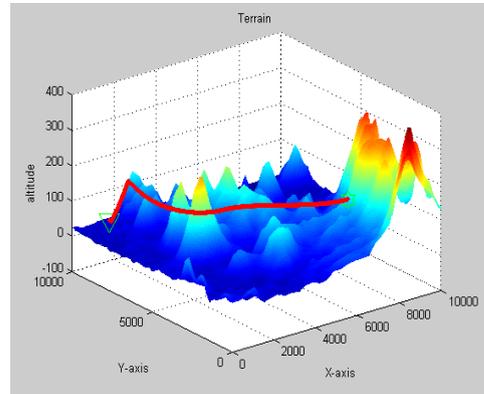


그림 20. 삼차원 지형에 따른 비행 궤적 생성

고도가 50m이다. 그림 18은 2차원 비행경로를 보여주는데, 그 중에서 마름모로 표시된 경로가 제안되는 최적 경로이다. 그림 19는 선택된 경로의 시간-고도 그래프를 보여준다. 그림에서 비행고도는 지형고도보다 50m 이상 높게 유지되는 것을 볼 수 있다. 그림 20은 3차원 비행경로를 나타낸 것이다.

### VI. 결 론

본 연구에서는 최적 입사각 제어 유도 기법을 기반으로 무인항공기의 지형충돌 회피 궤적을 생성하였다. 이때 사용된 유도 기법이 경로점 유도 기법의 일종이기 때문에 경로 계획을 자동으로 하는데 있어서 중요한 것은 결국 경로점을 자동으로 생성하는 일이다. 따라서 본 연구에서는 간단한 방법이지만, 안전한 경로점을 자동으로 생성할 수 있는 일련의 과정에 대해 제시하였다.

이로써, 실제 무인항공기에 탑재되는 것은 궤적 정보가 아닌 자동으로 찾아진 경로점 정보가 되어 무인항공기의 저장용량에 대한 부담이 감소될 것이다. 또한 비행제어컴퓨터의 탑재 유도 기법이 동일한 경우, 시뮬레이션 된 비행경로와 동일한 경로로 비행할 것이기 때문에 별도의 시뮬레이션 검증이 필요 없다는 장점을 갖는다.

단, 경로점 조합 구성에 이용되는 Dijkstra 알고리즘은 연산 시간이 긴 문제가 있고, 경로점 간소화에 이용된 K-means 군집화 알고리즘은 영역을 단순히 등분할 했다는 문제가 남아있기에 차후 개선이 요구된다.

### 후 기

본 연구는 대한항공기술연구원의 “최적 경로점 유도를 위한 탑재 S/W 개발” 위탁연구의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) 김부성, 유창경, 방효충, 정을호, "다수 위협에 대한 무인항공기 최적 경로 계획", 한국항공우주학회지, 제 34권 제 1호, 2006, pp. 74-80.
- 2) 김필준, 최중욱, 김유단, "Framed-Quadtree 파면전과 기법과 항법함수 기법을 이용한 항공기 위협회피 궤적 설계", 한국항공우주학회지, 제 35권 제 10호, 2007, pp. 918-926.
- 3) 유창경, 신호상, 탁민제, "무인기를 위한 최적 경로점 유도", 제어·자동화·시스템공학 논문지 제 11권 제 3호, 2005, pp. 240-245.
- 4) R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and S. L. Eddins, *Digital Image Processing using Matlab*, Prentice Hall, 2003.
- 5) T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest and C. Stein, *Introduction to Algorithms 2nd*, McGraw-Hill Book, 2001.
- 6) J. B. MacQueen, "Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations", *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1967, pp. 281-297.