

# 전자지도를 이용한 헬리콥터의 지상 충돌회피 스캔 패턴 설계

## Scan Pattern Design of Ground Collision Avoidance for Helicopters using Digital Terrain Elevation Map(DTED)

이원석\*, 이동진, 방효충(KAIST), 황상현, 안성진(ADD)

### 1. 서론

비행체의 충돌회피에 대한 다양한 알고리즘이 최근에 국내에서 활발하게 연구되고 있다. 지금까지 연구되어진 충돌회피의 대표적인 방법으로는 비례항법(Proportional navigation) 유도, 포텐션(Potential) 함수이용, 확률적 방법 및 최적화 기법을 이용한 충돌 회피 등이 있다. 또한 기존의 TCAS 시스템을 구현하여 항공기의 충돌 회피 알고리즘을 구현하는 방법도 있다. 한편 이와 같은 대부분의 충돌 회피 알고리즘은 항공기와 항공기 사이의 충돌 문제 위주로 진행되었다. 헬리콥터와 같이 저고도로 비행하는 비행체의 지상 충돌 문제는 본격적으로 다루어지지 않았다. 실제 운용상 헬리콥터의 경우, 야간 비행 또는 안개 등에 의한 시야 문제로 인해 지상과의 충돌이 빈번하게 발생하기 때문에 지상 충돌회피 시스템은 보조 시스템으로 헬리콥터의 안전한 운용에 있어 필수적이다.

이러한 충돌 회피 시스템 구현을 위해서 효과적인 방법은 역시 지형지도(DTED)를 참조하여 항공기의 궤적을 사전에 예측함으로써 충돌 가능성을 예측하고 필요한 경우 적절한 회피 기동을 수행하는 것이다. 대표적으로 영국 BAE 시스템사의 PGCAS (Predictive Ground Collision Avoidance System)가 있다. 이 시스템은 디지털 지형 정보를 이용하여 충돌을 예측하며 충돌 예상 시간 정보를 제공한다. 그 밖에 여러 가지 지상 충돌회피 시스템이 제안되어 실제 항공기에 탑재 운용되고 있다.

본 연구에서는 지형지도를 참조하기 위한 스캔 패턴을 설계하고 스캔 영역의 지향각을 산출하기 위해 비행경로 예측 기법을 이용하도록 한다.

### 2. 비행경로 예측 기법

지형 스캔 영역의 지향각을 얻기 위하여 실시간으로 예측되는 궤적을 계산해야 한다. 실시간으로 궤적을 얻기 위해서는 주어지는 비행데이터와 계산량을 고려하여 컴퓨터의 계산 로드를 줄여야 한다. 매 순간 수치적으로 해를 구하지 않고 일반적인 해석적 해를 구하여 이용하면 이 문제를 해결할 수 있다. 이를 위하여 일반적으로 비행체의 궤적을 원으로 가정하고 비행체의 궤적을 예측하는 기법이 많이 연구 되었다. 본 연구에서는 비행체의 궤적을 원에서 확장하여 cylindrical helix로 가정하고 Frenet frame을 이용하여 해석적 해를 구하였다. 해석적 해를 사용하기 때문에 실시간으로 궤적을 생성할 수 있다.

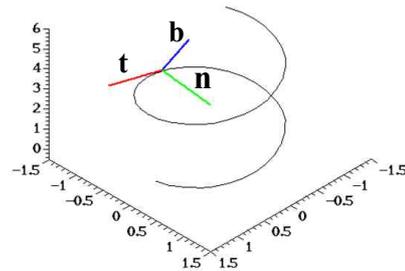


그림. 1 Frenet Frame

3차원의 주어진 비행경로의 임의의 위치에서 Frenet frame은 그림. 1에서처럼 직교하는 (orthogonal) 세 개의 단위 벡터로 정의 된다. 먼저 Tangent unit vector(first Frenet vector)는 곡선의 진행 방향을 나타내고, Normal

vector(second Frenet vector)는 curvature vector라고도 불리며 직선에서 곡선의 편차를 나타낸다. Binormal unit vector는  $\mathbf{t}$  와  $\mathbf{n}$  에 orthogonal 한 벡터로 정의 된다. 이 벡터들에 대한 자세한 식은 참고문헌[1]을 참조하도록 한다. 이 벡터들을 이용하여 시간  $t=t_0$ 에서 steady turn상태의 비행경로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{k_2^2}{G} + \frac{k_1^2}{G^{3/2}} \sin(s\sqrt{G}) \\ \frac{k_1^2}{G} (1 - \cos(s\sqrt{G})) \\ \frac{k_1 k_2}{G} s - \frac{k_1 k_2}{G^{3/2}} \sin(s\sqrt{G}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$G = k_1^2 + k_2^2$$

### 3. 지형 데이터 스캔 패턴 설계

#### 3.1 2차원 스캔 패턴 생성

기본적으로 스캔 패턴은 헬리콥터의 속도와 기동에 따라 변형이 가능하게끔 하도록 한다. 또한, 속도에 따라 스캔 영역의 상대적인 위치를 변화시켜 좀 더 타당하게 지형 데이터를 스캔하도록 한다. 그리고 실질적인 컴퓨터의 계산로드를 고려하여 매 순간 읽어드리는 데이터의 양은 항상 일정해야 하기 때문에 스캔 영역의 넓이는 고정되어 있어야 한다. 또한 저속일 경우 헬리콥터는 전후, 좌우로의 기동이 용이하므로 스캔 영역의 중심부분에 위치하게 되고, 고속일 경우는 저속과 달리 갑자기 다른 방향으로의 운동이 용이하지 못하므로 스캔 영역의 후미 쪽으로 위치시킨다. 계산이 용이하고, 속도에 따라 여러 방향을 고려하기 위해 사다리꼴 모양을 기본형으로 선택하였다. 우선, 기본적으로 전진 비행만 고려할 경우 그림에서와 같이 계산에 필요한 파라미터는 a, b, d, h로서 총 4개이다. a는 사다리꼴의 밑변의 반을 의미하고, b는 윗변의 반을 의미한다. 그리고 d는 헬리콥터 위치에 대한 스캔 영역의 상대적 위치를 나타내고, h는 사다리꼴의 높이를 표시한다. 앞서 언급했듯이, 속도에 따라 스캔 영역이 변화해도 넓이는 항상 일정해야 한다고 했으므로 기본적으로 한 변의

길이가 c인 정사각형을 고려해 본다. 우선, 밑변과 윗변에 대응되는 a와 b는 서로 속도가 빨라질수록 줄어들어야 하지만, 같은 비율로 좁히지 않고, 2:1 비율로 줄이도록 한다. 이는 속도가 빠를수록 헬리콥터 근방에서는 급하게 기동을 변화시킬 수 없기 때문이다. 정사각형일 경우, a와 b는 모두 c에 해당한다. 이를 속도에 따라서 2:1 비율로 줄인다면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$a = \left( c \times \frac{1}{2V} \right) \quad (2)$$

$$b = \left( c \times \frac{1}{V} \right)$$

이 값과 전체 넓이  $c^2$ 을 이용하여 높이 h를 구할 수 있다. 여기서 각 a와 b는 밑변과 윗변의 반만 나타내기 때문에 넓이를 구할 때는 이 합의 2배를 해주어야 한다.

$$S = c^2 = 2(a+b) \times \frac{h}{2} = 2 \left( \frac{c}{2V} + \frac{c}{V} \right) \times \frac{h}{2} \quad (3)$$

$$\therefore h = c \times \frac{2V}{3}$$

그리고 속도에 따른 헬리콥터에 대한 스캔 영역의 상대적 위치를 결정하는 d는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d = \frac{c}{2} - 0.1(V) \quad (4)$$

위 식들을 바탕으로 측면기동에 대해서 고려를 한다. 헬리콥터가 측면으로 기동할 경우, 기동하는 측면 쪽으로 가중치(weighting)를 주어 전체 스캔 영역이 측면 쪽으로 더 많은 영역을 고려하도록 유도한다. 전진 비행만 고려할 경우와 달리, e로 표기되는 파라미터가 하나 추가하게 되는데, 이는 앞에서 설명한 가중치에 해당한다. 헬리콥터의 근방에서는 측면 기동에 대해서 큰 영향을 받지 않으므로 밑변인 a에는 가중치 계산을 하지 않았다. 가중치(e)를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$e = b \times \left( \frac{V_y}{V_{yref}} \right) \quad (5)$$

여기서,  $v_y$ 는 측면 속도를 나타내고,  $v_{yref}$ 는 측면 속도의 기준 값을 나타낸다.  $v_{yref}$ 는 가중치가 어느 한도를 넘지 못하게 하기 위해 설정되었다.

### 3.2 3차원 스캔 영역

3차원으로 스캔 영역을 확장시키기 이전에 하강률을 고려하여 헬리콥터의 상하 움직임을 반영하도록 한다.

$$z_{scan} = Alt + \dot{h} \frac{h}{N} i \quad (6)$$

$Alt$ 는 헬리콥터의 현재 고도 값을 의미하고,  $\dot{h}$ 는 하강률을 나타낸다.  $N$ 은 스캔 영역의 높이 방향으로의 나누어진 전체 그리드 개수이다.  $i$ 는 나누어진 그리드의 번째 값을 의미한다. 하지만, 타당한 시간을 고려하여 실제 가능한 고도 축으로의 이동을 계산하는 것이 적절하기 때문에 아래와 같이 시간 개념을 도입하여 계산한다.

$$t_i = \frac{1}{U} \times \frac{h}{N} \times i \quad (7)$$

$$H = \dot{H} \times t_i$$

$$H = \dot{H} \times \left( \frac{1}{U} \times \frac{h}{N} \times i \right)$$

$t_i$ 는 x축의 속도와 각 그리드의 거리를 이용하여 해당 그리드까지 도달하는데 걸리는 시간을 계산한 것이다. 이 시간과 하강률을 이용하면 각 그리드에서의 고도 축으로의 이동 정도를 계산해 낼 수 있다.

앞에서 하강률을 이용하여 종축 움직임을 반영하였지만, 고도 축으로는 예상되는 진행 궤적보다 좀 더 여유를 주어 급한 기동에도 무리가 없도록 한다. 이를 반영하기 위해 일정한 lower bound를 설정하였다.

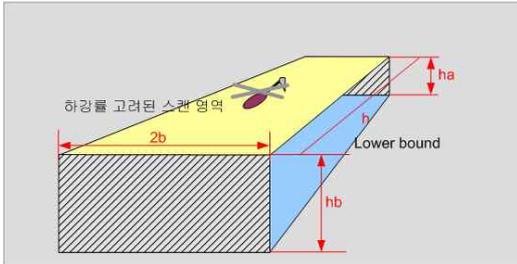


그림. 2 3차원 스캔 영역

여기서,  $ha$ 와  $hb$ 를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$ha_0 = \frac{A}{U_{ref}} \quad (8)$$

$$ha = \frac{A}{U}$$

$$(ha + hb) \times h = (ha_0 + hb_0) \times h = 2ha_0 \times h$$

$$\therefore ha + hb = 2ha_0$$

$U_{ref}$ 는 일정 기준 값인데 속도가 이 값 미만일 경우 항상  $ha_0$ 를 유지하도록 한다. 결국 위 식에서처럼  $ha$ 와  $hb$ 의 합은 항상 일정하다는 구속조건을 이용하여  $hb$ 를 구할 수 있다. 이렇게 구해진  $ha$ 와  $hb$ 를 이용하여 양 끝단 사이를  $N$ 개의 그리드로 나누어 각 그리드의 lower bound를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$hx = ha + \frac{2ha_0 - 2ha}{N} \times i \quad (9)$$

충돌에 대한 더 많은 정보를 제공하기 위해서 스캔 영역 안쪽 그리드를 체크하도록 하였다. 3차원 스캔 영역을 각 축에 대해서 여러 개의 그리드로 나누어 충돌 여부를 체크하고 확인하기 위해서는 모든 요소를 매트릭스로 만들어 관리하는 것이 좋다. 매트릭스의 요소들을 체크해서 충돌이 예상되는 요소 위치를 역 계산하여 실제 예상되는 지점을 계산해 내어 파일럿에게 정보를 제공하도록 한다.

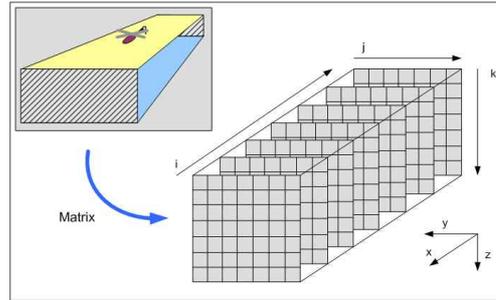


그림. 3 스캔 영역의 매트릭스화 과정

그림. 3은 스캔 영역을 매트릭스로 변화시키는 과정을 보여주고 있다. 매트릭스의 좌표는 그림과 같이  $(i, j, k)$ 로 설정되어 있다. 따라서 충돌 여부가 판단된 매트릭스를 비교할 때 충돌 가능성이 제기된 매트릭스 중  $i$ 값이 가장 큰 값으로써 장애물이 헬리콥터와 얼마나 근접해 있는지를 판단할 수 있다. 또한, 그 매트릭스 단면에서  $j$  값이 커질수록 헬리콥터의 좌측에서

충돌할 가능성이 있는 것이고,  $k$  값이 작을수록 헬리콥터와 고도차이가 크지 않다는 것을 암시한다.

#### 4. 시뮬레이션

설계되어진 스캔 패턴을 검증하기 위하여 3차원으로 시뮬레이션을 하였다. 그림. 4는 장애물이 존재하는 가상의 지형을 만들고, 이에 대한 충돌 여부를 판단하도록 제작한 시뮬레이션을 보여준다.

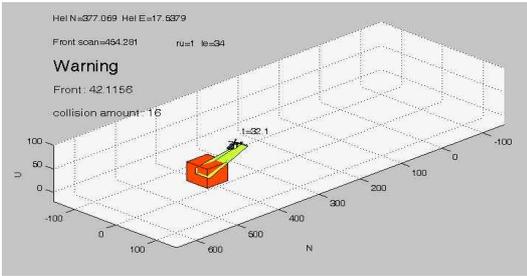


그림. 4 스캔 패턴 적용한 시뮬레이션

그림. 5는 스캔 영역에 충돌이 감지되었을 때 보여지는 매트릭스의 단면을 표현한 그래프이다. 가장 앞쪽부터 중간 지점까지 충돌이 감지되어 있는 것을 확인할 수 있고, 중간보다는 앞쪽이 충돌량이 많은 것을 확인할 수 있는데 이는 애니메이션에서 보여지는 결과와 동일함을 알 수 있다.

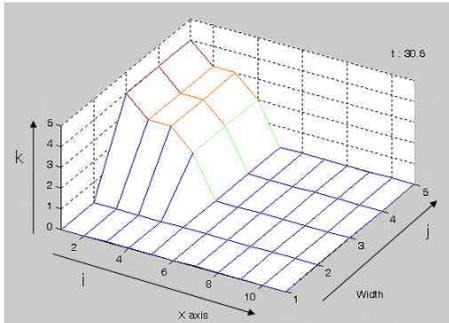


그림. 5 스캔 영역 3차원 매트릭스 그래프

#### 5. 결론

스캔 영역의 패턴은 사다리꼴 형태를 기반으로 별도로 계산된 가중치를 이용하여 기동에 맞

게 그 형태를 변화시키도록 하였다. 스캔 영역의 지향각은 단순히 헬리콥터의 기수각으로 설정하게 되면 특별한 기동에 대해서 지형 데이터를 제대로 맵핑할 수 없기 때문에 비행경로 예측 기법을 이용하여 앞으로의 진행 방향이 고려된 스캔 영역의 지향각을 산출하였다. 하강률을 고려하였고, 측면 기동에 비해 고도 축으로의 상하 기동은 급변할 수 있기에, 이를 반영토록 lower bound 개념을 설정하였다. 더 정확하고 많은 정보를 제공하도록 하기 위해 스캔 영역을 3차원으로 확장하였다. 확장된 3차원 스캔 영역의 정보를 처리하기 위해 모든 영역을 일정한 크기의 그리드로 나누어 매트릭스화 하였다. 이 매트릭스의 정보를 역계산하여 실제 위치를 얻어낸 후, 충돌의 근접정도와 충돌량 등에 대한 정보를 파일럿에게 제공하게 된다.

#### 후기

본 연구는 국방과학연구소에서 시행한 “지형 참조항법을 이용한 지상충돌회피 기법 연구”의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Giulio Anazini, Guido de Matteis, Luciano de Socio, "Natural description of aircraft motion," Journal of guidance, control, and dynamics, Vol. 21, No. 2, March-April 1998.
- [2] Giulio Avanzini, "Frenet-based algorithm for trajectory prediction," Journal of guidance, control, and dynamics, Vol. 27, No. 1, January-February 2004.
- [3] Finley Barfield, Judith Probert, Duke Browning, "All terrain ground collision avoidance and maneuvering terrain following for automated low level night attck," 11th digital avionics systems conference. Oct. 5-8, 1992.