

## 고정익 무인기의 충돌회피를 고려한 정밀 편대비행 유도법칙 연구

김현기1\*, 신희민1, 이재현1, 심현철1

한국과학기술원1

### Research the Guidance Law for Formation Flight of Fixed Wing UAVs regarding Collision Avoidance

Hyungi Kim<sup>1\*</sup>, Heemin Shin<sup>1</sup>, Jaehyun Lee<sup>1</sup>, David Hyunchul Shim<sup>1</sup>

**Key Words** : UAV(무인항공기), Formation Flight(편대비행), Collision Avoidance(충돌회피), Leader-Follower (선두기-추종기).

#### 서론

무인 항공기 기술의 발달은 무인기의 단독적인 사용 뿐 아니라 복수 무인기의 동시 운용을 가능하게 하였다. 편대비행은 복수 무인 항공기 운용의 한 방법이다. 편대비행을 통해 무인 항공기는 공격적 이점, 비행 효율 향상, 피탐지율의 저하 그리고 전술상 이점 등의 많은 장점을 가진다. 이를 위한 편대비행 알고리즘 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문은 가상추적점 기반의 편대 비행 유도 법칙을 소개하고, 기존의 알고리즘이 가지는 단점을 보완하여 선두기의 임의의 기동에 대해 편대 유지가 가능하도록 회전 반경을 고려한 가상추적점 기반 유도 법칙을 충돌 회피를 고려하여 설계한다.

#### 편대비행 유도 법칙

##### 정밀 편대 비행을 위한 회전반경 고려 VPP 설계

기존의 가상추적점 기반의 편대비행 유도 법칙<sup>(1)</sup>은 Fig. 1과 같이 나타낸다. 선두기의 가상추적점과 선두기에 대해 편대기가 위치하여야 하는 상대적인 위치를 통해 편대기의 가상추적점을 구한다. 이를 통해 편대기가 편대를 유지하기 위한 유도 명령을 구한다. 편대기는 아래의 9가지 선두기 정보에 대해 안다고 가정한다.

Attitude( $\phi, \theta, \psi$ ), Velocity( $u, v, w$ ), Position(Lat, Lon, Alt)

선두기와 편대기가 Fig. 1과 같이  $[f_c, l_c, h_c]$ 의 간격으로 편대를 구성해야한다. 선두기의 가상추적점은 개인  $k_{bok}$ 을 사용해 식(1)과 같이 나타낸다. 편대기의 가상추적점은 선두기의 가상추적점과 편대기와 선두기 사이의 거리를 이용해 식(2)와 같이 구한다.

$$X_{VPP}^L = POS_L + k_{bok} v_l \tag{1}$$

$$X_{VPP}^F = X_{VPP}^L + C_{b/r}(\phi_L, \gamma_L, \chi_L)[f_c \ l_c \ h_c]^T + K_F \rho_e \tag{2}$$

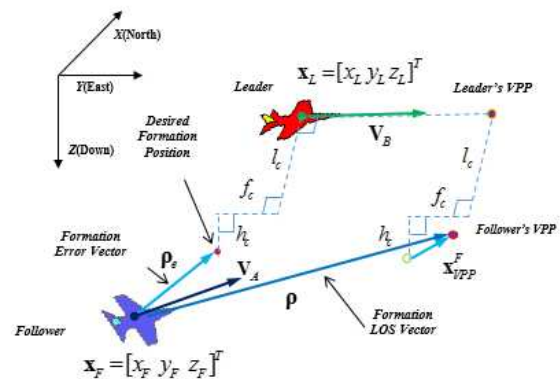


Fig. 1. VPP based formation flight

식(1)과 (2)를 기반으로 한 기존의 편대 비행 유도 법칙은 선두기가 단순한 직선 경로 혹은 완만한 곡선 비행을 수행 할 경우 정확한 편대 비행 수행이 가능하다. 그러나 선두기의 급격한 기동 시에는 편대의 유지에 어려움을 가진다.<sup>(1)</sup> 이를 해결하기 위해 선두기의 정보를 기반으로 편대기의 가상추적점을 새롭게 구해 편대를 구성하는 방법을 제안한다.

식(2)와 같이 가상추적점을 정하는 경우 회전 기동 시 편대 위치에 따라 회전반경이 달라지는 점이 고려되지 않는다. 달라지는 회전 반경이 고려되지 않으므로 회전 기동 시 잘못된 유도 명령을 구한다. 이는 Fig. 2의 시뮬레이션 결과에서 이등변 삼각형 구조의 편대를 이루지 못하는 것을 통해 확인할 수 있다.

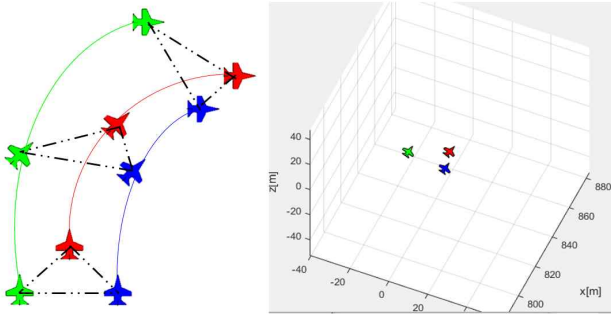


Fig. 2. Unimproved formation flight on curve

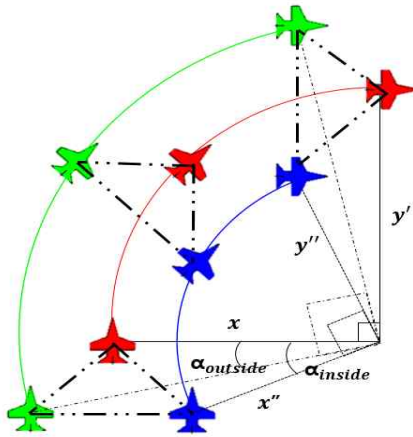


Fig. 3. improved formation flight on curve

회전기동에서 편대를 이루기 위해, Fig. 3.과 같이 선두기와 편대기가 같은 구심점을 가지도록 한다. 같은 구심점을 기준으로 같은 회전율, 다른 회전 반경으로 비행경로를 가지도록 편대기를 유도한다. 기존의 가상추적점을 속도 벡터에 계인을 곱해 구한 것과 달리 회전 경로 상에 가상추적점이 위치하도록 한다. 고정익기 비행의 기하 구조를 사용해 식(3)과 같이 선두기의 회전 반경을 구한다.

$$r_L = v_L^2 * \cos(\phi_L) / (g * \sin(\phi_L)^2) \tag{3}$$

Fig. 3.에서 편대기의  $\alpha$  는 회전 중심과 편대기 사이의 위치와 각도를 사용해 식(4)와 같이 구한다.

$$\alpha = \tan^{-1}(f / (r_L - l * \cos(\phi_L))) \tag{4}$$

편대기의 회전 반경은 선두기의 회전 반경을 사용해 식 (5)와 같이 구한다.

$$r_F = \sqrt{(r_L - l)^2 + (f)^2} \tag{5}$$

고정익기의 운동 기하 구조와 계인  $k_{offset}$  을 사용해 편대기의 가상추적점을 구한다. Fig. 3.의  $x'$ ,  $y'$  좌표에서 편대기의 가상추적점을 식 (6)을 통해 구한다.

$$VPP_{xyz} = \begin{bmatrix} r_F * \sin(k_{bok} v_l / (r_L * \cos(\phi_L))) \\ -r_F + k_{offset} * (r_F - r_F \cos(k_{offset} v_l / (r_L * \cos(\phi_L)))) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

이를 선두기의 동체좌표계 상에서 표현하기 위해 식(7)을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} VPP_{fx} \\ VPP_{fy} \\ VPP_{fz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} * VPP_{xyz} \tag{7}$$

이를 사용해 편대 구성을 위해 제안하는 편대기의 가상추적점은 식(8)을 사용해 구한다.

$$X_{VPP}^f = POS_L + C_b(\phi_L, \theta_L, \psi_L)[f, 0, h]^T + C_b(\phi_L, \theta_L, \psi_L)[VPP_{fx}, VPP_{fy}, VPP_{fz}]^T \tag{8}$$

새롭게 구한 편대기의 가상추적점을 이용해 편대 구성을 위한 편대기의 속도와 가속도 명령을 구할 수 있다.

### 충돌 회피를 고려한 편대 비행

편대 비행 중에 전술상의 이유 등으로 인해 편대 구조를 바꿔야할 수 있다. 편대기의 위치를 바꿀 때 편대기들 간 충돌 위험을 방지하기 위한 방법이 필요하다. 충돌 회피의 경우 다양한 기법이 연구되었다. 편대 비행의 경우 새로운 경로 계획을 통한 충돌 회피보다 포텐셜필드<sup>(2)</sup>를 사용해 무인 항공기가 충돌 위험 지역에서 벗어나도록 한다.

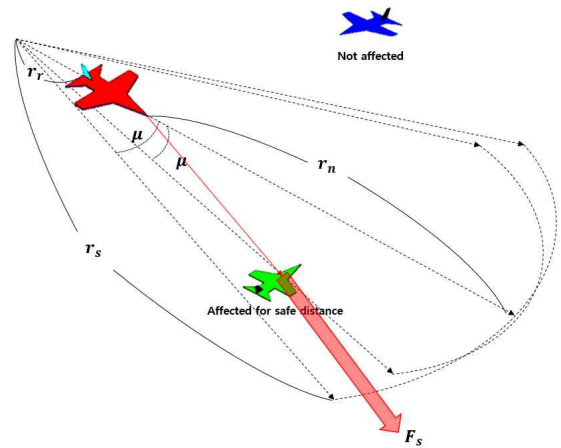


Fig. 4. improved formation flight on curve

Fig. 4.에서 빨간 기체가 n초 후에 도달할 수 있는 거리를  $r_n$  이라 한다. 기체 후방과 측 방향의 여유 안전거리를 위한  $r_l$  을 설정한다. 동체 좌표계상에서 기체에서 후방으로  $r_l$ 만큼 떨어진 지점에서  $r_l$ 과  $r_n$ 의 합인  $r_s$  를 반지름으로 가지고 양쪽으로  $\mu$ 의 각도로 가지는 원호를 충돌 위험 영역으로 설정한다. 편대기가 위험 영역 안에 있을 때 편대기 사이의 거리를  $r_b$  라 한다. Fig 4에서 빨간 기체의 위치를  $[x_r, y_r, z_r]$ , 녹색 기체의 위치를  $[x_g, y_g, z_g]$ 로 한다. 식(9)를 통해서 단위 벡터  $s$ 를 구할 수 있다.

$$\hat{s} = C_{r/b} * (\phi_L, \theta_L, \psi_L) * \begin{bmatrix} x_g - x_r \\ y_g - y_r \\ z_g - z_r \end{bmatrix} T \quad (9)$$

이 단위 벡터를 사용해 식(10)과 같은 가속도 명령을 만든다.

$$a_{amd}^s = (r_b - r_s)^2 * k_s * \hat{s} \quad (10)$$

$a_{amd}^s$ 를 가상추적점을 통해 만들어진 가속도 명령에 더해 주어 충돌 위험 안에 있는 편대기가 위험 지역에서 벗어나는 기동을 수행하도록 한다.

### 정밀 편대비행 모의 실험

#### 매트랩 기반 시뮬레이션

Fig. 5.는 본 논문에서 제안하는 회전 반경을 고려한 가상추적점을 가지고 다이아몬드 구조 편대비행 시뮬레이션을 수행한 결과이다. Fig. 5.를 통해 회전 구간에서 편대기들이 다이아몬드 편대를 구성해 비행하는 것을 확인할 수 있다.

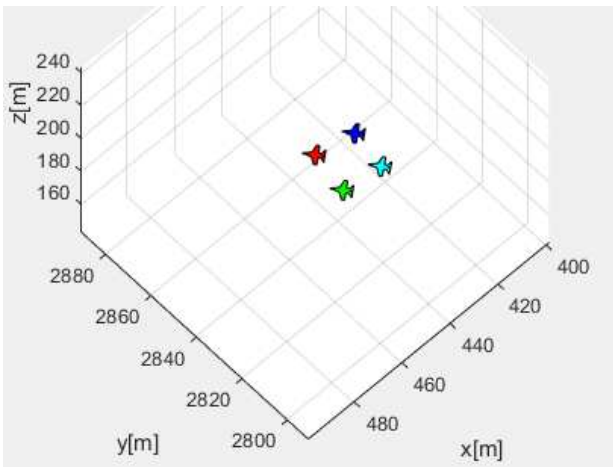


Fig. 5. Diamond formation flight

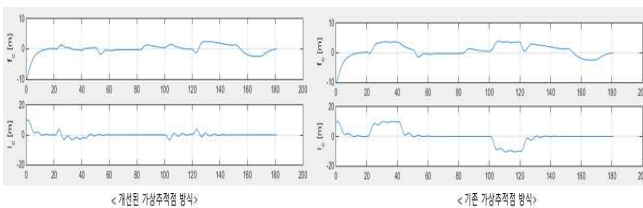


Fig. 6. Comparison of error

Fig. 6.는 기존 방식과 회전 반경을 고려한 방식의 전방, 측방향 오차를 비교한 것이다. 개선된 방식에서 오차가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 특히 20초와 40초 사이 그리고 100초와 120초 사이의 회전 기동 시에 기존의 10m 이상 발생하는 오차를 3m 이내로 줄인 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 회전반경이 고려된 가상추적점을 통한 편대 비행이 회전 구간에서 유효하게 편대를 이루는 것을 확인하였다.

편대비행을 위한 가상추적점 기반의 편대비행 유도 법칙이 회전 기동 시 달라지는 회전 반경을 고려하지 않으므로 회전 기동에서 편대 구조 유지에 어려움을 가진다. 이를 해결하기 위해 회전 반경을 고려하여 개선된 가상추적점기반의 편대비행 유도 법칙을 충돌 회피를 고려하여 설계하였다. 매트랩 기반의 시뮬레이션을 통해 설계된 유도 법칙이 기존의 가상추적점 기반 편대비행 유도 법칙이 회전 비행 시 편대 유지를 하지 못했던 문제를 개선해 회전구간에서도 편대 구조를 유지하여 비행함을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 국방 특화연구실의 일환으로 수행하였음. [계약번호:UD150047JD, 지능 기반 무인기 제어]

#### 참고문헌

- 1) Heemin Shin, Jaehyun Lee, Dong-Il You, David Hyunchul Shim, "Design the Guidance Law for Formation Flight of Multiple UAVs ", The Korean society for aeronautical & space sciences spring conference, 2016.
- 2) Ruchti, J., Senkbeil, R., Carroll, J., Dickinson, J., Holt, J., & Biaz, S., "UAV collision avoidance using artificial potential fields," Computer Science and Software Engineering Department, Auburn University, Tech. Rep. CSSE11-03, 2011.