

멀티콥터의 경로 추종 유도 알고리즘과 결합된 충돌회피 로직에 관한 연구

이상중*(제1저자), 민병문*(발표자), 김성수**

*인하공업전문대학 항공기계과

**용비에이티 (주)

e-mail : leesj@inhac.ac.kr, bmmin@inhac.ac.kr, kss275@hanmail.net

A Study on Collision Avoidance Logic integrated with Trajectory Tracking Guidance Algorithm

Sang-Jong Lee*, Byoung-Mun Min*, Sung-Su Kim**

*Dept. of Aircraft Mechanical Engineering, Inha Technical College

**YongBee AT Inc.

요약

본 논문에서는 기존에 개발된 멀티콥터의 항로점 기반 유도 알고리즘과 결합하여 다수의 멀티콥터를 안전하게 운용할 수 있는 충돌회피 로직을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 충돌회피 로직은 비행체가 추종해야 되는 비행체와 기준 궤적 사이의 횡방향 이탈거리를 장애물과 비행체의 거리에 따라 사인함수 형태로 인가하여 유도 명령을 생성하도록 설계하였다. 이와 같이 설계된 충돌회피 로직은 멀티콥터의 자동조종 제어기 및 항로점 기반 유도법칙과 결합된 비선형 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다.

1. 서론

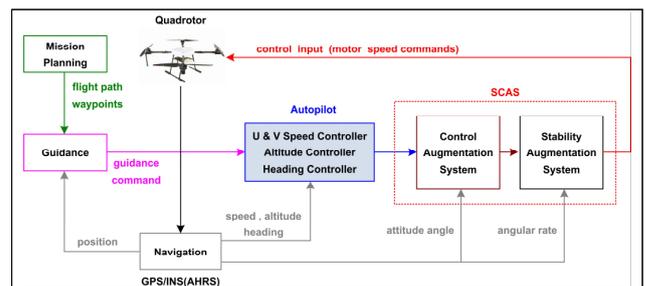
멀티콥터 형상의 무인항공기가 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 드론의 군집비행과 같이 다수의 무인기가 동시에 비행하면서 협업을 통하여 주어진 임무를 수행하는 경우가 증가할 것으로 예상된다. 이와 같이 다수의 무인기를 동시에 운용하는 상황에서 무인기 간의 충돌을 회피할 수 있는 기능이 필수적이기 때문에 무인기 충돌회피 관련 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다. 무인기 충돌회피 기법 가운데 고전적인 기법으로는 포텐셜 필드(potential field) 개념을 적용[1,2]한 것이 보편적이라고 할 수 있다. 또한 이와 유사한 개념으로 Limit Cycle을 이용하여 장애물과 일정 수준 이상의 거리를 유지하면서 충돌을 회피하는 기법[3]도 제안되었다. 최근에는 심층 강화학습 기법을 고전 유도기술에 접목하여 충돌회피 문제를 해결하는 방법[4]이 제시되었다.

본 연구에서는 기존 항로점 기반 유도 알고리즘에서 무인기가 기준 궤적을 추종할 때, 무인기와 기준 궤적 사이의 횡방향 이탈거리를 제거하도록 유도명령이 생성되는 점을 고려한 충돌회피 로직을 제안하였다. 제안된 충돌회피 로직은 장애물의 중심으로부터 무인기의 상대적 위치에 따라 무인기가 추종해야 되는 횡방향 이탈거리를 사인 함수 형태로 생성하고, 이를 유도 명령에 인가되도록 함으로써 장애물을 회피할 수 있도록 구성하였다.

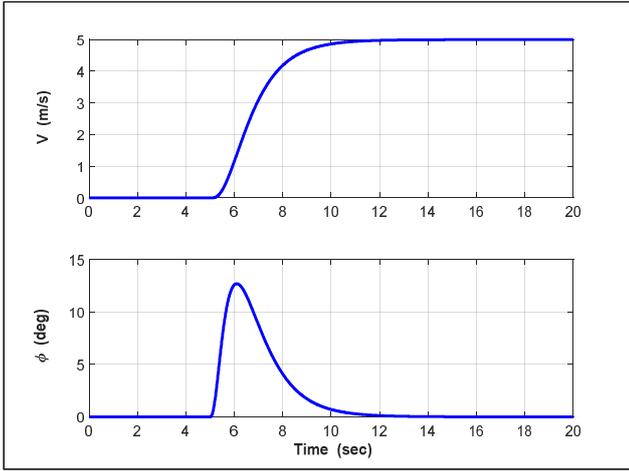
2. 유도 제어기 설계

2.1 자동조종 제어기

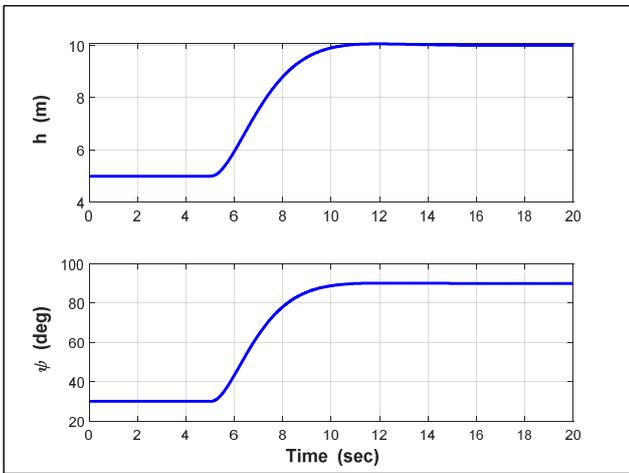
본 연구에서 고려하고 있는 무인기는 쿼드로터(quadrator) 형상의 무인기로, 해당 무인기의 자동조종 제어기는 몸체 좌표계의 x-축, y-축 속도와 고도 및 헤딩각을 제어할 수 있도록 설계하였다. 그림 1은 본 연구에서 설계된 쿼드로터의 유도 제어기 구조를 도시한 것으로, 몸체 좌표계의 속도와 고도 및 헤딩 제어기가 외부루프를 구성하고 있으며, 유도 알고리즘을 통해 경로점 추종을 위한 유도 명령이 생성되어 인가되도록 하였다. 그림 2와 그림 3은 횡방향(y-축) 속도와 고도 및 헤딩 제어기의 기본 성능을 도시한 것으로, 자동비행을 위한 외부루프 제어기의 기본 성능은 양호하다는 것을 확인할 수 있다.



[그림 1] 쿼드로터의 유도 제어기 구조



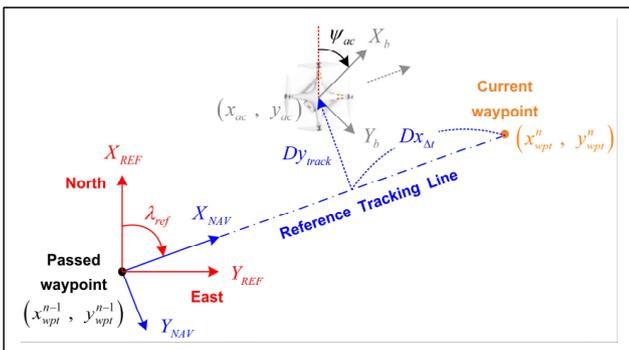
[그림 2] 횡축 속도(v) 제어기 기본 성능



[그림 3] 고도 및 heading 제어기 기본 성능

2.2 항로점 기반 유도 알고리즘

본 연구에서 설계된 항로점 기반 유도 알고리즘은 그림 4에 도시된 바와 같이, 무인기의 heading은 두 항로점 사이의 시선각(Line-Of-Sight Angle)과 일치시키고 두 항로점을 잇는 기준 궤적과 무인기 사이의 횡방향 이탈거리(Dy_{track})가 0이 되도록 횡방향 속도를 생성하도록 하였다. 따라서 횡방향 기동을 위한 heading 및 속도 유도 명령은 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

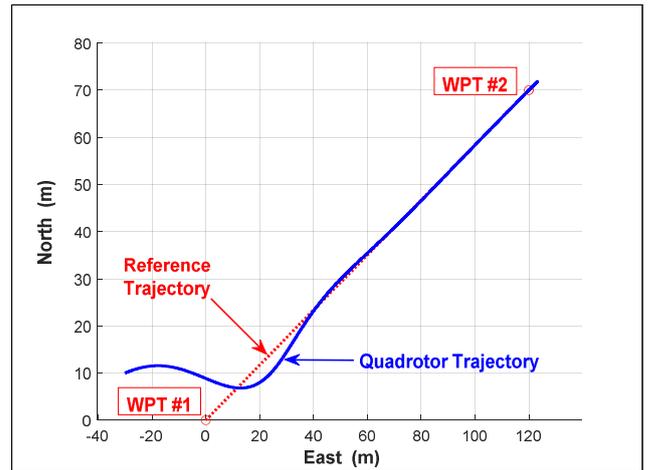


[그림 4] 항로점 기반 유도 기하

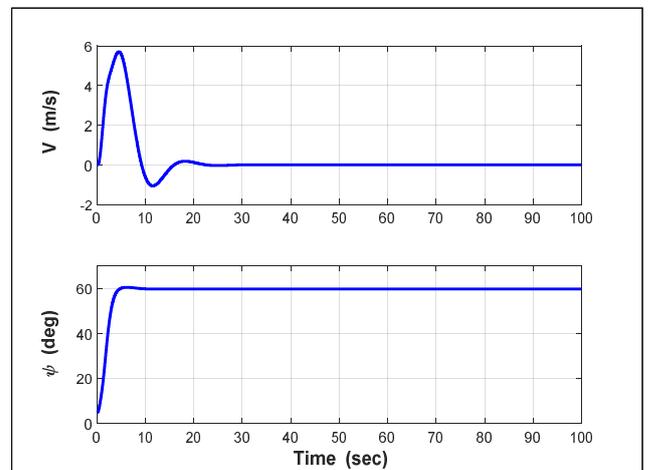
$$\psi_{cmd} = \lambda_{ref} = \tan^{-1}\left(\frac{y_{wpt}^n - y_{wpt}^{n-1}}{x_{wpt}^n - x_{wpt}^{n-1}}\right) \quad (1)$$

$$V_{cmd} = K_v \cdot (Dy_{ref} - Dy_{track}) \quad (2)$$

식 (2)에서 확인할 수 있는 바와 같이 횡축 속도 유도 명령은 비례 제어기 형태로 구성되어 있으며, 기준 궤적을 추종해야 하는 경우 Dy_{ref} 는 0이 된다. 이때 종방향 유도의 경우 고도 명령은 현재 향하고 있는 항로점의 고도가 되며, 전진방향 속도 명령은 현재 항로점까지의 거리($Dx_{\Delta t}$)에 비례하여 생성되도록 설계하였다. 그림 5와 그림 6은 설계된 유도 알고리즘의 성능 확인을 위한 시뮬레이션 결과를 도시한 것으로, 쿼드 로터가 초기 위치 (-30, 10) 및 5deg의 heading을 가지고 정지비행하고 있는 상태에서 기동을 시작하여 두 항로점을 잇는 기준궤적과 무인기 사이의 횡방향 이탈거리(Dy_{track})을 제거하면서 정확하게 기준궤적을 추종할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.



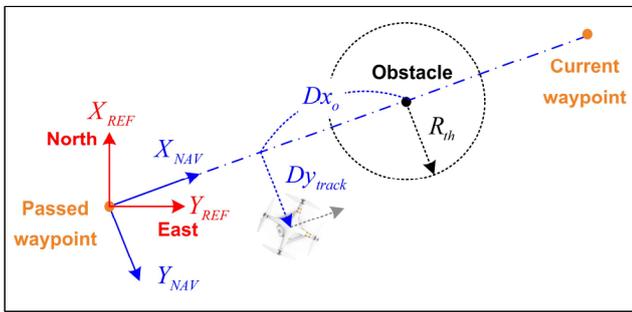
[그림 5] 유도 알고리즘에 따른 기준 궤적 추종 성능



[그림 6] 기준 궤적 추종을 위한 횡축 속도 및 heading 제어

3. 충돌회피 로직 및 성능 검증

본 연구에서는 2장에서 기술된 항로점 기반 유도 알고리즘을 기반으로 고정된 장애물을 회피할 수 있는 충돌회피 로직을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 충돌회피 로직은 무인기가 기준 궤적을 추종하기 위해서는 식 (2)에 제시된 횡축 속도 유도명령에서 Dy_{ref} 가 0이 되어야 한다. 하지만, 장애물을 기준으로 일정한 반경을 갖는 Threshold 영역에서는 Dy_{ref} 를 장애물과 무인기의 상대거리에 따른 펄스 함수 형태 및 사인 함수 형태로 변경함으로써 장애물을 회피할 수 있는 횡축 속도 유도명령이 생성되도록 설계하였다.



[그림 7] 충돌회피 유도 기하

Case 1 : 펄스 함수

펄스 함수 형태의 충돌회피 로직에서는 횡방향 유도명령을 생성하는 식 (2)의 횡방향 이탈거리의 기준값 Dy_{ref} 를 아래의 식 (3)과 같이 설정하였다.

$$Dy_{ref} = \begin{cases} 0 & \text{if } |Dx_o + \delta| > R_{th} \\ R_{th} & \text{if } |Dx_o + \delta| \leq R_{th} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, Dx_o 는 그림 7에 도시된 유도기하에서 유도좌표계의 x-축 방향(X_{NAV})을 기준으로 한 쿼드콥터와 장애물 사이의 거리를 의미하고, R_{th} 는 장애물을 중심으로 한 Threshold 영역의 반경을 나타낸다. 또한 δ 는 쿼드콥터의 진행방향 속도(u)를 고려하여 궤적을 성형하기 위한 설계 변수이다.

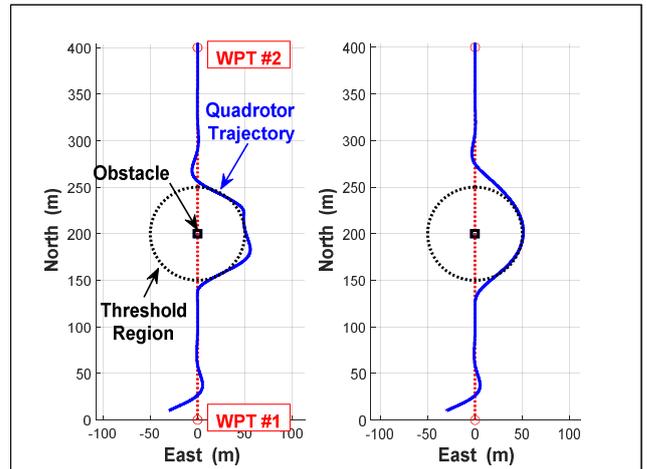
Case 2 : 사인 함수

사인 함수 형태의 충돌회피 로직에서는 횡방향 유도명령을 생성하는 식 (2)의 횡방향 이탈거리의 기준값 Dy_{ref} 를 아래의 식 (4)과 같이 설정하였다.

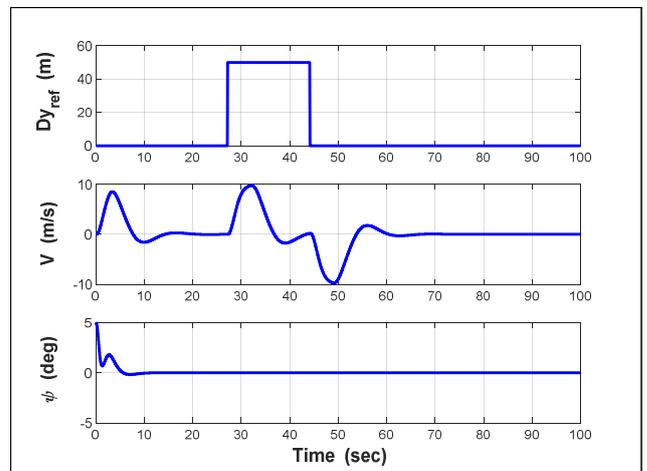
$$Dy_{ref} = \begin{cases} 0 & \text{if } |Dx_o + \delta| > R_{th} \\ R_{th} \sin\left(\frac{2\pi |Dx_o|}{R_{th}}\right) & \text{if } |Dx_o + \delta| \leq R_{th} \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에 표현된 사인 함수 형태에서의 횡방향 이탈거리 기준값 Dy_{ref} 는 Threshold 영역의 반경 R_{th} 의 크기를 갖고 쿼드콥터에서 장애물까지의 거리를 R_{th} 로 정규화(normalized)시킨 값을 사용하여 사인 함수가 계산되도록 하였다.

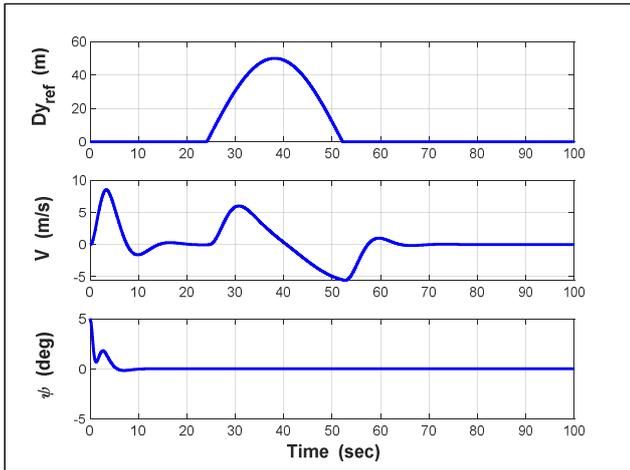
그림 6은 펄스 함수 및 사인 함수 형태로 생성된 횡방향 이탈거리 기준값에 따른 충돌회피 로직의 비선형 시뮬레이션 결과를 비교하여 도시한 것이다. 그림에 도시된 결과로부터 펄스 함수 및 사인 함수 형태의 횡방향 이탈거리 기준값을 적용한 경우에서 모두 장애물을 중심으로 설정된 Threshold 영역을 회피하면서 두 항로점을 잇는 기준 궤적을 정확하게 추종할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 사인 함수 형태의 충돌회피 로직이 펄스 함수 형태의 충돌회피 로직에 비해 Threshold 영역의 경계선을 따라 회피 기동을 하게 된다는 것을 알 수 있다.



[그림 8] 기준 궤적 추종을 위한 횡축 속도 및 헤딩 제어



[그림 9] Case 1 로직에 따른 횡축 속도 및 헤딩 제어



[그림 10] Case 2 로직에 따른 횡축 속도 및 heading 제어

그림 9와 그림 10은 기준 궤적을 추종하면 장애물을 회피하는 기동 과정에서의 횡방향 이탈거리 기준값 Dy_{ref} 와 횡방향 속도 및 heading 각 변화를 도시한 것이다. heading 유도명령은 횡방향 속도 유도명령과는 독립적으로 두 항로점의 시선각을 추종하도록 인가되기 때문에 Case 1과 Case 2의 경우에서 동일한 결과를 도시하게 된다. 하지만, 횡방향 속도의 경우 Case 1 로직의 경우 Dy_{ref} 가 불연속적으로 인가되기 때문에 회피기동 과정에서 속도 변화가 Case 2 로직에 비해 급격하게 변하게 된다는 것을 확인할 수 있다. 이상의 비선형 시뮬레이션 결과로부터 펄스 함수 형태의 충돌회피 로직에 비해 사인 함수 형태의 충돌회피 로직의 장애물 회피 기동 성능이 보다 양호하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 다수의 멀티콥터를 안전하게 운용하기 위한 목적으로 기존에 설계된 항로점 기반 기준궤적 추종 유도 알고리즘과 용이하게 결합될 수 있는 충돌회피 로직을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 충돌회피 로직은 기준 궤적을 추종하기 위해 무인기와 기준 궤적 사이의 횡방향 이탈거리를 제거하는 방식으로 횡방향 유도명령이 생성되는 점은 고려하여, 무인기가 추종해야 하는 횡방향 이탈거리의 기준값을 특정 함수 형태로 생성하여 기존의 횡방향 유도명령이 생성되도록 구성하였다. 장애물 회피 기동을 위한 횡방향 이탈거리의 기준값은 펄스 함수 형태와 사인 함수 형태의 두 가지 로직을 설계하였으며, 비선형 시뮬레이션을 통해 제안된 로직의 성능을 비교 검증하였

다. 비선형 시뮬레이션 결과로부터 사인 함수 형태의 충돌회피 로직이 기준 궤적을 추종하면서 양호하게 장애물을 회피할 수 있다는 것을 확인하였다.

추후 연구에서 현재 고정 장애물을 기준으로 제안된 충돌회피 로직을 이동 장애물에 대해서도 적용할 수 있도록 확장함으로써 다수의 멀티콥터를 동시에 운용할 때 멀티콥터 간의 충돌을 회피하면서 임무 형상에 따라 주어진 연속적인 항로점을 추종하는 것이 가능하도록 할 계획이다.

후기

본 연구는 민군기술협력사업(Civil-Military Technology Cooperation Program)으로 지원받았음.

(과제번호 : 18CM5053)

참고문헌

- [1] 목지현, 고상호, 최인호, 최형식, “포텐셜 필드 내 다수의 이동경로점 정보를 이용한 무인기 충돌회피”, 한국항공우주학회 2018 춘계학술대회 논문집, pp. 373-374.
- [2] 목지현, 신승찬, 최인호, 최형식, 고상호, “포텐셜 필드 기반 장애물 충돌회피 실내 비행”, 한국항공우주학회 2018 추계학술대회 논문집, pp. 270-271.
- [3] 이용우, 최현진, 김유단, “Limit Cycle을 이용한 무인항공기 충돌회피 기법 연구”, 한국항공우주학회 2011 춘계학술대회 논문집, pp. 453-458.
- [4] 류재훈, 박건우, 김중환, “도메인 지식을 활용한 강화학습 기반 항공기 충돌회피 기법”, 한국항공우주학회 2019 추계학술대회 논문집, pp. 236-237.