

다수 무인기 군집비행을 위한 통합 벡터필드 유도법칙 연구

홍진성
인하공업전문대학 항공기계공학과

Combined Vector Field Guidance Law for Flocking Flight of Multiple UAV

Jin-Sung Hong
Department of Aeronautical & Mechanical Engineering, Inha Technical College

요약 군집비행(flocking)은 목표점이 없이 새와 같은 무리가 서로의 위치 교환을 통해 충돌하지 않고 한데 모여서 비행하는 것으로 정의한다. 군집비행을 다수의 무인기를 이용한 비행으로 확장하면, 무인기는 정찰 또는 공격임무 등의 목표를 달성하기 위해 미리 입력되거나 실시간으로 변하면서 추종해야 할 항로점 waypoint이 필요하다. 주어진 항로점을 향한 군집비행 방법으로 기존의 벡터필드 유도법칙과 증강 CS 모델 및 포텐셜 필드(potential field)를 함께 사용한 알고리즘이 있다. 이 방법은 포텐셜 필드를 추가적으로 사용하고 있으며, 세 개의 다른 유도법칙의 합을 사용함에 따라 가중치 계산을 해야만 한다. 본 논문에서는 가중치 계산을 불필요하도록 증강 CS 모델 안에 벡터필드의 속도 명령을 직접 사용한 통합 벡터필드 유도법칙을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 통합 벡터필드 유도법칙을 사용하는 다수의 무인기가 임의의 위치에서 출발했을 때 서로 군집을 형성하고 충돌을 회피하면서 주어진 항로점을 따라 비행하는 것을 확인하였다. 제안한 알고리즘은 장애물 회피에도 활용할 수 있음을 추가적으로 확인하였다.

Abstract Flocking is defined as a flock of birds, without a target point, flying together without colliding through position exchange with each other. When this flocking is expanded to flight using multiple unmanned aerial vehicles (UAVs), UAVs need waypoints to be entered in advance or changed in real-time to achieve goals, such as reconnaissance or attack missions. An algorithm uses the existing vector field guidance law, augmented CS model, and potential field to flock toward a given waypoint. This method also uses a potential field, and the weight must be calculated using the sum of three different guidance laws. This paper proposes a combined vector field guidance law that directly integrates the vector field velocity command in the augmented Cucker-Smale model, so the weight calculation is unnecessary. Through a simulation, the proposed algorithm confirmed that multiple UAVs starting from a random location form a flock with each other and fly along given waypoints while avoiding collisions. Furthermore, it was confirmed that the proposed algorithm could be used for obstacle avoidance.

Keywords : Vector Field, Cucker-Smale Model, Flocking, Multi-agent Control, Obstacle Avoidance

본 논문은 2022년도 인하공업전문대학 학술연구사업 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Jin-Sung Hong(Inha Technical College)

email: jshong@inhac.ac.kr

Received October 11, 2022

Accepted December 7, 2022

Revised November 7, 2022

Published December 31, 2022

1. 서론

다수 에이전트 시스템(MAS : Multi Agent Systems)에 대한 연구가 진행되면서, 최근 많은 연구자들이 생물학, 물리학, 공학 등 다양한 분야에 이를 적용하는 연구를 수행하고 있다. 항공 분야에서 다수 에이전트 시스템이라는 것은 다수 무인기(UAVs)의 협력을 통한 비행으로 다루어지며, 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다. 다수 무인기의 비행에 대한 연구로는 군집비행이 대표적이다. 특히, 레이놀즈 규칙(Reynold's rule)이라고 알려진 알고리즘은 정렬(alignment), 응집(cohesion) 및 분리(separation) 규칙을 다수 무인기의 군집비행에 적용한 잘 알려진 방법 중 하나이다[1]. Cucker-Smale은 다수의 에이전트가 모여 무리지어 움직이도록 제어하는 Cucker-Smale 모델(이하 CS 모델)을 고안하였다[2]. 다수의 인공위성 제어시 연료 소비를 개선 및 인공위성 간 최대 거리 감소에 대한 연구는 CS 모델을 사용한 좋은 예이다[3]. 기존의 CS 모델에 서로의 위치 정보만 사용하는 것이 아닌 속도 정보까지 사용한 증강 CS 모델 연구도 있다[4]. 증강 CS 모델은 무인기가 서로 가까워지거나 멀어질 때 속도 감쇠(damping)가 되도록 하여 충돌회피 안정성을 증대시켰다. 증강 CS 모델을 사용한 유도법칙은 무인기가 군집비행을 하기 위한 가속도 명령(acceleration command)을 생성한다.

한편, 포텐셜 필드(potential field)와 벡터필드 접근법은 로봇 공학에서 경로 추종을 위해 널리 사용되고 있다[5-8]. 그중 벡터필드는 자동차, 잠수함 및 무인기와 같은 다양한 시스템의 유도 알고리즘으로 많이 사용되고 있다. 벡터필드는 코스(course)와 지면속도(ground speed)를 이용하여 무인기가 원하는 경로를 추종하도록 속도 명령(velocity command)을 생성한다. 특히, 벡터필드 유도법칙은 스톱(stall) 속도 이하로 속도를 줄일 수 없는 고정익 항공기가 표적을 중심으로 선회해야 할 때 잘 적용될 수 있고, 이 벡터필드 유도법칙은 리아푸노프(Lyapunov) 안정성 정리를 통해 선회 궤도에 안정적으로 수렴하는 것이 증명되었다[9].

앞서 언급한 바와 같이 벡터필드는 항로점을 향해 비행할 때 속도 명령을 생성하고, CS 모델은 다수 무인기의 군집 및 충돌회피 비행을 위해 가속도 명령을 생성한다. 속도와 가속도 명령을 혼합하여 하나의 명령으로 사용하기 위해 Lim은 벡터필드, CS 모델, 충돌회피를 위한 추가 포텐셜 필드의 합으로 구성된 하이브리드 군집비행 알고리즘을 제안하였다[10,11]. 이 논문에서 제안한 알

고리즘은 CS 모델 안에 충돌회피 명령을 생성하는 기능이 있음에도 CS 모델이 가속도 명령 기반이기 때문에 속도 명령 기반으로 되어있는 포텐셜 필드를 추가해서 사용하는 단점이 있다. 또한, 세 개의 유도법칙을 합하여 사용하기 때문에 적합한 가중치를 찾기 위해 항로점의 속성에 따라 미리 최적화 알고리즘을 사용하여 가중치를 계산해야 하는 불편함이 있다. 이 알고리즘은 일반적으로 항로점을 추종하여 비행해야 할 때 벡터필드에 높은 가중치가 부여되고, 다수 무인기가 군집 비행해야 할 때 CS 모델에 높은 가중치가 부여되는 형태가 된다. 따라서, 다양한 시나리오의 임무 항로점에 대해 적절한 가중치를 검토해야 하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 단점을 해결하기 위하여 항로점 추종을 위한 벡터필드 유도법칙 결과를 증강 CS 모델에 직접 결합한 통합 벡터필드 유도법칙을 제안한다.

2장은 항로점을 추종하기 위해 속도 명령을 생성하는 벡터필드 유도법칙과 군집비행을 위한 CS 모델 및 증강 CS 모델에 대해 설명한다. 3장에서는 위 두 개의 유도법칙을 결합한 통합 벡터필드 유도법칙을 제안하고, 제안한 유도법칙을 검증하기 위해 다수 무인기를 사용한 시뮬레이션 결과에 대해 설명한다.

2. 벡터필드 및 쿠커-스메일 모델

2.1 벡터필드 유도법칙

무인기가 목표점을 중심으로 선회 비행할 수 있도록 제어하는 방법에는 벡터필드 유도법칙이 많이 사용되고 있다. 아래 Eq. (1)은 표적을 중심으로 선회하도록 생성된 벡터필드를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ r\dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{v_g}{(r-r_d)^2 + p_d^2} \begin{bmatrix} r_d - r \\ p_d r \end{bmatrix} \quad (1)$$

이때, r_d 는 XY-평면에서 목표점과 무인기 사이의 원하는 선회 반경(거리), r 은 목표점과 무인기 사이의 현재 거리, v_g 는 무인기의 지면 속도, p_d 은 튜닝 파라미터를 나타낸다.

Eq. (1)의 벡터필드를 무인기에 적용하면 Fig. 1에서와 같이 임의의 위치에서 비행하고 있는 무인기를 목표점과 r_d 만큼 떨어진 거리에서 선회할 수 있도록 하는 속도 명령을 생성한다. 벡터필드 유도법칙을 적용하기 위해서는 Eq. (2)와 같이 먼저 코스명령(course command)

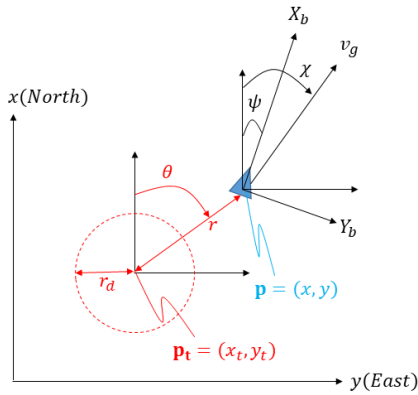


Fig. 1. Coordinate system for vector field guidance law

χ_{cmd} 를 계산한다. Eq. (2)의 \langle 기호는 계산된 코스 각도의 범위가 $-\pi \sim +\pi$ 임을 의미한다.

$$\chi_{cmd} = \langle \theta + atan2(p_d r, (r_d - r)) \rangle \quad (2)$$

무인기에 탑재된 비행제어컴퓨터(FCC : Flight Control Computer)는 좌표계 변환을 통해 NED 직교 좌표계 상태에서 이 코스 명령(χ_{cmd})과 현재 지면속도 (v_g)를 사용하여 Eq. (3)과 같이 각 축의 속도 명령(v_{VF})을 생성한다[10].

$$v_{VF} = [v_g \cos(\chi_{cmd}) \quad v_g \sin(\chi_{cmd})]^T \quad (3)$$

Eq. (3)의 벡터필드 유도법칙은 리아푸노프 안정성 이론을 사용하여 원하는 선회반경을 가진 원형 궤도로 수렴한다는 것이 증명되어있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 튜닝 파라미터인 양의 상수 p_d 는 공간에서 벡터필드가 얼마나 뒤틀려 있는지를 결정한다. 만약, p_d 이 작은 값을 가지고 원하는 반경도 작은 값을 가진다면, 목표점에 대해 직선으로 향하는 벡터필드를 생성할 수 있다. 따라서, 비행제어컴퓨터는 하나의 벡터필드 알고리즘으로 파라미터 p_d 및 r_d 를 적절히 조절해가면서 선회 또는 직선 경로를 조정할 수 있다. 이와 같은 유도법칙은 비행제어컴퓨터 내의 코드로도 구현하기 간편하다는 장점을 가지고 있다.

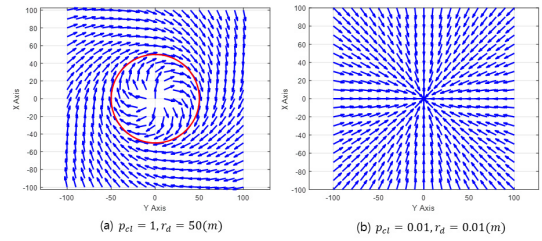


Fig. 2. Vector field depending on parameters

본 논문에서는 하나의 벡터필드 유도법칙을 사용하여 직선 및 선회를 수행하는 방법으로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3은 벡터필드 유도법칙을 사용할 때 튜닝 파라미터 p_d 과 r_d 을 항로점에 따라 어떻게 변화시킬 수 있는지에 대한 개념을 보여준다. 무인기가 진행해야 할 항로점 위치를 알고 있다고 가정할 때, 무인기의 위치가 항로점에서 멀리 떨어져 있는 경우는 일반적으로 항로점까지 직선비행을 한다. 이 경우 파라미터 p_d 및 r_d 는 항로점에 대해 직선으로 비행하도록 작은 값으로 설정한다. 무인기가 항로점을 향해 직선비행을 수행하여 항로점과 무인기 사이의 거리가 원하는 선회반경(r_d)에 전환경계(transition bound)를 더한 값 이하로 가까워졌다면, 항로점 주변을 선회하도록 하는 p_d 및 r_d 로 변경하여 속도 명령을 생성한다.

한편, 이 방법은 무인기가 비행 중 장애물을 조우하는 경우에도 사용할 수 있다. 장애물 회피를 위한 적절한 선회반경을 계산할 수 있다고 가정하면, 항로점 선회반경 대신 장애물 회피 선회반경을 사용함으로써 활용이 가능하다.

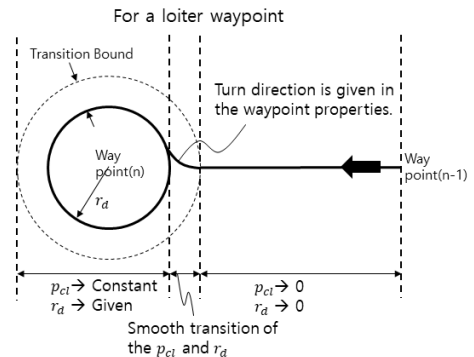


Fig. 3. Concept of vector field guidance for waypoint following mission

2.2 쿠커-스메일 모델(CS 모델)

Fig. 4는 CS 모델의 개념도를 보여준다[3]. 이때, x_i 는 i 번째 무인기의 위치, r_{ij} 는 i 번째 무인기와 j 번째 무인기 사이의 거리, a_{ij} 는 가중치를 의미한다. 기존 CS 모델은 Eq. (4)와 같이 $\psi(r_{ij})$ 의 계수에 따라 서로 이웃한 무인기들의 속도 가중 평균(weighted average)을 추종하도록 가속도 명령을 생성한다[2].

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{\lambda}{N} \sum_{i=1}^N \psi(r_{ij})(v_j - v_i) \quad (4)$$

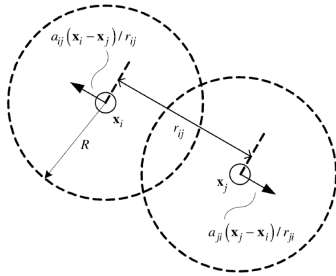


Fig. 4. Interaction in C-S model between two agents

한편, 기존의 CS모델에서 발전한 증강 CS 모델(augmented CS model)은 무인기간 충돌회피를 위해 결합력(bonding force)을 추가적으로 사용한다. 결과적으로 무인기 사이의 거리가 R 에 점진적으로 수렴하도록 가속도 명령을 생성한다. 따라서, 사용자는 무인기의 성능을 고려하여 충돌을 회피할 수 있는 충돌 안전반경(R)을 적절하게 설정할 수 있다. 결합력을 이용한 증강 CS 모델은 아래 Eq. (5)와 같다[4].

$$\begin{aligned} \frac{dv_i}{dt} = & \frac{\lambda}{N} \sum_{i=1}^N \psi(r_{ij})(v_j - v_i) \\ & + \frac{\sigma}{N} \sum_{i=1}^N \frac{K_1}{2r_{ij}^2} \langle v_i - v_j, x_i - x_j \rangle (x_j - x_i) \\ & + \frac{\sigma}{N} \sum_{j=1}^N \frac{K_2}{2r_{ij}} (r_{ij} - 2R)(x_j - x_i) \end{aligned} \quad (5)$$

Eq. (5)에서 첫 번째 항은 정렬력(alignment force)을 나타낸다. 이 항은 기존의 CS와 동일하다. 세 번째 항은 상대적으로 멀리 있는 무인기는 가깝게 다가오도록 하고, 충돌 안전반경 내에 진입한 무인기는 밀어내어 서로 이웃한 무인기가 충돌 안전반경(R)에 머물도록 응집

과 분리 기능을 수행한다. 두 번째 항은 서로 이웃한 무인기의 위치 정보만 사용하는 것이 아닌 속도 정보도 사용한다. 따라서, 무인기가 서로 가까워지거나 멀어질 때 속도 감쇠(damping)가 되도록 하여 충돌회피 안정성을 증대시키는 역할을 한다. 이와 같은 세 가지 항의 계산 결과가 합산되어 증강 CS 모델은 최종적으로 무인기의 가속도 명령을 생성하게 된다.

3. 통합 벡터필드 유도법칙

3.1 통합 벡터필드 유도법칙

많은 논문에서 다수 에이전트 또는 무인기의 속도 정렬을 통한 비행을 연구하였다. 하지만, 본 논문에서는 운전자(또는 사용자)가 모든 무인기를 원하는 방향과 속도로 조종하려는 경우를 고려하였다. 일반적으로 정찰 임무를 수행하는 무인기는 임무 수행을 위한 항로점이 필요한데, 사용자가 임무에 따른 항로점을 지상국(ground station)을 통해 무인기에 입력거나 무인기 자체적으로 실시간 생성하도록 설계되어 있다. 항로점에는 Fig. 5와 같이 무인기가 추종해야 할 속도 및 선회 유형(예: 선회(loiter) 또는 직진비행(fly-over))이 있도록 설계한다.

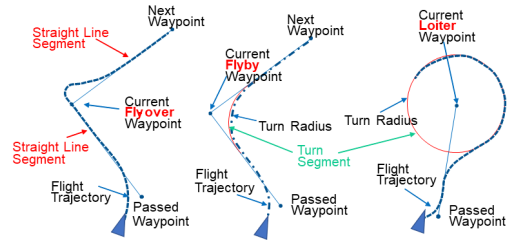


Fig. 5. Waypoint types

한편, 앞서 언급한 벡터필드 유도법칙은 속도 명령을 생성하는 반면 증강 CS 모델은 가속도 명령을 생성한다. 따라서, 이 두 가지 명령을 적절히 결합하여 같은 수준의 명령이 되도록 구성하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 새로운 통합 벡터필드 유도법칙(combined vector field guidance law)을 제안한다. 이 유도법칙은 Eq. (6)에서 볼 수 있듯이 증강 CS 모델에서 정렬항을 제거하고 벡터필드를 통해 계산된 속도 명령(v_{VF})을 따르도록 통합한다.

$$\begin{aligned} \frac{dv_i}{dt} = & K_0(v_{VF} - v_i) \\ & + \frac{\sigma}{N} \sum_{i=1}^N \frac{K_1}{2r_{ij}^2} \langle v_i - v_j, x_i - x_j \rangle (x_j - x_i) \\ & + \frac{\sigma}{N} \sum_{j=1}^N \frac{K_2}{2r_{ij}} (r_{ij} - 2R)(x_j - x_i) \end{aligned} \quad (6)$$

Eq. (6)의 첫 번째 항은 벡터필드를 통한 속도 명령 (v_{VF})과 현재 무인기의 속도 오차(error), K_0 는 오차에 따른 비례게인(proportional gain)을 나타낸다. 다른 두 항은 이전의 CS 모델과 동일하게 작동한다. Eq. (6)의 명령은 가속도 형태로 명령이 생성되므로, 속도 명령 형태로 바꾸어 준 후 무인기의 속도 명령 루프(loop)에 입력한다. 단, 속도 명령 루프는 이미 설계되어 있다고 가정하였다. 또한, Eq. (6)을 비행제어컴퓨터에 적용할 때에는 이산영역(discrete domain)으로 구현해야 하므로, Fig. 6과 같은 적분 방법을 사용한다. 적분 결과가 무인기의 최대속도를 초과하면, 최종적인 속도 명령은 최대속도가 유지되도록 한다.

즉, 제한하는 알고리즘은 무인기가 군집비행을 하면서, 추종해야 할 항로점을 따라 비행하고, 무인기간 충돌을 회피할 수 있으며, 무인기 성능에 따른 최대속도까지로 명령을 제한할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Set } v_i(k) &= v_i(k-1) + f(v) \Delta t \\ \text{If } v_i(k) > v_{lim} & \text{ set } v_i(k) = v_{lim} \\ \text{Otherwise use } & v_i(k) \end{aligned}$$

Fig. 6. Integration Method in discrete domain

3.2 시뮬레이션

제안한 통합 벡터필드 유도법칙이 정상적으로 동작하는지 확인하기 위해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 쿼드콥터(Quadcopter) 형태의 500g 급 소형 무인기를 아래 Eq. (7)과 같이 간단한 1차 전달함수 형태로 모델링하여 사용하고, 무인기는 모두 동일하다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= (v_{cmd} - v) / \tau_v \\ \dot{\psi} &= (\psi_{cmd} - \psi) / \tau_\psi \end{aligned} \quad (7)$$

모든 무인기가 서로 통신(Fully Connected)할 수 있

다고 가정하고, 각 무인기가 현재 향하고 있는 항로점의 위치와 자신의 위치를 서로 공유할 수 있다고 가정하였다. 무인기의 충돌 방지를 위한 안전거리는 저가의 단일 GPS 수신기 성능을 고려하여 $R=10(m)$ 로 설정, 최대 속도는 모델링에 사용된 소형 무인기의 일반 비행속도 수준인 $v_{lim} = 8(m/s)$ 로 설정하였다[12]. 시뮬레이션은 무인기가 서로 다른 임의의 위치에서 시작된다고 가정하였으며, 알고리즘의 동작만을 살펴보기 위함이므로 바람은 고려하지 않았다. 3개의 다른 항로점이 설정되어 있고, 마지막 항로점은 200m 반경의 선회형 항로점으로 설정하였다. 무인기가 현재 향하고 있는 항로점에 10m 이내로 가까워지면 항로점을 통과했다고 판단하도록 설정하였고, 이때 새로운 항로점으로 변경한 후 다른 무인기에게 항로점 통과 신호를 전달하여 모든 무인기가 향해야 할 항로점이 동일하게 변경된다고 가정하였다.

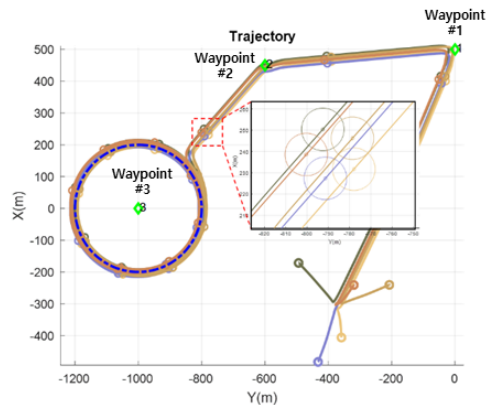


Fig. 7. Trajectories of 5 UAVs

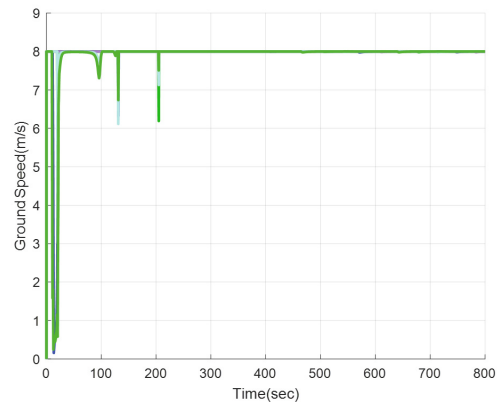


Fig. 8. Ground Speed of UAVs

Fig. 7은 각 무인기가 직진비행(Fly-Over) 속성을 가진 항로점 1과 2를 향할 때에는 직진비행을 수행하고, 선회(Loiter) 속성을 가진 항로점 3에서는 항로점 주변을 선회 비행하는 것을 보여준다. Fig. 8은 모든 무인기가 최대 속도($v_{lim} = 8(m/s)$)를 초과하지 않는 것을 보여 주고 있다. 또한, 시뮬레이션 시작 후 서로 이웃한 무인기가 군집을 형성해야 하므로 초기에 속도를 감소시키거나 증가시켜 군집비행 하는 것을 보여준다.

Fig. 9는 무인기간 상대거리(Relative Distance)를 보여준다. 상대거리가 무인기 충돌방지를 위한 안전거리 $R = 10(m)$ 수준에서 유지되고 있는 것을 알 수 있다.

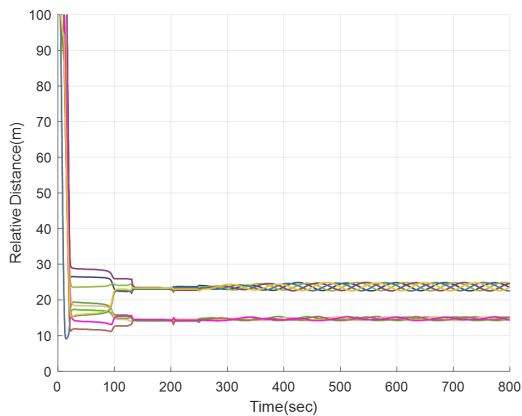


Fig. 9. Relative distances

추가적으로 장애물이 존재하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 장애물을 회피할 수 있는 반경을 설정, 해당 정보를 제안한 알고리즘에 선회 속성의 항로점으로 입력함으로써 장애물을 회피하도록 하였다. 이때,

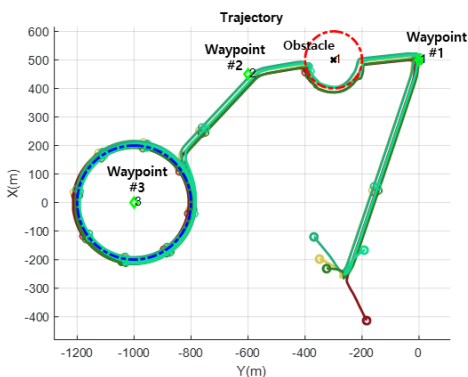


Fig. 10. Obstacle avoidance simulation

무인기의 장애물 회피 시작 및 회피 종료 지점을 결정하는 것은 본 논문의 범위를 벗어나므로, 본 논문에서는 직선 경로에 도달하였을 때 회피를 시작하고, 선회 이후 직선 경로에 도달하면 회피를 종료한다고 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 10에 도시된 바와 같이 무인기는 원하는 경로의 중간에 점선으로 표시된 장애물(obstacle)을 회피하고 원하는 경로로 다시 복귀하여 비행을 지속하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

주어진 항로점을 향한 군집비행 방법으로 기존의 벡터 필드 유도법칙과 증강 CS 모델 및 포텐셜 필드를 합해 사용한 알고리즘이 있다. 이 방법은 포텐셜 필드를 추가적으로 사용하고 있으며, 세 개의 다른 유도법칙의 합을 사용함에 따라 가중치 계산을 해야만 한다. 본 논문에서는 가중치 계산이 불필요하도록 증강 CS 모델 안에 벡터 필드의 속도 명령을 직접 사용한 통합 벡터필드 유도법칙을 제안하였다. 이때, 벡터필드 유도법칙은 속도 명령을 생성하며, 튜닝 파라미터인 p_d 및 r_d 를 조절함으로써 직선 및 선회비행 형태로의 명령을 생성하였다. 증강 CS 모델에는 벡터필드에서 생성한 속도 명령을 추가함으로써, 무인기가 주어진 속도 명령을 추종하면서 군집 및 충돌회피 비행이 가능하도록 하였다. 제안한 알고리즘은 가속도 기반으로 명령이 생성되지만, 이 명령을 적분하여 사용함으로써 무인기의 성능인 최대속도 이내에서 비행하도록 속도 명령을 생성할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 다수의 무인기가 직진비행(fly-over) 및 선회(loiter) 속성을 갖는 항로점을 향하면서 충돌 없이 군집 비행을 수행하고 최대속도 이내에서 비행이 되는 것을 확인하였다. 추가적으로 제안한 알고리즘은 장애물 회피에도 활용할 수 있음을 확인하였다. 향후 본 논문에 사용된 알고리즘을 기반으로 하여 서로 다른 임무를 수행하는 군집 무인기의 비행 시나리오에 확장 적용해 보고자 한다.

References

- [1] C. W. Reynolds, "Flocks, Herds, and Schools : A Distributed Behavioral Model", *Computer Graphics*, vol. 21, no. 4, pp. 25-34, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1145/37402.37406>

- [2] F. Cucker and S. Smale, "Emergent Behavior in flocks", *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 52, no. 6, pp. 852-862, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2007.895842>
- [3] L. Perea, G. Gomez and P. Elosegui, "Extension of the cucker-smale control law to space flight formations", *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol. 32, no. 2, pp. 527-537, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.2514/1.36269>
- [4] J. Park, H. Kim and S. Ha, "Cucker-Smale Flocking with Inter-Particle Bonding Forces", *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 2617-2633, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2010.2061070>
- [5] D. Koditschek, "Exact robot navigation by means of potential functions", *IEEE International Conference*, 1987.
- [6] J. P. Wilhelm and G. Clem, "Vector Field UAV Guidance for Path Following and Obstacle Avoidance with Minimal Deviation", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 42, no. 8, pp. 1848-1856, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.2514/1.G004053>
- [7] S. Park, J. Deyst and J. P. How, "Performance and Lyapunov Stability of a Nolinear Path-following Guidance Method", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 30, pp. 1718-1728, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.2514/1.28957>
- [8] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation", *IEEE International Conference*, 1991.
- [9] E. W. Frew, D. A. Lawrence and S. Morris, "Coordinate Standoff Tracking of Moving Target using Lyapunov Guidance Vector Fields", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 31, p. 17, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.2514/1.30507>
- [10] S. Lim, Y. Song, J. Choi, H. Myung, H. Lim and H. Oh, "Decentralized Hybrid Flocking Guidance for a swarm of Small UAVs", *Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS)*, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/REDUAS47371.2019.8999710>
- [11] J. Jeong, H. Myung, D. Kim, and H. Lim, "Design of Decentralized Guidance Algorithm for Swarm Flight of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 49, p.981-988, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.12.981>
- [12] S. Carcanague, "Low-cost GPS/GLONASS Precise Positioning Algorithm in Constrained Environment", Ph.D dissertation, University of Toulouse, p.137.

홍진성(Jin-Sung Hong)

[정회원]



- 2007년 2월 : KAIST 항공우주공학과 (항공우주공학석사)
- 2018년 8월 : KAIST 항공우주공학과 (항공우주공학박사)
- 2008년 2월 ~ 2022년 2월 : 국방과학연구소 항공기술연구원
- 2022년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 항공기계공학과 교수

<관심분야>

비행제어법칙, 조종안정성 해석, 다수 무인기 유도제어