

국방디지털융합학과 학사학위 논문

다중 셀 방식을 이용한 군집 내 UAV의 충돌회피

Collision Avoidance of UAVs in Swarm Using
Multi-Cell Strategy

아 주 대 학 교 정 보 통 신 대 학

국 방 디 지 털 융 합 학 과

조 선 흥

다중 셀 방식을 이용한 군집 내 UAV의 충돌회피

Collision Avoidance of UAVs in Swarm Using
Multi-Cell Strategy

이 논문을 학사학위 논문으로 제출함.

2022 년 12 월

아 주 대 학 교 소 프 트 웨 어 융 합 대 학
국 방 디 지 털 융 합 학 과
조 선 홍

성명의 공학 학사학위 논문을 인준함.

심사위원장 _____ 인

심 사 위 원 _____ 인

심 사 위 원 _____ 인

아주대학교 국방디지털융합학과

2022년 12월 2일

논 문 요 약

기존의 군집 UAV에 관련된 연구들은 대부분의 연구가 Leader-Follower, 즉 선도기-추종기와 관련된 형식으로 이루어지고 있다. 그 중에서도 주로 한 대의 선도기와 다수의 추종기 개념을 이용한 연구가 여럿 존재하고, 더 나아가 선도기 - 추종기 기법에서 발전한 가상대형기법을 접목한 연구들이 존재한다. 상술한 선도기 - 추종기, 그 외 파생 기법 이외에는 진행된 연구가 그렇게 많지 않았다.

UAV 충돌 회피 관련 연구에서는, 단일한 UAV의 충돌 회피에 대한 연구가 많이 진행되었다. 그 외 여러 대의 UAV에 대해서도 여러 가지 연구가 존재하지만 아직 개척의 여지가 많았다.

본 논문은 다중 셀 전략을 활용하여 UAV 군집에서 군집 내부의 UAV끼리의 충돌을 회피하는 문제에 대해 분석해, 이러한 문제점을 해결할 수 있도록 제안한다.

기존 선도기-추종기 기법을 통한 군집 UAV의 움직임은 선도기의 움직임에 따라서 추종기의 움직임이 결정되는 형태로서 만약 선도기에 문제가 생기게 된다면 여러 추종기의 움직임을 예상할 수 없으며, 종국에는 군집 전체에 대해 제어가 불가능해지는 문제가 발생할 수 있다. 또한 이러한 취약점을 가지고 있어 신뢰성을 항상 보장할 수 없다는 문제 또한 발생한다.

제안하는 다중 셀 기반 방식은 각 UAV에게 충돌 회피 알고리즘을 부여한다. 또한 군집 내 각 UAV가 다중 셀 방식을 이용하여 . 또한 특정한 선도기를 사용하지 않기 때문에 기존의 방식에서는 항상 보장할 수 없었던 신뢰성 보장 불가 문제를 해결한다.

MATLAB 시뮬레이터를 이용하여 성능을 분석한 결과 제안하는 기법이 기존

선도기-추종기 기법에 비해 우월한 성능을 가진다는 점은 보장할 수 없었지만 다중 셀 방식이 군집 내 UAV의 제어에서 사용될 때에도 유효함을 확인할 수 있다.

본 문 차 례

제 1 장 서론	1
제 2 장 관련 연구	3
제 1 절 선도기-추종기 기법	3
제 2 절 MDP 프레임워크를 이용한 셀 기반 충돌회피	5
제 3 장 제안 기법	14
제 4 장 모의실험	17
제 1 절 모의실험 환경	17
제 2 절 모의실험 결과	19
제 5 장 결론	22
참 고 문 헌	23
Abstract	25

그림 차례

그림 2.1. 선도기-추종기 기법의 대략적인 형태	3
그림 2.2. PD 제어의 관점에서 본 선도기-추종기 기법	4
그림 2.3. MDP 프레임워크를 이용한 셀 기반 UAV의 움직임	5
그림 2.4. 셀 기반 UAV 충돌회피 기법의 Pseudo-Code	7
그림 2.5. 선도기-추종기 기법을 이용한 군집의 GPS 수신 문제	8
그림 2.6. 안전구역 도식도	10
그림 2.7. UAV의 동적 장애물 회피 상황 도식화	12
그림 3.1. UAV의 동적 장애물 회피 상황 도식화	14
그림 3.2. 군집 내 UAV들의 충돌 회피 상황 도식화	15
그림 4.1. 시간 흐름에 따른 각 UAV 자세각의 변화	19
그림 4.2. 시간 흐름에 따른 각 UAV간 거리 변화	20

표 차례

표 2.1. 알고리즘 파라미터 범례표	11
표 4.1. 시뮬레이션 파라미터	18

제 1 장 서론

지난 수십 년 동안 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)는 민/관/군 등 여러 분야에서 널리 사용되었다. 민간 분야에서는 주로 사람이 직접 하기 어려운 구조, 순찰 등에 사용되었으며, 군사 분야에서는 주로 조종사의 귀환 확률이 낮다고 판단되는 정밀 추적 및 타격에 사용되었다. 초기에는 분야를 막론하고 기술 성숙도가 떨어져 단일한 UAV만을 운용하였기에 고려되지 않았으나, 기술이 고도화되고 단일한 UAV로 수행하기에는 제약을 받는 상황이 생기고, 작업 수행 성공률이 떨어지는 현상을 볼 수 있었다. 따라서 여러 대의 UAV를 동시에 제어할 필요성이 생기면서 최근의 연구는 군집 UAV(UAV Swarm)이라는 개념에 대해 점차 다루기 시작했다. 기존에 하나의 UAV를 제어하다가 이를 여러 대의 제어로 개념을 확장하면서 각 UAV간 충돌 방지, UAV 간의 연계 등 여러 가지 고려해야 할 쟁점들이 발생하였고, 이러한 점들을 해결하기 위해 우선적으로 구현하기 상대적으로 편리한 선도기 - 추종기 기법에 대한 연구가 현재 활발하게 진행되고 있는 추세이다.

선도기 - 추종기 기법은 선도기의 동작에 따라 추종기들이 그에 영향을 받아 움직이는 형태의 알고리즘을 주로 채택하고 있다. 이러한 상황에서 만일 선도기에게 문제가 생기게 된다면 추종기들도 이에 따라 문제가 발생하고, 종국에는 UAV 군집 전체에 대한 제어가 불가능해질 수 있다. 이러한 경우 UAV 군집에 대한 제어의 안정성 및 신뢰성 보장 불가 문제가 발생한다.

본 논문에서는 기존에 많이 연구되었던 선도기 - 추종기 기법 외의 방식으로의 UAV 사이의 충돌회피를 해결하기 위한 다중 셀 기반 기법을 제안한다. 제안 기법의 핵심 아이디어는 군집 내의 여러 UAV들이 각각 다중 셀 방식을 이용해 충돌회피를 수행한다. 또한 이러한 일련의 과정에서 UAV 간의

충돌이 없다는 것을 보이고, 실험 환경에서 제시한 제약 환경 내에서 충돌회피 동작들이 수행됨을 보인다. 따라서 다중 셀 방식을 이용해 군집 UAV 내에서의 충돌회피가 가능함을 증명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 선도기 - 추종기 기법과 MDP 프레임워크를 이용한 UAV 충돌회피에 대해 살펴본 뒤, 이러한 기존의 기법들을 사용했을 때 발생할 수 있는 문제점들에 대해 설명한다. 3장에서 문제점을 해결하기 위한 다중 셀 기반 군집 내 UAV 충돌회피 기법을 제안한다. 4장에서는 MATLAB 시뮬레이터를 사용하여 제약 조건 내 성공적으로 충돌회피가 이루어지는 것을 보이고, 마지막으로 5장에서는 결론을 지으며 마무리한다.

제 2 장 관련 연구

제 1 절 선도기 - 추종기 기법

UAV 운용이 고도화됨에 따라 기존의 단일 UAV 운용으로는 해결할 수 없는 문제점들이 발생할 수 있으며, 이를 해결하기 위해 여러 대의 UAV를 하나의 Cluster로 묶어 운용하는 UAV 군집을 통해 문제를 해결한다. 하지만 제어 대상이 단일한 UAV에서 여러 대의 UAV로 증가하고 그에 따라 고려해야 할 변수가 증가함에 따라, 기존에 한 대의 UAV를 운용하는 데 사용했던 아이디어들을 그대로 사용하기에는 한계점이 따른다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 군집 UAV의 통제 및 위치 제어 알고리즘을 구성하기 위한 연구가 진행 중이며, 대표적인 방식이 선도기 - 추종기 기법이다. 선도기 - 추종기 기법은 군집 내에 존재하는 한 UAV를 선도기로 지정하고 나머지 UAV는 추종기로 구성하여 추종기들이 선도기를 따라가는 방식으로 UAV 군집과 구성 UAV들의 위치를 제어한다.

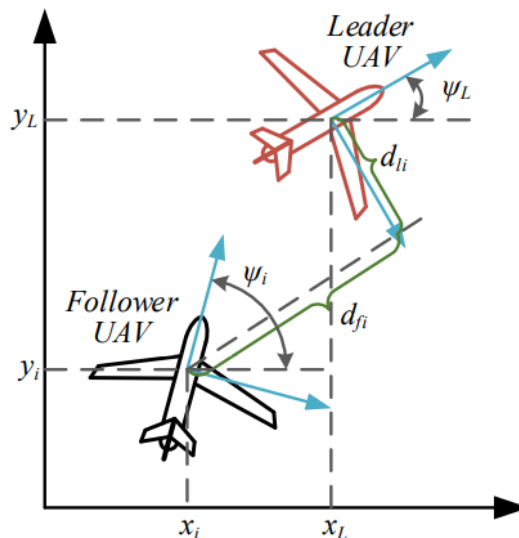


그림 2.1. 선도기 - 추종기 기법의 대략적인 형태

Fig. 2.1. Approximate Form of the Leader-Follower Method

그림 2.1.는 선도기 - 추종기 기법에 대한 개념도이다. (x_L, y_L) 를 선도기 UAV의 실제 위치라고 가정하면 전방 및 측면 방향을 따라 선도기와 추종기 UAV 사이의 실제 거리는 다음과 같다.

$$d_{fi} = (x_i - x_L)\cos\psi_i + (y_i - y_L)\sin\psi_i + D\cos(\psi_i - \psi_L)$$

$$d_{li} = (x_i - x_L)\sin\psi_i + (y_i - y_L)\cos\psi_i - D\sin(\psi_i - \psi_L),$$

이때 D는 제어 포인트와 질량 중심 사이의 거리를 뜻한다. 이러한 과정을 통해 선도기와 추종기는 일정한 거리를 유지하며 목표 지점까지 비행할 수 있다.

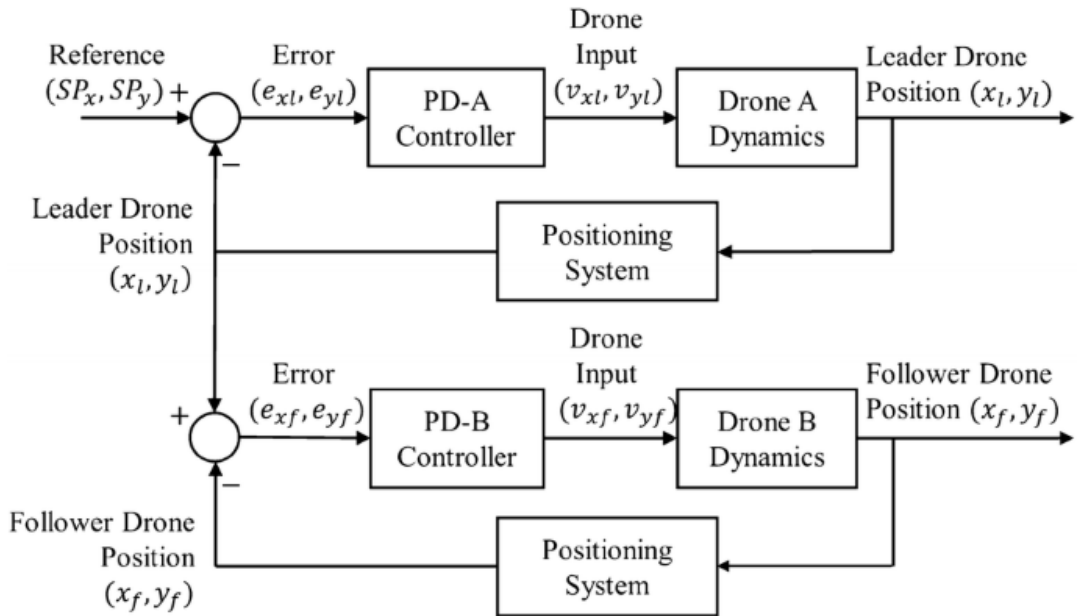


그림 2.2. PD 제어의 관점에서 본 선도기 - 추종기 기법

Fig. 2.2. Leader-follower Method from the Perspective of PD Control

그림 2.2.는 선도기 - 추종기 기법을 PD제어의 관점에서 고려했을 때의 도식도이다. 이를 통해 선도기의 위치가 우선적으로 제어된 이후 선도기의 위치에 따라 추종기의 위치가 영향을 받아 움직인다는 것을 확인할 수 있다.

제 2 절 MDP 프레임워크를 이용한 UAV 충돌회피

MDP(Markov Decision Process) 프레임워크는 이산 시간 확률 제어 프로세스로, 결과가 부분적으로 랜덤으로 도출된다. 또한 부분적으로 통제되는 상황에서 의사 결정을 모델링하기 위한 수학적 프레임워크가 제공된다. 이러한 MDP 프레임워크는 주로 강화학습을 통한 최적화 문제를 연구하는 데에 유용하게 사용되고 있으며, 순차적으로 행동을 결정해야 하는 문제를 풀기 위해 사용되는 수학적 모델이다.

이 때 MDP 프레임워크로 정의된 문제는 강화학습을 통해서 풀 수 있으며, 상태, 조치, 전환, 보상의 단계를 통해 풀 수 있다.

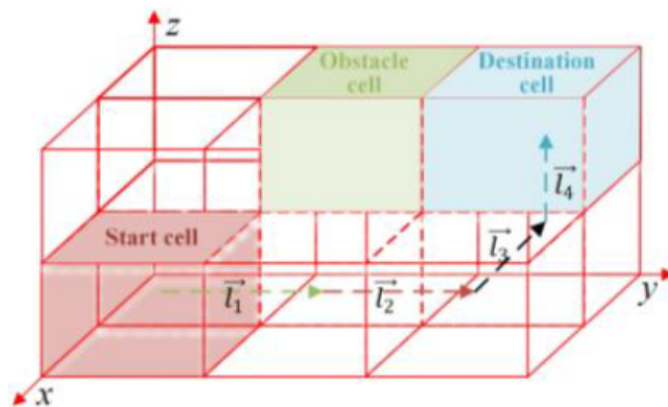


그림 2.3. MDP 프레임워크를 이용한 셀 기반 UAV의 움직임

Fig. 2.3. Cell-based UAV Movement Using the MDP Framework

우선 상태는 각각의 상태를 s 로 표현할 수 있는데, 이는 별개의 시간 단계에서의 셀 표현을 나타낸다. 제시된 환경은 임의의 여러 개의 셀로 분해될 수 있다. 비행 환경의 설정에 따라, 총 셀의 수는 각 셀의 크기에 따라서 달라질 것이다. 예를 들어 똑같은 공간이라면 셀의 수가 많아질수록 각각의 셀의 크기는 작아질 것이기 때문이다. 셀 기반 경로 계획 방법의 계산 속도는 상술한 셀의 총 수에 따라 결정된다. 총 셀의 수가 감소할수록 충돌회피 움직임을 위한 계산 속도가 증가하고, 따라서 수렴률이 증가하게 된다.

다음으로 조치는, 수평면에서 MDP 프로세스의 기본 작용은 그림에서의 1부터 8까지와 같다. 각 동작은 하나의 셀에서 다른 셀로 통과하는 것을 말하며, 이는 8방향으로 표현된다.

전환은, MDP 프로세스의 속성으로 인해 다음 상태 $s+1$ 의 분포는 주어진 작용에 따라 예측이 가능해진다. UAV가 항상 의도한 대로 작동하는 경우는 이상적인 상황에서만 발생할 수 있고, 이를 토대로 시뮬레이션 하는 것은 비현실적이기에 예기치 못한 오류가 발생할 수 있다. 논문에서 시뮬레이션하기 위해 사용한 수치들을 그대로 사용하여 예시를 들어보자면, 각 UAV는 0.9의 확률로 올바른 상태를 얻도록 설계되었다. 만약 비행 과정에서 장애가 발생한다면 UAV는 0.05의 확률로 두 개의 인접한 다른 상태로 이탈할 수 있다. UAV가 도달할 수 없는 다른 상태의 경우에 해당하는 전이 확률은 0으로 지정한다.

마지막으로 보상은, UAV를 장애물로부터 멀리 떨어뜨리고 목표에 접근하기 위해서, 모든 셀은 초기에 임의의 값을 부여받는다. 이 때 빈 공간에는 -0.1 이 할당되고, 장애물에는 $-\omega$, 목적지에는 $+\omega$ 의 값을 부여한다.

상술한 내용들을 Pseudo-Code로 표현하면 다음과 같다.

The Pseudo Code of a Trial-based Search

1. Start with an admissible state-value function V^k .
2. Repeat the following trial n times.
 Set the current state to be the start state s_t and repeat the following steps until the goal state.
 - 1) Determine the immediate reward of five actions $R(s_t, a_t, t)$, ($a_t = a_{t-1} - 1, a_{t-1} + 1, a_{t-1}, a_{t-1} - 32, a_{t-1} + 32$).
 - 2) Calculate the value function $V^{k+1}(s_{t+1}, a_t, t)$.

$$V^{k+1}(s_{t+1}, a_t, t) = R(s_t, a_t, t) + \sum_{s_{t+1} \in S} \gamma P_{ss_{t+1}}^{a_t} V^k(s_t, t).$$

- 3) Extract policy with greedy policy and replace the current state s_t with the next state s_{t+1} ,
 $\pi(s_t, t) = \operatorname{argmax}(R(s_t, a_t, t) + \sum_{s_{t+1} \in S} \gamma P_{ss_{t+1}}^{a_t} V^k(s_t, t)).$

3. The real position (x_t, y_t, z_t) is calculated as follows. Note that Γ refers to the rounding operation.

$$\begin{aligned} y_t &= \Gamma\left(\frac{s_t}{x_{\max} \cdot z_{\max}}\right) + 1, \\ z_t &= \Gamma((s_t - (y_t - 1) \times x_{\max} \times z_{\max}) / x_{\max}) + 1, \\ x_t &= s_t - (y_t - 1) \times x_{\max} \times z_{\max} - (z_t - 1) \times x_{\max}. \end{aligned}$$

그림 2.4. 셀 기반 UAV 충돌회피 기법의 Pseudo-Code

Fig. 2.4. Pseudo-Code of Cell-Based UAV Collision Avoidance Method

우선 실제로 작동 가능한 상태함수 V^k 부터 연산을 시작한다. 우선 a_{t-1} 에서 a_t 로 변환 시 5가지 작용을 선택해 그에 따른 즉각적인 보상을 결정하게 된다. 이후 함수 V^{k+1} 을 식을 통해 도출한다. Greedy Policy를 통해 적용된 정책을 추출하고 현재 상태 s 를 다음 상태 $s+1$ 로 바꾼다. 이후 목표 상태가 될 때까지 시행을 n 회 반복하게 된다.

제 3 절 기존 연구와 본 연구에서의 개선사항 비교

기존에 이루어진 대부분의 연구는 선도기 - 추종기 기법에 초점을 맞추었다고 상술하였다. 본 절에서는 이러한 현재의 연구들에서 어느 측면에서 문제가 발생할 수 있다는 점과 그에 따른 개선 사항을 언급한다.

1) 선도기가 무력화될 시 추종기의 제어 문제

지금까지 이루어진 선도기 - 추종기 연구에서 그 이름에 걸맞게 선도기가 군집 내 여러 UAV 중에서 선두에 서서 날아가고, 추종기들은 특정한 Formation을 유지하며 그 뒤를 따른다. 여기서 주목할 점은 단순히 대형 면에서만 선도기와 추종기가 나누어지는 것이 아니고, 대부분의 선도기 - 추종기 연구는 선도기에 대한 제어를 먼저 입력하고, 선도기가 어떠한 움직임을 보이는지에 따라 추종기들이 그에 영향을 받아 움직이는 구조로 제어가 이루어지고 있다. 선도기-추종기 기법에서 보통의 군집이 삼각 편대의 모양을 이루며 날아가는 시뮬레이션 환경이 많다는 점이 이를 뒷받침한다. 물론 이러한 점들을 개선하기 위해 가상대형기법 등을 사용하는 등 발전된 연구가 있지만, 본질적인 문제를 해결하기에는 문제가 있다. 선도기 - 추종기 기법을 사용했을 때 발생할 수 있는 여러 취약점 예시 중 하나가 그림 2.5. 이다.

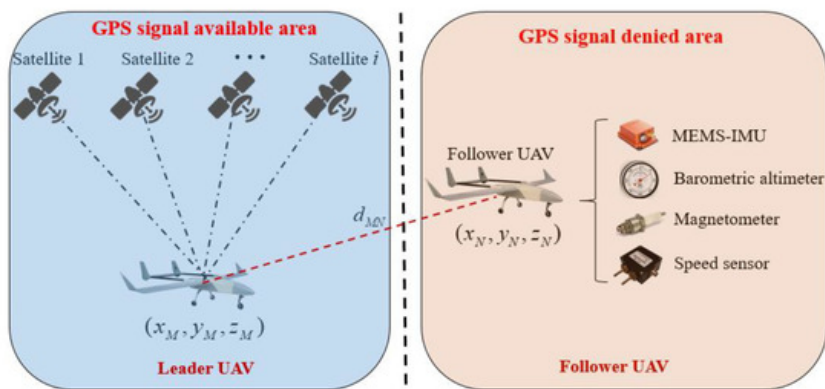


그림 2.5. 선도기 - 추종기 기법을 이용한 군집의 GPS 수신 문제

Fig. 2.5. GPS Reception Problem in UAV Swarm Using Lead-Following Method

그림 2.5.은 GPS 신호가 일부 UAV에만 수신될 때 이러한 문제를 해결하기 위한 방법을 도식화한 것이다. 그림에서 우리는 선도기 - 추종기 기법을 사용한 군집 UAV 제어가 어떠한 형태로 이루어지는 지 확인할 수 있으며, 이는 선도기(Leader UAV)가 위성으로부터 GPS 신호를 받아와 이를 추종기(Follower)들에게 전달하는 형태인 것을 볼 수 있다. 이 때 이러한 UAV 군집을 방해하기 위해서는 굳이 모든 UAV에 Jamming과 같은 위협을 가할 필요 없이, 단지 선도기만 방해하면 된다. 선도기가 제 역할을 하지 못하면 추종기들은 알고리즘 상 당연히 제대로 작동할 수 없기 때문이다.

특히 이러한 취약점은 군집 내 UAV 대수가 증가할수록 더욱 심각한 문제로 연결 된다. 더 많은 UAV 군집을 운용할수록 이들의 손실이 가져오는 피해가 크다는 것은 자명하다.

2) 단일한 UAV로만 연구가 이루어진 셀 기반 충돌회피 방식

군집 UAV에서 조금 벗어나서, 단일 UAV가 장애물을 회피하는 연구 또한 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 연구들은 주로 시뮬레이션 환경에서 제시된 제약 환경 내에서 주어진 정적/동적인 장애물을 극복하는 것을 목표로 한다. UAV가 장애물을 극복하여 목표점까지 날아가기 위해서 고려되는 점 중에서는 얼마나 효율적으로 비행하여 목표점에 도달할 수 있는지, 다시 말해 UAV의 이동거리를 최대한 줄일 수 있는 비행 방식이 있다. 이를 다른 측면에서 보면, UAV가 장애물을 피해 비행하는 과정에서 장애물과의 거리가 어느 정도까지 허용되어야 충돌이 발생하지 않고 최단거리로 목표점에 갈 수 있는지에 대해 연구가 필요하다고 할 수 있으며, 회피 동작이 발생할 때 UAV가 과도하게

민감하게 반응하지 않도록 할 수 있는 가이드라인이 필요하다. 이를 위해 도입된 개념이 ‘안전구역(=충돌자유구역, Safe Margin Area)’이다.

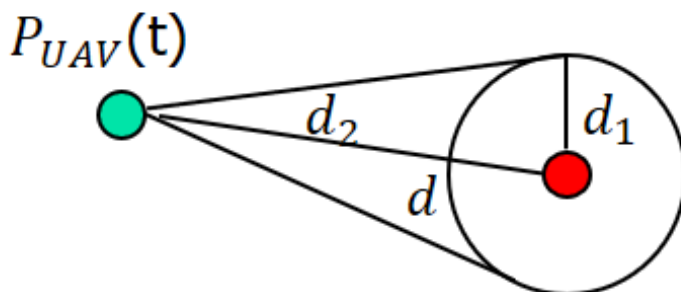


그림 2.6. 안전구역 도식도

Fig. 2.6. Schematic Diagram of the Safety Zone

안전구역은 그림 2와 같은 형태로 묘사할 수 있다. 초록색 $P_{UAV}(t)$ 가 UAV, 빨간색 점이 장애물이라고 했을 때, UAV와 장애물 간 거리는 d 와 같다. 이때 장애물을 중심으로 반지름이 d_1 인 원 모양의 구역을 그리면 UAV는 장애물과의 충돌을 피하기 위해 구역에 들어가지만 않으면 된다는 결론을 내릴 수 있다. 이 때 반지름이 d_1 인 원 모양의 구역을 안전구역이라고 한다. 안전구역은 상술한 ‘Cell’과 같다고 할 수 있으며, 이는 본 문제해결을 위해 MDP 프레임워크와 일련의 과정을 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

하술할 알고리즘을 이해하는 데에 필요한 파라미터 범례표는 다음과 같다.

θ	UAV의 pitch 각
ψ	UAV의 yaw 각
$x(t), y(t), z(t)$	UAV의 x,y,z 값
$x_{obs}, y_{obs}, z_{obs}$	장애물 중심의 x,y,z 값
a,b,c	장애물의 가로,세로,높이 값
ξ	동적 장애물의 반지름
λ	확장 계수 / 임의의 계수로 확장 계수가 1 이상일 시 UAV의 비행이 안전하다고 말할 수 있음
$\overrightarrow{U_r(t)}$	군집 내 한 UAV의 상대 속도
ϕ_{\max}	UAV의 최대 roll 각도
V_{\min}	UAV의 최소 속도
ψ'_{\max}	UAV의 최대 yaw rate

표 2.1. 알고리즘 파라미터 범례표

Table. 2.1. Algorithm Parameter Legend Table

단일한 UAV가 장애물을 보았을 때, 장애물은 정지 혹은 이동 중일 것이다. 이를 우리는 정적 장애물과 동적 장애물이라고 하는데, 두 가지 상황에 대해서 충돌금지구역은 다음과 같은 두 수식을 통해 표현될 수 있다.

$$\Gamma(P) = \left(\frac{x(t)-x_{obs}}{a}\right)^2 + \left(\frac{y(t)-y_{obs}}{b}\right)^2 + \left(\frac{z(t)-z_{obs}}{c}\right)^2$$

$$\Gamma(P) = \left(\frac{x(t)-x_{obs}}{\zeta}\right)^2 + \left(\frac{y(t)-y_{obs}}{\zeta}\right)^2 + \left(\frac{z(t)-z_{obs}}{\xi}\right)^2$$

두 수식 중 첫 번째 식이 장애물이 정지 상태일 때의 충돌금지구역을 표현한 식이고, 두 번째 식이 장애물이 이동하고 있는 상태일 때의 충돌금지구역을 표현한 식이다. 두 가지 식을 조합하여, 한 UAV가 장애물을 회피하기 위한 충돌자유구역을 정의할 수 있는데, 이는 다음과 같다.

$$C_{free} = P\left(\left(\frac{x-x_{obs}}{\lambda a}\right)^2 + \left(\frac{y(t)-y_{obs}}{\lambda b}\right)^2 + \left(\frac{z(t)-z_{obs}}{\lambda c}\right)^2 > 1 \mid \left(\frac{x(t)-x_{obs}}{\lambda \zeta}\right)^2 + \left(\frac{y(t)-y_{obs}}{\lambda \xi}\right)^2 + \left(\frac{z(t)-z_{obs}}{\lambda \xi}\right)^2 > 1\right)$$

다음으로 UAV의 운동 상태와 움직임에 대해 정의한다. 비행중인 UAV의 운동 상태와 동적인 장애물의 운동 상태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(t) = \{P_{UAV}(t), \vec{U}_{UAV}(t)\}$$

$$O(t) = \{P_o(t), \vec{U}_o(t)\}$$

위의 식들을 통해 단일한 UAV가 동적인 장애물을 회피하는 상황을 가정한다면, 상황은 다음과 같이 도식화할 수 있다.

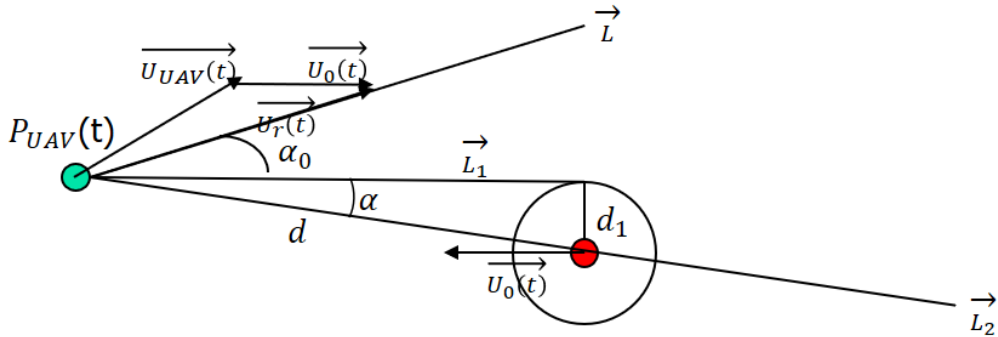


그림 2.7. UAV의 동적 장애물 회피 상황 도식화

Fig. 2.7. Schematic Design of Dynamic Obstacle Avoiding Situation in UAVs

초록색 점이 UAV, 빨간색 점이 장애물이라고 했을 때 UAV에서 장애물의 충돌자유구역으로 그은 접선을 L1, UAV와 장애물의 중심을 이은 선을 L2라고 하자. 위의 그림과 같은 상황에서 α_0 가 α 보다 작을 때 충돌이 일어나지

않는다는 것을 확인할 수 있다. 이를 다르게 말하자면, α_0 가 α 보다 크거나 같은 경우에는 경로의 재계획, 즉 충돌회피가 필요하다. 이때의 α 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{(\overrightarrow{U_r(t)}, \overrightarrow{P_{UAV}P_O})}{|\overrightarrow{U_r(t)}| |\overrightarrow{P_{UAV}P_O}|}$$

이러한 과정을 통해 UAV에 대한 충돌회피를 달성하는 연구는 여럿 존재한다. 하지만 대부분의 연구가 하나의 UAV가 충돌회피를 하는 것에 초점을 맞추고 있으며, 군집 UAV에 대한 고려는 거의 없었다.

제 3장 제안 기법

본 장에서는 앞서 조사한 선도기 - 추종기 방식과 MDP 프레임워크를 이용한 셀 기반 UAV의 충돌회피 방식을 고려하여 기존 단일한 UAV에서만 이루어지던 UAV의 충돌회피를 여러 대의 UAV가 비행하는 군집 환경에 맞도록 적용하여 군집 내 UAV 사이의 충돌 회피를 제안한다.

1) 군집 내에서 UAV의 충돌 회피 과정

앞서 2장 3절에서 단일한 UAV가 안전구역 개념을 사용하여 충돌회피를 수행하는 과정에 대해 설명하였다. 본 연구는 이러한 개념을 이용, 이를 단일한 UAV에서의 동작으로 국한하지 않고 개념을 확장해 군집 내 각 UAV 사이의 충돌 회피를 위해 본 개념을 사용하고자 한다.

이해를 돕기 위해 전에 사용했던 그림을 다시 가져오면 다음과 같다.

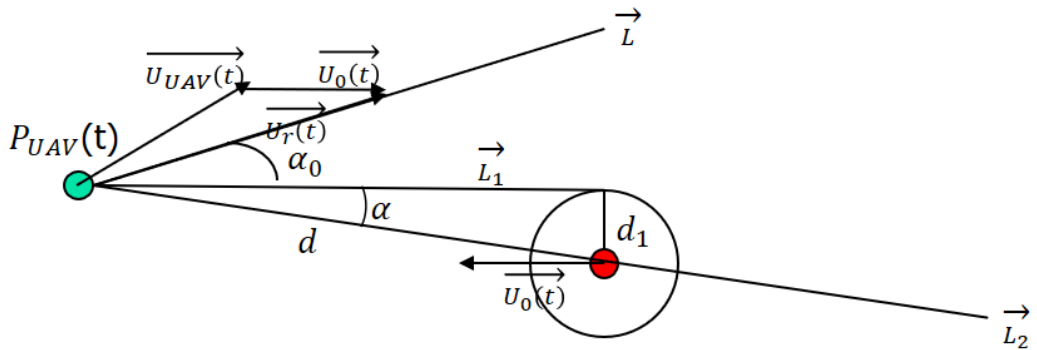


그림 3.1. UAV의 동적 장애물 회피 상황 도식화

Fig. 3.1. Schematic Design of Dynamic Obstacle

Avoiding Situation in UAVs

위의 그림에서, 한 대의 UAV(초록색 점)는 동적인 장애물(빨간색 점)을 피하기 위해 안전구역 외부에 위치해야만 한다. 여기서 장애물은 UAV를 조종하는 사람이 임의로 조종할 수 없는 비행체이다. 위 사진에서 동적인 장애물을 UAV로 바꾸어 생각해보면 다음과 같은 상황임을 알 수 있다.

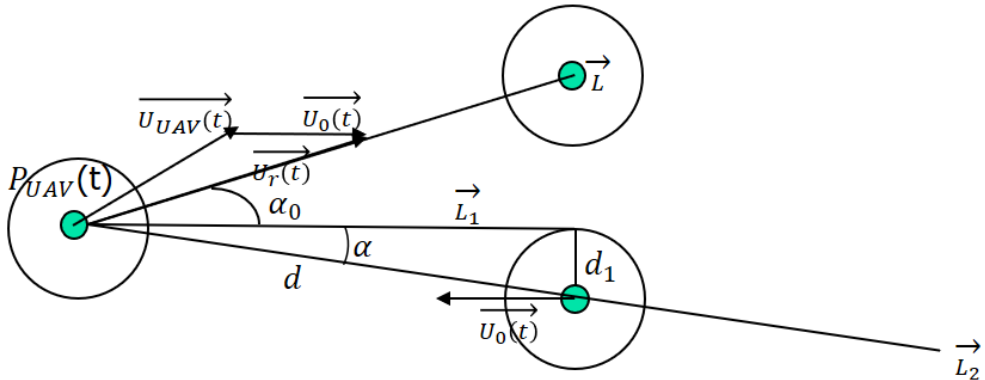


그림 3.2. 군집 내 UAV들의 충돌 회피 상황 도식화

Fig. 3.2. Schematic diagram of collision avoidance situations of UAVs Swarm

그림 3.2.은 군집 내 UAV들의 충돌 회피 상황 도식화를 나타낸 것이다. 이때 초록색 점으로 표현된 것을 각각 하나의 UAV라고 정의한다. 한 UAV에서 다른 UAV의 충돌자유구역으로 그은 접선을 L_1 , 한 UAV와 다른 UAV의 중심을 이은 선을 L_2 라고 하자. 그림 3.2.와 같은 상황에서 α_0 가 α 보다 작을 때 충돌이 일어나지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 이를 다르게 말하자면, α_0 가 α 보다 크거나 같은 경우에는 경로의 재계획, 즉 충돌회피가 필요하다.

이러한 연산을 군집 내에 존재하는 하나의 UAV만 시행한다면 이는 기존의 단일 UAV의 장애물 회피와 완전히 같다. 여기서 각각의 UAV가 그림 3.2.와 같은

충돌회피 동작을 수행한다면, 군집 내의 UAV끼리의 충돌 회피라고 할 수 있을 것이다. 또한 기존의 방식에서 장애물은 UAV를 운용하는 입장에서 제어할 수 없는 사항이었지만 위와 같은 상황에서는 충돌 회피를 수행하는 UAV와 회피할 대상을 운용자가 모두 제어할 수 있어 동적 장애물을 회피하는 과정과 비교하여 좀 더 효율적인, 다시 말해 더 세밀한 제어가 가능해진다.

제 4장 모의실험

본 장에서는 3장에서 제시된 기법을 모의실험을 통해 실행하여 제안 기법을 통해서도 군집 내 UAV의 충돌회피가 성공적으로 일어남을 검증한다. 검증을 위해 모의실험 환경을 제시한 뒤, MATLAB Simulink Simulator를 활용한 모의실험 결과를 분석한다.

제 1절 모의실험 환경

본 논문에서 이용된 시뮬레이션의 구성은 다음과 같다. UAV의 속도는 다음과 같은 형태로 정의한다.

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= V \cos \theta \cos \psi \\ \frac{dy}{dt} &= V \cos \theta \sin \psi \\ \frac{dz}{dt} &= V \sin \theta\end{aligned}$$

다음으로 UAV의 동적 제약조건을 정의한다. 시뮬레이션을 위해 각 UAV의 속도, 상승률, Roll / Pitch와 Yaw 한계를 정의할 필요가 있다. 이들은 계산을 통해 도출된 Yaw Rate를 제외하면 임의로 설정하였다.

표 4.1. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터

Table 4.1. Parameters used in the simulation

파라미터	값
Velocity	$20 \leq V \leq 60 \text{ m/s}$
Climb Rate	$-5 \leq v \leq 5 \text{ degree/s}$
Roll angle	$-30 \leq \phi \leq 30 \text{ degree}$
Pitch rate	$-10 \leq \theta \leq 10 \text{ degree/s}$

각 UAV의 비행을 모의 실험함에 있어서 현실에서 이를 구현하기 위해서 가장 주요한 제약 조건은 수평면에서의 최소회전반경 r_{\min} 이다. 이때의 r_{\min} 은 Yaw Rate의 한계 값과 관련이 있으며, 이는 다음과 같은 수식을 통해 정의된다.

$$m\psi'V = m\frac{V^2}{r} \quad \psi' = \frac{V}{r}, r_{\min} = \frac{V_{\min}}{\psi'_{\max}}$$

상술한 값과 수식들을 통해 Yaw Rate의 한계 값을 도출할 수 있는데, 이는 다음과 같다.

$$\psi_{\max} = \frac{g \tan \phi_{\max}}{V_{\min}} = \frac{9.8 \times \tan 30}{20} \times \frac{180}{\pi} = \frac{21.61}{s}$$

시뮬레이션 구현을 위해 기존의 단일 UAV가 동적 장애물을 상대로 충돌 회피하는 알고리즘을 3대의 UAV에 적용하였다. 이는 3대 이상의 UAV를 가지고 시뮬레이션을 진행해 도출된 결과여야 군집 UAV에 대한 연구로서 유의미하다는 판단에서 군집의 하한선인 3대로 설정하였다. 3대의 UAV에 대해 각각 UAV 1st,

UAV 2nd, UAV 3rd과 같이 넘버링을 하고 초기 위치와 관련 계수, 목표 비행위치를 설정한다. 이후 UAV간의 최소 거리를 설정해 안전구역의 크기를 지정하고, 비행 중 최소 거리 이내로 접근할 때 UAV가 충돌회피 동작을 수행하여 위치를 갱신한다. 이러한 일련의 과정을 반복해 3대 모두 충돌 없이 목표 지점까지 도달하도록 시뮬레이션을 설계하였다.

제 2 절 모의실험 결과

본 절에서는 연구 결과로 제안하는 셀 기반 기법의 성능 평가를 위해 진행된 MATLAB Simulator를 활용한 모의실험 결과를 확인하고 분석한다. 결과는 각 UAV의 자세각의 변화, 거리 변화를 그래프로 도출하였다. 반복문의 횟수는 임의로 100회로 설정하였고, 시간(t)는 200s로 설정하여 값을 도출하였다.

1. 각 UAV 자세각의 변화

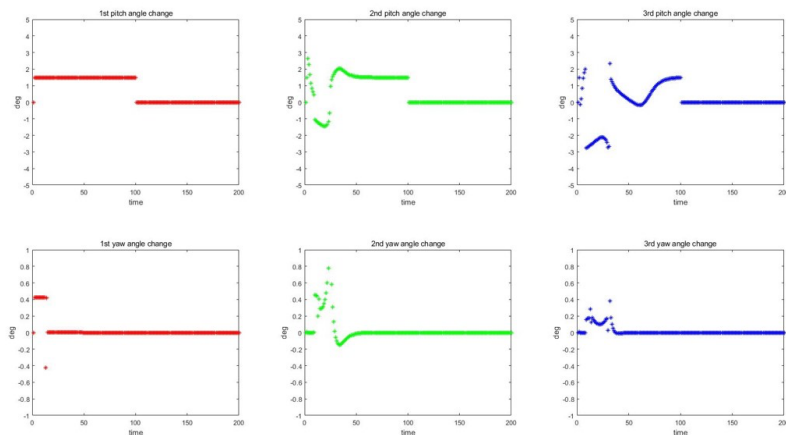


그림 4.1. 시간 흐름에 따른 각 UAV 자세각의 변화

Fig. 4.1. Variation in Each UAV Posture Angle over Time

그림 4.1은 시간이 0s에서 200s로 진행함에 따라서 각 UAV의 자세각의 변화를 그래프로 도출한 결과이다. 빨간색 그래프는 UAV 1st, 초록색 그래프는 UAV 2nd, 파란색 그래프는 UAV 3rd에 대한 그래프이다. 또한 가로 첫 줄의 그래프는 Pitch Angle의 변화량에 대한 그래프이며 가로 둘째 줄의 그래프는 Yaw Angle의 변화량에 대한 그래프이다. 6개의 그래프 모두 제시된 제약조건 외부의 값이 보이지 않았으며, 이는 각 UAV의 비행 및 충돌회피 동작이 제시된 제약조건 내에서 이루어졌음을 확인할 수 있다.

2. 각 UAV간 거리 변화

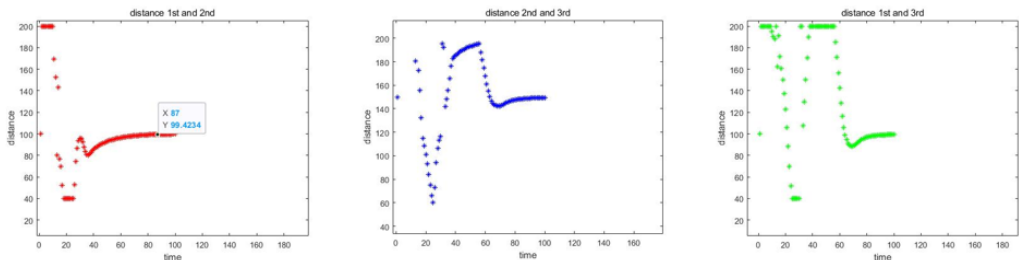


그림 4.2. 시간 흐름에 따른 각 UAV간 거리 변화

Fig. 4.2. Variation of Distance Between Each UAV over Time

그림 4.2는 시간이 0s에서 200s로 진행함에 따라 각 UAV간 거리 변화에 대해 나타낸 것이다. 그래프는 순서대로 UAV 1st - UAV 2nd 사이의 거리, UAV 2nd - UAV 3rd 사이의 거리, UAV 1st - UAV 3rd 사이의 거리를 나타낸다. 그래프에서 각 UAV 사이의 거리가 200m를 초과하지 않으며, 또한 40m 이내로 좁혀지지 않는다는 점을 확인할 수 있다. 200m를 초과하지 않는 이유는 설정한

값에 따라 UAV 사이의 거리가 200m를 초과하면 군집으로서 주는 의미가 없다고 생각하는 최대 설정 값 이내로 UAV가 움직인다는 것을 의미하며, 40m 이내로 좁혀지지 않는 이유는 한 UAV의 안전구역 반지름의 두 배인 40m 이내로 좁혀지지 않아 UAV간 충돌이 발생하지 않음, 즉 충돌회피가 성공적으로 이루어지고 있음을 그래프를 통해 확인할 수 있다.

제 5 장 결론

본 논문에서는 선도기 - 추종기 기법을 사용한 군집 UAV 제어 환경에서 발생할 수 있는 문제점에 대해 설명하고 이를 해결할 수 있는 셀 기반 충돌회피 기법을 제안하였다. 선도기 - 추종기 기법을 적용한 군집 UAV은 선도기에 전적으로 의존하는 알고리즘의 특징상 선도기가 무력화되면 UAV 군집 전체의 제어가 불가능해진다는 문제를 발생시킨다. 또한 이러한 문제점을 가지고 있기에 군집의 안정성이 크게 저하된다. 이러한 제어 과정에서의 안정성 및 신뢰성을 보장할 수 없다는 문제점은 실시간 전달이 중요한 운용 환경에 악영향을 미친다.

제안 기법은 상술한 문제들을 해결하기 위해 기존에 많이 사용되었던 선도기 - 추종기 기법 대신 셀 기반 충돌회피 기법을 사용한다. 이러한 충돌회피 기법은 MDP 프레임워크에 기반하여 이루어지고, 각각의 UAV에서 충돌회피 알고리즘이 작용한다. 별도의 선도기를 두지 않는 제안 기법의 특성상 안정성 및 신뢰성 보장 문제를 해결할 수 있다.

시뮬레이션을 거쳐 성능을 분석한 결과는 제안하는 기법이 기존 선도기 - 추종기 기법을 적용하기 않았음에도 제시된 시뮬레이션 제약환경 내에서 충돌회피라는 목표를 성공적으로 달성함을 확인할 수 있다.

제안 기법을 적용한 UAV 군집 환경에서는 군사적인 환경에서 뿐만 아니라, 재난 상황과 기지국 망이 단절된 지형과 같은 상황에서 기존보다 안정적으로 끊기지 않는 군집에 대한 제어를 가능케 한다. 더 나아가, 향후 알고리즘을 개량해 각 UAV에서 충돌회피를 위해 발생하는 연산량을 줄인다면 제안하는 기법 적용을 통해 성능 측면에서도 효율적인 제어가 가능하도록 적용 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] 김태균, 김승균, “군집 드론 기술 동향 및 발전 추세”, 제어로봇시스템학회지, 2019
- [2] Xiaohua Wang, Vi Yadav, Cooperative UAV Formation Flying With Obstacle/Collision Avoidance, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007
- [3] Jialong Zhang, Jianguo Yan, Multi-UAV Formation Control Based on a Novel Back-Stepping Approach, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020
- [4] A. Askari, M. Mortazavi, UAV Formation Control via the Virtual Structure Approach, journal of Aerospace Engineering, 2015
- [5] Fabra and Willian Zamora, “A Distributed Approach for Collision Avoidance between Multirotor UAVs Following Planned Missions,” sensors, vol.19, 2019
- [6] Sara Perez-Carabaza, Jurgen Scherer, “UAV trajectory optimization for Minimum Time Search with communication constraints and collision avoidance”, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol.85, 2019
- [7] Sunan Huang, Rodney See Huat Teo, “Collision avoidance of multi unmanned aerial vehicles: A review”, annual Reviews in control, 2019
- [8] Torsten Andre et al., "Application-driven design of aerial communication networks." IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 5, pp. 129-137,

May 2014.

- [9] Xiaobin Zhou, Xiang Yua nd Xiaoyan Peng, "UAV Collision Avoidance Based on Varying Cells Strategy," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.55, 2018
- [10] Xudong Zhu,Jizhou Lai, "Cooperative Location Method for Leader-Follower UAV Formation Based on Follower UAV's Moving Vector", Sensors, vol.22, 2022
- [11] Liu, Z. X., Yu, X., Yuan, C., & Zhang, Y. M, "Leader-follower formation control of unmanned aerial vehicles with fault tolerant and collision avoidance capabilities." 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015.

Abstract

Most of the existing studies related to cluster UAVs have been conducted in the form of Leader - Follower, that is, leader-follower-follower. Among them, there are several studies mainly using the concept of one leader and multiple followers, and further studies incorporating virtual large-scale techniques developed from the leader-following technique. There were not so many studies conducted other than the above-described leading machine-following machine and other derivative techniques.

In studies related to UAV collision avoidance, many studies have been conducted on collision avoidance of a single UAV. In addition, there are many studies on several UAVs, but there is still much room for pioneering.

This paper analyzes the problem of avoiding collisions between UAVs inside clusters in UAV clusters by utilizing multi-cell strategies and proposes to solve these problems.

The movement of the cluster UAV through the conventional leader-follower technique is determined by the leader's movement, and if there is a problem with the leader, the movement of several followers may not be expected, and in the end, the entire cluster may become uncontrollable. There is also a problem that reliability cannot be guaranteed at all times due to these vulnerabilities.

The proposed multi-cell based scheme gives each UAV a collision avoidance algorithm. In addition, each UAV in the cluster uses a multi-cell method. It also solves the problem of unreliable reliability, which cannot always be guaranteed in conventional methods because it does not use a particular leader.

Performance analysis using MATLAB simulators could not guarantee that the proposed technique has superior performance over the existing leader-follower technique, but it can be confirmed that it is also valid when multi-cell methods are used in the control of UAVs in clusters.