

UWB 기반 앵커를 활용한 군집 드론 동적 영역 착륙 시스템

천가영, 이주형, 남해운*

모빌리티랩, *한양대학교

blue@mobilitylab.kr, ovlxxlvo@mobilitylab.kr hnam@hanyang.ac.kr

Dynamic Landing Systems for Drone Swarms Using UWB Anchors

Gayoung Chun, Joohyoung Lee, Haewoon Nam*

Mobility Lab, *Hanyang Univ.

요약

본 논문은 UWB(Ultra-Wideband) 앵커를 활용하여 군집 드론의 착륙 영역을 자동으로 할당하고 정밀 착륙을 제어하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 시스템은 UWB 앵커가 형성하는 착륙 가능 영역을 산출하고, 드론 수용 용량을 최적화하여 안전 반경을 최대화하는 착륙 좌표를 생성한다. 드론은 할당된 목표 좌표에 대해 UWB 상대 좌표를 기반으로 정밀착륙을 수행하여, Gazebo 시뮬레이션을 통해 GPS 단독 사용 대비 평균 착륙 오차가 약 1m 감소함을 확인하였다.

I. 서론

드론 군집(swarm)은 최근 임무 규모와 기술 수준이 크게 발전하면서, 재난, 물류, 환경 감시, 군사 등 다양한 분야에서 대규모 실증적 활용이 가속화되고 있다. 단일 드론 대비 임무 효율, 확장성, 내결함성 측면에서 확실한 이점을 보임에 따라 최신 연구들은 분산제어, 실시간 협업, 경로 최적화, 안전성 및 신뢰성 향상 등 다양한 의사결정·비행 제어 기법을 활발히 논의하고 있다. [1-3]

그러나 군집 드론의 정확하고 안전한 착륙은 여전히 해결해야 할 핵심 과제로 남아 있다. 특히 제한된 착륙 공간에서 다수 드론 착륙 시, 드론 간 안전거리 확보, 착륙 가능 공간의 효율적 활용, 센서 오차 및 환경 요인에 따른 착륙 위치 편차가 복합적으로 작용하여 착륙 안전성을 저해한다. GPS 기반 위치 추정 오차는 상대적으로 큰 편이며, 이는 제한된 공간에서의 착륙 실패 위험 증가로 이어질 수 있다. 기존 연구에서는 UWB 기반 위치 추정, Circle Packing 기반 공간 활용 등 개별 요소를 다룬 바 있으나, UWB 기반 ‘착륙 영역 설정→드론 수에 따른 수용 가능성 산정→착륙 점 할당→상대좌표 정밀 착륙 제어’의 파이프라인을 종합적으로 구현한 연구는 제한적이다.

본 논문에서는 (1)UWB 앵커 기반 착륙 영역 설정 (2) Circle Packing 기반 드론 수용량 계산 및 착륙점 생성 (3) TWR 기반 상대좌표 정밀 착륙 제어를 통합하여 군집 드론 착륙 안전성을 향상시키는 알고리즘을 제안한다.

II. 본론

2.1 UWB 앵커 기반 영역 설정

2.1.1 TWR 기반 앵커 간 거리 측정

착륙 플랫폼 주변(또는 표면)에 복수의 UWB 앵커를 배치한다. 각 앵커는 TWR(Two-way Ranging) 프로토콜을 통해 거리 정보를 획득한다. 이 과정에서 각 앵커 쌍은 신호의 왕복 이동 시간과 응답 지연을 측정하며, 이를 이용해 두 앵커 간 거리 d 를 산출한다.

$$ToF = \frac{a_d \times b_d - a_p \times b_p}{a_d + b_d + a_p + b_p} \quad (1)$$

$$distance = c \times ToF \quad (2)$$

여기서 a_d, b_d 는 신호 응답시간, a_p, b_p 는 라운드트립 시간, c 는 빛의 속도이다.

2.1.2 착륙 가능 영역 자동 산출

앵커 좌표는 이산적인 점 집합으로 주어지므로, 이를 기반으로 착륙 슬롯 생성 및 안전성 검증에 필요한 연속적인 착륙 가능 영역을 정의할 필요가 있다. 본 연구에서는 앵커가 물리적으로 감지 가능한 공간을 최대한 포괄하도록 외곽 경계를 근사하기 위해, 앵커 좌표의 볼록 껍질(Convex Hull)을 착륙 가능 영역으로 정의하였다.

$$P = \text{ConvexHull}(A) \quad (3)$$

이와 같이 정의된 다각형 P 는 드론이 착륙 가능한 전체 영역을 의미한다.

2.2 Circle Packing 기반 착륙 슬롯 생성

군집 드론이 제한된 착륙 영역 내에서 안전하게 착륙하기 위하여 드론 크기와 비행 위치 오차를 고려한 상태에서 동일 반경을 갖는 착륙 점유 영역을 서로 겹치지 않게 배치해야 한다. 본 연구에서는 드론의 착륙 점유 공간을 원의 형태로 모델링하고 Circle Packing 개념을 적용한다. 착륙 슬롯 생성에 앞서, 드론 간 충돌을 방지하기 위한 최소 안전 반경 R_{safe} 를 드론 기체 크기, 위치 추정 오차, 환경적 요인을 고려하여 정의한다.

$$R_{safe} = R_{drone} + E_{UWB} + E_{env} \quad (4)$$

여기서 R_{drone} 은 드론 기체의 반경, E_{UWB} 는 UWB 기반 위치 추정 오차, E_{env} 는 바람, 진동 등 환경적 오차를 의미한다.

R_{safe} 를 하한값으로 설정하고, $R \geq R_{safe}$ 범위에서 반경 R 을 점진적으로 증가시키며, 주어진 드론 수를 수용할 수 있는지를 평가한다. 최종적으로 주어진 드론 수를 만족하면서 반경 R 이 최대가 되는 착륙 배치를 선택함으로써, 착륙 시 드론 간 안전 여유를 최대화한다.

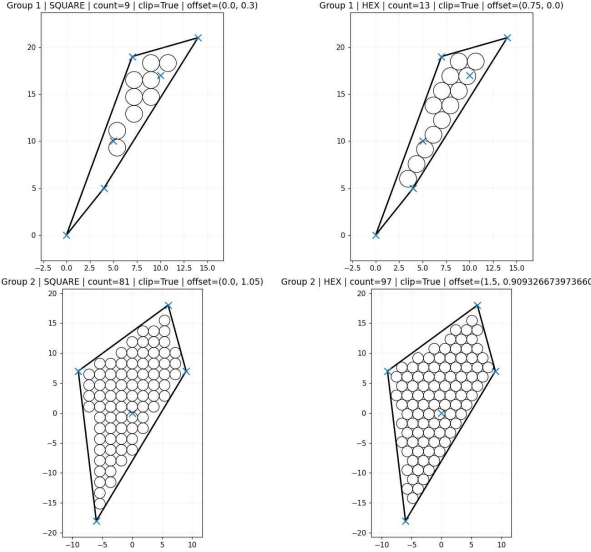


그림 1. 격자 형태에 따른 슬롯 수 정량적 비교

표 1. 격자 형태에 따른 슬롯 수 정량적 비교

격자 형태	앵커 GROUP 1	앵커 GROUP 2
SQUARE	9	13
HEX	81	97

착륙 슬롯 생성은 연속 공간에서의 Circle Packing 문제가 계산 비용이 높아 실시간 적용이 어렵다는 점으로 고려하여, 격자 기반 근사 방식을 사용하였다. 이때, 착륙 슬롯의 중심 좌표를 연속 공간 전체에서 최적화하는 대신, 격자 기반 후보점 집합을 정의 후 착륙 가능 영역 내부에 포함되는 유효한 좌표만을 선택하는 방식을 적용하였다. 또한 동일한 반경 조건에서 더 높은 공간 활용률을 제공하는 HEX 격자 기반 배치를 채택하였다.

그림 1, 표1은 동일 반경 조건에서 SQUARE 격자 기반 배치와 HEX 격자 기반 배치에 따른 착륙 슬롯의 배열을 시각적으로 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, HEX 격자는 드론 착륙 점유 공간을 원의 형태로 모델링했을 때, 동일한 영역 내에서 더 많은 슬롯을 효율적으로 배치할 수 있음을 보여준다.

2.3 상대좌표 기반 정밀 착륙

2.3.1 삼변 측량 위치 계산

각 드론은 실시간으로 자신과 여러 앵커 사이의 거리를 동시에 측정한다. 이 거리 정보를 삼변 측량(Trilateration, 최소 4개의 앵커 필요)에 넣어, 플랫폼 내부 상대 좌표상의 3차원 위치를 계산한다.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2, (i = 1, 2, 3 \dots N) \quad (5)$$

2.3.2 PID 기반 착륙 제어

최종적으로 드론은 목표 착륙점과 자신의 현재 위치 오차를 지속적으로 보정하며 하강한다. 오차가 10cm 이하로 줄어들면 착륙 시퀀스를 실행한다. 그렇지 않으면 속도 명령을 생성하여 계속 이동한다. 착륙 완료 후에는 모터를 정지하고 루프를 종료한다.

2.4 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제한된 UWB 앵커 기반 군집 드론 착륙 시스템을 시뮬레이션 실험을 통해 검증하였다. GPS 오차를 구현하기 위해 가우시안 노이즈가 추가된 GPS 단독 사용 환경을 구성하고, 이를 UWB를 상대좌표 기반 착륙 방식과 비교하였다.

표 2. GPS 단독 사용과 UWB 상대좌표 기반 착륙의 정확도 비교

측정 오차	GPS	UWB
최대 오차	1.4	0.12
오차 표준 편차	1.1	0.05

표2는 GPS 단독 사용과 UWB 상대좌표 기반 착륙 방식에 따른 착륙 오차를 비교한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과, UWB 상대좌표 기반 착륙은 GPS 단독 사용 대비 착륙오차를 감소시켰으며, 특히 제한된 공간에서의 군집 착륙 안정 가능성을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 UWB 기반 앵커를 이용한 군집 드론의 착륙 시스템의 원리와 구현 방안을 제안하였다. 제안 시스템은 UWB 앵커를 활용하여 착륙 플랫폼의 영역을 설정하고, 드론의 수에 대응하는 최대 반경을 고려하여 Circle Packing 기반(격자 근사) 착륙점 집합을 산출한 뒤, 상대좌표 기반 정밀 착륙 제어를 통해 시뮬레이션에서 성능을 검증하였다.

아울러, GPS 신호가 제한적인 실내 및 도심 환경에서 TWR 거리 측정, 삼변 측량 위치 기술을 통해 군집 드론의 정밀 착륙이 가능성을 시뮬레이션 실험을 통해 확인하였다. 본 방법은 재난·군사·물류 등 다양한 실제 환경에서 대규모 드론 운용의 안전성 및 효율성을 크게 개선할 수 있는 실질적인 기술적 대안이 될 것으로 기대된다.

향후에는 실제 하드웨어 기반 실험 및 야외 복합 환경(이동체·장애물 등) 검증을 통해 확장성과 한계를 보다 분석하고, 데이터 융합 및 제어 고도화를 추가로 추진 할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] B. Cetinsaya et al., "From PID to swarms: A decade of advancements in drone path planning and control," Computers and Electrical Engineering, 2024.
- [2] Usama Arshad et al., "Secure and optimized drone swarm operations with decentralized Adaptive Differential Evolution," Computers & Electrical Engineering, 2025.
- [3] R. Tang et al., "Enhanced multi agent coordination algorithm for drone swarms," Nature Scientific Reports, 2025.
- [4] J. Diez-Gonzalez et al., "Time-based UWB localization architectures analysis for indoor drone swarms," Robotics and Autonomous Systems, 2024.
- [5] A.K. Jose et al., "An Encoder-Decoder Approach for Packing Circles," arXiv preprint, 2023.
- [6] A. Ochoa-de-Eribe-Landaberea et al., "UWB and IMU-Based UAV's Assistance System for Drone Landing," Sensors, 2022.
- [7] Q. Dong et al., "Fast and Communication-Efficient Multi-UAV Exploration Via Voronoi Partition," arXiv, 2024.