UAV-UGV 협동 군집에서의 착륙 정밀도, 궤적 간섭, 확장성 문제 해결을 위한 시뮬레이션 및 실환경 검증

강지완[1*], 명하현[2], 나우선[1], 김신형[3], 정성훈[1†]
조선대학교 항공우주공학과[1], 조선대학교 스마트이동체융합시스템공학부[2], 조선대학교 스마트이동체융합시스템공학과[3]
25년도 항공우주공학회 추계학술대회, 강원도 고성, 2025. 11. 14.

*발표자
E-mail: oraresert20@chosun.kr
†교신저자
E-mail: jungx148@chosun.ac.kr

서론

UAV(무인 항공 차량)는 기동성이 우수하지만, 비행시간과 탑재 중량에 명확한 한계를 가진다. UGV(무인 지상 차량)는 장시간 운용과 중량물 탑재에 유리하나, 지형과 장애물로 인해 기동성이 제한된다.

단일 플랫폼만으로는 다중 목표 동시 달성이 어려워, 공중-지상 상호 보완적 구조가 필요하다. UAV-UGV 협동 군집은 관측 범위와 작업 반경을 확대하며 임무 시간을 단축시킬 수 있다.

하지만 2:2 이상의 군집 환경에서는 착륙 정밀도 저하, 임무 궤적 간섭, 군집 확장성 문제라는 심각한 난제들이 발생한다.

따라서 본 연구는 이 3가지 핵심 문제를 해결하기 위한 제어 기법을 제안하고, 2:2 군집 시뮬레이션 및 실환경 검증을 통해 임무 성공률 향상 효과를 입증하는 방법을 연구하였다

본론

<시뮬레이션을 위한 환경 구축>

- UAV-UGV 협동 군집 제어기 및 임무 알고리즘의 효과적인 개발과 검증을 위해 현실과 유사한 시뮬레이션 환경을 구축함
- 본 연구의 시뮬레이션 환경은 Ubuntu 22.04 LTS를 기반으로 PX4 SITL이 연동된 Gazebo Garden (gz sim 8.x.0) 물리 시뮬레이터로 구성됩니다. ROS 2 Humble 기반의 제어 노드가 PX4 Offboard Control을 통해 시나리오 제어 알고리즘을 구현하며, QGroundControl을 통해 실시간 모니터링이 이루어짐
- 이 환경은 실제 시스템 개발 전 다양한 시나리오를 반복적이고 안전하게 테스트하며, 향후 더 복잡한 군집 시스템 연구를 위한 기반 플랫폼을 제공하는 데 기여함

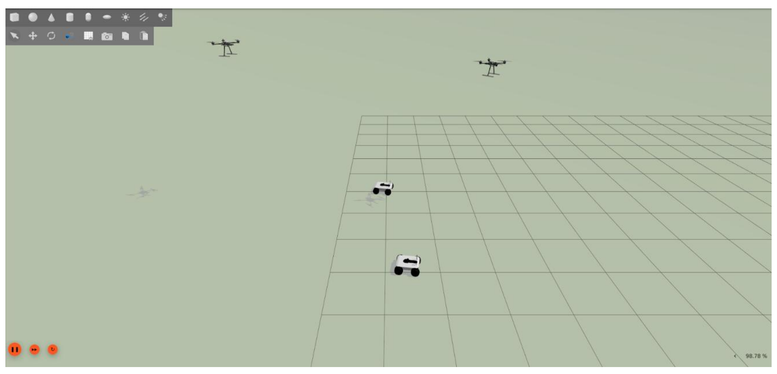


Fig 1. 가제보 시뮬레이션

<ROS2/PX4 통신 아키텍처>

- **[중앙 임무 계획]** /mission_planner 노드가 전체 군집(UAV/UGV)의 임무 계획 및 제어 명령 생성
- **[Offboard 제어]** ROS 2 토픽 (/vehicle_trajectory_setpoint)을 통해 다중 PX4 인스턴스(px4_1, px4_2 등)로 제어 목표치(setpoint) 전송
- **[실시간 통신]** offboard_control_X 노드가 이 setpoint을 구독하여 각 PX4 컨트롤러와 실시간 Offboard 통신 수행

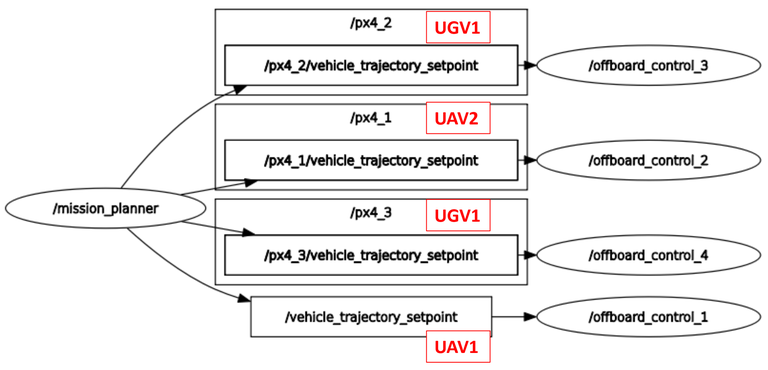
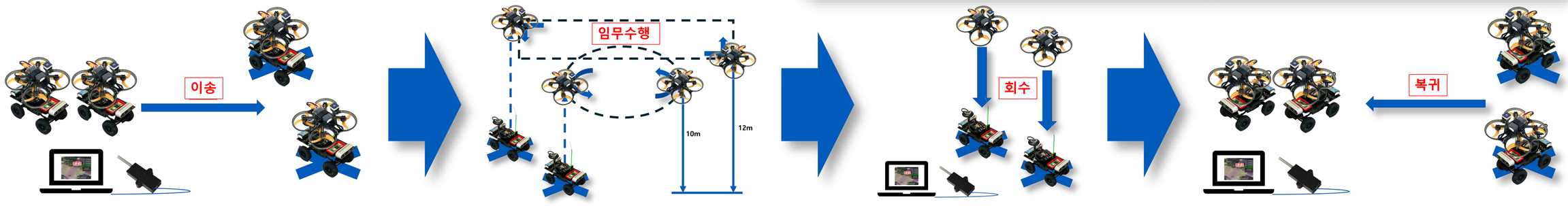


Fig 2. ROS2 토픽 통신 흐름

<목표 임무 절차(시나리오)>

- UAV-UGV 군집 운용 절차는 이송-임무 수행-회수-복귀의 네 개의 단계로 구성



1. 이송 단계 (Transport Phase)
2. 임무 수행 단계 (Mission Execution Phase)
3. 회수 단계 (Recovery Phase)
4. 복귀 단계 (Return Phase)

<3단계 착륙 상태기계>

- UAV의 착륙 정밀도를 향상하기 위해 3단계 착륙 상태기계를 설계
- 제안된 착륙 상태기계의 구체적인 알고리즘은 아래와 같이 접근, 정렬, 저속 강하의 세 가지 단계를 거치도록 구성

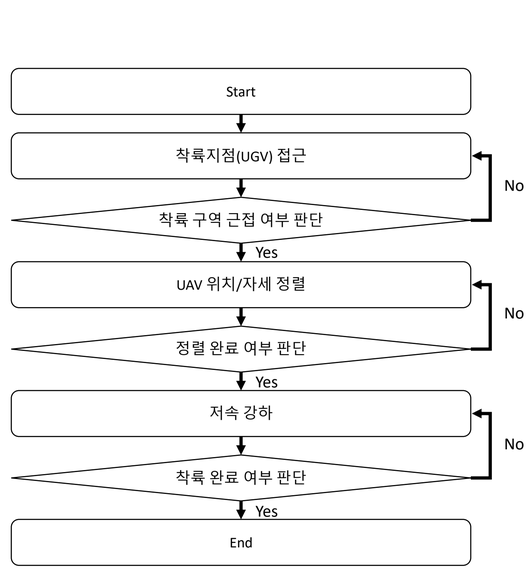


Fig 3. 착륙 상태기계 알고리즘

Fig 4. 착륙 상태기계 구현 코드

<평가 지표 및 목표 기준>

- 본 연구에서는 UAV-UGV 군집 운용 성능을 정량적으로 분석하기 위하여 착륙 정밀도, 궤적 간섭, 임무 성공률로 Table 1과 같이 세 가지 지표로 정의하였다.

Table 2. Performance Evaluation Metrics for UAV-UGV Cooperative Missions

구분	평가 지표	목표 기준
정밀 착륙	착륙 오차 RMS	≤0.1m
궤적 간섭	최소 분리 거리	≥2.0m
임무 성공률	전체 임무 성공률	≥95%

- **[정밀 착륙 지표]** 각 착륙 시도(i)마다 실제 착륙 위치와 목표 착륙 위치 간의 오차$(e_x,\ e_y,\ e_z\ )$를 계산

$$RMS_{3D} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(e_{x,i}^2 + e_{y,i}^2 + e_{z,i}^2)} \qquad \begin{cases} e_{x,i} = x_{actual,i} - x_{target} \\ e_{y,i} = y_{actual,i} - y_{target} \\ e_{z,i} = z_{actual,i} - z_{target} \end{cases}$$

- **[궤적 간섭 지표]** UAV간의 시간 t에 대한 순간 최소 분리 거리의 최솟값을 계산 $D_{AB}(t) = \sqrt{(x_A(t) - x_B(t))^2 + (y_A(t) - y_b(t))^2 + (z_A(t) - z_B(t))^2}$

$$D_{min,AB} = \min_{t\in[T_{start},T_{end}]}\{D_{AB}(t)\}$$

- **[임무 성공률 지표]** 각 임무 시도(j)의 성공 여부를 종합해 계산

$$Overall\ Mission\ Success\ Rate = \frac{\sum_{j=1}^{M} S_j}{M} \times 100\%, \qquad (\mathrm{M} = \text{임무시도횟수})$$

결론 및 향후 계획

- UAV-UGV 협동 군집 임무에서 발생하는 착륙 정밀도 저하, 궤적 간섭, 확장성 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 3단계 착륙 상태기계와 고도 분리/시간 슬롯 기반 충돌 회피 규칙을 포함한 제어 기법을 제안하였음
- 제안 기법의 검증을 위해 '이송-임무-회수-복귀' 절차를 포함하는 2:2 군집 시나리오를 정의함
- 향후 제안 기법의 범용성과 확장성을 추가 검증하기 위해, 3:3, 5:5 규모의 확장된 군집 시나리오 및 실외 환경에서의 반복적인 실증 실험을 수행하여 해당 제어 기법의 신뢰도를 검증할 예정임
- 본 연구의 결과는 향후 복잡한 실제 환경에서 다중 UAV-UGV 협동 임무를 수행하기 위한 군집 제어 시스템의 설계 및 최적화에 기여할 수 있을 것으로 기대됨