

미래항공모빌리티의 자율비행을 위한 안전항법시스템 연구

김가규, 백종찬, 이한섭, 이정호, 박주덕, 복윤수, 이문수, 임채덕

한국전자통신연구원

{ggkim, jcbaek, hanseob.lee, jh.lee86, zdpark, ysbok, mslee, cdlim}@etri.re.kr

Research on Safety Navigation System for AAM's Autonomous Flight

Kim Gague, Baek Jongchan, Lee Hanseob, Lee Jungho, Bok Yunsu, Lee Moonsoo, Lim Chaedeok

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)을 포함한 차세대 항공운송체계인 미래항공모빌리티(Advanced Air Mobility, AAM)는 자율비행 기술을 핵심 요소로 채택하고 있으며, 이에 따라 항공기의 안전하고 신뢰성 있는 항법시스템 개발이 필수적이다. 본 연구는 AAM 자율비행 환경에서의 안전성 확보를 위한 항법시스템의 구조와 핵심 기술 요소를 제안하고, 안전항법시스템의 연구 필요성과 기술적 방향성을 제시한다. 이를 위해 돌발 장애물을 회피하기 위한 비협력 객체 탐지/추적, 안정적인 항공통신을 제공하는 다중링크 통신, GNSS 이상상황에도 견고한 측위 정보를 제공하는 복합측위, 비전 AI 기반 정밀착륙, 안전 운항을 감시하는 실시간 원격 영상관제를 포함하는 AAM 자율비행 참조플랫폼을 개발하고, 이를 AAM 참조기체에 탑재하여 현장시험을 수행하였다. 그 결과, AAM 운항경로에서 마주할 수 있는 다양한 이상상황에서도 안전한 자율비행이 가능함을 확인하였고, 이를 통해 AAM의 실질적이고 종합적인 안전항법시스템으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

I. 서론

최근 전 세계적으로 교통 혼잡, 환경오염, 도심 내 물류 및 이동 수요 증가 등의 문제 해결을 위한 대안으로 도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM) 및 이를 확장한 미래항공모빌리티(Advanced Air Mobility, AAM) 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. AAM은 저고도 공역을 활용한 전기추진 수직이착륙(eVTOL) 기체 기반의 새로운 항공운송체계로, 기체의 자율비행 능력은 전체 운용 효율성과 안전성에 직결되는 핵심 요소로 인식되고 있다. 이에 따라, 인간 조종자의 개입 없이도 안전하고 신뢰성 있게 항로를 따라 비행할 수 있는 고도화된 항법시스템의 개발이 필수적이다[1].

AAM 기체는 복잡한 도심 환경에서 비정형 장애물, 통신 불안정, GNSS 수신 불가, 복잡한 착륙 조건 등 다양한 위험 요소에 노출된다. 그러나 기존의 항공 항법 기술은 전통적 공항 기반, 고고도 항로 운항을 전제로 설계되어 있어, AAM 운항 환경에서는 제한적인 적용만 가능하다. 이에 따라, AAM 특화 안전 항법 기술의 새로운 프레임워크 개발이 요구되고 있다.

특히, (1) 예기치 않은 장애물이나 비행체와 충돌을 방지하기 위한 비협력 객체 탐지 및 추적, (2) 도심 내 통신 인프라 변화에도 끊김 없는 데이터 전송을 보장하는 다중링크 기반의 안정적 항공통신, (3) GNSS(Global Navigation Satellite System) 이상 또는 장애 발생 시에도 위치 정확성을 유지할 수 있는 복합측위, (4) 도심 환경에서의 정밀한 착륙을 위한 비전 AI 기반 착륙, (5) 도심 상공에서의 운항 모니터링과 이상상황 대응을 위한 실시간 원격 영상관제 기술 등은 AAM 자율운항을 위한 핵심 항법 기능으로 부상하고 있다.

이에 본 논문에서는 상기 기술들을 통합한 AAM 자율비행 안전항법시스템 참조플랫폼을 설계하고, 이를 실제 AAM 참조기체에 탑재하여 현장 실증시험을 수행함으로써 기술의 안정성과 실효성을 검증하고자 한다. 제안하는 시스템은 다양한 이상상황 시나리오에서도 자율비행 안전성을 확보할 수 있도록 설계되었으며, 이를 통해 미래 AAM 운용 환경에 적합한 종합적인 안전항법시스템 개발 방향을 제시하고자 한다.

II. 본론

AAM 자율비행 안전항법시스템은 복잡한 도심 운항환경에서 마주할 수 있는 다양한 비정상 비행 유발조건에서도 안전하게 비행이 가능하도록 개발되어야 한다. 이를 위해 그림 1과 같은 기술개발 개념도에 따라 표 1 같은 5가지 핵심 기술과 성능목표를 도출하였다.

표 1. 핵심기술 및 성능목표

핵심기술명	성능목표	검증방법
비협력 객체 탐지/추적	90% 이상	상공 비행 영상 획득을 통해 비협력적 기체의 탐지 정확도 측정
면허대역 기반 다중링크 통신	600m 이상	UAM 운항고도 300~600m에서 PER* ≤ 10-3 확인
복합 정밀측위	-	-
비전 AI 기반 정밀착륙	30cm 이하	20m 고도에서 랜딩마커를 탐지하여 정밀착륙 후 오차 측정
실시간 원격 영상관제	-	-

*PER: Packet Error Rate

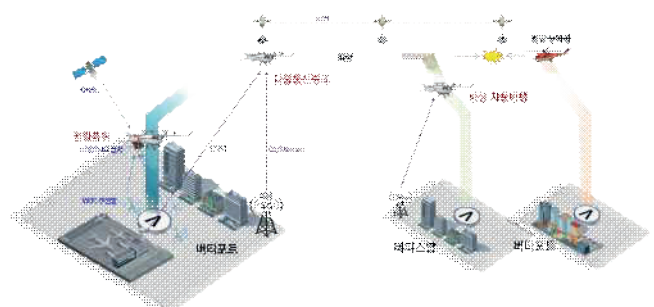


그림 1. AAM 자율비행 안전항법시스템 기술개발 개념도[2]

※ GNSS: Global Navigation Satellite System, NTN: Non-Terrestrial Network, C2: Command and Control, IMU: Inertial Measurement Unit

2.1 비협력 객체 탐지/추적

먼저 다양한 실험환경을 구성하여 탐지 대상 객체 대한 카메라 영상을 취득하고 양질의 데이터에 대해 학습 데이터셋을 구축한다[4]. 학습데이터는 Airborne, Airplane, Helicopter와 같이 총 3개 클래스로 나뉘지며, 탐지 및 추적 학습모델은 각각 YOLOv10과 BoT-SORT 알고리즘을 사용하였다. 학습 결과 평가 데이터셋 기준 정밀도(Precision) 0.94, 재현율(Recall) 0.93, 정확도 (mAP50) 97.148% 를 달성하였다. 온디바이스 AI 기반의 추론을 위해 탐지/추적 모델은 TensorRT 기반의 FP16 모델로 경량화한 뒤, Triton Server를 통해 온디맨드 서비스 방식으로 AAM 참조기체 내 임무장비 MC(Jetson Orin AGX)에서 운용된다. 그림 2는 AAM 참조기체가 상공에서 비행하는 동안 원격 지상관제실에서 실시간으로 수신한 AI 탐지 결과 영상이며, 원거리에 있는 드론 객체를 정확히 탐지하는 모습을 보여주고 있다.



그림 2. 비협력 객체 탐지/추적 결과 영상 스냅샷[3]

2.2 면허대역 기반 다중링크 통신

AAM 운항경로에서 통신 품질 기반으로 이음 5G와 C대역을 선택적으로 스위칭하는 다중링크 통신 모듈을 개발하였다. 다중링크 통신 모듈은 AAM 참조기체와 원격 지상관제 시스템에 각각 탑재되는데, AAM 참조기체에 탑재되는 통신모듈 내 SBC-CCU(Single Board Computer-Communication Control Unit)는 이음 5G 통신과 C대역 통신의 품질을 측정하기 위해 RSRP(Reference Signal Receive Power)와 SINR(Signal - to - interference-plus-noise ratio)을 이용한다.[5]

통신 품질에 따라 이음 5G와 C대역이 자동적으로 스위칭되는지에 대한 테스트를 위해 통신 품질을 인위적으로 조절할 수 있는 실험환경이 필요하다. 그래서 지상 실험실 환경에서 이음 5G 통신 품질을 떨어뜨리기 위해 이음 5G 통신장치에 부착된 안테나를 알루미늄 케이스 안에 넣어서 외부와 차단시키는 실험을 반복해서 수행하였다. 실험결과, 그림 3과 같이 이음 5G 통신 품질이 저하되는 시점에서 C대역 통신으로 스위칭되고, 반대로 이음 5G 통신 품질이 높아지는 시점에서는 다시 이음 5G 통신으로 스위칭되면서 안정적으로 영상 패킷이 전송됨을 확인하였다. 다음으로, 다중링크 통신모듈을 탑재한 AAM 기체가 상공을 비행하는 동안 이음 5G와 C대역이 스위칭되면서 안정적으로 영상이 전송되는지에 대한 테스트가 필요하다. 상공의 경우 지상과 달리 통신 품질을 인위적으로 조절할 수 없기 때문에 고도에 따라 강제적으로 스위칭하는 시나리오를 바탕으로 실험하였다.

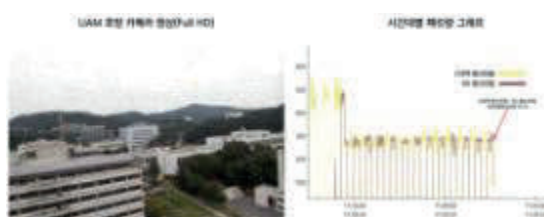


그림 3. 다중링크 통신모듈의 통신 스위칭 기능 실험[2]

AAM 참조기체에 3대의 카메라를 장착하고 정면 카메라 영상만 다중링크 통신모듈을 거치도록 하고, 이륙 후 100m 고도에 이르면 강제적으로 C대역 통신으로 스위칭하도록 시나리오를 구성하였다. 착륙 시 100m 고도까지 낮아지면 반대로 이음 5G 통신으로 스위칭한다. 그림 4(a)에서는 이륙 후 100m 고도에 이르기 전에 3대의 카메라로부터 원격 지상관제 시스템으로 전송한 영상을 보여주고 있는데, 고해상도의 영상이 안정적으로 전송됨을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 100m 이상 고도에서 대역폭이 작은 C대역 통신으로 스위칭된 후 정면 카메라 영상(가운데 영상)이 저해상도로 전송되고 있음을 확인할 수 있다. 측면 카메라 영상은 C대역 통신의 작은 대역폭 때문에 차단하도록 설정하였다. 이때도 마찬가지로 정면 카메라 영상이 안정적으로 전송되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 100m 고도에 이르기 전



(a) 100m 이상 고도에서

그림 4. 다중링크 통신모듈 기능 시험 (원격 지상관제 영상 스냅샷)

2.3 복합 정밀측위

AAM에서의 항법 기능을 위한 가장 기본적인 센서에는 GNSS(Global Navigation Satellite System)와 INS(Inertial Navigation System)가 있다[6]. 그러나 AAM의 항법 기능이 도심환경에서 끊김없이(Seamless) 이루어지기 위해서는 GNSS 신호의 세기 감소로 인한 GNSS 기능 저하 또는 불능과 같은 상황에 대한 대처방안이 필요하다. 복잡한 도심 상공 비행 시 GNSS 신호가 불안정한 상황은 높은 건물, 복잡한 지형, 전파간섭, 외부 구조물에 의한 신호 차단 등으로 인해 발생한다. 고고도 운항 중에도 우주 날씨 등의 영향으로 GNSS 항법 오차가 발생할 수 있다[1].

본 논문에서는 GNSS 이상상황에서도 안전한 착륙을 보장하기 위해 그림 5와 같이 고도별로 두가지의 복합측위 시스템을 제공한다.

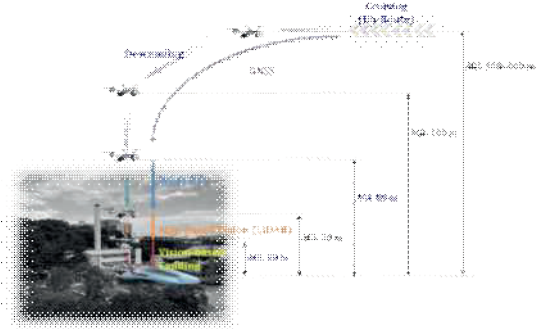


그림 5. 고도별 복합측위 시스템 설계

가장 가까운 버티포트를 찾아서 착륙을 시도하려는 과정에서 고도 80m까지 내려오게 되면 GNSS와 함께 Wi-Fi RTT 기반 적응형 3D 모듈에서 측위 정보를 제공한다. Wi-Fi RTT 기반 적응형 3D 모듈은 AAM의 이착륙시 측

위 가용성과 정확도를 향상시키기 위해, 버티포트 상공 내 측위용 데이터베이스 존재 여부에 따라 삼변측량 또는 Particle Filter 기반 측위 기술을 선택적으로 활용한다. 측위용 데이터베이스가 없으면, 버티포트 주변에 설치된 4개 이상의 Wi-Fi AP(Access Point)와 측위 모듈 간의 RTT(Round Trip Time) 정보를 활용하여 삼변측량 기법을 기반으로 측위정보를 제공한다. 측위용 데이터베이스가 존재할 경우, Wi-Fi 신호 RSS(Received Signal Strength) 및 RTT 정보를 활용한 Particle Filter를 기반으로 측위 정보를 제공한다. 이와 같이, Wi-Fi RTT 기반 적응형 3D 측위 기술은 위 두 기술을 상황에 따라 적응적으로 활용함으로써 측위 가용성 및 정확도를 향상시켜 고도 80m ~ 30m까지 1m 정확도의 측위정보를 제공한다.

AAM이 30m까지 내려오면 라이다 및 3D 지도 기반 다중거리 모델 측위 모듈이 50cm 이내의 오차로 측위 정보를 제공하게 된다. 이 모듈의 핵심은 실제 라이다 데이터와 가장 유사한 패턴을 보이는 위치를 지도상에서 찾는 것이다. 우선 라이다의 스캔 데이터로부터 거리 정보를 샘플링하는데, 다양한 고도에 대비하기 위해 여러 층의 정보를 추출한다. 다음에는 미리 준비한 현장 지도의 비교 대상 위치로부터 가상의 거리 정보를 추출한다. 이때에도 건물의 높이를 고려하여 여러 개의 거리를 모두 저장한다. 두 거리 정보를 비교할 때, 기체가 회전되어 있을 가능성을 고려하여 각도 방향으로 이동시키면서 비교하여 가장 유사할 때의 각도와 거리 차이를 기록한다. 이 작업을 지도상의 검색 영역 내 모든 점에서 수행하고, 가장 거리 차이가 작은 지점을 측위 결과로 출력한다. 이 모듈은 25cm 해상도의 지도를 사용하여 50cm 정확도의 측위 결과를 제공한다.

2.4 비전 AI 기반 정밀착륙

AAM이 20m 이내의 고도로 진입하게 되면 단안 카메라와 1D 라이다 기반의 정밀착륙 시스템이 동작한다. 단안 카메라로부터 찍은 영상에서 비전 AI 기반으로 버티포트의 착륙마커를 인식하고 카메라의 파라미터를 통해 영상에서 탐지된 위치를 실제 위치로 변환하는 Geo-Location 기법을 사용한다. 이미지 기하학에서 가장 중요한 요소는 바로 Scale Factor인데 이는 1D 라이다를 사용하여 카메라와 마커 사이의 거리를 직접적으로 측정함으로써 정밀한 위치 추정이 가능해진다. 본 논문에서 개발한 모듈을 AAM 참조기체에 탑재하여 현장실험을 수행한 결과 28cm 이내의 착륙오차를 달성하였다. AAM 참조기체 내 MC가 온디바이스 AI 기반으로 버티포트의 착륙마커를 인식한 결과는 그림 5와 같이 원격 지상관제 시스템에서 실시간으로 확인할 수 있다.



그림 5. 비전 AI 기반 정밀착륙 실험 영상 스냅샷

2.5 실시간 원격 영상관제

AAM의 안전성 확보, 운항 효율 향상, 상황인지 및 대응 능력 강화를 위해서는 실시간으로 모니터링이 가능한 원격 지상관제 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 제어 및 임무대역의 안정적인 다중링크 통신을 기반으로 비협력 객체 탐지/추적, 통신상태 모니터링, 이착륙 멀티뷰, 복합측위, 비전 AI 기반 정밀착륙 활동을 실시간으로 모니터링할 수 있는 원격 영상관제 시스템을 개발하였다. 그림 6은 지상 영상관제 시스템에서 보여지는 화면의

일부로서 실시간 영상 데이터를 기반으로 안전하게 AAM 운항을 감시할 수 있게 된다.

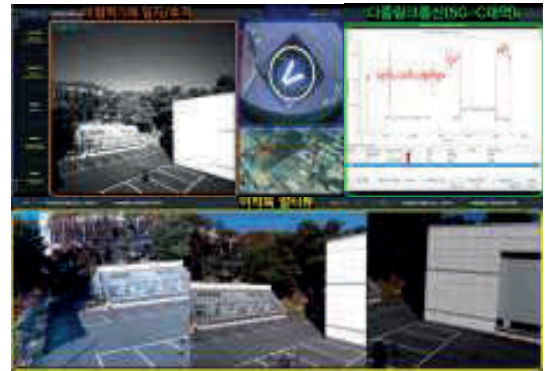


그림 6. 실시간 원격 영상관제 시스템 스냅샷

III. 결론

본 연구에서는 AAM의 자율운항을 위한 핵심 항법기능을 통합한 안전항법시스템 참조플랫폼을 설계하고, 실제 AAM 참조기체에 적용하여 일반적인 도심 시나리오 기반의 실증시험을 수행하였다. 제안한 시스템은 비협력 객체 탐지 및 추적, 다중링크 기반 항공통신, 복합측위, 비전 AI 기반 정밀착륙, 실시간 원격 영상관제 등 총 5가지 핵심 기능을 유기적으로 결합함으로써, 도심 내 복잡하고 불확실한 환경에서도 높은 수준의 자율비행 안전성을 확보할 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

실증 결과, 각 구성 기술은 단독 성능뿐 아니라 통합 운용 시에도 높은 안정성과 신뢰성을 유지하였으며, 특히 GNSS 장애나 통신 불안정 등 이상 상황 시나리오에서도 시스템 전체가 효과적으로 대응하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존 항법 체계로는 대응하기 어려운 AAM 특화 위험 요소들에 대해 실질적인 기술적 대안으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 ETRI 내부사업 재원으로 수행한 “편리하고 건강한 미래세상을 구현하는 디지털융합 첨단기술 개발 - 미래 에어모빌리티와 첨단 바이오” 과제의 지원을 받아 수행되었음(과제번호: 24BR1500).

참 고 문 헌

- [1] 오봉진 외 5인, “Advanced Air Mobility ICT 기술 현황 및 발전 방향”, 전자통신동향분석, Vol. 38, No. 3, 2023.06.
- [2] 김가규 외 5인, “도심항공교통을 위한 다중링크 기반 최적 통신 제어 및 정합 시스템”, 제26회 전자정보통신 학술대회, 2024.12.
- [3] 김가규 외 3인, “비협력 객체 탐지/추적을 위한 온디바이스 AI 기술”, The 20th IEMEK Symposium on Embedded Technology (ISET2025), 2025.5.
- [4] 김가규 외 3인, “도심항공 모빌리티를 위한 비협력 객체 탐지/추적 기술”, 2025년도 한국통신학회 동계종합학술발표회, 2025.2.
- [5] 양정기 외 1인, “A2G 통신을 위한 C대역/이음5G 다중링크 통신 제어 모듈 구현”, 한국항공우주학회 학술발표회 초록집, 2024, pp.1131-1132.
- [6] V. Stepanyan et al., “Adaptive multi-sensor information fusion for autonomous urban air mobility operations,” in Proc. AIAA Scitech Forum, (Virtual Event), Jan. 2021.