

노지 농업 정밀 주행을 위한 레이더 및 엣지 AI 기반 자율비행 드론 시스템 설계

임상민, 여현, 이명훈*

*국립순천대학교

sangmin9642@gmail.com, yhyun@scnu.ac.kr, *leemh777@scnu.ac.kr

Design of an autonomous drone system based on radar and edge AI for precision driving in open-field agriculture

Lim Sang Min, Yoe Hyun, Lee Meong Hun*

*Sunchon National Univ.

요약

본 연구는 스마트 노지 농업 환경에서 자율비행 드론의 실현을 목표로, mmWave 레이더와 RGB/IR 카메라, IMU, 초음파 센서를 융합한 360도 환경 인식 기반의 센서 플랫폼과 Jetson Xavier NX를 활용한 엣지 AI 연산 구조를 통합 설계하였다. 객체 인식(YOLOv5), 강화학습 기반 회피 판단(PPO), 경로 제어(MPC) 기능을 ROS2 기반 분산 노드로 구현하였으며, 센서 입력부터 판단·제어 명령 생성까지 전 과정을 기체 내부에서 실시간으로 완결할 수 있도록 구성하였다. 또한 통신 이중화, 전원 관리 계층 등 안정성 확보를 위한 하드웨어 최적화도 병행하였으며, 제안된 시스템은 향후 생육 모니터링, 병해충 진단, 정밀 방제 등 다양한 노지 농업 작업에 실용적으로 적용 가능한 자율운항 기반 기술로서 활용될 수 있다.

I. 서론

4차 산업혁명 기술의 급속한 진화는 농업의 구조와 운영 방식을 근본적으로 변화시키고 있다. 특히 무인이동체(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)는 스마트 노지 농업 분야에서 과종, 생육 모니터링, 병해충 탐지, 정밀 방제, 수확 예측 등 다양한 작업에 적용되며 다목적 기술 플랫폼으로 빠르게 자리 잡고 있다. 인공지능(AI), 자율주행, 센서 융합 기술의 발전과 함께 UAV는 단순한 원격 조종 장비를 넘어, 작물과 토양의 상태를 스스로 인식하고 판단하여 작업을 수행하는 자율운용 시스템으로 진화하고 있다.[1-2]

이러한 기술적 진보는 드론이 광범위한 농지, GPS 음영 지역, 기상 변화가 심한 노지 환경 등에서도 안정적으로 운용될 수 있도록 한다. 예를 들어, 잡초 감지 후 정밀 제초제 살포, 작물 이상 생육 구역의 실시간 탐지 및 지도화, 장거리 자동 순찰을 통한 농작물 생육 관리 등은 UAV의 고도화된 자율 비행과 실시간 데이터 분석 기능을 통해 가능해지고 있다.[3-5]

그러나 기존 드론의 자율비행 기술은 대부분 GPS 기반 항법과 비전 센서 기반 인식 기술에 의존하고 있다. GPS 신호 불안정, 카메라 센서의 민감성, 통신 지연 문제 등은 비정형적인 노지 농업 환경에서 UAV의 신뢰성과 운용 유연성을 제한하는 요소로 작용한다. 이러한 한계는 드론 기반 농작업의 완전 자동화를 저해하는 주요 요인이며, 다양한 환경 조건에서도 정밀 인식, 판단, 자율작업이 가능한 고신뢰성 UAV 플랫폼이 필요하다.[6-7]

II. 본론

본 연구는 기존 자율비행 드론 시스템의 구조적 한계를 극복하고, 다양한 노지 농업 환경에서 드론이 스스로 인식하고 판단하며 안정적으로 비행할 수 있는 자율운용 플랫폼을 설계하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 360도 레이더 센서를 기반으로 한 전방위 환경 인식 기술과, 엣지 AI 기반의 현장 중심 실시간 판단 및 제어 기술을 통합함으로써, 넓고 복잡한 노지 환경에서도 고신뢰 자율비행이 가능한 스마트 농업용 드론 시스템을 구현하고자 한다.

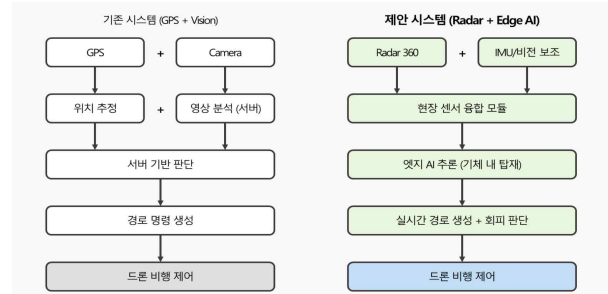


그림 1. 기존 시스템과 제안 시스템 비교

Fig 1. Comparison of existing and proposed systems

본 시스템은 스마트 노지 농업 환경에서의 자율작업 임무 수행을 목표로, 센서 계층, 연산 계층, 제어 계층, 통신 계층, 전원 관리 계층 등으로 구성된 통합형 엣지 AI 기반 하드웨어 플랫폼을 설계하였다. 각 계층은 기능적으로 모듈화되어 있으며, 기체 내부 공간에 최적화되도록 배치되어 농업용 드론의 소형·경량화 요구에도 부합하도록 구성되었다. 아래 그림 2는 전체 하드웨어 구성 요소 간의 데이터 흐름 및 인터페이스 구조를 도식화한 블록 다이어그램이다.

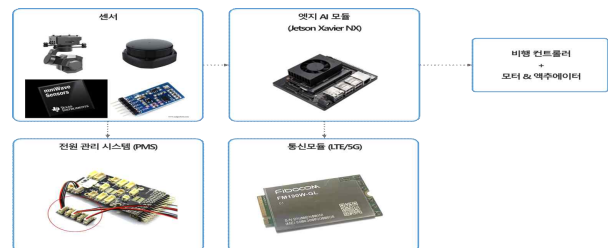


그림 2. 하드웨어 시스템 구성도

Fig 2. Hardware System Configuration Diagram

시스템의 최상위 계층은 다양한 환경 정보를 실시간으로 수집하는 센

서 계층으로 구성된다. 주요 구성에는 mmWave 레이더, RGB 카메라, IR 카메라, IMU, 초음파 센서 등이 포함되며, 이들은 주변 객체 인식, 거리 측정, 자세 추정, 열원 감지 등의 역할을 수행한다. 모든 센서 신호는 중앙 연산 장치로 전송되며, 이때 센서 노이즈 저감을 위한 하드웨어 필터링과 초기 동기화 처리가 병행된다. 센서에서 취득된 데이터는 Edge AI 모듈로 전달된다. 본 시스템에서는 NVIDIA Jetson Xavier NX를 사용하여 객체 탐지(YOLOv5), 위치 추정(SLAM), 장애물 회피 판단(RL 기반), 비행 제어 명령 생성(MPC 기반)을 실시간으로 처리한다. 연산 모듈은 ROS2 기반 미들웨어 구조를 채택하였으며, 각 기능은 노드 단위로 분산 실행되어 모듈 간 독립성과 유지보수성이 높다.

본 시스템의 자율비행 판단 구조는 다중 센서 기반의 농지 환경 인식을 출발점으로 하여, 실시간 판단 및 제어 명령 생성을 기체 내부 엣지 연산 장치에서 완결하는 구조로 설계되었다. 전체 데이터 처리 흐름은 “센서 입력 → 데이터 전처리 → 객체 인식 및 위치 추정 → 센서 융합 → AI 기반 판단 추론 → 경로 생성 → 제어 명령 송출”의 순서를 따르며, 각 단계는 ROS2 기반 모듈로 구성되어 독립적으로 실행된다. 이 구조는 농지 농업에서 흔히 발생하는 변수, 예를 들어 작물 간 격차, 이동 장애물(작업자, 농기계 등), 바람 등 외란 요소에 유연하게 대응할 수 있도록 설계되었다. 특히 각 단계는 상호 간의 실시간 데이터 흐름과 판단 결과의 전파를 고려해 설계되어, 누적 지연 없이 연속적인 자율작업이 가능하다. 아래 그림 3은 이러한 흐름을 시각화한 센서 융합 및 제어 흐름도로서, 각 처리 단계 간의 데이터 이동 및 의사결정 과정의 연계를 블록 구조로 나타낸 것이다. 이 흐름도는 센서 계층에서 시작된 데이터가 연산 계층을 거쳐 제어 계층으로 전달되며, 실시간 자율비행과 경로 재구성, 장애물 회피, 미션 수행을 어떻게 실현하는지를 직관적으로 보여준다.

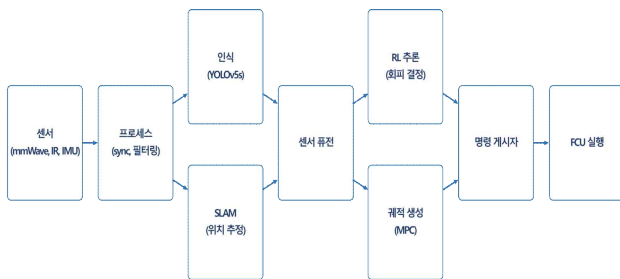


그림 3. 센서 융합 및 자율제어 흐름도

Fig 3. Sensor fusion and autonomous control flow chart

전체 판단 구조는 센서 신뢰도 저하, 통신 지연, 발열 등에 의한 일시적 오류 상황에서도 루프 유지가 가능하도록 자율성과 복원성을 확보한 구조이며, 이는 엣지 AI 기반 드론 시스템에서 통신 독립성과 판단 연속성을 동시에 확보하는 데 핵심적인 역할을 수행한다.

III. 결론

본 연구는 스마트 농지 농업 환경에서 자율비행 드론의 핵심 기술 구현을 목적으로, 360도 환경 인식이 가능한 mmWave 기반 레이더 센서와 고속 연산이 가능한 엣지 AI 플랫폼을 통합한 자율운항 구조를 설계하였다. 기존 농업용 드론이 가지고 있던 GPS 의존성, 외부 연산 기반 판단 구조, 농지의 비정형 환경에서 발생하는 인식 불안정성, 통신 단절 시 제어 실패 등의 한계를 극복하고자, 모든 판단과 제어 과정을 기체 내부에서 자율적으로 처리할 수 있는 구조를 중심으로 플랫폼을 구성하였다.

제안된 시스템은 mmWave 레이더, RGB/IR 카메라, IMU, 초음파 센서 등을 융합하여 실시간 농지 환경 정보를 수집하고, 객체 인식

(YOLOv5), 회피 판단(PPO 기반 강화학습), 경로 제어(MPC)를 Jetson Xavier NX 기반 엣지 AI 장치에서 병렬적으로 수행할 수 있도록 설계되었다. 각 연산 기능은 ROS2 기반의 분산 노드 구조로 모듈화되어 있으며, 우선순위 스케줄링과 QoS 기반 메시지 처리를 통해 연산 병목과 자원 충돌 가능성을 줄이고 실시간성을 확보하였다. 또한, 통신 이중화 구조와 전원 관리 계층 설계를 통해 외란 환경과 긴 작동 시간에도 안정성을 유지할 수 있다.

이와 같이 설계된 자율비행 구조는 향후 농지 환경에서의 작물 생육 모니터링, 병해충 진단, 정밀 방제, 작업 자동화 등의 농업 분야에 적용될 수 있는 기술적 기반을 제공하며, 후속 연구를 통해 실증 테스트와 다기체 협업, 경량화 모델 적용 등의 방향으로 확장될 수 있다. 본 연구에서 제안한 통합 자율운항 구조는 스마트 농지 농업 드론의 실용화를 위한 필수 설계 기술로서, 차세대 농업 자동화 시스템의 핵심 인프라로 자리매김할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화 혁신인재양성(Grand ICT연구센터) 사업의 연구결과로 수행되었음”(IITP-2025-2020-0-01489)

참 고 문 헌

- [1] 김병성. (2018). 충돌회피 자율 비행을 위한 드론용 초소형 3차원 레이더 센서 개발. 성균관대학교, 미래창조과학부 연구보고서.
- [2] 구분태, 박필재, & 한선호. (2021). 지능형 레이더 기술 동향. 전자통신동향분석, 36(2), 12-21.
- [3] 이새미, 문민정, 천형일, & 이우경. (2021). 군집 비행 드론의 충돌 방지를 위한 UWB 레이더의 속도 감응형 CFAR 최적화 연구. 한국정보통신학회논문지, 25(3), 477-486.
- [4] Han, S.-K., Lee, J.-H., & Jung, Y.-H. (2024). Convolutional neural network-based drone detection and classification using overlaid FMCW rangeÓDoppler images. Sensors, 24(17), 5805.
- [5] Lee, H., Han, S., Byeon, J., Han, S., Myung, R., Joung, J., & Choi, J. (2023). CNN-based UAV detection and classification using sensor fusion. IEEE Access, 11, 68791-68808.
- [6] 허건수, 이성수, & 박세훈. (2020). 드론 탐지 레이더와 카메라 센서 융합 기술 연구. 한국항공우주학회지, 48(7), 597-606.
- [7] 홍유경, 김유경, 김수성, 이희수, & 차지훈. (2019). 무인 비행체의 환경 인지 및 경로 계획 연구동향. 전자통신동향분석, 34(3), 43-54.