

산불 화재 확산 예측 기반 자율 드론 소화탄 투하 시스템 설계

한경태, 김성식, 신수용*

국립금오공과대학교 전자공학부 학부생

*국립금오공과대학교 IT융복합공학과 교수

20191221@kumoh.ac.kr, kss6119@naver.com

wdragon@kumoh.ac.kr

Design of an Autonomous Drone Fire-Extinguishing Bomb Dropping System Based on Wildfire Spread Prediction

Han Gyeong Tae, Kim Seong Sik, Shin Soo Young*

Kumoh National Institute of Technology, Department of Electronic Engineering

*Kumoh National Institute of Technology, Department of IT Convergence Engineering

요약

본 연구는 산불 발생 시 드론을 활용하여 화재의 확산 방향을 실시간으로 예측하고, 예측 지점에 소화탄을 선제적으로 투하함으로써 피해를 최소화할 수 있는 자율 소화 시스템을 제안한다. 화염 인식에는 YOLO 기반의 딥러닝 모델을 활용하여 카메라 영상에서 화재를 탐지하고, 풍향 데이터를 결합한 Farneback Optical Flow 기법을 통해 확산 방향을 실시간으로 예측한다. 드론은 예측된 지점으로 자율 비행하며, Tarot TL2961-03 서보 모터 기반의 릴리즈 모듈을 통해 투척형 소화탄을 정밀하게 낙하시킨다. 드론의 임무 수행은 ROS 2 Humble와 QGroundControl 기반의 자동 임무 시스템으로 구현되었으며, 전체 시스템은 모듈 간 연동 구조를 통해 다양한 환경에서도 유연하게 적용 가능하도록 설계되었다. 본 시스템은 기존 산불 대응 방식에 비해 보다 선제적이고 능동적인 대응이 가능하며, 확장성과 실용성 측면에서도 효과적인 UAV 기반 화재 대응 방안을 제시한다.

I. 서론

최근 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)는 재난 대응, 군사 작전, 산업 물류 등 여러 분야에서 많이 활용되고 있다. 특히 드론을 활용한 임무 자동화 기술은 빠르게 발전하고 있다. 기존의 산불 대응 드론 시스템은 주로 사전에 설정된 고정 좌표로 이동하거나 GPS 기반으로 소화 장비를 투하하는 방식이 대부분이었으나, 화재의 확산 특성을 반영한 실시간 능동적 대응에는 한계가 존재한다. 실제 산불은 바람, 지형, 온도 등 다양한 환경 요소에 따라 확산 방향이 급변하기 때문에, 정적인 투하 방식만으로는 효과적인 진화를 기대하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 YOLO 기반의 화염 인식 딥러닝 모델과 풍향 데이터를 결합한 산불 확산 방향 예측 알고리즘을 통해 드론이 예측 지점에 자율적으로 소화탄을 투하하는 시스템을 설계하였다. 화재 인식에는 영상 기반 인공지능 모델을 적용하고, 드론 제어는 ROS 2 Humble와 QGroundControl 기반의 자율 임무 수행 시스템으로 구현하였다. 또한 투하 장치에는 Tarot TL2961-03 서보 모터 기반 릴리즈 모듈을 적용하여 예측 위치에 정밀한 소화탄 투하가 가능하도록 하였다. 본 시스템은 일반적인 UAV 시스템과 달리 화재 확산 방향을 실시간 예측하여 대응하는 선제적 대응 구조를 갖추고 있으며, 이를 통해서 이전 방식보다 신속하고 정밀한 산불 대응의 가능성을 제시하고자 한다.

II. 본론

YOLOv8을 이용한 화재 인식

실시간 객체를 탐지해주는 알고리즘으로 YOLO(You Only Look Once)를 활용하여 화염을 탐지하였다. YOLO 버전 중에서 최신 버전인 YOLOv8을 사용하였다. YOLOv8은 CNN 기반의 경량화된 구조와 향상된 탐지 정확도를 갖추고 있어, 실시간 영상 처리에 적합하다. 본 시스템에서는 노트북 기반의 연산 환경에서 YOLOv8 모델을 구동하였으며, 드론에 수직 방향으로 장착된 카메라의 입력 영상을 통해 산불 화염을 탐지한다. YOLOv8은 영상 내 화염 영역을 바운딩 박스로 표시하며, 해당 박스의 중

심 좌표를 추출하여 드론과 화염 간의 상대 위치 정보를 산출하는 데 활용한다. 이를 통해 이후 화재 확산 방향 예측 및 자율 투하 경로 계산의 기초 데이터를 제공한다.



그림 1 YOLOv8 모델을 통한 산불 화재 탐지 결과 (실시간 영상 탐지)

산불 화재 확산 방향 예측 알고리즘

산불 화염의 확산 방향을 예측하기 위해, 본 시스템에서는 영상 기반의 Optical Flow 분석과 풍향 센서 데이터를 융합하는 알고리즘을 적용하였다. Optical Flow는 시간에 따라 변화하는 연속된 이미지 프레임에서의 픽셀 이동량을 벡터 형태로 계산하는 기법으로, 화염이 퍼지는 주 방향을 추정할 수 있다.

영상 내 픽셀 밝기 $I(x,y,t)$ 는 시간 t 가 변함에 따라 다음과 같은 밝기 보존 조건을 만족한다:

$$I(x, y, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$$

이를 테일러 전개하여 미분 형태로 나타내면, Optical Flow 기본 방정식

은 다음과 같이 표현된다:

$$\frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v + \frac{\partial I}{\partial t} = 0$$

여기서 u, v 는 x, y 방향의 화염 이동 속도(벡터)이며, 해당 벡터들의 평균값은 화염이 이동하는 주된 방향을 나타낸다.

이렇게 계산된 평균 Optical Flow 방향 벡터 \vec{d}_{flow} 에, 풍향 센서로부터 수집된 바람 방향 벡터 \vec{d}_{wind} 를 융합함으로써, 실제 화재의 확산 방향을 보다 정밀하게 예측할 수 있다. 최종 확산 방향 벡터 \vec{d}_{final} 은 아래의 가중 평균 수식으로 정의된다:

$$\vec{d}_{final} = \alpha \cdot \vec{d}_{flow} + (1 - \alpha) \cdot \vec{d}_{wind}$$

여기서 α 는 두 데이터의 신뢰도에 따라 설정되는 가중치로, 실험에서는 0.6 ~ 0.8 사이로 설정하였다.

자율 비행 드론 및 소화탄 투하 시스템 구성

1. 자율 비행 드론 경로 설정 및 임무 수행

본 연구의 드론 제어는 ROS 2 Humble과 QGroundControl(QGC) 기반으로 구현되었다. QGC는 PX4 비행 컨트롤러와 연동되는 오픈소스 지상관제 시스템(GCS)으로, 사용자 친화적인 UI를 통해 비행 경로(웨이포인트) 설정, 임무 계획 및 실시간 모니터링이 가능하다.

드론은 산불 확산 방향 예측 알고리즘에서 산출된 목표 지점을 기준으로 자동 비행 경로를 생성하며, ROS 2 노드가 QGC로 명령을 전송하여 자율 비행을 수행한다. 이를 통해 사람이 직접 조종하지 않고도 실시간 예측된 화재 확산 방향으로 효율적이고 신속하게 이동할 수 있다.

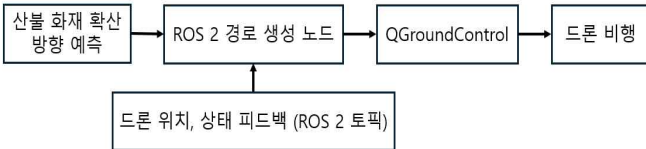


그림 2 자율 비행 임무 설정의 전체 흐름도

- 입력: 확산 방향 예측 벡터 및 목표 좌표
- 처리: ROS 2 노드에서 미션 생성 및 QGC에 전송
- 출력: 드론의 자동 경로 비행 및 실시간 위치 피드백

2. 소화탄 투하 장치 및 제어

투하 장치는 Tarot TL2961-03 서보 모터 기반 릴리즈 모듈로 구성하였다. 서보 모터는 ROS 2 노드와 연동되어, 미션 목표점 도달 시 정밀하게 소화탄을 투하할 수 있도록 작동한다.



그림 3 서보 모터 제어 신호 흐름도

서보 모터 제어는 퍼블리셔-서브스크라이버(publisher-subscriber) 구조로 구현되었다. ROS 2 퍼블리셔 노드가 투하 명령 메시지를 발행하면, 서브스크라이버 노드가 이를 수신하여 서보 모터를 제어한다.

3. 시스템 통합 및 확장성

본 시스템은 ROS 2의 모듈화된 구조를 활용하여, 화재 인식, 확산 예측, 자율 비행, 투하 제어 모듈이 유기적으로 연동되도록 설계되었다.



그림 4 모듈 간 데이터 흐름 및 통신 구조

모듈 간 데이터 흐름과 통신 구조를 나타내며, 각 기능이 독립적으로 동작하면서도 긴밀하게 협력함을 보여준다. 이러한 통신 아키텍처는 유지보수와 기능 확장에 용이하며, 다양한 환경과 상황에 맞추어 유연성있게 적용 가능하다.

III. 결론

본 연구에서는 자율 비행 드론과 ROS 2 기반의 통합 시스템을 활용하여, 산불 화염의 실시간 인식과 확산 방향 예측, 그리고 예측 지점에 대한 정밀한 소화탄 투하를 수행할 수 있는 시스템을 설계하고 구현하였다. YOLOv8 기반의 딥러닝 모델로 화염을 정확히 탐지하고, Farneback Optical Flow와 풍향 센서 데이터를 융합한 확산 방향 예측 알고리즘을 적용하여, 드론이 실시간으로 변화하는 화재 상황에 능동적으로 대응할 수 있도록 하였다. 또한, QGroundControl을 이용한 자율 임무 수행과 Tarot TL2961-03 서보 모터 기반 릴리즈 모듈을 통한 정밀한 소화탄 투하를 성공적으로 구현하였다. 본 시스템은 기존의 고정 좌표 기반 투하 방식과 달리 실시간 데이터 기반의 선제적 대응이 가능하며, ROS 2의 모듈화된 구조로 다양한 환경에서 유연성을 적용할 수 있는 확장성을 갖추었다. 향후에는 보다 다양한 기상 조건과 환경 변화를 고려한 알고리즘 개선과, 실제 야외 환경에서의 실증 실험을 통해 시스템의 실용성을 더욱 향상시키고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 정보통신기술기획평가원(IITP)이 주관하는 ITRC(정보기술연구센터) 지원 프로그램(IITP-2025-RS-2024-00437190)에 따라 한국 과학기술정보통신부(MITP-2025-RS-2022-00156394)가 지원했습니다. 이 연구는 IITP(정보통신기술기획평가원)가 주관하는 ICT 챌린지 및 첨단 네트워크(IITP-2025-RS-2022-00156394) 프로그램에 따라 한국 과학기술정보통신부(MITP-2025-RS-2022-00156394)가 지원했습니다.

참 고 문 헌

- [1] 강호현, 신수용.(2022). Aruco Marker를 사용한 드론 정밀 착륙 시스템. *한국통신학회논문지*, 47(1), 145-150.
- [2] 유성원, 신수용. (2024). 딥러닝 알고리즘을 사용한 UAV 정밀 투하 보조 시스템. *한국통신학회 학술대회논문집*, 제주.
- [3] 김병우(아주대학교), 원은식, 정성운 외 2명(2024). 강화학습 기반 산불 진화 드론 시뮬레이션 구현