

# 산불 발화점 추정을 위한 디지털 트윈 기반 감시 프레임워크

김동영, 김상원, 장인수, 김광주, 이경오  
한국전자통신연구원

dongyoung.kim@etri.re.kr, eddiekim@etri.re.kr, jef1015@etri.re.kr, kwangju@etri.re.kr,  
longweek7@etri.re.kr

## Digital Twin-Based Surveillance Framework for Wildfire Ignition Point Estimation

Dongyoung Kim, Sangwon Kim, In-su Jang, Kwang-Ju Kim, Kyoungoh Lee  
Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

### 요약

최근 산불은 전 세계적으로 발생 빈도와 피해 규모가 지속적으로 증가하고 있다. 초기 발견과 대응의 신속성과 정확성에 따라 피해 규모는 크게 달라진다. 따라서 조기에 산불 발화 지점을 정확히 추정하여 신속하게 전달하는 것이 중요하다. 하지만 기존 연구는 단순 영상 분석정도에 머물러 있어 실제 산불 발화 지점 추정하는 데 어려움이 있다. 본 연구는 산악 감시카메라 기반 산불 발화 지점 추정 알고리즘을 통해 발화점을 추정한다. 또한, 검출된 영상에서의 발화지점을 디지털 트윈 산악 지형 기반으로 실제 좌표로 산출하여 정확한 발화지점을 제공하는 통합 프레임워크를 제안한다.

### 1. 서론

기후 변화와 건조한 기상 조건, 인위적 요인으로 인해 최근 국내외 산불 발생 빈도와 피해 규모가 급격히 증가하고 있다 [1]. 산불은 단순한 환경 재해를 넘어 대기 오염, 인명 피해, 지역 사회의 경제적 손실로 이어지며 국가적 차원에서도 심각한 위기 요인으로 대두되고 있다. 특히 산악 지형은 넓고 복잡하여 화재가 시작되는 지점을 신속하고 정확하게 파악하지 못할 경우, 초기 대응 지연으로 인해 피해가 기하급수적으로 확대될 수 있다.

이러한 이유로 산불 조기 감시와 발화 지점의 정확한 위치 추정은 산불 대응의 핵심 요소이다. 기존의 센서 기반 화재 감지 기술은 [2] 연기나 온도의 변화를 탐지하지만 범위와 환경이 제한적이고 산악 지형과 같은 광범위한 지역에서 활용하는 것은 어렵다. 딥러닝 모델을 활용한 영상 기반 산불 탐지 기술은 [3] 실시간성과 정확성으로 인해 주목을 받고 있으나, 대부분 영상에서의 화재의 경계 박스와 같은 형태의 단순히 발생 여부와 위치를 검출하는 수준에 머물러 있다. 즉, 실제 지형상의 발화 지점에 대한 정교한 좌표 혹은 지리적인 정밀한 위치까지 제공하지 못한다. 따라서 이러한 한계로 인해 영상 기반의 산불 감시 시스템에는 여전히 한계가 있다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 감시카메라 기반 발화점 추정과 디지털 트윈 지형 모델과의 매핑을 통한 실제 발화 지점 추정 프레임워크를 제안한다. 본 연구의 핵심 기여는 세 가지이다. 첫째, 합성 연기 데이터를 기반으로 학습된 객체 탐지 모델을 활용하여 2D 영상에서 객체탐지 모델을 통하여 연기를 검출하고

발화점을 추정한다. 둘째, 드론으로 촬영한 영상을 활용해 감시카메라 주변 지형의 디지털 트윈 산악 지형 모델을 구축한다. 셋째, 감시카메라 영상에서 추정된 발화점을 디지털 트윈 산악 지형 모델과 매칭하고, 이를 Unity 환경의 투사를 통하여 3D 좌표로 변환한다. 최종적으로, 제안하는 프레임워크는 단순 탐지를 넘어 발화 지점을 실제 좌표로 추정할 수 있어, 산불의 초기 진압 및 자원 배치 효율성을 크게 높일 수 있다.

### 2. 산불 발화점 추정 프레임워크

#### 2.1 산불탐지 및 발화점 추정

우리는 산악 감시카메라 영상을 입력으로 하여 실시간 산불의 발화점 탐지를 수행한다. 모델 성능 향상을 위해, 우리는 Maya 시뮬레이터를 사용하여 가상의 산불 데이터셋을 구축하고, YOLOv4 [4] 객체탐지 모델을 사용하여 산불 데이터를 학습하고, 실제 산불 데이터로 검증한다. 산불은 하단에서 발생하여 상부로 확산되는 특성을 갖는다. 따라서 탐지 결과로부터 산불의 발화점을 추정하기 위해 경계 검출 필터(Sobel)를 적용하여 연기 영역의 경계선을 추출한 뒤, 고강도의 픽셀 중 하단부에 위치한 픽셀 집합을 발화점 후보로 선정한다. 이후 이 후보 포인트들의 무게중심을 계산하여 최종 발화점으로 결정한다.

#### 2.2 디지털 트윈 맵 생성

추정된 영상 좌표의 발화점으로부터 실제 위치 정보를 얻기 위해, 그림 1의 (b)와 같이 실제 지형 정보를 3차원 데이터와 같은 형태로 디지털화 한다. 드론을 이용해 감시카메라가 존재하는 산악 지역을 약 4km 씩 나누어

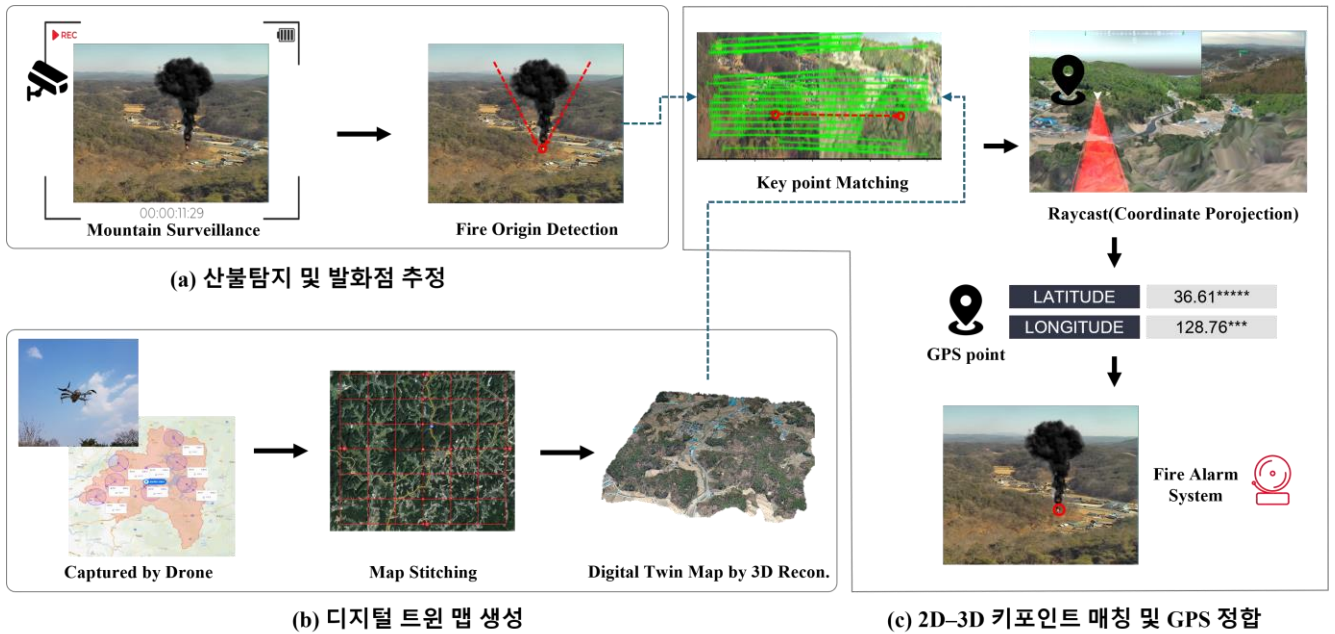


그림 1. 디지털 트윈 기반 산불 발화점 추정 프레임워크

촬영한다. 그 뒤, Unity 기반의 3D 산악 데이터로 재구성하고, 랜드마크들의 실제 좌표를 이용해 3D 영상과 정합하여 실제 좌표를 반영한 디지털 트윈 지형 모델을 생성한다.

### 2.3 2D - 3D 키포인트 매칭 및 GPS 정합

감시카메라 영상의 발화점과 디지털화 된 산악 지형과 좌표 매핑을 통해 실제 물리적인 위치를 획득한다. 키포인트 매칭 모델을 사용하여, 감시카메라 영상과 디지털 트윈 뷰 간의 주요 특징점을 매칭하여 감시카메라 영상과 디지털 트윈 영상을 정렬한다. 그 뒤, 2D 좌표를 대응되는 3D 지형 좌표로 투영하여 해당 부분의 실제 GIS 좌표를 구하여 최종적으로 발화 지점의 위도·경도 좌표를 산출한다. 이를 통해 사용자는 그림 1 의 (c)와 같이 디지털 트윈 지형 모델상에서 발화 위치를 확인하고, 실제 GIS 좌표를 획득하여 산불 대응에 활용한다.

## 3. 결론

본 논문에서는 산불 조기 감시를 위해 감시카메라 영상을 활용한 디지털 트윈 기반 발화 지점 추정 프레임워크를 제안하였다. 제안된 방법은 연기 탐지를 통해 발화 후보 영역을 찾아내고, 컴퓨터 비전 기반 분석으로 발화 지점을 추정한 뒤, 디지털 트윈 영상과의 정합을 통해 실제 GPS 좌표로 변환했다. 이를 통해 단순 2D 기반 화재 여부 탐지에서 나아가 화재의 실제 위치 정보를 제공하여 초기 대응 효율성을 향상시킬 수 있었다. 이는 향후 산불 감시 체계에서 초기 진압 경로 최적화, 자원 배치 효율화, 피해 확산 방지에 활용할 수 있다.

하지만 본질적으로 감시카메라 영상의 한계로 인해, 지형적으로 산이나 건물에 의한 발화점이 가려지는 문제는 여전히 한계가 있다. 발생하는 오류나 실제 그 결과 랜드마크 정합시 발생하는 매핑된 GPS 좌표 오차와 같은 문제가 발생할 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 3D 영상 기반 투사 과정에서 가려지는 문제를 최소화하여, 보다 정확한 발화 지점 추정과 랜드마크를 늘려 GPS 좌표 오차를 줄이고 우리의 프레임워크의 적용 범위 확장을 목표로 할 예정이다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구 논문은 한국전자통신연구원 연구운영지원 사업의 일환으로 수행되었음. [25ZD1120, 대경권 지역산업 기반 ICT 융합기술 고도화 지원사업].

## 참고 문헌

- [1] Cunningham, Calum X., Grant J. Williamson, and David MJS Bowman. "Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth." *Nature ecology & evolution* 8.8 (2024): 1420-1425.
- [2] Gaur, Anshul, et al. "Fire sensing technologies: A review." *IEEE Sensors Journal* 19.9 (2019): 3191-3202.
- [3] Sathishkumar, Veerappampalayam Easwaramoorthy, et al. "Forest fire and smoke detection using deep learning-based learning without forgetting." *Fire ecology* 19.1 (2023): 9.
- [4] Bochkovskiy, Alexey, Chien-Yao Wang, and Hong-Yuan Mark Liao. "Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection." *arXiv preprint arXiv:2004.10934* (2020).