

다수 드론에 탑재된 열화상 센서를 이용한 불량애자 탐지 및 이상설비 위치추정

서의석, 송형석, 김진관, 김영근, 나원상
 한동대학교 기계제어공학부

Fault Insulator Detection and Localization Using Thermal Imaging Sensor Mounted on Multiple Drones

Ui-Suk Suh, HyeongSeok Song, Jin-Kwan Kim, Young-Keun Kim, and Won-Sang Ra
 Handong Global University

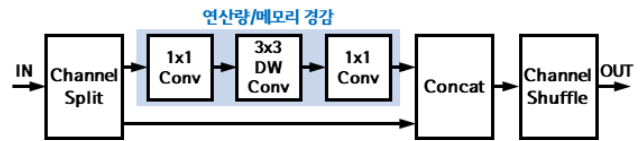
Abstract - This paper proposes a practical electric facility inspection system using autonomous drones with a thermal camera. The lightweight deep learning object detection algorithm is designed to discriminate the abnormal insulator due to temperature aging as well as to obtain the line-of-sight(LOS) angle between the defective part and the drone. With the help of a linear distributed state estimator using the LOS angle measurements shared by drones, the fault location is precisely estimated. For its computational efficiency, the proposed approach is suitable for real-time implementation. The validity and usefulness of the inspection system is demonstrated through the experiments.

1. 서 론

발전소에서 생산된 전력을 수용가로 공급하기 위해서는 다양한 전력시설을 사용해야 한다. 만일 이들 전력설비에 이상이 생기는 경우에는 대규모 정전 등으로 인한 사회적 비용이 급격히 증가하므로, 안정적인 전력 배분과 계통운용을 위해 전력설비의 주기적 점검이 필요하다. 불행하게도 전력설비가 위험지역에 위치한 경우, 경년열화 혹은 노후화 등으로 인한 결함 여부를 유인 점검하기 어려워 전력망 건전성 확보가 용이하지 않다. 이러한 이유로 최근 전력설비 이상을 스스로 탐지하고, 사고 대응을 위해 이상 위치정보를 제공하는 무인드론 기반 자율점검 시스템 개발 필요성이 높아지고 있다.

전력설비 자율점검을 수행하는 무인드론은 다양한 센서를 장착하고 있다. 그 중 하나는 열화상 카메라인데, 이는 전력설비 고장을 유발하는 주요 원인 중 상당한 비중을 차지하는 애자의 발열에 따른 절연파괴를 탐지하기 위한 것이다. 하지만, 제한적 연산 능력을 지닌 임베디드 컴퓨터 상에서 복잡한 영상처리를 통해 이상탐지를 수행하는 것은 쉽지 않은 과제이다. 더욱이 신속한 사고대응을 위해서는, 불량애자 탐지와 함께 이상 발생위치를 판제센터로 전송해야 하나, 현존하는 다수 드론 점검 시스템으로는 불량애자의 3차원 위치를 특정하는 것이 쉽지 않다.

이러한 점에 착안하여, 본 논문에서는 다수 드론이 센서 정보를 공유한다는 전제 하에, 이상설비 탐지와 측위를 동시에 수행할 수 있는 고수준 자율점검 시스템을 설계한다. 먼저, 이상설비 탐지 알고리즘의 실시간 구현을 고려하여, 경량화된 딥러닝 객체탐지 로직을 설계하여 열화상 이미지로부터 불량애자를 탐지한다. 탐지 과정에서 불량애자에 대한 시선각 측정치가 추출되면, 협업드론과 정보를 공유한다. 피동 연산 효율성이 높고, 우수한 추정성능을 지닌 일관 선형 분산형 필터를 적용하여 측정치 융합을 수행함으로써 불량애자의 위치를 정밀 추정한다. 제안한 기법은 다수 드론을 이용한 위험지역 내 설비점검 프로세스 전 과정을 무인 자동화 할 수 있다. 또한, 제안한 알고리즘은 기존 기법에 비해 상대적으로 적은 연산량을 요구하므로, 실시간 응용에 적합하다. 실험을 통해 제안 기법의 성능을 검증한다.



〈그림 1〉 ShuffleNet v2 모듈

2. 불량애자 탐지 및 위치추정 기법 설계

2.1 실시간 불량애자 탐지 및 시선각 검출 로직

경량화된 이상설비 탐지 알고리즘을 설계하기 위해, YOLO v4의 backbone 단계에서 기존의 CSP DarkNet53 모듈을 ShuffleNet v2 모듈로 대체한다 [1]. 이 과정에서 그림 1과 같이, ShuffleNet v2은 channel spilt을 통해 파라미터 수와 연산량을 감소시키고, channel shuffle 연산을 거쳐 정보 손실을 억제한다. 참고로, ShuffleNet v2 모델은 Depthwise(DW) 합성곱 연산을 통해 메모리 및 연산량을 감소시키는 효과가 있다.

일단 이상설비가 탐지되면, 영상평면의 경계상자(bounding box)와 카메라의 시야각을 이용하여 시선각 정보를 추출한다.

2.2 시선각 측정치 융합을 통한 이상설비 위치 추정

i번째 드론의 시선각 측정치 $\tilde{\lambda}_i$, 이상설비의 상대위치 \mathbf{x} 의 극좌표계 상관관계는 다음 관계식으로 기술된다.

$$y_i = \tilde{H}_i \Delta C_i \mathbf{x} + v_i, \quad \tilde{H}_i = L \tilde{C}, \quad \mathbf{x} = \mathbf{z} - \mathbf{p} \quad (1)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad \tilde{C} = \begin{bmatrix} \cos(\tilde{\lambda}_i) & \sin(\tilde{\lambda}_i) \\ -\sin(\tilde{\lambda}_i) & \cos(\tilde{\lambda}_i) \end{bmatrix}, \quad \Delta C = \begin{bmatrix} \cos(\delta\lambda_i) & \sin(\delta\lambda_i) \\ -\sin(\delta\lambda_i) & \cos(\delta\lambda_i) \end{bmatrix},$$

$$y_i = 0, \quad \delta\lambda_i \sim N(0, \sigma_{\lambda_i}^2), \quad v_i \sim N(0, R_i)$$

시선각 측정치 $\delta\lambda_i$ 로 구성되는 좌표 변환 불확실성 행렬 ΔC 의 통계적 속성은 아래와 같다.

$$E\{\Delta C_i\} = c \cdot I^{2 \times 2}, \quad c = e^{-0.5\sigma_{\lambda_i}^2}, \quad E\{\Delta C_i L^T R_i^{-1} v_i\} = 0 \quad (2)$$

따라서, 획득된 시선각 측정치를 이용한 이상설비 측위 문제는 다음 선형 불확정 시스템의 상태추정 문제로 재정의 된다.

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = F_k \mathbf{x}_k + G_k \mathbf{u}_k + G_k \mathbf{u}_k^c \\ y_k = \tilde{H}_k \Delta C_k^T \mathbf{x}_k + v_k \end{cases} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{x} 는 드론-이상설비 간 상대위치, $y_k = 0$ 은 가상표적 측정치, \mathbf{u}^c 는 드론의 가속도이다.

상태공간 방정식 (3)에 일관 강인 칼만필터의 필터 이론을 적용하면 미지 불확실성 ΔC 의 존재에도 불구하고, 불평형 상태추정치를 산출할 수 있다 [2].

측정치 갱신 (measurement update)

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = (I + P_{k|k} \Gamma_k^T \Psi_k) \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + P_{k|k} \Gamma_k^T \tilde{H}_k^T R_k^{-1} (y_k - \tilde{H}_k \Gamma_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (4)$$

$$P_{k|k}^{-1} = P_{k|k-1}^{-1} + \Gamma_k^T (\tilde{H}_k^T R_k^{-1} \tilde{H}_k - \Psi_k) \Gamma_k$$



〈그림 3〉 축소모형을 이용한 실내 실험환경

시간 갱신 (time update)

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} &= F_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + G_k^c \mathbf{u}_k^c \\ P_{k+1|k} &= F_k P_{k|k} F_k^T + G_k Q_k G_k^T \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\Gamma \equiv 1/c \cdot I^{2 \times 2}$, $\Psi \equiv V - \Gamma^{-T} V \Gamma^{-1}$, $V \equiv L^T R^{-1} L$.
 최종적으로, 전술한 일관 강인필터 추정치 및 오차공분산에 정보 분배 원칙을 적용하면 다수 드론에서 획득된 시선각 측정치 정보 융합과 더불어 이상설비 위치를 정밀 추정할 수 있다 [2].

3. 다수드론 기반 자율점검 시스템 성능분석

제안된 기법의 성능분석을 위해 그림 3과 같이 축소모형을 활용한 실내 실험환경을 구축하였다. 경년열화를 모의할 수 있도록 애자 내부 가열장치가 장착되었다. 열화상 카메라가 탑재된 2대의 Parrot ANAFI Thermal 드론이 이상설비 모의기 주변을 선회하며 집중 점검하는 시나리오를 고려하였다. 드론 및 이상설비 위치 정보 잡값은 실내 정밀측위 시스템(OptiTrack)에서 제공된다. 실험조건은 표 1에 정리한 바와 같다.

이상설비 탐지 알고리즘 설계를 위해 실험을 통해 총 9,460장 (50% 학습용, 30% 검증용, 20% 평가용)의 불량애자 열화상 이미지 데이터 세트를 취득하였다. 불량애자 탐지결과는 그림 4 및 표 2와 같다. 제안 모델은 YOLO v4 대비 요구 메모리 용량이 약 1/63배 줄어들며, 처리속도는 약 1.9배 빠르다. 객체탐지 정확도 지표인 mAP(mean Average Precision)는 두 방법 모두 약 99% 내외로 대동소이 하다. 이로부터 성능저하를 최소화하면서 실시간 구현에 적합한 경량화 모델이 개발되었음을 알 수 있다. 드론 #1로부터 획득된 열화상 이미지에 이상설비 탐지 알고리즘을 적용한 결과는 그림 4와 같다. 산출된 수평면 시선각 측정오차는 그림 5에 도시하였다. 실험 결과로부터 시선각 측정치의 평균오차는 1.1°, 최대 오차크기는 약 2.5° 이내로 유지됨을 알 수 있다.

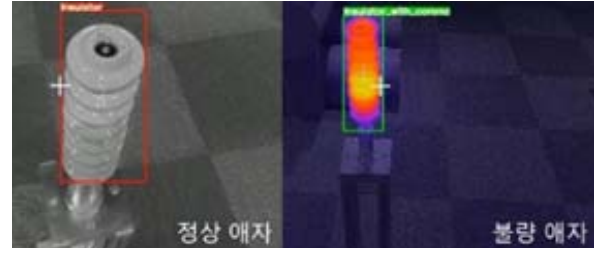
추출된 이상설비의 시선각 정보를 이용하여 협업 점검 드론의 이상설비 측위 성능을 검증해 보자. 25회 반복실험을 통해 산출된 이상설비의 위치 추정치의 RMSE는 그림 6과 같다. 기존의 EKF(extended Kalman filter) 기반 비선형 융합필터와 달리, 제안된 기법은 각 축별로 오차 5 [cm] 이내의 매우 정밀한 이상설비 위치 추정치를 제공한다.

〈표 1〉 실험 조건

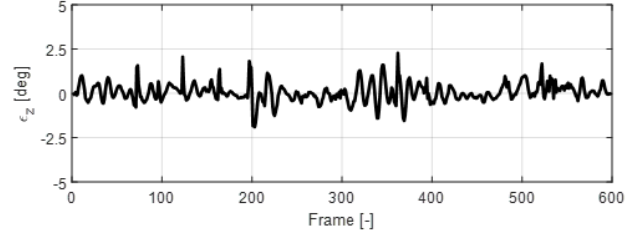
구분	선회유도 반경	열화상센서 수직 김발각
드론 #1	0.6 [m]	-35°
드론 #2	0.3 [m]	-55°

〈표 2〉 불량애자 탐지 성능

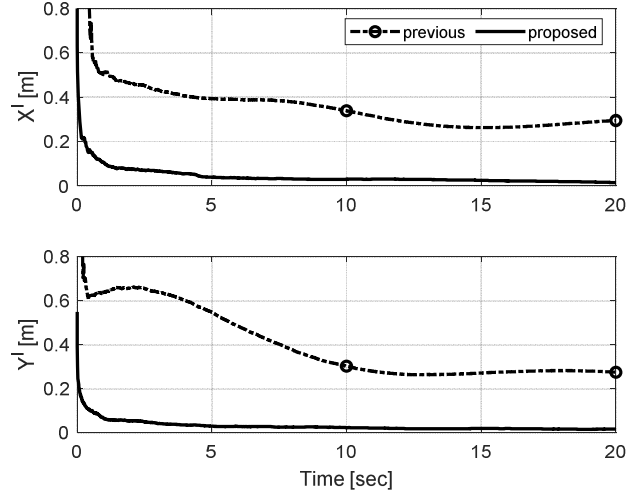
구분	YOLO v4	제안 모델
메모리	244.0 [MB]	3.85 [MB]
입력 해상도	320 × 320	640 × 640
FPS (Intel i7-8700)	2.0	3.8
mAP	99.65%	98.40%



〈그림 4〉 정상/불량애자 탐지 결과



〈그림 5〉 수평면 시선각 측정 오차 (드론 #1)



〈그림 6〉 불량애자 위치 추정필터: 위치 RMSE

4. 결 론

본 논문에서는 이상설비 탐지 및 정밀 측위 기능을 탑재한 다수 드론을 이용한 전력설비 무인 자율점검 시스템을 구현하고 타당성을 검토하였다. 이상설비 탐지 알고리즘의 실시간 구현 가능성을 감안하여 경량화된 딥러닝 객체검출 로직을 설계하고, 이를 통해 이상설비의 시선각을 획득하였다. 다수 드론에서 획득된 이상설비 시선각 측정치를 일관 선형 분산 측위필터를 이용해 융합함으로써, 영평균 추정오차 특성을 갖는 이상설비 위치 추정치를 얻을 수 있음을 보였다. 축소모형을 활용한 실험을 통해, 제안된 기법이 위험지역 내 위치한 이상설비의 무인 자율점검 시스템 구축에 매우 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행하였음 (No. 2021400000010).

[참 고 문 헌]

- [1] 유지환 외, “변전소 불량애자 검출을 위한 드론 EO/IR 영상 기반의 경량화 객체탐지 모델 응용 연구,” *전기학회논문지*, pp. 540-547, 2022.
- [2] 이윤하 외, ‘다중 UAV 협업을 위한 선형 분산 피동 표적추적 필터 설계’, *전기학회논문지*, pp. 314-324, 2018