

YOLO 기반 LED 점멸 패턴 추출과 LSTM 분류를 이용한 장치 고장 진단 시스템

조효준*, 남대현, 김응수, 문수빈, 양유진, 전형준, 이재욱

국립부경대학교 정보통신공학전공

(dhkldfemqh*,namdh01,oloae,subin23,eu9309,jun04292569)@pukyong.ac.kr, jlee0315@pknu.ac.kr

Device Fault Diagnosis Using YOLO-based LED Blink Pattern Extraction and LSTM Classification

Hyojun Jo*, Daehyeon Nam, Eungsu Kim, Subin Moon, Yujin Yang, Hyeongjun Jeon, Jaewook Lee

Department of Information and Communications Engineering, Pukyong National University

요약

현장 장비는 LED 점멸 패턴으로 상태(정상/오류)를 표시하는 경우가 많아, 원격 운용·유지보수(O&M) 관점에서 영상 기반의 자동 판독이 유용하다. 본 논문은 YOLO 기반 장치 및 LED 검출, OpenCV 기반 LED 색상·명암 특징 추출, 시간 패턴을 고려한 LSTM 분류를 결합하여 장치 고장 상태를 자동 판정하는 경량 파이프라인을 제안한다. Roboflow로 라벨링한 데이터셋(장치 3종 및 LED 5개)을 이용해 검출 모델을 학습하고, 검출된 LED 박스의 HSV/명암 통계로 프레임별 LED 상태 코드를 생성한다. 윈도우 기반 one-hot 인코딩 시퀀스를 LSTM에 입력하여 패턴을 분류하며, 장치의 자가 복구 불가능 특성을 고려한 라벨 선택 방식을 적용한다. 또한 오류(E)로 판정된 경우, 점멸 패턴의 세부 유형에 따라 전원·배선·통신·모듈 점검 등 사용자(소비자) 조치 가이드를 함께 제공한다. 제안 방법은 서로 다른 3종 장치에서 정상/오류/UNKNOWN 패턴을 안정적으로 구분함을 확인하였다.

I. 서론

네트워크 장비, 산업용 제어기, 전력 설비 등 다양한 현장 시스템은 LED로 동작 상태를 표시한다.[1] 그러나 운용자가 직접 확인해야 하거나, 영상이 제공되더라도 사람이 점멸 패턴을 판독해야 하는 경우가 많아 패턴이 복잡할수록 오판 가능성이 커진다.[2] 본 연구는 저비용 카메라 영상만으로 LED 패턴을 자동 추출하고 시간적 문맥을 반영해 정상/오류/UNKNOWN을 분류하는 컴퓨터 비전 기반 고장 진단 방법을 제안한다.

본 논문의 기여는 다음과 같다. YOLO 기반 객체 탐지로 장치와 개별 LED를 검출해 조명·배경 변화에 강한 ROI를 확보한다.[3] LED 영역의 HSV/명암 특징으로 프레임별 상태 코드를 생성하고 상태 변화 기반으로 시퀀스를 구성한 뒤, 윈도우 기반 LSTM 분류와 장치 특성(고장 발생 시 상태 지속)을 반영한 라벨 선택으로 안정적인 판정을 수행한다. 또한, 오류/UNKNOWN으로 판정된 경우에도 점멸 양상(LED 조합, 주기, 지속시간 등)에 따라 세부 유형을 구분해 전원·배선·통신·모듈 점검 등 사용자 조치 가이드를 제시한다.

II. 제안 방법



그림 1. 제안하는 고장 진단 파이프라인

그림 1은 제안 시스템의 흐름을 나타낸다. 입력 영상에서 YOLO가 장치와 LED 바운딩 박스를 출력하고, 각 LED 박스에서 OpenCV로 색상·명암 특징을 산출해 프레임별 LED 상태 벡터를 생성한다. 이후 결측(-1) 구간을 보정하고 상태 변화 지점 기준으로 세그먼트화해 점멸 패턴을 구성한다. 마지막으로 시퀀스를 one-hot 인코딩한 뒤 LSTM으로 정상/오류/UNKNOWN을 분류한다.

2.1 데이터셋 구축 및 YOLO 학습

본 데모에서는 실제 장치 촬영에 앞서, 장치 전면을 PPT로 간단히 재현한 영상에서도 파이프라인 동작을 확인하였다. 학습 데이터는 장치 3종과 LED 5개 프레임 이미지를 수집하고 Roboflow 라벨링 UI로 바운딩 박스를 지정해 구축하였다. 회전·자르기·밝기 변화 등 증강을 적용해 제한된 수량에서도 일반화 성능을 확보하도록 하였다.[4] 실험에서는 총 80장으로 초기 데이터셋을 구성하고 Ultralytics 기반 YOLO 모델(예: YOLO11m)을 epoch=100, imgsz=640으로 학습했으며, 추론 시 신뢰도 임계치 0.6을 적용해 오검출을 감소시켰다.

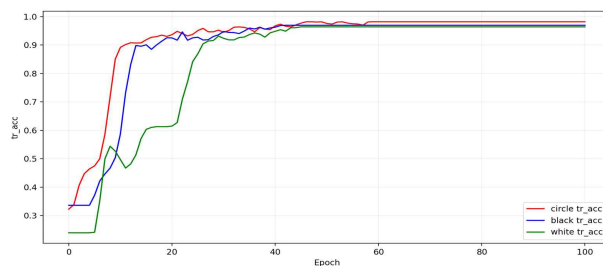


그림 2. 장치별 학습 정확도 변화

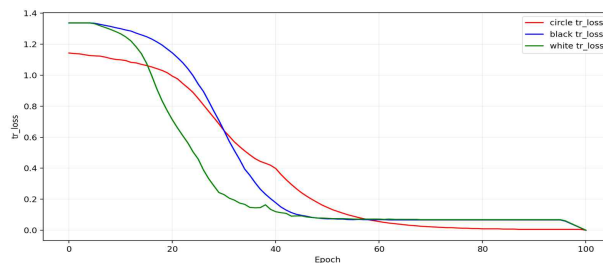


그림 3. 장치별 학습 손실 변화

그림 2는 장치별 학습 과정에서의 정확도(tr_acc) 변화를, 그림 3은 손실(tr_loss) 변화를 나타낸다. 세 장치 모두 epoch 40 전후로 약 0.95 이상의 정확도에 수렴하였으며, 손실은 0.1 이하로 안정화되어 모델이 효과적으로 학습되었음을 확인하였다.

2.2 OpenCV 기반 LED 상태 코드 생성

색상	HSV 범위(H,S,V)	비고
OFF	$V < 55$	소등
YELLOW	$H\ 20\text{--}34, S \geq 28, V \geq 55$	황색 LED
GREEN	$H\ 35\text{--}89, S \geq 28, V \geq 55$	녹색 LED
RED	$H\ 0\text{--}9\text{ 또는 }170\text{--}179, S \geq 28, V \geq 55$	적색 LED
BLUE	$H\ 95\text{--}139, S \geq 28, V \geq 55$	적색 LED

표 1. HSV 기반 LED 색상 분류 규칙

YOLO가 출력한 LED 박스 좌표 (x1, y1, x2, y2)로 LED 영역을 추출한 뒤, 픽셀의 평균 BGR과 HSV를 계산한다. 명암 정보는 HSV의 V(Value) 채널을 이용하며, V가 임계치 미만이면 OFF로 판단한다. ON 상태에서는 표 1에 제시된 HSV 범위 기반 규칙으로 색상을 분류하고, 각 LED의 상태를 정수 코드로 표현한다. (0=OFF, 1=YELLOW, 2=GREEN, 3=RED, 4=BLUE)

2.3 결측 보정 및 패턴 세그먼트화

```
[summary] patterns_filled length: 300
[summary] #segments: 46
seg#000 len= 14 state=[0, 0, 0, 0, 0]
seg#001 len= 6 state=[3, 0, 0, 0, 1]
seg#002 len= 6 state=[0, 1, 1, 0, 0]
```

그림 4. LED 상태 시퀀스의 패턴 세그먼트화 결과

영상에서 LED의 상태 변화가 프레임 간격보다 느리거나, 일부 프레임에서 LED가 가려지는 경우 YOLO가 LED를 검출하지 못해 -1(결측) 값이 발생할 수 있다. 제안 방법은 직전 프레임의 유효 값을 forward-fill 방식으로 전파하여 결측을 보정하고, 상태가 변경되는 프레임 인덱스를 기준으로 세그먼트를 생성한다. 그림 4는 결측이 보정된 패턴을 세그먼트화한 결과값이다. 예제 영상(총 300프레임)에서는 46개의 세그먼트가 생성되었으며, 각 세그먼트는 지속 프레임 수와 LED 상태 벡터로 표현된다.

2.4 LSTM 기반 패턴 분류

LED 상태 벡터 시퀀스는 윈도우 크기 16으로 분할하고, 프레임별상태를 one-hot 인코딩하여 LSTM 입력으로 사용한다.[5] 출력 클래스는 정상(N), 오류(E), UNKNOWN(U)으로 정의한다. 패턴 전이 구간에서는 윈도우가 겹치며 일시적으로 서로 다른 예측이 발생할 수 있다. 그러나 본 연구에서 다루는 장치는 고장 시 자가 복구가 불가능하므로, 오류나 UNKNOWN 패턴이 한 번 나타나면 지속되는 특성을 갖는다. 따라서 최종 판정은 구간 내에서 연속으로 가장 오래 반복된 라벨을 선택해, 이러한 장치 특성을 반영한 안정적인 판정을 수행한다. 또한 오류(E)로 판정된 구간에 대해서는 LED 조합과 점멸 주기/지속시간 등의 특징을 이용해 세부 유형을 구분하고, 유형별로 전원·배선 점검, 재시작, 통신 링크 확인, 모듈 재장착 등 소비자가 수행 가능한 해결 방법을 함께 제공한다.

III. 데모 결과 및 결론

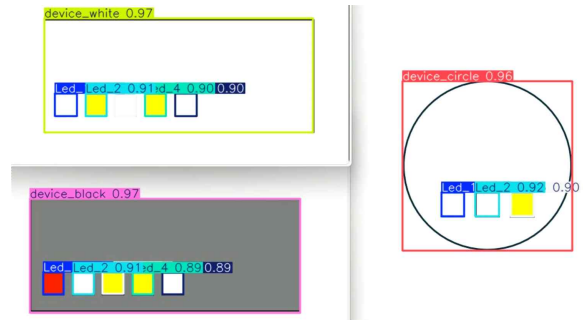


그림 5. 테스트 영상 프레임에서의 검출 결과(3종 장치)

제안 방법을 3종 장치(device_white, device_black, device_circle) 데모 영상에 적용하였다. 그림 5와 같이 정상·오류·UNKNOWN 패턴을 모두 포함해 테스트한 결과, 세 장치 모두에서 정상/오류/UNKNOWN을 안정적으로 구분하였다.

본 논문은 YOLO 기반 검출, OpenCV 기반 LED 상태 코드 생성, 시퀀스 분류를 결합해 LED 점멸 패턴 기반 고장 진단을 구현하였다. 또한 오류/UNKNOWN 상황에서 세부 유형별 조치 가이드를 제시해 실용적 대응을 지원한다. 향후에는 실제 네트워크 장비, 산업용 제어기, 전력 설비 등 실물 장치 LED 영상에 적용해 일반화 성능과 현장 적용 가능성을 정량 검증할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. RS-2025-00558169).

참 고 문 헌

- [1] S.-B. Kim and S.-S. Hong, "A Study on the Usage of LED Operation Indicator Light in Home Appliances," Journal of the Korean Society of Design Culture, vol. 22, no. 2, pp. 177 - 187, 2016.
- [2] P. Nilsson and T. B. Pedersen, "Detection and Classification of Industrial Signal Lights for Automated Production Monitoring," arXiv preprint arXiv:2001.05613, 2020.
- [3] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," Proc. CVPR, 2016.
- [4] Roboflow, "Roboflow: Give your software the power to see objects," (<https://roboflow.com>)
- [5] C. Olah, "Understanding LSTM Networks," 2015. (<https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>).