인공지능 기반 EL 이미지의 태양전지 및 모듈의 결함검출 연구

조선근¹ · 박인두² · 장주희³ · 오원욱^{4†}

¹스마트마인드(주) 데이터사이언스팀, 팀장

²스마트마인드(주) 데이터사이언스팀, 데이터사이언티스트

³스마트마인드(주) 기업부설연구소, 선임연구원

⁴스마트마인드(주) 기업부설연구소, 연구소장

A Study on the Detection of Defects in Solar Cells and Modules in EL Images based on Artificial Intelligence

Jo Sun-Keun¹ · Park In-Doo² · Jang Ju-Hee³ · Oh Wonwook^{4†}

¹Team Leader, Data Science Team, Smartmind

²Data Scientist, Data Science Team, Smartmind

³R&D Researcher, R&D Center, Smartmind

⁴R&D Director, R&D Center, Smartmind

[†]Corresponding author: oh@smartmind.team

Abstract

Currently, investment is being made in renewable energy for the transition to a low-carbon economy and society, and interest in solar energy is also increasing. In addition to the technological development of solar cells and photovoltaic (PV) modules, research in the field of convergence with artificial intelligence technology is being actively conducted. Defects occurring in the manufacturing process of solar cells and modules can be detected through electroluminescence (EL) measurements. In this study, we propose an artificial intelligence technology that can automatically detect defects in cells and modules in real time using EL image data of solar cells and modules in the manufacturing process. For EL defect detection, we propose an algorithm with high suitability in terms of speed and accuracy by applying deep learning-based object detection models and comparing and evaluating detection performance. In the case of the YOLO (you only look once) algorithm, which belongs to a one-step detector, it learns through an optimization process to find information about the defect and the location information of the corresponding failure in the form of a bounding box, and then detects the failure based on this information. The introduction of a deep learning-based defect detection model in the manufacturing process is expected to reduce the time required for defect detection by solar cell and PV module manufacturers and contribute to productivity improvement.

Keywords: 태양전지(Solar Cells), 태양광 모듈(PV Modules), 전계발광(Electroluminescence, EL), 인공지능(Artificial Intelligence, AI), 결함 검출(Detect Detection)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 41, No. 6, pp. 51-57, December 2021
<https://doi.org/10.7836/kses.2021.41.6.051>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 30 October 2021

Accepted: 7 November 2021

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기호 및 약어 설명

Recall : 재현율

TP : True Position

FN : False Negative

1. 서론

현재 저탄소 경제 사회로의 이행을 위해 신재생 에너지에 대한 투자가 이뤄지고 있는 가운데, 태양광 에너지에 관한 관심 역시 증가하고 있다¹⁾. 태양광 발전 시스템의 발전 성능은 모듈 제조공정에서 발생하는 결함에 의한 영향을 받는다. 태양전지 및 모듈의 결함은 제조공정 단계에서 지속해서 받게 되는 기계적 스트레스에 의해 발생 된다. 태양광 발전 모듈이 결함을 포함하고 있는 경우 더 큰 결함으로 성장하여 모듈 출력에 대한 미스매치를 발생시킬 수 있다. 이는 태양광 발전 시스템 전체에 발전 성능에 영향을 주게 되며, 열점 현상으로 인한 수명 단축을 발생시킬 수 있다^{2,3)}. 태양광 모듈 제조공정 단계에서 발생하는 태양전지 셀과 모듈에 대한 결함검출은 EL 이미지 분석을 통해 분석되어왔다²⁻⁵⁾. EL 이미지 분석의 경우 단순 측정 후 전문가가 육안으로 결함을 찾아내는 방법으로 진행되어왔다. 하지만 이와 같은 분석 방법은 정확도와 결함분석 시간의 한계성을 보인다.

따라서, 본 연구에서는 제조공정에서의 태양전지 셀과 모듈의 EL 이미지 데이터를 이용하여 실시간으로 셀과 모듈의 결함검출 여부를 자동으로 파악할 수 있는 인공지능 기술을 제안한다. EL 이미지를 통한 태양전지 셀과 모듈의 결함검출을 위해 딥러닝 기반 객체 검출 모델들을 적용하고 검출 성능을 비교 및 평가했다. 분석을 위한 인공지능 기술로는 속도와 정확도 측면에서 적합성이 높은 알고리즘인 YOLO 알고리즘을 적용하였다. 고장 이미지 학습을 통해 결함에 대한 라벨링을 진행하였으며 이미지를 통한 확인을 진행하였다. 또한 결함검출 알고리즘 적합성을 확인하기 위해 재현율을 통해 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 YOLO 알고리즘

Fig. 1은 You Only Look Once (YOLO) 모델의 네트워크 구조를 나타낸다. Fig. 2는 YOLO 알고리즘의 검출 방법을 나타낸다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 YOLO 알고리즘의 경우 1-단계 검출기에 속하며 결함에 대한 정보와 해당 고장의 위치 정보를 경계 상자 형태로 찾기 위한 최적화 과정을 거쳐 학습하고 이를 기반으로 고장에 대한 검출을 진행한다⁶⁾. 기존의 객체 탐지모델인 R-CNN (Region Based Convolutional Neural Networks)과 같은 모델은 복잡한 처리 과정으로 인해 결과를 도출하기까지 오랜 시간이 걸리게 된다⁶⁻⁹⁾. YOLO 모델은 딥러닝 기법으로 빠른 속도로 추론할 수 있으며 빠른 추론이 필요한 상황에서 효과적으로 사용이 가능한 장점이 있다⁶⁻⁸⁾. 따라서 본 논문에서는 EL 이미지를 통한 결함검출을 위해 YOLO 알고리즘을 사용하였다.

Fig. 1 The architecture of YOLO model⁶⁾

Fig. 2 The detection process of YOLO model⁶⁾

YOLO 알고리즘은 단일 단계 인식기(1-Stage Detector)로 이미지 내에 존재하는 객체와 해당 객체의 위치를 한 번만 보고 추론하는 알고리즘이다. 이 알고리즘은 이미지 내에서 경계박스를 다차원적으로 분리하고 클래스 확률을 적용하여 해당 경계박스 안에 객체가 있을 확률을 예측한다. 입력 이미지는 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 CNN을 통해 텐서의 그리드 형태로 나누고, 각 구간에 따라 객체인 경계박스 그리고 각 박스 별 클래스 확률을 생성하여 객체를 인식한다. YOLO는 앞서 언급했다시피 단일 단계 인식기로, 이 전의 객체탐지 모델에서 필요했던 후보 영역에 대한 추출을 진행하지 않기 때문에 기존 알고리즘들과 비교해 처리 시간에 월등한 성능을 가진다. 또한, 이미지 전체를 한 번에 처리하기 때문에 이미지별 객체에 대한 맥락적 이해도가 높아 배경으로 인한 성능 저하를 예방할 수 있다.

YOLO 알고리즘은 크게 Backbone/Neck/Head 3가지로 구분이 된다. Backbone은 Input Image를 feature map으로 변형시켜주는 부분으로 이미지가 가지고 있는 특징을 추출한다. Neck은 Backbone과 Head를 연결하

는 부분으로 추출한 특징들을 정제(Refinement), 재구성(Reconfiguration)하여 Head로 전달한다. 마지막으로 Head는 Backbone에서 추출한 feature map의 위치를 구성하는 작업이 이뤄지는 곳으로 클래스 확률과 bounding box를 그리는 작업이 이뤄진다.

2.2 Data set

본 논문에서는 제조공정에서의 태양전지 셀과 모듈의 EL 이미지를 바탕으로 결함검출에 대한 분석을 진행하였다. Table 1은 분석을 위해 사용한 데이터를 나타낸다. 데이터는 태양전지 및 모듈의 제조공정에서의 태양광 모듈의 결함 관련 이미지 데이터를 사용하였다. 다음 표에서 확인할 수 있듯이 셀과 모듈에 대한 EL 이미지는 각각 학습데이터 800장, 검증데이터 100장, 테스트 데이터로 100장을 사용하였다. 고장에 대한 라벨링 데이터를 이용해 인공지능을 통한 고장 검출 학습에 활용하였으며 이때 결함검출을 위해 활용한 모델의 적합성은 재현율(Recall)을 통해 확인하였다. 식(1)은 재현율을 나타내며 재현율은 결함검출 모델이 있다고 판단했을 때 실제로 해당 결함이 검출되는 경우를 나타내는 지표이다.

Table 1 Number of data

		No. of Data
Solar Cell	Training data	800
	Validation data	100
	Test Data	100
PV Module	Training data	800
	Validation data	100
	Test Data	100

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (1)$$

YOLO 모델의 학습에 앞서 모델을 적용하기 위한 데이터에 대한 처리를 진행하였다. YOLO 알고리즘의 경우 데이터의 학습을 위해 다음과 같은 항목을 요구한다. Fig. 3은 라벨링 수행 예시를 나타낸다. 본 연구에서는 다음 항목에 대한 데이터 세트를 구축하기 위해 이미지 라벨링 도구 중 하나인 LabImg를 사용하여 tagging 작업을 수행하였다. 다음 과정을 통해서 구축한 데이터 세트를 기반으로 YOLO 모델에 대한 학습을 진행하였다.

1. 이미지만을 가지고 있는 폴더
2. 이미지 파일의 위치
3. 라벨링 폴더(class, x-center, y-center, width, height에 관한 내용을 포함해야 함)
4. 학습시킬 데이터에 대한 구조를 담고 있는 파일

Fig. 3 The Labeling images

Fig. 4는 모듈 EL 이미지에 대한 데이터 전처리 예시를 나타낸다. 다음 그림에서 확인할 수 있듯이 제조공정에서 사용되는 태양광 모듈의 EL 이미지를 통한 결함검출을 위해 이미지 데이터에서 위치 기반 정보를 나타내는 알파벳과 숫자를 제외한 모듈의 이미지만을 자르는 전처리를 수행하였다.

Fig. 4 Preprocessing of the module EL image ((a) original image, (b) cropped image)

3. 결과

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 태양전지의 추론 이전의 정답 이미지와 추론 이후의 라벨링 된 이미지를 나타낸다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 태양광 모듈의 추론 이전의 정답 이미지와 추론 이후의 라벨링 된 이미지를 나타낸다. 다음 그림에서 확인할 수 있듯이 결함검출 모델이 정답 이미지와 비교해 보았을 때 결함에 대한 추론 값이 정답과 유사하게 나타나고 있는 것으로 확인되었다. Table 2는 알고리즘을 통해 확인한 재현율을 나타낸다. 다음 표에서 확인할 수 있듯이 태양전지와 태양광 모듈의 EL 이미지를 통한 결함검출 모델에 대한 재현율 98%를 확인할 수 있었다.

(a) (b)
Fig. 5 Test results of solar cells ((a) answer images (b) inferred images)

(a) (b)
Fig. 6 Test results of PV modules ((a) answer images (b) inferred images)

Table 2 Recall of solar cell and PV module

	Recall
Solar Cell	0.98
PV Module	0.98

4. 결론

본 논문에서는 인공지능 기술을 활용한 EL 이미지 결함검출을 수행하였다. 본 논문에서는 제조공정에 사용되는 태양전지와 모듈의 EL 장비에서의 결함검출 모델의 적합성을 재현율과 라벨링 된 이미지를 통해 확인하였다. 추론 이전의 정답 이미지와 추론 이후의 라벨링 된 이미지를 통해 모델의 정확도를 확인하였으며, 98%의 재현율을 확인할 수 있었다. 해당 지표를 기반으로 태양전지와 모듈에 발생한 결함에 대해서 실제로 98% 이상의 고장을 진단할 수 있을 것으로 판단되었다.

인공지능 기반 태양전지와 모듈의 EL 이미지를 통한 결함검출을 통해 제조사의 결함검출 시간 축소, 생산성 향상, 공정 개선, 관리자의 편의성 제공에 이바지할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20193091010240).

REFERENCES

1. Ministry of Trade, Industry and Energy, The Basic Plan of Long Term Electricity Supply and Demand, 2020.
2. Song, Y., Kang, G., Yu, G., Ahn, H., and Han, D., The Analysis of Growth and Electrical Characteristics of Micro-crack with Thermal Effect in PV Module, 2011 Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp.1318-1319, 2011.
3. Song, Y., Kang, G., Yu, G., Ahn, H., and Han, D., A Study on the Electrical Characteristics of Photovoltaic Module Depending on Micro-Crack Patterns of Crystalline Silicon Solar Cell, Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 3, pp. 407-412, 2012.
4. Köntges, M., Kunze, I., Kajari-Schröder, S., Breitenmoser, X., and Bjørneklett, B., The Risk of Power Loss in Crystalline Silicon based Photovoltaic Modules due to Micro-cracks, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, No. 4, pp. 1131-1137, 2011.
5. Dhimish, M., Holmes, V., and Mather, P., Novel Photovoltaic Micro Crack Detection Technique, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Vol. 19, No. 2, pp. 304-312, 2019.
6. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., and Farhadi, A., You Only Look Once: Unified, Real-time Object Detection, In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 779-788, 2016.
7. Lee, Y. and Kim, Y., Comparison of CNN and YOLO for Object Detection, Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 85-92, 2020.
8. Kang, J., Shim, S., Jo, S., and Chung, K., Yolo based Light Source Object Detection for Traffic Image Big Data Processing, Journal of Convergence for Information Technology, Vol. 10, No. 8, pp. 40-46, 2020.
9. Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., and Malik, J., Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation, In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 580-587, 2014.