

재활용 비용 절감을 위한 실시간 투명 폐트병 검출 및 분류 시스템

정윤희, 이소연, 김대영*

순천향대학교

{yh9652, lsy8647, dyoung.kim}@sch.ac.kr

Real-Time Transparent PET Bottle Detection and Classification System for Cost Reduction in Recycling

YunHee Jeong, So-Yeon Lee, Dae-Young Kim*
Soonchunhyung Univ.

요약

플라스틱 쓰레기 문제와 PET(Polyethylene Terephthalate) 재활용의 중요성이 강조되고 있지만, 라벨 및 뚜껑의 미분리로 재활용 효율이 저하되고 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구는 딥러닝 기반 실시간 투명 폐트병 검출 및 분류 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 (1) 플라스틱 병과 캔 검출, (2) 뚜껑, 고리, 라벨 구성 요소 검출, (3) 라벨 종류 분류의 세 단계로 구성되며, YOLOv8n 과 MobileNetv2 를 활용하였다. Jetson Nano 보드에 탑재된 본 시스템은 실시간으로 검출 결과를 시각적으로 출력하고, 사용자에게 구성 요소 제거를 안내하여 재활용 비용 절감과 품질 향상을 도모한다.

I. 서 론

전 세계적으로 일회용 플라스틱 제품 사용이 증가함에 따라 플라스틱 쓰레기 문제가 심화되고 있다. 특히 PET 는 가장 많이 사용되는 플라스틱 중 하나로, 생분해되지 않아 환경에 큰 부담을 주고 있다. 이에 따라 전 세계적으로 PET 재활용의 중요성이 강조되고 있으며, 한국에서도 2020 년부터 투명 폐트병 분리배출 의무제를 시행하고 있다 [1].

하지만, 현장에서는 라벨 및 뚜껑이 분리되지 않은 상태로 배출되는 경우가 많아 재활용 체계의 효율성이 저하되고 있다. 분리되지 않은 라벨이 세척 공정에서 분쇄된 플라스틱과 혼합될 경우, 재활용 비용이 증가하고 제품의 품질을 저하시킨다 [2]. 또한, 음료 브랜드마다 라벨의 재질과 구조가 상이하고, 동일한 공정에서 효율적인 처리가 어려운 경우가 많다 [3]. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 PET 병의 구성 요소를 정밀히 검출하고, 라벨의 부착 여부와 종류를 분류하여 맞춤형 재활용 공정을 적용할 수 있는 기술적 접근이 필요하다.

본 연구에서는 PET 병의 재활용 공정을 효율화하기 위해 딥러닝 기반의 투명 폐트병 검출 및 분류 시스템을 설계하고 개발하였다. 특히, 초기 데이터를 활용해 직접 학습시킨 가중치를 CVAT 의 Auto-labeling 기능에 적용함으로써 데이터 어노테이션 작업의 효율성을 높였으며, 학습된 모델을 Jetson Nano 보드에 탑재해 실시간 검출 및 분류를 가능하게 하였다.

II. 관련 연구

2.1 YOLOv8n (You Only Look Once v8 nano)

실시간 객체 검출에서 널리 사용되는 딥러닝 기반 모델인 YOLO 시리즈는 객체 클래스 확률과 바운딩 박스 좌표를 동시에 예측하는 통합된 구조를 활용하여 정확성과 속도 측면에서 우수한 성능을 보여준다 [4]. 본 연구에서는 PET 병 검출뿐 아니라, 병의 구성 요소를

세부적으로 검출하기 위해 YOLO 시리즈의 최신 버전 중 하나인 YOLOv8n 을 사용하였다. 이는 경량화된 구조를 가진 nano 버전으로 저사양 하드웨어에서도 실시간 객체 검출이 가능한 장점이 있다.

2.2 MobileNetv2

MobileNetv2 는 경량화된 딥러닝 이미지 분류 모델로, 모바일 및 임베디드 환경에서의 활용을 위해 설계되었다. Depthwise Separable Convolution 구조를 기반으로 모델 연산량을 대폭 줄이면서도 높은 분류 성능을 유지할 수 있는 특징이다 [5]. 본 연구에서는 라벨의 종류를 분류하기 위한 이미지 분류 모델로 MobileNetv2 를 사용하였으며, YOLOv8n 을 통해 검출된 라벨의 바운딩 박스를 입력 데이터로 사용하여, 라벨이 어느 카테고리에 속하는지 분류하였다.

2.3 Data Annotation

객체 검출 및 분류 모델의 성능은 고품질의 어노테이션 데이터에 크게 의존한다. AI 기술 개발에서 양질의 학습데이터를 확보하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 초기 데이터를 기반으로 학습된 가중치를 사용하여 CVAT(Computer Vision Annotation Tool) [6]의 Auto-labeling 기능을 활용하였다. 새로운 데이터셋에 대해 자동으로 객체를 라벨링하여 데이터 어노테이션 작업의 초기 단계를 자동화하고, 연구 목적으로 맞는 최종 데이터셋을 구축하였다.

III. 실시간 투명 폐트병 검출 및 분류 시스템

본 연구에서 PET 재활용 공정의 효율성을 향상시키기 위해, 딥러닝 기반의 실시간 투명 폐트병 검출 및 분류 시스템을 설계하고 구현하였다. 제안된 시스템은 세 단계로 구성되며, 플라스틱 병 검출, 구성 요소 검출, 라벨 종류 분류를 순차적으로 수행한다. 본 시스템은 Jetson Nano 보드에 최적화되어 실시간으로 동작한다.

3.1 시스템 구조

제안된 시스템은 YOLOv8n 과 MobileNetv2 를 중심으로 구성되며, 전체 구조는 그림 1 과 같다.

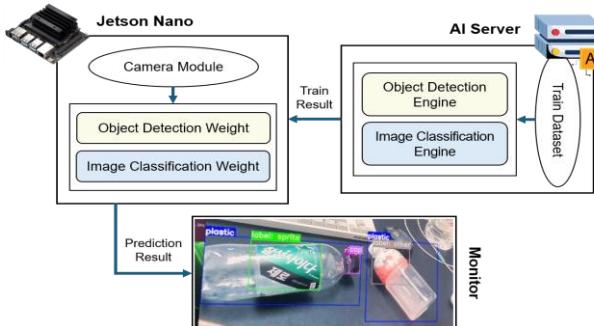


그림 1. 시스템 구조

AI 서버는 PET 병 및 구성 요소를 검출하는 객체 검출 엔진과 라벨 종류를 분류하는 이미지 분류 엔진으로 구성된다. 학습 데이터셋은 각 엔진에 학습되어 생성된 가중치 파일이 Jetson Nano 로 전달된다. Jetson Nano 는 카메라 모듈을 사용하여 실시간으로 PET 병을 인식한 후, AI 서버에서 받은 가중치 파일을 기반으로 객체 검출 및 이미지 분류를 수행한다. 예측 결과는 모니터를 통해 반환되며, PET 병 및 구성 요소의 위치가 Bounding Box 형태로 시각화된다.

3.2 학습 데이터셋

본 연구에서는 객체 검출과 이미지 분류를 위한 데이터셋을 구축하고, CVAT 의 Auto-labeling 기능을 활용하여 데이터 어노테이션 작업의 효율성을 높였다. 원천 데이터는 AI Hub 에서 공개하는 “생활 폐기물 이미지” [7]를 활용해 수집하였으며, 연구 목적에 맞게 전처리한 최종 학습 데이터셋 분포는 표 1 과 같다.

표 1. 학습 데이터셋 구성

Dataset Name \ Number	Train	Vali	Total	Purpose
Can/Plastic	57,085	7,091	64,176	Detection
Cap/Ring/Label	5,621	1,594	7,215	Detection
Coke/Sprite/Fanta/Other	1,120	280	1,400	Classification

3.3 실험 결과

제안된 시스템의 성능을 평가하기 위해 YOLOv8n 과 MobileNetv2 를 각각 학습시켰으며, 학습 설정 및 결과는 표 2 와 같다. 모델 학습은 NVIDIA RTX A6000 GPU(Ubuntu 22.04.3 LTS) 환경에서 수행되었으며, 각 모델은 PET 병 검출 및 분류 작업에 최적화되었다.

표 2. 학습 설정 및 결과

Model	Epoch	Batch Size	Img Size	F1 Score	mAP @0.5
Can/Plastic (YOLOv8n)	20	32	640	0.98	0.99
Cap/Ring/Label (YOLOv8n)	150	16	320	0.87	0.88
Coke/Sprite/Fanta /Other (MobileNetv2)	30	32	112	0.97	-

실험 결과, 제안된 시스템은 PET 병과 구성 요소를 효과적으로 검출 및 분류할 수 있음을 입증하였다. 최종적으로 학습된 모델은 Jetson Nano 보드에 탑재되어 실시간으로 PET 병 및 구성 요소를 검출하고, 예측 결과를 모니터에 출력하였다. Jetson Nano 에서의 시스템은 평균 3.16FPS 로 동작하며, PET 병의 뚜껑, 고리, 라벨의 위치를 바운딩 박스 형태로 표시한다.

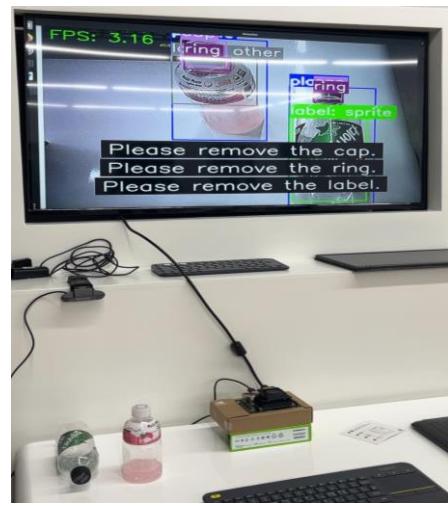


그림 2. Jetson Nano 수행 결과

그림 2 는 Jetson Nano 에서 실행된 시스템 결과를 보여주며, 검출된 구성 요소별로 적절한 분류 결과와 함께 “Please remove the cap”과 같이 사용자를 위한 안내 메시지가 출력되는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 PET 병 재활용 공정의 효율성 향상을 목표로 딥러닝 기반의 실시간 투명 폐트병 검출 및 분류 시스템을 설계하고 구현하였다. YOLOv8n 모델은 PET 병과 구성 요소(뚜껑, 고리, 라벨) 검출 작업에서 높은 성능(mAP@0.5: 0.99, 0.88)을 기록하였으며, MobileNetv2 모델은 라벨 종류 분류에서 F1-Score 0.97 로 정확한 분류 결과를 달성하였다. 제안된 시스템은 Jetson Nano 보드에서 실시간으로 동작하며, PET 병의 구성 요소를 검출하고 이를 기반으로 사용자에게 제거 안내 메시지를 제공한다. 이를 통해 재활용 비용 절감과 품질 개선에 기여할 수 있음을 입증하였다. 향후 연구에서는 데이터셋 확장 및 Jetson Nano 의 처리 속도 최적화를 통해 시스템의 범용성과 실질적 응용 가능성을 더욱 향상시킬 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 2024년도 SW 중심대학사업의 연구결과로 수행되었음”(2021-0-01399).

참고 문헌

- [1] Myoung Kook Seo et al., "Development of Recyclable Waste Identification Technology based on Heterogeneous Sensors for Unmanned Recyclable Waste Collection Devices," *Journal of Drive and Control*, Vol. 21, No. 4, pp. 64-71, Dec 2024.
- [2] Geuk Eun-sook, "Consumer Issues Survey on the Separate Disposal of Transparent (Colorless) PET Bottles," *Korea Consumer Agency*, 2021.
- [3] Choi Young Jo et al., "A Comparative Analysis of Beverage Labels for the Ease of Recycling - Focusing on Domestic PET bottled water juice beverages -," *Illustration Forum*, Vol. 20, No. 60, pp. 5-16, 2019.

- [4] M. M. A. Parambil *et al.*, "Navigating the YOLO Landscape: A Comparative Study of Object Detection Models for Emotion Recognition," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 109427–109442, 2024.
- [5] Minjun Oh et al., "Fast face detection and tracking using UltraFace and MobileNet feature," in *Proceedings of the 2024 Korea Computer Congress (KCC) by the Korean Institute of Information Scientists and Engineers (KIISE)*, pp. 2051–2053, Jeju Island, Korea, June 2024.
- [6] CVAT, <https://github.com/openvinotoolkit/cvat>
- [7] AI-Hub. Available online: <https://aihub.or.kr> (accessed on 12 January 2025).