컴퓨터 비전 기반 실시간 쓰레기 분류 시스템

송준혁, 정재훈
성균관대학교 소프트웨어학과

Email: {02hyeok, pauljeong}@skku.edu

A Computer Vision-Based Real-Time Waste Classification System

Junhyeok Song and Jaehoon (Paul) Jeong
Department of Computer Science and Engineering, Sungkyunkwan University

요 약

본 논문은 실내 공동 공간의 분리수거 효율성 제고를 위해 YOLOv8 과 TensorFlow 기반의 실시간 쓰레기 분류 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 스마트폰 카메라로 수집된 영상을 온디바이스(On-Device) AI 기술로 분석하여 '일반쓰레기', '캔·병', '종이' 클래스를 실시간으로 탐지한다. 웹 환경 최적화를 위해 학습된 PyTorch 모델을 TensorFlow 포맷으로 변환하고 INT8 양자화를 적용하여 모델 크기를 축소하였다. 실험 결과, Test 데이터셋에 대하여 93.1%의 mAP50 성능을 달성하였으며, 실제 모바일 기기 브라우저 환경에서 초당 15~20 프레임의 추론 속도를 확보하였다.

Ⅰ. 서 론

최근 환경 위기 극복을 위한 순환 경제 패러다임이 강조되고 있으나, 실제 재활용 공정의 실질 재활용률은 30~40% 수준에 머물러 있다. 특히 다수의 인원이 이용하는 실내 공동 공간에서는 복잡한 분리배출 지침에 대한 인지 부족이나 실수로 인해 재활용품이 오염되는 사례가 빈번하며, 이는 선별 과정의 경제성을 악화시키는 주요 요인이다. 기존의 사후 안내 방식은 즉각적인 행동 변화를 유도하기 어려우므로, 배출 시점에 개입하여 실시간 피드백을 제공하는 기술적 해결책이 필요하다.

본 논문에서는 별도의 설치 과정 없이 URL 접속만으로 활용 가능한 웹 기반 지능형 시스템을 제안한다. 이를 통해 최신 딥러닝 객체 탐지 기술인 YOLOv8[1]과 웹 브라우저에서 GPU 가속을 활용하는 TensorFlow 를 활용한다.

Ⅱ. 본론

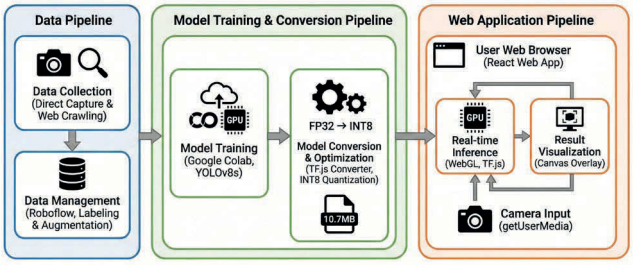


그림 1. 실시간 쓰레기 분류 시스템 구성도

A. 제안 시스템 설계 및 아키텍처

본 논문에서 제안하는 시스템은 실내 분리수거 문제를 해결하기 위해 문제 정의부터 데이터 준비, 모델 개발, 최종 애플리케이션 구현 및 테스트에 이르는 유기적인 단계를 거쳐 구축되었다. 그림 1 은 본 논문의 실시간 쓰레기 분류 시스템의 구성도를 보여준다. 본 시스템의 핵심은 데이터 파이프라인, 모델 학습 및 변환 파이프라인, 웹 애플리케이션 파이프라인의 세 가지 축으로 구성된다.

먼저 데이터 파이프라인 단계에서는 고품질의 AI 모델 학습을 위해 '일반쓰레기', '캔·병', '종이' 클래스에 해당하는 이미지 1,500 장 이상의 원본 데이터를 확보하였다. 데이터의 다양성을 확보하고자 직접 촬영 방식과 웹 크롤링을 병행하였으며, 특히 모델이 특정 환경에 과적합되는 것을 방지하기 위해 다양한 조명, 각도, 배경 및 객체의 훼손 상태를 의도적으로 반영하여 데이터의 현실성을 높였다. 수집된 데이터는 Roboflow 플랫폼을 통해 정밀한 라벨링 작업을 거쳤으며, 학습, 검증, 테스트 세트를 7:2:1 의 비율로 분할하고 좌우 반전 및 노이즈 추가 등의 데이터 증강 기법[2]을 적용하여 모델이 다양한 시각적 변화에 강인하게 반응하도록 훈련 환경을 조성하였다.

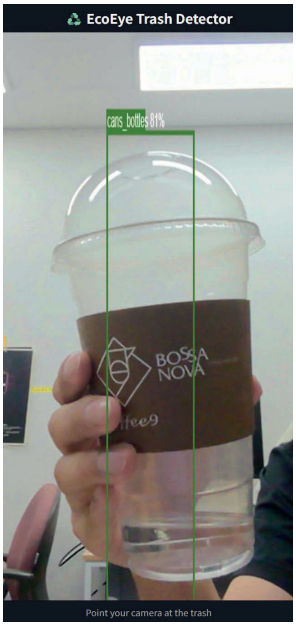
B. AI 모델 학습 및 최적화

모델 학습 파이프라인에서는 실시간성과 정확성의 균형을 고려하여 최신 객체 탐지 아키텍처인 YOLOv8s 를 채택하였다. Google Colab 의 GPU 환경에서 전이 학습을 진행하였으며, 이미지 크기를 320 으로 설정하여 모바일 환경에서의 추론 속도를 최적화하였다. 학습 과정에서는 매 에포크(Epoch)마다 검증 세트의 mAP 점수를 모니터링하여 모델 성능을 지속적으로 평가하고 개선하였다.

학습이 완료된 PyTorch 모델은 웹 브라우저 기반의 온디바이스(On-Device) AI 환경에서 구동하기 위해

TensorFlow 그래프 모델 포맷으로 변환되었다. 이 과정에서 모델의 로딩 속도를 높이고 메모리 부담을 줄이기 위해 INT8 정수 양자화 기술[3]을 적용하였다. 이를 통해 원본 모델 대비 약 50%의 용량을 축소하여 최종적으로 10.7MB 의 경량화된 모델을 확보하였으며, 이는 모바일 네트워크 환경에서 사용자에게 빠른 초기 로딩 속도를 제공하는 핵심 요소가 되었다.

C. 실시간 웹 구현 및 성능 분석



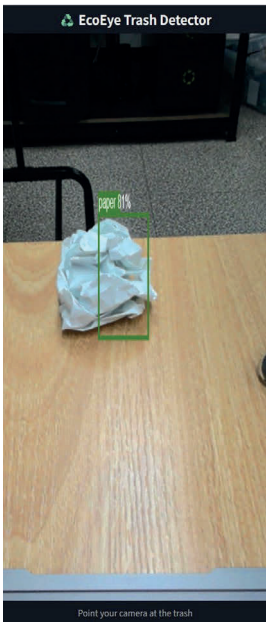


그림 2. 캔/병 탐지 그림 3. 종이 탐지

웹 애플리케이션 파이프라인은 React 와 TypeScript 를 기반으로 현대적인 프론트엔드 환경에서 구축되었다. 사용자의 카메라 접근을 위해 별도의 라이브러리 없이 웹 표준 API 를 활용하였으며, 모바일 기기의 후면 카메라를 우선적으로 활성화하여 실시간 영상 스트림을 HTML 비디오 요소에 연결하였다. 실시간 추론 루프는 브라우저의 렌더링 주기에 맞추어 API 를 통해 구현되었으며, 매 프레임마다 캡처된 영상을 텐서로 변환하여 TF.js 모델에 입력으로 전달한다. 모델의 추론 결과는 NMS 알고리즘을 거쳐 정제된 후, 비디오 요소 위에 겹쳐진 캔버스에 바운딩 박스와 클래스 정보로 시각화되어 사용자에게 직관적인 피드백을 제공한다. 그림 2 와 그림 3 은 본 시스템을 통해 캔/병 및 종이를 탐지하는 장면을 보여주고 있다.

그림 4. 테스트 데이터셋에 대한 모델 성능 평가

그림 4 는 테스트 데이터셋에 대한 모델 성능 평가 결과를 보여주고 있다. 최종 구현된 시스템의 성능을 분석한 결과, 테스트 데이터셋에 대해 mAP50 93.1%라는 우수한 정확도를 달성하였다. 특히 iPhone 16 및 Galaxy S24 등의 최신 기기에서 테스트했을 때, WebGL 백엔드(Backend)를 통한 GPU 가속을 활용하여 초당 15~20 프레임의 끊김 없는 추론 속도를 보여주었다. 비록 투명한 플라스틱이나 복잡하게 겹쳐진 객체에 대해 일부 미탐지가 발생하는 한계가 관찰되었으나, 전반적인 UI/UX 설계와 온디바이스 AI 연산의 실용성을 통해 앱 설치 없는 실시간 쓰레기 분류 시스템의 타당성을 성공적으로 입증하였다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 YOLOv8 과 TensorFlow.js 를 결합한 웹 기반 실시간 쓰레기 분류 시스템을 제안하였다. 실험을 통해 모바일 환경에서의 높은 정확도와 실시간 성능을 검증하였으며, 특히 앱 설치가 필요 없는 웹 방식을 통해 사용자 접근성을 극대화하였다. 향후 연구로는 탐지 클래스의 세분화와 오배출 경고 로직 고도화를 통해 시스템의 실용성을 더욱 강화할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구(No. RS-2024-00398199)이고, 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2023R1A2C2002990)임.

참 고 문 헌

[1] Jocher, G., et al., "YOLO by Ultralytics", GitHub Repository, 2023.

[2] 박승우 외, "딥러닝을 활용한 재활용 폐기물 선별 시스템 개발", 한국컴퓨터정보학회논문지, 2020.

[3] Chen, J., & Ran, X.. "Deep learning with edge computing: A review", 2019.