

디지털 트윈 기반 서비스 로봇 운영 시스템 구성

디지털 트윈 기반 사과 선별 공정 자동화

협동 -3

AI & Digital Twin 기반 지능형 자동화 시스템

Project Team

F-2 삼성

이승민, 이주학, 최대혁

멘토 : 김민수, 김도영

목 차 INDEX

01	프로젝트 개요 주제 · 배경 · 비전 시스템 · 구조 · 활용방안	→
02	팀 구성 및 역할 팀원별 담당 업무 및 협업 구조	→
03	핵심 전략 파라미터 스윙 최적화 및 기술적 접근 전략	→
04	수행 경과 데이터 확장 · Split 개선 · 증강 전략 (모델 최적화 스토리)	→
04-1	핵심 기술 및 통신 검증 코드 흐름 · DB 저장 · ROS2 통신 파이프라인 검증	→
05	사후 평가 완성도 평가 · 개선점 · 소감	→

주제 : AI & 디지털 트윈 융합 자동화

AI 비전 (YOLO) 과 Isaac Sim 물리 제어 기술을 결합하여
사과 선별 공정의 완전 자동화 및 가상화 시스템을 구축합니다 .

기획 의도 : 가상 검증을 통한 리스크 최소화

설비 구축 전 가상 환경 (Sim) 에서의 사전 검증을 통해
현장 도입 시 발생하는 비용 낭비와 다운타임 (Downtime) 을 획기적으로 제거합니다 .



NVIDIA Isaac Sim

Virtual Env & Physics



AI Logic & Control

YOLOv8 + RMPFlow



Optimization

Max Efficiency



프로젝트 개요 선정 배경 및 문제 정의

육안 선별의 한계와 품질 편차

사과의 계절 · 품종 · 외형 편차와 작업자 피로도로 품질 불균형 발생

설비 변경 시 비용 리스크

파라미터 변경 시 **라인 중단 (Downtime)** 과 막대한 실험 비용 불가피

현장 반복 실험의 물리적 제약

비정형 상황 재현 불가 → 시뮬레이션 기반 **가상 파라미터 탐색** 필수

Reality (Pain Points)



중단



비용



불가



Digital Twin Solution

⚡ 무한 반복 테스트

⚙️ 파라미터 즉시 최적화

📊 사전 검증 ROI 예측

Necessity Flow

현장 제약 증가

반복 실험 난해

비용 / 리스크

디지털 트윈 도입

프로젝트 개요 내용 (공정 범위)

주제 : 협동 -3 디지털 트윈 기반 서비스 로봇 운영 시스템

팀명 : F-2 삼성

인피드 및 라인 정렬

인피드 광폭 투입 → 3 갈래 분기 → 1 열 정렬 유도

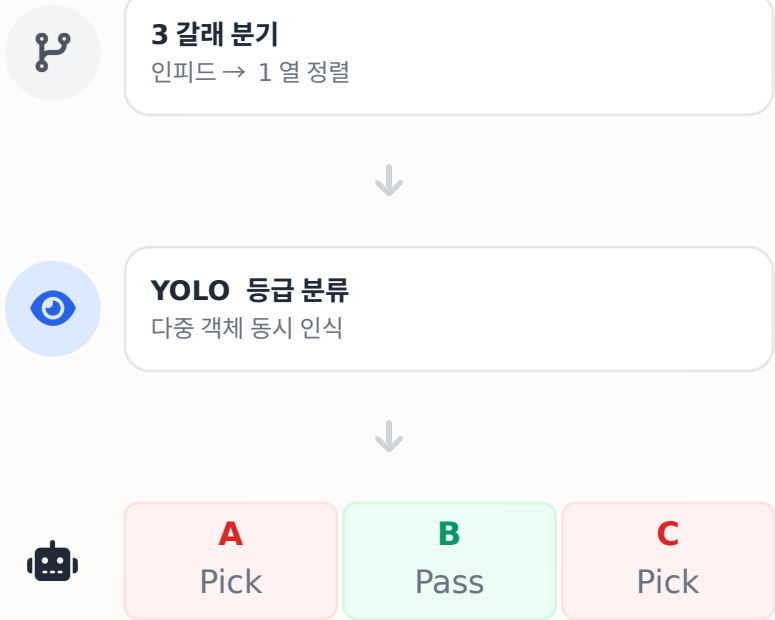
비전 인식 및 로봇 제어

YOLO 다중 검출로 등급 분류후 ,
로봇이 **A·C 등급은 픽 (Pick)** 하고 **B 등급만 통과 (Pass)** 하여 배출

시뮬레이션 제약 및 최적화

컨베이어는 형상만 렌더링하고 , 실제 이동은
사과 속도 · 굴림 모델로 경량화하여 성능 확보

LOGIC FLOW



Process Flow Architecture



프로젝트 개요 구조 및 활용 방안

주제 : 협동 -3 디지털 트윈 기반 서비스 로봇 운영 시스템

팀명 : F-2 삼성

모듈러 시스템 구조 (Modular Architecture)

전체 공정을 인피드 / 분기 / 비전 / 분류 / 로봇 / 배출의 독립된 모듈로 설계하여 유지보수와 기능 확장이 용이한 구조 확립

활용 방안 : 사전 검증 및 최적화

디지털 트윈 환경에서 충분히 테스트.
“빠르게 처리할 것인가, 정확하게 분류할 것인가”에 대해 현장에 맞는 최적의 균형점 도출

확장성 (Scalability)

사과 선별 외에도 유사한 외형을 가진 부품 (볼트 / 너트) 이나 다른 농산물 (감귤, 토마토 등) 의 등급 분류 공정으로 범용화 가능

System Module Architecture

INPUT LAYER
Infeed & Branch

SENSING LAYER
Vision System

YOLO Detection
Multi-Camera

ACTION LAYER
Robot Control

RMPFlow
Pick & Place

OUTPUT LAYER
(A/B/C)

Development Workflow

시스템 설계

시뮬레이션 구현

파라미터 튜닝

결과 리포트

현장 전개

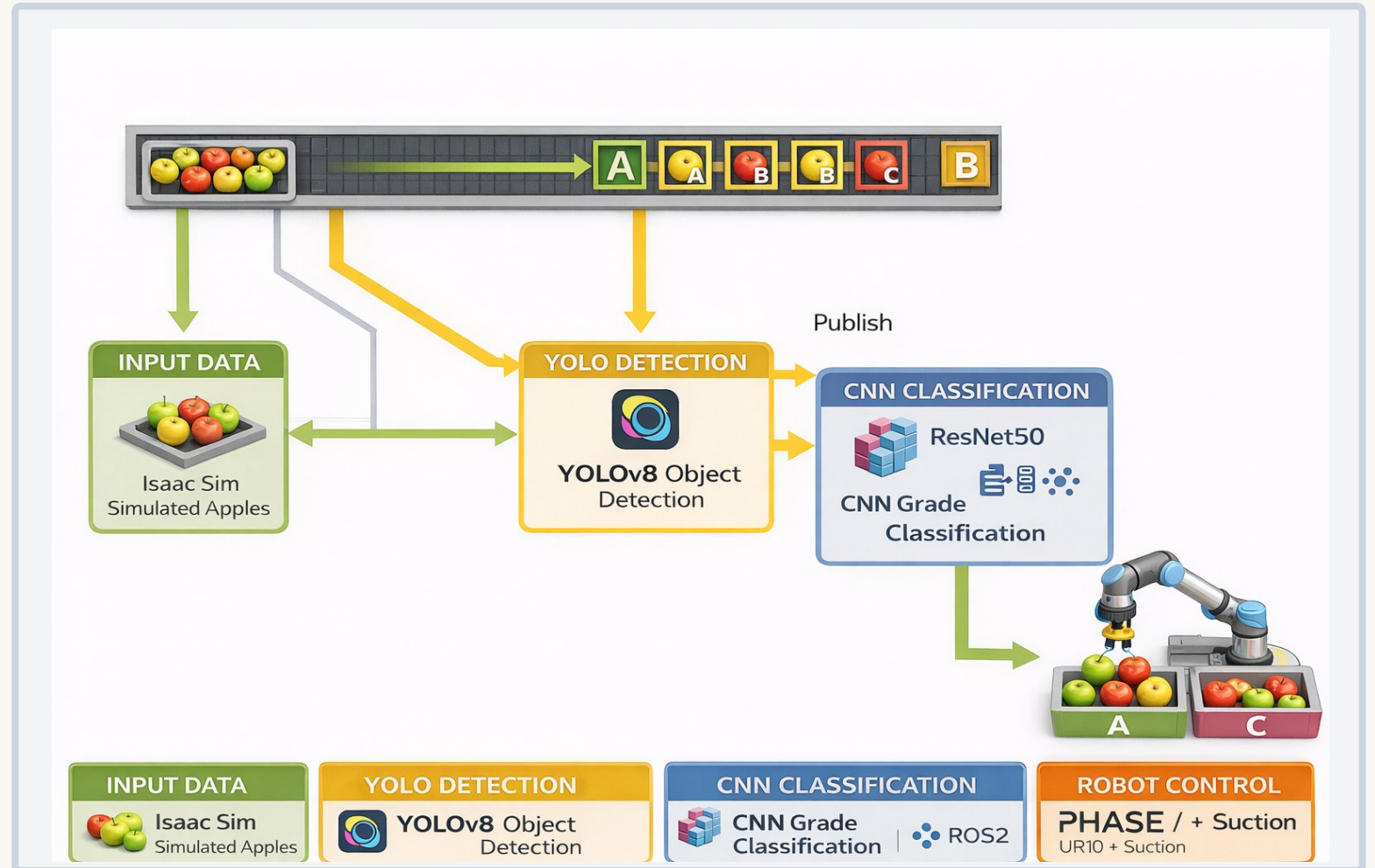
프로젝트 전체 구조 및 공정 흐름 도식

모듈러 시스템 구조

- 각 공정 단계별 독립적 기능 수행 고려
- 유연한 확장성을 고려한 아키텍처 설계

전체 공정 파이프라인

인피드 분기 비전 분류 로봇 배출



프로젝트 수행 절차 및 마일스톤

● Start: 19 일

End: 24 일 ●

Day 01 19 일

기반 구축

- 📅 프로젝트 계획
- 👥 역할 분담

Day 02 20 일

환경 구성

- 🌐 Isaac Sim
- ➡ USD 로드

Day 05 23 일

제어 구현

- 🔧 물리 엔진
- 🤖 로봇 제어

Day 03 21 일

데이터셋

- 📷 이미지 수집
- 🔍 가공 / 전처리

Day 04 22 일

AI 모델링

- 👁️ YOLO 학습
- 🧠 CNN 분류기

Day 06 24 일

최종 통합

- 🔗 시스템 연동
- 🎯 최종 시연

🗄️ 데이터 구축

🕶️ Digital Twin

🧠 AI & Logic

✅ 검증 완료

사과 투입 및 물리 엔진 적용 결과

주제 : 협동 -3 디지털 트윈 기반 서비스 로봇 운영 시스템

팀명 : F-2 삼성

핵심 검증 포인트

물리 엔진 최적화 주요 성과



물리엔진 충돌처리
Collision Handling



병목 현상 방지
Bottleneck Prevention



안정적 동작 구현
Stable Operation



비전 시스템 최적화 카메라 선정 검증

카메라 각도 비교 실험

사과 선별 정확도를 높이기 위해 두 가지 카메라 배치 (상부 vs 사선) 에 따른 객체 인식률 (mAP) 차이를 비교 분석하였습니다 .

실험 결과 및 분석

구 (Sphere) 형태 특성 : 각도 변화보다 조명 및 해상도가 더 큰 변수

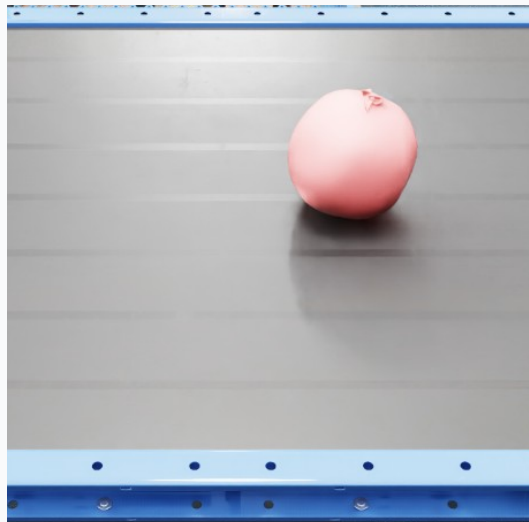
모델 정확도 차이 없음

사과는 둥근 형태로 , 어느 각도에서 촬영하든 외형적 특징 (Shape Features) 차이가 미미함

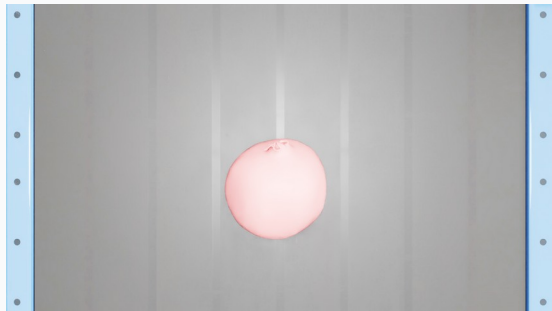
최종 선정 : 상부 단일 카메라

복잡한 멀티 카메라 구성 대신 상부 단일 카메라를 채택하여 시스템 복잡도를 낮추고 데이터 처리에 집중했습니다 .

Case A



Case B



“

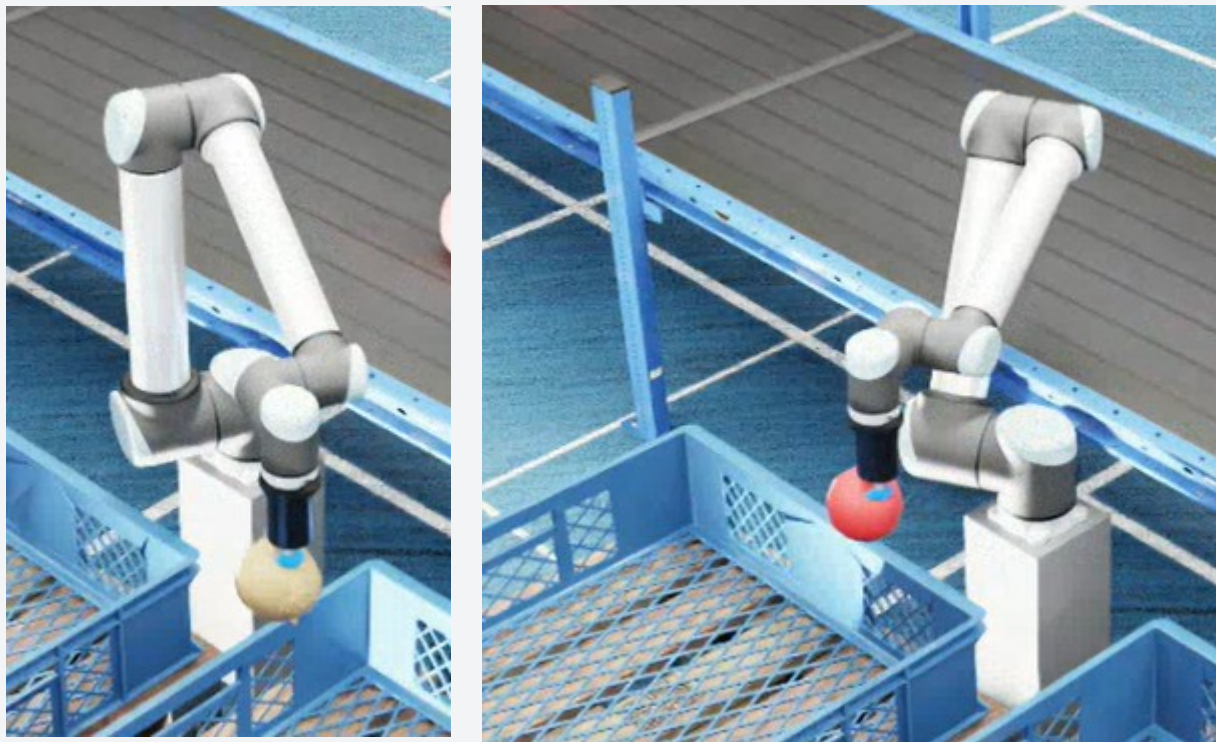
" 각도보다 데이터 · 증강 · 학습 전략이 성능을 결정합니다 ."

물리적 카메라 배치보다 데이터셋 품질 확보 (Data-Centric AI) 가 핵심임을 입증

로봇 암 Pick & Place

주제 : 협동 -3 디지털 트윈 기반 서비스 로봇 운영 시스템

팀명 : F-2 삼성



핵심 동작 포인트

01 PHASE 기반 제어
안정적인 상태 관리 로직 적용

02 Suction Open-Close
정확한 진공 흡착 / 해제 타이밍

03 Pick & Place 성공
오차 없는 목표 좌표 이동

i RGB 카메라와 로봇 암 좌표계 동기화를 통해 정확한 위치 제어를 수행합니다.

팀 구성 및 역할 Team Structure

Project F-2 삼성

이승민

TEAM
LEADER



시스템 설계 및 모델 구축

- **YOLO-CNN** 모델 구축
- 전체 시스템 설계 및 통합
- 학습 데이터 정제

이주학

MEMBER

환경 구성 및 디자인

- 디지털 트윈 환경 구성
- 시나리오 디자인
- 공정 시뮬레이션 설계

최대혁

MEMBER

데이터 수집 및 기획

- 디지털 트윈 환경 구성
- 발표 자료 (PPT) 제작
- 물리 디자인

수행 절차 및 방법

주제 : 협동 -3 디지털 트윈 기반 서비스 로봇 운영 시스템

팀명 : F-2 삼성

🎯 핵심 전략

- **파라미터 스위프 (Sweep) 최적화**
카메라 위치, 컨베이어 속도, 분기 각도 등 주요 변수를 가상 환경에서 반복 실험하여 최적값 도출
- **시뮬레이션 기반 병목 제거**
3 갈래 분기 지점과 로봇 작업 영역의 트래픽을 분석하여 병목 구간 사전 식별 및 해소

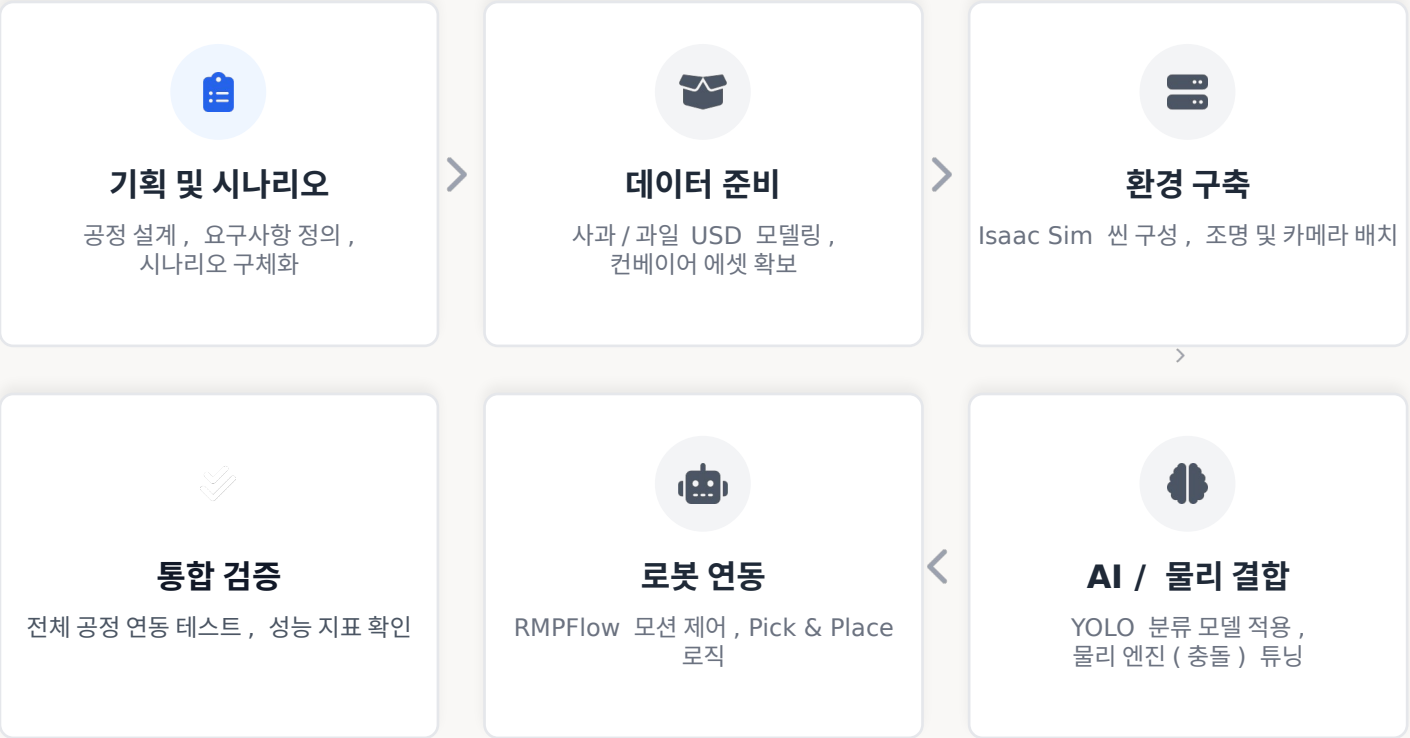
PROJECT TOOLS

Isaac Sim Python YOLOv8 ROS2

Overall Process Flow



Implementation Workflow



데이터 확장 및 품질 개선 6 단계 최적화 프로세스

Process: 문제 인식 → 전략 수립 → 최종 효과

1 Problem
문제 인식 (초기 상태)

초기 데이터 수 22 장 (매우 부족)

× 클래스 간 미세한 차이 (A/B/C) 분류 불가

2 Quantity
데이터 확장 전략

확장 규모 20 장 → 200 장 +

💡 단순 증량이 아닌 '형태 다양성 (회전 / 위치 / 가림)' 확보가 핵심 목적

3 Distribution
분할 방식 개선

기존 고정 폴더 분리 → 편향 (Bias)

개선 Random Split 적용 → 일반화 성능 ↑

Train (Random) Val (Random)

4 Augmentation
증강 전략 조정

Maintained

Flip Rotate

Remove
Random Crop

Why? 사과 등급의 핵심인 전체 형태 보존 필수

5 Training
학습 전략 변화

Epoch Flow 20 → 7 → 2

✓ 데이터 품질 확보 시 작은 Epoch 로 고성능 달성

6 Conclusion
최종 효과 요약

- ✓ 데이터 수 확장 + 증강 최적화
- ✓ Random Split 검증 안정성 확보
- ✓ 작은 Epoch 으로 고성능 달성

모델 최적화 증강 전략 및 Hyperparameter 튜닝

증강 전략 변경 : Random Crop 제거

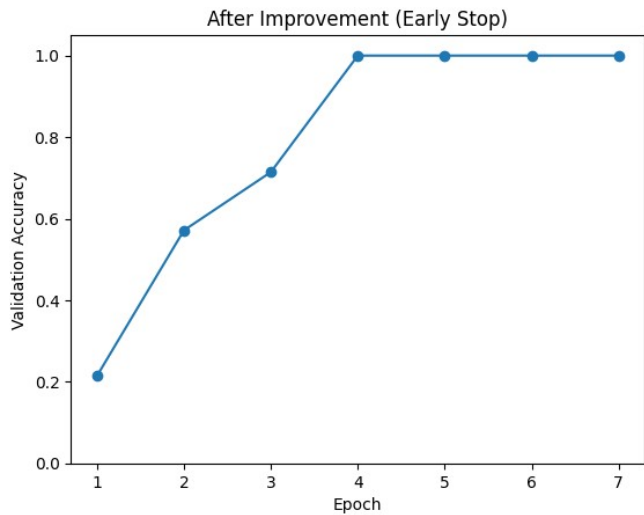
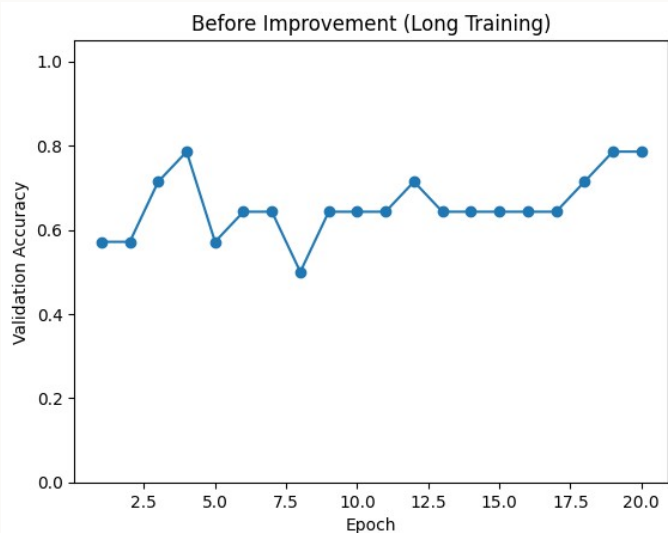
사과의 형태 (꼭지 , 돌기) 가 등급 분류의 핵심 단서입니다 .
Random Crop 은 이를 잘라내어 성능 저하를 유발하므로 제거하고 ,
형태 보존 위주의 증강 (Rotation, Flip 등) 으로 전환했습니다 .

Epoch 튜닝 (20 → 7 → 2) 및 결론

초기 Epoch 20 에서 과적합 (Overfitting) 징후 발생

데이터 품질 확보 후 **Epoch 2** 만으로도 최고 성능 달성

결론 : 충분한 양의 양질의 데이터 확보 시 과도한 Epoch 학습 불필요



```
rokey@rokey-Vector-16-HX-AI-A2XWIG:~/Downloads/work_23$ python3 train_resnet50_abc.py
RUNNING FILE: /home/rokey/Downloads/work_23/train_resnet50_abc.py
DATA_ROOT: /home/rokey/Downloads/work_23
device: cuda
classes (MUST be ['A','B','C']): ['A', 'B', 'C']
train_len: 649 val_len: 162
class_counts(train): [206, 221, 222]
class_weights: [0.004854368977248669, 0.004524887073785067, 0.0045045046135783195]
unique targets: [0, 1, 2]
Epoch 1/2: 100%|██████████| 21/21 [00:05<00:00, 3.64it/s, loss=0.0142, lr=0.0003]
[VAL] loss=1.0702 acc=0.7469
[SAVE:BEST] resnet50_abc_out/best_resnet50_abc.pt (acc=0.7469)
[SAVE:CKPT] resnet50_abc_out/checkpoint_latest.pt (epoch=1)
Epoch 2/2: 100%|██████████| 21/21 [00:05<00:00, 3.71it/s, loss=0.0314, lr=0.00015]
[VAL] loss=0.0000 acc=1.0000
[SAVE:BEST] resnet50_abc_out/best_resnet50_abc.pt (acc=1.0000)
[SAVE:CKPT] resnet50_abc_out/checkpoint_latest.pt (epoch=2)
[SAVE:LAST] resnet50_abc_out/last_resnet50_abc.pt
DONE best_acc: 1.0
```

증강 전략 수정

Random Crop 제거

Epoch 단축 (20→2)

최적 모델 확보

DB 기반 결과 관리 및 통신 검증

>_ ROS2 Topic Publish Log

Classification Results DB

```
[INFO] [1769240551.835480867] [camera_listener]: Subscribing: /rgb
[INFO] [1769240551.835995789] [camera_listener]: Publishing: /apple/grade
[INFO] [1769240551.836103121] [camera_listener]: DB: /home/rokey/Desktop/detect_classification/apple_grade_counts.db
[INFO] [1769240600.496003560] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: C (conf=1.000) | box=0 | pub_count=1 | DB C=1 | ALL={'A': 0, 'B': 0, 'C': 1}
[INFO] [1769240616.214098367] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: B (conf=1.000) | box=0 | pub_count=2 | DB B=1 | ALL={'A': 0, 'B': 1, 'C': 1}
[INFO] [1769240629.691559004] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: B (conf=1.000) | box=0 | pub_count=3 | DB B=2 | ALL={'A': 0, 'B': 2, 'C': 1}
[INFO] [1769240646.308008897] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: A (conf=1.000) | box=0 | pub_count=4 | DB A=1 | ALL={'A': 1, 'B': 2, 'C': 1}
[INFO] [1769240660.631695992] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: B (conf=1.000) | box=0 | pub_count=5 | DB B=3 | ALL={'A': 1, 'B': 3, 'C': 1}
[INFO] [1769240675.987659398] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: B (conf=1.000) | box=0 | pub_count=6 | DB B=4 | ALL={'A': 1, 'B': 4, 'C': 1}
[INFO] [1769240691.571523787] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: B (conf=1.000) | box=0 | pub_count=7 | DB B=5 | ALL={'A': 1, 'B': 5, 'C': 1}
[INFO] [1769240706.387894051] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: C (conf=0.864) | box=0 | pub_count=8 | DB C=2 | ALL={'A': 1, 'B': 5, 'C': 2}
[INFO] [1769240722.839505002] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: B (conf=1.000) | box=0 | pub_count=9 | DB B=6 | ALL={'A': 1, 'B': 6, 'C': 2}
[INFO] [1769240736.695170106] [camera_listener]: PUBLISH /apple/grade: A (conf=1.000) | box=0 | pub_count=10 | DB A=2 | ALL={'A': 2, 'B': 6, 'C': 2}
```

검증 포인트 : 분류 (Inference) → 통신 (Publish) → DB 저장 (Archive) 까지 데이터 파이프라인 무결성 확인

SUB_PUB.PY FLOW

- 1 **Image Subscribe**
Isaac Sim /rgb 토픽 수신
- 2 **YOLO Object Detection**
객체 탐지 및 좌표 추출
- 3 **CNN Classification**
Crop 이미지 추론 (A/B/C 등급)
- 4 **Publish Grade Topic**
/apple/grade 발행 (로봇 제어용)
- 5 **DB Accumulation**
결과 카운트 저장 및 대시보드 업데이트

핵심 기술 및 코드 흐름

sub_pub.py / train_resnet50_abc.py

Core Logic Details



데이터셋 구축 및 학습

YOLOv8 로 객체 (사과) 를 자동 감지하여 이미지를 저장하고 , `train_resnet50_abc.py` 에서 CNN 모델을 학습시켜 Best 가중치 생성



ROS2 통신 브리지 (sub_pub.py)

Isaac Sim 에서 전송하는 `/rgb` 토픽을 구독 (Sub) 하고 , 분류 결과를 `/apple/grade` 토픽으로 발행 (Pub) 하여 시뮬레이션 제어



Hybrid Inference (2-Stage)

1 단계 : **YOLO** 가 이미지 내 사과 위치 (BBBox) 탐지
2 단계 : **ResNet50** 이 A/B/C 등급 정밀 분류



분류 기반 로봇 제어

판정된 등급 (A/C) 은 Pick & Place 수행 , B 등급은 통과 (Pass) 시키는 로직을 물리 엔진에 실시간 반영

EXECUTION FLOW

1

Data Collection

YOLO 객체 감지 → Image Save

2

Model Training

ResNet50 CNN 모델 학습 → Best 가중치 저장

3

Real-time Inference

Isaac Sim RGB 토픽 수신 → YOLO+CNN 등급 분류

4

Publish Result

ROS2 Topic 발행 (/apple/grade: A/B/C)

5

Robot Control

분류 결과 기반 Pick(A/C) or Pass(B) 동작

사후 평가 완성도 자체 평가

주제: 협동 -3 디지털 트윈 기반 서비스 로봇 운영 시스템

팀명: F-2 삼성

핵심 기술 구현 성공 (Core Technology)

AI 기반 자동 등급 분류 성공: YOLO + CNN 모델 융합으로 정밀도 확보

디지털 트윈 환경 구축 완료: Isaac Sim 기반 가상 공정 구현

시스템 통합 및 데이터 관리 (Integration)

ROS2 연동 로봇 암 제어 안정화: Pick & Place 동작 최적화

DB 기반 분류 결과 관리 시스템 구현: 실시간 데이터 파이프라인 완성

Overall Score

Target: 10

10 / 10

Achievement

100%

사전 기획 단계에서 설정한
핵심 기능 구현 및 시스템 통합 목표를
성공적으로 달성하였습니다.

설계 (Design)

구현 (Dev)

검증 (Test)

평가 (Evaluation)

사후 평가 잘한 점 및 아쉬운 점

👍 잘한 점 (Key Success Factors)

- ✓ **물리 엔진 최적화**
시뮬레이션 환경 내 안정적인 물리 연산 구현 성공 및 충돌 처리 최적화
- ✓ **Phase 기반 로봇 제어**
순차적 로직 적용으로 충돌 없는 안정적인 픽애플레이스 (Pick & Place) 달성
- ✓ **시스템 통합 및 이해도 향상**
세분화된 코드의 시스템 통합 성공 및 USD 파일 구조 / 스킴 활용 능력 증대

⚠️ 아쉬운 점 (Limitations)

- ! **초기 구조 이해의 어려움**
ROS2 와 Isaac Sim 간 통신 및 전체 시스템 아키텍처 파악에 시간 소요
- ! **로봇암 동작 속도 한계**
실시간 처리량 증대를 위한 로봇암 작동 속도 및 모션 플래닝 개선 필요

Project Review Matrix



Success Points

Physics · Control · Teamwork



Limitations

Speed · Data · Initial Setup



Future Plan

GPU Optimization · Multi-Agent



사후 평가 개선 및 확장 방향

Phase: Future Roadmap

팀명 : F-2 삼성

🔧 기술적 개선점 (Improvements)



로봇암 작동 속도 개선

현재 속도 제약을 해소하여 사이클 타임 단축 및 처리량 증대



미세 결함 디텍팅 고도화

스크래치 등 미세 결함 학습 강화로 CNN 모델 정밀도 향상

🔲 적용 분야 확장 (Scalability)



유사 외형 부품 분류

볼트, 너트 등 크기와 형태가 유사한 산업용 부품 분류로 확장



산업 전반 응용

과일, 광물 등 등급 분류가 필수적인 식품 및 제조 산업 응용

기대 효과

Expected Benefits

$+\alpha$



다른 산업으로 확장 가능

- 결함 검출
- 품질 검사
- 제품 분류

24h



무인 자동화

- 중단 없는 연속 공정 수행
- 완전 무인 시스템 구축 가능

사후 평가 추가할 수 있는 내용

Phase: Future Roadmap

팀명 : F-2 삼성

🔧 기술적 개선점 (Improvements)

- 🕒 **로봇 암 정지 기능 추가**
태스크 완료 후 정지
- 🔍 **협동로봇 시스템 기능 추가**
모바일 로봇을 이용해 박스 이송



프로젝트 수행 소감



이론의 실무 적용 (Theory to Practice)

익숙하지 않은 툴 (Isaac Sim, ROS2 연동) 을 활용하여 비대면 수업에서 학습한 개념을 실제 프로젝트로 구현



개발 전체 사이클 경험

단순 구현을 넘어 기획 → 구현 → 개선으로 이어지는 프로젝트 완주



문제 해결 능력 향상

실무형 프로젝트 수행을 통해 돌발 이슈에 대처하는 응용력과 논리적 문제 해결 능력 배양



팀원 (Members' Review)



이승민 Team Leader

“ 시스템 통합 (System Integration) 의 중요성을 몸소 체험했습니다 .



이주학 Team Member

“ Isaac Sim 기반 디지털 트윈 환경 구축 노하우를 습득했습니다 .



최대혁 Team Member

“ 객관적 근거에 기반한 데이터 중심 사고 (Data-Driven) 를 확립했습니다 .