

프로젝트 #2 [1조] 발표평가

2차전지 VENT 결함 검출을 위한 실시간 광선 추적 기반
Photometric Stereo 오차보정 시스템

[1조] 배인호(팀장), 공민표, 정수연

deltah2000@cbnu.ac.kr, casash0123@gmail.com, syj@mmilr.com

충북대학교 산업인공지능연구센터

CONTENTS

I

프로젝트 #2 개요

프로젝트 개요 및 선정 논문 소개, 팀 구성원 소개 및 업무분장

II

서론 (Introduction)

연구 배경, 연구 필요성, 문제 정의

III

방법 및 구현 (Methodology & Implementation)

문제 해결을 위한 방법론

IV

실험 구성 및 평가 방법 (Experiment Settings)

데이터셋, 하이퍼파라미터, 컴퓨팅 환경, 평가지표

V

결과 및 분석 (Results & Analysis)

학습 결과, 정확도, 혼동행렬, 비교 평가, 결과 분석

CONTENTS



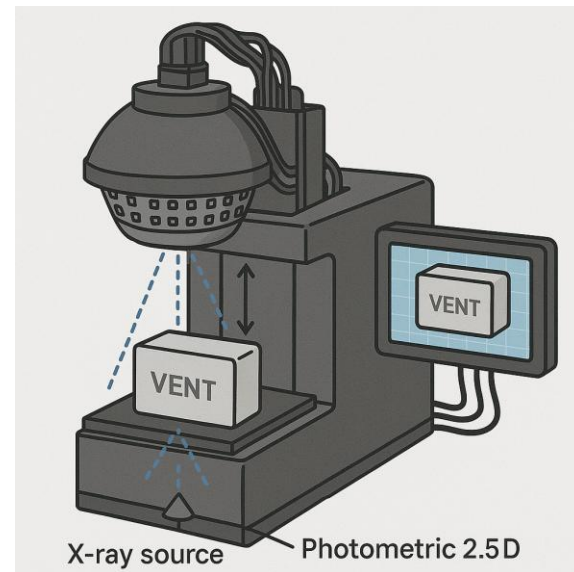
한계점 및 토론 (Limitations & Discussions)

본 연구의 한계점 및 개선점 등 논의



결론 및 향후 연구

본 연구의 결론 및 향후 연구 등 논의



■ 프로젝트 목표

2차전지 VENT 결함 검출을 위한 실시간 광선 추적 기반
Photometric Stereo 오차보정 시스템 구현

- **타겟 제품** - 2차전지 VENT부, **목적** - 결함 검출, **시스템 구현 방법** - 광선추적 + PS

■ 프로젝트 배경 및 필요성

1) 프로젝트 배경

- Photometric Stereo(PS)는 3방향 이상의 조명을 활용하여 표면 법선 벡터를 추정하는 기술[1]로 상대적으로 느린 3D 스캐닝을 대체하여 2차 전지 검사 공정에서 주로 활용됨.
- 기존의 포토메트릭 스테레오(Photometric Stereo) 기술은 표면에서 램버시안 반사를 한다는 이상적인 가정을 전제[8]로 동작하지만, 실제 금속 표면은 다양한 정반사 및 난반사 특성을 보이기에 이러한 가정이 깨지고, 그로 인해 법선 벡터 추정에 오차가 발생하게 됨.

2) 프로젝트 필요성

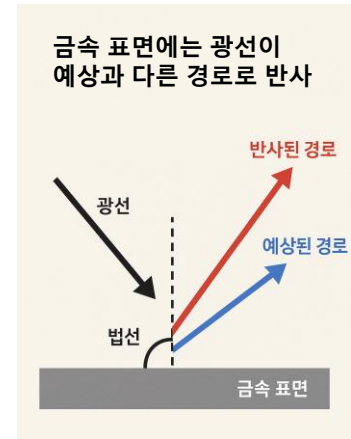
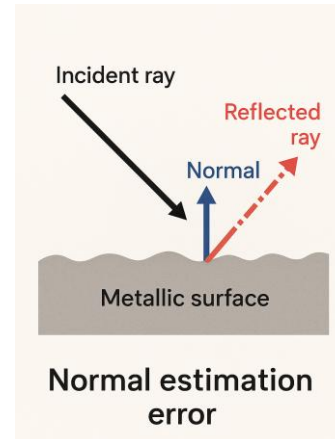
- PS 금속 표면의 난반사로 인해 각 방향별 이미지에 대해 하이라이트 제거 및 노이즈 억제의 이미지 후처리 연산이 필요하며, 이는 전체 공정 시간의 20~40%를 차지해 시간 단축이 필요함[4][9].
- 2차전지 VENT 부위의 결함은 폭발 위험성과 직결되므로, 오차를 최소화하는 고정밀 검사 기술이 필수 적임.

■ 문제 정의

Photometric Stereo는 실제 적용에는 여러 가지 현실적인 한계와 오차 요인이 존재합니다. 본 연구에서는 특히 조명 자체에서 발생하는 오차와 보정 과정의 실용성 문제에 주목하여 다음과 같은 문제를 정의합니다

1. 조명 오차로 인한 법선 벡터 추정 부정확성

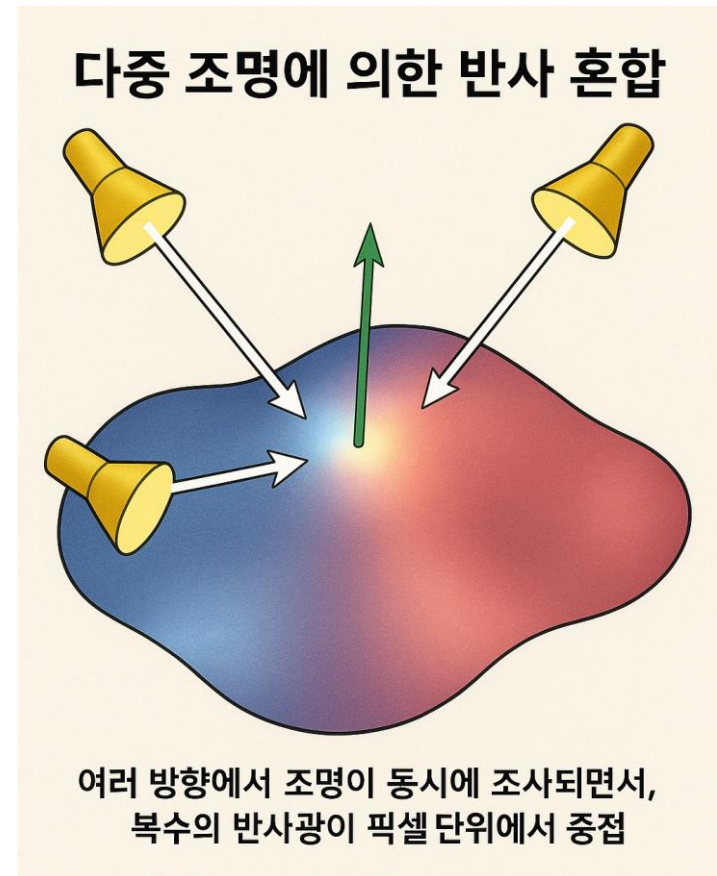
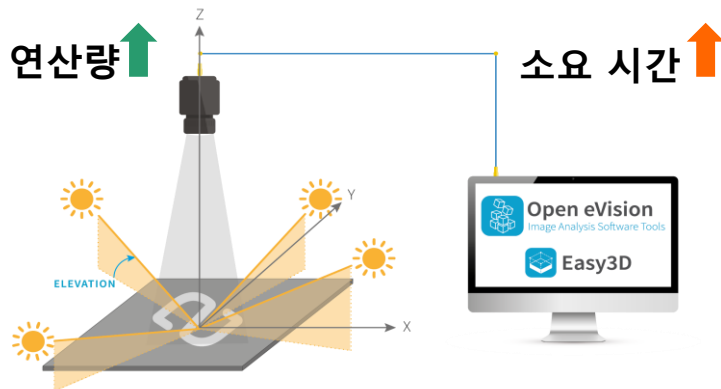
- 실제 조명은 이상적인 점광원이 아니며, LED 위치 편차, 입사각 변화, 광량 불균형 등으로 인해 정확한 입사광 방향과 세기 산출이 어려움.
- 이로 인해 금속 표면에서 광선이 예측 경로와 다르게 반사되어 Photometric Stereo 기반 법선 추정 정확도가 크게 저하됨[2][3].



■ 문제 정의

2. 기존 보정 기법의 실용성 한계

- 켈리브레이션과 후처리 알고리즘은 복잡하며[4][5], 높은 연산량과 긴 처리시간으로 인해 실제 생산 라인 등 실시간 환경에 적용이 어려움.
- 특히 2차전지 VENT 검사와 같은 고속 생산 공정에서는 보정 기법의 실효성이 떨어짐



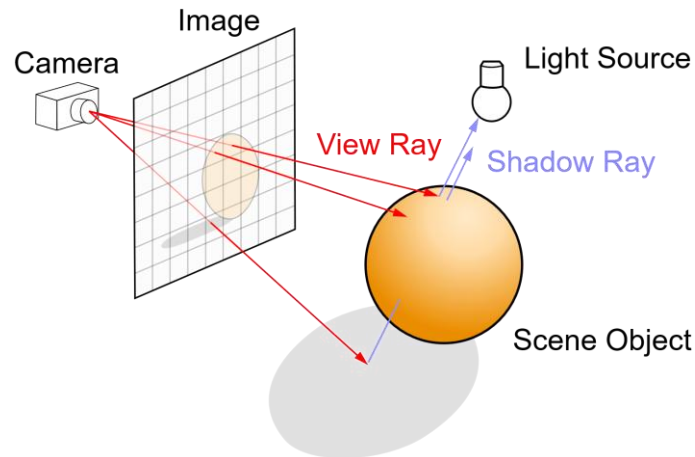
■ 주요 기여점 (문제정의와 1:1로 대응 매칭)

1. 광선 추적 기반 조명 오차 예측 및 법선 추정 정확도 향상

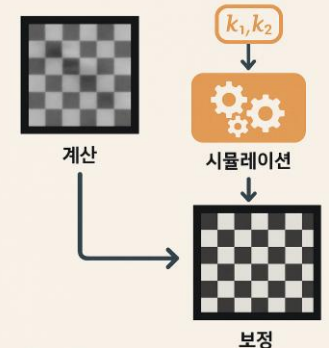
- 평면 시편을 이용한 조도 측정과 광선 추적 시뮬레이션[6]을 통해 조명 편차를 정량화하고 보정 계수 산출
- 이를 통해 Photometric Stereo의 조명 모델 오차를 정량화하고, 보다 정확한 법선 벡터 추정 가능

2. 실시간 적용 가능한 경량 보정[3][5] 시스템 구현

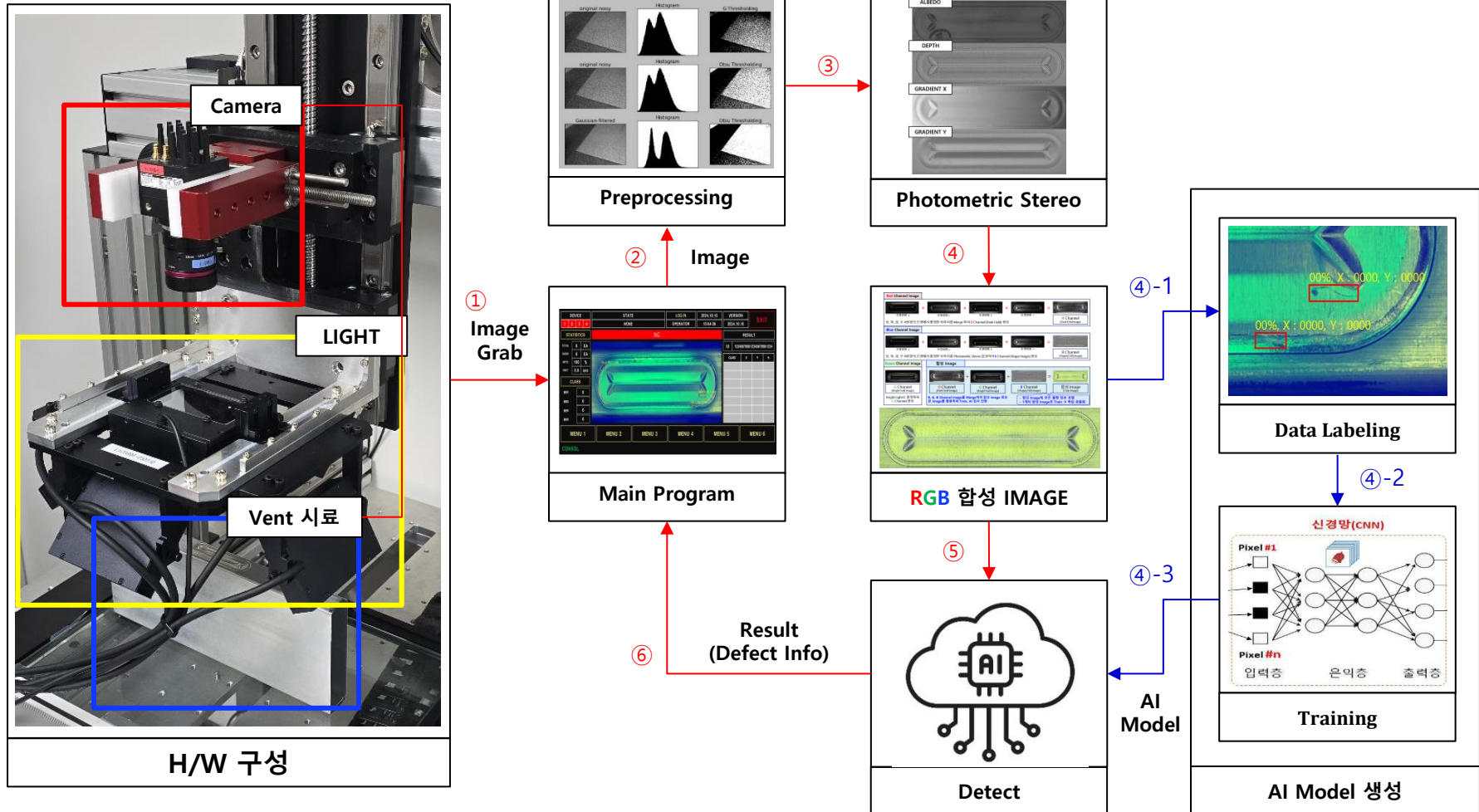
- 복잡한 후처리 없이, 사전 시뮬레이션 기반 보정 파라미터를 이용해 계산 속도를 단축
- 기존의 고비용 보정 방식 대비 낮은 연산량으로 유사한 성능 확보



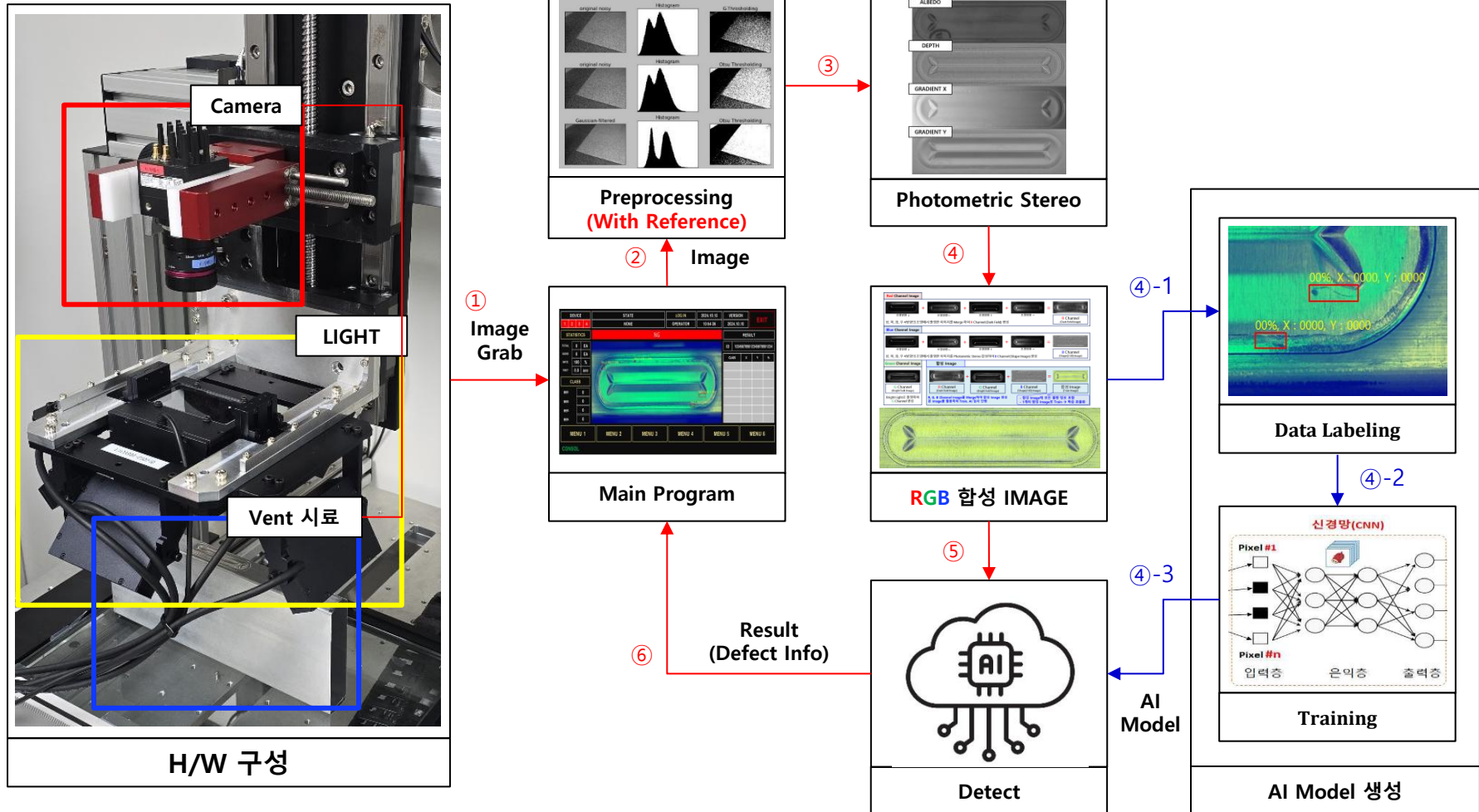
복잡한 후처리 없이,
사전 시뮬레이션 기반
보정 파라미터를 이용해
계산 속도를 단축



OVERVIEW – FLOW CHART



OVERVIEW – FLOW CHART(With Reference)



■ 방법 및 구현

1) 평면 시편 기반 조명 광량 측정

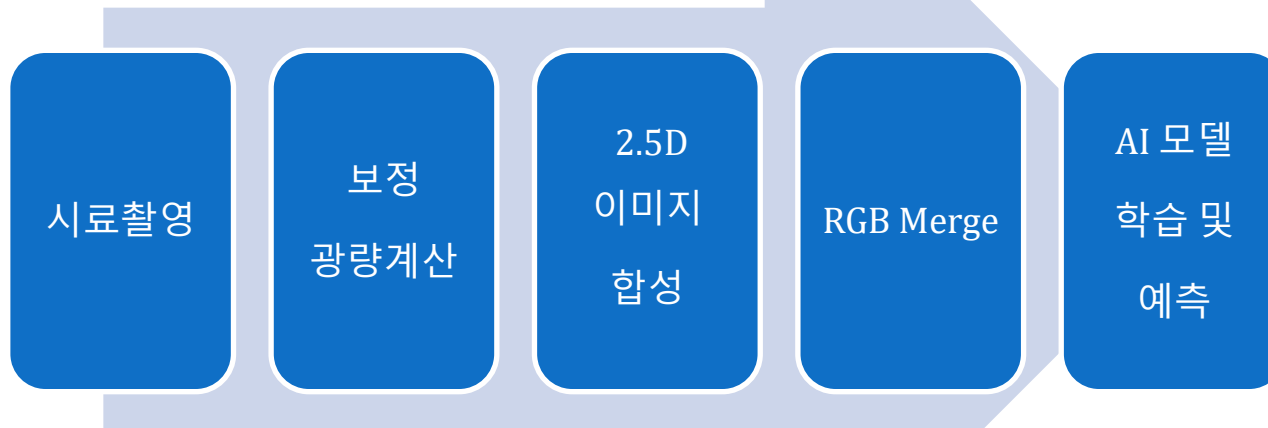
- VENT 표면의 조명 환경과 동일한 조건에서, 굴곡이 없는 평평한 시편을 촬영
 - 각 조명을 개별로 점등하여, 조명 방향에 따라 센서에 도달하는 실제 밝기값(irradiance) 을 측정
 - 이 시편은 광선의 반사 왜곡 없이, 조명 자체의 영향만을 정확히 측정하기 위한 기준 표면으로 사용됨
- ➔ 이를 통해 각 조명 방향의 실제 조도 분포를 계측하고, Photometric Stereo에서 사용하는 조명 벡터에 대응하는 보정 계수(correction factor)를 산출함

2) 조명 방향별 보정 계수 적용

- 각 조명 벡터에 대해, 시편에서 측정된 밝기값을 기준으로 보정 계수 계산
- 이 보정값은 곡면(Vent 표면)에서 Photometric Stereo를 수행할 때, 조명 강도 오차를 보정하기 위한 용도로 사용

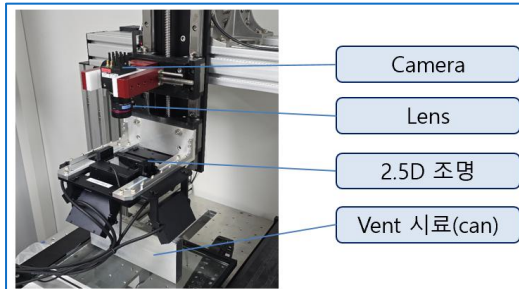
■ FLOW

1. 실제 공정과 유사한 조명 조건 하에서 VENT 시편을 다양한 방향에서 촬영 고정된 카메라와 변하는 광원 위치를 활용하여 다중 이미지를 확보
2. 평면 시편을 활용해 조명 강도 편차를 측정하고, 각 조명 벡터에 대한 **보정 계수**를 산출



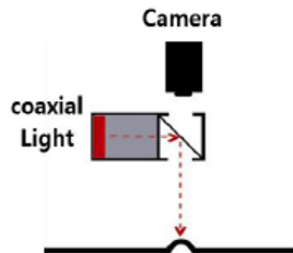
3. 보정된 다중 이미지를 통해 Photometric Stereo 방식으로 법선벡터, 곡률, 높이맵 등의 2.5D[1][4] 정보를 생성
4. 생성된 다양한 시각 특성을 R(G)B 채널에 각각 대응시켜 단일 합성 이미지를 생성
5. 합성 이미지를 딥러닝 기반 모델(Supervised Learning)로 학습시켜 결함 분류 및 위치 예측을 수행

■ 영상 취득 방법

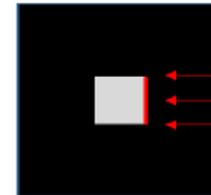
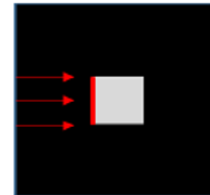
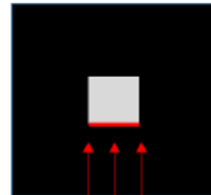
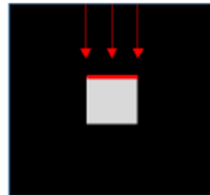
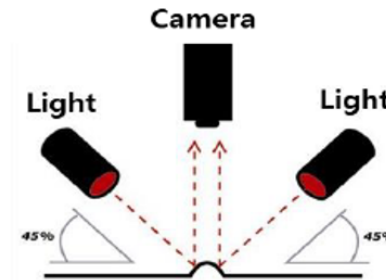


[Photometric Stereo]

5개 채널의 조명을 BF → DF상 → DF하 → DF좌 → DF우
순으로 이미지를 촬상하여 2.5D의 영상을 생성



BF 영상취득



DF 영상취득(상, 하, 좌, 우 4개의 영상 순차적 진행)

■ 영상 합성 방법

0. Calibration : 미리 정의된 각도에서 설정을 보정 (초기 세팅 단계에서만 설정)

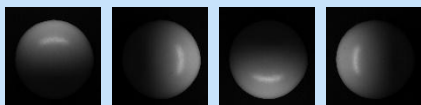
1. 이미지 촬영 및 이미지에 대한 밝기 값 계산

2. 계산된 밝기 값을 통한 2.5D 이미지 변환

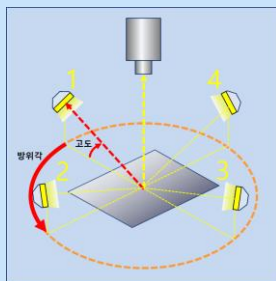
3. 결과처리 : 변환된 이미지를 통한 결함 검출

Calibration

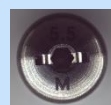
실제 촬영 환경과 동일한 조건에서
촬영된 구(또는 반구) 이미지를
통해 교정각도 계산
(구의 광택이 적을 수록 높은 성능)



이미지 촬영 및 이미지에 대한 밝기 값 계산



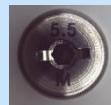
이미지 1



이미지 2



이미지 3



이미지 4

- 카메라와 물체를 고정하고 조명을 여러 번 변화시키며 촬영
 - 조명의 방위각과 고도를 통해 밝기 값 계산
- 방위각 : 조명이 수직선에서 떨어져 있는 각도 (동서남북)
 - 고도 : 조명이 수평평면에서 떨어져 있는 각도 (Z축)

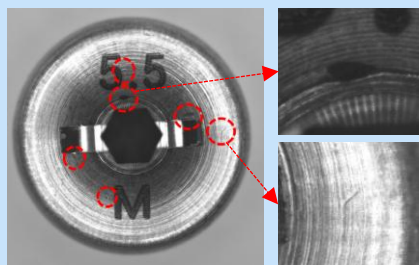
예) 이미지 1 : 방위각 90° / 고도 45°

이미지 2 : 방위각 180° / 고도 45°

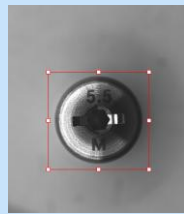
이미지 3 : 방위각 270° / 고도 45°

이미지 4 : 방위각 360° / 고도 45°

결과처리 : 결함 검출



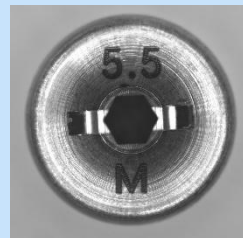
계산된 밝기 값을 통한 2.5D 이미지 변환



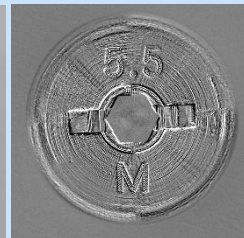
촬영 이미지 내
ROI 설정



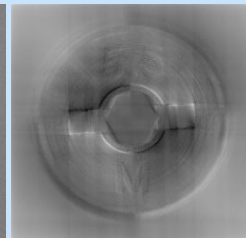
Normal



Albedo

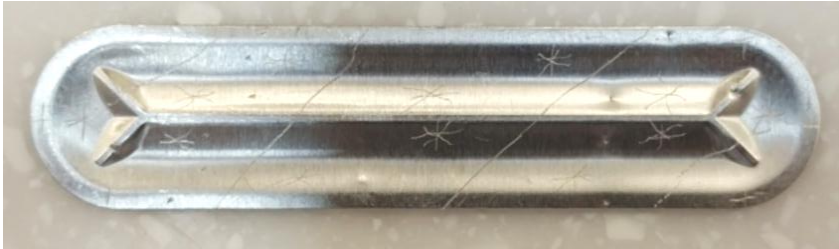


Mean Curvature

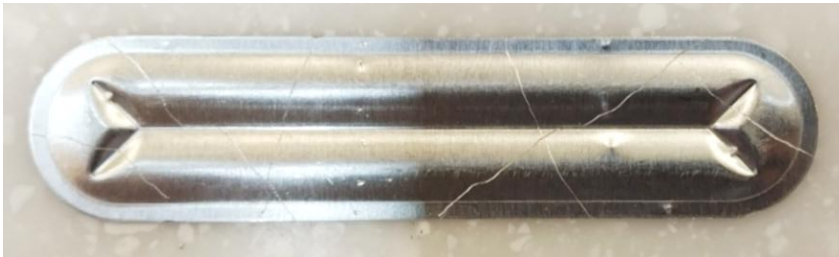


Height map

■ 검사 시료



[Vent부 상면]



[Vent부 하면]



[Vent 용접부]

■ 불량 시료 생성

- 현재 보유한 시료는 실제 어떠한 불량이 있는지 확인이 어려움
- 실제 양산라인에서 발현될 수 있는 불량을 강제로 제작하여, 취득한 영상과 실물과의 비교를 통해 검출 가능성이 어느정도인지 육안 매칭을하고자 함

■ 생성한 불량 종류

- 스크래치(다양한 방향성)
- 찌힘
- 눌림

※ 좌측 이미지는 핸드폰 영상임

실험 구성 및 평가 방법 (Experiment Settings)

■ AI 검출을 위한 RGB IAMGE 합성

Red Channel Image



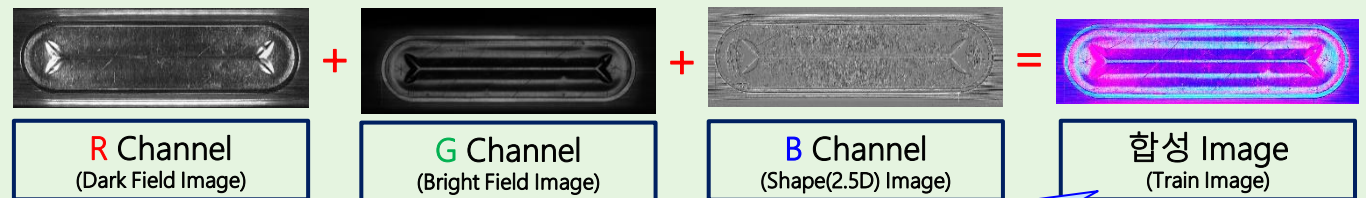
Blue Channel Image



Green Channel Image



합성 Image



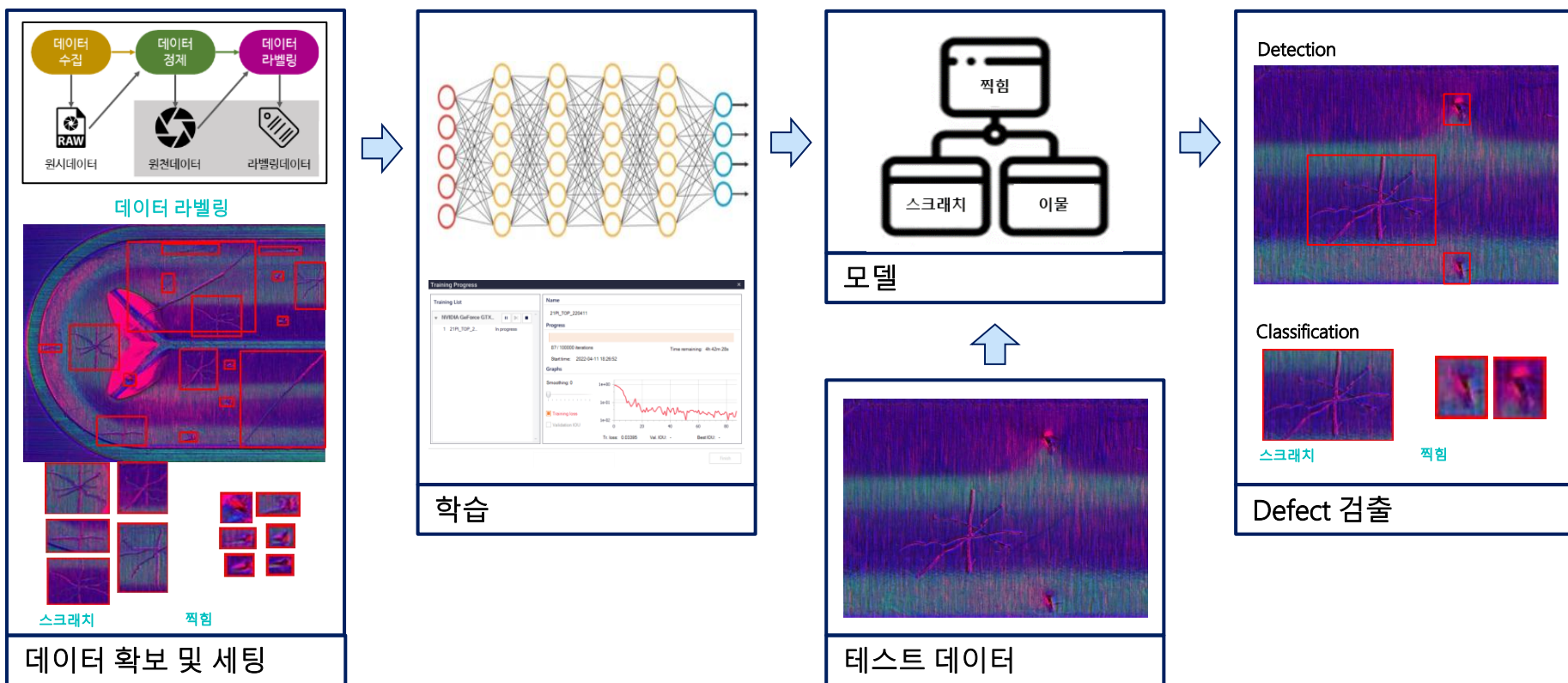
R, G, B Channel Image를 Merge하여 합성 Image
본 Image를 활용하여 Train, AI 검사 진행

- 합성 Image에 모든 불량 정보 포함
- 1개의 합성 Image로 Train → 학습 효율화

실험 구성 및 평가 방법 (Experiment Settings)

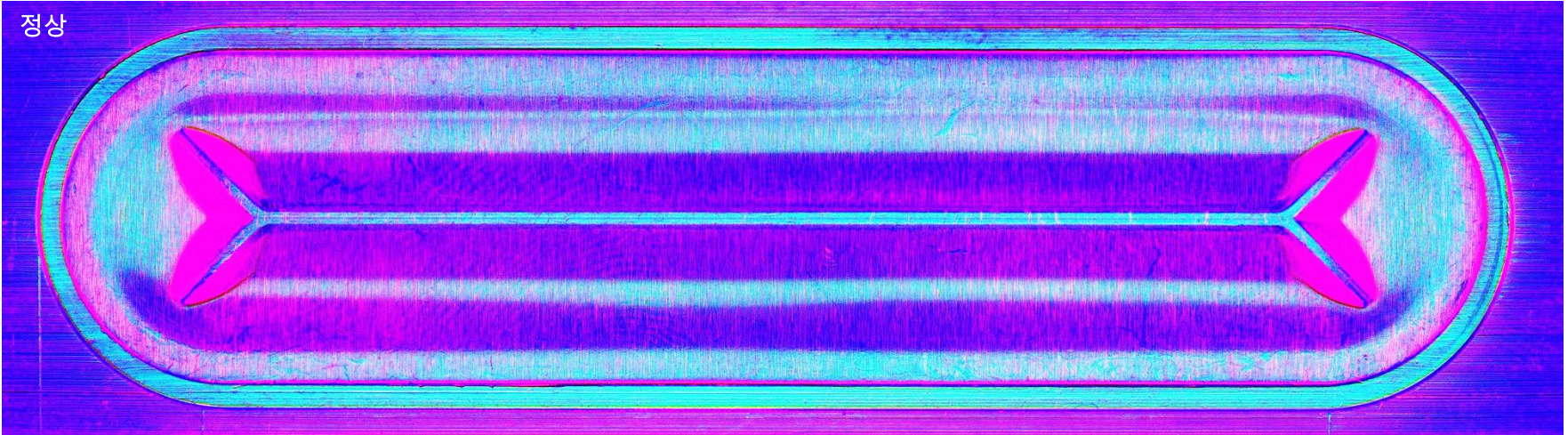
■ AI 검사 방식 : 지도학습

- 불량 종류 및 라벨(Label, 불량정보(크기, 위치 등))이 주어진 상태에서 학습하는 방식
- 다량의 학습데이터가 확보되어야 모델의 예측 정확성이 높아짐 : 다수의 레이블 데이터 필요
- 합성 Image (Train Image)를 학습 데이터로 사용하여 AI 학습
- 일정 기간/수량 검출 데이터 확보 후 딥러닝 학습데이터로 활용 : 학습 후 모델 업데이트

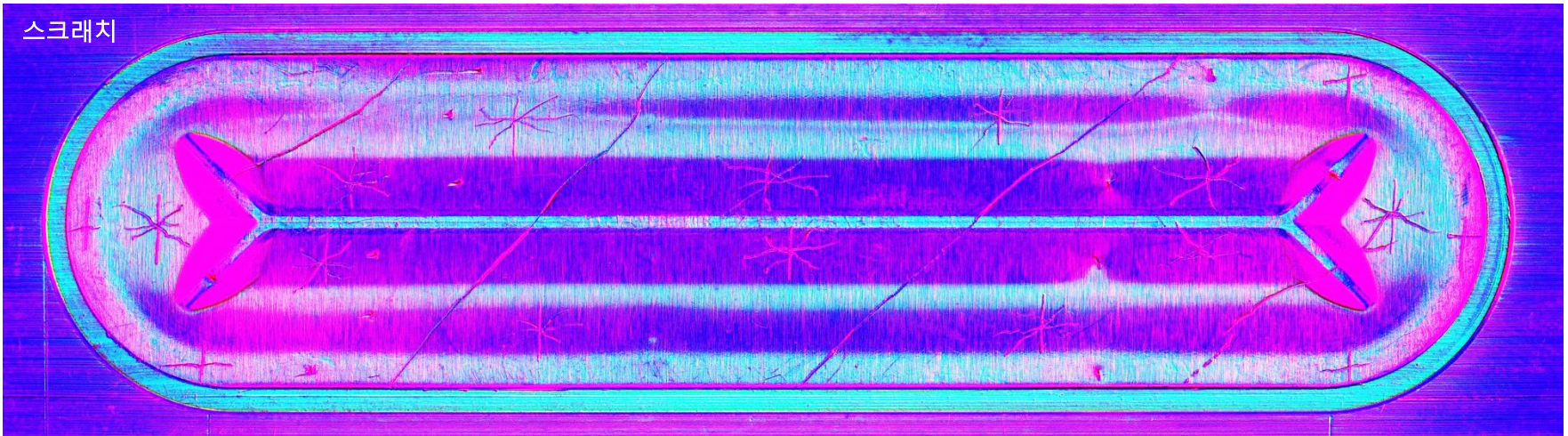


■ 합성 결과

정상



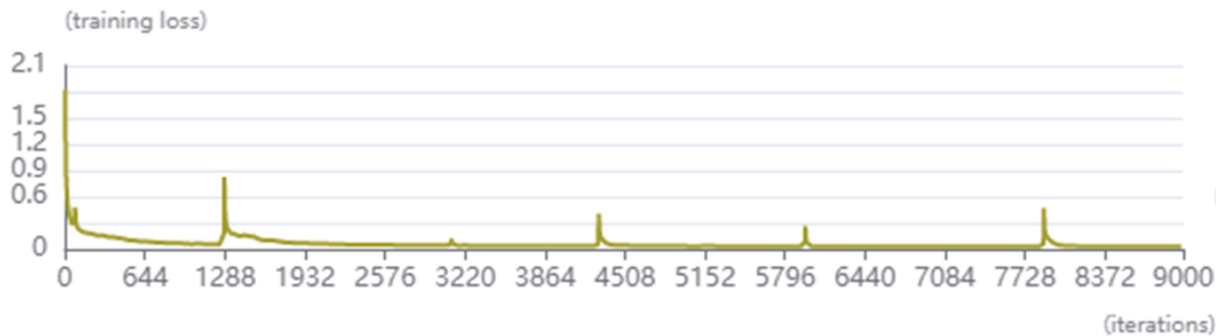
스크래치



■ 모델 생성 및 환경

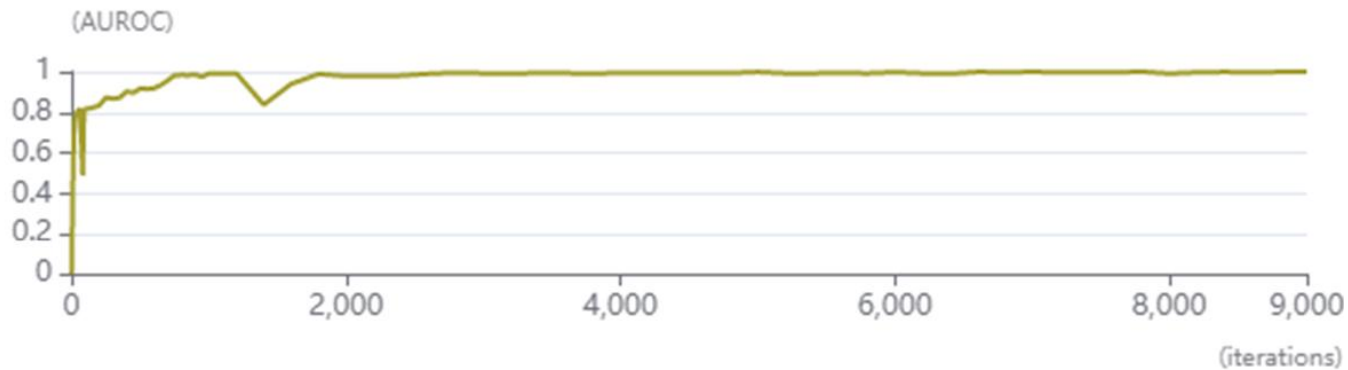
Training Loss 이력

● IADTEST(RESIZE18)(best)



소요 시간	0h 43m 9s
모델 상태	Best
네트워크 유형	Standard
반복 횟수	9,000
Image Resize	1/8 (640 * 147)
GPU	NVIDIA GeForce RTX 4090

■ ANORMAL SCORE



■ CONFUSION MATRIX

	● OK	● NG
● OK	11	4
● NG	0	0

■ 연구의 한계점

1) 보정 파라미터의 일반화 한계

- 본 연구에서 적용한 보정 계수는 특정 조명 환경과 시편 형상에 최적화되어 있음
- 다양한 조명 조건이나 재질 변화에 대한 일반화 성능은 아직 충분히 입증되지 않음.
- 실제 공정 환경이 변화할 경우, **광선 추적 기반 파라미터 재측정이 필요할 수 있음.**

2) 합성 이미지 기반 AI 학습의 제약

- RGB 채널을 기반으로 합성한 2.5D 이미지에서 불량 정보는 제한적 수량의 시뮬레이션된 시편에서 생성됨.
- AI 모델 학습 데이터가 실제 생산 환경의 불량 다양성을 완전히 반영하지 못할 가능성이 있음.
- 초기 실험에서는 **지도학습 기반 모델의 일반화 성능 검증에 한계가 있었음.**

3) 검출 성능 지표의 미완성

- 양산 테스트 이전이라 제한된 수량으로 지표에 한계가 있음
- 다양한 조명 세트 변화, 결함 종류 별 성능 평가가 누락
- 추가 시나리오 기반 실험 및 지표 확장 분석이 필요

■ 프로젝트 추가 연구 방향

1) 조명 환경 다양화에 따른 보정 모델 확장

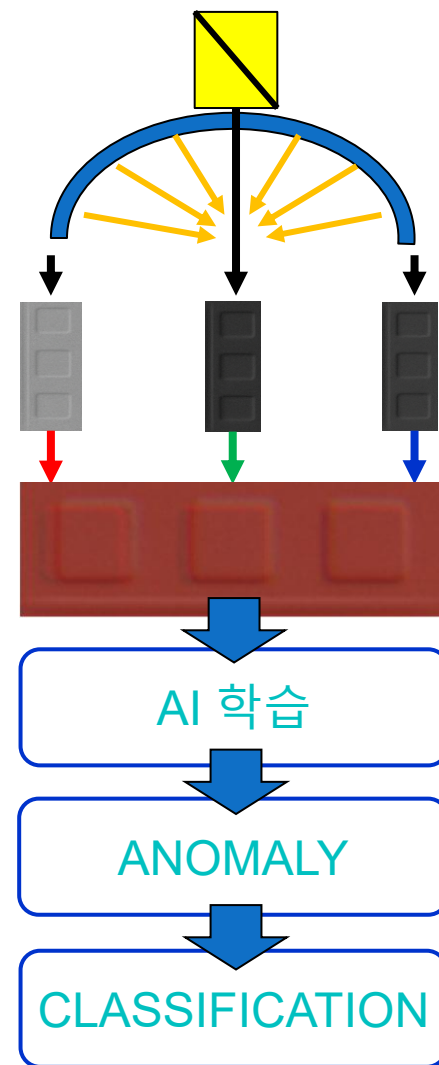
- 다양한 조명 세트에 대한 사전 시뮬레이션 기반 보정 파라미터 셋을 구축하여 자동 전환 가능한 보정 모델로 확장할 계획

2) AI 모델의 불량 검출 성능 고도화

- 지도학습(Supervised Learning)을 기반으로 초기 모델을 구현
- 향후 불량 유형이 불명확하거나 소량일 때를 위한 반지도학습 / 자가학습 기법 적용을 검토
- 다양한 실제 VENT 불량 사례를 수집하여 정밀 분류(Classification) + 위치 검출(Localization) 복합 AI 모델로 발전

3) 실시간 처리 검증 및 임베디드 시스템 적용

- 향후 연구에서는 제안한 시스템의 프레임당 처리 속도를 측정
- GPU 최적화 또는 경량 모델 적용을 통해 실시간 처리 성능을 정량적으로 검증할 계획
- 현장 라인에 탑재 가능한 임베디드 비전 시스템 구현



- [1] Euijeong Song, SRPS: Deep Learning Based Photometric Stereo Using Super Resolution Images, Ph.D. Dissertation, Korea University, 2021.
- [2] B. Haefner, S. Peng, A. Verma, Y. Quéau, and D. Cremers, "Photometric Depth Super-Resolution," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020.
- [3] H. Santo et al., "Deep Photometric Stereo Network," in Proc. ICCV Workshops, 2017.
- [4] S. Ikehata, "CNN-PS: CNN-based photometric stereo for general non-convex surfaces," in ECCV, 2018.
- [5] Q. Zheng et al., "SPLINE-Net: Sparse photometric stereo through lighting interpolation and normal estimation networks," in ICCV, 2019.
- [6] G. Chen, K. Han, and K.Y.K. Wong, "PS-FCN: A flexible learning framework for photometric stereo," in ECCV, 2018.
- [7] Y. Zhang et al., "Image Super-Resolution Using Very Deep Residual Channel Attention Networks," in ECCV, 2018.
- [8] Woodham, R. J. (1980). "Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images," Optical Engineering, 19(1), 139-144.
- [9] Mallick, S., et al. (2014). "Photometric Stereo with a Non-Lambertian Reflectance Model," Computer Vision and Image Understanding, 120, 52-66.
- [10] Ramamoorthi, R., & Hanrahan, P. (2001). "An Efficient Representation for Irradiance Environment Maps," ACM SIGGRAPH 2001, 497-500.



감사합니다

Q&A

