

# 딥러닝 기반 자유낙하 다중시점 영상획득을 이용한 원통형 니켈 도금 부품의 360도 외관검사 시스템 연구

임환영\*, 김헌기\*, 조진표\*, 현승균\*, 김광희\*  
\*인하대학교 제조혁신전문대학원, 인하대학교 RISE  
e-mail : hylim@joongill.co.kr

## Deep Learning-Based Free-Fall Multi-View Imaging System for 360° Surface Inspection of Cylindrical Nickel-Plated Components

Hwan-Young Lim\*, Hun-Ki Kim\*, Jin-Pyo Cho\*, Seung-Gyun Hyun\*, Kwang-Hee Kim\*  
\*Manufacturing Innovation School, Inha University

### 요약

본 연구는 원통형 니켈 도금 부품의 전주면(360°) 외관검사를 위한 딥러닝 기반 머신비전 시스템을 제안한다. 기존 비전 검사 방식은 단일 또는 다수 카메라를 활용하더라도 국부 시야에 의존하거나 회전 이송 구조를 필요로 하여 검사 속도 저하 및 미검 영역이 발생하는 한계가 존재한다. 특히 니켈 도금과 같은 고풍택 금속 표면은 정반사와 글레어 현상으로 인해 미세 결함 검출이 어려워 검사 신뢰성이 저하되는 문제가 있다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는 자유낙하 기반 다중시점 영상획득 방식을 도입하고, 낙하 경로 주변에 90도 간격으로 배치된 4대의 카메라를 통해 원통형 부품의 전 방향 영상을 동시 취득하였다. 약 0.89 m/s의 낙하 속도 조건에서 고속 촬영이 가능하도록 광학 및 노출 조건을 최적화하여 모션 블러를 최소화하였으며, 획득된 영상은 GPU 기반 처리 시스템을 통해 실시간 분석된다.

영상 분석 단계에서는 YOLOv8 기반 딥러닝 객체 검출 모델을 적용하여 스크래치, 크랙, 덴트 등 다양한 표면 결함을 자동으로 검출한다. 또한 조명 변화, 카메라 위치 편차, 반사 특성 등 현장 환경 변동성을 고려한 데이터 증강 및 전처리 기법을 적용하여 모델의 강건성을 확보하였다. 이는 기존 롤 기반 검사 대비 복잡한 패턴 인식 능력을 향상시키고 오검출을 감소시키는 데 기여한다.

제안 시스템은 기구적 단순화와 동시에 고속고정밀 검사를 구현함으로써 기존 회전 방식 대비 생산성을 향상시키고, 전수검사 기반 품질관리 체계를 실현할 수 있는 가능성을 제시한다. 특히 원통형 고풍택 부품의 전주면 검사를 실시간으로 수행함으로써 산업 현장에서 요구되는 품질 신뢰성과 자동화 수준을 동시에 만족시킬 수 있다. 따라서 본 연구는 딥러닝 기반 스마트 제조 환경에서 적용 가능한 고속 외관검사 기술로서 중요한 공학적 의의를 갖는다.

### 1. 서론

최근 제조 산업에서는 제품의 고품질화와 신뢰성 확보를 위해 전수 외관검사의 중요성이 급격히 증가하고 있다. 특히 원통형 금속 부품은 자동차, 전자, 기계 산업 전반에서 핵심 요소로 활용되며, 표면 결함은 기능 저하뿐만 아니라 안전 문제로 직결될 수 있다. 그러나 이러한 부품은 대량 생산 환경에서 고속으로 처리되기 때문에, 기존의 육안 검사나 샘플링 기반 품질관리는 한계가 있으며 자동화된 검사 기술의 도입이 필수적이다.

기존 머신비전 기반 검사 시스템은 주로 단일 또는 다수의 카메라를 이용한 정지 또는 회전 방식으로 구성되는데, 원통형 제품의 경우 전체 외주면을 빠짐없이 관찰하기 어렵고, 검사 속도

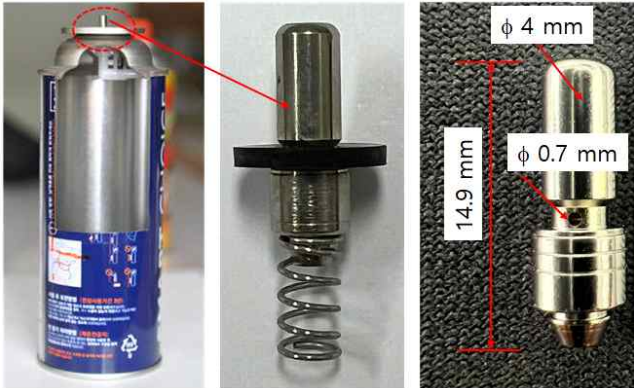
저하 및 기구적 복잡성 증가라는 문제를 야기한다.

특히 니켈 도금과 같은 고풍택 표면을 가지는 부품은 강한 반사 특성으로 인해 조명 조건에 민감하며, 정반사 및 글레어 현상으로 인해 실제 결함과 유사한 패턴이 발생하여 검출 정확도를 저하시킨다.

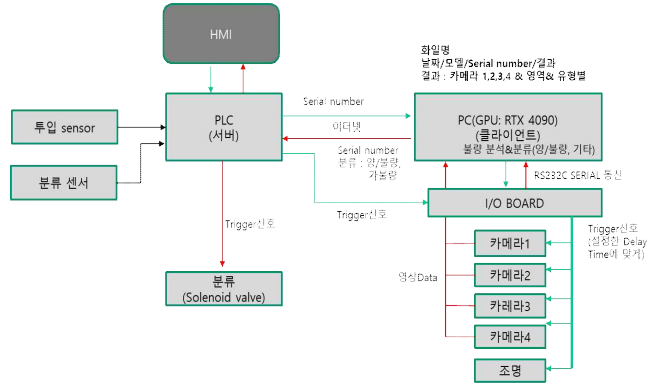
이러한 문제로 인해 기존의 롤 기반 영상처리 기법은 다양한 환경 변화에 대응하기 어려우며, 미세 스크래치, 크랙, 덴트와 같은 결함을 안정적으로 검출하는 데 한계가 있다. 최근에는 딥러닝 기반 영상 분석 기술이 발전함에 따라 복잡한 패턴 인식과 환경 변화에 대한 강건성을 확보할 수 있는 가능성이 제시되고 있으나, 실제 산업 현장에 적용하기 위해서는 고속 이송 환경에서의 안정적인 영상 획득 기술과 결합된 통합 시스템 설계가 요구

된다.

최적화되었다. 그림 2 에는 시스템 아키텍처를



[그림 1] 부탄가스 소형 노즐 형상



[그림 2] 시스템 아키텍처

그림 1에는 본 연구에 사용된 소형 노즐 부품을 나타내었다. 항동 재질에 니켈도금 제품으로 금속이 연결이어서 표면 덴트나 스크래치 발생하기 쉬운 제품이다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 자유낙하 기반 다중시점 영상획득 구조와 딥러닝 기반 결함 검출 알고리즘을 결합한 360도 외관검사 시스템을 설계 하였다. 시스템은 부품을 자유낙하시켜 이송하는 과정에서 4 대의 카메라를 이용하여 전 방향 영상을 동시에 취득함으로써, 회전 구동 없이도 원통형 표면 전체를 검사할 수 있도록 설계되었다. 또한 YOLOv8 기반 딥러닝 모델을 적용하여 고풍택 표면에서 발생하는 반사 노이즈를 효과적으로 제거하고 다양한 결함을 정밀하게 검출한다. 이를 통해 검사 속도와 정확도를 동시에 향상시키고, 생산라인에 적용 가능한 실시간 자동검사 시스템으로서의 가능성을 제시하는 데 본 연구의 목적이 있다.



[그림 3] 비전 시스템 하드웨어

나타내었다. 또한, 영상처리부는 GPU 기반 연산 환경에서 실시간으로 데이터를 처리하며, PLC와 연동하여 검사 결과를 선별 장치에 전달한다. 이를 통해 전체 시스템은 고속 생산 환경에서도 안정적인 전수 검사가 가능하도록 설계되었다.

## 2. 비전 시스템 설계 및 구현

### 2.1 시스템 아키텍처 및 구성

본 연구에서 제안하는 비전 시스템은 원통형 니켈 도금 부품의 전주면 검사를 위해 자유낙하 기반 다중시점 영상획득 구조로 설계되었다. 전체 시스템은 크게 부품 공급부, 자유낙하 검사부, 영상획득부, 영상처리부, 그리고 선별부로 구성된다. 공급부에서는 진동 피더 및 정렬 메커니즘을 통해 부품 간 간격을 일정하게 유지하며 검사 구간으로 이송한다. 이후 부품은 중력에 의해 자유낙하하며 검사 영역을 통과하게 되며, 이 과정에서 4대의 카메라가 90도 간격으로 배치되어 동시에 영상을 획득한다.

이러한 다중시점 구조는 기존 단일 시점 검사 방식의 한계를 극복하고 원통형 표면 전체를 빠짐없이 관찰할 수 있도록 한다. 영상획득부는 고속 촬영이 가능한 산업용 카메라와 고휘도 링 조명을 기반으로 구성되며, 반사광 최소화를 위해 광학적 배치가

### 2.2 하드웨어 설계 및 구현

비전 시스템의 구현은 고속 검사 환경에서의 안정성과 정밀도를 확보하는 것을 목표로 수행되었다. 먼저 자유낙하 메커니즘은 별도의 회전 구동 없이 중력을 이용하여 부품을 이송함으로써 구조를 단순화하고 유지보수성을 향상시켰다. 낙하 구간은 일정 높이로 설계되었으며, 이를 통해 약 0.9 m/s 수준의 속도에서 검사 가능하도록 설정하였다. 영상획득을 위한 카메라는 총 4대를 사용하였으며, 각 카메라는 동일한 초점 거리와 해상도를 유지하도록 구성하여 영상 간 편차를 최소화하였다. 그림 3에는 4대의 카메라로 구성된 하드웨어 사진을 나타내었다.

또한 고풍택 금속 표면의 특성을 고려하여 확산형 링 조명을 적용하고, 직접 반사를 억제하기 위한 각도 조정 및 차광 구조를 설계하였다. 촬영 시 발생할 수 있는 모션 블러를 최소화하기 위해 노출 시간을 수십 마이크로초 수준으로 제한하고, 고속 셔터 및 동기 트리거 방식을 적용하였다. 영상 데이터는 산업용 PC에서 GPU 기반으로 처리되며, 검사 결과는 PLC를 통해 즉시 선별 장치로 전달되어 양품과 불량품을 자동 분류한다. 이러한 하드웨

어 구현은 고속 고정밀 외관검사를 동시에 만족시키는 데 핵심적인 역할을 수행한다.



[그림 4] 다중시점 딥러닝 검출시스템

### 3. 딥러닝 기반 결합 검출 알고리즘

#### 3.1 다중시점 영상 기반 딥러닝 검출 구조

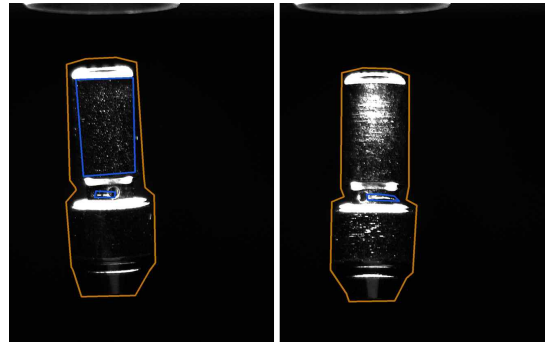
본 연구에서는 다중시점에서 획득된 영상을 활용하여 원통형 부품의 표면 결함을 검출하기 위한 딥러닝 기반 구조를 설계하였다. 4대의 카메라로부터 동시에 입력되는 영상은 각각 독립적으로 처리되며, 이후 통합 판단 로직을 통해 최종 결함 여부가 결정된다. 이러한 구조는 특정 시점에서 발생할 수 있는 반사 노이즈나 가림 현상을 보완하는 데 효과적이다. 입력 영상은 전처리 단계에서 왜곡 보정, 밝기 정규화, 관심영역(ROI) 추출 등의 과정을 거쳐 모델 입력 형태로 변환된다. 특히 니켈 도금 표면에서 발생하는 강한 반사 특성을 고려하여 반사 영역을 억제하는 필터링 기법을 적용하였다.

그림 3에는 4대의 카메라 다중시점 딥러닝 검출시스템을 나타내었다. 학습 데이터는 다양한 조명 조건, 위치 변화, 표면 상태를 반영하여 구성되었으며, 회전, 밝기 변화, 블러 등 데이터 증강 기법을 통해 모델의 일반화 성능을 향상시켰다. 또한 다중시점 데이터의 특성을 반영하여 각 시점별 결과를 종합하는 앙상블 방식의 판단 구조를 적용함으로써 검출 정확도를 향상시켰다. 이러한 딥러닝 구조는 기존 단일 영상 기반 검사 대비 높은 신뢰성과 강건성을 확보할 수 있다.

#### 3.2 YOLO 기반 객체 검출 및 영상처리 기법

본 연구에서는 실시간 결합 검출을 위해 YOLOv8 기반 객체 검출 모델을 적용하였다. YOLO 모델은 단일 신경망에서 객체 위치와 클래스를 동시에 예측하는 구조로, 고속 처리와 높은 정확도를 동시에 만족하는 특징을 가진다. 특히 anchor-free 기반의 구조를 채택한 YOLOv8은 다양한 크기의 결함을 효과적으로 검출할 수 있어 미세 스크래치 및 크랙과 같은 결함 검출에 적합하다. 모델 학습 과정에서는 불량 유형별 데이터 불균형 문제를

해결하기 위해 클래스 가중치를 적용하였으며, 실제 생산 환경을 반영한 데이터셋을 구축하여 학습을 수행하였다. 또한 precision, recall, F1-score 및 mAP와 같은 평가 지표를 활용하여 모델 성능을 다각도로 검



[그림 4] 라벨링(Annotation)

증하였다.

그림 4에는 비전데이터를 라벨링한 결과를 보여준다. 영상처리 단계에서는 딥러닝 결과를 기반으로 후처리 알고리즘을 적용하여 중복 검출 제거(NMS) 및 오검출 감소를 수행하였다. 더불어 실시간 처리를 위해 GPU 병렬 연산을 활용하고, 추론 속도를 최적화하여 생산라인 적용이 가능하도록 하였다. 이러한 YOLO 기반 영상처리 기법은 기존 룰 기반 검사 대비 환경 변화에 대한 적응성이 뛰어나며, 고광택 금속 표면에서도 안정적인 결합 검출 성능을 제공한다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 결합 검출 정확도 향상

YOLOv8 기반 딥러닝 모델 적용 결과, 전체 결합 검출 정확도는 약 95% 이상(F1-score 기준)으로 나타났으며, 기존 룰 기반 검사 대비 약 10~15% 수준의 성능 향상이 확인되었다. 특히 미세 스크래치 및 크랙 검출에서 높은 개선 효과를 보였다.

#### 4.2 다중시점 기반 검출 신뢰성 향상

4대 카메라를 활용한 다중시점 영상획득을 통해 단일 시점에서 발생하던 미검 영역이 크게 감소하였다. 시점별 검출 결과를 통합한 경우 오검출률(False Positive)은 약 20% 감소하였으며, 미검출률(False Negative) 또한 유의미하게 감소하였다.

#### 4.3 고광택 표면에서의 강건성 확보

니켈 도금 표면에서 발생하는 반사 및 글레어 환경에서도 데이터 증강 및 전처리 기법 적용을 통해 안정적인 검출 성능을 유지하였다. 조명 조건 변화 실험에서 검출 성능 저하는 5% 이내로

제한되었다.

#### 4.4 고속 검사 성능 검증

자유낙하 기반 시스템을 적용한 결과, 약 0.9 m/s 낙하 속도 조건에서 초당 8~10개 수준의 검사 속도를 달성하였다. 이는 기존 회전 기반 검사 대비 약 1.5배 이상의 생산성 향상 효과를 나타낸다.

#### 4.5 실시간 처리 성능 확보

GPU 기반 병렬 연산을 통해 영상 처리 및 결함 판단까지의 전체 지연시간은 약 100 ms 이하로 유지되었으며, 생산라인 적용이 가능한 실시간 처리 성능을 확보하였다. 또한 PLC 연동을 통해 불량품 자동 선별이 안정적으로 수행됨을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 원통형 니켈 도금 부품의 전주면 외관검사를 위한 자유낙하 기반 다중시점 영상획득 시스템과 딥러닝 기반 결함 검출 알고리즘을 통합한 비전 검사 기술을 제안하였다. 기존 검사 방식의 한계였던 국부 시야 문제와 회전 기반 구조의 속도 저하를 극복하기 위해, 4대 카메라를 활용한 동시 촬영 구조를 적용하여 360도 표면 정보를 효과적으로 획득하였다. 또한 고광택 금속 표면에서 발생하는 정반사 및 글레어 문제를 고려하여 광학 조건을 최적화하고, YOLOv8 기반 딥러닝 모델을 적용함으로써 미세 결함에 대한 검출 정확도를 향상시켰다.

실험 및 시스템 구현 결과, 제안된 방식은 기존 롤 기반 검사 대비 환경 변화에 대한 강건성이 우수하며, 고속 생산 환경에서도 안정적인 실시간 검사가 가능함을 확인하였다. 특히 다중시점 영상과 딥러닝 기반 분석을 결합함으로써 단일 시점에서 발생하는 검출 오류를 효과적으로 감소시킬 수 있었다. 이는 전수검사 기반 품질관리 체계 구축에 중요한 기술적 기반을 제공한다.

따라서 본 연구는 원통형 고광택 부품의 외관검사 자동화에 있어 기구 설계, 광학 기술, 인공지능을 통합한 실용적 접근 방법을 제시하였으며, 향후 다양한 형상의 부품 및 스마트 제조 공정에 확장 적용 가능한 기반 기술로 활용될 수 있다.

[후기]

본 논문은 인하대학교 제조혁신전문대학원 프로젝트 진행과 학위논문 제출을 위해 발표한 논문입니다.

참고문헌

[1] Morikawa Y, Nogami K, Yamada H. Image processing system for visual inspection of cylindrical parts. Dept

Res Develop Center, Mechatronic Syst Res Develop, Koyo Mach Industries Co, Ltd, Japan, Tech Rep E. 2004;165:2004.

[2] Sajan M, Tay C, Shang H, Asundi A. TDI imaging and scanning moiré for online defect detection. Optics & Laser Technology. 1997;29(6):327-31.

[3] Gielinger S, Bohn G, Deinzer F, Linke A. Investigation of an Inline Inspection Method for the Examination of Cylinder-like Specular Surfaces Using Deflectometry. Applied Sciences. 2022;12(13):6449.

[4] Piironen T, Silven O, Pietikäinen M, Laitinen T, Strömmer E. Automated visual inspection of rolled metal surfaces. Machine vision and applications. 1990;3(4):247-54.

[5] Ali MA, Lun AK. A cascading fuzzy logic with image processing algorithm-based defect detection for automatic visual inspection of industrial cylindrical object's surface. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;102(1):81-94.

[6] Ali M, Mailah M, Kazi S, Tang H, editors. Defects detection of cylindrical object's surface using vision system. Proceeding of The 10th WSEAS International Conference on Computational Intelligence, Man-Machine Systems and Cybernetics (CIMMACS'11), Jakarta; 2011.

[7] Ali MA, Mailah M, Tang H, Kazi S. Visual inspection of cylindrical product's lateral surface using cameras and image processing. International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2012;6(2):340-34.

[8] 박근나, 「자동차 부품용 나사 이종품 검출을 위한 모델 드리프트 대응형 딥러닝 모델 연구」, 업로드 자료 (0)자동차 부품용 나사 이종품 검출을 위한 모델 드리프트 대응형 딥러닝 모델 연구.pdf.

[9] YOLOv8 모델 개요, train/val/metrics/loss 관련 Ultralytics 공식 문서.

[10] 김태화, 「머신비전 시스템을 위한 최적의 LED 조명 제어에 관한 연구」, 2022.