

기어 가공 공정의 정밀도 향상을 위한 비전 기반 이물질 검사 기술 개발

유병문*, 김성용*, 정한규*

*한국섬유기계융합연구원

e-mail:bmyu@kotmi.re.kr

Development of a Vision-Based Foreign Object Inspection System to Improve Precision in Gear Machining Processes

Byungmoon Yu*, Sung Yong Kim*, Hankyu Jeung*

*Korea Textile Machinery Convergence Research Institute

요약

미래차용 고정밀 기어는 기존 내연기관용 기어 대비 높은 정밀도와 품질 안정성이 요구되며, 가공 공정 중 발생하는 절삭유, 칩 등의 표면 이물질은 가공 정밀도와 품질 저하의 주요 원인이 될 수 있다. 본 연구에서는 CNC 선반 공정에서 발생하는 이물질을 검출하기 위한 비전 기반 검사 기술을 개발하였고, 이를 활용하여 자동차용 기어 부품 생산 공정의 정밀도를 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 실제 가공 현장에서 발생하는 주요 이물질 유형을 분석한 결과, 공작물 및 칩 주변에 잔류하는 연속형 칩이 주로 발생하며 정밀도 저하에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이를 바탕으로 작업 거리, 시야 범위, 최소 검출 크기 등을 고려하여 비전 센서의 요구 사양을 도출하고, 표면 이물질 검출을 위한 비전 검사 시스템을 설계하였다. 또한 문헌 조사 및 오픈 데이터셋 기반 성능 평가를 통해 적용 가능한 기초 알고리즘을 선정하고, 실제 가공 장비 환경에 이물질 검출 알고리즘을 적용하였다. 임의의 이물질이 부착된 표면과 정상 상태를 비교하는 방식으로 비전 이물질 검사 정확도를 산출한 결과 약 70%의 정확도를 확인하였다. 향후 파라미터 최적화를 통하여 정확도를 향상시키고 이물질 여부에 따른 추가적인 에어를 분사하는 시스템을 구축할 예정이다.

필요하다. 최근 비전 기술과 인공지능 기반 영상 분석 기술은 제조 공정의 품질 검사 자동화 분야에서 활발히 적용되고 있다. Mjihad Azeddine et al^[1]은 양초 용기의 외관 이상을 검출하기 위해 CNN(Convolutional Neural Network) 기반 특징 추출과 OCSVM(One Class Support Vector Machine)을 결합한 방법을 적용하였다. 이 연구는 정상 시료의 특징을 기반으로 이상 여부를 판별하는 구조를 사용함으로써 불량 데이터 확보가 제한적인 환경에서도 적용 가능성을 제시하였다. Kuo et al^[2]은 그래픽카드 조립 라인에서 이물 혼입 또는 비정상 객체를 검출하기 위해 CNN 기반 딥러닝 기법을 사용하였으며, 조립 공정 내 시각적 검사 자동화의 가능성을 보여주었다. Kurniawan et al^[3]은 절단 채소 공정에서 혼입 이물질을 검출하기 위해 YOLOv5 기반 객체 검출 알고리즘을 적용하였다. 이물질의 형상과 위치가 비교적 명확한 경우 객체 검출 기반 접근이 효과적임을 보여준다. [표 1]과 같이 이물질 검사 및 이상 감지 분야의 선행연구에서는 CNN 기반 방법들이 주로 활용되고 있으며, 최근에는 정상 데이터 중심으로 학습하는 One-Class 기반 알고리즘을 주로 적용하고 있다.

1. 서론

미래차용 고정밀 기어 부품은 기존 내연기관용 기어에 비해 고속고토크 운전 조건에서 높은 정밀도와 품질 안정성이 요구된다. 특히 기어 가공 공정에서 발생하는 미세한 오차는 최종 제품의 진동, 소음, 내구성 및 품질에 직접적인 영향을 미치므로 가공 공정 중 품질 저하 요인을 사전에 검출하고 관리하는 기술이 중요하다. 이 중 CNC선반 공정에서 발생하는 절삭 칩, 절삭유 잔류물 등의 이물질은 공작물 표면이나 칩 주변에 잔류하여 다음 공정에서 제품 안착 불량, 위치 오차, 가공 정밀도 저하를 유발할 수 있는 주요 요인이다.

기존 제조 현장에서는 이러한 이물질을 작업자의 육안 확인이나 수동 청소에 의존하는 경우가 많아 검사 신뢰성의 편차가 크고, 자동화 공정과 연계한 실시간 품질 관리에는 한계가 있다. 또한 가공 장비 내부는 금속 표면 반사, 제한된 설치 공간, 온도 불균일, 절삭유 오염 등으로 인해 일반적인 비전 검사 환경보다 조건이 불리하므로 이를 고려한 시스템 구성 및 알고리즘 개발이

[표 1] 비전 기반 이물질 검사 및 이상 감지 선행연구 조사

No	제목	대상 품목	사용 알고리즘	출판연도
1	Automated Quality Control of Candle Jars via Anomaly Detection Using OCSVM and CNN-Based Feature Extraction	Candle jar	OCSVM + CNN	2025
2	Foreign Objects Detection Using Deep Learning Techniques for Graphic Card Assembly Line	Graphic card	CNN	2021
3	Advanced Detection of Foreign Objects in Fresh-Cut Vegetables Using YOLOv5	Vegetables	CNN(YOLOv5)	2024
4	Real-Time Foreign Object and production Status Detection of Tobacco Cabinets Based on Deep Learning	Tobacco	CNN(YOLOv5)	2022
5	Detection and Classification of Foreign Substances in Medical Vials Using MLP Neural Network and SVM	Medical	MLP, SVM	2010
6	PaDiM: A Patch Distribution Modeling Framework for Anomaly Detection and Localization	MVtec ad Dataset	OC-CNN	2021
7	Semi-Supervised Anomaly Detection Using Autoencoders	DAGM, RSDDs Dataset	CNN + AE	2020
8	Anomaly Detection for Industrial Inspection Using Convolutional Autoencoder and Deep Feature-Based One-Class Classification	MVtec ad Dataset	CNN + AE	2022
9	Convolutional Autoencoders for Data Compression and Anomaly Detection in Small Satellite Techniques	Satellite Data	CNN + AE	2025
10	Supervised Convolutional Autoencoder-Based Fault-Relevant Feature Learning for Fault Diagnosis in Industrial Processes	CSTR, TE process	CNN + AE	2022

2. 실험 장치 및 방법

2.1 시스템 구성

본 연구에서는 기어 가공 공정의 정밀도 저하를 유발하는 표면 이물질을 검출하기 위하여 비전 기반 머시닝 검사 시스템을 구성하였다. 대상 공정은 CNC 선반 가공 공정이며 실제 현장에서 문제가 되는 이물질의 유형을 먼저 분석한 후 장비 구조와 검사 환경을 고려하여 검사 방식을 도출하였다.

CNC 선반 가공 공정에서는 절삭 조건에 따라 다양한 형태의 칩이 발생하며 이러한 칩은 공작물 표면 또는 척 주변에 잔류하여 다음 공정에서 공작물 안착 불량이나 위치 오차를 유발함으로써 가공 정밀도를 저하시킬 수 있다. 실제 가공 현장을 분석한 결과 문제를 유발하는 주요 이물질은 실 형태로 길게 발생하는 연속형 칩으로 확인되었다. 이러한 연속형 칩은 공작물에 감기거나 척의 돌출부에 걸린 상태로 남아있을 수 있으며 다음 제품 장착 시 정밀도에 직접적인 영향을 미친다.



[그림 1] 실제 CNC 선반에서 발생하는 연속형 칩

검사 대상 장비는 Fuji社의 CSD-300 제품으로 더블 스핀들 구조의 반폐쇄형 가공 공간을 가진다. 장비 내부에는 기본 작업등이 설치되어 있으나, 금속 표면의 반사와 그림자에 의해 비전 검사를 수행하기에 충분한 조도 확보가 어려운 구조적 한계가 있다. 따라서 안정적인 영상 취득을 위해 별도의 조명을 추가하는 구성이 필요하다. 또한 적은 장비 내부 벽면에 인접해 있어 카메라 설치가 제한되므로 렌즈 전면과 척 사이의 작업 거리(Working Distance, WD)는 약 500~600mm로 설정하였다. 척 직경이 약 200mm 수준임을 고려하여 척 전체를 한 프레임 안에 포함하기 위한 시야 범위(Field of View, FOV)는 200mm x 200mm로 설정하였다.



[그림 2] 대상 장비 (CSD-300)

본 연구에서 제안한 비전 기반 검사 시스템은 가공 완료 후 칩 및 공작물 주변을 촬영하여 표면 이물질 존재 여부를 판별하는 구조로 설계하였다. 시스템은 가공장비 내부에 설치되는 카메라, 보조 조명, 판별 알고리즘으로 구성되며 정상 상태의 칩 영상을 기준 데이터로 활용하여 이물질 유무를 판별하도록 하였다. 다만 현재 시스템은 비전 기반 이물질 검출 알고리즘 적용 가능성과 성능을 검증하기 위해 임시로 구축한 시스템이다. 향후 실제 장비 구조와 설치 공간, 작업 거리, 보수성 등을 종합적으로 고려하여 장비에 최적화된 카메라 및 조명 장착 지그를 제작할 예정이다.



[그림 3] 비전센서 및 조명 설치

2.2 알고리즘 선정

선행연구에서는 CNN 기반 방법들이 주로 활용되고 있으며, 최근에는 정상 데이터 중심으로 학습하는 One-Class 기반 알고리즘이 활발히 적용되고 있다. 이는 실제 산업 현장에서 다양한 불량 데이터를 충분히 확보하기 어려운 경우가 많고, 불량 유형이 불규칙하기 때문이다. 본 연구의 대상인 CNC 선반 공정 내 연속형 칩 또한 같은 경우이다. 따라서 사전에 다양한 불량 형상을 모두 정의하여 학습하는 일반적인 지도학습 방식보다는 정상 상태를 기준으로 이상 여부를 판별하는 접근이 더 적합하다.

한편 YOLO와 같은 객체 검출 기반 알고리즘은 검출 대상의 위치와 형상이 비교적 명확하고 충분한 수의 라벨링 데이터를 확보할 수 있을 때 효과적이다. 그러나 본 연구에서 대상으로 하는 연속형 칩은 형상이 불규칙하여 bounding box를 일관되게 정의하기 어렵다.

이에 따라 이상감지 알고리즘 후보로 CAE (CNN Autoencoder)와 OC-CNN (One-Class CNN)을 선정하였다. CAE는 정상 영상을 입력받아 저차원 특징으로 압축한 뒤 다시 원본과 유사하게 복원하도록 학습하는 구조를 가진다. 정상 데이터에 대해서는 복원이 잘 이루어지지만, 학습되지 않은 이상 패턴이 입력될 경우 복원 오차가 증가하므로 이를 이용해 이상 여부를 판단할 수 있다. 반면 OC-CNN은 정상 데이터의 특징 분포를 하나의 클래스 중심으로 학습하고, 입력 영상이 이 정상 특징 공간에서 얼마나 벗어나는지를 기준으로 이상 여부를 판별하는 방식이

다. 즉 CAE는 복원 오차 기반의 이상감지라면, OC-CNN은 특징 공간 거리 기반의 One-Class 분류 방법이라 할 수 있다.

두 알고리즘은 공개 데이터셋인 MVtec AD를 활용하여 성능을 검토하였다. MVtec AD는 다양한 산업용 제품과 표면 결함 이미지를 포함하고 있어 이상감지 알고리즘의 성능을 비교하는데 널리 사용된다. CAE와 OC-CNN을 같은 데이터셋을 활용하여 비교해본 결과 이미지 복원 방식인 CAE의 경우 작은 결함이 있는 이미지는 정상 이미지와 큰 차이가 없는 것과 같이 복원하여 이상이 없는 것으로 판단하였다. 반면에 OC-CNN은 정상 데이터의 특징 분포를 직접 학습하여 미세한 패턴 차이에 더 민감하게 반응하는 경향을 보였다. 이에 따라 본 연구에서는 최종 적용 알고리즘을 OC-CNN으로 선정하였다.



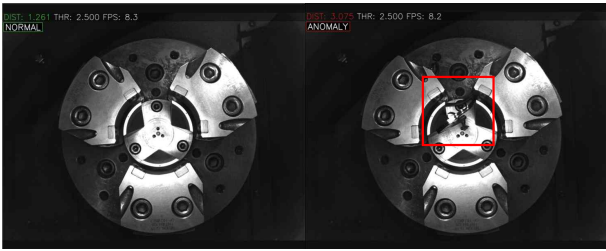
[그림 4] MVtec AD 중 알약 정상 / 이상 이미지

3. 실험 결과

본 연구에서는 CNC 선반 가공 공정 내 칩 및 공작물 주변에 잔류하는 연속형 칩 형태의 이물질을 검출하기 위하여 앞서 선정한 OC-CNN 기반 이상감지 알고리즘을 적용하였다. 알고리즘 적용을 위한 영상 데이터는 Fuji CSD-300 CNC 선반 내부에서 취득하였다. 가공 완료 후 장비가 정지된 상태에서 칩 전면을 촬영하였으며 정상 상태 영상과 이물질이 부착된 상태 영상을 각각 확보하였다. 이때 이물질은 실제 가공 공정에서 문제가 되는 연속형 칩을 활용해서 주로 연속형 칩이 주로 잔류하는 칩 표면에 부착하였다. 촬영 영상은 칩 중심부와 죠(Jaw) 주변을 포함하도록 구성하였으며, 정상 상태와 이물질 부착 상태 간의 시각적 차이를 기반으로 이상 여부를 판별하도록 하였다.

OC-CNN 학습 과정에서는 정상 상태 영상을 사용하여 칩 표면의 일반적인 특징을 학습하도록 하였다. 정상 영상은 금속 표면의 반사, 조명 변화, 장비 내부 배경 구조 등 실제 현장에서 발생할 수 있는 조건을 포함하고 있으므로 모델은 이러한 정상 변동성을 허용하는 범위 내에서 특징 공간을 형성하게 된다. 이후 입력 영상이 학습된 정상 특징 분포에서 벗어나는 경우 이를 이상 상태로 판단하였다. 즉, 절삭 칩이나 이물질 부착에 의해 영상 내 국부적 형상 변화가 발생하면 해당 영상은 정상 패턴으로부터 이탈한 것으로 분류된다.

OC-CNN 기반 이상감지에서는 입력 영상이 정상 패턴으로부터 얼마나 이탈하는지를 수치화한 중심 거리를 기준으로 정상과 비정상 상태를 구분하게 된다. 본 연구에서는 정상 상태 영상들을 이용하여 이상 점수의 분포를 먼저 확인하고 이를 바탕으로 정상과 이물질 부착 상태를 구분하기 위한 임계값을 설정하였다. 설정된 임계값 이하의 경우 정상 상태로, 임계값을 초과하는 경우 이물질이 존재하는 이상 상태로 판정하였다.



[그림 5] 정상 상태 및 이물질 부착 상태 영상

[그림5]는 정상 상태의 척 표면 영상과 이물질이 부착된 상태의 영상이다. 정상 상태 영상에서는 정상 상태와의 거리를 나타내는 DIST 값이 임계점인 2.5보다 낮은 약 1.2정도를 나타내는 것을 알 수 있으며, 이물질 부착 영상에서는 척 내부에 선삭 과정에서 발생한 연속형 칩을 임의로 배치하였고 그 결과 DIST 값이 약 3 정도로 임계값보다 높은 값을 나타내어 Anomaly로 분류하고 있는 것을 알 수 있다.

이와 같은 절차에 따라 측정 대상에 임의의 연속형 칩 이물질을 여러 형태로 부착한 후 이물질 검출 정확도를 평가하였고 약 70% 이물질 검출 성능을 보였다. 이를 통해 초기 단계의 현장 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 다만 검출 정확도가 충분히 높지 않은 이유는 검출 대상인 칩과 배경이 되는 척이 모두 금속 재질로 이루어져 있어 명암 및 질감 차이가 크지 않기 때문이다. 특히 척 표면의 반사, 조명 불균일, 절삭유 잔류 흔적 등은 칩과 배경의 경계를 불명확하게 만든다. 또한 연속형 칩은 두께가 얇고 형상이 불규칙하여 영상 내에서 차지하는 비중이 작아 특징이 충분히 두드러지지 않는 한계가 있다. 향후 이미지 전처리나 환경 개선을 통해 척 표면과 이물질 간의 경계를 보다 명확하게 하고자한다. 예를 들어 반사 억제를 위한 조명 최적화, 예지 강화 및 대비 향상 등을 적용하여 배경과 칩의 시각적 차이를 증대시킬 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 CNC 선반 가공 공정에서 가공 정밀도 저하의 원인이 될 수 있는 연속형 칩 이물질을 검출하기 위하여 비전 기반 이상감지 기법을 적용하였다. 실제 가공 현장에서 발생하는 연속형 칩의 경우 형태가 정해지지 않은 다양한 형태로 생성된다는

점을 고려하여 정상 상태 영상만으로 학습이 가능한 OC-CNN 기반 알고리즘을 적용하였으며, 장비 내부에서 취득한 척 전면 영상을 활용하여 정상 상태와 이물질 부착 상태를 구분하였다.

실험 결과 정상 상태 영상의 중심 거리 분포를 기반으로 임계값을 설정함으로써 이물질 유무를 판별할 수 있었으며, 연속형 칩을 임의로 부착한 조건에서 약 70% 수준의 검출 성능을 확인하였다. 이를 통해 제안한 방법이 CNC 선반 공정 내 이물질 검출에 초기 단계의 현장 적용 가능성을 검토할 수 있었다.

다만 검출 정확도가 충분히 높지 않은 원인으로서는 칩과 칩이 모두 금속 재질로 이루어져 있어 영상에서 명암 및 질감 차이가 크지 않고, 척 표면의 반사, 조명 불균일, 절삭유 잔류 흔적 등에 의해 이물질과 배경의 경계가 불명확해지는 점이 확인되었다. 또한 연속형 칩은 두께가 얇고 형상이 불규칙하여 영상 내에서 차지하는 비중이 작기 때문에 이상 특징이 두드러지지 않는 한계가 있었다.

향후에는 반사 억제를 위한 조명 최적화, 예지 강화 및 대비 향상과 같은 영상 전처리 기법을 적용하여 척 표면과 이물질 간 경계를 보다 명확히 분리하고자 한다. 또한 장비에 적합한 카메라 및 조명 지그를 설계·제작하여 촬영 조건의 반복성과 안정성을 높임으로써 실제 제조 현장에서 활용가능한 비전 기반 이물질 검사 시스템으로 발전시키고자 한다.

후기

이 연구는 2026년도 산업통상부의 자동차산업기술개발사업 지원을 받아 연구되었음 (RS-2025-25456381)

참고문헌

- [1] Mjahad, Azeddine, and Alfredo Rosado-Muñoz. "Automated Quality Control of Candle Jars via Anomaly Detection Using OCSVM and CNN-Based Feature Extraction." *Mathematics* 13.15 (2025): 2507.
- [2] Kuo, R. J., and Faisal Fuad Nursyahid. "Foreign objects detection using deep learning techniques for graphic card assembly line." *Journal of Intelligent Manufacturing* 34.7 (2023): 2989-3000.
- [3] Kurniawan, Hary, et al. "Advanced detection of foreign objects in fresh-cut vegetables using YOLOv5." *LWT* 212 (2024): 116989.