



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

머신 비전을 이용한 자동차 부품
검사 시스템에 관한 연구



2012년 2월

부경대학교 대학원

정보통신공학과

윤재식

공 학 석 사 학 위 논 문

머신 비전을 이용한 자동차 부품
검사 시스템에 관한 연구

지도교수 김 석 태

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

정 보 통 신 공 학 과

윤 재 식

윤재식의 공학석사 학위논문을 인준함.

2012년 2월 24일



주 심 공학박사 정 신 일 (인)

위 원 공학박사 윤 종 락 (인)

위 원 공학박사 김 석 태 (인)

목 차

I. 서론	1
II. 관련 연구	3
2.1 머신 비전의 개요	3
2.2 머신 비전 시스템의 구성	4
2.3 머신 비전의 산업 동향	9
2.4 기존의 자동차 부품 검사 시스템	11
III. 자동차 부품 검사 시스템 개발	17
3.1 기어 박스 검사 시스템	17
3.2 사이드 프로텍터 검사 시스템	21
IV. 결함 검출 알고리즘	24
4.1 기어 박스 결함 검출 알고리즘	24
4.2 사이드 프로텍터 결함 검출 알고리즘	38
V. 검사 시스템 동작 및 결과	46
5.1 기어 박스 검사 시스템	46
5.2 사이드 프로텍터 검사 시스템	49
VI. 결론	52
VII. 참고 문헌	53

그림 목차

[그림 2.1] 머신 비전 시스템 구성도	4
[그림 2.2] 초점거리에 따른 화각 변화	6
[그림 2.3] 머신 비전 시장 동향	10
[그림 2.4] 밸브 씰의 외관 및 형상	11
[그림 2.5] 중심 찾기 및 원형 검출	12
[그림 2.6] 밸브 씰의 상부영역 결함 검사	12
[그림 2.7] 부품의 검사 유형	13
[그림 2.8] 카시트 프레임 검사 시스템	14
[그림 2.9] 검사 알고리즘 개요	14
[그림 2.10] 락킹 레버 부품의 불량 유형	15
[그림 2.11] 락킹 레버 검사 시스템 구성	16
[그림 2.12] 락킹 레버 검사 화면	16
[그림 3.1] 기어 박스 부품	18
[그림 3.2] 기어 박스 검사 항목	18
[그림 3.3] 기어 박스 검사 시스템 구성	19
[그림 3.4] 기어 박스 검사를 위한 조명장치	20
[그림 3.5] 안정된 조명을 위한 차광막	20
[그림 3.6] 사이드 프로텍터 부품	21
[그림 3.7] 사이드 프로텍터 표면 결함	22
[그림 3.8] 사이드 프로텍터 검사 시스템 구성	22
[그림 3.9] LED 사각 조명장치	23
[그림 4.1] 기준 영상의 ROI 설정	25
[그림 4.2] 검사 대상의 위치 오차	26
[그림 4.3] 기준 영상의 픽셀 최소 직선거리	26
[그림 4.4] 객체 크기를 이용한 결함 검출 알고리즘 동작 순서도	28
[그림 4.5] 기어 박스 ROI 추출 영상	29
[그림 4.6] 명암대비 강조 영상	29
[그림 4.7] 명암대비 조절 함수	30

[그림 4.8] 기어 박스 2치화 영상	31
[그림 4.9] 잡음이 제거된 영상	31
[그림 4.10] 미디언 필터 동작	32
[그림 4.11] 레이블링 동작	33
[그림 4.12] 레이블링 실행 결과	33
[그림 4.13] 색상 평균값을 이용한 결합 검출 알고리즘 동작 순서도	34
[그림 4.14] 기어 박스 ROI 추출 영상	35
[그림 4.15] 사이드 프로텍터 결합 검출 알고리즘 동작 순서도	38
[그림 4.16] 임계값에 따른 전역 2치화 영상	40
[그림 4.17] 사이드 프로텍터 부품 원 영상	41
[그림 4.18] 전역 2치화 영상	41
[그림 4.19] 지역 2치화 영상	42
[그림 4.20] 모폴로지를 이용한 잡음 제거 영상	43
[그림 4.21] 영상 1의 레이블링 적용 결과	43
[그림 4.22] 영상 2의 레이블링 적용 결과	44
[그림 4.23] 사이드 프로텍터 결합 검출 결과	45
[그림 5.1] 기어 박스 검사 시스템 동작 순서도	46
[그림 5.2] 기어 박스 검사 프로그램	47
[그림 5.3] 사이드 프로텍터 검사 시스템 동작 순서도	49
[그림 5.4] 사이드 프로텍터 영상 획득 과정	50
[그림 5.5] 사이드 프로텍터 검사 프로그램	50

표 목차

[표 4.1] 기준 영상에서 설정된 ROI의 픽셀 좌표	25
[표 4.2] 기준 영상의 ROI 색상 평균값(G_n)과 전체 색상 평균값(G_{total})	36
[표 5.1] 기어 박스 결합 검출 알고리즘 평가	48

A Study on the Inspection System for Automobile Parts using Machine Vision

Jae Sik Yun

Department of Information and Communications Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Machine vision system has widely been used for semiconductor inspection, PCB inspection and so on. Despite the rapid development of the automobile industry, there are few inspection systems for automobile parts. This study suggests machine vision system that was developed to automatically inspect automobile parts.

The gear box has various models and is assembled from bolts, clips, fixed pads and so on. The gear box inspection system is suggested to inspect product assembly state. The inspection algorithm for the gear box allows Image binarization for covered structure of plastic products, image noise removal using morphology operation, labeling method for candidate regions, image filtering and calibration method for defect inspection.

Also, the side protector inspection system is suggested to inspect surface defects. The inspection algorithm for the side protector is processed largely by a method using average of pixels in region of interest and other methods dividing the area and checking the presence of the object. To verify the effectiveness of these systems, the accuracy evaluation and the processing time evaluation was conducted.

I. 서론

국내 자동차 부품 생산업체는 제품의 생산성 및 품질 향상을 위한 공장 자동화 설비에 많은 투자를 해왔다. 하지만 대부분의 자동차 부품 생산업체에서 제품의 불량 검사는 여전히 작업자의 육안 검사로 이루어지고 있다. 작업자가 장시간 많은 양의 부품 검사를 반복하게 되면 눈의 피로 및 착시현상으로 인해 객관적이고 일관성 있는 검사를 수행하는데 많은 어려움이 있다. 또한 최근 3D 업종 및 중소기업 직무기피 현상으로 인해 자동차 부품 생산업체는 노동력을 확보하는데 큰 어려움을 겪고 있다. 국내에서 노동집약적 산업은 더 이상 경쟁력을 유지하기 어려운 실정이며, 경쟁력 확보를 위해서는 첨단 제조업으로 전환되어야 한다. 최근 자동차 부품 생산업체에서 기존 제품 검사의 문제점 해결, 생산성 향상을 위한 머신 비전 시스템에 대한 수요가 증가되고 있다[1].

머신 비전(Machine Vision)은 사람이 시각에 의존해 원하는 정보를 얻거나 상황을 판단하는 능력을 기계가 대신하는 기술이다. 머신 비전 기술은 사람이 하던 일을 기계가 대신함으로써 고속, 정밀성, 정확성을 필요로 하는 작업환경에서 많은 이점을 가진다. 국내의 머신 비전 기술은 1990년대 이후 국내 반도체 산업, 디스플레이 산업의 급격한 성장과 더불어 발전해 왔다. 현재는 반도체, 디스플레이 산업뿐만 아니라 자동차, 의료, 방위산업 등 다양한 산업분야에서 품질검사, 계측, 자동제어와 같은 공장 자동화를 위한 목적으로 사용되고 있다. 하지만 국내의 머신 비전 개발업체 대부분이 중소기업이고 반도체, 디스플레이 산업에 크게 편중되어 있어서 지속적인 머신 비전 기술 개발에 큰 어려움이 있다.

최근 국내 자동차 산업의 발전과 함께 자동차 부품 검사를 자동화하기 위한 머신 비전 시스템에 대한 연구가 수행되고 있다. 기존에 자동차 부

품인 밸브 씰(Valve seal), 락킹 레버(Locking lever)의 생산과정에서 발생하는 형상불량을 검사하기 위한 연구가 수행되었다. 또한 자동차의 금속가공 및 조립 부품인 카시트 프레임(Car seat frame)의 결함을 검사하기 위한 연구가 수행되었다.

본 연구는 자동차 부품의 생산과정에서 부품의 불량 검사를 자동화하기 위한 머신 비전 시스템 개발을 목적으로 한다. 자동차의 플라스틱 사출성형(Injection molding) 부품인 기어 박스(Gear Box)와 사이드 프로텍터(Side Protector) 부품을 검사 대상으로 하며, 부품의 표면 결함 유무, 정상 조립 여부 등의 검사를 수행한다. 기어 박스 부품에서는 볼트, 클립, 고정패드 등이 정상적으로 조립되었는지를 검사하며, 사이드 프로텍터 부품에서는 사출성형, 도색과정에서 발생하는 성형불량, 스크래치, 찍힘 등과 같은 부품의 표면에 발생하는 결함을 검사한다.

머신 비전 기술에 대한 최근 기술 동향과 머신 비전 시스템 개발을 위한 기술적인 사항에 대한 연구를 수행함으로써, 향상된 머신 비전 시스템을 개발할 수 있다. 또한 자동차 부품 생산업체의 작업환경과 각 부품의 주요 검사 항목을 최대한 고려하여, 최적의 검사 환경 및 성능을 제공하도록 머신 비전 시스템을 구성한다. 그리고 머신 비전 시스템의 성능에 큰 영향을 미치는 검사 알고리즘 및 프로그램 개발을 위한 실험과 연구를 통해 머신 비전 시스템의 성능을 개선한다.

II. 관련 연구

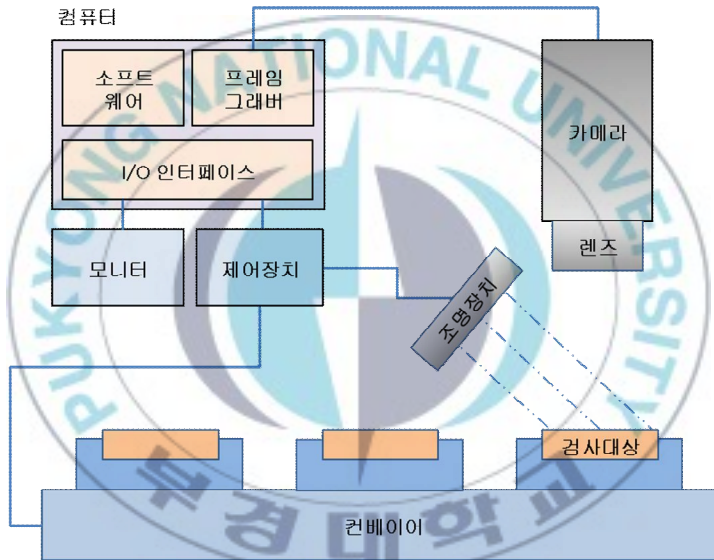
2.1 머신 비전의 개요

머신 비전(Machine Vision)은 사람이 시각에 의존해 영상을 인식하는 기능을 카메라와 컴퓨터를 이용하여 구현하는 기술을 말한다. 따라서 단순히 영상을 획득하고 처리하기 위한 장치뿐만 아니라 사람이 영상으로부터 원하는 정보를 얻고 결과를 도출해내는 능력을 구현해야 한다. 머신 비전에서 사람이 시각을 이용하여 단순히 영상 데이터를 얻는 기능은 카메라, 렌즈, 컴퓨터와 같은 기계적인 장치들이 대신한다. 그리고 영상으로부터 최종적인 결과를 도출해내는 것은 영상처리 기술을 이용하여 구현한 알고리즘이 대신하게 된다. 이러한 알고리즘은 머신 비전 시스템의 목적이나 구성에 적합하도록 구현해야 한다. 따라서 전체적인 시스템의 동작과 영상처리 관련 세부적인 기술 요소에 대한 정확한 이해가 필요하며 충분한 실험이 요구된다.

최근 머신 비전 시스템은 산업현장에서 제어, 계측, 검사, 인식 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 제어 분야는 용접 로봇, 페인팅 로봇에서 지능적인 로봇 제어를 위해 주로 활용된다. 계측 분야는 대상의 물리적인 치수인 거리, 직경, 굴곡, 면적 등을 측정하여 제품을 가공하는 과정에서 자동화 및 정밀도 개선을 위한 목적으로 사용된다. 검사 분야는 반도체, 전자, 자동차 등 다양한 산업현장에서 현재 가장 널리 활용되고 있는 분야이다. 반도체 IC, LED 패널, 플라스틱 성형부품, 금속 가공부품 등을 대상으로 표면 결함 검사, 외형 결함 검사 등을 수행한다. 인식 분야는 바코드 인식, 문자 인식 등을 통해 제품 생산효율을 개선 및 제품 관리를 위한 목적으로 활용되고 있다.

2.2 머신 비전 시스템 구성

머신 비전 시스템은 크게 영상 입력장치, 조명장치, 제어장치, 소프트웨어 등으로 구성된다. 머신 비전 시스템의 일반적인 구성을 [그림 2.1]에 나타내었다. 머신 비전 시스템 개발 시, 시스템의 주요 동작 및 성능을 고려하여 하드웨어와 소프트웨어로 이루어진 전체 시스템을 구성해야 한다.



[그림 2.1] 머신 비전 시스템 구성도

머신 비전 시스템은 근본적으로 입력된 영상 데이터로부터 최종 결과를 도출해내는 시스템이다. 따라서 무엇보다도 양질의 영상을 획득하는 것과 영상 데이터를 적절하게 처리하기 위한 소프트웨어가 매우 중요하다. 머신 비전 시스템의 주요 구성 장치인 카메라, 렌즈, 조명장치 선택과 소프트웨어 개발 시에 고려해야 할 기술 사항을 살펴보았다.

2.2.1 카메라

카메라는 광학센서의 종류, 광학센서의 배열구조, 출력방식, 해상도 등 다양한 기준에 의해서 분류된다. 광학센서의 종류에 따라 CCD(Charge Coupled Device) 카메라와 CMOS(Complementary Metal Oxide Field Effect Transistor) 카메라로 구분된다. CCD 카메라는 낮은 잡음의 신호 출력이 가능하며, 칩 사이즈가 작아서 소형화 및 경량화 할 수 있다. 또한 픽셀간의 균일성을 유지할 수 있어 고화질의 영상을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 소비전력이 높고 가격이 높다는 단점이 있다.

CMOS 카메라는 병렬전송을 통해 데이터를 전송하기 때문에 빠른 영상 출력이 가능하며 가격이 저렴하고 낮은 소비전력으로 동작시킬 수 있는 장점을 가진다. 하지만 노이즈 발생이 많으며 정밀한 표현력이 떨어지고 구조적인 문제로 고속으로 움직이는 물체를 촬영했을 때 상이 흔들리는 단점이 있다.

카메라의 해상도는 카메라 내부의 광학소자의 수에 의해 결정되며 해상도가 높을수록 영상을 보다 섬세하게 표현할 수 있다. 머신 비전 시스템에서 미세한 대상을 검사하거나 정밀한 치수 계측을 위해서는 고해상도의 카메라가 필요하다. 하지만 해상도가 높아지게 되면 실제 처리해야 할 데이터의 양이 많아지므로 고속 동작이 필요한 머신 비전 시스템의 동작에 방해의 요소가 될 수 있다.

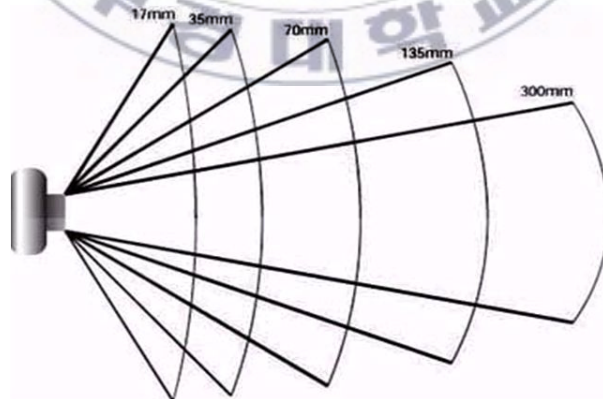
머신 비전 시스템의 활용 분야 및 동작 환경이 다양해지면서 산업용 카메라와 호스트간의 전기적 인터페이스가 다양해지고 있다. 가장 대표적인 인터페이스는 Analog, FireWire, USB, GigE Vision, LVDS(Low Voltage Differential Signaling) 등이 있다. 개발하고자 하는 머신 비전 시스템에 적합한 인터페이스를 지원하는 카메라를 사용함으로써 보다 간단한 시스템을 구성할 수 있으며 성능 향상을 기대할 수 있다.

2.2.2 렌즈

렌즈(Lens)는 명확한 영상을 생성하기 위해 카메라로 들어가는 빛의 초점을 맞추는 기능을 수행한다. 일반적으로 렌즈는 초점거리와 기능에 따라 표준렌즈, 망원렌즈, 광각렌즈, 줌렌즈, 마이크로렌즈, 컨버터렌즈 등으로 분류된다.

머신 비전 시스템에서 사용되는 렌즈는 대부분 사용자가 직접 초점을 맞춰서 사용해야 되는 고정된 포커스(Focus)이거나 수동 포커스인 렌즈를 많이 사용한다. 머신 비전 시스템을 위한 렌즈 선택 시, 중요한 요소로 화각(Angle of view), 초점거리(Focal length), 피사계 심도(Depth of field) 등이 있다.

화각은 카메라가 얼마나 넓은 영역을 영상으로 출력할 수 있는지를 나타내는 용어이고 초점거리는 렌즈와 초점 사이의 거리를 의미한다. 초점거리가 긴 경우는 화각이 좁아지게 되고 좁은 영역을 확대하여 촬영하게 된다. 초점거리가 짧은 경우는 화각이 넓어지게 되고 넓은 영역을 촬영할 수 있다.



[그림 2.2] 초점거리에 따른 화각 변화

렌즈는 초점거리에 따라 피사계 심도가 달라지는 특성이 있다. 피사계의 심도란 초점이 맞추어졌다고 생각되는 지점에서 선명한 화상이 맺힐 수 있는 폭을 말한다. 피사계의 심도는 조리개를 조일수록(F치가 높을수록) 깊어지고, 조리개를 개방할수록 낮아진다. 또한 초점거리가 짧을수록 피사계의 심도는 깊어진다. 자동 조리개 렌즈 사용 시는 조리개가 빛의 양에 따라 조리개가 자동으로 조절되기 때문에 피사계의 심도도 변하게 된다. 머신 비전 시스템에서 반드시 피사체의 크기나 카메라와 피사체 사이의 거리, 조명을 등에 적합한 렌즈를 선택해야 된다.

2.2.3 조명장치

조명장치는 카메라로부터 영상을 획득하는 과정에서 필수적인 장치이며 머신 비전 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다. 검사 대상에 존재하는 실제 결함 영역이 조명에 의해서 주변 영역보다 크게 밝거나 어두운 경우, 카메라로부터 획득한 실제 영상에서는 결함이 나타나지 않을 수 있다. 이와는 반대로 조명에 의해 결함이 없는 실제 검사 대상의 특정 영역이 주변보다 크게 밝거나 어두운 경우에 해당 영역을 검사 대상에 존재하는 결함으로 판단하는 오류를 발생시킬 수도 있다[2].

영상을 처리하는 과정에서 영상의 잡음 제거, 명암 보정과 같은 전처리 과정을 거치게 된다. 이러한 과정은 조명, 카메라, 렌즈와 같은 영상 입력 장치로부터 획득한 영상에 존재하는 불필요한 요소를 제거하고 머신 비전 시스템의 정확한 동작을 위한 과정이다. 따라서 머신 비전 시스템의 목적과 검사 대상에 최적화된 조명장치를 사용하게 되면 영상처리 과정이 보다 간단해지며 정확성도 개선될 수 있다. 이러한 이유에서 조명 선택 시에 조명의 위치, 방향, 조광, 안정성 등 다양한 조명 조건을 고려하여 검사 대상 및 시스템에 가장 적합한 조명을 선택해야 한다.

2.2.4 소프트웨어

머신 비전 시스템에서 하드웨어의 가장 큰 역할은 시스템의 목적에 적합한 영상을 획득하는 것이다. 그리고 획득한 영상을 처리 및 분석하여 시스템의 목적에 맞는 최종 결과를 도출해내는 과정은 소프트웨어를 이용해서 수행하게 된다. 소프트웨어는 하드웨어 제어, 데이터 관리, 영상 처리 등 머신 비전 시스템의 전체 동작을 제어 및 관리한다. 소프트웨어 내부 동작 중에서 가장 중요한 요소는 영상으로부터 시스템의 주요 목적에 맞는 정보를 얻는 영상처리 부분이다.

머신 비전 업계에서는 영상처리를 위한 소프트웨어 개발 과정을 보다 쉽고 빠르게 할 수 있도록 하는 라이브러리 제공하고 있다. 대표적으로 OpenCV(Open source Computer Vision), MIL(Matrox Imaging Library), HALCON, CVB(Common Vision Blox) 등이 있다. 이러한 라이브러리들은 기본적으로 다양한 카메라 및 주변 장치와의 인터페이스를 제공하며, 대부분의 영상처리 알고리즘을 사용자가 쉽게 이용할 수 있도록 구현하고 있다. 그리고 제한적이지만 머신 비전 시스템에서 다른 작업을 거치지 않고 바로 사용이 가능한 기능들을 제공하기도 한다. 개발자들은 이러한 라이브러리를 이용하거나 직접 필요한 모든 알고리즘을 구현하여 영상처리 소프트웨어를 개발하고 있다.

2.3 머신 비전의 산업 동향

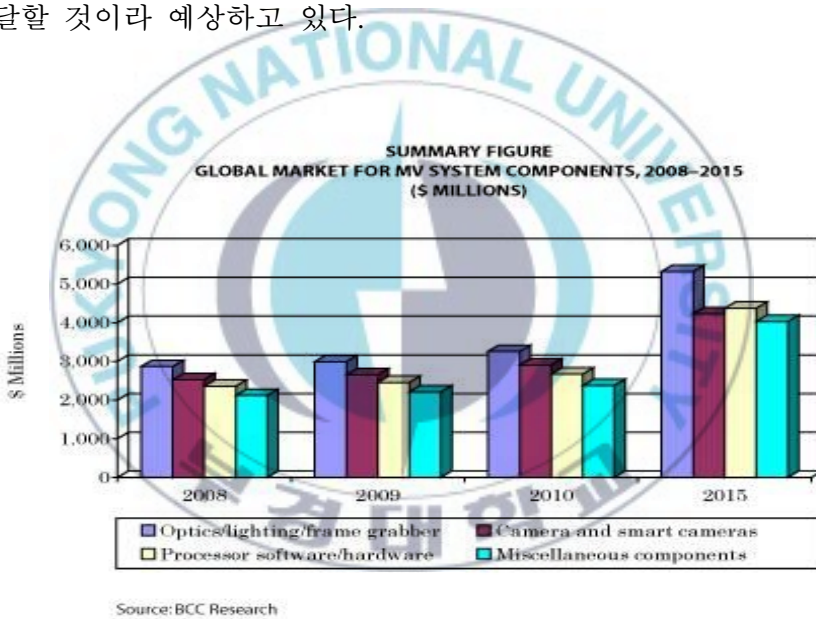
최근 머신 비전에서 큰 기술적 변화는 산업용 카메라의 다양한 디지털 인터페이스와 스마트 카메라(Smart Camera)이다. 그 동안 카메라 인터페이스는 아날로그 방식으로 주로 사용되어 왔지만, 디지털 방식인 IEEE 1394, USB, GigE Vision이 크게 확장되고 있다. 특히 디지털 방식의 전송 거리를 획기적으로 늘릴 수 있고 하드웨어적인 설치비용 절감, 사용자 편의 제공 등의 장점을 가진 GigE Vision에 업계의 이목이 집중되고 있다. 그리고 카메라 모듈에 마이크로프로세서와 기타 하드웨어의 기능을 추가시킨 스마트 카메라는 영상처리, 영상수집, 비전 검사 등을 단일 하드웨어로 수행할 수 있도록 해준다. 이와 같은 카메라 인터페이스와 스마트 카메라 기술은 머신 비전 시스템의 개발에 소요되는 비용을 절감시키고 응용분야를 확대시키고 있다.

광학 기술과 제어 기술의 발전은 머신 비전 시스템에서 고해상도의 영상을 얻을 수 있게 해주었고 이를 처리하기 위한 머신 비전 기술은 더욱 빠른 처리 속도를 요구하고 있다. 대용량의 영상 데이터를 고속으로 처리하는 것은 머신 비전 시스템의 성능을 향상시키는 중요한 기술적 요소이다. 이러한 이유에서 GPU(Graphics Processing Unit)를 이용하거나 병렬처리 기술을 이용하여 영상처리 속도를 개선하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 최근에 영상처리 분야에서 널리 사용되는 HALCON, IPP(Integrated Performance Primitives) 등의 라이브러리에서도 멀티프로세서와 멀티코어 컴퓨터를 지원하거나 SSE(Streaming SIMD Extensions) 기술을 활용하여 영상처리 속도를 향상시켜주고 있다.

미국 시장조사 회사인 BCC Research의 보고서 Machine Vision: Technologies and Global Markets에 따르면 세계시장에서 머신 비전 시스템 분야에서 2010년 기준으로 112억 달러에 이르고 2015년에 180억 가

까지 돌파할 것이라 예상하고 있다. 이는 연간 9%의 성장률을 나타내는 지표이기도 하다. 거대 시장으로 손꼽히는 광학장치, 조명장치, 프레임그레버 분야가 2010년 기준 33억 달러에 이를 것으로 예상되며, 2015년에는 연평균 10.3%의 성장률, 53억에 달할 것이라 기대된다.

두 번째 큰 시장인 카메라 분야는 2010년에 연평균 7.8%의 성장률에 29억 달러에 이를 것이고 2015년에 42억 달러 이상이 될 것이라 예측했다. 프로세서 소프트웨어와 하드웨어의 분야에서의 수익은 2010년에 27억 달러에 이를 전망이다. 2015년에 연평균 11.2%의 성장률로 40억 달러에 도달할 것이라 예상하고 있다.



[그림 2.3] 머신 비전 시장 동향

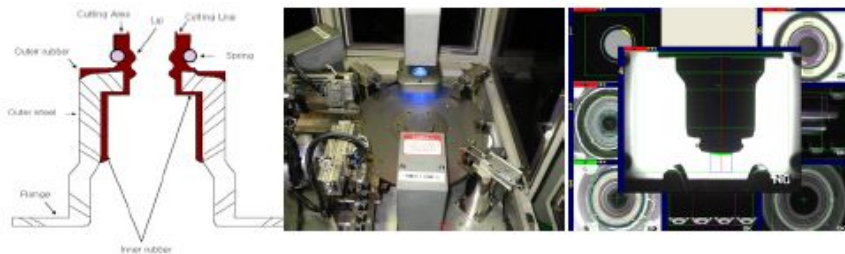
2.4 기존의 자동차 부품 검사 시스템

최근 국내 자동차 산업의 발전과 더불어 자동차 부품 검사를 자동화하기 위한 머신 비전 시스템에 대한 연구가 진행되어 왔다. 기존에 자동차 부품인 밸브 씰(Valve seal), 락킹 레버(Locking lever), 카시트 프레임(Car seat frame) 등의 생산과정에서 발생하는 불량률을 검사하기 위한 연구가 수행된 바 있다.

2.4.1 밸브 씰 검사

자동차용 밸브 씰(Valve seal)은 실린더 외부의 엔진오일이 엔진내부로 유입되는 것을 방지하기 위한 부품이다. 해당 연구에서는 밸브 씰의 외형 결함을 검사하기 위한 시스템 구성과 결함 검사 알고리즘을 제안하고 있다[3].

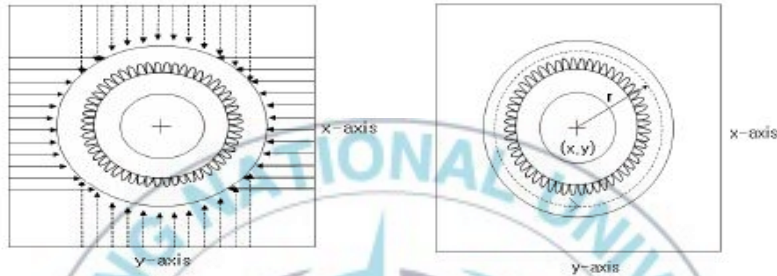
검사 시스템은 밸브 씰을 360도 방향에서 검사할 수 있도록 하기 위해서 8대의 CCD 카메라를 사용하고 있으며, 롤러를 이용하여 제품을 회전시키면서 검사를 수행한다. 또한 각 CCD 카메라에서 최적의 영상을 획득할 수 있도록 다양한 형태와 색상의 조명을 사용하고 있다.



(a) 외관형상 (b)원형 회전판 (c) 영상화면

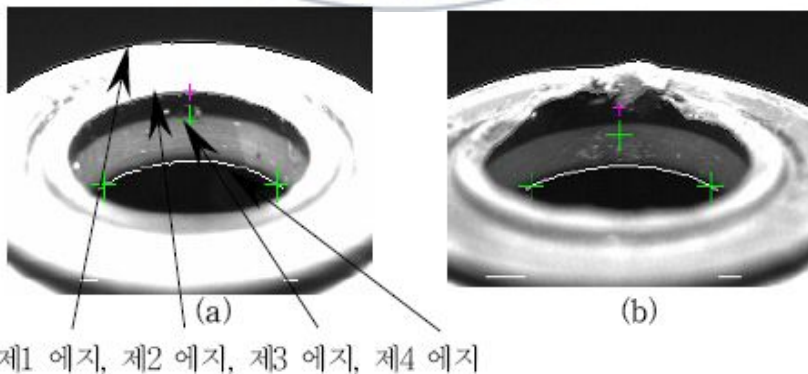
[그림 2.4] 밸브 씰의 외관 및 형상

밸브 씰 상부 영역에 대한 결함을 검출하기 위한 영상처리 알고리즘은 크게 중심 및 원형 검출 알고리즘과 평균화 필터(Averaging filter)로 구성되어 있다. 밸브 씰의 영상에서 x, y 방향의 좌우, 상하 에지를 검출하여 x, y 방향의 중심점을 구하고 100개의 포인트에 대한 평균값을 구하여 원의 중심을 구한다.



[그림 2.5] 중심 찾기 및 원형 검출

밸브 씰 상부 영역에 발생하는 립 단차 및 과사상 결함은 원형 검출 및 에지를 추출하여 검사한다. 결함 검사 결과를 [그림 2.6]에 나타내었다.

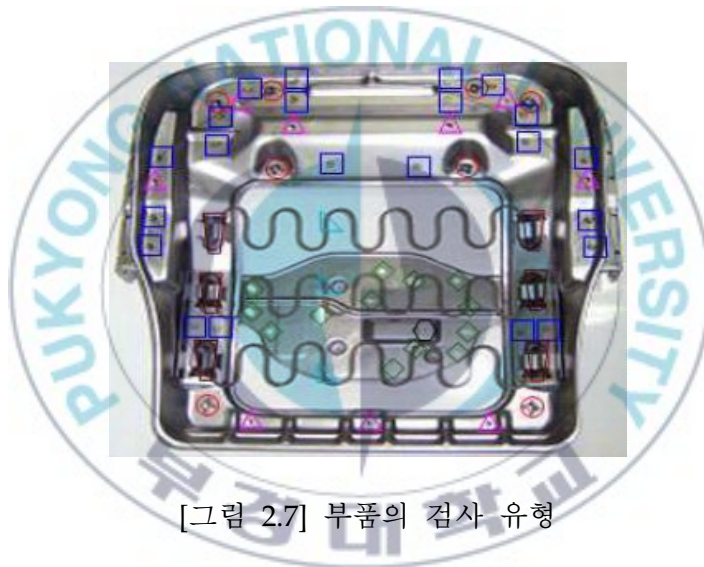


[그림 2.6] 밸브 씰 상부영역 결함 검사 (a) 양품 (b) 불량품

2.4.2 카시트 프레임 검사

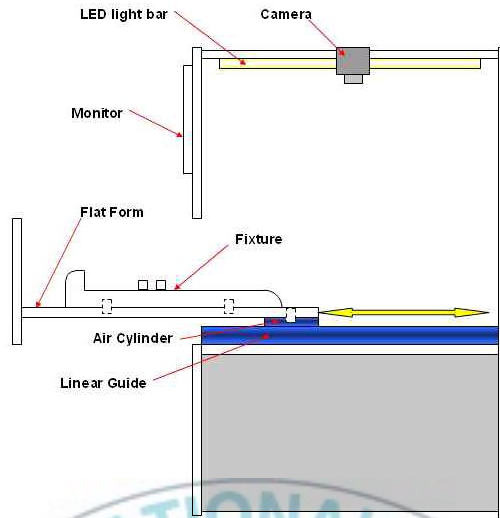
카시트 프레임(Car seat frame)은 아연 도금 처리한 철판으로 제작되며 크기는 가로, 세로 500mm이다. 해당 연구에서는 카시트 프레임에서 너트, 용접, 홀 등의 정상 가공 및 결합 유무를 검사하는 것이며, 비전 검사를 위한 하드웨어와 검사 알고리즘을 제안하였다[4][5].

카시트 프레임 검사 시스템의 검사 대상 및 검사 유형을 [그림 2.7]에 나타내었다.



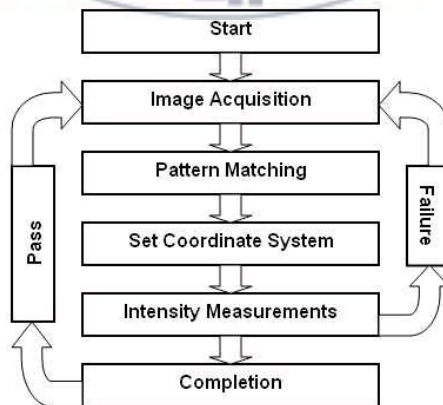
[그림 2.7] 부품의 검사 유형

검사 시스템은 작업환경을 고려하여 컨베이어 형태의 자동 부품 공급 장치는 포함하지 않고 있으며, 고정된 지그에 수동으로 카시트 프레임을 안착시켜 검사를 수행한다. 카시트 프레임의 금속 재질로 인한 조명의 반사 문제를 해결하기 위한 조명장치와 조명방법을 사용하고 있다. 또한 외부 차광을 차단하기 위한 암실에서 제품 검사를 수행한다. 해당 연구에서 제안한 카시트 프레임 검사 시스템의 구성을 [그림 2.8]에 나타내었다.



[그림 2.8] 카세트 프레임 검사 시스템

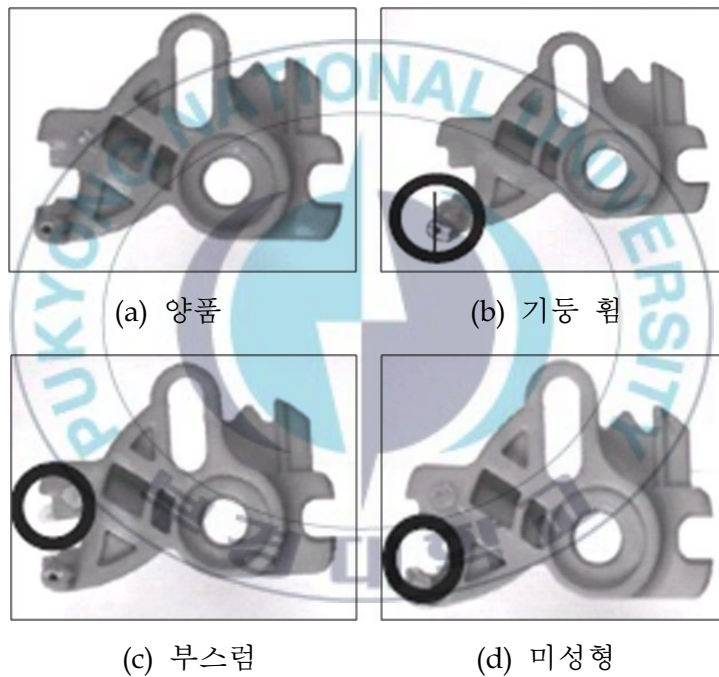
카세트 프레임 검사 시스템의 결합 검사 알고리즘은 현재의 영상과 템플레이트 영상에서 패턴매칭을 이용하여 ROI를 추출하고 각 ROI 내에서 형상 및 치수를 측정하는 방법을 제안하고 있다. 해당 연구에서 제안하는 검사 알고리즘 개요를 [그림 2.9]에 나타내었다.



[그림 2.9] 검사 알고리즘 개요

2.4.3 락킹 레버 검사

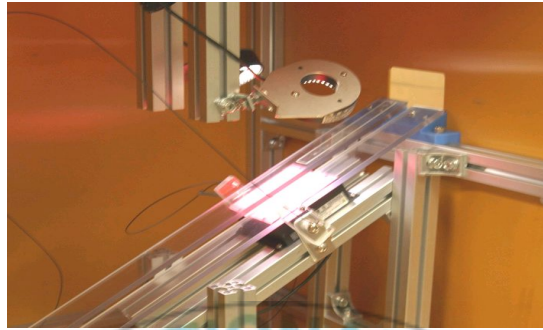
락킹 레버(Locking lever)는 자동차 문 잠금 장치에 사용되는 부품이며 플라스틱 사출성형 방법으로 제조된다. 락킹 레버는 성형과정에서 재료의 부족 또는 과도한 투입으로 미성형, 부스럼과 같은 불량 발생한다. 기존에 락킹 레버의 불량을 검사하기 위한 머신 비전 시스템이 제안되었다[6].



[그림 2.10] 락킹 레버 부품의 불량 유형

검사 시스템은 락킹 레버를 자동으로 공급하기 위한 슬라이더와 영상 획득을 위한 카메라, 조명장치, 프레임그래버 등으로 구성된다. 전체 시스템의 크기를 줄이기 위해서 카메라 렌즈에 접사링(Close Ring)을 부착하여 사용하고 있으며, 전방조명(Front Lighting)과 후방조명(Back

Lighting)을 사용하여 락킹 레버의 외형과 기동 부위를 검사 가능하도록 한다. 검사 시스템의 구성을 [그림 2.11]에 나타내었다.



[그림 2.11] 락킹 레버 검사 시스템 구성

결합 검사 알고리즘은 크게 좌표시스템 설정, 원 중심 포착, 결합 검출 등의 과정을 통해 수행된다. 좌표시스템 설정은 현재 입력된 영상과 템플릿 영상을 매칭 시켜 관심영역을 추출하기 위한 과정이다. 추출된 관심영역에 원의 중심을 찾은 후, 검사 영역의 크기와 측정 영역의 크기 비율을 설정된 값과 비교하여 최종 불량 유무를 판단한다.



[그림 2.12] 락킹 레버 검사 화면

Ⅲ. 자동차 부품 검사 시스템 개발

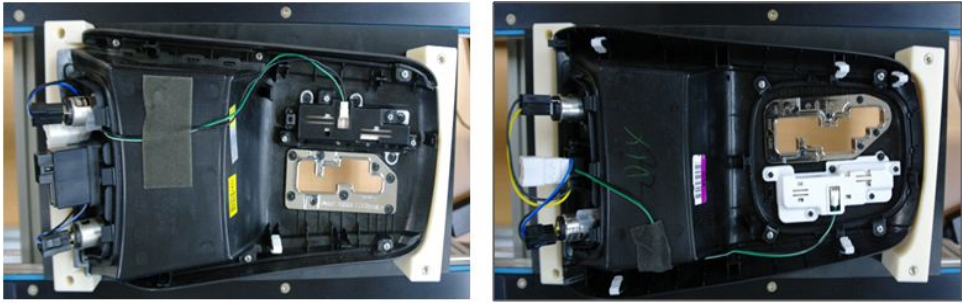
머신 비전 시스템은 카메라로부터 획득한 영상을 적절하게 처리 및 분석하여 제품의 불량을 검사하는 시스템이다. 따라서 검사 시스템을 개발하기 위해서는 무엇보다도 검사 대상과 주요 목적에 적합한 영상을 획득할 수 있는 하드웨어를 구성해야 한다. 이를 위해서는 검사 대상에 대한 정확한 이해와 검사 방법에 대한 고찰이 선행되어야 한다.

3.1 기어 박스 검사 시스템

자동차 부품인 기어 박스(Gear Box)는 전동에 사용하는 기어 장치를 내장한 상자 형 프레임을 말한다. 기어 박스는 차종에 따라 다양한 형태와 구성부품으로 이루어져 있기 때문에 기존의 육안 검사 시, 많은 숙련된 작업자가 필요하며 정확한 검사를 수행하는데 어려움이 있다. 머신 비전 시스템을 이용하여 기어 박스 검사를 자동화함으로써 육안 검사에 비해 보다 정확하고 빠른 품질 검사를 수행할 수 있다[7].

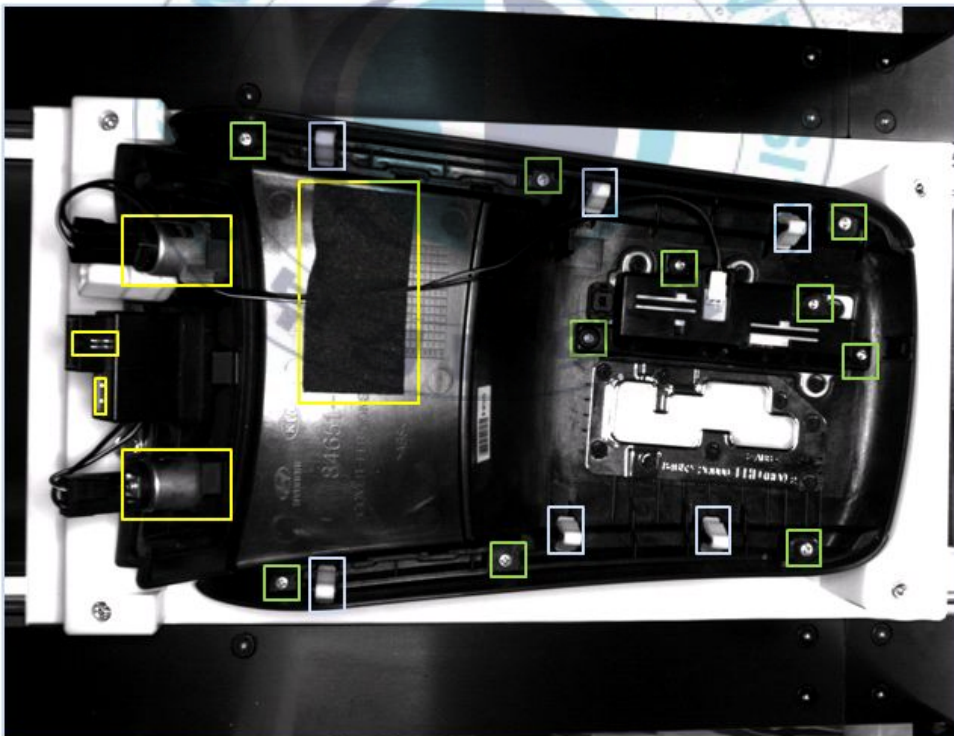
3.1.1 검사 대상

기어 박스 검사 시스템의 주요 검사 대상인 아반떼 HD, MD 차종의 기어 박스를 [그림 3.1]에 나타내었다. 검사 대상을 살펴보면 차종에 따라 기어 박스의 형태 및 구성 부품의 종류는 다르지만 고정패드, 클립, 볼트 등의 색상과 형태는 거의 일정하다. 따라서 구성 부품이 존재하는 정확한 ROI(Region of interest)만 추출한다면 해당 영역에 실제 구성 부품이 존재하는지 그리고 정상적으로 결합된 상태인지를 쉽게 검사할 수 있다.



[그림 3.1] 기어 박스 부품

주요 검사 항목은 [그림 3.2]에 나타난 고정패드, 클립, 볼트 등의 구성 부품에 대한 누락 유무를 검사하는 것이다.



[그림 3.2] 기어 박스 검사 항목

3.1.2 하드웨어 구성

검사 시스템의 하드웨어는 크게 영상 입력을 위한 카메라와 렌즈, 조명장치, 쉐도우 및 제어장치 등으로 구성된다.



[그림 3.3] 기어 박스 검사 시스템 구성

검사 시스템에서 기어박스의 영상을 획득하기 위해서 해상도가 1600(H)×1200(V)이고 최대 프레임 속도가 16fps(Frame per second)인 1394 카메라를 사용하고 있다. 기어 박스의 크기가 대략 330×220mm이고 카메라와 기어박스 사이의 거리가 제한적이기 때문에 넓은 시야각을 확보하기 위해서 초점거리가 5mm인 렌즈를 사용하였다. 기어 박스 검사에서는 미세한 형상 검사나 치수측정이 목적이 아니라 구성부품의 정상 조립 여부를 검사하는 것이기 때문에 고화질을 필요로 하지는 않는다.

검사 대상의 구성부품인 볼트, 클립, 고정패드 등은 기어 박스에서 특정한 영역에 편중되지 않고 전체적으로 분산되어 있으며, 금속 부품의 주변 영역에서 빛이 반사될 수가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해

서 [그림 3.4]와 같은 LED 링 조명장치를 사용하였다.



(a) LED 링 조명 (b) 조명 컨트롤러

[그림 3.4] 기어 박스 검사를 위한 조명장치

또한 외부의 빛으로부터 안정된 조명을 확보하기 위해서 [그림 3.5]와 같은 차광막을 사용하였다.



[그림 3.5] 안정된 조명을 위한 차광막

3.2 사이드 프로텍터 검사 시스템

사이드 프로텍터(Side Protector)는 자동차 문의 개폐 시에 외부 대상 물과의 충격에 의한 손상을 방지하고 미려한 외관을 제공하기 위한 부품이다. 사이드 프로텍터의 생산 과정은 크게 플라스틱 사출성형(Injection Molding) 방법을 이용하여 외형을 제작한 후, 표면을 도색하는 과정으로 이루어진다. 기존에 사이드 프로텍터 생산업체는 밝은 형광등 아래에서 제품을 육안으로 검사하고 있다. 머신 비전 시스템을 이용하여 사이드 프로텍터 표면에 존재하는 결함을 자동으로 검사함으로써 제품의 생산성을 향상시킬 수 있다.

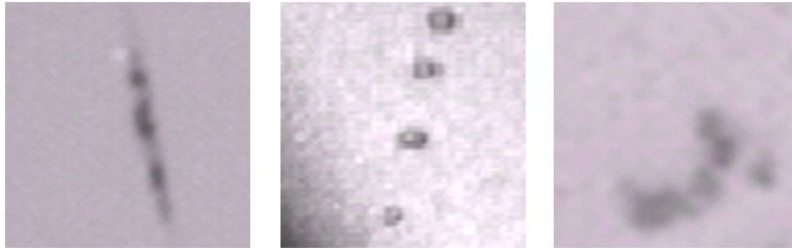
3.2.1 검사 대상

사이드 프로텍터는 차종에 따라 [그림 3.6]에 나타난 것처럼 다양한 형태와 색상으로 제작된다. 사이드 프로텍터의 결함은 도색 과정에서 페인트가 균일하게 분사되지 않아서 발생하는 기포와 이송과정에서 발생하는 스크래치, 찍힘 등의 결함이 주를 이룬다.



[그림 3.6] 사이드 프로텍터 부품

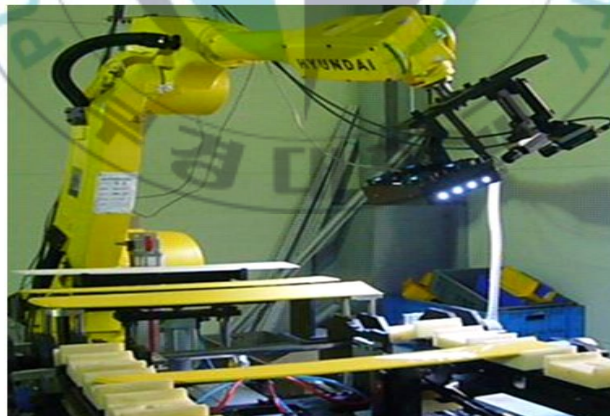
검사 대상의 표면에 발생하는 주요 결함을 [그림 3.7]에 나타내었다.



[그림 3.7] 사이드 프로텍터 표면 결함

3.2.2 하드웨어 구성

자동차 사이드 프로텍터의 검사 시스템은 카메라와 렌즈, LED 조명장치, 6관절 로봇 및 컨베이어 등으로 구성된다. 시스템의 하드웨어 구성을 [그림 3.8]에 나타내었다.



[그림 3.8] 사이드 프로텍터 검사 시스템 구성

검사 시스템에서 기어 박스의 영상을 획득하기 위해 해상도가 1600(H) ×1200(V)인 CCD 카메라와 프레임 그래버(Frame Grabber)를 사용하고

있다. 실제 검사 대상의 최대 크기는 $1000 \times 60mm$ 이며 Micro zoom 렌즈를 사용하여 확대된 영상을 획득하게 된다. 불량 검사 시에 하나의 사이드 프로텍터는 최소 25 프레임 이상의 영상을 촬영하여 불량 검사를 수행하게 된다. 이는 사이드 프로텍터의 표면에 존재하는 미세한 크기의 결함이 영상 획득과정에서 조명에 의해 손실되지 않도록 하고 정확한 결함 검사를 위한 것이다[8].

조명은 사이드 프로텍터의 표면에 존재하는 미세한 결함이 주변 영역보다 더욱 강조될 수 있도록 [그림 3.9]에서 보여주고 있는 고출력의 LED 사각 조명장치를 이용한다. 그리고 조명 방식으로는 Bright field effect 방법을 사용하였다. Bright field effect 방식의 조명은 빛의 정반사를 이용하여 표면이 매끄러운 영역을 조명하는 방법으로, 표면이 매끄러운 영역은 카메라로 정반사되어 밝게 보이고 표면이 거친 영역은 빛을 난반사시켜 어둡게 보이게 된다[2].



[그림 3.9] LED 사각 조명장치

카메라와 조명을 이동시키기 위한 6축 다관절 로봇은 크게 본체와 컨트롤을 위한 패널로 구성되며 패널을 이용하여 이동 경로 및 지점을 지정하여 사용할 수 있다. 또한 다양한 신호 입출력 인터페이스를 제공하기 때문에 외부 장치와 쉽게 연동이 가능하다.

IV. 결함 검출 알고리즘

결함 검출 알고리즘은 획득한 영상으로부터 부품의 불량 유무를 판단하기 위한 알고리즘이다. 결함 검출 알고리즘은 검사 프로그램 및 전체 시스템 동작에 있어서 동작 속도, 정확도 등 주요 성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 따라서 검사 대상의 특징을 충분히 고려한 후, 실험을 통해 적절한 결함 검출 알고리즘을 개발해야 한다.

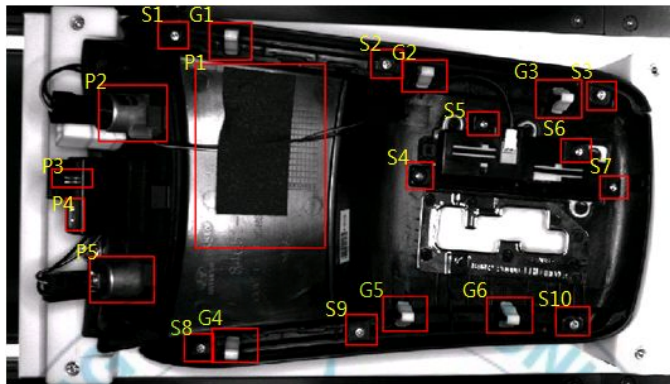
4.1 기어 박스 결함 검출 알고리즘

기어 박스(Gear Box) 결함 검출 알고리즘은 기어 박스의 구성 부품인 고정패드, 클립, 볼트 등의 구성 부품에 대한 누락 유무 및 정상 결합 여부를 검사하기 위한 알고리즘이다. 검사 대상에서 결함을 검출하기 위해서 우선 관심영역(Region of Interest, ROI)을 추출한다. 그리고 추출된 관심영역에서 객체 크기, 색상 평균값을 이용하여 결함을 검출하게 된다.

4.1.1 ROI 추출 알고리즘

본 검사 시스템에서 ROI는 고정패드, 클립, 볼트 등 구성 부품에 해당하는 영역이다. 가장 이상적인 경우는 카메라로 영상을 촬영할 때, 항상 동일한 위치에 피사체가 놓여 있다면 사용자가 직접 ROI를 지정하여 사용할 수 있다. 하지만 대부분의 머신 비전 시스템에서는 영상의 특정한 정보를 이용하여 자동으로 ROI를 추출해야 한다. 본 검사 시스템에서는 카메라를 이용하여 검사 대상을 촬영할 때, 항상 검사 대상의 위치가 일정하지는 않지만 이동 범위가 크게 제한되어 있다. 따라서 사용자가 수동적으로 설정한 ROI와 현재 영상에서 검사 대상의 왜곡된 위치를 보정하여 최종 ROI를 추출할 수 있다.

[그림 4.1]은 아반떼 HD 모델의 기어 박스를 대상으로 기준 영상을 촬영한 후, 프로그램을 이용하여 각 검사 영역에 대하여 ROI를 설정한 것이다.



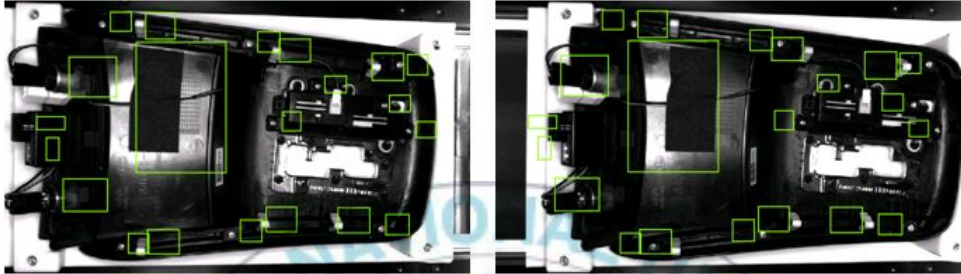
[그림 4.1] 기준 영상의 ROI 설정

사각형의 형태로 정의된 [그림 4.1]의 ROI는 [표 4.1]과 같이 영상의 픽셀 좌표로 표현할 수 있다.

[표 4.1] 기준 영상에서 설정된 ROI의 픽셀 좌표

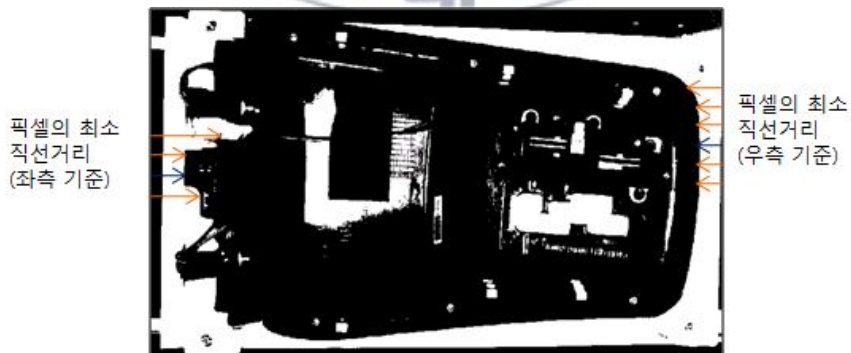
ROI	Top(x,y)	Bottom(x,y)	ROI	Top(x,y)	Bottom(x,y)
G1	(238, 93)	(288,137)	S1	(179, 92)	(215,124)
G2	(461,136)	(514,174)	S2	(425,124)	(463,158)
G3	(616,159)	(670,204)	S3	(675,161)	(710,195)
G4	(241,446)	(295,486)	S4	(466,254)	(498,286)
G5	(439,409)	(491,450)	S5	(537,196)	(574,224)
G6	(559,410)	(613,452)	S6	(645,227)	(681,255)
P1	(110,165)	(190,231)	S7	(690,270)	(723,297)
P2	(56, 262)	(104,284)	S8	(209,452)	(244,485)
P3	(72, 296)	(94, 334)	S9	(396,430)	(433,466)
P4	(100,363)	(175,417)	S10	(639,421)	(679,455)
P5	(222,141)	(373,354)			

실제 영상을 촬영할 때에는 기준 영상에 비해 검사 대상이 좌측 또는 우측으로 더 많이 이동 될 수 있다. 따라서 기준 영상으로 설정한 ROI를 사용하는 경우 [그림 4.2]와 같이 잘못된 영역을 ROI로 추출하게 된다.



[그림 4.2] 검사 대상의 위치 오차

이러한 문제점을 해결하기 위해서 [그림 4.3]과 같이 기준 영상을 2차화하여 픽셀 최소 직선거리를 계산한 후, 실제 제품 검사 시에 동일한 방법으로 현재 영상에서 픽셀의 최소 직선거리를 계산하여 ROI의 위치를 보정한다.



[그림 4.3] 기준 영상의 픽셀 최소 직선거리

픽셀의 최소 직선거리로부터 ROI를 보정하기 위해서 식(1), (2)를 사용한다. l_R 는 현재 영상에서 우측 기준의 픽셀 최소 직선거리를 의미하며, l_{SR} 는 기준 영상에서 우측 기준의 픽셀 최소 직선거리이다. l_L , l_{SL} 는 좌측 기준의 픽셀 최소 직선거리이며 m 은 ROI 개수를 의미한다.

$l_R - l_{SR} > 0$ 인 경우는 현재 촬영된 영상에서 검사 대상이 기준 영상에 비해 좌측으로 이동된 상태를 나타내며, 식(1)을 이용하여 검사 대상이 이동된 거리만큼 ROI의 x 축 좌표를 좌측으로 이동시킨다.

$$f(X, Y) = x_i - (l_R - l_{SR}), i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$l_L - l_{SL} > 0$ 인 경우는 현재 촬영된 영상에서 검사 대상이 기준 영상에 비해 우측으로 이동된 상태를 나타내며, 식(2)를 이용하여 검사 대상이 이동된 거리만큼 ROI의 x 축 좌표를 우측으로 이동시킨다.

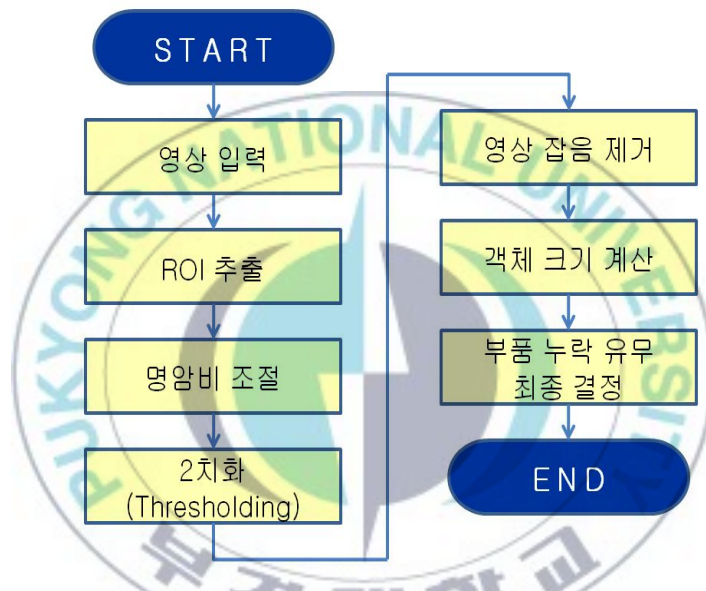
$$f(X, Y) = x_i + (l_L - l_{SL}), i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$l_R - l_{SR} = 0$ 또는 $l_L - l_{SL} = 0$ 인 경우는 현재 촬영된 영상에서 검사 대상이 기준 영상과 동일한 위치에 존재하는 상태이기 때문에 더 이상 ROI는 보정하지 않고 사전에 정의된 ROI를 그대로 사용한다.

ROI 추출 알고리즘에서는 컨베이어의 이동방향으로 변경되는 검사 대상의 위치만을 보정함으로써 빠르고 정확하게 ROI를 추출할 수 있다. 실제 검사 대상은 컨베이어의 이동방향과 수직인 방향으로도 미세하게 위치가 변경될 수도 있지만 시스템의 동작에는 영향을 미치지 않기 때문에 고려하지 않았다.

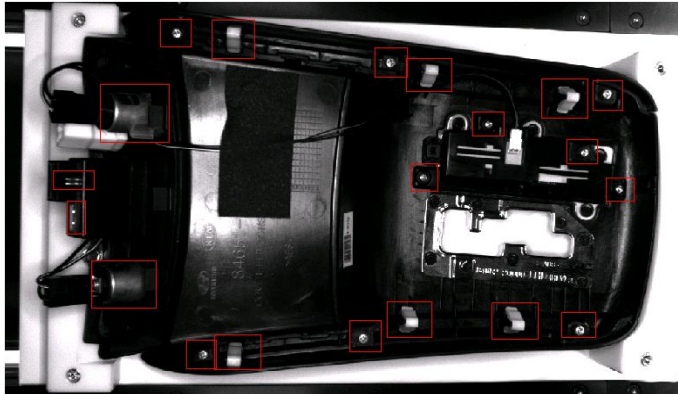
4.1.2 객체 크기를 이용한 결함 검출 알고리즘

추출한 ROI 내에 부품에 해당하는 크기의 객체가 존재하는지를 판단하여 부품의 정상 조립 여부를 검사할 수 있다. 따라서 객체의 크기를 정의하고 이를 비교하기 위한 방법이 필요하다. 객체 크기를 이용한 결함 검출 알고리즘을 [그림 4.4]에 순서도로 나타내었다.



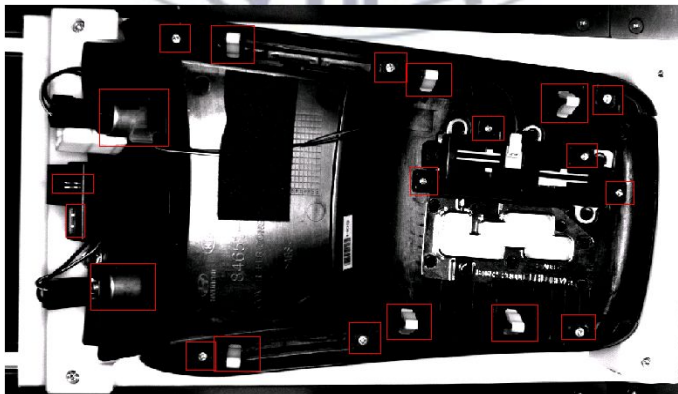
[그림 4.4] 객체 크기를 이용한 결함 검출 알고리즘 동작 순서도

해당 알고리즘에서는 우선 입력된 영상으로부터 부품 및 그 주변 영역을 ROI(Region of interest)로 추출해야 한다. 이때 ROI 추출은 차량의 모델에 따라 사전에 지정된 ROI 정보를 바탕으로 4.1.1절에서 설명한 방법을 이용한다. ROI를 추출한 결과를 [그림 4.5]에 나타내었다.



[그림 4.5] 기어 박스 ROI 추출 영상

원 영상에서 부품과 그 주변 영역의 명암대비를 높인 영상을 [그림 4.6]에 나타내었다. 명암대비는 그레이스케일 값의 밝고 어두운 부분의 차이를 의미한다. 영상이 전체적으로 밝거나 어둡기만 하면 그 영상을 명암대비가 작다고 표현한다. 반대로 영상의 특정 부분은 밝고 다른 부분은 어두워서 차이가 잘 느껴지는 영상은 명암대비가 높다고 표현한다. 명암대비를 높이기 위해서는 밝은 픽셀의 값은 더욱 밝게, 어두운 픽셀의 값은 더욱 어둡게 만들어주어야 한다[9].

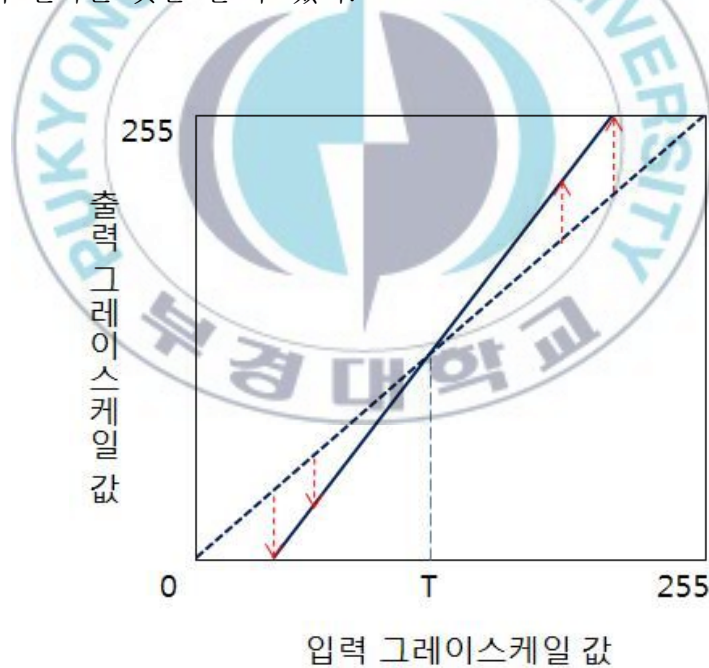


[그림 4.6] 명암대비 강조 영상

원 영상에서 명암대비를 변화시키기 위해서 식(3)을 이용하였다. T 값은 픽셀이 밝고 어두운 정도를 구분하는 기준 픽셀 값이다.

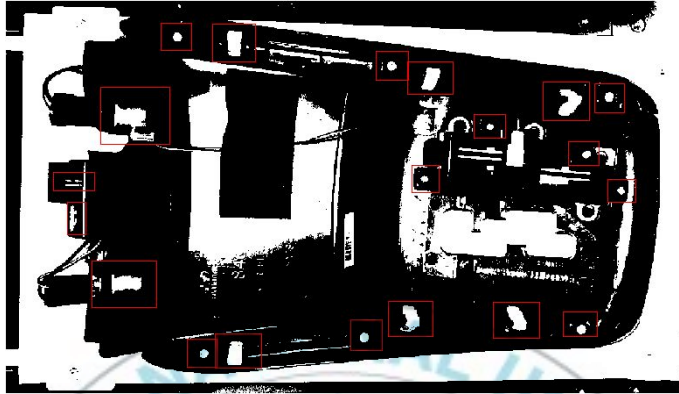
$$g(x,y) = f(x,y) + (f(x,y) - T) * a \quad (3)$$

식(3)에서 a 는 -1에서 1사이의 값을 갖는다. a 가 0~1 사이의 값을 가질 경우에는 명암대비를 증가시키는 연산을 수행하게 되며, -1~0 사이의 값을 가질 때에는 명암대비를 감소시키는 연산을 수행한다. [그림 4.7]의 명암대비 조절 함수 그래프를 살펴보면 임계값 T 값에서 멀리 떨어져 있는 그레이스케일의 픽셀 값은 가까이에 있는 픽셀 값보다 색상 값이 더욱 많이 변하는 것을 알 수 있다.



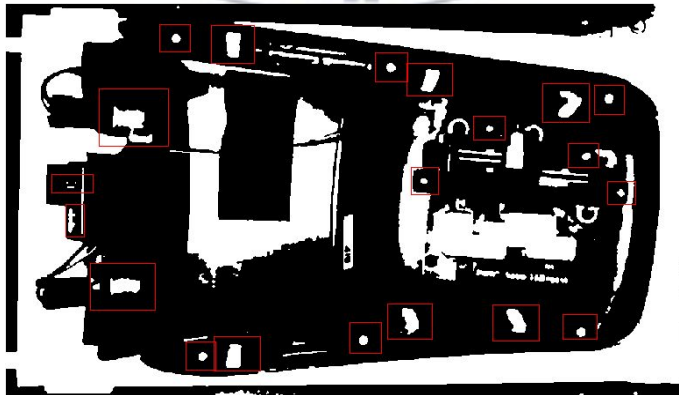
[그림 4.7] 명암대비 조절 함수

원 영상의 명암대비를 강조한 후, 2치화한 영상을 [그림 4.8]에 나타내었다.



[그림 4.8] 기어 박스 2치화 영상

2치화 과정에서 영상 잡음(Image noise)이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 영상 잡음을 제거하기 위해 미디언 필터(Median filter)를 이용하였다. 미디언 필터를 이용하여 영상 잡음을 제거한 결과를 [그림 4.9]에 나타내었다.



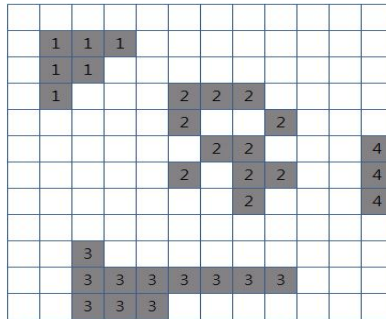
[그림 4.9] 잡음이 제거된 영상

미디언 필터는 비선형 공간적 필터링 기법으로 분류되며, 이는 마스크 값과 입력 픽셀의 값을 곱하여 선형 합으로 계산하는 필터가 아니기 때문이다. 미디언 필터는 특히 소금, 후추 잡음을 효과적으로 제거하는 능력을 가지고 있다. 미디언 필터의 동작은 [그림 4.10]에 나타낸 것처럼 입력 영상의 (x, y) 좌표 주변 픽셀들의 값을 오름 또는 내림차순으로 정렬하여 그 중앙에 있는 픽셀 값을 이용하는 필터이다. 본 알고리즘에서는 3×3 크기의 필터를 사용하였으며 픽셀의 값을 정렬하기 위해서 삽입정렬(insert sort) 알고리즘을 이용하였다. 현재 정렬하고자 데이터 량이 적은 수이기 때문에 퀵 정렬, 병합 정렬 방법에 비해 빠르게 동작한다[10].



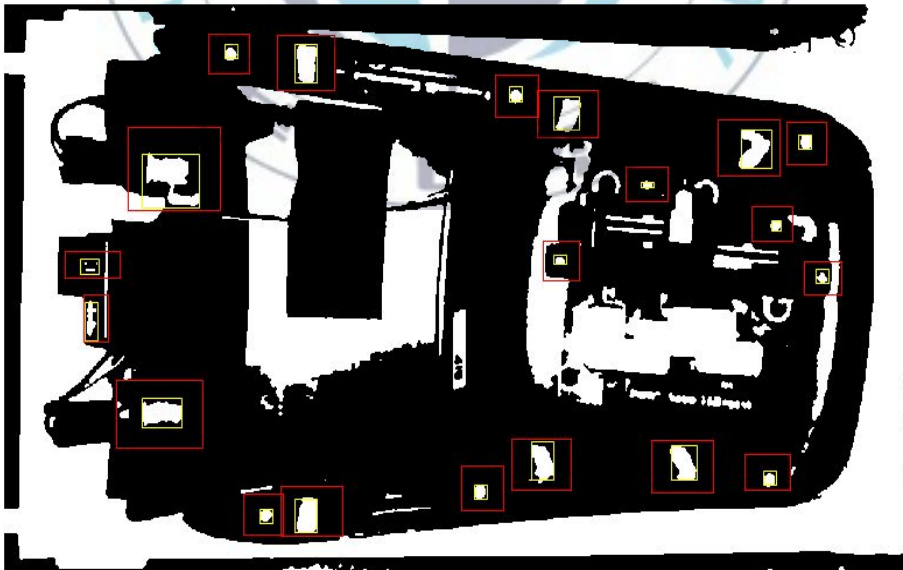
[그림 4.10] 미디언 필터 동작

영상 잡음을 제거한 후, 추출된 ROI 내에서 레이블링(Labeling) 연산을 수행한다. 레이블링은 [그림 4.11]과 같이 일반적으로 이진 영상에서 수행되는 영역 구분 방법이다. 하나의 이진 영상 안에는 다수의 객체가 존재할 수 있고 동일 객체에 속한 모든 픽셀에 고유한 번호를 매기는 작업이다[11].



[그림 4.11] 레이블링 동작

추출한 다수의 ROI 내에는 하나 이상의 인접한 픽셀로 이루어진 다수의 객체가 존재한다. 이러한 객체들은 후보들로 지정되며, 객체의 가로 또는 세로의 크기를 제한함으로써 일정한 크기 이상의 객체를 선택한다. ROI 내에서 레이블링 연산을 수행한 후, 각 ROI 내에 실제 부품에 해당하는 객체가 검출된 영상을 [그림 4.12]에 나타내었다.

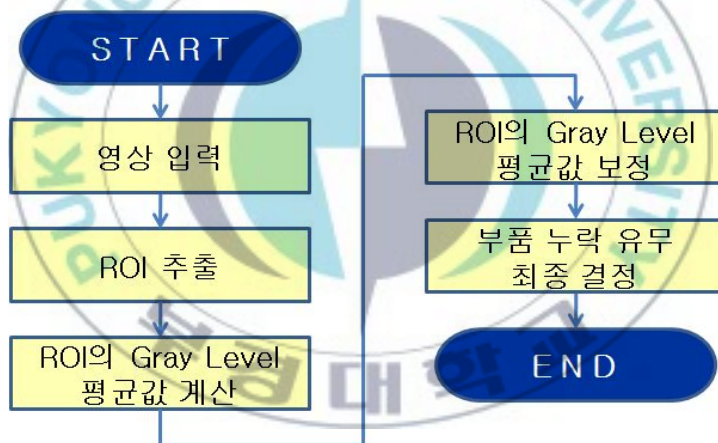


[그림 4.12] 레이블링 실행 결과

만약 ROI 내에 부품이 존재하지 않는 경우는 어떠한 객체도 남겨지지 않게 된다. [그림 4.12]를 살펴보면 빨간색은 추출된 ROI이며 노란색은 부품에 해당하는 객체를 레이블링 한 결과이다.

4.1.3 색상 평균값을 이용한 결함 검출 알고리즘

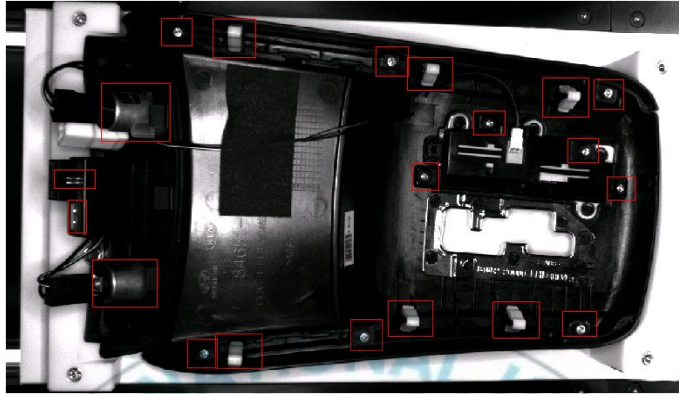
색상 평균값을 이용하여 결함을 검출하는 알고리즘은 획득한 영상을 2치화하지 않고 그레이스케일의 영상을 직접 이용한다. 따라서 전처리 과정이 간단하며 다른 결함 검출 알고리즘에 비해 알고리즘의 동작속도가 빠르다.



[그림 4.13] 색상 평균값을 이용한 결함 검출 알고리즘 동작 순서도

색상 평균값을 이용한 결함 검출 알고리즘은 4.1.2절의 객체 크기를 이용하는 결함 알고리즘과 동일하게 가장 먼저 입력 영상으로부터 부품 및 그 주변 영역에 해당하는 ROI(Region of interest)를 추출한다. 이때 ROI 추출은 차량의 모델에 따라 사전에 지정된 ROI 정보를 바탕으로 4.1.1절

에서 설명한 방법을 이용한다. ROI를 추출한 결과를 [그림 4.14]에 나타내었다.



[그림 4.14] 기어 박스 ROI 추출 영상

원 영상에서 ROI를 추출한 후, 식(4)를 이용하여 각 ROI의 색상 평균값인 G_n 을 구한다. 배열의 구조로 이루어진 원 영상(Image)에서 각 ROI의 픽셀 좌표를 이용하여 실제 픽셀 값을 구하고 이들의 평균을 계산한다. 수식에서 m 은 정의된 ROI의 개수를 나타낸다.

$$G_n = \frac{\sum_{i=x1_n}^{x2_n} \sum_{j=y1_n}^{y2_n} \text{Img}[i][j]}{(x2_n - x1_n + 1) \times (y2_n - y1_n + 1)}, n = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

ROI의 픽셀 평균값(G_n)을 보정하기 위한 전체 색상 평균값(G_{total})은 식(5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$G_{total} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m G_n \quad (5)$$

기준 영상에서 구한 각 ROI의 색상 평균값(G_n)과 전체 색상 평균값 (G_{total})을 [표 4.2]에 나타내었다.

[표 4.2] 기준 영상의 ROI 색상 평균값(G_n)과 전체 색상 평균값(G_{total})

ROI(n)	G_n	ROI(n)	G_n
G1(1)	40.30	S1(12)	14.42
G2(2)	38.29	S2(13)	21.93
G3(3)	46.76	S3(14)	25.50
G4(4)	41.36	S4(15)	25.39
G5(5)	35.97	S5(16)	16.78
G6(6)	40.78	S6(17)	25.40
P1(7)	77.59	S7(18)	47.80
P2(8)	31.34	S8(19)	14.15
P3(9)	18.10	S9(20)	26.11
P4(10)	50.38	S10(21)	28.16
P5(11)	30.73	G_{total}	33.20

기준 영상에서 얻은 색상 평균값과 전체 색상 평균값은 G_n , G_{total} 로 표현하고 현재의 검사 영상에서 얻은 색상 평균값과 전체 색상 평균값은 g_n , g_{total} 으로 표현한다. G_{total} 과 g_{total} 을 계산하는 이유는 외부 조명 혹은 환경에 의해 영상 전체의 명암이 어두워지거나 밝아지는 경우에 g_n 값을 보정함으로써 보다 정확하게 결함 유무를 판단하기 위해서이다. g_n 값을 보정하는 방법은 크게 일괄 수정 방법과 개별 수정 방법으로 구분된다.

일괄 수정 방법은 식(6)에 나타낸 것처럼 기준 영상의 전체 색상 평균값(G_{total})와 현재 영상의 전체 색상 평균값(g_{total})의 차를 g_n 에 빼준다. 이러한 연산은 기준 영상에 비해 명암이 어두운 영상에서는 g_n 이 밝은 값을 갖도록 하고 명암이 밝은 영상에서는 g_n 이 어두운 값을 갖도록 한

다. 이때 모든 ROI에 일괄적으로 동일한 값만큼 g_n 을 변화시키게 된다.

$$A_n = g_n - (g_{total} - G_{total}), n = 1, 2, 3, \dots, m \quad (6)$$

개별 수정 방법은 식(7)에 나타난 것처럼 기준 영상의 전체 색상 평균 값(G_{total})와 현재 영상의 전체 색상 평균값(g_{total})의 차에 α_n 을 곱하여 g_n 에 빼준다. 파라미터 α_n 은 0.5~1사이의 실수이며 각 ROI마다 다른 값으로 설정할 수 있다. α_n 을 사용하는 이유는 각 ROI 내에 존재하는 부품의 크기가 다르기 때문에 $g_{total} - G_{total}$ 값을 모든 ROI에 동일하게 적용할 경우 문제를 발생시킬 수 있다. 부품의 크기가 큰 ROI에는 α_n 에 큰 값을 적용해서 g_n 에 많은 변화를 주고 부품의 크기가 작은 ROI에는 α_n 에 작은 값을 적용하여 g_n 에 작은 변화만을 줄 수 있다.

$$A_n = g_n - (g_{total} - G_{total}) \times \alpha_n, n = 1, 2, 3, \dots, m \quad (7)$$

최종 A_n 과 기준 영상에서 구한 G_n 의 관계가 식(8)을 만족하는 경우 정상 제품으로 판단되게 된다. e_a 는 제품의 불량 및 정상 판정을 위한 허용오차이며 다수의 검사 대상에 대한 반복 실험을 통해 결정된다.

$$G_n - e_a < A_n < G_n + e_a, n = 1, 2, 3, \dots, m \quad (8)$$

4.2 사이드 프로텍터 결함 검출 알고리즘

사이드 프로텍터(Side Protector)의 결함 검출 알고리즘은 사이드 프로텍터 표면에 발생하는 찍힘, 기포 등과 같은 결함을 검사하기 위한 알고리즘이다. 검사 대상에서 결함을 검출하기 위해서 우선 관심영역(Region of Interest, ROI)을 추출한다. 그리고 추출된 관심영역에서 사이드 프로텍터의 곡면 구조를 고려한 영상 2치화, 영상 잡음 제거를 위한 모폴로지(Morphology) 연산, 객체의 크기를 결정하기 위한 레이블링(Labeling), 결함 후보영역으로부터 최종 결함을 판단하기 위한 영상 필터링(Filtering) 과정을 통해 결함을 검출한다[8].



[그림 4.15] 사이드 프로텍터 결함 검출 알고리즘
동작 순서도

4.2.1 곡면 구조를 고려한 영상 2치화

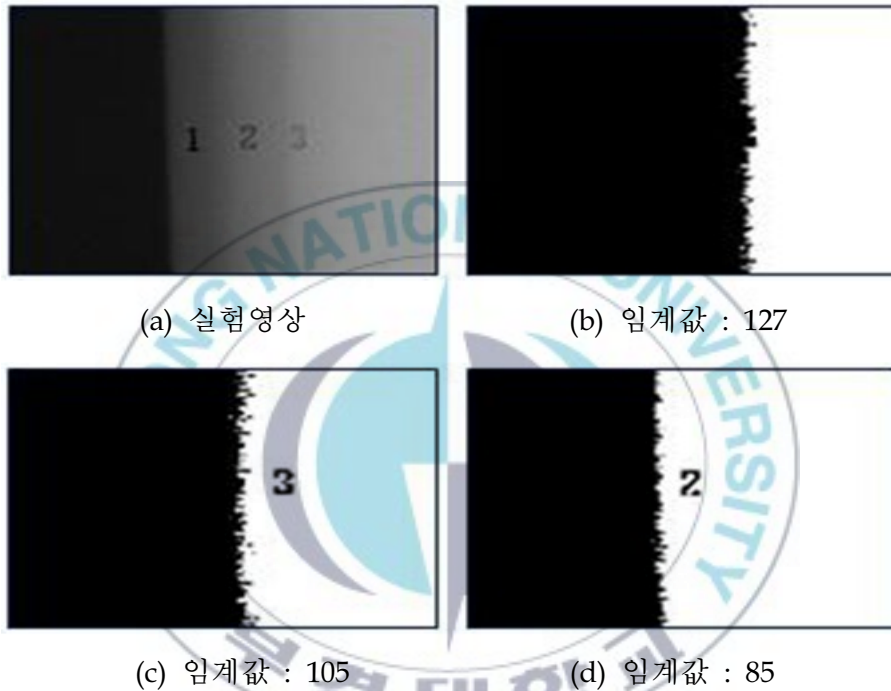
사이드 프로텍터(Side Protector) 영상으로부터 제품의 결함을 검출하기 위해서 가장 먼저 영상을 2치화(Binarization) 한다. 영상 2치화는 흑백 또는 색채 영상 등 다치(多値)의 영상으로부터 2치(1, 0)을 얻기 위한 처리과정이다. 영상을 흰색 또는 검정색의 2치 데이터로 이루어진 영상으로 변환시킨 후, 이로부터 특정 객체 또는 영역의 계수 및 형상 해석을 위한 용도로 주로 사용된다. 여기에서는 2치화 영상에 존재하는 검정색 점들을 제품에 존재하는 결함 후보들로 지정한다.

영상 2치화는 크게 전역 2치화와 지역 2치화 방법이 있다. 전역 2치화는 영상의 모든 픽셀에 대해 동일한 임계값을 적용하여 2치화하는 것이며 지역적 2치화는 원 영상을 다수의 영상들로 분할한 후, 분할된 각 영역에서 다른 임계값들을 적용하여 영상을 2치화한다. 여기에서 임계값은 영상에 존재하는 픽셀 값들을 검정색 또는 흰색으로 구분하기 위한 기준값으로 임계값 이상의 색상 값을 가지는 픽셀들은 흰색으로 그리고 임계값 보다 작은 색상 값을 가지는 픽셀들은 검정색으로 변환시킨다.

전역 2치화는 지역 2치화에 비해 구현이 용이하지만 임계값에 따라 2치화 영상에 매우 큰 변화가 존재하기 때문에 곡면을 이루는 사이드 프로텍터 부품의 불량 검사에는 적합하지 않다.

곡면 구조로 이루어진 사이드 프로텍터 제품의 모서리 영역에 결함으로 간주되는 숫자 1, 2, 3을 추가한 실험영상을 [그림 4.16(a)]에 나타내었다. 제품의 결함으로 간주되는 숫자 1, 2, 3은 각각 서로 다른 색상 값을 가지며 주변영역과 구분되는 색상 값을 가진다. 임계값이 127일 때, 제품의 결함(숫자 1, 2, 3)은 큰 임계값 때문에 2치화 과정에서 모두 사라지는 것을 [그림 4.16(b)]에서 볼 수 있다. 임계값이 105인 경우, 숫자 3에 해당하는 결함이 2치화 영상에 나타나는 것을 볼 수 있다. 임계값이

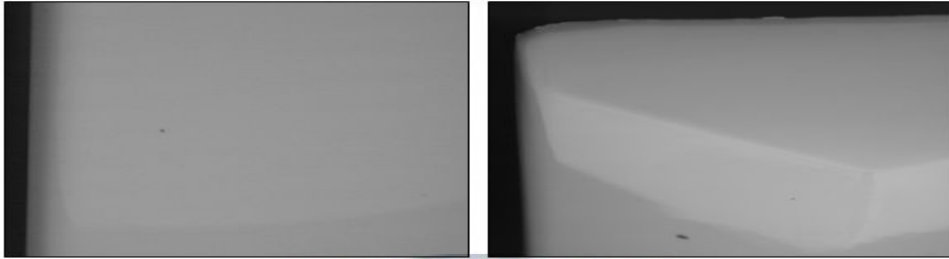
85인 경우, 숫자 2에 해당하는 결함은 2치화된 영상에 유지되지만 숫자 3에 해당하는 결함은 2치화 과정에서 손실된다. 이처럼 전역 2치화의 경우 임계값에 따라 제품에 존재하는 결함들이 2치화 과정에서 일부 손실될 수 있다. 손실된 결함은 제품의 검사 과정에 오류를 발생시킨다.



[그림 4.16] 임계값에 따른 전역 2치화 영상

본 결함 검출 알고리즘에서는 제품 영상을 지역 2치화하기 위해서 사용자가 지정한 크기로 전체 영상을 분할한 후, 해당 영역마다 다른 임계값을 적용하여 영상을 2치화한다. 지역 2치화를 통해 제품의 결함 영역이 2치화 과정에서 손실되는 것을 막을 수 있지만 지역 2치화 과정에서 영상 잡음(Image Noise)이 발생하기 때문에 잡음을 제거하기 위한 적절한 방법이 필요하다. 여기에서는 영상 잡음 제거를 위해 모폴로지(Morphology) 연산을 이용한다[10].

사이드 프로텍터 제품의 결함 검사 과정에서 획득한 영상들을 [그림 17]에 나타낸다. 카메라와 제품과의 거리가 매우 짧고 줌인 렌즈를 사용하기 때문에 실제 제품의 크기보다 확대된 영상이다.



(a) 영상 1

(b) 영상 2

[그림 4.17] 사이드 프로텍터 부품 원 영상

원 영상을 각각 전역 2치화한 결과 전역 2치화한 결과를 [그림 4.18], [그림 4.19]에 나타내었다. 전역 2치화 결과를 살펴보면 2치화 과정에서 실제 제품에 해당하는 영역은 줄어들고 배경 영역이 확장된 것을 볼 수 있다. [그림 4.17]에 나타낸 원 영상에는 제품 영역과 배경 영역의 경계 부분에 결함이 존재하지 않지만 만약에 결함이 존재하더라도 검사 과정에서 결함으로 판정되지 않는 문제점이 발생한다.

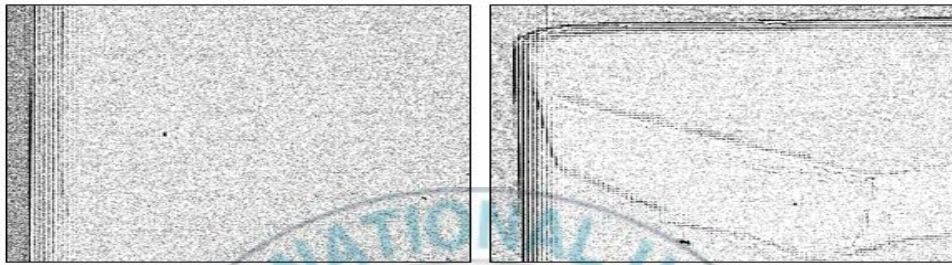


(a) 영상 1

(b) 영상 2

[그림 4.18] 전역 2치화 영상

지역 2치화한 결과를 살펴보면 제품 영역과 배경 영역의 경계가 [그림 4.17]의 원 영상에서처럼 선명하게 나타나며 원 영상에 존재하는 제품의 결함은 2치화 과정에서 손실되지 않는다. 하지만 [그림 4.19]에서처럼 영상에 많은 잡음이 발생하게 된다.



(a) 영상 1

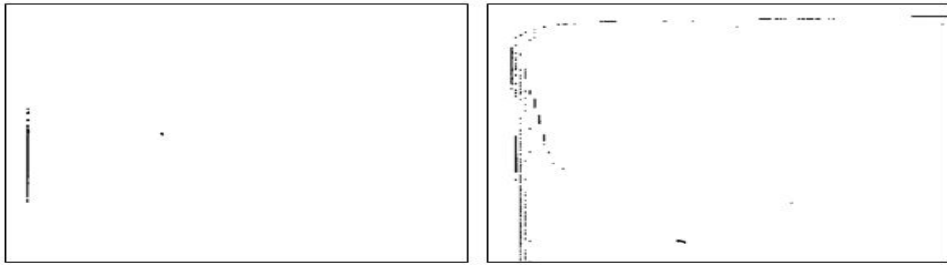
(b) 영상 2

[그림 4.19] 지역 2치화 영상

4.2.2 모폴로지 연산을 이용한 영상 노이즈 제거

모폴로지(Morphology)는 영상에서 경계, 골격과 같은 영역의 형태를 표현하기 위한 수학적 형태론의 개념으로 사용된다. 영상의 기본적인 특징은 유지하면서 형태에 변화를 주는 것으로서 영상 분할, 세션화, 잡음 제거, 특징 추출 등에 주로 사용되어진다.

본 논문에서는 모폴로지의 침식, 팽창 연산을 이용하여 지역 2치화 과정에서 발생하는 노이즈를 제거하기 위한 용도로 사용한다. 검사 프로그램에서 사용자가 모폴로지의 구성 및 연산 횟수 등을 지정할 수 있게 함으로써 영상에 따른 예외의 경우에 대해 대처할 수 있도록 하였다. 지역 2치화 영상에 모폴로지를 적용한 결과를 [그림 4.20]에 나타내었다.



(a) 영상 1

(b) 영상 2

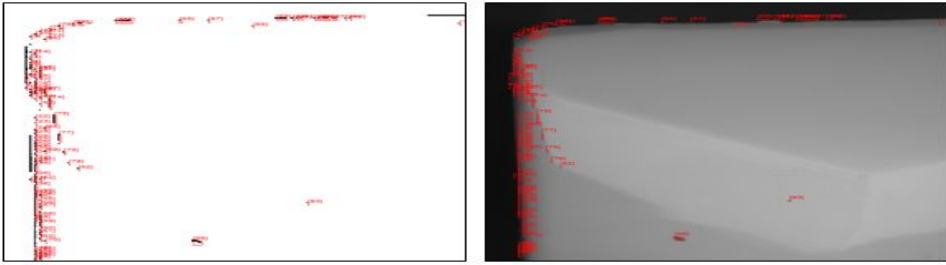
[그림 4.20] 모폴로지를 이용한 잡음 제거 영상

4.2.3 결함 후보영역 구분을 위한 레이블링 기법

모폴로지를 이용하여 영상 2치화 과정에서 발생하는 잡음을 제거한 후, 영상에 존재하는 모든 영역은 결함 후보영역으로 지정된다. 결함 후보영역에는 반드시 실제 제품에 존재하는 결함이 포함되어야 하며, 이러한 결함 후보영역을 구분하기 위해서 레이블링 기법을 이용한다. 결함 후보영역을 구분함으로써 이후에 후보영역으로부터 최종적인 결함 유무를 판단하는 과정에서 전체 영상에 대한 분석 및 처리 없이 후보영역만을 고려하면 된다.



[그림 4.21] 영상 1의 레이블링 적용 결과



(b) 영상 2

[그림 4.22] 영상 2의 레이블링 적용 결과

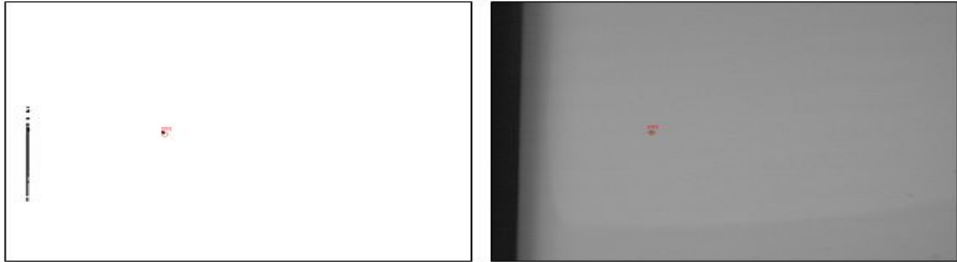
4.2.4 최종 결함 판단을 위한 영상 필터링

결함후보의 대부분은 제품 영역과 배경 영역의 경계부분에 존재하며, 이러한 결함후보 중에서 실제 결함을 판단하기 위해서 영상 필터링 및 객체 크기를 제한하는 방법을 이용하였다.

영상 필터링은 결함 후보영역이 실제 제품에 위치하는지를 판단하여 제품이 아닌 배경 영역이나 경계 영역에 존재하는 경우 결함 후보영역에서 제외시킨다. 이때 사용자가 직접 최소값 필터, 최대값 필터, 평균값 필터를 지정할 수 있게 하였으며 색상의 범위를 지정하게 된다. 색상의 상한 또는 하한 값을 이용해 설정된 색상 범위 밖에 존재하는 결함 후보 영역은 모두 후보영역에서 제외시킨다.

또한 객체 크기를 제한하는 방법은 영상에 존재하는 결함의 크기를 계산하여 결함 후보에서 제외시키는 방법이다. 먼지처럼 미세한 결함을 결함 후보영역에서 제외시키거나 아주 작은 결함 또한 검사 과정에서 포착 되도록 할 수 있다. 이는 제품의 종류, 검사 환경, 검사 수준에 따라 사용자가 직접 설정하게 된다. 이러한 과정을 통해 최종적으로 남은 결함 후보영역은 실제 결함으로 판정된다. 결함후보영역이 존재하지 않는 경우 해당 제품은 결함이 없는 제품으로 판정된다. 영상 1과 영상 2에서

최종 결함이 검출된 결과를 [그림 4.23]에 나타내었다.



(a) 영상 1



(b) 영상 2

[그림 4.23] 사이드 프로텍터 결함 검출 결과

V. 검사 시스템 동작 및 결과

5.1 기어 박스 검사 시스템

기어 박스(Gear Box) 검사 시스템은 컨베이어와 하우징에 고정된 카메라 및 조명장치를 이용하여 제품 영상을 획득한 후, 이로부터 제품 표면에 발생하는 불량을 검사하게 된다. 시스템의 전체 동작 과정을 [그림 5.1]에 나타내었다.



[그림 5.1] 기어 박스 검사 시스템
동작 순서도

검사 대상은 이송 컨베이어에 의해 영상 촬영 위치까지 이동되며, 촬영된 영상을 처리하는 동안 다른 검사 대상이 다시 카메라 아래의 촬영 위치로 이동된다.

기어 박스 검사를 위해 사용되는 검사 프로그램을 [그림 5.2]에 나타내었다. 검사 프로그램에는 기본적으로 기어 박스 검사를 위한 결함 검출 알고리즘이 구현되어 있으며, 검사 결과 및 영상을 관리하기 위한 데이터 관리 기능, 외부 장치와의 통신을 위한 기능 등을 제공한다.



[그림 5.2] 기어 박스 검사 프로그램

기어 박스 검사를 위한 실험 환경에서 카메라로 촬영한 제품 영상은 1600×1200 크기의 그레이스케일 영상이며, PC(CPU: Core2 Extreme X6800(2.93GHz), RAM : 3GB)를 이용하여 검사 프로그램을 동작 시킨다. 검사 대상의 영상을 획득한 후, 제품의 영상을 처리하여 결함 유무를 검사하는데 대략 0.2~0.5sec 시간이 소요된다. 해당 수치는 양품과 불량품으로 구성된 100개의 제품 영상을 촬영한 후, 100개의 모든 영상에 대해 10번의 반복 수행에 소요되는 실제 시간을 측정함으로써 산출하였다. 동일한 검사 대상에 대해서 이처럼 시간의 차이가 발생하는 이유는 검사 알고리즘에 의한 동작 시간의 차이 때문이다.

객체 크기를 이용한 결함 검출 알고리즘을 동작시키는 경우, 한 영상을 처리하는데 대략 0.5s의 시간이 소요된다. 그리고 색상 평균값을 이용한 결함 검출 알고리즘을 동작시키는 경우, 대략 0.2s의 시간이 소요된다.

검사 정확도를 평가하기 위해서 양품과 불량품으로 구성된 기어 박스 100개의 제품을 10번의 반복 검사를 통해 산출하였다. 객체 크기를 이용한 결함 검출 알고리즘을 동작 시키는 경우, 대략 99.5% 정도의 정확도를 얻을 수 있다. 그리고 색상 평균값을 이용한 결함 검출 알고리즘을 동작시키는 경우 대략 99.0%의 정확도를 얻을 수 있었다. 검사 오류는 기어 박스가 지그에서 미세하게 이탈되는 경우에 ROI 추출과정에서 오차가 발생하여 최종 결함 판단에도 오류를 발생시키게 된다.

[표 5.1] 기어 박스 결함 검출 알고리즘 평가

알고리즘 구분	처리 시간(sec)	정확도(%)
객체 크기를 이용한 결함 검출	0.5	99.5
색상 평균값을 이용한 결함 검출	0.3	99.0

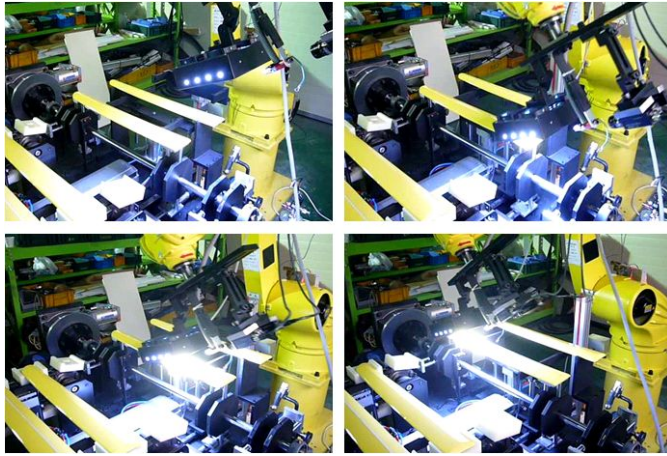
5.2 사이드 프로텍터 검사 시스템

사이드 프로텍터(Side Protector) 검사 시스템은 6관절 로봇에 부착된 카메라 및 조명장치를 이용하여 제품 영상을 획득한 후, 이로부터 제품 표면에 발생하는 불량 유무를 검사하게 된다. 시스템의 전체 동작 과정을 [그림 5.3]에 나타내었다.



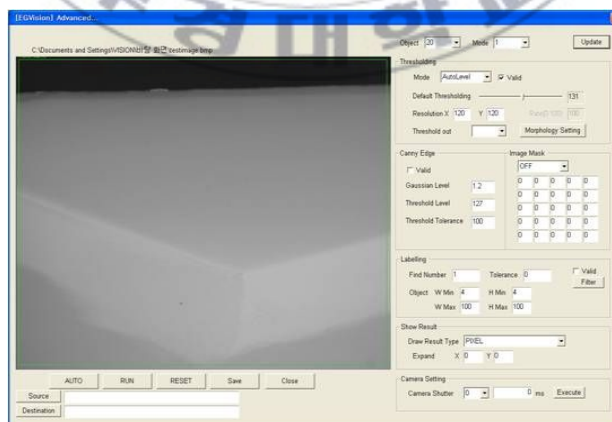
[그림 5.3] 사이드 프로텍터 검사 시스템 동작 순서도

로봇에 부착된 카메라와 조명장치를 [그림 5.4]와 같이 검사 대상을 따라 이동시키면서 25~30 프레임의 제품 영상을 촬영한 후, 다른 검사 대상이 이동되는 시간 동안 모든 영상을 일괄적으로 처리하여 제품의 불량을 검사한다.



[그림 5.4] 사이드 프로텍터 영상 획득 과정

카메라로부터 획득한 영상을 처리하여 제품의 결함을 검사하기 위한 검사 프로그램을 [그림 5.5]에 나타내었다. 검사 프로그램의 가장 중요한 기능은 결함 검출 알고리즘을 동작시켜 제품의 불량 유무를 판단하는 것이며, 이외에 영상 데이터 및 검사 데이터 관리, 외부 신호 입출력 등의 기능을 수행한다.



[그림 5.5] 사이드 프로텍터 검사 프로그램

카메라로 촬영한 영상은 1600×1200 크기의 그레이레벨 영상이며, 한 제품의 영상은 25~30 프레임으로 구성된다. PC(CPU: Intel(R) core(TM) 2 Duo CPU E6550@ 2.33Ghz, RAM : 2GB)를 이용하여 검사 프로그램을 동작 시킨다. 한 프레임의 영상으로부터 결함 검출 알고리즘을 실행시켜 최종 결함을 검사하는데 걸리는 시간은 대략 0.1s이며 한 제품에 대한 영상(25~30 프레임)을 처리하는데 2.5s~3.0s가 소요된다. 다관절 로봇 및 컨베이어가 이동하여 새로운 제품의 영상을 획득하는데 대략 10s가 소요되기 때문에 결함 검출 알고리즘은 해당 시스템에 적합한 처리 시간을 가진다.

본 검사 시스템의 정확도는 양품과 불량품으로 구성된 100개의 제품을 대상으로 10번의 반복 검사를 통해 산출하였다. 동일한 작업환경에서 결함 검사를 수행하였을 때, 대략 95.3%의 검사 정확도를 얻을 수 있었다. 이때 4.7%에 해당하는 검사 오류의 경우 대부분 플라스틱 표면에 존재하는 미세한 먼지를 제품의 불량으로 판정하는 경우였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 자동차 부품인 기어 박스(Gear Box)와 사이드 프로텍터(Side Protector) 제품의 불량 검사를 자동화하기 위한 머신 비전 시스템을 제안하였다. 기존에 자동차 부품 생산업체에서 작업자의 육안에 의존하는 불량 검사를 자동화함으로써 제품의 생산성을 향상시킬 수 있다.

기어 박스 검사는 구성 부품이 정상적으로 결합되어 있는지를 검사하는 것이 목적이며, 기어 박스의 주요 특징을 고려하여 검사 시스템을 설계하였다. 기어 박스 검사 시스템에서 결합 검출 알고리즘은 객체 크기를 이용한 방법과 색상 평균값을 이용하는 방법을 제안하였다. 두 알고리즘을 이용하여 불량 검사를 수행하였을 때, 객체 크기를 이용한 결합 검출 알고리즘은 0.5s의 처리시간이 소요되며, 99.5%의 검사 정확도를 얻을 수 있었다. 그리고 색상 평균값을 이용한 결합 검출 알고리즘에서는 0.3s의 처리시간이 소요되며, 99.0%의 검사 정확도를 얻을 수 있었다.

사이드 프로텍터 검사는 제품 성형과정에서 발생하는 표면 결함을 검사하는 것이 목적이다. 사이드 프로텍터의 구조를 고려하여 검사 효율을 높이기 위한 조명장치, 로봇장치 등의 하드웨어로 전체 시스템을 구성하였다. 그리고 사이드 프로텍터의 곡면 구조를 고려한 결합 검출 알고리즘을 제안하였으며, 결합 검출 알고리즘에서는 0.1s의 처리 시간과 95.3%의 검사 정확도를 얻을 수 있었다.

본 연구의 결과는 산업현장에서 기존의 육안 검사의 문제점을 해결하고 제품의 생산성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것이다. 또한 지속적인 연구를 통해 기어 박스, 사이드 프로텍터뿐만 아니라 제품 검사가 필요한 다양한 금속 또는 플라스틱 재질의 자동차 부품 검사에 활용할 수 있을 것이다.

VII. 참고문헌

- [1] 정만태, 지능형 유연생산시스템 분야의 2020 비전과 전략, KIET 산업연구원, 2007.
- [2] 배준영, “머신비전 시스템의 최적 조명 조건에 관한 연구”, 경북대학교, 석사학위논문, 2009.
- [3] 이규훈, 김용, 이은영, 조규만, 배진용, “자동차용 Valve-seal의 자동검사 장치 개발”, 대한전기학회, 2007년도 하계학술대회논문집, Vol. 38, No. 2, pp. 314-315, 2007.
- [4] 넬슨 안드레이, 장봉춘, “자동차 부품 카시트 프레임 검사를 위한 머신비전 개발”, 한국산학기술학회논문지, Vol. 12, No. 4, pp. 1559-1564, 2011.
- [5] Byeong-Mook Chung, Bum-Sik So and Sang-Hoon Lee, "Flexible Vision Inspection for Seat Frame of Automobile using Slit Beam", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 12, No. 4, pp. 605-612, 2011.
- [6] 장봉춘, “자동차 플라스틱 부품 락킹레버 검사를 위한 알고리즘 연구”, 한국산학기술학회논문지, Vol. 11, No. 5, pp. 1558-1563, 2010.
- [7] 김동환, 윤재식, 김진욱, 김석태, “자동차 성형 조립품을 위한 범용 검사기 개발”, 한국해양정보통신학회, 2011년 춘계학술대회논문집, Vol. 15, No. 1, pp. 813-815, 2011.
- [8] 윤재식, 박중현, 김진욱, 김석태, “6축 다관절 로봇용 플라스틱 제품의 표면 검사기”, 한국해양정보통신학회, 2010년 춘계학술대회논문집, Vol. 14, No. 1, pp. 569-571, 2010.
- [9] Svoboda, Tomas, Kybic, Jan, Hlavac and Vaclav, Image

Processing Analysis and Machine Vision, Cengage Learning, 2008.

[10] 황선규, 영상처리 프로그래밍 by Visual C++, 한빛미디어, 2007.

[11] Pratt, Digital Image Processing 4/E, Wiley, 2007.



감사의 글

석사과정 동안 부족한 저를 아낌없는 격려와 관심으로 지도해주신 김석태 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 논문 심사를 맡아주신 정신일 교수님과 윤종락 교수님의 소중한 충고와 조언에 깊은 감사를 드립니다. 또한 학부, 대학원 기간 동안 제게 많은 가르침을 주신 조성진 교수님, 박규철 교수님, 주문갑 교수님께 감사드립니다.

머신비전 분야를 공부하는데 있어서 많은 도움을 주신 김진욱 선배님께 감사드립니다. 그리고 저를 마음과 관심으로 격려해주신 남태희 선생님, 이석기 선배님, 최은희 선배님, 이수명 선배님, 김하경 선배님께 감사드립니다. 정보시스템 연구실에서 함께 공부했던 소위와 동환, 경철, 재호, 대성, 상민 후배들에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 헌신적인 사랑으로 저를 키워주시고 돌봐주신 부모님과 언제나 큰 힘이 되어준 누나들, 형에게 진심으로 감사드린다는 말을 전하고 싶습니다.

2011년 12월

윤재식