

11-1543
000-001
957-01

영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기 개발

2017
농림축산식품부

첨단생산기술개발사업 R&D Report

발간등록번호

11-1543000-001957-01

영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기 개발 최종보고서

2017 .12.22.

주관연구기관 / 성균관대학교
협동연구기관 / 진영종합기계

농림축산식품부

2. 제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기 개발”(개발기간 : 2014.09.25. ~ 2017.09.24)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 11. 08.

주관연구기관명 : 성균관대학교 산학협력단 산학협력단장
협동연구기관명 : 진영종합기계 대표이사



주관연구책임자 : 이 대 원
협동연구책임자 : 최 훈 민

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제고유번호	114046-3	해당 단계 연구 기간	2014.09.25.~ 2017.09.24	단 계 구 분	3년 / 3년
연구 사업 명	단 위 사 업	첨단생산기술개발			
	사 업 명	첨단생산기술개발			
연구 과제 명	대 과 제 명	영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기 개발			
	세 부 과 제 명				
연구 책임자	이대원	해당단계 참 여 연구원 수	총: 10명 내부: 10명 외부: 명	해당단계 연구 개발비	정부:140,000천원 민간:47,000천원 계:187,000천원
		총 연구기간 참 여 연구원 수	총: 10명 내부: 10명 외부: 명	총 연구개발비	정부:420,000천원 민간:141,000천원 계:561,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	성균관대학교 산학협력단 바이오메카트로닉스 학과 진영종합기계 기술개발부			참여기업명 : 진영종합기계	
위 탁 연 구	연구기관명:			연구책임자: 이대원(1세부과제) 최훈민(1협동과제)	
<p>○ 연구개발 목표 및 성과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 생략되고 자동화된 파프리카 수확을 위한 자동 수확을 위한 파프리카 수확작업기 개발 - 파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템 개발 - 적합한 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식시스템 개발 - 파프리카 수확기 주행 시스템 개발 <p>○ 연구내용 및 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 파프리카 과병의 절단을 위한 엔드이펙터의 링크구조에 대한 기하학적 구조 설계 - 파프리카 과병에 맞는 엔드이펙터의 크기 설정 - 파프리카 수확 작업시 훼손을 최소화하기 위한 엔드이펙터의 기구학적 설계 및 제작 - 절단장치를 파프리카에 접근시키기 위한 매니플레이터 설정 - 대상물과 배경을 판별하여 파프리카 좌표 획득 알고리즘 개발 - 파프리카 좌표 획득 후 파프리카 수확을 위한 수확 위치 선정 알고리즘 개발 - 정상 파프리카 선별 인식 알고리즘 개발 - 영상정보 획득 및 획득한 영상정보에 따른 시스템 제어를 위한 영상처리 시스템 개발 - 주행을 위한 영상처리 알고리즘 개발 - 좁은 현장 상황을 고려한 주행부 설계 및 제작 - 수확 후 파프리카의 적재 정보 획득 장치 설정 				<p>보고서 면수 : 본문 477쪽(총 486쪽)</p>	

국문 요약문

		코드번호		D-01			
연구의 목적 및 내용	<p>▶ 영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 생력화되고 자동화된 파프리카 수확을 위한 파프리카 수확작업기 개발 - 파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템 개발 - 적합한 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식시스템 개발 - 파프리카 수확기 주행시스템 개발 						
연구개발성과	1. 정량적 성과						
	성과목표	사업화지표		연구기반지표			
		지식 재산권		학술성과		인력양성	홍보전시
	출원	등록	논문 비SCI	학술발표			
달성실적	5	4	4	6		2	2
	2. 정성적 성과						
	<p>○ 파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 파프리카 과병의 절단을 위한 엔드이펙터의 링크구조에 대한 기하학적 구조 설계 - 파프리카 과병에 맞는 엔드이펙터의 크기 설정 - 파프리카 수확 작업 시 훼손을 최소화하기 위한 엔드이펙터의 기구학적 설계 및 제작 - 절단장치를 파프리카에 접근시키기 위한 매니플레이터 설정 <p>○ 적합한 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식시스템 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대상물(파프리카)과 배경(잎, 줄기, 기타)을 판별하여 파프리카 좌표 획득 알고리즘 개발 - 파프리카 좌표 획득 후 파프리카 수확을 위한 수확 위치 선정 알고리즘 개발 - 정상 파프리카 선별 인식 알고리즘 개발 - 영상정보 획득 및 획득한 영상정보에 따른 시스템 제어를 위한 영상처리 시스템 개발 <p>○ 파프리카 수확기 주행 시스템 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 주행을 위한 영상처리 알고리즘 개발 - 좁은 현장 상황을 고려한 주행부 설계 및 제작 - 수확 후 파프리카의 적재 정보 획득 장치 설정 						
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<p>○ 영상처리기술, 비주얼서보기술, 인공지능기술 등을 이용하여 파프리카 수확 작업 자동화 시스템 구축</p> <p>○ 영상처리기술, 인공지능기술 등은 작물의 수확적기 판단, 작물의 정상·비정상 진단 가능</p> <p>○ 본 연구 개발 기술의 대상체 인식 알고리즘은 대상체를 변경함으로써 농업 분야의 연구기술 개발에 광범위하게 활용 가능</p> <ul style="list-style-type: none"> - 병충해에 대한 사전 통보. - 성장에 필요한 시비 양액재배량 제어 - 정밀농업 발전에 기여 <p>○ 날개의 파프리카수확이 가능하여 반복 작업으로부터 노동집중현상 해소 효과</p> <p>○ 파프리카수확에 따른 노동 생산성의 향상효과</p> <p>○ 파프리카 수확기에 따른 가볍고 전력 소모가 적은 다른 농기계 개발에 기여</p> <p>○ 적기 수확과 자동화에 의한 노동력 절감과 농가수익의 증대 효과.</p> <p>○ 파프리카의 수확 시기에 노동 집중 현상을 해소</p>						
중심어 (5개 이내)	파프리카	수확기	절단장치	인식장치	생력화		

< SUMMARY >

	코드번호	D-02																								
Purpose& Contents	<p>▶Development of Automatic Harvest Machine for Paprika Recognition Using Image Processing</p> <ul style="list-style-type: none"> - Development of a paprika harvesting machine for labor-saving and automated paprika harvesting - Development of Cutting Operation System for Harvesting without Damage to Paprika - Development of a Paprika Recognition System for Appropriate Paprika Harvest - Development of Drive System for Paprika Harvest 																									
Results	<p>1. Quantitative results</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="3" style="width: 15%;">Goal of Achievements</th> <th colspan="2" style="width: 20%;">commercialization index</th> <th colspan="4" style="width: 65%;">research based index</th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="width: 20%;">intellectual property rights</th> <th colspan="2" style="width: 20%;">academic achievement</th> <th rowspan="2" style="width: 15%;">manpower training</th> <th rowspan="2" style="width: 10%;">public relations exhibition</th> </tr> <tr> <th style="width: 10%;">applicati on</th> <th style="width: 10%;">registrat ion</th> <th style="width: 10%;">dissertat ion</th> <th style="width: 10%;">academic presenta tion</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">track record</td> <td>5</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>6</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table> <p>2. Qualitative achievements</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Development of Cutting Operation System for Harvesting without Damage to Paprika <ul style="list-style-type: none"> - A Geometrical Structure Design of Link Structure of End Effector for Cutting of Paprika Stem - Size Selection of End Effector for Paprika Stem - Kinematical Design and Fabrication of End Effector to Minimize Damage in Paprika Harvesting - Manipulator Selection for Accessing the Cutting Device to Paprika ○ Development of a Paprika Recognition System for Appropriate Paprika Harvest <ul style="list-style-type: none"> - Development of Paprika Coordinates Acquisition Algorithm by Determining Objects (paprika) and Background (leaf, stem, etc.) - Development of Harvest Position Selection Algorithm for the Harvest of Paprika after Acquisition of Paprika Coordinates - Development of Normal Paprika Screening Algorithm - Development of Image Processing System for System Control based on Image Information Acquisition ○ Development of Drive System for Paprika Harvest <ul style="list-style-type: none"> - Development of Image Processing Algorithm for Driving 		Goal of Achievements	commercialization index		research based index				intellectual property rights		academic achievement		manpower training	public relations exhibition	applicati on	registrat ion	dissertat ion	academic presenta tion	track record	5	4	4	6	2	2
Goal of Achievements	commercialization index			research based index																						
	intellectual property rights			academic achievement		manpower training	public relations exhibition																			
	applicati on	registrat ion	dissertat ion	academic presenta tion																						
track record	5	4	4	6	2	2																				

	<ul style="list-style-type: none"> - Design and Fabrication of Driving Part Considering Narrow Field Situation - Fabrication of Loading Information Acquisition Device for Harvested Paprika 				
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> ○ Construction of an Automated Paprika Harvest Operation System Using Image Processing Technology, Visual Servo Technology, and Artificial Intelligence Technology ○ Image processing technology, artificial intelligence technology, etc. can judge harvesting time of crops, normal and abnormal diagnosis of crops ○ The object recognition algorithm of this research and development technology can be widely used in the development of research technology in the agricultural field by changing the object - Proceeding of pests and diseases. - Control of Nutrient Fluid Concentration for Growth - contribution to the development of precision agriculture ○ Effect of Reducing Labor Concentration from Repeated Works by Each Paprika Harvesting ○ Effect of Paprika Harvest on Labor Productivity ○ Contributing to the Development of Other Farming Machinery with Light and Low Power Expenditure due to the Paprika Harvesting System ○ The Effect of Harvest and Automation on the Labor Saving and the Farmer's Revenue ○ Removal of labor concentration during harvest of paprika 				
Keywords	Paprika	Harvester	Cutting system	Recognition system	Labor-Saving

< Contents >

1. Overview of the research and development	1
2. Present development of technologies in South Korea and overseas	10
3. Scope and results of the study	19
4. Degree of achievement of research goals, and contribution to related areas	456
5. Plan for utilizing study results, etc	458
6. Information on overseas scientific technology, collected during the study	467
7. Security grade of the research and development outcomes	467
8. Current overview of research facilities and equipment that have been registered with the national science and technology information system	467
9. Performance record of safety actions for the laboratory, etc., following implementation of the research and development task	468
10. Representative study outcomes of the research and development task	471
11. Other matters	473
12. References	473

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의개요	1
2. 국내외 기술개발 현황	10
3. 연구수행 내용 및 결과	19
4. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	456
5. 연구결과의 활용계획 등	458
6. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보	467
7. 연구개발성과의 보안등급	467
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비현황	467
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적	468
10. 연구개발과제의 대표적 연구실적	471
11. 기타사항	473
12. 참고문헌	473

<별첨> 자체평가의견서

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

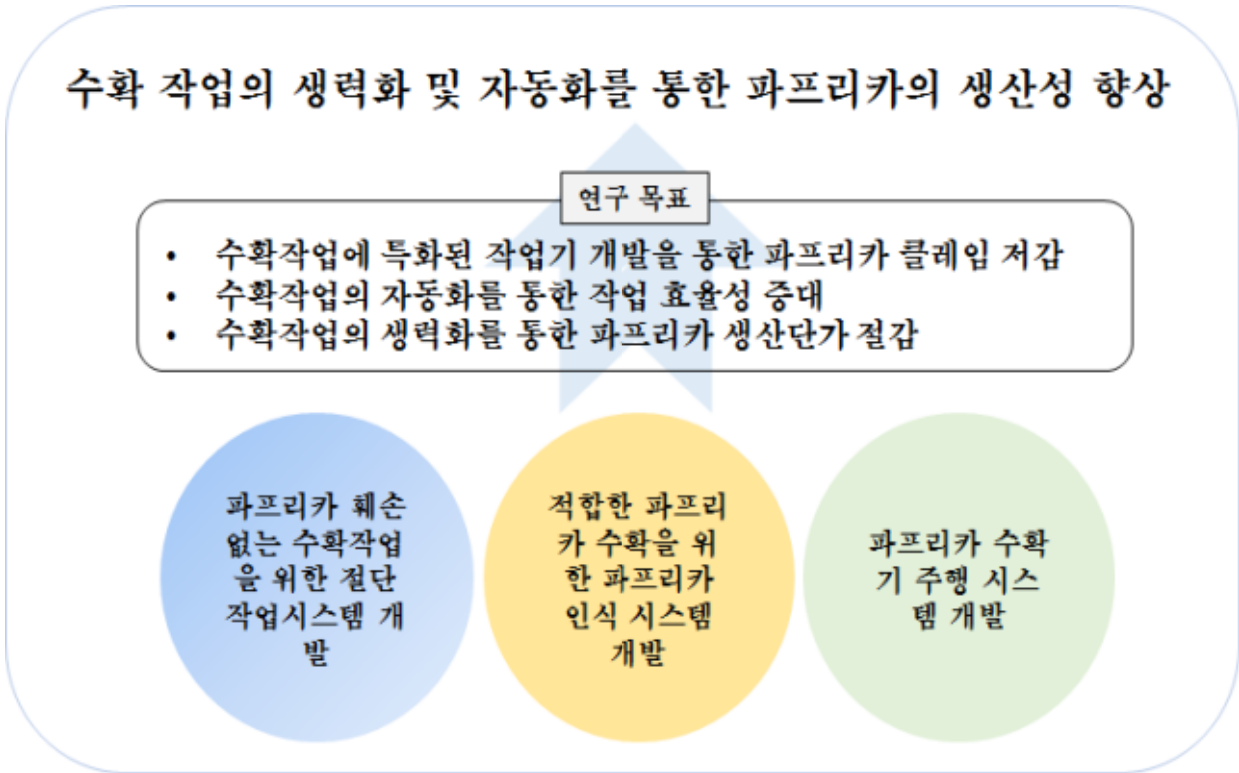
1. 연구개발과제의 개요

코드번호	D-03
------	------

1-1. 연구개발 목적

○ 연구개발의 최종목표

- 본 연구의 최종 목표는 생력화되고 자동화된 파프리카 수확을 위한 자동 수확을 위한 파프리카 수확 작업기 개발이다.



○ 연구 개발 목표

가. 제 1 세부(성균관대학교 산학협력단) 연구개발 목표

1. 파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템 제작

- 엔드이펙터 제작을 위한 파프리카 과병 특성 분석
- 엔드이펙터 제작을 위한 파프리카 착과 특성 분석
- 파프리카 과병의 절단을 위한 엔드이펙터의 링크구조에 대한 기하학적 구조 설계 및 실험
- 파프리카 과병에 맞는 엔드이펙터의 크기 설정
- 파프리카 수확 작업 시 훼손을 최소화하기 위한 엔드이펙터의 기구학적 설계 및 제작
- 파프리카 직경 측정 알고리즘 및 측정 장치 제작
- 매니플레이터 제작을 위한 파프리카 재배 환경 조사
- 절단장치를 파프리카에 접근시키기 위한 매니플레이터의 기구학적 설계 및 제작

- 절단 작업 후 절단면 소독을 위한 작업부 설계 및 제작

2. 적합한 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식시스템 개발

- 대상물(파프리카)과 배경(잎, 줄기, 기타)을 판별하여 파프리카 좌표 획득 알고리즘 개발
- 파프리카 좌표 획득 후 파프리카 수확을 위한 수확 위치 선정 알고리즘 개발
- 정상 파프리카 선별 인식 알고리즘 개발
- 영상정보 획득 및 획득한 영상정보에 따른 시스템 제어를 위한 영상처리 시스템 개발

3. 파프리카 수확기 주행 시스템을 위한 영상 알고리즘 개발

- 주행을 위한 영상처리 알고리즘 개발

나. 제 1 협동(진영종합기계) 연구개발 목표

1. 수확 후 파프리카의 운반을 위한 운반시스템 개발

- 토경재배 온실 및 수경재배 온실의 지면 환경 조사 및 적합 주행부 선정
- 파프리카 재배 온실의 이랑 간격 조사를 통한 주행부 설계
- 궤도식 주행부 및 4륜식 주행부의 시제품 제작 및 비교 실험
- 고온 다습한 온실 환경에 적합한 무게 획득 장치 개발을 위한 다양한 중량 측정 센서 비교 실험 및 센서 선정
- 사용자에게 무게 정보 전송을 위한 통신 모듈 개발
- 파프리카 적재 정보 획득 장치 제작 및 개발

1-2. 연구개발의 필요성

○ 국내의 파프리카는 90년대 중반 제주도의 유리온실에서 처음 재배된 이후로(정 외, 파프리카 산업의 현황과 과제, 한국농촌경제연구원, 2008년), 2013년 한해에 22,630 톤을 수출하는 국내 제 1 규모의 채소작물이 되었다(농림축산식품부 보도자료, 2014). 또한 국내의 파프리카는 2000년 수출되기 시작한 이후, 2012년 수출량 20,765 톤 중 20,762 톤이 일본에 수출되어, 일본 시장의 63%를 차지하는 규모로 성장하였다(농수산물수출지원정보, 2013년).

	2011		2012	
	중량(kg)	금액(\$)	중량(kg)	금액(\$)
총계	16,513,253.10	65,865,625.00	20,765,054.50	88,806,784.00
일본	16,478,477.10	65,682,694.00	20,761,569.50	88,783,361.00
러시아	6,970.00	62,028.00	1,545.00	14,472.00
호주	12,104.00	65,650.00	1,500.00	7,112.00
홍콩	488.00	1,692.00	430.00	1,833.00
독일	0.00	0.00	10.00	6.00
대만	5,290.00	12,865.00	0.00	0.00
인도네시아	100.00	1,084.00	0.00	0.00
캐나다	9,824.00	39,612.00	0.00	0.00

표 1. 2011년~2012년 파프리카 수출 동향

○ 그러나 국내의 파프리카 시장은 수출 위주 시장 형성으로 인하여, 수출량이 매년 증가하여 왔으나 수출량이 증가하였어도 수출액이 증가하지 않는 왜곡된 현상이 발생하였다. 일본의 양적완화 정책의 영향으로 원-엔화 환율이 급락하여, 2012년 대비 2013년 대일 파프리카 수출량은 6.1% 증가하여 총 22,017 톤의 규모가 수출되었으나, 수출액은 2012년 USD 88,783,000\$에서 2013년 USD 86,837,000\$로 전년대비 2.2%가 감소하였다(농림축산식품부 보도자료, 2014).

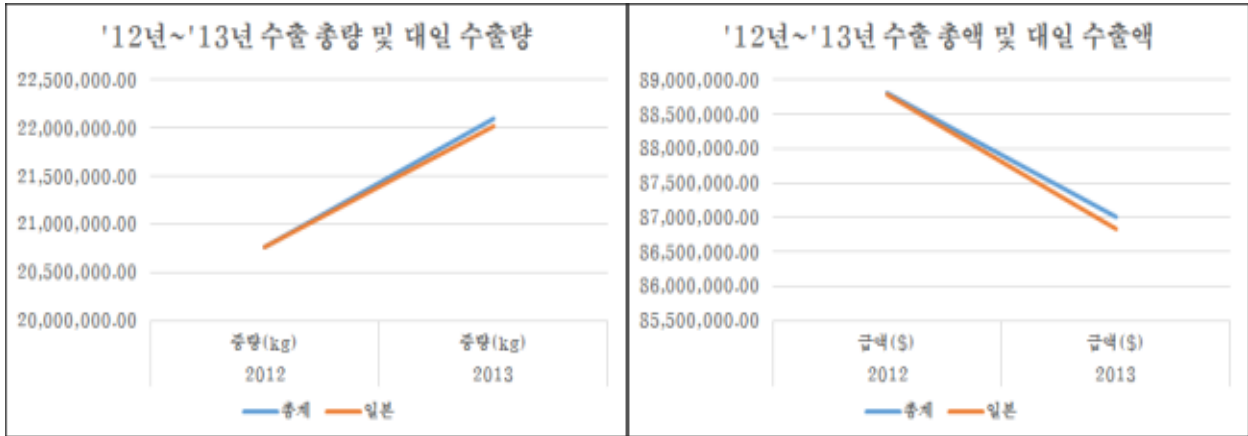


그림 1. 2012년 ~2013년 전체 수출 및 대일 수출 비교

○ 환율변화에 따른 수출액 감소는 세계 경제의 갑작스런 변화로 인하여 발생하는 것이기 때문에, 환율에 따른 피해가 발생하였을 때에 손쓸 방법이 없다. 피해를 최소화하기 위해서는 다양한 시장 판로를 개척하는 방법이 우선적이겠지만, 2013년 파프리카 국내 생산량 22,100 톤 중 99.6%인 22,017 톤을 일본에 수출하고 있어서(농림축산식품부 보도자료, 2014) 현재 생산량으로는 다른 시장을 개척하기에 역부족이다.



그림 2. 2013년 총 수출량 및 대일 수출량 비교

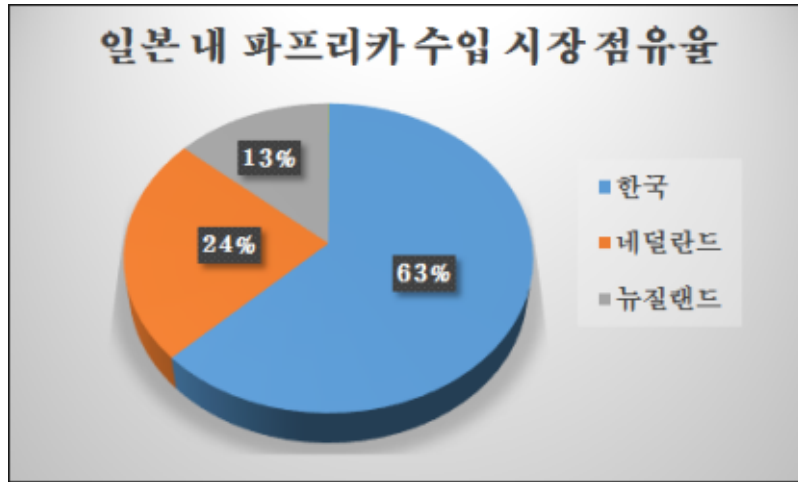


그림 3. 2013년 일본 내 파프리카 수입 시장 점유율

○ 또한 일본으로의 수출량을 줄일 시, 일본 파프리카 시장에서 점유율 2, 3위인 네덜란드와 뉴질랜드(네덜란드 ; 24% 뉴질랜드 ; 13%, 농수산물수출지원정보, 2013년)에 일본 시장의 점유율을 빼앗길 위험이 있기 때문에, 일본 내 우리나라의 파프리카의 판매망을 유지하기 위해서는 일본으로의 현재 수출량을 유지 하여야 한다. 일본 시장 의존적인 현재의 파프리카 수출 상황으로 인하여, 세계 경제의 변화에 민감할 수밖에 없는 파프리카 농업의 상황을 타개하기 위해서는 다양한 시장 판로 개척과 함께 국내 파프리카 생산성을 향상시키기 위한 연구가 진행되어야 한다.

○ 파프리카의 생산성을 높이기 위해서는 파프리카를 재배하기 위해 투입된 생산단가를 절감하여야 한다. 파프리카 재배는 여름작형과 겨울작형으로 나뉘어, 우리나라의 작형별 규모는 2010년 통계 여름작형이 전체 비율의 37%, 겨울작형이 63%를 차지한다. 파프리카의 재배는 작형과 작형에 따른 생산자체가 계절성을 가지고, 각 작형(여름작형, 겨울작형)의 작업 단계별로 노동의 수요가 차이가 있다(정 외, 파프리카 산업의 현황과 과제, 한국농촌경제연구원, 2008).

단위: 천원/10a(%)

		여름작형			겨울작형		
		비닐온실(A)	유리온실(B)	B/A	비닐온실(C)	유리온실(D)	D/C
매출액		25,550	30,660	1.20	33,175	50,295	1.52
경 영 비	인건비	3,000 (15.3)	3,429 (15.2)	1.14	5,625 (21.2)	7,105 (17.4)	1.26
	난방비	4,950 (25.2)	5,770 (25.6)	1.17	8,438 (31.8)	15,840(38.7)	1.88
	농자재비	8,565 (43.5)	7,915 (35.2)	0.92	8,771 (33.1)	11,554(28.3)	1.32
	기타	3,150 (16.0)	5,400 (24.0)	1.71	3,694 (13.9)	6,400 (15.6)	1.73
	계	19,665 (100.0)	22,514 (100.0)	1.14	26,528 (100.0)	40,899 (100.0)	1.54
소득		5,885	8,146	1.38	6,647	9,396	1.41

표 2. 농가의 작형별·시설유형별 경영성과 비교

○ 파프리카 농가의 작형별·시설유형별 경영성과를 비교한 표 2.(한국농촌경제연구원 농가조사, 2008)를 보면 여름작형에 비하여 겨울작형에 투입된 생산단가인 경영비 중 인건비가 여름작형에 비하여 겨

올작형이 2배가량 크다. 생산단가 중 인건비는 농업노동 고용이 노동인구의 고령화, 노동력의 과소화 등의 문제가 발생되면서, 그림 4.와 같이 지속적으로 상승하여왔다(고용노동부, 고용형태별근로실태조사, 2013). 이러한 인건비 향상은 생산단가를 증가시켜 농가 및 소비자의 부담을 증가시킨다.

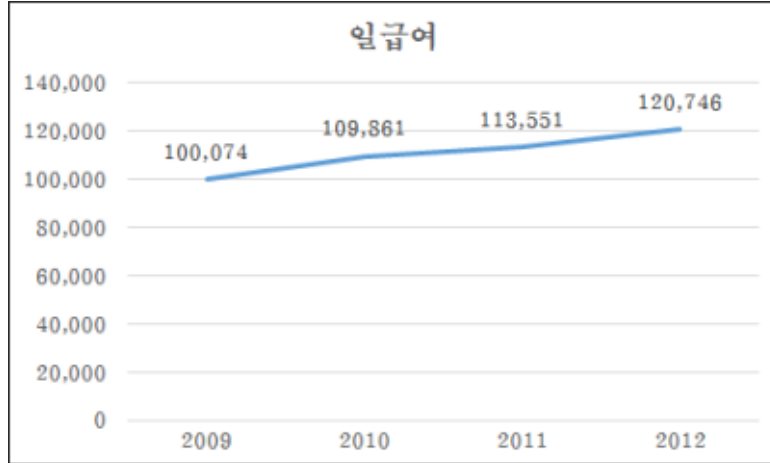


그림 4. 농업 근로실태 중 일급여 변화('09~'12)

○ 현재의 파프리카 재배 작업 중 선별·포장 작업은 상시고용된 인력에 의해 이루어지고 있으나, 수확 등의 농작업에서는 임시고용된 인력에 의해 이루어지고 있어 작업의 전문성이 결여되어 있다(장, 한국의 품목별·지대별 농업노동력 운용 실태, 농정연구, 2011; 정 외, 파프리카 산업의 현황과 과제, 한국농촌경제연구원, 2008). 수확 작업의 전문성 결여는 수확 시 절단 부위 안쪽을 절단하여 그림 5.와 같이 곰팡이병, 수분손실이 증가하여 파프리카의 상품성을 떨어뜨린다. 이와 같은 문제는 파프리카의 해외 수출 시 클레임을 발생시킨다(김, 파프리카 수출 현황과 문제점, 경남무역, 2013).



그림 5. 잘못된 수확작업에 의한 파프리카 상품성 하락

○ 또한, 파프리카는 비닐 및 유리 온실에서 재배되는데, 수확 작업 시 청장년의 생산 노동자의 수급에 어려움이 있어서, 고령의 노년층 생산 노동자가 수확 작업을 하는 것이 대부분의 경우이다(김, 파프리카 수출 현황과 문제점, 경남무역, 2013; 장, 한국의 품목별·지대별 농업노동력 운용 실태, 농정연구, 2011). 이는 파프리카 수확 작업의 효율성이 떨어지고 고온인 여름에서의 작업 시 안전상의 문

제가 발생할 수 있는 등의 다양한 문제를 가지고 있다.

○ 잘못된 수확작업으로 인한 파프리카 상품성 저하는 국제 무역에서 잦은 클레임을 발생시킨다. 국내외적으로 소비자들은 신선하고 품질이 좋은 농산물을 요구하고 있다(오 외, 친환경농산물의 소비 실태와 생산자의 대응방식 분석, 디지털정책연구, 2012). 자동화되고 정확하며 수확작업에 특화된 작업기 개발을 통하여 수확작업의 오작업률을 낮출 수 있다. 또한 생산단가를 효율적으로 관리하여 파프리카 재배의 생산성을 높이기 위해서는 임시고용의 비율이 높은 파프리카 수확 작업의 생력화가 필요하다. 수확작업의 생력화를 통해 농가의 노동력 대체 효과를 가져 올 수 있다. 파프리카의 생산성을 높이기 위해서는 생력 자동화 설비의 개발이 절실히 필요하다.

1-3. 연구개발 범위

○ 연차별 연구개발의 범위 및 내용

구분	연도	연구개발의 목표	연구개발의 내용	연구범위	비고
1차년도	2014	파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템 부분 제작	○파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템의 엔드이펙터 부분 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 엔드이펙터 제작을 위한 파프리카 과병 특성 분석 - 파프리카 수확 작업 시 훼손을 최소화하기 위한 엔드이펙터의 기구학적 설계 - 파프리카의 직경 측정 알고리즘 설계 - 엔드이펙터의 구성부품 선정 - 엔드이펙터의 부분 제작 - 엔드이펙터의 기초 실험 	- 1세부
			○파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템의 매니플레이터 부분 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 매니플레이터 제작을 위한 파프리카 재배 환경 조사 - 매니플레이터의 기초 설계 - 매니플레이터의 구성부품 선정 - 매니플레이터의 부분 제작 - 매니플레이터의 기초 실험 	- 1세부
		적합한 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식시스템 설계 및 부분 제작	○영상정보 획득 및 획득한 영상정보에 따른 시스템 제어를 위한 영상처리 시스템 설계 및 부분 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 파프리카 온실 환경에 강인한 카메라 모듈 및 구성부품 선정 - 영상처리 시스템의 기초 설계 - 영상처리 시스템의 부분 제작 - 영상처리 시스템의 기초 실험 	- 1세부
			○대상물(파프리카)과 배경을 판별하여 파프리카 좌표 획득 알고리즘 설계	<ul style="list-style-type: none"> - 파프리카와 배경을 판별하기 위한 파프리카 색상 정보 분석 - 파프리카와 배경 판별을 위한 알고리즘 설계 - 획득한 파프리카 정보를 통한 파프리카 좌표 획득 알고리즘 설계 	- 1세부
			○파프리카 좌표 획득 후 파프리카 수확을 위한 위치 선정 알고리즘 설계	<ul style="list-style-type: none"> - 위치 제어 알고리즘 설계 - 작업 시스템의 파프리카 접근 알고리즘 설계 	- 1세부
		파프리카 수확기 주행 시스템 설계 및 부분 제작	○좁은 현장 상황을 고려한 주행부 설계 및 부분 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 파프리카 재배 온실 환경 조사를 통한 주행부 설계 - 안전성을 고려한 메카니즘 설계 - 주행부의 구성부품 선정 - 주행부의 부분 제작 - 주행부의 기초 실험 	- 1협동
			○주행을 위한 영상처리 알고리즘 설계	<ul style="list-style-type: none"> - 재배 온실에서의 주행을 위한 재배 온실 이랑의 환경 조사 - 재배 온실에서의 주행을 위한 영상처리 알고리즘 설계 	- 1세부

구분	연도	연구개발의 목표	연구개발의 내용	연구범위	비고
2차년도	2015	파괴가 훼손 없는 수확 작업을 위한 절단 작업시스템 제작	○파괴가 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템의 엔드이펙터 제작	- 엔드이펙터 제작 - 엔드이펙터 구동제어시스템 제작 - 엔드이펙터 구동제어 소프트웨어 제작 - 파괴기의 직경 측정 장치 - 엔드이펙터 실험 및 분석	- 1세부
			○파괴가 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업 시스템의 매니플레이터 제작	- 매니플레이터 제작 - 매니플레이터 구동제어시스템 제작 - 매니플레이터 구동제어 소프트웨어 제작 - 매니플레이터 실험 및 분석	- 1세부
			○엔드이펙터와 매니플레이터의 통합을 통한 절단 작업시스템 제작	- 절단 작업시스템 제작 - 절단 작업시스템 구동제어시스템 제작 - 절단 작업시스템 구동제어 소프트웨어 제작 - 파괴기의 직경 측정 알고리즘 소프트웨어 제작 - 절단 작업 후 절단면 소독을 위한 작업부 설계 및 부분 제작 - 절단 작업시스템 실험 및 분석	- 1세부
		적합한 파괴가 수확을 위한 파괴가 인식시스템 제작	○영상정보 획득 및 획득한 영상정보에 따른 시스템 제어를 위한 영상처리 시스템 제작	- 영상처리 시스템 제작 - 영상처리 시스템 구동제어 소프트웨어 제작 - 영상처리 시스템의 실험 및 분석	- 1세부
			○좌표 획득 및 위치 선정 알고리즘 제작	- 파괴가 인식 및 좌표 획득 소프트웨어 제작 - 파괴가 위치 선정 소프트웨어 제작 - 제작 소프트웨어의 실험 및 분석	- 1세부
			○정상 파괴가 선별 인식 알고리즘 설계	- 정상 파괴기의 특성 분석 - 정상 파괴가 선별 인식 알고리즘 설계	- 1세부
		파괴가 수확기 주행 시스템 제작	○파괴가 수확기 주행 시스템 제작	- 주행부 제작 - 주행을 위한 영상처리 시스템 제작 - 주행부 구동제어 시스템 제작 - 주행을 위한 영상처리 시스템 구동제어 소프트웨어 제작 - 주행시스템의 실험 및 분석	- 공동
			○수확된 파괴기의 적재 정보 획득 장치 설계	- 온실 환경에 적합한 적재 정보 획득 센서 선정 - 적재 정보 전송을 위한 통신 모듈 선정 - 적재 정보 획득 알고리즘 설계 - 적재 정보 전송 알고리즘 설계 - 적재 정보 획득 장치의 기초 설계 - 적재 정보 획득 장치의 부분 제작 - 적재 정보 획득 장치의 기초 실험	- 1협동
		전체 수확시스템 설계 및 제작	○전체 수확시스템 설계 및 제작	- 각 시스템의 전체 수확시스템 구성 설계 및 제작 - 전체 수확시스템 구동제어시스템 설계 및 제작 - 전체 수확시스템 구동제어 소프트웨어 설계 및 제작 - 전체 수확시스템 실험 및 분석	- 공동

구분	연도	연구개발의 목표	연구개발의 내용	연구범위	비고
3차년도	2016	파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템 개발	○파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템 개발	- 파프리카의 훼손을 최소화하기 위한 절단면 소독 작업부의 제작 - 파프리카 과병 절단 시 훼손 성능 평가 - 절단 후 소독 작업부의 성능 평가	- 1세부
		적합한 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식시스템 개발	○적합한 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식 시스템 개발	- 생리장해 및 병해 발생 파프리카와 정상 파프리카의 선별 소프트웨어 제작 - 정상 파프리카 인식 성능 평가	- 1세부
		파프리카 수확기 주행 시스템 개발	○파프리카 수확기 주행 시스템 개발	- 파프리카 온실 환경 내 주행 성능 평가 - 수확된 파프리카 적재 정보 획득 장치 제작 - 적재 정보 획득 및 정보 전송 구동제어시스템 제작 - 적재 정보 획득 및 전송 성능 평가	- 1협동
		전체 수확시스템 보완 후 제작	○전체 수확시스템 보완 후 제작 ○보완된 최종 파프리카 수확기 실험 및 검증	- 전체 수확시스템 제어 실험 - 전체 수확시스템 성능 분석에 따른 문제점 검증 후 최종시스템 선정 및 보완 - 전체 수확시스템 인터페이스 - 파프리카 수확기 수확 실험 - 파프리카 수확기 수확 성능 분석	- 공동

2. 국내외 기술개발 현황

코드번호

D-04

1. 국내외 기술 개발 현황

○ 영상 처리를 통한 인식

Z. Husin 등(2012)은 영상 처리와 인공 신경망을 이용한 허브 잎의 구분에 대한 연구를 수행하였다. 해당 논문에서는 디지털 카메라로부터 입력된 허브 잎 영상을 그레이 스케일 영상으로 변환 후 임계화 및 모서리 추출 과정을 거친다. 추출된 형상을 기반으로 학습된 인공 신경망을 통하여 허브 잎을 구분하는 알고리즘을 제안하였다. 해당 연구에서는 20종의 허브 잎을 대상으로 영상 정보를 학습하였다. BP 알고리즘을 이용하여 학습하였고 학습을 통한 인식 성공률은 98.9%로 나타났다. 하지만 해당 연구에서는 흰색을 배경으로 허브 잎의 영상을 획득하여 사용하였다.

Guillaume Cerutti 등(2013)은 자연 상태의 배경에서 잎의 영상을 획득하고 형태를 기반으로 한 인식을 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 잎의 구분을 위하여 유사한 색상을 갖는 영역을 기준으로 영상을 분할하였다. 그 후 분할된 영역에서 형태를 통하여 잎의 종류를 구분하였다. 사용된 색상 모델은 $L \times a \times b$, RGB, HSL이었다. 분할된 영역에서 특정 형태의 모델을 이용하여 잎의 형상을 추측하고 가장 유사한 형태의 모델을 이용하여 잎을 구분하였다.

류(2013)는 영상 처리 기술을 통해 관심 객체를 인지하고 이동을 추적하는 시스템을 제안하였다. 영상의 배경 밝기와 객체의 이동경로를 인식하고 영역을 나누어 인식률을 높일 수 있도록 카메라 센서를 지능적으로 가변한다. 또한 객체의 유무에 따라 센서의 능동 제어로 최적의 객체 영상을 얻고자 하였다.

후 등(2012)은 스테레오 영상을 이용한 자기보정 및 3차원 형상 구현 알고리즘을 제안하였다. 이는 3차원 형상을 구현하기 위하여 스테레오 영상으로부터 에피폴라 기하 평가, 아핀 기하 평가, 계량 기하 변수를 평가하는 방법을 통해 사용자의 개입을 최소화하여 형상 구현 방법을 일컫는다. 해당 연구에서는 스테레오 정합을 위하여 구조광을 사용하였다. 제안한 알고리즘을 통하여 평균 오차 2.5%, 최대 오차 5.05%의 성능을 확인하였다.

Lu 등(2013)은 과일의 표면 결함을 감지하여 상품성을 판단하기 위하여 영상을 이용하는 시스템을 제안하였다. 과일의 외형적 특성을 인식하기 위하여 머신 비전 시스템을 이용하였다. 과일의 표면에 나타나는 손상 영역을 인식하는 더욱 정확하고 더욱 색상 노이즈에 더욱 영향을 덜 받으며 계산 비용을 줄일 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 영상 특징으로 사용하기 위해 지역 영상 패치에서 색상 히스토그램을 추출하였다. 모델을 학습하기 위하여 선형 SVM(Support vector machine)을 사용하였다. 오렌지 검사에서 96.7%의 검출 확률을 보였고, 오검출 확률은 1.7%로 나타났다.

Reum 등(2007)은 옥수수 식물의 다중 분광 영상을 이용하여 작물의 질소 영상 수준을 평가하는 영상 처리 방법을 개발하였다. 이미지에서 불필요한 정보를 제거 한 후 이미지의 잎을 가로 지르는 옥수수 식물의 반사율을 나타내는 1차원 신호로 변환하였다. 얻어진 데이터를 웨이블릿 패킷 변환을 통하여 추가 처리하여 작물 질소 스트레스에 대응하는 특정 패턴을 발견하였다. 최저 수준 근사치를 찾기 위하여 여러 수준에서 웨이블릿 분석을 수행하기 위해 1차원 신호는 좁은 주파수 대역의 패킷으로 분해되었다. 특징이 나타나는 것으로 사료되는 신호 대역폭에 대해 최대 웨이블릿 계수를 식별한 다음 옥수수 질소 수준의 실측 자료 사용된 SPAD 미터와 비교하였다. 분석 결과는 8레벨 분해에서 db4 웨이블릿이 선형 회귀 결정 계수가 0.78로 옥수수 질소 수준과 가장 상관관계가 높다는 것을 보여주었다.

김(2011)은 저속 이동체 추적을 위한 영상기반 무인 항공기의 영상 처리 및 유도/제어 방법을 제

안하였다. 단안 카메라를 이용하여 지속적으로 대상체를 관찰하도록 제어 및 유도하며 지상의 저속의 차량과 스테이션의 통신 중계 역할을 하도록 하였다. 설계된 단안 영상 시스템은 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)에 장착되어 대상이 되는 지상 차량의 위치를 계산하였다. 이러한 계산은 UAV와 카메라간의 상대적 좌표를 통하여 수행되었다. 지상 스테이션에 위치한 연산 장치의 시간을 기준으로 UAV의 정보와 영상 정보를 동기화 하였다. 영상에 존재하는 붉은색 목표물을 추적하기 위하여 평균 이동 알고리즘을 수행하였다. 인식된 목표물을 이용하여 UAV를 유도 및 제어하기 위하여 최적 궤적을 생성하고 PID 유도/제어 시스템을 설계하여 경로점을 추종하였다. 목표물이 12 m/s보다 낮은 속도를 갖는 경우 최적의 인식 및 유도/제어가 가능하였다.

Mohanaiah 등(2013)은 인텍싱, 검색을 위해 영상의 시각적 내용을 추출하는 방법의 하나로써 특징 추출 방법을 제안하였다. 처리되지 않거나 낮은 레벨의 영상 특징은 색상 추출, 질감과 형태 또는 도메인 특유의 특징과 같은 일반적인 특징이 있다. 본 연구에서는 영상의 움직임 추정을 위한 방법으로 2차 통계적 질감 특징을 추출하기 위하여 gray level co-occurrence matrix(GLCM)를 이용하는 방법을 제안하였다. Angular Second Moment, Correlation, Inverse Different Moment, Entropy 네 가지 특징을 Xilinx FPGA를 이용하여 계산하였다. 결과는 이러한 질감 특징들은 높은 식별 정밀도를 갖는 것으로 나타났으며, 실시간 패턴 인식 응용 프로그램에 효율적으로 사용되는 것을 보여주었다.

○ 영상 정보를 이용한 수확 로봇

하 등(2014)은 비닐하우스 내의 참외 재배 시설에 적합한 엔드 이펙터, 매니플레이터, 인식장치 및 주행 장치로 이루어진 수확 로봇의 개발을 수행하였다. 참외의 높이, 각도 등에 따라 정확한 줄기 커팅을 할 수 있도록 매니플레이터를 설계하였다. RGB 정보를 이용하여 참외를 인식하는 인식 장치를 개발하고 초음파 센서를 이용하여 거리를 측정하였다.

Bac(2016)은 파프리카 재배환경에 존재하는 재배용 끈, 줄기, 잎 등의 장애물을 피해 수확 작업을 수행 할 수 있도록 엔드 이펙터에 설치된 카메라를 이용하여 매니플레이터를 제어하기 위한 모션 플랜을 수행하였다. 158개의 과실 정보를 기반으로 두 분야의 분석을 수행하였고 온실 내 줄기의 위치를 수집하였다. 첫 번째 분석은 엔드 이펙터의 Azimuth 각도를 선택하는 두 방법을 비교하는 것이다. 새로운 제한된 Azimuth 방법은 완전한 Azimuth 방법과 유사하게 위험한 경로 회피를 수행하기 위한 모션 플랜에 성공하였다. 두 번째로 부딪히지 않고 목적지에 다다른 경로를 찾는 데 영향을 평가하기 위하여 다섯 가지 작물의 특징 변수에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 엔드 이펙터의 크기를 줄이고 줄기의 공간을 넓게 상정하는 것을 통하여 모션 플랜의 성공률을 63%에서 84%로 획기적으로 향상할 수 있다. 하지만 줄기에서 과실의 위치는 강한 영향을 주는 변수이기 때문에 줄기의 과실이 줄기의 전면에 위치하도록 하는 것이 수확에 큰 이득을 준다는 것을 확인하였다.

Barnea 등(2016)은 수확 로봇을 위한 색상 기반의 3차원 파프리카 인식에 관한 알고리즘을 제안하였다. 일반적으로 과실의 색상은 종종 고정되지 않은 조명환경에 의해 배경으로부터 분리되지 않는다. 따라서 색상 공간에서 대상을 인식하고 분할하는 것은 매우 예민하고 실행하기 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 깊이 정보를 추출할 수 있는 거리 카메라를 이용하여 3차원 깊이 맵을 추출하고 색상을 기반으로 하여 파프리카와 주변 배경을 분리하였다. 파프리카의 위치와 자세를 좌표계를 통하여 나타내고 해당 정보를 이용하여 매니플레이터를 제어하였다.

Kitamura 등(2009)은 온실 내 환경에서 파프리카를 수확하는 로봇 개발을 위하여 잎과 과실을 구분하는 방법을 제안하였다. 파프리카의 과실은 로봇에 설치된 수평 스테레오 비전 시스템을 이용하여 영상 처리 방법을 통하여 인식 되었다. 하지만 파프리카의 과실과 잎은 거의 유사한 색상을 갖는다. 이로 인하여 색상 정보만을 이용하여 과실을 인식하는 것은 어려운 문제다. 본 논문에서

는 LED 광의 반사를 이용하는 새로운 방법을 제안하였다. 파프리카의 과실은 잎에 비하여 반사하는 경향이 높다. 따라서 영상 내에서 반사가 상대적으로 많이 나타나는 영역을 과실 영역으로 추출하였다. 온실 내에서 제안된 방법을 이용하여 실험을 수행한 결과 로봇의 인식 성능이 향상되었음을 확인하였다.

Sa 등(2017)은 RGB-D 센서를 통해 얻은 색 정보와 기하학적 정보를 이용하여 과병 검색을 위한 지도 학습 기법을 제안하였다. 제안된 방법의 성능은 인식 정확도 재현 곡선의 Area-under-the-curve(AUC)의 질적, 양적 결과를 이용하여 검증되고 평가되었다. 재배 환경에서 파프리카의 과병을 인식하는데 0.71 AUC의 결과를 얻을 수 있었다.

○ 비주얼 서보 로봇 시스템

Meng 등(2015)은 우주 공간에서 작업하는 로봇의 비주얼 서보 제어 방법을 제안하고 있다. 태양 전지판 연결부의 영상 특성을 이용하여 위치를 추적하고 제어 시스템의 안정성을 확보 하고자 하였다. 시뮬레이션을 통하여 실험을 수행한 결과 초단거리 접근 제어 방법으로 전지판의 영상정보를 이용하여 안정적으로 로봇이 목표지점에 접근 하는 것을 확인 할 수 있었다.

Yu(2016)는 한 대의 CCD 카메라를 이용하여 핵사 포드 로봇을 제어하는 연구를 수행하였다. 단안 카메라로부터 입력된 주변 영상을 처리하여 18개의 DC 서보를 제어 하는 방법을 제안 하였으며 각 관절의 역 기구학을 통하여 장애물을 회피하도록 하였다.

Wang(2013)은 좁고 복잡한 환경에서 작업이 가능한 부드러운 형태의 매니퓰레이터를 제어하기 위한 비주얼 서보 시스템을 제안하였다. 부드러운 형태의 매니퓰레이터를 정확한 위치로 제어하기 위하여 각 부위 별로 일정한 곡률을 추정을 통한 역학적 모델을 제안하였다. 해당 역학적 모델이 적용된 비주얼 서보 시스템을 이용하여 매니퓰레이터의 엔드 이펙터를 원하는 위치에 이동하는 실험을 수행함으로써 영상 기반의 비주얼 서보 제어를 통하여 기존의 매니퓰레이터 형태가 아닌 부드러운 제질의 매니퓰레이터로 높은 안정성과 정확성을 확보 할 수 있었다.

Barth 등(2016)은 높은 밀도를 갖는 식물의 재배 현장에서 엔드 이펙터에 설치된 카메라를 이용하여 센싱과 모션 컨트롤을 할 수 있는 모듈형 소프트웨어 프레임 워크를 제안하였다. 밀도가 높은 환경에서 작업하는 수확 로봇은 과일의 움직임에 따른 위치 수정과 폴스 네거티브를 줄이기 위하여 다양한 시점에서 실시간 궤도 조정이 요구된다. 전문 소프트와는 대조적으로 제안된 프레임 워크는 다양한 농업에 적용 할 수 있는 하드웨어 및 확장을 지원하는 것을 목표로 하고 있다. 로봇 운영 시스템(ROS) 노드는 모듈화와 모션 컨트롤, 이미지 수집, 과일 감지, 비주얼 서보 제어, 단안 상대 깊이 추정을 위한 SLAM(Simultaneous localization and mapping) 등을 위하여 작성되었다.

Cheng 등(2014)은 형태가 가변되는 대상에 대한 단안 시각 서보 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 이미지 처리 장치와 서보 제어 장치의 두부분으로 구성되어 있다. 이미지 처리 장치의 경우 대상과 이미지 중심 사이의 움직임은 템플릿 매칭 방식에 의하여 결정되었다. 영상은 팬 틸트 로봇에 탑재된 영상 센서에 의해 파악되고 로봇은 영상 중심으로 목표를 유지하며 목표를 추적하도록 제어하였다. 대상이 변형됨에 따라 템플릿을 업데이트 하도록 하였다. 서보 제어 유닛은 칼만 필터 기술로 움직임을 추정하도록 하여 시각 서보 시스템의 추적 성능을 향상 시켰다.

○ 스테레오 비전 및 영상 정합

David(2004)는 서로 다른 시점의 물체 또는 장면으로부터 신뢰성 있는 정합을 수행하기 위하여 영상으로부터 특유의 불변하는 특징을 추출하기 위한 방법을 제안하였다. 제안된 특징은 영상의 크기와 회전에 불변해야 하며 아핀 왜곡, 3차원 시점 변화, 노이즈와 조명의 변화에 영향을 받지 않는 정합을 제공한다. 이러한 특징은 하나의 특징이 많은 영상으로부터 얻어진 큰 특징 데이터베

이سه에도 불구하고 높은 가능성으로 정확한 정합이 가능하다. 본 논문에서는 이러한 특징을 이용하여 대상을 인식하는 방법에 대해서도 언급하고 있다. 하나의 객체에 속하는 클러스터를 인식하기 위한 허프 변환에 의한 Fast nearest-neighbor 알고리즘을 이용하여 알려진 대상으로부터 추출된 특징의 데이터베이스에서 각각의 특징의 정합으로부터 인식하는 과정과 불변하는 자세 파라미터의 최소 자승법을 통한 성능 검증을 수행하였다. 이러한 인식 방법은 거의 실시간으로 객체 인식을 수행 할 수 있었다.

Jung 등(2011)은 우도(likelihood)와 우선순위를 통한 스테레오 정합에 대한 연구를 수행하였다. 일반적인 Bayesian 접근법에 따르면 스테레오 정합 문제는 우도와 우선순위를 이용하여 풀 수 있다. 우도는 종종 단항의 형태로 나타나며 우선순위는 Markov random field(MRF)의 Pair-wise 또는 Higher order cliques에 의하여 정의 된다. 제안된 방법은 스테레오 영상에서 높은 순위를 갖는 우도 모델을 사용하는 것이다. 정규화된 교차 상관 관계, 가우시안의 라플라시안, Census 필터와 같은 기본적인 정합 방법들을 기반으로 하는 여러 가지 패치들을 설계하였다. 이는 패치 내의 모든 화소들은 같은 디스패리티를 갖는다고 가정한 상태에서 이루어졌다. 하지만 patch-wise 비용은 MRF의 Higher order cliques에 의해 계산되기 때문에 정합 비용은 영상 패치의 디스패리티에 의한 함수가 된다. 디스패리티 맵에 의해 투영된 영상으로부터 획득한 패치는 디스패리티 불연속성에 의해 발생하는 블러링이 없기 때문에 더 좋은 정합을 수행 할 수 있어야 한다. Patch-wise high order 정합 비용 중에서 Census 필터를 이용한 접근법이 Pair-wise cliques를 감소하는데 용이 하였다. Census 필터 기반의 High order 우도를 이용한 실험 결과가 독립적으로 동일한 분포의 단항식 모델에서 이점이 있음을 보여주었다.

김 등(2014)은 SIFT(Scale Invariant Feature Transform)를 이용하여 매칭 기반 객체 인식 방법을 제안하였다. 기존의 SIFT는 1:1 매칭 기반으로 정합 대상이 완벽히 동일한 형태가 아닌 경우 인식률이 현저히 나빠지는 단점이 존재하였다. 이를 해결하기 위하여 객체를 대표할 수 있는 템플릿 특징을 이용하여 객체의 인식률을 높이고자 하였다. 템플릿 특징을 추출하기 위하여 영상의 특징을 클러스터링 하여 대표 클러스터를 템플릿 특징으로 하는 방법을 사용하였다. Adaptive threshold를 통해 객체를 인식하였고 실험을 통하여 단순한 SIFT 매칭이나 BoVW 방법에 비하여 유사도가 낮은 객체들도 높은 성능으로 인식할 수 있음을 확인하였다.

○ 인공 신경망 학습

Lee(2010)는 기계 학습의 경우 학습하고자 하는 데이터로부터 대표성을 갖는 특징을 추출하여 입력하는 지도 학습에 대한 단점을 개선하기 위하여 영상, 음성, 문자와 다양한 센서와 같이 여러 데이터들로부터 자동으로 좋은 특징을 비지도 학습하는 방법을 제안하였다. 소수의 기저 벡터를 사용하여 각 입력 데이터의 특징을 나타내는 효율적인 sparse-coding 알고리즘을 제안하였다. 또한 다양한 기계 학습에서 향상된 성능을 유발하는 특징 표현 방법을 제안하였다. 추가적으로 더욱 복잡한 특징이 자동적으로 단순한 특징들의 조합의 형태로 학습 되도록 하기 위하여 sparse deep belief 망과 convolutional deep belief 망 알고리즘을 제안하였다. 영상에 적용하는 경우 이러한 방법들은 자동적으로 대상과 대응하는 특징을 학습하며 대상들을 각각의 부분으로 분해한다. 이러한 특징들은 기존의 대상 인식과 분할을 위한 영상처리 알고리즘보다 나은 결과를 보이기도 한다. 더욱이 음성 정보로부터도 같은 알고리즘을 적용할 수 있다. 몇몇 음성 인식 작업에서 기존의 state-of-the-art 방법보다 나은 성능을 보이기도 하였다.

임(1998)은 영상에 나타나는 오이의 특징 형상 정보를 인식하기 위해 신경회로망을 사용하는 방법을 제안하였다. 오이가 포함된 영상을 30x30 화소로 나누어 연상 메모리 학습을 수행하였다. 각 학습 패턴에 대한 출력 패턴의 연상 능력을 분석하고 검출 조건을 분석하여 인식 하고자 하는 형상을 검출하였다. 신경회로망 기술과 컴퓨터 영상처리 기술을 이용하여 오이의 형상 인식을 위

한 모델링을 수행하였다. 학습 결과 오인식 률은 0.1~4.2%로 나타났다.

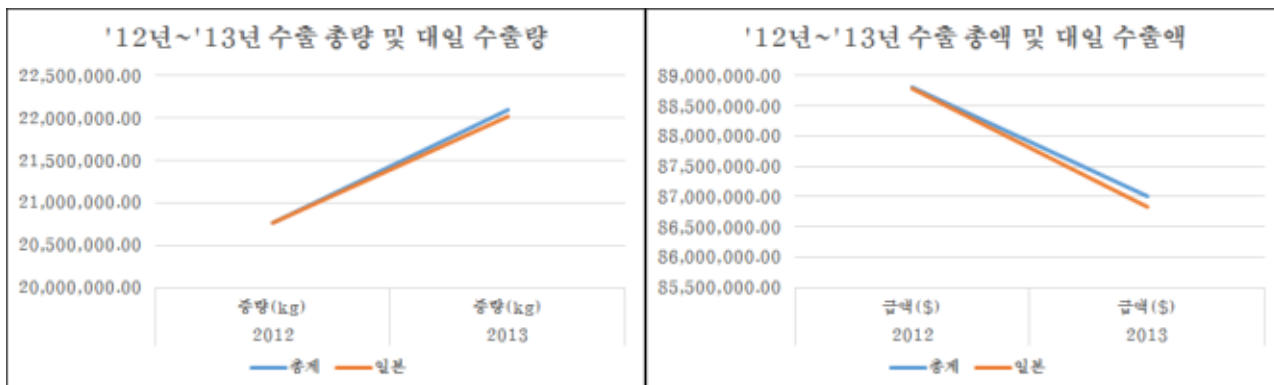
Zbontar 등(2015)은 교정된 영상 쌍으로부터 깊이 정보를 추출하는 과정에서 스테레오 정합 비용을 계산하기 위하여 두 영상 패치가 얼마나 잘 정합되는지를 추측하고자 Convolutional neural network 학습을 수행하였다. 정합 비용은 폐색된 영역의 오차 제거를 위하여 좌/우 일관성 확인을 통해 교차 기반의 비용 집합과 준전역 정합을 통하여 정제되었다. 제안된 스테레오 정합 방법은 KITTI 스테레오 데이터 셋을 이용하였을 때 오차율 2.61%로 2014년 당시 같은 데이터 셋을 이용한 결과 중 가장 좋은 성능을 보였다.

Krizhevsky 등(2012)은 LSVRC-2010 ImageNet 학습 셋을 이용하여 130만개의 영상을 1000종류의 클래스로 분류하기 위한 심층 Convolutional Neural Network를 제안하였다. 학습 결과는 상위 1위와 5위 결과로 오차율 39.7%와 18.9%를 획득하였다. 이는 기존의 최고의 결과보다 훨씬 좋은 결과였다. 신경망은 6천만 개의 변수와 5십만 개의 뉴런으로 이루어져있다. 이는 5개 층의 convolutional 층을 포함하고 있는데 이 중 max-pooling 층을 포함하는 층이 존재한다. Convolutional 층은 국부적으로 연결되어 있으며 최종적인 1000개의 출력을 갖는 softmax와 두 개의 전역적인 연결을 갖는다. 학습 속도를 빠르게 하기 위하여 non-saturating 뉴런을 사용하였고 convolutional 망을 구현하는데 매우 효과적인 GPU를 사용하였다. 또한, 전역적으로 연결된 신경망 층에서 overfitting이 일어나는 것을 감소시키기 위하여 새로운 정형화 방법을 제안하였다.

2. 국내외 제품생산 및 시장현황

○ 국내 제품생산 및 시장 현황

- 국내의 파프리카 시장은 수출 위주 시장 형성으로 인하여, 수출량이 매년 증가하여 왔으나 수출량이 증가하였어도 수출액이 증가하지 않는 왜곡된 현상이 발생하였다. 일본의 양적완화 정책의 영향으로 원-엔화 환율이 급락하여, 2012년 대비 2013년 대일 파프리카 수출량은 6.1% 증가하여 총 22,017 톤의 규모가 수출되었으나, 수출액은 2012년 USD 88,783,000\$에서 2013년 USD 86,837,000\$로 전년대비 2.2%가 감소하였다(농림축산식품부 보도자료, 2014).

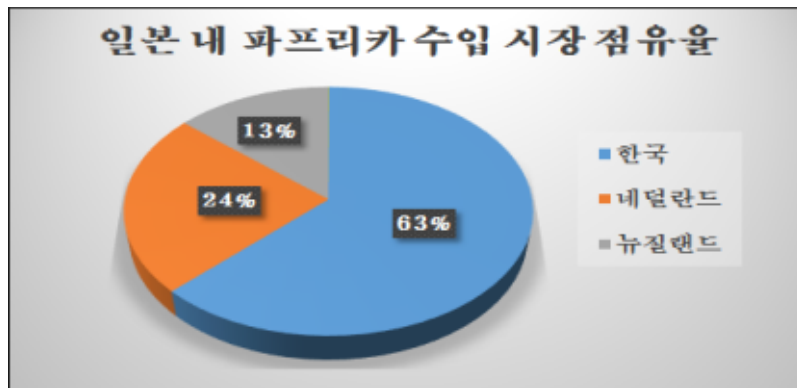


2012년 ~2013년 전체 수출 및 대일 수출 비교

- 환율변화에 따른 수출액 감소는 세계 경제의 갑작스런 변화로 인하여 발생하는 것이기 때문에, 환율에 따른 피해가 발생하였을 때에 손쓸 방법이 없다. 피해를 최소화하기 위해서는 다양한 시장 판로를 개척하는 방법이 우선적이겠지만, 2013년 파프리카 국내 생산량 22,100 톤 중 99.6%인 22,017 톤을 일본에 수출하고 있어서(농림축산식품부 보도자료, 2014) 현재 생산량으로는 다른 시장을 개척하기에 역부족이다.



2013년 총 수출량 및 대일 수출량 비교



2013년 일본 내 파프리카 수입 시장 점유율

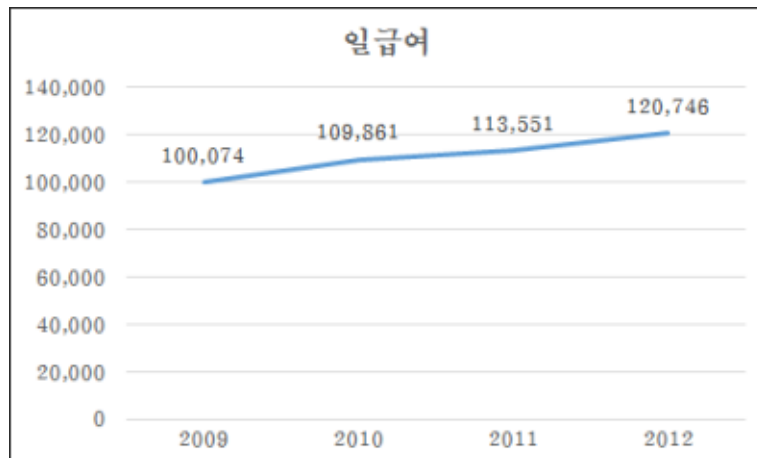
- 또한 일본으로의 수출량을 줄일 시, 일본 파프리카 시장에서 점유율 2, 3위인 네덜란드와 뉴질랜드 (네덜란드 ; 24% 뉴질랜드 ; 13%, 농수산물수출지원정보, 2013년)에 일본 시장의 점유율을 빼앗길 위험이 있기 때문에, 일본 내 우리나라의 파프리카의 판매망을 유지하기 위해서는 일본으로의 현재 수출량을 유지 하여야 한다. 일본 시장 의존적인 현재의 파프리카 수출 상황으로 인하여, 세계 경제의 변화에 민감 할 수밖에 없는 파프리카 농업의 상황을 타개하기 위해서는 다양한 시장 판로 개척과 함께 국내 파프리카 생산성을 향상시키기 위한 연구가 진행되어야 한다.
- 파프리카의 생산성을 높이기 위해서는 파프리카를 재배하기 위해 투입된 생산단가를 절감하여야 한다. 파프리카 재배는 여름작형과 겨울작형으로 나뉘어, 우리나라의 작형별 규모는 2010년 통계 여름작형이 전체 비율의 37%, 겨울작형이 63%를 차지한다. 파프리카의 재배는 작형과 작형에 따른 생산자체가 계절성을 가지고, 각 작형(여름작형, 겨울작형)의 작업 단계별로 노동의 수요가 차이가 있다(정 외, 파프리카 산업의 현황과 과제, 한국농촌경제연구원, 2008).

단위: 천원/10a(%)

		여름작형			겨울작형		
		비닐온실(A)	유리온실(B)	B/A	비닐온실(C)	유리온실(D)	D/C
매출액		25,550	30,660	1.20	33,175	50,295	1.52
경 영 비	인건비	3,000 (15.3)	3,429 (15.2)	1.14	5,625 (21.2)	7,105 (17.4)	1.26
	난방비	4,950 (25.2)	5,770 (25.6)	1.17	8,438 (31.8)	15,840(38.7)	1.88
	농자재비	8,565 (43.5)	7,915 (35.2)	0.92	8,771 (33.1)	11,554(28.3)	1.32
	기타	3,150 (16.0)	5,400 (24.0)	1.71	3,694 (13.9)	6,400 (15.6)	1.73
	계	19,665 (100.0)	22,514 (100.0)	1.14	26,528 (100.0)	40,899 (100.0)	1.54
소득		5,885	8,146	1.38	6,647	9,396	1.41

농가의 작형별·시설유형별 경영성과 비교

- 파프리카 농가의 작형별·시설유형별 경영성과를 비교한 “농가의 작형별·시설유형별 경영성과 비교 (한국농촌경제연구원 농가조사, 2008)를 보면 여름작형에 비하여 겨울작형에 투입된 생산단가인 경영비 중 인건비가 여름작형에 비하여 겨울작형이 2배가량 크다. 생산단가 중 인건비는 농업노동 고용이 노동인구의 고령화, 노동력의 과소화 등의 문제가 발생되면서, ‘농업 근로실태 중 일급여 변화’와 같이 지속적으로 상승하여왔다(고용노동부, 고용형태별근로실태조사, 2013). 이러한 인건비 향상은 생산단가를 증가시켜 농가 및 소비자의 부담을 증가시킨다.



농업 근로실태 중 일급여 변화('09~'12)

- 파프리카의 국내 겨울작 재배면적이 2010년 기준 596,300평 즉 19712a라고 했을 때, 10a당 7,105,000원의 비용이 드는 인건비 부분을 전체 겨울작 재배면적으로 환산하면 총 14,005,376,000원의 금액이 소요된다. 140억 원의 금액을 자동화, 생력화를 통하여 절감 할 수 있다면 파프리카의 생산단가를 획기적으로 개선 할 수 있을 것이라 사료한다.
- 파프리카의 경우, 수확작업을 위한 특허, 연구, 기술 개발이 전무하여 관련 수확작업기 시장이 국내에 형성되어 있지 않다. 제안 과제를 통하여 수확기를 개발하면 제품의 산업화를 통하여 현저한 경제효과를 이룰 수 있으리라 판단한다. 파프리카의 선별기 같은 경우, 2009년 처음 국내에 보급

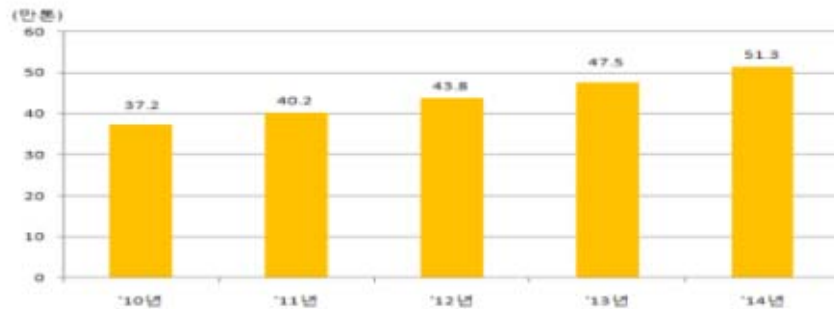
되기 시작하여, 파프리카의 생산성 및 상품성 향상에 큰 기여를 하여, 이전까지의 선별작업에 투입되었던 2억여 원을 절감하는 효과를 보았으므로(2009년, 뉴시스 기사), 제안 과제에서 개발하고자 하는 파프리카 수확작업기 역시 그에 준하거나 그 이상의 효과를 얻을 수 있을 것이라 판단한다.

○ 국외 제품생산 및 시장 현황

- 가장 앞서가는 파프리카 재배 기술을 가진 나라는 네덜란드로, 네덜란드의 농작업 자동화를 위한 작업기 분야의 주요 업체로는 Lely, Aris, Lacquey, CCM, Priva, SBG Precision Farming, Tyker Technology 등이 있다. 네덜란드의 농작업 자동화 기술 중 특히 시설재배의 자동화 기술이 강점을 보인다. 하지만 네덜란드의 노동시장 침체로 인하여 자동화 기술에 의한 일자리 감소가 사회적 이슈로 떠오르고 있다. 또한 네덜란드의 자동화 기술은, 대학 등의 연구기관과 대학병원에서 가정용 흡소이나 의료분양 대한 연구가 집중적으로 이루어지고 이에 대한 응용분야도 많지만, 어떤 분야도 발전규모가 광범위하지 않다. 서비스에 로봇기술을 지능적으로 응용하는 분야에 많은 초점이 맞추어져 있어, 파프리카 생산의 자동화 기술 개발은 미흡한 편이다(출처 ; KOTRA 글로벌 윈도우, '미래를 좌우할 로봇산업, 네덜란드의 현주소는').
- 네덜란드는 파프리카 종자 시장을 선점하고 있고, 시설재배에서의 기술 역시 네덜란드에 비하여 우리나라가 현저히 뒤쳐져 있으나(국내 파프리카 단위 면적당 생산량 ; 네덜란드 단위 면적당 생산량의 33% 수준의 생산량), 상기한 바와 같은 이유로 파프리카 수확의 자동화 기술 개발은 진행되고 있지 않다.
- 농업자동화는 제조업의 자동화와 달리 환경변화에 적절히 대응할 수 있어야 하고, 대상체가 생물이 라는 점을 고려한 수확장치(end effector)의 설계가 중요하다는 인식으로 연구가 활발히 진행되고 있다.
- 일본의 곤도(Kondo) 등은 딸기 자동 수확장치를 제작하여 66%의 수확 성공률을 보였다. 곤도 등은 1996년 스테레오 기계시각 시스템과 수직다관절로봇을 이용하여 방울토마토 수확시스템을 개발하여 약 70%의 정확도를 보였다. 또한 리드 등은 1995년 기계시각 시스템과 직교좌표 로봇 그리고 흡착컵을 이용한 수확장치로 구성된 버섯 수확로봇 시스템으로 67%의 수확 성공률을 나타내었다. 또한, 우치다 등은 1994년 식물공장용 상추 수확시스템을 개발하여 1800 포기/시간(hr)의 속도로 수확이 가능함을 선보였다. 또한, 시몬튼 등은 1991년 온실재배용 식물을 다루는 수확장치를 개발하고 제라늄을 자르는 데 적용하여 잎쪽지의 손상이 1.5%, 줄기의 손상이 2.0%가 발생하였음을 보고한 바 있다. 또한, 웨버 등은 1991년 멜론 수확기를 기초로 두 가지 형태의 수확장치(parallel plate gripper와 v-v notch gripper)에 대하여 멜론을 잡았을 때 발생하는 응력을 유한 요소법으로 분석하여 수확장치(v-v notch gripper)가 멜론에 손상을 덜 주는 형태임을 보고하고 있다. 또한, 키나세 등은 1991년 약 15초 만에 식물묘목을 자르고 이식하는 로봇시스템을 개발한 바 있으며, 호이 등은 1987년 토마토를 그리퍼로 잡을 때 발생하는 압력을 측정하여 팽창 가능한 세 개의 손가락을 가진 그리퍼의 제어의 적용에 관한 연구를 수행한 바 있다(출처 ; 월간로봇, '농업로봇 특허와 전망'). 하지만 파프리카의 수확을 위한 연구는 전무하며, 농업 분야 자동화의 선구적인 입지에 있는 일본의 경우, 파프리카 재배 규모가 미비하기 때문에 파프리카에 대한 연구 역시 부족하다.

- 중국의 파프리카 재배 경우, 북경, 교구, 하남, 산둥의 보호지 및 해남, 운남, 내몽고 집녕의 노천지에서 주로 재배되고 있으며, 흑룡강 녕안, 신장 변경 등에서도 일부 생산되고 있다. 2000년부터 일부지역에서 규모화 재배를 시작했으나, 재배기술 및 시설이 낙후되어 수확 가능한 면적은 재배면적의 절반 정도 밖에 되지 않았으나, 2006년 이후 기술 향상 및 재배면적 증가 등으로 증가 추세에 있어, 2009년 생산량은 350,000톤으로 우리나라의 10배 이상까지 증가하였다. 중국시장조사연구센터에 따르면 냉동, 저장 등의 기술이 발전하면서 제품보존, 운송원가가 낮아져 많은 중소기업체와 농가들이 생산량을 늘림에 따라 '14년에는 생산량이 50만톤 이상 달할 것으로 전망하였다(농수산물유통공사, '중국 파프리카시장').

【 중국 파프리카 생산전망 】



중국 파프리카 생산전망

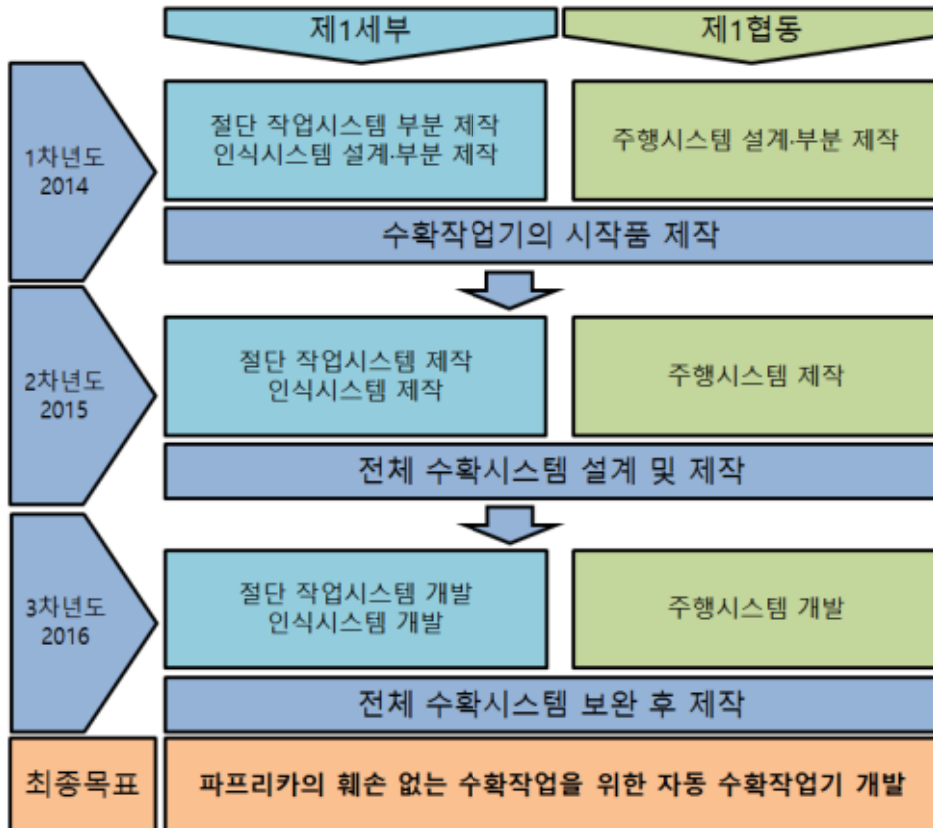
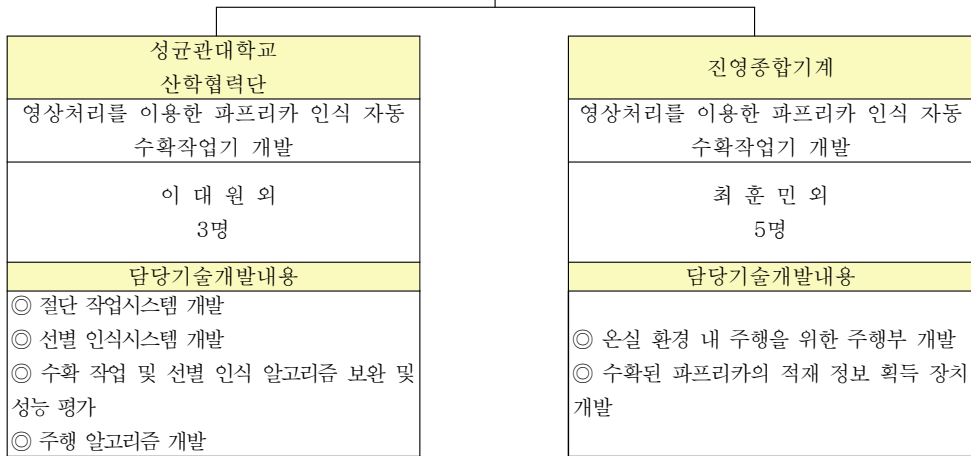
- 중국의 경우, 토경재배가 주를 이루며, 다수의 파프리카 재배기지가 존재하지만 각 기지별로 사용 가능한 비료와 농약의 종류, 투입시기, 투입량 등에 대한 통일된 기준이 없고 개별농가에 따라 재배방법을 달리하고 있다. 이는 파프리카 거래가 안전성과 품질이 아니라 무게를 중심으로 이루어지기 때문이다. 하지만 이를 개선 한다면, 우리나라 파프리카 산업을 위협할 수 있는 국가로 성장할 것이라 사료한다. 따라서 파프리카 수확작업기의 기술을 선점하여 국내 파프리카의 생산성 및 상품성을 높여야 한다고 판단한다.

3. 연구수행 내용 및 결과

코드번호	D-05
<p>○ 연구개발 추진전략 및 방법</p> <ul style="list-style-type: none"> - 본 연구는 산·학 공동으로 3년 과제로 추진한다. - 세부·협동 기관별 연구 목표 및 내용을 일정에 맞추어 진행한다. - 매월 1회 이상의 정례 모임 및 진행사항 발표를 통하여 연구내용을 협의하고 추진한다. - 파프리카 재배 농가의 애로사항을 면밀히 분석하여 연구개발 리스크를 최소화한다. - 파프리카 재배 농가 실정에 맞는 시스템 개발로 연구개발 종료 후 보급화가 이루어지도록 한다. - 각 세부연구목표는 다음과 같이 수행하였다. <ol style="list-style-type: none"> 1. 성균관대학교(1세부) <ul style="list-style-type: none"> - 절단 작업시스템 개발 - 인식시스템 개발 - 주행알고리즘 개발 2. 진영종합기계(1협동) <ul style="list-style-type: none"> - 주행시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 1차년도 제작시스템은 각 시스템을 분리하여 설계·제작하였다. <ol style="list-style-type: none"> 1. 성균관대학교(1세부) <ul style="list-style-type: none"> - 절단 작업시스템 설계 및 제작 - 인식시스템 설계 및 제작 2. 진영종합기계(1협동) <ul style="list-style-type: none"> - 주행시스템 설계 및 제작 - 2차년도 제작시스템은 각 시스템을 개발한 후 인터페이스 설계·제작 시 세부과제 연구팀과 협동과제 연구팀 논의 후 진행하였다. - 3차년도 제작시스템은 2차년도에 파악한 보완점을 토대로 각 시스템을 보완제작하고, 세부와 협동 공동으로 수확 시스템을 제작하였다. <ol style="list-style-type: none"> 1. 성균관대학교(1세부) <ul style="list-style-type: none"> - 절단 작업시스템 제작 - 인식시스템 제작 2. 진영종합기계(1협동) <ul style="list-style-type: none"> - 주행시스템 설계 및 제작 - 3차년도 최종 제작시스템은 각 시스템을 개발한 후 파프리카의 수확 작업의 성능 평가를 세부과제 연구팀과 협동과제 연구팀 논의 후 진행하였다. - 세부과제 연구팀은 협동과제 연구팀과 연구 시작 전, 시행 중, 시행 후에 반드시 연구 개발 방법 및 방향을 의논하였다. 	

○ 연구개발 추진체계

연구개발과제		총 참여 연구원	
과제명	영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기 개발	주관연구책임자 (이 대 원)외 총 9명	
기관 별 참여 현황			
구 분	연구기관수	참여연구원수	
대 기 업			
중견기업			
중소기업	1	6	
대 학	1	4	
국공립(연)			
출 연 (연)			
기 타			



○ 연구개발 추진일정

구분	세부연구내용	월 단위 추진계획											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1차년도	○파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단작업시스템의 엔드이펙터 부분 제작	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	○파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단작업 시스템의 매니플레이터 부분 제작	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	○영상정보 획득 및 획득한 영상정보에 따른 시스템 제어를 위한 영상처리 시스템 설계 및 부분 제작			■	■	■	■	■	■				
	○대상물(파프리카)과 배경을 판별하여 파프리카 좌표 획득 알고리즘 설계						■	■	■	■	■		
	○파프리카 좌표 획득 후 파프리카 수확을 위한 위치 선정 알고리즘 설계								■	■	■	■	■
	○좁은 현장 상황을 고려한 주행부 및 운반부 설계 및 부분 제작	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	○주행을 위한 영상처리 알고리즘 설계								■	■	■	■	■

구분	세부연구내용	월 단위 추진계획											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2차년도	○과프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템의 엔드이펙터 제작												
	○과프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업 시스템의 매니플레이터 제작												
	○엔드이펙터와 매니플레이터의 통합을 통한 절단 작업시스템 제작												
	○영상정보 획득 및 획득한 영상정보에 따른 시스템 제어를 위한 영상처리 시스템 제작												
	○좌표 획득 및 위치 선정 알고리즘 제작												
	○생리장해 및 병해 발생 과프리카와 정상 과프리카 선별 인식 알고리즘 설계												
	○주행부 및 수확 후 과프리카의 운반을 위한 운반시스템 제작												
	○과프리카 수확량 획득 장치 설계												
	○전체 수확시스템 설계 및 제작												

구분	세부연구내용	월 단위 추진계획											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3차년도	○절단면 소독 작업부 제작	■	■	■									
	○파프리카 절단 작업 성능 평가			■	■				■	■			
	○소독 작업부 절단 후 처리 성능 평가				■	■							
	○정상 파프리카 선별 소프트웨어 제작		■	■	■	■							
	○정상 파프리카 인식 성능 평가			■	■				■				
	○수확기 온실 환경 내 주행 성능 평가							■	■	■			
	○적재 정보 획득 장치 제작	■	■	■									
	○적재 정보 획득 및 전송 제어 시스템 제작			■	■								
	○정보 획득 및 전송 성능 평가				■	■							
	○전체 수확 시스템 인터페이스 제작					■	■	■					
	○전체 시스템 제어 실험							■	■	■			
	○최종 시스템 선정 및 보완									■	■	■	
	○수확 실험 및 성능 분석												■

○ 연구개발 결과

1. 파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업 시스템 개발

○ 파프리카 훼손 없는 수확 작업을 위한 절단 작업 시스템의 엔드이펙터 부분 제작

- 엔드이펙터 설계를 위한 파프리카 특성 분석

1. 국내 재배되는 파프리카 재배 현황 및 특징

파프리카는 가지과(Solanaceae)에 속하는 1년생식물(Therophyte)로서, 멕시코, 중앙 아메리카, 남아메리카, 서인도제도를 포함한 서반구의 열대지역에서 자생한다. 국내에는 항공기 기내식에 사용하고자 ‘㈜제동홍산’이 1994년도에 제주도의 유리온실에서 재배하기 시작하여, 1995년 김제 ‘참샘영농조합’에서 수출용 재배(1.1ha)를 시작한 이후, 2014년 8,012만 달러의 수출액으로 원예 농산물 수출 1위 품목으로 성장하였다. 표 1은 최근 7년 간 파프리카의 재배면적 및 생산량 변화를 나타낸다.

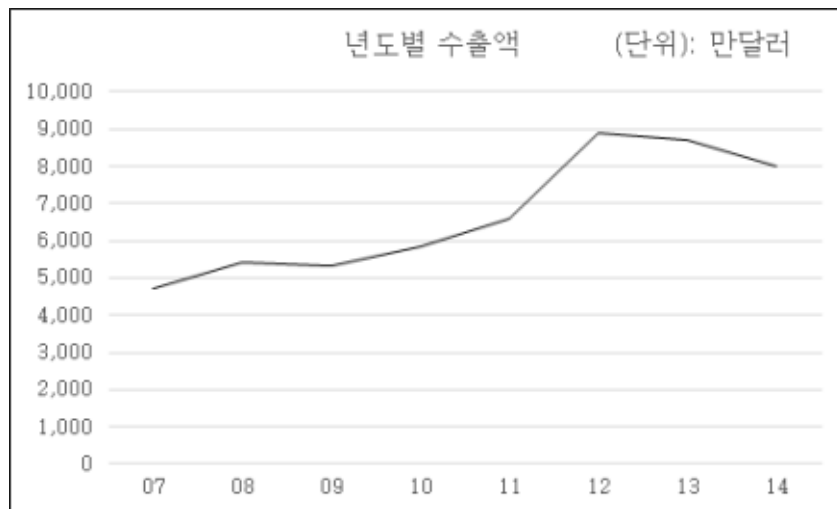


그림 14. 국내 파프리카 년도 별 수출액

표 1. 국내 파프리카 재배면적 및 생산량

구분	2007년	2008년	2009년	2010년	2011년	2012년	2013년
재배면적(ha)	320	367	410	424	429	430	575
생산량(톤)	28,870	32,778	36,023	41,396	43,160	50,642	62,622

국내 파프리카 재배 농가는 주로 강원도와 경상도, 전라도에 집중되어 있으며, 지역별 재배면적의 편차가 크다. 2013년 지역별 재배면적은 경상남도가 202ha로 전체 35%를 차지하며, 강원도 195ha(34%), 전라북도 57ha(9.9%), 전라남도 56ha(9.7%), 그 외 지역 65ha(11.3%) 차지하고

있다. 파프리카는 열대성 작물로서, 국내에서는 온실에서 재배가 되는데 온실 내 온도를 최저 18℃ 이상을 유지하여야 한다. 그에 따라 온도에 따라서 재배형태가 겨울을 분기로 여름작형과 겨울작형으로 나뉜다. 재배작형에 따른 주요산지는 표 2.와 같다.







파프리카 열매의 길이는 품종에 따라 12.5mm에서 30cm가량이며, 모양은 길거나 둥글거나 원뿔형이며, 색깔은 노란색·갈색·보라색·빨간색 등으로 다양하다.

표 2. 겨울작형과 여름작형 별 주요산지

	파종시기	정식시기	수확시기	주요산지
겨울작형	7월~8월	8월~9월	11월~익년6월	김제, 영광, 진주, 함안, 화순 등 평지 지역 충부지방 유리온실
여름작형	1월~2월	2월~4월	5월~12월	남원, 평창, 합천, 화천 등 고랭지 지역

국내에서 재배되는 품종은 2014년 채소종자사업단 등 국산화를 위한 노력이 진행 중이나 네덜란드 등의 유럽종에 의존하고 있다. 국내에서 재배되는 품종별 재배비율은 적색품종이 62%이고 황색품종이 31%이며 주황색 품종이 7%이다. 적색품종 중 국내에서 재배면적이 많은 대표 품종은 쿠퍼라(Cupra), 데브라(Debla), 플랜티(Plenty), 미라지(Mirage) 등이며, 황색품종의 경우 마세라티(Maserati), 클라리티(Clarity), 데비(Derby) 등의 품종이 국내에서 재배면적이 많은 대표 품종이다. 주황색 품종 중 국내에서 재배면적이 많은 대표 품종은 프레지던트(President)와 부기(Boogie) 등 이다. 국내에서 재배되는 품종별 특성은 표 3과 같다.

표 3. 국내 파프리카 주요 재배 품종의 특징

적색 품종	
	<p style="text-align: center;">쿠피라 (Cupra)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 평균 과경 : 75mm • 평균 무게 : 170g • 과형 특성 : Blocky • 식물 특성 : 개장형(開長形), 착과율이 높음 • 재배 유형 : 가온 온실
	<p style="text-align: center;">데블라 (Debla)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 평균 과경 : 86mm • 평균 무게 : 210g • 과형 특성 : Blocky • 식물 특성 : 착과 용이, 적색 색감이 좋음 • 재배 유형 : 가온 온실
	<p style="text-align: center;">플랜티 (Plenty)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 평균 과경 : 80mm • 평균 무게 : 185g • 과형 특성 : Blocky • 식물 특성 : 개장형, 과실이 균일함 • 재배 유형 : 가온 온실
	<p style="text-align: center;">미라지 (Mirage)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 평균 과경 : 80mm • 평균 무게 : 180g • 과형 특성 : Blocky • 식물 특성 : 식물체가 강건함, 착과율이 높음 • 재배 유형 : 가온 온실
황색 품종	
	<p style="text-align: center;">마세라티 (Maserati)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 평균 과경 : 81mm • 평균 무게 : 200g • 과형 특성 : Blocky • 식물 특성 : 경도가 낮음 • 재배 유형 : 가온 온실
	<p style="text-align: center;">클라리티 (Clarity)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 평균 과경 : 80mm • 평균 무게 : 190g • 과형 특성 : Blocky • 식물 특성 : 생육이 빠름 • 재배 유형 : 가온 온실



데비 (Derby)

- 평균 과경 : 90mm
- 평균 무게 : 205g
- 과형 특성 : Blocky
- 식물 특성 : 과실이 크고, 착과율이 높음
- 재배 유형 : 가온 온실

주황색 품종



프레지던트 (President)

- 평균 과경 : 83mm
- 평균 무게 : 195g
- 과형 특성 : Blocky
- 식물 특성 : 당도가 높음, 과실의 길이가 짧음
- 재배 유형 : 가온 온실



부기 (Boogie)

- 평균 과경 : 84mm
- 평균 무게 : 195g
- 과형 특성 : Blocky
- 식물 특성 : 착과 용이, 생산성 높음
- 재배 유형 : 가온 온실

시판 중인 파프리카의 적색 품종, 황색 품종, 주황색 품종의 과실의 외형 특성은 표 4와 같다. 재배되는 파프리카의 중량은 $194.62 \pm 3.5g$, 과실의 직경은 $80.92 \pm 1.08mm$, 과실의 길이는 $92.15 \pm 1.84mm$, 과병의 직경은 $13.85 \pm 0.34mm$, 과병의 길이는 $72.15 \pm 0.81mm$ 이다.

표 4 국내 파프리카 재배 품종의 외형 특성

	중량(g)	과실 직경(mm)	과실 길이(mm)	과병 직경(mm)	과병 길이(mm)
Cupra	170	75	95	13	77
Debla	215	86	100	16	74
Ferrari	210	79	101	16	74
Plenty	185	80	90	13	74
Mirage	180	80	85	13	71
Special	190	76	80	13	74
Veyron	210	78	100	16	72
Nagano	185	80	90	13	74
Maserati	200	81	95	14	73
Clarity	190	80	85	13	71
Derby	205	90	100	13	65
Boogie	195	84	90	13	70
President	195	83	87	14	69
평균	194.62	80.92	92.15	13.85	72.15
표준편차	12.63	3.89	6.62	1.23	2.90
표준오차	3.50	1.08	1.84	0.34	0.81

2. 엔드이펙터의 제작을 위한 물성분석

파프리카는 수확작업 시 과실의 훼손정도에 따라 상품성의 차이가 생기므로, 정밀하고 정확한 수확작업이 이루어져야 한다. 파프리카의 수확작업은 파프리카의 과실을 파지하고 파프리카의 과병을 절단함으로써 진행된다. 파프리카 자동 수확기는 수확작업 시 엔드이펙터의 파프리카 과실 파지 작업과 파프리카 과병 절단 작업이 정밀하고 정확하게 수행할 수 있어야 한다. 파프리카 자동 수확기의 엔드이펙터의 정밀하고 정확한 수확작업을 위해서는 파프리카의 과실을 잡는 그림퍼의 압축강도와 파프리카의 과병을 절단하는 커터의 절단력 등의 설계요인을 명확히 선정하고 면밀히 분석하여야 한다. 따라서 효율적인 수확을 위한 엔드이펙터의 설계 요인을 선정하기 위하여 파프리카의 기하학적 특성, 압축강도, 파프리카 과병의 절단 강도를 측정하고, 엔드이펙터의 설계

를 위한 기초 요인을 분석하였다.

파프리카의 물성측정을 위하여 사용한 파프리카는 광주광역시에서 재배되어 본량농협에서 상품화한 파프리카를 사용하였다. 적색 품종인 Ferrari와 황색 품종인 derby를 사용하였으며, 주황색 품종은 President를 사용하였다. 파프리카의 기하학적 측정 및 과실의 압축시험을 위해서 상기 세 가지 품종의 파프리카 35개씩 총 105개의 파프리카를 사용하였으며, 파프리카 줄기의 절단 시험을 위하여 105개의 파프리카 중 줄기의 굵기가 굵은 상위 30개의 파프리카의 줄기를 사용하였다. Point Gray 사의 Blackfly BFLY-U3-13S2C-CS를 CS-082에 설치하여 파프리카를 스캔하였으며, Mitutoyo 사의 Mitutoyo 530-109를 사용하여 파프리카의 각 기하학적 특성을 측정하였다. 그림 24은 Blackfly BFLY-U3-13S2C-CS을 이용하여 파프리카를 스캔하는 모습이다.



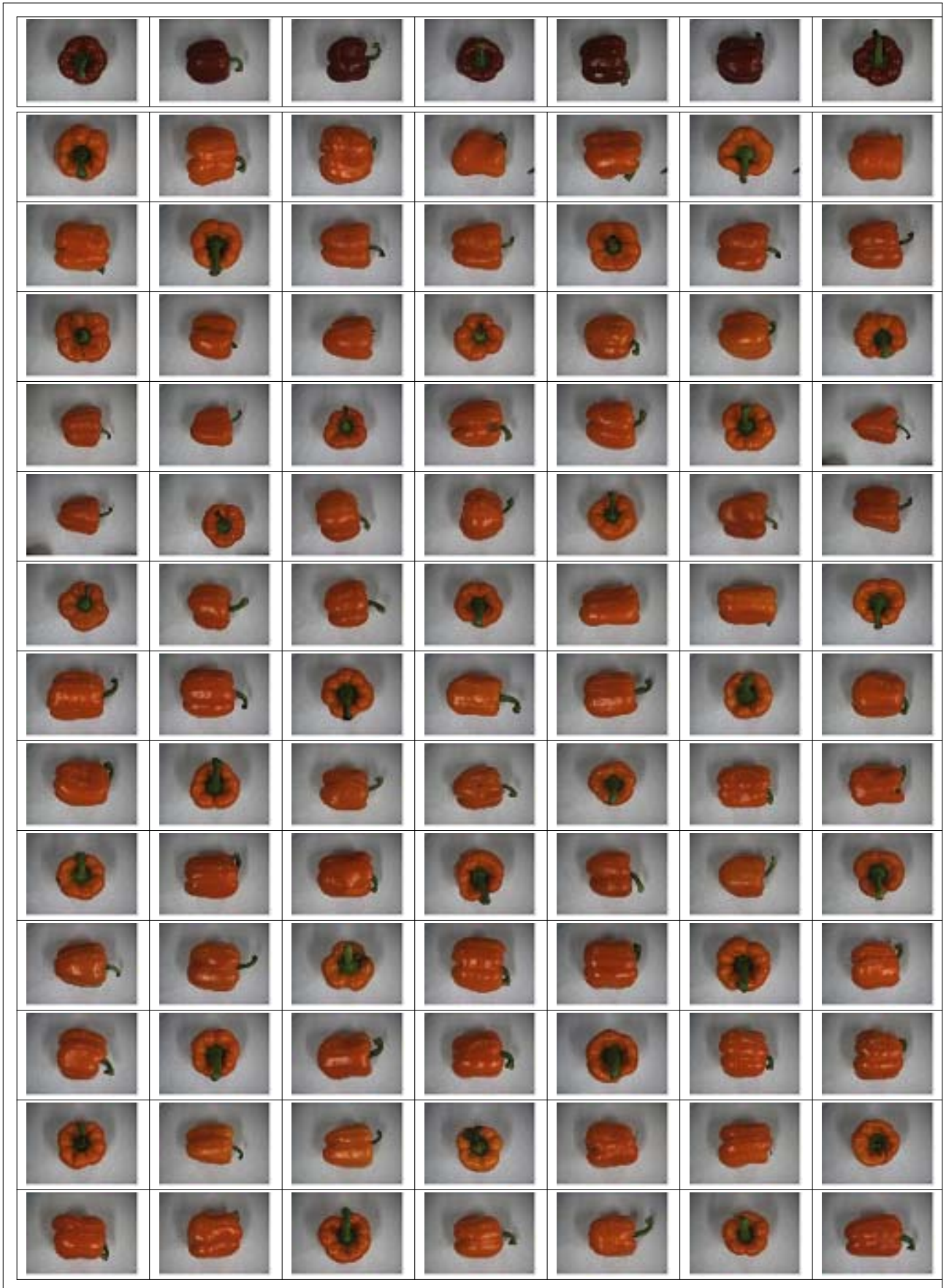
그림 24 BFLY-U3-13S2C-CS을 사용한 파프리카의 스캔

- Point Gray 사의 Blackfly BFLY-U3-13S2C-CS를 사용하여 파프리카의 상면, 좌측면, 우측면을 스캔하였으며, 105개의 파프리카를 총 3회 스캔한 영상은 표 5.와 같다.

표 5. 파프리카의 상면, 좌측면, 우측면 스캔한 영상









파프리카의 과실 및 과병의 기하학적 측정은 파프리카 과실의 파지를 위한 그립퍼의 핑거부와 파프리카 과병의 절단을 위한 절단부의 설계를 위하여 진행하였다. 그림 340과 같이 파프리카 과실의 길이(a), 파프리카 전체의 길이(e), 파프리카 줄기의 길이(f)를 측정하였고, 파프리카 과실 상단 10% 지점(d), 과실 중심(c), 파프리카 과실 하단 10% 지점(b)의 직경을 측정하였으며, 파프리카 과병의 끝단(h)과 파프리카 과병의 중심(g)의 직경을 측정하였다.

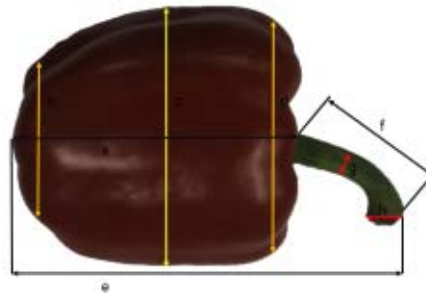


그림 340 파프리카 과실 및 과병의 기하학적 측정

또한 파프리카 과실의 중심의 둘레와 파프리카 과병의 중심의 둘레를 측정하였다. 파프리카의 중량은 CAS사의 CAS CBL-3200h를 이용하여 측정하였다. 파프리카의 상단부 및 중심, 하단부의 직경의 차이는 엔드이펙터의 그립퍼가 파프리카의 과실을 파지하였을 때 작업의 안정성을 높이기 위하여 그립퍼의 핑거 형상과 구조를 어떻게 설계할지 결정하는 중요한 요소이다. 파프리카의 상단부, 중심, 하단부의 직경을 분산분석을 통하여 세 직경의 연관성을 분석하였다. 파프리카의 중량 측정 시 사용한 CAS-CBL-3200h의 재원은 표 6과 같다.

표 6. CAS-CBL-3200h의 재원



제품명	CAS CBL-3200h
최대 측정 중량	3200g
분해능	0.01g
직선성	30mg
사용온도	+5℃ ~ +40℃

파프리카의 기하학적 특성을 측정한 결과는 아래 표 7과 같다. 파프리카의 전체 길이는 77.20mm~138.10mm의 범위에서 평균 105.62mm, 파프리카 과실의 길이는 67.40mm~110.50mm의 범위에서 평균 88.43mm로 측정되었다. 파프리카 과실의 상단 10% 직경은 62.00mm~94.00mm의 범위에서 평균 81.22mm, 파프리카 과실의 중심 직경은 64.00mm~103.00mm의 범위에서 평균 82.70mm, 파프리카 과실의 하단 10% 직경은 56.40mm~96.10mm의 범위에서 평균 77.88mm로 측정되었다. 중량은 110.51g~284.52g의 범위에서 평균 211.69g로 측정되었다.

파프리카 과실의 상단, 하단, 중심의 직경의 길이의 차이가 없다고 가정하였을 때, 과실의 상단, 하단, 중심의 직경의 길이를 일원 분산분석(1-way ANOVA model)을 한 결과는 표 8과 같다. 유의확률 p값이 0.05에 비하여 현저히 작으므로 파프리카 과실의 상단, 하단, 중심의 직경의 길이의 차이가 없다는 가정을 기각한다. 따라서 과실의 상단, 하단, 중심의 길이는 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의미한 차이를 갖는다.

표 7. 측정된 파프리카의 기하학적 특성

	평균	분산	표준편차	표준오차	최대값	최소값
무게(g)	211.69	738.70	27.18	2.65	284.52	110.51
파프리카 전체 길이(mm)	105.62	182.96	13.53	1.32	138.10	77.20
파프리카 과실 길이(mm)	88.43	87.97	9.38	0.92	110.50	67.40
파프리카 줄기 길이(mm)	52.99	110.55	10.51	1.03	75.00	10.00
상단 10% 직경(mm)	81.22	32.27	5.68	0.55	94.00	62.00
하단 10% 직경(mm)	77.88	57.65	7.59	0.74	96.10	56.40
과실 중심 직경(mm)	82.70	50.31	7.09	0.69	103.00	64.00
줄기 중심 직경(mm)	9.55	3.31	1.82	0.18	15.00	4.20
줄기 끝단 직경(mm)	13.37	13.36	3.65	0.36	21.10	4.20
과실 둘레(mm)	266.04	387.50	19.68	1.92	323.00	218.00
줄기 둘레(mm)	33.56	32.25	5.68	0.55	46.00	18.00

표 8. 과실의 상단, 하단, 중심의 직경의 길이의 분산분석

인자의 수준	관측수	합	평균	분산			
상단 10%	105	8528	81.21905	32.2656			
하단 10%	105	8177.5	77.88095	57.6504			
중심	105	8683.2	82.69714	50.30566			
변동의 요인	제곱합	자유도	제곱 평균	F 비	P-값	F 기각치	
처리	1278.317	2	639.1584	13.6746**	2.03E-06	3.024681	
오차	14583.05	312	46.74055				
계	15861.37	314					

파프리카 과병의 길이는 10.00mm~75.00mm의 범위에서 평균 52.99mm로 측정되었다. 파프리카 과병의 중심 직경은 4.20mm~15.00mm의 범위에서 평균 9.55mm로 측정되었으며, 파프리카 과병의 끝단 직경은 4.20mm~21.10mm의 범위에서 평균 13.37mm로 측정되었다. 과병의 둘레는 18.00mm~46.00mm의 범위에서 평균 33.56mm로 측정되었다.

파프리카의 중량은 110.51g~284.52g의 범위이며 평균 211.69g로 측정되었는데, 중력가속도를 9.806m/s²로 계산하였을 때, 파프리카의 중량은 1.084N~2.790N의 범위이다.

파프리카 과실의 압축 시험은 엔드이펙터의 파프리카 과실의 파지 작업 시 과실의 훼손을 최소화하기 위하여 파지 작업 시의 적정 압력을 선정하기 위하여 수행하였다. 파프리카 과실의 압축 시험을 위하여 push-pull gauge인 digitech dtg-20를 이용하여 파프리카 과실의 압축강도를 측정하였다. 파프리카 과실의 압축 시험을 위하여 사용한 push-pull gauge의 재원은 표 9와 같으며, 그림 342와 같이 파프리카 과실의 중심의 압축강도를 측정하였다.

표 9. push-pull gauge의 재원

측정축	M6
계측 정밀도	±0.2% F.S
측정 주기	1ms, 5ms, 16ms, 50ms / 초 임의 전환
사용 온도 범위	0℃ ~ +40℃
측정 범위	200N, 20kgf, 44.09lb
최소 표시	0.1N, 10gf, 0.01lb

- 파프리카 과실의 압축시험을 한 결과는 표 10과 같다.



그림 342 push-pull gauge를 이용한 압축강도 측정

표 10. 측정된 압축강도

	압축강도(kgf)
평균	6.63
분산	1.53
표준편차	1.24
표준오차	0.12
최대값	9.90
최소값	3.25

파프리카 과실의 압축강도는 31.87N~97.08N의 범위에서 평균 65.01N으로써, 단위면적으로 나누게 되면 18.04N/cm²~54.96N/cm²의 범위에서 평균 36.81N/cm²의 압축강도가 측정되었다. 최소값과 최대값의 차이가 36.92N/cm²로써 특정 파프리카에서는 훼손되지 않는 힘으로 과지하였다고 하더라도 다른 파프리카는 훼손될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

파프리카 과병의 절단 시험은 엔드이펙터의 절단부를 설계하기 위하여 수행하였다. 실제 파프리카 농가에서 사용하는 파프리카 수확용 접도 OLFA CK2의 절단날을 push-pull gauge에 부착하여 절단날의 절단강도를 측정하였다. 파프리카 과병의 절단 시험을 위하여 파프리카의 과실 및 과병의 기하학적 측정을 통하여 얻은 결과 중 과병의 둘레가 큰 1순위부터 30순위까지의 파프리카의 과병을 이용하여 줄기의 중심을 고정한 후 절단하였다. 과병의 절단 강도를 측정하기 위하여 사용한 파프리카 수확용 접도 OLFA CK2은 그림 343와 같다.



그림 343 수확용 접도 OLFA CK2

파프리카 과병의 절단 시험을 통한 절단강도를 측정한 결과는 표 11과 같다. 접도의 절단날을 이용하여 측정한 절단강도는 22.16N~67.76N의 범위에서 40.99N의 평균값으로 측정되었다.

표 11. 측정된 절단 강도

	절단강도(kgf)
평균	4.18
분산	1.40
표준편차	1.18
표준오차	0.22
최대값	6.91
최소값	2.26

파프리카의 물성을 측정한 전체 결과를 별첨하였다.

별첨. 파프리카 물성 측정 결과

no.	절단강도(kgf)
1	2.85
2	3.03
3	3.74
4	2.26
5	6.22
6	2.65
7	3.29
8	2.28
9	2.3
10	4.63
11	6.91
12	5.6
13	5.22
14	3.34
15	4.39
16	5.2
17	4.49
18	4.22
19	4.45
20	4.47
21	4.76
22	4.58
23	4.33
24	3.69
25	2.77
26	4.49
27	5.07
28	5.14
29	5.36
30	3.61

별첨. 파프리카 물성 측정 결과

no.	무게(g)	전체 길이(mm)	과실 길이	과병 길이	과실 상단 10% 직경	하단 10% 직경	중양 직경	과병 중앙 직경	과병 끝단 직경	과실 둘레	과병 둘레	입측강도(kgf)
1	234.60	122.10	95.00	62.00	85.50	83.60	83.30	10.20	15.50	275.00	34.00	6.00
2	245.74	106.00	83.50	64.00	86.00	95.00	89.10	10.00	16.60	306.00	35.00	6.97
3	227.77	97.00	97.00	57.00	86.10	80.40	86.00	9.00	11.30	286.00	32.00	8.20
4	228.55	93.70	88.20	51.00	80.20	84.00	86.00	11.10	18.20	267.00	37.00	8.05
5	193.56	115.00	83.40	49.00	83.40	69.60	76.60	9.20	10.70	267.00	29.00	5.25
6	207.98	110.00	89.00	44.00	91.00	79.90	85.00	8.80	11.40	292.00	28.00	6.63
7	175.12	78.50	77.00	25.00	83.50	83.00	87.80	6.30	4.20	266.00	23.00	5.71

8	174.27	102.60	93.20	39.00	84.30	73.00	84.70	7.30	10.20	266.00	29.00	5.03
9	120.89	88.00	72.00	36.00	71.80	67.20	79.50	5.90	5.20	234.00	22.00	5.53
10	183.57	107.00	86.50	45.00	86.30	81.20	89.00	8.50	9.20	276.00	33.00	6.00
11	110.51	108.80	81.20	45.00	71.00	56.40	69.00	4.20	6.80	218.00	19.00	3.47
12	181.91	90.70	71.40	54.00	83.70	93.00	93.80	6.80	13.30	236.00	23.00	6.51
13	183.22	103.80	87.40	42.00	85.40	64.70	81.00	6.60	9.20	268.00	26.00	5.25
14	167.97	106.00	74.40	54.00	82.40	76.40	80.50	9.40	16.80	271.00	35.00	6.79
15	225.06	105.50	103.50	53.00	81.40	75.80	79.00	10.00	12.20	244.00	27.00	7.14
16	241.60	121.30	93.40	60.00	86.80	82.80	85.50	12.20	14.00	278.00	42.00	6.91
17	223.27	138.10	97.90	65.00	80.50	70.00	76.10	11.70	17.00	254.00	39.00	7.27
18	229.73	109.40	91.60	61.00	80.00	82.70	82.00	10.00	17.40	261.00	38.00	7.86
19	181.91	103.50	83.00	48.00	78.50	76.00	82.00	7.50	10.00	256.00	28.00	4.21
20	213.01	104.10	92.30	47.00	79.00	73.00	75.00	10.00	16.00	242.00	39.00	6.22
21	239.17	117.70	95.00	57.00	78.00	74.00	76.00	10.00	17.60	282.00	33.00	7.65
22	199.22	100.50	81.00	51.00	82.70	72.50	82.80	9.10	14.60	273.00	31.00	4.81
23	215.17	125.20	90.50	52.00	89.30	76.70	90.50	9.20	11.50	279.00	33.00	5.50
24	284.52	106.90	88.50	60.00	92.00	93.30	93.00	11.00	20.00	306.00	40.00	5.86
25	238.42	97.90	82.40	61.00	84.00	90.40	87.00	12.00	19.00	290.00	37.00	8.04
26	235.36	114.00	89.80	62.00	84.90	75.50	83.20	11.40	17.00	268.00	41.00	7.95
27	221.58	99.20	81.00	53.00	81.60	84.00	86.00	10.30	16.40	288.00	37.00	7.03
28	158.06	110.20	90.60	49.00	78.70	66.80	78.00	6.60	9.90	248.00	25.00	4.84
29	204.78	97.00	97.00	40.00	77.70	80.00	77.60	15.00	15.00	255.00	20.00	6.53
30	234.19	96.80	84.00	54.00	88.00	90.40	89.60	12.50	16.50	278.00	37.00	6.74
31	188.55	123.00	80.30	68.00	80.00	78.30	81.00	9.80	17.00	259.00	35.00	7.35
32	211.92	129.40	96.00	61.00	74.50	75.60	73.30	9.80	16.60	243.00	36.00	4.27
33	167.00	97.70	73.60	52.00	79.00	71.00	80.00	8.40	12.00	256.00	28.00	7.57
34	221.91	95.70	79.20	53.00	87.70	92.60	90.70	11.00	11.50	291.00	42.00	6.75
35	215.08	88.70	81.00	51.00	85.30	81.10	87.60	9.60	12.50	270.00	32.00	7.15
36	240.94	94.70	87.40	54.00	87.50	82.60	88.00	8.50	14.50	278.00	36.00	5.49
37	220.12	107.00	100.50	51.00	76.00	77.90	75.80	11.40	16.10	244.00	35.00	5.05
38	223.01	127.60	102.00	51.00	73.00	76.20	77.20	11.20	14.60	240.00	38.00	5.82
39	231.12	108.50	96.50	62.00	73.00	80.10	75.30	12.30	21.10	250.00	41.00	9.35
40	214.91	98.40	84.20	59.00	84.30	80.20	86.40	10.50	16.20	278.00	37.00	6.94
41	179.97	116.10	106.70	65.00	73.00	68.90	70.70	9.00	10.90	239.00	31.00	5.10
42	219.82	107.00	80.50	65.00	82.10	76.40	86.30	11.20	19.70	268.00	37.00	7.72
43	221.72	131.20	110.50	63.00	71.80	82.50	74.80	10.00	18.30	243.00	38.00	6.41
44	193.73	116.00	92.50	59.00	76.50	69.00	77.40	9.80	16.20	247.00	39.00	7.21
45	205.86	97.30	84.30	49.00	78.80	79.00	83.20	7.30	16.00	270.00	32.00	4.95
46	216.43	109.80	87.00	53.00	86.60	87.00	91.00	10.50	16.00	276.00	37.00	6.59
47	194.12	129.10	98.50	55.00	82.50	68.00	82.60	9.00	11.00	259.00	33.00	6.23
48	211.21	128.00	109.20	50.00	76.60	70.00	72.70	12.70	18.00	230.00	41.00	3.25

49	218.76	90.50	85.80	49.00	84.00	81.30	81.00	11.00	17.00	271.00	43.00	8.28
50	232.89	107.20	83.00	54.00	77.60	71.00	79.50	10.10	17.60	256.00	37.00	7.36
51	230.48	113.10	97.00	50.00	76.80	69.00	74.20	12.20	19.30	255.00	43.00	5.05
52	214.47	96.00	89.40	46.00	83.30	76.80	82.00	12.40	17.00	264.00	41.00	7.67
53	209.46	115.20	97.00	62.00	74.40	77.50	76.70	11.00	15.00	250.00	42.00	5.26
54	244.79	110.00	89.00	49.00	87.50	82.00	90.00	10.50	13.00	292.00	43.00	6.98
55	238.31	103.30	92.00	15.00	72.50	77.20	70.00	9.60	9.60	234.00	42.00	7.22
56	206.57	93.00	76.60	42.00	77.10	81.00	79.00	10.00	14.40	253.00	37.00	5.38
57	237.91	103.00	91.60	49.00	78.10	87.00	81.50	10.60	18.00	252.00	32.00	5.90
58	214.56	115.90	92.90	59.00	74.70	71.80	78.60	7.60	13.70	253.00	30.00	6.49
59	211.50	110.20	81.80	54.00	89.20	81.00	91.00	10.70	16.60	279.00	35.00	8.94
60	245.98	123.10	104.00	55.00	79.60	77.00	79.00	12.00	18.70	243.00	41.00	6.01
61	223.52	97.70	80.60	65.00	81.10	75.70	81.40	13.00	21.00	270.00	46.00	9.90
62	209.98	98.00	88.70	60.00	72.00	74.20	73.00	11.00	14.20	240.00	35.00	5.74
63	224.79	128.90	99.40	53.00	74.40	65.60	72.20	10.30	16.40	232.00	35.00	6.10
64	222.42	118.30	95.30	58.00	71.00	77.00	70.00	10.00	13.00	245.00	34.00	5.55
65	213.42	112.50	99.40	54.00	75.00	73.00	74.00	10.90	13.60	236.00	36.00	5.91
66	229.04	96.10	95.00	63.00	77.70	72.70	82.60	9.00	13.60	241.00	32.00	6.55
67	240.62	125.20	103.50	56.00	79.00	70.00	79.90	9.60	15.30	253.00	34.00	6.21
68	227.08	116.00	93.60	57.00	78.00	75.80	82.60	8.70	14.60	274.00	33.00	7.00
69	228.03	119.20	98.40	51.00	75.00	71.00	75.70	10.70	14.00	252.00	38.00	5.87
70	203.45	109.00	97.40	19.00	70.00	66.00	64.00	9.00	7.00	224.00	32.00	7.02
71	200.17	119.00	87.40	59.00	84.00	80.00	83.00	8.20	10.10	266.00	30.00	6.66
72	198.70	91.40	77.60	58.00	81.40	76.30	82.90	9.20	11.30	271.00	36.00	8.34
73	195.75	101.70	88.00	51.00	85.10	86.40	88.00	10.50	13.50	281.00	35.00	7.90
74	219.48	95.00	94.80	55.00	83.00	88.60	86.20	9.20	12.20	271.00	32.00	8.02
75	210.47	98.00	98.00	57.00	78.50	79.20	78.90	9.50	7.00	272.00	31.00	8.41
76	215.82	123.60	102.70	52.00	79.20	66.00	71.90	7.60	7.40	257.00	29.00	6.44
77	165.18	107.40	101.80	32.00	62.00	68.30	65.50	8.30	6.40	257.00	25.00	4.86
78	199.11	84.40	77.00	41.00	87.20	88.00	90.10	9.00	9.00	286.00	35.00	8.52
79	258.36	100.90	100.90	58.00	94.00	95.90	100.00	7.60	8.00	309.00	32.00	7.24
80	264.85	93.50	88.60	50.00	90.00	96.10	103.00	12.00	14.40	315.00	37.00	7.47
81	272.11	97.00	86.40	64.00	93.80	91.00	100.00	11.10	13.70	323.00	41.00	6.27
82	246.68	88.30	88.30	10.00	85.50	82.30	92.20	12.00	12.00	292.00	34.00	6.96
83	169.56	91.30	76.00	49.00	80.60	79.00	85.60	8.80	13.00	273.00	32.00	6.43
84	218.94	106.30	92.00	61.00	79.00	71.40	81.00	8.80	9.30	260.00	37.00	7.91
85	194.39	82.20	70.50	63.00	80.80	83.10	87.00	7.50	13.60	282.00	29.00	6.86
86	179.20	85.80	73.70	59.00	87.30	87.40	90.00	8.50	13.30	284.00	37.00	6.01
87	205.02	97.60	85.00	75.00	83.50	77.40	86.00	8.30	10.40	264.00	35.00	6.75
88	207.21	97.00	85.50	61.00	80.00	75.90	79.00	9.00	11.00	272.00	31.00	7.13
89	208.77	91.00	79.00	54.00	85.00	82.00	90.00	5.50	12.60	288.00	28.00	5.12

90	173.76	91.60	79.00	54.00	76.50	71.50	82.00	10.00	8.00	259.00	33.00	7.82
91	209.61	90.70	80.00	48.00	84.30	83.00	88.00	9.50	13.00	270.70	33.00	7.47
92	209.35	122.60	96.60	30.00	81.50	73.10	87.30	4.90	5.30	265.00	18.00	6.16
93	208.38	99.60	88.00	60.00	82.30	79.90	85.70	10.50	9.20	268.00	36.00	5.85
94	253.97	137.10	108.10	60.00	85.50	79.80	85.00	8.50	13.30	274.00	25.00	7.38
95	215.36	98.70	85.10	45.00	87.00	84.20	87.00	6.00	10.20	285.00	20.00	8.99
96	215.22	131.00	91.00	72.00	83.60	70.00	81.00	8.50	13.00	261.00	31.00	9.08
97	212.19	114.20	86.30	59.00	81.30	73.00	80.00	8.60	13.30	258.00	30.00	8.31
98	200.68	91.00	75.00	55.00	90.00	84.00	91.40	8.70	14.60	289.00	32.00	6.20
99	169.72	77.20	71.30	54.00	78.60	76.00	86.00	8.40	12.00	273.00	26.00	6.38
100	211.99	97.80	80.20	56.00	87.00	74.50	88.40	8.10	12.70	282.00	29.00	6.98
101	214.82	81.00	67.40	55.00	88.60	85.00	93.50	7.70	13.00	297.00	29.00	6.27
102	207.29	119.20	88.80	54.00	75.00	65.50	79.70	10.00	10.00	251.00	35.00	8.13
103	204.07	106.50	85.50	48.00	82.10	73.00	85.10	9.00	11.00	288.00	31.00	5.48
104	179.91	100.50	74.50	60.00	80.30	76.00	87.70	9.60	14.80	271.00	34.00	6.00
105	225.06	91.70	78.10	64.00	84.60	73.40	88.60	10.00	8.70	280.00	35.00	6.68

3. 엔드이펙터의 제작을 위한 착과 특성 분석

파프리카는 목본성 식물로서 저목형이며, 줄기가 비교적 약한 편이다. 따라서 수확기에 과실의 무게에 의하여 줄기가 부러지기 쉽다. 파프리카의 꽃눈은 각 분지단계에서 발생하며, 착화와 과실발육 능력은 수광량, 온습도, 식물체의 영양 상태 등 다양한 요인에 영향을 받는다. 성공적으로 착과된 과실은 약 6주에 걸쳐 성숙을 마친다. 과실의 최종 크기는 품종에 따라 다르다. 착과에서 성숙까지 소요되는 기간은 기후조건 등의 요인에 영향을 받아 일반적으로 6주에서 8주가 걸린다. 일반적으로 과색은 불규칙적으로 변하기 때문에 과실의 색상이 완숙되었을 때 수확한다. 단위면적당 착과되는 정도는 수광량에 영향을 받는데, 수광량별 착과정도는 표 12와 같다.

표 12. 수광량별 착과정도

수광량	적정 착과수
800 j/cm ²	14~17 과/m ²
1300 j/cm ²	17~25 과/m ²
1800 j/cm ²	25~35 과/m ²
2300 j/cm ²	37~40 과/m ²

파프리카의 착과 특성을 분석하기 위하여, 경기 고양시에 위치한 한국농원과 경북 구미시에 위치한 구미원예농단 등에 방문하였다. 또한, 파프리카의 착과 특성을 분석하기 위하여 온실 환경을 조성하여 파프리카의 생육 및 착과를 확인하였다. 그림 34은 실제 농가를 방문한 모습이다.



그림 344 실제 농가에서의 파프리카 착과 특성 분석

파프리카 온실 환경 조성을 위하여 그림 345과 같은 미니온실을 연구실 내에 설치하였다. 실제 온실 환경과 유사하도록 온실 내 온도를 18℃ 이상으로 유지하였다. 또한 온습한 환경에서 성장하는 파프리카의 특성에 맞게 습도를 항상성 있게 유지하였다. 그림 346은 실제 온실의 모습을 나타내며, 그림 347는 2015년 06월 17일부터 2015년 07월 11일까지의 온실의 일일 온도 및 습도 변화를 감시한 모습이다.



그림 345 미니 온실



그림 346 연구실 내 온실 환경 조성

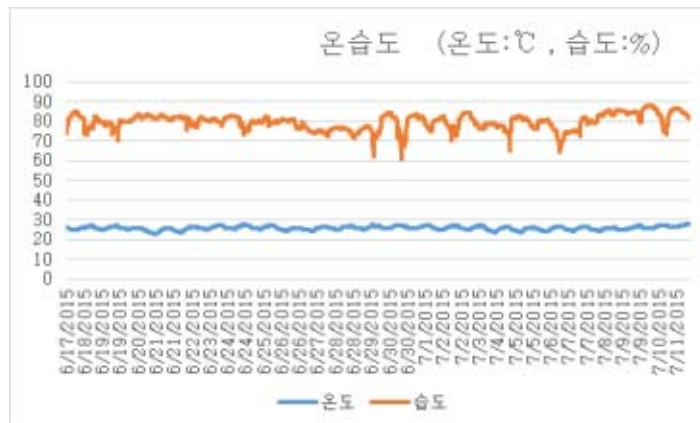


그림 347 온실 내 온습도 변화

실내 온실에서의 수광량 조절을 위하여 파프리카 온실 내 LED를 설치하였다. 2010년 농수산물 유통공사 강원지사의 연구 결과에 따라, 적색, 청색, 백색 LED의 비율을 “RED : BLUE : WHITE = 4 : 1 : 1”로 맞추었으며, 전체 출력 144W로 하였다. 파프리카의 품종은 국내에서 주로 재배되는 적색 파프리카 중 Plenty로 하여 총 10주를 재배하였다. 그림 348은 실제 연구실 내 온실에서 재배한 파프리카의 모습을 나타낸다.



그림 348 온실 내 파프리카 재배 모습

실제 농가를 방문하여 착과 특성을 조사하고, 연구실 내 온실을 조성하여 파프리카의 착과 특성을 분석한 결과, 파프리카의 착과된 과실 수는 한 주당 9.8개 인 것을 확인 할 수 있었다.

3. 요약 및 결론

‘파프리카의 훼손이 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템’의 엔드이펙터 설계를 위하여 파프리카의 과실 및 과병의 특성을 분석하였고, 파프리카의 착과 특성을 분석하였다.

파프리카의 국내에서 재배되는 품종별 재배비율은 적색품종이 62%이고 황색품종이 31%이며 주황색 품종이 7%으로, 적색품종 중 국내에서 재배면적이 많은 대표 품종은 쿠퍼라(Cupra), 데블라(Debla), 플랜티(Plenty), 미라지(Mirage) 등이며, 황색품종의 경우 마세라티(Maserati), 클라리티(Clarity), 데비(Derby) 등의 품종이 국내에서 재배면적이 많은 대표 품종인 것을 확인하였다. 시판 중인 파프리카의 적색 품종, 황색 품종, 주황색 품종의 중량은 $194.62 \pm 3.5g$, 과실의 직경은 $80.92 \pm 1.08mm$, 과실의 길이는 $92.15 \pm 1.84mm$, 과병의 직경은 $13.85 \pm 0.34mm$, 과병의 길이는 $72.15 \pm 0.81mm$ 인 것을 확인하였다.

105개의 파프리카를 분석한 결과, 파프리카의 전체 길이는 77.20mm~138.10mm의 범위에서 평균 105.62mm, 파프리카 과실의 길이는 67.40mm~110.50mm의 범위에서 평균 88.43mm로 측정되었다. 파프리카 과실의 상단 10% 직경은 62.00mm~94.00mm의 범위에서 평균 81.22mm, 파프리카 과실의 중심 직경은 64.00mm~103.00mm의 범위에서 평균 82.70mm, 파프리카 과실의 하단 10% 직경은 56.40mm~96.10mm의 범위에서 평균 77.88mm로 측정되었다. 중량은 110.51g~284.52g의 범위에서 평균 211.69g로 측정되었다.

파프리카 과실의 상단, 하단, 중심의 직경의 길이의 차이를 분석한 결과, 과실의 상단, 하단, 중심

의 길이는 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의미한 차이를 갖는다. 따라서 파프리카의 과실을 파지하는 그립퍼의 핑거부를 설계할 때 상단, 중심, 하단을 파지할 때 각 부분의 길이의 차이를 고려하여 파지하도록 설계하여야 한다.

105개의 파프리카를 분석한 결과, 파프리카 과병의 길이는 10.00mm~75.00mm의 범위에서 평균 52.99mm로 측정되었다. 파프리카 과병의 중심 직경은 4.20mm~15.00mm의 범위에서 평균 9.55mm로 측정되었으며, 파프리카 과병의 끝단 직경은 4.20mm~21.10mm의 범위에서 평균 13.37mm로 측정되었다. 과병의 둘레는 18.00mm~46.00mm의 범위에서 평균 33.56mm로 측정되었다. 이를 고려하여 엔드이펙터의 절단부의 크기 및 설치위치 등을 설계하여야 한다.

105개의 파프리카를 분석한 결과, 파프리카의 중량은 110.51g~284.52g의 범위이며 평균 211.69g로 측정되었는데, 중력가속도를 9.806m/s^2 로 계산하였을 때, 파프리카의 중량은 1.084N~2.790N의 범위이다. 따라서 엔드이펙터의 그립퍼는 평균 2.076N의 파프리카를 파지하고 이동하여야 한다. 엔드이펙터의 모터 및 구동력을 산출 할 때 파프리카의 중량을 고려하여 설계하여야 한다.

파프리카 과실의 압축강도는 31.87N~97.08N의 범위에서 평균 65.01N으로써, 단위면적으로 나누게 되면 $18.04\text{N/cm}^2 \sim 54.96\text{N/cm}^2$ 의 범위에서 평균 36.81N/cm^2 의 압축강도가 측정되었다. 최소값과 최대값의 차이가 36.92N/cm^2 로써 특정 파프리카에서는 훼손되지 않는 힘으로 파지하였다고 하더라도 다른 파프리카는 훼손될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 파프리카의 훼손 정도에 따라 상품성이 크게 달라지므로 파프리카 과실의 훼손을 줄이기 위해 엔드이펙터의 그립퍼가 파지상태를 유지하기 위한 최소의 파지력으로 파지하여 수확하여야 한다. 그리고 단위면적당 받는 힘이 커질수록 파프리카의 훼손이 발생하므로, 엔드이펙터의 그립퍼가 파프리카 과실에 주는 힘을 면적에 따라 분산하여 파지할 수 있도록 파프리카의 과실과 접촉하는 그립퍼의 핑거부의 면적을 크게 하여 단위면적당 받는 힘을 분산시킬 수 있도록 하여야 한다. 또한 압력에 의한 과실의 훼손을 최소화하기 위하여 그립퍼의 파프리카 과실 파지 시 파지하는 힘의 정도를 세밀히 조절 및 제어할 수 있어야 한다.

30개의 파프리카의 과병의 접도의 절단날을 이용하여 측정한 절단강도는 22.16N~67.76N의 범위에서 40.99N의 평균값으로 측정되었다. 파프리카 과병은 측정된 절단강도의 최대값인 67.76N보다 큰 힘을 이용하여 절단되어야 하므로 그에 맞게 엔드이펙터의 절단부의 모터의 선정 및 설계가 이루어져야 한다.

파프리카는 수광량에 따라, 적게는 14개에서 많게는 40개까지 착과한다. 실제 농가 조사 및 연구실 내 온실의 파프리카 착과 조사를 통하여, 한 주당 9.8개의 과실이 착과된다는 것을 확인하였다.

- 엔드이펙터의 기초 설계

1. 수확 작업 시 훼손을 최소화하기 위한 엔드이펙터 설계

파프리카의 수확작업 시 엔드이펙터의 성능은 수확작업의 능률에 매우 중요한 영향을 미치므로, 다음과 같은 설계기준을 두고 설계하였다. 첫째, 공간상에서 원활하게 움직이며 작업하기 위하여, 엔드이펙터는 경량이어야 한다. 둘째, 파프리카 과실의 파지 및 과병의 절단 시 작업 대상에 상해를 주지 않아야 한다. 셋째, 온습한 온실 환경에서 작업이 이루어지므로 습기에 대하여 내부식

성이 있어야 한다. 넷째, 고장으로 인한 수리 및 소제(掃除)를 위해 구조가 간단하고, 작업 중 변형이 없어야 한다. 다섯째, 실제 농가 환경에서 사용하기 위하여 부품 및 제작 원가가 경제적이어야 한다.

파프리카의 특성을 분석하여, 파프리카의 훼손을 최소화하기 위한 엔드이펙터의 설계요인으로 삼았다. 파프리카 과실의 훼손이 시작되는 파프리카 과실의 압축강도는 31.87N~97.08N의 범위에서 평균 65.01N으로써, 단위면적으로 나누게 되면 18.04N/cm²~54.96N/cm²의 범위에서 평균 36.81N/cm²이다. 재배된 파프리카 하나하나의 압축강도는 다르게 나타나는데, 엔드이펙터의 그립퍼의 파지작업 시 일률적인 파지력으로 파프리카를 수확하게 되면 파프리카의 훼손이 발생 할 수 있다. 따라서 엔드이펙터의 그립퍼가 파지작업을 할 때, 측정된 압축강도인 31.87N의 힘보다 작은 힘인 25N의 힘으로 파지를 하되, 엔드이펙터의 세밀한 파지작업을 위하여 파프리카와 접촉하는 파프리카의 핑거부에 압력센서를 부착하여 그립퍼가 파프리카 과실을 파지하는 정도를 측정하여 세밀한 파지작업이 가능하게 하여 파프리카 과실의 훼손을 최소화 하겠다.

또한, 파프리카 과실의 상단 10% 직경은 62.00mm~94.00mm의 범위에서 평균 81.22mm, 파프리카 과실의 중심 직경은 64.00mm~103.00mm의 범위에서 평균 82.70mm, 파프리카 과실의 하단 10% 직경은 56.40mm~96.10mm의 범위에서 평균 77.88mm로 엔드이펙터의 그립퍼의 핑거부를 설계할 때 각 직경을 고려하여 설계하였다.

또한, 과병의 훼손을 최소화 하기 위하여, 측정된 과병의 특성인 평균 52.99mm의 과병의 길이와 평균 13.37mm의 파프리카 과병의 끝단 직경을 고려하여 엔드이펙터의 절단부를 설계하였다. 파프리카 과병은 최대 67.76N의 힘을 주었을 때 절단 되므로, 절단력을 고려하여 엔드이펙터의 절단부의 모터를 선정하고, 설계하였다.

2. 엔드이펙터의 기하학적 메카니즘 설계

국제표준인 ISO-10218-1에 의한 엔드이펙터의 표준 요구사항은 다음과 같다.

a. 에너지 공급(즉, 전기, 유압, 공압, 진공 공급)의 손실 또는 변화로 인하여 위험조건이 발생할 수 있는 부하 방출이 유발되지 않도록 해야 한다.

b. 부하 및 엔드이펙터로 인하여 생성되는 정적 및 동적 힘이 로봇의 부하용량 및 동적응답 범위 내에 있도록 한다.

c. 팔목판(wrist plates, 설치 플랜지)과 부속물이 적절하게 정렬되어야 한다.(결합되어야 한다.)

d. 분리가능한 공구가 사용 중에 단단하게 고정되어 있어야 한다.

e. 엔드이펙터의 예상 수명 동안 예상되는 힘을 견딜 수 있어야 한다.

f. 분리가능한 공구의 분리작업은 분리로 인하여 위험 상황을 유발할 수 있는 경우에, 지정된 장소 또는 구체적이고 제어된 조건하에서만 이루어져야 한다.

g. 시스템에 동작에너지를 공급하지 않은 상태에서 수리 목적으로 전원을 엔드이펙터에 공급할 수 있어야 한다.

h. 기계적으로 보호되는 공압 또는 진공 호스, 스프링이 장착된 부가적 잡는 장치와 같이 자체 유보 장치 등과 같이 위험조건을 회피 할 수 있는 수단이 제공되어야 한다.

엔드이펙터를 설계 할 때, 상기 국제표준인 ISO-10218-1에 의거하여 엔드이펙터의 기하학적 메카니즘을 설계 하여야 한다.

파프리카 수확작업기의 엔드이펙터는 인간의 손에 해당되는 부분이다. 본 연구에서 엔드이펙터는 파프리카의 과실을 파지하고 과병을 절단하는 작업을 실제로 수행하는 부분이다. 그립퍼는 손가락 또는 손 전체로 물건을 잡는 일을 할 경우에 주로 사용되는 로봇의 손을 지칭하는 용어이고, 엔드이펙트는 작업 공구를 로봇 손의 위치에 부착하여 손 대신 사용할 때에 부르는 용어이다.

산업현장에서 사용되고 있는 엔드이펙터는 요구되는 작업의 종류에 따라 형태가 다양하다. 그림 349은 산업현장에서 사용되고 있는 대표적인 엔드이펙터의 형태를 나타낸 것이다.



그림 349 엔드이펙터의 형태

엔드이펙터는 그림 349와 같이 손가락의 수, 그리고 각 손가락의 관절의 수에 따라 특징이 나뉜다. 그림 351에서 모터에 의해 하나의 관절이 제어되는 것처럼, 손가락과 관절의 수에 따라 손이 할 수 있는 일의 범위가 결정되기 때문이다.



그림 350 엔드이펙터의 관절 및 손가락의 수

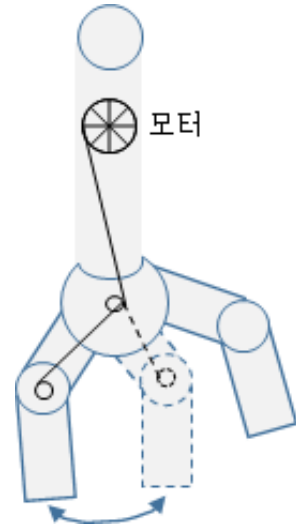


그림 351 모터에 의한 관절 제어

본 시스템의 엔드이펙터는 파프리카의 과실을 파지하는 그립퍼와 파프리카의 과병을 절단하는 절단부로 구성된다. 수확 작업 시 훼손을 최소화하기 위하여 선정된 설계기준에 따라 시스템의 엔드이펙터는 공간상에서 원활하게 움직이며 작업하기 위하여, 경량이어야 한다. 따라서, 그립퍼의 손가락 및 관절의 개수를 최소화하여 엔드이펙터를 경량화 하여야 한다.

3. 엔드이펙터의 기초 설계

효과적인 엔드이펙터의 제작을 위하여, 다양한 모델의 엔드이펙터를 고려하였다. 고려한 엔드이펙터는 실제 농가의 조언을 토대로 개선하였다. 그림 352는 초기 고려한 엔드이펙터의 모델이다.

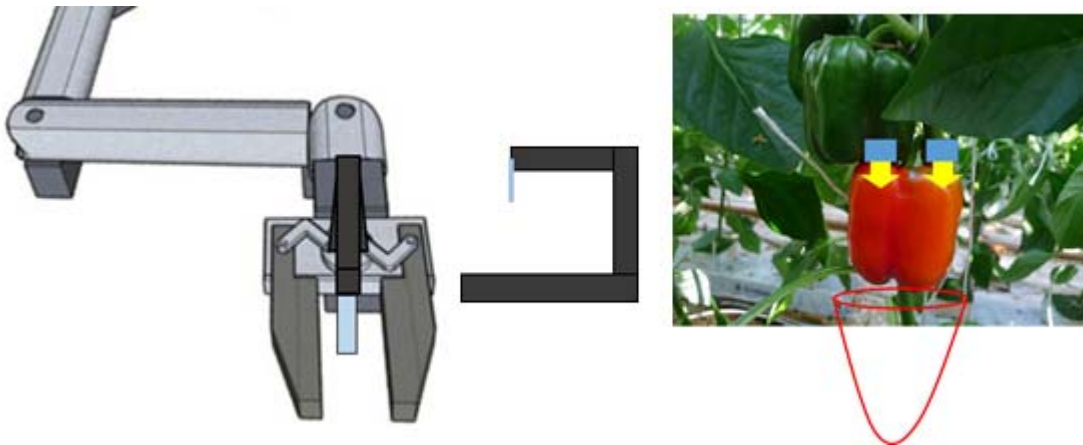


그림 352 초기 엔드이펙터 구상도

파프리카의 훼손을 최소화하기 위하여, 그립퍼 형태로 파프리카를 잡은 뒤, 절단하는 것이 아닌 절단 후 망에 떨어트리는 형태로 진행하고자 하였으나, 한 주당 10개 내외의 과실이 맺는 파프리카의 착과밀도와 수확을 위하여 과실에 접근 시 작업 대상에 훼손을 줄 수 있다는 농가의 조언을 고려하여 설계 방향을 변경하였다.

그림 353는 시스템 1의 Autodesk의 Autocad 2016을 이용하여 엔드이펙터의 그립퍼를 설계한 모습이다.

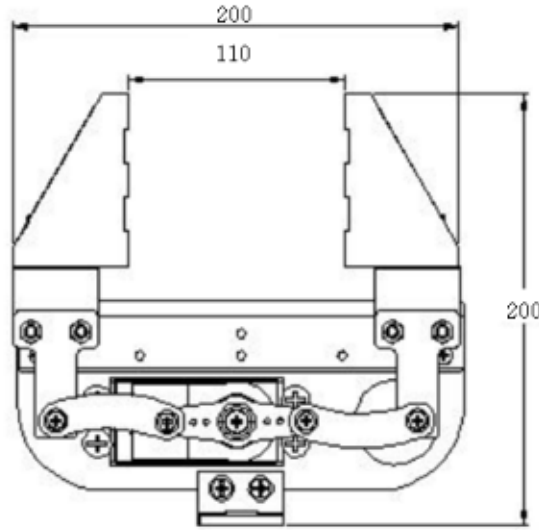


그림 353 시스템 1의 그립퍼 설계도

설계 기준 중 첫 번째인 ‘공간상에서 원활하게 움직이며 작업하기 위하여, 엔드이펙터는 경량이어야 한다.’에 부합되도록 그립퍼의 재질은 PP판으로 설계하였다. 구동을 최소화하기 위하여 하나의 모터에 의하여 파지동작이 가능하게 하였고, 파프리카의 과실을 파지하기 위하여 최대 100mm까지 벌어지도록 하였다.

시스템 2는 파프리카 과실의 훼손을 최소화하기 위하여, 파프리카 과실과 접촉하는 엔드이펙터의 그립퍼의 접촉면에 접촉센서 및 압력센서를 부착하여 설계하였다.

영상처리 과정을 통하여 파프리카를 인식하고, 인식 후 엔드이펙터를 파프리카 과실 쪽으로 접근하여 파프리카 과실을 파지한다. 파지할 때, 중심 측 접촉면에 있는 접촉센서가 파프리카 과실의 위치를 확인시켜 주고, 좌·우측의 접촉면에 있는 압력센서가 파프리카 과실에 주어지는 힘을 감지한다. 그림 354은 Autodesk의 Autocad 2016을 이용하여 설계한 시스템 2의 설계도이며, Autodesk의 Inventor 2015을 이용하여 그림 355과 같이 3차원 설계하였다.

파프리카 과실의 상단 10% 직경은 62.00mm~94.00mm의 범위에서 평균 81.22mm, 파프리카 과실의 중심 직경은 64.00mm~103.00mm의 범위에서 평균 82.70mm, 파프리카 과실의 하단 10% 직경은 56.40mm~96.10mm의 범위에서 평균 77.88mm로, 과실 및 과실의 부위에 따라 직경이 달라진다. 따라서 시스템 2의 그립퍼는 최대 120mm에서 최소 50mm까지 동작이 가능하도록 설계하였다.

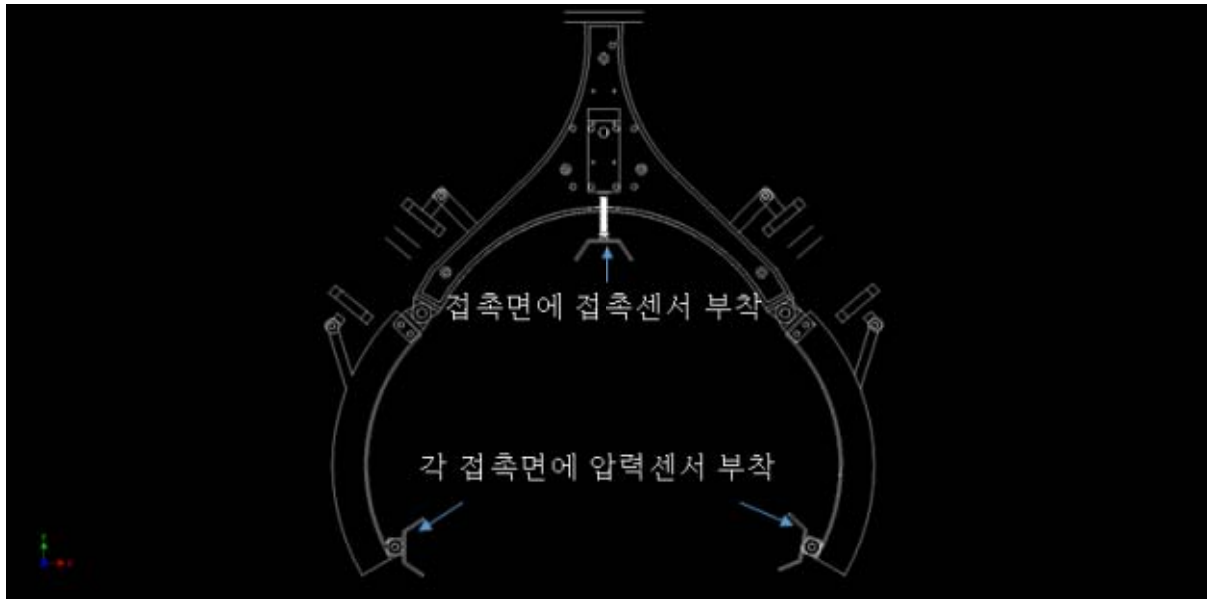


그림 354 시스템 2의 설계도

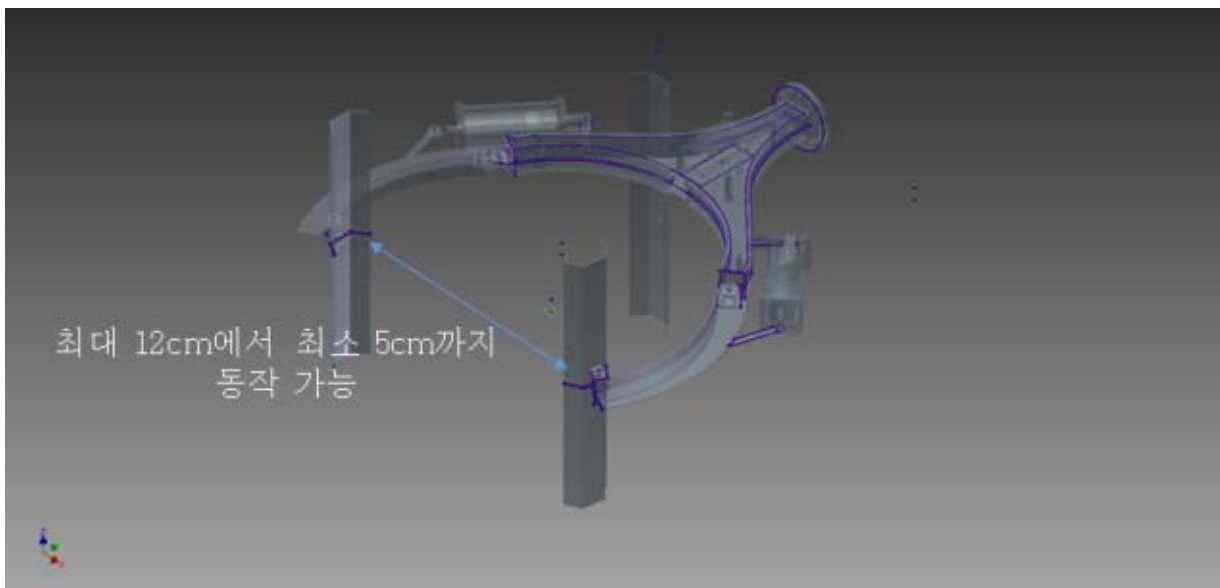


그림 355 시스템 2의 3차원 형태

그림 356은 공간상에서의 원활한 작업을 위하여, 엔드이펙터의 관절을 최소화 하고, 경량화한 시스템 3의 3차원 설계도를 나타낸다.



그림 356 관절을 최소화한 1자유도 엔드이펙터

Autodesk의 Inventor 2015을 이용하여 설계하였으며, 엔드이펙터를 경량화하기 위하여 재질을 PP판으로 설정하였다.

3. 파프리카의 직경 측정 알고리즘 설계

파프리카의 물성을 분석한 결과, 파프리카 과실의 상단 10% 직경은 62.00mm~94.00mm의 범위에서 평균 81.22mm, 파프리카 과실의 중심 직경은 64.00mm~103.00mm의 범위에서 평균 82.70mm, 파프리카 과실의 하단 10% 직경은 56.40mm~96.10mm의 범위에서 평균 77.88mm로 측정되었다. 엔드이펙터의 그립퍼의 파프리카 과실의 훼손을 최소화한 파지 작업을 위해서는 파프리카 과실의 직경을 정확히 측정하여 파지 동작을 진행하여야 한다. 물성 측정한 결과를 토대로 최대 직경인 103.00mm보다 크게 엔드이펙터의 그립퍼의 손가락과 손가락 사이를 설계하여야 한다. 그림 357와 같이 접촉센서와 압력센서를 이용하여 파프리카의 직경을 측정한다.

영상처리 과정을 통하여 파프리카를 인식하고, 인식 후 엔드이펙터를 파프리카 과실 쪽으로 접근하여 파프리카 과실을 파지한다. 파지할 때, 중심 측 접촉면에 있는 접촉센서가 파프리카 과실의 위치를 확인시켜 주고, 좌·우측의 접촉면에 있는 압력센서가 파프리카 과실에 주어지는 힘을 감지한다.

엔드이펙터의 그립퍼의 크기, 접촉센서 및 압력센서를 이용한 측정 등의 기구학적인 파프리카의 직경 측정이외에도, 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식 시스템을 통하여, 영상처리 과정을 통하여 파프리카 직경 측정하도록 한다.

파프리카 수확을 위한 파프리카 인식 시스템의 영상처리 순서도는 그림 358과 같다.

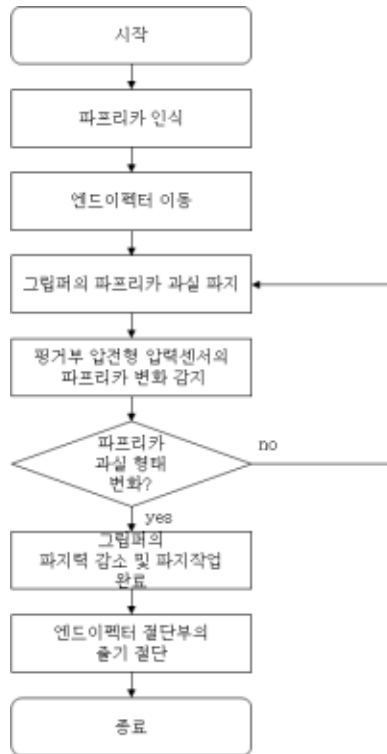


그림 357 파프리카의 직경 측정

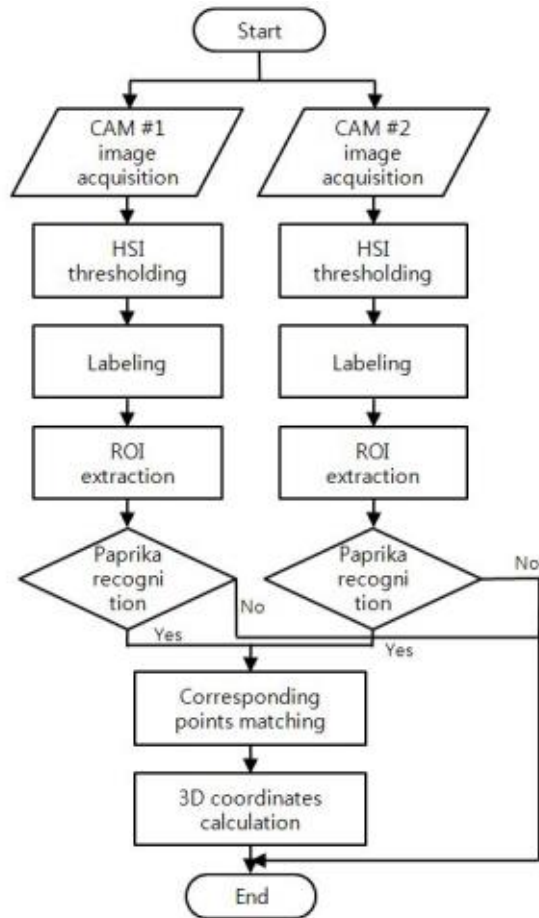


그림 358 영상처리 순서도

- 엔드이펙터 부분제작

1. 엔드이펙터의 구성 부품 선정 및 부분 제작

기초 설계한 결과를 토대로 엔드이펙터를 부분제작하였다.

그림 359은 시스템 1의 실제 제작된 그립퍼의 사진이다.



그림 359 시스템 1의 그립퍼

설계 기준 중 첫 번째인 ‘공간상에서 원활하게 움직이며 작업하기 위하여, 엔드이펙터는 경량이어야 한다.’에 부합되도록 그립퍼의 재질은 PP판을 사용하였다. 제작은 CNC 조각기를 사용하였다. 구동을 최소화하기 위하여 하나의 모터에 의하여 파지동작이 가능하게 하였고, 보완 및 수정이 용이하도록 탈부착이 가능하도록 3mm 볼트로 고정하였다. 파프리카의 과실을 파지하기 위하여 최대 100mm까지 벌어지도록 하였다.

엔드이펙터의 모터 및 부착 센서를 제어하기 위하여 ATmega328 프로세서를 이용하는 Arduino uno를 선정하였다. 표 13.은 선정한 Arduino uno의 사양을 나타낸다. 아두이노 우노의 경우 5V 동작 전압으로 구동 가능하며, 14개의 입출력 핀을 사용할 수 있다. 그 중 6개의 PWM 출력 핀을 통해 PWM 제어가 가능하다. 또한 6개의 아날로그 입력 단자가 존재한다. 그림 360은 Arduino uno의 외형이며, 그림 361는 Arduino uno의 회로도이다.



그림 360 Arduino Uno

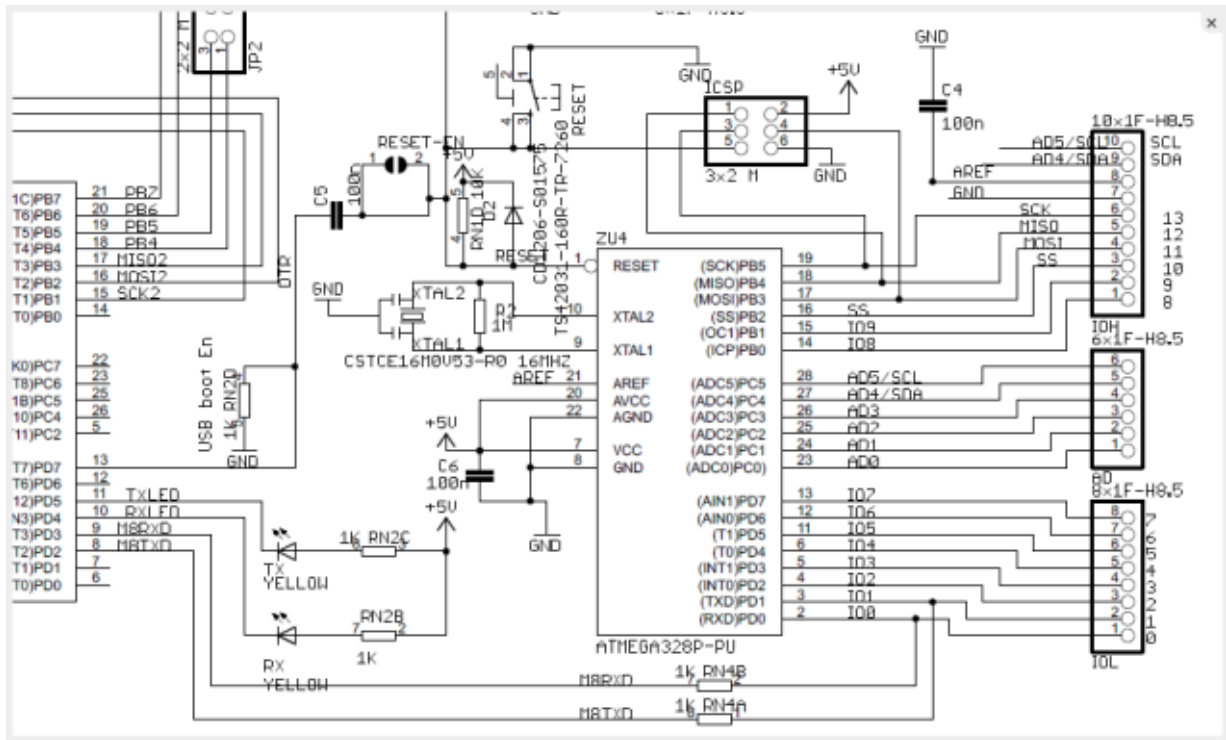


그림 361 Arduino Uno의 회로도

표 13. Arduino uno의 사양

Micro controller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage	7-12V
Input Voltage(limits)	6-20V
Digital I/O pins	14(of which 6 provide PWM output)
Analog Input pins	6
DC Current per I/O pin	40mA
DC Current for 3.3V pin	50mA
Flash Memory	32KB(ATmega328) of which 0.5KB used by bootloader
SRAM	2KB(Atmega328)
EEPROM	1KB(Atmega328)
Clock Speed	16MHz
Length	68.6mm
Width	53.4mm
Weight	25g

파프리카의 과실은 3.25kgf와 9.90kgf 사이의 강도에서 과실이 발생하므로, 과실의 훼손을 최소화하기 위하여 세밀한 힘 조절이 가능한 모터가 선정되어야 한다. 세밀한 그립퍼의 파지 작업을 위하여 선정한 모터는 그림 362과 같으며, 세부적인 사양은 표 14와 같다.



그림 362 RB-150MG SERVO의 모습

표 14. RB-150MG SERVO의 사양

Control System	+ Pulse Width Control 1500usec Neutral
Operating Voltage	5-7.2 Volts
Operating Temperature Range	0 to +60 Degree C
Operating Speed (6.0V)	0.16sec/60°at no load
Operating Speed (7.2V)	0.14sec/60°at no load
Stall Torque	13kg·cm (5.0V);15kg·cm(6.0V);16kg·cm (7.2V);
Current Drain (6.0V)	7.9mA/idle and 180mA no load operating
Current Drain (7.2V)	15.8mA/idle and 220mA no load operating
Dead Band Width	10usec
Connector Wire Length	300mm

파프리카 과실과 엔드이펙터의 그립퍼의 접촉을 감지하기 위한 접촉 센서를 디지털 접촉 감지 터치센서 HD-DFR0030으로 선정하였다. 엔드이펙터를 파프리카에 접근시켰을 때, 그립퍼와 파프리카의 접촉을 감지하여, 시스템의 정밀한 작업이 가능하도록 하겠다. 그림 363는 본 연구에서 선정한 접촉센서이며, 그림 364는 선정한 센서의 회로도이다. 표 15는 접촉센서의 사양을 나타낸다.

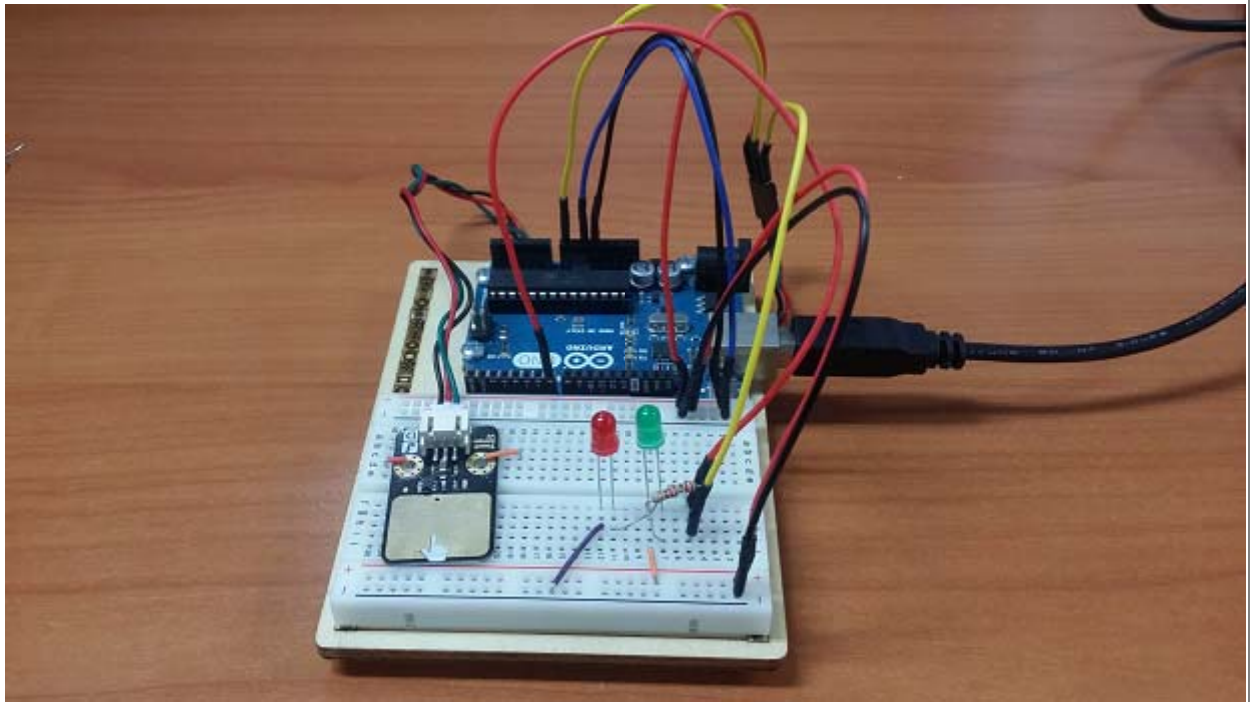


그림 363 HD-DFR0030

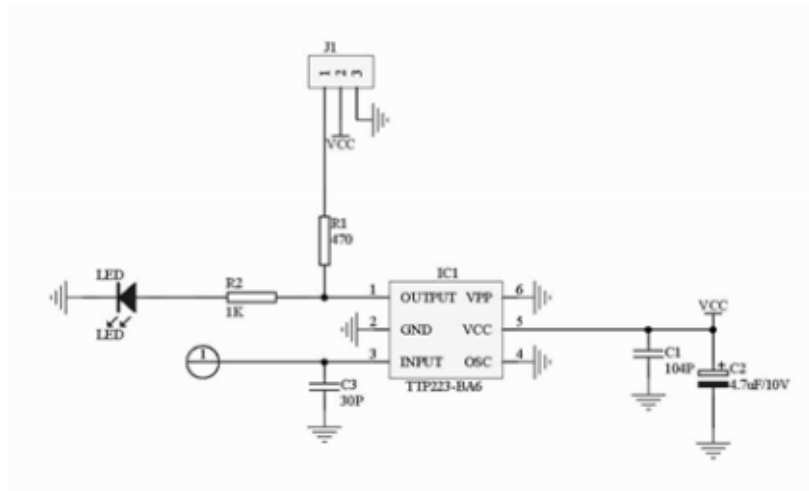


그림 364 HD-DFR0030의 회로도

표 15. HD-DFR0030의 사양

타입	digital
특징	사람의 인체와 금속 감지 가능
공급 전압	DC 3.3V ~ 5V
크기	22 by 30 mm
중량	3g

Arduino Uno에서 HD-DFR0030을 이용하여 접촉을 감지하기 위한 프로그래밍 코드는 아래 와 같다.

```

intledPin = 13; // Connect LED on pin 13, or use the onboard
one
intKEY = 2; // Connect Touch sensor on Digital Pin
2
voidsetup(){
pinMode(ledPin, OUTPUT); // Set ledPin to output mode
pinMode(KEY, INPUT); //Set touch sensor pin to input mode
}
voidloop(){
if(digitalRead(KEY)==HIGH) { //Read Touch sensor signal
digitalWrite(ledPin, HIGH); // if Touch sensor is HIGH, then turn
on
}
else{
digitalWrite(ledPin, LOW); // if Touch sensor is LOW, then turn off the
led
}
}
}

```

파프리카 과실의 압축강도는 31.87N~97.08N의 범위에서 평균 65.01N으로써, 단위면적으로 나누게 되면 18.04N/cm²~54.96N/cm²의 범위에서 평균 36.81N/cm²의 압축강도가 측정되었다. 최소값과 최대값의 차이가 36.92N/cm²로써 특정 파프리카에서는 훼손되지 않는 힘으로 파지하였다고 하더라도 다른 파프리카는 훼손될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 파프리카의 훼손 정도에 따라 상품성이 크게 달라지므로 파프리카 과실의 훼손을 줄이기 위해 엔드이펙터의 그립퍼의 파지작업 시 그립퍼와 파프리카 과실 사이에 작용하는 압력의 정도를 면밀히 감시할 필요가 있다. 영상처리 과정을 통하여 파프리카를 인식하고, 인식 후 엔드이펙터를 파프리카 과실 쪽으로 접근하여 파프리카 과실을 파지할 때, 파프리카 과실에 주어지는 힘을 감지하는 좌·우측의 접촉면에 부착할 압력센서를 그림 365와 같은 Flexiforce Pressure Sensor SEN0136으로 선정하였다. Flexiforce Pressure Sensor SEN0136은 최대 110N까지 측정할 수 있기 때문에, 파프리카가 파손하는 최대 압축강도인 97.08N까지 무난히 측정가능하다. 그림 366은 Flexiforce Pressure Sensor SEN0136의 회로도이며, 표 16은 Flexiforce Pressure Sensor SEN0136의 사양을 나타낸다.



그림 365 Flexiforce Pressure Sensor SEN0136

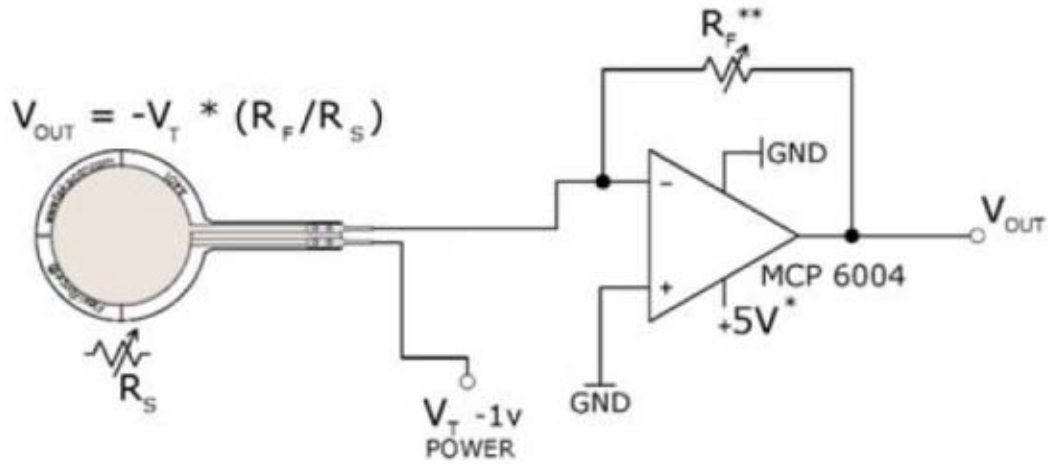


그림 366 SEN0136의 회로도

표 16. SEN0136의 사양

Sensing Area	25.4mm diameter
Connector	2-pin Male Square Pin
Force Range	0 - 110N
Linearity (Error)	< ±3%
Repeatability	< ±2.5% of full scale
Response Time	< 5µsec

그림 367은 시스템 3의 실제 제작된 그림퍼의 모습이다. 공간상에서의 원활한 작업을 위하여, 엔드 이펙터의 관절을 최소화하였고, 재질을 PP판으로 하여 경량화 하였다. 표 17은 시스템 3의 사양을 나타낸다.



그림 367 시스템 3의 그림퍼

표 17. 시스템 3의 사양

Issue	Description
Size (WxH, mm)	120 x 500
Arm Length (mm)	470
Weight (g)	1020
Operating	5 DOF (Servo Motor)

2. 엔드이펙터의 기초 실험

시스템 3을 이용하여, 엔드이펙터와 파프리카 간 거리 추적에 대하여 실험하였다. 엔드이펙터와 파프리카 과일 간의 거리 추적 실험은 임의의 목표의 지점을 설정한 후 10회 반복하였다. 실험 평균값을 역기구학적으로 해석한 예상값과 비교하였다. 실제로 이동한 좌표를 기준으로 역기구학적으로 해석한 예상값과 비교하였다.

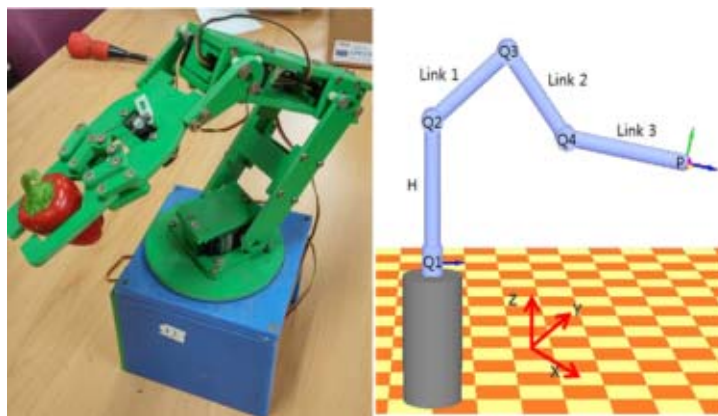


그림 368 시스템3의 역기구학

표 18은 엔드이펙터와 파프리카 과일 간의 거리 추적 실험의 예상값과 측정값의 위치를 비교한 것이며 그림 369은 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

표 18. 예상값과 측정값의 위치 비교

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
실제 거리 (mm)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
접근 거리 (mm)	14	30	22	21	45	40	45	50	65	60

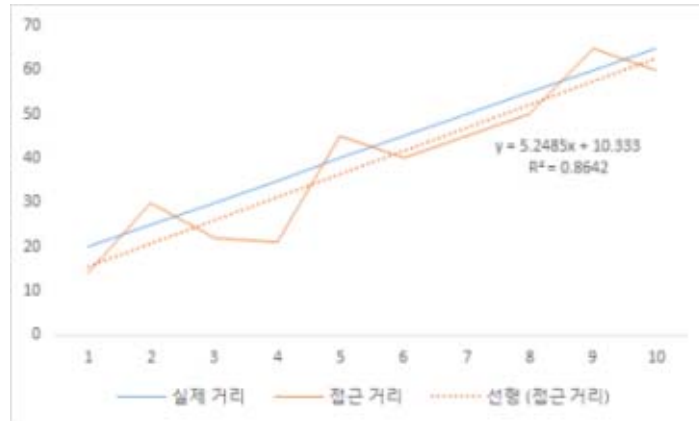


그림 369 예상값과 측정값 비교

시스템 3은 DOF의 값이 5로, 상기 실험을 진행한 결과 실제 거리와 접근 거리의 오차가 적게는 5mm에서 크게는 14mm가 발생하였다. 엔드이펙터는 작업 시, 파프리카 과실의 파지 및 과병의 절단 시 작업 대상에 상해를 주지 않아야 하는데, 파프리카로 접근할 때 접근 거리에 오차가 발생하게 되면 작물에 상해를 입히기 쉽다. 따라서 엔드이펙터의 파프리카 접근 동작을 오차거리가 발생하지 않도록 엔드이펙터 및 매니플레이터의 자유도를 줄이고, 세밀하고 정밀하게 이루어 질 수 있도록 시스템을 개선하여야 한다.

SEN0136 압력센서의 특성을 분석하기 위하여, 표 19와 같이 무게별 출력 전압을 측정하였다. 압력센서의 측정 대상으로 1kg, 1.5kg, 2.5kg, 3kg, 5kg, 7kg, 10kg의 중량원판을 사용하였다. 그림 371은 측정에 사용한 중량원판과 압력센서이다. 각 무게마다 총 5회 측정하여 평균을 산출하였다.

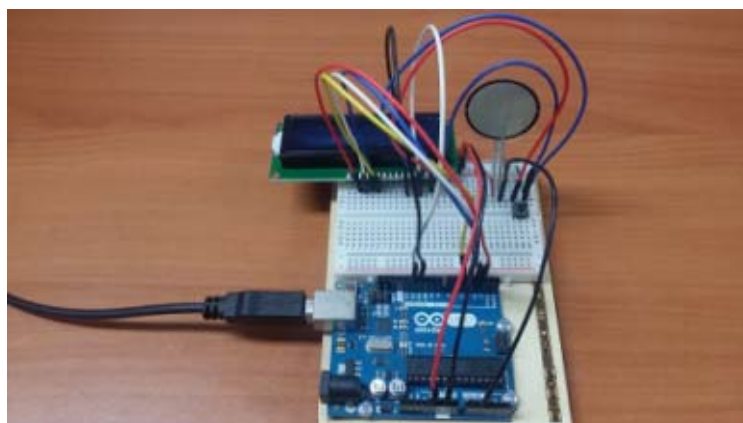


그림 371 압력센서 특성 분석을 위한 중량원판 및 압력 센서

표 19. 압력센서의 무게별 출력 전압 측정

결과 값	출력 전압
측정 무게	1kg, 1.5kg, 2.5kg, 3kg, 5kg, 7kg, 10kg
반복 횟수	5회

압력센서의 무게별 출력 전압 측정을 측정함으로써 실제 엔드이펙터의 그림퍼가 파프리카 과실을 파지할 때 파지하는 압력을 측정할 수 있도록 하였다. 압력센서의 무게별 출력 전압은 그림 372와 같다.

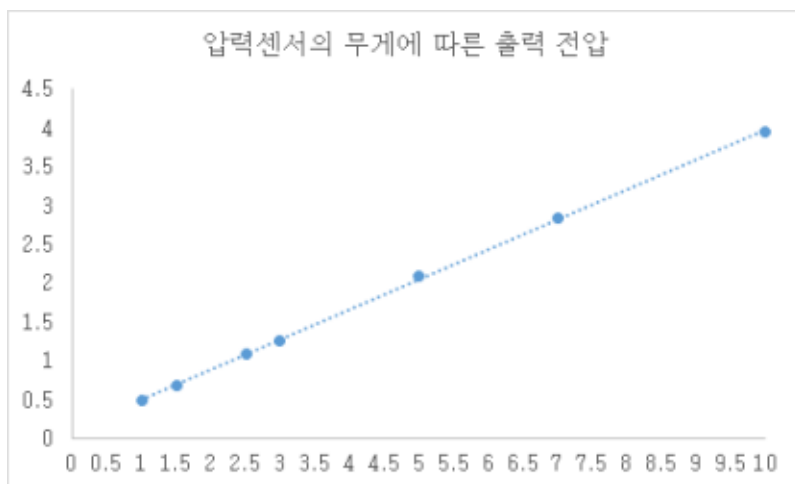


그림 372 압력센서의 무게별 출력 전압

표 20. 압력센서의 무게별 출력 전압

Force(kg)	1	1.5	2.5	3	5	7	10
Volts(V)	0.5	0.70	1.09	1.27	2.09	2.84	3.96

측정한 결과를 이용하여 전압에 따른 압력을 예측하기 위하여 아래와 같은 회귀식을 구할 수 있었다.

$$x = g \times (2.5927y - 0.3254)$$

x : 압력
 g : 중력 가속도
 y : 전압

이를 통하여, 압력센서에서 변화되는 전압을 측정하여 가해지는 압력을 구할 수 있다. 압력 센서의 최소 측정 무게인 1kg에서 최대 측정 무게인 10kg까지 결정계수 0.9998로 높은 신뢰도가 높음을 확인하였다.

○ 파프리카 훼손 없는 수확 작업을 위한 절단 작업 시스템의 매니플레이터 부분 제작

- 매니플레이터 설계를 위한 파프리카 재배 환경 조사

1. 국내 파프리카 농가의 파프리카 재배 환경

파프리카는 2013년 575ha가 재배되고 있는데 그 중 100%, 즉 전부가 시설환경에서 재배 되고 있다. 시설환경 중 유리온실(자동화·비닐 온실 재배 겸용 포함) 재배 농가는 25%, 자동화 온실(비닐 온실 재배 포함) 재배 농가는 57%, 비닐온실 재배 농가는 18%를 차지한다.

유리온실은 경상남도와 전라남도를 제외하면 평균 14,876㎡ 이상으로 규모가 크다. 경기도, 충청남도, 경상북도의 유리온실 농가 수는 적지만, 규모는 19,834㎡ 이상이며, 경상남도와 전라남도의 유리온실 농가 수는 비교적 많지만, 규모는 경상남도 6,611㎡, 전라남도 9,917㎡ 내외이다. 재배 농가가 57%로 가장 많은 자동화 온실은 강원도, 경상남도의 평균 재배면적이 6,611㎡ 내외이며, 전라남도는 6,611㎡ 내외이다. 전라북도는 5,619㎡ 정도에서 자동화 온실로 재배되고 있다. 자동화 온실은 시설 단가가 낮기 때문에 다른 온실들이 자동화 온실로 전환되고 있다. 비닐 온실은 강원도, 전라북도, 경상북도에서 주로 운영되고 있다. 비닐온실의 경우 난방 효율이 낮기 때문에 여름작형 재배에 이용되고 있다. 표 21은 (사)한국파프리카생산자자조회에서 제공한 2013년 파프리카 농가의 시설형태별 재배면적과 농가 수를 나타낸다.

표 21. 2013년 파프리카 농가의 시설형태별 재배면적과 농가 수 단위 : 평, 호(%)

지역	평균재배면적	시설형태					
	농가 수	유리온실	유리+자동화	유리+비닐	자동화온실	자동화+비닐	비닐온실
경기	6,873	6,873	-	-	-	-	-
	2(100.0)	2(100.0)	-	-	-	-	-
강원	2,105	4,567	5,350	-	2,102	2,000	1,460
	75(100.0)	3(4.0)	2(2.7)	-	48(64.0)	2(2.7)	20(26.7)
충남	6,848	6,848	-	-	-	-	-
	3(100.0)	3(100.)	-	-	-	-	-
전북	2,724	4,587	22,300	-	1,700	1,550	1,287
	48(100.0)	12(25.0)	1(2.1)	-	13(27.1)	6(12.5)	16(33.3)
전남	2,883	2,929	4,733	-	2,810	-	1,467
	49(100.0)	14(28.6)	3(6.1)	-	27(55.1)	-	5(10.2)
경북	3,222	7,100	-	-	5,000	-	1,860
	10(100.0)	2(20.0)	-	-	1(10.0)	-	7(70.0)
경남	2,135	2,103	3,058	2,500	2,134	2,000	1,947
	161(100.0)	23(14.3)	17(10.6)	2(1.2)	102(63.4)	1(0.6)	16(9.9)
제주	4,571	5,320	-	-	2,700	-	-
	6(100.0)	5(83.3)	-	-	1(16.7)	-	-
전체 농가수	354(100.0)	64(18.1)	23(6.5)	2(0.6)	192(54.2)	9(2.6)	64(18.1)

국내 파프리카의 평균 재실밀도는 3.75주/㎡으로, 파프리카 한 주와 한 주 사이의 거리는 30cm 내외이다.

실제 농가의 파프리카 재배 환경을 조사하기 위하여, 경기 고양시에 위치한 한국농원과 경북 구미시에 위치한 구미원에농단 등에 방문하여 실제 농가의 파프리카 재배 환경을 조사하였다. 그림

373은 실제 농가의 파프리카 재배 환경을 조사하는 모습이다.



그림 373 실제 농가의 파프리카 재배 환경 조사

실제 온실 내의 파프리카는 지상으로부터 최소 60cm에서부터 착과가 되어, 무작위로 착과된다. 또한 한줄기에서 세 개 내외의 열매가 착과된다. 그림 374와 같이 파프리카 각 주 당 식재 간격은 30cm이다. 또한, 각 이랑 간의 간격은 1m 내외였다. 표 22는 실제 농가 환경에서 조사한 파프리카의 식재간격 등을 나타낸다.



그림 374 파프리카의 식재 및 이랑 간격

표 22. 실제 농가 환경에서 조사한 파프리카 재배 환경

수확 방법	과병의 이음새를 절단함 (그 외의 부위는 목질이라 절단 X)
수확 범위	최소 착과 높이 60cm부터 무작위 간격, 두줄기 재배, 한줄기에 세 개 열매 착과
식재 간격	30cm 내외
이랑 간격	100cm 내외
생장 길이	최대 400cm

실제 농가 환경을 조사한 결과, 파프리카를 수확하는 엔드이펙터를 파프리카에 근접하도록 이동시키고, 수확된 파프리카를 이동시키는 매니플레이터의 작업반경을 그림 375와 같이 확인하였다.

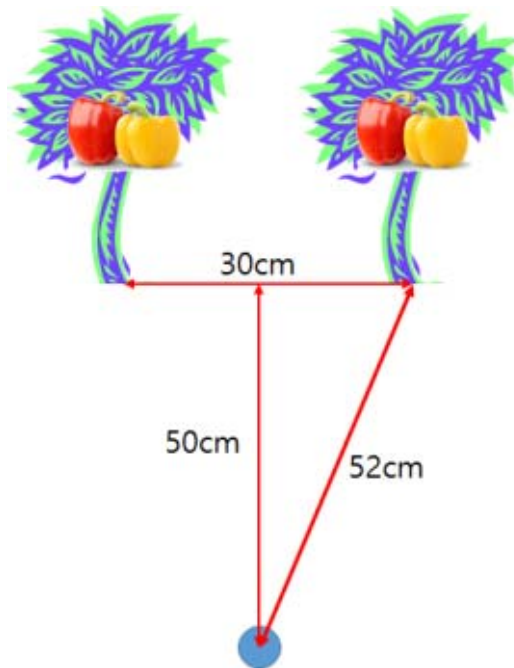


그림 375 매니플레이터의 작업 반경

실제 농가 환경을 조사하여 매니플레이터의 작업반경을 확인한 결과, 온실 내 파프리카의 최소 착과 높이 60cm, 식재 간격 30cm, 최대 생장 길이 400cm를 고려하여 매니플레이터를 설계 하여야 한다.

- 매니플레이터 설계

1. 매니플레이터의 기하학적 메카니즘 설계

파프리카 수확기를 위한 매니플레이터를 설계하기 위해서는 파프리카 온실 내에서의 작업반경 및 작업환경을 고려하여 매니플레이터의 형태를 선정하여야 한다. 매니플레이터의 형태는 3축 로봇을 기준으로 하였을 때, 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

■ 직교좌표형(Cartesian)

- 구성된 관절은 미끄럼 관절로 서로 수직하며 직교좌표 X,Y,Z축과 대응한다.
- 각 관절이 디커플(decouple)되어 서로의 움직임에 독립적이기 때문에 축의 움직임이 서로의 움직임에 영향을 받지 않는다.
- 매우 강한 강성(stiff)을 가지며, 로봇의 설계가 간단하다.
- 목표지점과 경로, 좌표의 계산을 위한 역기구학의 해를 간단히 구할 수 있다.
- 모든 공급 장치와 고정구가 로봇의 내부에 있어야 하며, 로봇의 부피가 커질 수 있다.
- 그림 376은 직교좌표형의 예를 나타낸다.

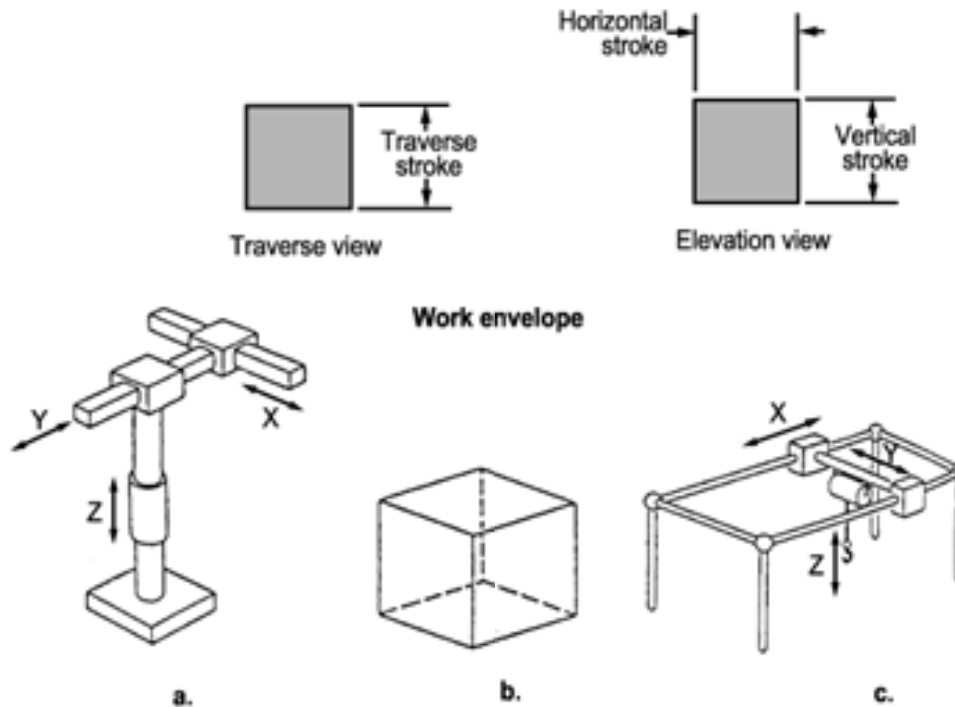


그림 376 (a)직교좌표형 구성 (b)직교형 매니퓰레이터가 동작하는 작업영역 (c)직교좌표형 매니퓰레이터의 예

■ 다관절형(Articulated)

- 의인형(anthropomorphic)이라고도 하며, 회전관절만을 일정한 길이를 갖는 링크들로 연결한 형태이다.
- 사람의 팔과 유사하여 다양한 자세와 접근경로를 나타낼 수 있다.
- 그림 377은 다관절형의 예를 나타낸다.

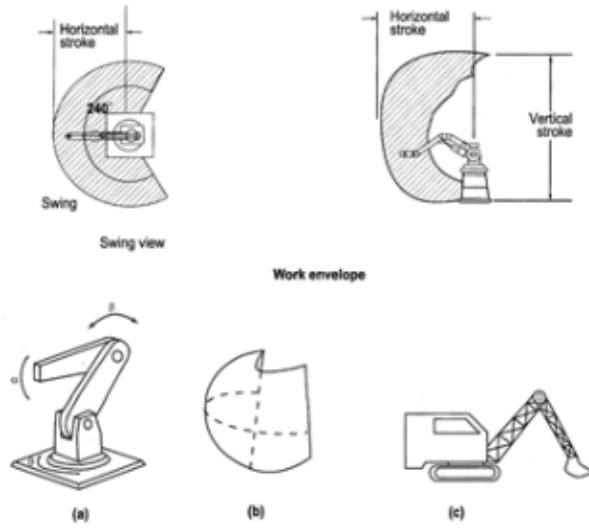


그림 377 (a)다관절형 구성 (b)다관절형 매니퓰레이터가 동작하는 작업영역 (c)다관절형 매니퓰레이터의 예

■ 스카라형(SCARA)

- 수평형(Horizontal)이라고도 하며, 관절이 모두 지면에 수직인 형태로 구성되어 중량이 크거나 중력의 영향을 적게 받기 위해 설계한다.
- 3개의 평행인 회전 관절을 갖고 있어서 평면 내에서 움직이면서 방위를 잡을 수 있으며, 네 번째의 미끄럼 관절은 말단 효과 장치를 평면에 수직으로 움직이게 한다.
- Z축을 중심으로 회전관절에 링크(Link)를 연결하여 링크의 끝에 직선관절을 연결한다.
- 2개의 회전형 축과 한 개의 직선형 축을 가진다.
- 그림 378은 스카라형의 예를 나타낸다.

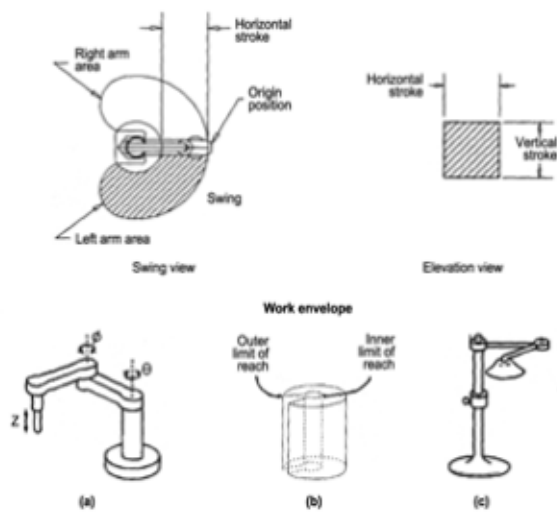


그림 378 (a)수평형 구성 (b)수평형 매니퓰레이터가 동작하는 작업영역 (c)수평형 매니퓰레이터의 예

■ 구형(Spherical)

- 관절형 매니플레이터와 유사하나 팔목 관절이 하나의 미끄럼 관절(직선 관절)로 대체되었다.
- 2개의 회전관절에 하나의 직선관절로 구성된다.
- 로봇의 작업공간, 즉 엔드이펙터가 접촉할 수 있는 공간이 반구(hemisphere)로 표현된다.
- 그림 379는 구형의 예를 나타낸다.

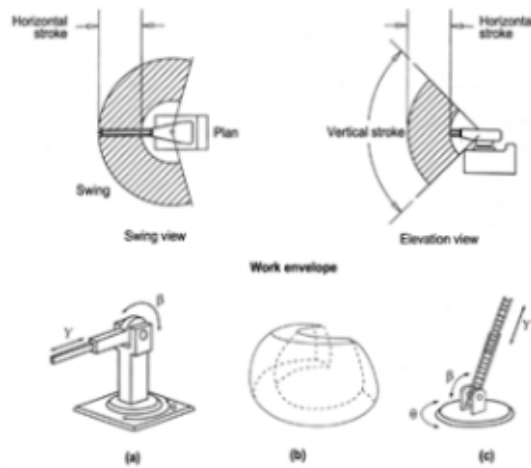


그림 379 (a)구형 구성 (b)구형 매니플레이터가 동작하는 작업영역 (c)구형 매니플레이터의 예

■ 원통형(Cylindrical)

- 팔을 움직이기 위한 미끄럼 관절과 수직축을 가진 회전 관절로 이루어져 있다.
- 작은 공간 활용에 적합하다.
- 그림 380은 원통형의 예를 나타낸다.

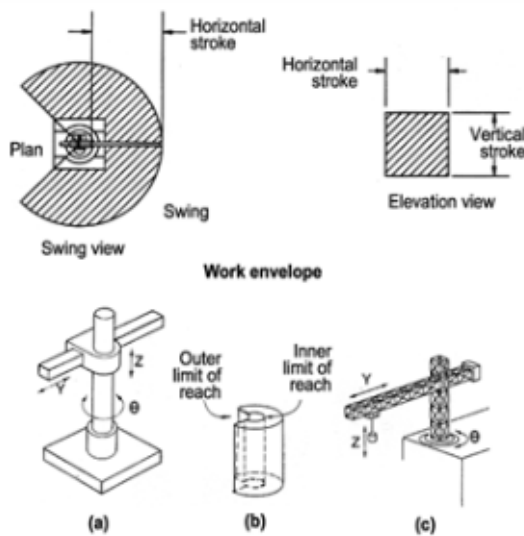


그림 380 (a)원통형 구성 (b)원통형 매니플레이터가 동작하는 작업영역 (c)원통형 매니플레이터의 예

n 개의 링크를 가진 매니퓰레이터가 외부환경과 접촉하는 경우, 매니퓰레이터의 엔드이펙터에서 느끼는 접촉력을 f 라고 하면, 시스템의 동역학은 다음과 같다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + H(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) + J^T(q)f$$

q, \dot{q}, \ddot{q} 는 각각 $n \times 1$ 관절의 위치, 속도 및 가속도 벡터이다. τ 는 구동기에 의해 공급되는 $n \times 1$ 관절 토크 벡터이다. $M(q)$ 는 대칭이고 정칙(positive definite)인 $n \times n$ 관성 행렬을 나타내며, $H(q, \dot{q})$ 는 $n \times 1$ 원심력 및 전향력 벡터이다. $g(q)$ 는 중력을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이고, $J(q)$ 는 $n \times n$ 자코비안 행렬이다.

파프리카 온실의 작업환경은 그림 381과 같으며, 재배환경은 다음과 같다.

- 수확 범위 ; 최소 착과 높이 60cm부터 무작위 간격, 두줄기 재배, 한줄기에 세 개 열매 착과
- 식재 간격 ; 30cm
- 이랑 간격 : 96cm~98cm

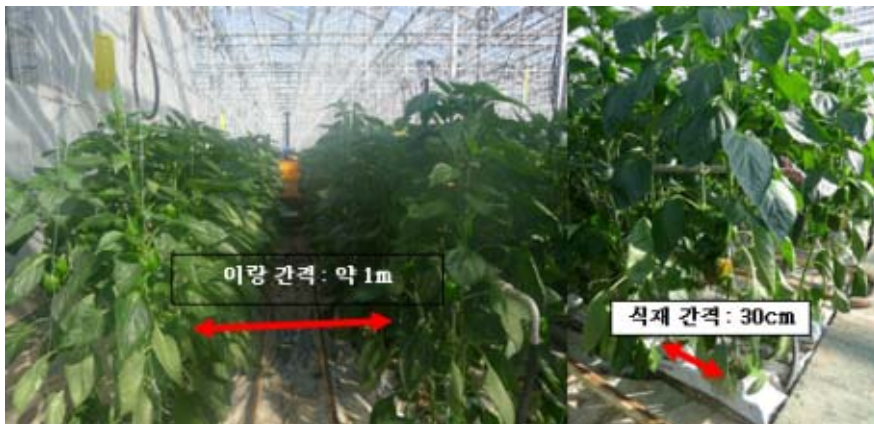
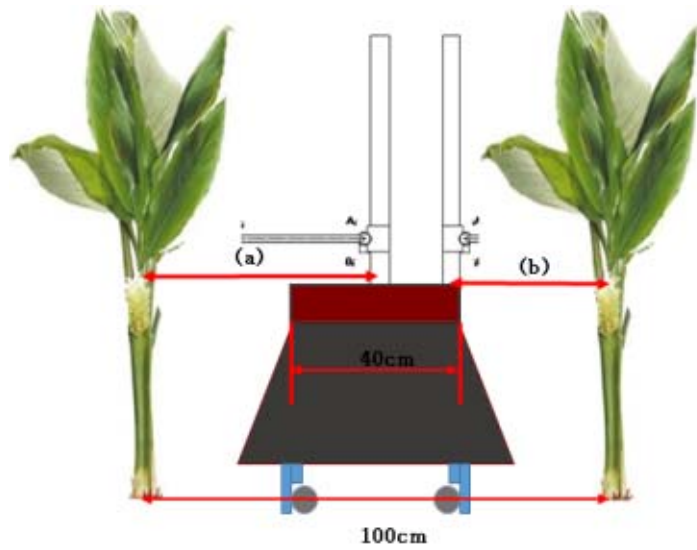


그림 381 파프리카 온실의 작업환경

파프리카 온실의 작업환경을 고려하여 매니퓰레이터의 설계기준을 세워야 한다. 첫째, 연약하고 상해를 입기 쉬운 작물에 접근하는 매니퓰레이터이기 때문에, 매니퓰레이터의 움직임이 거추장(cumbersome)스럽지 않고, 파프리카에 접근할 때 최적의 경로로 정밀·조밀(compact)하여야 한다. 둘째, 본 연구개발을 통한 매니퓰레이터는 온실에서의 주행을 위한 주행시스템 위에 부착된다. 본 연구개발의 주행시스템은 레일주행식 리프트형식을 기반으로 개발한다. 셋째, 대상 작물인 파프리카의 최소 착과 높이는 지면으로부터 60cm로, 매니퓰레이터의 최소 작업 높이가 60cm이 하여야 한다. 넷째, 파프리카는 최대 4m까지 자라기 때문에 매니퓰레이터가 4m까지 작업이 가능 하여야 한다. 본 연구개발의 매니퓰레이터는 최대 4m까지 상승이 가능한 레일 리프트 위에 탑재 되기 때문에 최대 작업 높이가 4m가 아니어도 된다. 파프리카 온실의 이랑 간격, 매니퓰레이터가 탑재될 본 시스템의 주행시스템의 크기를 고려하여 매니퓰레이터와 대상작물의 간격을 설정하면 그림 382와 같다.



(a) 리프트 중심 ↔ 작물 : 50cm

(b) 리프트 끝단 ↔ 작물 : 30cm

그림 382 매니플레이터와 대상작물의 간격

다섯째, 실제 농가 환경에서 사용하기 위하여 부품 및 제작 원가가 경제적이어야 한다. 매니플레이터의 형태 별 작업 반경 및 특징과 파프리카 온실의 작업환경을 고려하였을 때, 매니플레이터의 부피가 커서는 안되며, 파프리카 수확을 위하여 접근이 용이하여야 한다. 이에 가장 적합한 매니플레이터의 형태는 매니플레이터의 형태 5가지 중 원통형과 직교형의 결합된 형태라 판단한다. 그림 383은 제작할 매니플레이터의 개념도이다.

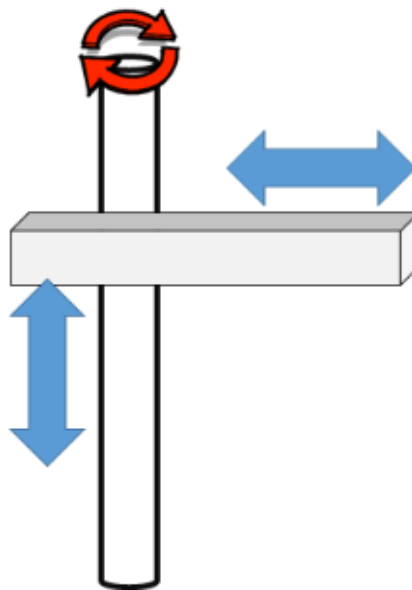


그림 383 매니플레이터의 개념도

2. 매니플레이터의 기초 설계 및 구성부품 선정

파프리카 온실의 작업환경을 고려하여, 파프리카의 최대 성장 높이에 맞는 매니플레이터를 설계하여야 한다. 파프리카는 최대 3m까지 성장하나, 매니플레이터가 운반차 위에 올라가도록 제작하기 때문에, 높이는 그에 맞도록 설계하였다. 운반차는 최대 3m까지 올라갈 수 있기 때문에, 운반차 위에서 동작할 매니플레이터의 높이는 파프리카의 성장높이인 3m까지 없으므로, 매니플레이터의 높이는 1000mm로 설계하였다.

또한, 파프리카 온실 내 온실 이랑 간격을 고려하여 설계하여야 한다. 온실 이랑 간격은 1000mm 내외 이므로, 매니플레이터가 500mm 이내로 동작하도록 설계하였다.

개발 시스템의 매니플레이터는 원통형과 직교형의 결합된 형태이므로, 시스템의 상하운동을 담당할 볼나사의 선정이 중요하다.

볼나사(ball screw)란 운동용 나사의 일종으로, 나사 홈에 강구(steel ball)를 넣을 수 있도록 원호상으로 된 나선 홈을 가공한 형태이다. 이 나선 홈 부분이 서로 마주 보도록 맞추어 홈 사이로 강구를 연속적으로 삽입하여 볼의 구름 접촉에 의하여 나사 운동을 한다. 볼나사는 일반적인 나사에 비하여 마찰계수가 0.005 이하로 작다. 효율은 90% 이상이며, 수치 제어용 공작기계의 이송 나사 등에 쓰인다.

그림 384는 볼나사의 선정 방법을 나타낸다.

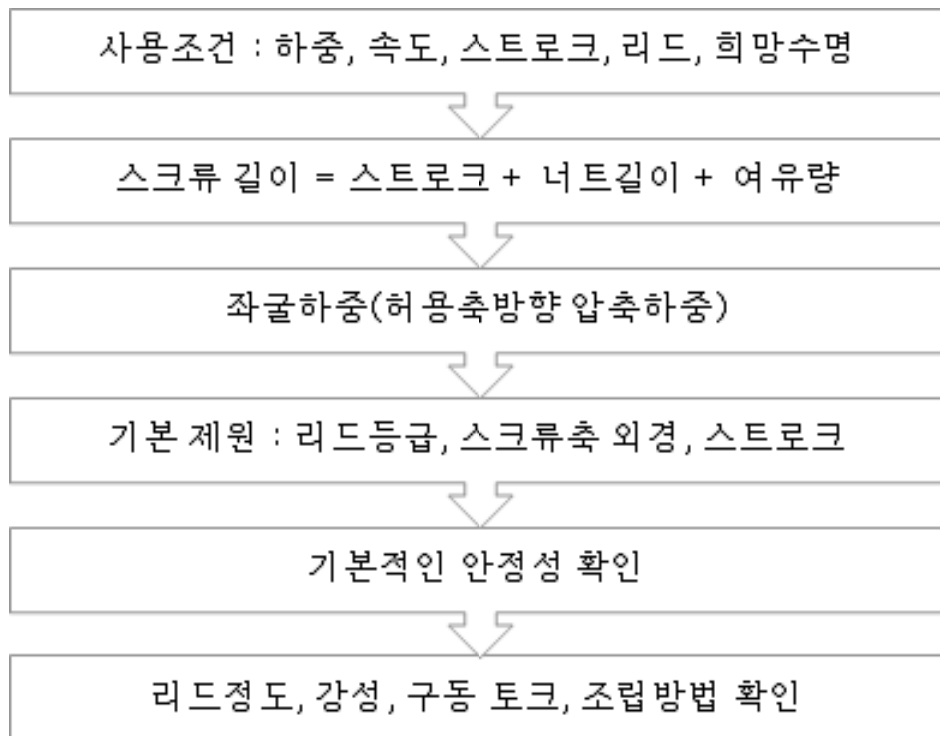


그림 384 볼나사의 선정 방법

본 시스템을 구동하기 위한 볼나사의 사용조건은 표 23과 같다.

표 23. 볼나사의 사용조건

반송방향	수직 방향 (vertical)
반송질량	18kg 이내
테이블안내방법	구름 나사
스트로크	1,000mm
희망수명시간	24h X 100day X 5years = 12000h
리드	$l \geq \frac{V_{\max}}{N}$: 5mm 이상
사용속도	10000mm/min : 0.2m/s

그림 385는 매니플레이터의 상하운동을 위하여 선정된 볼나사의 설계도이며, 그림 386은 선정된 볼나사의 3차원 설계도이다.

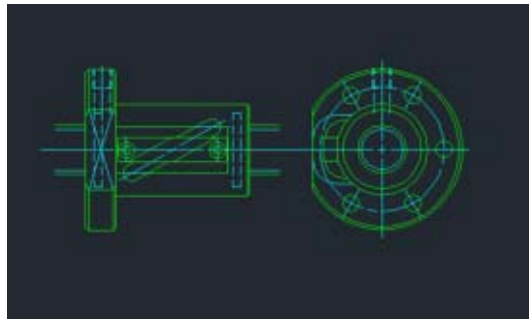


그림 385 볼나사의 설계도

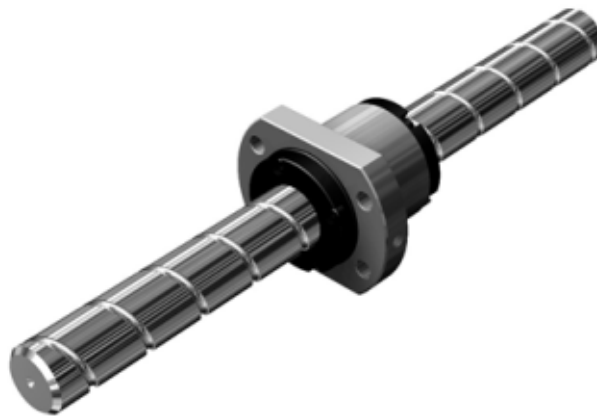


그림 386 볼나사의 3차원 설계도

모터 선정은 매니플레이터의 상하운동을 위한 동력원을 선정하는 것이므로 중요하다. 그림 387은 매니플레이터의 상하운동을 위한 모터의 선정 방법을 나타낸다.

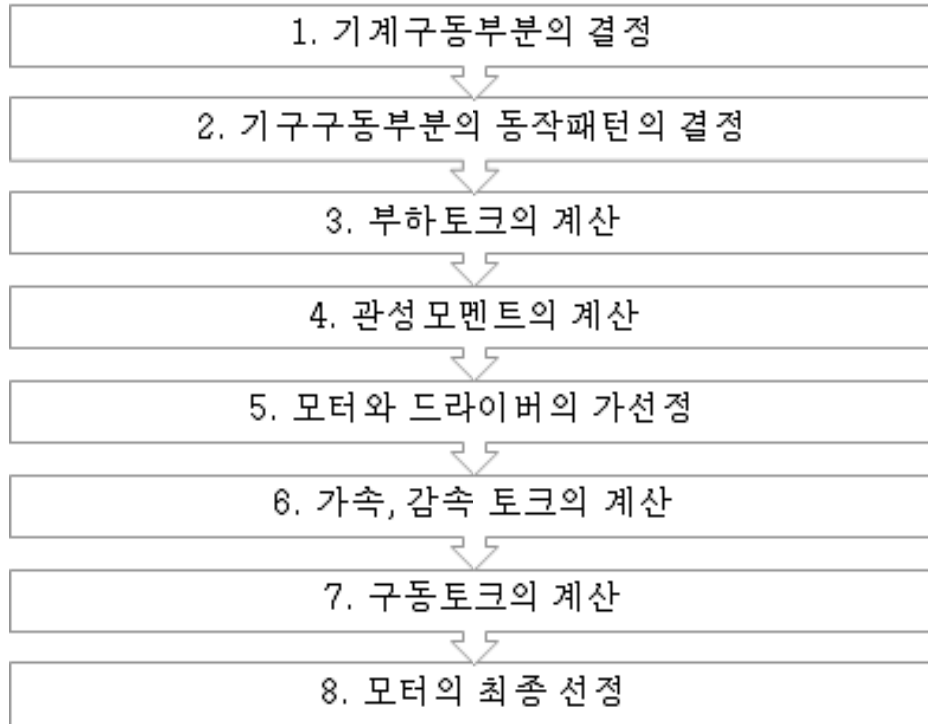


그림 387 모터의 선정 방법

모터의 선정 방법을 고려하여, 매니플레이터의 상하운동을 위한 모터를 그림 388과 같이 Panasonic MSMD022G1T 모터를 선정하였다. 표 24.는 선정한 모터의 사양을 나타낸다.



그림 388 Panasonic MSMD022G1T

모터의 선정 방법을 고려하여, 매니플레이터의 상하운동을 위한 모터를 그림 48.과 같이 Panasonic MSMD022G1T 모터를 선정하였다. 표 24.는 선정한 모터의 사양을 나타낸다.

표 24. Panasonic MSMD022G1T의 사양

AC 200V용 모터	
전원 설비 용량	0.5 kVA
정격 출력	200 W
정격 토크	0.64 N·m
순간 최대 토크	1.91 N·m
정격 전류	1.6 A (rms)
순간 최대 전류	6.9 A (o-p)
정격 회전 속도	3000 r/min
최고 회전 속도	5000 r/min
로터 관성 모멘트	$0.16 \times 10^{-4} kg \cdot m^2$
1회전 당 분해능	1,048,576
정마찰 토크	1.27 N·m 이상

개발 시스템의 매니플레이터는 원통형과 직교형의 결합된 형태로서, 매니플레이터의 파프리카로의 수평 접근은 직교 형태로 이루어진다. 파프리카 온실의 이랑 간격은 1000mm 내외 이므로, 매니플레이터의 수평방향 동작부의 길이는 500mm 이내로 설계하여야 한다. 수평운동을 위한 볼나사는 스트로크 500mm로 하여 그 외 사양은 상하운동을 위한 볼나사와 같다. 또한, 수평운동을 위한 모터는 상하운동을 위한 모터와 사양이 같다.

그림 389는 매니플레이터의 상하운동을 담당하는 부분을 Autodesk의 AutoCad 2016을 이용하여 설계한 모습이며, 그림 390은 매니플레이터의 수평운동을 담당하는 부분을 Autodesk의 AutoCad 2016을 이용하여 설계한 모습이다.

그림 391은 상하운동과 수평운동이 가능하도록 매니플레이터를 Autodesk의 AutoCad 2016을 이용하여 기초 설계한 도면이다. 그림 392는 상하운동과 수평운동이 가능하도록 기초 설계한 매니플레이터의 3차원 설계도이다.

온습한 온실환경에서 작업이 이루어지므로, 내부의 볼나사 등의 부품을 보호하기 위하여 차폐 형태로 설계하였다. 작업의 속도가 빠르고 정밀하여야하기 때문에, 매니플레이터를 경량화 하고자 재질을 알루미늄으로 설계하였다.

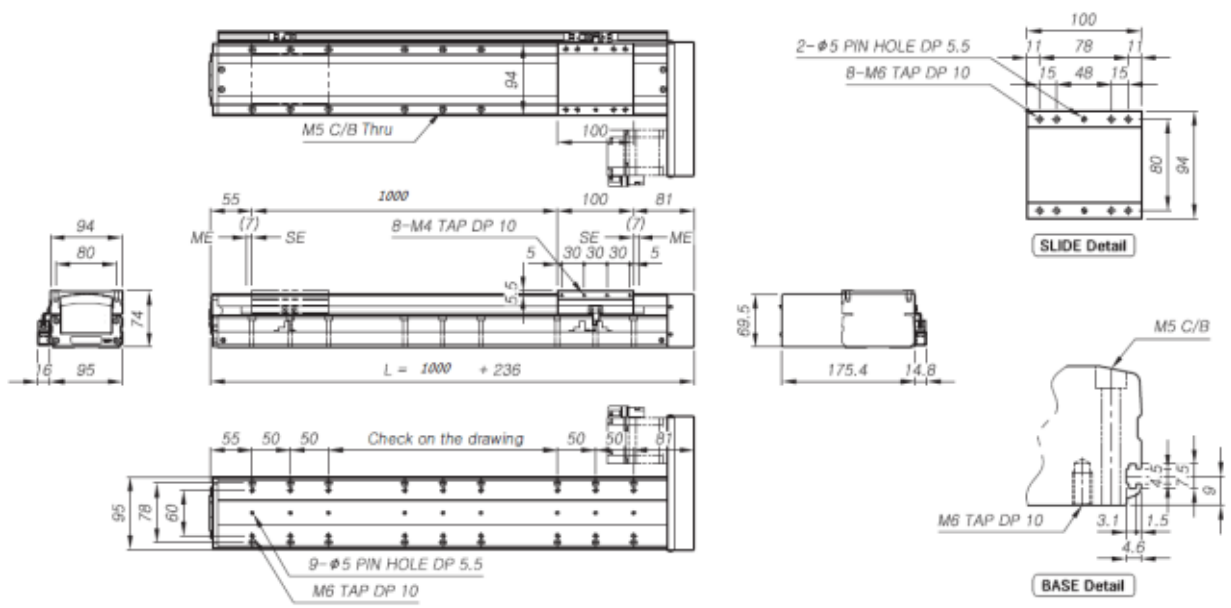


그림 389 매니플레이터의 상하운동

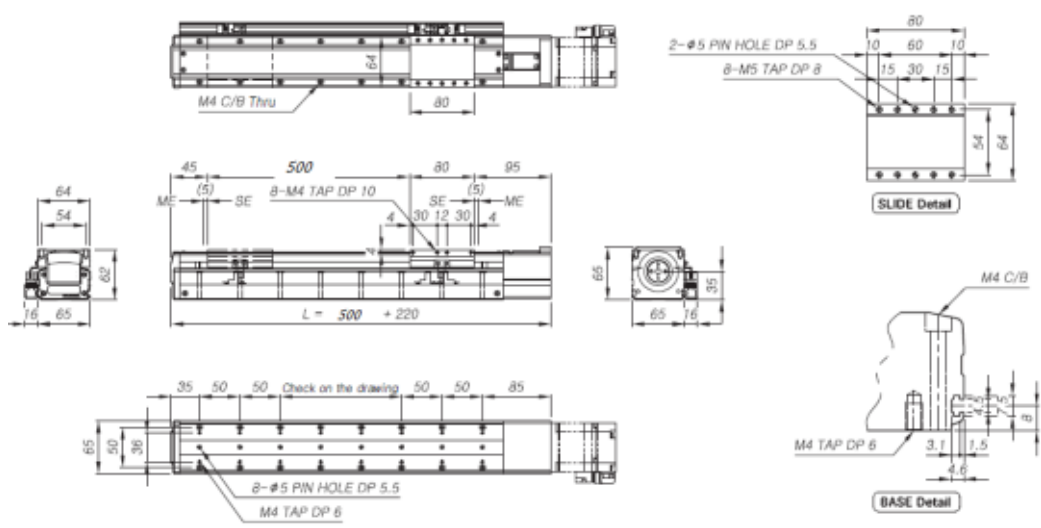


그림 390 매니플레이터의 수평운동



그림 391 매니플레이터의 기초 설계

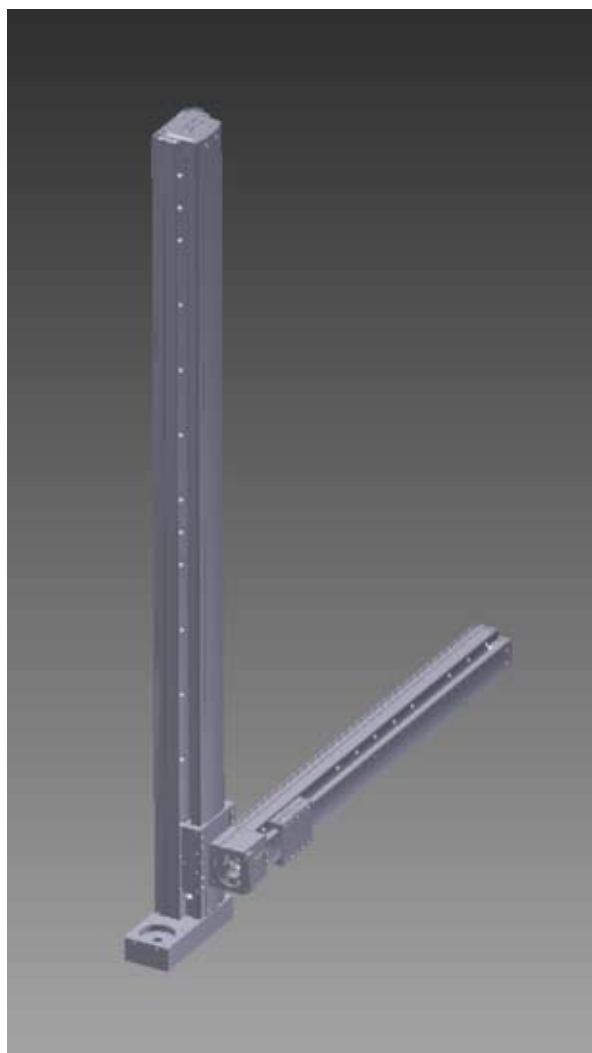


그림 392 기초 설계한 매니플레이터의 3차원 도면

- 매니플레이터 부분 제작

1. 매니플레이터의 부분 제작 및 기초 실험

기초 설계 및 구성 부품 선정된 결과를 토대로, 매니플레이터를 부분 제작하였다.

매니플레이터의 상하운동을 담당하는 수직방향의 볼나사의 리드는 10mm이며, 수직방향의 최대 하중은 18kg이다. 상하운동 시 최대 운송 속도는 500mm/s이며, 수직방향 이송 시 반복이송정밀도는 0.005mm이다. 연삭 Nut 및 축을 채용하여 정밀하며, 매니플레이터의 운동 시 소음이 적도록 하였다. 차폐 형태로 제작하여 온실환경에서의 내부식성을 높였다. 재질을 알루미늄으로 하여 경량화 하였다.

매니플레이터의 수평운동을 담당하는 수평방향의 볼나사의 리드는 10mm이며, 수평방향의 최대 하중은 25kg이다. 수평운동 시 최대 운송 속도는 500mm/s이며, 수평방향 이송 시 반복이송정밀도는 0.005mm이다. 연삭 Nut 및 축을 채용하여 정밀하며, 매니플레이터의 운동 시 소음이 적도록 하였다. 차폐 형태로 제작하여 온실환경에서의 내부식성을 높였다. 재질을 알루미늄으로 하여 경량화 하였다.



그림 393 매니플레이터의 부분 제작

그림 393은 매니플레이터를 부분 제작한 모습이다.

매니플레이터의 상하운동 및 수평운동의 동력원인 Panasonic MSMD022G1T의 제어를 위한 모터드라이버는 Panasonic MADHT1507로 선정하였다. 그림 394는 선정한 Panasonic MADHT1507의 모습이다.



그림 394 Panasonic MADHT1507

온습한 파프리카 온실 환경에서 매니플레이터의 작업이 이루어지므로, 매니플레이터의 모터드라이버가 온습한 파프리카 온실 환경에서 작동이 가능한지 확인하여야 한다. 매니플레이터의 모터드라이버의 환경 조건을 확인한 결과는 표 25와 같다.

표 25. 모터드라이버의 환경 조건

항목	조건
동작 온도	0℃ ~ 55℃ (비동결)
동작 습도	20% ~ 85% RH (비응축)
보관 온도	-20℃ ~ 80℃
보관 습도	20% ~ 85% RH (비응축)
진동	10Hz ~ 60Hz

파프리카 온실은 파프리카의 바른 생육을 위하여 18℃에서 27℃ 사이의 온도를 유지하여야 한다. 또한 작물 생장에 최적의 상대습도는 70% RH에서 80% RH이다. 모터드라이버의 환경 조건과 실제 파프리카 온실 내 환경을 비교한 결과, 선정한 Panasonic MADHT1507는 온실 내에서 매

니플레이터를 구동하는데 적합하다는 것을 확인 할 수 있었다.

매니플레이터의 제어를 위하여 마이크로 컨트롤러를 선정하여야 한다. 본 연구에서는 COMFILE TECHNOLOGY의 CPCV5-102BR을 이용하여 매니플레이터를 제어하고자 한다. 그림 395는 COMFILE TECHNOLOGY의 CPCV5-102BR이며, 표 26.은 COMFILE TECHNOLOGY의 CPCV5-102BR의 사양을 나타낸다.



그림 395 CPCV5-102BR

표 26. CPCV5-102BR의 사양

항목	CPCV5-102BR
CPU	Intel BayTrail-M N2930/ Quad Core/ 1.83GHz
RTC	Chipset Built-in RTC with Lithium Battery
Memory	SOMIMM DDR3L 4GB
Graphics	Intel HD Graphics, DVI Output port * 1
LCD	10.2inch, WVGA(800 by 480), 350cd/m ²
Backlight	White LED, LT :>20,000hr
Ethernet	2 * Gigabit Ethernet (Realtek RTL8111G)
USB	3 * USB 2.0, 1 * USB 3.0
HDD	m-SATA 128GB
Serial	2 * RS232C
Input Power	DC 12V
Power Consumption	<17W (1.4A@DC12V)
Weight	1.52kg
Operating Temperature	0℃~60℃

○ 파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템의 엔드이펙터 제작

- 엔드이펙터 제작

1. 엔드이펙터(End-effector)의 그립퍼(Gripper)의 최종 형태 선정

효과적인 수확작업을 수행하기 위해서는 엔드이펙터의 그립퍼의 성능이 매우 중요하므로 다음과 같은 설계기준을 두고 설계하였다. 첫째, 공간상에서 원활하게 움직이며 작업하기 위하여, 엔드이펙터는 경량이어야 한다. 둘째, 파프리카 과실의 파지 및 과병의 절단 시 작업 대상에 상해를 주지 않아야 한다. 셋째, 온습한 온실 환경에서 작업이 이루어 지므로 습기에 대하여 내부식성이 있어야 한다. 넷째, 고장으로 인한 수리 및 소제(掃除)를 위해 구조가 간단하고, 작업 중 변형이 없어야 한다. 다섯째, 실제 농가 환경에서 사용하기 위하여 부품 및 제작 원가가 경제적이어야 한다.

효과적인 그립퍼의 제작을 위하여, 다양한 모델의 엔드이펙터를 고려하였다. 파프리카의 훼손을 최소화하기 위하여, 그립퍼 형태로 파프리카를 잡은 뒤, 절단하는 것이 아닌 절단 후 망에 떨어트리는 형태로 진행하고자 하였으나, 한 주당 10개 내외의 과실이 맺는 파프리카의 착과밀도와 수확을 위하여 과실에 접근 시 작업 대상에 훼손을 줄 수 있다는 농가의 조언을 고려하여 설계 방향을 변경하였다.

그림 396은 시스템 1의 엔드이펙터의 그립퍼를 설계한 모습이며, 그림 397는 시스템 1의 실제 제작된 모습이다.

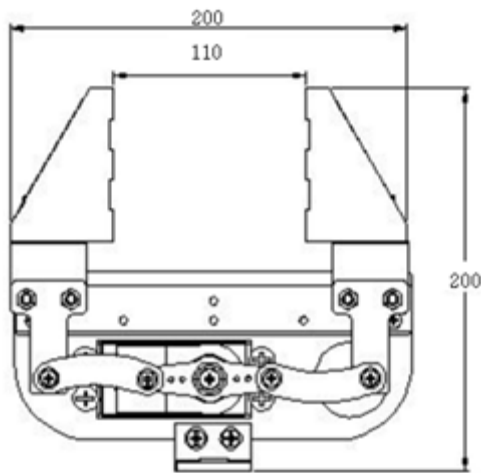


그림 396 시스템 1의 그립퍼의 설계도

그림 397 시스템 1의 그립퍼의 실제 제작 모습

시스템 1은 Autodesk의 Autocad 2016을 이용하여 설계하였으며, 제작은 CNC(Computer Numerical Control) 조각기를 이용하여 제작하였다. 엔드이펙터는 경량이어야 한다.’에 부합되도록 그립퍼의 재질은 PP(Polypropylene)판으로 제작하였다. 구동을 최소화하기 위하여 하나의 모터에 의하여 파지동작이 가능하게 하였고, 파프리카의 과실을 파지하기 위하여 최대 100mm까지 벌어지도록 하였다. 또한, 보완 및 수정을 용이하게 하기 위하여 분해 및 조립이 용이하도록 3mm의 볼트로 고정하였다.

그림 398는 시스템 2의 엔드이펙터의 그립퍼를 설계한 모습이며, 그림 399는 시스템 2의 실제 제작된 모습이다.

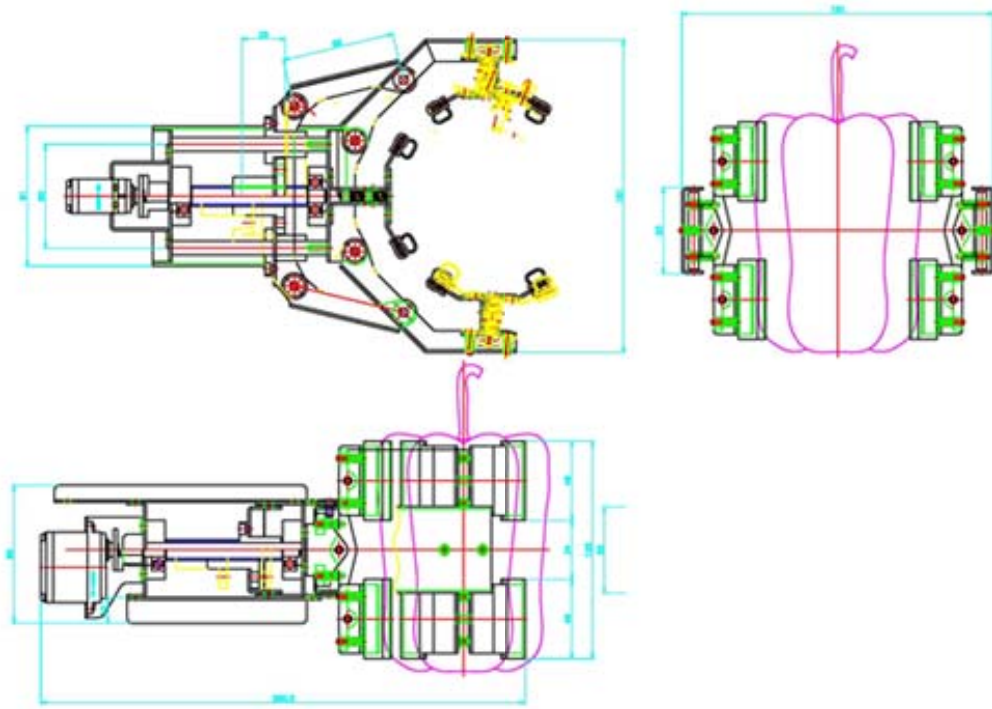


그림 398 시스템 2의 그립퍼의 설계도

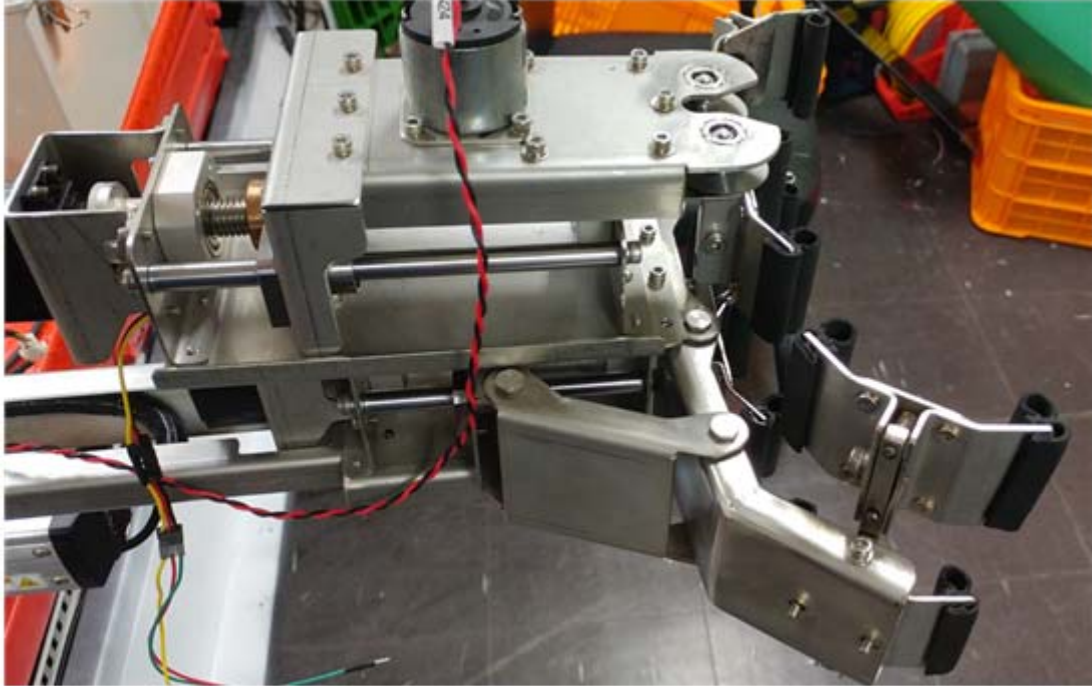


그림 399 시스템 2의 그립퍼의 실제 제작 모습

시스템 2는 Autodesk의 Autocad 2016을 이용하여 설계하였으며, 제작은 CNC(Computer Numerical Control) 조각기를 이용하여 제작하였다. 구동을 최소화하기 위하여 하나의 모터에 의하여 파지동작이 가능하게 하였고, 모터의 회전을 리드스크류를 통해 직선운동으로 바꾸도록 하였다. 또한 다관절 구조를 통하여 파지가 가능하도록 하였다. 각 기계요소들의 재질은 무게를 줄이고, 부식되지 않도록 하기 위하여 두랄루민을 사용하여 제작하였다.

그림 400은 시스템 3의 엔드이펙터의 그립퍼를 설계한 모습이며, 그림 401은 시스템 3의 실제 제작된 모습이다.



그림 400 시스템 3의 그립퍼의 설계도



그림 401 시스템 3의 그립퍼의 실제 제작 모습

시스템 3은 Autodesk의 Inventor 2015을 이용하여 설계하였으며, 엔드이펙터를 경량화하기 위하여 재질을 PP판으로 제작하였다. 공간상에서의 원활한 작업을 위하여, 엔드이펙터의 관절을 최소화하였다.

2. 엔드이펙터의 그립퍼의 구동 효율성 및 파프리카 훼손 비율 비교를 통한 개발 시스템의 그립퍼 최종 형태 선정

시스템 1,2,3 중 개발 시스템의 그립퍼의 최종 형태를 선정하기 위하여 각 실험 시스템의 파지 성공률과 파지 시 파프리카의 훼손 유무를 실험하였다.

그립퍼의 파지 성공률과 파지 시 파프리카의 훼손 유무를 알기 위하여 파프리카를 실험재료로 사용하였다. 본 실험에 사용된 파프리카는 강원도 철원군 김화농협 산지유통센터에서 생산하여 판매한 빨간색 파프리카와 노란색 파프리카를 각각 108개씩 총 216개를 사용하였다. 그림 402은 실험에 사용한 파프리카의 모습이다.



그림 402 김화농협 산지유통센터에서 생산한 적색, 황색 파프리카

그림 403은 성능 평가를 위하여 사용한 실험장치이다.



그림 403 실험 장치

실험장치는 높이 조절이 가능한 카피스텐드로 최대 높이 700mm에서 파프리카를 명주실로 매단 후 그립퍼의 파지 성공률과 파지 시 파프리카의 훼손 유무 실험을 수행하였다.

가. 실험 방법

시스템 1, 2, 3의 그립퍼의 파지 성공률을 확인하기 위하여 시스템 별로 빨간색 파프리카 18개와 노란색 파프리카 18개를 사용하였다. 또한 파지 시 파프리카의 훼손 유무를 확인하기 위하여 시스템 별로 빨간색 파프리카 18개와 노란색 파프리카 18개를 사용하였다. 각 시스템과 파프

리카의 접촉부는 고무재질로서 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. 그립퍼의 파지 성공률을 확인하기 위해서는 동일한 압력(15N/cm²)으로 파지하였을 때 10초간 파지상태를 유지하는지 확인하였다. 파지 시 파프리카의 훼손 유무를 확인하기 위해서는 동일한 압력(18N/cm²)으로 파지하였을 때 파지 10초 후 파프리카의 훼손 유무를 확인하였다. 표 84은 그립퍼의 파지 성공률을 측정하기 위한 실험 조건이다. 각 실험은 섭씨 18도, 상대습도 20%rh 내외의 실내 환경에서 진행하였다.

	그립퍼의 파지 성공률 실험		파지 시 파프리카의 훼손 유무 실험	
	15N/cm ² 압력, 10초 유지 가능 여부		18N/cm ² 압력, 10초 후 훼손 여부	
시스템 1	1-A	36개 파프리카 사용	1-B	36개 파프리카 사용
시스템 2	2-A	36개 파프리카 사용	2-B	36개 파프리카 사용
시스템 3	3-A	36개 파프리카 사용	3-B	36개 파프리카 사용

표 54 각 실험의 조건

파프리카 과실이 파괴되는 압축강도는 31.87N~97.08N의 범위에서 평균 65.01N으로써, 단위면적으로 나누게 되면 18.04N/cm²~54.96N/cm²의 범위에서 평균 36.81N/cm²의 압축강도가 측정되었다. 최소값과 최대값의 차이가 36.92N/cm²로써 특정 파프리카에서는 훼손되지 않는 힘으로 파지하였다고 하더라도 다른 파프리카는 훼손될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 파프리카의 훼손정도에 따라 상품성이 크게 달라지므로 파프리카 과실의 훼손을 줄이기 위해 엔드이펙터의 그립퍼가 파지상태를 유지하기 위한 최소의 파지력으로 파지하여 수확하여야 한다. 그리고 단위면적당 받는 힘이 커질수록 파프리카의 훼손이 발생하므로, 엔드이펙터의 그립퍼가 파프리카 과실에 주는 힘을 면적에 따라 분산하여 파지할 수 있도록 파프리카의 과실과 접촉하는 그립퍼의 평거부의 면적을 크게 하여 단위면적당 받는 힘을 분산시킬 수 있도록 하여야 한다. 또한 압력에 의한 과실의 훼손을 최소화하기 위하여 그립퍼의 파프리카 과실 파지 시 파지하는 힘의 정도를 세밀히 조절 및 제어할 수 있어야 한다.

파프리카를 파지하고, 과병을 절단하여 파프리카를 적재하기까지의 작업시간을 10초 가정하였을 때, 파프리카의 훼손이 시작되는 18.04N/cm²의 압력보다 작은 15N/cm²의 압력으로 10초 동안 파지가 가능한 지 확인하고자 하였다. 또한, 수확 작업 동안 그립퍼에 의한 훼손 유무를 확인하기 위하여, 파프리카 파지 후 10초 간 파프리카의 훼손이 시작되는 18.04N/cm²의 압력과 근소한 18N/cm²의 압력을 유지하였을 때 파프리카의 훼손 유무를 확인하였다. 그림 404는 그립퍼의 성능을 평가한 실험의 모습이다.



그림 404 그립퍼의 성능 평가

나. 시스템 1, 2, 3의 성능 분석

엔드이펙터의 그립퍼의 형태를 선정하기 위하여 그립퍼의 파지 성공률과 파지 시 파프리카의 훼손 유무를 확인하는 실험을 하였다. 실험한 결과는 표 55와 같다.

(단위 ; 개)

	그립퍼의 파지 성공률 실험		파지 시 파프리카의 훼손 유무 실험	
	15N/cm ² 압력, 10초 유지 가능 여부		18N/cm ² 압력, 10초 후 훼손 여부	
	유지(성공)	낙과(실패)	비훼손(성공)	훼손(실패)
시스템 1	25	11	27	9
시스템 2	36	0	33	3
시스템 3	28	8	21	15

표 55 각 실험의 결과

시스템 1의 경우 그립퍼의 파지 성공률 실험은 파프리카 총 36개 중 25개를 10초간 유지하였고, 파지 시 파프리카의 훼손 유무 실험에서는 파프리카 총 36개 중 27개의 파프리카가 훼손되지 않았다. 시스템 2의 경우 그립퍼의 파지 성공률 실험은 파프리카 총 36개 중 36개를 10초간 유지하였고, 파지 시 파프리카의 훼손 유무 실험에서는 파프리카 총 36개 중 33개의 파프리카가 훼손되지 않았다. 시스템 3의 경우 그립퍼의 파지 성공률 실험은 파프리카 총 36개 중 28개를 10초간 유지하였고, 파지 시 파프리카의 훼손 유무 실험에서는 파프리카 총 36개 중 21개의 파프리카가 훼손되지 않았다.

파프리카의 훼손을 최소화하는 엔드이펙터의 그립퍼의 선정을 위하여 시스템 1, 2, 3의 성능을 평가한 결과, 시스템 1의 경우 그립퍼의 파지 성공률 69.4%, 파지 시 파프리카의 비훼손률 75%였다. 시스템 2의 경우 그립퍼의 파지 성공률 100%, 파지 시 파프리카의 비훼손률 91.7%였다. 시스템 3의 경우 그립퍼의 파지 성공률 77.8%, 파지 시 파프리카의 비훼손률 58.3%였다.

3. 파프리카의 훼손을 최소화하는 엔드이펙터의 그립퍼 선정 및 구동 알고리즘 설계

파프리카의 훼손을 최소화하는 엔드이펙터의 그립퍼를 선정하기 위하여 그림 405과 같이 1차년도에 기설계한 시스템 1, 2, 3의 그립퍼의 파지 성공률과 파지 시 파프리카의 훼손 유무를 확인하는 실험을 하였다.

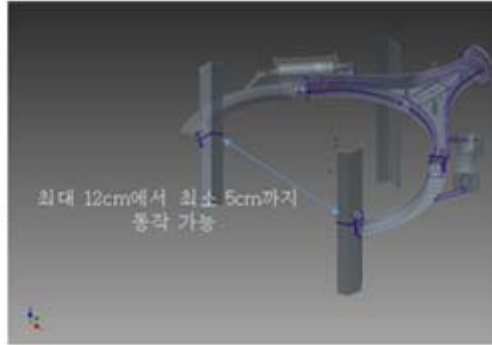
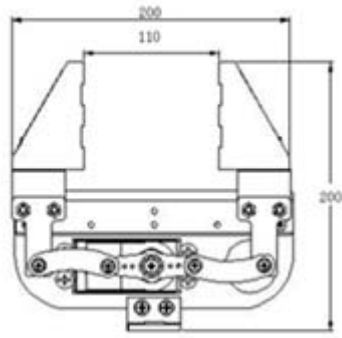


그림 405 1차년도에 기초 설계된 엔드이펙터의 그립퍼의 3가지 형태

실험 결과, 그림 406과 같이 시스템 2는 그립퍼의 파지 성공률, 파프리카의 비훼손률이 다른 두 시스템에 비하여 높게 측정되었다. 시스템 1의 경우 그립퍼의 파지 성공률 69.4%, 파지 시 파프리카의 비훼손률 75%였다. 시스템 2의 경우 그립퍼의 파지 성공률 100%, 파지 시 파프리카의 비훼손률 91.7%였다. 시스템 3의 경우 그립퍼의 파지 성공률 77.8%, 파지 시 파프리카의 비훼손률 58.3%였다.

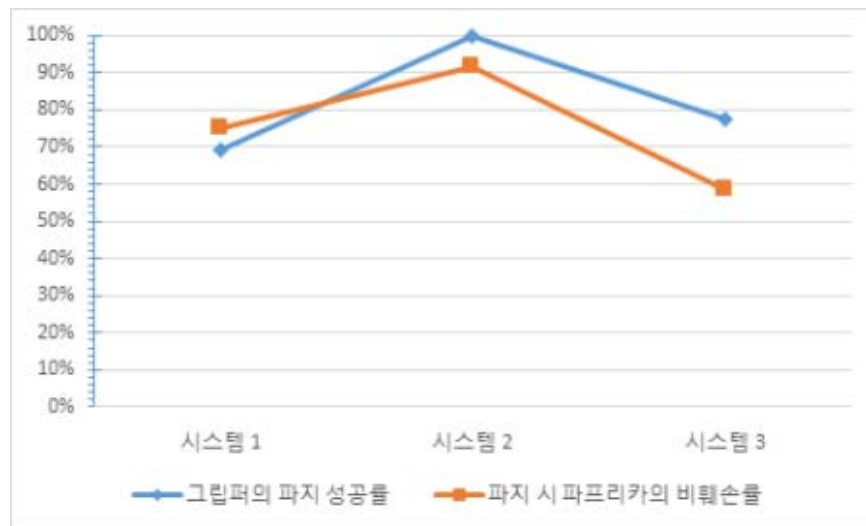


그림 406 시스템 1, 2, 3의 성능 비교

시스템 1, 2, 3의 성능을 비교한 결과, 파프리카의 훼손을 최소화 할 수 있는 엔드이펙터의 그립퍼는 시스템 2의 판단하였다. 시스템 2의 경우, 파프리카를 파지하고 과병을 절단하여 파프리카를 적재하기까지의 작업시간을 10초 가정하였을 때, 파프리카의 훼손이 시작되는 18.04N/cm²의 압력보다 작은 15N/cm²의 압력으로 10초 동안 파지가 가능한지 확인한 결과 총 36개의 파프리카

로 실험하여 100%의 성공률을 보였다. 또한 시스템 2의 경우, 수확 작업 동안 그립퍼에 의한 훼손 유무를 확인하기 위하여, 파프리카 파지 후 10초 간 파프리카의 훼손이 시작되는 $18.04\text{N}/\text{cm}^2$ 의 압력과 근소한 $18\text{N}/\text{cm}^2$ 의 압력을 유지하였을 때 총 36개의 파프리카로 실험하여 91.7%의 과실이 훼손되지 않았다. 시스템 2는 시스템 1과 시스템 3에 비하여 성능이 현저히 우수하므로 개발 엔드이펙터의 그립퍼로 가장 적합할 것으로 판단하였다. 그림 407는 개발 엔드이펙터에 적용할 시스템 2 그립퍼의 실제 모습이다.

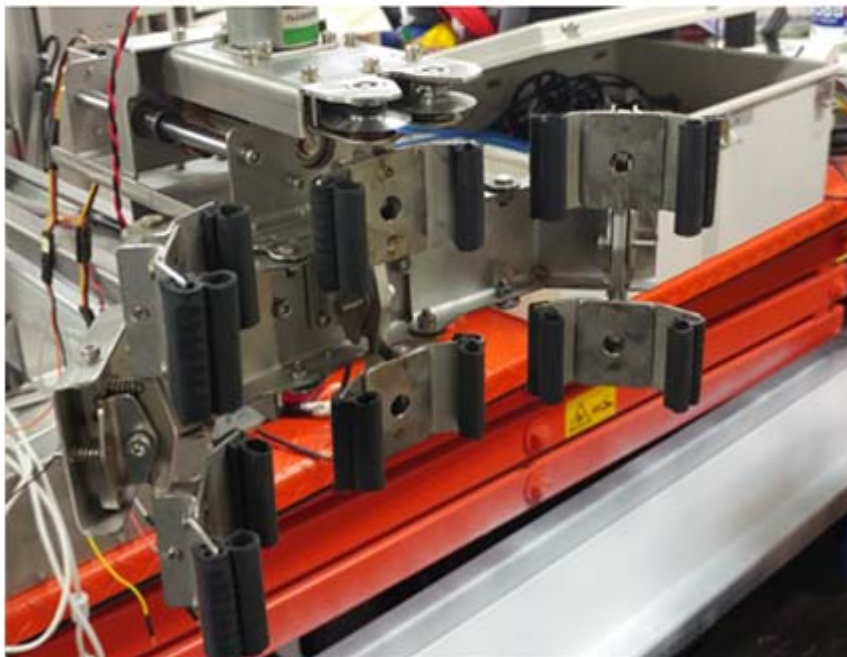
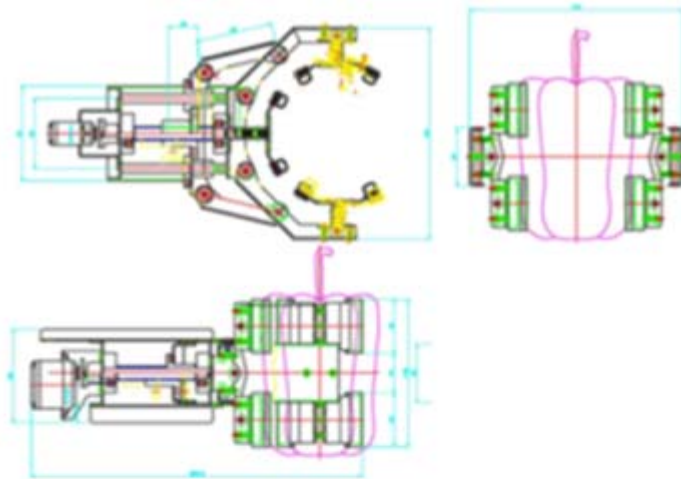


그림 407 개발 시스템에 적용할 엔드이펙터의 그립퍼

하지만, 파프리카의 수확 작업 중 파프리카 과실의 훼손이 발생하지 않는 것이 중요한데 시스템 2의 엔드이펙터의 그립퍼로 파지하였을 경우에도 파프리카의 훼손이 8%가량 존재하였다. 따라서, 파프리카의 훼손을 최소화하기 위하여 그립퍼로 파프리카를 파지하였을 때, 파프리카에 훼손을 주지 않는 안전한 범위의 압력에서 작업이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 파프리카의 훼손을 최소화 하기 위하여 파지 시 압력의 범위를 확인하는 압력센서를 엔드이펙터의 그립퍼에 부착하여 파프리카의 파지 작업을 정밀하게 진행 하고자 한다. 파지 작업 시, 파프리카의 훼손을 최소화하는 엔드이펙터의 그립퍼의 구동 알고리즘은 그림 408과 같다.

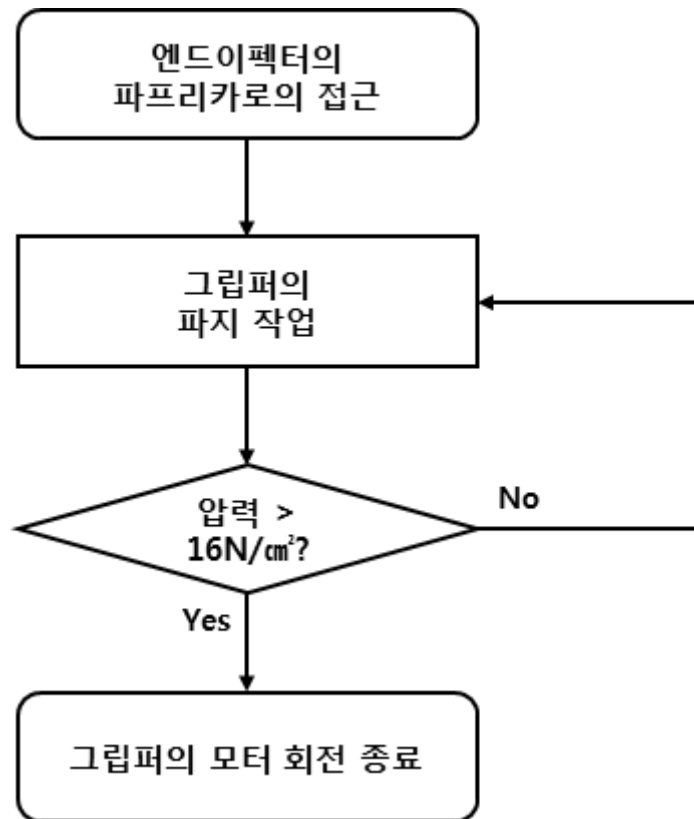


그림 408 그립퍼의 구동 알고리즘

그림 408과 같은 과정을 거치며 파프리카를 파지 하고 그 후 과병의 절단 작업을 진행하여 파프리카의 수확작업을 진행하고자 한다.

4. 실제 파프리카 농가의 파프리카 과실과 과병, 줄기의 형태에 맞는 엔드이펙터의 절단부 설계 및 제작

실제 파프리카 농가의 파프리카 과실과 과병, 줄기의 형태에 맞는 엔드이펙터의 절단부 설계를 위하여, 강원도 원주시에 소재한 영흥영농과 경상북도 구미시에 소재한 구미원예농단, 경상남도 함안군에 소재한 (주)러브파프, 경상남도 함안군에 소재한 원예특작과학원 시설원예연구소를 방문하여 실제 재배되는 파프리카의 과실, 과병, 줄기의 형태를 확인하였다.



그림 409 영흥영농, 구미원예농단, (주)러브파프, 시설원예연구소

강원도 원주시에 소재한 영흥영농과 경상북도 구미시에 소재한 구미원예농단, 경상남도 함안군에 소재한 (주)러브파프, 경상남도 함안군에 소재한 원예특작과학원 시설원예연구소의 실제 온실 내 파프리카의 재배 환경을 조사한 결과, 파프리카는 지상으로부터 60cm 가량부터 착과하여, 줄기 당 3개의 열매가 착과된다. 파프리카의 착과 간격은 무작위 간격으로 파프리카 한 주마다, 그리고 파프리카 줄기마다 그 간격이 제각각이었다.



그림 410 실제 파프리카 온실의 재배 모습

최소 착과 높이	지면으로부터 600mm 내외
줄기 당 착과 개수	한 줄기 당 3~4개
착과 간격	무작위
재식밀도	약 3.75주/m ²
식재 간격	300mm 내외
줄기 직경	평균 13.8mm
줄기 둘레	평균 34.6mm

표 56 실제 파프리카 온실 환경에서의 파프리카의 특성

표 56은 실제 파프리카 온실 환경에서 조사한 파프리카의 착과 및 줄기 간격 등을 나타내며,

그림 411은 파프리카의 성장 및 착과 모습이다. 조사한 파프리카의 평균 재식밀도는 약 3.75주/m²으로, 파프리카 한 주와 한 주 사이의 거리는 30cm 내외이다. 또한 파프리카의 줄기의 직경은 착과한 파프리카 줄기 50개를 조사한 결과 평균 13.8mm로 확인하였으며 줄기의 둘레는 평균 34.6mm로 확인하였다.



그림 411 파프리카의 성장 및 착과 모습

엔드이펙터의 절단부 설계를 위하여, 기타 과채류의 수확을 위한 시스템에서의 절단부를 특허 조사 하였다. 기타 과채류의 수확을 위한 시스템에서의 절단부의 특허를 조사한 결과, 2001년 특허 등록된 '과일 수확 장치', 2007년 특허 등록된 '벤치 재배형 딸기 수확 로봇 시스템', 2009년 특허 등록된 '엔드이펙터의 추종 제어 방법 및 그 장치', 2012년에 특허 등록된 '참외 수확용 엔드 이펙터' 등을 확인 할 수 있었다. 그림 412은 각 특허의 절단부의 설계를 나타낸다.

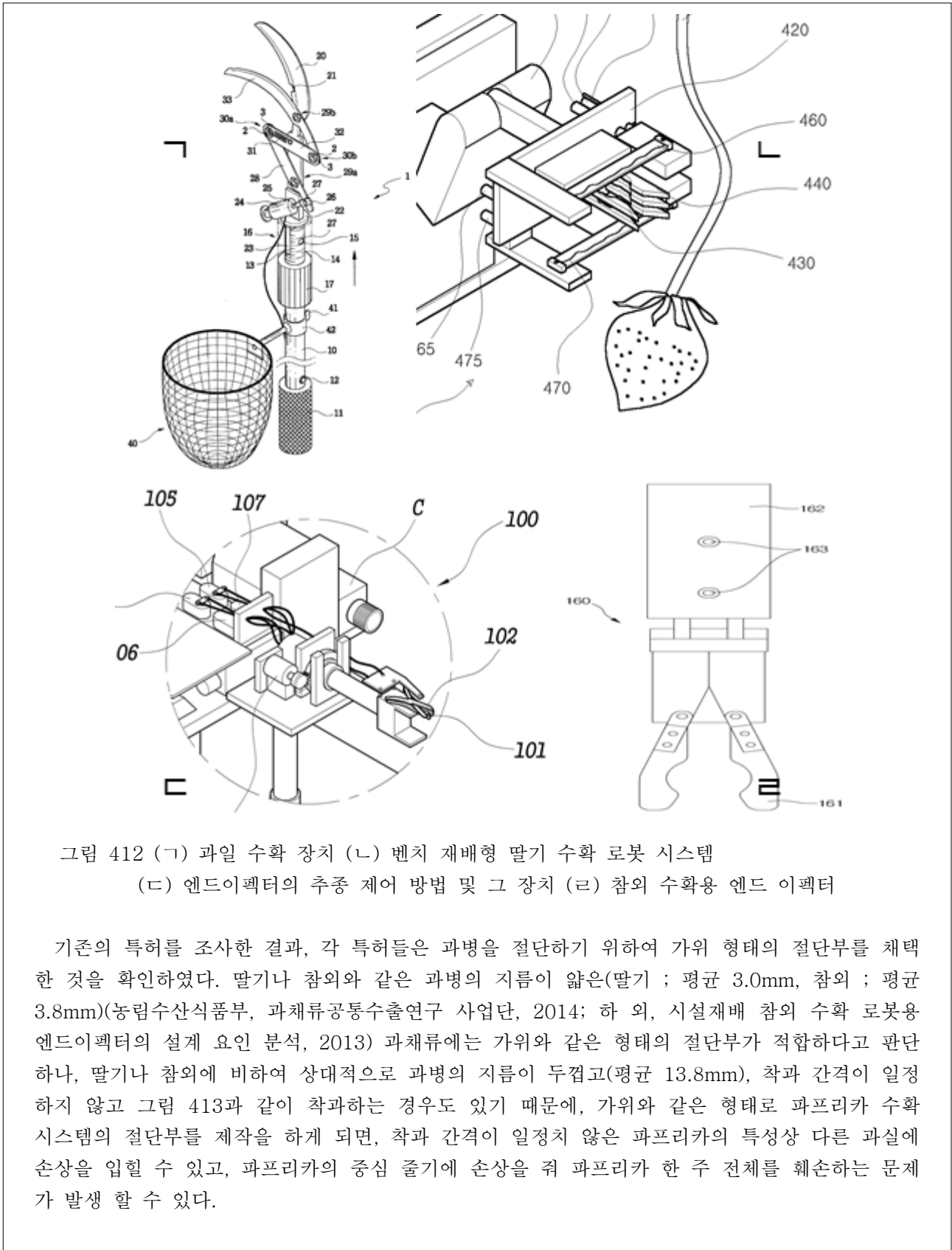


그림 412 (ㄱ) 과일 수확 장치 (ㄴ) 벤치 재배형 딸기 수확 로봇 시스템
 (ㄷ) 엔드이펙터의 추종 제어 방법 및 그 장치 (ㄹ) 참외 수확용 엔드 이펙터

기존의 특허를 조사한 결과, 각 특허들은 과병을 절단하기 위하여 가위 형태의 절단부를 채택한 것을 확인하였다. 딸기나 참외와 같은 과병의 지름이 얇은(딸기 ; 평균 3.0mm, 참외 ; 평균 3.8mm)(농림수산식품부, 과채류공통수출연구 사업단, 2014; 하 외, 시설재배 참외 수확 로봇용 엔드이펙터의 설계 요인 분석, 2013) 과채류에는 가위와 같은 형태의 절단부가 적합하다고 판단하나, 딸기나 참외에 비하여 상대적으로 과병의 지름이 두껍고(평균 13.8mm), 착과 간격이 일정하지 않고 그림 413과 같이 착과하는 경우도 있기 때문에, 가위와 같은 형태로 파프리카 수확 시스템의 절단부를 제작을 하게 되면, 착과 간격이 일정치 않은 파프리카의 특성상 다른 과실에 손상을 입힐 수 있고, 파프리카의 중심 줄기에 손상을 줘 파프리카 한 주 전체를 훼손하는 문제가 발생 할 수 있다.



그림 413 파프리카의 착과 모습

따라서, 본 개발 시스템의 엔드이펙터의 절단부는 가위 형태가 아닌 형태로 설계하였다. 그림 452는 엔드이펙터의 절단부를 설계한 모습이다. Autodesk의 Autocad 2016을 이용하여 설계하였다.

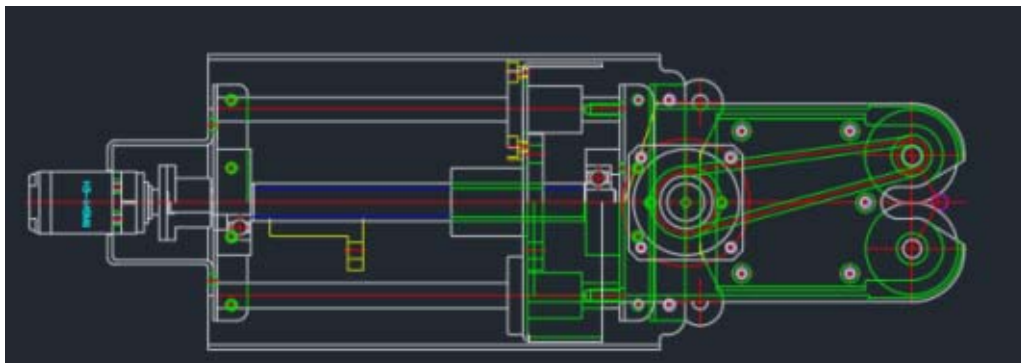


그림 414 엔드이펙터의 절단부의 설계도

5. 1차년도 조사한 파프리카의 물리적 특성을 고려한 엔드이펙터의 절단부의 설계 및 제작

1차년도에는 ‘파프리카의 훼손이 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템’의 엔드이펙터 설계를 위하여 파프리카의 과실 및 과병의 특성을 분석하였고, 파프리카의 착과 특성을 분석하였다. 파프리카의 국내에서 재배되는 품종별 재배비율은 적색품종이 62%이고 황색품종이 31%이며 주황색 품종이 7%으로, 적색품종 중 국내에서 재배면적이 많은 대표 품종은 쿠파라(Cupra), 데브라(Debla), 플랜티(Plenty), 미라지(Mirage) 등이며, 황색품종의 경우 마세라티(Maserati), 클라리티(Clarity), 데비(Derby) 등의 품종이 국내에서 재배면적이 많은 대표 품종인 것을 확인하였다. 시판 중인 파프리카의 적색 품종, 황색 품종, 주황색 품종의 중량은 $194.62 \pm 3.5g$, 과실의 직경은 $80.92 \pm 1.08mm$, 과실의 길이는 $92.15 \pm 1.84mm$, 과병의 직경은 $13.85 \pm 0.34mm$, 과병의 길이는 $72.15 \pm 0.81mm$ 인 것을 확인하였다. 05개의 파프리카를 분석한 결과, 파프리카 과병의 길이는 10.00mm~75.00mm의 범위에서 평균 52.99mm로 측정되었다. 파프리카 과병의 중심 직경은 4.20mm~15.00mm의 범위에서 평균 9.55mm로 측정되었으며, 파프리카 과병의 끝단 직경은

4.20mm~21.10mm의 범위에서 평균 13.37mm로 측정되었다. 과병의 둘레는 18.00mm~46.00mm의 범위에서 평균 33.56mm로 측정되었다. 30개의 파프리카의 과병의 접도의 절단날을 이용하여 측정된 절단강도는 22.16N~67.76N의 범위에서 40.99N의 평균값으로 측정되었다. 파프리카 과병은 측정된 절단강도의 최대값인 67.76N보다 큰 힘을 이용하여 절단되어야 하므로 그에 맞게 엔드이펙터의 절단부의 모터의 선정 및 설계가 이루어져야 한다. 그림 415은 파프리카의 줄기에 착과된 파프리카의 모습이다.

과병의 길이 : 평균 52.99mm
 과병의 직경 : 9.55mm~13.37mm
 과병의 둘레 : 33.56
 절단강도 : 22.16N~67.76N



그림 415 파프리카의 물리적 특성

파프리카의 과병의 길이는 10.00mm~75.00mm의 범위에서 평균 52.99mm이므로, 엔드이펙터의 절단부는 그림퍼의 상단에 설치되어 과병의 길이 한도 안에서 과병에 접근하여 과병을 절단하도록 하였다. 파프리카 과병의 절단 강도는 22.16N~67.76N의 범위에서 40.99N의 평균값이므로 최대 절단강도인 67.76N보다 강한 힘을 주어야 한다. 따라서 67.76N을 kgf로 환산하면 6.91kgf이므로 모터의 회전 시 6.91kgf보다 강한 힘을 주도록 하였다. 그림 416은 파프리카의 물리적 특성을 고려하여 제작한 엔드이펙터의 절단부의 모습이다.

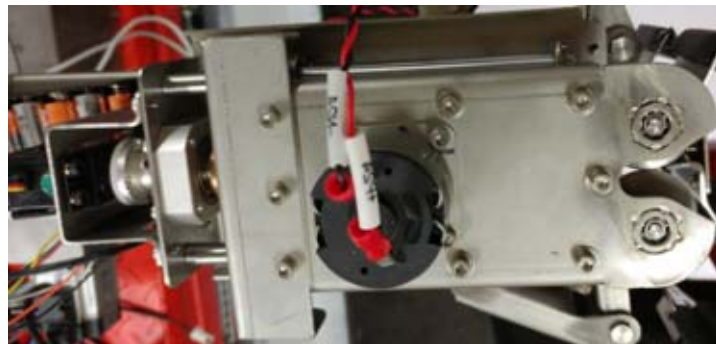


그림 416 엔드이펙터의 절단부의 실제 제작 모습

제작은 CNC(Computer Numerical Control) 조각기를 이용하여 제작하였다. 구동을 최소화하기 위하여 하나의 모터에 의하여 과병에 접근이 가능하게 하였고, 모터의 회전을 리드스크류를 통해 직선운동으로 바꾸도록 하였다. 절단을 위한 회전 칼날은 DC모터로 구동하도록 하였다. 각 기계요소들의 재질은 무게를 줄이고, 부식되지 않도록 하기 위하여 두랄루민을 사용하여 제작하였다.

6. 엔드이펙터의 절단부 및 그림퍼의 통합 설계 및 제작

과프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템의 엔드이펙터 제작을 위하여, 엔드이펙터의 절단부와 그립퍼를 통합하기 위한 설계 작업을 진행하였다. 그림 417는 절단부 및 그립퍼를 통합하기 위한 설계도의 모습이다. 그립퍼와 절단부의 설계 및 제작을 위하여 분석한 요인을 토대로 통합된 절단부와 그립퍼를 설계하였다. Autodesk의 Autocad 2016을 이용하여 설계하였다. 그립퍼 위에 절단부를 부착하도록 설계하였으며, 보완 및 수정을 용이하게 하기 위하여 탈부착이 가능하도록 3mm의 볼트로 고정하였다. 그림 418은 실제 제작한 모습이다. 각 기계 요소들의 재질은 무게를 줄이고, 부식되지 않도록 두랄루민을 사용하여 제작하였다.

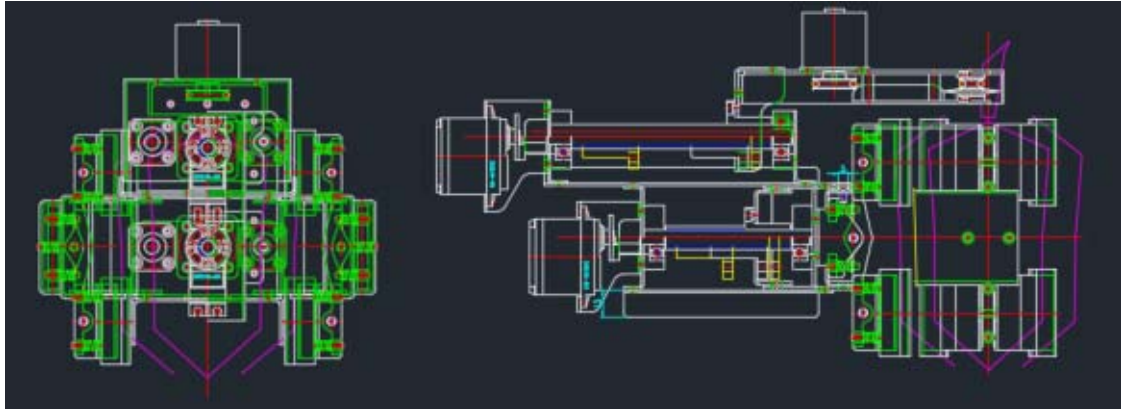


그림 417 절단부 및 그립퍼를 통합하기 위한 설계도



그림 418 실제 제작 모습

- 엔드 이펙터 구동제어시스템 제작

1. 엔드이펙터의 구동을 위한 제어부 설계 및 모터 등 구성 부품 선정

엔드이펙터의 구동을 위한 제어부는 MCU(Micro Controller Unit)인 Arduino Uno를 사용하여 구성하였다. Arduino Uno는 Atmega328 프로세서를 사용하며, 5V의 동작 전압으로 구동이 가능해 크기가 작고 전원 공급이 용이하다. 그림 419는 제어부를 구성하기 위하여 사용한 MCU의 모습이며, 표 57는 사용한 MCU인 Arduino Uno의 사양이다.

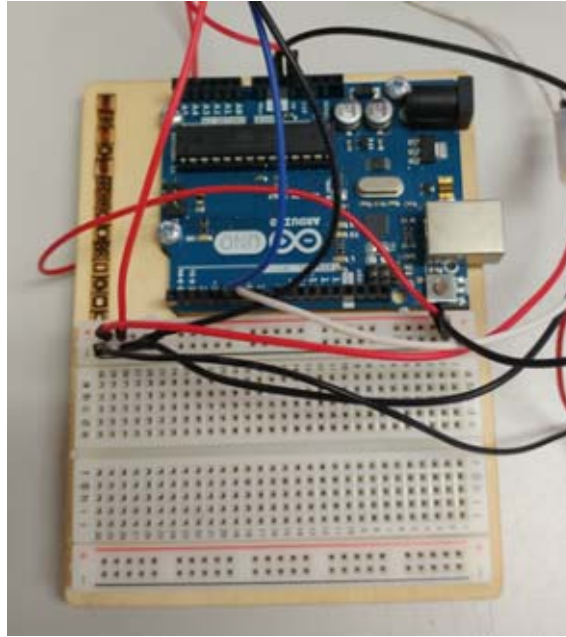


그림 419 Arduino Uno

Micro controller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage	7-12V
Input Voltage(limits)	6-20V
Digital I/O pins	14(of which 6 provide PWM output)
Analog Input pins	6
DC Current per I/O pin	40mA
DC Current for 3.3V pin	50mA
Flash Memory	32KB(ATmega328) of which 0.5KB used by bootloader
SRAM	2KB(ATmega328)
EEPROM	1KB(ATmega328)
Clock Speed	16MHz
Length	68.6mm
Width	53.4mm
Weight	25g

표 57 MCU(Arduino Uno)의 사양

엔드이펙터의 그립퍼와 절단부는 각각 한 개의 서보모터를 사용하여 구동하고자 하였다. 그립퍼의 경우, 2mm 피치의 리드스크류를 통해 서보모터의 회전운동을 직선운동으로 전환하도록 하였다. 절단부의 경우, 절단부의 회전 칼날이 과병에 접근할 수 있도록 2mm 피치의 리드스크류를

사용하여 서보모터의 회전운동을 직선운동으로 전환하도록 하였다. 그림 420는 서보모터의 회전운동을 직선운동으로 전환하기 위하여 사용한 2mm 피치의 리드스크류의 모습이다.



그림 420 2mm 피치의 리드스크류

절단부의 과병으로의 접근과 그립퍼의 파프리카 파지는 파프리카의 훼손을 최소화하도록 세밀한 조절이 가능하여야 한다. 그러므로 그립퍼와 절단부의 동작을 위하여 사용할 모터는 정밀하게 속도 조절이 가능하여야 한다. 따라서, 엔드이펙터의 구동을 위한 모터는 서보모터로 선정하였다. 선정한 서보모터의 모델명과 사양은 표 58와 같다.

Model	RB-150MG SERVO
Control System	+Pulse Width Control 1500usec Neutral
Operating Voltage	5-7.2 Volts
Operating Temperature Range	0 to +60 Degree C
Operating Speed (6.0V)	0.16sec/60°at no load
Operating Speed (7.2V)	0.14sec/60°at no load
Stall Torque	13kg·cm (5.0V);15kg·cm(6.0V);16kg·cm (7.2V);
Current Drain (6.0V)	7.9mA/idle and 180mA no load operating
Current Drain (7.2V)	15.8mA/idle and 220mA no load operating
Dead Band Width	10usec
Connector Wire Length	300mm

표 58 선정한 서보모터의 사양

Arduino Uno를 사용하여 엔드이펙터를 제어하도록 하였으며, 그립퍼와 절단부는 RB-150MG SERVO를 이용하여 구동하도록 하였다. 2mm 피치의 리드스크류를 통하여 서보모터의 회전운동이 직선운동으로 전환되도록 하였다. 피치가 2mm이므로 1회전당 이송거리는 2mm이다. RB-150MG SERVO는 1회전 하는 데에 0.96초가 소요되므로, 이론상 그립퍼와 절단부의 이송속도는 2.08mm/s 이다.

절단부의 회전 칼날은 DC모터를 사용하여 구동하도록 하였다. 그림 421은 선정한 DC모터의 사양이다.

Model	Voltage		No Load		Rated Load				Stall			
	Operating Range	Nominal	Speed	Current	Speed	Current	Torque		Output	Torque		Current
			rpm	A	rpm	A	g.cm	mN.m	W	g.cm	mN.m	A
MC-R3429A1A	21.0 ~ 26.0	DC 24.0V	5,150	≤0.070	5,000	≤0.13	30.0	2.94	1.54	≥350	≥34.3	≤1.20

그림 421 선정된 DC모터의 사양

2. 엔드이펙터의 구동을 위한 제어 회로도 설계 및 구동제어시스템 제작

영상처리를 통하여 파프리카를 인식한 후 엔드이펙터를 파프리카로 접근시키는 과정은 그림 422과 같다.

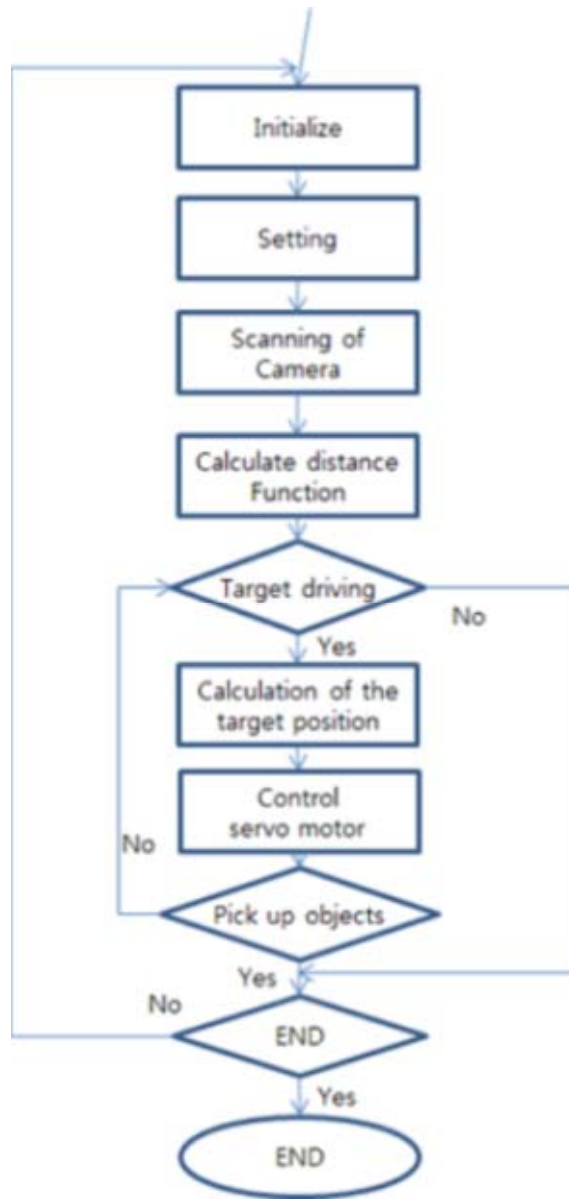


그림 422 엔드이펙터 구동의 예

위와 같은 과정을 거치며 엔드이펙터가 구동이 되는데, 파프리카의 인식 후 엔드이펙터가 구동되기 위해서는 영상정보를 통하여 파프리카의 인식과정을 거치는 제어부와의 통신이 필요하다. 엔드이펙터의 MCU와 파프리카의 인식과정을 거치는 제어부는 rs232을 이용한 시리얼 통신으로 서로간의 정보를 주고 받도록 하였다.

시리얼 통신(Serial Communication, 직렬 통신)은 임베디드 시스템 상에서 각종 프로세서와 회로들 간의 정보를 주고 받을 수 있게 하는 표준 프로토콜의 일종이다. 시리얼 버스는 전송용(TX), 수신용(RX)의 단 2개의 선으로만 구성된다. 프로세서간의 TX, RX 연결은 그림 423과 같은 형태로 연결 된다.

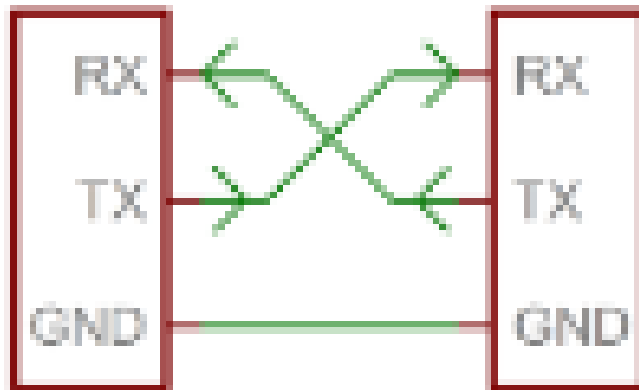


그림 423 시리얼 통신의 연결

파프리카의 인식과정을 거치는 제어부는 영상정보를 처리하고, 매니플레이터를 구동하여야 하기 때문에 PC로 구성하고자 한다. PC와 엔드이펙터의 MCU인 Arduino Uno의 시리얼 통신을 위하여 그림 424와 같은 USB to RS232 변환 모듈을 사용하였다. 그림 425은 엔드이펙터의 MCU와 파프리카의 인식과정을 거치는 제어부인 PC와의 연결을 도식화한 모습이다.



그림 424 USB to RS232 변환 모듈

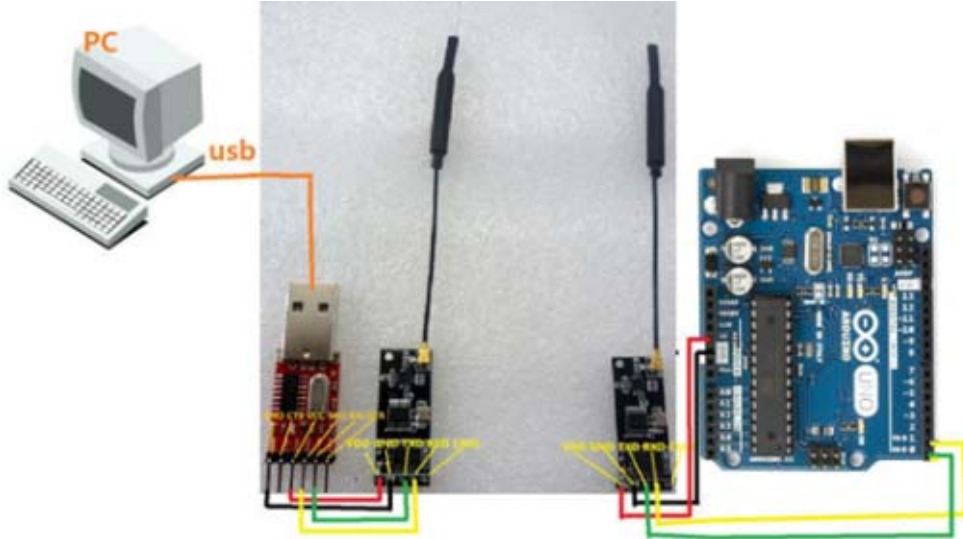


그림 425 RS232 인터페이스를 이용한 각 제어부 상호간 통신

엔드이펙터의 구동을 위한 제어부는 MCU(Micro Controller Unit)인 Arduino Uno를 사용하여 구성하였다. 또한 엔드이펙터의 구동을 위한 모터는 Alsrobot사의 RB-150MG SERVO로 선정하였다. 절단을 위한 회전 칼날은 153KOREA사의 MC-R3429A1A 모델을 선정하였다. 엔드이펙터의 구동을 위하여 그림 426과 같은 제어 회로도를 설계하였다. Arduino Uno의 회로도는 그림 428과 같다.

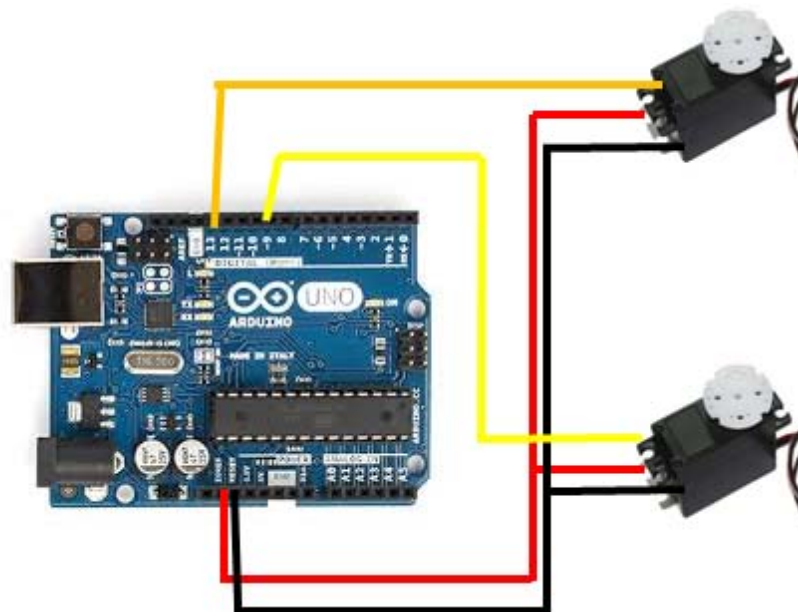


그림 426 Arduino Uno의 서보모터 제어 회로도

그림퍼의 서보모터와 절단부의 서보모터에 각각 5V(빨간선)와 GND(검은선)을 연결하고, 각 서보모터 신호선에 Arduino Uno의 pin 13(주황선)과 pin 9(노란선)를 각각 연결하였다. 그림 427는 Arduino Uno를 이용하여 구성한 엔드이펙터의 구동제어시스템의 실제 모습이다.



그림 427 엔드이펙터의 구동제어시스템

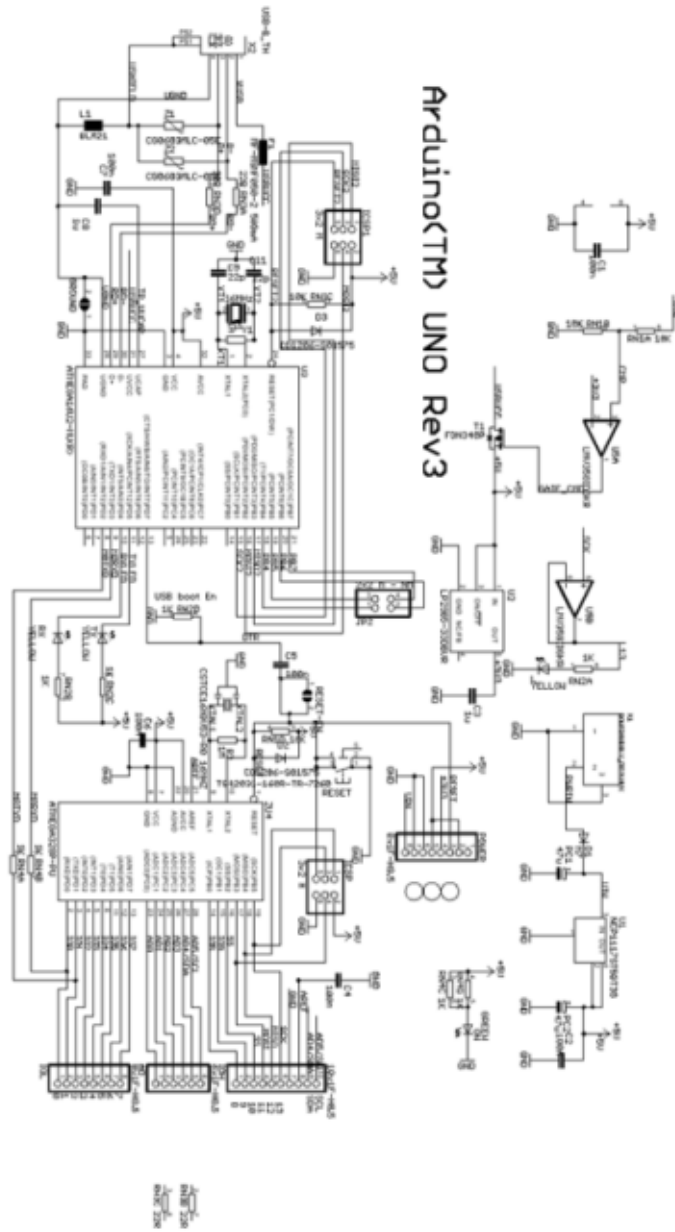


그림 428 Arduino Uno의 회로도

- 엔드이펙터 구동제어 소프트웨어 제작

Java와 C를 기반으로 한 크로스 플랫폼 응용 소프트웨어인 'Arduino IDE(Integrated Development Environment; 통합개발환경)'를 이용하여 엔드이펙터 구동제어 및 파프리카 직경 측정 알고리즘 소프트웨어를 제작하였다.



그림 429 Arduino IDE

Arduino IDE는 C++을 사용하여 원하는 동작을 하도록 코딩을 하고 이것을 보드에 업로드하면 Arduino가 동작한다. Arduino 업로드는 플래시 메모리에 쓰이므로 다음부터는 전원만 인가하면 동작한다. Arduino IDE에서 업로드가 실행되면, 부트로더가 동작하기 위해 DTR 신호가 타겟 마이크로컨트롤러에 전달되어 리셋되고 부트로더가 실행된다. 리셋 신호를 ATmega16U2에서 전달하기 위해 캐패시터(0.1~0.22uF)를 사용하여 타겟과 연결되어 있다. 그림 430는 Arduino IDE를 통하여 Arduino Uno에 코드를 업로드하는 과정이다.

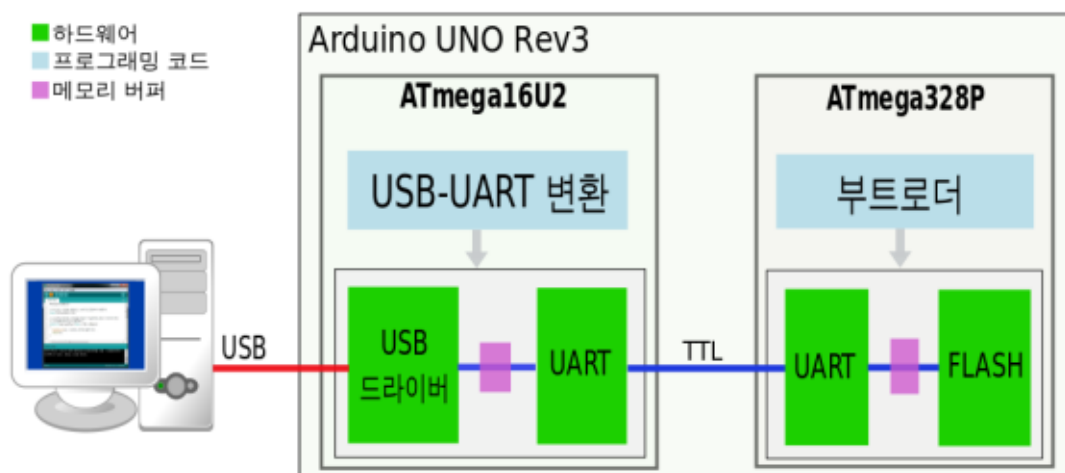


그림 430 Arduino Uno의 업로드 구조

```

SoftwareSerialExample $
/*Software serial multiple serial test

Receives from the hardware serial, sends to software serial.
Receives from software serial, sends to hardware serial.

The circuit:
* RX is digital pin 10 (connect to TX of other device)
* TX is digital pin 11 (connect to RX of other device)

Note:
Not all pins on the Mega and Mega 2560 support change interrupts,
so only the following can be used for RX:
10, 11, 12, 13, 50, 51, 52, 53, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69

Not all pins on the Leonardo support change interrupts,
so only the following can be used for RX:
8, 9, 10, 11, 14 (MISO), 15 (SCK), 16 (MOSI).
*/
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>

SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX
Servo myservo;

void setup()
{
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(57600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for Leonardo only
  }

  Serial.println("STOP");

  // set the data rate for the SoftwareSerial port
  mySerial.begin(4800);
  mySerial.println("Continue");
  myservo.attach(13);
}

void loop() // run over and over
{
  if (mySerial.available())
    Serial.write(mySerial.read());
  if (Serial.available())
    mySerial.write(Serial.read());
  myservo.write(180);
}

```

그림 431 마이크로 컨트롤러 프로그램

그림 431은 Arduino Uno를 통해 엔드이펙터의 움직임을 제어하고, PC와 Arduino Uno의 시리얼 통신을 위하여 Arduino IDE를 사용하여 작성한 마이크로 컨트롤러 프로그램이다. 시리얼 통신의 속도인 Baud rate를 조절할 수 있게 제작하였으며, 서보모터의 위치 및 속도를 조절할 수 있도록 제작하였다. 서보모터의 위치 및 속도 제어를 통하여 그림퍼의 파지 작업의 속도와 절단부의 과병으로의 접근 속도를 조절할 수 있도록 하였다. 절단부의 회전 칼날은 On/Off 제어로 절단 작업을 수행하도록 하였다. PC의 파프리카 영상 인식에 대한 정보를 Arduino Uno로 전송하여 엔드이펙터의 작업을 시작하고 종료할 수 있도록 Serial 통신을 하는 프로그램을 Microsoft사의 통합개발환경인 Visual Studio 2016을 이용하여 제작하였다. 그림 432은 Visual Studio 2016을 이용하여 PC와 Arduino Uno 간의 시리얼 통신을 하는 프로그램이다.

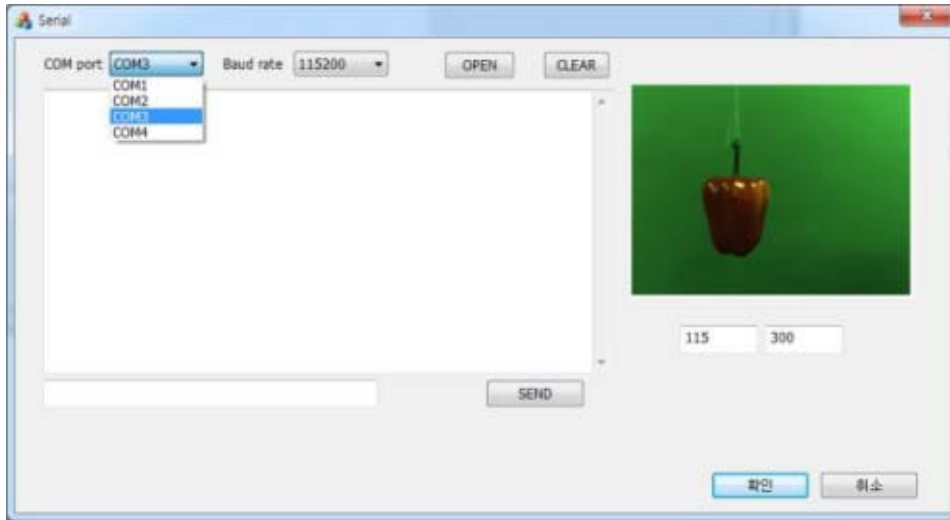


그림 432 PC와 Arduino Uno간의 시리얼 통신 프로그램

영상 인식과정을 통하여 얻은 정보를 시리얼 통신을 이용해 Arduino Uno로 전송할 수 있도록 하였다.

- 파프리카의 직경 측정 장치

파프리카의 과실의 훼손을 최소화하기 위해서는 엔드이펙터의 파프리카 파지 작업 시 엔드이펙터에 의한 파프리카의 훼손이 발생하지 않아야 한다. 파프리카 파지 작업 시 파프리카의 훼손을 막기 위해서는 파프리카의 직경보다 더 작게 움켜쥐어 파프리카에 무리한 압력을 가하거나, 파프리카의 직경보다 더 크게 움켜쥐어 수확작업 중 파프리카를 떨어트리거나 하는 일이 발생하면 안 된다. 따라서 파프리카의 과실의 훼손을 최소화하기 위해서는 파프리카의 직경을 정확하게 파악할 수 있어야 한다.

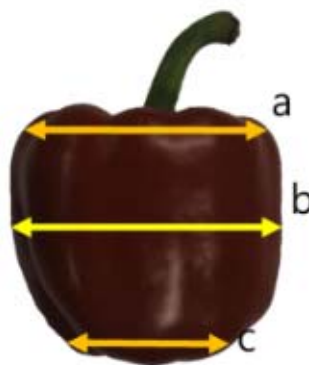


그림 433 파프리카의 과실의 직경

파프리카는 그림 433과 같이 상단, 중단, 하단의 직경이 다르다. 총 105개의 파프리카 과실의

상단 10% 지점의 직경(a), 파프리카의 과실의 중심의 직경(b), 파프리카 하단 10% 지점의 직경 (b)과 파프리카 과실의 중심에서의 둘레를 조사한 결과, 표 59과 같은 결과를 나타내었다.

	평균	분산	표준편차	표준오차	최대값	최소값
상단 10% 직경(mm)	81.22	32.27	5.68	0.55	94.00	62.00
하단 10% 직경(mm)	77.88	57.65	7.59	0.74	96.10	56.40
과실 중심 직경(mm)	82.70	50.31	7.09	0.69	103.00	64.00
과실 둘레(mm)	266.04	387.50	19.68	1.92	323.00	218.00

표 59 파프리카의 세 지점의 직경과 과실 중심의 둘레

파프리카 과실의 상단 10% 직경은 62.00mm~94.00mm의 범위에서 평균 81.22mm, 파프리카 과실의 중심 직경은 64.00mm~103.00mm의 범위에서 평균 82.70mm, 파프리카 과실의 하단 10% 직경은 56.40mm~96.10mm의 범위에서 평균 77.88mm로 측정되었다. 파프리카 과실의 중심의 둘레는 218.00mm~323.00mm의 범위에서 평균 266.04로 측정되었다. 또한 파프리카 과실의 상단, 하단, 중심의 직경의 길이의 차이가 없다고 가정하였을 때, 과실의 상단, 하단, 중심의 직경의 길이를 일원 분산분석(1-way ANOVA model)을 한 결과는 표 60과 같다.

인자의 수준	관측수	합	평균	분산
상단 10%	105	8528	81.21905	32.2656
하단 10%	105	8177.5	77.88095	57.6504
중심	105	8683.2	82.69714	50.30566

변동의 요인	제곱합	자유도	제곱 평균	F 비	P-값	F 기각치
처리	1278.317	2	639.1584	13.6746**	2.03E-06	3.024681
오차	14583.05	312	46.74055			
계	15861.37	314				

표 60 과실의 상단, 하단, 중심의 직경의 길이의 분산분석

유의확률 p값이 0.05에 비하여 현저히 작으므로 파프리카 과실의 상단, 하단, 중심의 직경의 길이의 차이가 없다는 가정을 기각한다. 따라서 과실의 상단, 하단, 중심의 길이는 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의미한 차이를 갖는다.

따라서, 본 시스템의 엔드이펙터에서는 파프리카의 상단, 중단, 하단이 서로 직경에 차이가 있는 것을 고려하여, 상단, 중단, 하단을 각각의 직경에 맞게 파지 할 수 있도록 엔드이펙터의 그립퍼를 수정하였다. 그림 434는 파프리카의 과실의 각 부위의 직경에 맞도록 파지할 수 있는 엔드이펙터의 그립퍼이다.

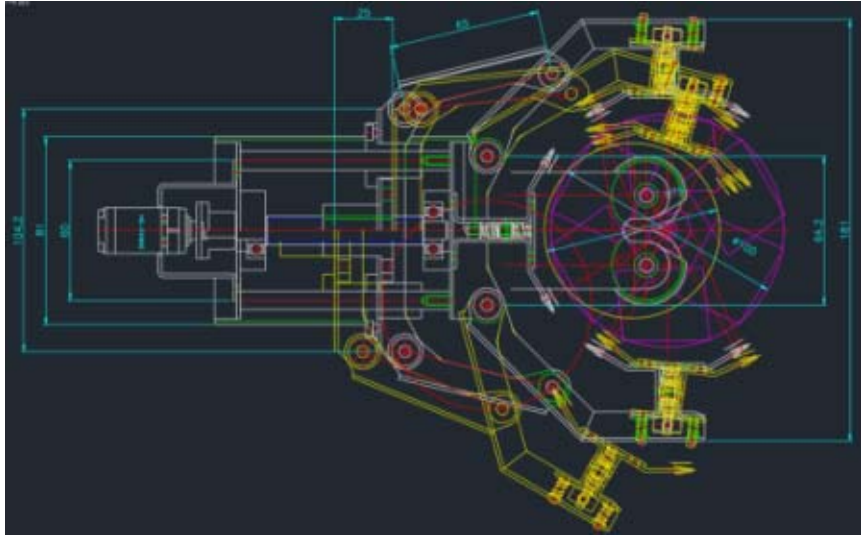


그림 434 과실의 각 부위의 직경에 맞도록 파지할 수 있는 엔드이펙터의 그립퍼

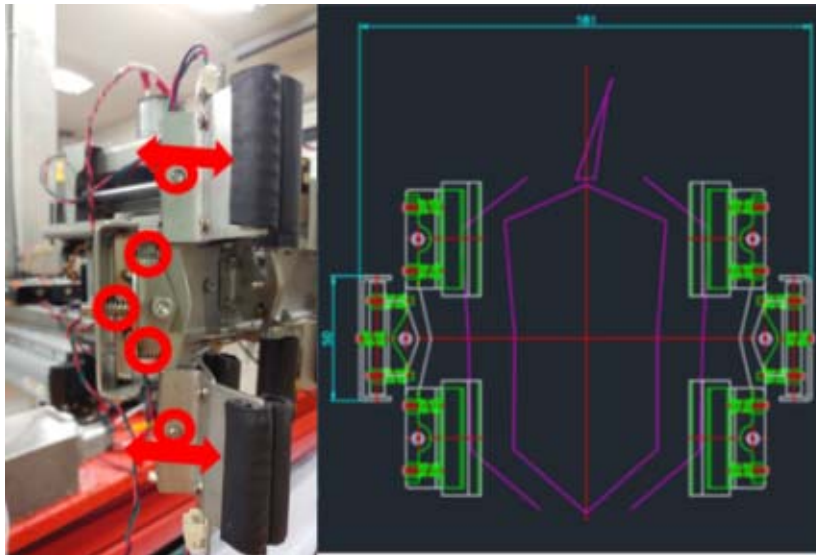


그림 435 상단 하단으로 나눈 그립퍼의 접촉부

그림 435와 같이 그립퍼에서 파프리카의 과실과 접촉하는 부분을 상단과 하단 두 부분으로 나누어 각기 다른 파프리카 과실의 직경에 맞게 파지 할 수 있도록 하였다. 또한, 접촉부의 체결부위를 스프링으로 제작하여 파프리카의 굴곡에 맞게 움직일 수 있도록 하였다.

또한, 파지 작업 시 그립퍼의 움켜쥌이 파프리카의 과실에 압력을 가해 파프리카의 손상이 오는 것을 막고자, 그립퍼의 접촉부에 압력센서를 부착하여 파프리카 과실의 파손이 없는 압력 범위에서 파지 작업을 진행 할 수 있도록 하였다. 파프리카 과실에 주어지는 힘을 감지하는 압력센서를 Flexiforce Pressure Sensor SEN0136으로 선정하였다. Flexiforce Pressure Sensor SEN0136은 최대 110N까지 측정할 수 있기 때문에, 파프리카가 파손하는 최대 압축강도인 97.08N까지 무난히 측정가능하다. 그림 436은 MCU에 연결한 SEN0136의 모습이며, 표 61은 Flexiforce Pressure Sensor SEN0136의 사양을 나타낸다.

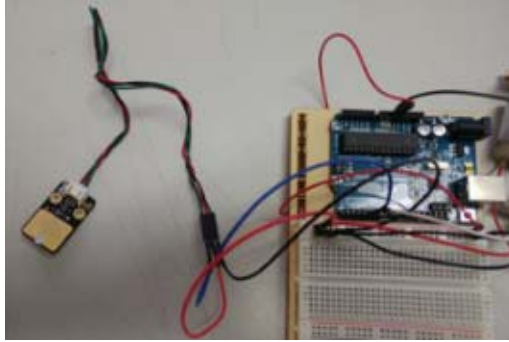


그림 436 SEN0136

Sensing Area	25.4mm diameter
Connector	2-pin Male Square Pin
Force Range	0 - 110N
Linearity (Error)	< $\pm 3\%$
Repeatability	< $\pm 2.5\%$ of full scale
Response Time	< 5 μ sec

표 61 SEN0136의 사양

그립퍼의 파지 작업 시 압력센서를 이용하여 파프리카 과실에 가해지는 압력을 측정하기 위하여, 그림 437과 같이 파프리카의 과실과 접촉하는 부분 6곳에 SEN0136을 부착하였다. 각 부위에 부착된 압력센서에서 측정되는 압력이 16N/cm², 즉 1.63kgf/cm²가 되면 그립퍼의 모터의 회전이 멈추도록 하여 파프리카의 직경보다 더 작게 움켜쥐어 파프리카에 무리한 압력을 가하지 않도록 하였다. 파프리카 과실의 직경 측정 과정은 그림 438과 같다.

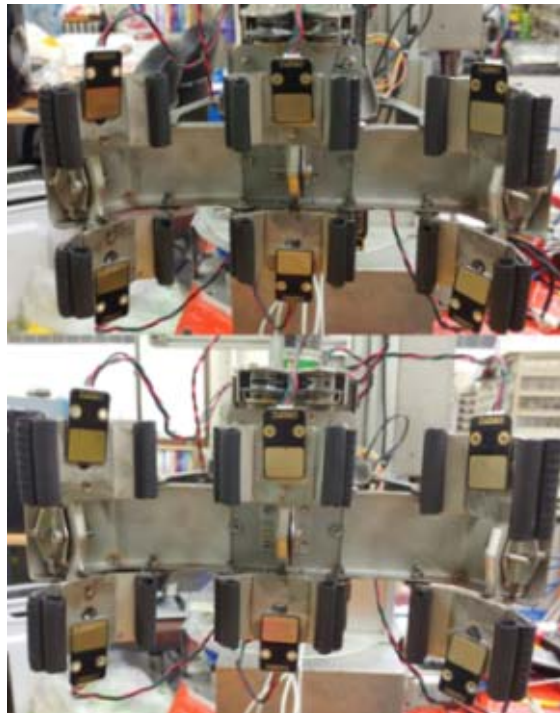


그림 437 압력센서를 부착한 모습

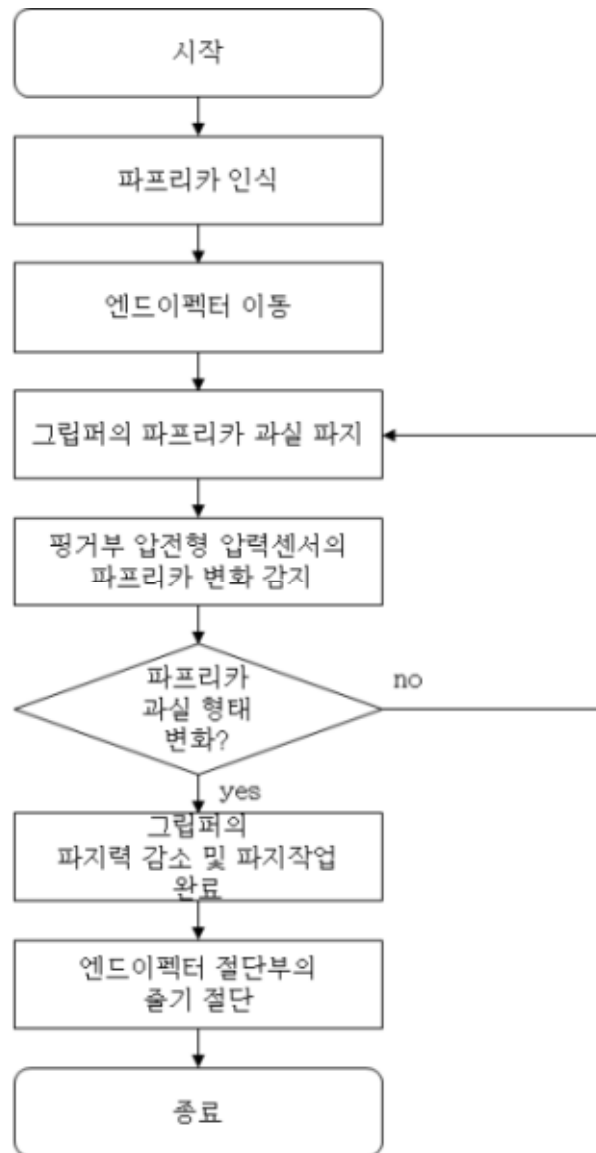


그림 438 파프리카의 직경 측정

- 엔드이펙터 실험 및 분석

1. 엔드이펙터의 그립퍼의 파지 속도 측정 실험 및 분석

본 연구 과제의 3차년도 종료 시 최종 목표는 시간당 100개의 수확 작업을 진행하는 것이다. 시간당 100개의 수확을 이루기 위해서는 파프리카 1개의 수확 작업 시간이 36초 이내에 이루어져야 한다.

2차년도인 금년에는 3차년도 최종 목표인 시간당 100개의 수확작업을 성공하기 위하여 설계 및 제작한 엔드이펙터의 그립퍼의 파지 작업의 속도를 측정하여 얻게된 결과를 분석하여, 분석된 결과를 토대로 엔드이펙터의 그립퍼의 보완점을 찾아보고자 한다.

1개의 수확 작업에 소요되어야 하는 시간은 36초 이내이므로 파지작업에 소요되는 최대 시간은 36초의 3분의 1인 12초로 한다. 그립퍼의 서보모터가 1회전 하는 시간은 0.96초이고, 리드스 크류의 피치가 2mm이므로 이론상 엔드이펙터의 그립퍼의 이송속도는 2.08mm/s이다. 엔드이펙터의 그립퍼의 파지 속도 측정 실험은 파프리카의 과실을 파지하는 데에 걸리는 시간이 12초 이내인지 확인하였으며, 그립퍼의 이송속도와 이론상의 그립퍼의 이송속도의 오차를 측정하였다. 그립퍼의 이송속도는 5초간 이동한 거리를 측정하여 계산하였다. 파프리카의 파지 작업시간은 Android 6.0.1버전의 ‘알람/시계’어플의 스톱워치 기능을 이용하여 측정하였다. 5초간 이동한 거리는 Mitutoyo사의 버니어 캘리퍼스 530-109를 사용하여 측정하였다. 그림 439는 엔드이펙터의 그립퍼의 파지 작업 시간 측정을 진행하는 모습이다. 그림 440는 그립퍼의 이송속도 측정을 진행하는 모습이다.

파지 작업 시간	12초 이내
이론상 그립퍼의 이송속도	2.08mm/s
반복 횟수	30회

표 62 엔드이펙터의 그립퍼의 파지 속도 측정 실험

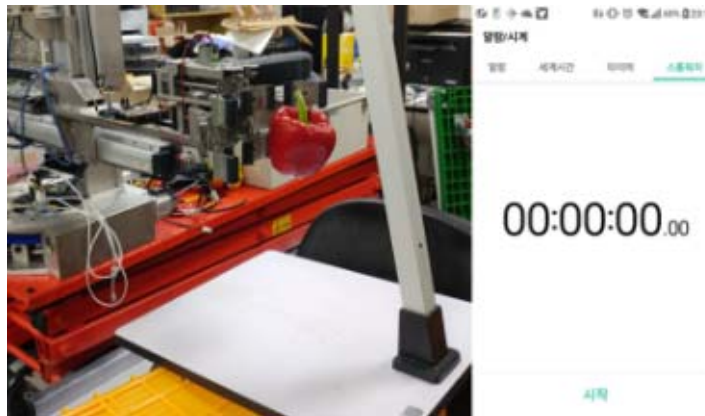


그림 439 엔드이펙터의 그립퍼의 파지 작업 시간 측정



그림 440 측정 장비와 그립퍼의 이론상 이송속도와 실제 이송속도 비교

가. 엔드이펙터의 그립퍼의 파지 작업 시간 측정

총 30번의 파지작업을 진행하여 그립퍼의 파지작업에 소요된 시간을 측정한 결과는 표 63과 같다.

average	12.69s
variance	0.197684
standard deviation	0.444617
standard error	0.081176
degree of freedom	29
Maximum Value	13.44s
Minimum Value	12.03s

표 63 그립퍼의 파지 작업 시간 측정

나. 그립퍼의 이송속도 측정

총 30번 그립퍼를 이송하여 그립퍼의 이송속도를 측정한 결과는 표 64와 같다.

average	2.06mm/s
variance	0.000912
standard deviation	0.030205
standard error	0.005515
degree of freedom	29
Maximum Value	2.10mm/s
Minimum Value	2.00mm/s

표 64 그립퍼의 이송속도 측정

다. 측정 결과 분석

다-1. 엔드이펙터의 그립퍼의 파지 작업 시간 측정 결과 분석

그립퍼의 파지 작업 시간을 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 12초라 할 수 있는 지 확인하였다. 귀무가설과 대립가설은 다음과 같이 설정한다.

$$H_0 : \mu = 12$$

$$H_1 : \mu \neq 12$$

측정 결과로부터 검증 통계량 t는 다음과 같이 계산된다.

$$t = \frac{12.69 - 12}{0.4446 / \sqrt{30}} = 8.5000$$

t 분포표로부터 임계값을 읽으면 $t_{30,0.025} = 2.042$ 이므로 $|t| = 8.5000$ 은 2.042보다 크다. 그러므로 H_0 를 기각한다. 즉 유의수준 0.05에서 파지 작업 시간은 12초가 아니다.

총 30번의 반복 측정 결과 유의수준 0.05에서 그립퍼의 파지 작업 시간은 12초가 아니다. 그립퍼의 파지 작업 시간은 12.03초~13.44초의 범위에서 평균 12.69초이다. 시간당 파프리카의 수확량이 100개가 되기 위해서는 그립퍼의 구동을 보완하여야 한다.

다-2. 그립퍼의 이송속도 측정 결과 분석

그립퍼의 이송속도를 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 2.08mm/s라 할 수 있는 지 확인하였다. 귀무가설과 대립가설은 다음과 같이 설정한다.

$$H_0 : \mu = 2.08$$

$$H_1 : \mu \neq 2.08$$

측정 결과로부터 검증 통계량 t는 다음과 같이 계산된다.

$$t = \frac{2.06 - 2.08}{0.0302 / \sqrt{30}} = -3.6267$$

t 분포표로부터 임계값을 읽으면 $t_{30,0.025} = 2.042$ 이므로 $|t| = 3.6267$ 은 2.042보다 크다. 그러므로 H_0 를 기각한다. 즉 유의수준 0.05에서 그립퍼의 이송속도가 2.08mm/s가 아니다.

총 30번의 반복 측정 결과 유의수준 0.05에서 그립퍼의 이송속도는 2.08mm/s가 아니다. 그립퍼의 실제 이송속도는 2.00mm/s~2.10mm/s의 범위에서 평균 2.06mm/s이다. 그립퍼의 이론상의 이송속도에 비하여 실제 이송속도가 작은 것을 확인하였다. 그립퍼의 하중 및 마찰저항 등의 요인에 의하여 이론상의 이송속도보다 실제 이송속도가 작게 나온 것으로 판단된다.

그립퍼의 이송속도는 이론상의 속도보다 느리고, 그립퍼의 파지 작업 시간은 12초와 같지 않으므로, 그립퍼의 파지 작업 시간을 단축시키기 위해서는 그립퍼의 이송속도를 기존의 속도보다 빠르게 하여야 한다. 그립퍼의 이송속도를 빠르게 하기 위하여, 3차년도에는 서보모터의 속도를 향상시키거나, 리드스크류의 피치를 증가시켜야 할 것이다.

2. 엔드이펙터의 그립퍼의 파지 시 압력변화 측정 실험 및 분석

가. SEN0136 압력센서의 특성 분석

SEN0136 압력센서의 특성을 분석하기 위하여, 표 12와 같이 무게별 출력 전압을 측정하였다.

압력센서의 측정 대상으로 1kg, 1.5kg, 2.5kg, 3kg, 5kg, 7kg, 10kg의 중량원판을 사용하였다. 그림 441은 측정에 사용한 중량원판과 압력센서이다. 각 무게마다 총 5회 측정하여 평균을 산출하였다.

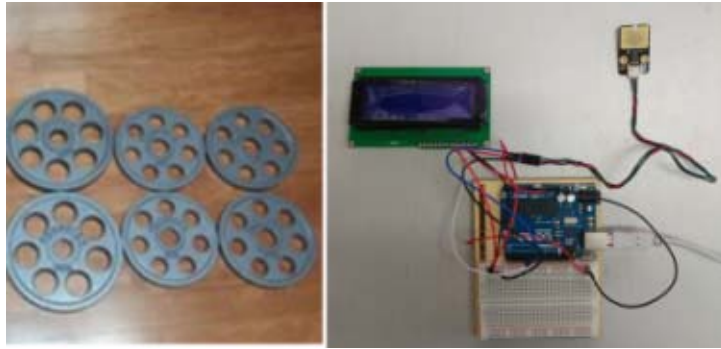


그림 441 압력센서 특성 분석을 위한 중량원판 및 압력 센서

결과 값	출력 전압
측정 무게	1kg, 1.5kg, 2.5kg, 3kg, 5kg, 7kg, 10kg
반복 횟수	5회

표 65 압력센서의 무게별 출력 전압 측정

압력센서의 무게별 출력 전압 측정을 측정함으로써 실제 엔드이펙터의 그림퍼가 파프리카 과실을 파지할 때 파지하는 압력을 측정할 수 있도록 하였다. 압력센서의 무게별 출력 전압은 그림 442과 같다.

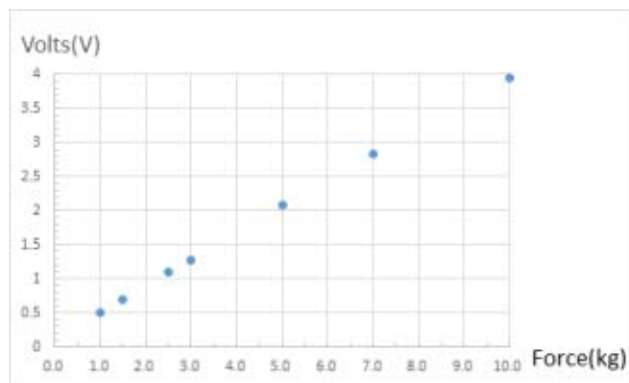


그림 442 압력센서의 무게별 출력 전압

Force(kg)	1	1.5	2.5	3	5	7	10
Volts(V)	0.5	0.70	1.09	1.27	2.09	2.84	3.96

표 66 압력센서의 무게별 출력 전압

측정한 결과를 이용하여 전압에 따른 압력을 예측하기 위하여 아래와 같은 회귀식을 구할 수 있었다.

$$y = -0.0051x^2 + 0.4454x$$

x : 압력
 y : 전압

이를 통하여, 압력센서에서 변화되는 전압을 측정하여 가해지는 압력을 구할 수 있다. 압력 센서의 최소 측정 무게인 1kg에서 최대 측정 무게인 10kg까지 결정계수 0.9993으로 높은 신뢰도가 높음을 확인하였다.

그립퍼의 파지 시 압력변화를 측정하는 이유는 파지 작업 시 압력을 18N/cm² 이상 주게 되면 파프리카의 과실에 상해를 입힐 수 있기 때문이다. 따라서 그립퍼의 파지 작업은 그림 443과 같이 압력이 16N/cm²가 되면 모터의 회전을 멈추도록 할 수 있게 압력변화를 측정하여야 한다.

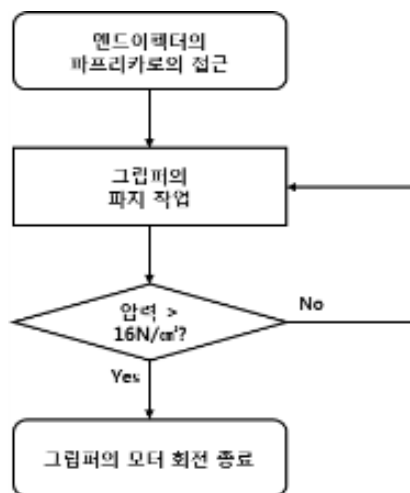


그림 443 그립퍼의 파지 작업 과정

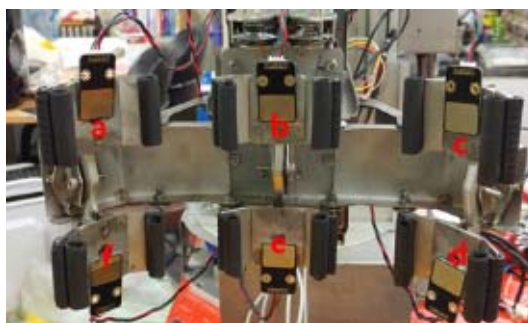


그림 444 그립퍼의 압력센서 (좌측 상단부터 시계방향으로 abcdef)

나. 그립퍼의 파지 작업 종료 시 압력 측정

과실에 가해지는 한계 압력인 16N/cm²(1.63kgf/cm²)에 해당하는 전압은 SEN0136 압력센서의 특성을 분석하여 얻은 회귀식을 통하여 0.71V로 계산되었다. 그립퍼에 부착된 6개의 압력센서가 0.71V를 출력하면 그립퍼의 모터의 회전을 멈추도록 하였다. 본 실험에서는 파지 작업의 종료를 원활하게 수행하는지 파악하기 위하여, 그립퍼의 파지 작업 종료 시 그림 49의 각 센서에서 출력하는 전압을 측정하였다. 영농조합법인 한국농원에서 생산하고 판매한 빨간색 파프리카 30개를

이용하여 실험하였다. 압력센서에서 출력하는 전압과 함께 파지 작업 종료 후 파프리카의 과실의 손상 유무를 확인하였다. 표 67는 그룹퍼의 파지 작업 종료 시 압력 측정 실험의 요인을 나타낸다.

실험 요인	6개 센서의 파지 작업 종료 시 출력 전압	
	파지 작업 종료 시 파프리카 과실의 손상 유무	
반복 횟수 ; 30회		

표 67 그룹퍼의 파지 작업 종료 시 압력 측정 실험

나-1. 그룹퍼의 파지 작업 종료 시 출력 전압 측정 결과

파지 작업 종료 시 출력 전압 측정 결과는 표 68와 같다. 총 30개의 파프리카를 사용하였으며, 총 6개의 압력센서(a,b,c,d,e,f)의 출력 전압을 확인하였다.

	a	b	c	d	e	f	average	variance	SD	SEM	DOF
1	0.73	0.75	0.78	0.72	0.75	0.73	0.74	0.0006	0.02449	0.01	6
2	0.81	0.78	0.77	0.71	0.76	0.72	0.76	0.00139	0.03732	0.0152	6
3	0.80	0.78	0.73	0.71	0.73	0.73	0.75	0.00121	0.03481	0.0142	6
4	0.75	0.79	0.71	0.71	0.75	0.71	0.74	0.00088	0.02967	0.0121	6
5	0.79	0.76	0.77	0.72	0.77	0.71	0.75	0.00097	0.03112	0.0127	6
6	0.78	0.78	0.72	0.72	0.77	0.73	0.75	0.00094	0.03061	0.0125	6
7	0.72	0.71	0.77	0.71	0.72	0.74	0.73	0.00046	0.02139	0.0087	6
8	0.79	0.73	0.82	0.72	0.76	0.72	0.76	0.00174	0.04166	0.017	6
9	0.71	0.78	0.74	0.72	0.72	0.72	0.73	0.00076	0.0276	0.0113	6
10	0.74	0.75	0.75	0.71	0.74	0.74	0.74	0.00019	0.01361	0.0056	6
11	0.71	0.77	0.81	0.71	0.78	0.74	0.75	0.00155	0.03939	0.0161	6
12	0.74	0.75	0.75	0.71	0.75	0.74	0.74	0.00027	0.01649	0.0067	6
13	0.76	0.74	0.80	0.71	0.76	0.74	0.75	0.00078	0.028	0.0114	6
14	0.75	0.75	0.80	0.71	0.76	0.74	0.75	0.00081	0.02846	0.0116	6
15	0.79	0.74	0.76	0.72	0.72	0.71	0.74	0.00098	0.03127	0.0128	6
16	0.72	0.74	0.73	0.71	0.73	0.74	0.73	8.8E-05	0.0094	0.0038	6
17	0.72	0.71	0.72	0.72	0.72	0.71	0.72	1.5E-05	0.00383	0.0016	6
18	0.74	0.75	0.76	0.72	0.78	0.71	0.74	0.00061	0.02479	0.0101	6
19	0.77	0.78	0.77	0.71	0.76	0.75	0.76	0.00065	0.0255	0.0104	6
20	0.79	0.75	0.76	0.71	0.77	0.72	0.75	0.00079	0.0281	0.0115	6
21	0.74	0.78	0.81	0.71	0.75	0.71	0.75	0.00156	0.03944	0.0161	6
22	0.71	0.78	0.72	0.71	0.76	0.72	0.73	0.0008	0.02824	0.0115	6
23	0.75	0.71	0.75	0.72	0.72	0.72	0.73	0.00028	0.01686	0.0069	6
24	0.79	0.75	0.77	0.71	0.76	0.74	0.75	0.00077	0.02774	0.0113	6
25	0.80	0.74	0.73	0.72	0.74	0.74	0.75	0.00083	0.02883	0.0118	6
26	0.73	0.71	0.78	0.72	0.74	0.71	0.73	0.00072	0.02679	0.0109	6
27	0.76	0.78	0.77	0.72	0.75	0.73	0.75	0.00063	0.02514	0.0103	6
28	0.74	0.74	0.76	0.71	0.76	0.74	0.74	0.00028	0.01678	0.0068	6
29	0.73	0.74	0.77	0.72	0.74	0.74	0.74	0.00033	0.01822	0.0074	6
30	0.79	0.74	0.73	0.71	0.74	0.74	0.74	0.00067	0.02594	0.0106	6

표 68 파지 작업 종료 시 출력 전압 측정 결과 (단위 ; V)

각 센서 별 평균, 분산, 표준편차, 표준오차 등은 표 69과 같다.

	a	b	c	d	e	f
average	0.76	0.75	0.76	0.71	0.75	0.73
variance	0.00095769	0.00051862	0.00084328	7.7214E-06	0.00035617	0.00014725
standard deviation	0.03094649	0.02277318	0.02903924	0.00277874	0.01887256	0.01213463
standard error	0.00565003	0.00415779	0.00530182	0.00050733	0.00344564	0.00221547
degree of freedom	29	29	29	29	29	29
Maximum Value	0.81	0.79	0.82	0.72	0.78	0.75
Minimum Value	0.71	0.71	0.71	0.71	0.72	0.71

표 69 각 센서 별 출력전압의 통계값 (단위 ; V)

나-2. 그립퍼의 파지 작업 종료 시 파프리카 과실의 훼손 유무

영농조합법인 한국농원에서 생산하고 판매한 빨간색 파프리카 30개를 이용하여 실험한 결과, 30개 파프리카 모두 과실이 훼손되지 않았다.

나-3. 측정 결과 분석

각 센서별로 그립퍼의 파지 작업 종료 시 출력 전압을 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 0.71V라 할 수 있는 지 확인하였다. 귀무가설과 대립가설은 다음과 같이 설정한다.

$$H_0 : \mu = 0.71$$

$$H_1 : \mu \neq 0.71$$

측정 결과로부터 각 센서의 검증 통계량 t 는 다음과 같다.

$$t_a = 8.8495, t_b = 9.6205, t_c = 9.4307, t_d = 0, t_e = 11.6088, t_f = 9.0274$$

t 분포표로부터 임계값을 읽으면 $t_{30,0.025} = 2.042$ 이므로 t_e 를 제외한 나머지 5개의 값들은 2.042보다 크다. 그러므로 압력센서 e는 파지 작업 시 한계 전압인 0.71V에서 멈추었다 할 수 있지만, 나머지 다섯 압력센서는 0.71V를 초과한 전압에서 모터의 회전이 멈추었다는 것을 확인 할 수 있다. 본 실험에서는 30개의 과실 중 상해를 입은 과실이 없었으나, 0.71V를 초과하여 그립퍼의 모터의 회전이 멈추게 되면 과실에 상해를 입힐 수 있으므로, 한계 압력을 10N/cm²로 조정하여 그립퍼의 모터의 회전이 여유롭게 멈출 수 있도록 조정하겠다.

3. 엔드이펙터의 절단부의 과병 절단속도 측정 실험 및 분석

본 연구 과제의 3차년도 종료 시 최종 목표는 시간당 100개의 수확 작업을 진행하는 것이다. 시간당 100개의 수확을 이루기 위해서는 파프리카 1개의 수확 작업 시간이 36초 이내에 이루어져야 한다.

2차년도인 금년에는 3차년도 최종 목표인 시간당 100개의 수확작업을 성공하기 위하여 설계 및 제작한 엔드이펙터의 절단부의 과병 절단 작업의 속도를 측정하여 얻게 된 결과를 분석하여, 분석된 결과를 토대로 엔드이펙터의 절단부의 보완점을 찾아보고자 한다.

1개의 수확 작업에 소요되어야 하는 시간은 36초 이내이므로 절단작업에 소요되는 최대 시간은 36초의 3분의 1인 12초로 한다. 절단부의 서보모터가 1회전 하는 시간은 0.96초이고, 리드스크류의 피치가 2mm이므로 이론상 엔드이펙터의 절단부의 이송속도는 2.08mm/s이다. 엔드이펙터의 절단부의 과병 절단속도 측정 실험은 파프리카의 과병을 절단하는 데에 걸리는 시간이 12초 이내인지 확인하였으며, 절단부의 이송속도와 이론상의 절단부의 이송속도의 오차를 측정하였다. 절단부의 이송속도는 5초간 이동한 거리를 측정하여 계산하였다. 파프리카 과병의 절단 작업 시간은 Android 6.0.1버전의 ‘알람/시계’어플의 스톱워치 기능을 이용하여 측정하였다. 5초간 이동한 거리는 Mitutoyo사의 버니어 캘리퍼스 530-109를 사용하여 측정하였다. 그림 445는 엔드이펙터의 절단부의 과병 절단 작업 시간 측정을 진행하는 모습이다. 그림 446는 절단부의 이송속도 측정을 진행하는 모습이다.

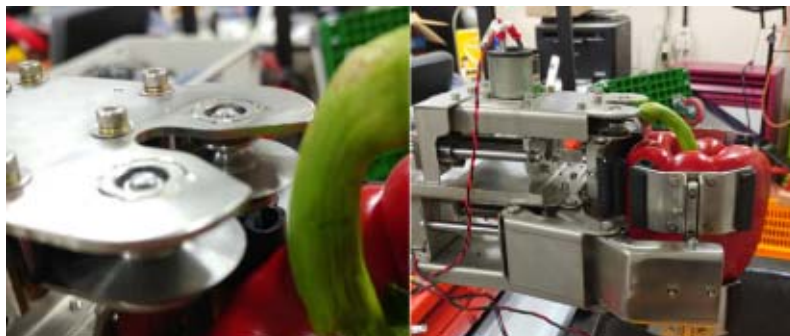


그림 445 엔드이펙터의 절단부의 과병 절단 작업 시간 측정



그림 446 절단부의 이송속도 측정

가. 엔드이펙터의 절단부의 과병 절단 작업 시간 측정

영농조합법인 한국농원에서 생산하여 판매한 빨간 파프리카 30개를 사용하여 파프리카 과병의 절단 작업에 소요된 시간을 측정한 결과는 표 70과 같다.

average	11.01s
variance	0.306458
standard deviation	0.553586
standard error	0.101071
degree of freedom	29
Maximum Value	12.08s
Minimum Value	10.02s

표 70 절단부의 과병 절단 작업 시간 측정

나. 절단부의 이송속도 측정

총 30번 절단부를 이송하여 절단부의 이송속도를 측정한 결과는 표 71와 같다.

average	2.05mm/s
variance	0.001405
standard deviation	0.037478
standard error	0.006842
degree of freedom	29
Maximum Value	2.11mm/s
Minimum Value	1.98mm/s

표 71 절단부의 이송속도

다. 측정 결과 분석

다-1. 엔드이펙터의 절단부의 과병 절단 작업 시간 측정 결과 분석

절단부의 과병 절단 작업 시간을 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 11초라 할 수 있는 지 확인하였다. 귀무가설과 대립가설은 다음과 같이 설정한다.

$$H_0 : \mu = 11$$

$$H_1 : \mu \neq 11$$

측정 결과로부터 검증 통계량 t 는 다음과 같이 계산된다.

$$t = \frac{11.01 - 11}{0.5535 / \sqrt{30}} = 0.0989$$

t 분포표로부터 임계값을 읽으면 $t_{30,0.025} = 2.042$ 이므로 $|t| = 0.0989$ 은 2.042보다 작다.

그러므로 H_0 를 기각할 수 없다. 즉 유의수준 0.05에서 과병의 절단 작업 시간은 11초라 할 수 있다.

총 30개의 과병을 절단하여 얻은 측정 결과 유의수준 0.05에서 절단부의 과병 절단 작업 시간은 11초라 할 수 있다. 절단 작업 시간만 놓고 보았을 때, 시간당 파프리카의 수확량 100개는 충분히 가능하다.

다-2. 그립퍼의 이송속도 측정 결과 분석

그립퍼의 이송속도를 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 2.08mm/s라 할 수 있는 지 확인하였다. 귀무가설과 대립가설은 다음과 같이 설정한다.

$$H_0 : \mu = 2.08$$

$$H_1 : \mu \neq 2.08$$

측정 결과로부터 검증 통계량 t 는 다음과 같이 계산된다.

$$t = \frac{2.05 - 2.08}{0.0375 / \sqrt{30}} = -4.3844$$

t 분포표로부터 임계값을 읽으면 $t_{30,0.025} = 2.042$ 이므로 $|t| = 4.3844$ 은 2.042보다 크다. 그러므로 H_0 를 기각한다. 즉 유의수준 0.05에서 절단부의 이송속도가 2.08mm/s가 아니다.

총 30번의 반복 측정 결과 유의수준 0.05에서 절단부의 이송속도는 2.08mm/s가 아니다. 절단부의 실제 이송속도는 1.98mm/s~2.11mm/s의 범위에서 평균 2.05mm/s이다. 그립퍼의 이론상의 이송속도에 비하여 실제 이송속도가 작은 것을 확인하였다. 그립퍼의 하중 및 마찰저항 등의 요인에 의하여 이론상의 이송속도보다 실제 이송속도가 작게 나온 것으로 판단된다.

○ 파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업시스템의 매니플레이터 제작

- 매니플레이터 제작

1. 파프리카 온실 내 작업 반경을 고려한 매니플레이터의 설계

파프리카는 2013년 575ha가 재배되고 있는데 그 중 100%, 즉 전부가 시설환경에서 재배되고 있다. 시설환경 중 유리온실(자동화·비닐 온실 재배 겸용 포함) 재배 농가는 25%, 자동화 온실(비닐 온실 재배 포함) 재배 농가는 57%, 비닐온실 재배 농가는 18%를 차지한다.

유리온실은 경상남도와 전라남도를 제외하면 평균 14,876㎡ 이상으로 규모가 크다. 경기도, 충청남도, 경상북도의 유리온실 농가 수는 적지만, 규모는 19,834㎡ 이상이며, 경상남도와 전라남도의 유리온실 농가 수는 비교적 많지만, 규모는 경상남도 6,611㎡, 전라남도 9,917㎡ 내외이다. 재배 농가가 57%로 가장 많은 자동화 온실은 강원도, 경상남도의 평균 재배면적이 6,611㎡ 내외

이며, 전라남도는 6,611㎡ 내외이다. 전라북도는 5,619㎡ 정도에서 자동화 온실로 재배되고 있다. 자동화 온실은 시설 단가가 낮기 때문에 다른 온실들이 자동화 온실로 전환되고 있다. 비닐 온실은 강원도, 전라북도, 경상북도에서 주로 운영되고 있다. 비닐온실의 경우 난방 효율이 낮기 때문에 여름작형 재배에 이용되고 있다. 표 72는 (사)한국파프리카생산자조합에서 제공한 2013년 파프리카 농가의 시설형태별 재배면적과 농가 수를 나타낸다. 국내 파프리카의 평균 재실밀도는 3.75주/㎡으로, 파프리카 한 주와 한 주 사이의 거리는 30cm 내외이다.

단위 : 평, 호(%)

지역	평균재배면적	시설형태					
	농가 수	유리온실	유리+자동화	유리+비닐	자동화온실	자동화+비닐	비닐온실
경기	6,873	6,873	-	-	-	-	-
	2(100.0)	2(100.0)	-	-	-	-	-
강원	2,105	4,567	5,350	-	2,102	2,000	1,460
	75(100.0)	3(4.0)	2(2.7)	-	48(64.0)	2(2.7)	20(26.7)
충남	6,848	6,848	-	-	-	-	-
	3(100.0)	3(100.)	-	-	-	-	-
전북	2,724	4,587	22,300	-	1,700	1,550	1,287
	48(100.0)	12(25.0)	1(2.1)	-	13(27.1)	6(12.5)	16(33.3)
전남	2,883	2,929	4,733	-	2,810	-	1,467
	49(100.0)	14(28.6)	3(6.1)	-	27(55.1)	-	5(10.2)
경북	3,222	7,100	-	-	5,000	-	1,860
	10(100.0)	2(20.0)	-	-	1(10.0)	-	7(70.0)
경남	2,135	2,103	3,058	2,500	2,134	2,000	1,947
	161(100.0)	23(14.3)	17(10.6)	2(1.2)	102(63.4)	1(0.6)	16(9.9)
제주	4,571	5,320	-	-	2,700	-	-
	6(100.0)	5(83.3)	-	-	1(16.7)	-	-
전체 농가수	354(100.0)	64(18.1)	23(6.5)	2(0.6)	192(54.2)	9(2.6)	64(18.1)

표 72 2013년 파프리카 농가의 시설형태별 재배면적과 농가 수

파프리카 온실의 작업환경은 그림 447와 같으며, 재배환경은 다음과 같다.

- 수확 범위 ; 최소 착과 높이 60cm부터 무작위 간격, 두줄기 재배, 한줄기에 세 개 열매 착과
- 식재 간격 ; 30cm
- 이랑 간격 : 96cm~98cm



그림 447 파프리카 온실의 작업 환경

매니플레이터의 형태 별 작업 반경 및 특징과 파프리카 온실의 작업환경을 고려하였을 때, 매니플레이터의 부피가 커서는 안되며, 파프리카 수확을 위하여 접근이 용이하여야 한다. 이에 가장 적합한 매니플레이터의 형태는 매니플레이터의 형태 5가지 중 원통형과 직교형의 결합된 형태라 판단하였다. 파프리카 온실의 작업환경을 고려하여, 파프리카의 최대 성장 높이에 맞는 매니플레이터를 설계하여야 한다. 파프리카는 최대 3m까지 성장하나, 매니플레이터가 운반차 위에 올라가도록 제작하기 때문에, 높이는 그에 맞도록 설계하였다. 운반차는 최대 3m까지 올라갈 수 있기 때문에, 운반차 위에서 동작할 매니플레이터의 높이는 파프리카의 성장높이인 3m까지 없으므로, 매니플레이터의 높이는 1000mm로 설계하였다. 또한, 파프리카 온실 내 온실 이랑 간격을 고려하여 설계하여야 한다. 온실 이랑 간격은 1000mm 내외 이므로, 매니플레이터가 500mm 이내로 동작하도록 설계하였다.

반송방향	수직 방향 (vertical)
반송질량	18kg 이내
테이블안내방법	구름 나사
스트로크	1,000mm
희망수명시간	24h X 100day X 5years = 12000h
리드	$l \geq \frac{V_{\max}}{N}$: 5mm 이상
사용속도	10000mm/min : 0.2m/s

표 73 볼나사의 사용조건

개발 시스템의 매니플레이터는 원통형과 직교형의 결합된 형태로서, 매니플레이터의 파프리카로의 수평 접근은 직교 형태로 이루어진다. 파프리카 온실의 이랑 간격은 1000mm 내외 이므로, 매니플레이터의 수평방향 동작부의 길이는 500mm 이내로 설계하여야 한다. 수평운동을 위한 볼나사는 스트로크 500mm로 하여 그 외 사양은 상하운동을 위한 볼나사와 같다. 본 시스템을 구동하기 위한 볼나사의 사용조건은 표 73과 같다.

그림 53은 매니플레이터의 상하운동을 담당하는 부분을 Autodesk의 AutoCad 2016을 이용하여 설계한 모습이며, 그림 54는 매니플레이터의 수평운동을 담당하는 부분을 Autodesk의 AutoCad 2016을 이용하여 설계한 모습이다.



그림 53 매니플레이터의 상하운동

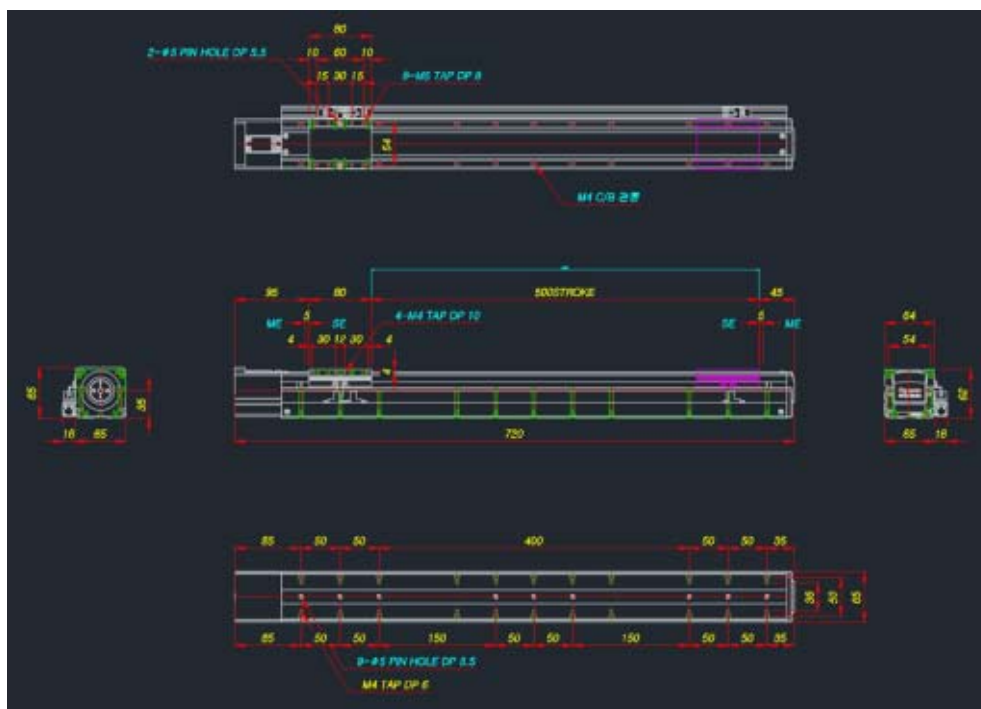


그림 54 매니플레이터의 수평운동

그림 55는 매니플레이터의 수평운동을 담당하는 부분과 상하운동을 담당하는 부분을 서로 체결하기 위하여 Autodesk의 AutoCad 2016을 이용하여 설계한 브라켓이다.

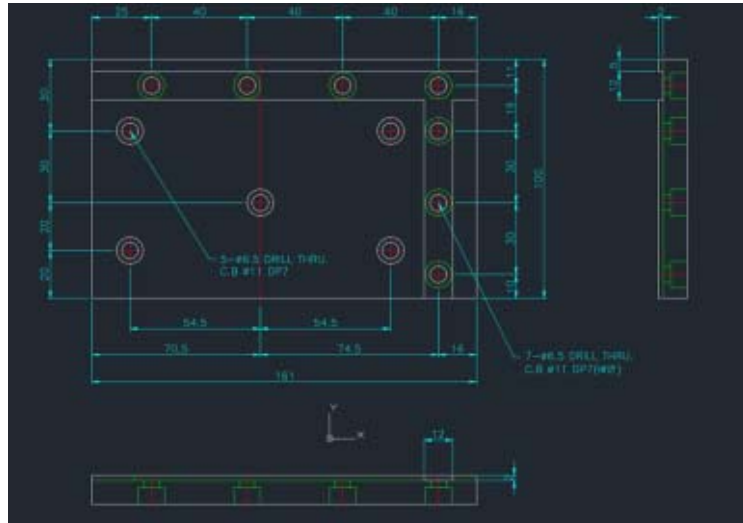


그림 55 수평운동부와 상하운동부 체결 브라켓

그림 56는 직교운동과 회전운동이 가능하도록 설계한 매니플레이터의 3차원 설계도이다. Autodesk의 Inventor 2016을 이용하여 설계하였다. 상하운동을 담당하는 부분의 밑에 회전운동을 할 수 있는 부분을 부착하여 매니플레이터의 형태 중 직교형과 원통형이 결합된 형태로 설계하였다.

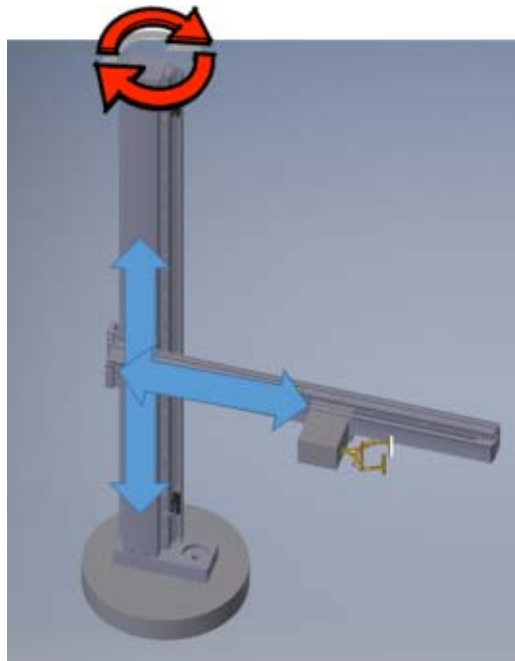


그림 56 매니플레이터의 3차원 도면

그림 57은 매니플레이터의 회전운동을 담당하는 부분을 Autodesk의 Autocad 2016을 이용하여 설계한 모습이다.

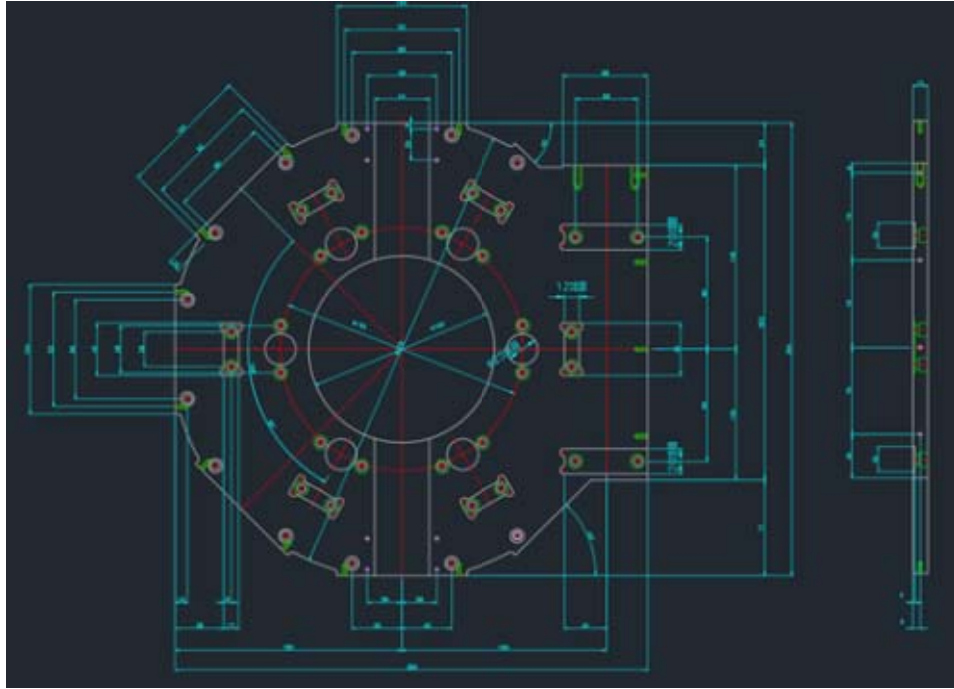


그림 57 매니플레이터의 회전운동부

그림 58은 매니플레이터의 직교운동을 담당하는 부분과 회전운동을 담당하는 부분을 서로 체결하기 위하여 Autodesk의 AutoCad 2016을 이용하여 설계한 브라켓이다.

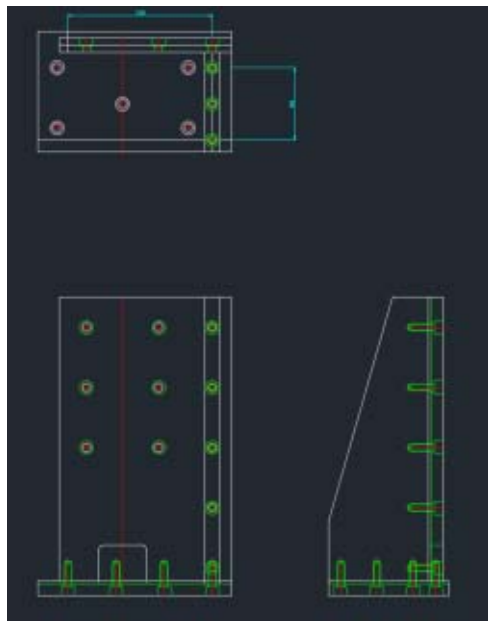


그림 58 직교운동부와 회전운동부 체결 브라켓

2. 파프리카 온실 내 작업 반경을 고려한 매니플레이터의 제작

매니플레이터의 상하운동을 담당하는 수직방향의 볼나사의 리드는 10mm이며, 수직방향의 최대 하중은 18kg이다. 상하운동 시 최대 운송 속도는 500mm/s이며, 수직방향 이송 시 반복이송 정밀도는 0.005mm이다. 연삭 Nut 및 축을 채용하여 정밀하며, 매니플레이터의 운동 시 소음이 적도록 하였다. 차폐 형태로 제작하여 온실 환경에서의 내부식성을 높였다. 재질을 알루미늄으로 하여 경량화 하였다.

매니플레이터의 수평운동을 담당하는 수평방향의 볼나사의 리드는 10mm이며, 수평방향의 최대 하중은 25kg이다. 수평운동 시 최대 운송 속도는 500mm/s이며, 수평방향 이송 시 반복이송 정밀도는 0.005mm이다. 연삭 Nut 및 축을 채용하여 정밀하며, 매니플레이터의 운동 시 소음이 적도록 하였다. 차폐 형태로 제작하여 온실 환경에서의 내부식성을 높였다. 재질을 알루미늄으로 하여 경량화 하였다.

웜과 웜기어를 이용하여 매니플레이터의 회전운동이 가능하도록 제작하였다. 매니플레이터의 회전운동의 감속비는 모터가 150바퀴를 돌아야 매니플레이터가 1바퀴 돌도록 구성하였다. 차폐 형태로 제작하여 온실 환경에서의 내부식성을 높였다. 재질은 알루미늄으로 하여 경량화 하였다.

그림 59는 실제 제작한 매니플레이터의 모습이다.



그림 59 실제 제작한 매니플레이터

Autodesk의 AutoCad 2016을 이용하여 본 매니플레이터를 설계하였다. 각종 프레임 및 부품 제작은 CNC 조각기를 이용 1/100mm의 정밀도로 제작하여 사용하였다. 수확작업을 수행하는데 있어 매니플레이터의 역할은 상해를 입기 쉬운 파프리카에 엔드이펙터를 근접시키는 것이다. 고속 작업이 가능하기 위하여 경량이어야 하고, 단순 반복적인 작업에서도 대응 할 수 있도록 내구성이 높아야 한다. 특히 매니플레이터의 작업 환경이 습도가 높은 온실 내부이므로 내부식성이어야 한다. 따라서 매니플레이터의 각 부품은 연삭 Nut 및 축을 채용하여 정밀하며, 매니플레이터의 운동 시 소음이 적도록 하였다. 차폐 형태로 제작하여 온실 환경에서의 내부식성을 높였다. 재질을 알루미늄으로 하여 경량화 하였다.

- 매니플레이터 구동제어시스템 제작

1. 매니플레이터의 회전운동을 위한 모터 및 모터 드라이버 선정

모터 선정은 매니플레이터의 회전운동을 위한 동력원을 선정하는 것이므로 중요하다. 그림 60은 매니플레이터의 회전운동을 위한 모터의 선정 방법을 나타낸다.

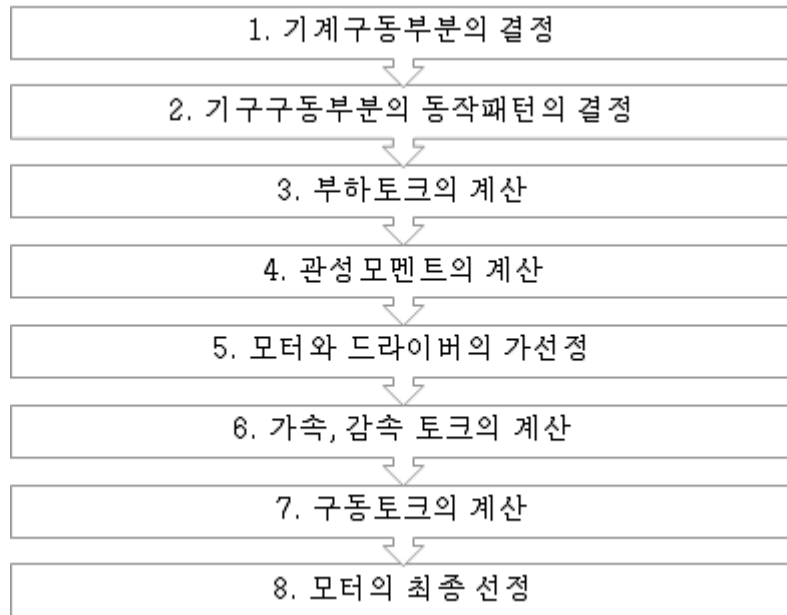


그림 60 모터 선정 방법

모터의 선정 방법을 고려하여, 매니플레이터의 회전운동을 위한 모터를 그림 61과 같이 Panasonic MSMD022G1T 모터를 선정하였다. 표 72는 선정한 모터의 사양을 나타낸다.



그림 61 Panasonic MSMD022G1T

AC 200V용 모터	
전원 설비 용량	0.5 kVA
정격 출력	200 W
정격 토크	0.64 N·m
순간 최대 토크	1.91 N·m
정격 전류	1.6 A (rms)
순간 최대 전류	6.9 A (o-p)
정격 회전 속도	3000 r/min
최고 회전 속도	5000 r/min
로터 관성 모멘트	$0.16 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
1회전 당 분해능	1,048,576
정마찰 토크	1.27 N·m 이상

표 74 Panasonic MSMD022G1T의 사양

매니플레이터의 상하운동 및 수평운동의 동력원인 Panasonic MSMD022G1T의 제어를 위한 모터드라이버는 Panasonic MADHT1507로 선정하였다. 그림 62는 선정한 Panasonic MADHT1507의 모습이다.



그림 62 Panasonic MADHT1507

온습한 파프리카 온실 환경에서 매니플레이터의 작업이 이루어지므로, 매니플레이터의 모터드라이버가 온습한 파프리카 온실 환경에서 작동이 가능한지 확인하여야 한다. 매니플레이터의 모터드라이버의 환경 조건을 확인한 결과는 표 73과 같다.

항목	조건
동작 온도	0℃ ~ 55℃ (비동결)
동작 습도	20% ~ 85% RH (비응축)
보관 온도	-20℃ ~ 80℃
보관 습도	20% ~ 85% RH (비응축)
진동	10Hz ~ 60Hz

표 75 모터드라이버의 환경 조건

파프리카 온실은 파프리카의 바른 생육을 위하여 18℃에서 27℃ 사이의 온도를 유지하여야 한다. 또한 작물 생장에 최적의 상대습도는 70% RH에서 80% RH이다. 모터드라이버의 환경 조건과 실제 파프리카 온실 내 환경을 비교한 결과, 선정된 Panasonic MADHT1507는 온실 내에서 매니플레이터를 구동하는데 적합하다는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 63은 매니플레이터의 상하, 수평, 회전 운동을 제어하기 위한 모터 드라이버의 모습이다. 왼쪽부터 차례로 회전 운동, 상하 운동, 수평 운동을 담당한다.



그림 63 매니플레이터의 모터 드라이버

2. 매니플레이터의 구동제어 회로도 설계

그림 64와 같이 각 모터드라이버와 전체 시스템의 제어부는 연결되어 통신한다.

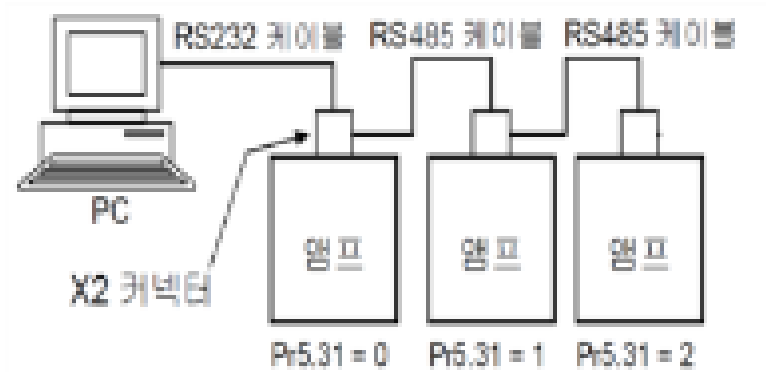


그림 64 모터 드라이버와 PC의 통신

매니플레이터의 모터 드라이버와 전체 시스템의 제어부는 rs232를 이용한 시리얼 통신으로 서로간의 정보를 주고 받도록 하였다. 시리얼 통신(Serial Communication, 직렬 통신)은 임베디드 시스템 상에서 각종 프로세서와 회로들 간의 정보를 주고 받을 수 있게 하는 표준 프로토콜의 일종이다. 시리얼 버스는 전송용(TX), 수신용(RX)의 단 2개의 선으로만 구성된다. 프로세서 간의 TX, RX 연결은 그림 65와 같은 형태로 연결 된다.

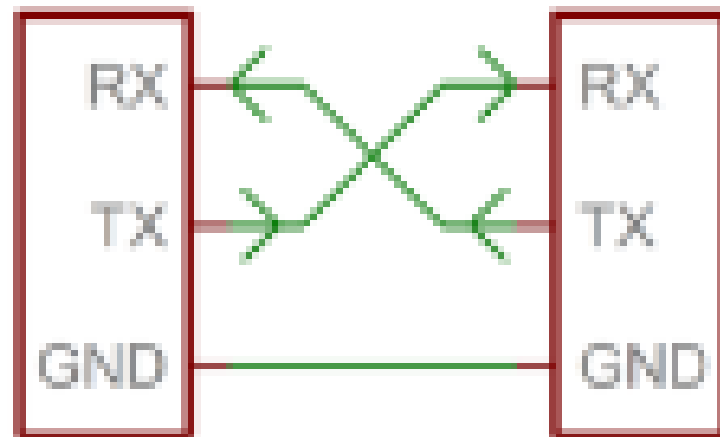


그림 65 시리얼 통신의 연결

전체 시스템의 제어부는 영상정보를 처리하고, 매니플레이터를 구동하여야 하기 때문에 PC로 구성하고자 한다. PC와 매니플레이터의 모터 드라이버의 시리얼 통신을 위하여 그림 66와 같은 USB to RS232 변환 모듈을 사용하였다.



그림 66 USB to RS232 변환 모듈

매니플레이터의 움직임은 연계되어 움직여야 하기 때문에 회전운동을 담당하는 모터 드라이버는 PC와 RS-232 통신으로 연결하고, 각 모터 드라이버는 RS-485 통신으로 연결하여, 모터 드라이버 상호간의 정보 전달 및 PC와 모터 드라이버의 정보 전달의 연계성을 높였다.

그림 67은 모터 드라이버 MADHT1507의 회로도 이다.

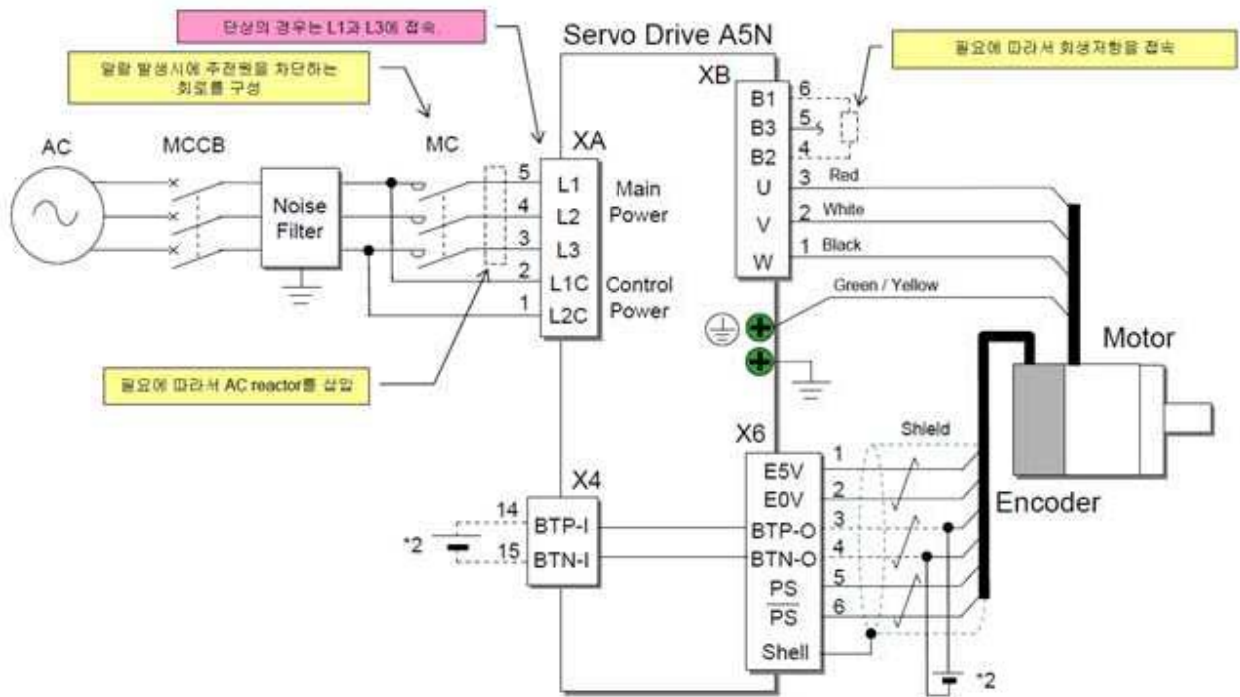


그림 67 MADHT1507의 회로도

2. 매니플레이터의 구동제어시스템 제작

상하운동 및 수평운동 시 볼 스크류의 스트로크를 벗어나 동작할 경우 매니플레이터의 파손이 발생하므로 이를 방지하기 위하여 그림 68과 같이 상하운동 및 수평운동 축에 광센서를 이용하여 한계점과 원점을 확인할 수 있도록 하였다.



그림 68 리미트 센서 및 원점 센서

모터 컨트롤러 및 모터, 리미트 센서 등 각종 장치와 부품, 센서들에 전원을 공급하고 신호를 주고 받기 위하여 그림 69와 같이 단자대를 이용하여 각 부품들을 체결하였다.



그림 69 모터 컨트롤러 등 부품과 단자대 연결

- 매니플레이터 구동제어 소프트웨어 제작

그림 70와 같이 각 모터드라이버와 전체 시스템의 제어부는 연결되어 통신한다.

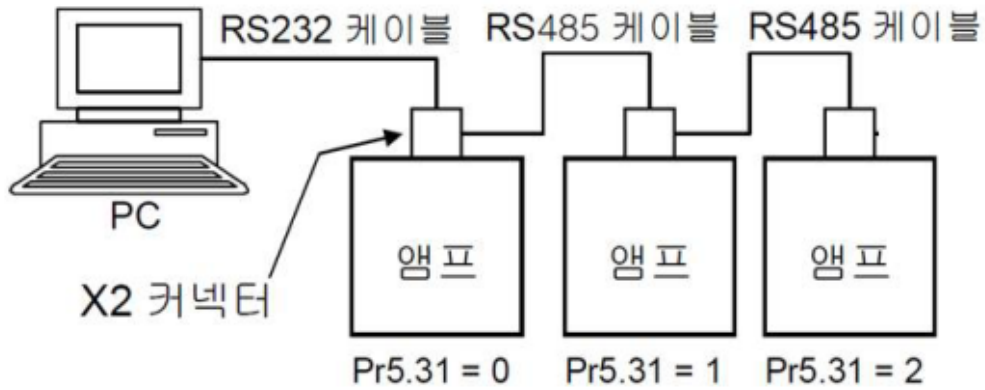


그림 70 모터드라이버와 PC의 통신

PC와 각 모터 드라이버 상호간의 통신을 위하여 그림 71과 같이 모터드라이버와 시리얼 통신이 가능하도록 프로그램을 제작하였다.

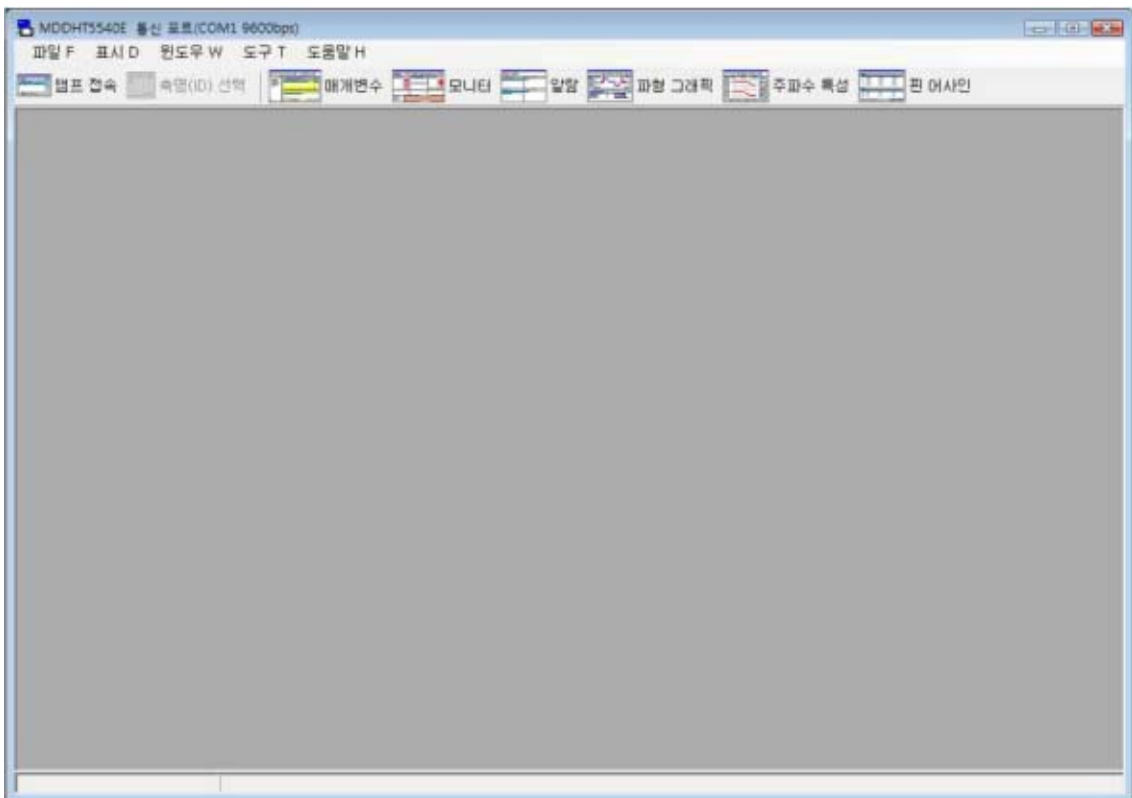


그림 71 PC와 모터 드라이버의 상호간 통신 프로그램

통합개발환경인 Visual Studio 2016을 사용하였으며, C++의 MFC(Microsoft Foundation Classes)을 기반으로 작성하였다. 그림 72와 같은 창에서 PC와 통신을 할 모터 드라이버의 포트 및 통신 속도를 설정하도록 하였다.

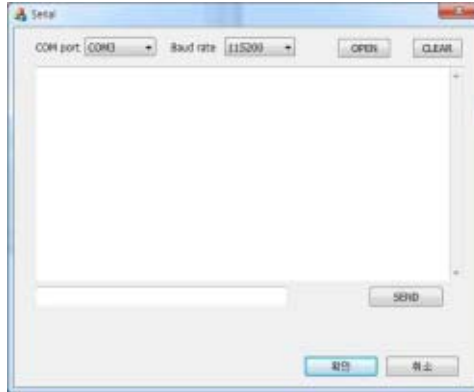


그림 72 시리얼 통신

PC와 모터 드라이버 간의 주고 받는 인자를 그림 73과 같이 파라미터로 변수로 설정하였다. 시리얼 통신을 통하여 각 모터 드라이버의 매개변수들을 설정할 수 있도록 하였다.

```
public:
    CMycomm();
    virtual ~CMycomm();

    // Attributes
public:
    HANDLE  _hComDev;
    HWND    _hWnd;

    BOOL    _bIsOpened;
    CString _sComPort;
    CString _sBaudRate;
    CString _sParity;
    CString _sDataBit;
    CString _sStopBit;
    BOOL    _bFlowCtrl;

    OVERLAPPED  _OLR, _OLW;
    char  _sInBuf[MAXBUF * 2];
    int  _nLength;
    CEvent  *_pEvent;

    // Operations
public:
    void  Clear();
    int  Receive(LPCTSTR Inbuf, int len);
    BOOL  Send(LPCTSTR outbuf, int len);
    BOOL  Create(HWND hWnd);
    void  HandleClose();
    void  Close();
    void  ResetSerial();
    // UINT  CommThread(LPVOID InData);
    CMycomm(CString port, CString baudrate, CString parity, CString databit, CString stopbit);

protected:
    DECLARE_MESSAGE_MAP()
};
```

그림 73 시리얼 통신 상의 파라미터

모터 드라이버의 매개변수를 설정한 후 그림 74와 같이 PC에서 모터를 제어하여 매니플레이터의 움직임을 제어할 수 있도록 하였다.

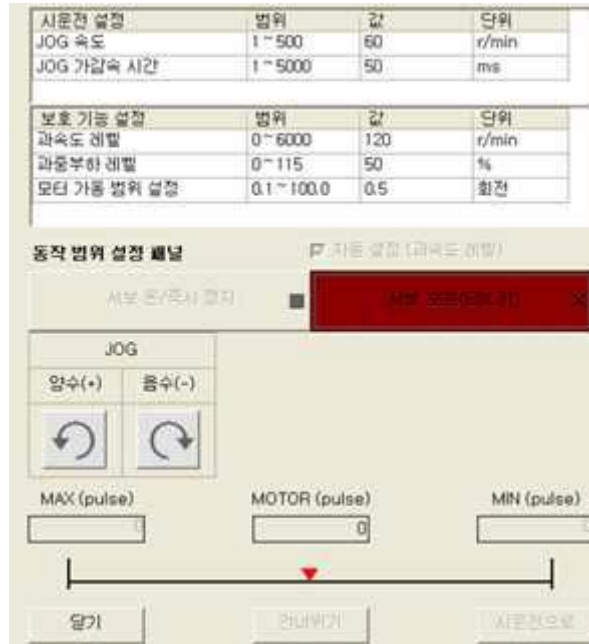


그림 74 모터 제어

매니플레이터 구동제어 소프트웨어는 모터의 회전 방향, 모터의 회전 속도를 조절 할 수 있다.

- 매니플레이터 실험

가. 매니플레이터의 상하 운동 반복 위치 오차 측정

그림 75와 같이 Height Gauge를 이용하여 매니플레이터의 상하 운동 시 위치 오차를 측정하였다. 300r/min의 회전 속도로 10초간 이송하였을 때의 이론상 이송거리와 실제 이송거리를 비교하여 오차를 30회 반복하여 구하였다.

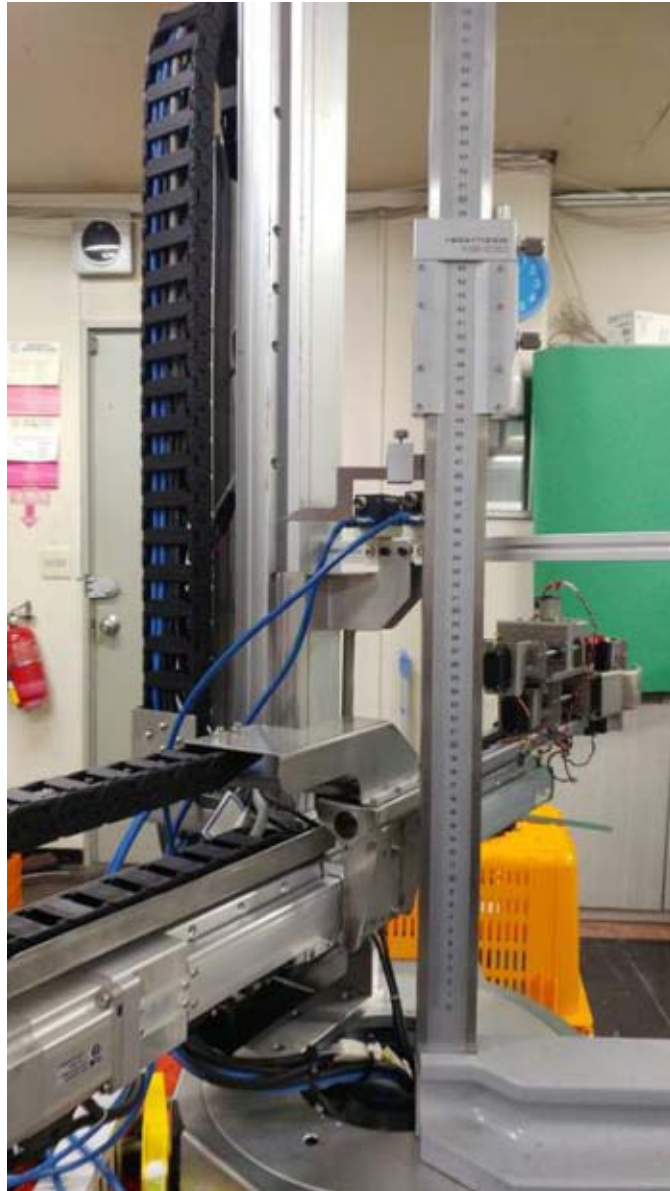


그림 75 상하 운동 반복 위치 오차 측정

나. 매니플레이터의 수평 운동 반복 위치 오차 측정

그림 76과 같이 버니어 캘리퍼스를 이용하여 매니플레이터의 수평 운동 시 위치 오차를 측정하였다. 300r/min의 회전 속도로 10초간 이송하였을 때의 이론상 이송거리와 실제 이송거리를 비교하여 오차를 30회 반복하여 구하였다.



그림 76 수평 운동 반복 위치 오차 측정

다. 매니플레이터의 회전 운동 반복 위치 오차 측정

그림 77과 같이 매니플레이터의 회전 운동 시 위치 오차를 측정하였다. 300r/min의 회전 속도로 10초간 이송하였을 때의 이론상 각도와 실제 각도를 비교하여 오차를 30회 반복하여 구하였다.



그림 77 회전운동 반복 위치 오차 측정

- 매니플레이터 실험 결과

가. 매니플레이터의 상하 운동 반복 위치 오차 측정 결과

총 30회동안 10초 간 매니플레이터의 상하 운동을 하여 얻은 매니플레이터의 이송거리는 표 74과 같다.

average	50.00mm
variance	0.000911
standard deviation	0.030182
standard error	0.00551
degree of freedom	29
Maximum Value	50.05mm
Minimum Value	49.95mm

표 76 상하 운동 반복 위치 오차 측정

나. 매니플레이터의 수평 운동 반복 위치 오차 측정 결과

총 30회동안 10초 간 매니플레이터의 수평 운동을 하여 얻은 매니플레이터의 이송거리는 표 75와 같다.

average	50.00mm
variance	0.000834
standard deviation	0.028883
standard error	0.005273
degree of freedom	29
Maximum Value	50.05mm
Minimum Value	49.96mm

표 77 수평 운동 반복 위치 오차 측정

다. 매니플레이터의 회전 운동 반복 위치 오차 측정 결과

총 30회동안 10초 간 매니플레이터의 회전 운동을 하여 얻은 매니플레이터의 이송각도는 표 76와 같다.

average	120.12도
variance	0.312058
standard deviation	0.558621
standard error	0.10199
degree of freedom	29
Maximum Value	120.99도
Minimum Value	119.07도

표 78 회전 운동 반복 위치 오차 측정

라. 실험 결과 분석

상하운동 및 수평운동 시 매니플레이터의 이론상 이송 거리는 50mm이다. 매니플레이터의 상하운동 및 수평운동의 이송거리를 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 50mm라 할 수 있는 지 확인하였다. 귀무가설과 대립가설은 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned}H_0 : \mu &= 50 \\H_1 : \mu &\neq 50\end{aligned}$$

측정 결과로부터 상하운동 및 수평운동의 검증 통계량 t 는 다음과 같다.

$$t_{\text{상하}} = -0.8977, t_{\text{수평}} = 0.6339$$

t 분포표로부터 임계값을 읽으면 $t_{30,0.025} = 2.042$ 이므로 상하운동과 수평운동 모두 2.042보다 작다. 그러므로 상하운동 및 수평운동의 측정 이송 거리는 모두 이론상 이송거리와 같다고 할 수 있다.

회전운동 시 매니플레이터의 이론상 이송 각도는 120도이다. 매니플레이터의 회전운동의 이송 각도를 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 120도라 할 수 있는 지 확인하였다. 귀무가설과 대립가설은 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned}H_0 : \mu &= 120 \\H_1 : \mu &\neq 120\end{aligned}$$

측정 결과로부터 회전운동의 검증 통계량 t 는 다음과 같다.

$$t_{\text{회전}} = 1.1891$$

t 분포표로부터 임계값을 읽으면 $t_{30,0.025} = 2.042$ 이므로 회전운동 검증 통계량은 2.042보다 작다. 그러므로 회전운동의 측정 이송 각도는 이론상 이송 각도와 같다고 할 수 있다.

파프리카 온실 내에서 작물에 훼손을 최소화 하며 엔드이펙터를 파프리카에 접근시키는 것이 매니플레이터의 목적이다. 본 개발 시스템에서 제작한 매니플레이터는 그 목적에 부합하게 정밀하게 이송가능하다고 판단한다.

○ 엔드이펙터와 매니플레이터의 통합을 통한 절단 작업시스템 제작

- 절단 작업 시스템 제작

제작한 엔드이펙터와 매니플레이터의 통합을 위하여 그림 78과 같은 체결부를 설계하였다.

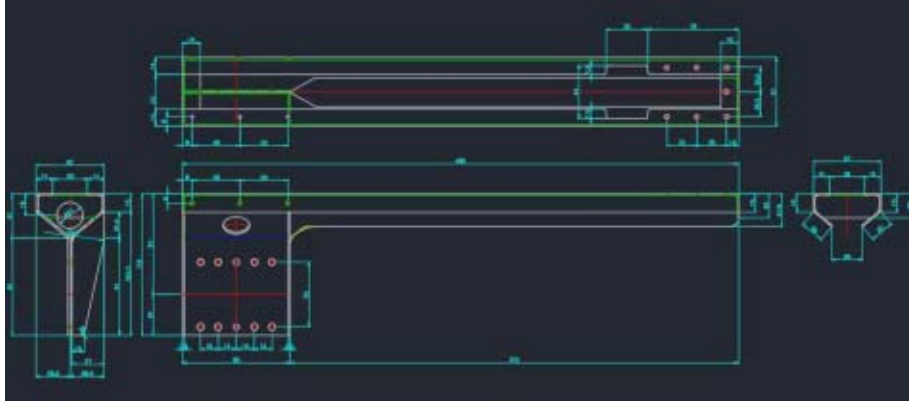


그림 78 엔드이펙터와 매니플레이터의 결합부

그림 79는 엔드이펙터와 매니플레이터의 통합 설계도이다.

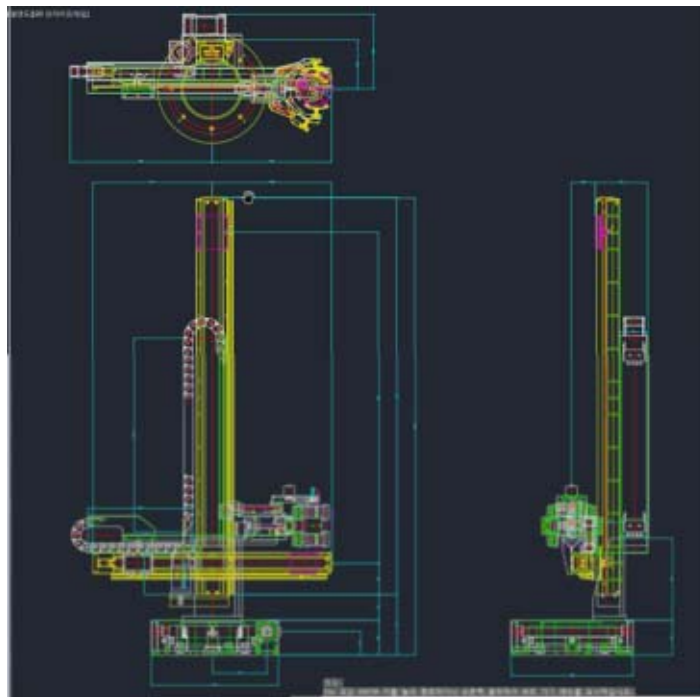


그림 79 엔드이펙터와 매니플레이터의 통합

그림 80은 실제 통합된 엔드이펙터와 매니플레이터의 모습이다.



그림 80 실제 통합된 엔드이펙터와 매니플레이터의 모습

제작을 위한 설계도는 Autodesk의 Autocad 2016을 이용하여 설계하였다. 엔드이펙터와 매니플레이터의 체결을 위한 체결부는 제작은 CNC(Computer Numerical Control) 조각기를 이용하여 제작하였다. 각 기계요소들의 재질은 무게를 줄이고, 부식되지 않도록 하기 위하여 두랄루민을 사용하여 제작하였다. 보완 및 수정을 용이하게 하기 위하여 탈부착이 가능하도록 3mm의 볼트로 고정하였다.

- 절단 작업 시스템 구동제어시스템 제작

엔드이펙터의 구동을 위한 제어부는 MCU(Micro Controller Unit)인 Arduino Uno를 사용하여 구성하였다. 매니플레이터의 구동은 모터드라이버에 의하여 이루어진다. 엔드이펙터의 구동과 매니플레이터의 구동은 PC와 엔드이펙터의 MCU, 매니플레이터의 모터드라이버의 시리얼 통신에 의하여 이루어진다. 시리얼 통신(Serial Communication, 직렬 통신)은 임베디드 시스템 상에서 각종 프로세서와 회로들 간의 정보를 주고 받을 수 있게 하는 표준 프로토콜의 일종이다. 시리얼 버스는 전송용(TX), 수신용(RX)의 단 2개의 선으로만 구성된다. 프로세서간의 TX, RX 연결은 그림 81과 같은 형태로 연결된다.

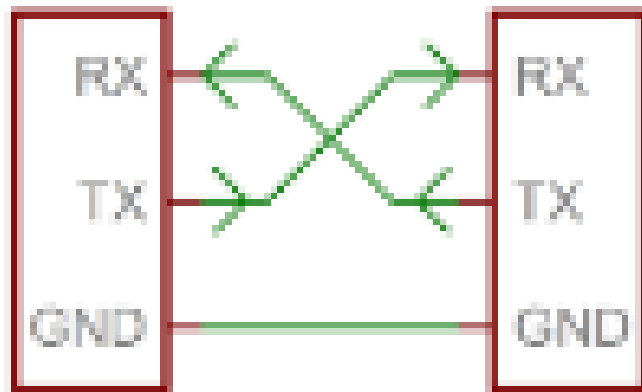


그림 81 시리얼 통신의 연결

과프리카의 인식과정을 거치는 제어부는 영상정보를 처리하고, 매니플레이터를 구동하여야 하기 때문에 PC로 구성하고자 한다. 그림 82는 엔드이펙터의 MCU와 과프리카의 인식과정을 거치는 제어부인 PC와의 연결을 도식화한 모습이다.

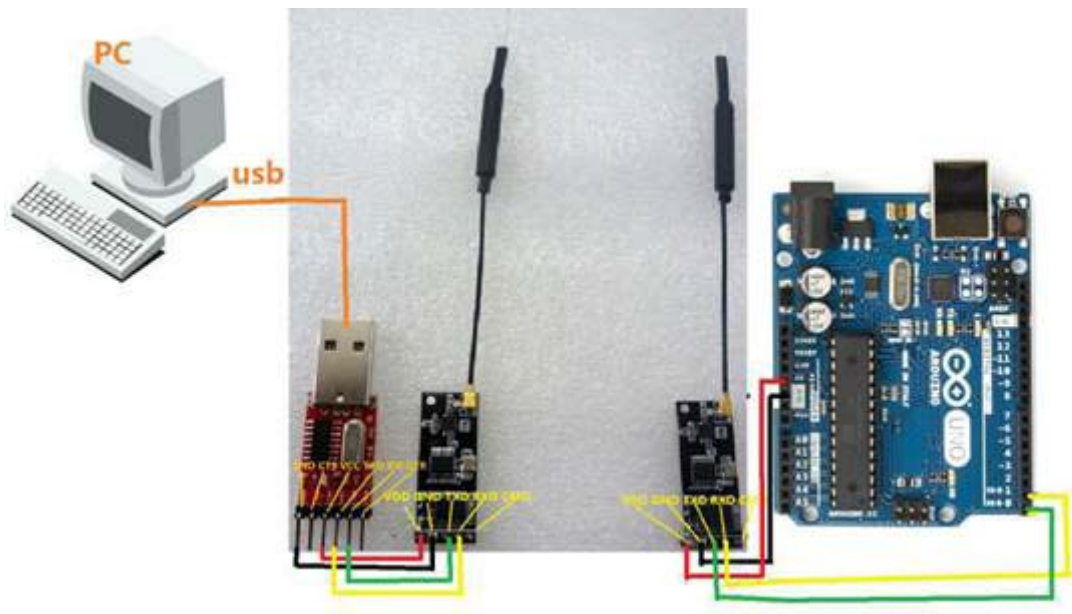


그림 82 RS232 인터페이스를 이용한 각 제어부 상호간 통신

그림 83은 매니플레이터의 상하, 수평, 회전 운동을 제어하기 위한 모터 드라이버의 모습이다. 왼쪽부터 차례로 회전 운동, 상하 운동, 수평 운동을 담당한다.



그림 83 매니플레이터의 모터 드라이버

그림 84와 같이 각 모터드라이버와 전체 시스템의 제어부는 연결되어 통신한다.

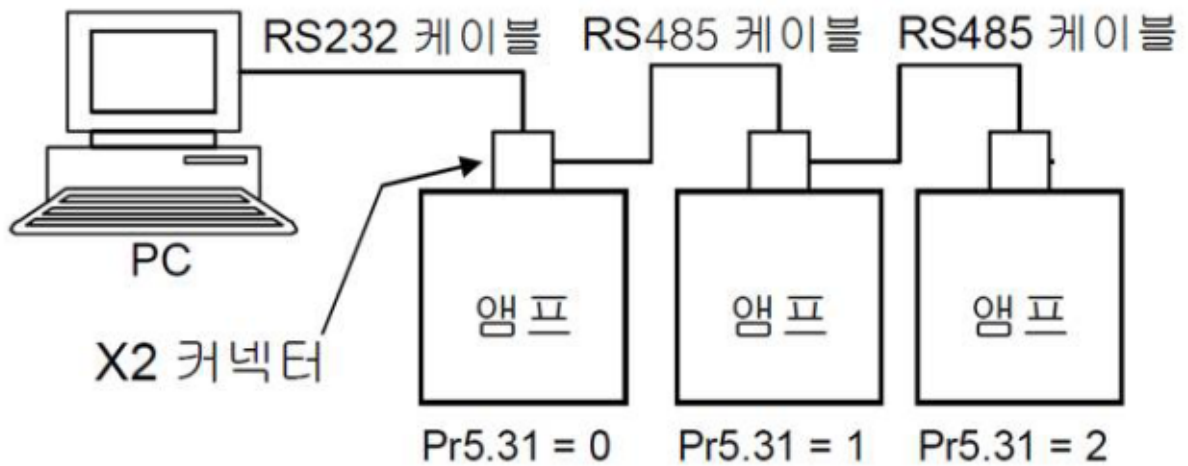


그림 84 모터 드라이버와 PC의 통신

매니플레이터의 모터 드라이버와 전체 시스템의 제어부는 rs232를 이용한 시리얼 통신으로 서로간의 정보를 주고 받도록 하였다.

매니플레이터의 움직임은 연계되어 움직여야 하기 때문에 회전운동을 담당하는 모터 드라이버는 PC와 RS-232 통신으로 연결하고, 각 모터 드라이버는 RS-485 통신으로 연결하여, 모터 드라이버 상호간의 정보 전달 및 PC와 모터 드라이버의 정보 전달의 연계성을 높였다. 그림 85는 제작한 절단 작업 시스템의 구동제어시스템이다.



그림 85 제작한 절단 작업 시스템의 구동제어시스템

- 절단 작업시스템 구동제어 소프트웨어 제작

Java와 C를 기반으로 한 크로스 플랫폼 응용 소프트웨어인 ‘Arduino IDE(Integrated Development Environment; 통합개발환경)’를 이용하여 엔드이펙터 구동제어 및 과프리카 직경 측정 알고리즘 소프트웨어를 제작하였다. Arduino IDE는 C++을 사용하여 원하는 동작을 하도록 코딩을 하고 이것을 보드에 업로드하면 Arduino가 동작한다. Arduino 업로드는 플래시 메모리에 쓰지므로 다음부터는 전원만 인가하면 동작한다. Arduino IDE에서 업로드가 실행되면, 부트로더가 동작하기 위해 DTR 신호가 타겟 마이크로컨트롤러에 전달되어 리셋되고 부트로더가 실행된다. 리셋 신호를 ATmega16U2에서 전달하기 위해 캐패시터(0.1~0.22uF)를 사용하여 타겟과 연결되어 있다. 그림 86은 Arduino IDE를 통하여 Arduino Uno에 코드를 업로드하는 과정이다.

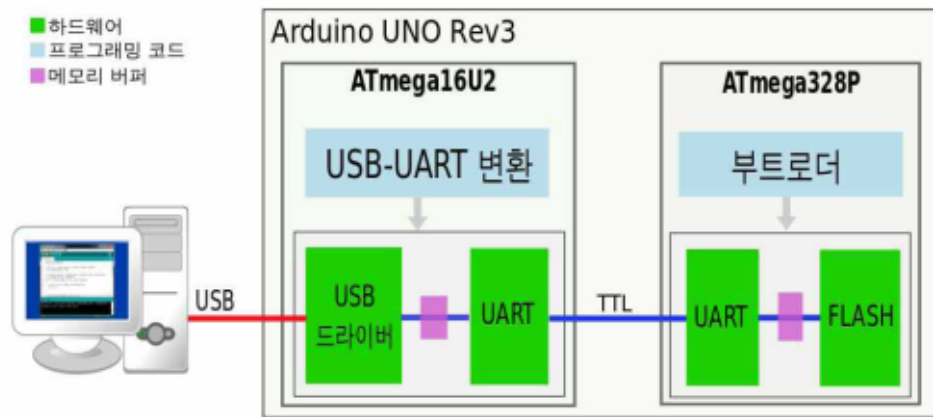


그림 86 Arduino Uno의 업로드 구조

매니플레이터 구동제어를 위한 프로그램은 통합개발환경인 Visual Studio 2016을 사용하였으며, C++의 MFC(Microsoft Foundation Classes)을 기반으로 작성하였다. PC에서 모터의 매개변수를 조절하여 모터드라이버에 신호를 보낼 수 있게 하였다.

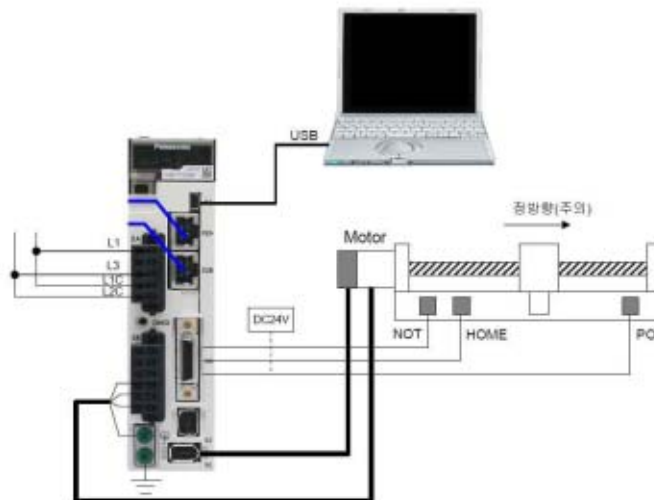


그림 87 모터 드라이버와 PC의 연결

그림 88은 두 시스템을 제어하기 위한 프로그램 제작 모습이다. C++의 MFC(Microsoft Foundation Classes)을 기반으로 작성하였다.

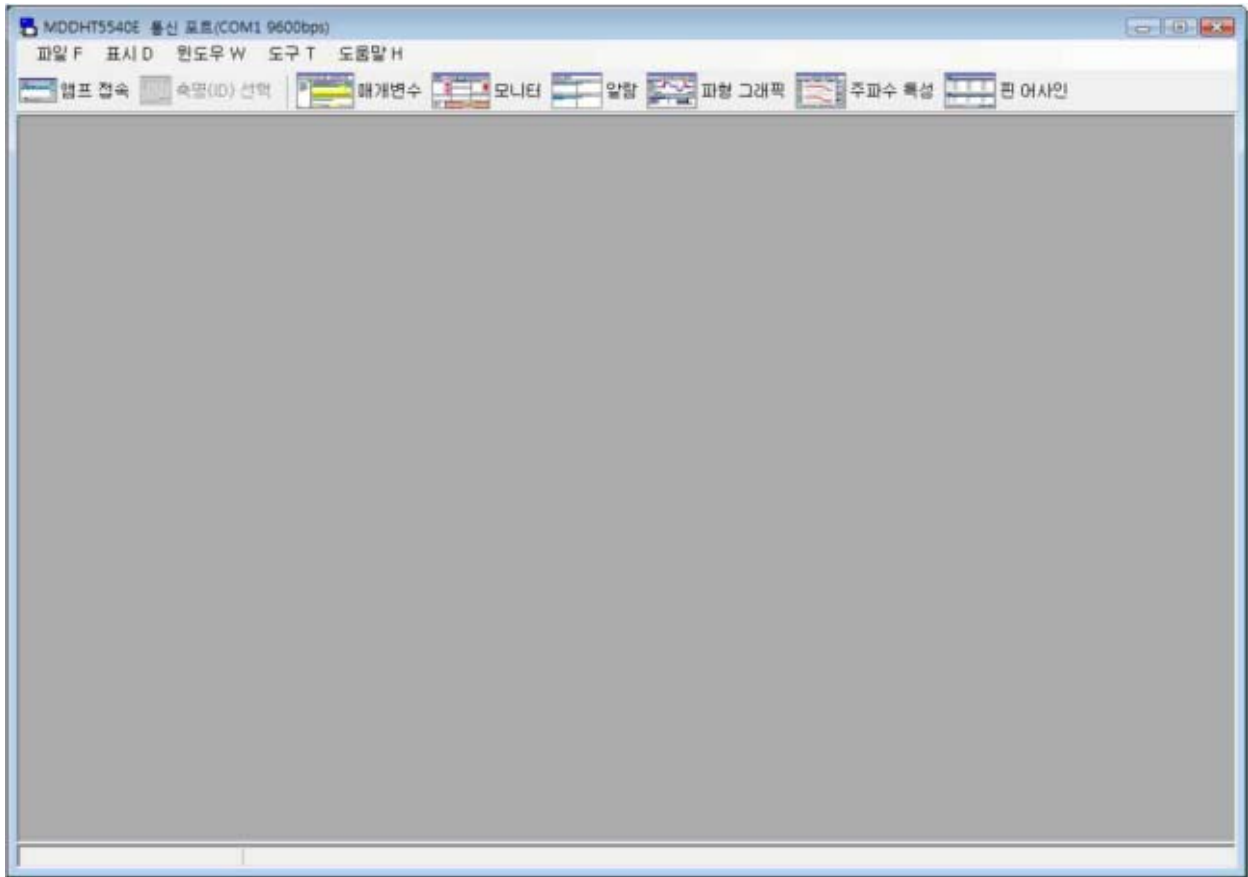


그림 88 PC와 절단 작업시스템 구동제어 프로그램

- 절단 작업 후 절단면 소독을 위한 작업부 설계 및 제작

파프리카의 수확 시 과병에 상해를 입히게 되면 그림 89와 같이 곰팡이병, 수분손실이 증가하여 파프리카의 상품성을 떨어뜨린다. 2013년 경남무역에서 파프리카의 수출 현황과 문제점을 조사한 결과, 파프리카의 수확 시 과병의 상해는 클레임을 발생시키는 것으로 확인하였다.



그림 89 과병의 상해에 의한 파프리카 상품성 하락

실제 파프리카 농가에서 과병의 손상을 최소화 하기 위하여 어떠한 방법을 사용하는 지 조사하였다. 경기도 고양시에 소재한 한국농원, 강원도 원주시에 소재한 영흥영농과 경상북도 구미시에 소재한 구미원예농단, 경상남도 함안군에 소재한 (주)러브파프를 방문하여 수확 작업 시 과병의 손상을 최소화 하는 방법을 조사하였다.

실제 농가에서는 수확을 위해 과병 절단 작업 시 사용하는 도구는 그림 90과 같다.



그림 90 실제 작업 도구

총 네 곳의 파프리카 온실을 방문하여 과병의 상해를 최소화 하는 방법을 조사한 결과, 버콘 등 살균 소독액으로 수확 작업을 하는 손과 도구를 소독한 후 수확작업을 수행하는 것으로 확인하였다. 경기도 고양시에 소재한 한국농원의 경우 라이터 등으로 수확칼날을 가열한 후 수확작업을 수행한다. 그림 91은 소독에 쓰이는 버콘을 나타낸다.



그림 91 버콘 소독제

절단면 소독을 위한 작업부에 사용할 소독제를 선정하기 위하여 파프리카 수확 칼날 소독에 사용되는 버콘, 탈지분유의 소독 능력을 비교하였다. 버콘과 탈지분유의 소독 능력을 비교하기 위하여 그림 92와 같은 수확칼 2개를 이용하였다.

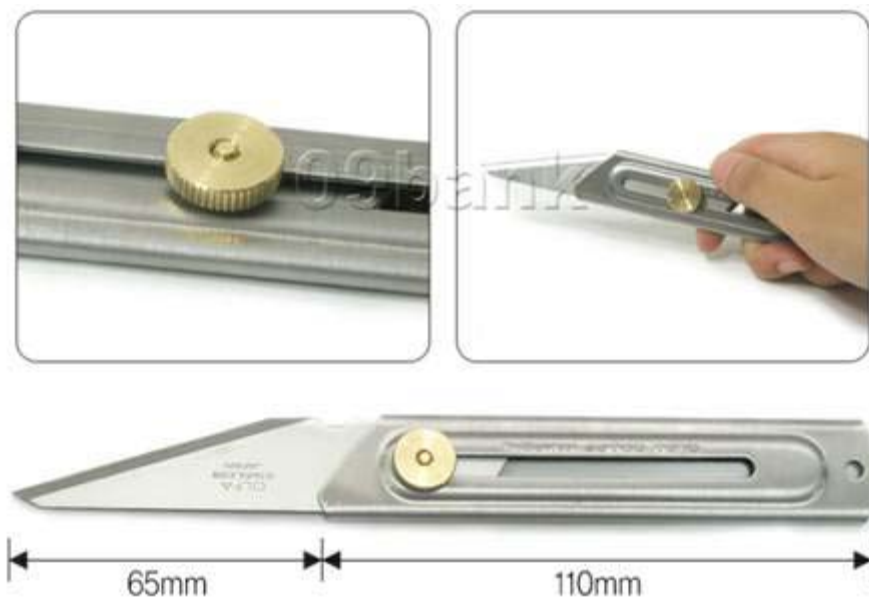


그림 92 실험에 사용한 수확칼

실험을 위하여 잡스 사의 '틸라이온 버콘'과 서울우유의 탈지분유를 사용하였다. 한국농원에서 생산하여 판매한 파프리카 30개를 사용하였다. 실험을 위하여 파프리카 1개를 썬 후 생긴 곰팡이를 사용하여 소독여부를 확인하였다.

수확칼을 곰팡이로 오염시킨 후 소독제에 1분 간 침지한 후 파프리카의 과병을 절단하였다. 절단 후 수분 및 온도 유지와 바람의 유입을 막기 위하여 실내 온실에 보관 하였다. 과병의 절단하여 보관한 지 3일 후 곰팡이에 오염되었는지 확인하였다. 온도는 20도 이상을 유지하였으며 상대습도는 30%내외를 유지하였다. 그림 93은 실험을 위하 파프리카를 보관한 실내 온실이다.



그림 93 연구실 내 실내 온실

10% 탈지분유 용액으로 소독한 후 절단한 과병 15개 중 1개에서만 곰팡이를 확인하였다. 버콘 용액으로 소독한 후 절단한 과병 15개 중 1개에서만 곰팡이를 확인하였다. 실험을 통하여 두 제품의 곰팡이 소독 효과가 93.33%, 93.33%라는 것을 확인하였다.

본 시스템에서는 수확 칼날의 소독을 위하여 회전 칼날을 버콘, 탈지분유 등의 소독액에 소독이 용이하도록 탈부착이 가능하게끔 설계 및 제작하였다. 또한, 소독약을 적셔 회전칼날을 소독할 수 있는 그림 94와 같은 부품을 두어 절단 작업 시 과병의 상해를 최소화 할 수 있도록 하였다.

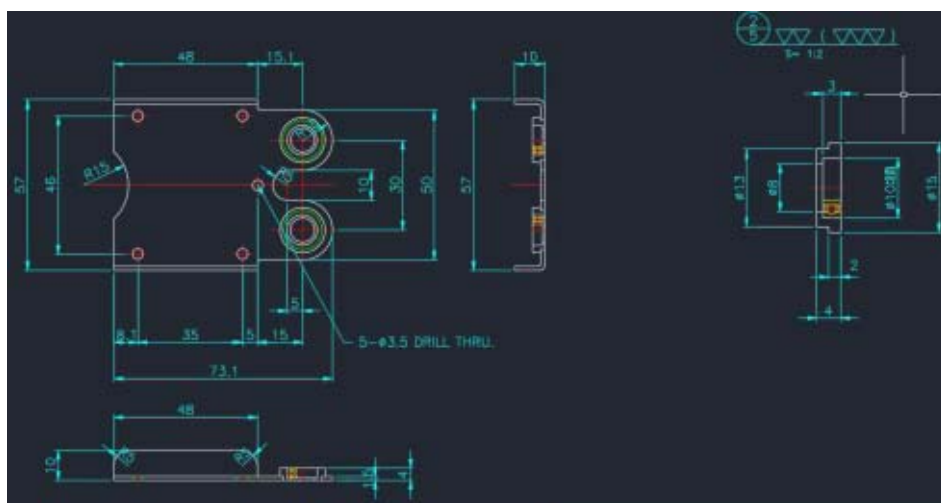


그림 94 절단면 소독을 위한 작업부

그림 95은 소독 작업부와 절단 작업부의 설계도이다.

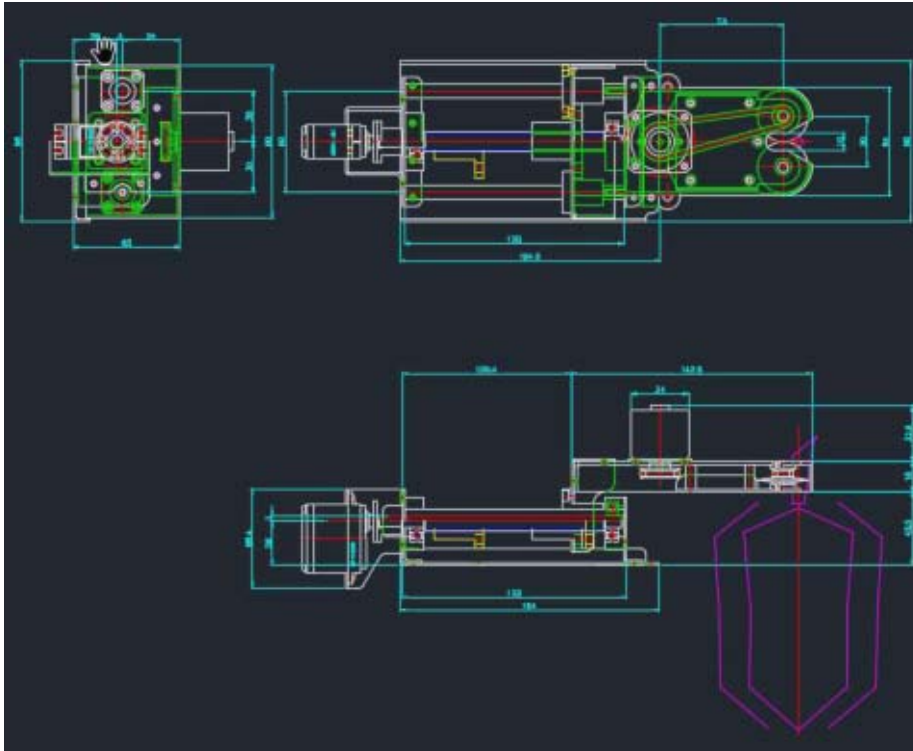


그림 95 소독 작업부와 절단 작업부의 설계도

설계도는 Autodesk의 Autocad 2016을 이용하여 설계하였다. 그림 96은 절단 작업부에 부착하기 위하여 부분제작한 소독 작업부를 나타낸다. 제작은 CNC(Computer Numerical Control) 조각기를 이용하여 제작하였다. 각 기계요소들의 재질은 무게를 줄이고, 부식되지 않도록 하기 위하여 두랄루민을 사용하여 제작하였다. 보완 및 수정을 용이하게 하기 위하여 탈부착이 가능하도록 3mm의 볼트로 고정하였다.



그림 96 소독작업부 부분 제작

- 절단 작업시스템 실험 및 분석

절단 작업시스템의 이송 정확도를 확인하기 위하여, 제작한 절단 작업시스템의 원점에서 X, Y, Z 축으로 300mm 떨어진 거리에 파프리카를 고정시켜 10회 반복 측정 후, 파프리카를 원점에서 X, Y, Z 축으로 400mm의 위치로 이동시켜 매니플레이터를 작동시키면서 엔드이펙터와 파프리카의 거리를 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. 그 결과 표 77과 같이 나타났다.

X	x		average	y		average	z		average
	300	400		300	400		300	400	
1	0.48	0.90	0.69	0.67	0.15	0.41	0.55	0.98	0.77
2	0.19	0.38	0.28	0.09	0.19	0.14	0.05	0.32	0.19
3	0.18	0.48	0.33	0.24	0.43	0.34	0.10	0.40	0.25
4	0.65	0.39	0.52	0.09	0.44	0.27	0.95	0.99	0.97
5	0.98	0.28	0.63	0.93	0.23	0.58	0.77	0.29	0.53
6	0.72	0.40	0.56	0.71	0.15	0.43	0.85	0.41	0.63
7	0.14	0.52	0.33	0.97	0.66	0.82	0.92	0.97	0.94
8	0.69	0.31	0.50	0.58	0.74	0.66	0.13	0.61	0.37
9	0.13	0.81	0.47	0.78	0.27	0.53	0.17	0.32	0.24
10	0.55	0.69	0.62	0.67	0.67	0.67	0.65	0.58	0.62
average	0.47	0.52		0.58	0.39		0.51	0.59	
variance	0.0885	0.0461		0.1048	0.0537		0.1345	0.0850	
SD	0.2975	0.2147		0.3237	0.2317		0.3668	0.2915	
SEM	0.0941	0.0679		0.1023	0.0733		0.1160	0.0922	
DOF	9	9		9	9		9	9	
Max error	0.98	0.90		0.97	0.74		0.95	0.99	
Min error	0.13	0.28		0.09	0.15		0.05	0.29	

표 79 절단 작업시스템의 이송 정확도 실험

측정된 엔드이펙터와 파프리카의 거리를 보면 해당 좌표로 이송 시 1mm 이하의 오차가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 매니플레이터의 원점에서 X, Y, Z축의 위치에 대해서 1mm 이하의 오차가 발생하는 것으로 보아 파프리카의 위치에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

절단 작업 시스템의 이송 속도를 확인하기 위하여, X, Y, Z 축으로 300mm 떨어진 거리에 파프리카를 고정시키고 10회 반복 측정하여 파프리카에 엔드이펙터가 도달하는 시간을 측정하였다. 모터의 회전 속도는 1500r/min으로 하였으며 스마트폰의 스톱워치를 사용하여 시간을 측정하였다. 표 78와 같은 결과를 확인 할 수 있었다.

1	33.6
2	33.6
3	33.1
4	33.2
5	33.2
6	33.5
7	33.6
8	33.5
9	33.4
10	33.6
average	33.4
variance	0.0392
SD	0.1980
SEM	0.0626
DOF	9.0000
Max. Value	33.6
Min. Value	33.1

표 80 이송 시간

매니플레이터의 원점으로부터 x,y,z축으로 300mm 떨어진 거리에 파프리카를 고정하고 엔드 이펙터를 이송시켜 도달한 시간을 측정한 결과 33.1초~33.6초의 범위에서 평균 33.4초인 것을 확인하였다.

○ 파프리카 훼손 없는 수확작업을 위한 절단 작업 시스템 개발

- 파프리카의 훼손을 최소화하기 위한 절단날 소독 작업부의 제작

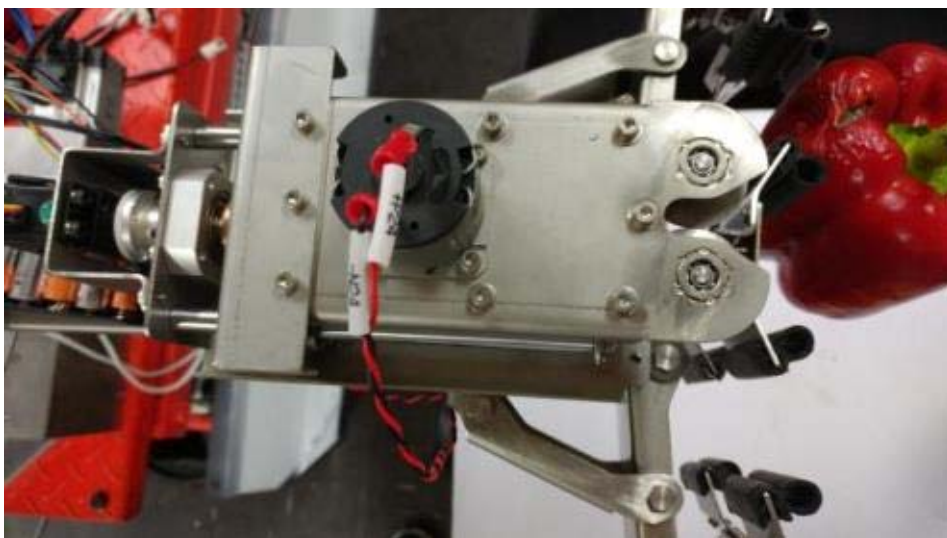


그림 492 2차년도 제작 엔드이펙터

2차년도 연구 결과, 파프리카 과실의 손실을 최소화하기 위하여 상기 그림과 같이 파프리카의 상, 중, 하단 각각을 파프리카의 크기 및 압력을 고려하여 파지 할 수 있도록 엔드이펙터를 설계 및 제작하였다. 그러나 2차년도에 제작된 엔드이펙터는 절단을 위한 모터와 파지를 위한 모터 등 엔드이펙터 구동을 위한 부속품과 상단, 중단, 하단을 따로 파지하기 위하여 구성한 관절 및 링크 등에 의해 협소한 파프리카 재배 환경에 비하여 엔드이펙터의 체적이 커진 문제점이 발생하였다. 파프리카의 훼손을 최소화하고 작업 속도 등의 능률을 향상시키기 위하여 엔드이펙터를 경량화 할 필요성이 대두되었다.

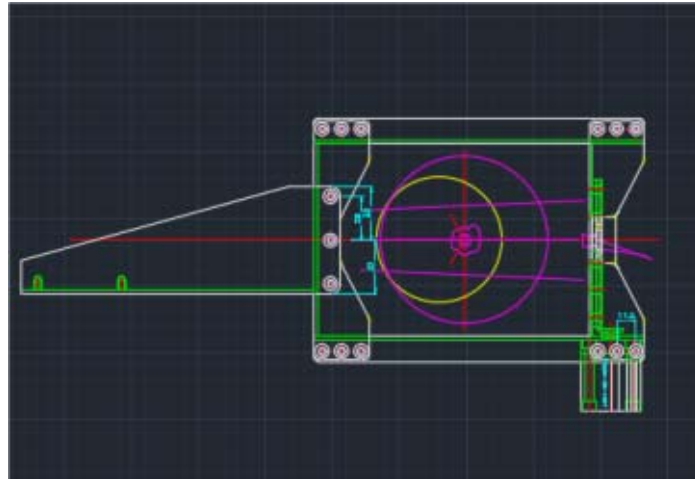


그림 493 수정된 엔드이펙터

수확 작업 시 파프리카의 훼손을 최소화하기 위하여 엔드이펙터의 파지 및 절단 엔드 이펙터의 경우 엔드 이펙터의 체적을 최소화 하기 위하여 모터 등 의 기타 부속품이 필요하지 않도록 하기 위해, 파지하는 동작을 수행하지 않고 과실을 아래에서 받치는 형태로 수정 설계하였다.

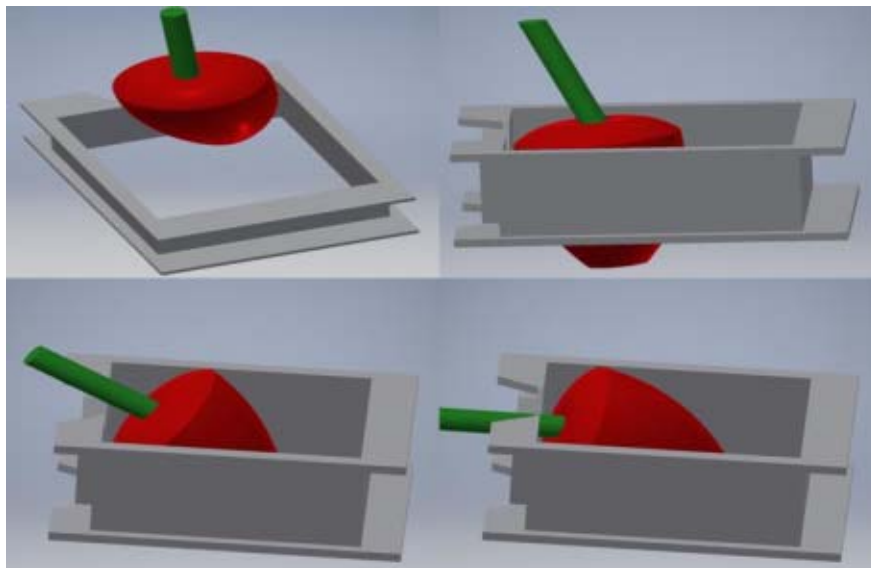


그림 494 수정된 엔드이펙터의 수확 작업

상기 그림과 같이 파프리카 과실과의 직접적인 접촉을 최소화 하여 과실에 손상이 없도록 하였

다. 모터 및 관절, 링크 등 을 제거하여 엔드이펙터의 체적을 최소화 하고 엔드이펙터의 동작을 간소화 하였다. 또한 2차년도 연구 결과에 따라 파프리카 과병 절단부를 버콘, 탈지분유 등으로 소독이 용이하도록 파프리카 과병 절단부를 구성하였다.

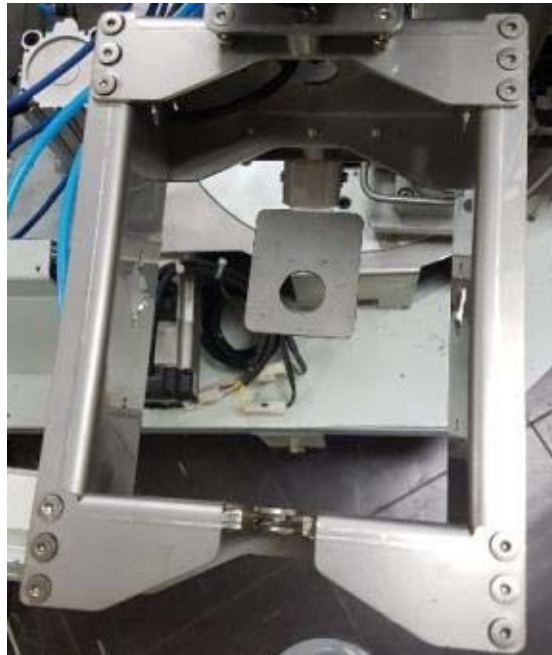


그림 495 End-effector(top).

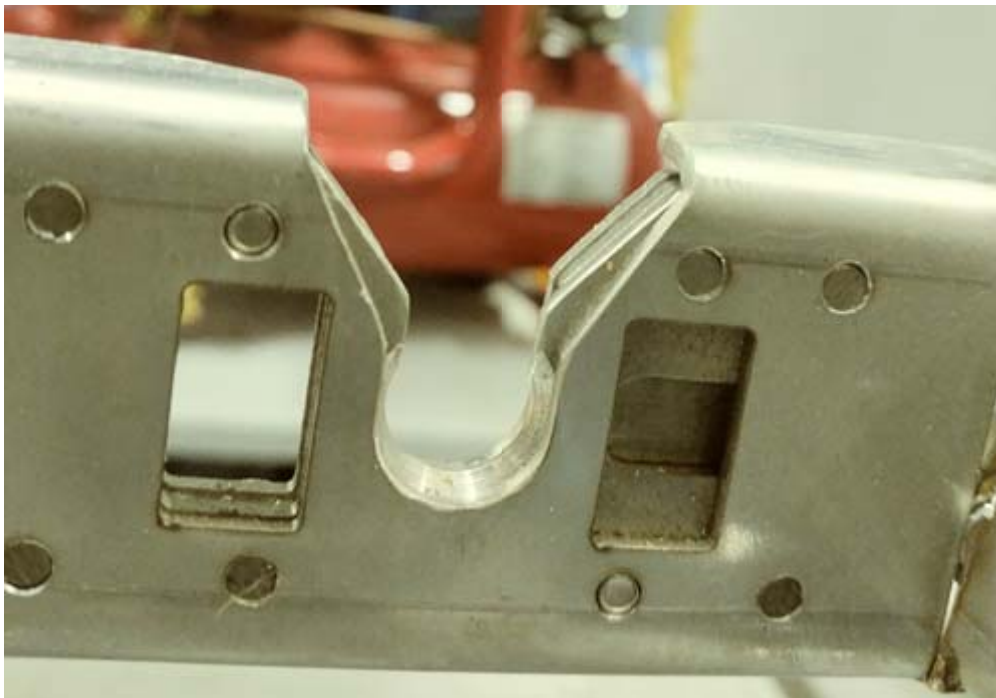


그림 496 엔드이펙터의 절단날 소독 작업부

엔드이펙터에 부착된 절단날의 소독에 용이하기 위하여 절단날이 작업하는 부위를 개방하여 놓았다. 절단날을 개방하여 놓음으로 해서 소독액에 의한 절단날의 소독이 용이하도록 하였다.

- 파프리카 과병 절단 시 훼손 성능 평가

파프리카 과병 절단 시 훼손 성능 평가를 위하여 첫 번째 절단 실험에서는 절단날에 곰팡이로 오염시킨 후 파프리카의 과병을 절단하였다. 2차년도 실험과 동일하게 절단 후 수분 및 온도 유지와 바람의 유입을 막기 위하여 실내 온실에 보관 하였다. 과병의 절단하여 보관한 지 3일 후 곰팡이에 오염되었는지 확인하였다. 온도는 20도 이상을 유지하였으며 상대습도는 30%내외를 유지하였다. 두 번째 절단 실험에서는 절단날을 곰팡이로 오염시킨 후 절단날 소독 작업부에 500ml 물과 버콘 5g의 혼합액을 분무기로 분사하여 세척한 후 파프리카의 과병을 절단하였다. 절단 후 보관은 첫 번째 절단 실험과 동일하게 수행하였다.



그림 497 (좌) 소독 작업 없이 절단 (우) 소독 작업 후 절단

각각 10개의 파프리카, 총 20개의 과병 절단 시 훼손 성능 평가를 수행하여, 소독 작업 없이 절단을 한 10개의 파프리카 중 총 10개의 파프리카에서 곰팡이 등의 과병의 훼손이 발생하였으나, 소독 작업 후 절단을 한 10개의 파프리카는 곰팡이의 감염 없이 훼손 되지 않는 상태를 유지하는 것을 확인 할 수 있었다.

2. 적합한 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식시스템 개발

○ 영상정보 획득 및 획득한 영상정보에 따른 시스템 제어를 위한 영상처리 시스템 설계 및 부분 제작

- 파프리카 온실 환경에 강인한 카메라 모듈 및 구성부품 선정

1. 카메라 선정

온실 환경에서 사용하기 위하여 온도와 습도 변화에 강인한 카메라를 선정 하고자 하였다. 본 연구에서 선정한 카메라는 point grey research 社의 BFLY-U3-13S2C-CS 모델로 0~45°의 온도와 최대 80%의 습도에서 작동 가능하다.

또한, 최대 1.3M화소로 500 by 500mm의 공간 영상을 획득한 경우 약 0.2mm/pixel의 해상도를 얻을 수 있다. 카메라의 CCD 센서는 Sony ICX445모델로 1/3“크기로 각 픽셀의 크기는 3.75um이며 1288x964해상도에서 초당 30프레임을 획득 할 수 있다.

A/D Converter	12-bit; 10- and 12-bit (BFLY-U3-2356)
Video Data Output	8, 12, 16 and 24-bit digital data
Image Data Formats	Mono8, Mono12, Mono16, Raw8, Raw12, Raw16 (all models); RGB, YUV411, YUV422, YUV 444 (color models)
Partial Image Modes	Pixel binning, decimation, and region of interest (ROI) modes
Image Processing	Gamma, lookup table, hue, saturation, and sharpness
Shutter	Global shutter; Automatic/manual/one-push Up to 32 seconds
Gain	Automatic/manual/one-push -10.104 dB to 23.991 dB (BFLY-U3-0352); 0 dB to 23.991 dB (BFLY-U3-0552); -11 dB to 23.99 dB (BFLY-U3-1352); -10.319 dB to 23.991 dB (BFLY-U3-2054); 0 dB to 29.9 dB (BFLY-U3-2356); -6.234 dB to 23.991 dB (BFLY-U3-50H5)
Gamma	0.50 to 3.99, programmable lookup table
White Balance	Automatic/manual/one-push
Color Processing	On-camera in YUV or RGB format, or on-PC in Raw format
Digital Interface	USB 3.0 interface with screw locks for camera control, data, and power
Transfer Rates	5 Gbit/s
GPIO	6-pin Hirose HR10A-7R-6PB GPIO connector for trigger, strobe, and power
External Trigger Modes	Standard, bulb, low smear, overlapped, multi shot
Image Buffer	16 MB frame buffer
Memory Channels	2 user configuration sets for custom camera settings
Flash Memory	1 MB non-volatile memory
Dimensions	29 mm x 29 mm x 30 mm excluding lens holder, without optics (metal case)
Mass	36 g (without optics)
Power Consumption	5-24 V via GPIO or 5 V via USB 3.0 interface, maximum <3 W
Machine Vision Standard	USB3 Vision
Camera Control	Via FlyCapture SDK or USB Vision third party software
Camera Updates	In-field firmware updates
Lens Mount	CS-mount; C-mount (BFLY-U3-2356 and BFLY-U3-50H5)
Temperature	Operating: 0° to 45°C; Storage: -30° to 60°C
Humidity	Operating: 20 to 80% (no condensation); Storage: 20 to 95% (no condensation)
Compliance	CE, FCC, KCC, RoHS
Operating System	Windows, Linux (32- and 64-bit)

그림 498 카메라 사양

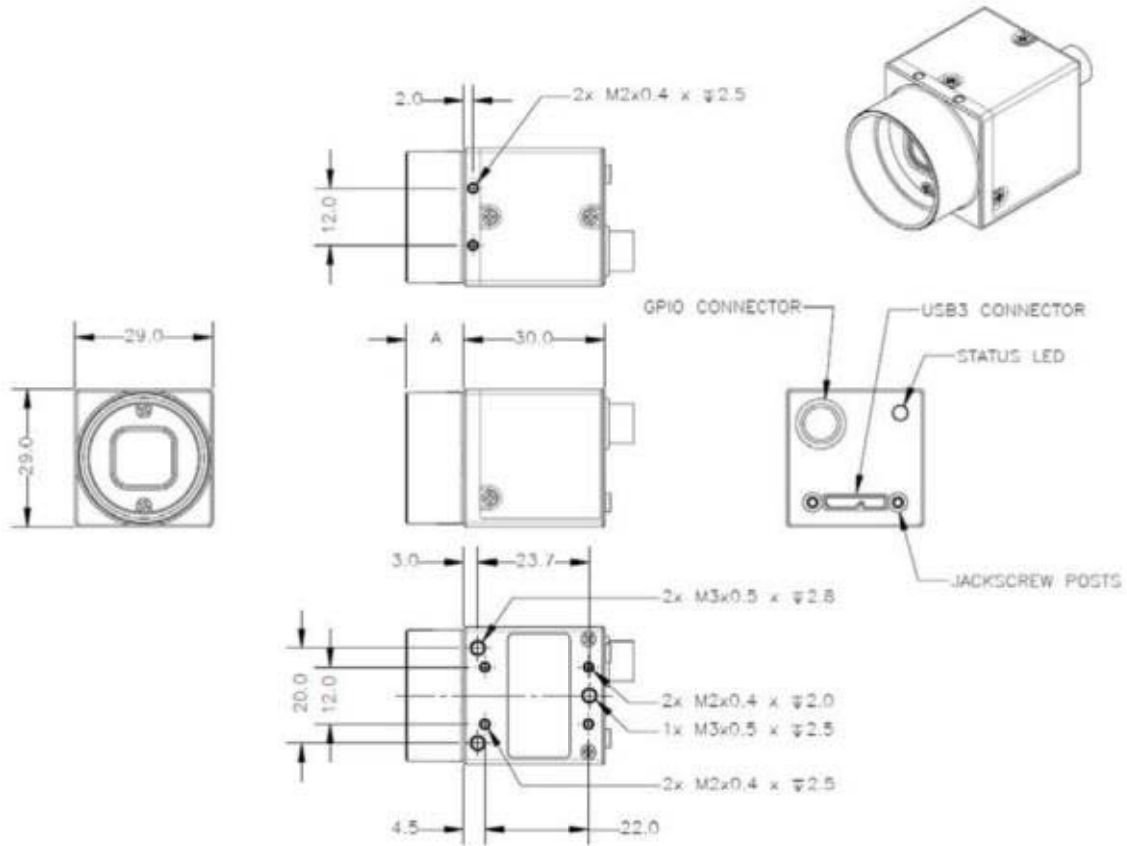


그림 499 카메라 외형

2. 렌즈 선정

렌즈 선정을 위하여 카메라의 ccd 센서 크기와 영상 획득 거리(WD : Working Distance), 영상 획득 가능 폭(FOV : Field Of View), 센서 크기(SS : Sensor Size)를 이용하여 초점거리($f\#$: Focal length)를 계산하고, 카메라 마운트의 크기에 맞춰 렌즈를 선정하였다. 다음 수식에 서 센서 크기는 해당 인치수의 센서의 수평 길이를 mm단위로 사용한다.

$$f\# = WD \frac{SS}{FOV} \quad \text{수식 57}$$

다음 표는 CCD 센서의 호칭(인치 단위)에 따른 대각, 수평, 수직 방향의 미터 크기를 나타내고 있다.

표 82 카메라 센서 호칭에 따른 크기

Inch	Diagonal(mm)	Horizontal(mm)	Vertical(mm)
1/4	4.0	3.2	2.4
1/3	6.0	4.8	3.6
1/2	8.0	6.4	4.8
2/3	11.0	8.8	6.6
1	16	12.8	9.6

위의 정보를 이용하여 계산된 초점 거리는 다음과 같다.

표 83 렌즈 선정 요인과 계산된 f#

Camera sensor size	1/3"
Working distance	500mm
Field of view	400mm
Focal length	6mm

다음은 선정된 렌즈의 외형과 자세한 사양이다.



그림 500 선정된 6mm 렌즈

표 84 렌즈 사양 표

Compatible pixel	400Kpixel
Largest Compatible Camera(inch)	2/3"
O/I(mm)	50.33
Iris Lock	yes
Weight(g)	64
Length(mm)	32.80
Mount	C
Focal Length(mm)	6.0
Max Aperture Ration	1:1.4
Focus Operation Range(M)	0.1~∞

3. 소프트웨어 제작 툴 선정

본 연구에서 카메라를 통해 획득한 영상을 저장하고 각 영상의 정보를 추출 및 처리하기 위하여 소프트웨어를 제작 하고자 한다. 해당 소프트웨어는 Microsoft社의 Visual studio 2012버전의 MFC 라이브러리를 이용하여 dialog base의 형태로 작성 하고자 하였으며, 해당 프로그래밍 언어와 카메라간의 연동을 위하여 Point grey research社의 소프트웨어 개발 키트인 Flycapture2.x 버전을 사용하였다.

```
int CPGR::GetImageBuffer()
{
    CRect rect
    CDC MemDC1
    CDC MemDC2
    CBitmap* pOldBmp1
    CBitmap Bitmap1
    CBitmap* pOldBmp2
    CBitmap Bitmap2
    MemDC1.CreateCompatibleDC(m_pDC1);
    MemDC2.CreateCompatibleDC(m_pDC2);
    Bitmap1.CreateCompatibleBitmap(m_pDC1, rect.Width(), rect.Height());
    Bitmap2.CreateCompatibleBitmap(m_pDC2, rect.Width(), rect.Height());
    pOldBmp1 = (CBitmap*)MemDC1.SelectObject(&Bitmap1);
    pOldBmp2 = (CBitmap*)MemDC2.SelectObject(&Bitmap2);
    MemDC1.PatBlt(0, 0, rect.Width(), rect.Height(), WHITENESS);
    MemDC2.PatBlt(0, 0, rect.Width(), rect.Height(), WHITENESS);
    m_Error = m_Cam1.StartCapture();
    if(m_Error != FlyCapture2::PGRERROR_OK){
        m_ErrorTrace(m_Error);
        return -1000}
    m_Error = m_Cam1.RetrieveBuffer(&m_Image1);
    if(m_Error != FlyCapture2::PGRERROR_OK){
        m_ErrorTrace(m_Error);
        return -1001}
    m_Error = m_Cam1.StopCapture();
    if(m_Error != FlyCapture2::PGRERROR_OK){
        m_ErrorTrace(m_Error);
        return -1002}
    m_Error = m_Cam2.StartCapture();
    if(m_Error != FlyCapture2::PGRERROR_OK){
        m_ErrorTrace(m_Error);
        return -1000}
    m_Error = m_Cam2.RetrieveBuffer(&m_Image2);
    if(m_Error != FlyCapture2::PGRERROR_OK){
```



```

        m_ErrorTrace(m_Error);
        return -1001}
m_Error = m_Cam2.StopCapture();
        if(m_Error != FlyCapture2::PGRERROR_OK){
            m_ErrorTrace(m_Error);
        return -1002}
m_pDC1->BitBlt(0, 0, rect.Width(), rect.Height(), &MemDC1, 0, 0, SRCCOPY);
m_pDC2->BitBlt(0, 0, rect.Width(), rect.Height(), &MemDC2, 0, 0, SRCCOPY);
MemDC1.SelectObject(pOldBmp1);
MemDC2.SelectObject(pOldBmp2);
MemDC1.DeleteDC();
MemDC2.DeleteDC();
}

```

위의 코드는 Visual studio MFC와 SDK를 연동하여 두 대의 카메라를 순차적으로 활성화하고 영상을 획득 한 후 버퍼에 저장하는 과정을 수행하는 GetImageBuffer()라는 함수의 모습이다. 이 함수를 실시간으로 반복함으로써 스테레오 영상 버퍼를 획득하고 해당 버퍼를 저장함으로써 영상 정보를 획득 할 수 있다.

- 영상처리 시스템의 기초 설계

스테레오 카메라 시스템을 제작하기 위하여 선정한 카메라의 외형을 측정하여 고정부를 설계 하였다. 고정된 카메라는 일정 거리를 유지 할 수 있도록 프로파일을 이용하여 고정할 수 있도록 체결 부위를 설계하였다. 이 때 두 카메라간의 거리는 100mm를 유지 할 수 있도록 고려하였다.

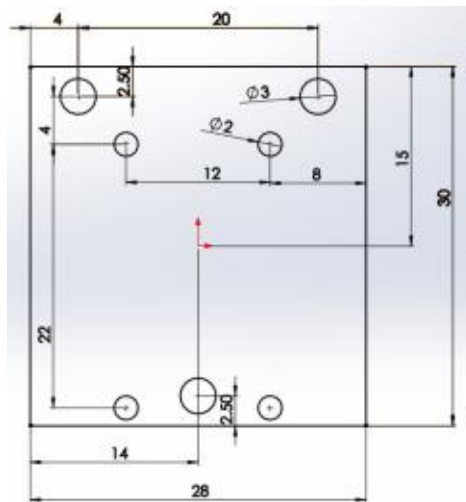


그림 501 카메라 형태 측정

선정한 카메라의 체결 부위는 지름 3mm의 볼트 체결 구멍이 3군데 있었으며, 지름 2mm의 구멍은 4군데 존재했다. 또한, 가로 폭은 28mm, 세로 폭은 30mm다. 초기 카메라의 고정을 위하여 설계한 고정부의 모습은 아래 그림과 같다.

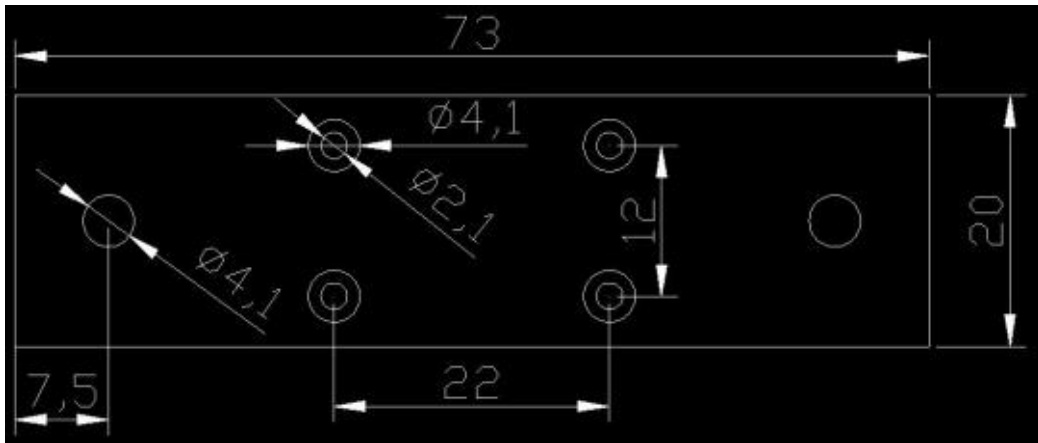


그림 502 카메라 고정부 설계



그림 503 제작된 모습



그림 504 카메라가 고정된 모습

2mm의 볼트 구멍을 이용하여 체결 하도록 설계 하였으며, 좌우 4mm 볼트를 이용하여 프로파일에 고정 할 수 있도록 설계 되었으나, 제작 후 확인 결과 체결 구멍이 많아 체결 시 뒤틀림이

발생하여 정확한 수평을 이루도록 카메라를 고정하는 것에 문제가 발생하여 설계를 수정하였다.

두 번째로 설계된 체결부의 설계도는 다음 그림과 같다. 카메라 폭과 넓이에 맞도록 홈을 파고 3mm 지름의 볼트 3개를 이용하여 고정 하도록 하였다. 또한 카메라 고정부와 프로파일 고정부를 따로 설계하여 두 개의 고정부가 서로 맞물릴 수 있도록 설계하였다. 다음 그림은 카메라가 위치할 홈을 파고 고정 시킬 볼트 체결용 구멍과 프로파일 체결부와 연결할 사각형 구멍을 뚫은 형태의 카메라 체결부의 설계도이다.

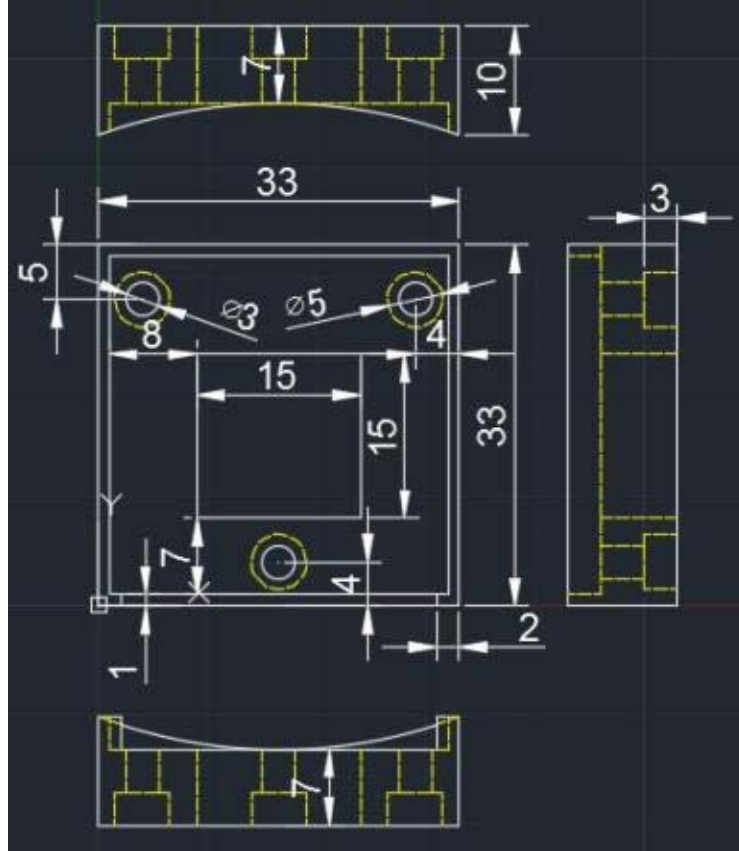


그림 505 카메라 체결 부품 #1 설계

다음 그림은 카메라 체결부와 프로파일을 연결 할 수 있도록 설계된 체결부이다. 카메라 체결부에 존재하는 사각형 구멍과 일치하는 크기의 사각형 돌출부를 설계하여 해당 부위를 통해 카메라 체결부와 연결되도록 하였고, 프로파일을 이용하여 연결하기 위해 20mm의 구멍을 내고 4mm의 볼트 구멍을 수직하게 뚫도록 설계 하였다.

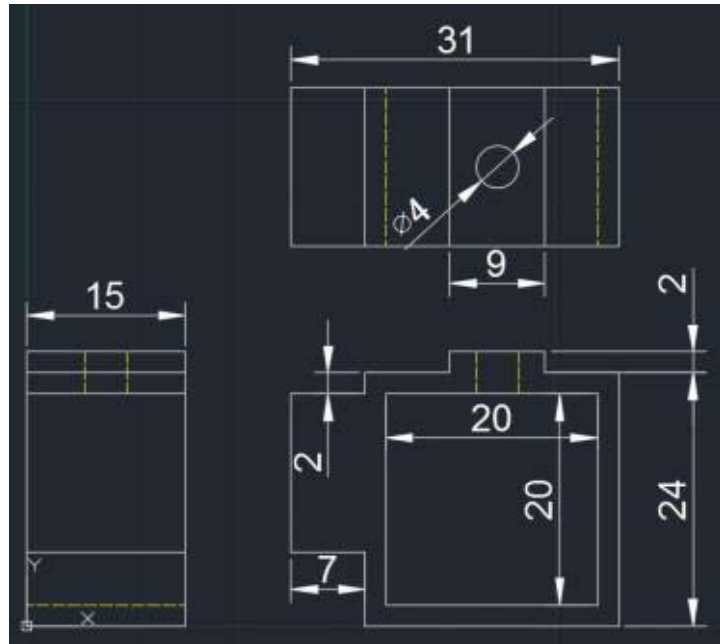


그림 506 카메라 체결 부품 #2 설계

- 영상처리 시스템의 부분 제작

영상처리 시스템의 부분 제작을 위하여 먼저, 두 대의 카메라를 고정 할 수 있도록 설계된 도면에 따라 플라스틱을 재질로 하여 3차원 프린터를 이용하여 체결 부품을 제작하였다. 제작된 체결 부품의 모습은 아래의 그림과 같다.



그림 507 카메라 체결 부품 #1 제작

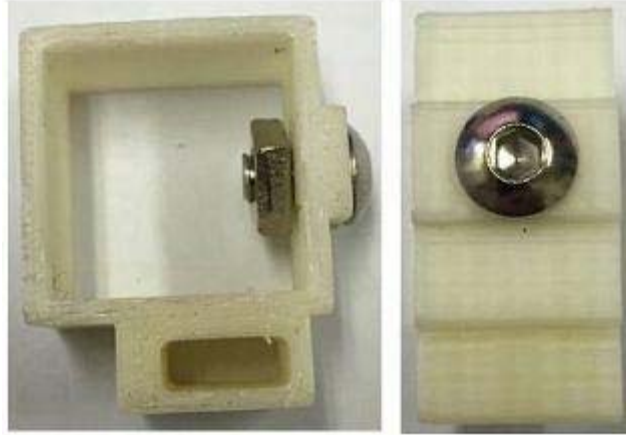


그림 508 카메라 체결 부품 #2 제작

카메라 체결부와 프로파일 체결부를 각각 제작하였고, 정확한 크기의 홈을 이용하여 두 체결부를 연결 하였다. 또한 프로파일을 이용하여 두 대의 카메라가 100mm의 간격으로 설치 되도록 고정하였다.



그림 509 카메라가 고정 된 모습



그림 510 스테레오 카메라 시스템

다음으로 제작된 스테레오 카메라 시스템의 성능을 실험하기 위하여 다음 그림과 같이 초기 버전의 스테레오 영상 획득 프로그램을 Visual studio 2012 MFC 라이브러리를 이용하여 제작하였다. 두 대의 카메라로부터 실시간으로 영상을 획득하여 확인 할 수 있도록 제작되었고, 원하는







다음은 히스토그램을 영상에 출력하기 위하여 2차원 배열의 형태로 구하고 그 값을 영상 버퍼로 전송하는 Histogram()함수의 코딩이다. 입력 인자는 전체 영상 정보의 배열과 영상의 크기를

받도록 하였다.

```
void CBufferClass::Histogram(int* m_Array, int size)
{
    int i, k
    size = size/sizeof(m_Array);
    BYTE* TempImg = new BYTE [size];

    for(i=0 i<360*256 i++) m_cImg1.HistImg[i] = 205
    for(i=0 i<360 i++) m_cImg1.Histogram[i] = m_Array[i];

    int max=0, min=m_nWidth*m_nHeight
    for(i=1 i<size i++)
    {
        if(max < m_Array[i]) max = m_Array[i];
        if(min > m_Array[i]) min = m_Array[i];
    }

    for(i=1 i<size i++)
    {
        int a = (int)((m_Array[i]-min)*255.0/(max-min));
        if(a > 255) TempImg[i] = 255
        else if(a < 0) TempImg[i] = 0
        else TempImg[i] = a
    }

    for(i=1 i<size i++)
    {
        for(k=255 k>255-TempImg[i]; k--;)m_cImg1.HistImg[k*size+i] = 0
    }

    for(i=0 i<360*256 i++)
    {
        if(m_cImg1.HistImg[i] != 0) m_cImg1.HistImg[i] = 205
    }

    delete [] TempImg
    SetHistImgBuffer();
    SetDibWnd2();
}
```

좌측 윈도우에 분석하고자 하는 영상을 입력하고 H(Hue, 색상), S(Saturation, 채도) 라디오 버튼을 누르면 전체 영상에서 해당하는 값을 스캔 한 후 우측 윈도우에 히스토그램을 나타내는 프

로그램이다. 임계값을 설정하여 원하는 H, S값을 임계값으로 하여 제거 또는 분리 할 수 있도록 하였다.

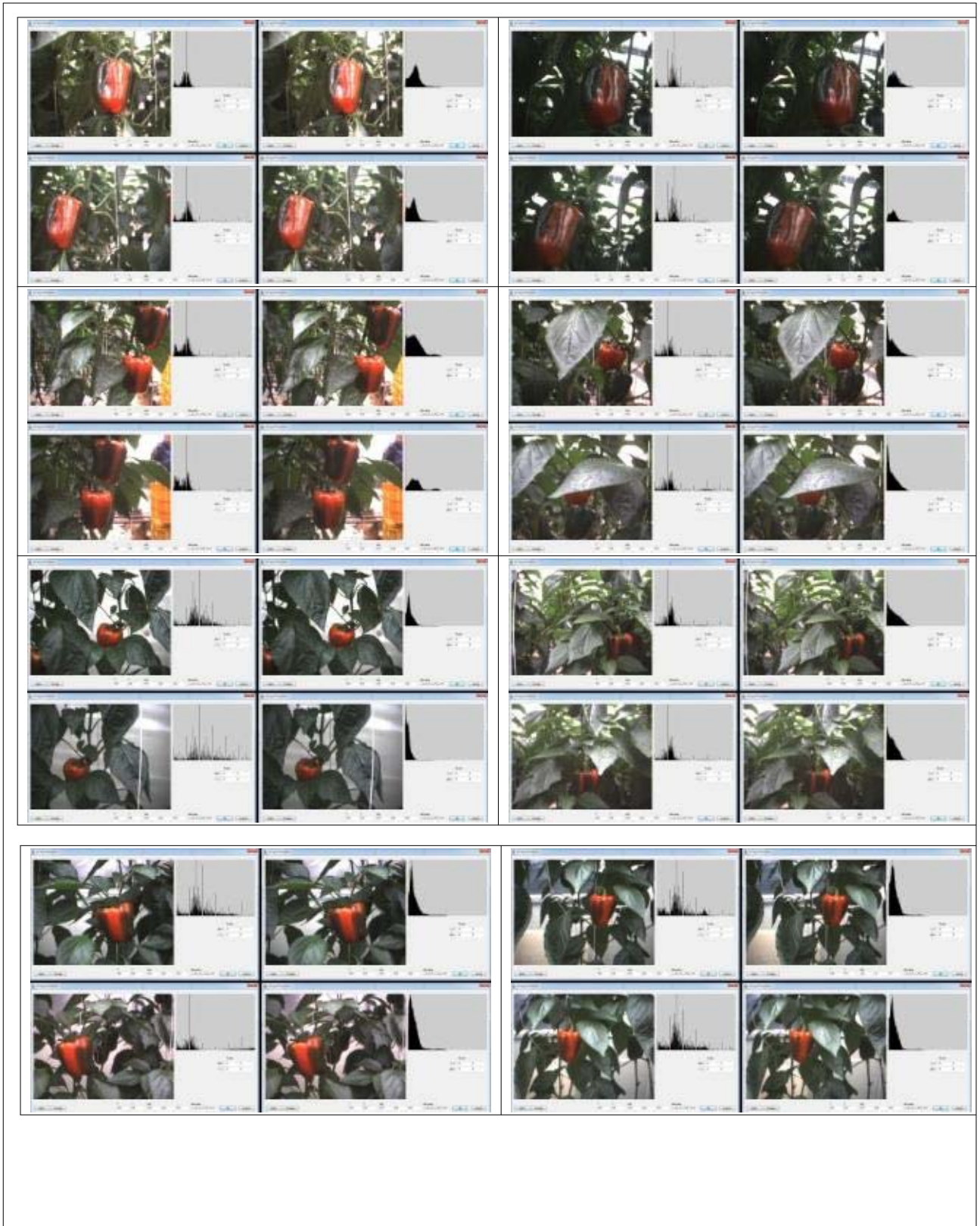
아래 영상은 붉은색 파프리카와 노란색 파프리카의 영상을 배경이 존재 하는 상태에서 히스토그램 분석 한 후 히스토그램을 우측 윈도우에 표현한 것이다. 히스토그램은 색상과 채도, 명도에 대해 작성 하였으며 이 정보를 추후 배경 제거에 사용하였다.

본 실험에서 구한 히스토그램은 각 픽셀이 갖고 있는 색상(또는 채도, 명도)값을 도수분포표로 나타내고 이를 그래프로 나타낸 것이며, 가로축이 계급(픽셀의 값), 세로축이 도수(영상에 나타나는 횟수)이다. 전체 픽셀의 수는 n이고 색상 값(k)의 히스토그램 h는 다음 조건을 만족하며, h의 누적 히스토그램 H는 다음과 같이 구할 수 있다.

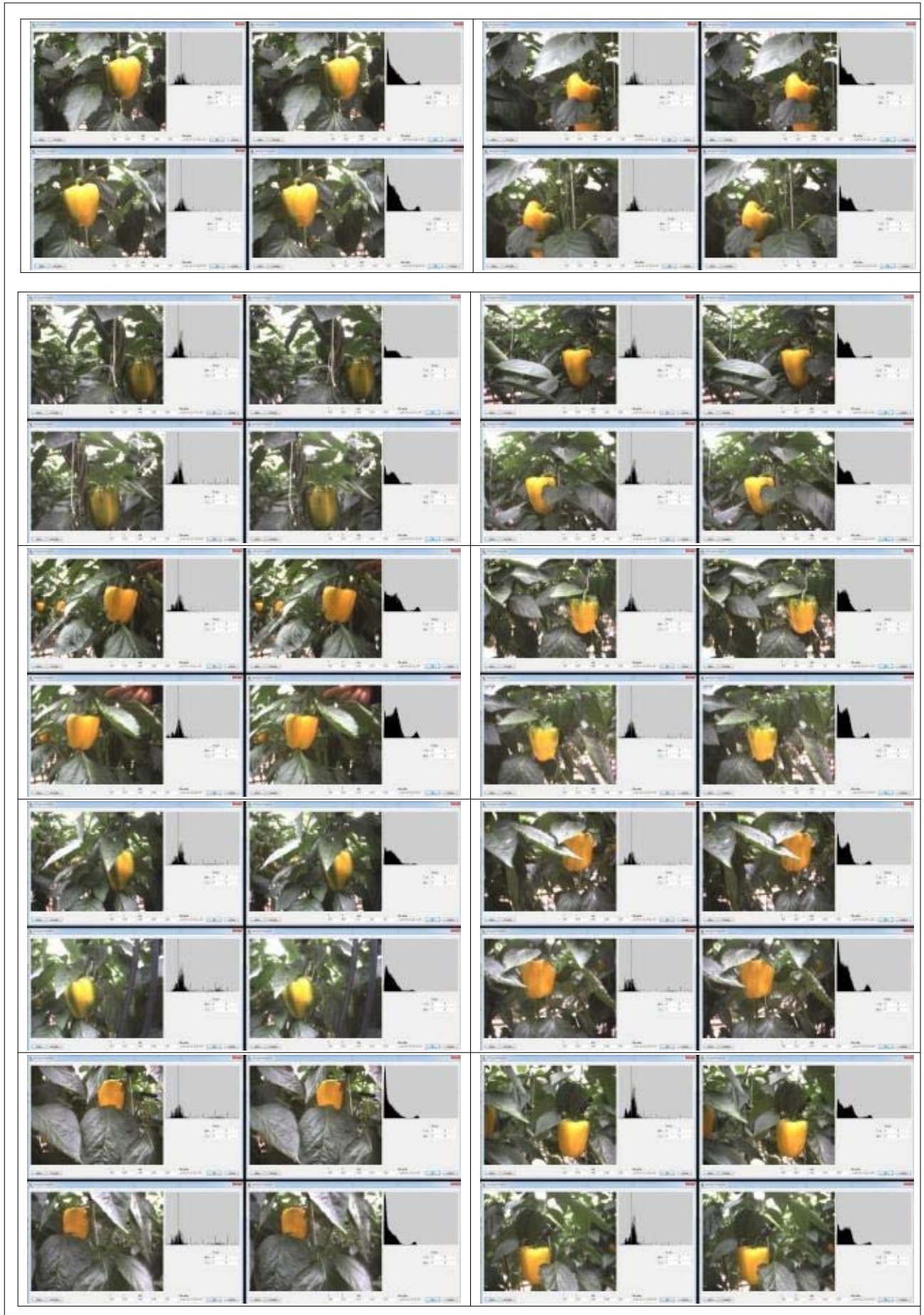
$$N = \sum_{k=1}^n h_k \quad \text{수식 58}$$

$$H_k = \sum_{k'=1}^k h_{k'}$$











위 히스토그램을 바탕으로 하여 영상처리 알고리즘 중 임계값 추출에 사용 될 임계값을 설정하고자 하였다. H에 대한 임계값은 색상 정보에 의해 붉은색과 노란색 영역인 0~60° 구간에서 나타나는 것으로 확인하였으나 H값만으로 추출하는 경우 무채색 영역에서 잡음이 발생하였다. 이를 제거하기 위하여 S(채도)값을 이용하여 선명한 색상을 갖는 영역의 임계값을 구하여 임계값 추출에 사용하도록 하였다.

나. 대상물(파프리카)과 배경을 판별하여 파프리카 좌표 획득 알고리즘 설계

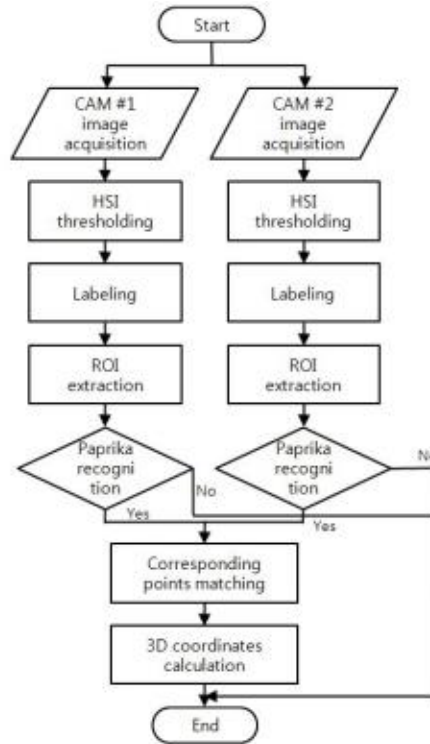


그림 594 영상처리 순서도

전체 영상처리의 순서는 위의 순서도와 같다.

먼저 두 대의 카메라를 이용하여 영상을 획득하고, 획득한 영상의 RGB 정보를 HSI 정보로 변환 한 후 설정된 H와 S의 임계값을 이용하여 임계값 추출을 수행한다. 이를 통하여 파프리카와 색상 정보가 유사한 영역만 남기고 나머지 영역은 제거 된다.

그 후, 남은 영역에 대해 라벨링을 수행하여 각 영역의 픽셀 크기를 측정한다. 해당 영역의 픽셀 크기가 파프리카 영역에 비해 너무 크거나 작은 경우 노이즈로 판별하여 제거한다. 이러한 과정을 통하여 제거된 부분은 배경 영역으로 생각하고, 남은 영역을 파프리카 영상 영역일 확률이 높은 것으로 보고 ROI(Region of interest)로 설정한다.

설정된 영역의 여부를 판단하여 양쪽 영상에 모두 ROI가 존재하는 경우 두 영상의 매칭 과정을 수행하고, 이를 통하여 3차원 좌표를 추출 하는 것으로 전체 좌표 획득 알고리즘의 수행을 마친다.

- 파프리카와 배경을 판별하기 위한 파프리카 색상 정보 분석

먼저, 전처리 과정을 통해 붉은색과 노란색 파프리카를 영상에서 인식하기 위하여 영상 정보 중 색상 정보를 이용하여 추출하고자 하였다. RGB 정보는 영상의 조명상태에 따라 영향을 많이 받기 때문에 조명 환경에 강인한 특성을 갖는 Hue값을 이용하여 추출하였다.

이를 위하여 RGB를 HSI 색상 모델로 변환하여 H값과 S값에 대하여 히스토그램 분석을 수행 하였다.

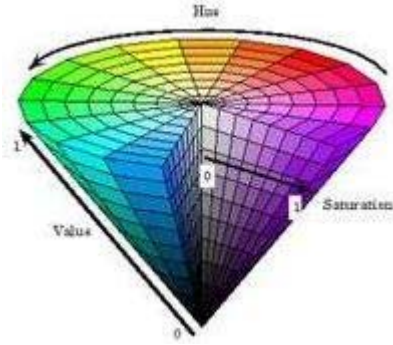


그림 595 HSI 색상 모델

$$H = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right] \quad \text{수식 59}$$

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)]$$

$$I = \frac{R+G+B}{3}$$

다음은 RGB 정보를 HSI 정보로 변환하는 m_RGBtoHSI()함수의 코드다. 구조체 형태의 영상 정보를 입력으로 받았다.

```
void CBufferClass::m_RGBtoHSI(m_Img cImg){
    int i, j
    double R, G, B, Theta, S, I
    for(j=0 j<m_nHeight j++) {
        for(i=0 i<m_nWidth i++){
            R = cImg.R[j*m_nWidth+i]/255.0
            G = cImg.G[j*m_nWidth+i]/255.0
            B = cImg.B[j*m_nWidth+i]/255.0
            if(R == G && G == B) cImg.H[j*m_nWidth+i] = 0
            else{
                Theta =
                acos(0.5*(R-G+R-B)/sqrt(pow(R-G,2)+(R-B)*(G-B)))*180.0/3.141592
                if(B > G) cImg.H[j*m_nWidth+i] = (int)(360.0-Theta);
                else cImg.H[j*m_nWidth+i] = (int)(Theta);
                if(cImg.H[j*m_nWidth+i] > 360) cImg.H[j*m_nWidth+i] =
                360
                if(cImg.H[j*m_nWidth+i] < 0) cImg.H[j*m_nWidth+i] = 0
            }
            double min = 100
            if(R < min) min = R
            if(G < min) min = G
```

```

if(B < min) min = B
S = (1.0 - 3/(R+ G+ B)*min)*255.0
cImg.S[j*m_nWidth+i] = (int)S
I = (R+ G+ B)/3*255.0
cImg.I[j*m_nWidth+i] = (int)I
}
}
}

```

붉은색과 노란색 파프리카 각각 임의의 160픽셀의 H, S값을 추출하여 히스토그램으로 나타내고 이를 분석하였으며, 분석한 히스토그램을 참고하여 붉은색과 노란색 파프리카의 색상 임계값을 설정하였다. 색상 값은 채도가 낮은 무채색 영역에서 뚜렷한 차이가 나타나지 않기 때문에 채도에 대한 임계값 또한 설정하였다.

먼저, 영상에서 파프리카의 영역을 색상과 채도를 이용하여 추출하기 위하여 붉은색과 노란색 파프리카 영역 픽셀의 색상과 채도를 히스토그램으로 나타내고 이를 분석한 결과이다. 픽셀은 각 색상 파프리카 영역의 임의의 지점에서 추출 하였고 색상 별로 160개의 픽셀을 분석하였다.

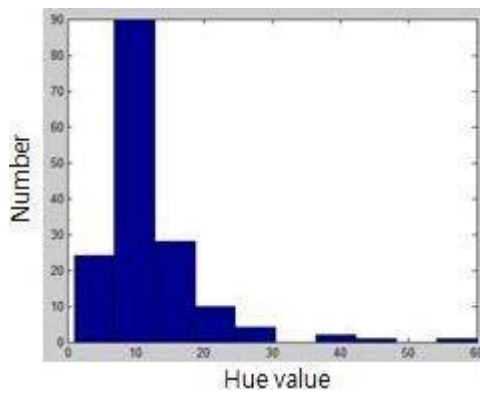


그림 596 붉은색 파프리카 색상 히스토그램

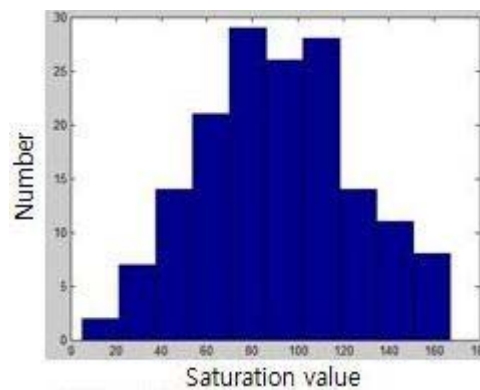


그림 597 붉은색 파프리카 채도 히스토그램

HSI에서 색상 분포를 보면 붉은색의 경우 0~30° 구간에서 확인 할 수 있다. 위 그림 중 색상

히스토그램을 보면, 0~30° 구간에서 많은 픽셀이 존재하며, 10°의 영역에서 가장 큰 값을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 또한 채도의 분포는 0~160사이에서 존재하며 80~110 구간에서 가장 큰 값을 보이고 있다.

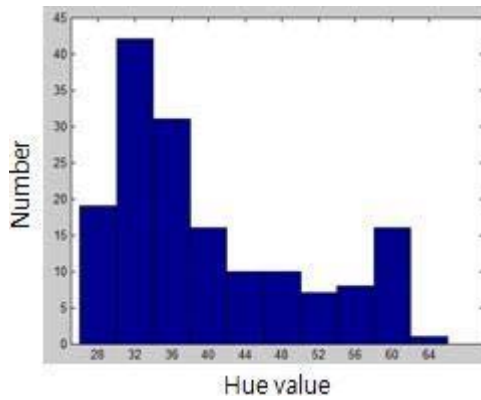


그림 598 노란색 파프리카 색상 히스토그램

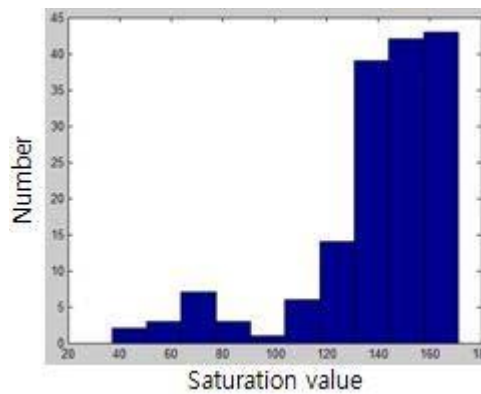


그림 599 노란색 파프리카 채도 히스토그램

HSI에서 색상 분포를 보면 노란색의 경우 30~60° 구간에서 확인 할 수 있으나, 녹색 영역과 겹치는 경향이 있어 60° 영역에서는 녹색 영역이 존재하기도 한다. 위 그림 중 색상 히스토그램을 보면, 0~40° 구간에서 많은 픽셀이 존재하며, 60° 영역에서도 피크를 보인다. 또한 30°의 영역에서 가장 큰 값을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 채도의 분포는 40~160사이에서 존재하며 140~150 구간에서 가장 큰 값을 보이고 있다.

표 101 히스토그램 분석 결과

Color	Threshold	Pixel	%
Red	$H \leq 30$	156/160	97.5
	$S > 40$	150/160	93.8
Yellow	$H \leq 60$	159/160	99.4
	$S > 80$	148/160	92.5

- 파프리카와 배경 판별을 위한 알고리즘 설계

파프리카와 배경을 분리하기 위하여 파프리카 색상 정보를 분석한 결과를 이용하였다.

붉은색 파프리카의 히스토그램을 분석한 결과 H값이 30 이하인 픽셀이 97.5%로 나타났으며, S값이 40 초과인 픽셀이 93.8%로 나타나 임계값을 $H \leq 30, S > 40$ 으로 설정하였고, 같은 방법으로 노란색 파프리카를 분석한 결과 H값이 60 이하인 픽셀이 99.4%, S값이 80 초과인 픽셀이 92.5%로 나타나 $H \leq 60, S > 80$ 으로 임계값을 설정하는 것이 타당한 것으로 사료되어 다음 식과 같은 조건으로 색상과 채도를 이용하여 배경으로부터 파프리카 추출을 수행하였다.

$$\begin{cases} \text{if } H_{xy} > 60 \text{ then } p_{xy} = 0 \\ \quad H_{xy} \leq 30 \text{ and } S_{xy} < 40 \text{ then } p_{xy} = 0 \\ \quad 30 < H_{xy} \leq 60 \text{ and } S_{xy} \leq 80 \text{ then } p_{xy} = 0 \\ \text{else } p_{xy} = 1 \end{cases} \quad \text{식 60}$$

다음은 위의 식을 프로그램으로 나타낸 것이다. H(색상), S(채도)값을 이용하여 임계값을 설정하고 임계값 이외의 영역을 모두 흰색(픽셀 값 = 255)으로 설정하여 화면에서 제거하도록 하는 HSICut()함수이다.

```
void CBufferClass::HSICut()
{
    int i
    for(i=0 i<m_nHeight*m_nWidth i++){
        if(Img1.H[i] > 61){
            Img1.R[i] = 255
            Img1.G[i] = 255
            Img1.B[i] = 255
            Img1.I[i] = 255}

        if(Img2.H[i] > 61){
            Img2.R[i] = 255
            Img2.G[i] = 255
            Img2.B[i] = 255
            Img2.I[i] = 255}
```

```

if(Img1.H[i] <= 30){
    if(Img1.S[i] < 40){
        Img1.R[i] = 255
        Img1.G[i] = 255
        Img1.B[i] = 255
        Img1.I[i] = 255}}

if(Img2.H[i] <= 30){
    if(Img2.S[i] < 40){
        Img2.R[i] = 255
        Img2.G[i] = 255
        Img2.B[i] = 255
        Img2.I[i] = 255}}

if(Img1.H[i] > 30 && Img1.H[i] <61){
    if(Img1.S[i] < 80){
        Img1.R[i] = 255
        Img1.G[i] = 255
        Img1.B[i] = 255
        Img1.I[i] = 255}}

if(Img2.H[i] > 30 && Img2.H[i] <61){
    if(Img2.S[i] < 80){
        Img2.R[i] = 255
        Img2.G[i] = 255
        Img2.B[i] = 255
        Img2.I[i] = 255}}
}
}

```

위 조건을 이용하여 임계값 추출을 한 결과의 예시를 다음과 같이 나타내었다. 영상에서 볼 수 있듯이 작은 점의 노이즈들이 많이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.



그림 600 임계값 추출 결과

이러한 노이즈들을 제거하기 위하여 클로징 연산과 주변 8 픽셀을 비교하여 노이즈를 제거하는 방법을 구현하고 두 방법의 결과를 비교하였다. 주변 8 픽셀의 비교는 neighbor 8 points라는 방법으로 3 by 3 크기의 마스크를 이용하여 해당 마스크 내의 흰 픽셀의 개수와 검은 픽셀의 개수, 중심 픽셀의 명도 값을 이용하여 중심 픽셀의 새로운 명도 값을 계산하는 방법을 일컫는다.

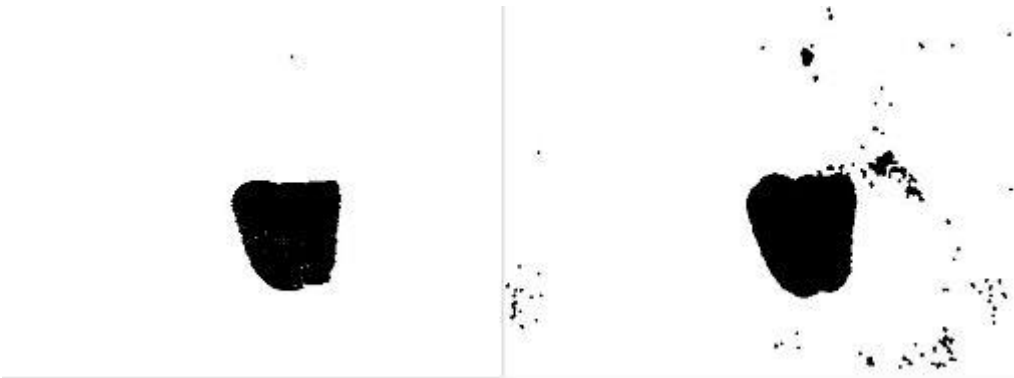


그림 601 클로징 연산과 주변 8 픽셀 비교 결과

위의 그림에서 확인 할 수 있듯이 클로징 연산의 경우 노이즈 제거에는 더욱 강하지만 파프리카 영역의 손실이 많았다. 그에 비해 주변 8 픽셀간의 관계를 비교하는 마스크의 경우 노이즈는 비교적 많이 남지만 파프리카 영역의 손실은 거의 없는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 후자의 방법을 선택하여 수행하였고 그 후 라벨링(Labeling)을 통하여 각각의 영역의 픽셀 크기를 구하고 임계값을 적용하여 너무 크거나 작은 점들을 제거하였다.



그림 602 노이즈가 제거된 영상

다음은 영상 정보를 구조체 형태로 입력 받은 후 pop(), push() 함수의 스택을 이용하여 영상을 라벨링하는 m_Labeling() 함수의 코드이다.

```
int CBufferClass::m_Labeling(m_Img Img)
{
    m_Binarization(Img);
    int i, j, m, n, top, area
    short curColor = 0, r, c

    short* stackx = new short[m_nHeight*m_nWidth];
    short* stacky = new short[m_nHeight*m_nWidth];
    int arr_size = m_nHeight*m_nWidth

    memset(Img.BlobArea, 0, sizeof(Img.BlobArea));

    short* coloring = new short [m_nHeight*m_nWidth];
    for(i=0 i<m_nHeight*m_nWidth i++) coloring[i] = 0

    for(j=0 j<m_nHeight j++)
    {
        for(i=0 i<m_nWidth i++)
        {
            if(coloring[j*m_nWidth+i] != 0 || Img.I[j*m_nWidth+i] != 0)
continue

            r=j c=i top=0 area=1
            curColor++;

            while(1)
            {
                GRASSFIRE:
```

```

        for(n=r-1 n<=r+1 n++)
        {
            for(m=c-1 m<=c+1 m++)
            {
                if(m < 0 || m >= m_nWidth
                    || n < 0 || n >=
m_nHeight) continue

                if(Img.I[n*m_nWidth+m] == 0 &&
                    coloring[n*m_nWidth+m] == 0)
                {
                    coloring[n*m_nWidth+m] =
curColor

                    if(push(stackx, stacky, arr_size,
                        (short)m, (short)n, &top) == -1)
continue

                    r=n
                    c=m
                    area++;
                    goto GRASSFIRE
                }
            }
        }
        if(pop(stackx, stacky, &c, &r, &top) == -1) break
    }
    if(curColor<360) Img.BlobArea[curColor] = area
}

//float grayGap = 250.0f/(float)curColor;

for(i=0 i<m_nWidth*m_nHeight i++)
{
    if(coloring[i] == 0 || Img.BlobArea[coloring[i]] < 5000)
    {
        Img.I[i] = 255
        Img.C[i] = 255
        Img.R[i] = 255
        Img.G[i] = 255
        Img.B[i] = 255
    }
    else

```

```

        {
            Img.I[i] = (BYTE)coloring[i];
            Img.C[i] = (BYTE)coloring[i];
            Img.R[i] = (BYTE)coloring[i];
            Img.G[i] = (BYTE)coloring[i];
            Img.B[i] = (BYTE)coloring[i];
        }
    }
    return curColor;
    delete [] coloring;
    delete [] stackx;
    delete [] stacky;
}

int CBufferClass::pop(short* stackx, short* stacky, short* vx, short* vy, int* top)
{
    if(*top==0) return(-1);
    *vx=stackx[*top];
    *vy=stacky[*top];
    (*top)--;
    return (1);
}

int CBufferClass::push(short* stackx, short* stacky, int arr_size, short vx, short vy, int*
top)
{
    if(*top >= arr_size) return (-1);
    (*top)++;
    stackx[*top] = vx;
    stacky[*top] = vy;
    return (1);
}

```

노이즈를 제거 한 후 파프리카 영역으로 추출된 영역을 원 영상에서 분리해낸 영상은 다음과 같다. 조명이 강하여 색상이 나타나지 않는 부분과 미성숙하여 색상이 나타나지 않는 부분, 잎에 가려진 부분 등을 임계값 추출을 통하여 제거하고 파프리카 영역만이 추출된 것을 확인 할 수 있다.

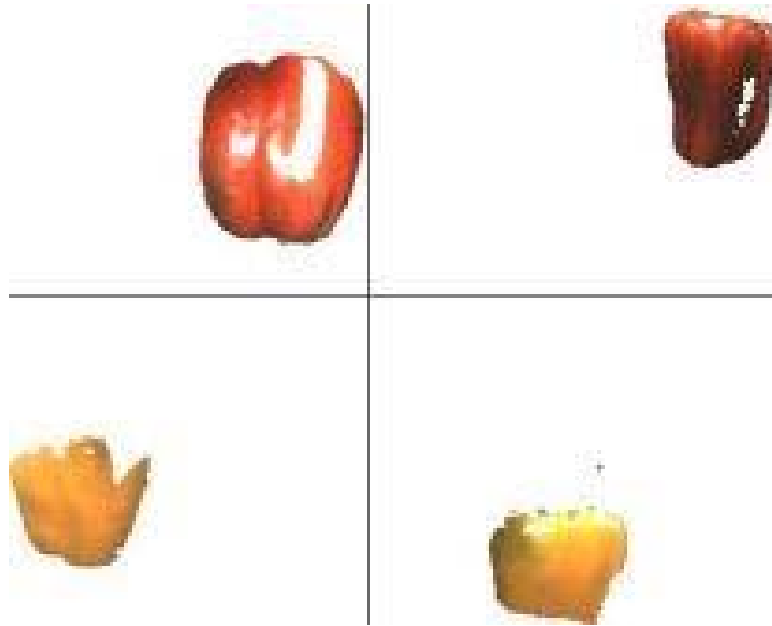


그림 603 임계값 추출 결과

- 획득한 파프리카 정보를 통한 파프리카 좌표 획득 알고리즘 설계

두 대 이상의 카메라가 기하학적인 관계(translation, rotation)를 가질 때, 두 카메라에 의해서 생성되는 영상 면과 공간상의 점 P , 점 P 가 좌, 우 영상에 투사된 점 x, x' 은 다음 그림 에피폴라 기하학 구조와 같은 관계를 갖는다.

이 때, 두 카메라의 중심 C, C' 을 잇는 선이 영상 면과 만나는 점을 에피폴(epipole)이라 하며, 에피폴과 영상 상의 점 x 또는 x' 을 잇는 선을 에피폴라(epipolar) 선이라고 한다.

기본 행렬(Fundamental matrix) F 는 3×3 skew-symmetric 형태의 행렬로 랭크는 2이고 7 자유도를 갖는다. F 는 x 와 x' 의 관계를 이용하여 구할 수 있으며, F 와 점 x 에 의하여 구해진 에피폴라 선 l 은 점 x 와 대응하는 점 x' 을 포함하는 선이다. 이러한 관계를 이용하여 대응관계를 구하고자 하는 점의 대응점을 구할 수 있다.

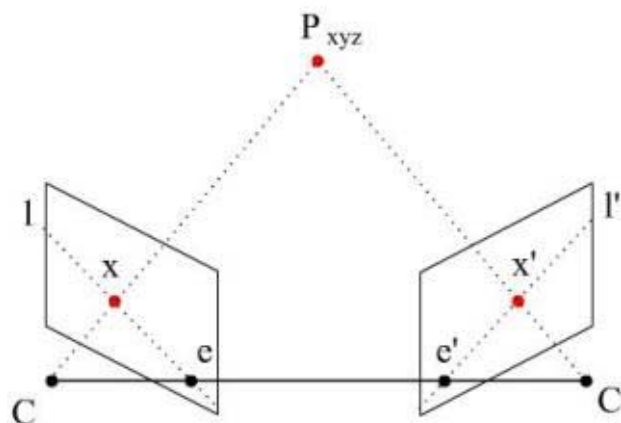


그림 604 에피폴라 기하학 구조

위 그림에서 x 와 x' 은 F 에 의하여 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$x'^T Fx = 0 \text{ 수식 61}$$

또한, 에피폴라 라인 l과 l'은 다음과 같이 F를 통해 구할 수 있다.

$$l' = Fx, l = F^T x' \text{ 수식 62}$$

F 행렬을 구하는 대표적인 방법으로는 Lmeds, RANSAC, Norm8Points 알고리즘이 있다. 본 연구에서는 세 가지 알고리즘을 통하여 F 행렬을 구한 후 해당 행렬을 이용하여 에피폴라 에피폴라 선을 구하여 에피폴라의 거리와 에피폴라 선의 평행도, 에피폴라 선과 대응점 간의 거리를 구하였다. 그 이유는 두 대의 카메라가 서로 평행하게 고정된 상태에서 획득한 영상이기 때문에 에피폴라의 거리가 멀수록 에피폴라 선이 평행하고, F 행렬이 정확한 것으로 사료되기 때문이며, 에피폴라 선 상에 나타나야 할 대응점과 에피폴라 선까지의 거리를 구하여 F 행렬의 정확도를 평가하고 결과가 좋은 F 행렬을 선택하였다.

1. LmedS(Least median of Squares)

샘플의 값과 회귀식에 의해 구해진 값의 차이인 residual을 자승하여 그 값들의 중간값이 최소가 되도록 해를 찾는 최적화 방법이다. 다음은 실제 영상의 대응점 16개를 이용하여 구한 F 행렬이다.

-0.000000057794775	0.000002905763282	-0.000939855370157
0.000011737154798	-0.000000503468552	0.039646055665349
-0.002950814060946	-0.042627745502252	0.998300729858232



그림 605 LmedS에 의하여 구해진 에피폴라 선

에피폴라 선은 모든 에피폴라 선이 통과하는 점이므로 F 행렬에 의해 구해진 두 에피폴라 선이 교차하는 점을 구함으로써 에피폴라의 위치를 알 수 있다. 두 선이 $ax+by+c=0$ 과 $dx+ey+f=0$

으로 표현된다면, 두 선의 교점 x, y 는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$x = \frac{-(by + c)}{a} \quad \text{수식 63}$$

$$y = \frac{af - cd}{bd - ae} \quad \text{수식 64}$$

$$x = -3.366823277146542e+003, y = 2.564801414657510e+002$$

원점으로 부터의 거리 : $3.376578303919823e+003$

2. Norm8Points(Normalized 8 Points)

8개 이상의 점을 임의의 원점으로부터 거리가 $\sqrt{2}$ 가 되도록 정규화한 후 정규화된 점을 이용하여 선형적인 해석을 통하여 residual이 가장 적은 값을 갖는 해를 구하고 이를 다시 역정규화 하는 방법이다.

0.000000154392271	-0.000005460827048	0.002103459916508
0.000028317144774	-0.000000444503209	0.126637598196759
-0.007323007258025	-0.130194626625726	0.983477013092486



그림 606 Norm8Points 에 의하여 구해진 에피폴라 선

$$x = -4.468053967778408e+003, y = 2.588668174860131e+002$$

원점으로 부터의 거리 : $4.475546702714174e+003$

3. RANSAC(RANdom SAmple Consensus)

무작위로 샘플을 추출 한 후 consensus가 최대로 형성되는 회귀식을 구하는 방법으로 outlier의 존재에 큰 영향을 받지 않는다는 장점이 있다.

0.000000154392271	-0.000005460827048	0.002103459916508
0.000028317144774	-0.000000444503209	0.126637598196759
-0.007323007258025	-0.130194626625726	0.983477013092486



그림 607 RANSAC에 의하여 구해진 에피폴라 선

$x = -3.456071548949215e+003$, $y = 2.599125423860307e+002$
 원점으로 부터의 거리 : $3.465831080873069e+003$

Normalized 8 points 알고리즘의 경우 8점을 이용하는 방법 대신 16점을 이용하여 계산하였기 때문에 이 둘 간의 차이 비교가 필요할 것으로 보인다. Epipole의 위치가 멀수록 평행에 가깝기 때문에 camera calibration은 용이하나 대응점 매칭이 잘되는 F matrix를 찾기 위하여 실제 대응점의 위치와 epipolar line간의 residual을 계산하여 확인 할 필요가 있을 것으로 사료된다. 하지만 본 실험에서 추출되는 데이터는 실험자가 직접 추출한 값이기 때문에 outlier가 존재하지 않으므로 RANSAC의 경우 큰 의미가 없을 것으로 보이는 결과를 확인 할 수 있었다. 비교한 결과 예상했던 대로 normalized 8 points 알고리즘으로 계산한 에피폴라 선이 가장 멀리 존재 하고 있으며, LmedS와 RANSAC의 경우 유사한 거리에 에피폴라 선이 존재 하는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 이는 카메라가 정확히 수평하게 설치되었다는 가정을 전제로 에피폴라 선이 가장 수평에 가깝게 나타나는 F 행렬이 좋은 결과라고 말 할 수 있기 때문에 대응점과 에피폴라 선의 거리를 측정하는 실험을 수행하였다.

에피폴라 선과 F 행렬을 구하기 위하여 사용된 16개의 대응점간의 거리를 구하기 위하여 다음 식을 사용하였다.

$$xF = l' \quad l' : ax + by + c = 0$$

$$\text{Distance from } x'(x'_1, y'_1) : d = \frac{|ax'_1 + by'_1 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{수식 66}$$

LmedS와 RANSAC 알고리즘의 경우 최적화 알고리즘이기 때문에 알고리즘 수행 시 동일한 결과가 출력되는 것이 아니므로 4회 반복 수행하여 결과를 비교하였다. 다음 그림은 3가지 방법을 통하여 구해진 F 행렬과 16개의 대응점을 이용해 에피폴라 선을 구하고 각 선과 점간의 거리를 나타낸 것이다.

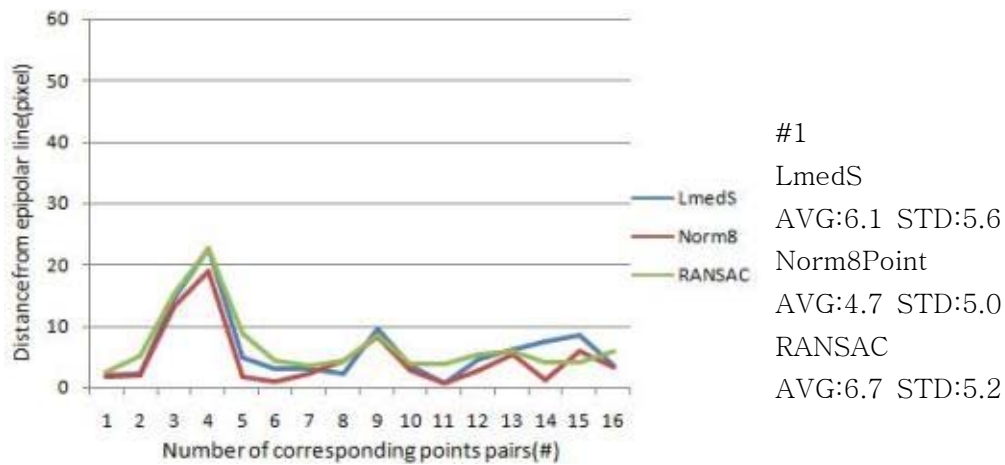


그림 608 에피폴라 선과 대응점간의 거리 #1

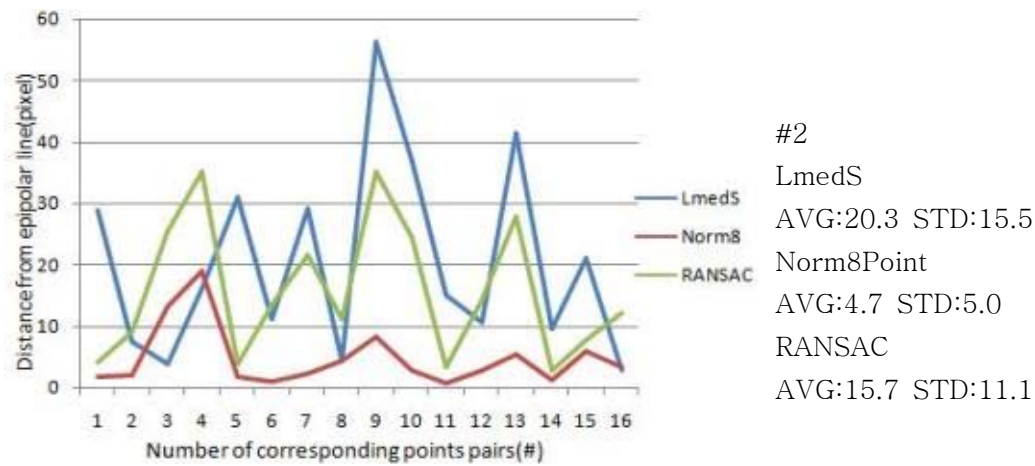
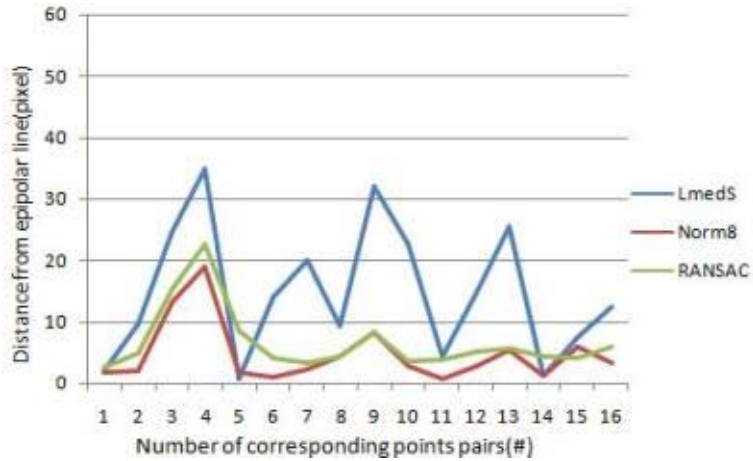
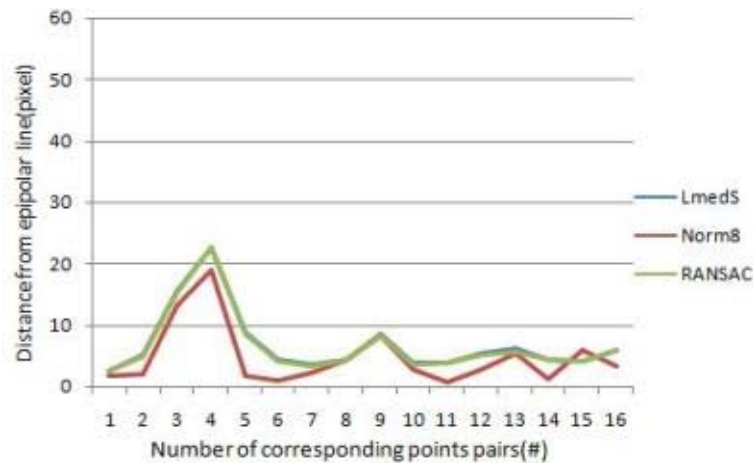


그림 609 에피폴라 선과 대응점간의 거리 #2



#3
 LmedS
 AVG:14.7 STD:10.9
 Norm8Point
 AVG:4.7 STD:5.0
 RANSAC
 AVG:6.6 STD:5.2

그림 610 에피폴라 선과 대응점간의 거리 #3



#4
 LmedS
 AVG:6.8 STD:5.2
 Norm8Point
 AVG:4.7 STD:5.0
 RANSAC
 AVG:6.6 STD:5.2

그림 611 에피폴라 선과 대응점간의 거리 #4

다음 표는 각 알고리즘을 통해 구해진 거리(오차)의 평균, 표준편차를 나타낸 것이다.

표 109 F 행렬을 통해 구해진 에피폴라 선과 대응점 간의 거리비교 결과

	Average	STDEV	Average	STDEV	Average	STDEV	Average	STDEV
LmedS	6.125	5.628	20.319	15.522	14.683	10.888	6.793	5.245
Norm8	4.699	4.980	4.699	4.980	4.699	4.980	4.699	4.980
RANSAC	6.707	5.198	15.659	11.097	6.644	5.230	6.644	5.230

본 실험에서 사용된 대응점 16쌍은 실험자가 직접 추출 한 것이기 때문에 outlier가 존재하지 않는다. 따라서 선형적으로 계산된 Norm8Points 알고리즘이 가장 정확한 결과가 나타난 것으로 사료된다.

에피폴라 선을 구한 후 해당 선 상에 존재하는 점에 대해 대응관계를 확인하기 위하여 11x11 크기의 윈도우를 이용하여 해당 윈도우 내에 존재하는 픽셀의 H(색상)값을 마스크로 컨벌루션 한 후 좌, 우 영상의 차이를 구하여 해당 차이가 최소가 되는 점을 대응점으로 추출 하였다.



Fig. 612 파프리카의 명도 영상

파프리카 영역의 명암을 이용하여 특징을 비교하는 경우 위의 영상과 같이 파프리카 영역에서 확연한 특징이 나타나지 않기 때문에 색상 영상을 이용하였고, 대응점과 직접 비교되는 픽셀을 강조하고 수직, 수평방향 이웃 픽셀들을 강조하기 위하여 다음 그림과 같은 형태의 마스크를 사용하였다.

아래 그림은 5x5 픽셀의 마스크로 중심 픽셀의 가중치는 25이고 수직, 수평방향 픽셀의 가중치는 5, 나머지는 1의 값을 갖도록 한 형태이고, 실제 알고리즘에서는 11x11 마스크를 사용하였다.

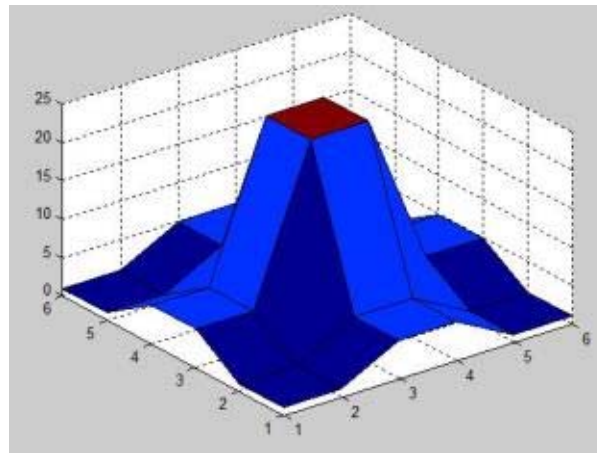


Fig. 613 중심 픽셀 강조 마스크

$$H'_{m \times m} = H_{m \times m} * M_{m \times m} \quad \text{수식 67}$$

$$\epsilon_{x_r, y_r} = \frac{1}{(2m+1)^2} \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m |H'_{x_l+i, y_l+j} - H'_{i+m, j+m}| \quad \text{수식 68}$$

위 수식에서 H'은 H(색상) 영상과 마스크의 컨벌루션을 통해 구할 수 있다.

또한 픽셀의 에러를 구하기 위하여 컨벌루션 된 H'영상의 좌, 우측 픽셀 값을 마스크 상에서 뺀 후 절대 값의 평균을 구했다. 해당 에러 값이 최소가 되는 점이 대응점으로 추출 되도록 프로그래밍 하였다.

다음은 좌측 영상의 점에 의하여 그려진 우측 영상의 에피폴라 라인 상의 점 ptx, pty를 입력으로 받아 좌, 우 픽셀의 오차의 제곱 합을 구하는 프로그램의 코딩이다. 오차의 제곱 합이 최소가 되는 픽셀의 x, y 좌표를 저장하도록 코딩하였다.

```
void CStereotestDlg::Compare(int ptx, int pty)
{
    int i, j, k, l, Minx, Miny, cnt;
    double MSE, MinMSE=10000.0;

    for(j=pty-100; j<pty+100; j++){
        for(i=ptx-150; i<ptx+150; i++){
            MSE = 0;
            cnt = 0;
            for(l=-1*m_eMaskSize; l<m_eMaskSize+1; l++){
                for(k=-1*m_eMaskSize; k<m_eMaskSize+1; k++){
                    if((abs(l)+abs(k))%2 == 0)
                    {
                        MSE +=
pow((double)(m_pCBuf->Img2.C[(j+l)*m_nWidth+(i+k)] -
m_pCBuf->Img1.C[(pty+l)*m_nWidth+(ptx+k)]),2);
                        cnt++;
                    }
                }
            }
            MSE /= cnt;
            if(MinMSE > MSE)
            {
                MinMSE = MSE;
                Minx = i;
                Miny = j;
            }
        }
    }
}
```



그림 614 대응점 매칭

위 그림에 나타난 영상은 대응 영상 중 우측 영상에 양측 매칭 점을 표시하고 두 점간의 관계를 녹색 선으로 나타낸 것이다. 좌측 영상의 한 점을 선택하면 해당 좌표와 F 행렬을 이용하여 우측 영상에 에피폴라 선을 적용하고 해당 선 위에서 좌측 영상에서 선택된 점과 비교 연산을 수행하여 가장 오차가 작은 점을 추출하였다. 파란색 십자는 좌측 영상에서 선택된 좌표를 우측 영상에 표현한 것이고, 붉은색 x자는 해당 점과 매칭된 좌측 영상의 좌표를 표현한 것이다.

대응점을 구한 후 대응점 간의 픽셀 거리를 구하였다. 스테레오 영상에서 픽셀 거리를 d (disparity)로 표현 할 수 있으며, d 가 커질수록 점 P의 실제 좌표 중 Z좌표는 작아지고, d 가 작아질수록 점의 Z좌표는 커진다는 것을 알 수 있다. 이를 이용하여 카메라로부터 대상까지의 거리를 구할 수 있다.

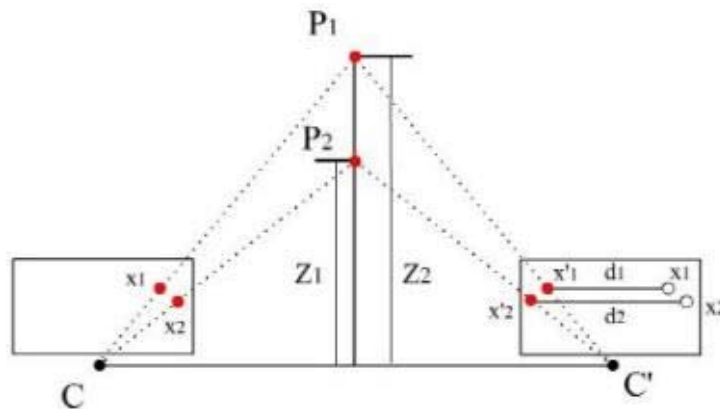


그림 615 스테레오 영상의 기하학적 구조

위 그림에서 공간상의 점 P1은 좌, 우 카메라의 중심 C, C'과 이루는 직선에 의하여 두 영상면과 만나는 점 x_1 , x'_1 에 나타난다. 마찬가지로 P2는 x_2 , x'_2 로 나타난다.

이 때, x_1 과 x'_1 의 거리 d_1 을 픽셀 차(disparity)라고 한다면 거리(Z)가 가까운 P2에 의해 발생하는 d_2 의 크기가 d_1 보다 더 큰 것을 확인 할 수 있다. 이러한 경향을 캘리브레이션 판을 이용하여 여러 개의 점에 대하여 픽셀 차를 구하고 해당 픽셀 차를 거리에 대하여 회귀식을 구하고

자 하였다.

본 연구에서는 파프리카 수확기의 작업 공간이 500mm 이내이고, 카메라 시스템의 구조에 의해 150mm 이내에서는 두 영상에 대응하는 영역이 존재하지 않기 때문에 150mm ~ 550mm의 Z좌표에서 캘리브레이션 판을 놓고 d를 구하였다.

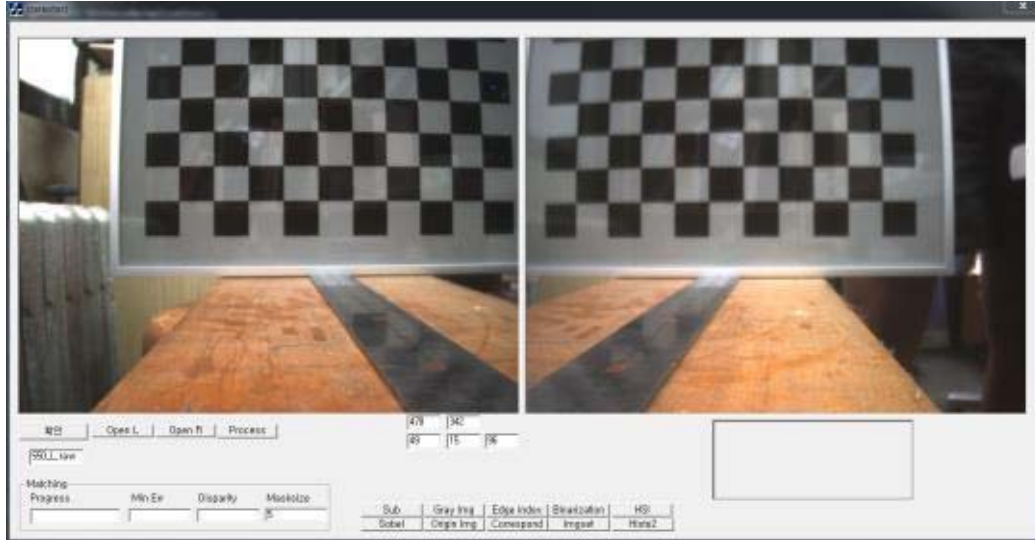


그림 616 캘리브레이션 보드의 스테레오 영상
표 110 거리에 따른 좌표간의 픽셀 차

Z (mm)	left		right		d (pixel)
	x	y	x	y	
150	585	286	31	292	554
200	539	271	121	273	418
250	489	261	159	263	330
300	469	254	194	255	275
350	444	253	209	256	235
400	433	251	227	253	206
450	383	254	201	257	182
500	380	253	214	256	166
550	383	251	234	255	149

위 표는 거리 150mm부터 550mm까지 캘리브레이션 판을 이동하면서 좌, 우측 영상에서 대응하는 점들의 좌표와 픽셀 차를 구한 결과표이다. 이 표를 이용하여 픽셀 차와 실제 거리간의 상관관계를 3차 다항식 회귀를 통하여 관계식을 구한 결과는 아래와 같다. 결정계수 R^2 는 0.999였다.

$$Z = -0.00001025d^3 + 0.01362d^2 - 6.3346d + 1221.3402 \quad \text{수식 69}$$

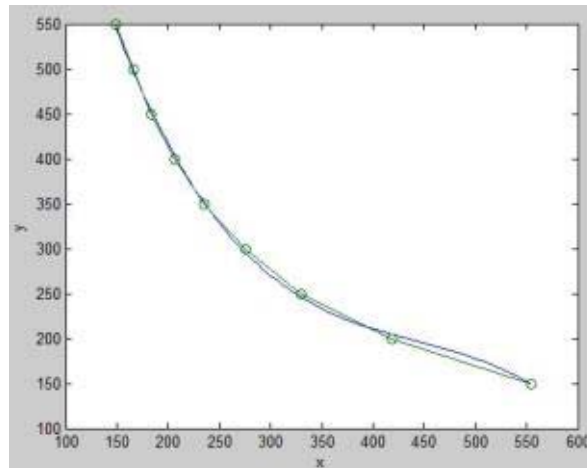


Fig. 617 픽셀 차와 거리간의 회귀 결과

다음은 비선형 회귀를 위하여 작성한 matlab m파일인 Polyfits()함수이다. 두 개의 입력 x, y 와 다항식의 차수 m을 입력으로 하여 회귀 결과 그래프와 식, 결정계수를 출력하는 형태로 작성 되었다.

```
function [a, r2, syx] = Polyfits(x, y, m)
```

```
n=length(x);
```

```
x=x(:); y=y(:);
```

```
Z(:, m+1) = ones(n,1);
```

```
for i=m:-1:1
```

```
    Z(:,i) = Z(:, i+1).*x;
```

```
end
```

```
a=Z\y;
```

```
r=y-Z*a;
```

```
sr=norm(r)^2;
```

```
r2=1-sr/(norm(y-mean(y)))^2;
```

```
syx=sqrt(sr/(length(x)-length(a)));
```

```
xi=linspace(min(x), max(x));
```

```
yi=polyval(a,xi);
```

```
plot(xi, yi, x, y, '-o')
```

```
xlabel('x'), ylabel('y')
```

또한, x, y좌표를 얻기 위하여 공간상의 점과 영상에 나타나는 점, 그리고 초점거리의 관계를 이용하고자 한다. 다음 그림을 보면 공간상의 점 A와 영상면의 점 a의 좌표는 f와 Z에 의해 아래 식과 같은 관계를 갖는다.

이 때, 결과 값을 미터 단위로 구하기 위해서 픽셀의 가로, 세로 방향의 실제 길이를 구하여 계산 한다.

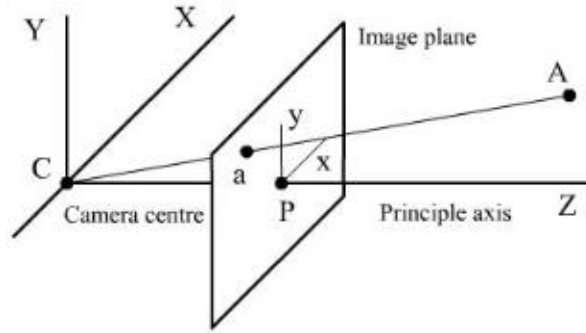


그림 618 공간에서 점 A와 a의 상관관계

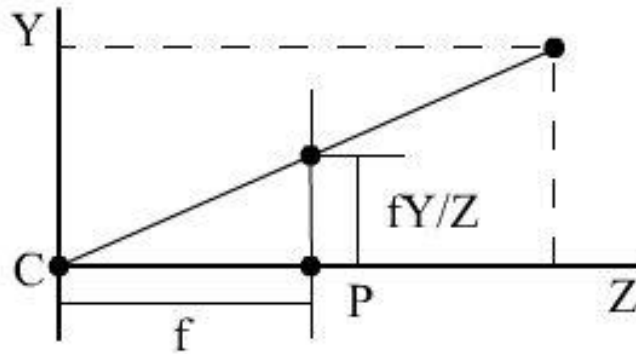


그림 619 YZ 평면에서 점 A와 a의 상관관계

$$\begin{aligned} a_y - P_y : Y = f : Z \\ a_x - P_x : X = f : Z \end{aligned} \quad \text{수식 70}$$

이러한 관계를 이용하여 앞서 계산한 초점거리와 Z거리를 이용하여 x, y 좌표를 구할 계획이다.

- 파프리카 좌표 획득 후 파프리카 수확을 위한 위치 선정 알고리즘 설계

본 연구에서는 파프리카의 정확한 위치를 파악하기 위하여 기계 학습(Machine learning) 인공지능 알고리즘 중 하나인 심층학습(Deep learning) 알고리즘을 사용하고자 한다. 심층학습 알고리즘은 비지도 학습에 가까운 학습법이나 정확히 비지도 학습이라고 분류 할 수 없는 알고리즘이다. 지도 학습과 비지도 학습의 차이는 다음 표와 같다.

표 111 지도 학습과 비지도 학습 비교

	Supervised	Unsupervised
Input data	Training data	Raw data
Output	Classification/ Regression	Clustering
Algorithms	SVM(Support Vector Machine) BP(Back propagation)	Decision tree, K-Means

지도 학습의 경우 입력을 실험자가 직접 선택하여야 한다. 각 입력과 기대하는 출력간의 상관 관계를 분석하여 상관도가 높은 입력을 선택하여야 양호한 학습 결과를 얻을 수 있다. 지도 학습의 결과는 다음 그림과 같이 분류 또는 회귀의 결과를 얻을 수 있다. 대표적인 알고리즘으로는 서포트 벡터 머신(SVM), 오류 역전파 알고리즘(BP) 등이 있다.

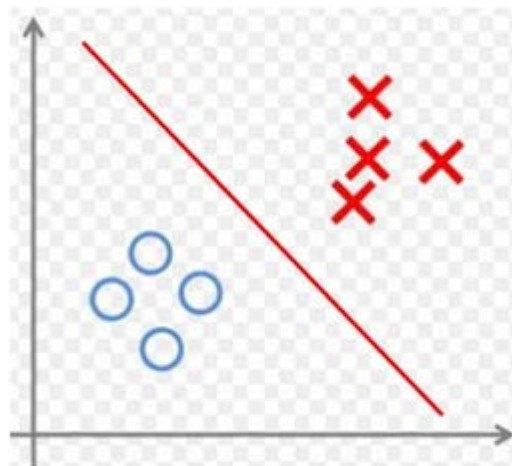


그림 620 지도학습 결과 예시

비지도 학습의 경우 입력을 선택하지 않고 획득한 모든 정보를 입력으로 준 후, 학습을 통해 출력과 관계가 높은 입력에 대한 가중치를 강화하는 방법으로 학습 자체가 입력을 선택 하도록 하는 방법이다. 입력에 대한 연산이 많아 학습시간이 오래 걸린다는 단점이 있으나 하드웨어의 발달에 의하여 많은 개선이 이루어졌다. 비지도 학습의 결과는 다음 그림과 같이 클러스터를 이루도록 하는 특징이 있다. 대표적인 알고리즘으로는 결정 나무, K-Means 등이 있다.

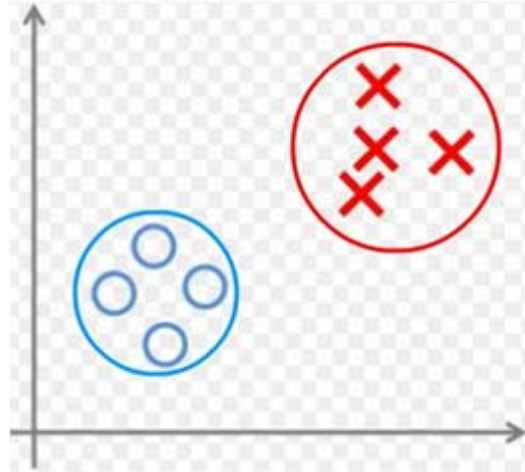


그림 621 비지도 학습 결과 예시

심층 학습은 비지도 학습과 유사한 경향을 보이나, 입력 값을 피쳐(feature) 형태로 변환하는 과정을 거쳐 학습을 한다는 것이 비지도 학습과의 차이점이다. 특히, 영상처리에서 심층 학습이란 CNN(Convolutional Neural Network)을 대표적인 알고리즘으로 하며, 반복적인 컨벌루션을 통하여 영상 정보를 압축하여 피쳐 맵(map)을 생성한 후 이를 오류 역전파 알고리즘(BP)을 통하여 학습 하는 알고리즘이다.

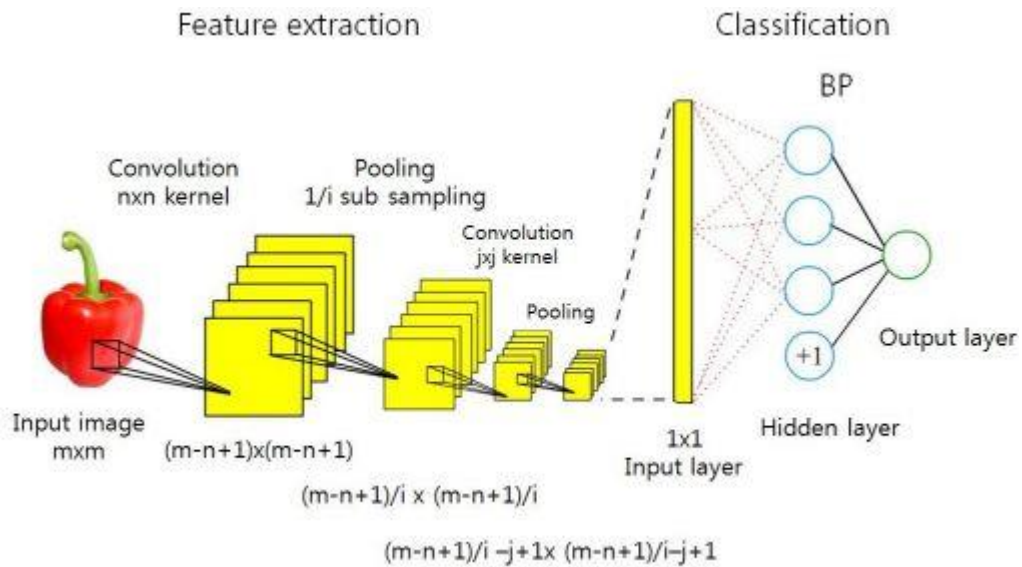


그림 622 CNN 개략도

위 그림은 CNN 알고리즘의 개략도를 나타낸 것이며, 입력 데이터는 m by m 크기의 영상인 것을 확인 할 수 있다. 입력된 영상은 n by n 크기의 커널을 이용하여 컨벌루션 되고 이를 통해 $(m-n+1)$ by $(m-n+1)$ 크기로 줄어든다. 컨벌루션 커널의 종류에 따라 피쳐 맵이 생성되며, 이를 풀링(Pooling) 과정을 통하여 압축 하게 되는데 이러한 과정을 sub sampling이라고 한다. 이때, 샘플링의 정도는 실험자가 조절 할 수 있다. 컨벌루션과 풀링 과정을 반복적으로 수행하여 피쳐 맵을 1 by 1 의 크기까지 압축을 한 후, 이를 입력 값으로 하는 오류 역전파 알고리즘을 통해 학습하게 된다. 일반적으로 영상처리에서 컨벌루션이란 필터, 마스크, 윈도우 등의 표현으로

사용되고 있다. 컨벌루션 커널의 크기에 따라 해당 커널과 영상 배열의 값을 서로 곱한 후 더하여 중심 픽셀의 값으로 하는 과정을 의미한다. 다음 그림은 영상의 컨벌루션을 간략화 하여 나타낸 것이다.

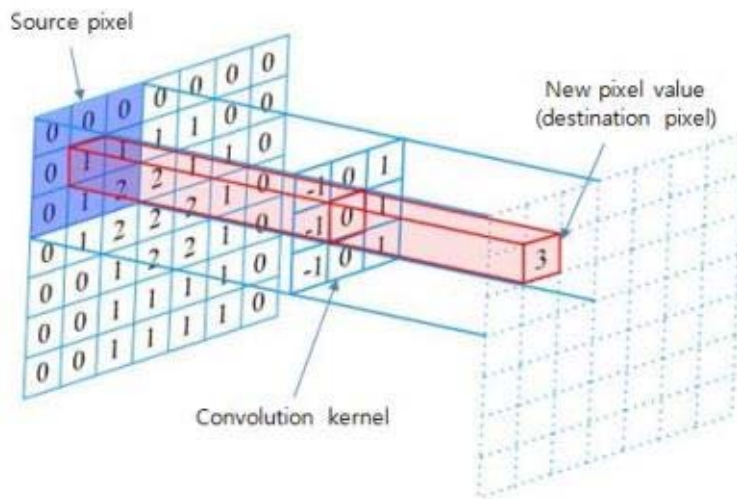


그림 623 영상 정보의 컨벌루션

본 알고리즘에서 피쳐 추출과정에서의 연결 강도는 컨벌루션 커널로 나타낼 수 있으며, 각 뉴런간의 연결은 방향성을 갖는다. 같은 방향 연결 강도는 같은 값을 공유 하는 형태로 연결 되어 있다. 이러한 뉴런간의 연결을 통하여 피쳐 추출이 이루어지며, 오류 역전과 알고리즘 입력 연결 부터 완전히 연결된(fully connected) 형태로 뉴런의 연결이 이루어진다.

본 연구에서는 컨벌루션 커널을 이용하여 파프리카의 형태를 추출하여 입력으로 하고자 하였기 때문에 다음 그림과 같이 픽셀 값의 방향성을 강조하는 컨벌루션 커널을 사용하고자 한다.

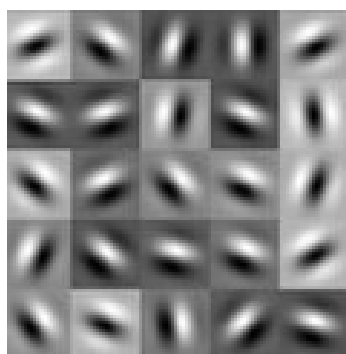


그림 624 방향성 강조 커널

각 연결 강도는 학습이 진행됨에 따라 최후 층에서 발생한 오류의 값을 역전과 함으로써 계산된 오류 신호를 통해 수정되는 과정을 거친다. 이 때, 오류 신호에 의하여 변하는 연결 강도는 학습률에 영향을 받고, 최종 오차가 설정된 임계값 보다 작아지면 학습을 완료하고 각 연결 강도를 저장하게 된다. 저장된 연결 강도는 학습이 끝난 후 검증에 사용되며, 추 후 영상처리 알고리즘에 적용할 계획이다.

다음 그림은 "Food detection and recognition using convolutional neural network"

(Kagaya 등, 2014) 논문에서 기존의 Spatial pyramid matching(SPM)과 Support vector machine(SVM) 학습 방법과 CNN 알고리즘을 통해 식품 영상을 학습 한 후 인식 결과를 비교한 결과이다.

	Natto	Yogurt	Green Salad	Deep-fried chicken	Rice	Ramen	Miso soup	Grilled salmon	Cold tofu	Curry and rice
Natto	60.11%	8.33%	2.44%	5.78%	3.33%	4.00%	2.89%	2.00%	6.11%	5.00%
Yogurt	4.89%	65.89%	4.44%	2.11%	7.89%	1.44%	2.67%	1.78%	8.56%	0.33%
Green salad	1.89%	3.11%	72.11%	2.78%	2.22%	7.22%	3.33%	2.67%	3.89%	0.78%
Deep-fried chicken	4.11%	1.67%	2.56%	70.00%	0.89%	3.22%	4.56%	6.22%	3.56%	3.22%
Rice	3.89%	5.33%	2.56%	1.33%	72.78%	2.22%	2.67%	1.33%	6.56%	1.33%
Ramen	3.33%	2.44%	8.00%	3.56%	2.11%	68.22%	3.67%	2.33%	3.56%	2.78%
Miso soup	1.33%	2.22%	3.22%	2.11%	1.56%	4.00%	78.22%	0.78%	4.00%	2.56%
Grilled salmon	2.44%	3.56%	2.44%	9.11%	2.33%	3.33%	1.89%	70.22%	3.78%	0.89%
Cold tofu	5.22%	8.22%	6.00%	4.22%	7.22%	3.89%	5.56%	1.44%	54.67%	3.56%
Curry and rice	2.89%	1.00%	1.44%	4.67%	2.78%	3.44%	2.67%	0.67%	2.00%	78.44%

(a) CNN

	Natto	Yogurt	Green Salad	Deep-fried chicken	Rice	Ramen	Miso soup	Grilled salmon	Cold tofu	Curry and rice
Natto	46.34%	10.00%	1.89%	6.77%	4.56%	4.67%	4.11%	4.22%	9.67%	7.78%
Yogurt	6.34%	61.77%	3.45%	1.89%	8.22%	1.56%	2.56%	4.00%	7.67%	2.56%
Green salad	1.67%	5.11%	58.98%	3.67%	3.33%	9.78%	5.44%	3.67%	8.56%	1.78%
Deep-fried chicken	7.56%	2.33%	2.22%	47.66%	0.78%	6.00%	6.00%	6.67%	5.11%	15.66%
Rice	4.78%	9.44%	2.22%	1.44%	61.23%	2.67%	3.78%	2.22%	10.00%	2.22%
Ramen	4.12%	2.45%	8.23%	5.78%	2.45%	57.62%	6.23%	4.12%	5.67%	3.34%
Miso soup	3.22%	3.11%	4.78%	6.45%	2.11%	5.00%	60.21%	2.22%	5.78%	7.11%
Grilled salmon	6.00%	5.44%	3.89%	7.89%	2.00%	4.22%	2.78%	57.42%	8.11%	2.22%
Cold tofu	6.34%	8.00%	8.56%	6.22%	14.89%	7.67%	5.33%	4.89%	35.01%	3.11%
Curry and rice	5.33%	2.22%	1.56%	12.34%	1.67%	2.78%	5.33%	1.22%	2.78%	64.79%

(b) Color SPM + SVM

모든 항목에서 인식률이 기존의 학습 알고리즘 보다 높게 나타난 것을 확인 할 수 있으며, 특히 오 인식률은 10%가 넘지 않는 것을 확인 할 수 있다.

○ 영상정보 획득 및 획득한 영상정보에 따른 시스템 제어를 위한 영상처리 시스템 제작

- 영상처리 시스템 제작

영상처리 시스템을 제작하기 위하여 카메라, 렌즈를 선정하고 수확기에 연결 할 수 있도록 연결부를 설계 및 제작 하고자 함. 카메라의 경우 1차년도 연구 결과를 바탕으로 HSI 정보를 이용하여 파프리카를 인식 할 수 있도록 RGB 컬러 정보를 획득하는 모델을 선정하고자 하였으며, 해상도의 경우 640x480의 경우 CCD 센서의 크기가 작아 FOV(Field of view)가 충분하지 않았기 때문에 1288x964의 해상도를 갖는 CCD 센서를 선정하고 해당 스펙에 맞춰 카메라를 선정하였음.

또한, 렌즈의 선택에 있어서도 6mm, 8mm, 12mm, 16mm의 focal length를 갖는 렌즈에 대하여 실험을 수행하여 FOV, DOF(Depth of field)에 대하여 검토하였음. 본 시스템의 최소 WD(Working distance)인 400mm와 최대 WD 700mm에서 각각 수행함.

표 112 CCD 센서 사이즈와 Focal length에 따른 FOV 변화 측정

Sensor size	Focal length(mm)	FOV(mm)	
		WD 400mm	WD 700mm
1/4"	6	240	420
	8	180	315
	12	120	210
	16	90	157.5
1/3"	6	320	560
	8	240	420
	12	160	280
	16	120	210

본 시스템의 작업 환경을 고려하였을 때 1/3" 센서 크기의 카메라와 6mm의 focal length를 갖는 렌즈를 선택하는 것이 타당하다고 사료됨. 해당 조건의 영상처리 시스템을 구현할 경우 WD 400 ~ 700mm 구간에서 최소 320mm에서 최대 560mm까지의 FOV를 확보 할 수 있음.

위의 결과를 통하여 선정한 CCD 센서는 Sony ICX445모델로 1/3"크기로 각 픽셀의 크기는 3.75um이며 1288x964해상도에서 초당 30프레임을 획득 할 수 있음.

해당 센서를 이용한 카메라 중에서 온도와 습도 변화에 영향을 적게 받는 모델의 카메라를 선정하고자 point grey research 社의 BFLY-U3-13S2C-CS 모델을 선정하였고 해당 카메라는 0~45°의 온도와 최대 80%의 습도에서 작동 가능함.

BFLY-U3-13S2C-CS	Color	1.3 MP	■ Sony ICX445, 1/3", 3.75 μm
BFLY-U3-13S2M-CS	Mono		■ Global shutter
			■ 30 FPS at 1288 x 964

그림 626 선정된 카메라의 사양

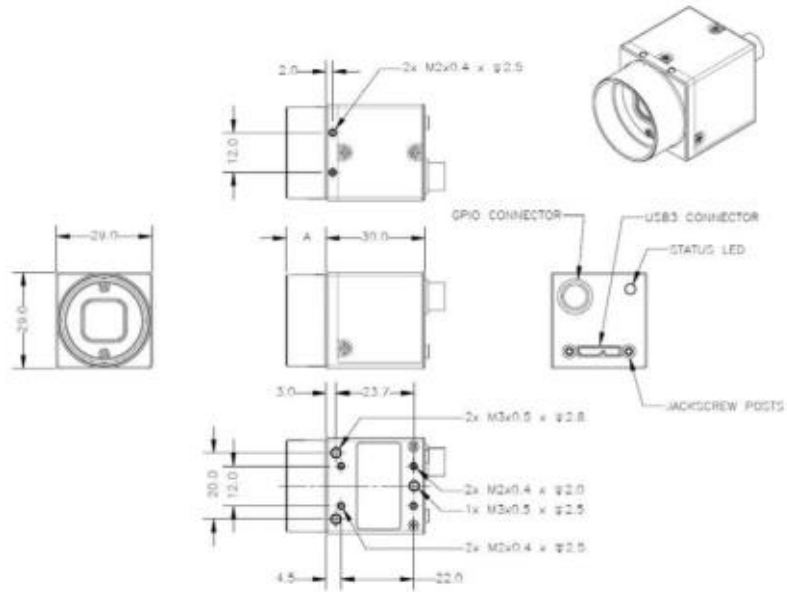


그림 627 카메라 외형

표 113 선정된 렌즈의 사양

Lens size	1/2"
focal length	6mm
f#	1.2
Mount type	C



그림 628 카메라와 렌즈의 모습

카메라와 렌즈를 이용하여 두 대의 카메라 시스템을 제작하였으며, 두 카메라 시스템을 이용하여 하나의 스테레오 영상 시스템을 구성하였음. 두 카메라는 중심간 간격을 50mm로 맞추었으며, 이는 1차년도 연구에서 100mm 간격으로 시스템을 구성하였을 때 스테레오 영상에서 양쪽 영상에서 서로 대응하는 영역이 충분치 않아 이를 늘리고자 함.

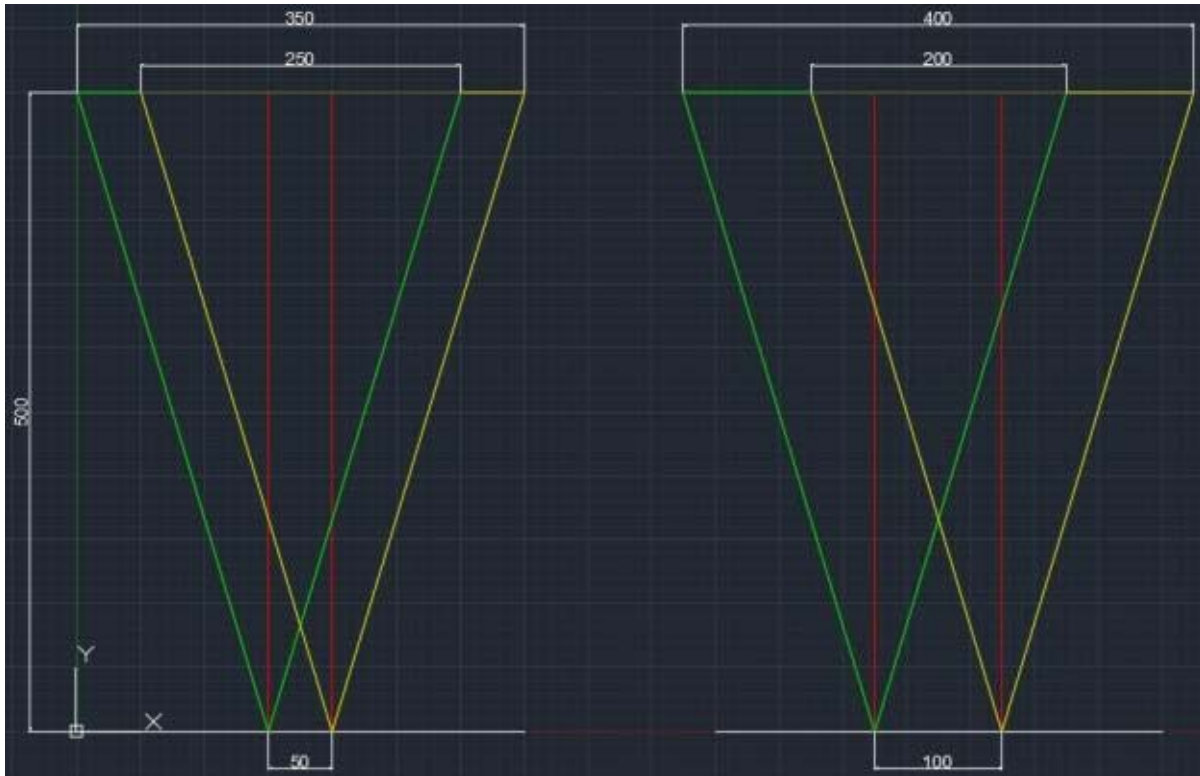


그림 629 카메라 간의 간격에 따른 교차 영역 변화

카메라 중심간의 거리를 50, 100mm로 설정하였을 때 WD 500에서 FOV의 교차 영역을 비교해 보면 카메라와 렌즈의 왜곡이 전혀 없다고 가정하였을 때 250mm와 200mm로 나타남. 또한 카메라 중심간의 거리를 100mm로 설정하였을 경우 제작된 매니퓰레이터에 설치를 하기 위한 공간이 추가적으로 필요하게 되어 매니퓰레이터의 중심과 카메라의 중심을 일치시키기 어려운 점이 있음. 따라서 당해연도 연구에서는 스테레오 카메라 시스템의 카메라 중심간의 거리를 50mm로 설정하였음.

해당 거리로 설정한 후 카메라에 나타나는 영상의 disparity를 확인하고 설정 거리에서 충분한 해상도를 갖는 정보를 획득할 수 있는지 확인하고자 함.

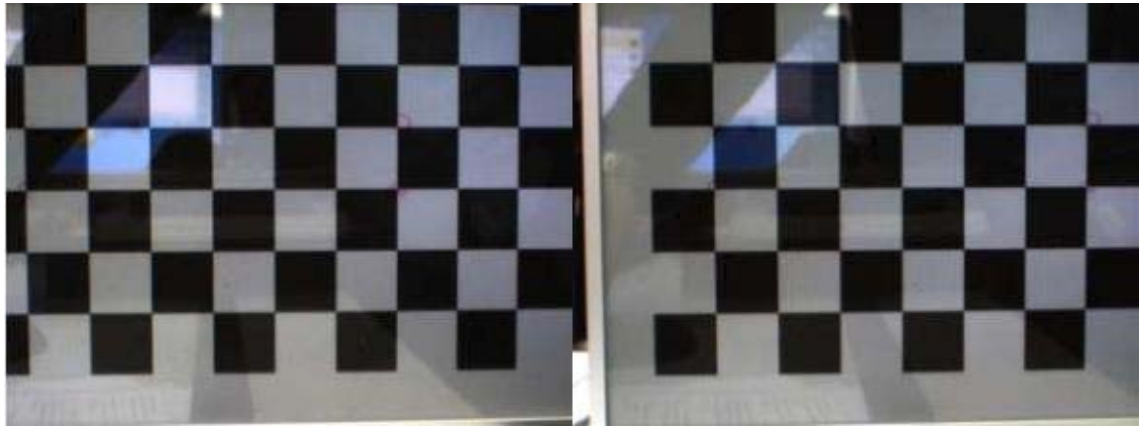


그림 630 설정된 카메라 거리에서 획득한 캘리브레이션 보드의 스테레오 영상

계획한 형태로 시스템을 구성하고 실험을 해본 결과 계산과는 달리 약 210mm의 영역이 교차되어 나타남을 확인함.

또한, x 방향 disparity는 약 280pixel로 나타남. 이는 WD 500mm에서 측정한 결과로 depth map의 해상도는 약 1.786mm/pixel로 구할 수 있음.

구성 된 영상 시스템을 수확기와 체결하기 위하여 연결부를 설계하고 설계에 맞추어 연결부를 제작하였음. 연결부를 설계함에 있어 매니플레이터와의 간섭, 연결 케이블의 이동 등을 고려하여 설계 요인을 설정하고 다음과 같이 설계도를 완성하였음.



그림 631 카메라 시스템과 매니플레이터 연결부 설계도 #1

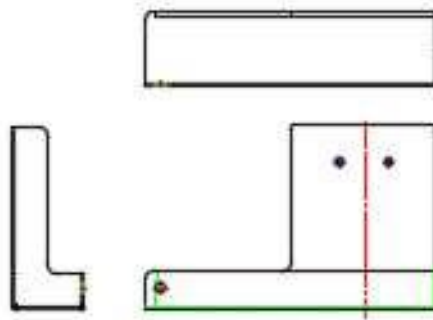


그림 632 카메라 시스템과 매니플레이터 연결부 설계도 #2

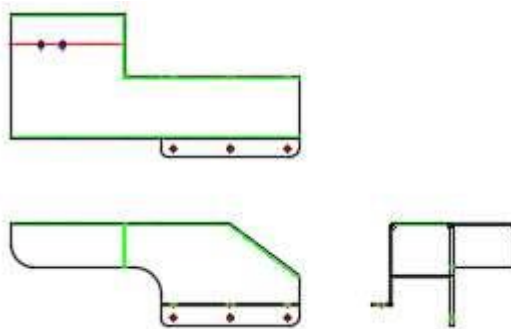


그림 633 카메라 시스템과 매니플레이터 연결부 설계도 #3

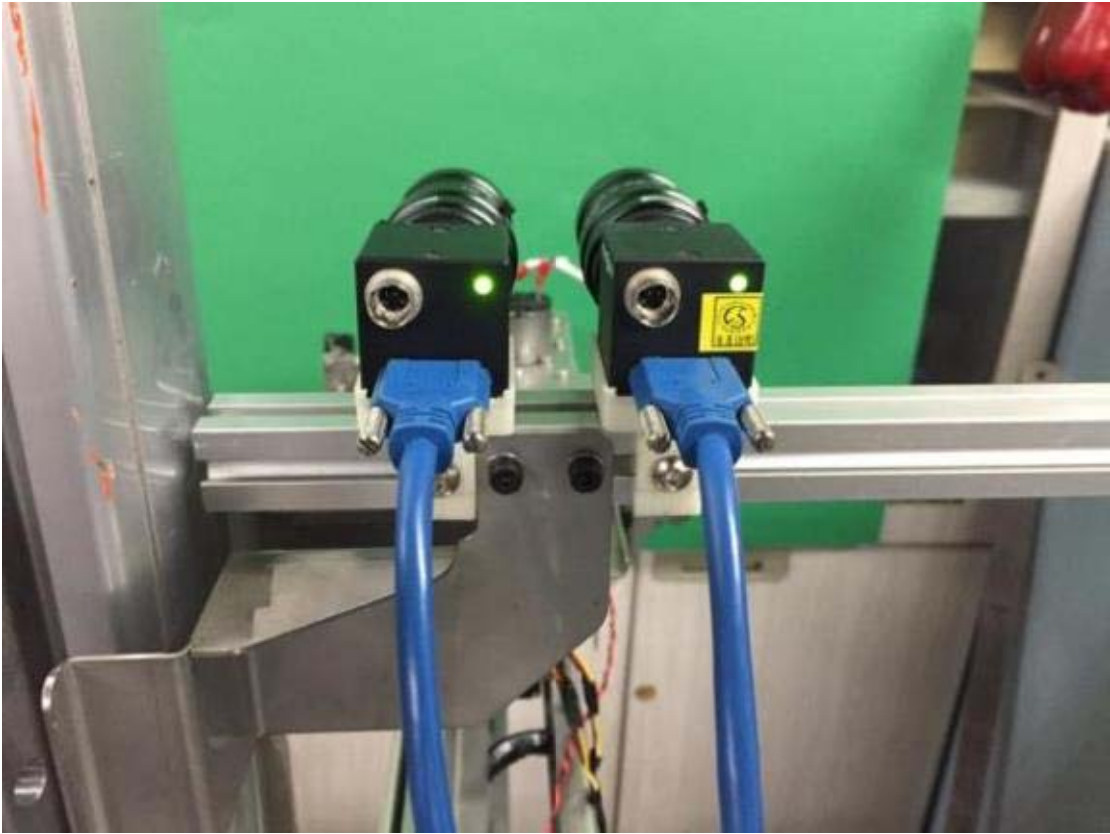


그림 634 영상처리 시스템 연결부 후면



그림 635 영상처리 시스템 연결부 전면

- 영상처리 시스템 구동제어 소프트웨어 제작

제작된 영상처리 시스템의 제어를 위하여 카메라의 연결을 제어하고 카메라로부터 영상 정보를 읽어 들일 수 있어야 하며, 해당 정보를 원하는 형태로 저장 및 파일로 출력 할 수 있어야 함. 이를 위하여 당해연도 연구에서는 Microsoft 社의 Visual studio C++ 언어를 이용하여 프로그램을 작성하고자 하였으며, 해당 언어의 MFC 라이브러리를 통해 윈도우 프로그램을 작성함.

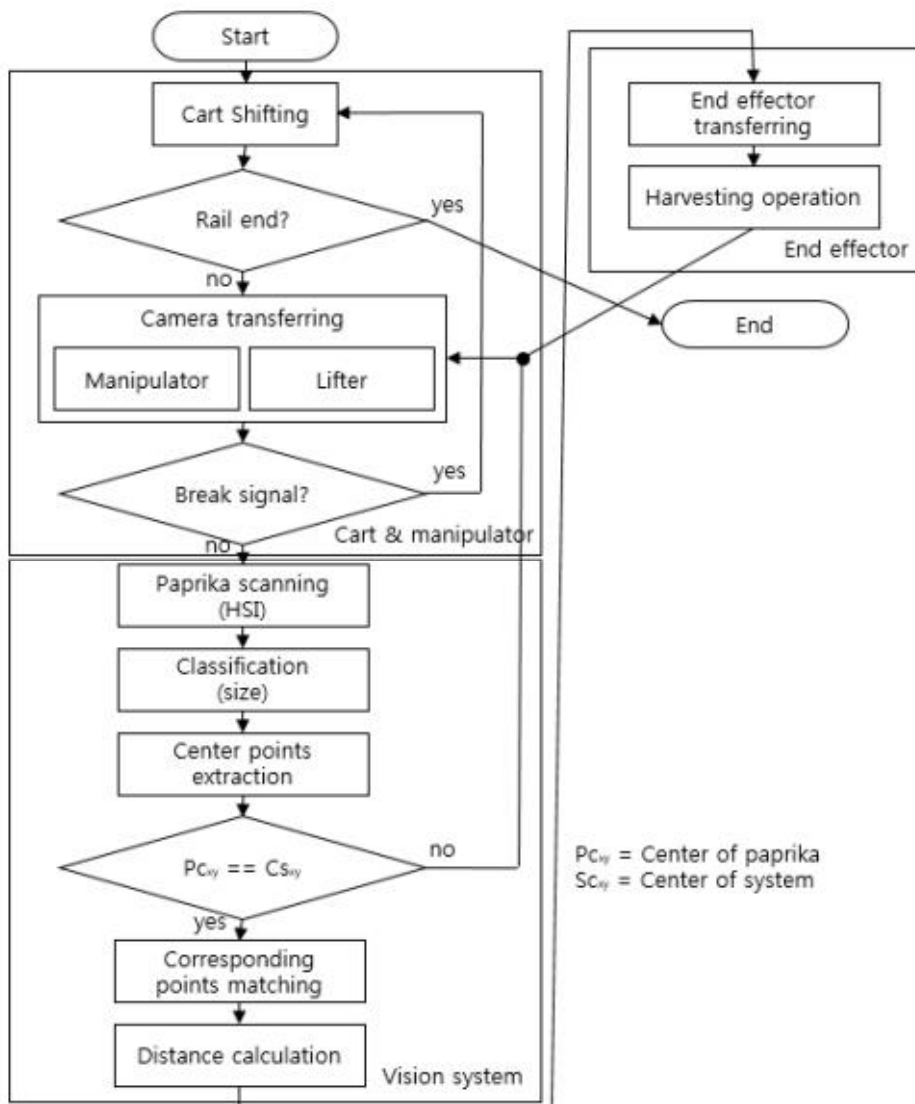


그림 636 영상 정보를 이용한 시스템 제어 순서도

본 시스템에서 선정된 카메라는 point grey research 社의 제품으로 해당 카메라를 Visual studio C++ MFC로 제어하기 위하여 FlyCapture 2 SDK 라이브러리를 사용해야 함. 해당 SDK 라이브러리는 2.7.3.18 버전을 사용하였으며, 각 카메라의 serial number를 이용하여 본 연구에서 제작된 프로그램과 카메라의 통신을 수행하였음.

```
Cam[0].CamSN = 14366932;  
Cam[1].CamSN = 14432783;
```

각 카메라 변수는 구조체 형식으로 0번과 1번 카메라 변수로 지정하여 내부 변수로 serial number를 지정할 수 있도록 설계되었음. 0번 카메라는 좌측 카메라를 의미하며 1번 카메라는 우측 카메라를 의미함.

```
struct sCam  
{  
    FlyCapture2::Camera m_Cam;  
    FlyCapture2::Image m_Image;  
    FlyCapture2::Image m_RGBImage;  
    FlyCapture2::CameraControlDlg m_CamCtrlDlg;  
  
    int CamSN;  
  
    BYTE* Original;  
    BYTE* BGR;  
  
    BYTE* R;  
    BYTE* G;  
    BYTE* B;  
  
    BYTE* prev;  
  
    int* H;  
    int* S;  
    int* I;  
};
```


카메라 구조체 변수는 위와 같은 형태로 SDK에서 제공하는 객체인 Camera, Image, CameraControlDlg를 이용함. 카메라 Serial number를 저장하는 CamSN변수, 원 영상을 저장하기 위한 BYTE형 포인터 Original, 컬러 영상의 채널을 BGR 순서로 저장하는 BYTE형 포인터, R, G, B 각 채널의 값을 저장하기 위한 변수들, 처리 이전의 영상을 저장하기 위한 prev, 영상의 H, S, I 정보를 저장하기 위한 변수들로 이루어짐.

먼저 카메라의 연결은 SDK에서 제공하는 BusManager 객체를 이용하여 카메라 Serial number를 이용하여 id의 주소 값을 갖는 버스를 생성하고 해당 id의 주소 값을 Camera 객체의 Connect 함수를 이용하여 연결하였음.

당해연도 연구에서 사용하고자 하는 영상 정보는 좌, 우측 각각 1288x964 픽셀로 일반 모니터의 해상도가 가로 픽셀 2000이 되지 않는 점을 감안하여 한 윈도우 내에 좌, 우측 영상을 동시에 출력하는 것에는 무리가 있을 것으로 사료됨.

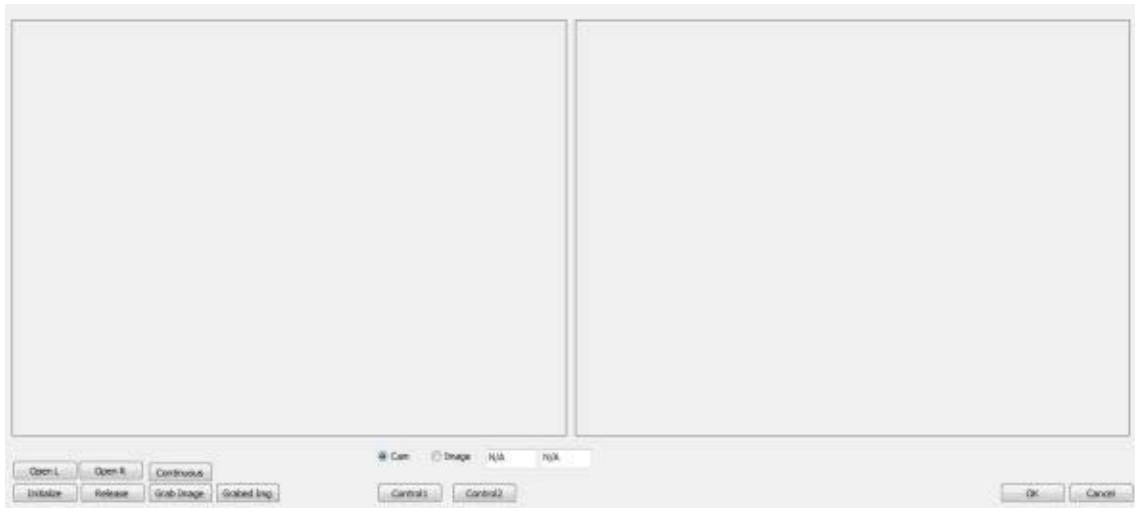


그림 637 스테레오 영상을 하나의 윈도우에 표시할 경우 예시

만약 한 윈도우 내에 스테레오 영상을 출력한다면 가로 픽셀이 2500을 넘어 해상도가 낮은 모니터에서는 사용에 어려움이 있음. 따라서 본 연구에서는 좌, 우측 영상을 따로 저장하고 원하는 영상을 선택하여 출력 할 수 있도록 프로그램을 설계함.



그림 638 작성된 영상처리 시스템 제어 프로그램을 통하여 출력된 좌측 영상



그림 639 작성된 영상처리 시스템 제어 프로그램을 통하여 출력된 우측 영상

입력된 영상 정보로부터 영상 픽셀의 x, y 좌표와 각 좌표의 R, G, B 정보를 입력 받았으며 해당 정보가 정확한지 확인하였음.



그림 640 입력 영상의 R 채널 영상 및 히스토그램



그림 641 입력 영상의 G 채널 영상 및 히스토그램



그림 642 입력 영상의 B 채널 영상 및 히스토그램

입력된 영상은 실시간으로 확인 할 수 있으며, 이를 저장하기 위하여 grab 함수를 작성하였음.

```
void CPGR::Wnd_Grab()
{
    CString str;
    str = m_GetTime();
    //Save
    char m_cStr[25];
    for (int i = 0; i < 2; i++)
    {
        sprintf_s(m_cStr, sizeof(m_cStr), str + "_Cam%d.raw", i);
        m_Error = Cam[i].m_RGBImage.Save(m_cStr, FlyCapture2::RAW);
    }
}
```

기존에 계획 했던바와 같이 영상 파일의 저장 및 불러오기를 용이하게 할 수 있도록 RAW 확장자 형태로 파일을 저장 할 수 있으며, 파일 명은 구분이 용이 하도록 날짜와 시간을 이용하였음.

- 영상처리 시스템의 실험 및 분석 :

제작된 영상처리 시스템을 이용하여 본 연구에서 수행하고자 하는 영상처리 알고리즘을 적용하기 위해 먼저 카메라 시스템의 캘리브레이션이 필요함. 당해연도에는 해당 캘리브레이션을 수행하기 위하여 에피폴라 기하학을 이용하고자 함.

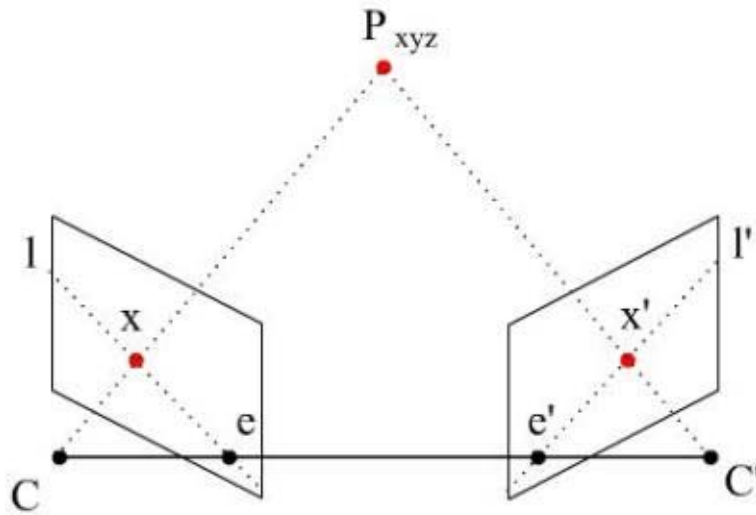


그림 643 에피폴라 기하학 구조

위 그림에서 x 와 x' 은 F 에 의하여 다음과 같은 관계를 가짐.

$$x'^T F x = 0 \quad \text{수식 71}$$

따라서 대응점 쌍(x, x')을 이용하여 기본 행렬 F 를 구할 수 있음. 대응점 쌍을 획득하기 위하여 다음과 같이 실험을 수행함.

250~600mm의 범위에서 50mm 간격으로 캘리브레이션 보드를 위치를 이동시키고 8쌍의 스테레오 영상을 획득함. 기존의 실험에서 영상의 상단 영역만 사용할 수 있었던 것을 개선하고자 캘리브레이션 보드의 중심과 카메라의 중심을 최대한 일치 시키고자 하였음.

표 114 250~400mm 구간의 캘리브레이션 보드 스테레오 영상

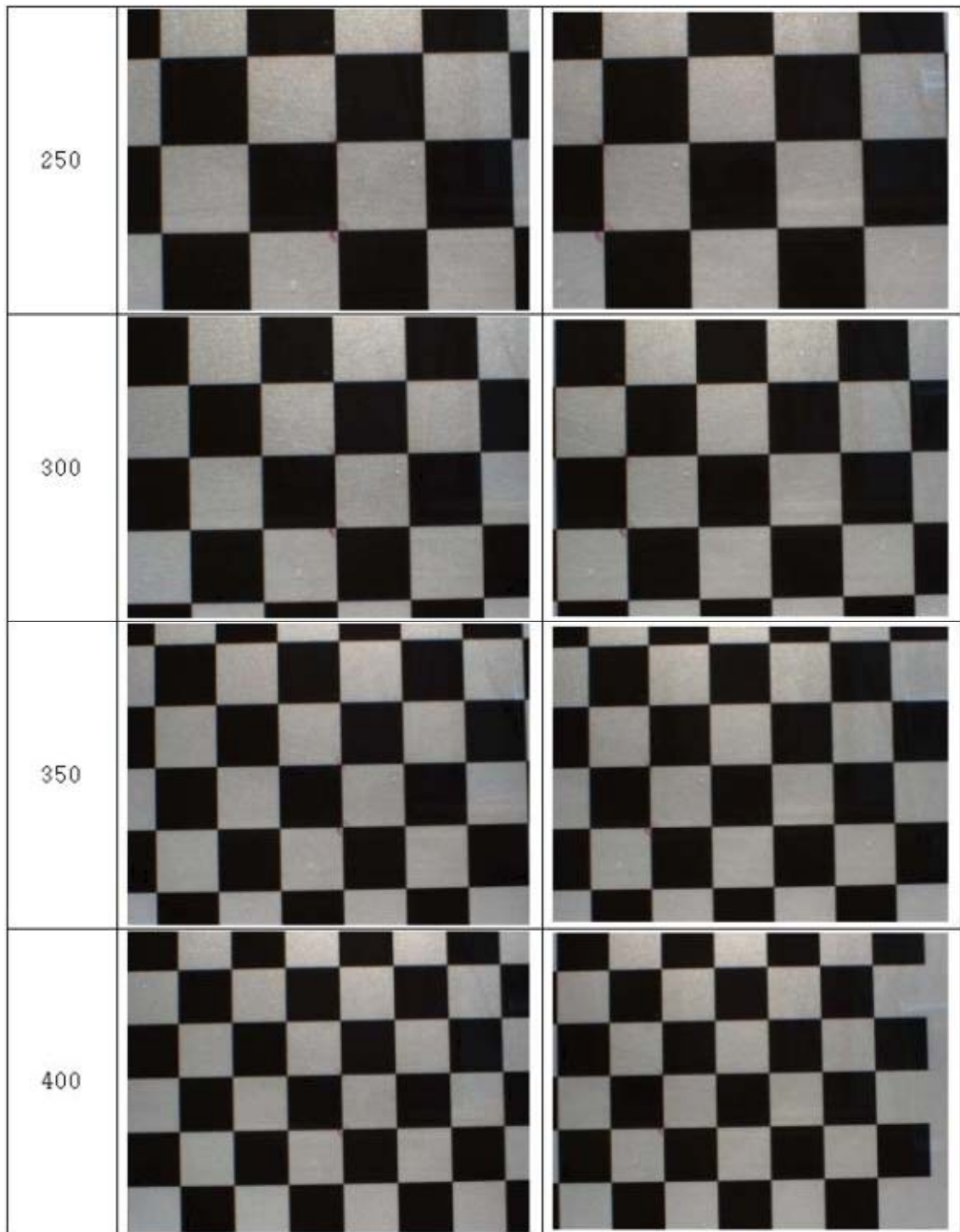
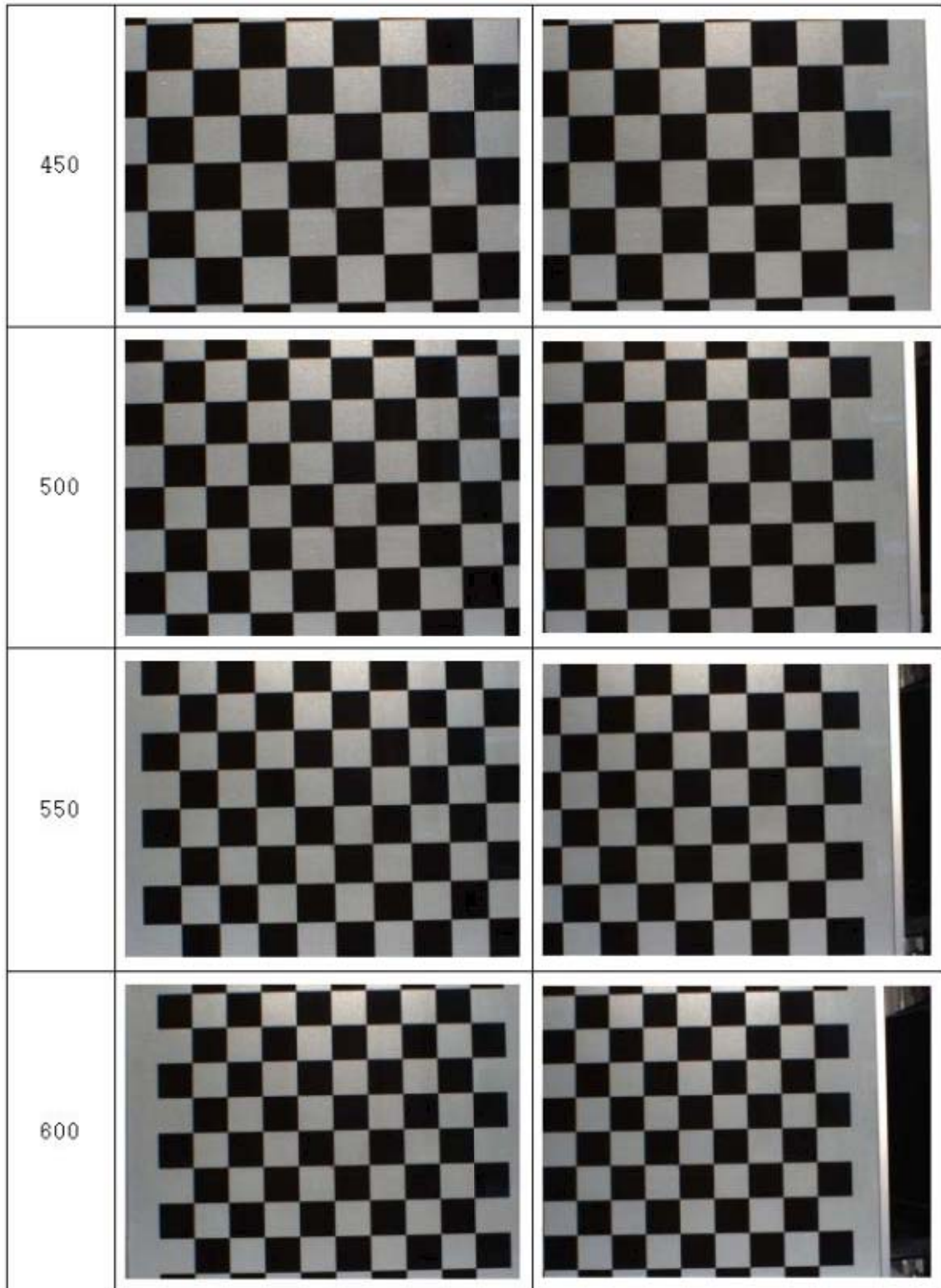


표 115 450~600mm 구간의 캘리브레이션 보드 스테레오 영상



8쌍의 영상에서 각각 4쌍씩의 대응점을 추출하여 총 32쌍의 대응점을 기록함.

표 116 캘리브레이션 보드의 스테레오 영상에서 추출한 32쌍의 대응점

(unit: pixel)

	Left image		Right image	
250mm	949	422	444	425
	956	703	448	708
	668	426	164	431
	674	709	167	712
300mm	659	210	237	215
	666	675	242	678
	1134	666	709	669
	1123	203	700	205
350mm	485	456	120	458
	488	655	123	657
	1085	643	717	647
	1080	445	714	448
400mm	508	290	185	294
	513	637	189	638
	1035	625	708	629
	1026	281	702	283
450mm	525	163	237	166
	533	622	243	623
	994	612	702	615
	983	155	693	157
500mm	537	335	273	338
	542	610	277	612
	818	605	552	607
	813	330	548	332
550mm	424	229	183	231
	433	728	190	728
	1059	716	814	718
	1048	217	804	219
600mm	447	252	222	254
	452	593	225	595
	796	587	568	589
	789	245	563	247

위 32쌍의 대응점을 이용하여 F행렬을 계산함. 이 때 Lmeds(Least median squares), N8P(Normalized 8 points), RANSAC(Random sample consensus) 방법을 이용하여 F를 구하고 해당 F를 통하여 오차를 계산하여 비교함.

표 117 각 방법에 따른 SOE(sum of error)

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
Lmeds	379	379	382	410	381	387	382	409	384	405
Ransac	435	384	435	381	372	387	382	378	405	428
N8p	12122	12122	12122	12122	12122	12122	12122	12122	12122	12122

3가지 알고리즘을 이용하여 계산된 F 행렬의 정확도를 평가하기 위하여 F 행렬을 계산하기 위해 사용된 대응점 쌍을 이용하여 에피폴라 선을 그리고 해당 에피폴라 선과 대응하는 점까지의 거리를 오차로 오차합을 구하였음. 해당 과정을 수행하기 위하여 matlab을 이용하여 다음과 같이 함수를 작성함.

표 118 SOE를 계산하기 위한 matlab 함수

```
function [F1, F2, F3, F1SOE, F2SOE, F3SOE] = EpipolarErrorTest(p1, p2)
n = length(p1);

F1 = estimateFundamentalMatrix(p1, p2);
F2 = estimateFundamentalMatrix(p1, p2, 'Method', 'norm8point');
F3 = estimateFundamentalMatrix(p1, p2, 'Method', 'RANSAC');

plt = p1;
F1SOE = 0;
F2SOE = 0;
F3SOE = 0;
D(3,n) = 0;

for i = 1:1:n
    plt(3,i) = 1;
    L1 = plt(:,i)'*F1;
    L2 = plt(:,i)'*F2;
    L3 = plt(:,i)'*F3;
    D(1,i) = abs(L1(1)*p2(1,i)+L1(2)*p2(2,i)+L1(3))/sqrt(L1(1)^2 + L1(2)^2);
    D(2,i) = abs(L2(1)*p2(1,i)+L2(2)*p2(2,i)+L2(3))/sqrt(L2(1)^2 + L2(2)^2);
    D(3,i) = abs(L3(1)*p2(1,i)+L3(2)*p2(2,i)+L3(3))/sqrt(L3(1)^2 + L3(2)^2);
    F1SOE = F1SOE + D(1,i);
    F2SOE = F2SOE + D(2,i);
    F3SOE = F3SOE + D(3,i);
end
```

Lmeds, RANSAC 방법은 계산을 반복 할 때마다 다른 값을 출력하기 때문에 10회 반복하여서 가장 오차가 적은 F 행렬을 계산함. N8p의 경우 다른 방법에 비하여 오차가 매우 크게 나타나기 때문에 제외하고 가장 적은 오차를 보인 5회차 계산의 RANSAC을 통한 F 행렬을 이용하여 캘리브레이션 과정을 진행함.

좌측 영상에서 한 점을 선택하면 우측 영상에 해당하는 에피폴라 선이 그려지는 기능을 프로그램에 추가함. 에피폴라 선을 구하기 위하여 입력된 점과 F 행렬의 곱을 통하여 직선의 방정식을 구함.

$$l' = Fx \text{ 수식 72}$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \\ F_4 & F_5 & F_6 \\ F_7 & F_8 & F_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$l' = ax + by + c$$

해당 식을 통하여 좌, 우측 끝점을 계산 후 해당 끝점의 범위 내에서 직선의 방정식의 값이 0에 가까운 경우 해당 좌표를 흰색으로 표시하는 방법으로 직선을 나타냄.



그림 644 계산된 F 행렬을 이용하여 계산된 에피폴라 라인

F 행렬을 이용하여 영상을 캘리브레이션 하기 위하여 에피폴라 교정 과정을 수행하고자 함.

기존의 연구에서 모든 점에 대하여 에피폴라 선을 그리고 해당 선을 스캔하여 주변 점을 비교하는데 시간이 많이 소모 됨. 또한 매칭의 효율을 높이기 위하여 전처리 과정과 오차 계산 방법을 개선하고자 하였으나, 실제 개선 효과는 크게 나타나지 않아 이를 해결하기 위하여 에피폴라 교정을 수행하고자 함.

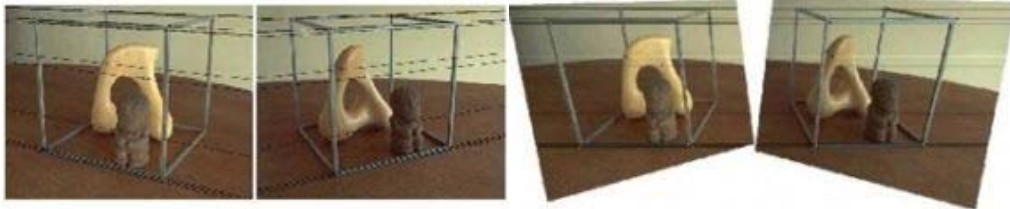


그림 645 에피폴라 교정 예시

에피폴라 교정이란 위 영상에서 나타나는 것과 같이 양쪽 영상에 나타나는 에피폴라 선을 평행하게 서로 일치 시키는 과정을 의미함. 기존의 방법이 에피폴라 선 각각에 대하여 라인을 따라 스캔을 하는 방법인데 반해 이 방법은 x방향으로 같은 라인 상에 존재하도록 영상을 교정하여 스캔을 용이하게 하는 장점이 있음. 처리과정이 한 단계 추가되었으나, 스캔하는 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있어서 매칭 효율뿐만 아니라 처리 시간에서도 효율이 높음.

Epipolar line rectification을 수행하기 위하여 먼저 homogeneity 행렬 H 를 계산함. 행렬 H 는 G , R , T 행렬의 합성으로 구할 수 있으며 각각 에피폴을 무한대의 위치로 이동하는 행렬 G , 에피폴라 선을 x 축과 평행하게 변환하는 회전 행렬 R , 에피폴의 위치를 x 축 상으로 이동시키는 행렬 T 로 이루어짐.

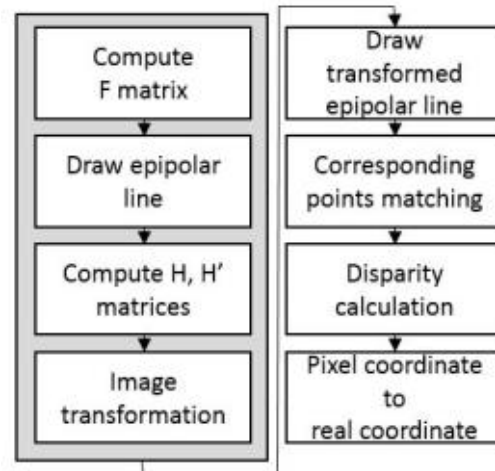


그림 646 에피폴라 교정 과정

해당 교정을 하기 위하여 먼저, 우측 영상의 에피폴을 구하고 에피폴을 무한으로 이동시킴으로써 에피폴라 선들이 서로 평행하게 영상을 변환 시키는 변환 행렬을 구함. 여기서 에피폴이란 모든 에피폴라 선들이 만나는 교차점으로 해당 교차점을 무한의 위치로 이동시킴으로써 에피폴라 선들을 평행하게 변환 할 수 있음. 이러한 변환을 수행하기 위하여 다음의 식을 통해 변환 행렬을 구함.

$$H' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & & \\ e'_x & & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{수식 75}$$

우측 영상의 에피폴 e' 의 x 좌표 e'_x 를 이용하여 위와 같이 변환 행렬 H' 을 계산하면 해당 에피폴의 위치를 무한의 위치(∞, ∞)로 이동 시킬 수 있음.

$$H'e' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & & \\ e'_x & & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e'_x \\ e'_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e'_x \\ e'_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{수식 76}$$

교차점이 무한에 위치한다면 각 선들은 서로 평행하게 됨.



그림 647 평행하게 변환된 에피폴라 선들

F 행렬을 이용하여 H', H를 계산한 후 변형 한 결과 영상은 위와 같음. 수평 방향의 흰선은 에피폴라 선으로 서로 평행하게 변형되었으며, 그 외의 선들은 변형에 따라 나타나는 비어있는 공간임. 이는 2차 선형 보간 방법을 통하여 제거함.

영상 내부에 존재하는 가로선은 에피폴라 선으로 실제 영상을 분석하는 것에는 부정적 영향을 끼치는 부분이 아님. 하지만 그 외의 흰 선들은 영상의 확대 변형으로 인하여 비어 있는 픽셀들로 이를 보간 할 필요가 있음. 이를 보간 하기 위하여 2차원 bilinear interpolation 방법을 사용하고자 함.

2차원 bilinear interpolation은 보간 하고자 하는 픽셀의 이전 좌표 즉, 변형 전의 좌표를 구하고, 그 좌표 주변의 픽셀 값을 이용하여 보간 하는 방법임. 하지만, 변형 전의 좌표를 구할 경우 정수 형태의 좌표가 아니라 실수 형태의 좌표를 구하기 때문에 해당 실수 좌표의 가장 가까운 네 개의 정수 좌표를 갖는 픽셀의 값을 이용하여 구함. 이 때, 실수 좌표로 나타나는 관심 픽셀의 값은 주변 네 픽셀까지의 거리에 비례하여 계산 하도록 함.

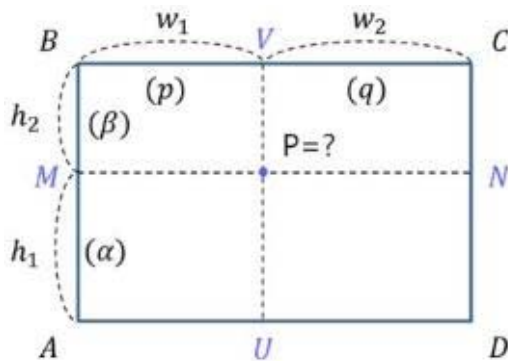


그림 648 다중 선형 보간법

정리하면 구하고자 하는 픽셀 P는 주변 픽셀 A, B, C, D를 통하여 구할 수 있으며, A와 B 사이의 M, C와 D사이의 N은 각 점들과 P의 수직 거리 a, b에 의하여 계산됨. 또한 M과 N 사이의 거리 p와 q를 통하여 P를 구할 수 있음. 반대의 과정으로 V, U를 구한 후 M, N을 구하는 방법도 가능함.

$$M = \beta A + \alpha B, N = \beta D + \alpha C$$

$$P = qM + pN \quad \text{수식 77}$$

$$P = q(\beta A + \alpha B) + p(\beta D + \alpha C)$$

2차원 bilinear interpolation을 수행하기 위해서는 먼저 H'에 의하여 변형되기 전의 좌표를 구해야 함. 따라서 H'⁻¹행렬을 구해야 하며, 이는 다음과 같이 구하였음.

$$H' = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}, \det = aei + bfg + cdh - ceg - bde - afh$$

수식 78

$$H'^{-1} = \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} ei - fh & -(bi - ch) & bf - ce \\ -(di - fg) & ai - cg & -(af - cd) \\ dh - eg & -(ah - bg) & ae - bd \end{bmatrix}$$

H'의 역행렬을 이용하여 변형 전의 좌표를 구하고, 주변 4픽셀의 값과 거리를 이용하여 해당 좌표의 값을 결정하는 알고리즘을 구현함.

각 에피폴라 선들이 변형 후 보관 과정을 거친 후 다음 과정을 수행함.



그림 649 에피폴라 선을 평행하게 변환 후 보관한 영상

영상에서 나타나는 선의 각도를 계산하여 서로 평행한지 확인하고 해당 각도를 이용하여 H'의 다음 회전 행렬을 계산하고자 함. F 행렬과 해당 행렬을 통하여 구해진 에피폴의 위치가 정확하다면 에피폴라 선이 서로 평행하게 나타날 것임. 이를 확인하기 위하여 9 개의 에피폴라 선을 그린 후 H'을 통하여 영상을 변환함.

표 119 교정된 에피폴라 선의 각도

(unit : °)

Line #	Repeat #			average	error
	1	2	3		
1	0.715	0.681	0.613	0.669667	0.005593
2	0.654	0.558	0.647	0.619667	0.055593
3	0.719	0.708	0.805	0.744	0.068741
4	0.704	0.704	0.703	0.703667	0.028407
5	0.697	0.642	0.656	0.665	0.010259
6	0.722	0.689	0.688	0.699667	0.024407
7	0.658	0.66	0.598	0.638667	0.036593
8	0.65	0.61	0.678	0.646	0.029259
9	0.688	0.691	0.694	0.691	0.015741
			average	0.675259	0.03051

9개의 에피폴라 선을 각각 3번씩 각도를 측정하여 평균 각도를 구하고 해당 각도의 평균을 구하는 방법으로 전체 선들이 얼마나 평행한지를 구함. 각 선들의 각도의 평균은 약 0.675°이며 해당 각도에서 평균적으로 약 0.031° 정도 차이가 남을 확인 할 수 있음. 결과적으로 각 선들 간의 각도 차이는 약 0.031°로 거의 평행에 가깝다고 할 수 있으며 F 행렬과 에피폴의 위치가 양호하게 계산되었음을 확인 할 수 있음.

구해진 각도를 이용하여 H'의 회전 행렬을 구함. 이 때, 회전 각도는 0.675°가 아닌 -0.675°임. 그 이유는 영상 좌표계가 y축으로 반전이 발생한 형태기 때문임.

$$H' = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ \frac{-1}{e'_x} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{수식 79}$$



그림 650 H' 행렬을 이용하여 교정된 우측 영상

위 그림에서 각 에피폴라 선들이 변형 후 어떠한 모습으로 나타나는지 확인 할 수 있음. 각 선들의 각도를 계산한 결과 0 또는 0과 근사한 값들로 나타남을 확인함.

F 행렬을 이용하여 에피폴을 구하고 해당 에피폴을 무한의 위치로 이동시킴으로써 에피폴라 선을 서로 평행하게 변환하였고 변환된 에피폴라 선의 각도를 이용하여 각 선들이 x축과 평행하도록 회전시키는 과정을 수행하는 변환 행렬 H'을 구함.

계산된 변환 행렬 H'을 이용하여 다음의 식을 최소화하는 H행렬을 구하고자 함.

$$\sum_i d(Hx_i, H'x'_i) \quad \text{수식 80}$$

위 식에서 x_i, x'_i 은 각각 좌, 우측 픽셀의 좌표를 나타냄. 여기서 $Hx_i = H_A \hat{x}_i$ 으로 표현 할 수 있으며 $\hat{x}_i = H_0 x_i$ 임. $H_0 = H'M$ 을 통하여 구할 수 있는데 이 때 M은 $F = [e']_{\times} M$ 을 통하여 구할 수 있음.

$$F = [e']_{\times} M \quad \text{수식 81}$$

$$[e']_{\times}^{-1} F = M$$

$$[e']_{\times} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & y'_e \\ 1 & 1 & -x'_e \\ -y'_e & x'_e & 1 \end{bmatrix} \quad \text{수식 82}$$

M을 이용하여 $H_0 = H'M$ 을 구한 후 H'과 H_0 을 이용하여 $\hat{x}_i = H_0 x_i, \hat{x}'_i = H' x'_i$ 를 각각 구함.

$\sum_i (a\hat{x}_i + b\hat{y}_i + c - \hat{x}'_i)^2$ 식을 다음의 형태로 변형하여 linear least-squares parameter 최적화 문제로 해결 가능함.

$$Ax = b$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \hat{y}_1 & 1 \\ \hat{x}_2 & \hat{y}_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & 1 \\ \hat{x}_i & \hat{y}_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}'_1 \\ \hat{x}'_2 \\ \vdots \\ \hat{x}'_n \end{bmatrix} \quad \text{수식 83}$$

A를 SVD하면 UDV^T 를 이용하여 $b' = U^T b$ 의 값을 갖는 다음 형태로 변환 가능.

$$\begin{bmatrix} d_1 & & & \\ & d_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \\ \vdots \\ b'_n \end{bmatrix} \quad \text{수식 84}$$

Dy = b'형태에서 $y_i = b'_i/d_i$ 를 이용하여 y를 구하고 Vy = x를 통해 x(a, b, c)를 구함.

$$H_A = \begin{bmatrix} a & b & c \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{이므로 } H = H_A H_0 \text{로 구하고자 하는 H를 구할 수 있음.}$$

표 120 H 행렬 계산을 위한 matlab 함수 작성

```
function [H] = HmatrixtoRectification(PointsL, PointsR, Hp)
[F, e2] = Epipolar(PointsL, PointsR);
PointsL(3,:) = 1;
PointsR(3,:) = 1;
hatxp = Hp*PointsR;
ex = [0, -1, e2(2); 1, 0, -e2(1); -e2(2), e2(1), 0];
M = pinv(ex)*F;
H0 = Hp*M;
hatx = H0*PointsL;
for i=1:1:3
    hatxp(i,:) = hatxp(i,:)./hatxp(3,:);
    hatx(i,:) = hatx(i,:)./hatx(3,:);
end
[u, s, v] = svd(hatx');
b = hatxp(1,:);
bp = u'*b';
y(3) = 0;
for i=1:1:3
    y(i) = bp(i)/s(i,i);
end
abc = v*y';
HA = [abc(1,1), abc(2,1), abc(3,1); 0, 1, 0; 0, 0, 1];
H = HA*H0;
H = H./H(3,3);
```

해당 과정을 반복 수행하기 용이 하도록 matlab 함수 형태로 작성함. 대응점 쌍을 추출하고 F 행렬을 계산 한 후 H'의 경우 실험자가 수동으로 계산 과정을 수행하여야 함.

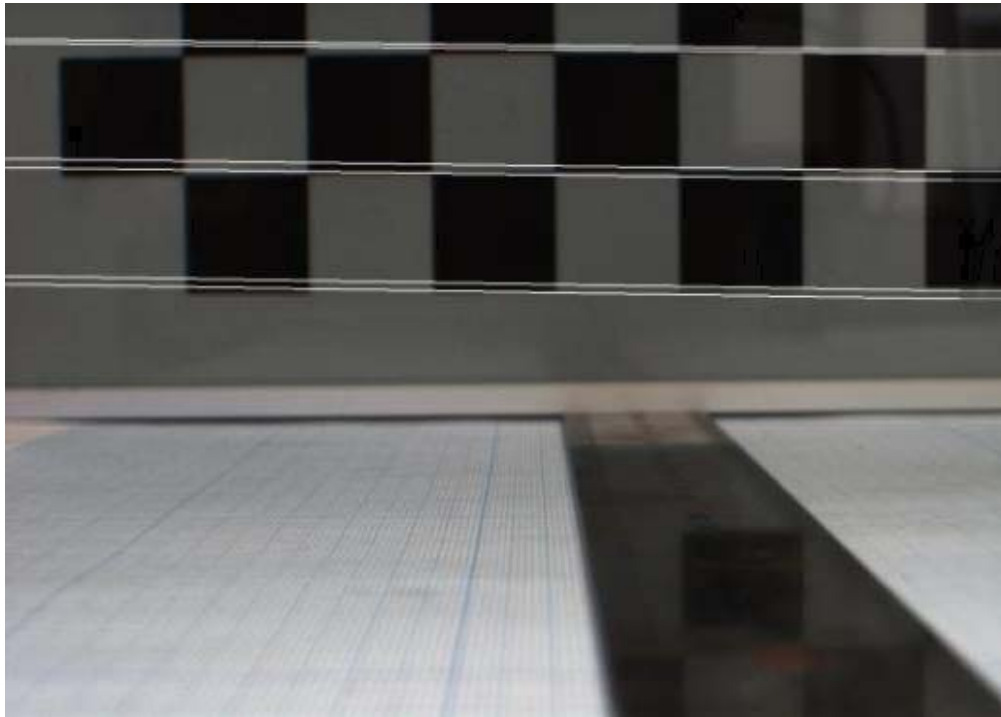


그림 651 스테레오 좌측 영상 원본과 에피폴라 선



그림 652 스테레오 우측 영상 원본과 에피폴라 선

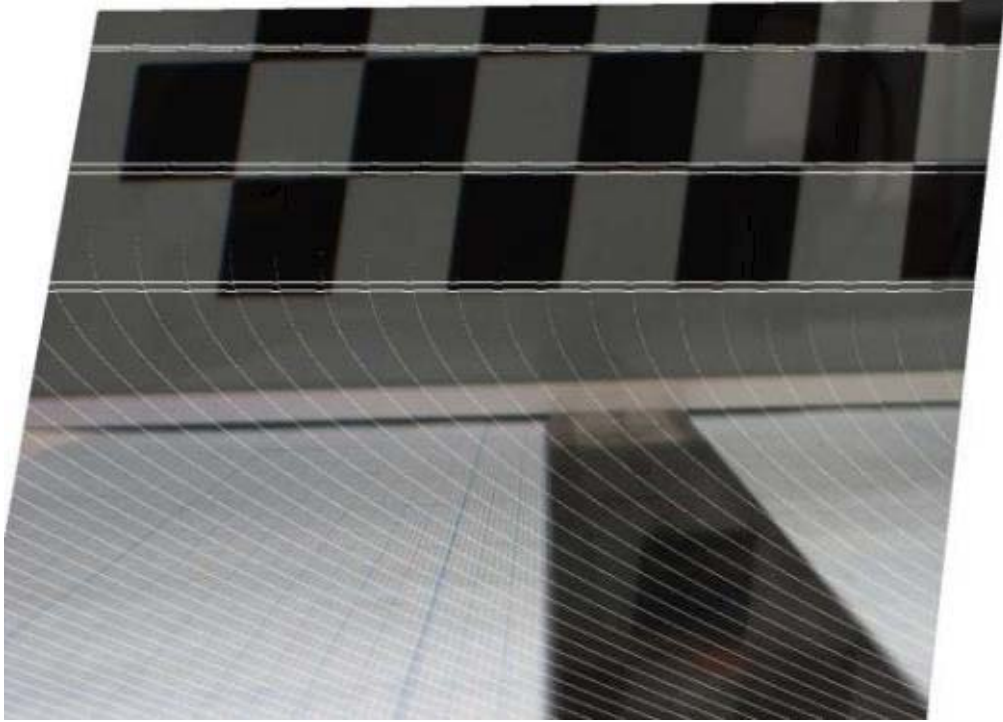


그림 653 계산된 H 행렬을 통해 교정 된 좌측 영상

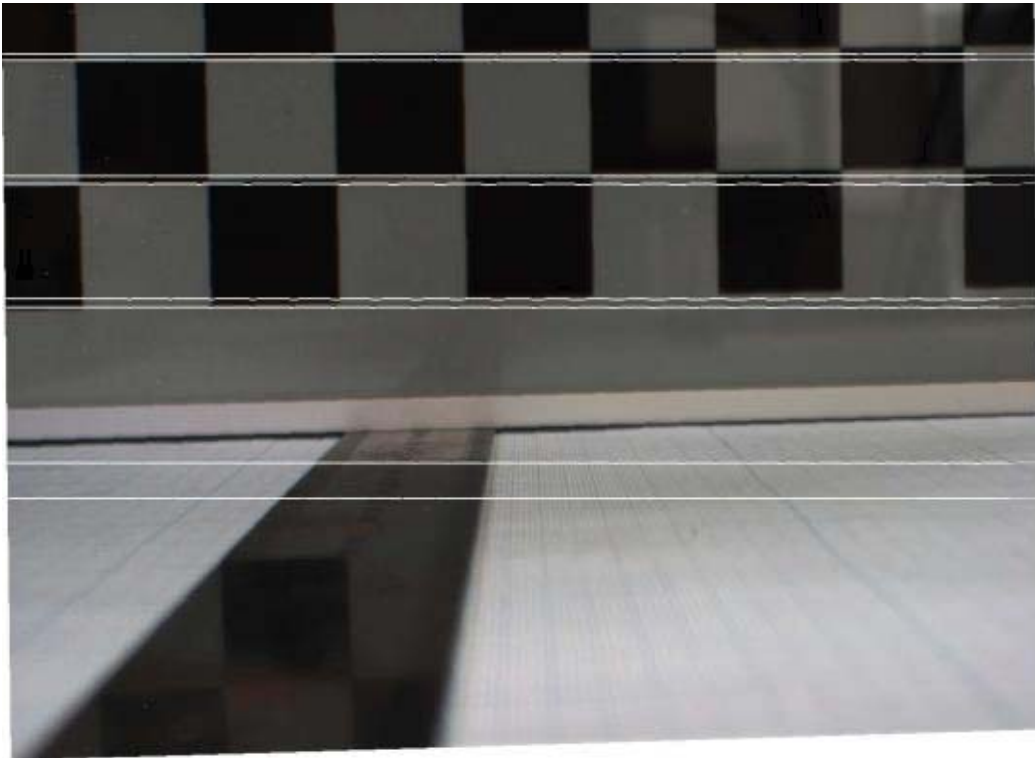


그림 654 계산된 H' 행렬을 통해 교정 된 우측 영상

계산된 H, H' 행렬을 이용하여 교정된 영상을 분석한 결과 모든 에피폴라 선들이 x축에 평행하며 대응하는 선들이 서로 같은 y축에 위치하도록 교정된 것을 확인 할 수 있었음.

각 에피폴라 선들이 x축에 평행하며 서로 유사한 위치에 나타나는 것을 확인 할 수 있음. 각 선들의 y축 위치가 어느정도 일치하는지를 확인하기 위하여 측정을 수행함. 에피폴라 선은 두께가 1이 아니기 때문에 y축 방향으로 높은 점, 중심 점, 아래 점 3곳을 측정하여 평균을 구함. 좌, 우측 에피폴라 선의 y 좌표를 구한 후 대응하는 선들의 차이를 구함.

표 121 교정된 에피폴라 선의 y좌표

(unit : pixel)

	Left				Right				difference
	Upper	Center	Lower	average	Upper	Center	Lower	average	
1	59	60	62	60.3	64	65	65	64.6	4.3
2	65	66	68	66.3	72	72	73	72.3	6
3	218	218	219	218.3	218	220	220	219.3	1
4	230	231	233	231.3	229	230	231	230	-1.3
5	377	378	380	378.3	374	376	377	375.6	-2.7
6	389	389	390	389.3	386	387	389	387.3	-2

위 표에 따르면 1, 2번 선의 픽셀 차이는 4~6픽셀로 크게 나타나는 반면 3~6번 선의 차이는 2.7 픽셀 이하로 나타나는 것을 확인 할 수 있음. 1, 2번 선의 경우 영상의 최상단 부로 볼 수 있으며 일반적으로 왜곡이 많이 나타나는 영역으로 왜곡에 의한 영향으로 사료됨. 해당 실험에서 캘리브레이션 보드가 영상의 위쪽에 치우쳐져 있는 경향이 있어 F 행렬을 구하기 위해 사용된 대응점들이 대부분 영상의 중심보다 y축 방향으로 0에 가까움. 또한, y축 방향으로 0에 가까운 영역은 왜곡이 심한 영역을 포함하고 있음. 이러한 영향으로 인하여 1, 2번 선의 오차가 크고, 3, 4번 선의 오차가 가장 작으며 5, 6번 선의 오차가 다시 커지는 경향을 보이는 것으로 사료됨.

캘리브레이션 보드 영상을 더 나은 환경에서 촬영하여 얻고, 영상의 외곽에 치우친 영역 즉, 왜곡이 심한 영역을 제외한다면 오차를 줄일 수 있을 것으로 보임.

스테레오 매칭을 위해 각 픽셀들의 비교를 하기 위해서는 비어있는 픽셀들을 보관할 필요가 있음. 따라서 2중 선형 보관법을 이용하여 변환 후 빈 픽셀들의 값을 보관하는 과정을 추가함. 아래 두 영상은 위의 변환된 영상을 보관하여 나타낸 것이며, 기존의 에피폴라 선이 흰색인 경우 비어있는 픽셀과 구분이 안되기 때문에 녹색의 선으로 색상을 변경함.

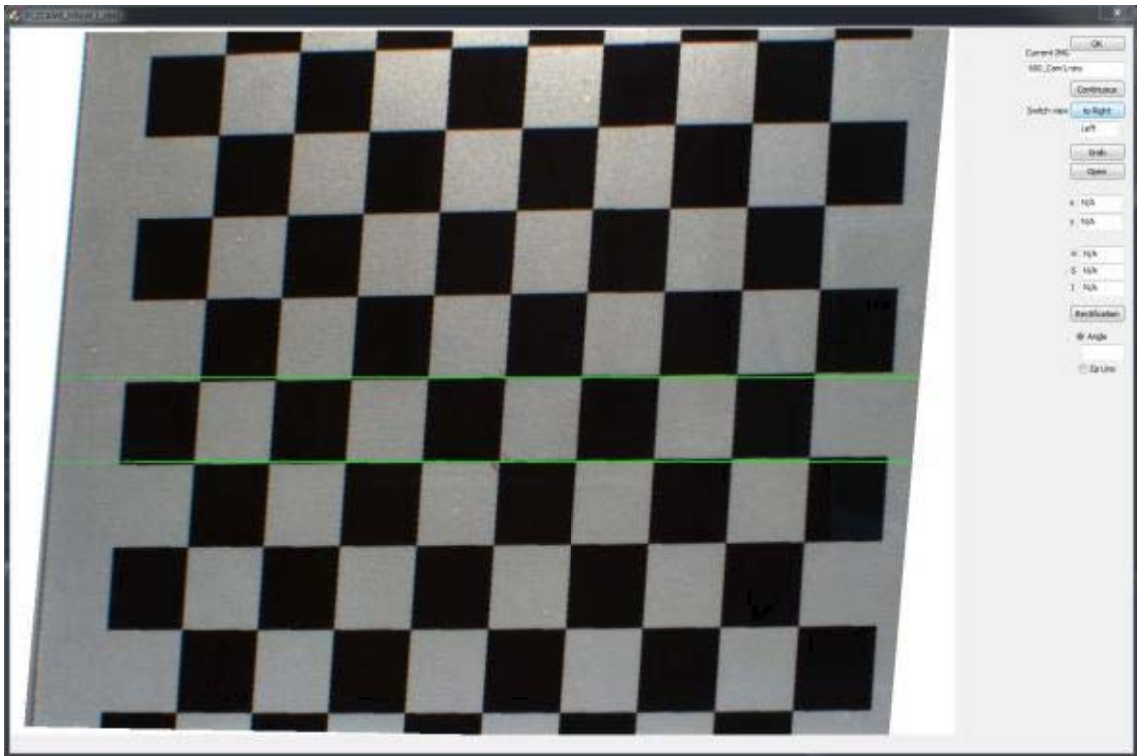


그림 655 수정된 알고리즘으로 교정한 스테레오 영상의 좌측 영상

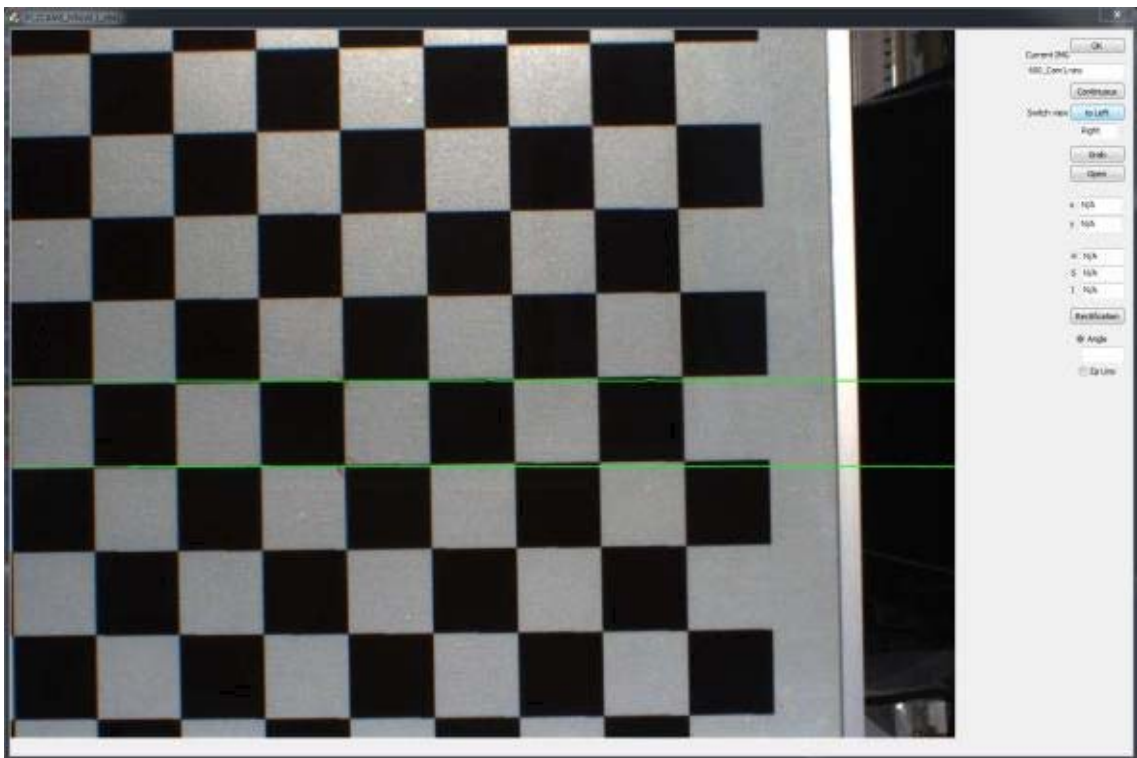


그림 656 수정된 알고리즘으로 교정한 스테레오 영상의 우측 영상

○좌표 획득 및 위치 선정 알고리즘 제작

- 파프리카 인식 및 좌표 획득 소프트웨어 제작

파프리카 재배 환경 영상을 이용하여 파프리카를 인식하기 위하여 영상 전처리를 수행함.

획득한 영상의 RGB 정보로부터 HSI 정보로 색 모델을 변경한 후 H, S 값을 임계값으로 설정하여 파프리카와 유사한 값을 갖는 영역을 남기고 배경으로 추측되는 영역은 모두 제거 함. 그 후 이진화를 통하여 필요 없는 정보를 제거함으로써 영상 처리의 효율을 높이하고자 함. 이진화된 영상에서 너무 작은 픽셀 즉, 오차를 제거하기 위하여 열림 연산을 수행함. 그 후 남아있는 픽셀 덩어리를 라벨링 하여 각 영역 별로 다른 픽셀 값을 입력 한 후 해당 영역들을 ROI(region of interest)로 설정하여 해당 영역의 상, 하, 좌, 우 위치를 추출함.

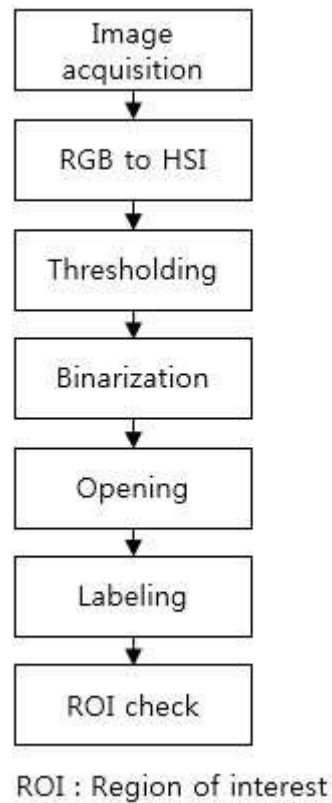


그림 657 전처리 순서도

파프리카 재배 영상을 획득하기 위하여 1차년도 연구에서 획득한 영상 이외에 추가적으로 2016년 6월 23일 ~ 24일 경상남도 함안에 위치한 국립 원예 특작 과학원 시설원예연구소 내의 파프리카 온실 및 파프리카 농장을 방문하여 RGB컬러 영상 및 NIR 영역 영상을 촬영함.

제작한 스테레오 영상 시스템을 이용하여 붉은색과 노란색 파프리카를 각 10쌍씩 촬영 하였으며 6mm, 8mm 렌즈를 이용하여 촬영하였음. 또한, 670~769nm 까지 NIR 영역의 영상을 획득함.













1차년도 연구에서 전처리 과정을 통해 붉은색과 노란색 파프리카를 영상에서 인식하기 위하여 영상 정보 중 색상 정보를 이용하여 추출하고자 하였다. RGB 정보는 영상의 조명상태에 따라 영향을 많이 받기 때문에 조명 환경에 강인한 특성을 갖는 Hue값을 이용하여 추출하고자 함.

이를 위하여 RGB를 HSI 색상 모델로 변환하여 H값과 S값에 대하여 히스토그램 분석을 수행함.

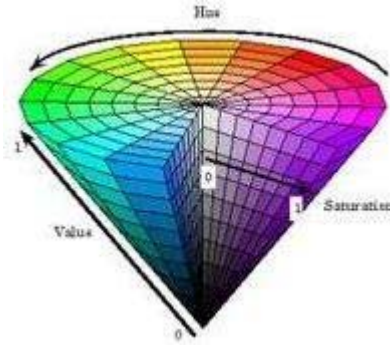


그림 658 HSI 색상 모델

$$H = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right] \quad \text{수식 85}$$

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)]$$

$$I = \frac{R+G+B}{3}$$

붉은색과 노란색 파프리카 각각 임의의 160픽셀의 H, S값을 추출하여 히스토그램으로 나타내고 이를 분석하였으며, 분석한 히스토그램을 참고하여 붉은색과 노란색 파프리카의 색상 임계값을 설정하였다. 색상 값은 채도가 낮은 무채색 영역에서 뚜렷한 차이가 나타나지 않기 때문에 채도에 대한 임계값 또한 설정함.

영상에서 파프리카의 영역을 색상과 채도를 이용하여 추출하기 위하여 붉은색과 노란색 파프리카 영역 픽셀의 색상과 채도를 히스토그램으로 나타내고 이를 분석한 결과이다. 픽셀은 각 색상 파프리카 영역의 임의의 지점에서 추출 하였고 색상 별로 160개의 픽셀을 분석함.

표 124 히스토그램 분석 결과

Color	Threshold	Pixel	%
Red	$H \leq 30$	156/160	97.5
	$S > 40$	150/160	93.8
Yellow	$H \leq 60$	159/160	99.4
	$S > 80$	148/160	92.5



그림 659 전처리 전의 원본 파프리카 영상



그림 660 HSI 임계값을 이용한 파프리카 영역 추출 영상

이진화 과정은 영상에 존재하는 픽셀 값들을 0 또는 1로 변경하는 것으로써 실제 픽셀 값은 0 또는 255의 값을 갖게 됨. 본 연구에서 작성된 알고리즘에서는 255가 아닌 모든 값을 0으로 변경하는 과정을 수행함.

$\text{if } P_{xy} \neq 255 \text{ then } P_{xy} = 0$ 식 86



그림 661 이진화 수행 결과

이진화 후 영상의 픽셀들이 모두 0 또는 255로 변경되면 3x3 윈도우를 이용하여 침식 팽창 연산을 반복수행하는 열립 연산을 수행함. 침식 연산이란 영상의 모폴로지 연산 중 영상에 존재하는 픽셀 값이 255인 픽셀 즉, 흰색 픽셀을 foreground, 픽셀 값이 0인 픽셀 즉, 검은색 픽셀을 background라고 할 때 3x3 윈도우 내에 255인 픽셀의 수가 절반이 되지 않을 경우 중심 픽셀의 값을 0로 변경함으로써 전체적으로 foreground의 체적을 줄이는 과정을 의미함.

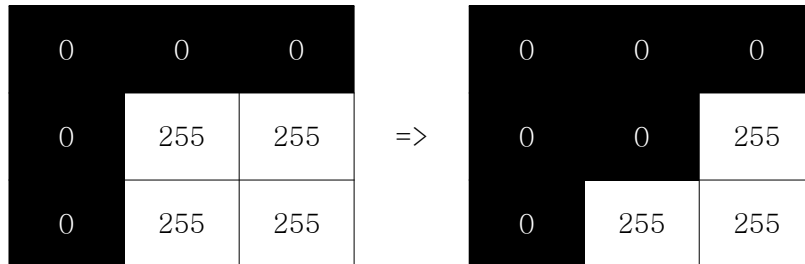


그림 662 침식(dilation) 연산

팽창 연산이란 침식 연산의 반대되는 개념으로 3x3 윈도우 내에 0인 픽셀의 수가 절반이 되지 않을 경우 중심 픽셀의 값을 255으로 변경함으로써 전체적으로 background의 체적을 줄이는 과정을 의미함.

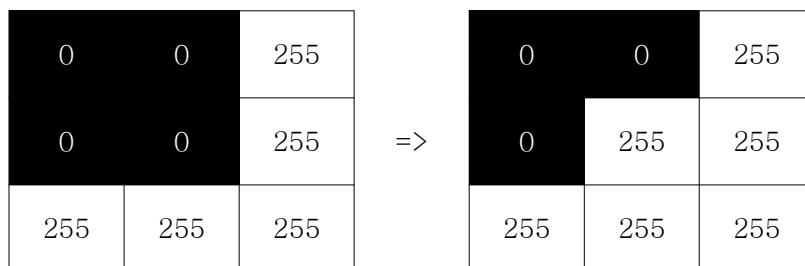


그림 663 팽창(erosion) 연산

열립 연산은 침식과 팽창과정을 반복 수행하는 방법으로 아주 작은 픽셀들을 제거하는 효과를 확인 할 수 있음.

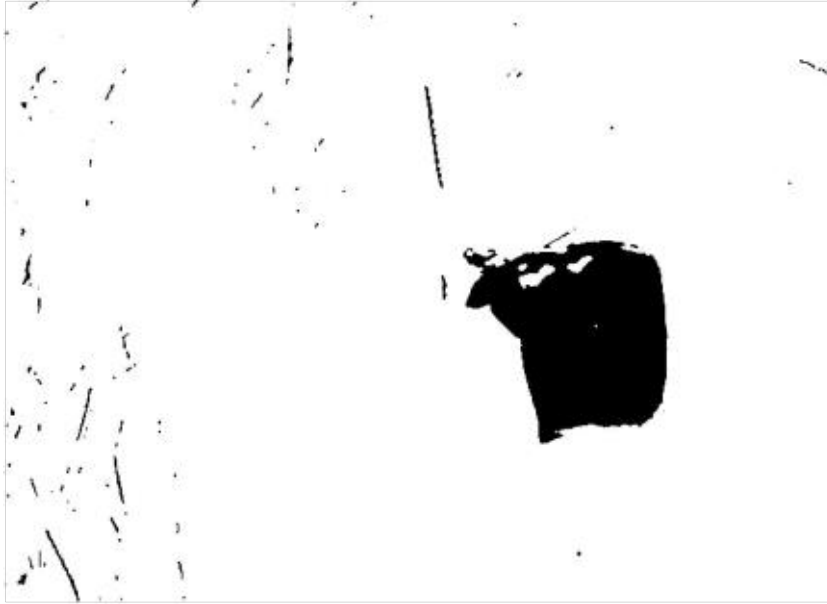


그림 664 열림 연산 후 결과 영상

열림 연산을 통해서도 제거되지 않는 일정 크기 이상의 크기를 갖는 노이즈들을 제거해야 하며, 파프리카 영역으로 추출된 픽셀들을 구분해야 하는 필요가 있음. 따라서 라벨링 과정을 통해서 이어진 픽셀들을 구분하고 이어진 픽셀의 개수를 세어 해당 구역의 크기를 계산함. 해당 픽셀 크기가 일정 크기 이하인 영역들은 제거하는 방법으로 남아있던 노이즈를 제거함.

라벨링은 영상에 나타난 값을 갖는 픽셀들의 연속성을 확인하고, 연속성이 있는 픽셀들은 하나의 영역으로 인식함. 하나의 영역으로 인식된 영역은 고유한 픽셀 값을 갖게 되며, 해당 영역의 크기가 저장됨.

한 영역의 픽셀 값은 모두 같으며, 각각 영역의 픽셀 값은 1에서 시작하여 스캔 방향으로 1씩 증가함.

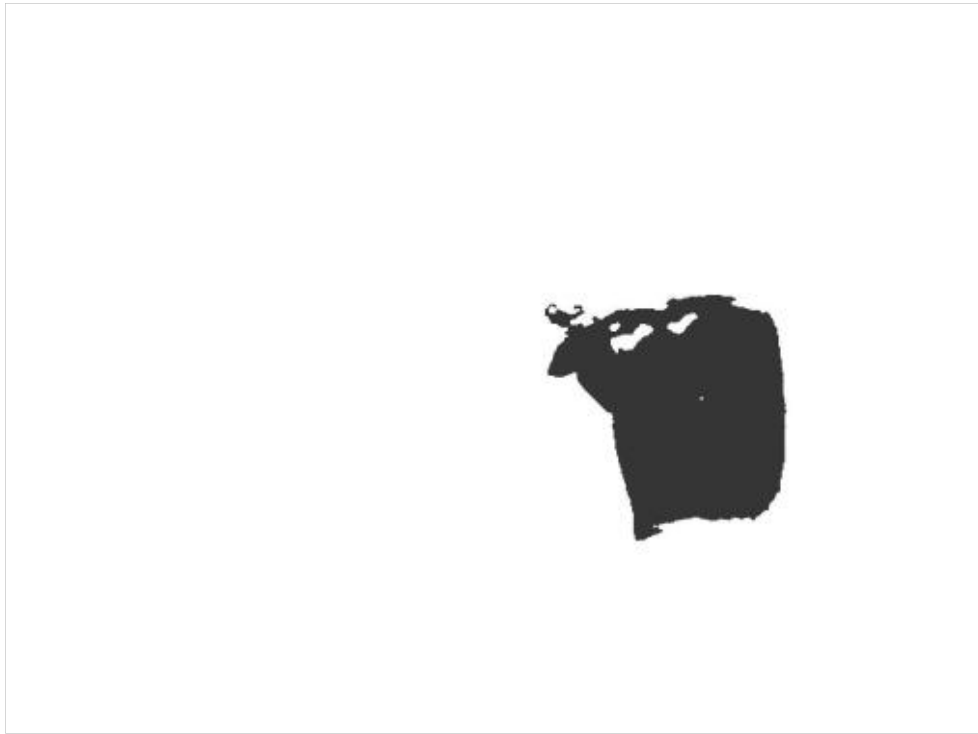


그림 665 라벨링 및 노이즈 제거 결과 영상

열림 연산 후 결과 영상에 나타나는 파프리카 예상 영역과 노이즈를 구분하기 위하여 파프리카의 픽셀 크기와 그 외의 노이즈의 픽셀 크기를 임계값을 통해 나누어 임계값 미만의 값들을 제거함으로써 파프리카 예상 영역 픽셀만을 추출함.

해당 과정을 수행하기 위하여 각각의 픽셀 영역들의 픽셀 수를 확인하여 임계값을 설정하였음. 해당 임계값은 15000 픽셀로 6mm 렌즈를 통해 400~700mm 거리에서 촬영된 파프리카의 픽셀 크기를 분석 한 결과를 통해 결정함.

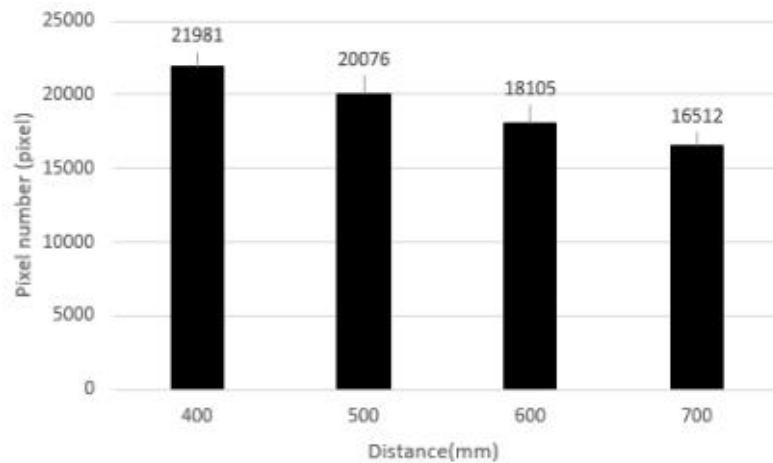


그림 666 거리에 따른 파프리카 추출 영역의 픽셀 수

라벨링 및 노이즈가 제거된 영상에서 각 라벨에 따라 다른 픽셀 값을 갖는 파프리카를 픽셀 크기에 따라 같은 파프리카 인지 아닌지 확인하는 과정을 거쳐 가장 확실한 파프리카 영역을 대상 영역으로 결정하고 해당 영역의 상, 하, 좌, 우 좌표를 추출하여 ROI(region of interest)를 표시함.



그림 667 파프리카 인식 결과 영상

전처리를 통하여 파프리카를 인식한 후 다음 과정을 진행하기 위하여 ROI의 중심 좌표와 해당 영역의 픽셀 번호를 확인 할 필요가 있음. 따라서 해당 정보를 저장 할 수 있도록 프로그램을 작성함.

본 연구에서 작성한 프로그램으로 위의 과정을 구현하여 파프리카를 인식하는데 소요되는 시간을 측정한 결과 약 450~600ms로 측정되었음.



그림 668 프로그램에서 추출된 파프리카 영역 정보를 확인하는 다이얼로그(붉은색 파프리카)



그림 669 프로그램에서 추출된 파프리카 영역 정보를 확인하는 다이얼로그(노란색 파프리카)



그림 670 인식 실패 영상 #1

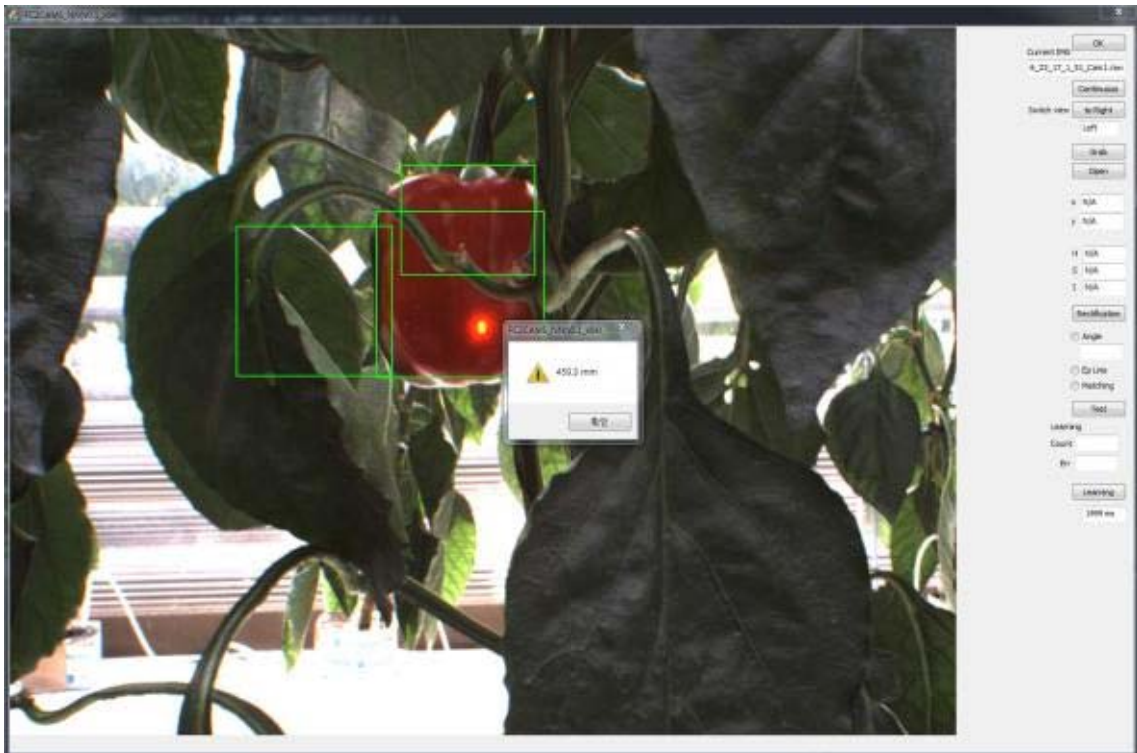


그림 671 인식 실패 영상 #2

영역이 겹치는 파프리카는 하나의 파프리카로 인식하는 알고리즘을 추가하여 해당 문제점을 해결할 수 있을 것으로 사료됨.

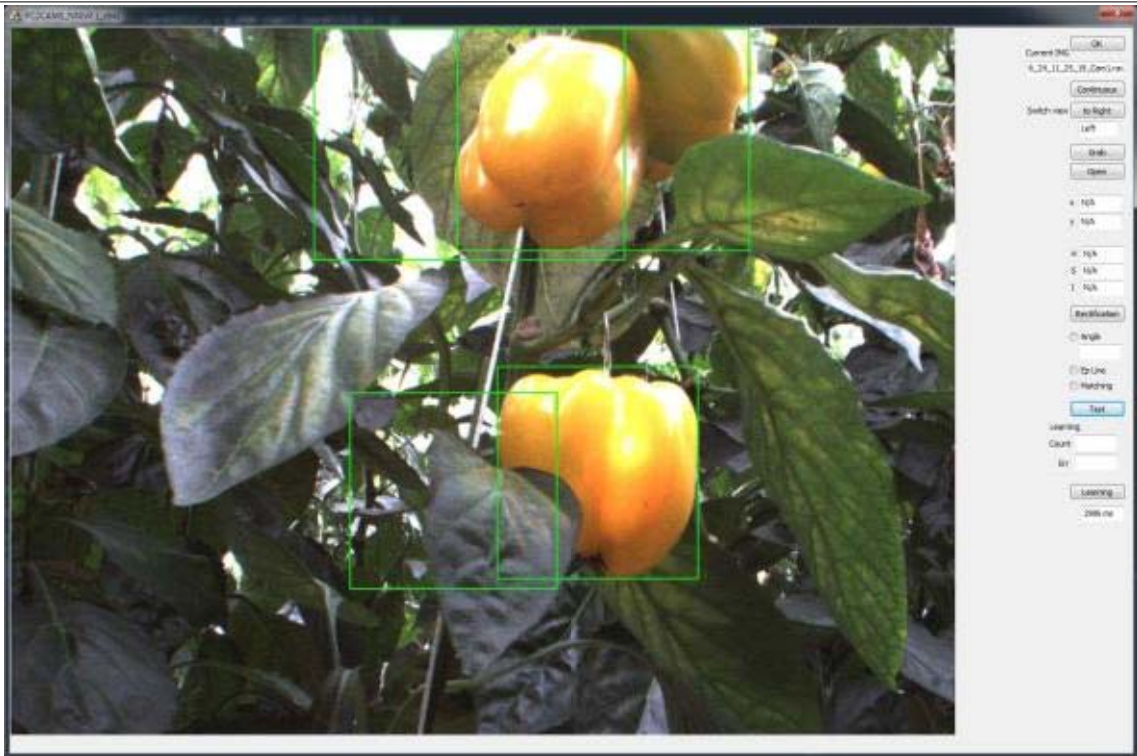


그림 672 인식 실패 영상 #3



그림 673 인식 실패 영상 #4

영역의 크기 및 비율 등을 이용하여 하나 이상의 파프리카를 하나로 인식하는 경우를 줄이는 알고리즘을 통해 해결 하고자 함.

- 파프리카 위치 선정 소프트웨어 제작

진처리를 통하여 파프리카의 위치로 예상되는 영역 즉, ROI를 추출하였음. 해당 ROI 내에서 파프리카의 3차원 위치를 추정하기 위하여 스테레오 비전 시스템을 이용함. 스테레오 영상에 나타나는 대응점은 다음의 관계를 갖고 있음.

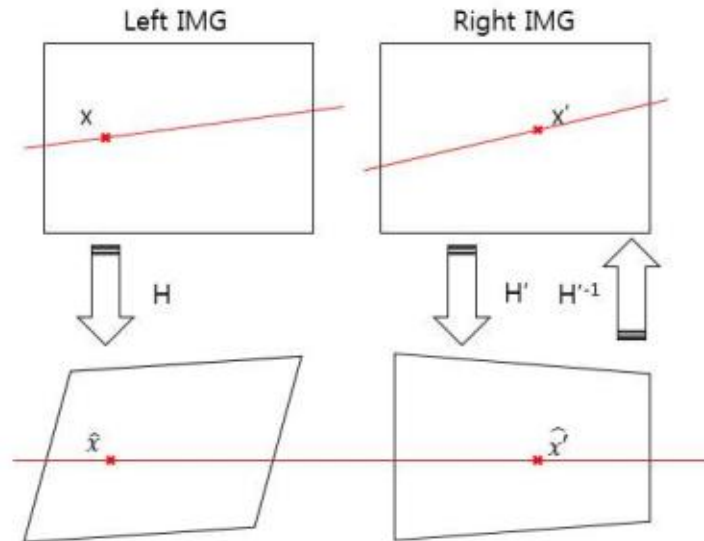


그림 674 스테레오 영상의 좌, 우 대응점과 H 행렬의 관계

에피폴라 교정을 통하여 캘리브레이션 된 영상은 Homogeneity 행렬 H, H'을 통하여 서로 대응하는 점 x, x' 을 \hat{x}, \hat{x}' 으로 변환 시키며 \hat{x}, \hat{x}' 는 서로 같은 y 좌표 값을 갖는다는 것을 이용하여 대응점을 검색하는 영역을 줄이며 정확도를 높일 수 있음.

기존의 과정을 통하여 대응점의 위치로 추정되는 점들을 구함. 해당 점들을 각각 대상 점과 비교하여 차이가 가장 작은 점을 대응점으로 추출함. 이를 위하여 먼저, 5x5 윈도우를 통해 25개 픽셀의 값들을 비교하여 오차를 구하고 해당 오차가 가장 작은 점을 표시함.

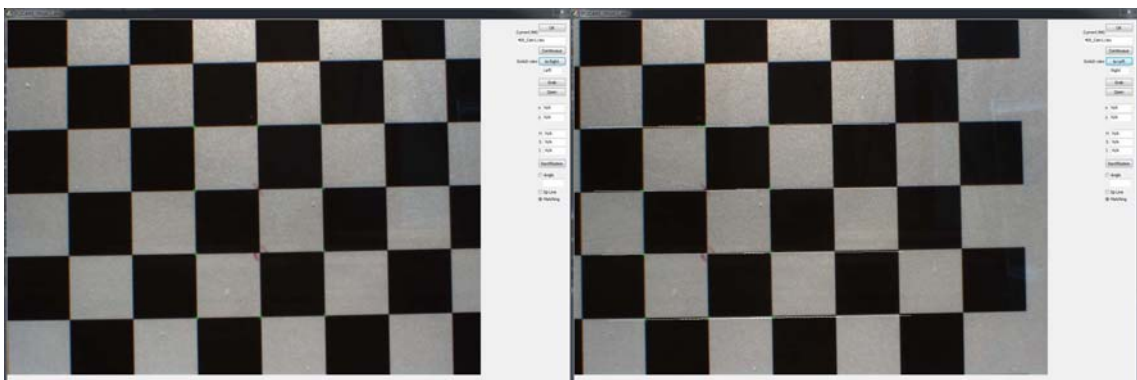


그림 675 5x5 윈도우 비교를 통한 좌, 우측 영상의 대응점 추출

위 영상에서 흰색 선은 선택된 점과 대응하는 에피폴라 선을 의미함. 녹색으로 표시된 점 중 좌측 영상에서 표시된 것이 선택한 점이고 우측 영상에서 표시된 것이 알고리즘에 의해 계산된 대응점을 나타냄. 위의 영상의 경우 캘리브레이션 보드가 흑백의 영상이기 때문에 사용하고자 했던 hue 값을 이용하여 실험이 불가능함. 따라서 intensity값으로 대체하여 실험을 수행한 결과임. 10개의 점 중 1개의 점에서 오차가 발생함. 또한, 비교를 위한 선에 비어있는 공간이 발생하여 해당 픽셀에서 비교가 되지 않는 것으로 사료됨.

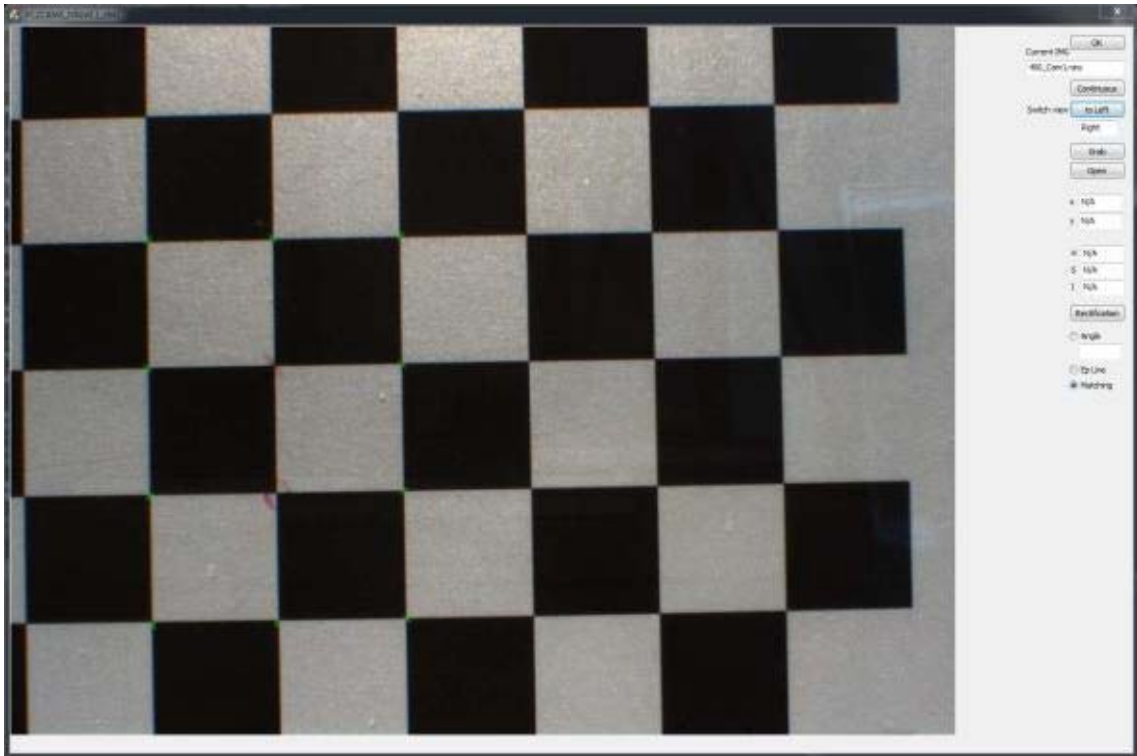


그림 676 9x9 윈도우 비교를 통한 좌, 우측 영상의 대응점 추출

위 영상은 9x9 윈도우를 이용하여 대응점을 찾은 결과로 10개의 점이 모두 정확히 나타난 것을 확인 할 수 있음.

기존의 윈도우 비교를 통한 대응점 추출 방법 외에 경쟁식 인공 신경망 중 hamming net을 이용한 방법을 구현하고자 함. 입력 층과 표본 패턴을 비교하는 방법으로 다음의 식을 통하여 가중치를 구함.

$$w = \begin{bmatrix} \frac{s_1(1)}{2} & \frac{s_2(1)}{2} & \dots & \frac{s_n(1)}{2} & \frac{n}{2} \\ \frac{s_1(2)}{2} & \frac{s_2(2)}{2} & \dots & \frac{s_n(2)}{2} & \frac{n}{2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{s_1(m)}{2} & \frac{s_2(m)}{2} & \dots & \frac{s_n(m)}{2} & \frac{n}{2} \end{bmatrix} \quad \text{수식 87}$$

위 식을 통하여 계산된 가중치를 이용하여 입력 뉴런은 비교하고자 하는 픽셀의 값으로 하여 출력 오차를 계산하여 가장 작은 오차를 갖는 점을 대응점으로 출력 하도록 함.

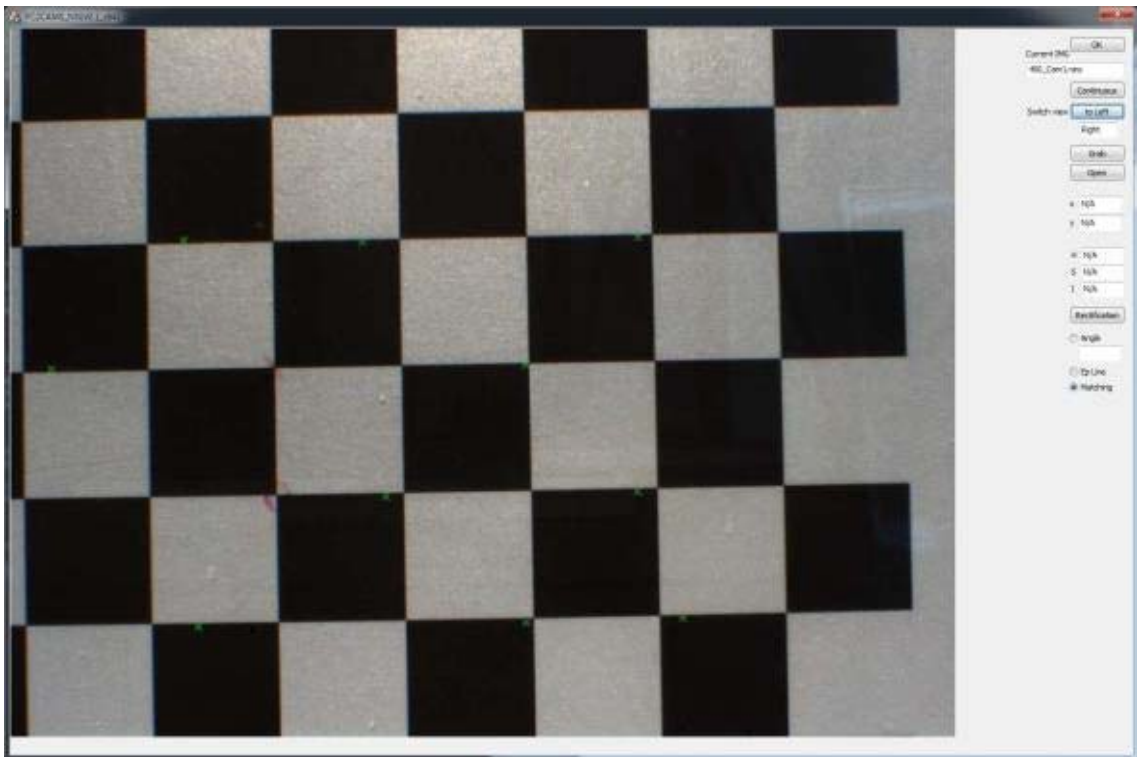


그림 677 Hamming net을 이용한 대응점 추출 결과

윈도우를 이용한 영상과 같은 영상에서 같은 점을 선택하여 실험함. 하지만, 결과에서 볼 수 있듯이 대응점을 찾는데 실패함. hamming net의 경우 기본적으로 이진 데이터를 입력과 비교 패턴으로 사용하는 방법인데 이를 수정하여 정수형 데이터를 입력으로 하는 알고리즘을 구현하려고 하였으나 결과와 같이 제대로 적용되지 않음을 확인 할 수 있음.

스테레오 매칭을 위한 픽셀의 수를 줄이고 정확도를 높이기 위하여 특징점 추출을 하고자 함. 현재 알고 있는 정보 중 H, S, I 정보에 대해 영상을 출력하여 특징점을 구할 수 있을지 확인하고자 하였음.

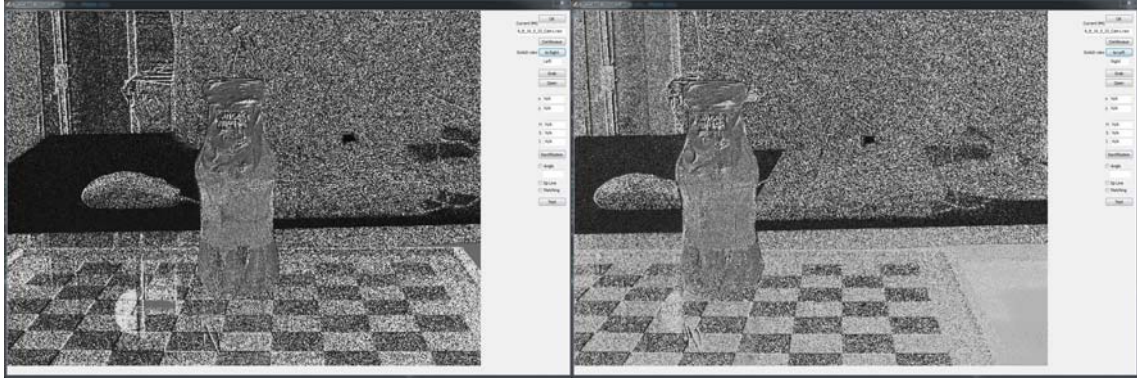


그림 678 색상(Hue) 값을 표현한 영상

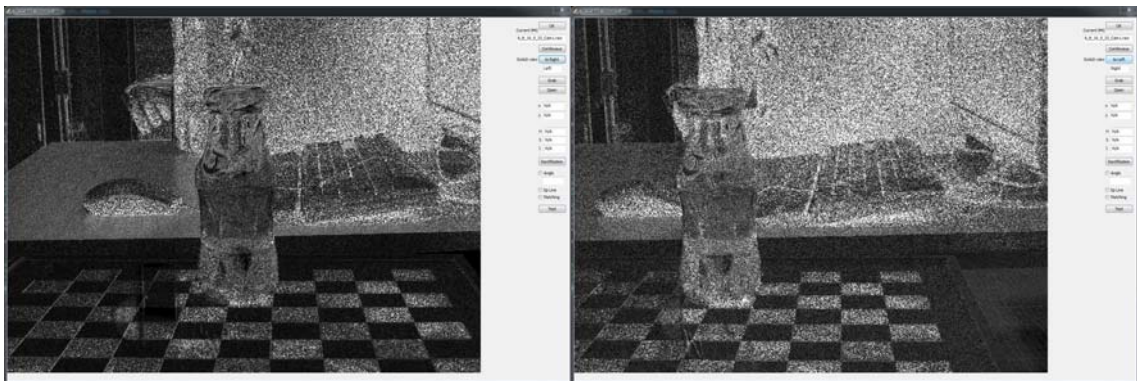


그림 679 채도(Saturation) 값을 표현한 영상

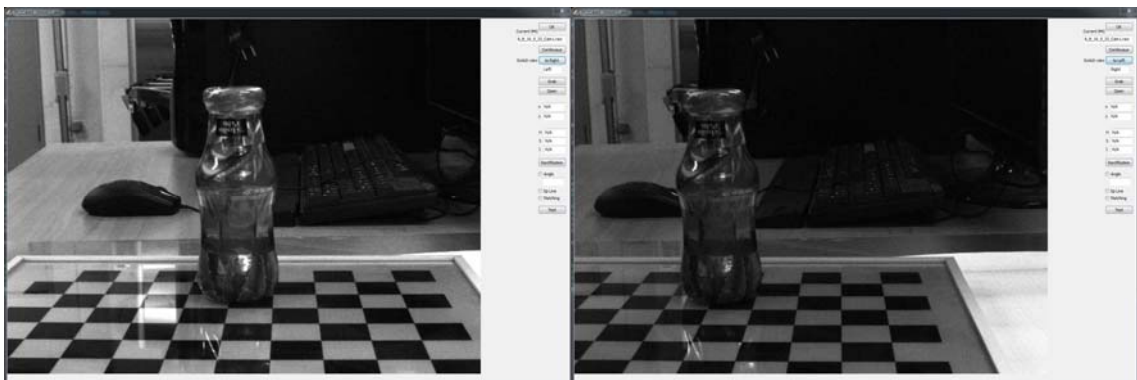


그림 680 명도(Intensity) 값을 표현한 영상

현재 사용하고 있는 영상에는 흰색, 검은색인 픽셀이 많이 존재하기 때문에 색상(H) 영역에 대하여 영상을 표현하였을 때 노이즈가 많이 발생하여 사용하기 힘들다는 것을 확인 할 수 있음. 또한 채도(S) 영역에서도 노이즈가 많이 발생함. 따라서 명도(I) 영역에서 특징을 찾기 위하여 다음과 같은 sobel 마스크를 이용하여 edge 추출 알고리즘을 수행 함.

$$sobel_{hor} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, sobel_{ver} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{수식 88}$$

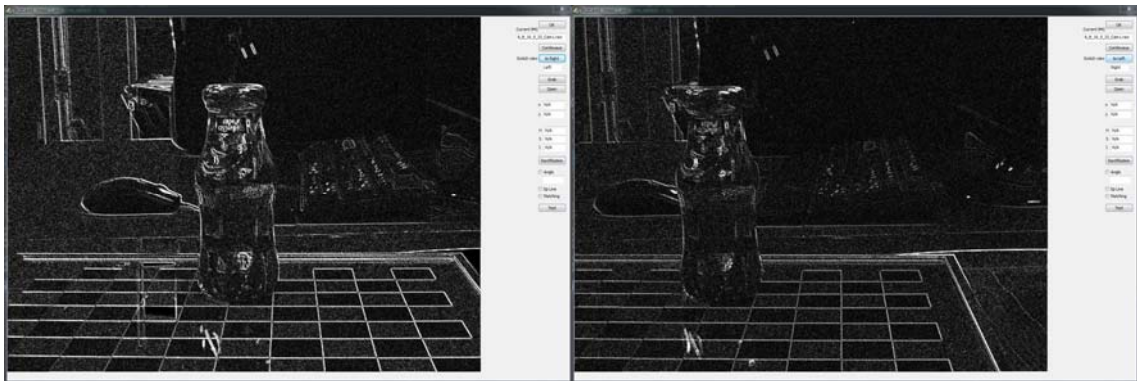


그림 681 Sobel 마스크 적용 결과 영상

위와 같이 edge를 추출하여 매칭 알고리즘을 수행 하였으나 좌, 우측 영상의 명도의 차이가 크게 나타나 edge 정보가 균일하지 않음. 이를 해결하기 위한 방법을 구현함. 아래 두 영상을 보면 명암의 차이가 확연히 드러나는 것을 확인 할 수 있음. 이를 해결하기 위하여 RGB 각각의 비율을 계산하고 해당 비율에 따라 어두운 쪽 영상의 RGB 값에 비율을 가중치로 적용하여 영상을 개선함.

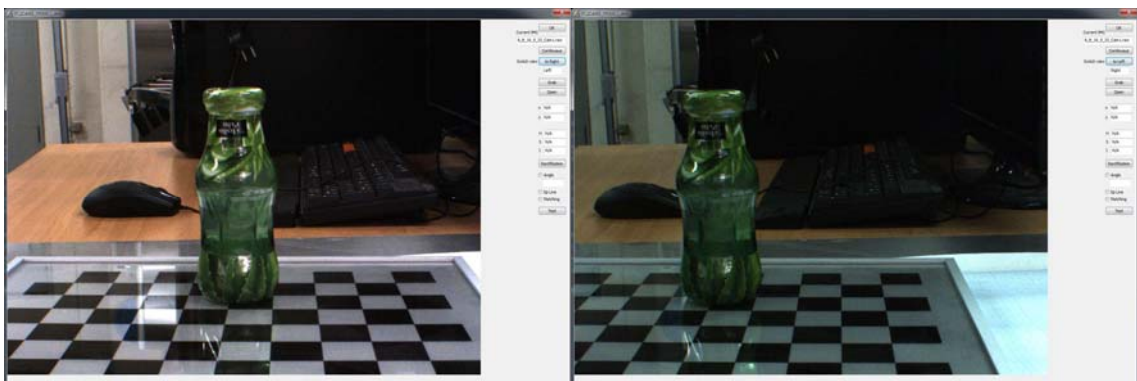


그림 682 개선 전 영상

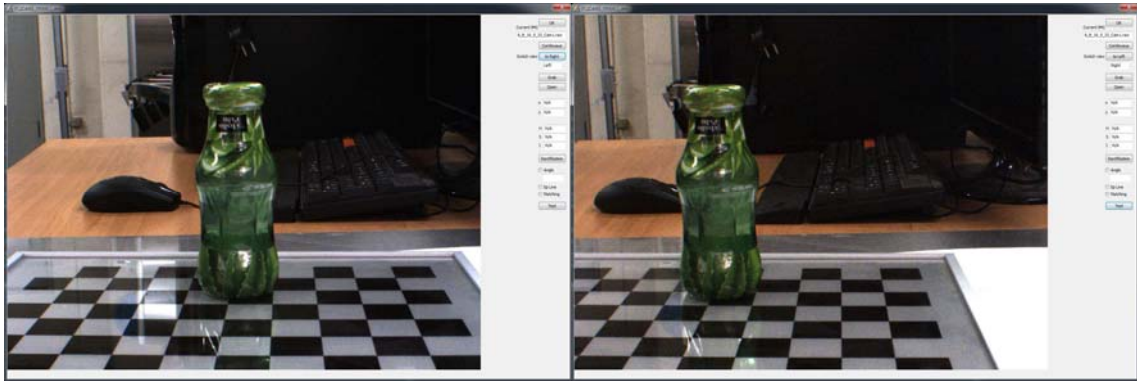


그림 683 개선 후 영상

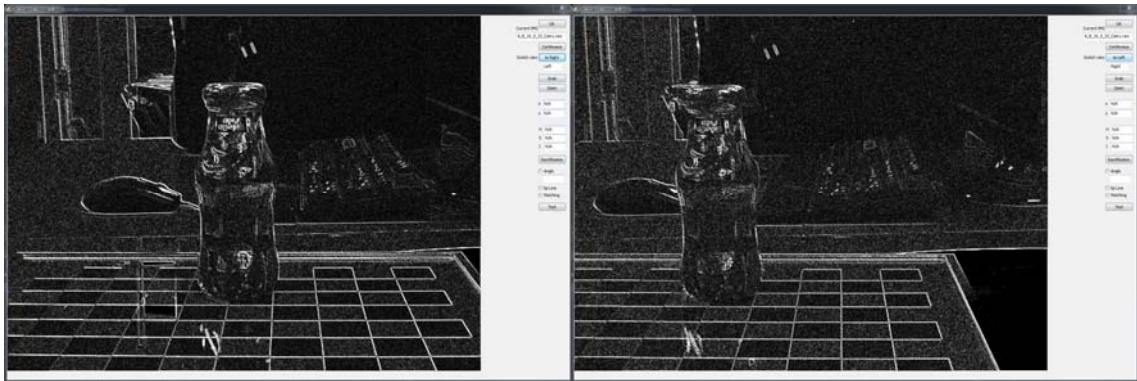


그림 684 개선 후 영상을 이용한 sobel 마스크 적용 영상

개선 후 sobel 마스크를 이용하여 edge를 추출한 영상을 개선 전의 영상의 결과와 비교한 것임. 기준에 비하여 좌, 우측 영상의 명암이 유사해 진 것을 확인 할 수 있음.

Edge로 추출된 픽셀 중에서 값이 큰 픽셀을 붉은색으로 나타내어 이를 특징점으로 하여 매칭을 하고자 함.

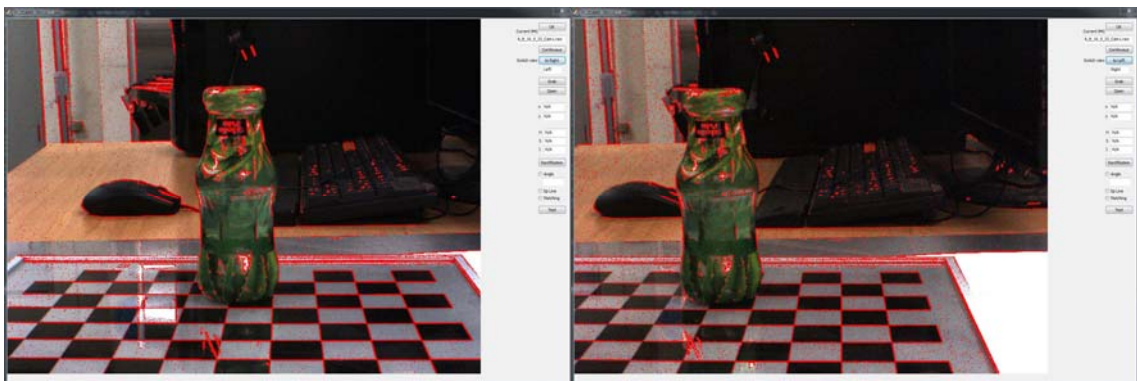


그림 685 특징점 추출 결과

특징점을 표시하기 위하여 sobel 마스크를 이용하여 edge를 추출한 결과 영상을 통해 매칭을 수행하는데 문제점이 발생하여 harris corner 추출 방법을 이용하여 특징점을 구하고자함. harris corner 방법은 두 방향 벡터의 내적을 구하여 얼마나 90도에 가까운지를 계산하는 방법으로 먼저, sobel 마스크에 의한 미분을 통해 각 픽셀의 미분 값을 구하고 해당 값을 gaussian 필터를 통해 처리 한 후 각 픽셀에서 x, y방향의 크기 변화를 구하는 과정을 거침. 다음 행렬은 2x2 고유 벡터가 얼마나 서로 수직인 방향으로 큰 값을 갖는지를 측정하기 위한 것임. I_x , I_y 는 각각 영상에서 가로, 세로 방향의 미분 값을 의미함. 이러한 행렬에서 고유 벡터를 구하면 경계 방향에 수직인 벡터 두 개를 구할 수 있음.

$$M = \begin{bmatrix} I_x^2 & I_{xy} \\ I_{xy} & I_y^2 \end{bmatrix} \quad \text{수식 89}$$

코너 응답 함수(Corner Response Function)는 위 행렬의 고유 벡터를 구하기 위해 고유값 분해를 하지 않고 아래의 식으로 얼마나 수직에 가까운지 만을 계산함.

$$\det(M) - K \cdot \text{Trace}(M)^2 \\ = (I_x^2 \cdot I_y^2 - I_{xy} \cdot I_{xy}) - K \cdot (I_x^2 + I_y^2)^2 \quad \text{수식 90}$$

위 식에서 $\text{Trace}(M)$ 은 행렬의 대각합을 뜻하며 K 는 상수로 0.04~0.06 사이의 값을 사용함. 위에서 계산된 값을 CRF라고 하며 해당 값이 임계값 이상이면 코너로 판별하는 방법이 harris corner 추출 방법임.

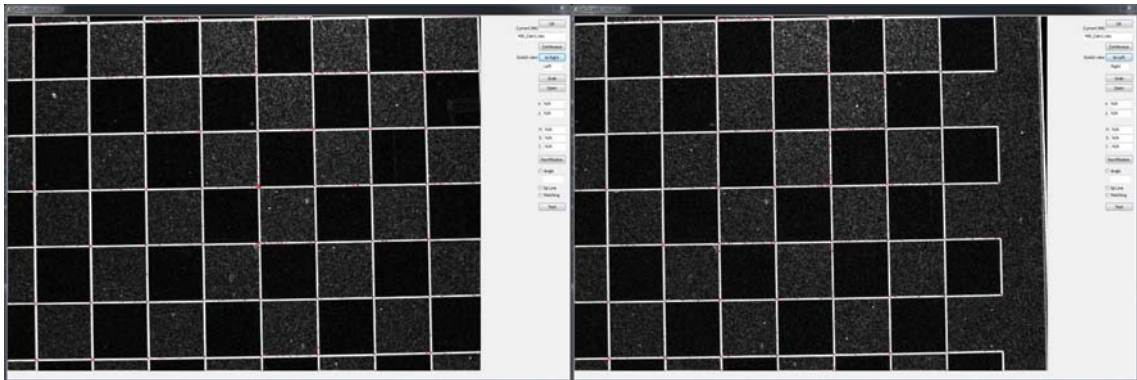


그림 686 Harris corner 추출 결과

구현한 결과 영상은 위와 같음. 캘리브레이션 보드 영상의 경우 교차하는 영역에서 많은 코너가 발생하는 것을 확인 할 수 있으나, 코너가 아닌 곳에서도 코너로 인식하는 경우가 발생함.

파프리카 영상에 대하여 harris corner 추출 방법을 적용한 결과는 다음과 같음.

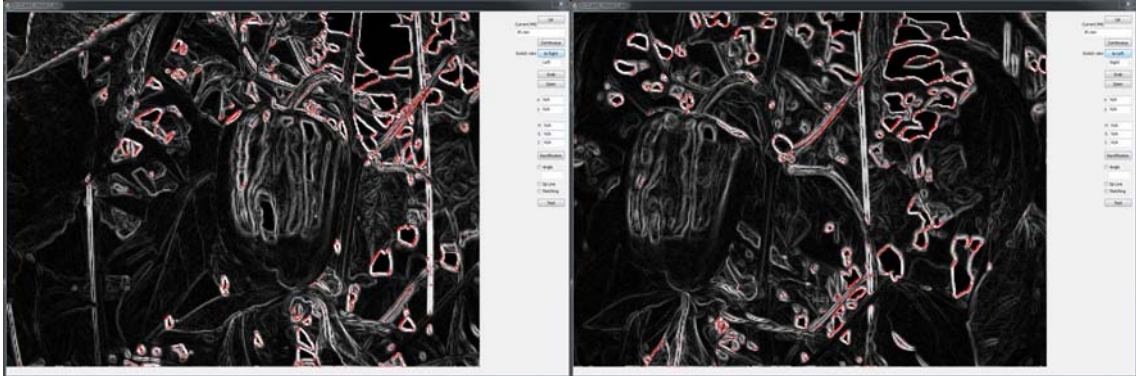


그림 687 명도 값을 이용하여 harris corner를 추출한 결과

파프리카 영상의 경우 파프리카 보다 잎과 줄기에 의하여 생기는 특징점이 지배적으로 많은 것을 확인 할 수 있음.

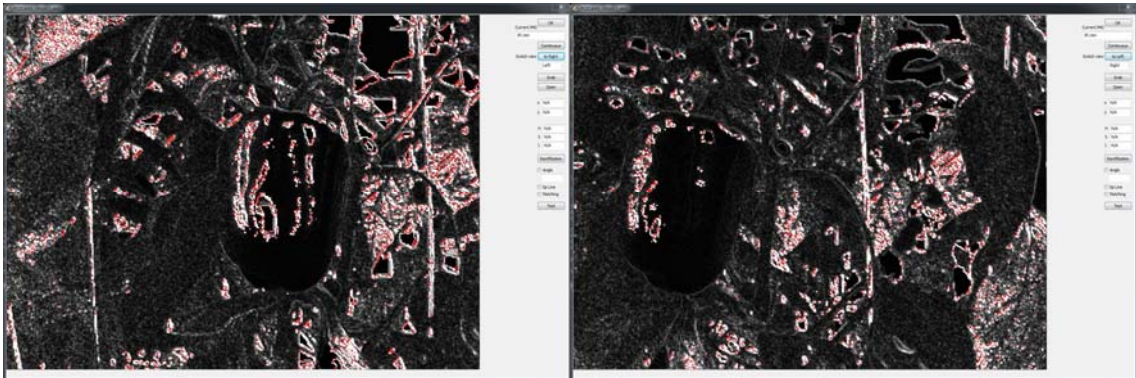


그림 688 색상 값을 이용하여 harris corner를 추출한 결과

위 두 영상은 색상(H)값을 미분하고 harris corner 추출을 한 결과 영상임. 명도(I)를 이용한 결과에 비하여 특징점이 많이 나타났지만 파프리카의 경우 여전히 상대적으로 적은 특징점을 보이며 특히 대부분의 특징점이 조명에 의해 나타나는 영역에만 집중 된 것을 확인 할 수 있음. 해당 문제점을 해결하기 위하여 구조광 형태의 조명을 사용하는 것을 고려해 볼 필요가 있을 것으로 사료됨.

특징점을 이용하여 매칭을 수행하는 방법에 대해서는 다른 방법을 구상 중이며, 기존의 방법과 같이 전체 픽셀에 대하여 매칭을 수행하는 방법 또한 개선을 하기 위해 문헌 연구를 수행 중임.

각 대응점의 비교를 위하여 polychromatic 알고리즘을 사용함. 일반적으로 polychromatic 방법은 R, G, B의 값을 사용하여 다음의 식을 통해 MSE를 구하여 최소 MSE를 갖는 픽셀을 대응점으로 추출하는 방법임.

$$MSE = \sum \sqrt{(a_L - a_R)^2 + (b_L - b_R)^2 + (c_L - c_R)^2} \quad \text{수식 91}$$

본 연구에서의 a, b, c는 각각 H, S, I의 값을 사용하였음. 대응점 비교를 위하여 선택된 좌측 픽셀의 H, S, I를 각각 a_L, b_L, c_L 이라고 하며, 우측 픽셀의 H, S, I를 a_R, b_R, c_R 이라고 할 때, 각 값들의 오차의 MSE를 최소화 하는 우측 픽셀을 선택된 좌측 점의 대응점으로 함. H, S, I 값을 이용한 이유는 좌, 우측 영상의 조명, 화이트 밸런스 등의 차이로 인하여 R, G, B 각 채널의 명도의 차이가 쉽게 발생 할 수 있는 문제가 있어 이를 조명 변화에 쉽게 변하지 않는 H, S의 값을 사용하고자 하였음. 명도의 경우 물체의 형상적인 특성을 이용하기 위하여 사용하였음.

각 대응점의 H, S, I 값은 1차 미분 후 사용함. 1차 미분은 다음의 1x3 크기의 마스크를 이용하여 컨벌루션하여 x 방향으로만 수행하였음.

-1	0	1
----	---	---

그림 689 x방향 미분
마스크

1차 미분을 수행 할 경우 영상에 나타나는 정보의 고주파 성분을 추출하는 high pass filter의 역할을 수행하게 됨. 따라서 영상에 나타나는 edge 영역의 특징을 강조하여 대응점 비교 시 해당 영역에서 높은 정합율을 얻을 수 있을 것으로 기대하였음.

```

double CPGR::Matching_PolychromaticDifferential(CPoint pt)
{
int length;
double dist;
double minerr = 10000.0;

CPoint* EpipolarLine = new CPoint[m_nWidth*m_nHeight];
CPoint Points;

length = Epipolar_PointsOnLine(EpipolarLine, pt);

int aL, aR, bL, bR, cL, cR;
for (int k = 0; k < length; k++){
    for (int i = -10; i < 10; i++){
        if (EpipolarLine[k].y + i > 0 && EpipolarLine[k].y < m_nHeight){
            if (Cam[0].ROI[pt.y*m_nWidth + pt.x] == Cam[1].ROI[(EpipolarLine[k].y + i)*m_nWidth +
EpipolarLine[k].x]){
                aL = -Cam[0].H[pt.y*m_nWidth + pt.x - 1] + Cam[0].H[pt.y*m_nWidth + pt.x + 1];
                aR = -Cam[1].H[EpipolarLine[k].y*m_nWidth + EpipolarLine[k].x - 1] +
Cam[1].H[EpipolarLine[k].y*m_nWidth + EpipolarLine[k].x + 1];

                bL = -Cam[0].S[pt.y*m_nWidth + pt.x - 1] + Cam[0].S[pt.y*m_nWidth + pt.x + 1];
                bR = -Cam[1].S[EpipolarLine[k].y*m_nWidth + EpipolarLine[k].x - 1] +
Cam[1].S[EpipolarLine[k].y*m_nWidth + EpipolarLine[k].x + 1];

                cL = -Cam[0].I[pt.y*m_nWidth + pt.x - 1] + Cam[0].I[pt.y*m_nWidth + pt.x + 1];
                cR = -Cam[1].I[EpipolarLine[k].y*m_nWidth + EpipolarLine[k].x - 1] +
Cam[1].I[EpipolarLine[k].y*m_nWidth + EpipolarLine[k].x + 1];

                double err;
                err = abs(pow(aL - aR, 2)) + abs(pow(bL - bR, 2)) + abs(pow(cL - cR, 2));
                if (minerr > err){
                    minerr = err;
                    dist = sqrt(pow((EpipolarLine[k].x - pt.x), 2) + pow((EpipolarLine[k].y - pt.y), 2));
                    Points.x = EpipolarLine[k].x;
                    Points.y = EpipolarLine[k].y;}}}}
    }
}

delete[] EpipolarLine;
return dist;
}

```

표 125 파프리카 인식 및 대응점 매칭 결과 #1

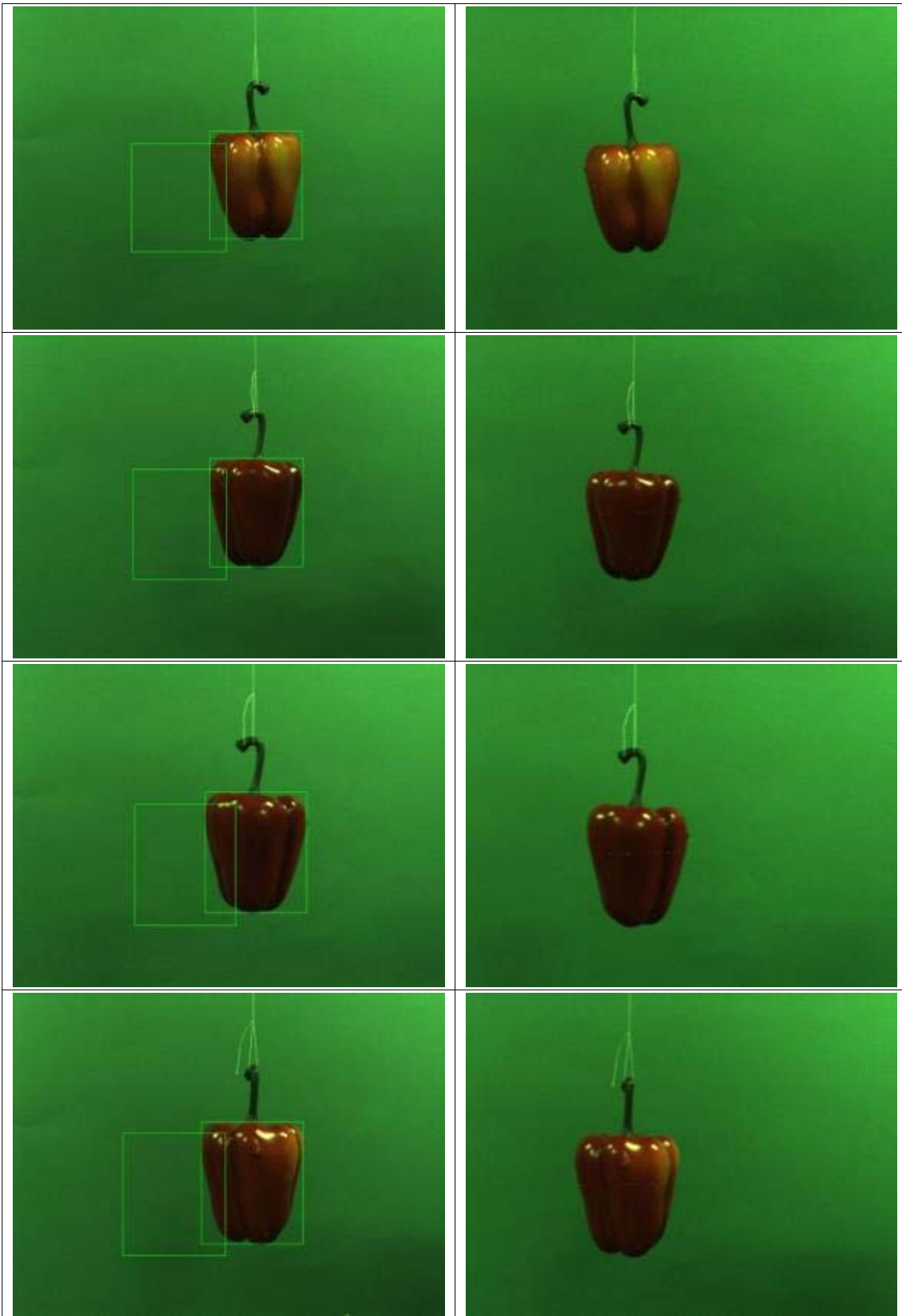
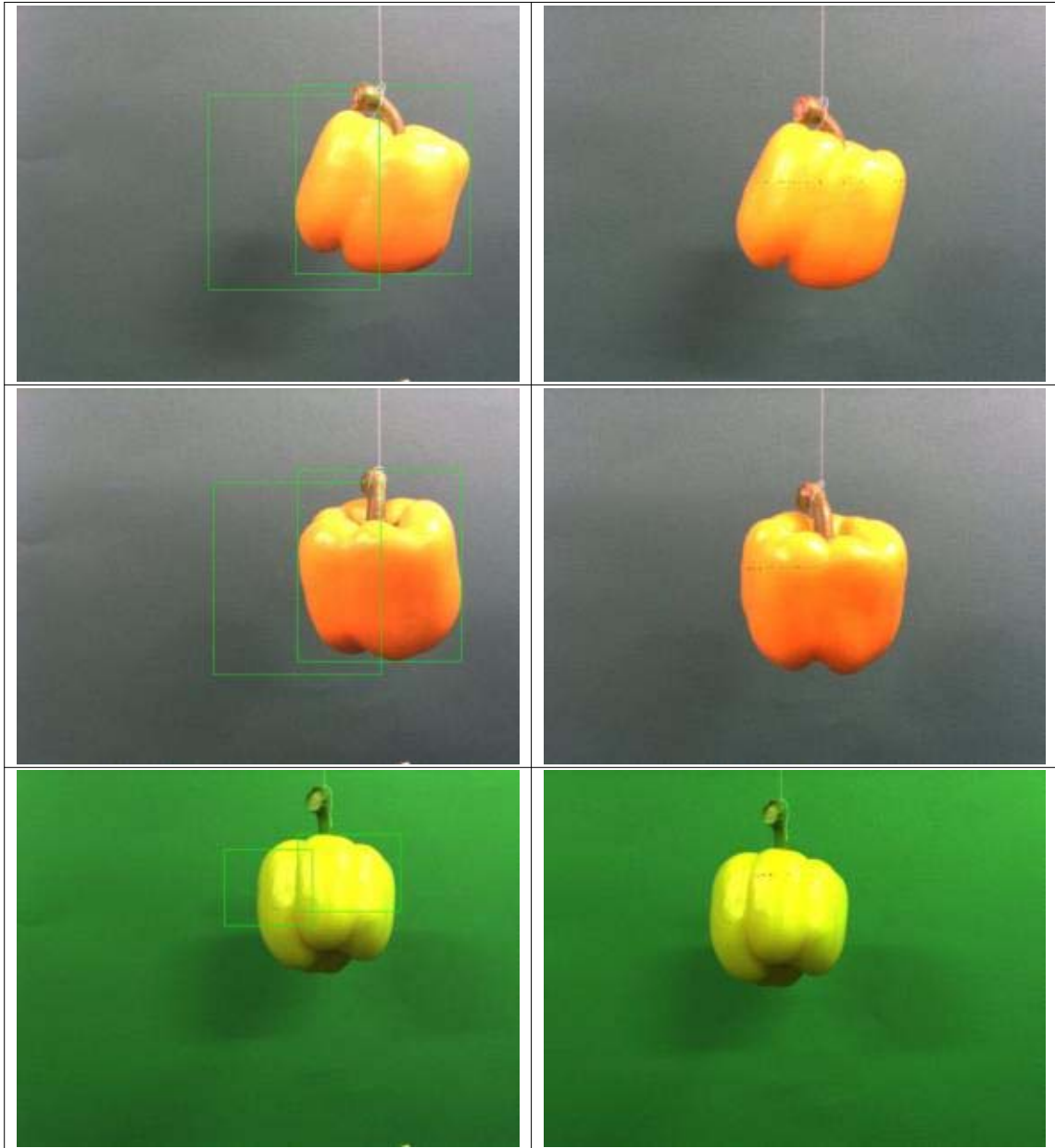


표 126 파프리카 인식 및 대응점 매칭 결과 #2



파프리카의 위치를 인식 후 파프리카의 중심을 기준으로 x 방향으로 스캔하며 매칭을 수행함. 해당 스캔을 통하여 구해진 각 대응점들의 disparity는 추후 실제 거리와의 캘리브레이션을 통하여 카메라로 부터의 실제 거리로 변환 할 계획임.

노란색 파프리카의 경우 실내 조명과 카메라 화이트 밸런스를 자동으로 설정하지 않은 상태에서는 HSI 임계값 추출이 제대로 수행되지 않는 현상이 발생하였음.

- 제작 소프트웨어의 실험 및 분석

영상에서 나타나는 disparity와 실제로 측정된 거리간의 calibration을 수행하고자 영상 촬영 시 레이저 거리 측정기의 포인터를 파프리카에 조사하고 동시에 거리를 측정함.



그림 704 레이저 거리측정기를 이용하여 거리를 측정한 스테레오 영상

영상에 나타나는 레이저 포인터의 중심의 좌표를 측정하고 레이저 거리 측정기로 측정된 거리와 비교함. disparity를 계산하는 방법 중 x축 방향의 차이를 이용하는 것과 실제 두 좌표간의 거리를 계산하는 방법에 대해 수행함. 영상 촬영은 10회 수행하였으며, 파프리카 수확 시 예상되는 작업 영역인 400~700mm의 거리의 파프리카를 대상으로 함.

표 127 레이저 거리측정 결과와 레이저 포인터의 영상 좌표 비교

Yellow paprika real distance(mm)	L(pixel)		R(pixel)		xl-xr (pixel)	distance (pixel)
	x	y	x	y		
1	505	662	322	395	343	267.8246
2	650	628	301	442	334	188.9047
3	612	1019	218	812	242	208.3867
4	655	501	243	315	262	186.9679
5	591	843	570	629	590	214.9325
6	406	997	440	621	468	377.0411
7	400	1034	338	649	364	385.8769
8	481	751	284	469	316	283.8098
9	551	792	219	566	250	228.1162
10	698	780	308	608	329	173.2772

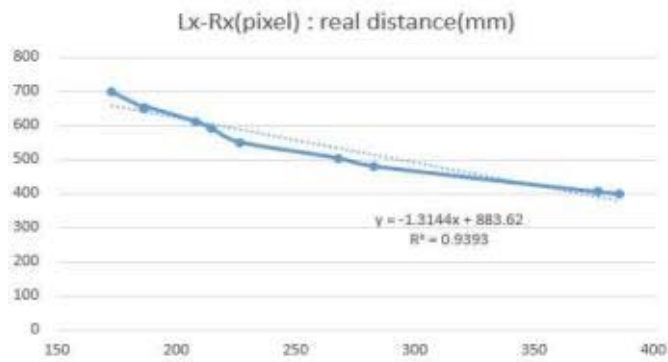


그림 705 x축 거리와 실거리 캘리브레이션 결과(1차식)

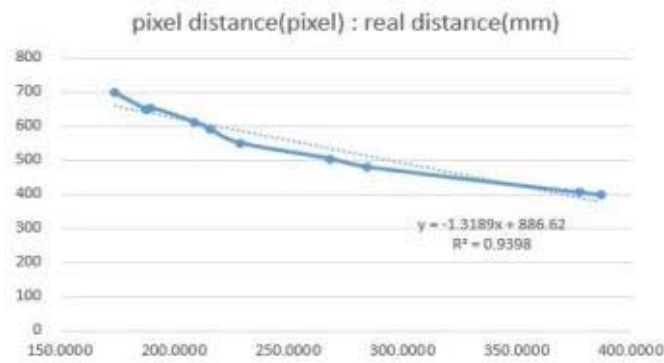


그림 706 좌표 거리와 실거리 캘리브레이션 결과(1차식)

1차식을 이용하여 직선의 형태로 회귀식을 구하고 결정계수 R^2 값을 비교한 결과임. 회귀식과 R^2 값이 유사한 것을 확인 할 수 있음. 직선 회귀식의 경우 R^2 값이 약 0.94임.

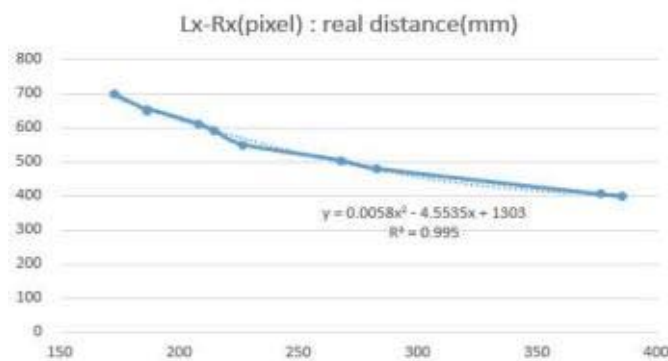


그림 707 x축 거리와 실거리 캘리브레이션 결과(2차식)

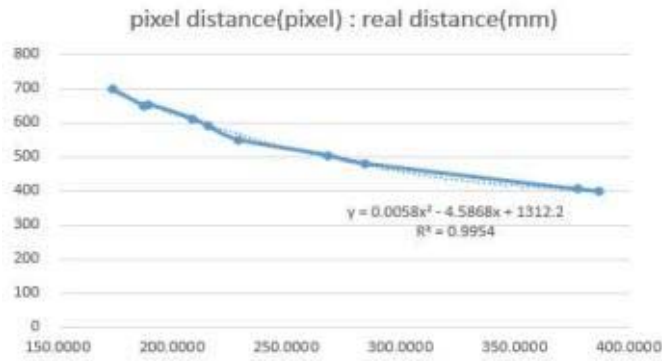


그림 708 좌표 거리와 실거리 캘리브레이션 결과(2차식)

다항식을 이용한 경우 가장 R^2 값이 높게 나타났으며, 3차 다항식의 경우 계수의 크기가 매우 작아 2차 다항식의 결과를 사용함. x축 거리와 좌표 거리의 결과를 비교한 결과 거의 차이가 없음. 하지만 실제 표에서는 x축 거리만으로 비교하기에는 무리가 있을 것으로 보임.

위 결과에 의하면 회귀식은 다음과 같으며 해당 경우 R^2 값은 0.9954임.

$$y = 0.0058x^2 - 4.5868x + 1312.2 \quad \text{수식 92}$$

회귀식을 이용하여 오차를 구한 결과 최대 7mm의 오차를 보임. 해당 오차는 600mm 이상의 영역에서 발생함. 분해능은 400~700mm 구간에서 0.1~0.01mm로 나타남.

```

double CPGR::Matching_CenterMatching(int value)
{
    int masksize = 5;
    int centerpt = masksize*masksize;
    CPoint* center = new CPoint[centerpt];

    m_ROICenterExt(value-1, masksize, center);

    for (int i = 0; i < centerpt; i++) m_SetRGB(0, center[i], sRGBRed);

    double* dist = new double[centerpt];
    for (int i = 0; i < centerpt; i++){
        dist[i] = Matching_PolychromaticDifferential(center[i]);}

    m_ArraySorting(dist, centerpt);

    double sum = 0.0;
    for (int i = 0; i < centerpt; i++)
    {
        sum += dist[i];
    }

    double average = sum / (double)centerpt;

    double result = 0.0;
    result = 0.0095*(pow(average, 2)) - 6.096*average + 1363.5;

    delete[] dist;
    delete[] center;
    return result;
}

```

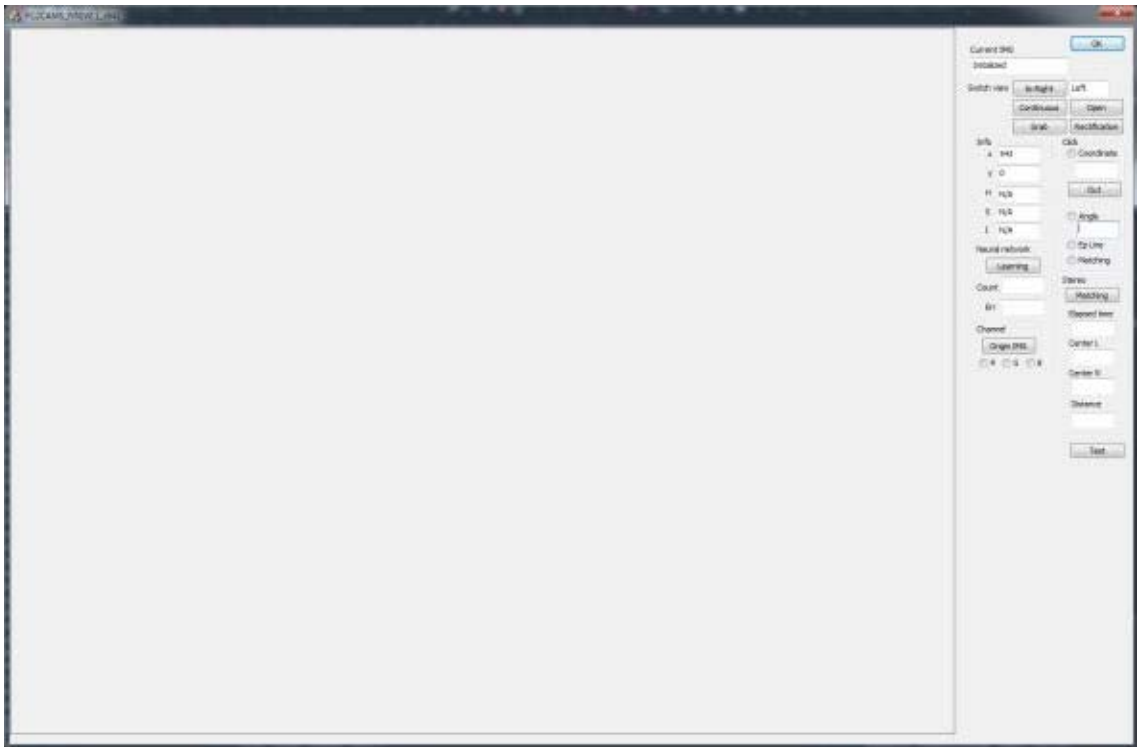


그림 709 MFC를 이용하여 제작한 영상처리 윈도우 프로그램

파프리카의 인식, 좌표 및 위치 추출을 위한 알고리즘들을 자동으로 수행하고 결과를 출력하기 위하여 Visual studio C++ MFC 라이브러리를 이용하여 윈도우 프로그램을 제작함.

좌, 우 스테레오 영상을 실시간으로 입력받고 선택하여 확인 할 수 있으며, 입력받은 정보를 배열의 형태 및 파일의 형태로 저장 할 수 있음. 파일로 저장 시 파일 명은 저장을 수행하는 날짜_시간_카메라번호.RAW 형식으로 저장함. 저장된 파일을 읽어 들일 수 있고 실시간 영상은 1288x964 해상도를 이용하며, 저장된 파일은 1288x964, 1280x960, 640x480 세 가지 해상도의 파일을 읽어 들일 수 있음.

입력된 영상은 픽셀의 x, y 좌표 및 HSI 정보를 Edit box를 통해 확인 할 수 있음. 최대 100 개까지의 좌표를 저장 할 수 있으며 파일로 출력 할 수 있음. 에피폴라 교정을 수행 하는 알고리즘을 실행할 수 있으며, 파프리카 인식을 위한 전처리와 인식된 파프리카의 중심을 정합하여 disparity를 구하고 해당 값을 이용하여 거리를 구할 수 있음.

해당 값들은 Edit box를 통하여 좌, 우측 영상의 파프리카 영역의 중심, 거리를 출력 하도록 함. 또한 모든 과정은 알고리즘 시작으로부터 종료까지 시간을 측정하여 출력함.

연구실 실내에서 실험을 위하여 실험 환경을 구성함. 녹색 배경을 바탕으로 실제 파프리카와 파프리카 모형을 이용하여 일정거리에 위치시키고 실험을 수행함.

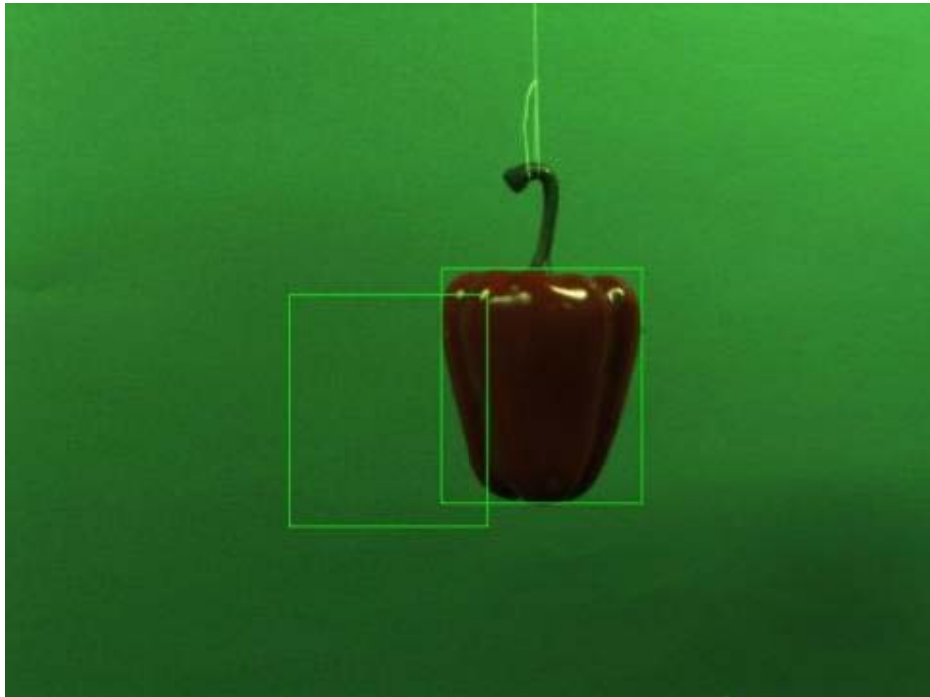


그림 710 실내 실험을 위해 구성된 실험 환경에서의 실험(파프리카 모형)

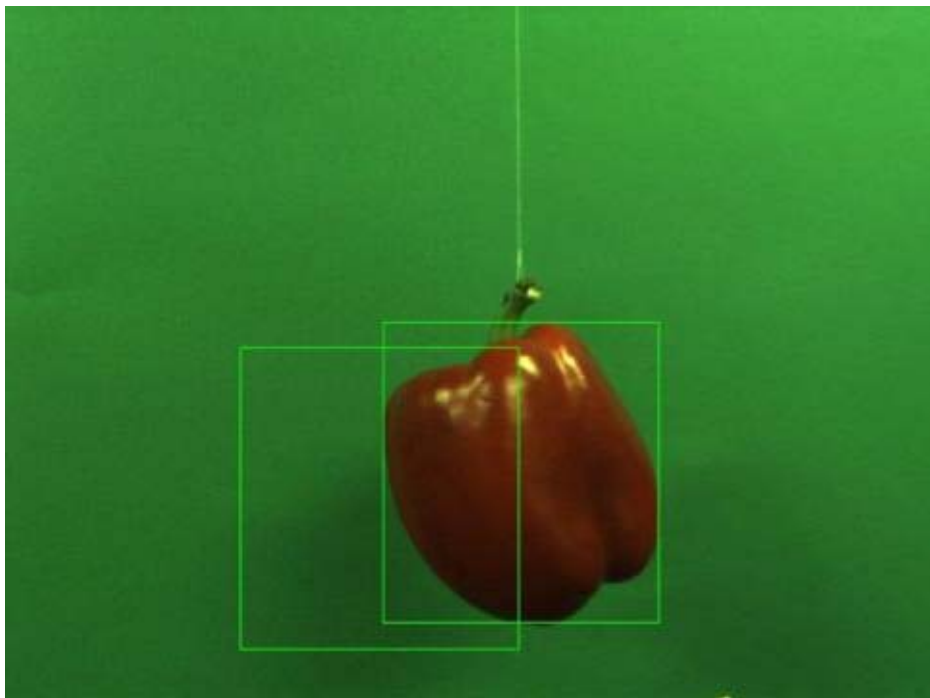


그림 711 실내 실험을 위해 구성된 실험 환경에서의 실험(붉은색 파프리카)

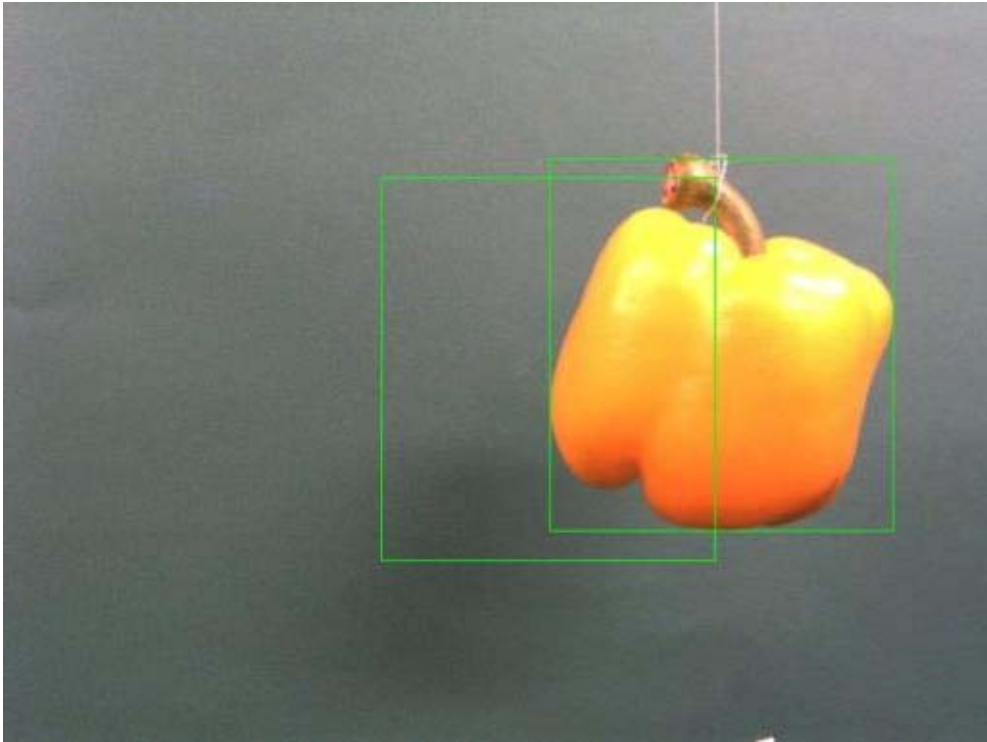


그림 712 실내 실험을 위해 구성된 실험 환경에서의 실험(노란색 파프리카)

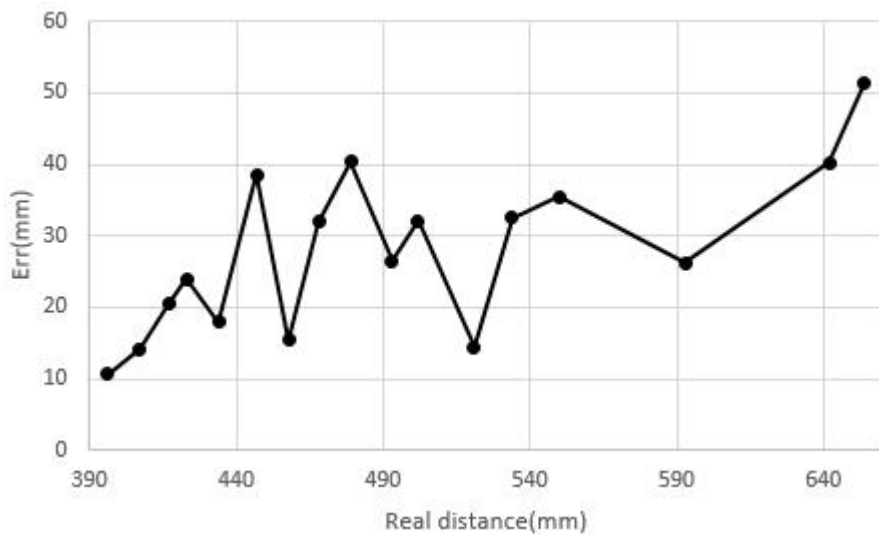










그림 713 거리에 따른 오차

카메라로부터 파프리카까지의 실제 거리와 계산된 거리의 오차를 계산하였을 때 평균 27.8mm, 표준편차 16.2, 4.75%의 오차율을 보임.

표 129 스테레오 정합 결과에 따라 계산된 거리 출력(온실 내 재배 환경 영상)

	
447.6mm	503.6mm
	
452.0mm	585.8mm
	
464.0mm	611.2mm
	
495.2mm	627.5mm

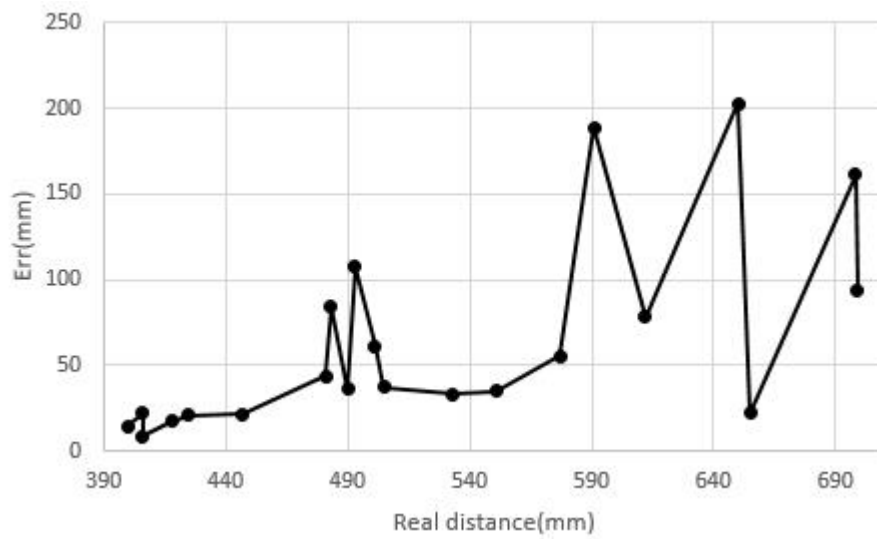


그림 714 거리에 따른 오차

카메라로부터 파프리카까지의 실제 거리와 계산된 거리의 오차를 계산하였을 때 평균 64mm, 표준편차 55.24, 11.3%의 오차율을 보임. 오차율이 급격히 높아지는 경우는 파프리카 인식이 발생하지 않은 경우로 다음과 같이 두 개 이상의 파프리카가 겹쳐서 나타나거나 잎에 의하여 한쪽 영상의 파프리카가 가려지는 등의 경우에 발생함.



그림 715 파프리카 인식 오류

인식 오류를 제외한 경우 정합에 의한 거리 계산 오차는 평균 33.9mm, 표준편차 19.16, 6.65%의 오차율을 보임.

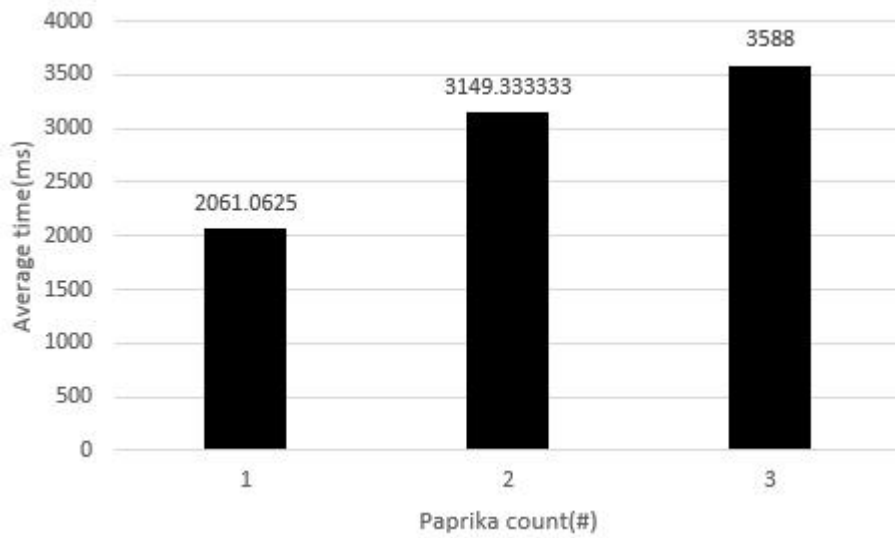


그림 716 파프리카 개수에 따른 소요시간 변화

영상 획득으로부터 거리 측정까지 알고리즘을 수행하는데 소요되는 시간을 측정한 결과임. 전체 실험 결과의 평균 소요시간은 2361ms였음. 일반적으로 영상에 파프리카가 하나만 존재하는 경우 약 2061ms의 시간이 소요 되었으며, 파프리카 개수가 증가 할수록 소요 시간은 증가하는 경향을 보임.

영상에서 파프리카를 인식하는 과정에서 발생하는 오차는 추출된 파프리카 예상 영역의 가로와 세로 비율을 실제 파프리카 크기와 비교하여 인식률을 높일 계획이며, 파프리카 인식 및 거리 측정에 소요되는 시간을 줄일 필요가 있을 경우 영상에 나타나는 파프리카의 영상 선별을 통하여 해당 시간을 줄일 수 있을 것으로 생각되나 현재 알고리즘의 수행 속도는 충분하다고 사료 됨.

○생리장해 및 병해 발생 파프리카와 정상 파프리카 선별 인식 알고리즘 설계

- 발생이 잦은 생리장해와 병해의 특성 분석

표 130 파프리카 병해 증상 및 특징

명칭	증상
잠두위조바이러스2	초기에는 약한 모자이크 증상을 보이면서 엽맥 투명으로 나타나고 후기에는 잎이 위축됨. 과실에서는 멍이 든 것과 같은 과실과 반점이 나타남.
오이모자이크바이러스	잎에서 엽맥 투명 증상이 초기에 나타나서 엽맥이 괴사한 후 잎이 떨어짐. 과실 괴사 반점.
토마토반점위조바이러스	잎과 열매에 원형반점 및 황화 증상을 보임.
고추모틀바이러스	엽맥에 녹색의 띠가 있으며 황반 모자이크 증상이 나타남. 과실에서 요철이 있는 모자이크 및 줄무늬 증상을 보임.
고추마일드모틀바이러스	잎에 황색 얼룩무늬가 나타나고 생육 부진. 과실에 황화원형반점이 불규칙한 크기로 나타남.
선세포	과실의 끝이 뾰족해져 상품가치를 잃게 되며 저온 및 다습에 의해 암술머리가 적정시기에 건조되지 못할 때 발생함.
석과	과가 비대가 되지 않으며 잘라보면 수정이 되지 않아 태좌부에 종자가 거의 없거나 적고 과가 납작해지며 굴곡이 심해짐.
기형과	온도 조건이 맞지 않거나 양분이나 수분의 과부족 등으로 발생. 착과수가 과다하게 많거나 일조 부족.
일소과	과 표면에 강한 직사광선을 받아 온도가 50도 이상이 되거나 과 표면에 물은 물방울이 볼록렌즈 역할을 할 때 발생. 과실 표면에 이상 조직 발생
열과	주야간 온도차이가 크거나 건조한 상태에서 갑자기 수분을 흡수하였을 때 발생. 고온, 직사광선 및 늦은 수확시기 등에 의해 발생함. 과실 표면에 주름 발생
리젯팅	착색시기의 과 표면에 미세한 균열이 발생.
담배나방	피해과는 부패하거나 과 표면에 구멍이 나있음.
배꼽썩음과	주로 녹색 과에서 발생하며 토양의 건조나 과습으로 인하여 질소가 과다하면 칼슘의 흡수가 둔화되어 발생. 표피가 파괴되는 특징.

- 구별 생리장해 및 병해 선정

영상정보를 이용하여 생리장해 및 병해의 유무를 확인하기 위하여 영상에서 인식된 파프리카 영역내의 색상정보로 구분이 가능한 특성을 선정하고자 함.

표 131 각 병에 따라 나타나는 과실의 영상 특성

일소과		실버링	
칼슘집적과		열과	
탄저병		배꼽썩음	
미세균열		오이모자이크바이러스	
잠두위조바이러스2		고추모틀바이러스	
토마토반점위조바이러스		고추마일드모틀바이러스	

- 생리장해 및 병해 발생 파프리카와 정상 파프리카의 특성 분석

생리장해 및 병해 발생 파프리카를 정상 파프리카와의 구분을 위하여 정상 파프리카의 영상의 색상 및 채도 히스토그램을 분석하고 해당 결과를 이용하여 정상과와 비정상과의 구분을 시도하고자 함. 이를 위하여 Visual studio C++ MFC 라이브러리를 이용하여 윈도우 프로그램을 제작함.

영상에서 파프리카의 정상 영역을 색상과 채도를 이용하여 추출하기 위하여 붉은색과 노란색 파프리카 영역 픽셀의 색상과 채도를 히스토그램으로 나타내고 이를 분석한 결과이다. 픽셀은 각 색상 파프리카 영역의 임의의 지점에서 추출 하였고 색상 별로 160개의 픽셀을 분석함.

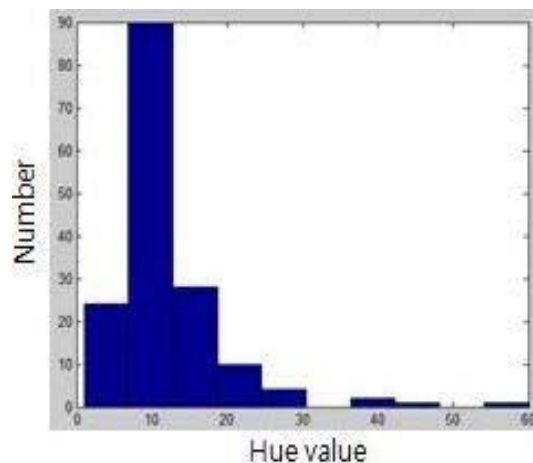


그림 729 붉은색 정상 파프리카 색상 히스토그램

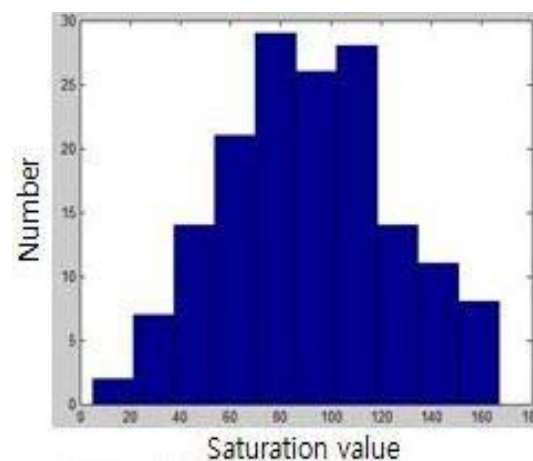


그림 730 붉은색 정상 파프리카 채도 히스토그램

HSI에서 색상 분포를 보면 붉은색의 경우 0~30° 구간에서 확인 할 수 있다. 색상 히스토그램을 보면, 0~30° 구간에서 많은 픽셀이 존재하며, 10°의 영역에서 가장 큰 값을 보이는 것을 확인 할 수 있음.

채도의 분포는 0~160사이 존재하며 80~110 구간에서 가장 큰 값을 보임.

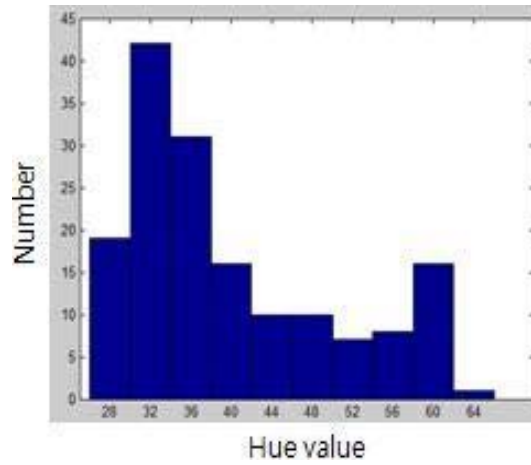


그림 731 노란색 정상 파프리카 색상 히스토그램

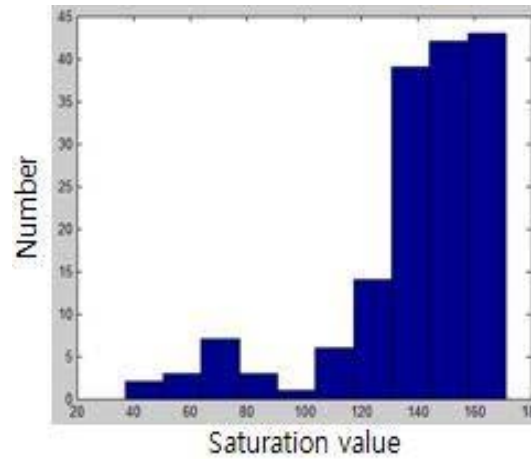


그림 732 노란색 정상 파프리카 채도 히스토그램

HSI 모델에서 H 히스토그램을 확인한 결과 노란색의 경우 30~60° 구간에서 색상이 존재하는 것을 볼 수 있으나, 60° 영역에서는 녹색 영역이 존재하기 때문에 녹색 영역과 겹치는 경향이 있음. 위 그림 중 색상 히스토그램을 보면, 0~40° 구간에서 많은 픽셀이 존재하며, 60° 영역에서도 피크를 보인다. 또한 30°의 영역에서 가장 큰 값을 보이는 것을 확인 할 수 있음. 채도의 분포는 40~160사이 존재하며 140~150 구간에서 가장 큰 값을 보임.

표 132 정상 파프리카 영역의 H, S 히스토그램 분석 결과

Color	Threshold	Pixel	%
Red	$H \leq 30$	156/160	97.5
	$S > 40$	150/160	93.8
Yellow	$H \leq 60$	159/160	99.4
	$S > 80$	148/160	92.5

제작한 프로그램을 이용하여 병징의 HSI 모델에서 H 히스토그램을 확인하고자 함.

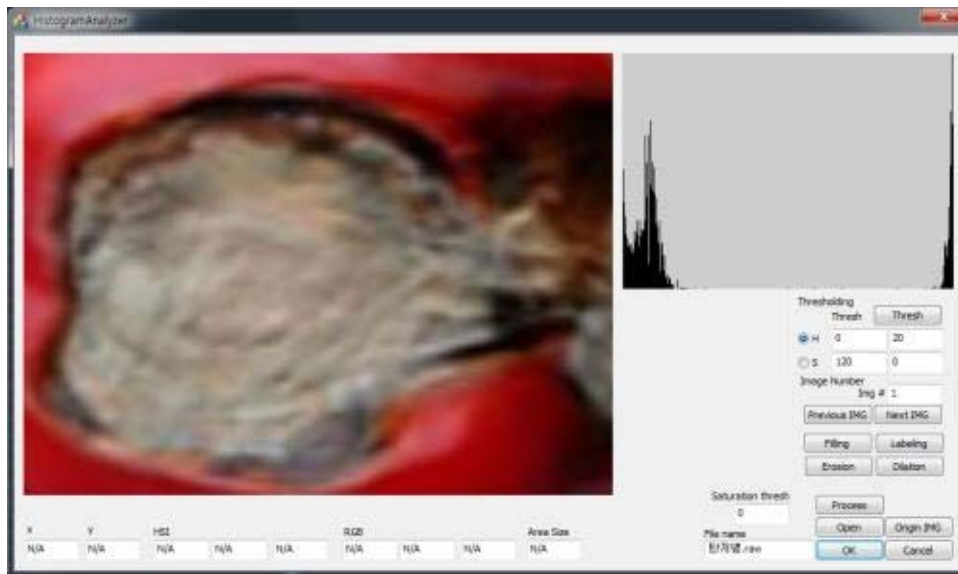


그림 733 탄저병 병징의 H 히스토그램 분석 영상

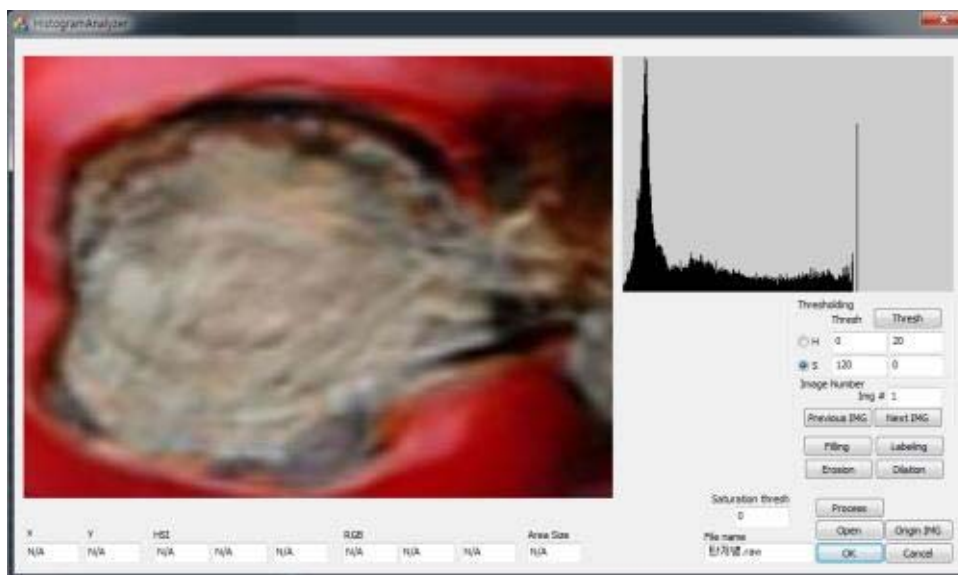


그림 734 탄저병 병징의 S 히스토그램 분석 영상

탄저병 병징의 HSI 색상 모델의 히스토그램 분석 결과 비정상 영역은 약 5~70도의 색상 값을 갖고 있음. 따라서 해당 영역에 대하여 임계값 추출을 한 영상은 다음과 같음.

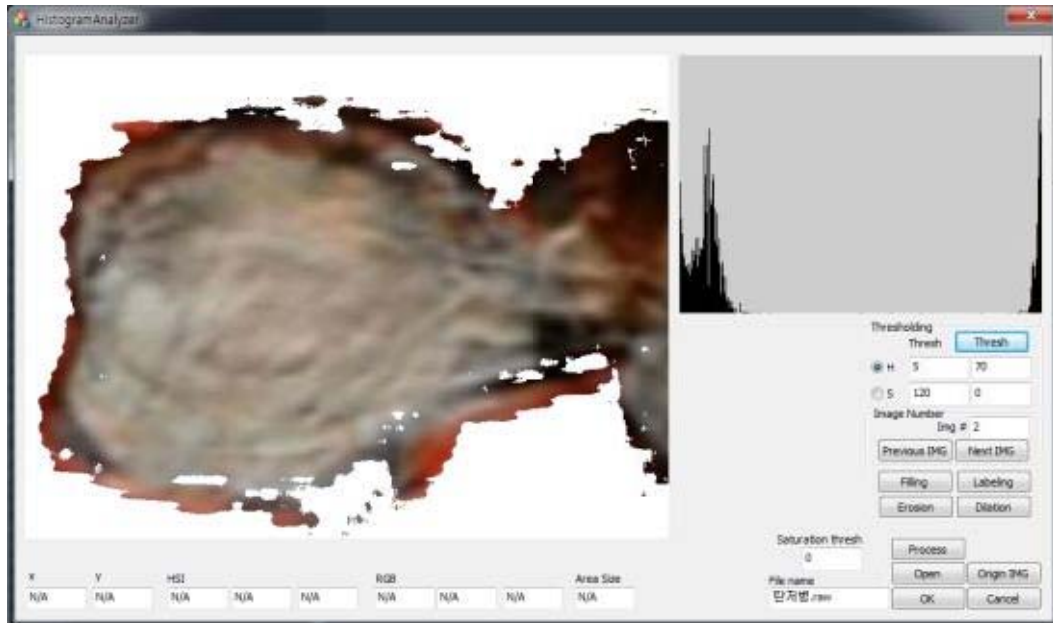


그림 735 임계값 추출을 이용하여 탄저병 비정상 영역 확인

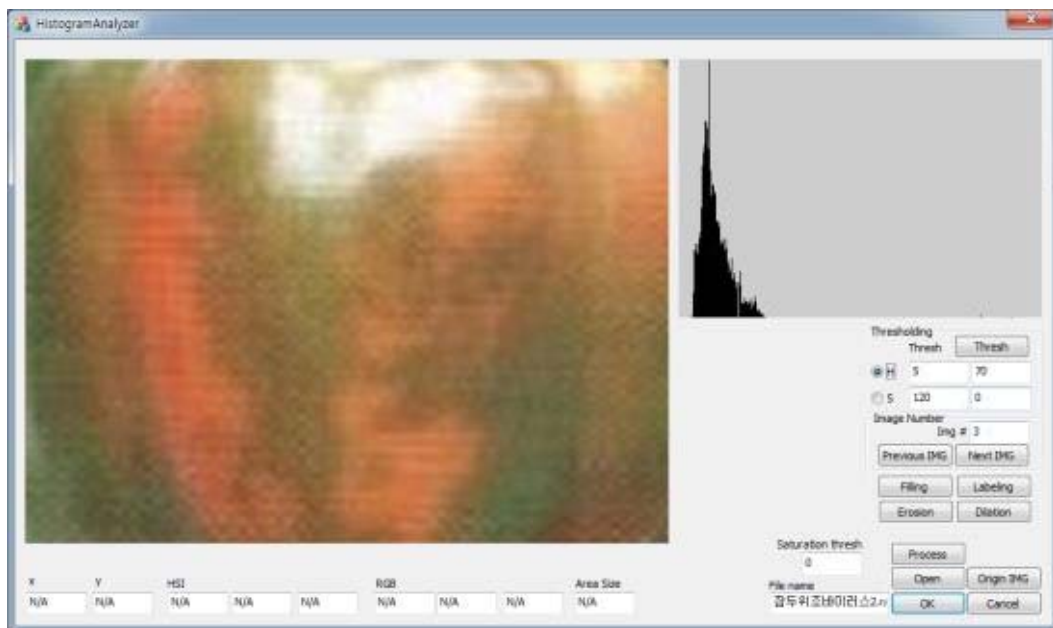


그림 736 잠두위조배이러스2 병징의 H 히스토그램 분석 영상

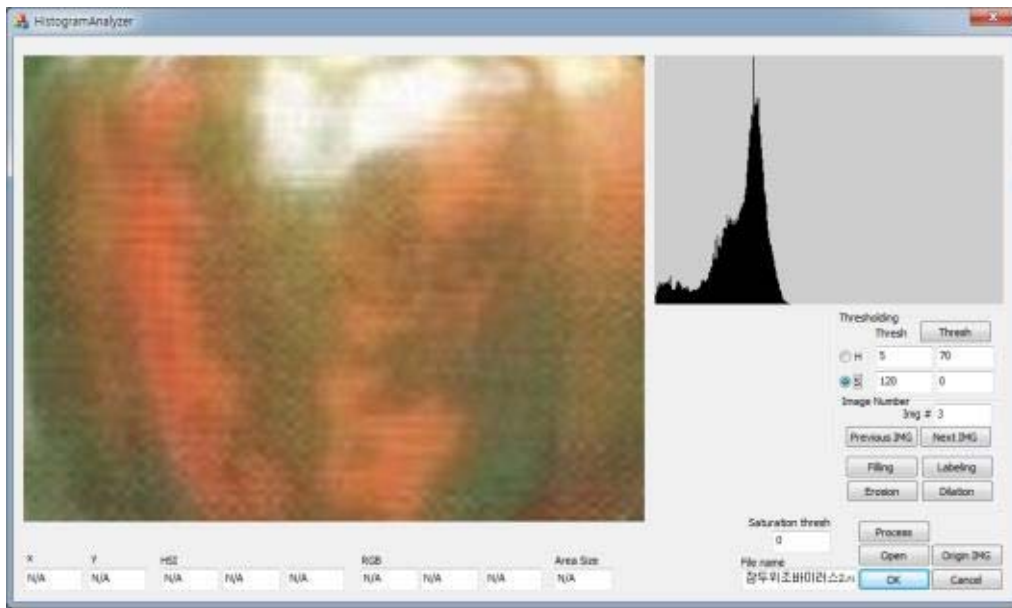


그림 737 잠두위조바이러스2 병징의 S 히스토그램 분석 영상

잠두위조바이러스2 병징의 HSI 색상 모델의 히스토그램 분석 결과 비정상 영역은 약 35~80도의 색상 값을 갖고 있음. 따라서 해당 영역에 대하여 임계값 추출을 한 영상은 다음과 같음.

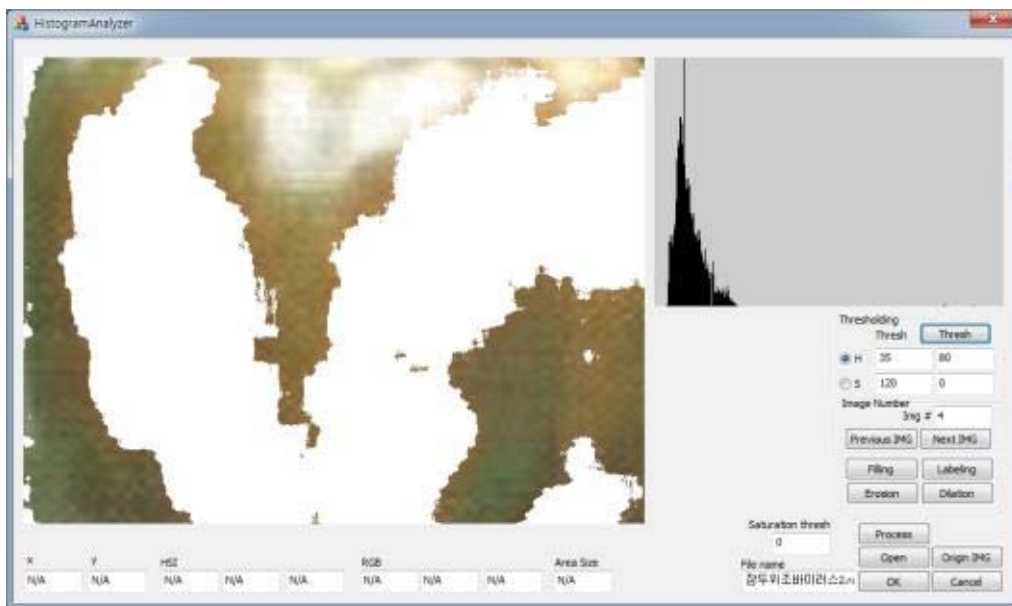


그림 738 임계값 추출을 이용하여 잠두위조바이러스2 비정상 영역 확인

잠두위조바이러스2의 비정상 영역을 색상으로 추출하는 경우 비 성숙 영역과 구분이 힘들.

- 생리장해 및 병해 발생 파프리카와 정상 파프리카 선별 인식 알고리즘 설계

정상 파프리카의 선택적 특징은 색상, 채도, 명도의 정보 변화가 크지 않고, 비정상 파프리카는 선택이 고르지 않고, 훼손된 영역의 색상이 현저한 차이를 보이기 때문에 이를 히스토그램 분석하여 정상 조직으로 판별 가능한 영역의 색상, 채도, 명도의 임계를 정하고 정상 영역을 추출함으로써 파프리카의 비정상 영역을 구분하고자 함.



그림 739 정상 영역 추출 이전의 원본 영상

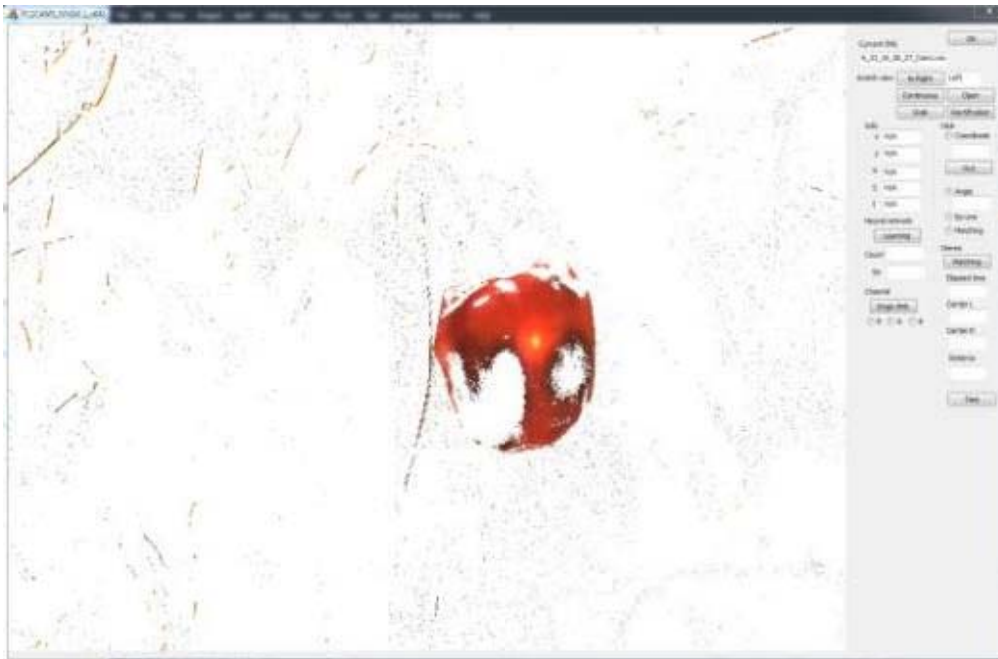


그림 740 정상 영역 추출을 위한 임계값 적용 영상

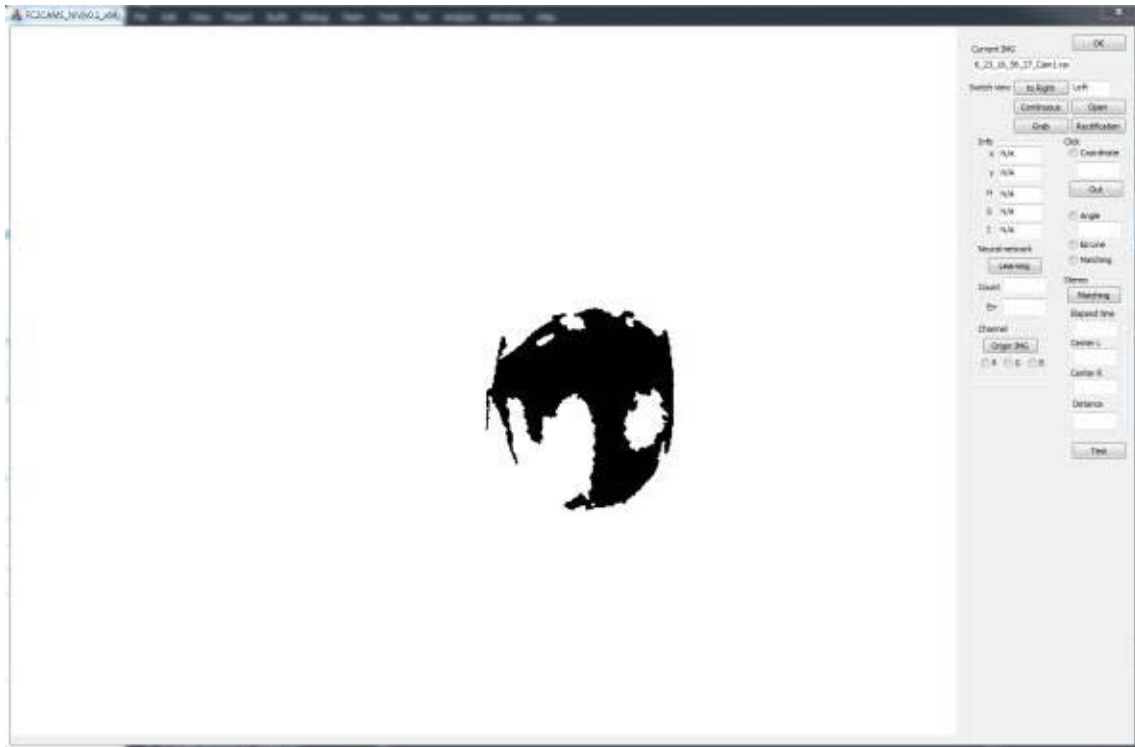


그림 741 정상 영역 추출 결과 영상

분석한 히스토그램을 기반으로 정상 영역을 추출한 결과 영상임. 해당 영상을 통하여 정상 조직과 비정상 조직을 구분 할 수 있을 것으로 사료됨.

기타 생리장해의 경우 과실의 크기를 이용하여 구분 할 수 있을 것으로 사료되나 비성숙과와의 구분은 힘들 것으로 사료됨. 또한, 파프리카 표면에 나타나는 병징은 위와 같은 방법을 통하여 구분이 가능하며 색상만으로 해당 병을 구분해 내는 것은 어려우나 정상 과실과 비정상 과실을 구분 하는 것은 가능 할 것으로 사료됨.

따라서 영상에서 파프리카를 인식하고 추출하는 과정에서 정상, 비정상 영역을 구분하고 비정상 영역으로 구분된 영역에 대하여 색상 히스토그램을 통한 비교를 통해 병징을 추출 해 내는 방법으로 알고리즘을 구현 할 수 있음.

정상 영역의 HSI 색상 값을 학습 인자로 하여 인공 신경망을 통하여 학습하고 가중치를 이용하여 학습 결과를 확인하고자 함. 출력의 경우 정상 파프리카 영역을 확인하는 학습은 0 또는 1로 설정하여 unipolar sigmoid 활성화 함수를 이용하여 학습을 하는 BP알고리즘을 이용하고자 함.

BP 알고리즘의 설계의 일환으로 초기 연결강도 설정을 위하여 D. Nguyen, B. Widrow의 연구에 따라 초기 연결강도는 $w = -0.5 \sim +0.5$, $v = -0.5 \sim +0.5$ 로 설정하며, v 는 학습 시작 시 다음의 식에 의해 변형됨.

$$v^{new} = \frac{\beta v^{old}}{\|v^{old}\|}, \beta = 0.7^n \sqrt{p} \quad \text{수식 93}$$

n = 입력층의 뉴런수

p = 은닉층의 뉴런수

은닉층의 뉴런수를 결정하기 위하여 G. Mirchandini, W. Cao의 연구에서 입력 패턴 공간이 n 차원이고, 은닉층의 뉴런수가 p 이면 선형 분리 가능한 영역의 최대수 M 은 다음의 식으로 구할 수 있음.

$$M = \sum_{k=0}^n {}_p C_k \quad \text{수식 94}$$

단, $k < p$

만약 $n \geq p$ 라면

$$M = {}_p C_0 + {}_p C_1 + \dots + {}_p C_p \quad \text{수식 95}$$

$$= 2^p$$

따라서, 선형 분리 가능한 영역의 문제를 해결하기 위한 은닉층의 뉴런수 p 는

$$p = \log_2^M \quad \text{수식 96}$$

학습률은 다음과 같이 설정함.

$$a = 0.001 \sim 0.1$$

학습 패턴의 수는 E. Baum, D. Haussler의 연구에서 연결 강도의 수 N , 정확도 a 일 때 학습 패턴의 수 P 는 다음의 식으로 구하고 있음.

$$P = \frac{N}{1-a}$$

일반적으로 양극성 데이터를 사용하면 이진 데이터를 사용하는 경우보다 학습이 빠름.

BP학습 시 오차 신호에 의하여 연결강도를 변화하는데 학습률을 작게 설정 할 경우 연결강도 변화량이 줄어들어 학습이 느려짐. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 연결강도 변화 시 이전 학습 단계의 변화량을 보조적으로 활용하여 학습이 느려지는 것을 방지하고자 함.

$$\Delta v^k = \alpha \delta_z x^k + \beta \Delta v^{k-1}$$

$$\Delta w^k = \alpha \delta_y z^k + \beta \Delta w^{k-1}$$

a, b는 각각 학습률과 모멘텀 상수. δ_z, δ_y 는 각각 은닉층과 출력층의 오차신호. 모멘텀 상수는 일반적으로 0~0.8

구현 된 BP 알고리즘이 제대로 실행되는지 확인하기 위하여 학습 입력 패턴 [0 1], 목표치 1 을 입력하고 초기 연결강도 $v = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$ $w = [0.1 \ 0.2 \ 0.2]$ 로 설정하고 최대 오차 $E_{max} = 0.01$, 학습률 1일 때 단극성 시그모이드 함수를 사용하여 그 결과를 확인하였음.

그 후, 모멘텀 BP 알고리즘을 추가하고 그 결과를 비교함. 결과를 비교하기 위하여 기본 BP 알고리즘을 수행하였을 때 학습 횟수는 22회였고 오차의 변화는 다음의 그래프와 같이 나타남.

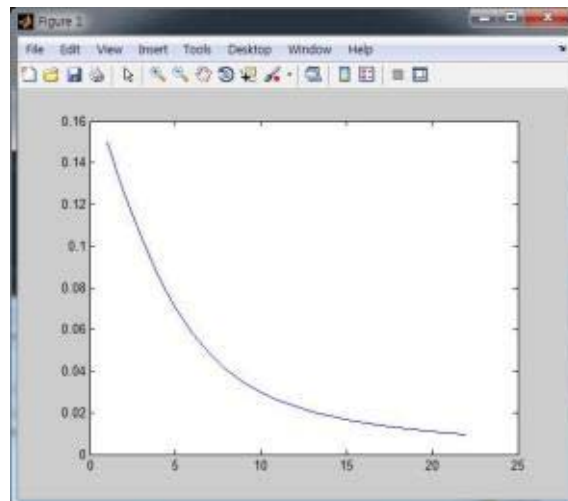


그림 742 일반 BP알고리즘의 오차 변화

모멘텀 BP 알고리즘으로 같은 조건에서 학습을 수행 한 결과 학습 횟수는 7회였고 다음의 그래프와 같은 오차 변화가 나타남. 그래프에서 나타나는 오차 변화 경향은 초기 변화량이 일반 BP가 급격히 줄어드는 것으로 보임.

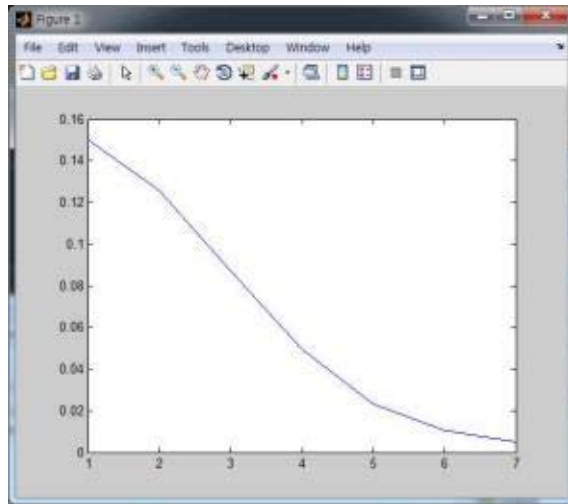


그림 743 모멘텀 BP 알고리즘의 오차 변화

하지만 두 그래프를 직접 비교하였을 때는 오차 변화량은 모멘텀 BP 알고리즘이 더욱 크게 나타남을 확인 할 수 있었음.

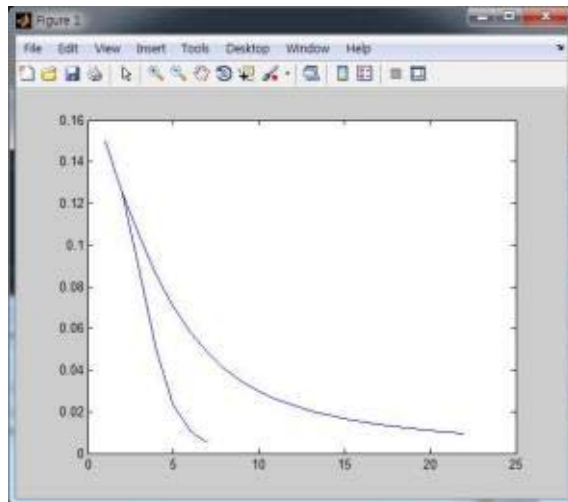


그림 744 각 알고리즘의 오차 변화 비교

위의 과정은 모두 unipolar sigmoid 함수를 이용하여 수행된 결과이며 앞서 언급하였듯이 bipolar sigmoid 함수를 사용하면 그 학습 횟수를 줄이는데 도움이 되기 때문에 bipolar sigmoid 함수를 활성화 함수로 하여 그 결과를 확인함. 학습 횟수는 5회로 가장 적은 횟수로 학습에 성공함.

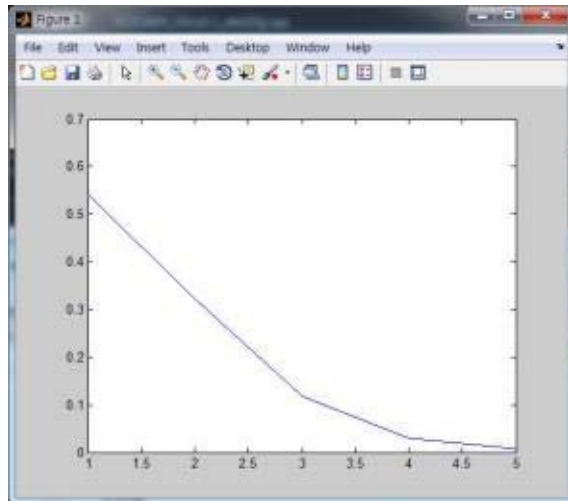


그림 745 Bipolar sigmoid 함수를 이용한 BP 알고리즘의 학습 오류 변화

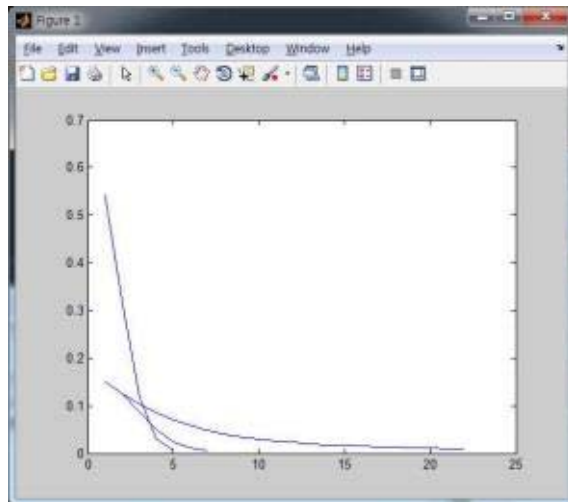


그림 746 각 알고리즘의 학습 오류 변화 비교

bipolar 활성화 함수의 경우 첫 학습 시 오차의 크기가 크게 나타나지만 오차의 변화량이 커서 빠르게 학습이 완료 된 것을 확인 할 수 있음. 추가적으로 bipolar 활성화 함수로 기존의 BP 학습을 수행한 결과 21회의 반복을 통해 학습이 완료됨.

또한, 초기 연결강도 설정에 대한 D. Nguyen, B. Widrow의 연구에 따라 초기 연결강도 v 를 설정한 후 학습 한 결과 학습 횟수를 4회로 줄일 수 있었음.

○ 적합한 파프리카 수확을 위한 파프리카 인식 시스템 개발

- 정상 파프리카 선별 소프트웨어 제작

추출된 영역을 확인하는 과정을 수행하기 위하여 영상에서 종횡비와 픽셀의 수를 확인하였다. 그림 747는 350~600mm의 거리에서 획득한 영상에 존재하는 파프리카 150개를 대상으로 파프리카의 화소 수를 확인 한 결과이며 최소 31,392 화소, 최대 380,219 화소로 나타났다. 따라서 라벨링 과정에서 노이즈 제거를 위한 화소 수 임계값을 30000개로 설정하였다.

또한, 150개의 파프리카를 통하여 영상에 나타나는 종횡비를 확인한 결과는 그림 748, 742와 과 표 133와 같다. 따라서 ROI로 추출된 영역의 x축 길이가 $100 < x < 700$, y축 길이가 $100 < y < 800$ 의 범위 내에서 종횡비가 $0.6 < \text{ratio} < 1.2$ 이하인 영역을 파프리카 영역으로 검출 하도록 하였다.

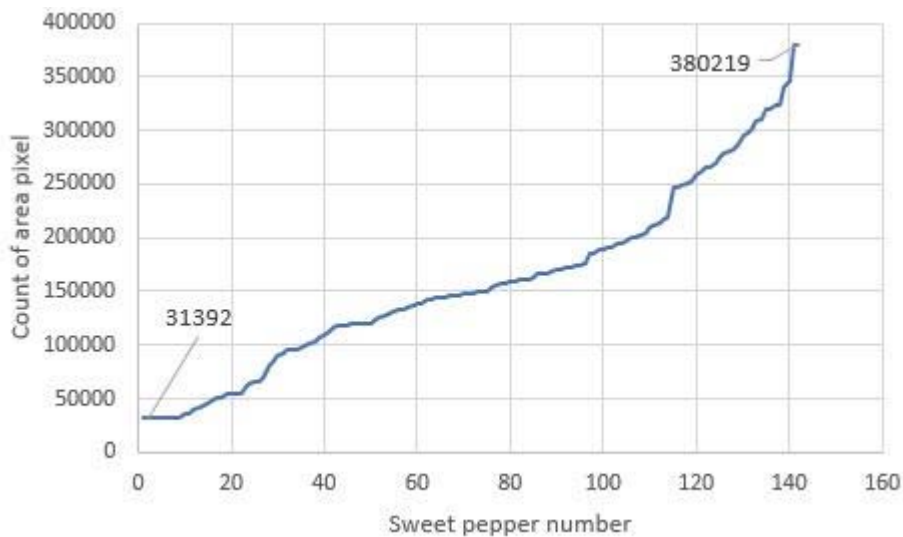


그림 747 Pixel area of sweet-pepper in image.

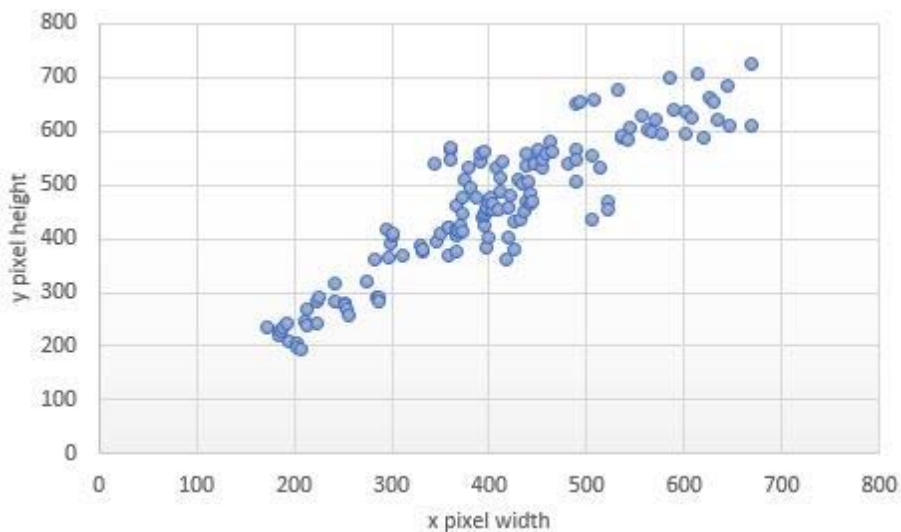


그림 748 Width and height of sweet-peppers in images.

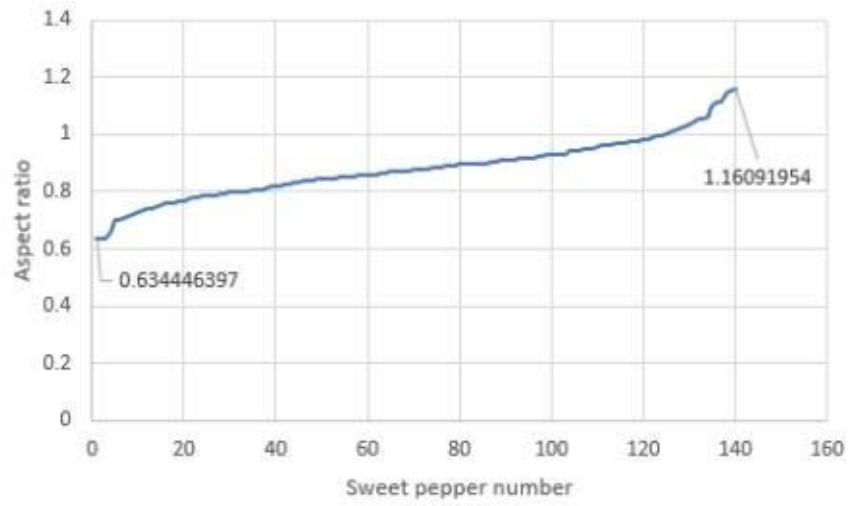


그림 749 Aspect ration of sweet-peppers in images.

	x length	y length	Ratio
Average	387.54	442.39	0.88
Min	129	152	0.63
Max	669	724	1.16

표 133 Aspect ratio of sweet-peppers in images.

1. BP 알고리즘 학습을 통한 파프리카 영역 추출

$$v^{new} = \frac{\beta v^{old}}{\|v^{old}\|}, \beta = 0.7^n \sqrt{p} \quad \text{수식 100}$$

여기서, n = 입력층의 뉴런수, p = 은닉층의 뉴런수

초기 연결강도 설정을 위하여 D. Nguyen와 B. Widrow의 연구에 따라 초기 연결강도는 $w = -0.5 \sim +0.5$, $v = -0.5 \sim +0.5$ 범위의 값으로 초기 설정하며, v는 학습 시작 시 식(100)에 의하여 초기화 된다.

$$M = \sum_{k=0}^n {}_p C_k \quad \text{수식 101}$$

은닉층의 뉴런수를 결정하기 위하여 G. Mirchandani와 W. Cao의 연구를 참고하여 입력 패턴 공간이 n 차원이고, 은닉층의 뉴런수가 p이면 선형 분리 가능한 영역의 최대수 M을 식 (101)로 구하였다.

$$\begin{aligned} M &= {}_p C_0 + {}_p C_1 + \dots + {}_p C_p \quad \text{수식 102} \\ &= 2^p \end{aligned}$$

단, k가 p보다 작고 n이 p보다 크거나 같다면 식 (102)와 같다.

$$p = \log_2^M \quad \text{수식 103}$$

따라서, 선형 분리 가능한 영역의 문제를 해결하기 위한 은닉층의 뉴런수 p는 식 (103)으로 구할 수 있다. 학습률 a는 0.001~0.1의 범위 내에서 변경하며 학습의 진행 정도를 참고하여 설정하였다. 학습 시 학습률의 크기가 너무 작을 경우 지역 국소점(Local minima)에 쉽게 빠지고 반대로 너무 큰 경우 발산할 가능성이 높기 때문에 학습 시 변경하며 확인할 필요가 있다. 학습 패턴의 수는 E. Baum, D. Haussler의 연구에서 연결 강도의 수 N, 정확도 a일 때 학습 패턴의 수 P는 식(104)을 통하여 구하고 있다.

$$P = \frac{N}{1-a} \quad \text{수식 104}$$

일반적으로 양극성 시그모이드 함수를 사용하면 이진 데이터를 사용하는 경우보다 학습이 빠르지만, 본 연구에서는 양극성 시그모이드 함수를 사용하지 않고 단극성 시그모이드 함수를 사용하였다. 그 이유는 입력으로 전달되는 영상 정보의 크기가 0~255의 크기로 정규화 되어 있기 때문이다.

BP학습 시 오차 신호에 의하여 연결강도를 변화하는데 학습률을 작게 설정 할 경우 연결강도 변화량이 줄어들어 학습이 느려진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 연결강도 변화 시 이전 학습 단계의 변화량을 보조적으로 활용하여 학습이 느려지는 것을 방지하고자 하는 알고리즘을 모멘텀 BP 알고리즘이라 일컫는다.

$$\begin{aligned} \Delta v^k &= \alpha \delta_z x^k + \beta \Delta v^{k-1} \\ \Delta w^k &= \alpha \delta_y z^k + \beta \Delta w^{k-1} \quad \text{수식 105} \end{aligned}$$

식(105)에서 α , β 는 각각 학습률과 모멘텀 상수를 의미하며 δ_z, δ_y 는 각각 은닉층과 출력층의 오차신호를 의미한다. 모멘텀 상수는 일반적으로 0~0.8로 설정하는데 본 연구에서는 0.8로 설정하였다.

BP 알고리즘 학습을 위하여 사용된 입력 값은 R, G, B, H, S, Y, Cb, Cr의 8가지 색상 정보를 사용하였다. 출력 기대 값은 붉은색 파프리카 일 경우 [0 0 1], 노란색 파프리카 일 경우 [0 1 0], 그 외의 경우 [1 0 0]으로 설정하였다. 추출된 색상 정보는 총 204800개의 픽셀을 이용하였고 학습에 사용된 픽셀 수는 184320개가 사용되었다. 나머지 10%는 학습 결과를 확인 하는데 사용되었고 학습 결과가 99% 이상인 경우 학습을 종료 하도록 하였다.

학습 결과를 확인하기 위하여 학습된 가중치 v, w 를 이용하여 입력 층을 통해 전달되는 영상 정보가 출력 층에서 활성화 되는 경향을 영상으로 출력하도록 하였다. 출력 층 활성화 상태가 [0 0 1]인 경우 영상에서는 붉은색 픽셀로, [0 1 0]인 경우 노란색 픽셀로 그 외의 경우 녹색 픽셀로 출력하도록 하였다. 출력된 활성화 영상과 입력된 파프리카 재배 환경 영상을 비교하여 파프리카 영역의 활성화 상태를 확인하였다. 또한, 입력 영상이 활성화 영상으로 바뀌는데 소요되는 시간을 측정하였다.

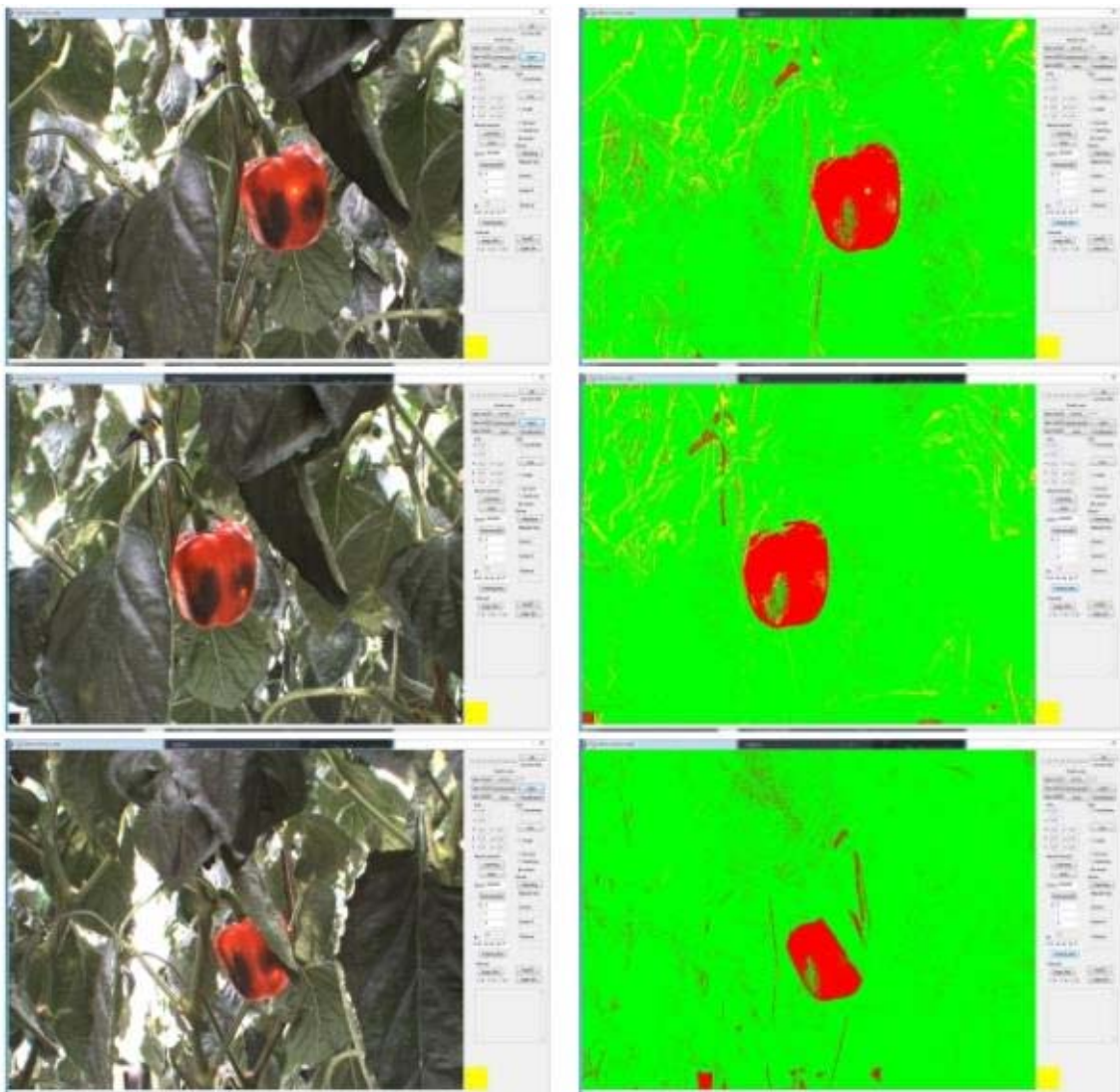


그림 750 Activation images using neural network(red sweet-pepper).

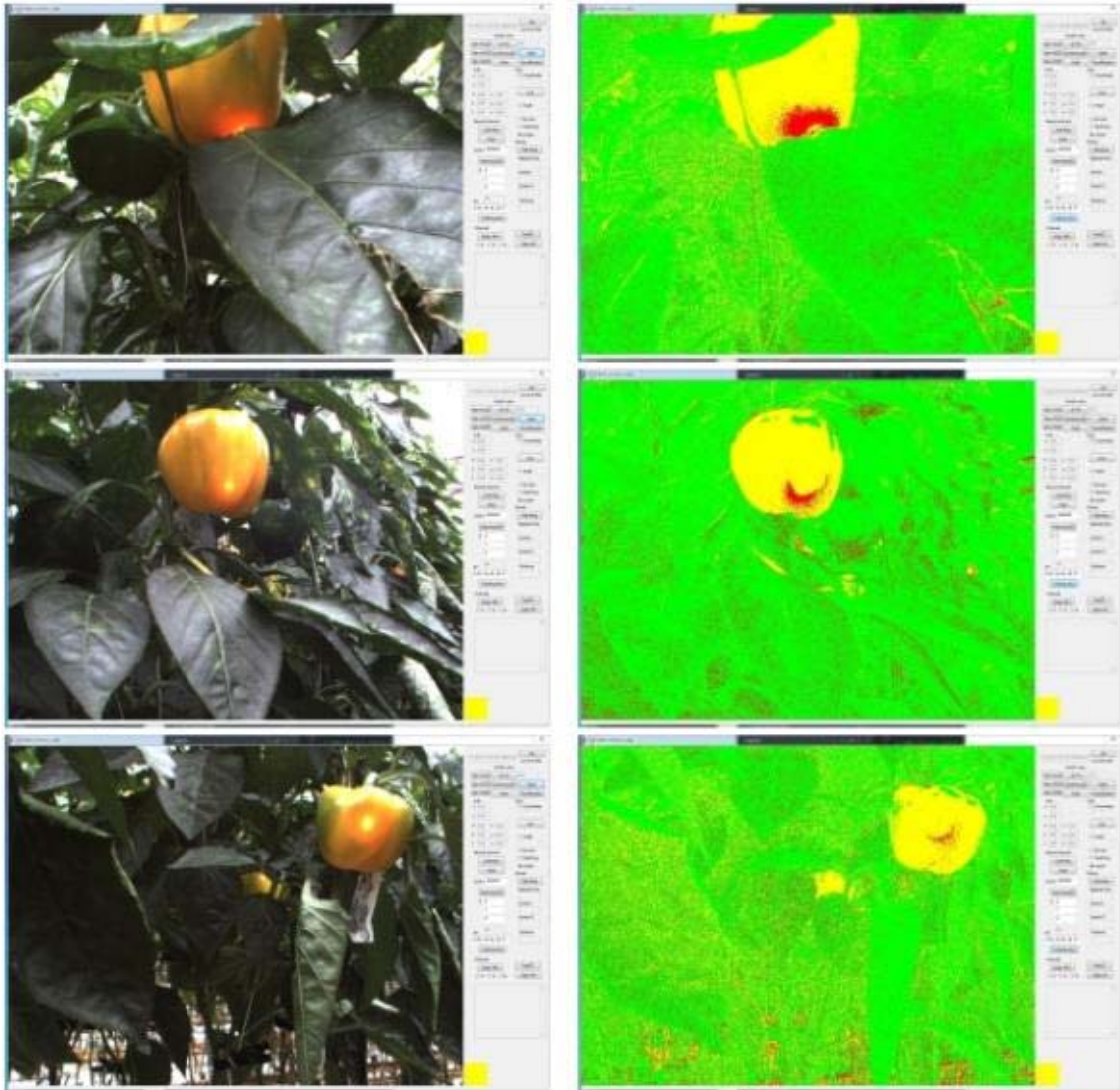


그림 751 Activation images using neural network(yellow sweet-pepper).



그림 752 Extracted sweet peppers.

붉은색, 노란색 파프리카와 잎 영역의 H, S, Y, Cb, Cr, R, G, B를 입력으로 BP 학습을 수행하였다. 가중치는 은닉층 1개, 은닉층 뉴런수 3개, 최대 오차 0.05, 학습률 0.01, 모멘텀 상수 0.8로 설정하고 100만회의 학습을 통하여 계산하였다.

그림 750, 751는 인공 신경망을 통하여 파프리카 영역을 추출한 결과 영상이다. 학습한 v , w 값을 이용하여 계산된 출력 값을 붉은색, 노란색, 녹색 픽셀로 나타낸 것으로 여기서 붉은색 픽셀은 붉은 파프리카 영역으로 인식되는 픽셀이며, 노란색은 노란색 파프리카, 녹색은 그 외의 영역으로 인식되는 픽셀을 의미한다. 조명에 의해 발생하는 반사, 그림자와 같은 본연의 색상을 추출하기 어려운 영역에서 많은 노이즈가 발생하지만, 실제 파프리카 영역은 선명하게 추출되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 752는 그림 750, 751의 우측 영상을 이용하여 노이즈를 제거하고 파프리카 영역만을 남긴 후 해당 영역을 녹색 사각형으로 표시한 것이다.

2. 심층 신경망 학습을 통한 파프리카 영역 추출

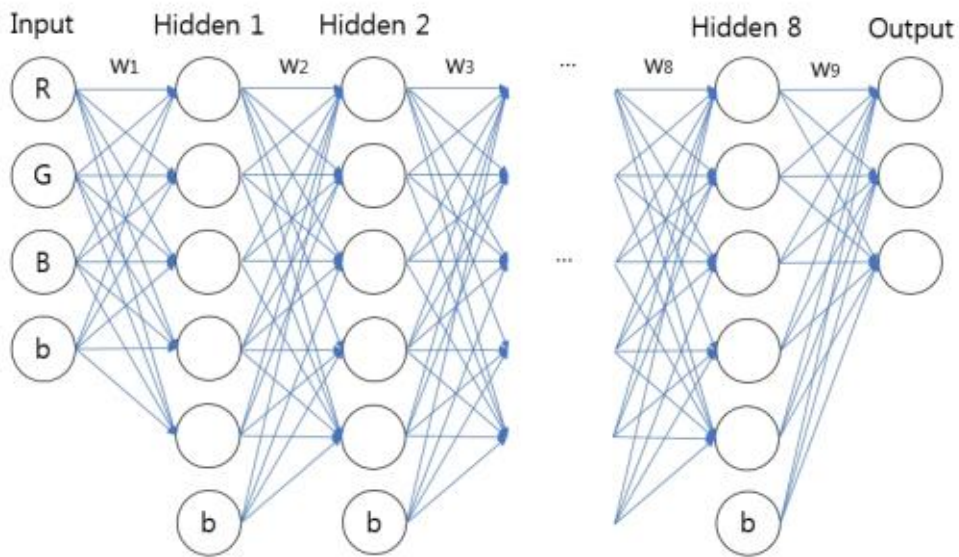


그림 753 Design of deep neural network with 8 hidden layers.

심층 신경망을 구현하기 위하여 그림 753과 같이 최대 8개의 은닉층을 갖고 각 은닉층은 5개의 뉴런을 갖도록 설계하였다. 학습을 위한 입력 셋은 RGB 정보만을 입력하였고, 출력은 BP 학습과 동일하게 3개의 출력 뉴런을 이용하였다. 가중치는 w1부터 w9까지 최대 9개의 가중치 행렬이 존재하며 각 가중치는 Xavier 초기화 알고리즘을 이용하여 초기화 되었다. 활성화 함수는 ReLU 함수를 사용하였으며 출력은 Softmax 알고리즘을 이용하였다. 학습률은 0.00005~0.01 범위에서 변경하며 결과를 확인하였다.

심층 신경망 학습은 붉은색, 노란색, 그 이외의 영역에 대하여 RGB 정보를 입력으로 하여 수행되었다. 실험 시 학습이 10만회를 넘는 경우 발산하여 학습이 완료되지 않았기 때문에 최대 학습 회수는 20만으로 제한하고 학습률은 0.0005~0.01까지 변화하며 학습을 수행하였다. 은닉층 수는 3개부터 최대 8개까지 증가 시키며 학습을 시도하였으며 총 100회의 학습 시도 중 학습률이 90% 이상인 학습은 24회였다.

NO.	Training set (ea)	Test set (ea)	Hidden layers (ea)	Learning rate	Training accuracy (%)	Test accuracy (%)	Processing time(ms)
1	3538	30	8	0.001	99.95	100	36715
2	3538	30	7	0.001	99.0	100	34120
3	3538	30	6	0.0005	99.95	100	41017
4	3538	30	5	0.0005	99.95	100	38873
5	4404	46	5	0.001	98.59	100	25925
7	7866	84	5	0.001	99.16	100	26211
8	7866	84	3	0.001	93.12	96.43	19902

표 134 Training conditions.

표 134는 성공한 학습 중 대표적인 학습 조건을 나타낸 것이다. 학습률은 0.001이 가장 적절 하였으며 이보다 낮은 경우 학습이 느려지거나 지역 최소점(Local minima)에 빠져 학습이 진행되지 않는 경우가 발생하였다. 또한, 학습률이 클 경우 비용 함수의 출력이 0에 수렴하지 못하고 발산하여 학습이 불가능한 경우도 발생하였다. 은닉층의 수는 최소 3개까지 학습에 성공하였으나 학습률은 상대적으로 낮았다. 은닉층의 수가 많을수록 학습이 성공적으로 이루어졌지만 학습 시간과 테스트에 소요되는 시간이 증가하였다.



그림 754 Activation images using Deep neural network.

3. CNN 학습을 통한 파프리카 인식

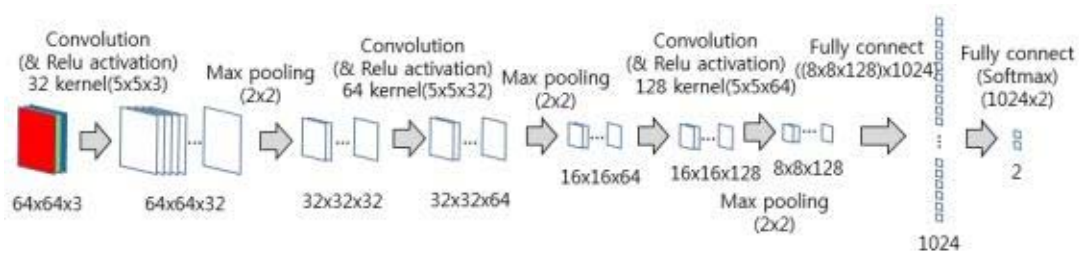


그림 755 Deep neural network.(CNN)

CNN 학습을 위하여 그림 755와 같은 형태의 신경망을 설계하였다. 64×64 크기의 RGB 영상을 각각의 채널로 구분하고 각 입력에 대해 32개의 5×5 커널을 적용(Convolution)하여 피쳐맵을 생성하고 2×2 최대값 추출(Max pooling) 과정을 통해 피쳐맵을 축소한다. 해당 과정에서 영역 내에서 가장 큰 활성화 값을 추출하여 두드러지는 특징을 추출한다. 컨벌루션과 맥스 풀링 과정을 거치면서 피쳐맵의 크기는 반복적으로 줄어들어 최종적으로 분류기의 입력 뉴런과 같은 형태가 되면 학습을 수행한다. 학습 과정에서 발생하는 오차 신호를 통하여 층들 간의 가중치가 학습된다.

	Train image	Test image	Total
Sweet-pepper	300	100	400
etc.	200	0	200

표 135 Number of 64×64 images.

표 135과 같이 파프리카 재배 영상으로부터 400개의 파프리카 및 200개의 파프리카 이외의 영상을 추출하여 학습에 사용하였다.

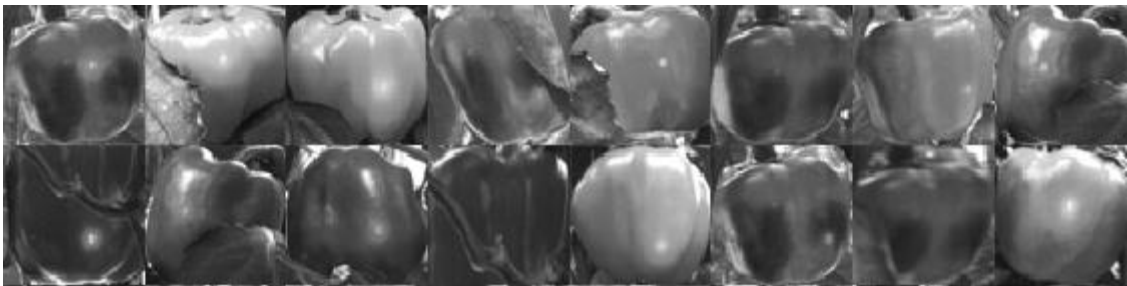


그림 756 64×64 sweet-pepper intensity images for training.

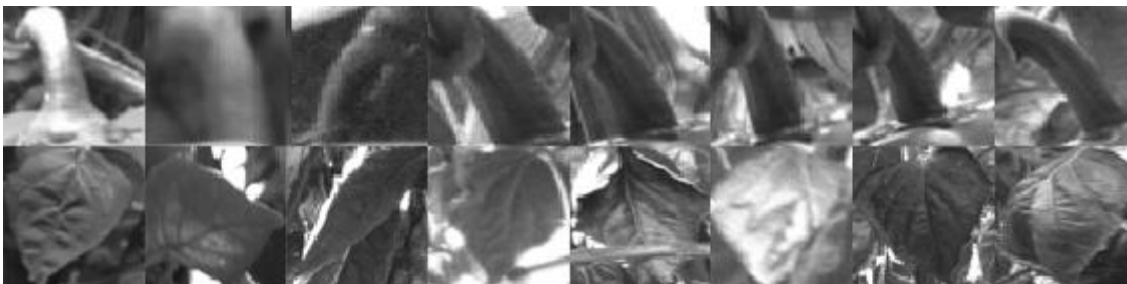


그림 757 64×64 non sweet-pepper intensity images for training.

그림 756은 학습을 위하여 추출된 64×64 크기의 파프리카의 명도 영상이며 그림 757은 파프리카와 대조되는 영역을 파프리카 이 외의 영상에서 추출한 것이다. 파프리카 이외의 영역은 과병, 잎 영역에서 200개 추출하여 학습하고 학습 결과는 100개의 파프리카 영상을 이용하여 학습 확인 하였다.

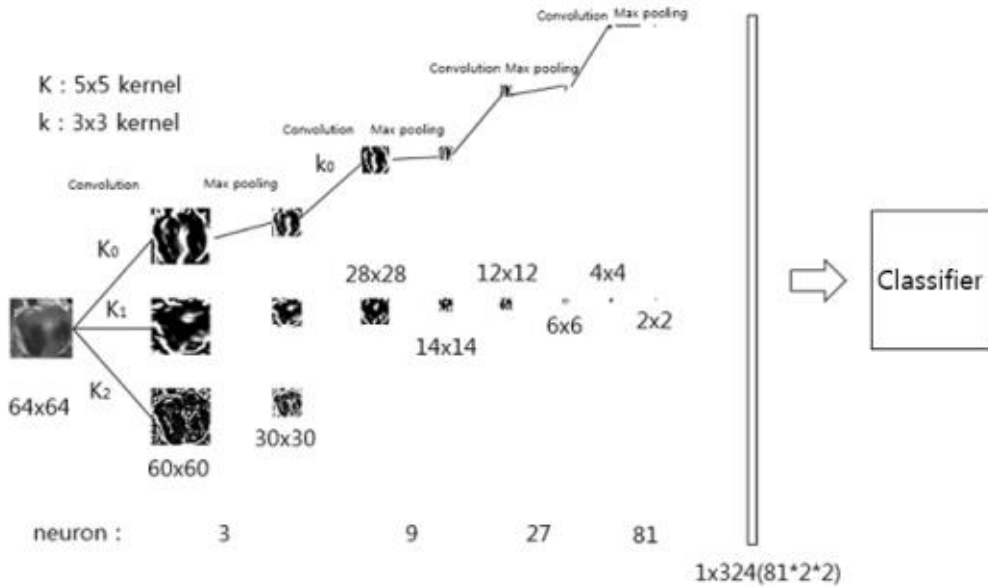


그림 758 Diagram of CNN.

CPU를 이용하여 CNN 학습을 수행하였다. 영상에서 파프리카 영역과 그 외의 영역을 64×64 크기로 추출한 후 학습을 수행하였다. 학습량을 줄이기 위하여 명도 영상을 이용하였다.

그림 758은 본 연구에서 5×5 , 3×3 커널을 가중치로 이용하여 컨벌루션하고 맥스 풀링을 통해 분류기에 입력하기 위한 1×324 크기의 입력 셋으로 변환하는 과정을 간략하게 나타낸 것이다.

표 136는 학습 결과를 확인 한 것이다. Softmax 알고리즘을 이용하였기 때문에 결과는 확률로 표현된다. 우측 하단의 잎 영상은 파프리카로 인식되었다. 학습에 사용되지 않은 100개의 파프리카 영상을 이용하여 학습 결과를 검증하였다. 검증 결과 100개의 파프리카 영상 중 79개를 파프리카로 인식하였고 21개의 인식에는 실패하였다.

Sweet-pepper	0.65	0.57	0.72	0.71	0.61	0.59
etc.	0.35	0.43	0.28	0.29	0.39	0.41
Sweet-pepper	0.27	0.45	0.41	0.38	0.49	0.52
etc.	0.73	0.55	0.59	0.62	0.51	0.48

표 136 Examples of CNN test result.

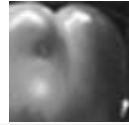




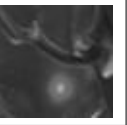
						
Sweet-pepper	0.50	0.40	0.49	0.39	0.45	0.49
etc.	0.50	0.60	0.51	0.61	0.55	0.51

표 137 Examples of failed result using part image of sweet-peppers.

표 137는 인식에 실패한 파프리카 영상과 확률을 표현한 것이다. 파프리카의 부분 영상의 경우 인식률이 좋지 못하였다. 영상에서 파프리카 영역을 어떻게 분할하는가 하는 것이 인식에 큰 영향을 주는 것으로 사료된다. 본 알고리즘을 수행하기 위하여서는 영상 분할이 먼저 수행 되어야 하는데 해당 과정을 통하여 91.8% 파프리카를 인식 할 수 있었기 때문에 CNN을 위해 영상 분할을 하는 것은 비효율적이다. 또한 본 시스템에서는 GPU를 사용하고 있지 않기 때문에 연산량이 많은 CNN의 적용은 바람직하지 않다고 판단하였다. 하지만 추후 시스템의 성능을 높인다면 Ren에 의하여 제안된 영상 분할 과정을 포함하고 있는 Faster R-CNN을 이용하여 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 해당 알고리즘은 Region proposal 이라는 과정을 학습을 통하여 수행하여 영상 분할과 인식을 동시에 수행하기 때문에 인식 성능 향상에 도움이 될 것이라 사료된다.

4. 주성분 분석을 이용한 ROI 추출

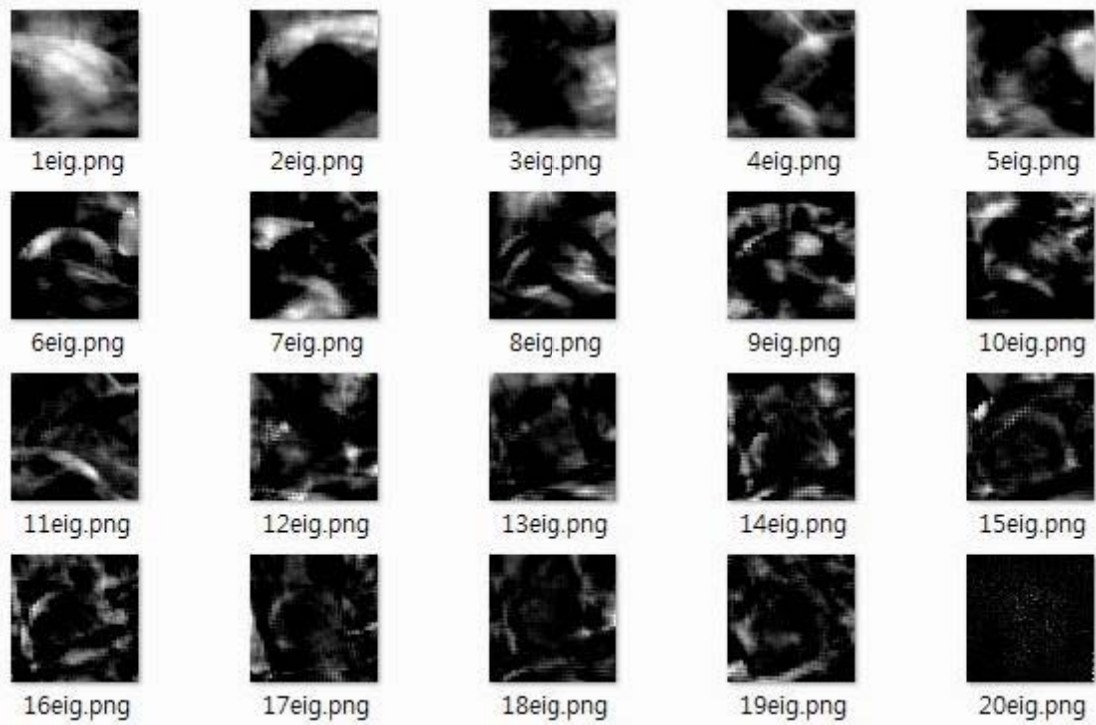


그림 759 Eigenvector images according to k number

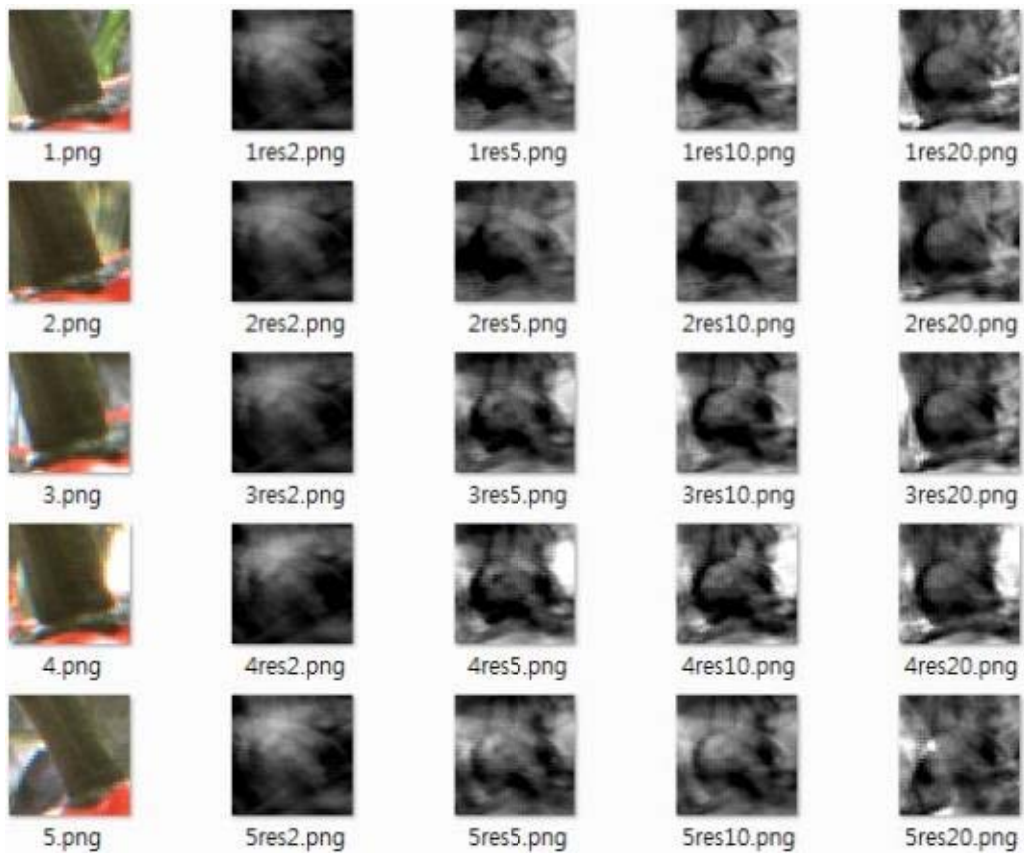


그림 760 Restored images(1~5) using number of k eigenvector.

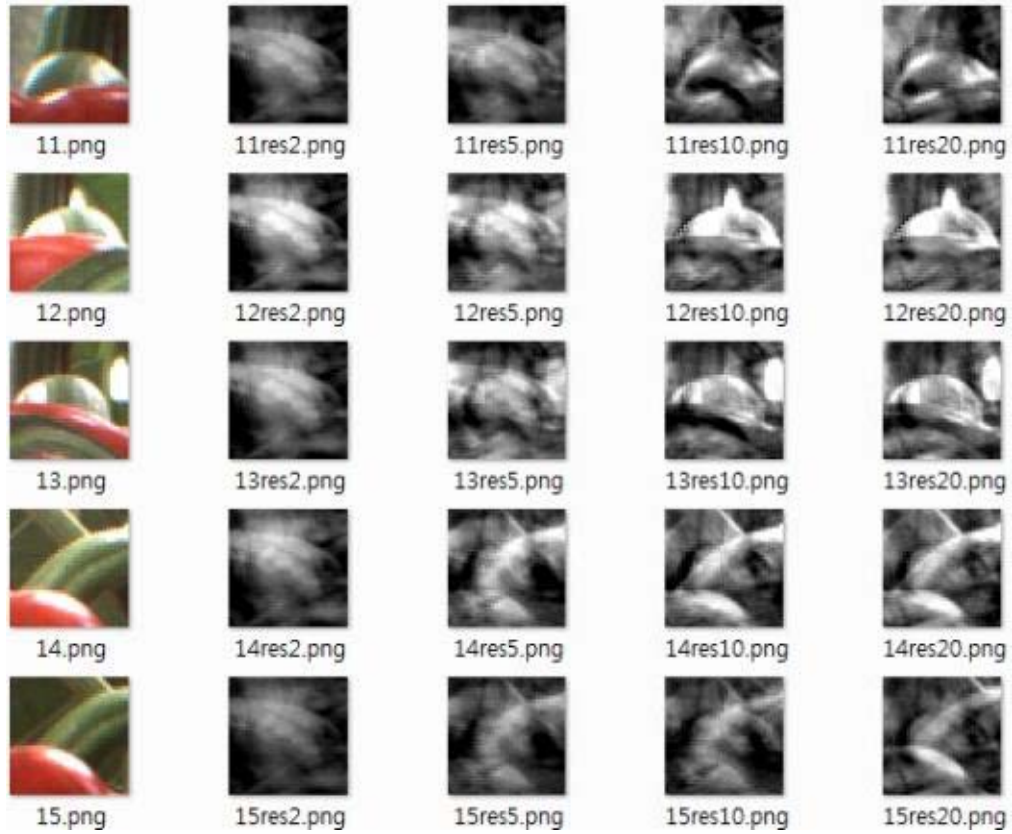


그림 761 Restored images(11~15) using number of k eigenvector.

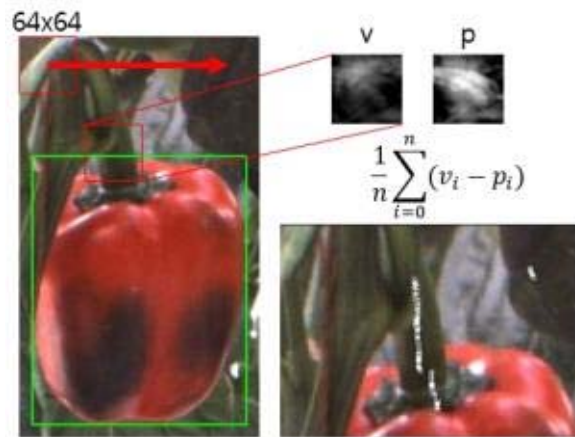


그림 762 Peduncle region detection algorithm using PCA result.

파프리카 과병 영역 영상의 PCA를 수행하기 위하여 20개의 64×64 명도 영상을 획득 한 후 각 영상을 1차원 배열로 저장하였다. 그 후 20×(64×64) 크기의 행렬의 공분산을 구하고 해당 공분산 행렬의 고유 벡터를 구하였다.

그림 759는 1번부터 20번까지의 고유 벡터를 영상으로 나타낸 것이다. k가 낮을수록 과병 영상의 공통된 요소가 나타나고 높아질수록 세부적인 차이들이 나타난다. 가장 끝의 k가 20인 영상은 노이즈 정보를 나타낸다. 따라서 후반부 벡터들을 제거하고 전반부 벡터 k개를 이용하여 데이터를 표현하면 원 데이터와 가까운 값으로 나타난다. 즉, k의 값이 커질수록 원본의 영상과 유사해지고(복원됨) k가 작아질수록 공통의 특성이 나타나는 결과를 얻을 수 있다.

그림 760, 761은 입력 영상과 주성분 벡터 중 k번째 벡터까지 이용하여 영상을 복원한 것을 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 k의 값이 작을수록 공통된 형태를 보이며 k가 높을수록 원본의 영상과 유사해지는 것을 확인 할 수 있다.

파프리카 과병 부위의 PCA결과를 이용하여 과병의 위치를 찾고자 하였다. 먼저, PCA를 통하여 구해진 과병의 주성분 벡터로 이루어진 영상과 입력 영상의 PCA 영상의 차이를 통하여 과병의 위치를 검출하는 알고리즘을 구현하고 수행하였다. 그림 762은 과병 위치 검출 알고리즘을 보여주고 있다. 파프리카 영역으로 추출된 영역의 상단 200pixel 영역에서 64×64 화소의 윈도우를 이용하여 x축 방향으로 영상을 입력하며 과병의 주성분 벡터 영상과 비교를 하며 가장 그 차이가 적은 영역의 중심을 표시한다. 이러한 과정을 y축을 따라 수행함으로써 각 y축에서 가장 과병에 유사한 영역을 추출한다.

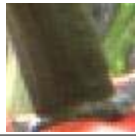
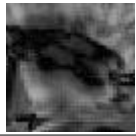
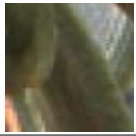

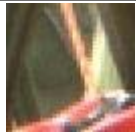
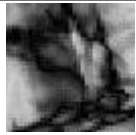


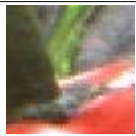
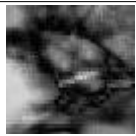

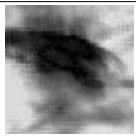
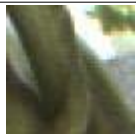


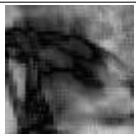



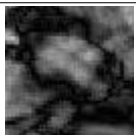
NO.	Input	Output	Average	NO.	Input	Output	Average
1			71	6			86
2			86	7			85
3			78	8			128
4			86	9			81
5			67	10			60

표 138 Example results of average intensity difference between eigenvector images.

Sa의 연구에서는 파프리카의 수확을 위하여 색상과 3차원 정보를 이용하여 과병영역을 인식하고자 하였다. 본 연구에서는 과병을 인식하기 위하여 파프리카 과병 부위의 명도 영상을 64×64로 추출한 후 해당 영상을 주성분 분석하였다. 이를 통하여 구해진 주성분 벡터로 이루어진 영상과 입력 영상의 차이를 통하여 과병의 위치를 추측하고자 하였다.

표 138은 입력 명도 영상의 역을 이용하여 고유 벡터 영상과 차영상 하였을 경우 평균 명도 값을 나타낸 것이다. 차이가 적을수록 명도 값은 낮게 나타난다는 것을 이용하여 고유 벡터 영상과 가장 유사한 영역을 추출하였다.



그림 763 Result images of peduncle extraction algorithm using PCA.

또한, 과병의 경우 영상에서 수직 방향으로 존재하는 경향이 강하기 때문에 y축을 기준으로 한 검색 알고리즘을 수행하여 그림 763과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

과병 추출 알고리즘을 이용하여 추출된 과병 예상 영역을 흰색 픽셀로 표현한 영상을 나타낸 것이다. 영상에서 확인 할 수 있는 것은 과병 영역에서 나타나는 흰색 픽셀이 강하게 나타나며 과병 뿐 아니라 줄기, 잎 등에서도 나타남을 확인 할 수 있다. 특히, 과병이 수직 방향으로 나타나지 않는 경우에는 과병 보다 줄기에서 강하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

	0~30°	30~60°	60~90°	Total
peduncle (%)	14.7	49.46	87.01	50.39
stem (%)	76.22	47.51	10.54	44.76
etc. (%)	9.08	3.03	2.45	4.85
NO. (ea)	10	33	27	70

표 139 Peduncle extraction algorithm results.

표 139은 전체 70개의 과병이 존재하는 영상을 이용하여 알고리즘을 수행한 후 과병의 각도에 따라 과병 화소로 추출된 좌표가 어디에 존재하는지를 나타낸 것이다. 추출된 영역이 과병, 줄기, 그 외의 영역인지를 %로 나타내었다. 가장 많은 빈도수로 나타나는 과병의 기울기는 30~60°였으나 해당 각도에서 과병의 추출 성공률은 49.46%로 50%에 못 미쳤다. 이는 수직 방향으로 존재하는 줄기 영역과 실제 과병 영역의 구분이 어렵기 때문인 것을 확인 할 수 있다. 제안한 알고리즘을 이용하여 과병을 절단 하는 방식의 수확은 불가능 하다고 판단된다. 따라서 과병 영역 추출을 위하여 PCA를 사용하는 알고리즘을 본 시스템에 적용하는 것은 불가능 하였다.

5. GLCM을 이용한 ROI 추출



그림 764 Original RGB image.

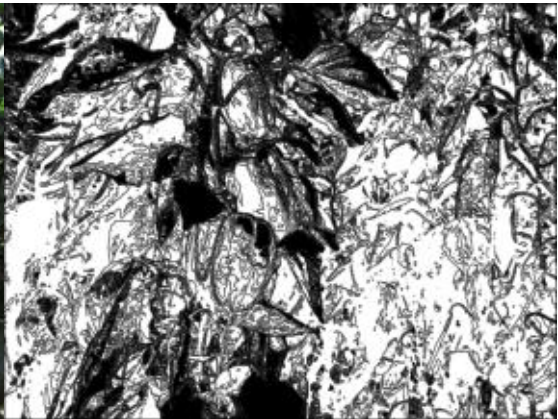


그림 765 ASM texture.

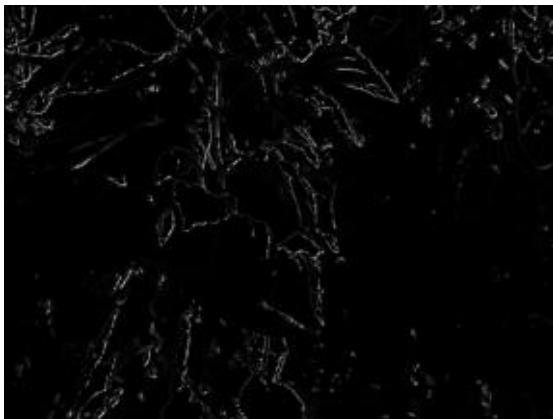


그림 766 Contrast texture.

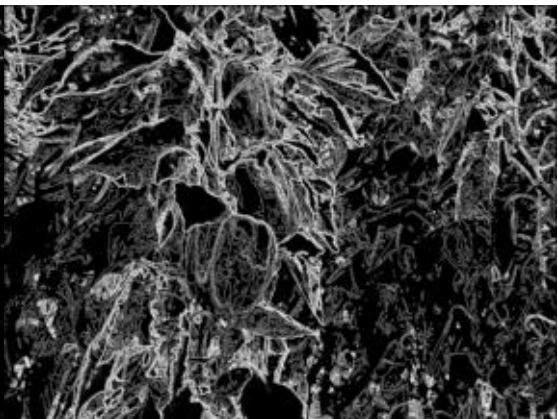


그림 767 Entropy texture.



그림 768 Mean texture.

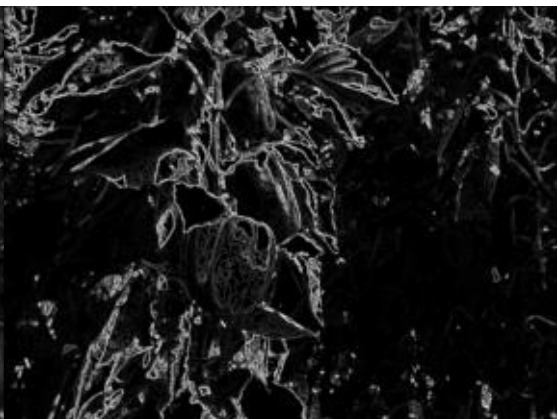


그림 769 Variance texture.

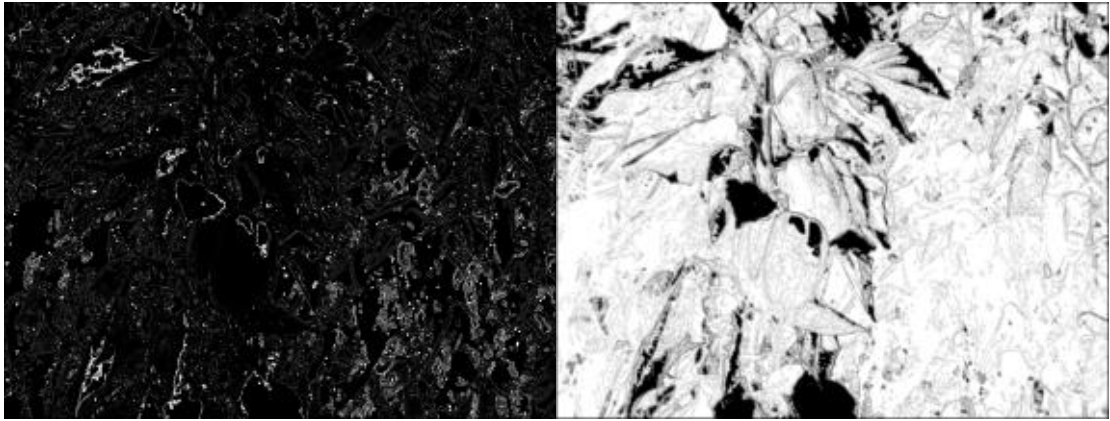


그림 770 Correlation texture.

그림 771 IDM texture.

	Peduncle		Leaf	
RGB				
ASM				
Contrast				
Entropy				
Mean				
Var				
Cor				
IDM				

표 140 GLCM feature images of peduncle and leaf.

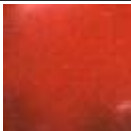


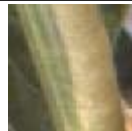

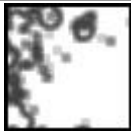
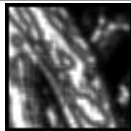
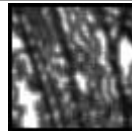
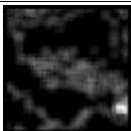
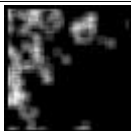


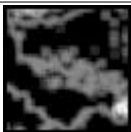
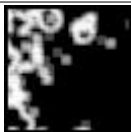

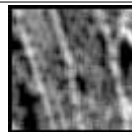



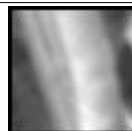
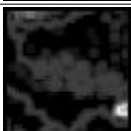


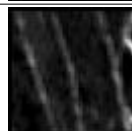


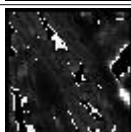





	Fruit		Stem	
RGB				
ASM				
Contrast				
Entropy				
Mean				
Var				
Cor				
IDM				

표 141 GLCM feature images of sweet-pepper and stem.

GLCM(Gray Level Co-occurrence Matrix)을 이용하여 영상의 질감(texture) 특징을 구하고자 하였다. 영상에 존재하는 파프리카와 잎, 줄기 등은 서로 다른 질감의 특징을 가지고 있을 것으로 추측하여 해당 결과를 파프리카 및 과병을 인식하는데 사용하고자 하였다. GLCM 특징 중 ASM(Angular second moment, Contrast), Entropy, Mean, Variance, Correlation feature, IDM(Inverse difference moment) 7가지 특징이 과실, 과병, 줄기, 잎에서 어떠한 형태로 나타나는지 확인하고 분석하였다. 표 140, 141는 과병, 잎, 과실, 줄기의 64×64크기의 영상을 추출하고 7가지 질감 특징 영상으로 변환한 것의 예를 보여준다.

파프리카 재배 환경 영상에서 과병, 잎, 줄기, 파프리카 영역을 64×64 크기의 2차원 영상 행렬로 저장한 후 해당 영상의 명도(intensity) 값을 이용하여 7가지 GLCM 특징을 계산하였다.

그림 765는 그림 764의 GLCM map을 통해 ASM(Angular Second Moment) 질감을 영상으로 표시한 것이다. 같은 과정을 통하여 대조, 엔트로피, 평균, 분산, 상관도, IDM(Inverse Difference Moment) 질감 영상을 구하였다.

영상을 확인한 결과 과실, 과병, 줄기, 잎에서 질감 특성이 뚜렷하게 나타나는 영상은 ASM, 엔트로피, IDM 세 가지로 각각의 질감 영상을 분석하여 비교하였다. 각 50장의 질감 영상에서 부위별 100개의 영역을 추출하여 해당 패치의 평균을 구하여 히스토그램 분석을 수행하여 차이를

확인 하고자 하였다. 각 영상 패치는 영상에 나타나는 영역의 크기가 각기 다르기 때문에 5×5부터 64×64까지 크기를 변경하며 추출하였다.

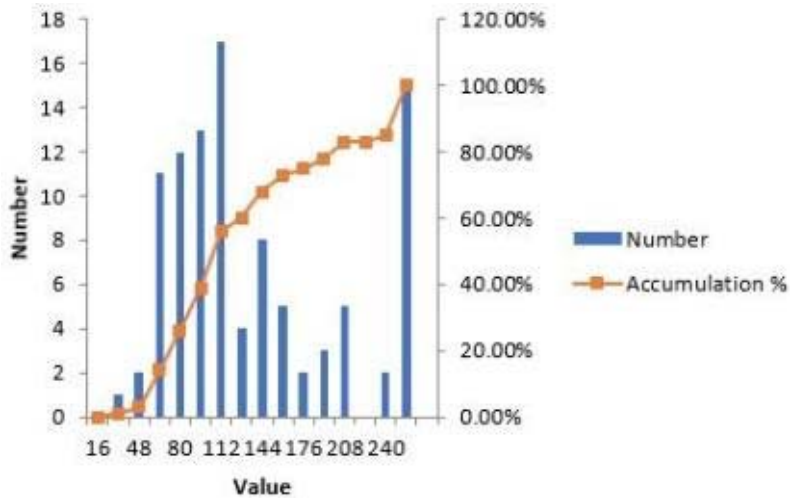


그림 772 Histogram of ASM texture(fruit).

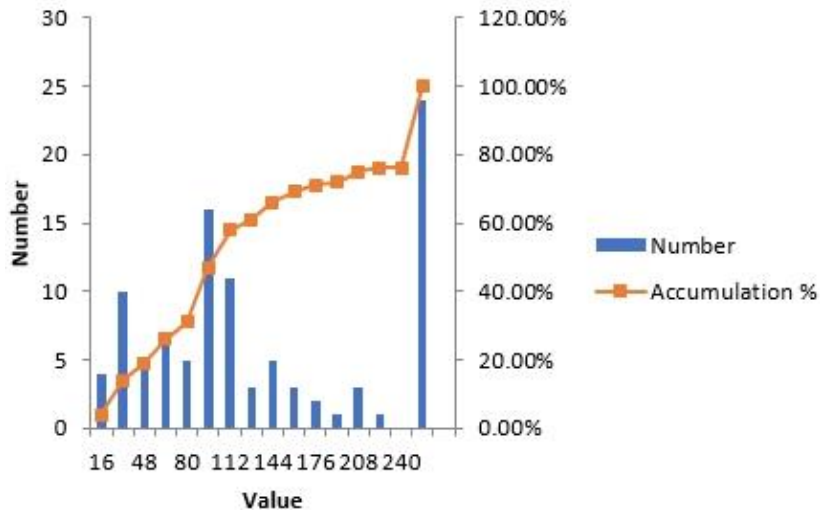


그림 773 Histogram of ASM texture(peduncle).

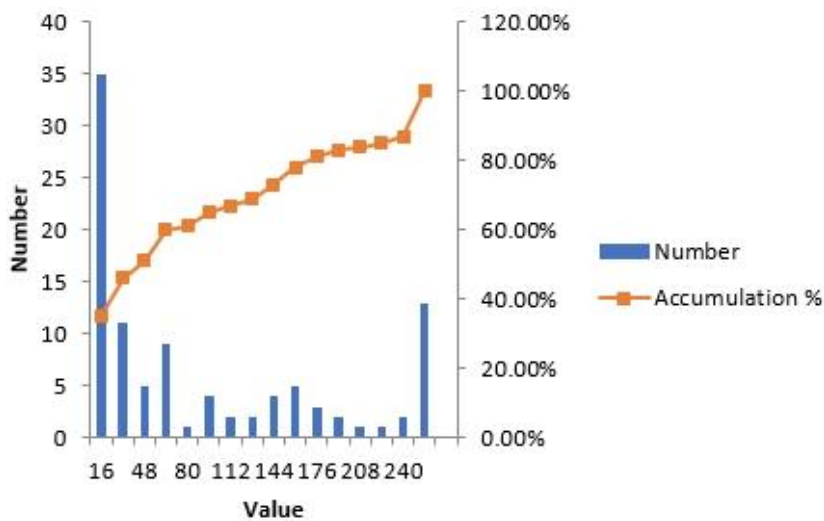


그림 774 Histogram of ASM texture(stem).

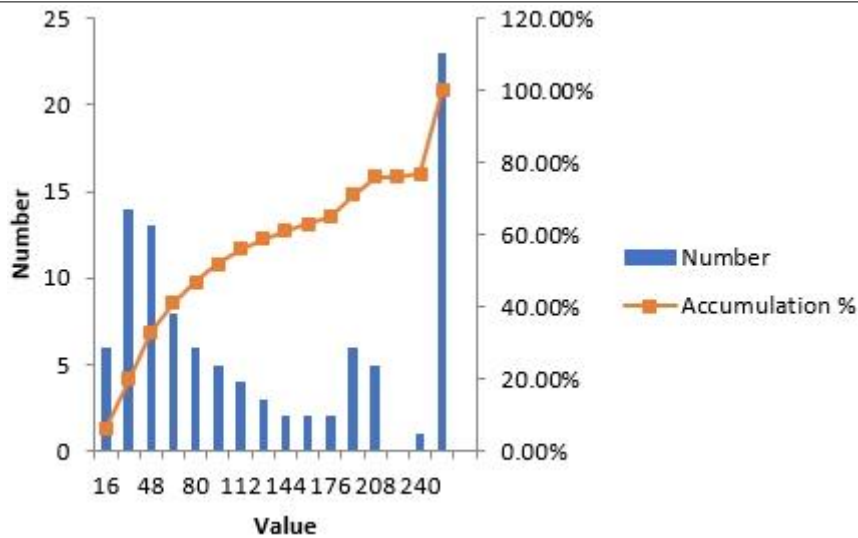


그림 775 Histogram of ASM texture(leaf).

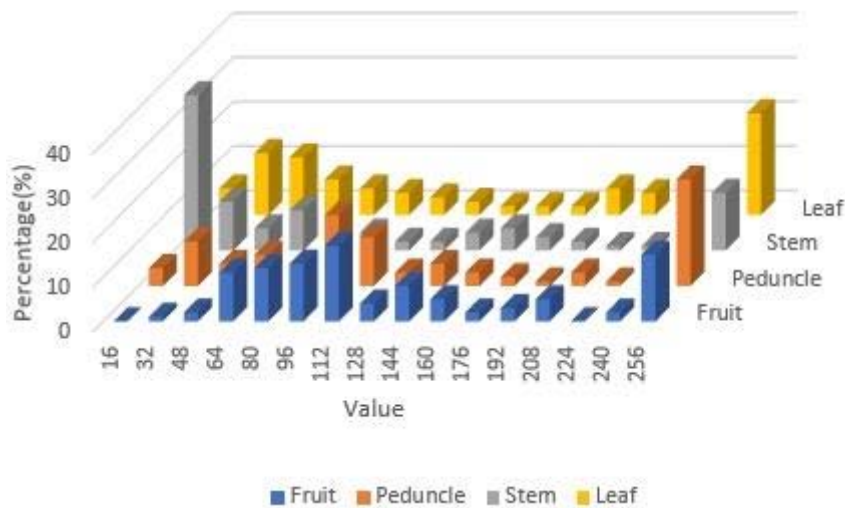


그림 776 Histogram of ASM.

ASM 특징의 영역별 히스토그램은 그림 772 ~ 775과 같이 나타났다. 파란 히스토그램은 각각의 빈도수를 표현한 것이고 주황색은 누적 확률을 표현하였다.

그림 776은 전체 히스토그램을 비교한 것이다. 히스토그램의 256 영역에서는 모든 영역에서 10% 이상의 빈도로 특징이 나타났다. 그 외의 영역에서도 특징은 고르게 분포되어 나타났다. 과실의 경우 0~48 구간과 224~240 구간에서 특징이 약한 경향을 보였는데 다른 부위의 경우 마찬가지로 224~240에서 약한 특징을 보였다. 줄기의 경우 다른 영역에 비하여 0~16구간에서 큰 특징을 보였다. 히스토그램 분석 결과 줄기의 경우 경향의 차이는 있으나 히스토그램의 영역이 나머지 영역과 중첩되어 차이를 확인 할 수 없었다.

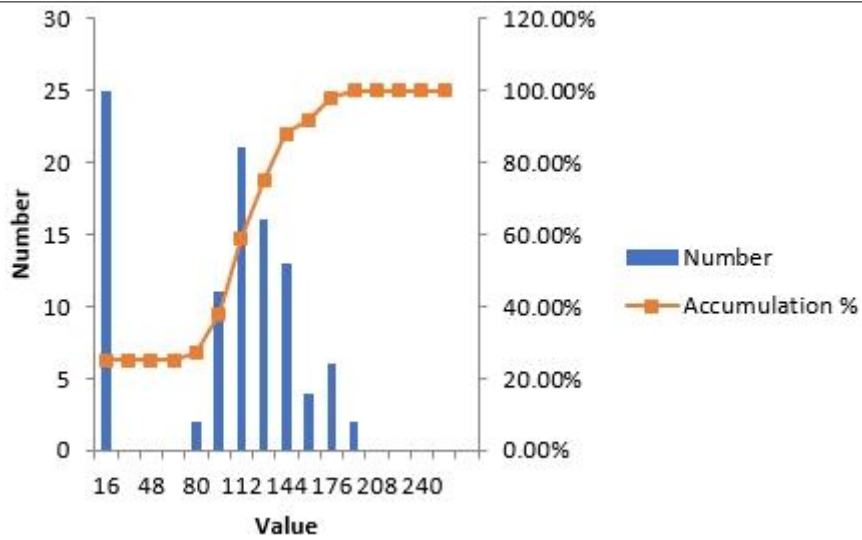


그림 777 Histogram of entropy texture(fruit).

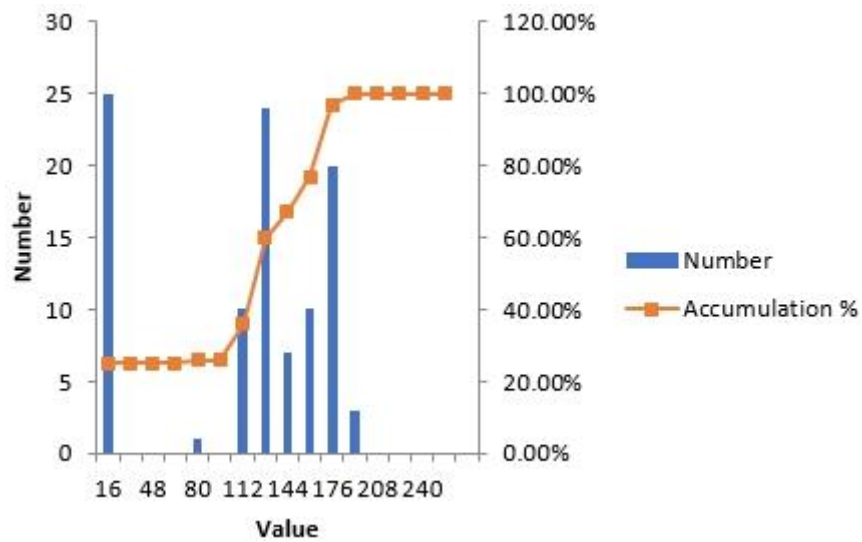


그림 778 Histogram of entropy texture(peduncle).

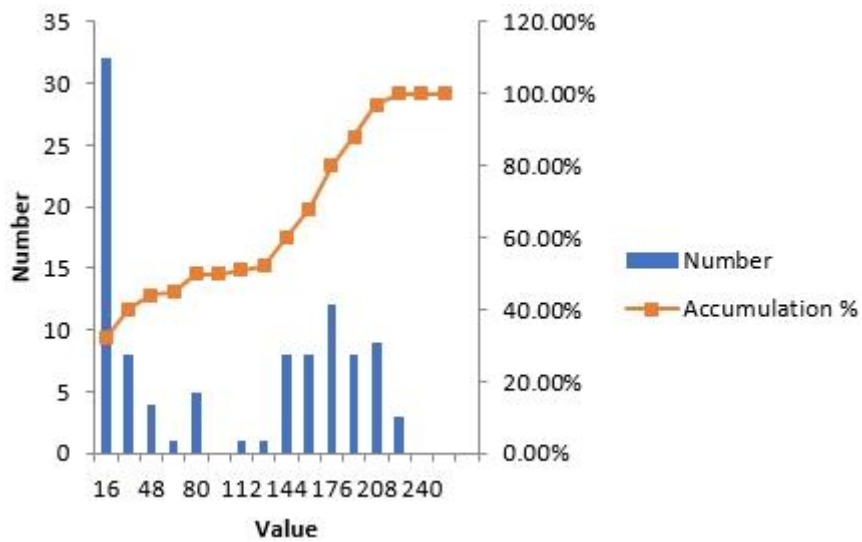


그림 779 Histogram of entropy texture(stem).

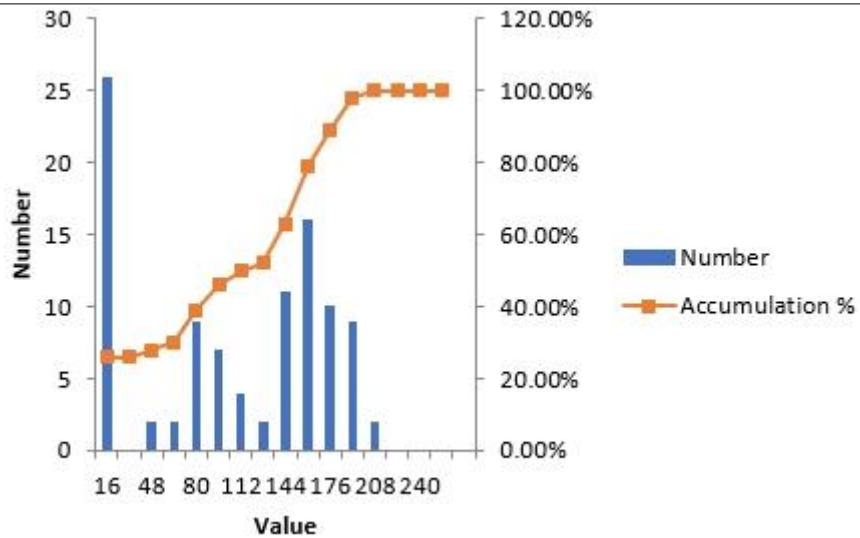


그림 780 Histogram of entropy texture(leaf).

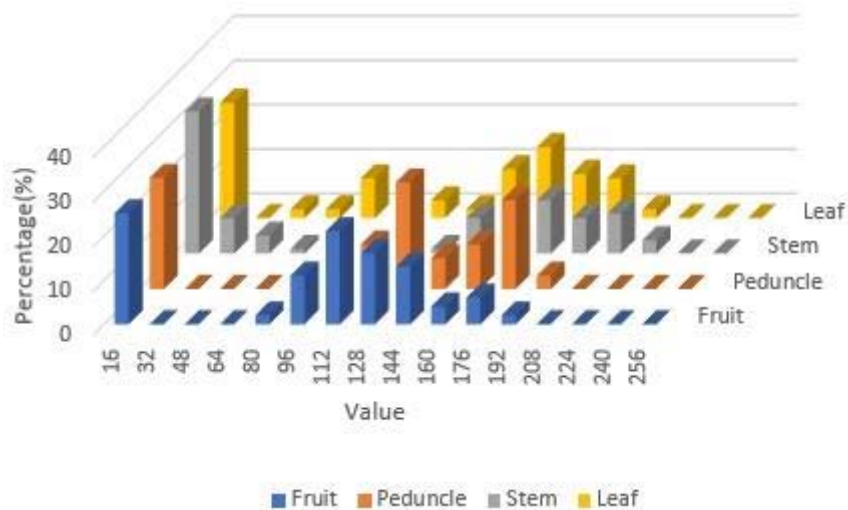


그림 781 Histogram of entropy.

Entropy 특징을 추출하고 영역별로 평균을 구하여 히스토그램을 나타낸 것은 그림 777 ~ 780 와 같다. 파란 히스토그램은 각각의 빈도수를 표현한 것이고 주황색은 누적 확률을 표현하였다. 그림 781는 전체 히스토그램을 비교한 것이다. 히스토그램의 0~16 구간에서는 모든 영역에서 25% 이상의 빈도로 특징이 나타났다. 그 외의 영역에서도 특징은 유사하게 분포되어 나타났다. 과실의 경우 32~80 구간과 208~256 구간에서 특징이 약한 경향을 보였는데 다른 부위의 경우 마찬가지로 32~80, 208~256 구간의 부근에서 약한 특징을 보였다. 히스토그램 분석 결과 각 영역은 서로 중첩되어 차이를 확인 할 수 없었다.

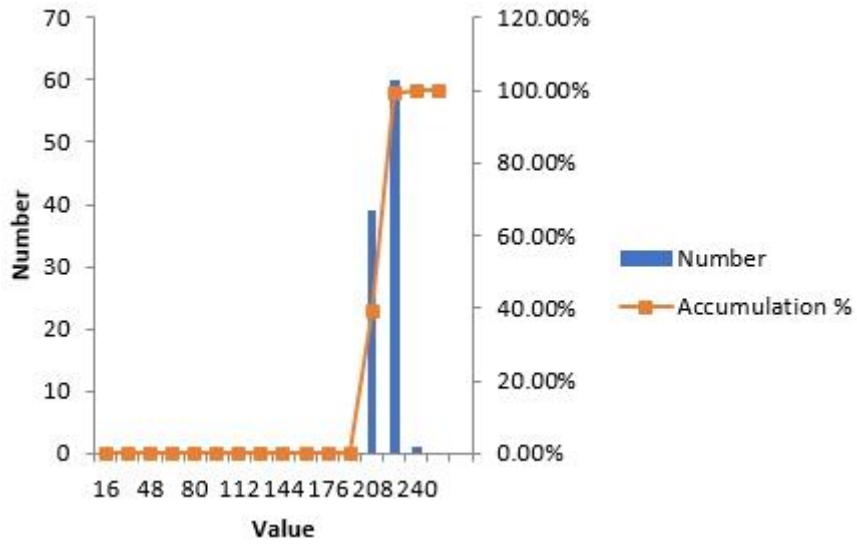


그림 782 Histogram of IDM texture(fruit).

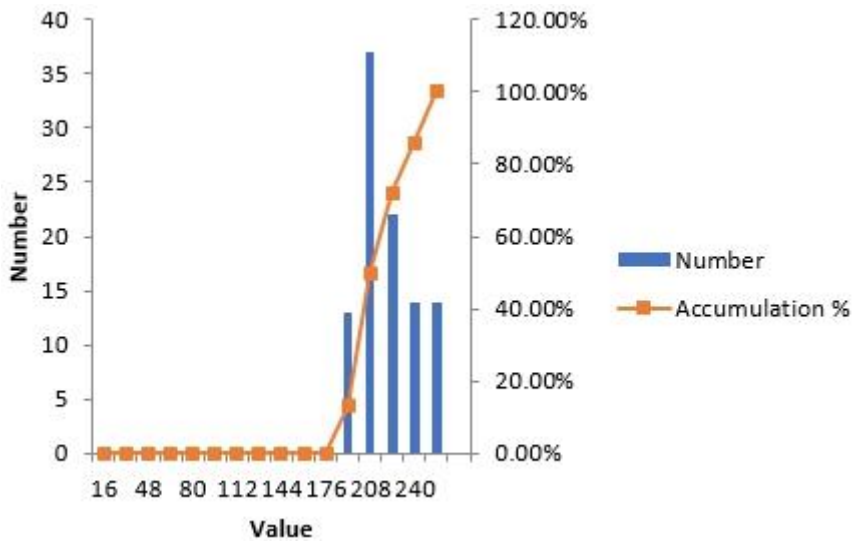


그림 783 Histogram of IDM texture(peduncle).

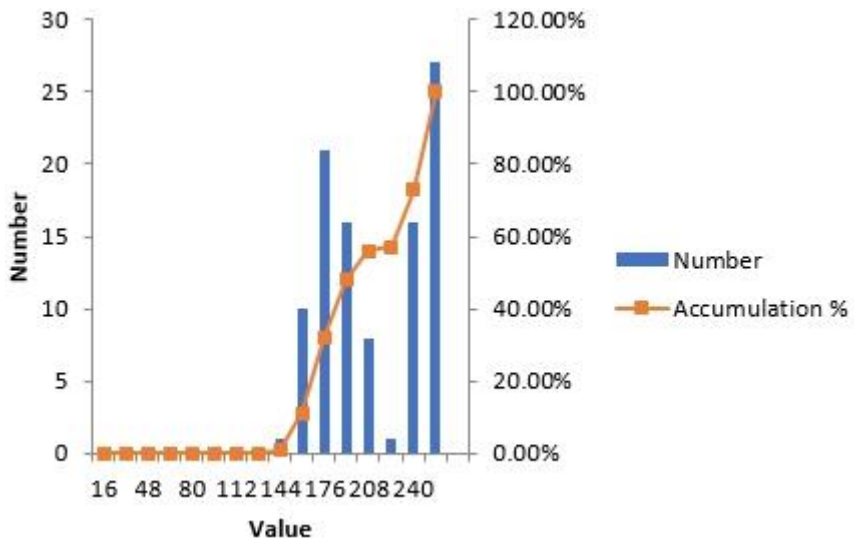


그림 784 Histogram of IDM texture(stem).

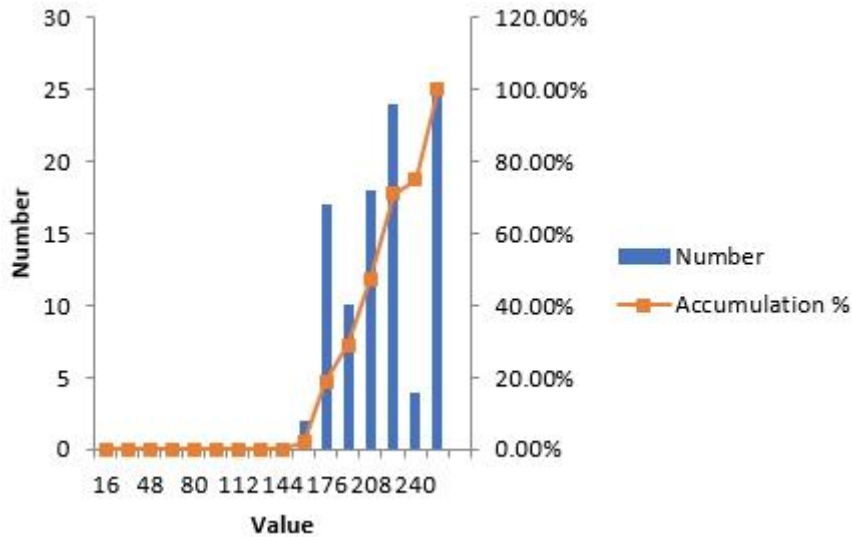


그림 785 Histogram of IDM texture(leaf).

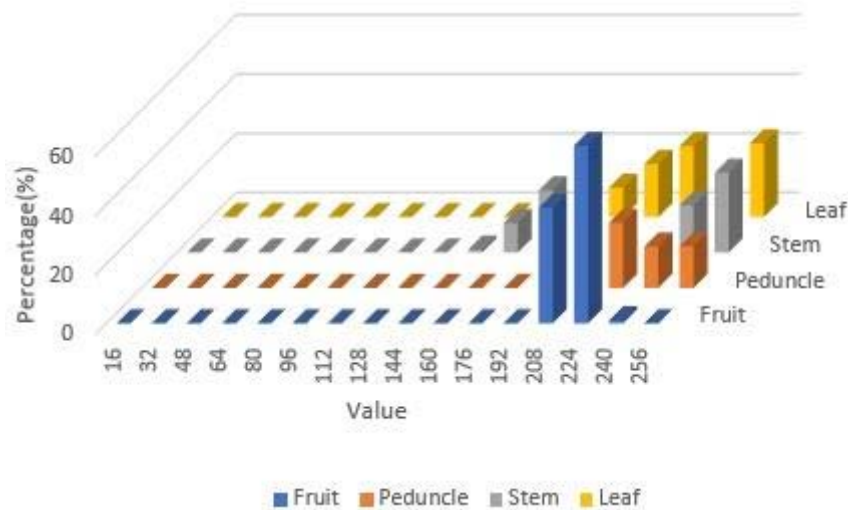


그림 786 Histogram of IDM.

IDM 특징을 추출하고 영역별로 평균을 구하여 히스토그램을 나타낸 것은 그림 782 ~ 785와 같다. 파란 히스토그램은 각각의 빈도수를 표현한 것이고 주황색은 누적 확률을 표현하였다.

그림 786은 IDM 특징의 전체 히스토그램을 비교한 것이다. 히스토그램의 0~ 144 구간에서는 모든 영역에서 0% 빈도로 특징이 나타났다. 과실의 경우 208~224 구간에서만 특징이 보였는데 다른 부위의 경우도 해당 구간에서 특징이 나타났다. 과병의 경우 192~256 구간에서 강하게 나타났다으며, 줄기는 160~192, 240~256 구간에서 나타났다. 잎의 경우 176~224 구간에서 특징이 나타났다. 히스토그램 분석 결과 과실의 경우 경향의 차이는 있으나 히스토그램의 영역이 나머지 영역과 중첩되어 분리가 불가능 할 것으로 사료된다. 따라서 IDM 특징을 이용하여 각 영역을 구분 하는 것은 불가능 하다. 7가지 GLCM 특징을 추출하여 영상으로 비교한 결과 Variance, Mean, Correlation 특징에서 영역 구분이 불가능 하였고, 히스토그램을 비교한 결과 ASM에서는 줄기 영역만이 차이가 나타났으며, Entropy, IDM에서는 차이가 없는 것을 확인하였다. PCA와 GLCM 특징을 이용하여 파프리카 영역을 직접적으로 추출할 수 있을 것으로 기대하였으나 분석 결과 해당 특징을 추가적인 처리 없이 영상 추출에 사용하는 것은 불가능함을 확인하였다.

6. 영상 교정

가. F 행렬 계산

본 연구에서는 F 행렬을 계산하기 위하여 Hartley의 저서를 참고하여 LmedS(Least median of Squares), Normalized 8 points, RANSAC(RANdom SAMple Consensus) 알고리즘을 이용하였다. 각 방법을 이용하여 F 행렬을 계산 한 후 해당 행렬을 이용하여 에피폴라 선을 그렸다. 그 후 각 에피폴라 선과 대응점 간의 거리를 구하여 오차를 계산하였다. 가장 작은 오차를 갖는 F 행렬을 이용하여 에피폴라 교정을 수행하고자 하였다.



그림 787 Epipolar line (LmedS)



그림 788 Epipolar line (Norm 8 Point)



그림 789 Epipolar line (RANSAC)


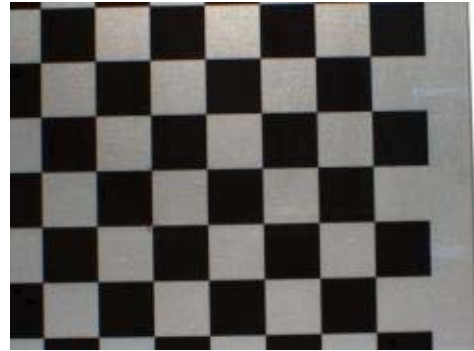

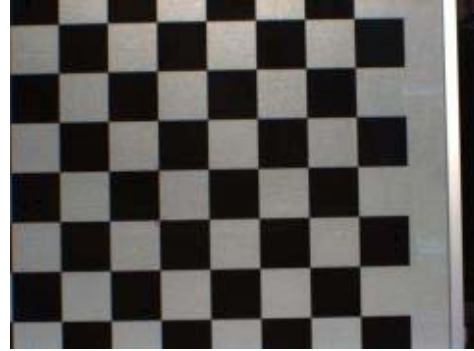
450		
500		

표 142 Example images of calibration board

250~600mm의 범위에서 50mm 간격으로 캘리브레이션 보드를 위치시키고 8쌍의 스테레오 영상을 획득하였다. 표 142는 총 8쌍의 캘리브레이션 보드의 스테레오 영상 중 450mm와 500mm에서 촬영된 영상이다. 8쌍의 영상에서 각각 4쌍씩의 대응점을 추출하여 총 32쌍의 대응점을 기록하였다.

	Left image		Right image	
250mm	949	422	444	425
	956	703	448	708
	668	426	164	431
	674	709	167	712
300mm	659	210	237	215
	666	675	242	678
	1134	666	709	669
	1123	203	700	205
350mm	485	456	120	458
	488	655	123	657
	1085	643	717	647
	1080	445	714	448
400mm	508	290	185	294
	513	637	189	638
	1035	625	708	629
	1026	281	702	283
450mm	525	163	237	166
	533	622	243	623
	994	612	702	615
	983	155	693	157
500mm	537	335	273	338
	542	610	277	612
	818	605	552	607
	813	330	548	332
550mm	424	229	183	231
	433	728	190	728
	1059	716	814	718
	1048	217	804	219
600mm	447	252	222	254
	452	593	225	595
	796	587	568	589
	789	245	563	247

표 143 32 pairs of corresponding points.(pixel)

32쌍의 대응점을 이용하여 F행렬을 계산하였다. 이 때, Lmeds, N8P, RANSAC 방법을 이용하여 F를 구하고 해당 F를 통하여 오차를 계산하여 비교하였다.

NO.	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
Lmeds	379	379	382	410	381	387	382	409	384	405
RANSAC	435	384	435	381	372	387	382	378	405	428
N8p	12122	12122	12122	12122	12122	12122	12122	12122	12122	12122

표 144 SOE(sum of error)s of each method.

Lmeds, RANSAC 방법은 계산을 반복 할 때마다 다른 값을 출력하기 때문에 10회 반복하여서 가장 오차가 적은 F 행렬을 계산하였다(표 144). Normalized 8 points의 경우 다른 방법에 비하여 오차가 매우 크게 나타나기 때문에 제외하고 가장 적은 오차를 보인 RANSAC을 통한 F 행렬을 이용하여 추후 과정을 진행하였다.

나. 에피폴라 선 교정

영상의 매칭 과정의 일환으로 에피폴라 선을 구하고 이를 이용하여 대응점을 찾고자 한다. 하지만, 모든 점에 대하여 에피폴라 선을 그리고 해당 선을 스캔하여 주변 점을 비교하는데 시간이 많이 소모 된다. 또한 매칭의 효율을 높이기 위하여 전처리 과정과 오차 계산 방법을 개선하고자 하였으나, 실제 개선 효과는 크게 나타나지 않아 이를 해결하기 위하여 Hartley가 제안한 에피폴라선 교정을 수행하였다.

Hartley에 의하면 모든 에피폴라 선을 x 축과 평행하도록 영상 변형을 하기위하여 F 행렬을 이용하여 우측 영상의 에피폴을 구하고 해당 에피폴을 무한대의 위치(∞, ∞)로 이동시키는 투영 변환을 수행하는 행렬 H'을 구한 후 H'을 이용하여 좌측 영상의 교정을 수행하는 H 행렬을 구한다.

$$[F]^T \begin{bmatrix} e'_x \\ e'_y \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad \text{수식 106}$$

먼저, $Fe = 0$, $F^T e' = 0$ 의 식 (106)을 이용하여 에피폴 e와 e'의 x, y 좌표를 계산하였다.

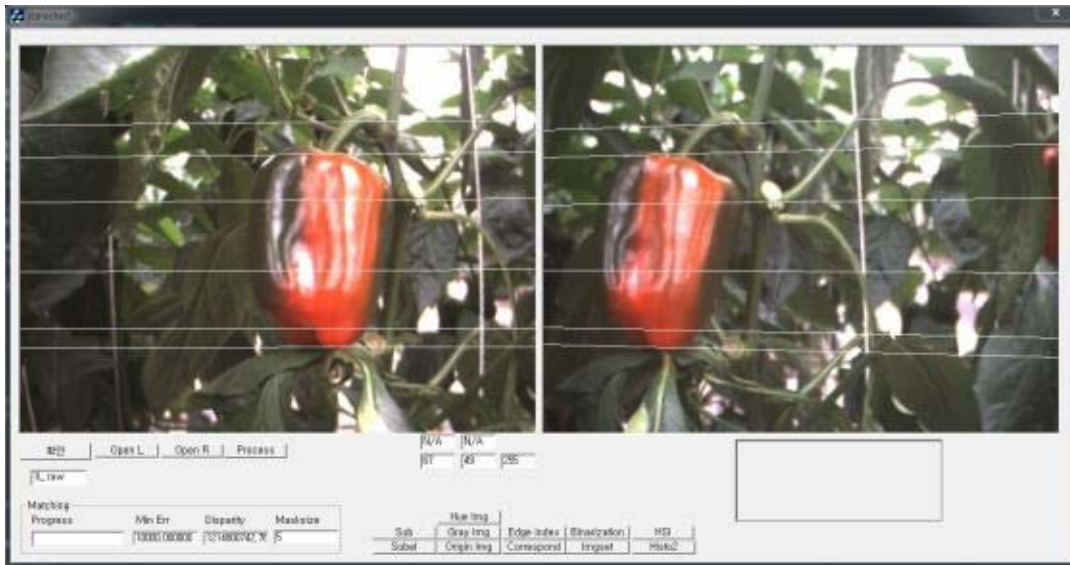


그림 790 Stereo image with epipolar lines.



그림 791 Transformed image using G, T matrix.

계산된 e의 값은 다음과 같다. 에피폴라 선을 그리고 해당 선의 교점을 구하는 방법으로 에피폴라 선을 구한 결과와 같음을 확인 하였다.

$$X_e = -4.468053967854761e+003, Y_e = 2.588668172485111e+002$$

$$X_{pe} = -2.387320360446864e+003, Y_{pe} = 3.887696117114289e+002$$

에피폴라의 위치를 이용하여 변환행렬 $H' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -149 \\ 1/2387 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 로 변환 후, 에피폴라 라인의 각도를 계산하여 회전하였다.

G, T 행렬을 통해 변환된 영상에 나타나는 에피폴라 선의 기울기를 구하고 이를 이용하여 R 행렬을 계산하였다. 에피폴라 선의 기울기는 $\tan^{-1}(30/504) \approx 3.41^\circ$ 로 나타났다. 이를 회전 행렬의 기본 식 $\begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$ 을 이용하여 회전 행렬을 구하였다.

$$H = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & -149 \\ 1/2387 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \alpha = 3.41 \times \pi/180 \quad \text{수식 107}$$

따라서 G, R, T 행렬을 이용하여 구한 homogeneity 행렬 H'은 식 (107)과 같다. 또한, 이 과정에서 기존에 에피폴라의 중심을 영상의 중심으로 이동시키는 과정을 생략하였고, 그 결과는 그림 792와 같다.

계산된 H' 을 이용하여 $\sum_i d(Hx_i, H'x'_i)$ 을 최소화 하는 H 행렬을 구한다. 이러한 일련의 과정을 매트랩(Matlab) 함수로 구현한 것은 그림 793과 같다.



그림 792 Transformed images using H' matrix

```
function [H] = HmatrixtoRectification(PointsL, PointsR, Hp)
[F, e2] = Epipolar(PointsL, PointsR);
PointsL(3,:) = 1;
PointsR(3,:) = 1;
hatxp = Hp*PointsR;
ex = [1, -1, e2(2); 1, 1, -e2(1); -e2(2), e2(1), 1];
M = pinv(ex)*F;
H0 = Hp*M;
hatx = H0*PointsL;
for i=1:1:3
    hatxp(i,:) = hatxp(i,:)./hatxp(3,:);
    hatx(i,:) = hatx(i,:)./hatx(3,:);
end
[u, s, v] = svd(hatx');
b = hatxp(1,:);
bp = u'*b';
y(3) = 0;
for i=1:1:3
    y(i) = bp(i)/s(i,i);
end
abc = v*y';
HA = [abc(1,1), abc(2,1), abc(3,1); 0, 1, 0; 0, 0, 1];
H = HA*H0;
H = H./H(3,3);
```

그림 793 Coded matlab function to calculate H matrix.

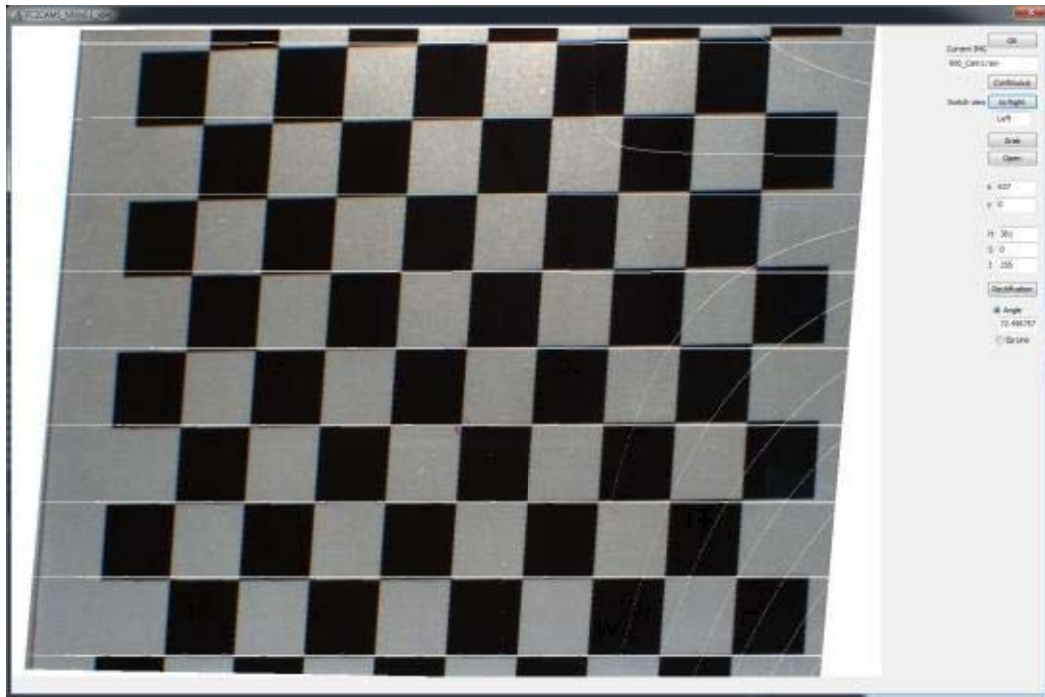


그림 794 Rectified left stereo image using H matrix.

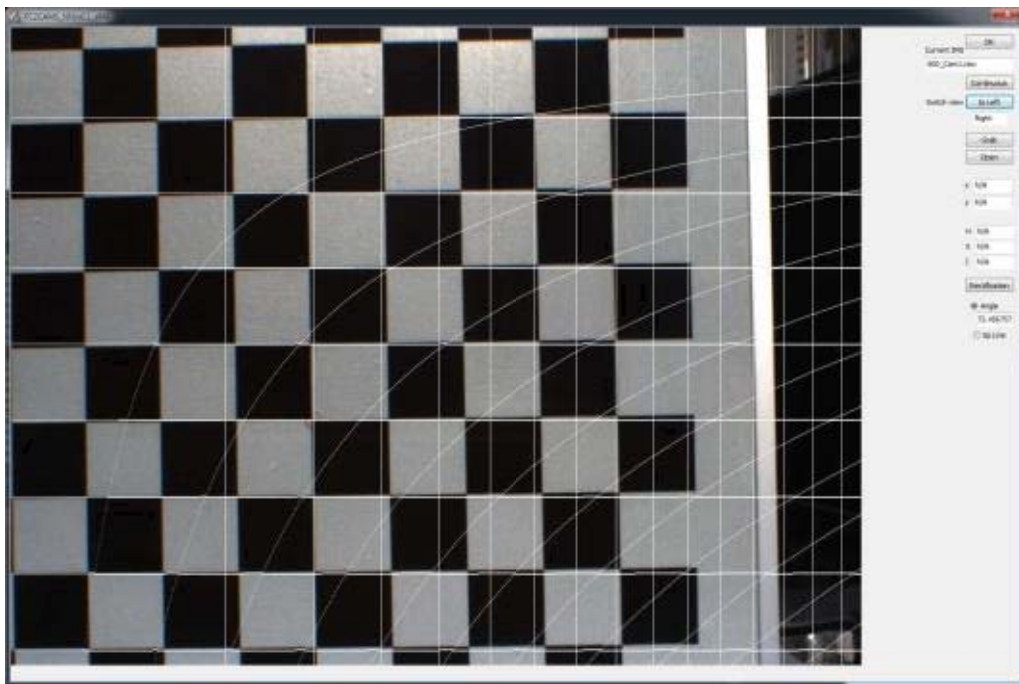


그림 795 Rectified right stereo image using H' matrix.

F 행렬을 이용하여 H', H를 계산한 후 변형 한 결과 영상은 상기 그림과 같다. 수평 방향의 선은 에피폴라 선으로 서로 평행하게 변형되었으며, 그 외의 선들은 변형에 따라 나타나는 비어있는 공간이다. 이는 2차 선형 보간 방법을 통하여 제거 하였다.

Left y coordinate	Right y coordinate	Error
135	136	1
250	251	1
365	363	2
476	478	2
591	593	2
705	708	3
816	825	9
932	940	8

표 145 y coordinates of rectified epipolar lines. (pixel)

위의 표는 좌, 우측 영상에서 서로 대응하는 8쌍의 에피폴라 선을 그리고 계산된 H, H'행렬을 통해 변환 한 후 나타나는 y축 좌표를 비교한 결과이다. 오차는 최소 1에서 최대 9까지 나타났으며 700~800pixel 사이에서 급격히 증가한 것을 확인 할 수 있다. 그 외의 영역에서는 3pixel 이내의 오차를 보인다. 이는 영상 가장자리에서 나타나는 왜곡의 영향으로 사료된다. 이러한 결과를 바탕으로 오차가 큰 영역을 제거한 후 스테레오 정합을 수행하였다.

7. 스테레오 정합

스테레오 정합을 위하여 먼저, 특징점을 추출하였다. Herbert Bay가 제안한 SURF(Speeded-Up Robust Features) 알고리즘을 이용하여 특징점을 추출하는 방법과, 파프리카에 레이저 광원을 조사하여 특징점을 추출하는 방법을 수행하였다. 스테레오 정합은 특징점으로 추출된 영역을 기준으로 마스크를 이용하여 오차의 합이 가장 작은 마스크의 중심을 대응점으로 하였다.

- SURF 알고리즘

SURF 알고리즘은 가우시안 필터를 적용한 후 영상의 2차 미분을 수행하고 지역 최대값이 되는 점을 특징으로 하는 알고리즘으로 영상의 2차 미분 값으로 이루어진 Hessian 행렬을 이용하여 함수의 지역 곡률을 측정하고 해당 곡률을 크기와 방향의 성분으로 나타낸다. 명도 영상에서는 파프리카 내부에 존재하는 특징을 구하기 어렵기 때문에 색상 및 채도 영상에 대해서도 특징점 추출을 수행하였다. 이를 위하여 색상 및 채도 값은 0~255의 크기로 정규화한 후 시각화 하였다. 또한 파프리카 주변 영역의 잎, 줄기 등에 특징점이 상대적으로 많기 때문에 파프리카 영역을 추출한 후 특징점 추출을 수행하도록 알고리즘을 설계하였다.

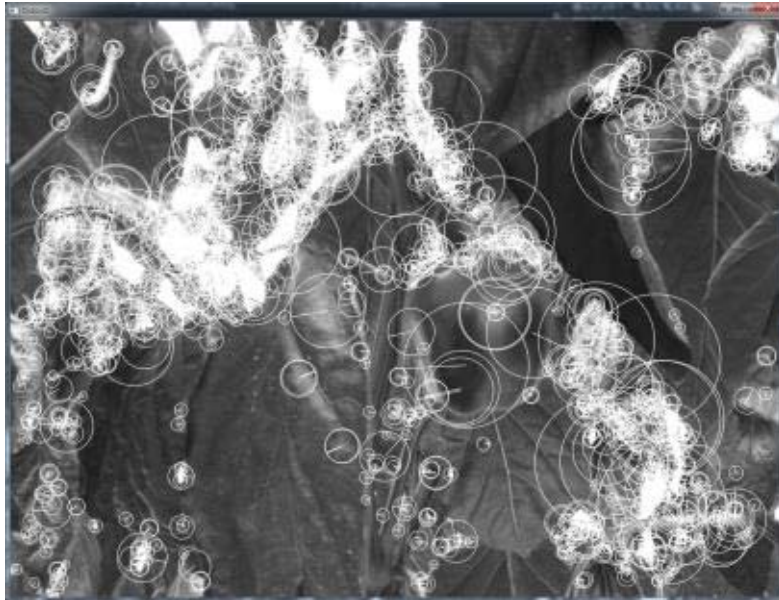


그림 796 SURF result using intensity image.

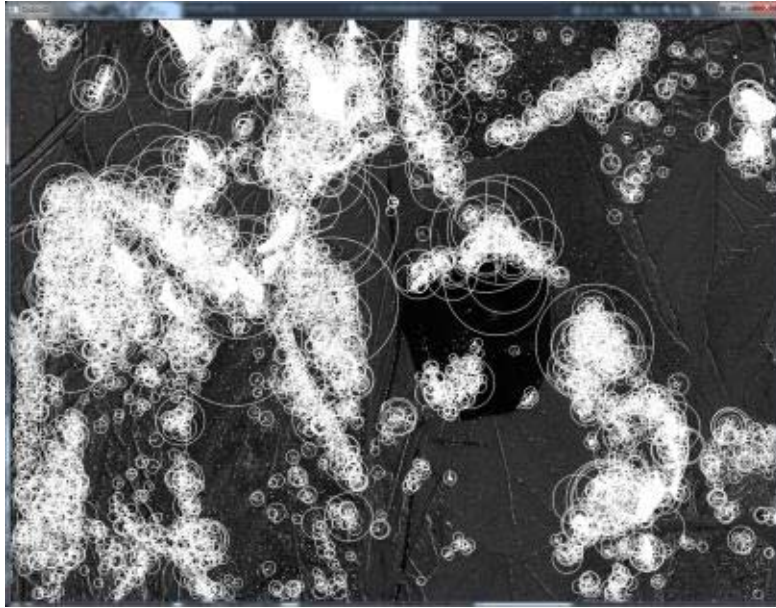


그림 797 SURF result using hue image.

스테레오 정합의 수행을 용이하게 하기 위하여 영상에 존재하는 특징점을 추출하여 해당 특징점을 중심으로 정합을 수행하고자 하였다. 특징점을 추출하는 방법 중 Bay가 제안한 SURF 알고리즘을 이용하여 특징점을 추출한 후 스테레오 정합 결과를 확인하였다.

그림 796은 파프리카 재배 환경 영상의 명도를 이용하여 SURF 알고리즘을 수행한 결과이다. 파프리카 내부에 존재하는 특징점은 빈도수가 낮으며 일 영역에서 상대적으로 많은 특징점이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

그림 797은 색상(Hue) 값을 0~255의 크기로 정규화한 후 시각화 한 영상을 통하여 SURF 알고리즘을 적용한 결과이다. 색상 영상을 이용하여 특징점을 추출한 결과 상대적으로 명도 영상에 비하여 특징점이 늘어난 것을 확인 할 수 있었다. 하지만, 파프리카 내부의 특징점이 상대적으로 다른 영역에 비하여 빈도수가 낮게 나타나는 경향은 동일하였다. 파프리카 이외의 영역에서 상대적으로 많은 특징점이 나타나는 것을 완화하기 위하여 파프리카 영역을 추출 한 후 알고리즘을 수행하였다.

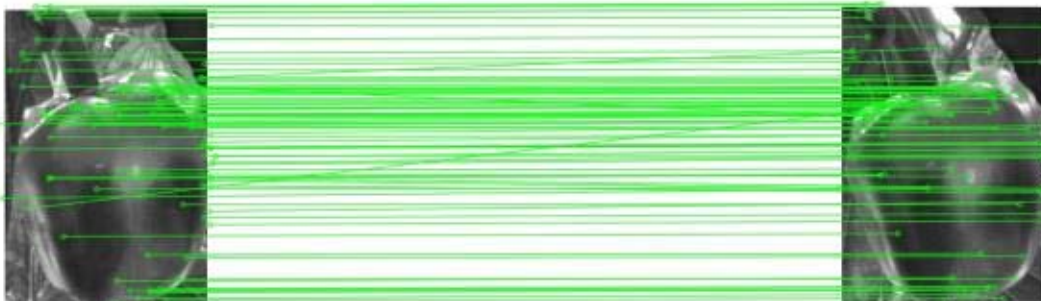


그림 798 Stereo matching result image using intensity image.

Image NO.	Matches(ea)	Time(ms)	Outlier(ea)
1	85	2202	21
2	75	2232	8
3	62	1962	11
4	69	2400	7
5	66	2333	5
6	70	2061	13
7	48	1924	3
8	81	2290	8
9	53	2082	15
10	41	1869	9

표 146 Matching result using intensity image.

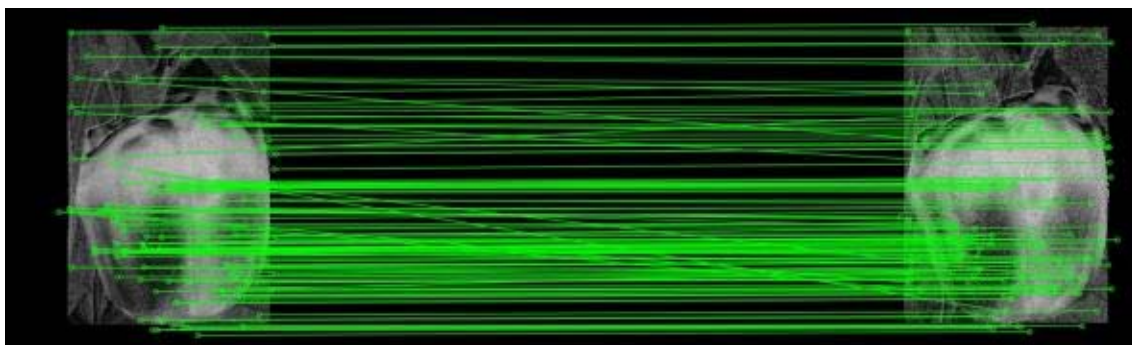


그림 799 Stereo matching result image using saturation image.

Image NO.	Matches(ea)	Time(ms)	Outlier(ea)
1	116	2708	22
2	92	2582	13
3	57	2098	11
4	89	2561	8
5	92	2791	10
6	65	2431	17
7	51	2096	15
8	100	2494	11
9	84	2237	15
10	40	1956	3

표 147 Matching result using saturation image.

총 81개의 특징점을 추출하여 매칭을 수행하였고 본 시스템에서 2.290초가 소요되었다. 표 146은 매칭에 성공한 특징점 수와 소요시간, Outlier의 수를 나타내고 있다. Outlier의 경우 확연히 매칭에 실패하거나 영상 외의 영역에서 매칭을 시도한 경우를 의미한다. 특징점 추출 알고리즘이 마스크를 사용하기 때문에 영상 밖의 영역에서 값이 나타나는 경우가 발생하는 것으로 보인다.

소요 시간은 본 시스템에서 영상 입력으로부터 평균 2.1초였으며, 카메라 초점, 영상 노이즈 등에 의하여 Outlier가 발생하는 빈도가 높아지는 것을 확인 하였다. 또한, 파프리카 내부에 특징점이 크게 존재하지 않아 매칭이 시도 되는 횟수가 줄어드는 것을 확인 하였다.

먼저, 파프리카에 존재하는 특징점을 증가시키기 위한 방법의 일환으로 SURF 알고리즘에서 명도 영상을 사용하는 것을 채도 영상으로 대체 시도하였다. 그림 799은 채도 영상을 이용하여 특징점을 추출하고 매칭을 시도한 결과를 나타낸 것이다.

추출된 ROI의 채도 영상을 입력받아 영상에 출력한 결과 기존의 흰색(255, 255, 255) 영역의 채도는 0이기 때문에 해당 영역이 검은 색으로 나타났다. 이 때, 매칭에 사용된 특징점은 116개로 명도 영상을 사용한 경우 85개였던 것에 비하여 31개 특징점이 더 사용되어, 파프리카 내부에 존재하는 특징점도 더 증가한 것으로 보인다.

NO.	Outlier (ea)	Intensity		Outlier (ea)	Saturation	
		Matches (ea)	%		Matches (ea)	%
1	21	85	24.71	22	116	18.97
2	8	75	10.67	13	92	14.13
3	11	62	17.74	11	57	19.30
4	7	69	10.14	8	89	8.99
5	5	66	7.58	10	92	10.87
6	13	70	18.57	17	65	26.15
7	3	48	6.25	15	51	29.41
8	8	81	9.88	11	100	11.00
9	15	53	28.30	15	84	17.86
10	9	41	21.95	3	40	7.50
Average	10	65	15.57	12.5	78.6	16.41

표 148 Matching result comparison.

표 148을 보면 채도 영상을 사용한 경우 평균 13.6개 더 많은 정합을 수행 한 것을 확인 할 수 있다. 이는 파프리카 및 줄기의 특징점을 포함 한 것으로 실제로 파프리카 자체의 특징점은 더욱 큰 폭으로 증가 하였을 것으로 사료된다. Outlier의 비율은 명도 영상일 때 평균 15.57%, 채도 영상에서 평균 16.41%로 나타났다. 이는 명도와 채도 영상에서 큰 차이가 나타나지 않았다. 따라서 파프리카 자체의 매칭을 위해서는 채도 영상을 사용하는 것이 더 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 화병 영역에 대한 매칭을 위해서는 명도 영상을 사용하는 것이 용이할 것으로 사료되었다.

8.레이저 광원을 이용한 특징점 추출

파프리카 영상에서 파프리카 영역 내 특징점의 빈도수가 낮아 특징점을 인위적으로 추가하기 위하여 레이저 광원을 추가하여 해당 조명을 특징점으로 하는 방법을 구상하였다.



그림 800 Illuminations using laser source.

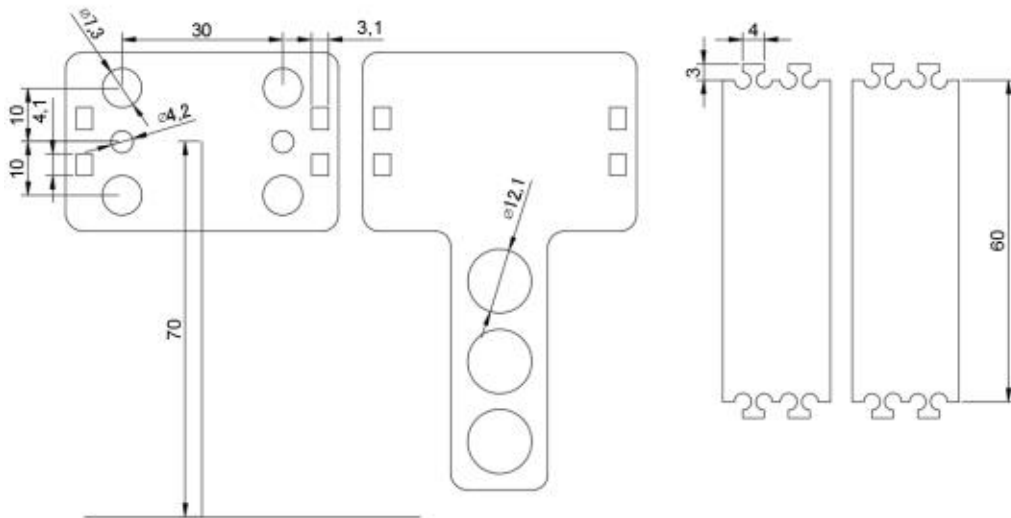


그림 801 A design of joint parts for laser sources.

그림 800은 레이저 광원을 파프리카에 조사하여 인위적으로 특징점을 만든 영상이다. 본 시스템에서는 파프리카 내부 영역에서 추출하기 용이하도록 녹색 레이저 광원을 사용하였으며, 정합 오차 발생 시 보정을 위하여 3개의 광원을 이용하였다. 특징점의 스테레오 정합에 따른 결과를 확인하기 위하여 레이저 조명에 의하여 발생한 영상의 점을 350~600mm 거리에서 측정하여 디스패리티를 구하고 거리와의 캘리브레이션 하였다. 또한, 삼각측량 결과를 이용하여 거리를 구하여 비교하였다.

그림 801은 제작된 매니플레이터와 카메라 시스템에 맞춰 설계된 레이저 광원의 고정부이다. 구동 시 다른 시스템과의 간섭이 없도록 설계하였으며, 3개의 레이저 광원을 설치 할 수 있도록 설계 하였다.



그림 802 Green laser light spot on the sweet pepper.

파프리카 과실 표면에 특징점이 많이 존재하지 않는 것을 보완하기 위하여 레이저 광원을 이용하여 과실 표면에 직접적으로 특징점을 만들어 정합을 수행하고자 하였다.

그림 802의 중앙 파프리카 모형의 하단에 녹색 레이저 점을 확인 할 수 있다.

Z(mm)	Average disparity(pixel)
350	802.09
400	615.87
450	472.21
500	385.35
550	337.65
600	284.78

표 149 Each average disparities from 350mm to 600mm.

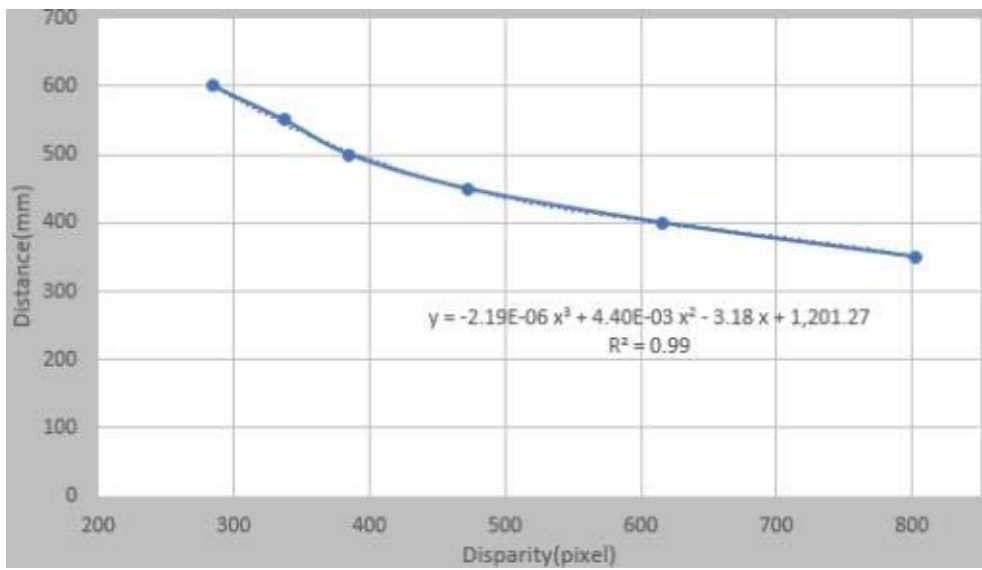


그림 803 Regression result of disparities.

Z	z	Error	Z	z	Error
351	381	30	459	469	10
355	383	28	459	465	6
361	392	31	460	454	6
365	393	28	460	457	3
373	390	17	461	443	18
375	392	17	461	440	21
379	391	12	464	466	2
382	392	10	465	459	6
382	392	10	467	467	0
385	394	9	469	468	1
388	395	7	470	464	6
390	397	7	470	482	12
392	398	6	473	489	16
395	400	5	475	473	2
397	398	1	477	468	9
413	418	5	477	470	7
420	420	0	478	470	8
421	444	23	478	471	7
422	419	3	479	468	11
425	429	4	479	470	9
425	427	2	479	465	14
426	427	1	480	483	3
427	426	1	504	506	2
427	427	0	509	509	0
428	431	3	525	525	0
428	427	1	527	531	4
429	427	2	540	552	12
430	423	7	550	556	6
440	426	14	564	561	3
453	449	4		average	8.34

표 150 Calibration results.

(Unit : mm)

레이저 점을 추출하고 정합을 수행한 결과를 캘리브레이션한 결과는 표 150와 같다. 350mm에서 600mm까지 50mm 간격으로 레이저 포인터의 디스패리티를 구한 후 실제 거리와 캘리브레이션하였다. 각 거리에서 30개 이상의 점을 선택하여 디스패리티를 구한 후 평균을 구하여 회귀식을 구하였다(그림 803). 삼차 다항식을 이용하여 회귀식을 구한 결과 결정계수는 0.99로 확인 되었다.

표 150는 캘리브레이션 결과를 이용하여 파프리카의 거리를 측정된 결과이다. Z는 실제 거리이며 z는 계산된 거리이다. 실험 결과의 오차 평균은 8.34mm, RMSE는 11.45mm였다. 가까운 거리일수록 오차가 크게 나타나는데 영상에 나타나는 디스패리티의 크기가 가까울수록 크게 나타나기 때문에 오차 또한 크게 나타나는 것으로 판단된다. 그 외의 구간에서 크게 나타나는 오차는 영상에서 발생하는 오차, 레이저 광원의 출력에 의한 오차 등으로, 레이저 광원의 출력이 일정하지 않아서 생기는 오차에 의한 것은 안정적인 출력을 갖는 레이저 광원을 사용하면 줄일 수 있을 것이다.

9. 3차원 위치 정보 획득

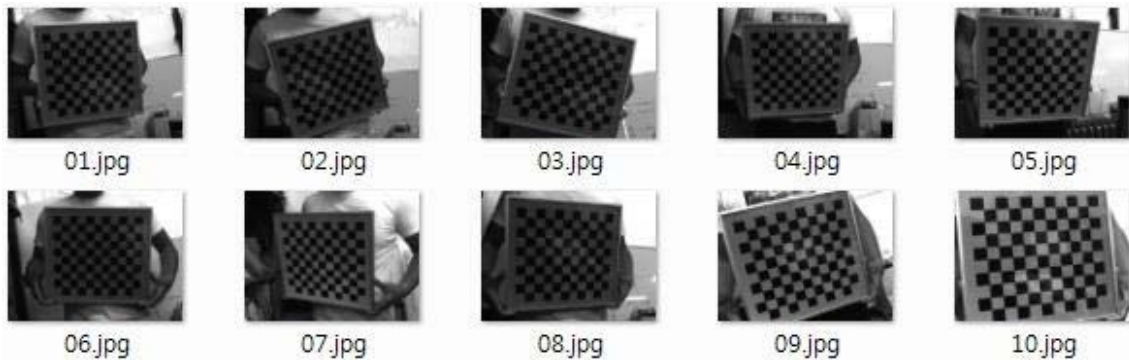


그림 804 Calibration board images to calculate internal matrix K.



그림 805 Calibration board image(Z distance : 250mm).

삼각 측량을 수행하기 위하여 연구에 사용된 세 대의 카메라를 이용하여 그림 804와 같이 캘리브레이션 보드의 영상을 획득 하였다. 해당 영상을 이용하여 내부 행렬 K(식(109, 110, 111))를 각각 구하였다.

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1628.38 & 0 & 623.60 \\ 0 & 1628.38 & 517.27 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{수식 109}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 1651.58 & 0 & 652.95 \\ 0 & 1651.58 & 498.08 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{수식 110}$$

$$K_3 = \begin{bmatrix} 1633.60 & 0 & 645.43 \\ 0 & 1633.40 & 499.478 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{수식 111}$$

Hartley의 연구에 따라 스테레오 정합에 사용된 카메라 행렬 k_1, k_2 를 이용하여 행렬 E 를 계산하고 E 를 SVD하여 R, t 행렬을 구하였다. 그 후, 좌, 우측 카메라의 투영(Projection) 행렬 P, P' 을 계산하였다. 구해진 행렬 P, P' 과 입력된 영상 좌표 $(x, y), (x', y')$ 을 이용하여 공간 좌표 (X, Y, Z) 를 구하였다. 공간 좌표 (X, Y, Z) 는 단위가 없기 때문에 이를 mm 단위로 캘리브레이션 하는 과정이 필요하다.

삼각 측량을 위한 캘리브레이션을 수행하기 위하여 250mm~700mm까지 50mm 간격으로 10쌍의 캘리브레이션 보드의 영상을 획득 하였다. 영상 획득 시 카메라의 중심과 캘리브레이션 보드의 중심을 일치 시켰다.

그림 805은 250mm에서 촬영된 캘리브레이션 보드의 영상이며 두 개의 삼각형으로 표시된 점이 캘리브레이션 보드의 중심으로 설정된 점이다. 해당 점의 영상 좌표는 (668, 425)로 실제 영상의 중심 (644, 482)과는 차이가 있다. 기구적인 방법으로 카메라의 중심과 캘리브레이션 보드의 중심을 정확히 맞추는 것은 한계가 있기 때문에 프로그램 상에서 캘리브레이션 하는 과정에서 보정 하였다.

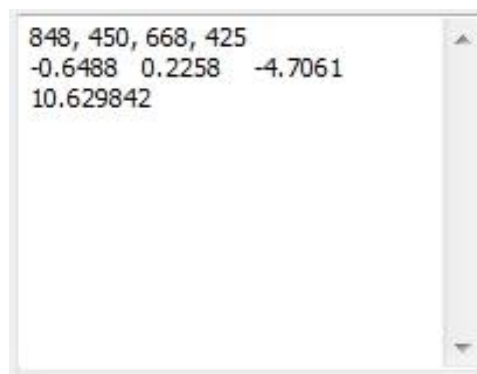


그림 806 Magnified result box.

그림 806은 그림 805의 우측 하단 출력 상태를 확대한 것으로 좌, 우측 캘리브레이션 보드 영상의 중심점 좌표 (848, 450), (668, 425)를 입력으로 하여 삼각 측량 하였을 때 단위 없이 나타나는 결과 (-0.6488, 0.2258, -4.7061)와 해당 결과의 역 투영 오차를 보여준다. 여기서 (-0.6488, 0.2258, -4.7061)는 (X, Y, Z) 를 의미하며 현재 단위가 없는 수치이므로 캘리브레이션 과정이 필요하다. 해당 좌표는 250mm에서 (0, 0)으로 설정된 좌표로 3차원 좌표로는 (0, 0, 250)로 볼 수 있다. 이러한 과정을 각 거리에서 중심을 기준으로 9개점을 추출하여 수행하였다. 각 점은 캘리브레이션 보드의 3x3 격자로 실제 크기는 가로, 세로 30×30mm의 크기다.

Z 방향의 캘리브레이션을 우선 수행하고 해당 정보를 기반으로 X, Y의 캘리브레이션을 수행 하였다. 기구적으로 카메라의 주선과 캘리브레이션 보드의 중심을 일치 시키지 못하였기 때문에 각 거리별로 X, Y에 대하여 캘리브레이션을 수행하고 해당 회귀식의 기울기와 절편을 거리에 대하여 상관관계를 구하는 것으로 삼각 측량의 결과와 공간 좌표간의 캘리브레이션을 수행하였다.

영상 좌표를 이용하여 3차원 좌표를 획득하기 위하여 250~700mm까지 거리에 캘리브레이션 보드를 위치시키고 영상을 촬영 한 후 각 영상으로부터 9점씩 총 90점에 대한 삼각 측량 결과와 실제 측정한 거리의 결과를 캘리브레이션 하고자 하였다.

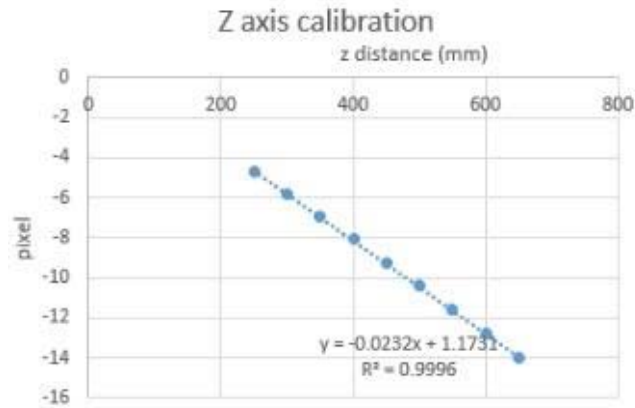


그림 807 Z axis regression result

삼각 측량을 통하여 구해진 Z축 값을 실제 거리와 캘리브레이션 한 결과는 위 그림과 같다. x축은 Z 방향의 mm 단위의 거리를 의미하며, y축은 삼각 측량 결과(Z)를 의미한다.

	z	err	z	err	z	err
250	257.5083	7.508276	253.7602	3.760172	254.1581	4.158147
	254.5384	4.538362	253.4444	3.444397	253.271	3.271034
	254.4006	4.400603	252.7693	2.769267	254.0172	4.017241
	average	4.2075				
300	304.3177	4.317672	301.8474	1.847371	301.3354	1.335388
	303.1195	3.119526	300.7697	0.769741	302.2671	2.267112
	301.8431	1.84306	300.6141	0.614052	300.1147	0.114698
	average	1.80318				
350	351.1695	1.169526	348.5085	1.491509	346.9564	3.043621
	351.4475	1.447543	347.3881	2.611853	348.6422	1.357845
	351.261	1.260991	347.7101	2.289871	347.4427	2.557328
	average	1.914454				
400	397.8013	2.198707	396.196	3.804009	396.9269	3.073103
	398.4034	1.596552	395.1943	4.80569	395.9834	4.016552
	396.6447	3.355302	395.6589	4.341121	395.2314	4.768621
	average	3.551073				
450	451.4678	1.467802	450.05	0.049957	448.2394	1.760603
	450.7269	0.726897	449.6189	0.381078	445.4485	4.551509
	449.4116	0.588362	450.5669	0.566853	448.7564	1.243621
	average	1.259631				
500	502.0639	2.063922	499.5364	0.463578	496.4988	3.50125
	506.8753	6.875345	495.683	4.316983	493.5544	6.445603
	504.3739	4.373879	492.3995	7.600517	495.9328	4.067241
	average	4.412035				
550	552.0757	2.07569	551.1112	1.111207	544.0299	5.970129
	552.1237	2.123664	551.4456	1.445603	539.8329	10.16711
	547.8287	2.171336	544.0487	5.951336	547.4834	2.516638
	average	3.725857				
600	600.938	0.938017	603.3241	3.324095	598.646	1.354009
	601.3356	1.335647	598.9413	1.058707	602.9888	2.988793
	600.8737	0.873664	599.6393	0.360733	597.6703	2.329698
	average	1.618151				
650	659.7589	9.758879	651.5369	1.53694	651.4552	1.455216
	660.42	10.41996	656.3934	6.393448	652.5703	2.570259
	655.4193	5.419267	657.5159	7.515948	646.9804	3.019612
	average	5.343281				
700	713.25	13.25004	696.5295	3.470474	700.8044	0.80444
	713.1352	13.13522	709.7096	9.709569	703.1752	3.175172
	702.2697	2.269698	697.853	2.146983	703.729	3.728966
	average	5.743396				
	total	3.092796	RMSE	4.337404		

ㄹ 151 Z axis calibration results. (Unit : mm)

해당 회귀식과 250~700mm 거리의 캘리브레이션 보드 영상의 픽셀을 이용하여 거리를 계산한 결과는 표 151과 같다. 각 거리에서 9개의 좌표를 비교하였다.

전체 오차의 평균은 약 3.09mm, RMSE는 약 4.34mm 이며, 최대 오차는 700mm에서 13.25mm로 나타났다. 700mm 에서의 평균오차는 5.74mm, RMSE는 7.37mm로 나타났다.

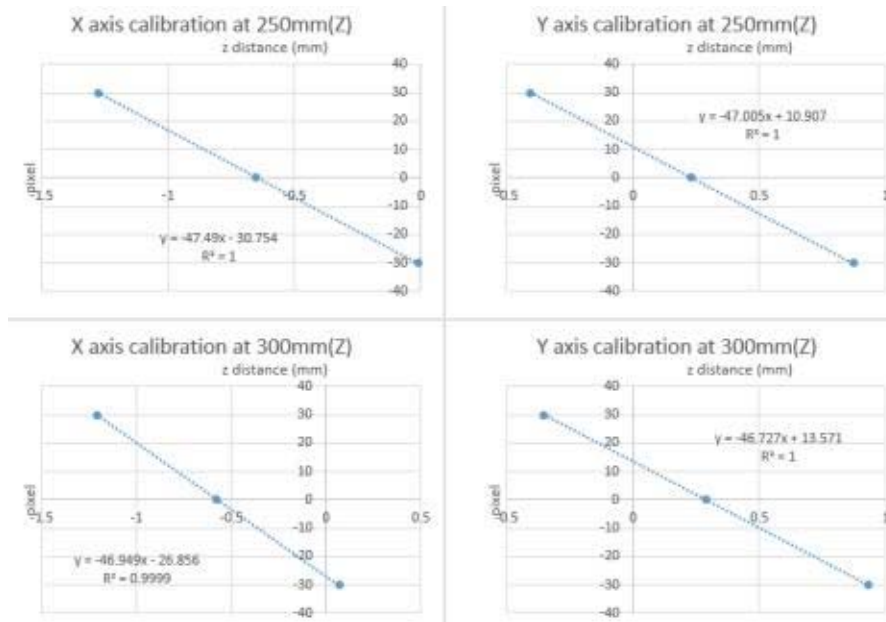


그림 808 X, Y regression result(250, 300mm)

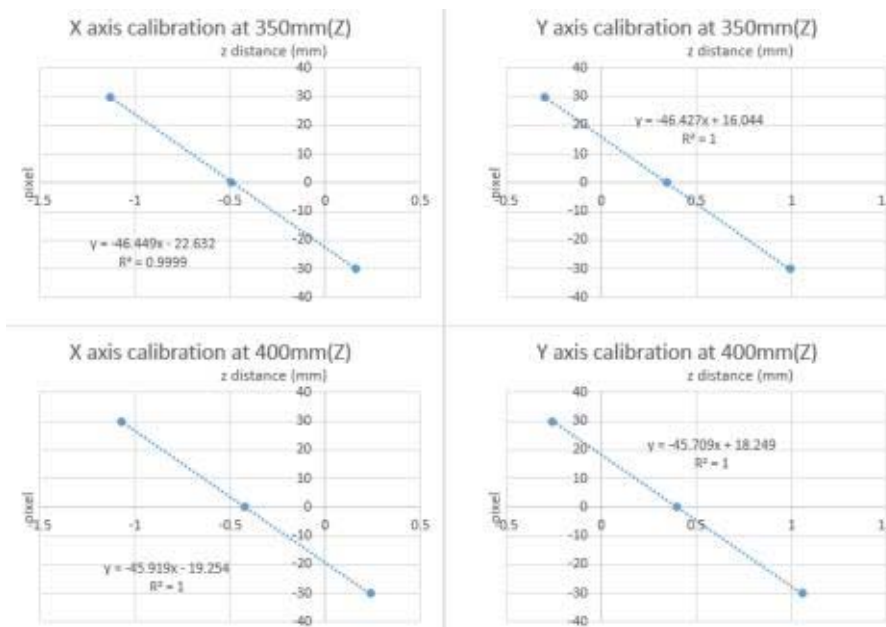


그림 809 X, Y regression result(350, 400mm)

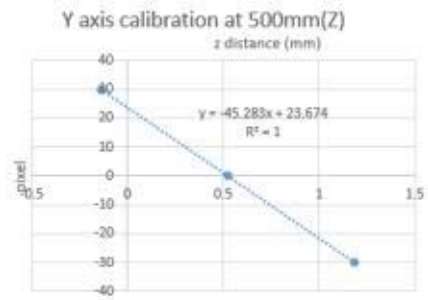
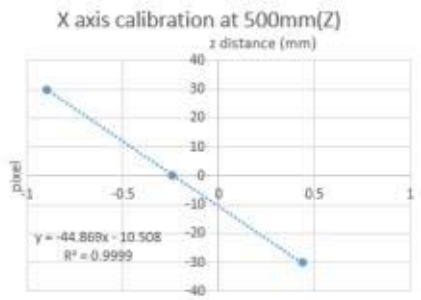
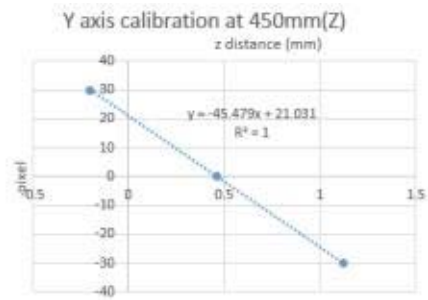
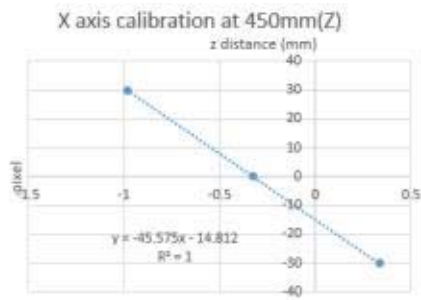


그림 810 X, Y regression result(450, 500mm)

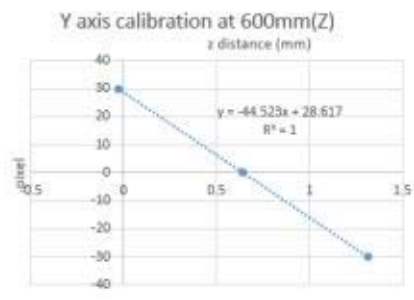
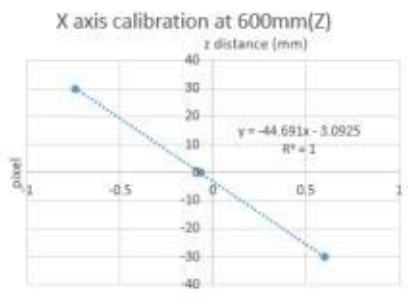
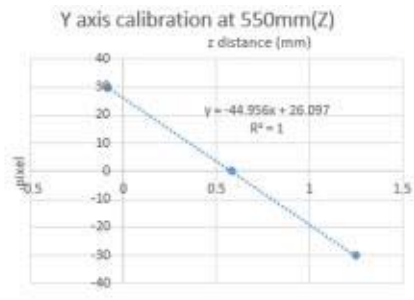
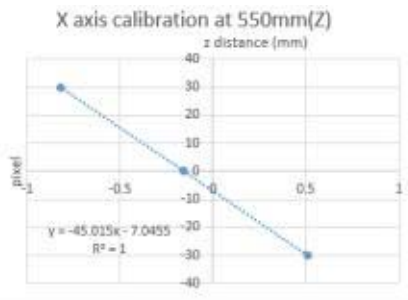


그림 811 X, Y regression result(550, 600mm)

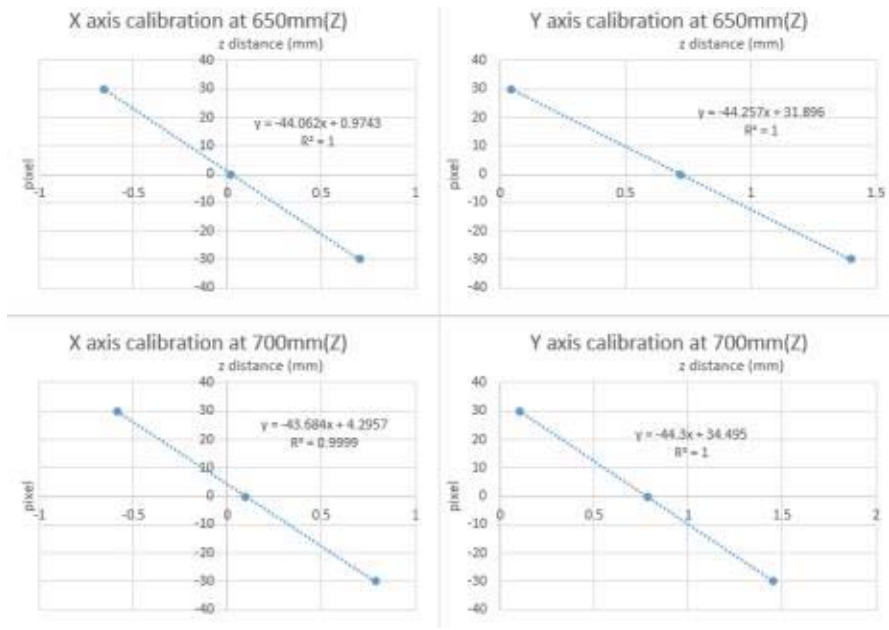


그림 812 X, Y regression result(650, 700mm)

그림 808부터 812는 250mm에서 700mm까지 회귀식을 통한 캘리브레이션을 보여주는 것으로 각 그래프의 가로 축은 삼각 측량을 통하여 계산된 값을 의미하며 세로 축은 -30, 0, 30mm의 실제 공간상의 좌표를 의미한다.

Z	x			y		
	gradient	y intercept	R2	gradient	y intercept	R2
250	-47.490	-30.754	1	-47.005	10.907	1
300	-46.949	-26.856	0.9999	-46.727	13.571	1
350	-46.449	-22.632	0.9999	-46.427	16.044	1
400	-45.919	-19.254	1	-45.709	18.249	1
450	-45.575	-14.812	1	-45.479	21.031	1
500	-44.869	-10.508	0.9999	-45.283	23.674	1
550	-45.015	-7.046	1	-44.956	26.097	1
600	-44.691	-3.093	1	-44.523	28.617	1
650	-44.062	0.974	1	-44.257	31.896	1
700	-43.684	4.296	0.9999	-44.300	34.495	1

표 152 X, Y calibration results according to Z distance

선형 회귀를 통하여 구해진 회귀식의 기울기와 y 절편, 그리고 결정계수를 표 152에 표시하였다. 각 값은 직선에 근접한 값으로 나타나며 X, Y축 방향의 왜곡 없이 결과를 추출한 것을 확인할 수 있다.

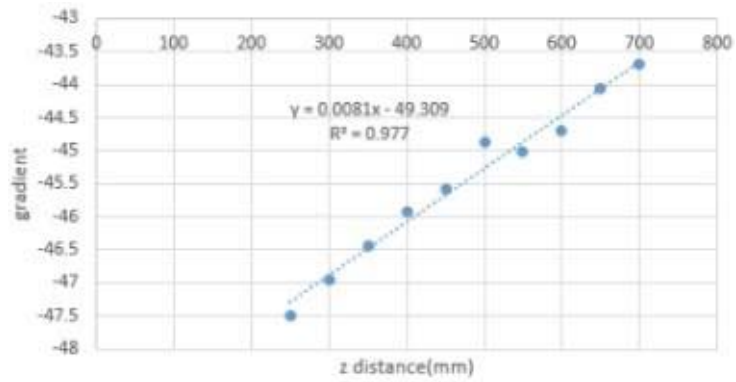


그림 813 Regression result of X (gradient)

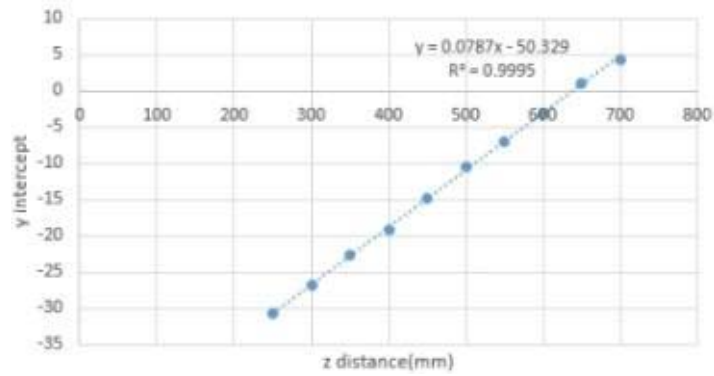


그림 814 Regression result of X (y intercept)

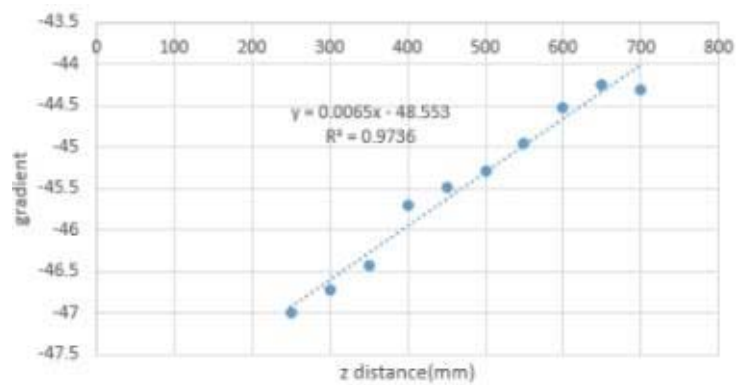


그림 815 Regression result of Y axis (gradient)

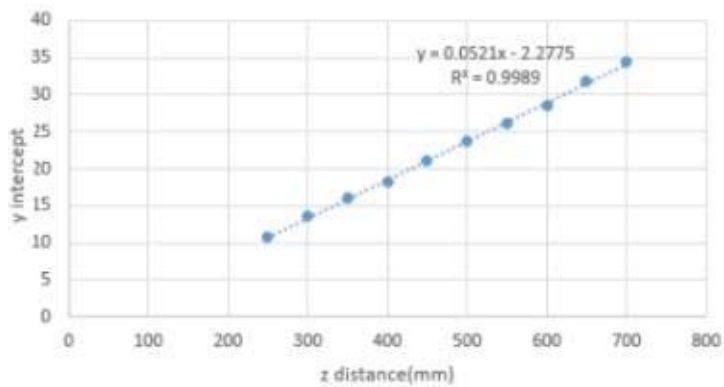


그림 816 Regression result of Y (y intercept)

그래프는 각각 기울기와 y 절편이 Z거리에 대해 변화하는 추세를 보여주고 있으며 x축은 Z 방향 거리(250~700mm), y축은 회귀식의 기울기(또는 y 절편)를 나타낸다.

X축에 대한 결과를 그래프로 나타내고 선형 회귀를 수행한 결과 y 절편의 경우 결정 계수가 0.99 이상으로 직선에 근접한 결과를 보였으나 기울기의 경우 결정 계수가 약 0.98로 오차가 존재함을 확인 할 수 있었다. 이는 다음 그림에서 y축에 대한 결과를 확인 했을 때도 같은 경향을 보인다.

	x	y	z	x	y	z	x	y	z
250	-29.43	-30.80	257.51	3.42	-29.70	253.76	35.56	-28.96	254.16
	-29.48	-0.10	254.57	3.09	-0.08	253.44	35.10	0.50	253.27
	-29.69	30.11	254.40	2.86	29.90	252.77	35.02	29.90	254.08
300	-29.89	-30.76	304.38	3.68	-29.93	301.85	36.17	-29.25	301.34
	-30.09	-0.29	303.12	2.96	-0.12	300.77	36.29	0.32	302.27
	-30.29	29.82	301.84	3.17	29.90	300.61	35.28	29.56	300.11
350	-30.89	-30.804	351.17	3.05	-29.98	348.51	36.03	-29.27	346.96
	-31.05	-0.32	351.45	2.71	-0.07	347.39	36.11	0.22	348.64
	-31.42	29.77	351.26	2.59	29.79	347.71	35.63	29.83	347.44
400	-31.14	-30.87	397.80	3.19	-30.02	396.20	37.51	-29.68	396.93
	-31.57	-0.08	398.40	2.84	0.20	395.20	37.07	0.38	395.98
	-31.54	30.04	396.64	2.98	30.16	395.66	36.67	30.09	395.23
450	-32.52	-30.67	451.47	2.70	-29.92	450.05	37.27	-29.54	448.24
	-32.50	-0.16	450.76	2.38	-0.12	449.62	36.70	0.30	445.45
	-32.77	30.07	449.41	2.28	30.13	450.57	36.60	30.28	448.76
500	-33.65	-30.44	502.06	2.11	-30.18	499.54	37.03	-29.32	496.50
	-34.14	-0.29	506.88	1.42	0.13	495.68	36.48	0.30	493.55
	-34.21	30.12	504.37	1.10	29.71	492.40	36.32	30.06	495.93
550	-34.34	-30.48	552.08	1.69	-29.86	551.11	36.88	-29.11	544.03
	-34.31	-0.03	552.12	1.36	-0.01	551.45	36.58	0.57	539.83
	-34.71	30.00	547.83	1.07	29.88	544.05	36.42	30.37	547.48
600	-35.52	-30.08	600.94	1.24	-29.93	603.32	37.19	-29.31	598.65
	-35.48	-0.074	601.34	0.06	0.44	598.94	37.51	0.83	602.99
	-35.83	30.10	600.87	0.56	30.50	599.64	36.35	30.34	597.67
650	-37.02	-30.86	659.76	0.28	-30.11	651.54	37.16	-29.48	651.46
	-36.97	-0.66	660.42	0.28	0.27	656.39	36.88	0.43	652.57
	-36.96	29.71	655.42	-0.08	30.14	657.52	36.17	29.73	646.98
700	-37.58	-30.43	713.25	0.23	-29.41	696.53	37.24	-28.92	700.80
	-38.00	-0.14	713.14	-0.31	0.44	709.71	37.55	0.58	703.18
	-38.05	29.64	702.27	-0.55	29.77	697.85	36.68	30.18	703.73

표 153 Calculated real coordinates using calibration result. (Unit : mm)

캘리브레이션 결과를 이용하여 측정된 값을 실 거리(unit: mm)로 변환한 값은 상기 표와 같다. (-30, -30), (0, -30), (30, -30), (-30, 0), (0, -30), (30, 0), (-30, 30), (0, 30), (30, 30)의 9개 점에 대한 측정값이므로 해당 값과 차이를 오차로 작성하였다.

	x	y	x	y	x	y
250	0.56546	0.803667	3.420682	0.299642	5.56067	1.04433
	0.524947	0.104827	3.0925	0.075133	5.096793	0.504625
	0.306349	0.111209	2.863759	0.10437	5.02274	0.10028
average	2.939322	0.349787		RMSE	3.532094	0.486585
300	0.109438	0.75546	3.67746	0.068015	6.116602	0.752719
	0.091402	0.287573	2.959775	0.122866	6.290532	0.316327
	0.292264	0.177389	3.170076	0.101378	5.2756	0.442161
average	3.109239	0.335988		RMSE	3.905191	0.418601
350	0.893196	0.803972	3.053641	0.020351	6.034254	0.732989
	1.049209	0.322984	2.70654	0.065903	6.119942	0.217925
	1.417983	0.2312	2.587058	0.212229	5.628363	0.167077
average	3.276687	0.308292		RMSE	3.841248	0.40368
400	1.138357	0.871371	3.187347	0.017268	7.512907	0.315165
	1.571537	0.079038	2.83826	0.197737	7.073678	0.383131
	1.535734	0.039361	2.983426	0.156673	6.667332	0.092901
average	3.834287	0.239183		RMSE	4.523688	0.347335
450	2.524684	0.669378	2.704685	0.080065	7.270802	0.459439
	2.501863	0.162198	2.377894	0.116476	6.698824	0.29953
	2.765067	0.06704	2.284641	0.12521	6.604644	0.217192
average	3.970345	0.244059		RMSE	4.470003	0.309569
500	3.654117	0.435089	2.107239	0.178449	7.03096	0.680602
	4.13694	0.287284	1.416952	0.126885	6.484032	0.296775
	4.214236	0.119418	1.098195	0.291339	6.317449	0.057937
average	4.051125	0.274864		RMSE	4.561531	0.328899
550	4.343547	0.4825	1.693646	0.137737	6.869559	0.891608
	4.31039	0.030256	1.361284	0.012916	6.584175	0.574773
	4.71429	0.000471	1.068459	0.116275	6.415277	0.369261
average	4.151181	0.290644		RMSE	4.681304	0.412049
600	5.520116	0.076396	1.235402	0.066622	7.189202	0.687438
	5.477372	0.074	0.059634	0.439964	7.509426	0.831693
	5.83443	0.095625	0.563616	0.498957	6.353941	0.335261
average	4.415904	0.345106		RMSE	5.215468	0.440215
650	7.021469	0.863283	0.28062	0.106457	7.157104	0.516538
	6.966885	0.65577	0.281606	0.27364	6.877148	0.430813
	6.962826	0.290138	0.078234	0.137246	6.172168	0.2745
average	4.644229	0.394265		RMSE	5.608511	0.458534
700	7.575436	0.42991	0.230279	0.588689	7.24278	1.083662
	7.995063	0.137489	0.313775	0.438438	7.554923	0.579121
	8.04809	0.36146	0.554463	0.234472	6.682617	0.179155
average	5.133047	0.448044		RMSE	6.152967	0.523868
total	3.952537	0.323023		RMSE	4.6492005	0.4129335

표 154 Errors of calculated real coordinates. (Unit : mm)

전체 평균 오차는 X: 3.95mm, Y: 0.32mm, RMSE는 X: 4.65mm, Y: 0.41mm로 나타났으며 구간 별로 보았을 때 Z방향 700mm 거리에서 X 방향 오차가 7.99mm로 가장 크게 나타났다. 이는 Z calibration 결과에서도 같은 점에서 가장 큰 오차가 나타났기 때문인 것으로 사료된다. 700mm에서 큰 오차가 발생하는 이유를 분석하고 이를 해결 한다면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

스테레오 정합 결과와 삼각측량을 통하여 실제 거리를 계산한 결과를 확인하고자 시스템의 작업 영역인 350~600mm에서 50mm 간격으로 레이저 광원을 조사한 파프리카 모형 영상을 획득하고 검증 실험을 수행하였다. 먼저, 삼각측량의 과정 중 계산된 투영 행렬 P를 검증하기 위하여 영상에 나타나는 점의 좌표 x와 공간상의 점 X를 P를 이용해 역투영하여 구한 좌표를 비교하였다.

Real Z (mm)	Average error x (pixel)	Average error y (pixel)	RMSE x (pixel)	RMSE y (pixel)
350	-0.014	3.080	0.022	3.145
400	-0.008	1.738	0.019	1.957
450	-0.013	1.059	0.024	1.492
500	-0.020	1.226	0.032	1.672
550	-0.020	0.958	0.030	1.485
600	-0.022	0.125	0.030	1.403

표 155 Reprojection errors according to Z.

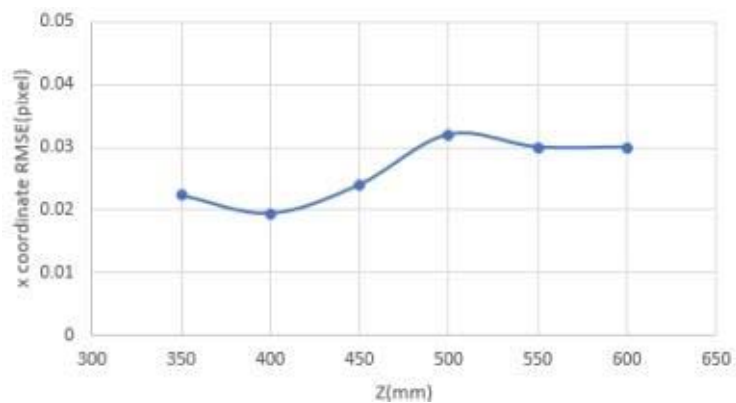


그림 817 RMSE of x coordinate computing.

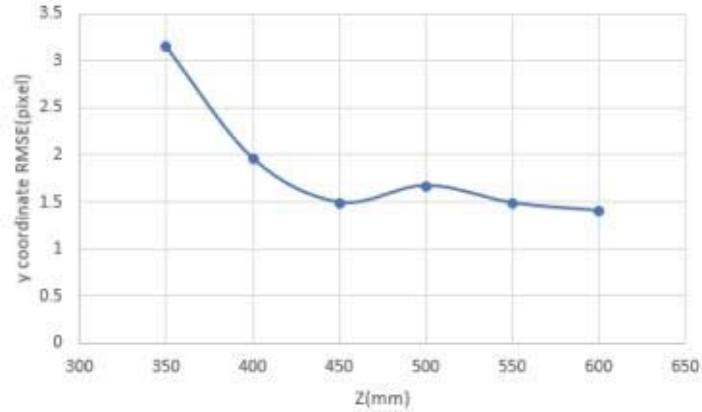


그림 818 RMSE of y coordinate computing.

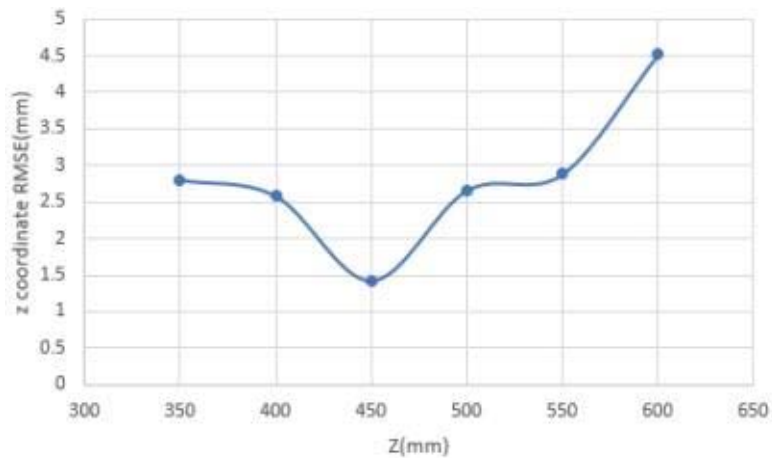


그림 819 RMSE of z coordinate computing.

각 거리에서 30개 좌표를 추출하여 오차와 RMSE를 구하였다. x축의 경우 약 0.02~0.03 화소의 오차를 보였으며 500mm에서 가장 큰 오차를 보인다. 하지만 이는 최소 오차와 0.013mm의 차이이다. y축의 경우 350mm 거리에서 오차가 3.145mm로 가장 큰 오차를 보였다. 가까울수록 디스퍼티의 크기가 커지고 그에 따라 캘리브레이션 및 정합 오차 또한 증가 한 것으로 사료된다. 거리(Z)에 대한 삼각측량 결과를 확인하기 위하여 350~600m 구간에서 획득한 영상에서 구해진 z 값과 실제 거리 Z의 값을 각 거리별로 30개의 좌표를 추출하여 검증하였다. 600mm 거리 구간에서 최대 약 4.5mm의 오차를 확인할 수 있었다. 거리가 가까울수록 작은 화소의 오차로 큰 오차가 발생하였고 영상의 왜곡에 의하여 오차가 커지는 경향을 확인할 수 있었다.

추출된 대응점을 이용하여 대응점간의 거리를 계산하고 해당 거리와 카메라 내부 함수를 이용하여 삼각 측량을 수행하였다. 삼각 측량의 결과를 이용하여 3차원으로 재구성 하였다. 카메라의 주선을 실 좌표계의 0, 0으로 설정하여 3차원 좌표를 계산하였다. 실험을 위하여 사용한 영상에는 파프리카 모형, 캘리브레이션 보드, 컴퓨터 등이 존재하였다. 영상에 나타나는 파프리카는 카메라로부터 z 방향으로 350mm 거리에 있으며, y 방향으로 50mm 아래에 존재한다. 캘리브레이션 보드는 z 방향으로 500mm, y 방향으로 120mm 아래에 존재하고 있으며, 가장 멀리 있는 책장은 z 방향으로 1200mm 거리에 존재한다.



그림 820 Result image of 3D points calculation with developed program.

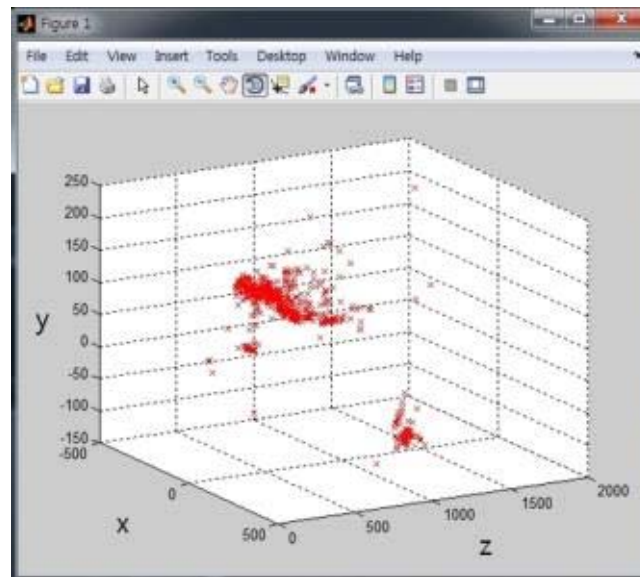


그림 821 x-y-z isometric projection graph.

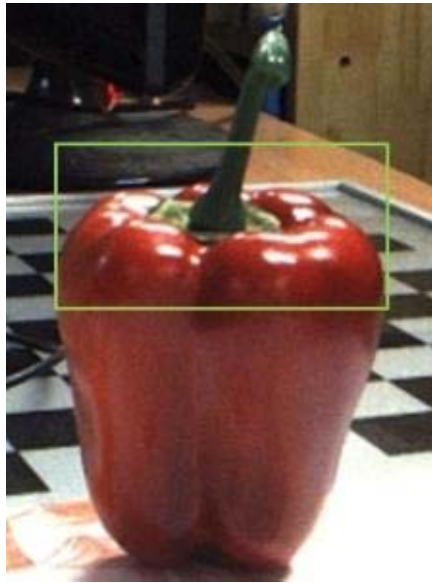


그림 822 Sweet-pepper model.

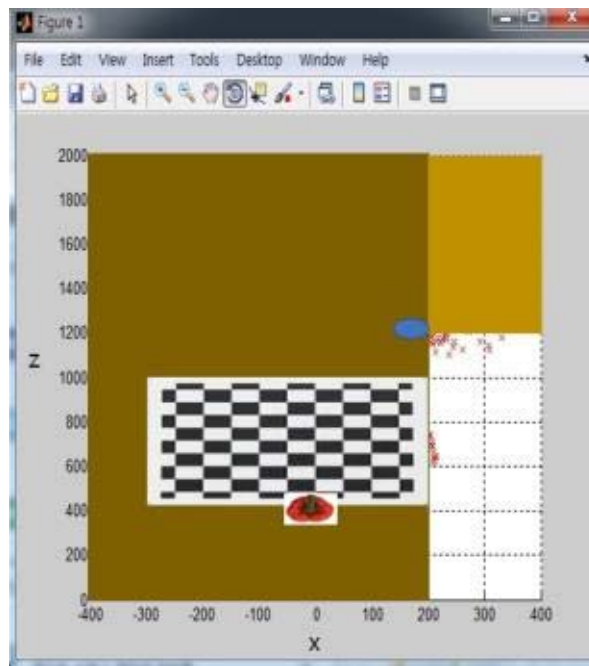


그림 823 Real object Position.

Z축의 경우 스테레오 매칭에 실패한 경우 음의 값이 발생 하는 것으로 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 Z값이 음인 경우 매칭에 실패 한 것으로 보고 제거 하였다.

x, y, z축 중앙(x = -15~20mm, y = 0mm, z = 370~400mm) 영역에서 점이 무리지어 있는 것을 확인 할 수가 있는데 해당 위치가 그림 4-72에서 중앙의 파프리카가 존재하는 위치다. 파프리카의 상단에 존재하는 점들에 의한 결과로 확인하였으며 이는 조명에 의하여 생긴 특징점으로 판단된다.

그림 824는 영상에 존재하는 파프리카, 캘리브레이션 보드, 우산, 책장, 책상의 위치를 그래프 상에 위치한 것이다. z 축의 범위가 x축에 비해 크기 때문에 x축과 z축을 약 1:2.5의 비율로 나타내었다. x축 중앙의 전면에 파프리카가 위치하고 바로 뒤에 캘리브레이션 보드가 위치한다. 그리고 우측 1200mm 후방에 책장이 존재한다.

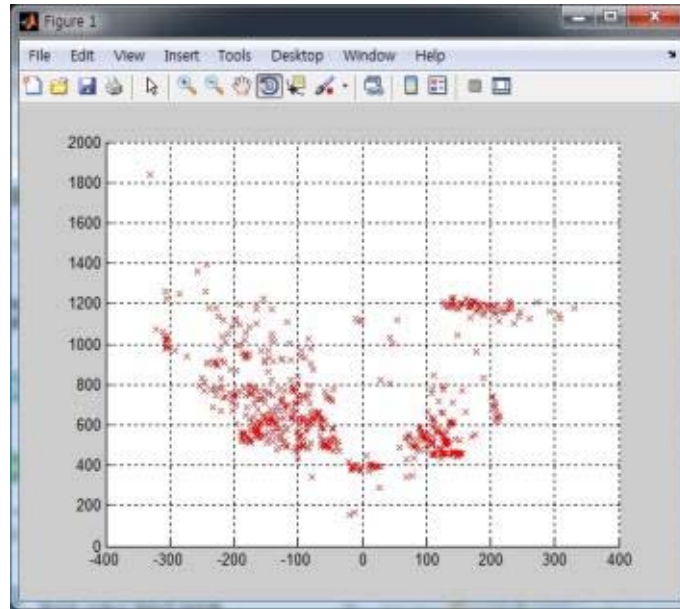


그림 824 x-z plane projection graph.(mm)

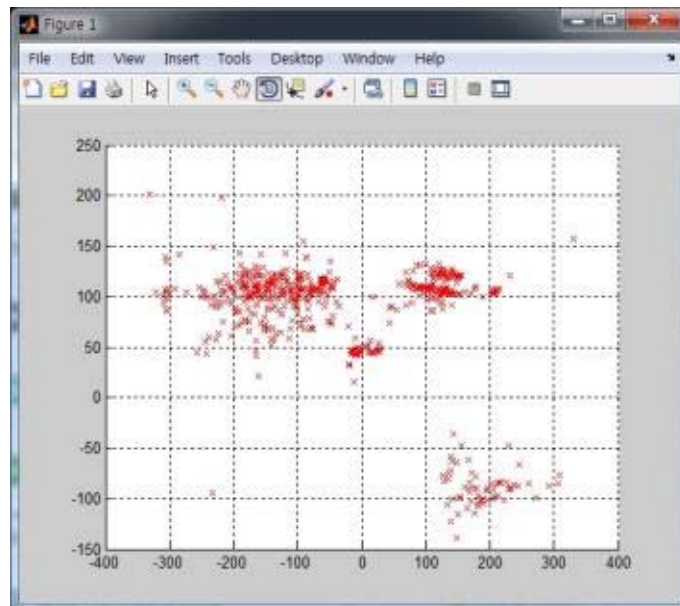


그림 825 x-y plane projection graph.(mm)

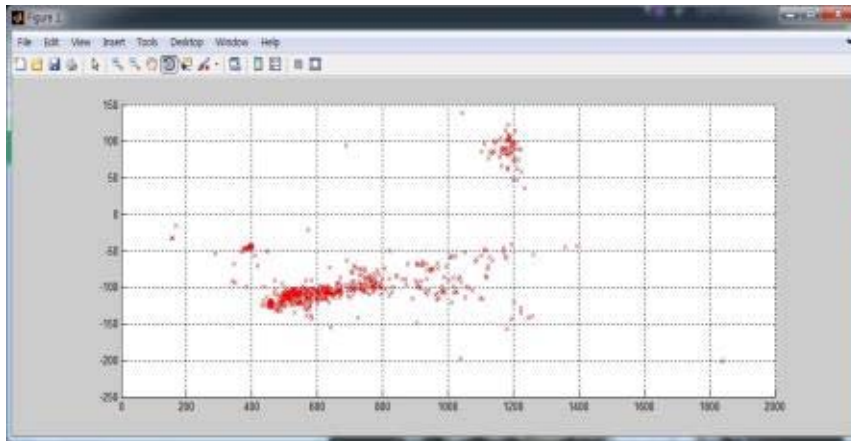


그림 826 Reversed y-z plane projection graph.(mm)

그림 824는 x-z 평면을 나타낸 것으로 x축 0mm, z축 400mm에 파프리카의 위치가 나타난다. 그림 825은 x-y평면에서 본 그래프로 다음의 실제 스테레오 매칭 결과와 비교해 보면 캘리브레이션 보드, 파프리카, 책장의 높이를 감안했을 때 위의 그래프는 y축이 역전 되어 출력되었음을 확인 할 수 있다.

y-z 평면에서 y축을 반전시켜서 확인한 결과는 그림 826과 같다. y축 스케일과 z축 스케일을 유사하게 표현하고자 가로 방향을 늘려서 표현하였다. 그래프에서 실측 할 수 있는 점들을 이용하여 결과를 확인 하였다. 영상에 나타나는 파프리카의 상단 부위와 캘리브레이션 보드, 책장의 옆면과 같이 특정 할 수 있는 50개의 지점에 대하여 거리를 실측한 결과와 그래프의 결과를 비교하면 z축 최대 오차 109.6mm, 평균 오차 29.7mm, y축 최대 오차 66.0mm, 평균 오차 13.3mm, x축 최대 오차 61.3mm, 평균 오차 15.8mm로 나타났다. 오차가 크게 나타나는 영역은 카메라로부터의 거리가 700mm 이상인 영역으로 실제 캘리브레이션에서 포함되지 않은 영역이다. 특히, 카메라의 주선이 공간 좌표계와 수평하지 않기 때문에 이를 보정하는 과정이 필요할 것으로 사료된다.

SURF 특징점을 이용한 정합을 통하여 삼각 측량을 한 결과와 레이저 광원을 이용한 결과를 비교한 결과 레이저 광원을 이용하여 특징점을 표시하고 정합을 한 경우 특징점 추출이 용이하고 명확한 특징점 3개에 대하여 알고리즘을 수행하기 때문에 기존의 특징점 추출을 통한 정합 과정 보다 단순화 할 수 있었다. 또한, SURF 특징점을 통하여 계산된 z축 오차의 경우 평균 29.7mm이었으나 레이저 광원을 이용하여 정합을 수행한 결과 평균 8.34mm의 오차가 발생하였다. 파프리카에 직접 특징점을 제공하기 때문에 상대적으로 정확한 파프리카의 거리 정보를 획득 할 수 있었던 것으로 판단된다. 레이저 광원을 조사한 파프리카로부터 구한 결과를 삼각 측량에 적용한 경우 최대 오차가 4.5mm로 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

- 정상 파프리카 인식 성능 평가

히스토그램 분석을 통한 추출의 경우 히스토그램을 분석하는 과정에서 많은 시간이 소모된다. 또한, 대상물이 바뀌는 경우 HSI 이외의 정보가 필요하게 될 수 있으며 더 많은 분석이 필요하였다. BP 학습에 의한 추출의 경우 어떠한 학습인자를 사용하는가에 따라 학습의 효율이 달라진다. 색상으로 대상을 추출 할 수 있는 경우 HSI, RGB, YCbCr의 색상 값에 대한 입력을 넣는 것만으로 학습이 가능하다. 하지만 가중치에 따른 결과를 확인 하는데 걸리는 시간은 임계값 추출 보다 많이 소모되는 것을 확인 하였다. 심층 학습의 경우 BP에 비하여 적은 입력으로도 학습이 가능했다. 하지만 은닉층의 수가 많아질수록 소요 시간이 증가하였다. 따라서 각 방법을 선택적으로 적용하는 것이 필요할 것으로 사료된다.



그림 827 Original image before thresholding using H, S value.



그림 828 Thresholding result image(#1).



그림 829 Thresholding result image(#2).

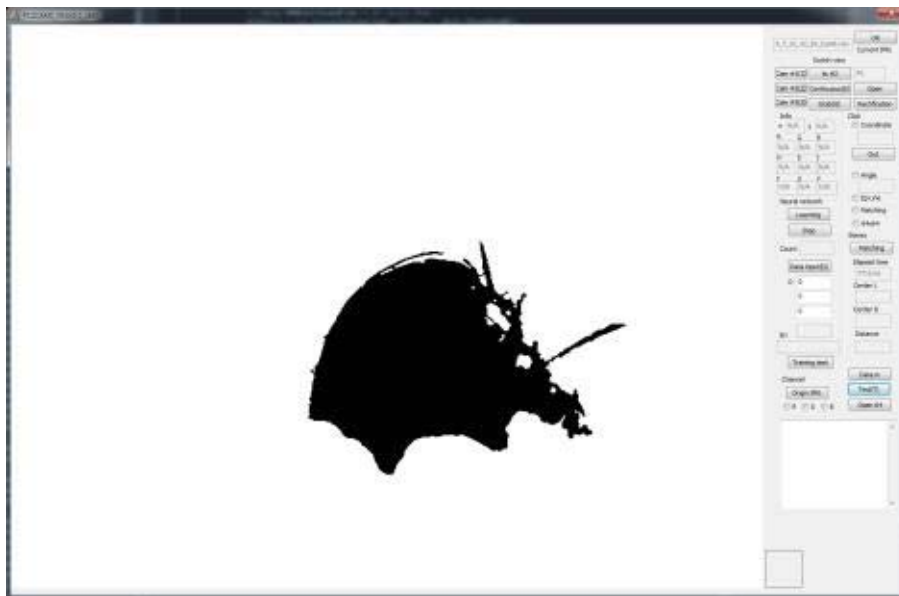


그림 830 Result image using trained neural network.

그림 827는 임계화 이전의 원본 영상을 나타내고 있다. 해당 영상에는 직사광선에 의한 명암이 강하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 그림 828, 829는 그림 827를 H, S 값을 이용하여 임계화 한 결과이다. 그림 828은 S 값의 임계치를 낮게 설정하여 대부분의 음영 영역이 제거 된 것을 확인 할 수 있으며, 그림 829는 임계치를 높게 설정하여 파프리카가 아닌 영역까지 추출 된 것을 확인 할 수 있다. 이 경우 H, S만을 이용하여 파프리카 영역을 추출 하는 것에는 무리가 있다.

그림 830는 그림 829에 학습된 인공 신경망 알고리즘을 적용한 결과이다. 가중치와 입력 픽셀의 정보를 이용하여 활성화 출력을 영상으로 표현하고 노이즈를 제거하여 파프리카 영역을 추출 할 수 있었다.

파프리카 평균 길이는 92.15mm, 평균 직경은 80.92mm다. 이를 이용하여 직사각형을 그리고 해당 내부에 각 길이를 장축과 단축으로 하는 타원을 그렸을 때 해당 타원의 넓이는 약 5856.5mm²가 되며 이는 직사각형의 약 78.54%의 영역이 된다. 실제 농가에서 파프리카를 수확할 때 파프리카는 80% 가량 색이 나타난 것을 수확하기 좋은 것으로 보는데 본 시스템에서는 영상에 나타나는 파프리카의 반대 측면을 확인 할 수 없기 때문에 90% 이상 성숙한 것을 수확하도록 하였다. 따라서 추출한 파프리카 예상 영역을 나타내는 사각형 내부에서 색상을 갖는 픽셀이 70% 이상 존재할 경우 해당 파프리카를 수확 대상으로 판정하도록 알고리즘을 작성 하였다.

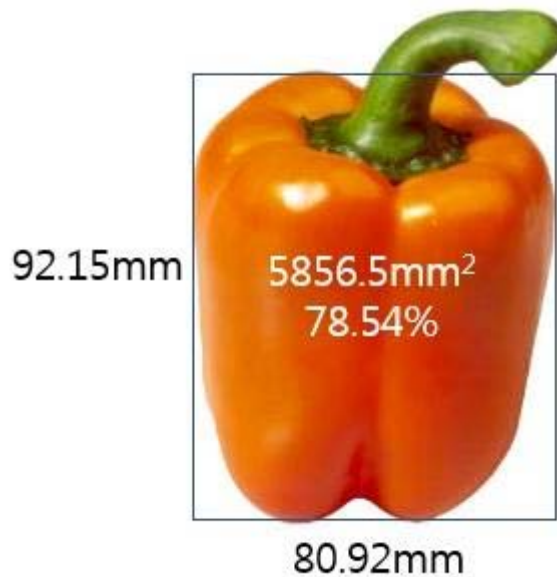


그림 831 Approximated percentage using average appearance.

파프리카 인식 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 269개의 파프리카 영상을 이용하여 파프리카를 추출하는 알고리즘을 수행하였다. 그 결과 파프리카 인식에 성공한 확률은 91.82%였다. 인식에 실패한 경우는 명암의 차이가 심한 경우 인식에 실패한 경우가 1회(0.37%) 발생하였다. 잎, 가지 등에 의하여 가려진 영역이 많은 경우 인식 실패한 경우가 21회(7.81%) 발생하였다. 명암의 차이가 심한 경우 인식에 실패하였는데 이는 직사광선으로 인하여 측정한 색상(hue) 값이 실제 색과 다르기 때문으로 확인하였다. 이는 조명 환경 제어를 통하여 극복 가능 할 것으로 사료된다. 잎, 가지 등에 의하여 가려진 영역이 많을 때 인식 실패한 경우는 수확 로봇이 이동하면서 다른 각도에서 영상을 획득하면 추출 할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 공기를 분사하는 등 잎을 영상에서 제거 하는 방법을 추가한다면 성능을 향상 시킬 수 있을 것이다.

	총 횟수
인식 성공	247
인식 실패	22

표 156 파프리카 인식 알고리즘의 성능

3. 수확 후 파프리카의 운반을 위한 운반시스템 개발

○ 좁은 현장 상황을 고려한 주행부 및 운반부 설계 및 부분 제작

- 파프리카 재배 온실 환경을 통한 주행부 및 운반부 설계

파프리카 수확 시스템의 차량 부를 설계하기 위하여 파프리카 재배 온실을 방문하여 최소 착과 높이, 식재 간격, 레일 간격, 이랑 간격을 조사하였다.

경기도 고양시 소재 농가와 경북 구미시 소재 농가를 방문하여 조사한 결과는 다음과 같다.



그림 832 파프리카 농가 식재 모습

표 158 온실 환경 조사 결과

최소 착과 높이	600mm
식재 간격	300mm
레일 간격	440~460mm
레일 지름	약 100mm
이랑 간격	960~980mm, 1,200mm
온도	18~25°C
습도	약 70%

조사 결과에 따르면, 최소 착과 높이는 600mm로 차량부의 제작 시 수확 시스템의 최소 높이를 선정 하는데 유의해야 할 것으로 보이며, 레일 간격은 조절 할 수 있도록 설계토록 할 것이다. 또한, 레일의 형태가 일반 레일이 아닌 원통형인 경우도 있어 바퀴의 형태 선정 시 고려가

필요할 것으로 사료된다. 이랑 간격은 약 1m 내외로 차량의 폭을 해당 간격에 맞춰 설계할 계획이다.

파프리카는 2013년 575ha가 재배되고 있는데 그 중 100%, 즉 전부가 시설환경에서 재배되고 있다. 시설환경 중 유리온실(자동화·비닐 온실 재배 겸용 포함) 재배 농가는 25%, 자동화 온실(비닐 온실 재배 포함) 재배 농가는 57%, 비닐온실 재배 농가는 18%를 차지한다.

유리온실은 경상남도과 전라남도를 제외하면 평균 14,876㎡ 이상으로 규모가 크다. 경기도, 충청남도, 경상북도의 유리온실 농가 수는 적지만, 규모는 19,834㎡ 이상이며, 경상남도과 전라남도의 유리온실 농가 수는 비교적 많지만, 규모는 경상남도 6,611㎡, 전라남도 9,917㎡ 내외이다. 재배 농가가 57%로 가장 많은 자동화 온실은 강원도, 경상남도의 평균 재배면적이 6,611㎡ 내외이며, 전라남도는 6,611㎡ 내외이다. 전라북도는 5,619㎡ 정도에서 자동화 온실로 재배되고 있다. 자동화 온실은 시설 단가가 낮기 때문에 다른 온실들이 자동화 온실로 전환되고 있다. 비닐 온실은 강원도, 전라북도, 경상북도에서 주로 운영되고 있다. 비닐온실의 경우 난방 효율이 낮기 때문에 여름작형 재배에 이용되고 있다. 표 75는 (사)한국파프리카생산자자조회에서 제공한 2013년 파프리카 농가의 시설형태별 재배면적과 농가 수를 나타낸다.

표 75. 2013년 파프리카 농가의 시설형태별 재배면적과 농가 수 단위 : 평, 호(%)

지역	평균재배면적 농가 수	시설형태					
		유리온실	유리+자동화	유리+비닐	자동화온실	자동화+비닐	비닐온실
경기	6,873	6,873	-	-	-	-	-
	2(100.0)	2(100.0)	-	-	-	-	-
강원	2,105	4,567	5,350	-	2,102	2,000	1,460
	75(100.0)	3(4.0)	2(2.7)	-	48(64.0)	2(2.7)	20(26.7)
충남	6,848	6,848	-	-	-	-	-
	3(100.0)	3(100.)	-	-	-	-	-
전북	2,724	4,587	22,300	-	1,700	1,550	1,287
	48(100.0)	12(25.0)	1(2.1)	-	13(27.1)	6(12.5)	16(33.3)
전남	2,883	2,929	4,733	-	2,810	-	1,467
	49(100.0)	14(28.6)	3(6.1)	-	27(55.1)	-	5(10.2)
경북	3,222	7,100	-	-	5,000	-	1,860
	10(100.0)	2(20.0)	-	-	1(10.0)	-	7(70.0)
경남	2,135	2,103	3,058	2,500	2,134	2,000	1,947
	161(100.0)	23(14.3)	17(10.6)	2(1.2)	102(63.4)	1(0.6)	16(9.9)
제주	4,571	5,320	-	-	2,700	-	-
	6(100.0)	5(83.3)	-	-	1(16.7)	-	-
전체 농가수	354(100.0)	64(18.1)	23(6.5)	2(0.6)	192(54.2)	9(2.6)	64(18.1)

- 기존 파프리카 운반 대차의 운반부 비교 조사



그림 833 농가에서 사용 중인 차량 #1



그림 834 농가에서 사용 중인 차량 #2



그림 835 리프트 레일 차량

파프리카의 특성 상 성장을 약 5m까지 하기 때문에 현재 파프리카 농가에서 사용하는 차량은 리프트가 가능한 형태로 사람이 직접 리프트를 타고 올라가 작업을 하는 형태임을 확인하였다.

표 160 리프트 차량 사양

	A 제품	B 제품
길이	1500mm	1800mm
폭	530mm	550mm
높이(최소)	600mm	630mm
높이(최대)	2500mm	4000mm
배터리	DC 12V	DC 12V 2개
모터	150W	300W

기존의 차량의 경우 수평 방향의 레일 이동은 전력을 이용하여 전동으로 구동되지만 보조 바퀴의 경우 사용자가 직접 밀어서 인력으로 제어하고 있다. 본 연구에서는 수확 작업의 자동화를 위하여 보조 바퀴 또한 모터를 이용하여 제어하고자 한다.



그림 836 기존의 차량 상부 형태

그림과 같이 기존의 리프트 차량은 사람이 직접 탑승해서 조작하고 수확 하는 형태로 차량 상부에 손잡이, 제어기, 바닥 판이 설치되어 있다. 바닥 판의 크기는 길이 1600mm, 폭 400mm이며 손잡이의 높이는 1000mm다. 제어기는 전진, 후진, 이동속도 제어가 가능하고 리프트 상하 이동 및 보조 바퀴제어가 가능하도록 제작되었다. 하지만, 본 연구에서 개발하고자 하는 차량은 사람이 탑승하지 않고 수확기 시스템을 설치하고 자동으로 제어 할 계획이기 때문에, 상부의 형태를 목적에 부합하도록 설계할 필요가 있을 것으로 사료된다.

- 주행부 및 운반부 기초 시스템 설계

과프리카 수확 작업을 위해 최대 5000mm까지 작업이 가능한 시스템을 구현하기 위하여 리프트형 차량을 제작하여 높이 4000mm까지 수확 시스템을 운반할 수 있도록 하고자 하였다. 이 차량은 수확기와 연동하여 제어가 가능하도록 하며, 리프트의 움직임은 유압 시스템을 통하여 제어토록 할 계획이다. 본 차량의 설계에 가장 우선시 되는 부분은 높이 4000mm까지 리프트 할 수 있는 형태여야 하며, 차량 전복이 되지 않도록 안전성을 확보하는 것이다. 또한, 레일과 레일 사이를 이동 할 수 있도록 제어 가능한 보조 바퀴를 설계하였다.

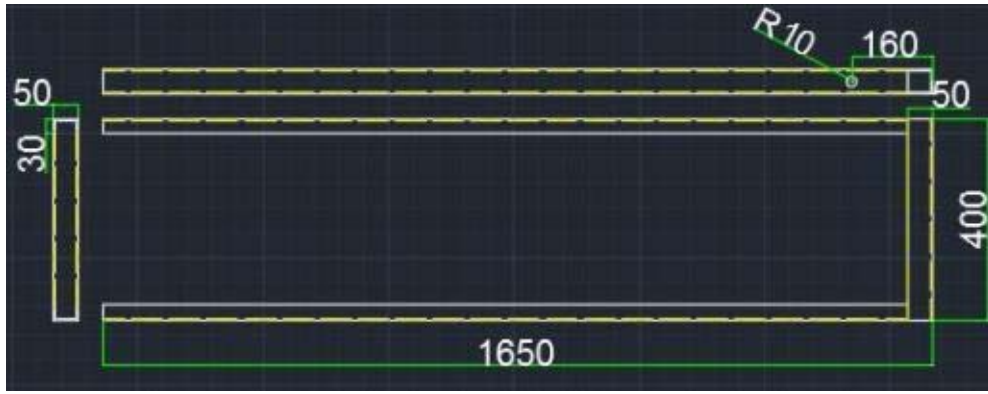


그림 837 리프트 상부 프레임

위 그림은 차량의 상부 프레임으로 리프트와 연결되어 상하로 이동하며 수확 시스템을 이송할 수 있는 역할을 하고자 한다. 수확 시스템은 해당 프레임의 중심에 추가적인 고정부를 설계하여 체결하며 리프트를 통해 최대 4000mm까지 이송이 가능하도록 설계하였다.

아래 그림은 리프트의 구조적인 형태로 내부 프레임과 외부 프레임은 유압 실린더로 연결되어 유압에 의하여 구동 하도록 할 계획이다.

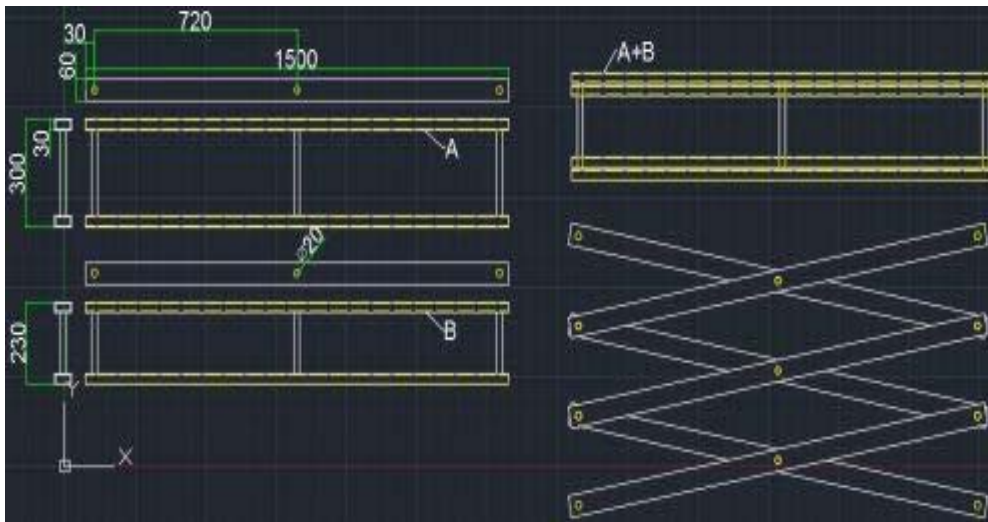


그림 838 리프터

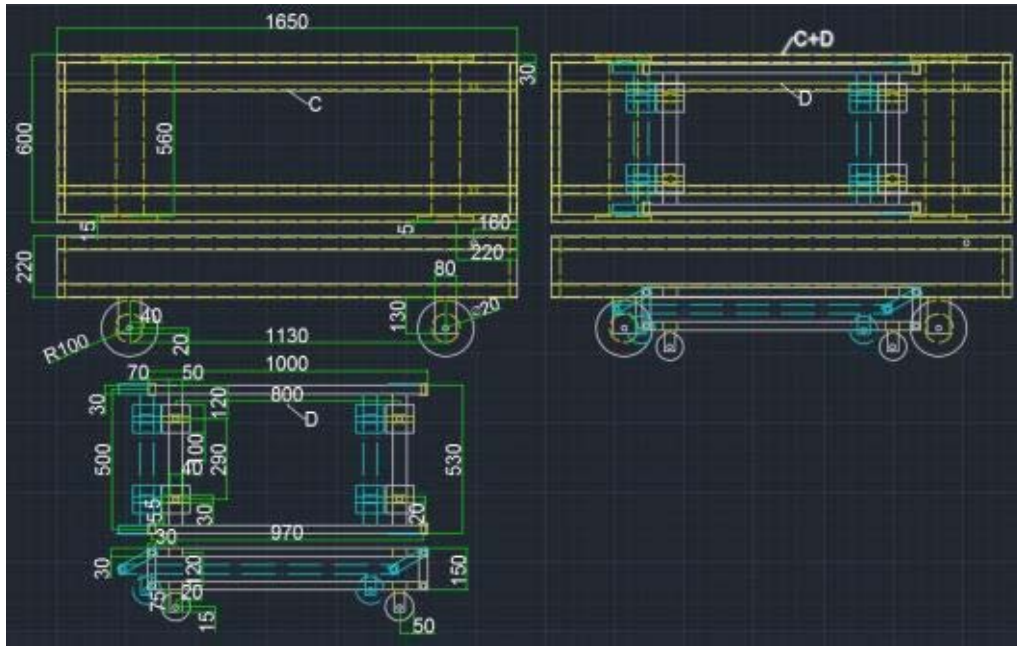


그림 839 하부 프레임과 보조 바퀴

차량의 본체라고 할 수 있는 하부 프레임과 차량의 수직방향 이동을 위하여 보조 바퀴를 설계하였다. 하부 프레임은 차량의 제어를 위하여 유압 실린더, 모터, 배터리를 설치 할 수 있도록 설계하였으며, 보조 바퀴는 접이식으로 수직 방향으로 이동 할 경우 유압 실린더를 이용하여 바퀴가 바닥에 접촉하여 전체 차량을 받칠 수 있도록 할 계획이다.



그림 840 보조바퀴 등각 투상도



그림 841 보조바퀴 평면도



그림 842 전체 차량의 등각 투상도



그림 843 리프트 작동 모습

- 안전성을 고려한 메카니즘 설계

차량 전복은 외부에서 작용하는 힘이 차량 중량에 의한 복원 모멘트보다 클 경우 발생한다. 국내에서 적용되고 있는 레일 차량에 대한 전복 안전도의 정의는 다음 그림과 같은 요인을 안전도식에 적용하고 있다.

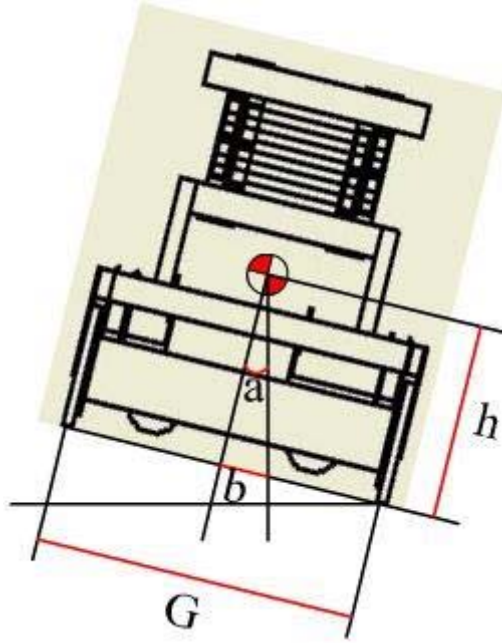


그림 844 대차 전복 안전도

전복 안전도는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\frac{G}{2} = S \cdot b \quad \text{수식 112}$$

G : 좌우 레일 접촉점간 거리

b : 레일의 중심에서 중량과 원심력의 합력이 캔트 평면과 교차되는 점까지의 거리

h : 무게중심의 높이

위 식에서 전복에 대한 안전율은 두 바퀴가 지면에 닿아 b=0일 때 무한대가 되고, 전도가 시작되는 순간 1이 된다. 즉, 안전율이 1보다 작아지면 전도가 발생한다(한국 철도 기술 연구원 1999). 틸팅 각도에 따른 안전율의 변화를 확인하기 위하여 다음과 같이 각도 a에 관한 식으로 정리하였다.

$$b = h \tan a \quad \text{수식 113}$$

$$\frac{G/2}{h \tan a} = S \quad \text{수식 114}$$

따라서 본 연구에서 설계된 리프트 대차의 전도에 대한 안전성을 유지하기 위하여 무게중심을 구하고, 틸팅 각도에 따라 변화하는 안전율과 리프트의 상하 운동에 따라 변화하는 무게중심의 이동에 따른 전복안전도를 구하였다.

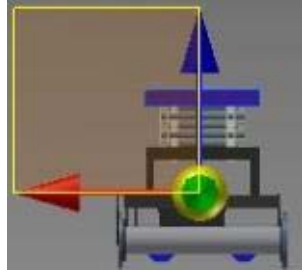


그림 845 리프트 최소
높이에서의 무게중심

리프트 최소 높이에서 전체 대차의 높이는 620mm이며, 이 때 무게 중심의 위치는 299.9mm(x), -840.0mm(y), 296.9mm(z)로 구할 수 있었다. 또한, 최대 높이에서 전체 대차의 높이는 4000mm로 무게 중심의 위치는 299.9mm(x), -754.0mm(y), 1006.948mm(z)였다.

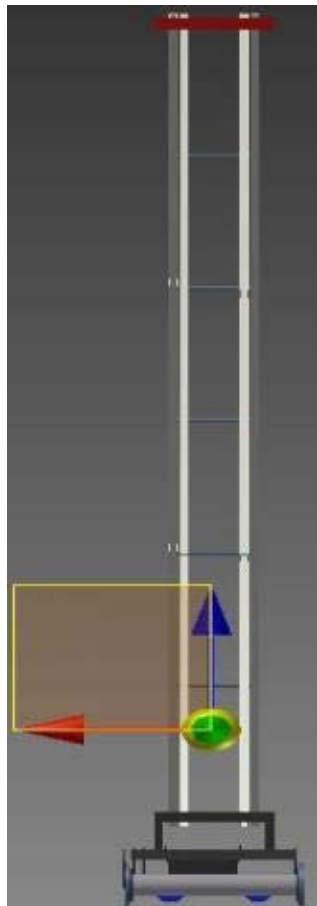


그림 846 리프트 최대
높이에서의 무게중심

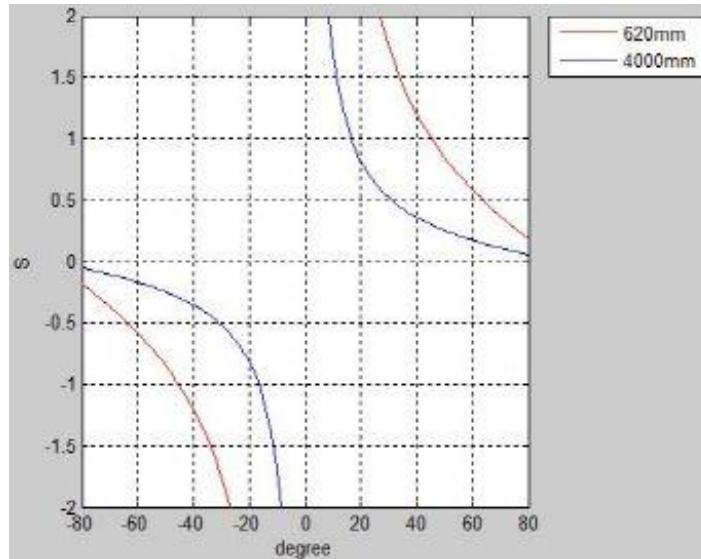


그림 847 각도변화에 따른 안전율 변화

앞서 언급한 바와 같이 안전율 1을 기준으로 그 이하일 때 전복이 시작되고, 1 이상에서 자체 중량에 의한 복원 모멘트에 의해 전복을 막을 수 있다. 위 그래프는 설계된 리프트 대차의 최소 높이인 620mm 일 때의 요인에 의해 계산된 결과(붉은색)와 최대 높이인 4000mm일 때의 요인에 의해 계산된 결과(푸른색)를 나타낸 것으로 y축은 S(안전율), x축은 차체의 각도를 표현한다. 620mm일 때 안전율 1을 넘지 않기 위해서는 틸팅 각도 $\pm 45.28^\circ$ 를 넘지 않아야 하고, 4000mm 일 때는 $\pm 16.59^\circ$ 를 넘지 않아야 한다. 이러한 조건을 벗어나지 않도록 레일을 배치하고, 대차의 주행을 수행해야 할 것으로 사료된다.

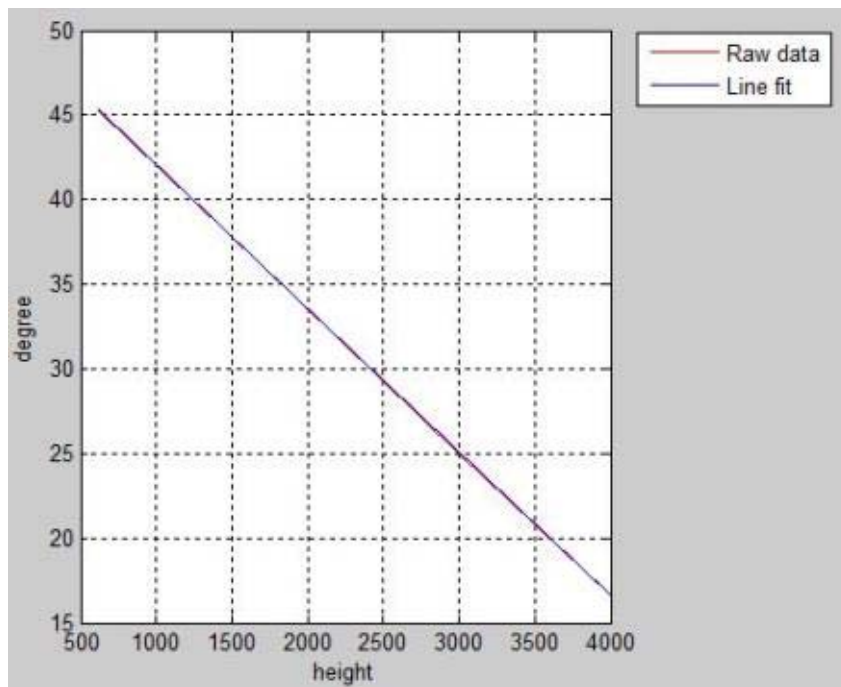


그림 848 대차 높이 변화와 안전각도의 관계

위 그래프는 대차 높이에 따라 움직이는 무게중심의 위치 변화에 의한 안전각도 변화를 나타낸

것으로 붉은색 선은 해당 높이에서의 안전 각도를 계산한 값이고, 파란색 선은 각 계산 값을 선형으로 회귀한 결과를 의미한다. 각도와 높이의 관계에 대해 선형 회귀를 수행한 결과 회귀식은 다음 식과 같고 결정 계수는 1이다.

$$d = -0.0085h + 50.5514 \quad \text{수식 115}$$

추가적으로 차량 자체의 중량에 의해 발생하는 복원 모멘트를 다음의 그림과 같은 방법으로 구하였다.

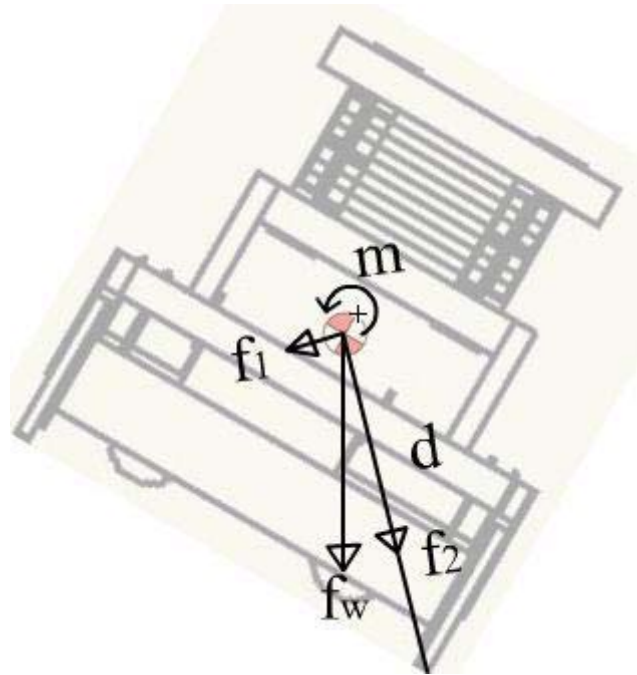


그림 849 차체 자체의 중량에 의해 발생하는 모멘트

설계된 차량의 자체 중량은 재질을 알루미늄으로 선정할 경우 밀도가 2.7g/cm^3 로 총 중량 약 107kgf (상대오차 0.021%)이며, 리프트가 최저 높이일 경우 레일 접촉점에서 무게중심까지의 거리 d_{\min} 는 0.422m , 최대 높이일 경우 d_{\max} 는 1.051m 이다. 위 그림에서 f_w 와 d 간의 각도(a)가 변화함에 따라 변화하는 모멘트 m 을 다음과 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$f_1 \times d = m \quad \text{수식 116}$$

이 때, 각도(a)에 따라 크기가 변하는 f_1 은 다음의 유도를 통해 구하였다. f_1 에 따라 변하는 모멘트 m 을 리프트의 최대(4000mm), 최소(620mm) 높이에서 구하여 그래프로 나타내었다.

$$\tan a = \frac{f_1}{f_2}$$

$$f_w^2 = f_1^2 + f_2^2$$

$$f_w^2 - f_1^2 = f_2^2$$

$$(\tan a)^2 = \frac{f_1^2}{f_w^2 - f_1^2}$$

$$\frac{1}{(\tan a)^2} = \frac{f_w^2 - f_1^2}{f_1^2}$$

수식 117

$$\frac{1}{(\tan a)^2} + 1 = \frac{f_w^2}{f_1^2}$$

$$\frac{(\tan a)^2}{1 + (\tan a)^2} = \frac{f_1^2}{f_w^2}$$

$$f_w^2 \frac{(\tan a)^2}{1 + (\tan a)^2} = f_1^2$$

$$f_w \frac{\tan a}{\sqrt{1 + (\tan a)^2}} = f_1$$

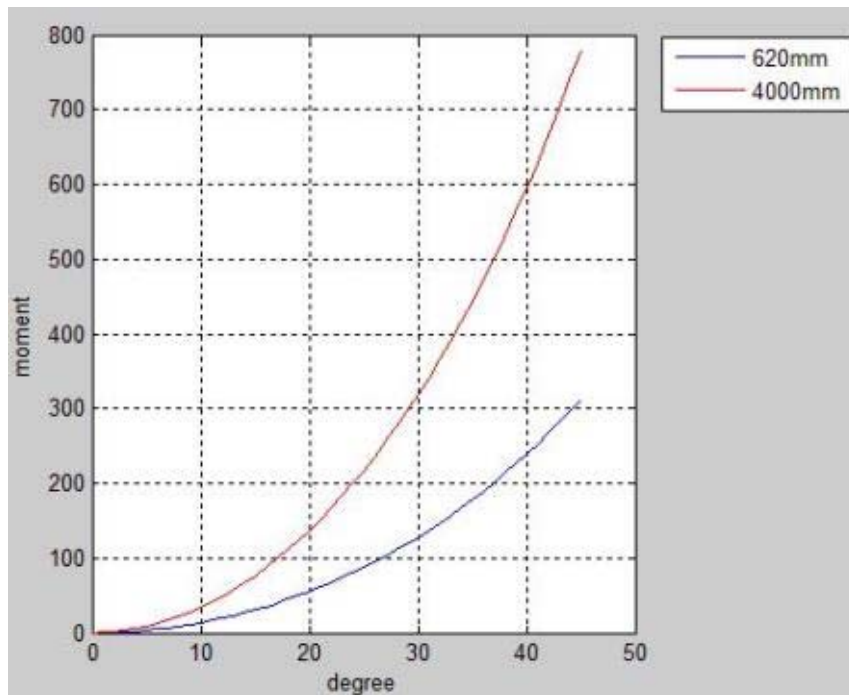


그림 850 틸팅 각도에 따른 차체 중량에 의한 모멘트 변화

위 그래프에 따르면 4000mm 높이에서 모멘트가 급격히 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 여기서 각도는 무게 중심과 바퀴가 궤도와 만나는 점이 이루는 선과 중력방향간의 각도를 의미한다. 즉, 적을수록 차체가 기울어져 있는 것이다.

- 주행부 및 운반부의 구성부품 선정

1. 마이크로 컨트롤러 선정

차량의 제어를 위하여 본 연구에서는 모터와 유압유닛을 제어하고자 한다. 차량의 수평 방향 이동을 위한 모터 1개, 수직 방향 이동을 위한 모터 1개, 리프트와 보조 바퀴의 제어를 위한 유압 실린더의 제어를 위하여 마이크로 컨트롤러를 선정하고자 한다.

먼저, ATmega328 프로세서를 이용하는 아두이노 우노의 경우 사양은 아래와 같다.



그림 851 아두이노 우노 외형

표 161 아두이노 우노 사양

Micro controller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage	7-12V
Input Voltage(limits)	6-20V
Digital I/O pins	14(of which 6 provide PWM output)
Analog Input pins	6
DC Current per I/O pin	40mA
DC Current for 3.3V pin	50mA
Flash Memory	32KB(ATmega328) of which 0.5KB used by bootloader
SRAM	2KB(ATmega328)
EEPROM	1KB(ATmega328)
Clock Speed	16MHz
Length	68.6mm
Width	53.4mm
Weight	25g

아두이노 우노의 경우 5V 동작 전압으로 구동 가능하며, 14개의 입출력 핀을 사용할 수 있다. 그 중 6개의 PWM 출력 핀을 통해 PWM 제어가 가능하다. 또한 6개의 아날로그 입력 단자가 존재한다.

다음으로 ARM 프로세서를 사용하는 라즈베리 파이의 사양은 아래와 같다.



그림 852 라즈베리 파이 외형

표 162 라즈베리 파이 사양

Micro controller	ARM
RAM	1GB
Ports	4 USB ports
	Full HDMI port
	Ethretnet port
Pins	3.5mm audio jack and composite video
	50 GPIO pins
3D Graphic Core	VideoCore IV
etc.	Camera interface
	Display interface
	Micro SD card slot

ARM 프로세서를 사용하는 라즈베리 파이의 경우 USB포트를 사용할 수 있으며, 디스플레이 모듈을 설치하여 linux OS를 구동 할 수 있다. 자체 카메라 인터페이스가 존재하여 카메라 모듈을 설치하는 경우 라즈베리 파이 자체로 영상 처리가 가능하다.

Comfile technology 社의 산업용 컴퓨터의 사양은 다음과 같다. 아래 PC는 Windows OS를 직접 설치하여 사용할 수 있기 때문에 Visual studio를 사용할 수 있다는 장점이 있다.

표 163 큐블릭 산업용 PC 사양

화면	10.2" (800x480)
CPU	Intel Quad core 1.83GHz
RAM	4GB
HDD	128GB m-SATA
OS	Windows embedded standard 7



그림 853 산업용 컴퓨터

2. 카메라

라즈베리 파이 모델의 컨트롤러를 사용하는 경우 자체 카메라 모듈을 사용 할 수 있다. 해당 카메라 모듈의 사양은 다음과 같다.

- 옴니비전(OmniVision)의 OV5647
- 8.5 x 8.5 x 5mm
- 전체 크기(PCB 포함) : 25mm x 20mm x 9mm
- 5메가픽셀
- 정지영상 캡처 2592×1944
- 초당 30프레임의 1080p 지원
- 초당 60프레임의 720p 지원
- 초당 90프레임의 640x480p 지원
- 150mm 리본 케이블
- PCB + 카메라 모듈의 무게 : 2.4g, 리본 케이블의 무게 : 1.0g

산업용 PC를 사용하는 경우 영상처리 파트에서 사용하는 CCD 카메라를 사용 할 수 있다는 장점이 있다.



그림 854 CCD 카메라

3. 모터

모터는 ExceM社의 DA3A-25B4 모델을 선정하였다. 해당 모터의 출력은 300W이고 RPM은 2500이기 때문에 다음 식을 통하여 각속도와 토크를 계산하였다.

$$\omega = 2\pi \frac{RPM}{60} \quad \text{수식 118}$$

$$W = \tau\omega$$

각속도 ω 는 261.8rad/s 이며, 토크 τ 의 크기는 1.15 Nm이다.

또한, 변속기는 15의 기어 비를 갖도록 설정 하였다. 추 후 바퀴 제작 시 2의 기어 비를 갖도록 하여 최종 감속비를 설정 할 계획이다.

표 164 모터 사양

Output	300W
Volt	24V DC
RPM	2500
Current	16.5A

4. 배터리

12V의 배터리 두 대를 직렬 연결하여 24V의 전력을 얻고 배터리 충전기를 설치하여 전원과 직접 연결하여 충전 및 작동이 가능 하도록 하였다.



그림 855 두 대의 12V 배터리 연결

- 주행부 및 운반부의 부분 제작 및 기초실험

차량의 차체 부분 제작의 일환으로 알루미늄 6063 T5 재질의 프로파일을 이용하여 기초 제작을 수행하였다. 본 기초 제작을 통해 구성 부품들을 배치하고 전체 시스템이 완성 되었을 때 서로간의 간섭이 생기지 않도록 하고자 하였다.

50x50 8mm SERIES



Technical Data

Item No. (형번)	NPE5050-01L
Material (재질)	A6063S-T5
Area (단면적)	967.40mm ²
Weight (단중량)	2.612kg/m
Moments of inertia (단면2차 모멘트)	I _x =19.7cm ⁴ I _y =19.7cm ⁴
Surface (표면)	Sliver Anodized + Sealing (실버무도장)

그림 856 알루미늄 프로파일 사양

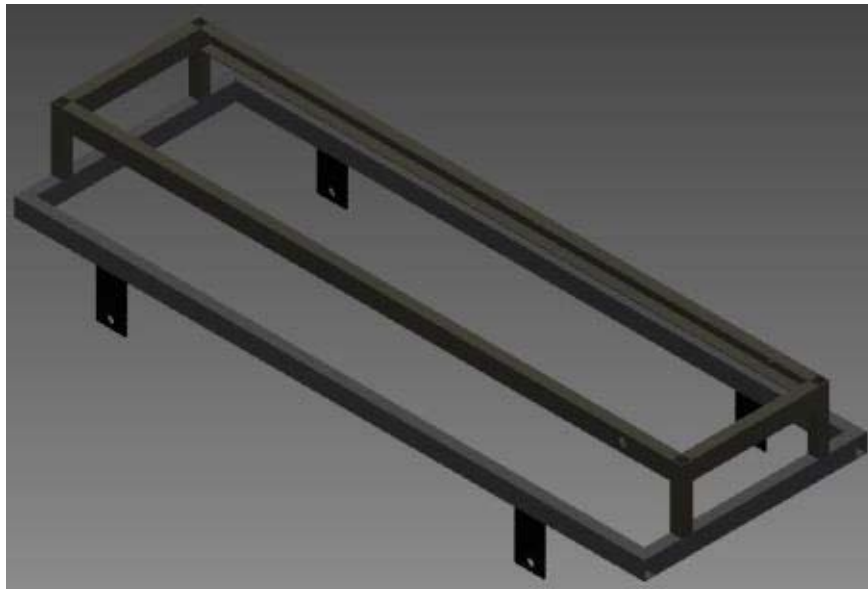


그림 857 하부 프레임 설계 도면



그림 858 차량 차체 기초 제작 결과

하부 프레임 제작 결과 무게는 24.59kg이었다.



그림 859 동력부 부분 제작

모터와 모터 드라이버, MCU, SMPS 등을 하부 차체 프레임과 체결을 위하여 위의 그림과 같이 제작 하였다. 모터 드라이버는 주 바퀴의 구동 뿐 아니라 보조 바퀴의 구동을 제어 할 수 있도록 2축 이상의 제어가 가능한 형태로 선정하였다.



그림 860 모터와 체결된 감속기

- 주행을 위한 영상처리 알고리즘 설계
- 재배 온실에서의 주행을 위한 영상처리 알고리즘 설계

전체 시스템의 주행을 위해 설계된 차량은 레일 궤도를 따라 주행하는 형태로 수평방향 이동은 레일 궤도에 의존 하지만, 수직 방향 이동은 보조 바퀴를 이용하여 제어 해야만 한다.



그림 861 파프리카 농가의 레일 궤도

수직 이동은 레일과 레일 사이에서 이루어지는데, 현재 레일 형 대차의 경우 보조바퀴를 이용하여 사람이 수동으로 이동하고 있는 실정이다. 이를 자동화하기 위하여 카메라를 이용하여 레일의 위치를 인식하고 보조 바퀴를 제어하여야 한다.

먼저, 카메라를 이용하여 레일을 인식하는데 있어 문제점은 농가마다 레일의 색, 형태, 크기에 다소의 차이가 있다는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 레일의 입구에 특정 표식을 하고 이를 인식하여 차량이 진입하는데 이용하고자 한다.

표식은 카메라에서 쉽게 인지 할 수 있고 외부 영향을 크게 받지 않아야 한다. 이를 위하여 특정 대역의 빛의 반사를 이용 할 수 있을 것으로 사료된다. 특정 대역의 광원을 조사하고 해당 대역의 band pass filter를 카메라 렌즈에 장착하여 레일 표식의 반사광을 인지하고 차량의 위치와 자세를 제어 하는 형태의 알고리즘을 구현하고자 한다.

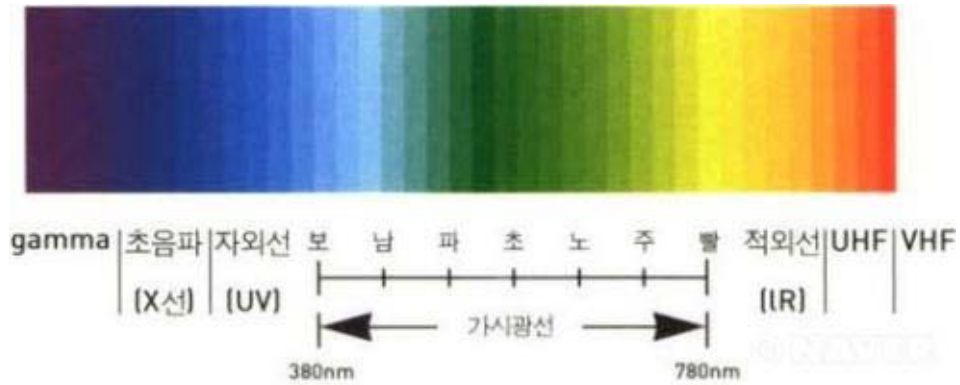


그림 862 빛의 대역에 따른 분류

먼저 파프리카 농가 내에 존재하는 파장대의 빛은 제외 하고자 한다. 붉은색, 노란색의 파프리카 열매, 녹색의 잎을 제외하고, 잎의 엽록소가 반사하는 NIR 영역도 제외한다. 따라서 약 400nm 영역의 파장을 갖는 빛을 이용하여 레일의 진입로를 표시하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

조명의 경우 해당 영역이 가시광선 영역이기 때문에 일반적인 LED 조명을 사용할 계획이며, 파란색 LED를 이용하여 다음과 같이 조명을 제작하였다. 이 때, 파란색 LED는 약 460nm의 파장대의 빛을 발광하는 것을 선정하여 설치하였다.

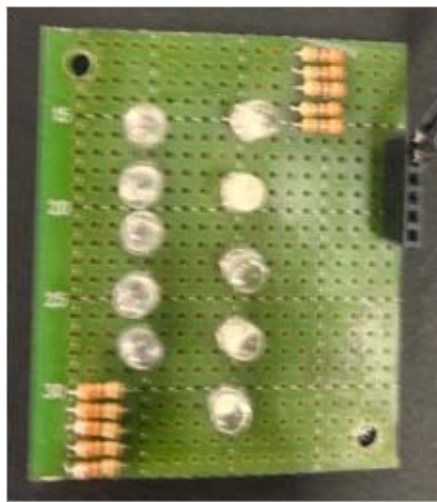


그림 863 LED 조명 기초 제작

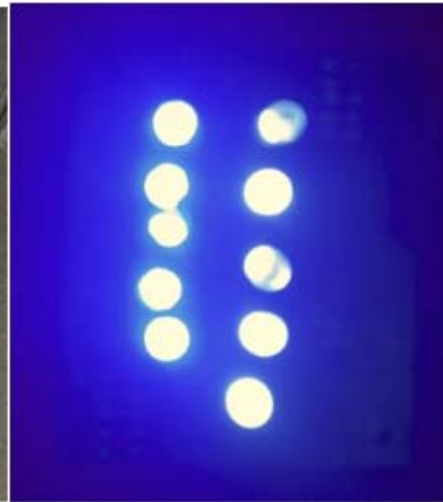


그림 864 발광 중인 파란색 LED

또한 해당 영역이 가시광선 영역이기 때문에 밴드 패스 필터를 이용하여 그 외의 대역의 빛을 차단 하고자 한다.



그림 865 대역별 카메라 필터

조명과 필터를 이용하여 진입로 표시를 강조한 영상을 획득 한 후 다음과 같은 영상처리 과정을 통해 차량을 이동하는데 필요한 정보를 얻을 계획이다.

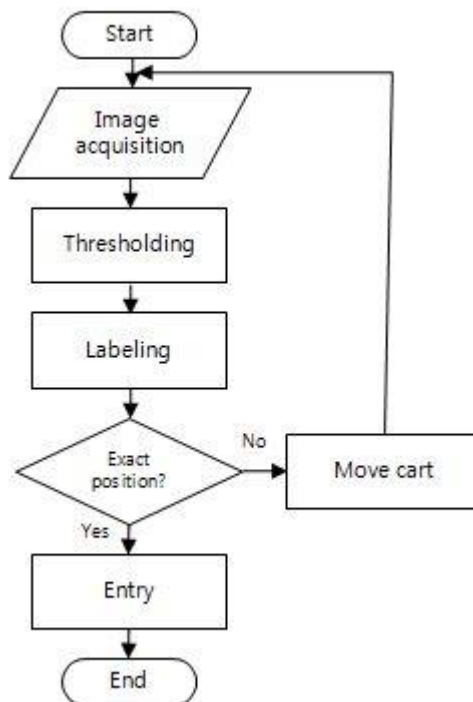


그림 866 영상처리 순서도

위 그림과 같이 진입로가 강조된 영상을 획득 한 후 임계값을 이용하여 영상을 이진화 하여 강조된 영역을 추출한다. 그 후, 강조된 영역의 위치를 계산하여 차량을 정확한 위치로 이동하고 레일 간 이동을 마무리함으로써 수직 이동 과정을 마무리 한다.

기존의 설계를 바탕으로 다음과 같이 주행부 및 운반부를 제작함. 차량의 본체를 레일을 따라서 전·후진이 가능하도록 프레임과 주행바퀴를 제작하여 과수 간 이동을 할수 있도록 제작하였으며, 차량의 제어를 위하여 유압 실린더, 모터, 배터리 등을 설치함. 파프리카를 자동으로 수확할 경우에 과수 상부의 열매도 수확이 가능하도록 매니플레이터 혹은 엔드이펙터가 접근할 수 있도록 리프트를 설치하여 리프트 상판에 수확부를 위치함. 또한 레일과 레일 사이의 이동을 위하여 접이식의 보조바퀴를 설치하였으며, 이동시에 유압 실린더를 이용하여 바퀴가 바닥에 접촉하여 전체 차량의 무게를 견디며 이동할 수 있도록 제작하여 평지에서의 이동성을 증가시킴. 실제 제작한 모습은 다음과 같음.

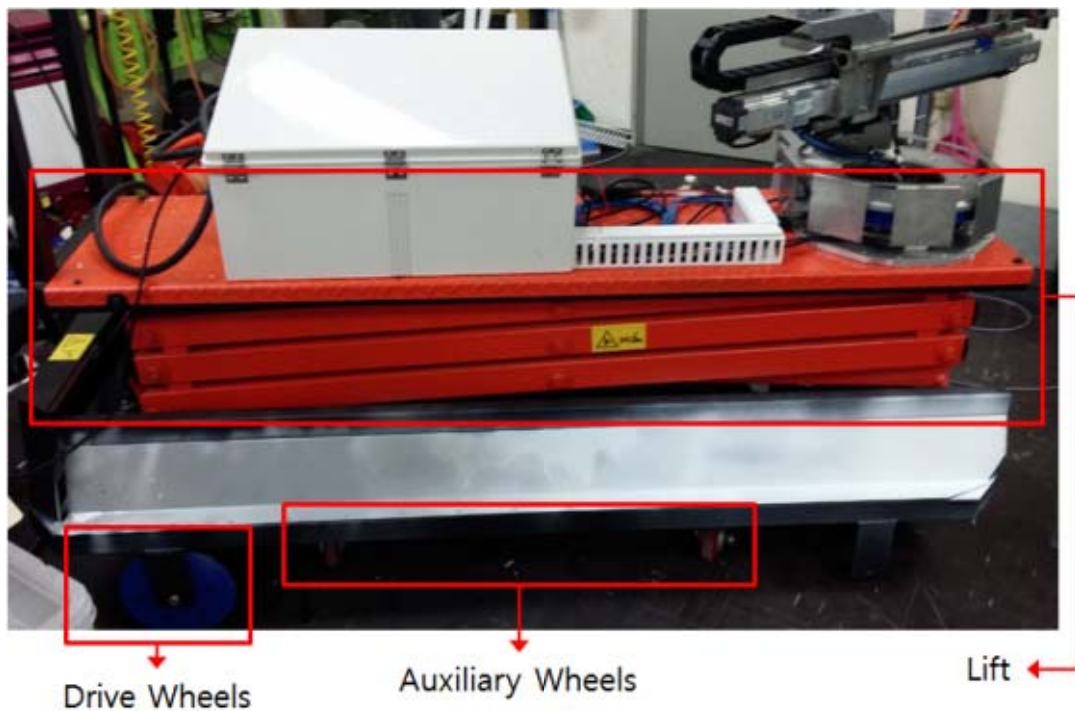


그림 869 주행부 및 운반부 제작 모습

주행부 및 운반부의 경우 파프리카 자동 수확이 아닌 일반적인 경우에서의 이동을 위해서는 수동으로 조작을 할 수 있도록 제작하였으며, 파프리카 수확 시 자동으로 수확 작업을 진행할 수 있도록 자동으로 제어를 할 수 있도록 제작하였음.

- 주행을 위한 영상처리 시스템 제작

파프리카 수확 작업 후 다음 레일로 자동으로 이동하기 위하여 해당 레일의 중심에 주행부의 중심을 일치 시키는 과정을 카메라 영상을 통해 레일의 중심 위치를 확인하는 알고리즘을 구현하고자 함.

파프리카 레일의 형태 및 주변 환경의 영상을 촬영하기 위하여 2016년 6월 23일 ~ 24일 경상남도 함안에 위치한 국립 원예 특작 과학원 시설원예연구소 내의 파프리카 온실 및 파프리카 농장을 방문하여 RGB컬러 영상 및 NIR 영역 영상을 촬영함.

일반적인 파프리카 온실의 레일은 원통형 파이프 형태로 이루어 졌으며 파프리카가 식재 되어 있는 사이에 존재함. 촬영한 파프리카 온실의 레일은 다음의 영상과 같은 형태임.



그림 870 파프리카 온실의 레일 영상

컬러 영상에서 레일의 중심을 찾기 위하여 사용 할 수 있는 영상 정보는 레일을 중심으로 양 측에 존재하는 파프리카의 존재와 영상 및 레일의 중심에 위치한 온실 천정의 밝기 정보로 해당 영역의 색상 및 명도의 히스토그램을 이용하면 레일의 중심을 찾을 수 있을 것으로 사료됨.



그림 871 파프리카 온실의 레일 영상(NIR 670nm)



그림 872 파프리카 온실의 레일 영상(NIR 690nm)



그림 873 파프리카 온실의 레일 영상(NIR 769nm)

가시광선 영역의 RGB 영상 및 NIR 영역의 영상을 비교한 결과 NIR 영역의 영상의 영상 정보를 이용하는 경우 RGB 영상에 비해 정보가 줄어드는 것에 비하여 확연한 특징이 나타나지 않음을 확인 할 수 있음. NIR의 경우 해당 영역에서 파프리카 잎 영역의 반사율이 높은 특성을 이용하려고 하였으나 그 외의 영역에서 나타나는 명도 또한 높게 나타나 해당 특성을 이용 할 수 없을 것으로 사료됨.

표 165 컬러 영상과 NIR 영역 영상의 비교

	Color image	NIR image
Number of channel	3	1
Maximum range of data	Hue (0~360)	Intensity (0~255)
Bandwidth	440~647nm	670~850nm
Expectation effectiveness	Green value of leaf area	Reflection of leaf area
etc.	None	Extra illumination

컬러 영상의 각 x축 픽셀 별로 R, G, B 채널의 Intensity 값을 히스토그램의 형태로 나타내고 레일의 중심으로 추정되는 파프리카가 식재 간격의 중심에 나타나는 온실 천장의 높은 명도를 특징으로 추출하고자 함. 다음의 표는 각 채널마다 명도 값을 y축 방향으로 스캔하여 적층한 형태의 히스토그램을 표현 한 것임.

표 166 컬러 영상의 R, G, B 채널 별 히스토그램 #1



R, G, B 채널의 히스토그램을 분석 한 결과 레일의 중심으로 예상되는 영역에서 높은 피크가 나타남을 확인 할 수 있었음. R 채널 영역에서 상대적으로 가장 높은 값의 피크가 레일의 중심에서 나타났으며, B 채널 영역에서는 중심 피크와 유사한 피크가 나타나는 구간이 있음을 확인할 수 있음. 이는 카메라 화이트 밸런스를 맞추는 과정에서 나타나는 B 값이 높은 픽셀들에 의한 것으로 보임.

표 167 컬러 영상의 R, G, B 채널 별 히스토그램 #2



R



G



B

레일의 컬러 영상을 분석하고 레일의 중심을 추출하는 과정에서 B 채널에서는 최대 피크로 나타나는 영역이 중심 이외의 영역에서도 나타나는 경우가 발생함. 따라서 레일 추출을 위해 히스토그램을 사용하는 알고리즘에서는 R 채널을 사용하는 것이 오차를 줄 일 수 있을 것으로 사료됨.



그림 882 R채널 히스토그램을 이용한 컬러 영상 레일 중심 추출 결과 #1



그림 883 R채널 히스토그램을 이용한 컬러 영상 레일 중심 추출 결과 #2



그림 884 명도 히스토그램을 이용한 NIR 영상 레일 중심 추출 결과 670nm

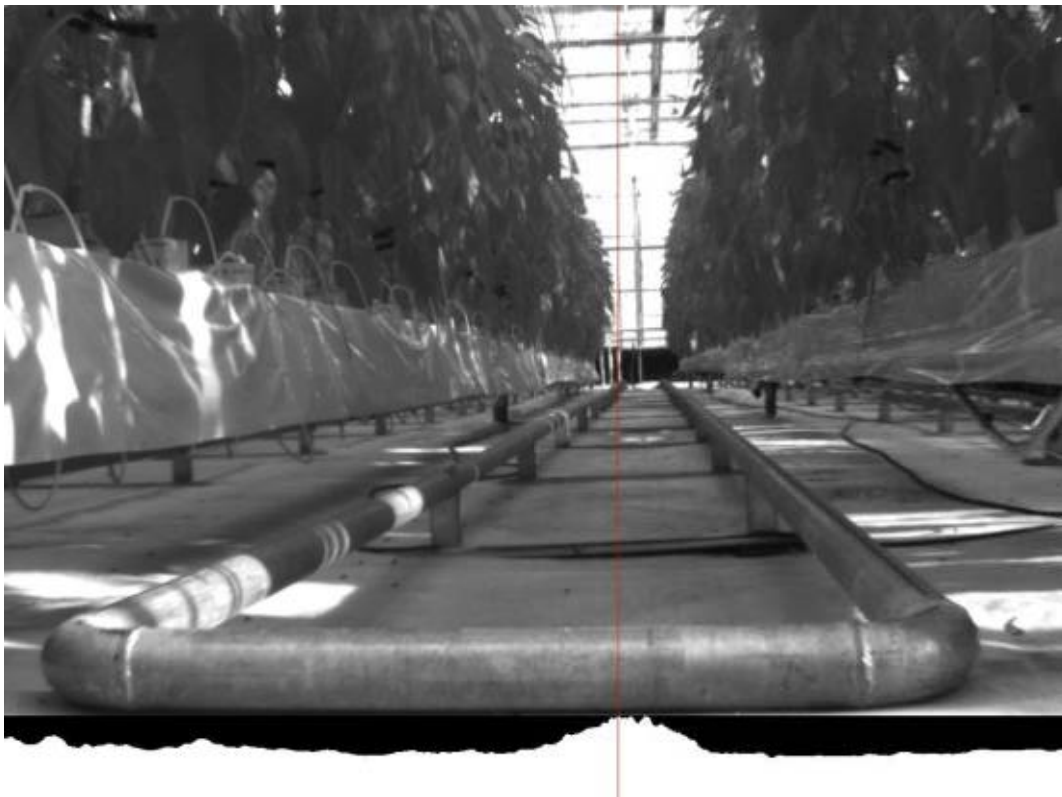


그림 885 명도 히스토그램을 이용한 NIR 영상 레일 중심 추출 결과 690nm



그림 886 명도 히스토그램을 이용한 NIR 영상 레일 중심 추출 결과 769nm

컬러 영상의 R 채널과 NIR 영상의 명도를 이용하여 히스토그램을 나타내고 최대 피크를 중심으로 추정하는 알고리즘을 수행 한 결과를 비교하였음. NIR 영상의 명도를 이용하는 경우 NIR 영역의 특성이 나타나는 결과를 얻을 수 없었기 때문에 해당 명도는 RGB 영상의 명도와 크게 차이가 나지 않았음. 따라서 컬러영상의 R 채널을 이용하여 레일의 중심을 찾는 알고리즘을 적용 하는 것이 타당 할 것으로 사료됨.

표 168 실제 좌표와 계산된 좌표를 통한 레일의 중심 위치와 대차의 관계

	Center		Direction	
	Real	Calculated	Real	Calculated
#1	677	602	Right	Stop
#2	584	578	Left	Left
#3	716	683	Stop	Stop
#4	624	744	Left	Left
#5	571	579	Stop	Left

실험을 통하여 나타나는 결과는 실제와 계산된 출력 값에 차이가 있으나 이는 카메라의 중심이 캘리브레이션 되지 않았기 때문에 대차의 중심에 설치된 카메라를 캘리브레이션을 통해 실제 대차 중심과 카메라의 중심을 일치 시킨 후 계산된 레일의 중심이 영상의 중심과 영상의 중심을 비교하여 수평 방향으로 대차를 이동 시키면서 중심을 비교하여 해당 중심이 임계값 이내 일 때 대차의 이동을 멈추고 레일로 진입하도록 하는 형태의 영상 처리 시스템을 제작.

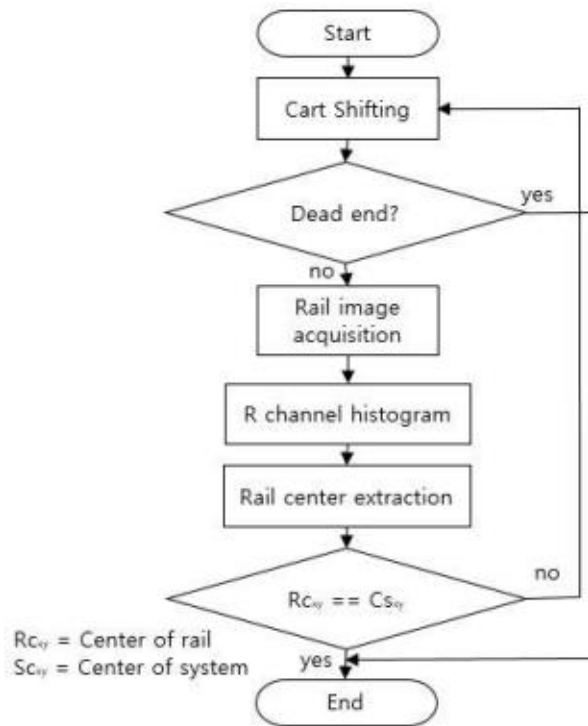


그림 887 대차 이동을 위한 레일 중심 획득 순서도

- 주행부 및 운반부 구동제어 시스템 제작

주행부 및 운반부의 구동을 제어하기 위한 제어 시스템 설계를 진행하고 제작을 하였음. 앞서 밝힌 바와 같이, 주행부 및 운반부의 경우 일반적인 이동을 할 경우 수동으로 제어를 하고, 파프리카를 자동으로 수확할 경우에는 자동으로 제어를 할 수 있도록 제작을 하였음.

수동 제어 조작부는 다음과 같음. 모터 전·후진을 제어하기 위한 모터 컨트롤 스위치, 속도 조절을 위한 가변 스위치, 리프트 상하 이동을 위한 토글 스위치 및 보조바퀴의 상하 이동을 위한 토글스위치, 마지막으로 배터리 잔량을 표시할 수 있도록 제작하였음.



그림 888 수동 제어 조작부

파프리카를 자동으로 수확하기 위해서는 우선 주행부 및 운반부를 통해 일정간격을 이동함. 이후 영상처리를 통해 파프리카를 인식하고 이를 기구부의 기구학적 해석을 통해 인식된 파프리카로 접근을 하여 수확작업을 진행함. 즉 영상처리 및 기구부와의 연동을 위해 주행부 및 운반부의 구동도 PC를 이용하여 제어를 하였음. PC와 주행부 및 운반부의 통신 및 제어를 위해 마이크로컨트롤러를 추가로 선정하였음. PC와 주행부 및 운반부의 통신 및 제어를 위한 마이크로컨트롤러로 Genuino 101을 선정하였음. Genuino 101은 기존의 코어텍스 기반의 ARM칩이나 AVR기반의 ATmega 칩들과는 다른 Curie라는 모듈을 기반으로 만들어진 아두이노 보드임. Curie 모듈이란 인텔 퀵 코어와 ARC 코어, 6축자이로센서, 가속도센서, 블루투스까지 내장된 모듈로 사이즈는 기본의 Arduino uno와 동일하지만 연산속도는 더 빠름.



Model Name	Intel® Genuino 101
Microcontroller	Intel® Curie™
Operating Voltage	3.3V (5V tolerant I/O)
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	7-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 4 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	4
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
Flash Memory for Bootloader	196 kB
SRAM	24 kB
Clock Speed	32MHz
Features	Bluetooth LE, 6-axis accelerometer / gyro
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm

그림 889 주행부 및 운반부 구동을 위한 마이크로컨트롤러

자동으로 수확작업을 진행할 경우 주행부 및 운반부의 실험을 통해 적정 이동 속도를 선정하고 이후에는 이동 속도를 고정하여 자동 제어를 하며, 보조바퀴는 평지에서의 이동시에만 사용을 함. 즉 모터의 전·후진 및 리프트의 상하 이동을 위한 부분만 자동으로 제어를 함. 따라서 수동 제어 조작부에서의 모터의 전·후진을 위한 6접점의 캠 스위치와 리프트의 상하 이동을 위한 2접점의 토글 스위치를 릴레이를 이용하여 자동으로 제어하였음. 이를 위해 4채널 릴레이 2개를 이용하여 제어를 하였으며, 제어를 위한 릴레이는 다음과 같음.

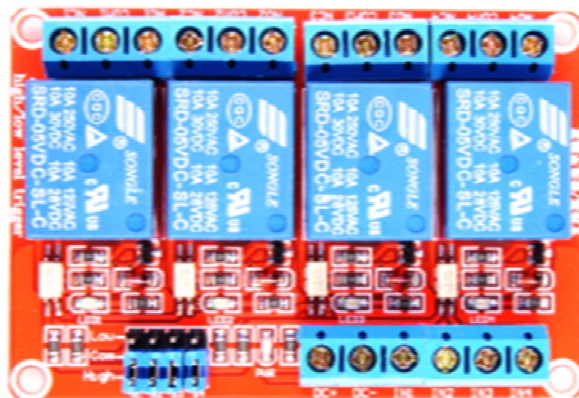


그림 890 4채널 릴레이, 5V DC

각각의 스위치와 릴레이, 마이크로컨트롤러, PC와의 연결을 위한 설계는 다음과 같음.

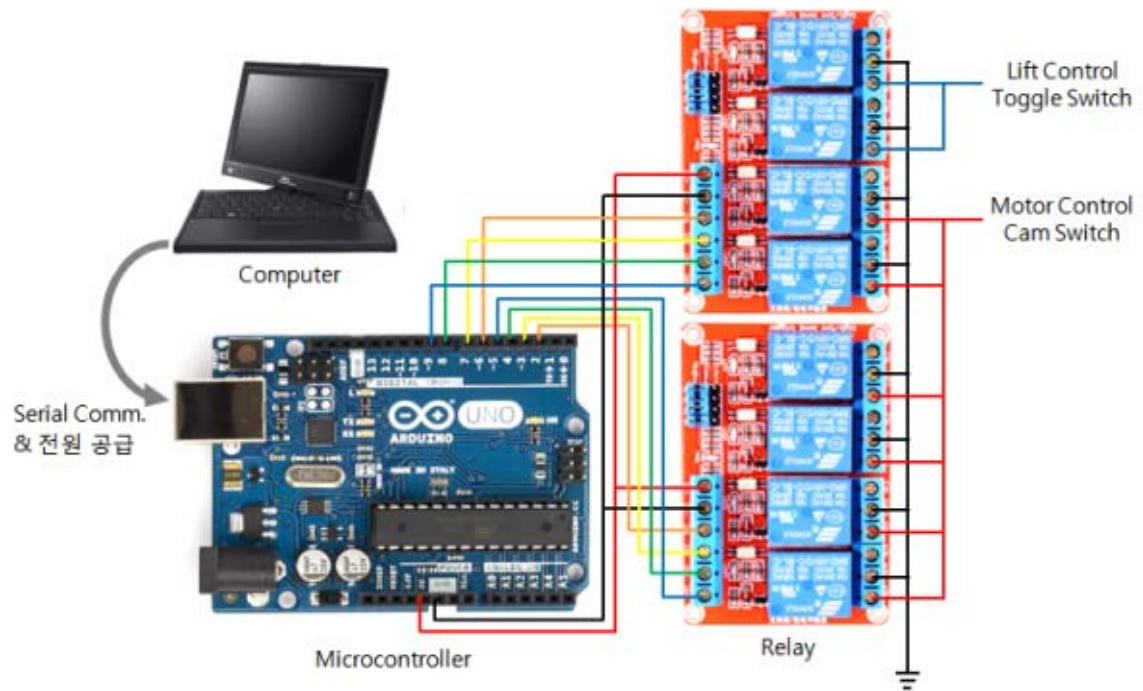


그림 891 주행부 및 운반부 자동 제어를 위한 컨트롤러 설계

PC와 마이크로컨트롤러, 릴레이를 각각 결선하여 실제 제작한 모습은 다음과 같음.



그림 892 주행부 및 운반부 자동 제어 컨트롤러 제작 모습

- 주행부 및 운반부 구동제어 시스템 소프트웨어 제작

PC에서 시리얼 통신을 이용하여 주행부 및 운반부를 제어하기 위한 신호를 마이크로컨트롤러에 전달을 하면 마이크로컨트롤러에서는 PC에서 수신한 신호에 맞는 동작을 하게 됨. 이때 PC에서 수신한 신호에 따라 입·출력 포트를 통해 해당하는 릴레이를 제어하게 되면 최종적으로 수동 제어 조작부의 스위치를 자동으로 제어하게 됨. 이러한 절차를 수행하기 위해서는 PC와 마이크로컨트롤러에서 신호를 원활히 송수신할 수 있도록 프로그램을 작성하여야 함. 따라서 우선 아두이노 통합개발환경인 스케치를 통해서 마이크로컨트롤러에서 PC와의 시리얼 통신을 하기 위한 부분과 수신 받은 신호에 해당하는 입·출력 포트를 제어하기 위한 프로그램을 다음과 같이 작성하였음.

```

Paprika_Ctrl
int incomingByte=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
}

void loop() {
  if(Serial.available(>0)
  {
    incomingByte = Serial.read();
    Serial.print("I");
    Serial.print(" ");
    Serial.print("R");
    Serial.print("e");
    Serial.print("c");
    Serial.print("e");
    Serial.print("i");
    Serial.print("v");
    Serial.print("e");
    Serial.print(":");
    Serial.print(" ");
    Serial.println(incomingByte, DEC);

    if(incomingByte == 49)
    {
      digitalWrite(3, LOW);
    }
  }
}
  
```

```

Paprika_Ctrl
if(incomingByte == 49)
{
  digitalWrite(3, LOW);
  digitalWrite(2, HIGH);
}
else if(incomingByte == 50)
{
  digitalWrite(2, LOW);
  digitalWrite(3, HIGH);
}
else if(incomingByte == 51)
{
  digitalWrite(2, LOW);
  digitalWrite(3, LOW);
}

if(incomingByte == 52)
{
  digitalWrite(5, LOW);
  digitalWrite(4, HIGH);
}
else if(incomingByte == 53)
{
  digitalWrite(4, LOW);
  digitalWrite(5, HIGH);
}
else if(incomingByte == 54)
{
  digitalWrite(4, LOW);
  digitalWrite(5, LOW);
}
  
```

그림 893 릴레이 제어 및 시리얼 통신을 위한 마이크로컨트롤러 프로그램

다음으로 마이크로컨트롤러와 PC간의 시리얼 통신을 하기 위한 프로그램을 Visual Studio를 이용하여 작성하였음. 적정 포트를 열기위한 포트 설정부와 통신 속도를 설정하기 부분, 통신을 시작하기위한 OPEN 버튼, 시리얼 송수신 창을 삭제하기 위한 CLEAR 버튼, 주고받은 신호를 표시하기 위한 텍스트 창, 마이크로컨트롤러에 신호를 전달하기 위한 SEND 버튼을 배치하였음. 실제 작성한 프로그램은 다음과 같음.

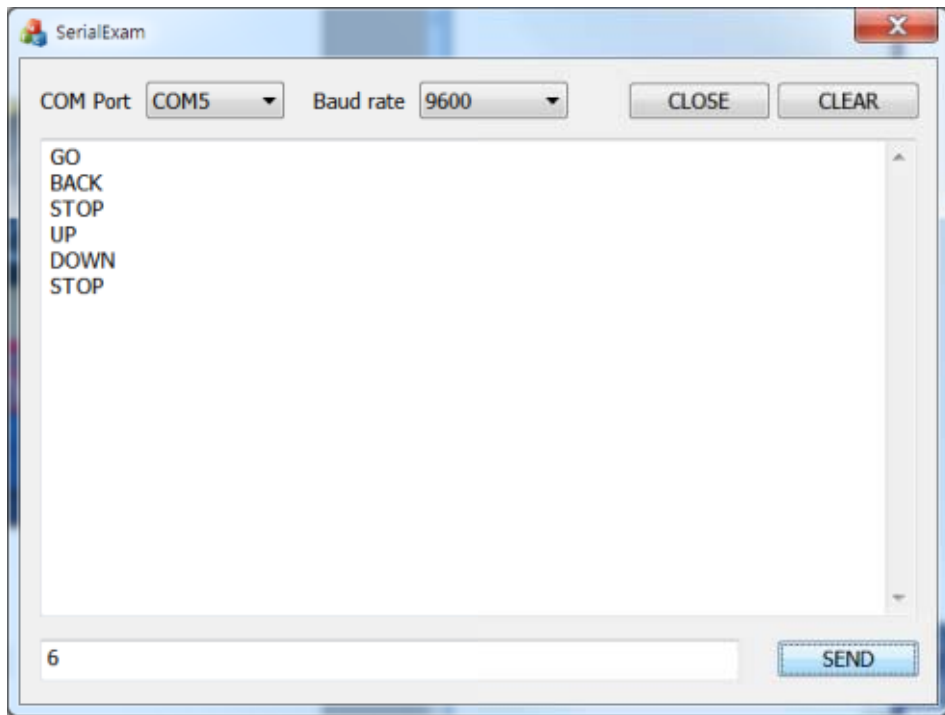


그림 894 주행부 및 운반부 자동제어를 위한 시리얼 통신 프로그램

PC에서 Visual Studio를 이용하여 작성한 시리얼 통신 프로그램에서 적정 신호를 보내게 되면 이를 마이크로컨트롤러에서 수신함. 아래 그림과 같이 수신한 신호에 따른 입·출력 포트를 제어하여 릴레이를 구동하게 되며 릴레이 옆의 LED를 통해서 실제 구동여부를 확인할 수 있음. 이에 따라 릴레이가 수동 제어 조작부의 스위치 역할을 하게 되어 주행부 및 운반부를 자동으로 제어할 수 있음.

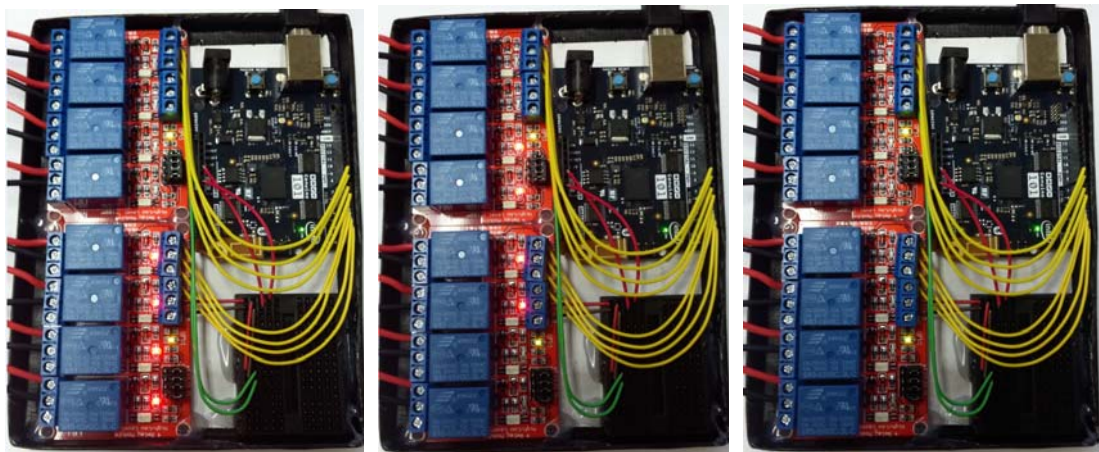


그림 895 시리얼 통신을 통한 릴레이 제어

- 운반시스템의 실험 및 분석

1차 년도에 설계에 따른 차량 안정성을 계산하였으나, 차체 구동을 위한 모터, 모터 관련 구동 장치, 유압 실린더, 배터리 등을 제외하고 계산을 하였음. 또한 리프트 상단에 설치한 수확부와 실제 파프리카 수확 시의 무게를 고려하지 않음. 따라서 실제 제작 시에 설계 시와는 달리 앞서 언급한 부분들을 모두 고려하여 주행부 및 운반부의 안정성을 계산할 필요가 있음. 주행부 및 운반부의 차체 및 각각의 세부적인 부속들의 정확한 수치 및 중량을 정확히 측정하기에는 많은 어려움이 따름. 따라서 본 연구 과제에서는 무게 중심을 결정하는데 있어 중요하다고 생각되는 부분들에 대하여 간략화하고 계산을 수행하였음.

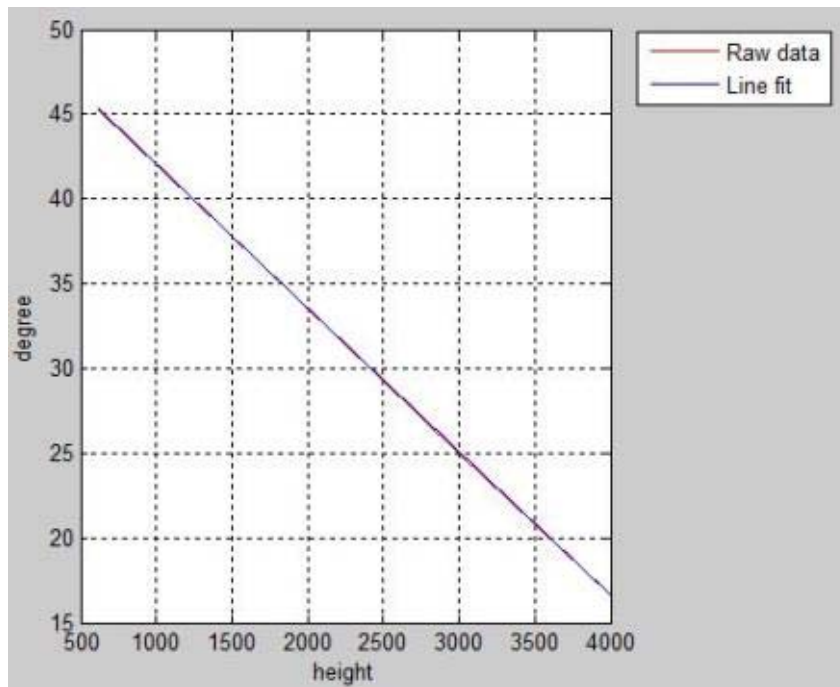


그림 896 대차 높이 변화와 안전각도의 관계

1차 년도에 대차 높이의 변화에 따른 안전각도의 관계에 관한 그래프를 보면 리프트를 전체 대차의 높이가 620mm이면 지면에서 연직방향으로 무게 중심의 위치는 296.9mm로 나타났으며, 틸팅 각도가 $\pm 45.28^\circ$ 를 넘지 않으면 안전한 것으로 나타났음. 마찬가지로 리프트를 최대한 올린 4000mm 높이 수준에서 주행부 및 운반부의 틸팅 각도가 $\pm 16.59^\circ$ 를 넘지 않는 한 안전한 것으로 나타났으며 무게 중심은 1006.9mm로 나타났음.

무게 중심에 따른 전복 시의 틸팅 각도를 계산하는 1차 회귀식을 계산할 수 있음. 다음의 연립방정식을 이용하여 1차 회귀식의 계수를 계산할 수 있고 계산한 수식은 다음과 같음.

$$\begin{cases} 45.28 = 296.9a + b \\ 16.59 = 1006.9a + b \end{cases}$$

$$\therefore a = -0.0404, \quad b = 57.277$$

$$y = -0.0404x + 57.277, \quad (x: \text{무게 중심}, y: \text{전복 시의 각도})$$

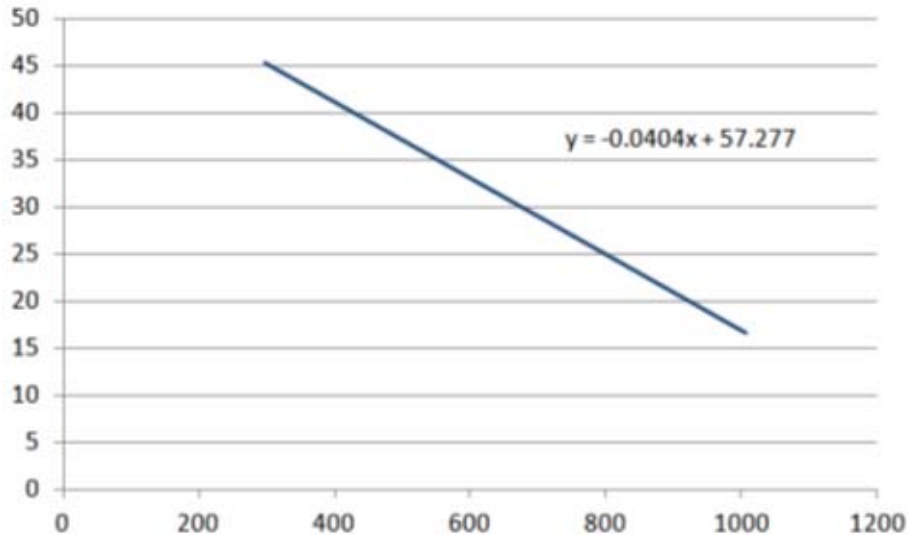


그림 897 운반시스템의 무게 중심에 따른 전복 시의 각도

당해년도에 실제 주행부 및 운반부를 제작한 결과, 차체 하부의 무게는 약 300kg이었으며 대부분의 하중이 리프트를 제외한 하부에 집중되어 있음. 또한 리프트 상단에 위치하는 메니플레이터, 엔드이펙터, 카메라 등의 수확부와 수확부의 컨트롤러 등에 해당하는 무게는 약 30kg 정도임. 1차 연도 조사 결과 파프리카 한 과당 평균 무게는 194.62g으로 조사되었음. 자동 수확 시에 약 100여개의 파프리카를 수확하여 적재한다고 가정하면 20kg내외의 무게를 가짐. 여기에 좀 더 여유를 두어 약 200여개까지 파프리카를 수확한다고 가정하면 무게는 약 40kg이 되므로 파프리카 적재 시의 무게는 40kg으로 가정하였음.

제작한 주행부 및 운반부의 주행방향으로 차체의 길이는 1700mm로 전복의 위험이 거의 없음. 하지만 정면에서 볼 경우 폭은 400mm로 상대적으로 안정성이 낮으므로 측면 방향으로의 전복의 위험성이 있을 수 있음. 따라서 측면에서의 안정성 분석이 필요하다. 상기의 그림과 같이 차체 자체의 무게(300kg), 파프리카 최대 수확 시의 무게(40kg), 수확부의 무게(30kg)를 최대한 간략화하고 리프트를 최대로 올렸을 때의 높이(4000mm)와 차체의 높이(430mm), 수확부와 파프리카 수확 상자의 높이(450mm)도 간략화하고 정면에서 봤을 때의 무게 중심을 계산하였음.

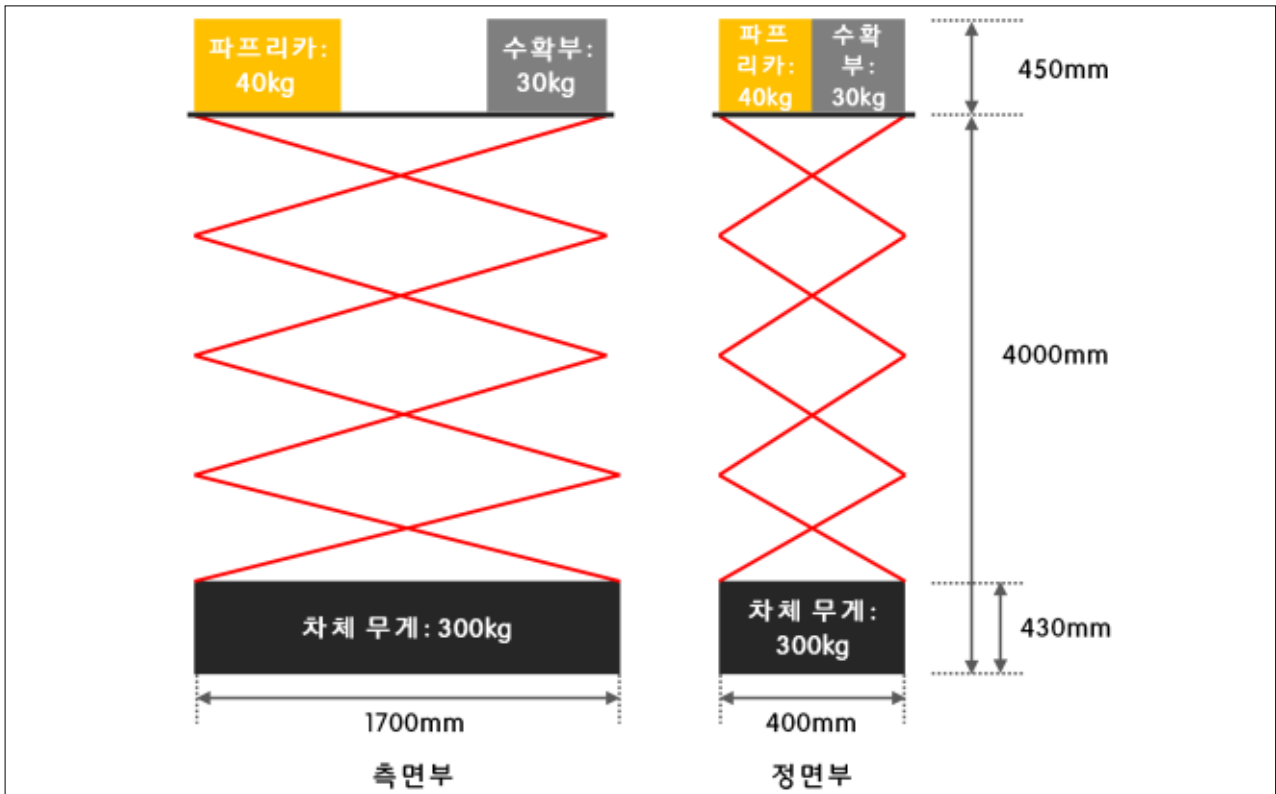


그림 898 무게 중심 계산을 위한 간략화

주행부 및 운반부를 정면에서 보고 무게 중심을 계산할 경우 적재한 파프리카와 파프리카 수확부는 리프트 위에 위치하므로 하나의 무게로 간주할 수 있음. 따라서 수확부와 적재한 파프리카의 무게를 하나의 무게로 보고 차체 무게와의 거리를 고려하면 차체 자체에서의 무게 중심점을 계산할 수 있음. 이 무게 중심점에 차체 높이의 절반(215mm)을 더하면 지면에서부터 차체의 무게 중심을 계산할 수 있음. 우선 차체 자체에서의 무게 중심점은 다음 식에 의해 계산할 수 있음. 지면에서부터 차체의 무게 중심은 차체 높이의 절반을 더한 973.6mm로 계산됨.

$$70 : 300 = x : (4010 - x)$$

$$\therefore x = 758.6$$

1차 년도에 설계만을 이용하여 최대 높이에서의 무게 중심을 계산한 결과는 1006.9mm로 나타났으며 실제 제작된 수확 시스템을 이용하여 무게 중심을 계산한 결과는 973.6mm로 계산됨. 따라서 실제 제작한 시스템의 경우 차체 하부에 대부분의 장치를 배치하여 설계 시의 무게 중심보다 더 낮으며 전복되기 위한 틸팅 각도는 앞서 구한 1차식($y = -0.0404x + 57.277$)에 대입하면 $\pm 17.94^\circ$ 로 계산됨. 즉 리프트를 이용하여 최대 높이에서 작업 시 약 18° 이내로만 틸팅되면 전복될 위험이 없음. 또한 실질적으로 수확 작업은 3m 이내에서 이루어지므로 무게 중심은 더 낮아지게 되며 레일을 이용하여 운송을 하는 시스템의 특성 상 경사지가 거의 없으므로 개발한 운반시스템을 현업에 적용하기에 무리가 없음.

운반시스템의 실제 이송 속도 및 관성에 의한 이동거리 측정을 위해 실험을 진행하였음. 아래 그림의 운반시스템의 수동 제어 조작반의 속도조절기를 각각의 수치에 놓고 운반시스템을 전진 시키며 관성에 의한 이동 거리 및 평균 이송 속도를 측정하였음.



그림 899 수동 제어 조작부







본 운반시스템의 경우, 브레이크가 없는 DC모터에 감속기를 부착하고 체인을 이용하여 구동 바퀴에 동력을 전달함. 즉, 제어부에서 신호를 전달하여 릴레이를 ON하여 운반시스템의 모터에 전력을 공급하게 되고 멈출 경우 릴레이 신호를 OFF하여 시스템을 멈추게 됨. 이때 릴레이를 신호를 OFF하여 운반시스템의 모터에 전력 공급을 중단하게 되면 모터 자체의 구동은 멈추게 되지만, 자체 하중에 의한 관성에 의해 제어 신호가 OFF된 뒤에도 어느 정도 거리를 움직이게 됨.

표 169 제어 신호 OFF후 관성에 의한 이동 거리

속도조절기 수치	0	1	2	3	4	5
이동 거리(cm)	10	22	35	52	62	70

속도조절기를 각각의 수치에 놓고 1m를 이송한 후 제어 신호를 OFF하여 관성에 의해 추가적으로 이동한 거리를 측정하는 결과는 위의 표와 같음. 속도조절기의 수치가 6이상인 경우, 관성에 의해 추가적으로 이동한 거리는 1m 이상으로 나타났음. 따라서 운반시스템을 이용하여 자동으로 파프리카를 수확할 경우에 운반시스템의 정확한 이송을 위해 최대한 운반시스템의 이송속도를 낮추는 것이 안정적임. 하지만 이송속도가 너무 느린 경우 수확 과정에 있어 시간이 오래 걸리므로 적절한 이송 속도를 결정하는 것이 중요함. 적절한 운송 속도를 선정하기에 앞서 우선 속도조절기의 수치에 따른 평균 이송속도를 측정하였음. 일정한 거리를 이동한 시간을 속도조절기의 수치에 따라 각각 5회씩 측정하고 평균한 값을 이용하여 운반시스템의 평균이송속도를 계산하였음. 이때 6이상의 수치에서는 관성에 의한 이동 거리가 너무 길어 측정에서 제외하였음.

표 170 일정한 거리(3m)를 이동하는데 걸린 시간

회수 속도조절	단위(초)					평균
	1	2	3	4	5	
	11.56	11.75	11.45	11.58	11.20	11.51
	7.84	7.63	7.98	7.78	7.57	7.76
	6.38	6.42	6.46	6.37	6.20	6.37
	5.41	5.40	5.29	5.44	5.48	5.40
	4.85	4.83	4.81	4.77	4.73	4.80
	4.29	4.24	4.37	4.25	4.28	4.29

측정한 결과 값은 위의 표와 같고, 평균 이동 속도는 속도조절 수치에 따라 0에서 5까지 각각 0.9, 1.4, 1.7, 2, 2.3, 2.5(km/h)로 계산됨. 또한 300mm를 이동하는데 걸리는 평균 시간은 각각 1.15, 0.78, 0.64, 0.54, 0.48, 0.43(초)로 나타나는 것을 확인할 수 있었음. 또한 영상을 통해 파프리카의 유무를 확인하는데 걸리는 시간은 0.5초 이내로 개발한 운반시스템을 이용하여 속도조절기의 수치를 0에서 3에 위치하도록 이동하면 파프리카의 유무를 확인하는데 있어 문제가 없음. 또한 속도가 증가할수록 수확하는데 있어 소요되는 시간은 줄어들지만 운반시스템의 관성에 의해 이동하는 거리는 증가하게 됨. 즉, 추후 추가적인 연구를 통해 파프리카의 유무를 확인하는데 있어 충분한 시간과 운반시스템 자체의 관성에 의해 이동하는 거리를 절충하여 적절한 속도를 선정할 필요가 있음.

○ 파프리카 무게 획득 장치 설계

- 온실환경에 적합한 중량 측정 센서 선정

파프리카를 자동으로 수확할 경우, 파프리카 수확부에 무한정 파프리카를 쌓아둘 수 없으므로 적정량을 수확하게 되면 수확한 파프리카를 운반한 후 다시 수확 작업을 진행하여야 될 필요가 있음. 따라서 적정량의 파프리카가 수확되었는지를 확인하기 위해 파프리카를 수확하는 부분에 중량 센서를 설치하여 적정 중량이 되었는지를 확인하고자 하였음. 이를 위해 중량 센서로 흔히 쓰이는 로드 셀 중에서 저가이며 제어가 간편한 3선식 로드 셀을 선정하였음.



제품규격 (Specification)	
최대측정용량	50Kg
Full Scale 출력	1.1 mV/V (± 0.15)
비직진성(Non-Linearity)	0.02 % F.S
반복성(Repeatability)	0.01 % F.S
내부임피던스(Impedance)	1K(±5)
절연저항	>2000 MΩ(100VDC)
인가전압	5~10V
과부하능력	150Kg
동작온도(Operating temp.)	-10 °C ~ +50 °C
크기(Size)	34x34x7.8mm

그림 906 선정한 로드셀과 상세 제원

- 무게 정보 전송을 위한 통신 모듈 선정

로드 셀과 마이크로컨트롤러간의 원활한 데이터 송수신을 위해 로드 셀의 신호를 증폭시키는 신호변환모듈을 추가하였음. 다음은 본 연구에 사용한 로드 셀 신호변환 모듈임.



그림 907 로드 셀 신호변환모듈

PC에서 무게 측정을 하도록 시리얼 통신을 이용하여 마이크로컨트롤러에 신호를 전달하면 마이크로컨트롤러에서는 클럭을 발생시킴. 이때 로드 셀 신호변환모듈에서는 발생된 클럭에 따라 로드 셀에서 데이터를 획득하여 24bit 신호로 변환하여 마이크로컨트롤러로 신호를 전달함. 마이크로컨트롤러에서는 전달받은 24bit 신호를 16bit 신호로 변환하여 무게 정보를 획득함. 획득한 무게 정보는 시리얼 통신을 이용하여 PC측에 전달하여 모니터링 할 수 있게 됨.

- 무게 획득 알고리즘 설계

통상적으로 로드 셀의 사용 개수는 구조물의 형태와 관련이 있으며 많이 사용한다고 성능이 높아지는 것은 아님. 1개나 3개가 가장 안정되고 정확한 계량을 할 수 있는 반면 4개나 6개를 사용할 경우 중심점을 조정하기가 쉽지 않아 오차 발생 확률이 높아진다고 알려져 있음. 본 연구 과제에서는 우선적으로 1개의 로드 셀을 이용하여 무게를 측정하였음.

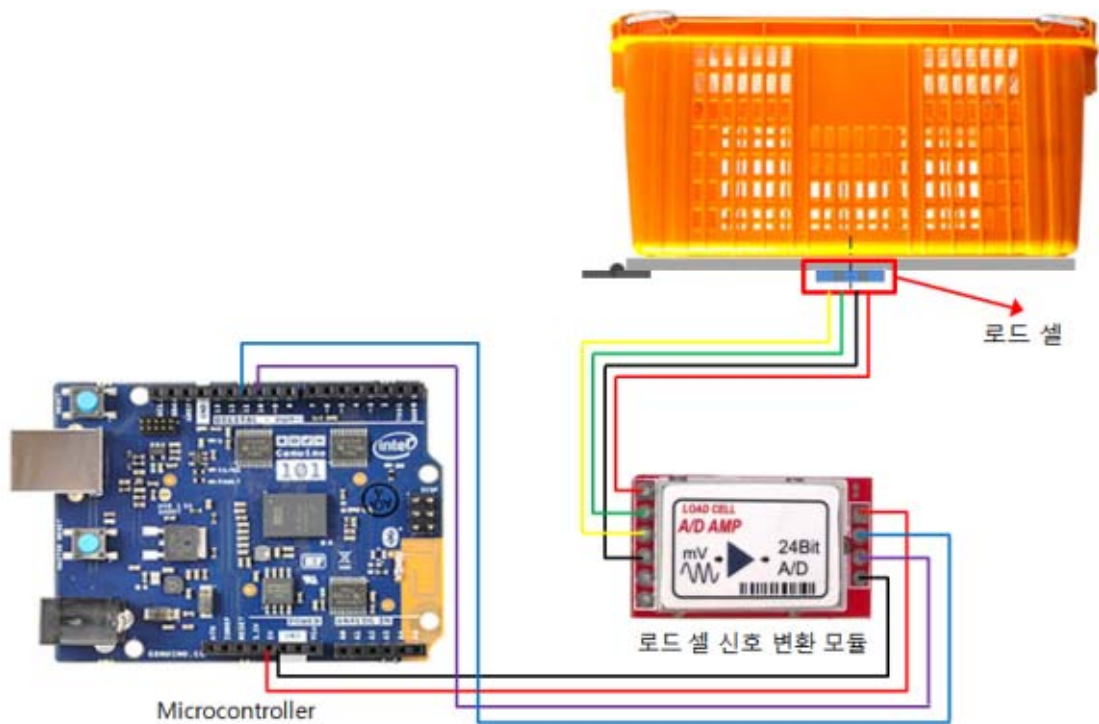


그림 908 마이크로컨트롤러를 이용한 무게 획득 장치

본 연구에서 개발한 수확 장치의 경우 일반적인 운반 상자를 이용하여 파프리카를 적재함. 자동으로 파프리카를 수확하며 지속적으로 운반 상자에 적재를 하는데 다음 파프리카를 수확하기 전에 신호를 보내어 무게를 측정하도록 함. 이때 측정된 무게가 일정 값을 넘어서게 되면 자동 수확을 멈춤. 자동 수확을 멈추면 적재된 파프리카 상자를 내리고 빈 운반 상자를 올리고 신호를 보내어 무게를 측정함. 이때 측정된 무게를 원점으로 하여 다시 자동 수확 작업을 진행함. 이후의 과정은 반복적으로 동일하게 진행함.

- 무게 정보 전송 알고리즘 설계

주행부 및 운반부의 자동 제어를 위해 선정한 마이크로컨트롤러의 경우, PC와의 데이터 송수신을 위한 프로그램을 작성하였으므로 무게를 측정할 데이터도 앞서 선정한 마이크로컨트롤러 (Genuino 101)를 이용하여 송수신하였음. 이에 추가적으로 마이크로컨트롤러에서 무게 정보를 획득하기 위해 3선식 로드 셀과 마이크로컨트롤러간의 물리적인 연결이 필요함. 마이크로컨트롤러와 3선식 로드 셀을 물리적으로 연결하기 위한 회로도도 다음 그림과 같음. 물리적인 연결이 완료되면 PC에서 원하는 시점에 무게를 측정하기 위해 신호를 송신함. 이때 마이크로컨트롤러에서 무게 측정을 시작하기 위한 신호를 PC에서 수신하면 3선식 로드 셀에 클럭을 발생시켜 무게를 측정할 데이터를 마이크로 컨트롤러에 송신함. 마이크로컨트롤러에서는 수신된 무게 정보를 최종적으로 PC측에 시리얼 통신을 통해 전달하게 되어 PC에서 무게 정보를 모니터링 할 수 있음.

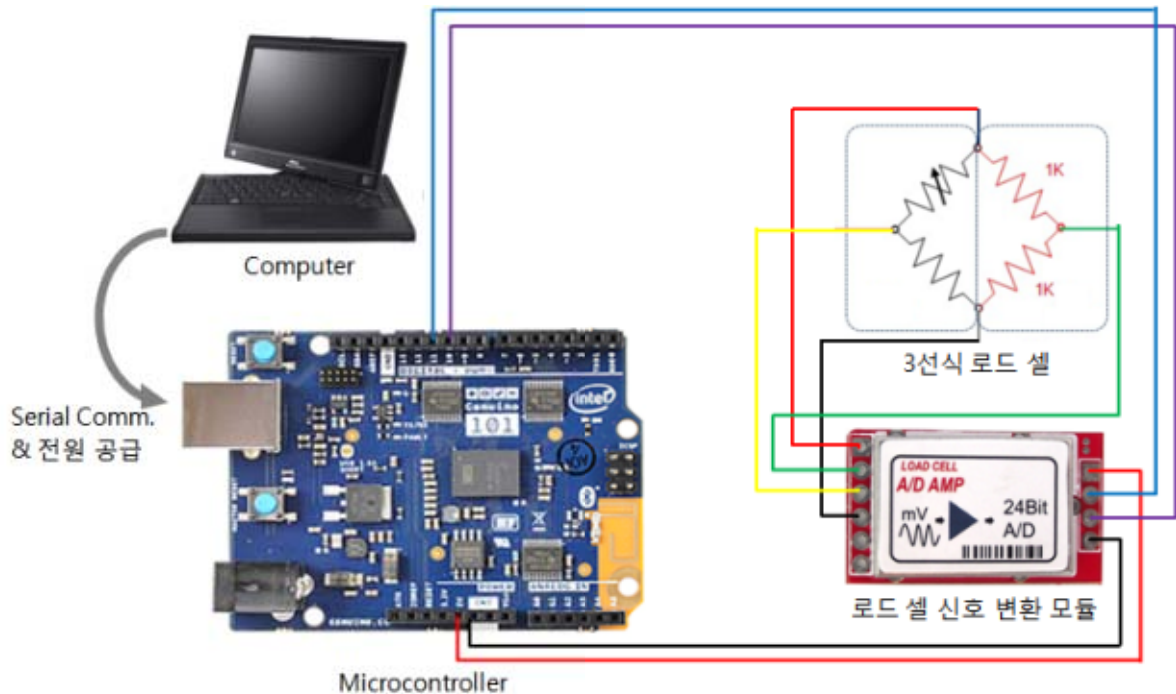


그림 909 무게 정보 전송을 위한 알고리즘 설계

앞서 제작한 주행부 및 운반부의 자동 제어를 위한 마이크로컨트롤러 프로그램에 무게를 측정하기 위한 프로그램을 추가하였음. 즉, 마이크로컨트롤러에서 PC에서의 적정 신호를 전달받으면 3선식 로드셀에 클럭을 발생시켜 무게 정보를 획득함. 이후 획득한 무게 정보를 다시 PC에 송신하도록 스케치를 이용하여 프로그램을 추가하였음.

```

Arduino_24bitAD | 아두이노 1.6.9
파일 편집 스케치 툴 도움말
Arduino_24bitAD $
#define DATA 10 // DO/RX
#define CLK 11 // CK/TX

unsigned long raw;
int i;
unsigned long val;
signed int rval;
char buf[20];

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(DATA, INPUT);
  pinMode(CLK, OUTPUT);
  digitalWrite(DATA, HIGH);
}

void loop(){
  digitalWrite(DATA, HIGH);
  digitalWrite(CLK, HIGH);

  raw = 0;
  //while(reader==HIGH);
  raw = digitalRead(DATA);
  for(i=0; i<24; i++)
  {
    digitalWrite(CLK, HIGH);
    raw <<= 1;
    digitalWrite(CLK, LOW);
    if(digitalRead(DATA))
    {
      raw++;
    }
  }
  digitalWrite(CLK, HIGH);
  delay(1);
  digitalWrite(CLK, LOW);

  val = raw;
  rval=(val>>8) & 0xffff; // change from the 24bit to 16bit
  sprintf(buf, "%d", rval);
  Serial.print("Weight : ");
  Serial.println(buf);
  delay(1000);
}

```

그림 910 무게 측정을 위한 마이크로컨트롤러 프로그램 코딩

PC에서도 무게 측정을 하기 위한 신호를 전달하는 부분과 측정된 무게 정보를 받아들이기 위한 프로그램을 기존의 시리얼 통신 프로그램에 추가하였음. 아래 그림과 같이 PC측에서 ‘7’이라고 하는 신호를 송신하면 마이크로컨트롤러에서는 획득한 무게 정보를 PC측에 송신함.

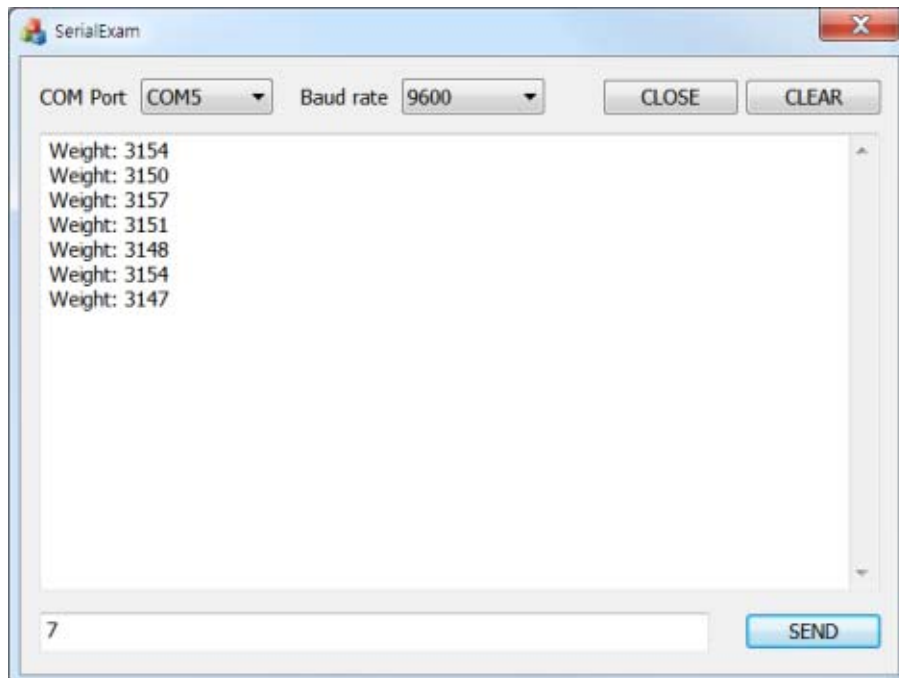


그림 911 무게 정보 측정을 위한 시리얼 통신 프로그램

- 무게 획득 장치의 기초 설계

일반적인 운반 상자를 이용하여 파프리카를 수확 및 운반하고자 함. 하지만 일반적인 운반 상자의 경우, 앞서 밝힌 바와 같이 대부분이 타공되어 있으므로 앞서 선정된 로드 셀을 직접적으로 장착하기가 어려움. 또한 플라스틱의 경우 휘어짐이 많이 발생되므로 운반 상자 하부에 상대적으로 휘어짐이 적으면서 강성이 뛰어난 두랄루민 재질의 패널을 배치하여 휘어짐 없이 균일하게 로드 셀에 힘이 가해지도록 하여 정확한 무게 측정이 이루어지도록 하였음.



그림 912 무게 획득 장치 기초 설계

추후 수확 시스템에 장착 시에는 두랄루민 패널과 수확 시스템의 리프트 상관을 경첩을 이용하여 서로 고정함. 경첩을 통해 두랄루민 패널 자체의 움직임을 제한하지 않도록 하여 정확한 무게 측정이 이루어지도록 함. 이후 두랄루민 패널 자체의 하중에 의해 가해진 로드 셀의 수치를 측정하고 이 수치를 원점으로 놓음. 또한 고정된 두랄루민 패널의 상단에 운반 상자의 밑면에 대응되는 홈을 제작하고 홈에 맞추어 운반 상자를 위치함. 이를 통해 운반시스템의 주행 시나 리프트 상하 이동 시 진동에 의해 운반 상자가 이탈하지 않도록 함. 로드 셀을 운반 상자 혹은 두랄루민 패널의 중심에 설치하고 무게를 측정을 하여 편향된 무게 측정이 이루어지지 않도록 함.

- 무게 획득 장치의 부분 제작

앞서 무게 정보 전송을 위한 알고리즘 설계에서도 살펴볼 수 있듯이 하프브리지 형태의 3선식 로드 셀에 1kohm 저항 두 개를 추가하여 풀 브리지 회로를 구성하였음. 풀 브리지 회로로 구성된 3선식 로드 셀을 로드 셀 신호변환모듈과 결선하였음. 또한 신호변환모듈을 컨트롤러의 VCC(5V 출력) 포트와 GND(Ground) 포트를 이용하여 전원을 공급하고 CLK(클럭 입력) 포트와 DO(데이터) 포트를 각각 컨트롤러의 디지털 입·출력 포트에 연결하였음. 로드 셀, 로드 셀 신호변환 모듈, 컨트롤러 등을 이용하여 실제 무게 획득을 위한 장치를 일부 제작한 모습은 다음과 같음.

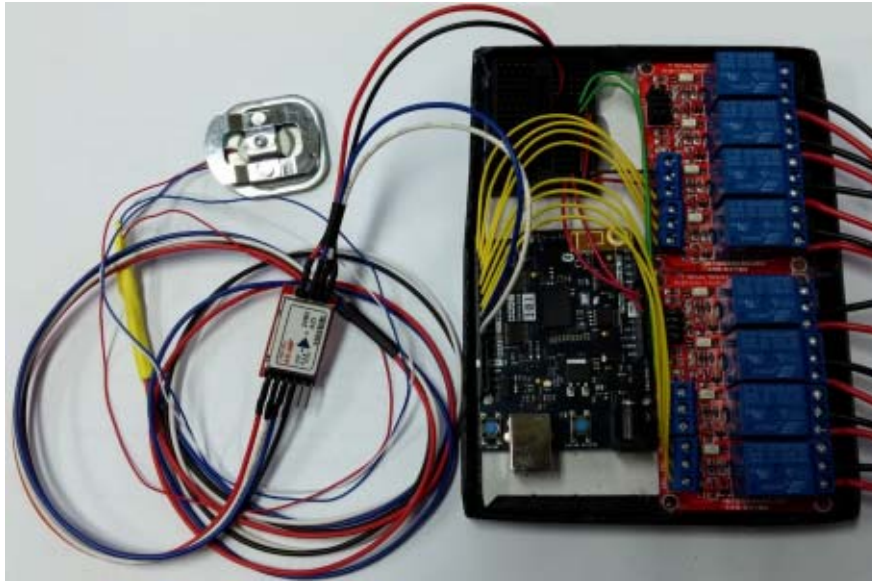


그림 913 무게 측정을 위한 컨트롤러 제작 모습

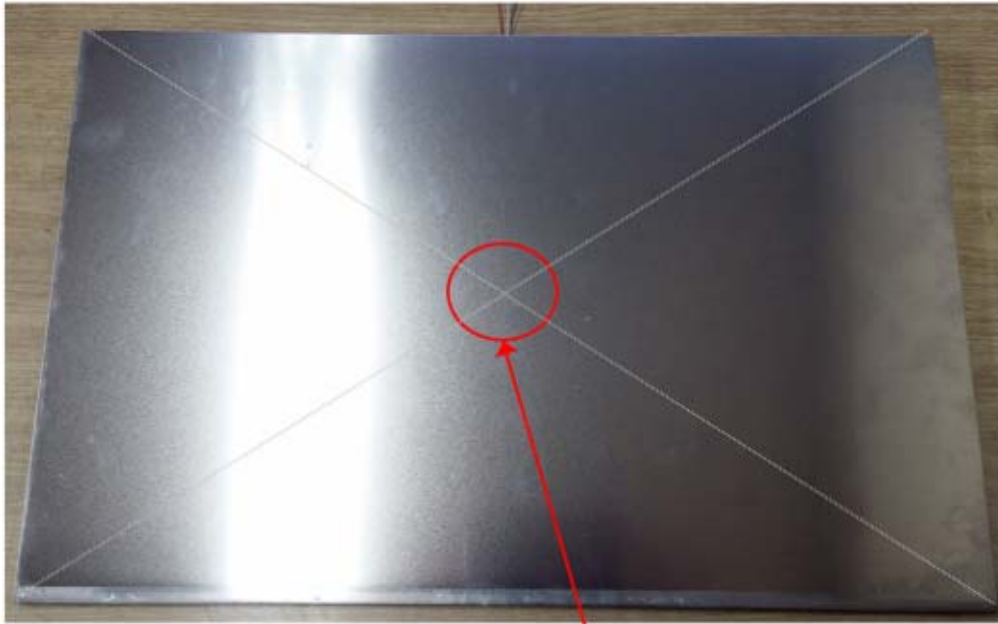
- 무게 획득 장치의 기초 실험

선정한 로드 셀을 다양한 무게를 가지는 물체를 이용하여 무게 측정 및 캘리브레이션을 진행하였음.



그림 914 로드 셀 캘리브레이션을 위한 중량물(2kg, 2.5kg, 5kg, 7kg)

상기의 그림과 같이 2kg, 2.5kg의 바벨 추와 5kg 아령 1세트, 7kg 아령 1세트를 이용하여 무게 측정 및 캘리브레이션을 진행하였음. 캘리브레이션을 진행하기에 앞서 로드 셀을 평평한 바닥에 놓은 다음, 두랄루민 패널의 중심에 로드 셀이 위치하도록 하여 패널을 다음 그림과 같이 로드 셀 위에 위치하였음.



로드 셀의 위치

그림 915 무게 측정 및 캘리브레이션을 위한 패널
 다음 그림과 같이 측정하고자 하는 중량물을 패널 위의 중심에 위치한 후 앞서 제작한 무게
 정보 획득을 위한 컨트롤러 및 통신 프로그램을 이용하여 측정을 진행하였음.



그림 916 무게 정보 획득을 위해 중량물을 패널위에 위치한 모습

각각의 중량물을 조합하여 각각의 무게(0kg, 2.5kg, 5kg, 7.5kg, 10kg, 12.5kg, 14kg, 19kg,
 24kg, 28.5kg)에 대하여 5회씩 측정을 진행하였음. 다음 표는 각각의 무게에 대해서 총 5회씩
 값을 측정한 결과임.

표 171 무게에 따른 로드 셀 측정 값

무게(kg) \ 횟수(회)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
1	3315	3604	3847	4107	4343	4584	4706	5115	5532	5974
2	3316	3607	3853	4104	4339	4579	4707	5122	5536	5979
3	3318	3605	3857	4113	4341	4583	4706	5115	5524	5973
4	3307	3611	3855	4115	4336	4581	4701	5119	5530	5969
5	3311	3604	3847	4113	4337	4579	4703	5122	5525	5979

표 172 무게에 따른 로드 셀 측정값을 평균한 값

무게(kg) \ 평균 값	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
평균 값	3313	3606	3852	4110	4339	4581	4705	5119	5529	5975

각각의 무게에 대해서 5회씩 측정한 값의 평균값을 이용하여 로드 셀의 캘리브레이션을 진행하였음.

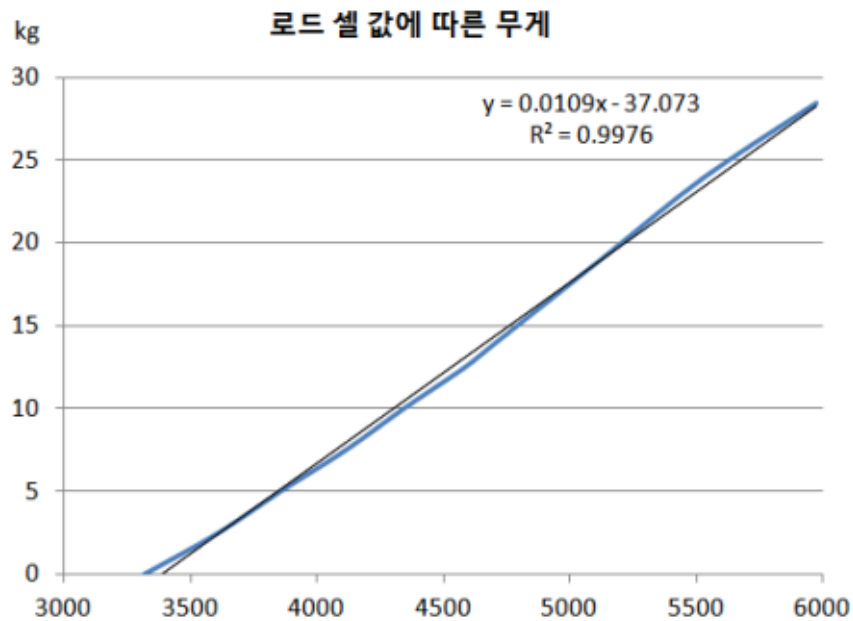


그림 917 로드 셀 측정값에 따른 실제 무게 그래프

로드 셀 값에 따른 무게에 대한 그래프는 상기의 그림과 같음. 로드 셀 측정값에 따른 무게 값을 1차 회귀식을 이용하여 선형 근사를 수행한 결과 결정 계수는 0.9976으로 나타났음. 이를 통해 로드 셀로 측정한 값을 이용하여 무게를 정확하게 계산할 수 있다는 것을 확인할 수 있었음.

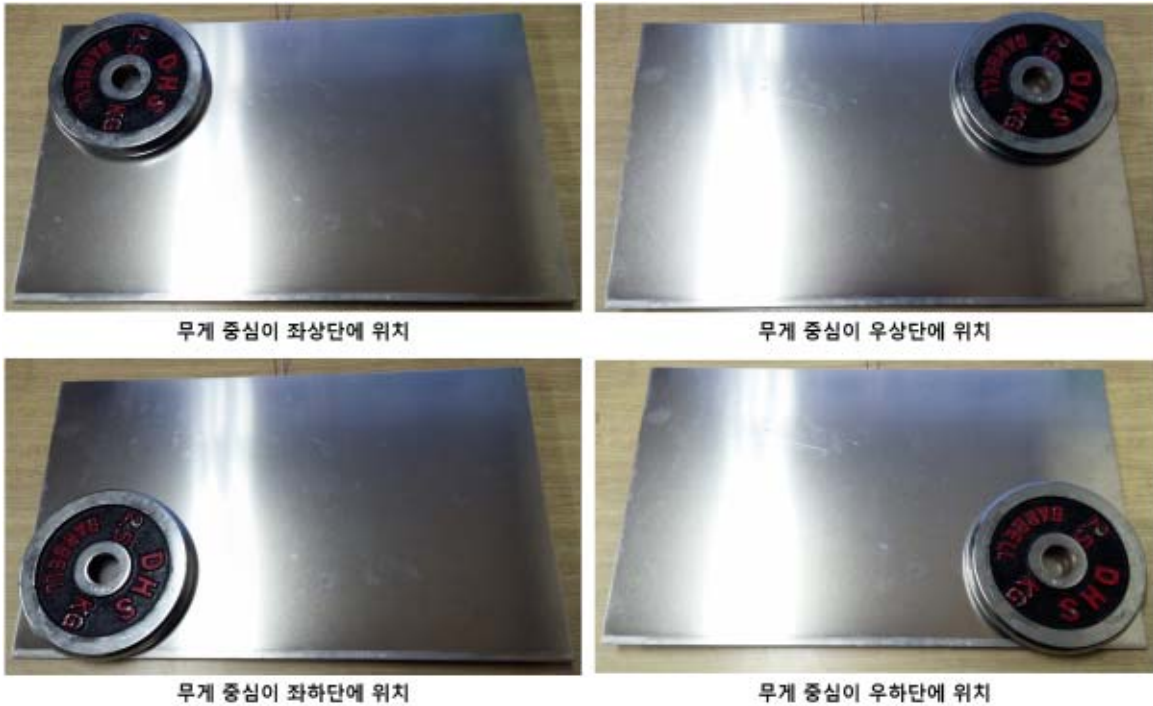


그림 918 중심에서 벗어난 중량물의 무게 측정

실제 파프리카를 수확하는 과정에서 운반 상자의 한 쪽으로만 파프리카를 적재할 경우 운반 상자의 무게 중심이 한 쪽으로 쏠리는 경우가 발생할 수가 있음. 이 경우에도 상기의 무게 측정 방식이 적용가능한지를 확인해보기 위해서 중량물을 패널의 중심에서 벗어난 부분에 올려놓고 무게 측정 실험을 진행하였음. 앞서 중량물을 패널의 중심에 위치하여 측정하였을 때와 마찬가지로 각각의 무게(0kg, 2.5kg, 5kg, 7.5kg, 10kg, 12.5kg, 14kg, 19kg, 24kg, 28.5kg)에 대하여 5회씩 측정을 진행하였다. 각각의 무게에 대해서 총 5회씩 값을 측정한 결과는 다음 표와 같음.

표 173 무게 중심이 좌상단일 경우 무게에 따른 로드 셀 측정 값

무게(kg) 회수(회)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
1	3315	3415	3444	3541	3774	4015	4031	4319	4485	4726
2	3316	3415	3452	3534	3773	4011	4029	4325	4483	4725
3	3318	3419	3442	3532	3772	4013	4028	4317	4482	4728
4	3307	3421	3445	3541	3770	4011	4027	4316	4480	4725
5	3311	3422	3442	3536	3772	4007	4028	4320	4484	4728

표 174 무게 중심이 좌상단일 경우 무게에 따른 로드 셀 측정값을 평균한 값

무게(kg)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
평균 값	3313	3418	3445	3537	3772	4011	4029	4319	4483	4726

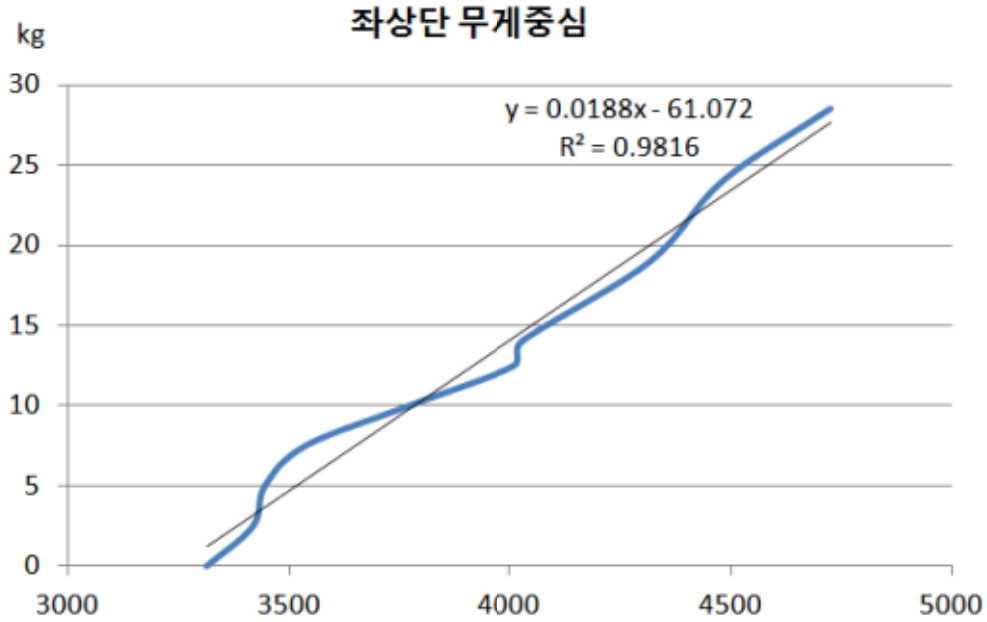


그림 919 좌상단 무게 중심에서의 측정값과 실제 무게와의 관계

무게 중심이 패널에서 좌상단에 위치할 경우에 각각의 무게에 대해서 총 5회씩 측정한 결과와 5회씩 측정한 값의 평균값은 상기의 표와 같음. 상기에 측정한 값을 이용하여 로드 셀 측정값에 따른 무게 값을 선형회귀를 이용하여 근사를 수행한 결과 결정 계수는 0.9816으로 나타났음.

표 175 무게 중심이 우상단일 경우 무게에 따른 로드 셀 측정 값

무게(kg)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
횟수(회)										
1	3315	3423	3442	3558	3792	3972	4040	4204	4472	4629
2	3316	3417	3447	3561	3796	3997	4041	4206	4471	4626
3	3318	3419	3444	3564	3798	3993	4047	4213	4480	4619
4	3307	3418	3447	3555	3798	3997	4039	4203	4483	4619
5	3311	3420	3449	3559	3795	3986	4043	4207	4478	4625

표 176 무게 중심이 우상단일 경우 무게에 따른 로드 셀 측정값을 평균한 값

무게(kg)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
평균 값	3313	3419	3446	3559	3796	3989	4042	4207	4477	4624

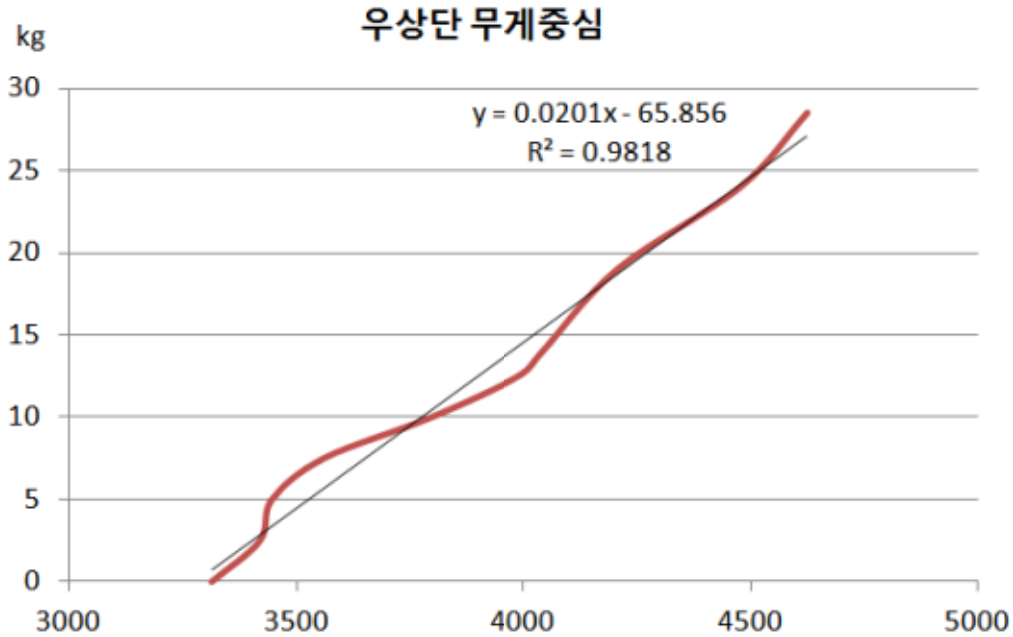


그림 920 우상단 무게 중심에서의 측정값과 실제 무게와의 관계

무게 중심이 패널에서 우상단에 위치할 경우에 각각의 무게에 대해서 총 5회씩 측정한 결과와 5회씩 측정한 값의 평균값은 상기의 표와 같음. 상기에 측정한 값을 이용하여 로드 셀 측정값에 따른 무게 값을 선형회귀를 이용하여 근사를 수행한 결과 결정 계수는 0.9818로 나타났음.

표 177 무게 중심이 좌하단일 경우 무게에 따른 로드 셀 측정 값

무게(kg)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
횟수(회)										
1	3315	3403	3428	3513	3807	3989	4067	4299	4575	4715
2	3316	3409	3429	3513	3807	3981	4061	4295	4569	4708
3	3318	3399	3426	3511	3810	3987	4070	4301	4569	4706
4	3307	3398	3438	3511	3815	3988	4070	4291	4572	4706
5	3311	3405	3432	3506	3815	3985	4069	4293	4573	4718

표 178 무게 중심이 좌하단일 경우 무게에 따른 로드 셀 측정값을 평균한 값

무게(kg)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
평균 값	3313	3403	3431	3511	3811	3986	4067	4296	4572	4711

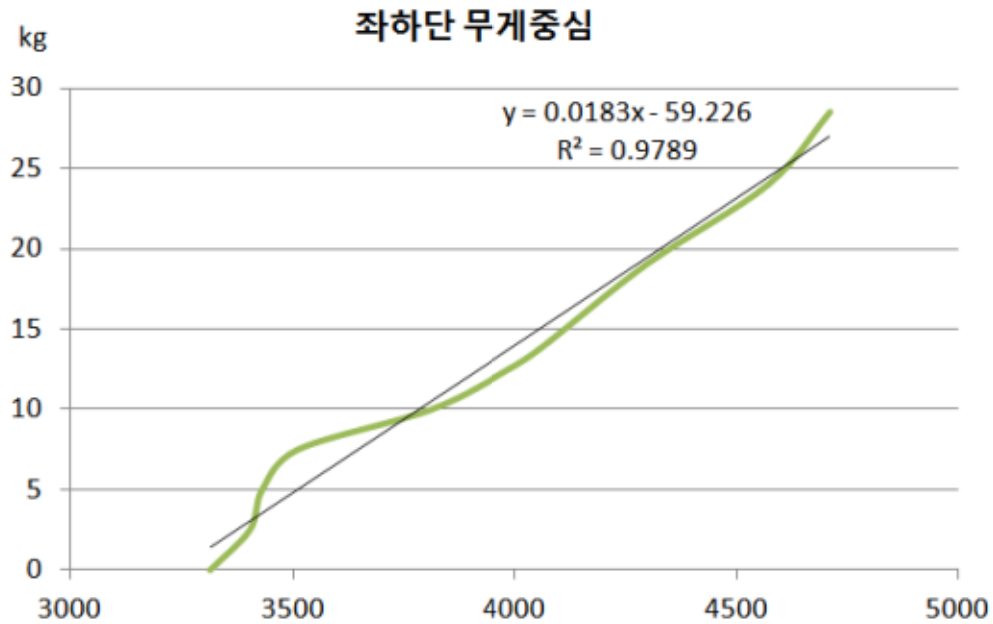


그림 921 좌하단 무게 중심에서의 측정값과 실제 무게와의 관계

무게 중심이 패널에서 좌하단에 위치할 경우에 각각의 무게에 대해서 총 5회씩 측정한 결과와 5회씩 측정한 값의 평균값은 상기의 표와 같음. 상기에 측정한 값을 이용하여 로드 셀 측정값에 따른 무게 값을 선형회귀를 이용하여 근사를 수행한 결과 결정 계수는 0.9789로 나타났음.

표 179 무게 중심이 우하단일 경우 무게에 따른 로드 셀 측정 값

무게(kg)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
횟수(회)										
1	3315	3410	3457	3539	3829	3994	4085	4269	4480	4628
2	3316	3414	3465	3543	3831	3991	4087	4270	4490	4631
3	3318	3411	3466	3539	3831	3992	4083	4266	4487	4629
4	3307	3414	3459	3539	3826	3984	4088	4259	4489	4631
5	3311	3410	3465	3546	3827	3992	4083	4265	4489	4631

표 180 무게 중심이 우하단일 경우 무게에 따른 로드 셀 측정값을 평균한 값

무게(kg)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	14	19	24	28.5
평균 값	3313	3412	3462	3541	3829	3991	4085	4266	4487	4630

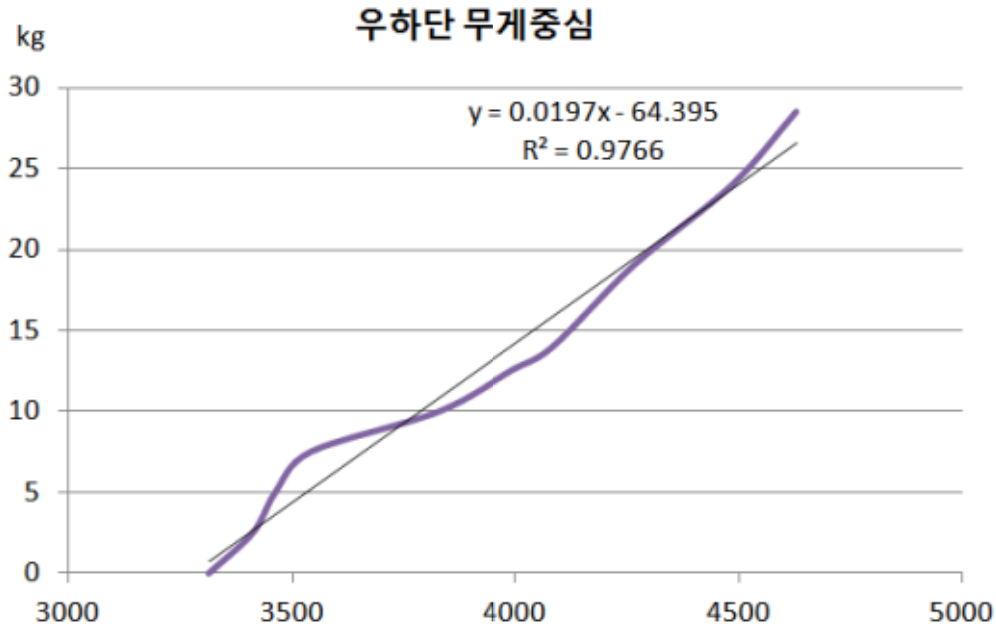


그림 922 우하단 무게 중심에서의 측정값과 실제 무게와의 관계

무게 중심이 패널에서 우하단에 위치할 경우에 각각의 무게에 대해서 총 5회씩 측정한 결과와 5회씩 측정한 값의 평균값은 상기의 표와 같음. 상기에 측정한 값을 이용하여 로드 셀 측정값에 따른 무게 값을 선형회귀를 이용하여 근사를 수행한 결과 결정 계수는 0.9766으로 나타났음.

무게 중심이 로드 셀과 일치하지 않는 경우에 1차 회귀식의 결정 계수는 각각 무게 중심이 좌상단인 경우에 0.9816, 우상단인 경우에 0.9818, 좌하단인 경우에 0.9789, 우하단인 경우에 0.9766으로 나타났음. 이는 무게 중심이 패널의 중심에 있을 때 보다는 줄어든 수치이지만 무게 중심이 패널의 중심에서 벗어난 경우에도 선형 회귀를 이용하여 정확한 무게 측정이 가능하다는 것을 알 수 있음. 또한 무게 중심이 중심에서 벗어난 경우의 데이터를 나란히 놓고 보게 되면 아래 그림과 같이 각각의 실제 무게에 따른 측정값 및 추세선의 형태가 유사한 것을 확인할 수 있음.

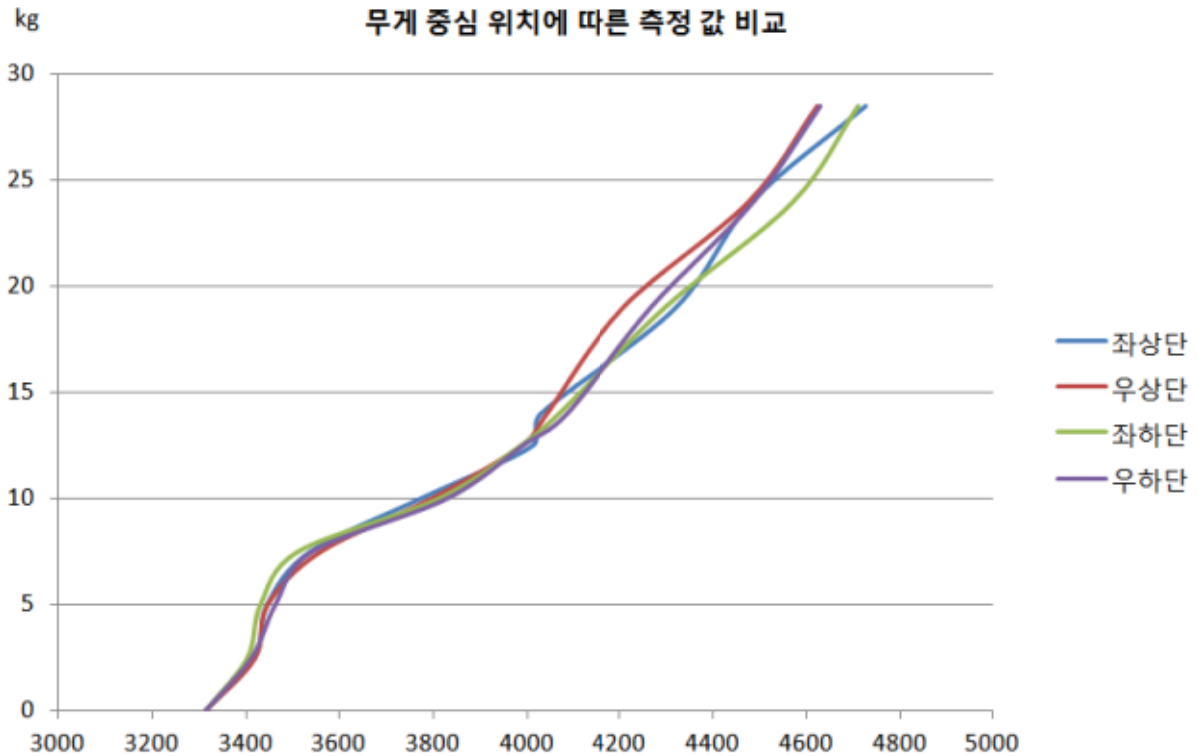


그림 923 중량물 무게 중심 위치에 따른 로드 셀 측정 값 비교

이상을 종합하면 1개의 로드 셀을 이용하여 무게를 측정할 경우, 측정하고자 하는 물체의 무게 중심이 벗어난 위치보다는 물체의 무게 중심이 로드 셀의 측정 지점과 일치하는 정도에 따라 로드 셀 측정값이 달라진다는 것을 확인할 수 있었음. 즉, 자동 수확 시스템을 이용하여 파프리카를 운반 상자에 적재할 때 무게 중심이 고르게 가도록 적재를 할 경우 1개의 로드 셀로도 충분한 측정이 가능함. 만약 1개의 로드 셀만을 이용하여 운반 상자에 적재된 파프리카의 무게를 측정할 경우에 만약에 파프리카를 한쪽으로 치우치게 적재하게 되면 파프리카의 무게 중심이 로드 셀의 중심에서 벗어난 정도를 정확히 파악하기 위한 추가적인 장치 및 측정 알고리즘을 개발할 필요가 있음. 또한 무게 중심에서 벗어난 거리에 따른 회귀식을 계산하기 위한 알고리즘도 추가적으로 개발하여야 함. 혹은 로드 셀을 추가하여 3점 혹은 5점에서 측정하도록 무게 측정 시스템을 개발할 필요가 있음. 이상으로 언급한 두 가지 모두 추가적인 장치가 필요하고 알고리즘의 복잡도가 증가하게 됨. 1개의 로드 셀로도 충분히 실제 무게 측정이 가능한 만큼 본 연구에서는 파프리카를 수확하여 적재를 할 때 운반 상자에 고르게 적재를 하여 정확한 무게 측정이 이루어지도록 하고자 함.

○ 파프리카 수확기 주행 시스템 개발

- 수확된 파프리카 적재 정보 획득 장치 제작

수확 작업이 끝난 파프리카의 과실을 적재할 적재상자를 배치하고 적재상자의 중량을 측정할 적재 정보 획득 장치를 파프리카 수확기 주행 시스템에 부착하기 위하여 파프리카 수확기 주행 시스템의 설계를 아래와 같이 변경하였다.

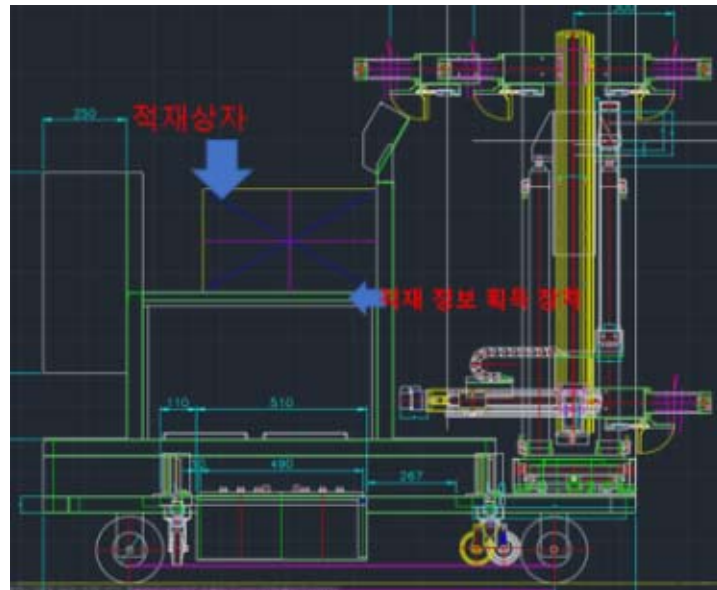


그림 924 변경된 파프리카 수확기 주행 시스템의 설계도

유압리프트 형식으로 수확된 파프리카 적재 상자와 매니플레이터 및 엔드이펙터, 카메라 등의 절단 작업시스템과 인식시스템을 탑재하고 3m 내외로 상승 작업을 하면서 주행을 할 경우, 무게 중심의 변화에 따른 안정성에 문제가 발생할 수 있고 전체 제어 시스템과 적재 정보 획득 장치의 제어의 연결 배선이 3m 내외의 상승 하강 작업을 반복 할 경우 노이즈 등의 오신호를 발생시킬 수 있기 때문에 적재상자를 배치할 적재 정보 획득 장치는 일정 높이에 고정 되게끔 설계를 변경하였다.



그림 925 적재 정보 획득 장치를 추가한 파프리카 수확기 주행 시스템

- 적재 정보 획득 및 정보 전송 구동제어 시스템 제작

주행부 및 운반부의 자동 제어를 위해 선정된 마이크로컨트롤러의 경우, PC와의 데이터 송수신을 위한 프로그램을 작성하였으므로 무게를 측정된 데이터도 마이크로컨트롤러(Genuino 101)를 이용하여 송수신하였다. 마이크로컨트롤러에서 무게 측정을 시작하기 위한 신호를 PC에서 수신하면 3선식 로드 셀에 클럭을 발생시켜 무게를 측정된 데이터를 마이크로 컨트롤러에 송신하도록 하였다. 마이크로컨트롤러에서는 수신된 무게 정보를 최종적으로 PC측에 시리얼 통신을 통해 전달하게 되어 PC에서 무게 정보를 모니터링 할 수 있도록 하였다.

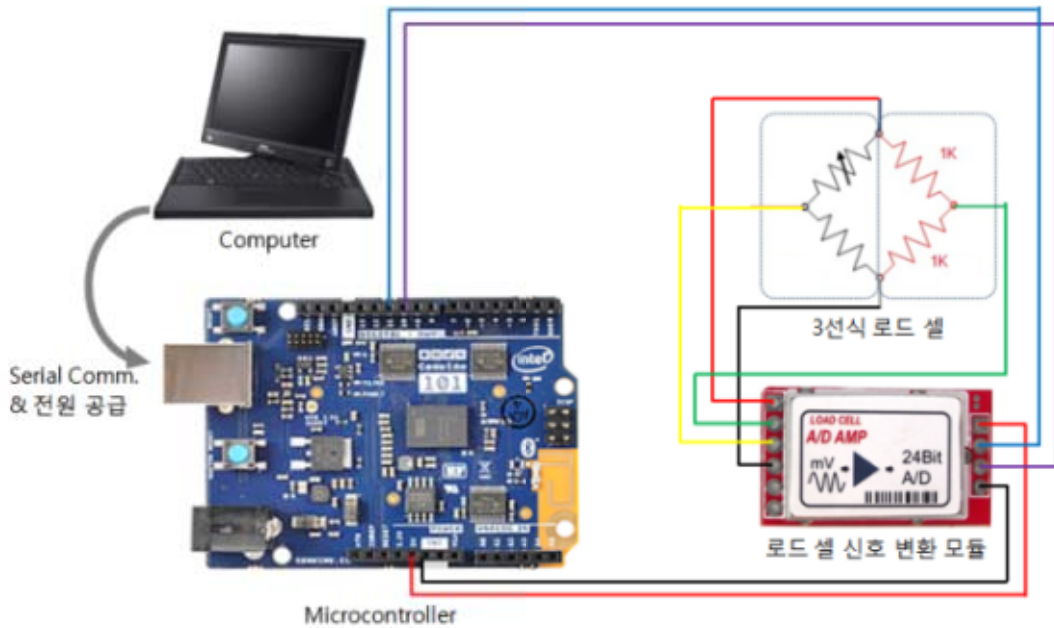


그림 926 무게 정보 전송을 위한 알고리즘

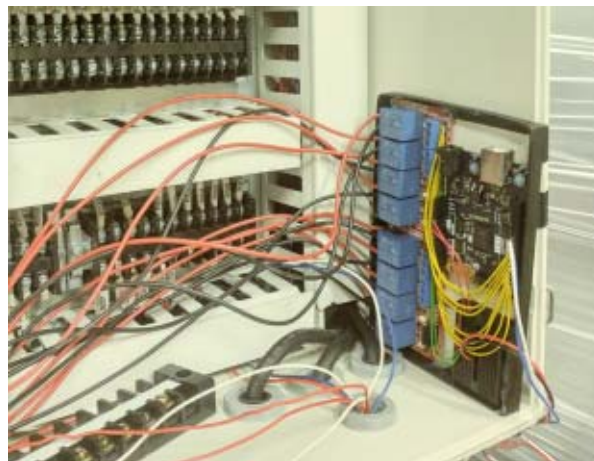


그림 927 전체 제어 시스템과 적재 정보 획득 및 전송 구동제어 시스템의 연결

- 적재 정보 획득 및 전송 성능 평가

일반 농가에서 사용되는 520mm X 368mm X 320mm 적재상자에 파프리카를 가득 담게 되면 30개 내외의 파프리카가 적재된다. 적재상자가 가득 담겨진 이후에도 수확 작업이 이루어지면 안 된다. 따라

서 가득 담는 것보다 다소 부족하게 25개 정도 수확이 이루어 졌을 경우 적재된 정보를 전송하게끔 하도록 하였다. 파프리카 과실 1개의 평균 중량은 200g 내외 이므로 적재 정보, 즉 로드셀에 걸리는 무게 정보가 5kg 이상(200g X 25)이 되면 적재 정보를 전송하도록 하였다. 정확한 성능을 평가하기 위하여 원주시에 위치한 영흥영농의 파프리카 비닐 온실에서 적재 정보 획득 및 전송 성능 평가를 실시하였다.

성능을 평가하기 위하여 첫 번째로 아래 그림과 같이 적재상자에 파프리카 과실 등을 순차적으로 적재하며 5kg에 다다랐을 때 적재 정보를 전송하는 여부를 확인하였다.



그림 928 중량의 순차적 증가에 따른 적재 정보 전송 확인

두 번째로 아래 그림과 같이 임계값 (5kg)을 초과한 상태에서의 수확 작업을 방지하기 위하여 적재 정보 획득 장치 상에 임계값 이상의 적재상자를 탑재하였을 경우 적재 정보를 전송하는지 여부를 확인하였다.



그림 929 과적 상태에서의 적재 정보 전송 확인

각각의 실험을 5회씩 반복하여 적재 정보를 모니터 할 수 있게끔 PC로 전송하는 지 여부를 확인한 결과, 두 경우 모두 적재 정보를 올바르게 전송하는 것을 확인 할 수 있었다.

- 파프리카 온실 환경 내 주행 성능 평가

1. 실험 환경

- 영상처리를 이용한 파프리카 자동 수확작업기의 주행 시스템의 성능 실험은 강원도 원주시에 위치한 영홍영농의 비닐 온실과 경상북도 구미시에 위치한 구미원예농단 내 하나로 파프리카의 유리 온실에서 실시하였다.



그림 930 강원도 원주시 영홍영농



그림 931 경상북도 구미시 하나로 파프리카

- 실험은 온실 내 50m 식 각각 2개의 레인에서 주행 실험을 진행하였다.



그림 932 영홍영농 내 2개 레인



그림 933 하나로 파프리카 내 2개 레인

- 레일이 없을 경우 주행 가능 여부를 판단하기 위해 하나로 파프리카 내 일반 콘크리트 포장도로에

서 주행 성능을 평가하였으며, 영흥영농의 경우 레일을 제외한 노면은 비포장 도로 이므로 레일 위에서의 주행 성능만을 평가하였다.

- 레일 위에서의 경우 레일 진입로 인식 후 주행 시스템의 성능을 실험하였다.
- 주행 시스템의 속도는 기본 속도 (속도 조절기 ; 0)인 0.9km/h의 속도로 실험을 수행하였다.



그림 934 각 레일의 진입로



그림 935 각 레일 진입 후 주행 모습

2. 실험 결과

- 하나로 파프리카의 온실에서 수행한 레일이 없을 때의 자율 주행 유무를 실험 한 결과, 레일을 인식 후 주행하면서 파프리카 수확 작업이 이루어지도록 주행 및 수확 알고리즘을 설계하였기 때문에 자율 주행이 이루어지지 않았다.

- 따라서 레일이 없을 경우 사용자의 조작으로 주행이 가능 할 수 있도록 수동 제어 버튼을 부착하였다.



그림 936 주행 시스템 수동 제어 버튼

- 레일 인식 후 레일 위를 주행하는 3가지의 주행 성능을 평가한 결과는 아래 표와 같다.

	영흥영농 1	영흥영농 2	하나로파프리카 1
Rail recognition time	5	4	4
the Time taken to driving to 50m	218	216	215

표 181 온실 환경 내 주행 성능 평가 (단위 ; 초)

- 3가지의 경우 모두 레일의 진입로를 인식 후 주행하는 것에 성공하였으며, 레일 진입로를 인식하는 것에 5초 내외의 시간을 소요하였다.

- 각 레일 50m를 주행하는 것에 소요된 시간은 영흥영농 1번 레일에서는 218초, 영흥영농 2번 레일에서는 216초, 하나로 파프리카 1번 레일에서는 215초 이었다. 일반 실내에서 기본 속도(0.9km/h)로 주행하는 것보다 느린 속도로 나타났다. (영흥영농 1; 0.824km/h, 영흥영농 2; 0.835km/h, 하나로 파프리카 1; 0.839km/h) 이는 레일 상의 요철 등 파이프 레일 표면이 고르지 못하였기 때문으로 사료된다.

4. 파프리카 수확시스템 개발

○ 2차년도 수확시스템 설계 및 제작

- 각 시스템의 전체 수확시스템 구성 설계 및 제작

절단 작업 시스템의 실제 모습은 아래 그림과 같다.



그림 937 절단 작업 시스템

영상처리 시스템의 실제 모습은 아래 그림과 같다.



그림 938 영상처리 시스템

주행부의 실제 모습은 아래 그림과 같다.



그림 939 주행부

각 시스템을 통합하여 제작한 모습은 아래 그림과 같다.



그림 940 개발 수확시스템

시스템의 통합을 위하여 3차원 설계 소프트웨어인 Autodesk 사의 Inventor 2016을 사용하였으며, 온실 내 작업환경에 맞도록 습도에 강하도록 내부식성을 지닌 두랄루민을 사용하여 각 부품을 제작하였다.

- 2차년도 수확시스템 구동제어시스템 설계 및 제작

전체 수확시스템의 구동제어는 파프리카를 인식하는 영상처리를 수행하고, 전체 시스템이 제어 가능한 PC를 사용하였다. 전체 수확시스템은 아래 그림과 같은 흐름으로 제어된다.

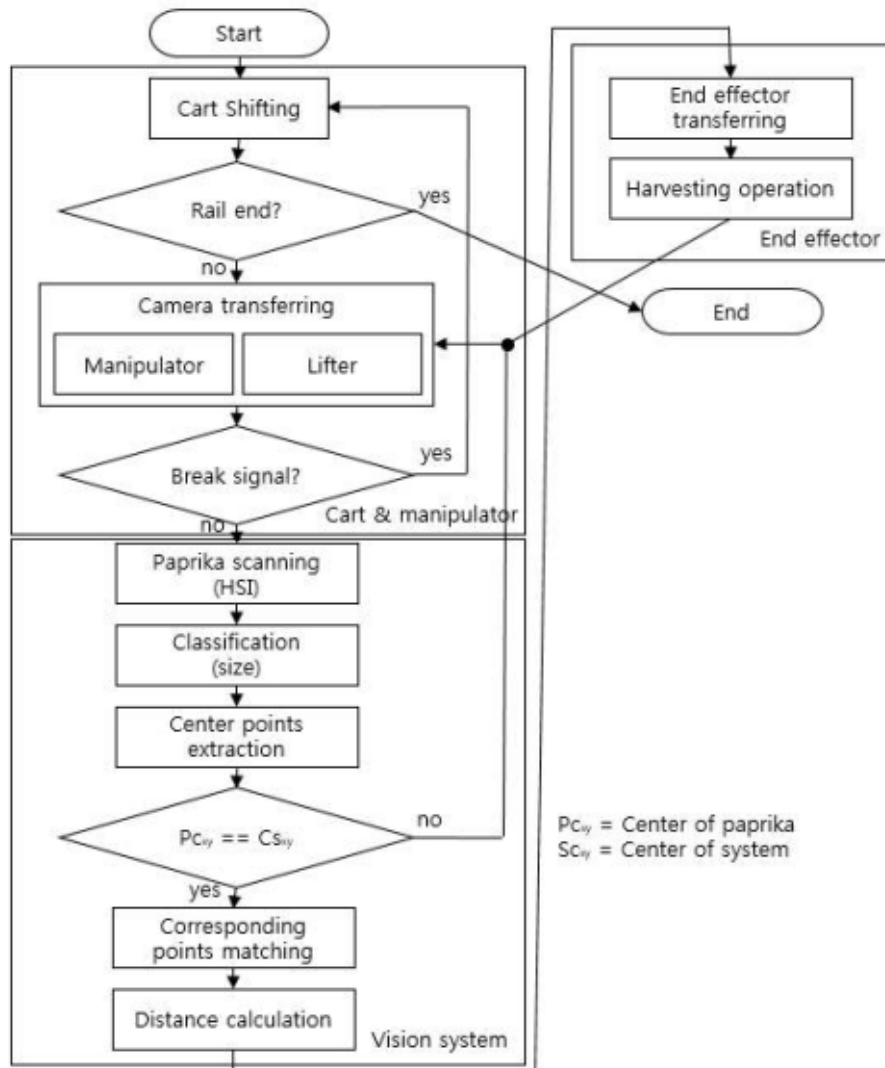


그림 941 영상 정보를 이용한 시스템 제어 순서도

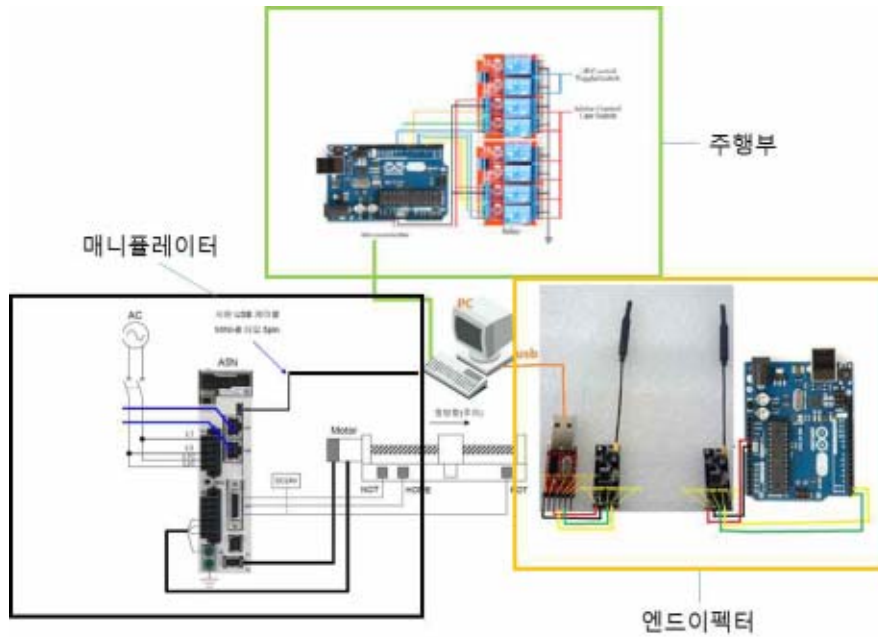


그림 942 PC를 중심으로 한 전체 수확시스템의 구동제어

전체 수확시스템은 파프리카를 인식하고 파프리카와의 거리를 측정하는 영상처리 시스템인 PC에서 주행부 그리고 엔드이펙터와 매니플레이터의 절단작업시스템을 총괄하여 구동제어한다. 상기 그림과 같이 PC를 중심 한 전체 수확시스템의 구동제어시스템을 구성하였다.

- 2차년도 수확시스템 소프트웨어 설계 및 제작

Microsoft 사의 Visual Studio 2016을 사용하여 엔드이펙터와 매니플레이터, 영상처리 시스템과 주행부를 총괄하여 제어할 수 있는 프로그램을 제작하였다. PC에서 엔드이펙터와 매니플레이터의 상태 및 주행부의 상태를 제어할 수 있도록 하였다. 아래 그림은 제작한 모습이다.

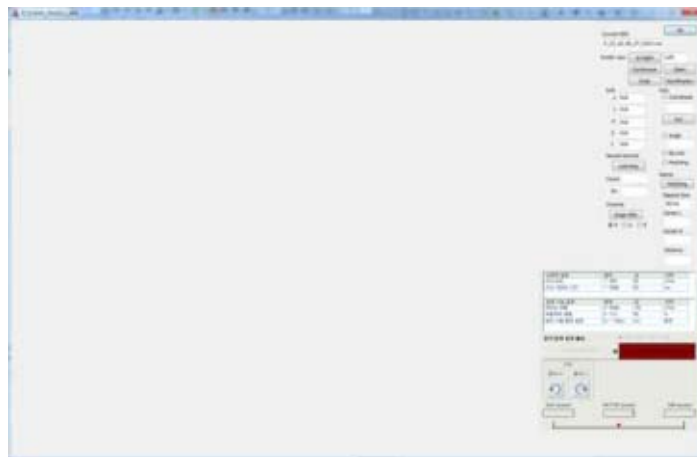


그림 943 총괄 제어 프로그램

시리얼 통신으로 엔드이펙터와 매니플레이터, 주행부의 제어부와 신호를 주고 받는다.

- 2차년도 수확시스템 실험 및 분석

본 연구개발의 최종 목표인 시간당 100개 수확을 위하여 2차년도 제작 시스템의 보완점을 찾고자 50cm 주행 후 매니플레이터의 원점에서 x,y,z 축에서 200mm 거리에 고정된 파프리카를 인식하고 파프리카를 파지하기 까지의 시간을 측정하였다. 실험은 30회 반복하였으며, 한국농원에서 생산하여 판매한 빨간색 파프리카 30개를 사용하였다. 실험 결과는 표 155와 같다.

average	44.54s
variance	0.11572032
standard deviation	0.34017689
standard error	0.06210752
degree of freedom	29
Maximum Value	45.03s
Minimum Value	43.96s

표 182 실험 결과

총 30회 반복한 결과 50cm 주행 후 매니플레이터의 원점에서 x,y,z 축에서 200mm 거리에 고정된 파프리카를 인식하고 파프리카를 파지하기 까지의 시간은 43.96초~45.03초의 범위에서 평균 44.54초로 확인할 수 있었다. 주행과 영상인식에는 시간이 크게 소요되지 않으나 절단 작업시스템의 매니플레이터의 이송 작업과 엔드이펙터의 파지작업에서 소요하는 시간이 많았다. 본 연구개발의 최종 목표인 시간당 100개 수확을 위해서는 매니플레이터와 엔드이펙터의 모터의 성능을 향상시키고, 엔드이펙터의 리드스크류의 나선산거리를 조정하여야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

○ 전체 수확시스템 보완 후 제작

- 최종 시스템 선정 및 보완

1. 2차년도 수확시스템의 성능 분석에 따른 문제점 분석

2차년도 수확 시스템은 다음과 같은 문제점이 있었다.

■ 엔드이펙터

- 1개의 모터를 이용하여 파프리카의 과실의 크기에 따라 파지 할 수 있도록 제작
- 파프리카 파지 작업 제어를 위한 모터가 부착되어 있어 엔드이펙터의 부피 증가
- 10cm 내외의 파프리카의 크기에 맞춰 제작되어 실제 온실 내 작업을 수행하기에는 엔드이펙터의 크기가 과도하게 큼

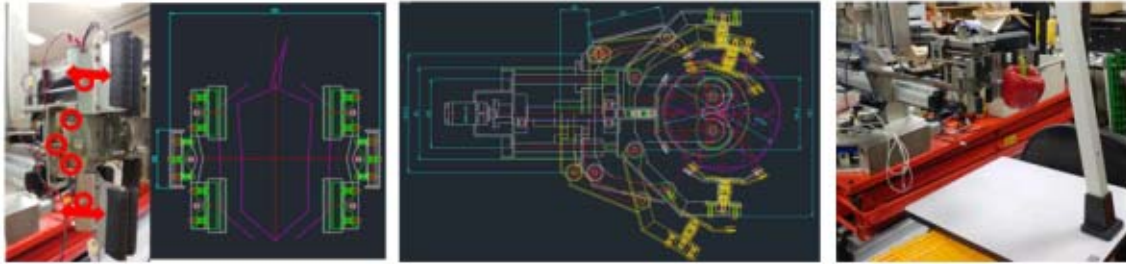


그림 944 2차년도 수확시스템의 엔드이펙터

- 작업 속도를 높이고, 온실 내 원활한 작업을 수행하기 위하여 경량화 하여야 함

■ 매니플레이터 및 주행부

- 최대 3m 내외까지 성장하는 파프리카에 맞춰 주행부에 유압리프트와 같은 형태의 상승 하강 작업부를 두어 최대 3m까지 수확이 가능하도록 하였으나, 주행부 및 전체 수확시스템의 작업 속도를 높이기 위하여 경량화 하여야 함
- 파프리카를 수확한 후 적재 상자로의 이송이 용이하여야 함

■ 영상 시스템

- 2차년도 영상 시스템은 두 대의 카메라를 이용한 스테레오 비전 시스템으로 매니플레이터에 고정된 형태로 제작
- 매니플레이터에 고정된 형태로 영상을 획득하기 때문에 빛, 조명, 줄기 등에 의한 노이즈에 취약함
- 다양한 상황에 대처할 수 있도록 영상 시스템의 구조를 변경하여야 함

2. 최종 시스템 보완 설계 및 제작

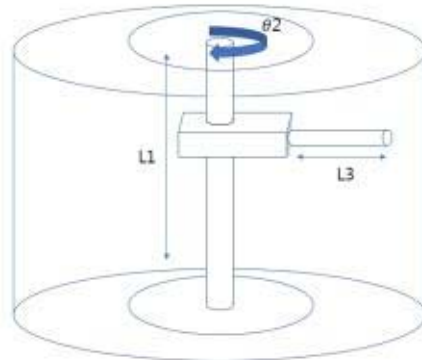


그림 945 Cylindrical robot.

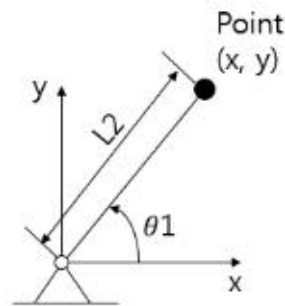


그림 946 Joint variables and link length.

그림 945과 같이 원통 형 로봇은 높이 $L1$, 각도 $\theta2$, 그리고 반경 $L3$ 에 의하여 제어된다(P joint, R joint, P joint). 로봇의 구동은 좁은 공간에서 효율적으로 작업이 가능하며 수평 방향의 접근이 용이하다. V. Kumar는 세 개의 독립적인 자유도를 갖고 있으며 수직, 수평 방향의 조인트는 서로 교차하며 수직 방향의 자유도를 무시한다면 회전과 수평 방향의 R-P 매니퓰레이터로 그림 946과 같이 나타낼 수 있다고 한다. 회전각도 $\theta1$ 은 수평 방향 x축으로부터 정의되며, $L2$ 는 회전 축으로부터 엔드 이펙터의 말단 점까지의 거리로 정의할 수 있다.

■ 비주얼 서보(Visual servo)

영상은 인간의 시각을 흉내 내고 환경의 비접촉 측정을 가능하게 하기 때문에 로봇 센서로써 유용하다. 일반적으로 영상 인지와 제어는 “보고”, “움직이는” 개 루프 형태로 볼 수 있다. 또한, 작업의 정밀도는 영상 센서의 정밀도와 엔드 이펙터 제어의 정밀도에 직접적으로 의존한다. 이러한 서브 시스템의 정밀도를 높이기 위한 대안으로 영상-피드백 제어 루프를 사용함으로써 시스템의 전체적인 정밀도를 높일 수 있을 것이다. 결과적으로 기계 시각은 로봇의 엔드 이펙터 제어를 위해 페루프 위치 제어를 제공 할 수 있으며 이를 비주얼 서보라고 한다.

비주얼 서보 시스템은 일반적으로 두 가지의 카메라 설정을 사용한다. 첫 번째는 엔드 이펙터에 장착된 형태이고 다른 하나는 작업 현장에 고정된 형태이다. 먼저 첫 번째는 종종 eye-in-hand 라고 불리우며 로봇의 엔드 이펙터에 달린 형태를 갖는다. 이는 카메라와 엔드 이펙터의 자세간에 이미 알고 있고 종종 고정되어있는 관계를 갖는다. 이때 엔드 이펙터와 카메라의 자세 관계를 ${}^c x_c$ 라고하며 대상과 카메라간의 자세 관계를 ${}^c x_t$ 라고 한다. 두 번째로 카메라가 현장에 고정되어 있는 경우에는 카메라는 로봇의 기본 좌표계와의 ${}^0 x_c$ 의 관계를 갖고 대상체와 ${}^c x_t$ 의 관계를 갖는다. 대상의 카메라 영상은 로봇의 움직임과는 독립적이다. 어떠한 카메라 형태를 선택하든 카메라 캘리브레이션을 수행하여야 한다. 초점 거리, 화소 크기, 주점과 같은 내부 변수를 알아야만 비주얼 서보 작업을 수행 할 수 있다. 고정된 카메라의 자세 ${}^0 x_c$ 는 전역 좌표계와 고정 되어야 하며 카메라 캘리브레이션 과정을 통하여 외부 변수를 구하여야 한다. Eye-in-hand의 경우 상대적인 자세 ${}^c x_c$ 가 결정되어야 하며 이는 hand/eye 캘리브레이션 문제라고 한다.

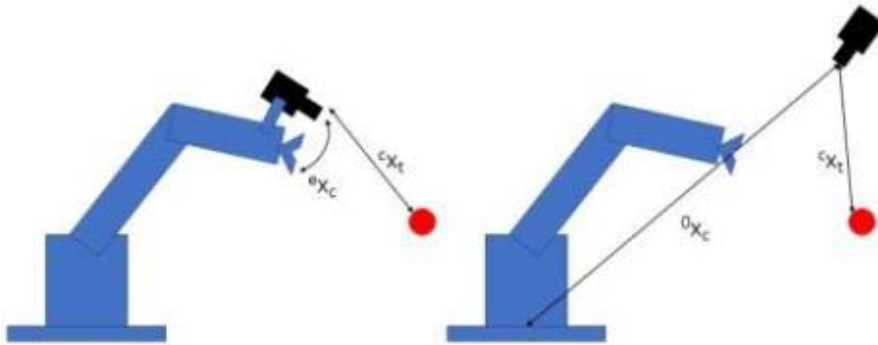


그림 947 Relevant coordinate frames for camera configurations.

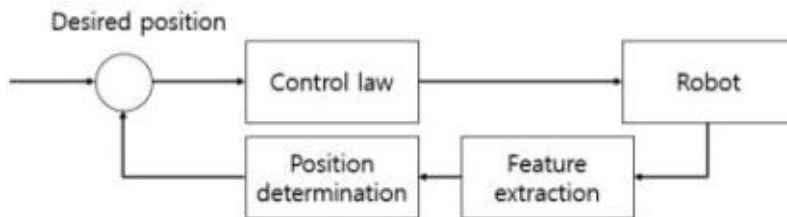


그림 948 Position based visual servo.

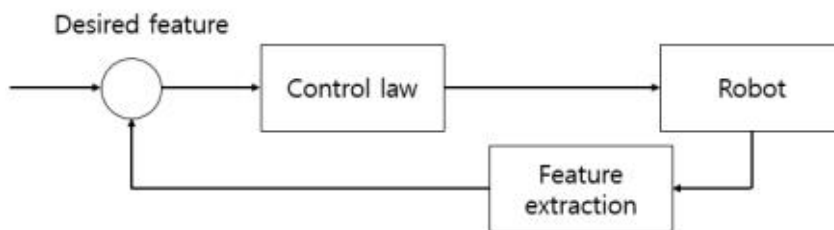


그림 949 Image based visual servo.

■ 영상 시스템

Version	Resolution	Imaging sensor	Operating temperature	Operating humidity
Color	1288×964 (30 FPS)	Sony ICX445, 1/3", 3.75 um	0~45°	20~80%

표 183 Vision camera specification.

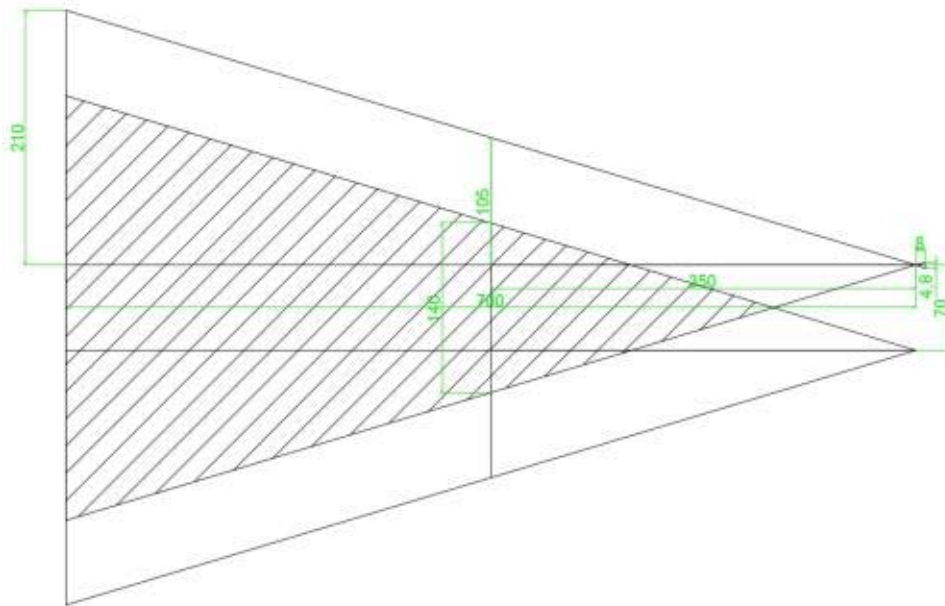


그림 950 Overlapped area of stereo vision system and FOV of 8mm lens according to WD.

선정된 카메라의 주요 사양은 표 183과 같다. 카메라에 사용된 렌즈는 8mm 렌즈로 선정하였다. 그림 950을 보면 8mm렌즈가 1/3" CCD 센서에 사용되었을 때 WD(Working Distance)에 따른 FOV(Field Of View)를 나타내고 있다. 본 연구에서 제작하고자 하는 수확 로봇은 시스템의 중심으로부터의 거리가 350~600mm인 영역에서의 작업을 목표로 하고 있으므로 해당 영역에서의 FOV가 작업에 적합한지 확인하고자 하였다. 또한, 스테레오 영상 시스템의 경우 해당 영역에서 중첩되는 영역이 중요한데 이를 확인하기 위하여 상기 그림과 같이 70mm 거리에 두 카메라가 존재 할 때 각 카메라의 FOV가 어떻게 존재하고 서로 중첩되는지 확인하였다.

	Fruit weight(g)	Fruit diameter(mm)	Fruit length(mm)	Peduncle diameter(mm)	Peduncle length(mm)
Cupra	170	75	95	13	77
Debla	215	86	100	16	74
Ferrari	210	79	101	16	74
Plenty	185	80	90	13	74
Mirage	180	80	85	13	71
Special	190	76	80	13	74
Veyron	210	78	100	16	72
Nagano	185	80	90	13	74
Maserati	200	81	95	14	73
Clarity	190	80	85	13	71
Derby	205	90	100	13	65
Boogie	195	84	90	13	70
President	195	83	87	14	69
Average	194.62	80.92	92.15	13.85	72.15
STDEV	12.63	3.89	6.62	1.23	2.90

표 184 Average appearance of domestic sweet-pepper.

350mm에서 140mm의 영역이 중첩되는데 김 등의 연구 및 엄 등의 연구, 강 등의 연구에 따르면 국내 파프리카의 외형 특성을 조사한 결과 과실의 직경은 최대 90mm, 평균 80.92 ± 1.08 mm로 해당 거리에서 파프리카의 중첩 영상을 얻기에 적합하였다.

영상 시스템은 두 부분으로 나눈다. 첫 번째 영상 시스템은 엔드 이펙터에 설치되어 엔드 이펙터의 움직임을 보정하는데 사용된다. 두 번째 영상 시스템은 스테레오 영상 시스템으로 엔드 이펙터의 중심과 스테레오 영상 시스템의 중심이 일치되는 위치에 설치하여 엔드 이펙터와 대상물 간의 거리를 측정하였다.

두 부분의 영상 시스템은 제작된 매니플레이터와 엔드 이펙터에 설치하기 위하여 그림 951를 참고하여 그림 952의 형태로 설계 하였다.

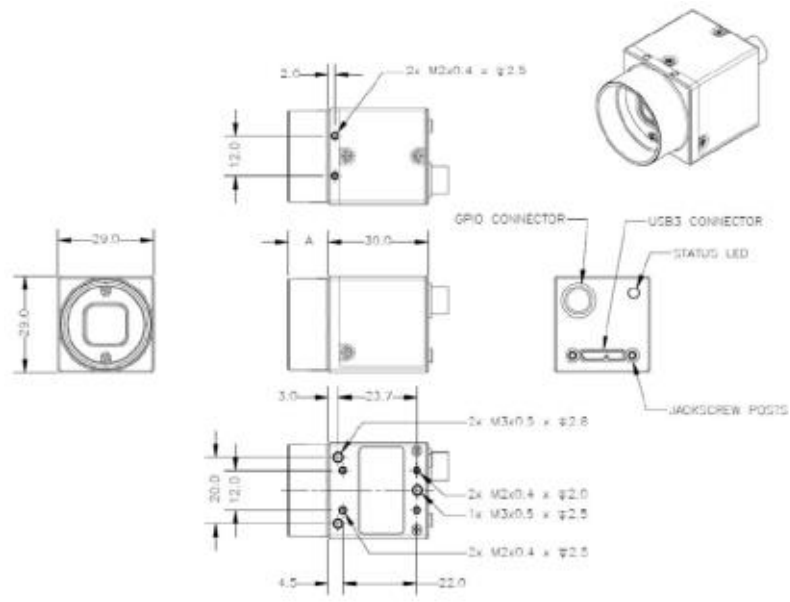


그림 951 Camera appearance.

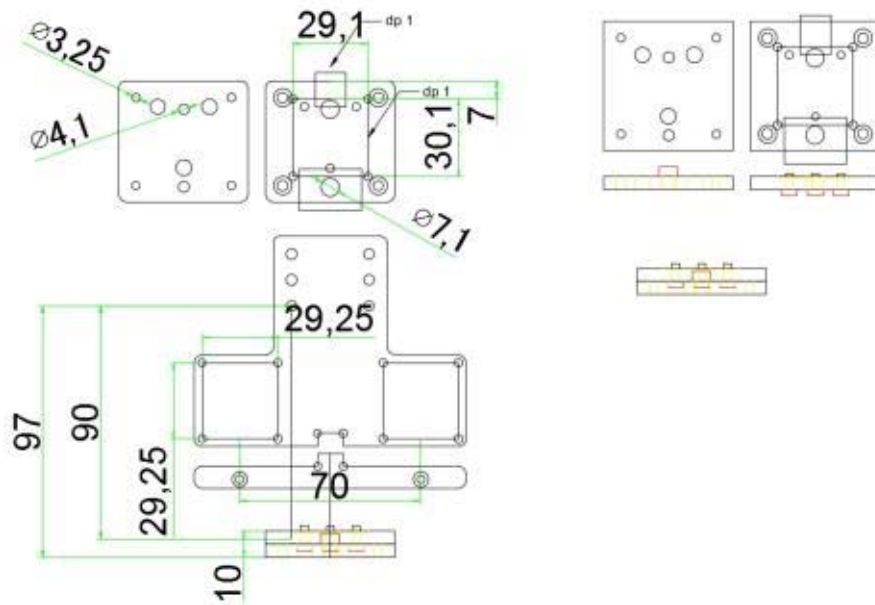


그림 952 A design of joint parts for vision system.

■ 매니플레이터 및 엔드 이펙터

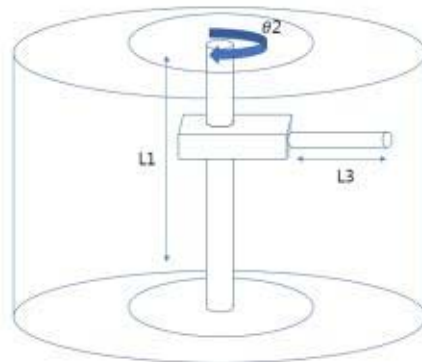


그림 953 Cylindrical robot.

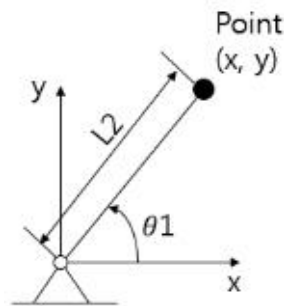


그림 954 Joint variables and link length.

그림 953과 같이 원통 형 로봇은 높이 $L1$, 각도 $\theta2$, 그리고 반경 $L3$ 에 의하여 제어된다(P joint, R joint, P joint). 로봇의 구동은 좁은 공간에서 효율적으로 작업이 가능하며 수평 방향의 접근이 용이하다. V. Kumar는 세 개의 독립적인 자유도를 갖고 있으며 수직, 수평 방향의 조인트는 서로 교차하며 수직 방향의 자유도를 무시한다면 회전과 수평 방향의 R-P 매니플레이터로 그림 954과 같이 나타낼 수 있다고 한다. 회전각도 $\theta1$ 은 수평 방향 x축으로부터 정의되며, $L2$ 는 회전 축으로부터 엔드 이펙터의 말단 점까지의 거리로 정의할 수 있다.

본 연구에서 사용된 매니플레이터는 회전, 수평, 수직의 3개의 축을 갖는 그림 955와 같은 좁은 공간에 적합한 원통 형 로봇(Cylindrical robot)의 형태이다.

작업 영역은 파프리카 재배 환경 특성을 분석하여 시스템의 중심으로부터의 거리 350~600mm, 수직 높이 1000mm로 설정하였다. 파프리카 온실 내 파프리카 식재 간격은 1000mm이며 레일의 간격은 500~600mm이다. 해당 조건에 맞추어 작업 영역을 설정 하였다. 일반적으로 파프리카는 3m 이상 성장하기 때문에 그 외의 영역은 매니플레이터의 제어가 아닌 주행부에 설치된 유압 실린더를 이용하여 작업 영역을 이동하도록 설계하였다.

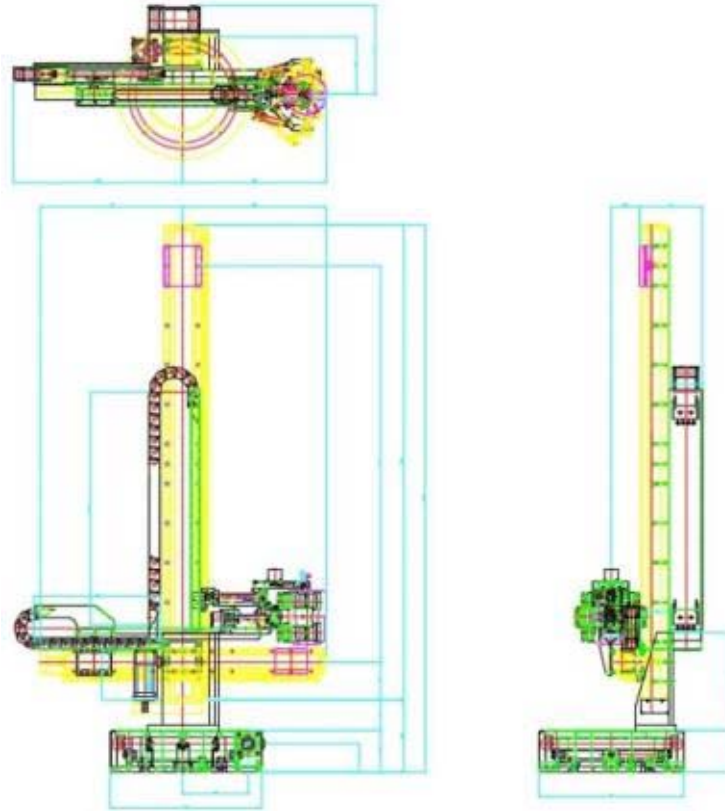


그림 955 Design of manipulator.

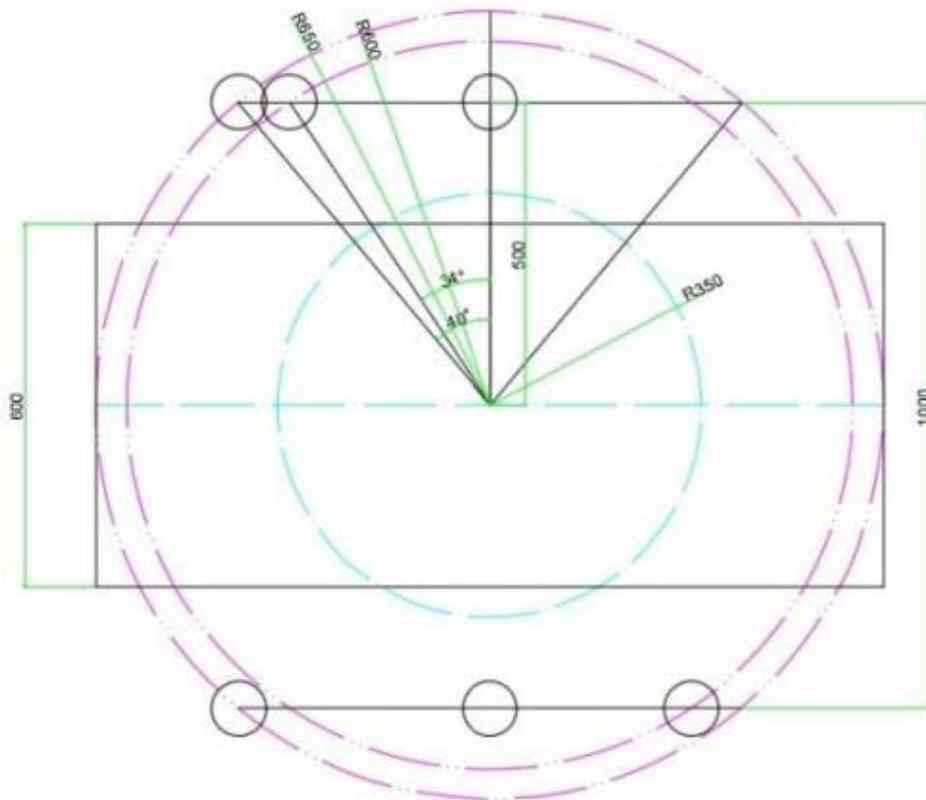


그림 956 Working area of end-effector(top view).

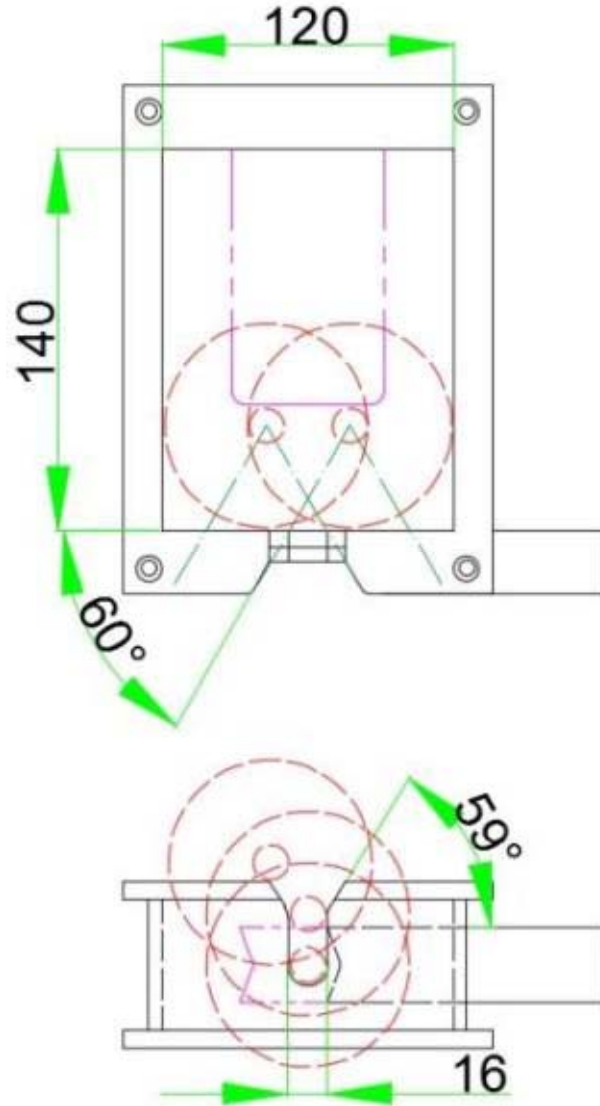


그림 957 Design of end-effector.

그림 957은 설계한 엔드 이펙터를 표현한 것이다. 엔드 이펙터의 경우 엔드 이펙터의 체적을 최소화 하기 위하여 모터 등 의 기타 부속품이 필요하지 않도록 하기 위해, 파지하는 동작을 수행 하지 않고 과실을 아래에서 받치는 형태로 설계하였다. 그 후 엔드 이펙터의 자세 제어를 통하여 과병이 절단부로 위치하도록 한 후 공압 실린더를 이용하여 칼날을 움직여 수확 하는 형태로 구상하였다. 이 때 절단부는 수직 방향으로만 절단 할 수 있도록 하여 파프리카의 주줄기를 자르는 것을 방지하였다.

엔드 이펙터는 파프리카의 크기를 감안하여 가로 길이는 파프리카 직경의 평균 80.92mm의 150%인 120mm로 설정하였고 세로 길이는 파프리카 길이의 평균 92.15mm의 150%인 140mm로 설정하였다. 또한 절단 부의 입구는 파프리카 과병의 직경의 평균이 13.85mm인 것을 고려하여 16mm로 설정하였는데 이는 절단 압력에 의하여 파프리카 과병이 이탈하는 것을 방지하기 위함이며 입구를 10mm로 상대적으로 좁게 한 후 스프링을 이용하여 탄력있게 제어되도록 하였다. 엔드 이펙터 전면부에 절단을 위한 공압 실린더를 설치하고 파프리카 줄기를 유도하기 위하여 약 35mm의 두께를 갖는 가이드를 설계하였다. 가이드는 60°의 각도를 갖도록 설계하였는데 이는 수확 시 파프리카의 줄기가 위치하도록 설계한 것이다.

$$\tan^{-1}\left(\frac{20}{12}\right) = 59.04 \text{ 수식 129}$$

또한, 수직 방향 가이드는 59°로 설계하였는데 이는 파프리카의 과병이 파프리카 과실의 중앙에 위치한다고 가정하였을 때 가이드 입구로부터 절단부까지 약 59°를 이루기 때문이다.

■ 제어 시스템

제어를 위하여 사용된 시스템은 Intel社의 i5-4690 CPU와 RAM 8GB로 구성하였고 MS社의 Windows 7 64bit OS를 사용하였다. 제어 시스템은 매니플레이터 모터 제어, 엔드 이펙터의 공압 실린더 제어로 나누어진다. 온실 내 환경 조건에 적합한 구동조건을 갖는 앰프를 선택하고자 하였다. 파프리카 온실의 경우 파프리카의 생육을 위하여 18~27°C의 온도를 유지해야하며, 상대 습도는 70~80%가 적정 상태였기 때문에 해당 환경에서 사용가능한 모델을 선정하고자 하였다. 각 앰프는 제공되는 x4 커넥터를 사용하여 PCI 슬롯을 사용하는 모터 컨트롤러와 연결되어 최종적으로 PC와 연결하여 제어 하도록 구성 하였다. 모터 컨트롤러는 최대 4축 제어가 가능한 것을 선택하였다. 해당 컨트롤러는 MS社의 Visual studio MFC 기반의 프로그램을 이용하여 제어하였다.

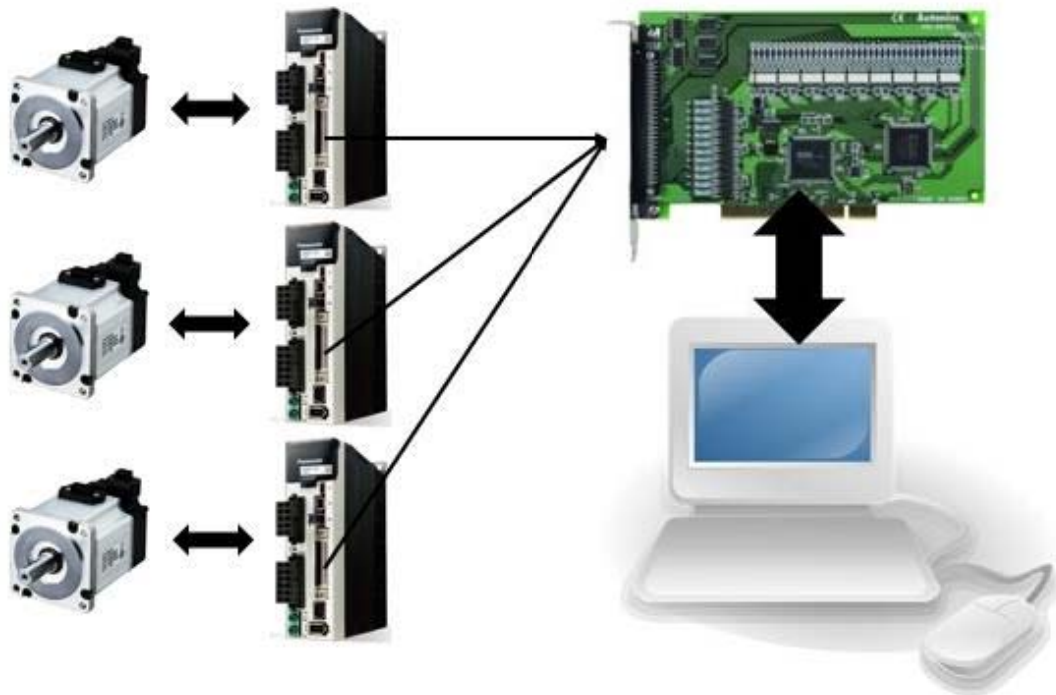


그림 958 Connection between motors and computer.

매니퓰레이터는 수직, 수평 방향의 운송을 가능하도록 두 종류의 리니어 액츄에이터를 사용하였다. 먼저, 수직 방향의 운송을 담당하는 리니어 액츄에이터의 경우 스트로크는 1000mm, 볼나사의 리드 10mm, 수직방향 최대 하중 18kgf, 최대 운송 속도 500mm/s, 반복 이송 정밀도 0.005mm이며, 수평 방향의 경우 스트로크는 500mm, 최대 하중은 25kgf 그 외에는 수직 방향과 같은 사양의 제품을 사용하였다. 재질은 고온 다습한 온실 환경에서 작업하는 특성상 내부식성이 우수한 알루미늄 재질을 이용하여 차폐된 형태로 제작하였다.



그림 959 Rotation axis of manipulator.



그림 960 Horizontal axis of manipulator.



그림 961 Vertical axis of manipulator.

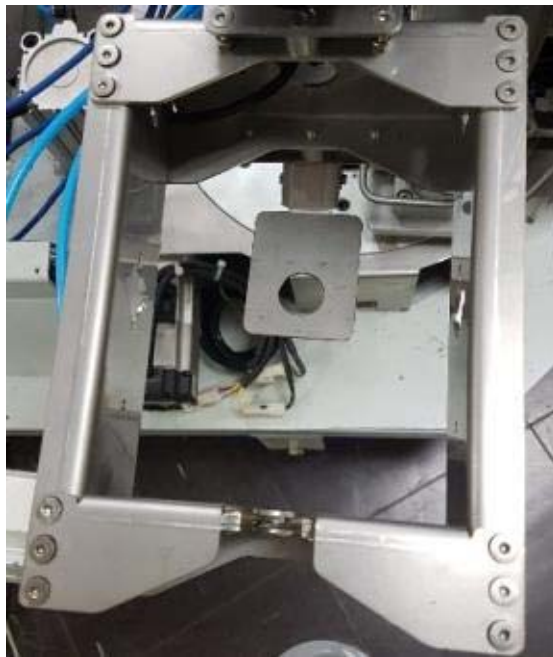


그림 962 End-effector(top).

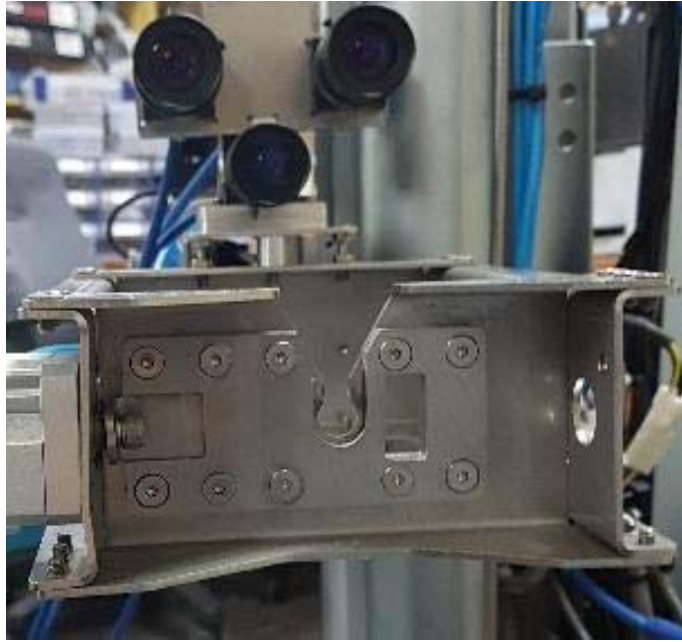


그림 963 End-effector(front) with vision system.



그림 964 An image of control board.

엔드 이펙터 하단에는 파프리카 수확 후 운송 시 까지 받침이 되어 줄 부분을 설치하였고 이를 개폐하기 위하여 공압 실린더를 추가 하였다.

매니플레이터의 모터를 제어하기 위하여 모터 앰프 Panasonic minas a5를 사용하였다. 매니플레이터에 사용된 모터와 같은 제작사의 앰프이며, 해당 모델의 작동 가능 온도 및 습도를 확인 한 결과 파프리카 재배 환경 조건에서 동작 가능하였기 때문에 선정하였다. 그림 964는 전체 수확시스템의 구동제어를 위하여 각 제어부가 연결된 모습이다.

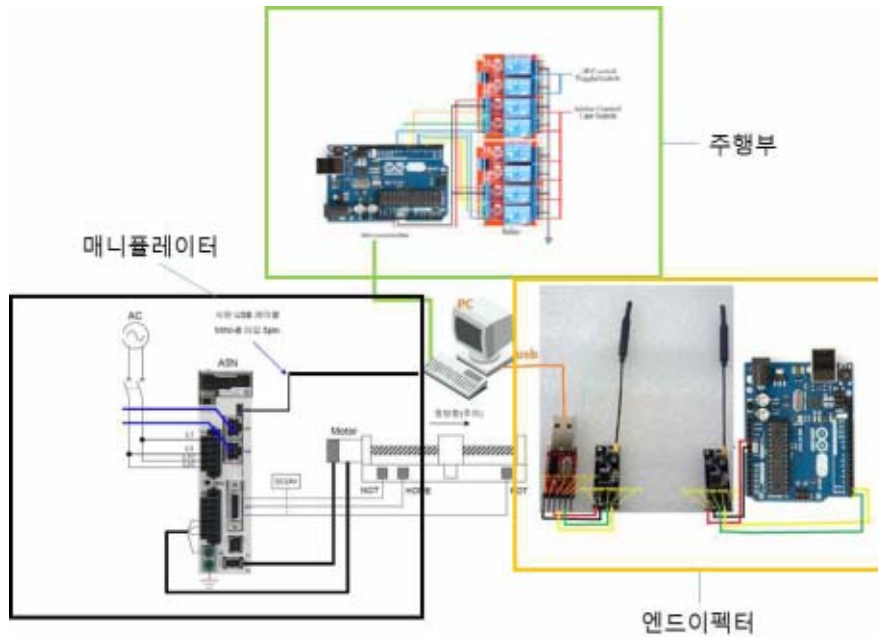


그림 965 PC를 중심으로 한 전체 수확시스템의 구동제어

전체 수확시스템은 파프리카를 인식하고 파프리카와의 거리를 측정하는 영상처리 시스템인 PC에서 주행부 그리고 엔드이펙터와 매니플레이터의 절단작업시스템을 총괄하여 구동제어한다. 상기 그림과 같이 PC를 중심 한 전체 수확시스템의 구동제어시스템을 구성하였다.

- 전체 시스템 제어 실험

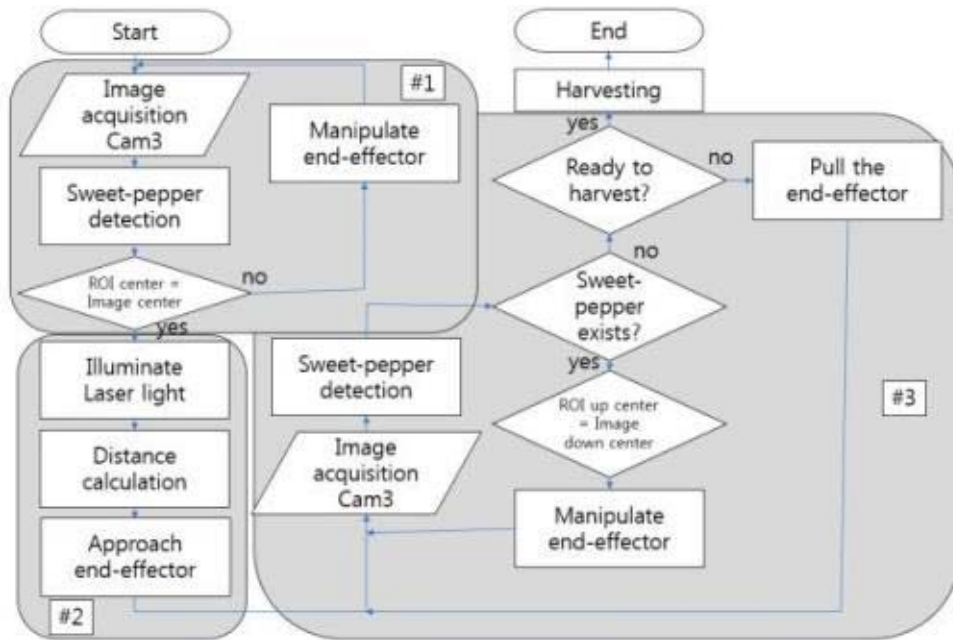


그림 966 Flow chart of harvesting algorithm.

파프리카 수확 과정은 상기 그림과 같이 설계하였다. 비주얼 서보 형태의 수확 알고리즘을 구현하고자 엔드 이펙터에 설치된 카메라를 통하여 먼저 파프리카의 중심을 추출한 후 엔드 이펙터가 해당 파프리카와 일치되도록 제어한 후, 특징점 추출 및 스테레오 정합을 통하여 거리를 측정했다. 3차원 좌표가 획득되면 해당 정보를 바탕으로 엔드 이펙터가 파프리카에 접근한 후, 파프리카의 위치를 영상으로 확인하면서 엔드 이펙터를 제어한다. 파프리카의 과병 부위가 엔드 이펙터의 절단부로 접근 할 수 있도록 영상을 확인하며 해당 과정을 반복한다.

파프리카의 ROI가 추출되면 해당 ROI의 중심이 카메라의 중심에 오도록 매니플레이터를 회전하며 카메라의 중심과 ROI의 하단이 일치 되도록 y축 매니플레이터를 제어한다. 이러한 과정을 거치는 이유는 스테레오 정합 시 두 카메라 모두 해당 파프리카 정보를 획득 할 수 있게 하며, 레이저 광원 또한 조사할 수 있게 하였다. 카메라의 중심과 파프리카의 중심이 일치하도록 제어되는지 확인하기 위하여 실험을 수행하고 결과를 확인하였다. 결과는 매니플레이터의 제어를 위한 펄스의 단위와 회전 축 매니플레이터의 회전 각, 수직 축 매니플레이터의 이동 거리를 측정하여 분석하였다.

두 번째 단계는 조사된 레이저 광원을 추출하고 해당 점의 정합을 수행한 후 거리를 측정하는 과정이다. 파프리카 영역 내에 존재하는 녹색 레이저를 추출하고 해당 레이저의 원형도를 판별한다. 원형인 경우 원의 중심을 추출하고 해당 원의 중심을 기준으로 정합을 수행한다. 정합 시 에피플라 기하학을 이용하여 정합을 수행하며 정합된 점들의 디스패리티를 구한 후 z-score를 계산하여 Outlier를 구분해 낸다. 구해진 디스패리티와 캘리브레이션 결과를 이용하여 거리를 측정한 후 수평 방향 매니플레이터를 이동하여 엔드 이펙터가 파프리카의 하단에 위치하도록 한다. 해당 과정의 수행 결과를 확인하기 위하여 거리 센서를 이용하여 측정된 거리와 알고리즘을 통하여 계산된 거리를 비교하였다.

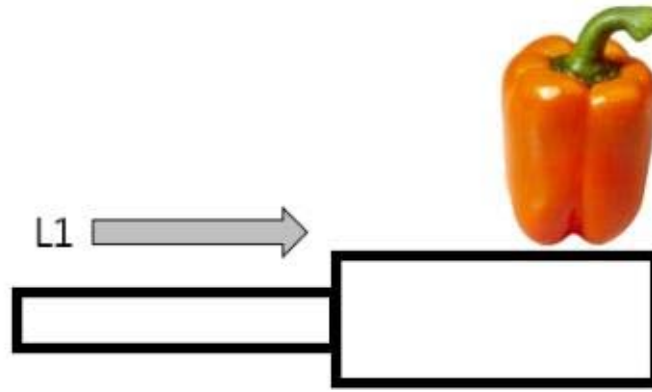


그림 967 Approaching sequence.

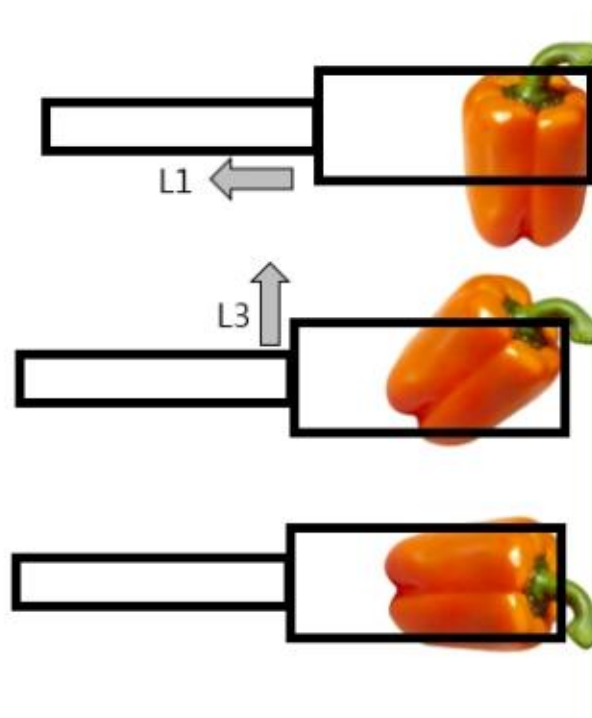


그림 968 Sweet-pepper pose control using L1, L3 variables.

수확의 마지막 단계는 엔드 이펙터에 설치된 카메라를 이용하여 파프리카의 자세에 따라 엔드 이펙터의 위치를 제어하는 과정이다. 엔드 이펙터가 파프리카와 중심을 일치 시키면서 파프리카의 영상이 카메라에 나타나지 않을 때까지 수직 축을 상승 시킨다. 해당 과정을 통하여 파프리카의 과병 부위가 엔드 이펙터의 절단 부와 높이를 일치 시킬 수 있다. 그 후 영상에 파프리카가 나타나지 않을 경우 수평 축을 당겨 엔드 이펙터가 파프리카를 당기도록 한다. 같이 파프리카의 과병은 주줄기 또는 가지에 고정되어 있기 때문에 수평 방향으로 이동시키면 과병을 중심으로 회전한다. 해당 과정에서 파프리카가 회전하는 만큼 수직 방향으로 엔드 이펙터를 이동하면 절단부에 과병을 위치시킬 수 있다. 이 때, 회전축을 이용하여 과병을 엔드 이펙터의 중심에 유지시키는 것이 필요하다.

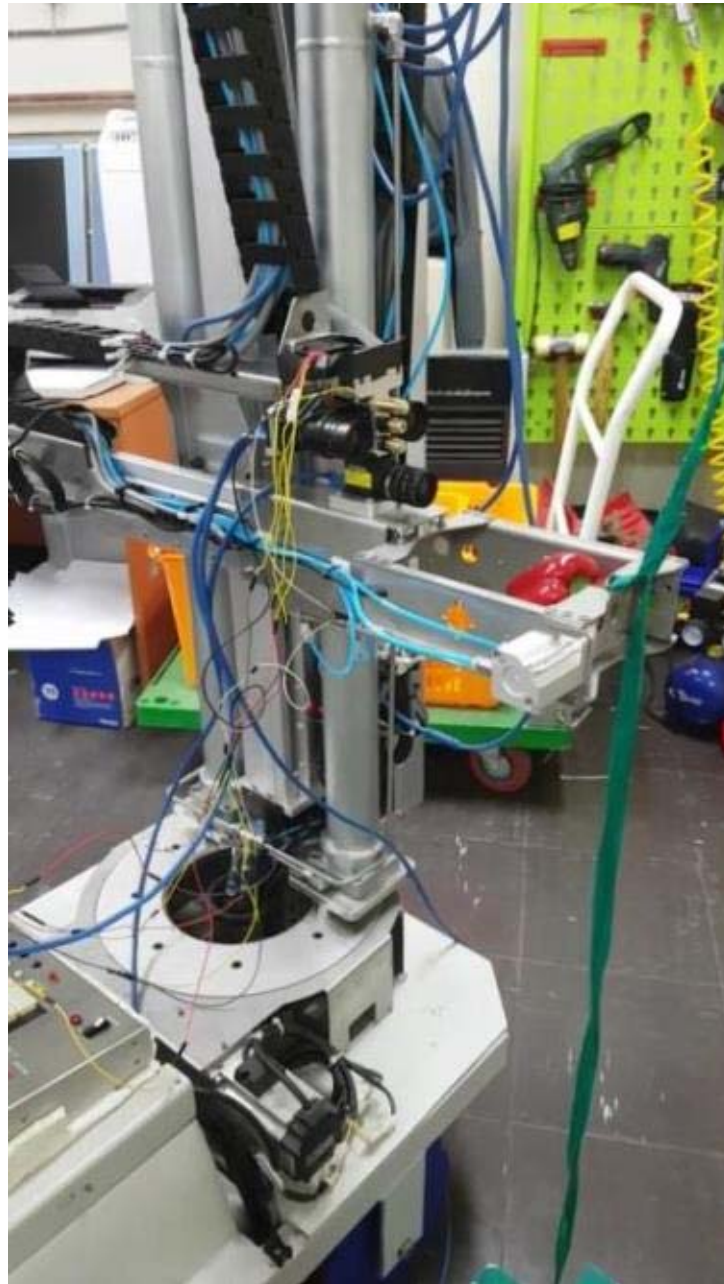


그림 969 Indoor experiment.

비주얼 서보 제어를 위한 제어 변수 설정 실험을 위하여 파프리카 모형을 이용하여 유사 환경을 구성하였다.

실험을 통하여 수확 알고리즘 단계별로 제어 변수들을 결정하였다. 단계 별로 파프리카의 위치 변화에 따른 영상 내 위치 변화, 매니플레이터의 위치 설정 간의 관계를 실험을 통하여 규명하고 적절한 제어 변수를 설정하고자 하였다.

1단계는 엔드 이펙터에 설치된 카메라의 중심과 파프리카 하단의 중심이 일치하도록 하였다. 해당 과정을 통하여 2단계에서 거리를 측정 한 후 엔드 이펙터가 파프리카의 하단으로 접근 할 수 있도록 하기 위하여서다. 해당 과정을 수행하기 위하여 매니플레이터의 회전 제어 변수 θ_2 와 수직 제어 변수 L_3 을 영상에 나타나는 좌표에 따라 설정하였다.

3단계는 엔드 이펙터가 파프리카의 하단에 위치한 상태로 시작한다. 수확 작업을 수행하기 전 파프리카의 중심을 엔드 이펙터의 중심과 유지하며 그림 971의 형태가 되도록 제어 하고자 하였다.

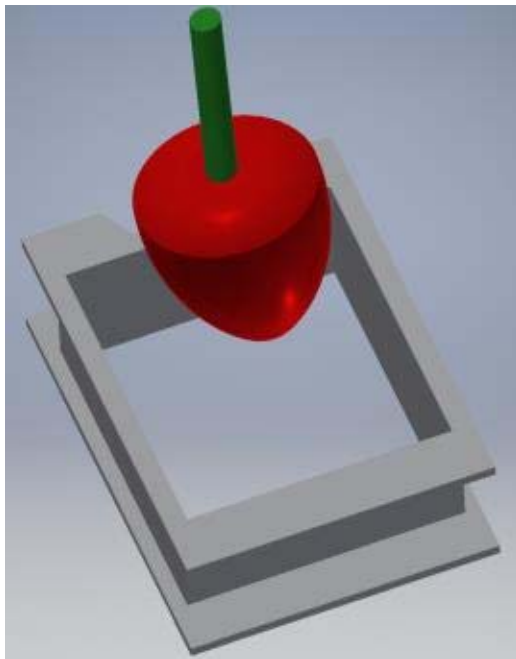


그림 970 Sweet-pepper's starting position at third stage of harvesting.

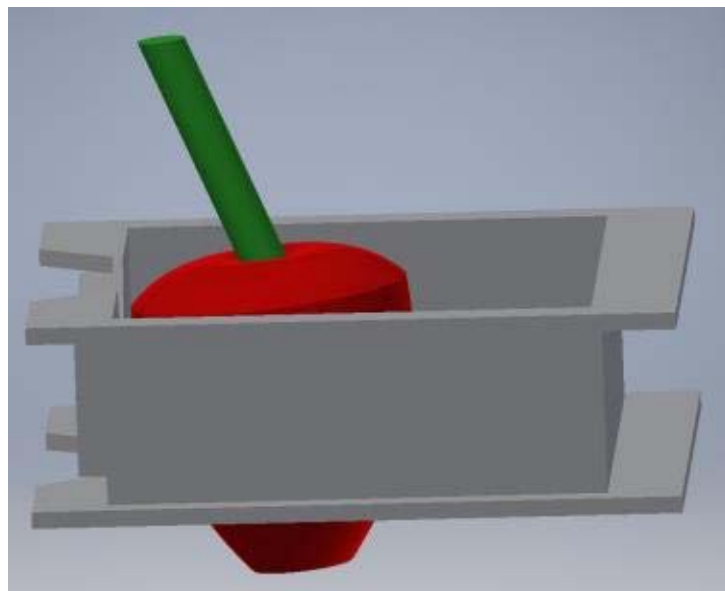


그림 971 Sweet-pepper's position at third stage of harvesting(1).

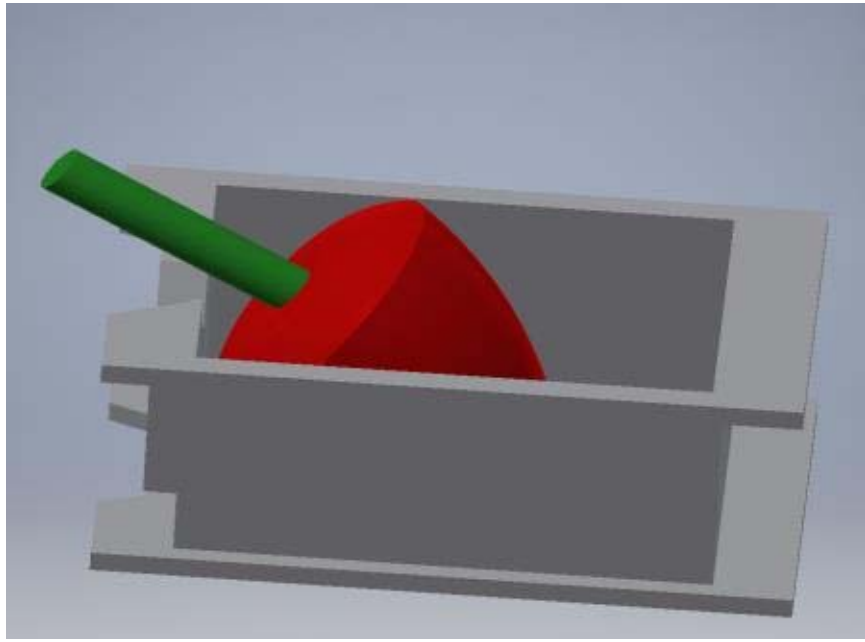


그림 972 Sweet-pepper's position at third stage of harvesting(2).

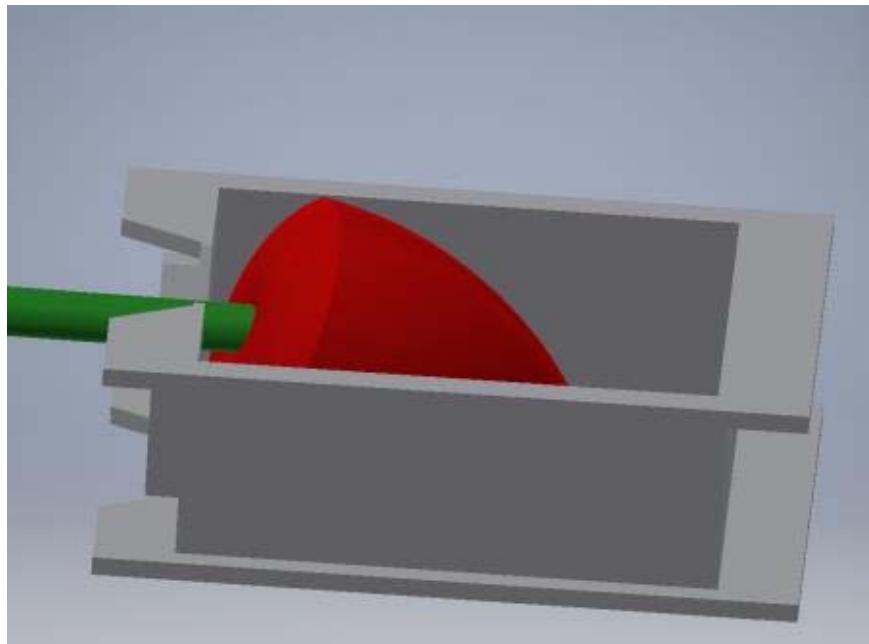


그림 973 Sweet-pepper's position at third stage of harvesting(3).

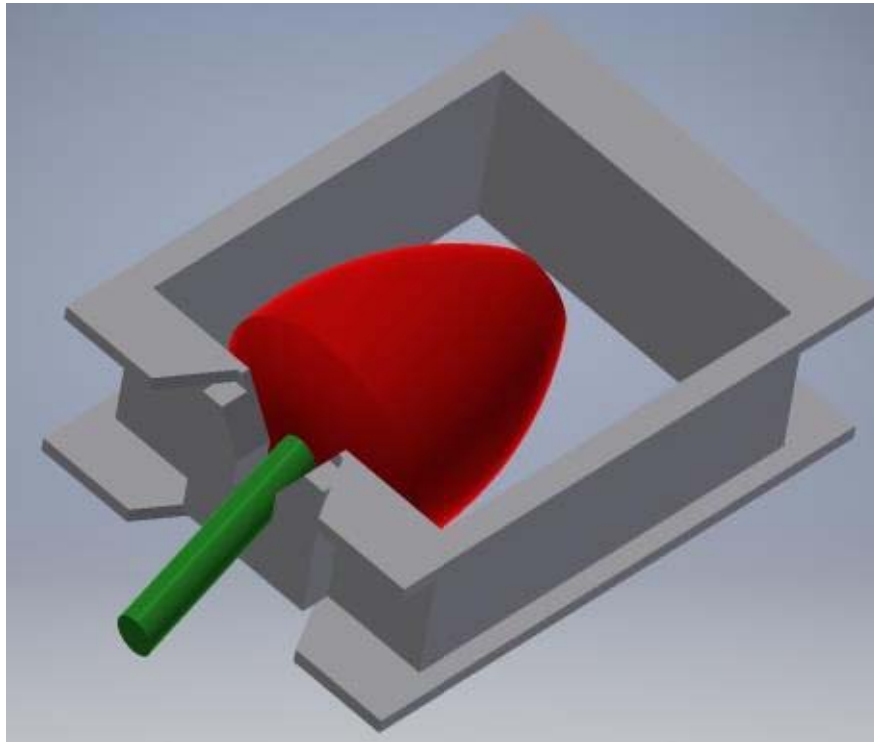


그림 974 Sweet-pepper's last position at third stage of harvesting.

그림 972, 973는 매니플레이터의 수평 제어 변수 L2를 이용하여 엔드 이펙터를 시스템 방향으로 이동하였을 때 파프리카는 줄기와 과병의 연결부를 중심으로 회전하게 되는 것을 표현하였다. 해당 과정에서 파프리카의 중심을 엔드 이펙터의 중심과 유지하기 위하여 매니플레이터의 회전 제어 변수 θ_2 를 설정하였다.

최종적인 엔드 이펙터와 파프리카의 자세는 그림 974과 같다. 영상으로부터 파프리카의 위치를 인식하고 위치에 따라 매니플레이터를 제어하기 위하여 L1, θ_2 , L3의 제어 펄스의 크기를 설정하여 제어 변수 설정을 수행하였다.

비주얼 서보를 이용한 수확 알고리즘을 구현하기 위하여 수확 단계 별 영상에 나타나는 대상체의 위치와 자세에 따른 매니플레이터 제어 변수를 설정하고자 하였다. 비주얼 서보 제어가 필요한 수확 단계는 1단계와 3단계로 1단계에서는 파프리카의 위치를 기반으로 엔드 이펙터를 파프리카의 하단부로 접근하기 위한 준비 단계이다. 해당 단계에서는 파프리카의 하단의 중심을 엔드 이펙터의 카메라의 중심과 일치시키는 과정을 수행한다.

1단계에서는 영상에 나타나는 파프리카의 영역을 추출하고 해당 영역의 하단부의 중심을 검출한 후 카메라의 중심과의 거리를 x, y축 방향으로 계산한다. 그림 975는 영상에서 검출된 파프리카의 ROI와 해당 영역의 하단 중심의 위치와 카메라의 중심의 차이를 표시한 것이다. 영상의 x, y 방향 차이를 구한 후 x 방향 차이로부터 회전 제어 변수 θ_2 를 설정하고, y 방향 차이로부터 수직 제어 변수 L3을 설정하였다. 350mm에서 600mm에 존재하는 파프리카 영상으로부터 추출된 파프리카 중심을 카메라의 중심에 일치 시키는 실험을 수행하고 x, y 방향으로 매니플레이터를 제어하기 위하여 필요한 제어 변수를 설정하였다. 회전축은 $2.4^\circ/10000\text{pulse}$ 의 비율로 회전하며 수직, 수평축은 $10\text{mm}/10000\text{pulse}$ 의 비율로 제어되도록 제작되었다.

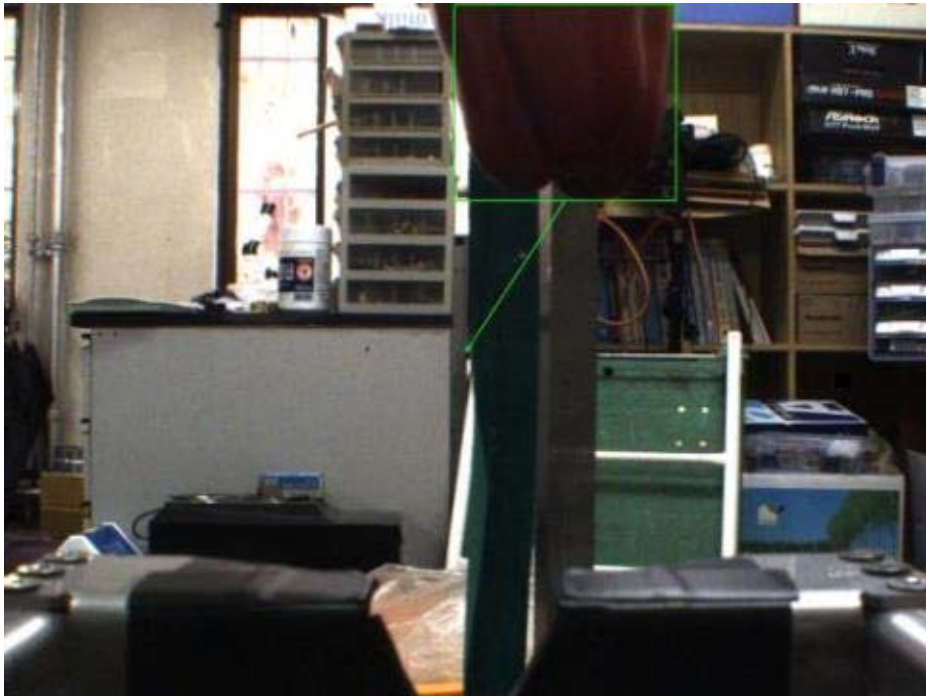


그림 975 Detected sweet-pepper's ROI and camera center.

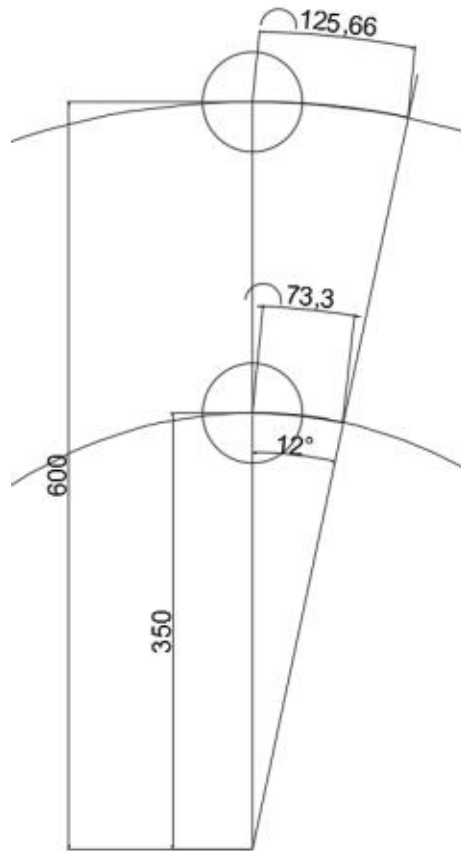


그림 976 Correlation between distance and rotation.

Change	350 mm	600 mm
12°	73.300 mm	125.660 mm
	0.164 °/mm	0.095 °/mm
30mm	342 pixel	127 pixel
	0.088 mm/pixel	0.236 mm/pixel
	0.014 °/pixel	0.023 °/pixel

표 185 Correlation between each unit.

그림 976은 작업 공간 350mm와 600mm에서 θ_2 가 12°일 때 거리의 변화량을 나타낸 것이다. 표 185은 350mm와 600mm에서 30mm의 길이가 영상에 몇 화소로 나타내는지를 구하고 각도 변화에 따른 영상 화소 위치의 변화를 계산한 것이다. 350mm에서는 1 화소 변화 시 0.014°만큼 θ_2 를 제어해야 하며, 600mm에서는 1화소 변화 시 0.023°만큼 θ_2 를 제어해야 한다. 하지만 거리 정보를 사용할 수 없기 때문에 평균인 0.018°만큼 제어하였다.

$$\begin{aligned} 2.4^\circ / 10000 P &= 0.00024^\circ / P && \text{수식 130} \\ 0.018^\circ &= 75 P \end{aligned}$$

P는 θ_2 제어를 위한 펄스(Pulse)를 의미한다. 즉, 영상에 나타나는 x 축 방향 화소 당 75 펄스를 θ_2 제어를 위하여 사용한다. 화면의 중앙에 가까워질수록 정밀한 자세 제어를 하기 위하여 x 축 방향 화소 차이가 15화소 이하일 경우 정밀하게 θ_2 를 제어하기 위하여 50펄스를 사용하였다. 또한, 카메라의 중심에서 10화소 이내의 경우 중심에 위치하는 것으로 설정하였다.

y 축 제어는 표 185의 화소와 거리의 상관관계에서 350mm에서 1화소 변화 시 0.088mm, 600mm에서 0.236mm의 변화를 확인 하였다. x 축 제어와 마찬가지로 평균값을 이용하여 화소 당 0.16mm를 L3 제어를 위하여 사용하였다.

$$\begin{aligned} 10mm / 10000 P &= 0.001mm / P && \text{수식 131} \\ 0.16mm &= 160 P \end{aligned}$$

상기 식에 따라서 y축 화소 당 160 펄스를 L3 제어 변수로 사용하였다.

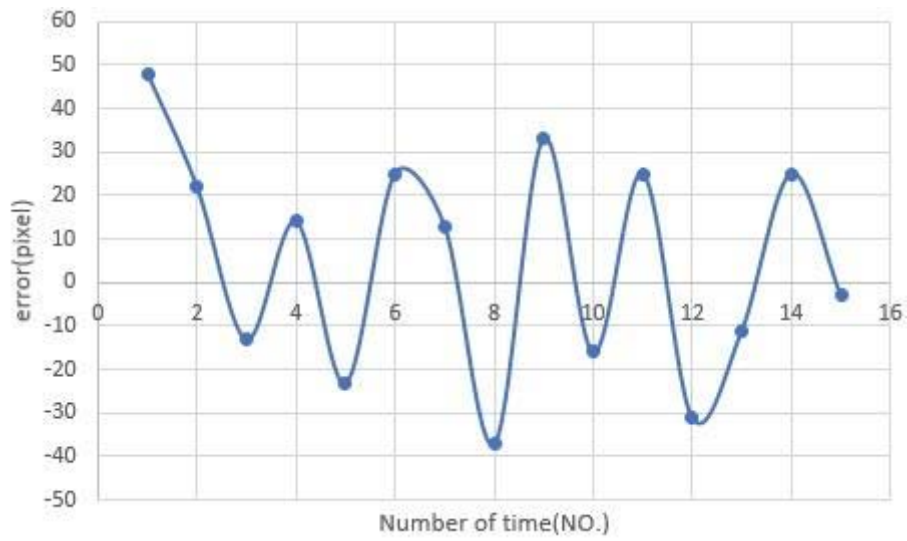


그림 977 Graph of y axis control error.



그림 978 Sweet-pepper on camera center.

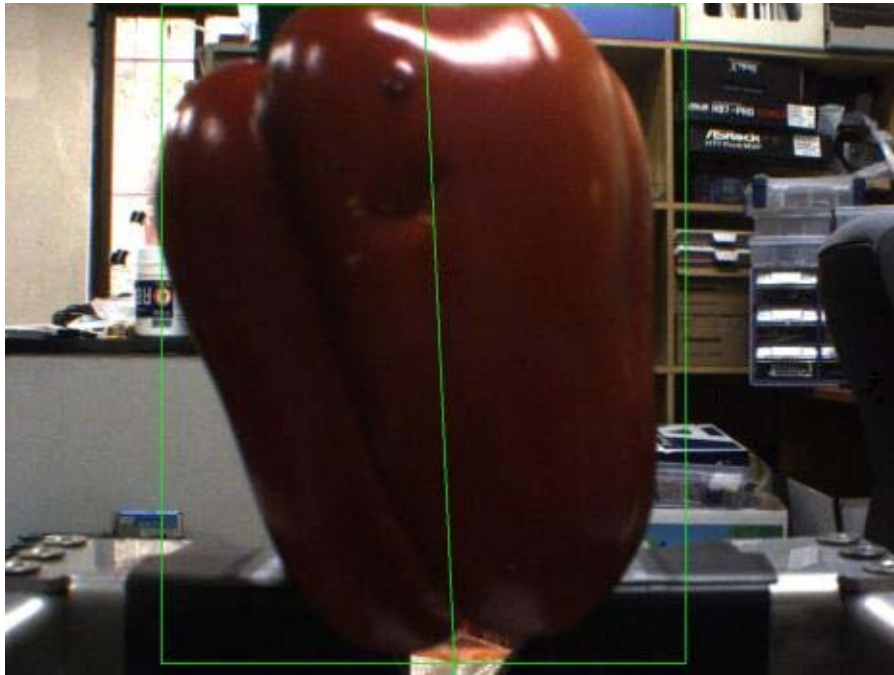


그림 979 Detected sweet-pepper's ROI and distance.

	at 90mm	at 110mm	at 130mm	at 150mm
1	127	109	101	102
2	126	108	105	98
3	143	109	104	102
4	128	107	101	100
5	134	104	106	100
6	108	106	102	98
7	123	105	101	97
8	125	104	98	94
9	130	107	103	99
10	128	105	102	101
average	127.2	106.4	102.3	99.1

표 186 Variation of coordinate. (Unit : pixel)

그림 977은 설정된 제어 변수를 이용하여 제어 실험을 수행한 결과 중 오차가 수렴하는데 많은 시도가 필요했던 경우를 나타낸 것이다. 세로축은 화소 단위의 오차를 나타내고 가로축은 제어 횟수를 의미한다. 그래프에서 ± 30 pixel을 기준으로 0에 수렴하지 않고 발산하는 것을 확인하였다. 따라서 y 축 방향 화소가 30화소 이내의 경우 화소 당 100펄스를 이용하여 제어 하였다.

그림 978는 수확 1단계가 완료 된 후 엔드 이펙터에 설치된 카메라의 중심과 파프리카의 하단의 중심이 일치된 상태를 보여준다. 이 후, 2단계 과정을 거쳐 거리를 측정하고 파프리카 하부로 엔드 이펙터를 접근 시킨다.

그림 979은 수확 과정 3단계에서 엔드 이펙터의 상단에 위치한 파프리카를 인식하고 추출된 ROI의 상단 중심이 영상의 하단 중심인 엔드 이펙터의 절단 부위로 이동하는 과정을 나타내고 있다. 3단계 수확 과정은 엔드 이펙터 상에 설치된 카메라로부터 90~150mm 내에 존재하는 파프리카를 대상으로 하기 때문에 해당 범위에서 픽셀 당 거리 변화를 측정하였다.

표 186는 90, 110, 130, 150mm 거리에서 엔드 이펙터 카메라를 이용하여 공간 좌표 10mm 변화 시 영상 좌표의 변화를 기록한 것이다. 위의 결과에서 90mm 거리에서 측정한 결과가 다른 거리에 비해 차이가 큰 것을 확인 할 수 있었다. 이는 가까운 거리에서 촬영한 영상의 왜곡에 의한 것으로 판단된다. 따라서 10mm/100pixel을 기준으로 3단계에서 수직 축 제어를 위한 L3은 화소 당 100pulse로 설정하였다. 또한 해당 결과를 각도로 변환하여 계산하려면 매니플레이터 L1 변수의 값이 필요하다.

$$\alpha = 2 \tan^{-1}\left(\frac{1}{L1 + 230}\right) \text{ 수식 132}$$

$$\theta_2 = \alpha^\circ / \frac{0.24^\circ}{1000 \text{ Pulse}} \text{ 수식 133}$$

식 (132)에서 L1 변수를 이용하여 X 좌표 1mm 변화에 따른 각도 α 를 구한다. 구해진 각도는 $0.24^\circ/1000\text{pulse}$ 비율에 맞춰 θ_2 의 제어 펄스를 계산하였다(식 (133)).



그림 980 Third stage of visual servo control.



그림 981 Rotated sweet-pepper.

그림 980는 3단계 과정 중 파프리카의 과병이 있는 영역까지 엔드 이펙터를 상승 시킨 상태의 영상이다. 파프리카의 중심을 절단부가 위치한 엔드 이펙터의 중심과 일치 시키며 상승한 결과이다. 이 후 엔드 이펙터의 L1 변수를 줄여 파프리카가 과병과 줄기의 연결부를 중심으로 회전하도록 한다.

그림 981는 L1을 줄임으로 인하여 파프리카가 당겨지며 회전한 상태의 영상이다. 그림 980에 비하여 ROI의 y축 좌표가 변화한 것을 확인 할 수 있다. 따라서 수직 축 L3가 변화하여 엔드 이펙터는 위로 상승하며 과병을 절단부로 밀어 넣는다. 해당 과정을 L1과 L3이 파프리카가 회전하기 시작하는 지점에서 100mm(과병의 길이 + α)를 제한으로 하여 반복 수행한다.



그림 982 Test of sweet-pepper's position controlling using image(1).



그림 983 Test of sweet-pepper's position controlling using image(2).



그림 984 Test of sweet-pepper's position controlling using image(3).

제어 변수 설정 후 매니플레이터의 각 축을 이용하여 영상에 나타나는 파프리카의 위치를 제어하는 실험을 수행하였다(그림 982 ~984). 해당 실험을 통하여 설정된 제어변수를 이용하여 파프리카의 위치를 통한 비주얼 서보 제어가 가능한지 확인하였다.

NO.	error x(pixel)	error y(pixel)	number of time
1	0	5	3
2	-1	7	4
3	-1	0	4
4	-6	10	3
5	-10	5	3
6	9	4	3
7	-2	7	3
8	1	-3	8
9	3	1	3
10	6	3	5
11	-2	-5	3
12	-5	5	3
13	-5	2	4
14	3	-9	6
15	-3	9	6
16	4	2	7
17	-9	1	5
18	-2	7	3
19	2	3	3
20	9	1	4
Average	-0.45	2.75	4.15

표 187 Test results of sweet-pepper's position controlling using image.

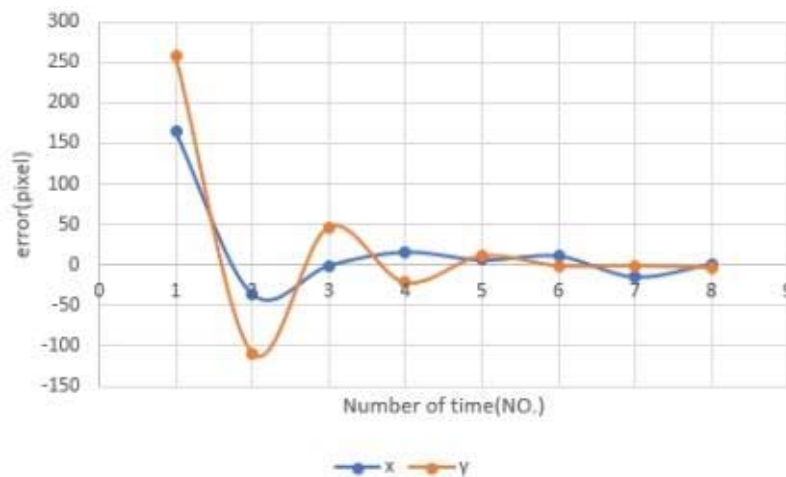


그림 985 Graph of control error.

표 187은 실험 결과를 표로 나타낸 것이다. 20회의 실험을 통하여 x, y축 오차와 매회 제어가 수행된 횟수를 표시하였다. 파프리카의 위치를 영상으로부터 인식하여 엔드 이펙터를 목표 지점으로 이동하는데 평균 4.15회의 제어 과정이 필요하였다.

그림 985는 실험 결과 중 제어 과정이 8번으로 가장 많은 실험의 오차 변화를 나타낸 것이다. 5회 차 제어부터 오차가 10화소와 근사하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 파프리카 ROI 추출에서 발생한 오차에 의하여 수렴하지 못한 것으로 분석되었다.

제어 오차는 평균 x축 방향 -0.45pixel, y축 방향 2.75pixel로 나타났다. 2.75pixel은 거리 600mm에서 0.65mm로 비주얼 서보 제어에 문제가 없을 것으로 판단하였다.

수확 알고리즘은 3단계로 구분하여 구현 하였다. 각 단계를 수행한 후 결과를 분석하였다.

NO.	Sweet-pepper's position (°)	End-effector's position (°)	Error (°)	Error (mm)
1	-7.20	-8.40	1.20	11.31
2	-14.40	-14.64	0.24	2.22
3	0.00	-0.72	0.72	6.91
4	21.60	20.64	0.96	7.20
5	0.00	0.72	0.72	6.03
6	7.20	6.84	0.36	3.17
7	10.08	11.16	1.08	6.78
8	12.24	11.52	0.72	5.65
9	24.48	23.88	0.60	5.23
10	-10.08	-9.60	0.48	4.35
11	0.00	-0.96	0.96	8.21
12	2.88	2.28	0.60	5.34
13	12.96	11.88	1.08	7.35
14	-10.80	-11.76	0.96	6.78
15	-7.92	-8.64	0.72	5.95
16	15.84	15.24	0.60	5.34
17	1.44	0.96	0.48	3.52
18	6.48	5.52	0.96	7.37
19	-5.04	-5.88	0.84	7.55
20	4.32	3.24	1.08	8.10
average			0.768	6.22

표 188 Field experiment results of sweet-pepper's position extraction algorithm (rotation axis).

표 188는 회전축을 이용하여 엔드 이펙터의 위치를 수확 대상 파프리카의 중심으로 이동하는 알고리즘을 구현하고 수행한 결과를 나타낸 것이다. 실제 좌표는 영상에 나타나는 파프리카를 확인하고 매니플레이터의 펄스를 500 단위로 입력하여 중심을 맞춘 후 거리를 이용하여 각도를 구하였다. 엔드 이펙터의 좌표는 알고리즘을 통해 이동한 후 측정된 펄스를 표시하였다. 오차는 최대 1.2°, 평균 0.77°도이며 각도를 거리에 따라 mm로 나타냈을 때 최대 11.3mm, 평균 6.22mm로 나타났다. x 방향 오차가 11.3mm인 경우 엔드 이펙터의 가로 길이가 120mm이고 파프리카의 직경이 평균 80.92mm이므로 수확 작업에 문제가 없었다.

NO.	Sweet-pepper's position (mm)	End-effector's position (mm)	Error (mm)
1	0.0	0.00	0
2	50.0	47.8	2.2
3	100.0	113.8	13.8
4	-84.5	-76.6	7.9
5	-50.0	-32.9	17.1
6	69.1	64.3	4.8
7	58.0	43.5	14.5
8	53.6	43.8	9.8
9	27.5	23.6	3.9
10	-19.0	-31.9	12.9
11	-55.0	-58.4	3.4
12	-51.0	-67.2	16.2
13	56.1	47.3	8.8
14	39.4	33.7	5.7
15	68.0	65.1	2.9
16	60.2	55.9	4.3
17	93.2	89.5	3.7
18	66.1	49.4	16.7
19	10.7	-19.0	12.6
20	30.8	27.9	2.9
		average	8.205

표 189 Field experiment results of sweet-pepper's position extraction algorithm (vertical axis).

표 189는 수직축 매니플레이터를 이용하여 엔드 이펙터의 위치를 수확 대상 파프리카의 하단부로 이동하는 알고리즘을 구현하고 수행한 결과이다. 최대 오차는 17.1mm였으며 평균 오차는 8.205mm로 나타났다. 최대 오차가 수평 방향에 비해 크게 나타나는 이유는 영상의 종횡비의 세로가 작아서 화소수가 상대적으로 적기 때문으로 판단된다. 수확 알고리즘의 1단계로 파프리카의 위치를 찾고 엔드 이펙터를 목표한 지점으로 이동 시키는 과정에서 수평 방향으로 최대 11.3mm, 수직 방향으로 최대 17.1mm의 오차가 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 파프리카를 인식하고 ROI를 설정할 때 발생하는 오차로 인하여 제어 오차가 발생하였다. 수확 알고리즘 3단계에서 파프리카의 자세를 추출하여 수확 작업을 수행함으로써 위치를 보정하였다.

NO.	Z	z	Error
1	385	418	33
2	400	439	39
3	420	432	12
4	431	458	27
5	443	462	19
6	450	459	9
7	470	473	3
8	474	474	0
9	477	474	3
10	483	483	0
11	490	517	27
12	498	492	6
13	500	498	2
14	501	493	8
15	504	504	0
16	510	513	3
17	512	510	2
18	515	525	10
19	515	514	1
20	535	535	0
average			10.05

표 190 Field experiment results of distance compute algorithm (Unit : mm)

2단계 수확 알고리즘인 시스템으로부터 대상 파프리카까지의 깊이 정보를 획득하는 실험 결과는 표 190과 같다. Z는 실제 거리 좌표를 의미하며 z는 계산된 거리 좌표를 의미한다. 깊이 정보를 추출하는 알고리즘을 수행한 결과 최대 오차 39mm, 평균 10.05mm의 오차를 보였다. 실내 실험에서 최대 31mm, 평균 8.44mm로 나타났던 것에 비하여 오차가 크게 나타났음을 확인 할 수 있었다. 그 이유는 특징점 추출을 위하여 사용된 레이저 광원이 현장에서 출력이 약해 자연광에 의한 간섭이 발생하였고 이로 인하여 광원 추출에 오차가 발생한 것으로 확인하였다. 또한, 실내 실험의 결과와 마찬가지로 가까운 거리일수록 오차가 크게 나타나는 경향을 확인 할 수 있었다.

- 수확 실험 및 성능 분석

1. 1차 수확 실험 및 성능 분석

현장 실험을 위하여 경북 구미 원예 농단 내 농장(하나로 파프리카) 온실에서 재배 중인 파프리카를 대상으로 수확 실험을 수행하였다.



그림 986 A scene of field experiment.

그림 986은 현장 실험 촬영 영상의 한 장면이다. 현장 실험은 파프리카 재배 현장에서 수확 과정 중 파프리카의 인식 후 엔드 이펙터의 중심과 일치시키는 과정에서 각 제어 변수의 오차와 거리 측정에 따른 제어에서 발생하는 오차를 측정하고, 과병의 굵기, 길이, 각도에 따른 수확의 성공 여부를 확인하고 분석 하였다. 굵기는 0~10mm, 10~15mm, 15mm 이상인 경우로 나누어 분석 하였으며, 길이는 0~3mm, 3~6mm, 6~9mm, 9mm 이상으로 구분 하였다. 또한, 각도는 0~20°, 20~45°, 45~70°, 70° 이상으로 구분하여 30회 씩 실험을 4회 반복 수행하고 수확 여부를 확인하였다. 4회 반복을 수행한 후 결과를 이용하여 최종 수확 성능을 평가 하였다.

NO.	Z	z	Error
1	385	418	33
2	400	439	39
3	420	432	12
4	431	458	27
5	443	462	19
6	450	459	9
7	470	473	3
8	474	474	0
9	477	474	3
10	483	483	0
11	490	517	27
12	498	492	6
13	500	498	2
14	501	493	8
15	504	504	0
16	510	513	3
17	512	510	2
18	515	525	10
19	515	514	1
20	535	535	0
average			10.05

표 191 Field experiment results of distance compute algorithm (Unit : mm)

수확 알고리즘 중 시스템으로부터 대상 파프리카까지의 깊이 정보를 획득하는 실험 결과는 표 191과 같다. Z는 실제 거리 좌표를 의미하며 z는 계산된 거리 좌표를 의미한다. 깊이 정보를 추출하는 알고리즘을 수행한 결과 최대 오차 39mm, 평균 10.05mm의 오차를 보였다. 실내 실험에서 최대 31mm, 평균 8.44mm로 나타났던 것에 비하여 오차가 크게 나타났음을 확인 할 수 있었다. 그 이유는 특징점 추출을 위하여 사용된 레이저 광원이 현장에서 출력이 약해 자연광에 의한 간섭이 발생하였고 이로 인하여 광원 추출에 오차가 발생한 것으로 확인하였다. 또한, 실내 실험의 결과와 마찬가지로 가까운 거리일수록 오차가 크게 나타나는 경향을 확인 할 수 있었다.

수확 알고리즘 중 파프리카를 수확하기 위하여 엔드 이펙터를 이송하는 과정으로 파프리카의 과병이 엔드 이펙터의 절단부에 접근 시키는 것이 목적이다. 이 과정은 수확의 성공 여부를 과병의 굵기, 길이, 각도에 따라 나누어 확인 하였다.

0~10mm			10~15mm			15mm~		
Try	Success	Rate	Try	Success	Rate	Try	Success	Rate
12	7	58.3%	15	9	60%	3	0	0%

표 192 Field experiment results of harvesting algorithm according to diameter of peduncle.

과병의 굵기와 길이는 엔드 이펙터의 절단부와 닿는 지점을 기준으로 측정하였으며, 각도는 시스템과 수직 방향을 0°로 설정하여 측정하였다. 먼저, 과병의 굵기는 과병 직경이 0~10mm, 10~15mm, 15mm 이상인 경우로 나누어 표 192과 같이 수확 성공률을 확인하였다. 해당 직경은 엔드 이펙터의 절단부에 닿은 부위를 측정하였다. 파프리카 과병의 직경은 10~15mm의 범위에서 가장 많이 나타났으며 그 외 영역에서는 상대적으로 적게 나타났다.

실험 횟수는 30회로 그 중 16회 수확에 성공 하였으며 직경에 따른 수확 성공률은 0~10mm에서 58.3%로 가장 크게 나타났으나 15mm 이상의 영역에서는 성공하지 못하였다. 이는 해당 직경의 과병이 절단부로 진입하기에 절단부의 입구가 좁아서 수확에 실패 한 것으로 판단된다.

0~3mm			3~6mm		
Try	Success	Rate	Try	Success	Rate
2	0	0%	5	1	20%

6~9mm			9mm~		
Try	Success	Rate	Try	Success	Rate
15	9	60%	8	6	75%

표 193 Field experiment results of harvesting algorithm according to length of peduncle.

과병의 길이에 따른 수확 성공률을 확인한 결과는 표 193과 같다. 0~3mm, 3~6mm, 6~9mm, 9mm이상으로 구분하여 실험의 결과를 분석하였다. 수확 실험에서 6mm 이하의 길이를 갖는 과병은 대부분 성공하지 못하였는데 이는 엔드 이펙터의 전면부에 설치된 가이드의 두께가 두꺼워 실패한 것으로 판단된다.

0~20°			20~40°		
Try	Success	Rate	Try	Success	Rate
6	4	66.7%	10	7	70%
40~60°			60°~		
Try	Success	Rate	Try	Success	Rate
12	7	41.7%	2	0	0%

표 194 Field experiment results of harvesting algorithm according to degree of peduncle.

과병의 각도에 따라 수확 성공여부를 확인한 결과는 표 194와 같다. 과병의 각도가 60° 이상인 경우 엔드 이펙터가 파프리카에 접근이 불가능 하거나 접근하더라도 주변의 가지, 잎 등에 의하여 수확에 실패 하였다.

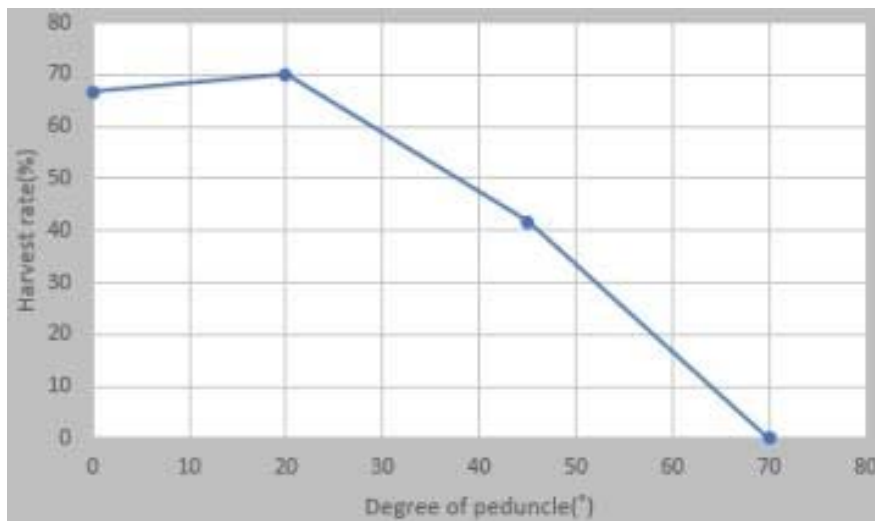


그림 987 Graph of harvesting rates according to degree of peduncle.

그림 987에서 성공률은 0~20°의 구간에서 20~40° 보다 높게 나타 날 것으로 예측 했으나 실제 농가에 0~20°의 각도를 갖는 파프리카의 빈도수가 낮았기 때문에 실험 결과는 20~40°에서 상대적으로 높은 수확률이 나타난 것으로 사료된다.

	2nd	3rd	4th	Remarks
1	O			
2	X	X	O	
3	X	X	X	Diameter > 15mm
4	O			
5	X	O		
6	X	X	X	Length < 3mm
7	X	X	X	Length < 3mm
8	X	X	X	Diameter > 15mm
9	X	X	O	
10	O			
11	X	X	X	Diameter > 15mm
12	X	X	X	Angle > 60°
13	X	O		
14	X	X	X	Angle > 60°

표 195 Harvesting retry results.

과병의 직경, 길이, 각도에 따른 수확 작업의 성공률을 분석한 결과 전체 성공률은 46.7%로 나타났다. 이는 1회 시도에서 나타난 결과이며 재시도의 결과는 표 195과 같다. 엔드 이펙터의 절단부가 파프리카 과병에 접근한 접근율은 86.7%였으며, 수확에 실패한 파프리카를 이용하여 같은 수확 과정을 재시도 하였을 때 최대 4회까지 시도 한 결과 70%의 수확률을 보였다. 하지만, 엔드 이펙터의 구조상 수확 할 수 없는 조건이 존재함을 확인 할 수 있었다. 엔드 이펙터의 구조를 수정한다면 수확률을 접근율의 수준으로 높일 수 있을 것으로 사료된다.

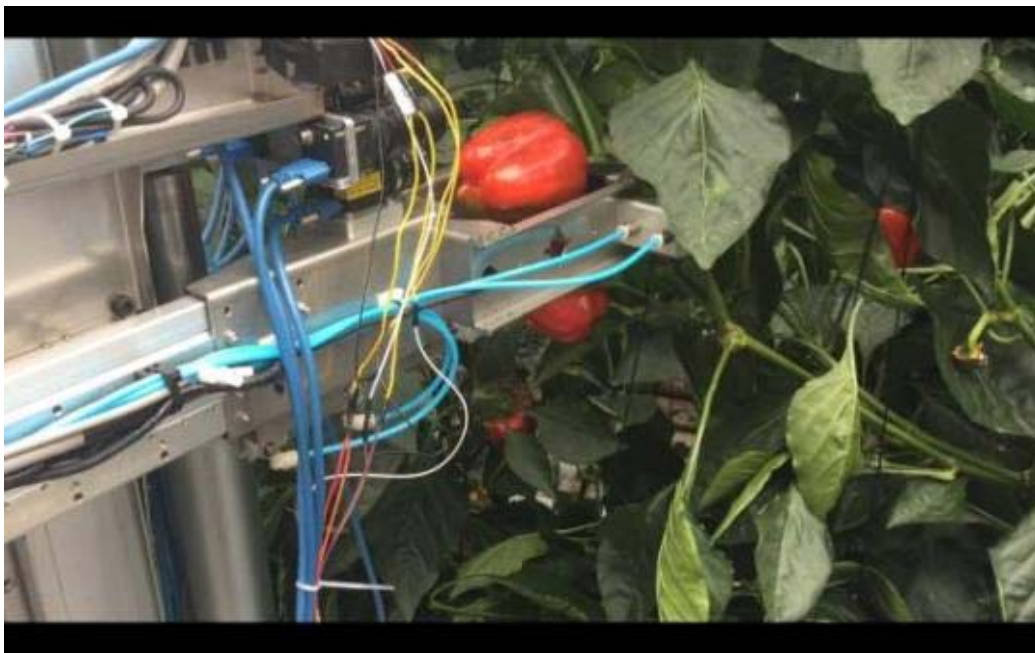


그림 988 Failed harvesting scene due to large diameter of peduncle.

그림 988과 같이 과병의 직경이 커 엔드 이펙터의 절단 부위로 접근이 되지 않는 경우 수확에 실패 하였다. 엔드 이펙터의 절단부는 공압 실린더를 이용하여 칼날을 수평방향으로 이송하여 절단하는 시스템으로 이루어 졌기 때문에 이 때, 절단 압력에 의하여 과병이 이탈하는 것을 막기 위하여 입구를 10mm로 좁게 설계하고 스프링의 탄력을 이용하여 열고 닫히는 형태로 하였다. 하지만 실제 수확 실험 시 설계보다 과병의 두께가 더욱 두꺼워 절단부에 삽입되지 않거나 과병이 찢어지는 경우가 발생하였다. 절단부의 칼날을 수평으로 이송하지 않고 회전하는 형태로 만든다면 입구를 더 넓게 설계할 수 있을 것으로 사료되며, 이를 통하여 수확률을 높일 수 있을 것이다.



그림 989 Failed harvesting scene due to thickness of guide.



그림 990 Distance between end-effector and stem.

또한, 전면부의 가이드의 두께가 두꺼워 파프리카를 엔드 이펙터 내부로 유도 할 수 없는 경우가 발생하였다. 이는 파프리카 외형에 대한 조사 시 과병의 길이가 72.15mm였는데 이는 휘어진 과병의 길이로 실제 수확 작업 시에는 절단 부와 과병에 의하여 발생하는 공간의 직선 길이가 중요하였다. 가이드의 두께를 줄인다면 해당 공간을 확보하여 실패한 작업을 성공 할 수 있을 것으로 판단된다.



그림 991 Failed harvesting scene due to edge of end-effector.

그림 991와 같이 엔드 이펙터의 전면 모서리 및 공압 실린더에 의하여 엔드 이펙터가 접근 할 수 없는 경우가 발생하였다. 해당 문제로 인하여 작업 각도에 따라 실패율이 증가하였다. 공압 실린더를 엔드 이펙터의 후방으로 이동하고 가이드의 두께를 줄이며 엔드 이펙터의 모서리를 원형으로 구성 한다면 성공률을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

NO.	Elapsed time	NO.	Elapsed time
1	76.688	16	47.516
2	62.353	17	37.732
3	58.656	18	64.203
4	46.161	19	53.660
5	45.038	20	56.835
6	55.817	21	56.478
7	50.982	22	57.527
8	48.983	23	56.501
9	52.713	24	72.332
10	47.687	25	38.542
11	39.063	26	58.230
12	36.796	27	58.502
13	38.354	28	42.399
14	41.821	29	52.665
15	44.270	30	34.354
average			51.095

표 196 Harvesting process elapsed time.(second)

표 196은 30회의 수확 시도에서 소요된 시간을 나타낸다. 평균적으로 51.095초 소요되었으며 최대 76.688초 최소 34.354초 소요되었다. 매니플레이터의 이송 시 모터의 RPM을 증가시키고, 수확 알고리즘을 최적화 한다면 시간을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

2. 시스템 보완 및 2차 수확 실험 및 성능 분석

구미 농가에서의 현장 실험에서 얻은 시스템의 구조적 문제점을 보완하였다. 첫째, 파프리카 과실의 크기로 인하여 수확이 불가능 한 것을 방지하고자 가이드의 크기를 변경하였다. 둘째, 파프리카 과병의 굵기로 인하여 수확이 불가능 한 것을 방지하고자 파프리카의 이탈을 방지하는 입구의 크기를 변경하였다. 셋째, 가이드의 전면 모서리와 공압 실린더에 의하여 수확이 불가능 한 것을 방지하고자 공압 실린더의 위치 등 설계를 변경하였다.

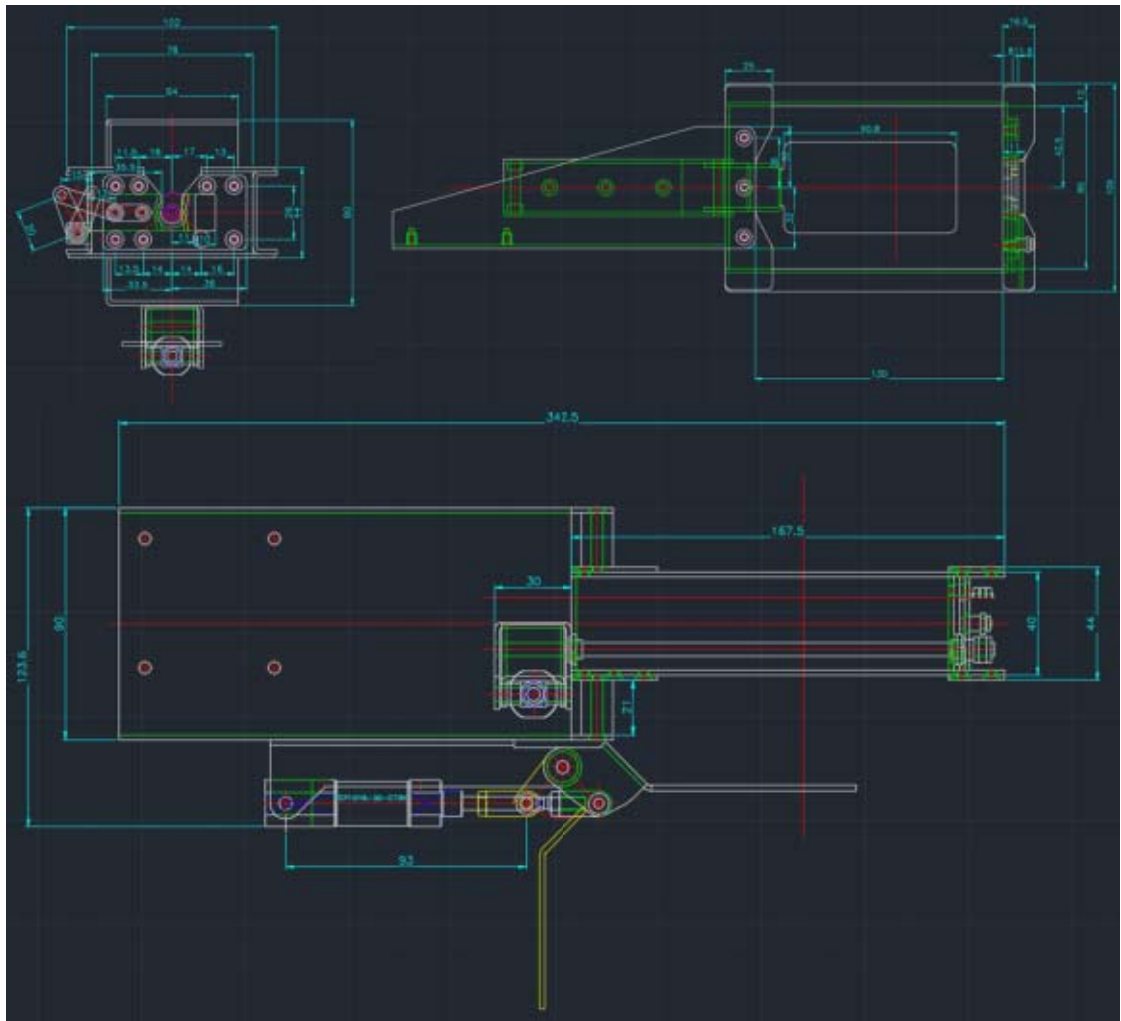


그림 992 변경된 엔드이펙터의 설계도



그림 993 변경된 엔드이펙터

수정된 엔드이펙터의 수확 성능을 평가하고 전체 수확 시스템의 성능을 확인하고자 강원도 원주시의 영흥영농의 파프리카 비닐온실에서 현장 실험을 실시하였다.



그림 995 2차 현장실험 농가 영흥영농

온실 내 이동통로에서 레일의 위치를 잡는 것으로 시작하여 레일의 끝에 도착하면 수확작업을 종료하도록 하였다.



그림 996 레일 위치 탐색

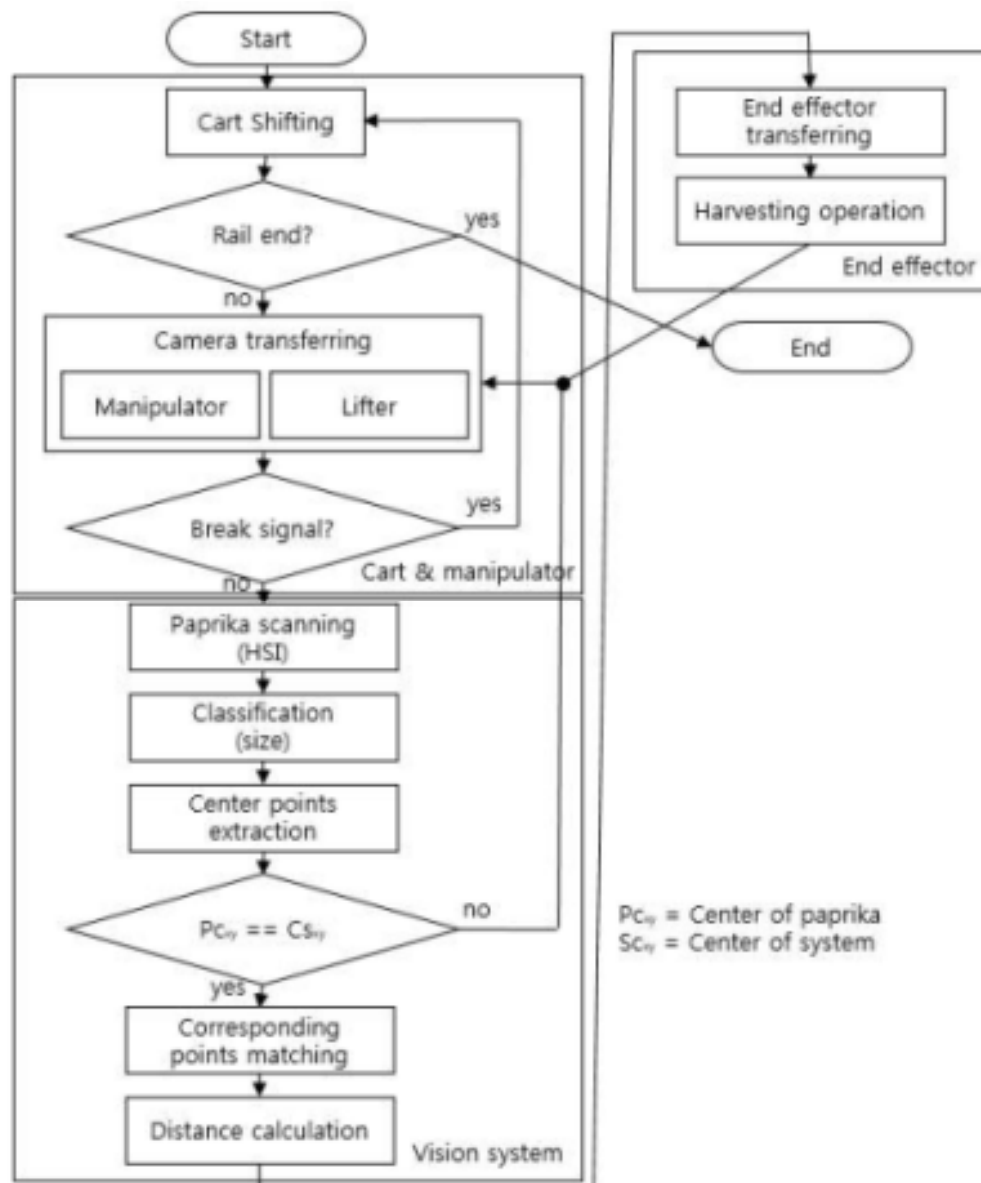


그림 997 영상 정보를 이용한 시스템 제어 순서도

레일 위치를 인식하게 되면 상기 순서도와 같은 흐름으로 수확 작업이 이루어 진다. 개발한 파프리카 수확 시스템을 이용하여 영흥영농 내 한 이랑 당 50m 씩 두 이랑에 착과된 과실 110개를 대상으로 수확실험을 하였다. 수확 대상이 될 과실은 영흥영농의 관계자가 지정을 한 빨강 파프리카 75개, 노랑 파프리카 35개를 대상으로 하였다.



그림 998 파프리카 수확 성능 실험

총 110개의 파프리카에 대하여 수확 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 확인하였다.

Total sweet pepper	Harvested completely	Harvested incompletely		Did not be harvested
110	97	4	2	9
Rate(%)	88.2 %	3.6 %	1.8	8.2 %

표 197 The number of harvested sweet-pepper

수확을 시도한 파프리카 과실 중에서 97개는 수확이 가능하였으며, 6개 중 4개는 착과 형태에 따라 과병과 줄기 사이의 폭이 협소하거나 여러 과실이 연달아 착과된 형태라 과병의 절단이 불충분하여 수확을 하지 못하였다. 또한 2개는 영홍영농의 관계자가 지정한 수확대상이 아닌 과실을 수확한 경우이다. 수확을 하지 못한 9개에 대해서는 입과 줄기 등에 의한 인식의 불충분 및 파지와 절단 등이 복합적으로 작용하여 수확이 불가능하였다. 전체 대상 작물 중 88.2%의 수확 성공률을 보였으며, 총 수확 작업을 하는데 소요된 시간은 79분 04초이다.

4. 목표달성도 및 관련분야 기여도

		코드번호	D-06
4-1. 목표달성도			
○ 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발 목표의 달성도			
평가의 대상	평가의 내용	가중치	달성도 (%)
정량적 연구 목표 달성 여부	○ 계측 대상	10 %	100
	○ 파프리카 위치 인식 정밀도	10 %	100
	○ 정상 파프리카 검출 정밀도	10 %	100
	○ 수확 파프리카의 훼손도	10 %	100
	○ 파프리카 과병 절단면 소독 여부	10 %	100
	○ 수확효율	10 %	78.2
연구 수행 과정 산출물 (진영 종합기계)	○ 절단 작업시스템 설계도	5 %	100
	○ 인식 작업시스템 설계도	5 %	100
	○ 주행 작업시스템 설계도	5 %	100
	○ 센서 통합 회로도	5 %	100
	○ 통합 설계도	10 %	100
	○ 성능 평가서	10 %	87

4-2. 관련분야 기여도

- 본 연구를 통해 개발된 “영상처리 및 인공지능을 이용한 수확 적기 파프리카 과실 판별 기술”은 최근 인공지능 및 4차 산업혁명이라는 세계적 시류에 부합하는 우수한 연구 성과로 판단되며, 이를 바탕으로 타 온실 작물 및 과실수 판별에 적용한다면 농작업 중 수확작업의 생력화를 좀 더 앞당길 수 있으며, 농업의 노동력 부족 상황을 개선함으로써 농가의 소득 증대 및 농가 경제 활성화를 촉진시킬 수 있다고 판단됨
- 과제를 제안했던 2014년의 경우 파프리카가 소득 1위 작물이었으나, 국내 생산량 증가 및 환율 등 외부요인에 따른 수출 흑자 감소 등으로 인하여 소득 순위가 4위로 떨어진 상황이므로 본 연구를 통해 개발된 기술을 적극 도입하여 파프리카 농가의 경영비를 절약하여 농가의 소득 구조를 개선하고 절약된 경영비를 품질 및 시설 등에 재투자를 함으로써 파프리카 품질의 향상에 기여할 수 있을 것으로 생각됨
- 파프리카 생산량이 이미 국내 생산량을 추월한 중국시장을 견제하기 위하여, 동남아, 중남미, 아프리카 등에 개발 장비를 수출하여, 상품 질이 낮지만 가격경쟁력으로 승부하는 중국 파프리카 수출을 견제할 수 있을 것이라 판단됨.
- 학문 발전적 측면
 1. 영상처리기술, 비주얼서보기술, 인공지능기술 등을 이용하여 파프리카 수확 작업 자동화 시스템 구축
 2. 영상처리기술, 인공지능기술 등은 작물의 수확적기 판단, 작물의 정상·비정상 진단 가능
 3. 본 연구 개발 기술의 대상체 인식 알고리즘은 대상체를 변경함으로써 농업 분야의 연구기술 개발에 광범위하게 활용 가능
 - 병충해에 대한 사전 통보.
 - 성장에 필요한 시비 양액재배량 제어
 - 정밀농업 발전에 기여
- 경제적·산업적 측면
 1. 날개의 파프리카수확이 가능하여 반복 작업으로부터 노동집중현상 해소 효과
 2. 파프리카수확에 따른 노동 생산성의 향상효과
 3. 파프리카 수확기에 따른 가볍고 전력 소모가 적은 다른 농기계 개발에 기여
 4. 적기 수확과 자동화에 의한 노동력 절감과 농가수익의 증대 효과.
 5. 파프리카의 수확 시기에 노동 집중 현상을 해소

5. 연구결과의 활용계획

코드번호	D-07
<p>1. 연구 성과의 활용</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구의 결과는 각종 논문 및 학술발표, 특허출원 및 등록을 통해 농작업 중 수확작업의 자동화를 위한 기술에 대한 연구에 기초자료로 활용됨 ○ 파프리카 온실 환경 및 파프리카 작물을 분석한 연구 결과를 토대로 파프리카 온실의 자동화 및 스마트팜에 대한 연구에 기초자료로 활용됨 ○ 원예 작물의 수확 작업에 대한 자동화 기술을 통해 국내 원예 재배 기술의 경쟁력을 높일 수 있고 이를 통해 원예 작물의 품질 향상 유도 가능 ○ 개발된 수확 자동화 기술의 특허 출원 및 등록을 통한 산업지적재산권확보 가능 ○ 산업지적재산권확보를 통한 관련 산업체 등 기술이전 가능 ○ 날개 수확이 가능한 농산물에 대한 투입·절단장치 기술의 활용 ○ 투입·절단장치를 이동시키기 위해 현장을 고려한 작업시스템 기술 활용 ○ 수확한 농산물의 적재 정보 획득 장치 기술 활용 ○ 농산물 인식을 위한 인식장치 및 알고리즘 기술 활용 ○ 농산물을 수확하기 위한 위치제어 시스템 및 알고리즘 기술 활용 ○ 본 연구과제에서 개발된 파프리카 수확기에 따른 현장 적용이 가능한 가볍고 전력소모가 적은 다 른 농기계 기술 활용 ○ 연구 성과의 결과를 정리하여 원예과학지 등 SCIE 급 논문에 투고 계획임 ○ 실제 파프리카 농가 현장 사용자가 원활하게 사용할 수 있도록 수동 조작 및 전체 제어 매뉴얼 을 제작 예정임 <p>2. 추가 연구의 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 파프리카 온실 내 식재간격, 이랑간격, 레일간격 등 작업이 이뤄지는 현장의 규격은 농가별로 큰 차 이가 없으나, 온실 진입로의 구성과 온실 내 적정 일조량 관리, 온실 내 수분 및 CO2 농도 관리 등 재배를 위한 환경이 천차만별이라 표준화된 자동화 기술 및 자동화 장비 개발을 위해서는 파프리카 온실의 표준화를 위한 연구가 필요함. <p>3. 타 연구에의 응용</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구의 대상 작물인 파프리카와 색상 정보가 유사한 사과, 감귤 등의 작물에 본 연구에서 개발된 영상처리 및 인공지능 기술을 활용하여 수확적기 및 정상, 비정상 과 판별 등에 활용될 수 있음. ○ 날개 수확이 이루어지는 농산물에 대하여 본 연구의 개발 기술인 절단 시스템, 비주얼 서보 기술을 활용할 수 있음 ○ 본 연구 결과에서 나타난 문제점과 개선방향을 참고하여 온실 작물을 대상으로 한 다양한 농작업의 자동화 기술 개발이 이루어 질 것으로 판단됨. <p>4. 사업화 추진 방안</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 사업화를 위한 비즈니스 모델 <p>가. BM 수립 배경</p> <ul style="list-style-type: none"> - 비즈니스 모델이란 기업이 어떻게 운영되는지 설명하고 사업을 운영하는 방식에 관한 개념도를 	

나타낸다. 즉, 비즈니스 모델은 고객에게 제품과 서비스를 제공하여 수익을 창출하는 방식에 관한 설명인 것이다. 비즈니스 모델은 누가 기업의 고객이고, 그 고객에게 어떤 가치를 어떤 방식으로 제공할 것이며, 그 제공의 대가로 어느 정도의 수익을 어떤 방식으로 거둘 것인가에 대한 설명이다. 비즈니스 모델의 구성요소는 아래 표와 같다.

표 201 비즈니스 모델 구성요소

구분	비즈니스 모델 구성요소	내용
제품	가치 제안	기업이 제공하는 모든 제품과 서비스에 대한 견해
고객	목표 고객	기업이 가치를 제공하고자 하는 대상
	분배망	기업이 고객에 접촉하는 모든 종류의 수단
	관계	기업과 고객 간의 연결망
인프라 관리	가치 배열	기업의 모든 활동과 자원 배분
	핵심 경쟁력	비즈니스 모델 실행을 위해 필요한 경쟁력
	파트너 네트워크	상업화한 가치를 고객에게 제공하기 위해 타 기업과의 협력 구축
자금	비용 구조	비즈니스 모델 실행에 필요한 모든 비용
	수익 모델	기업이 수익을 낼 수 있는 모든 형태의 구조

- 본 연구과제의 사업화를 위한 비즈니스 모델을 성공적으로 구축하기 위하여, 비즈니스 모델 구성요소 중 제품의 구매 대상이 되는 ‘고객 - 농업 종사자’와 경쟁 및 협력 대상이 되는 ‘인프라 - 농기계 산업’에 대한 정확한 분석이 필요하다.
- 제품의 구매 대상이 되는 ‘고객 - 농업 종사자’를 면밀히 분석하기 위하여 관련 연구 및 동향을 조사하였다. 연령별 농가인구 변화추이를 살펴보면 연령이 적을수록 나타나는 농가인구 감소율이 연령이 많아질수록 나타나는 농가인구 감소율보다 훨씬 크게 나타남을 확인할 수 있었는데, 14세 이하의 경우 1970년 대비 2010년의 감소율이 95.7%로 급감하였고 60~64세의 경우 1970년 대비 2010년의 감소율이 28.8%를 보였다. 반면 연령별 농가인구 변화 추이의 모든 연령대에서 농가인구가 감소한 것에 비해 65세 이상의 인구만 1970년 대비 2010년 농가인구가 36.5%증가한 것으로 나타났는데 이는 농촌의 고령화 문제 심각성을 볼 수 있는 것이다. 특히 인구연령지표인 고령화 지수((65세 이상 인구)/(전체 인구)*100 으로 초고령사회의 경우 65세 이상 인구 비율이 20%이상이다.)에서 농가의 경우 1999년에 이미 초고령사회로 진입하였다(2012년, 농업노동력의 수급분석 및 안정공급방안 연구, 농촌진흥청).

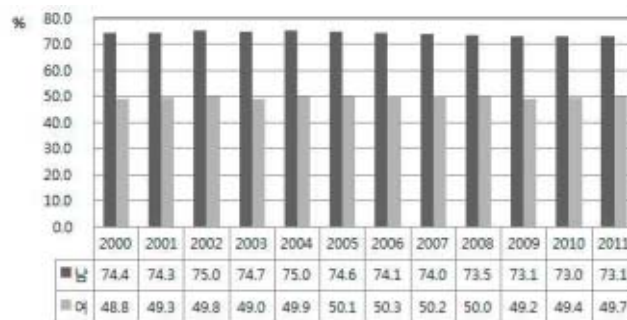
연령별 농가인구 변화 추이

(단위 : 천명)

구분	농가인구	14세이하	15~19세	20~49세	50~59세	60~64세	65세이상
1970	14,422	6,271	1,497	4,404	1,107	430	713
1980	10,827	3,230	1,684	3,701	1,074	400	738
1990	6,661	1,370	734	2,259	1,111	418	769
2000	4,031	459	262	1,301	676	457	876
2010	3,063	270	133	793	587	306	973
증감율(%) (1970/2010)	↓78.8	↓95.7	↓91.1	↓82.0	↓47.0	↓28.8	↑36.5

자료 : 농림수산물부 농림수산물 주요통계

- 농가의 고령화와 인구감소가 진행되면서, 여성 농업인의 농작업 효율성 향상이 중요한 화두로 대두되고 있다. 2000년부터 2010년까지 전국의 경제활동인구(15~64세)는 연평균 0.7% 증가하여 2010년 36,989천 명을 기록하고 있으며, 이 가운데 여성의 경제활동 인구는 전체 경제활동인구의 48.9%를 차지하고 있다. 한편 농가의 경제활동인구는 같은 기간 연평균 3.9%의 비율로 감소하여 2010년, 1,820천 명이며 이 가운데 여성 경제활동인구의 비율은 49.8%로 나타나, 전국 경제활동인구 가운데 여성이 차지하는 비율보다 높은 수준을 유지하고 있다. 이처럼 농가의 경제활동 인구가 지속적으로 감소하고 있는 데 반해 농가의 여성경제활동인구는 전국과 비교해 소폭이긴 하나 높은 수준을 유지하고 있으므로 농업생산에 있어 여성의 역할이 확대하였음을 알 수 있다. 또한, 산업별 성별 취업자 비중의 경우, 최근 여성 취업자가 전체 취업자의 41.6%를 차지하고 있는 가운데 2010~2011년 동안 농림어업 및 광공업 취업자에서 차지하는 여성의 비율이 각각 0.7%p, 0.4%p 증가하였다(2013년, 한국 친환경농업 생산공간의 변화와 여성노동력의 영향, 한국경제지리학회지).



농업의 성별 경제활동 참가율 변화

- 농업 부문 사업체 종사자 가운데 여성의 비율이 2000년대 전반 약 20%의 비중을 유지하다 2009년에는 25.1%까지 증가하였으며 작물재배업의 경우는 2000년 32.4%에서 2009년 44.4%로 여성 비중 증가가 두드러지게 나타나고 있다. 농업 부문에서의 여성 취업자 비중이 남성과 비교해 증가하고 있는 가운데 경영주 성별 특성 측면에서도 2005년의 경우 경영주가 여성인 농가는 216,706 가구로 전체 농가의 17%를 차지하였으나 2010년에 이르러서는 전국적으로 1,548 가구가 증가하여 전체 농가의 18.5%를 점유하고 있다. 이처럼 전국과 비교해 높은 수준인 농가 여성경제활동인구, 경제발전과 산업구조의 고도화에 따라 1차산업의 비중이 급격하게 감소하였음에도 농업부문 여성 취업자 비중의 증가추이, 여성 농가 경영주의 확대 등은 농업생산 공간에서 여성의 역할을 증대시키고 있다(2013년, 한국 친환경농업 생산공간의 변화와 여성노동력의 영향, 한국경제지리학회지).
- 제품의 구매 대상이 되는 ‘고객 - 농업 종사자’를 분석한 결과, 농업 종사자의 특징을 세 가지로 나눌 수 있었다. 첫 번째는 농업 인구의 감소이다. 도시화, 세계화가 진행되면서 농업에 종사하는 인구가 급격히 감소하고 있다는 것을 알 수 있었다. 두 번째는 농업 인구의 고령화이다. 한국 사회의 급격한 산업화에 의한 이촌향도 현상은 농업 종사자의 초고령화를 불러 일으켰다. 세 번째는 여성 농업인의 역할 증대이다. 상기 언급한 두 가지 특징에 의한 농업 인구의 구조 변화는 양적으로나 질적으로나 여성 농업인의 역할을 증대 시켰다. 이러한 특징들을 기반으로 명확한 고객 선정에 의한 비즈니스모델 구축이 이루어져야 한다.
- 경쟁 및 협력 대상이 되는 ‘인프라 - 국내 농기계 산업’은 국내 농업의 성장이 정체되면서 교체

수요를 중심으로 유지되고 있는 가운데, 내수 공급량이 2000년 이후 급감하는 등 취약한 내수시장 여건으로 고군분투하고 있다. 높은 부품구매 비중과 다품종 소량생산 방식의 산업 특성상 수익 창출력 또한 전반적으로 다른 산업들에 비하여 열세한 가운데, 정부규제로 인하여 판가 인상여력이 부족하고 해외 메이커 대비 영세 규모로 운영되어 고정비 절감에 의한 수익 개선폭도 제한적임에 따라 국내 업계는 성장 동력 부족과 만성적 저 수익 기조를 지속해 왔다(2014년, 기로에 놓인 국내 농기계 업계, 한국기업평가).

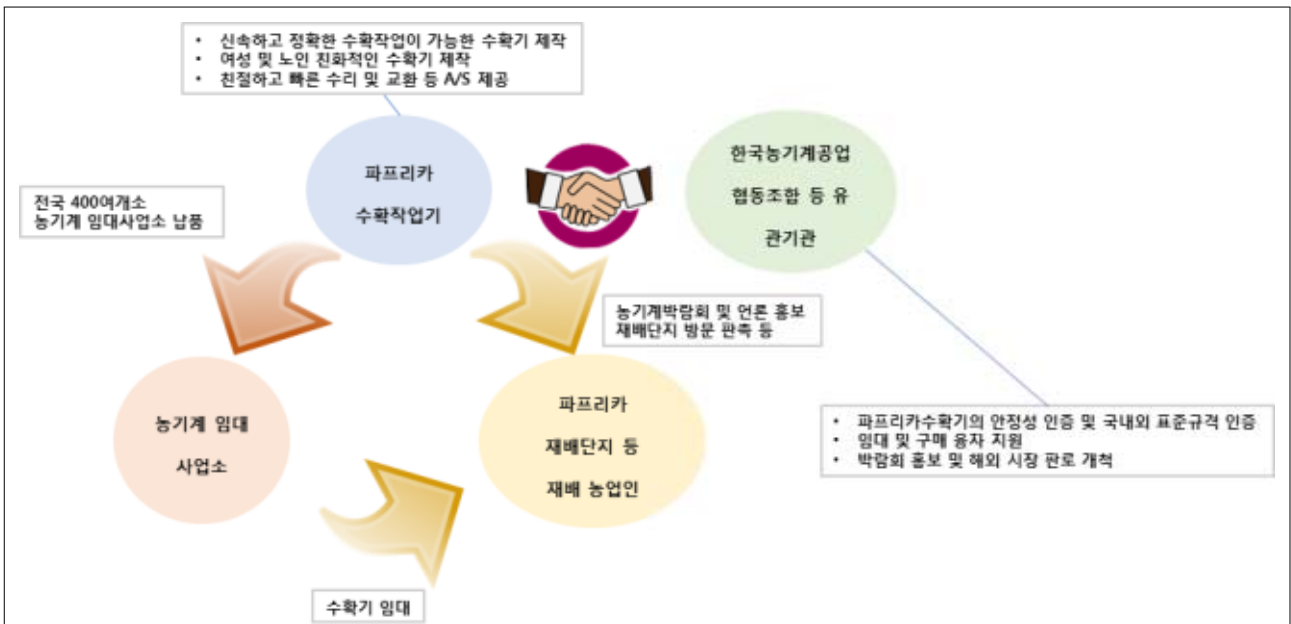
- 최근 국내 농기계 공급대수는 감소추세로 농기계를 주로 사용하는 농가경영주의 급속한 고령화에 따른 은퇴농가의 증가, 대형 고성능 농기계의 공급확대 등으로 당분간 감소추세가 지속될 것으로 보인다. 2012년 수입산 농기계의 국내시장 점유율은 트랙터 13.2%, 승용이앙기 57.5%, 콤바인 27.3%로 2003년 대비 트랙터는 4.4%p가 감소한 반면, 승용이앙기와 콤바인은 각각 31.5%p, 20.2%p나 큰 폭으로 증가하였다. 국산 농업기계의 국내시장 점유율 감소는 잦은 모델·설계변경으로 인한 농기계 및 부품가격 상승, A/S불안정, 농협·대리점의 과다 판매경쟁 등으로 농업기계 유통·사후관리 체계 약화는 물론 소비자의 신뢰저하가 그 원인으로 해석된다. 또한 국산 농기계 모델수가 과다하고, 주요 핵심부품은 수입 의존도가 증가하는 추세로 가격을 낮추기가 어려운 반면에 일부 수입산 농기계의 경우 국산농기계 보다 가격이 낮은 모델이 공급되고 있는 실정으로 국내 농기계산업의 어려움이 가중될 것으로 보인다. 결과적으로 국내 농업기계 수요가 감소하는 상황에서 농기계산업의 활성화를 위해서는 국산 농기계의 국내시장 점유율 확대는 물론 수출확대가 절실하다(2015년, 농업기계 유통 및 사후관리에 관한 연구, 농촌진흥청).
- 정부는 농업 인구의 고령화 및 감소와 농업 산업의 구조 변화에 대응하기 위하여, 1978년도부터 ‘농업기계화촉진법’을 제정하여 농업기계화 정책 수립의 기본 방향으로 삼고 있다. ‘농업기계화촉진법’은 농업기계의 개발과 보급을 촉진하고 효율적이고 안전한 이용 등을 도모함으로써 농업의 생산성 향상과 경영 개선에 이바지함을 목적으로 한다. 영세한 국내 농업인의 상황을 고려하여 정부에서는 ‘농업기계화촉진법’에 의거하여 농업기계를 구입하는 비용의 전부 또는 일부를 지원하여 주고, 농업기계의 제조업자에게는 농업기계의 개발, 생산 및 사후관리에 필요한 자금의 전부 또는 일부를 지원하여 주고 있다. 또한, 영세한 국내 농업인의 상황을 고려하여 농업기계 임대사업을 추진하고 있다. 2016년, 농림축산식품부에서는 농기계 공동이용을 활성화하기 위해 2016년까지 전국 시군에 400개소(시군당 2~3개소)의 농기계 임대사업소 설립을 지원하고 있다. 각 시군구의 농업기술센터에서는 농기계임대사업소를 설치하여 농기계 임대를 지원하고 있다.
- 국내의 농기계 업체들은 한국농기계공업협동조합을 조직하여 국내 농기계 산업의 육성과 글로벌화를 위하여 협력하고 있다. 한국농기계공업협동조합은 1962년도부터 농기계와 농업용 수공구공업의 건전한 발전과 조합원 상호간의 복리증진을 도모하며 협동사업을 수행함으로써 자주적인 경제활동을 조장하고 경제적 지위향상을 기하여 농업기계화의 촉진과 국민경제의 균형 있는 발전을 도모하기 위하여 노력하고 있다. 한국농기계공업협동조합에서는 농업기계 구매 자금을 지원해주고, 국내 농업기계의 세계화를 위하여 농기계 표준화업무 및 수출시장 개척 지원 등을 하고 있다.
- 경쟁 및 협력 대상이 되는 ‘인프라 - 국내 농기계 산업’을 분석한 결과, 국내 농업인구의 감소로 인하여 국내 농기계 매출이 감소하고 있다는 것을 알 수 있었다. 해외 농기계 제품에 대한 비교우위를 점하기 위해서는 가격 경쟁력은 물론이거니와 제품의 성능 향상으로 인한 경쟁력 제고가 필

요하다는 것을 확인하였다. 또한, 사업화 후 제품의 안정적인 판매를 위해서는 ‘농업기계화촉진법’에 의거한 정부의 지원을 받기 위한 노력이 반드시 필요하고, 각 시군구 농업기술센터의 농기계 임대사업소를 중심으로 한 인프라 네트워크 구축이 필요하다. 마지막으로 농기계 산업의 발전을 위한 협력업체인 한국농기계공업협동조합의 정책지원 및 통상지원을 받아 국내 판로의 안정화 및 해외 판로의 확장을 도모하여야 한다는 것을 확인하였다.

나. BM 목표 및 핵심경쟁요인

(1) BM 목표

- 본 연구개발 과제를 통하여 개발할 ‘영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기’는 일반 소비자인 농업 종사자에게 판매하는 것도 중요하지만, 정부 및 각 시군구에서 운영하는 농기계 임대사업소에 판매하는 것 역시 농업 종사자에게 판매하는 것 못지않게 중요하다. 따라서 ‘영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기’ 과제의 비즈니스모델은 Business-to-Customer(B2C : 기업과 소비자 간의 거래, 이하 B2C)와 Business-to-Government(B2G : 기업과 정부 간의 거래, 이하 B2G)가 결합된 형태이어야 한다.
- 성공적인 B2C를 위하여 한국농기계공업협동조합의 농업기계박람회 등을 이용한 홍보와 각 시도 지역신문을 이용한 홍보, 파프리카재배단지 방문 관측 등을 수행할 것이다. 또한, 성공적인 B2G를 위하여, 농작업의 기계화를 위하여 설립된 전국 400여개소의 농기계임대사업소에 납품 할 수 있도록 노력할 것이다. 원활한 농기계임대사업소의 납품을 위하여, 농기계실용화재단 및 한국농기계공업협동조합 으로부터 개발할 ‘영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기’의 안정성과 국내 및 국제 표준 규격을 인증 받을 것이다.
- 본 연구개발 과제의 사업화를 위한 비즈니스모델의 개요는 아래 그림과 같다.



영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기의 비즈니스 모델

(2) 핵심경쟁요인

- 국내의 파프리카는 90년대 중반 제주도의 유리온실에서 처음 재배된 이후로(정 외, 파프리카 산업의 현황과 과제, 한국농촌경제연구원, 2008년), 2013년 한해에 22,630 톤을 수출하는 국내 제 1 규모의 채소작물이 되었다(농림축산식품부 보도자료, 2014). 또한 국내의 파프리카는 2000년 수출되기 시작한 이후, 2012년 수출량 20,765 톤 중 20,762 톤이 일본에 수출되어, 일본 시장의 63%를 차지하는 규모로 성장하였다(농수산물수출지원정보, 2013년).

	2011		2012	
	중량(kg)	금액(\$)	중량(kg)	금액(\$)
총계	16,513,253.10	65,865,625.00	20,765,054.50	88,806,784.00
일본	16,478,477.10	65,682,694.00	20,761,569.50	88,783,361.00
러시아	6,970.00	62,028.00	1,545.00	14,472.00
호주	12,104.00	65,650.00	1,500.00	7,112.00
홍콩	488.00	1,692.00	430.00	1,833.00
독일	0.00	0.00	10.00	6.00
대만	5,290.00	12,865.00	0.00	0.00
인도네시아	100.00	1,084.00	0.00	0.00
캐나다	9,824.00	39,612.00	0.00	0.00

2011년~2012년 파프리카 수출 동향

- 그러나 국내의 파프리카 시장은 수출 위주 시장 형성으로 인하여, 수출량이 매년 증가하여 왔으나 수출량이 증가하였어도 수출액이 증가하지 않는 왜곡된 현상이 발생하였다. 일본의 양적완화 정책의 영향으로 원-엔화 환율이 급락하여, 2012년 대비 2013년 대일 파프리카 수출량은 6.1% 증가하여 총 22,017 톤의 규모가 수출되었으나, 수출액은 2012년 USD 88,783,000\$에서 2013년 USD 86,837,000\$로 전년대비 2.2%가 감소하였다(농림축산식품부 보도자료, 2014).



2012년 ~ 2013년 전체 수출 및 대일 수출 비교

- 현재의 파프리카 재배 작업 중 선별·포장 작업은 상시고용된 인력에 의해 이루어지고 있으나, 수확 등의 농작업에서는 임시고용된 인력에 의해 이루어지고 있어 작업의 전문성이 결여되어 있다 (장, 한국의 품목별·지대별 농업노동력 운용 실태, 농정연구, 2011; 정 외, 파프리카 산업의 현황과 과제, 한국농촌경제연구원, 2008). 수확 작업의 전문성 결여는 수확 시 절단 부위 안쪽을 절단하여 아래 그림과 같이 곰팡이병, 수분손실이 증가하여 파프리카의 상품성을 떨어뜨린다. 이와 같은 문제는 파프리카의 해외 수출 시 클레임을 발생시킨다(김, 파프리카 수출 현황과 문제점, 경남무역, 2013).



잘못된 수확작업에 의한 파프리카 상품성 하락

- 또한, 파프리카는 비닐 및 유리 온실에서 재배되는데, 수확 작업 시 청장년의 생산 노동자의 수급에 어려움이 있어서, 고령의 노년층 생산 노동자가 수확 작업을 하는 것이 대부분의 경우이다(김, 파프리카 수출 현황과 문제점, 경남무역, 2013; 장, 한국의 품목별·지대별 농업노동력 운용 실태, 농정연구, 2011). 이는 파프리카 수확 작업의 효율성이 떨어지고 고온인 여름에서의 작업 시 안전상의 문제가 발생할 수 있는 등의 다양한 문제를 가지고 있다.
- 잘못된 수확작업으로 인한 파프리카 상품성 저하는 국제 무역에서 잦은 클레임을 발생시킨다. 국내외적으로 소비자들은 신선하고 품질이 좋은 농산물을 요구하고 있다(오 외, 친환경농산물의 소비 실태와 생산자의 대응방식 분석, 디지털정책연구, 2012). 하지만, 파프리카의 수확작업의 기계화 또는 자동화는 전무하다.

- 국내의 400여개소의 농기계임대사업소에서 농업의 기계화를 위하여 다양한 농업 기계를 임대하고 있으나, 파프리카수확기의 경우 기개발된 수확작업기가 존재하지 않기 때문에 농기계임대사업소 내에 구비하여 놓은 파프리카수확기가 존재하지 않는다.
- 이는 본 연구개발 과제의 사업화를 위한 비즈니스모델의 핵심경쟁요인 중 하나이다. 국내의 파프리카재배단지 등의 농업 종사자와 전국의 농기계임대사업소 등 해당기술 및 기계에 대한 필요성 및 요구는 증대하고 있으나, 이를 충족시켜줄 업체나 기계가 존재하지 않는다. 따라서 본 연구개발을 통하여 ‘영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기’가 개발이 된다면, 파프리카의 수확작업을 기계화 시킬 수 있고, 또한 경쟁 상대가 없는 진영종합기계의 독점 기술 개발이기 때문에 파프리카재배단지 등의 농업 종사자와 전국의 농기계임대사업소 등 의 국내 시장을 선점할 수 있다.
- 파프리카의 수확 작업은 전체 파프리카 재배 노동시간에서 약 20%의 비율을 차지하고 있으나 기계화는 다른 공정에 비하여 많이 부족한 실정이다. 또한, 농업 인구의 초고령화, 여성 농업인의 비율 증대 등 전통적인 농업 종사자의 형태가 산업화에 따라 변화되고 있지만, 파프리카의 수확작업은 고래의 수작업을 고수하고 있어, 고령화 및 여성 농업인 비율 증대 와 같은 현 농업 인구의 상황에 따른 수확 작업의 변화가 필요하다. 이를 위해서는 연령대가 높은 사용자와 여성의 사용이 용이한 파프리카수확기가 필요하다.
- 이는 본 연구개발 과제의 사업화를 위한 비즈니스모델의 핵심경쟁요인 중 또 다른 하나이다. 사용자의 편의를 고려한 자동화된 파프리카수확기 개발을 통하여 연령대가 높은 농업 종사자와 남성에 비하여 체구가 작은 여성 농업인의 접근성을 높일 것이다. 기존의 남성 위주, 장년 위주의 조작 시스템을 벗어나, 여성 친화적이며 모든 연령층이 조작이 편리한 ‘영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기’를 통하여 개발 제품의 경쟁력을 향상 시킬 것이다.

다. 목표 시장 구조

(1) 경쟁기업 현황

(가) 경쟁기업 현황

- 영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기는 기계화가 이루어지고 있지 않기 때문에 경쟁기업 및 경쟁제품이 존재하지 않는다.

(나) 경쟁구조

- 개발 기술이 성공적으로 이루어진다면 독점구조로 시장을 선점할 수 있다.

(2) 시장진입 장벽

- '농업기계화촉진법'에 의거한 정부 및 각 시군구의 지원과 농림축산식품부의 '농기계 임대사업'과 '농기계 지원사업'에 의하여, 국내 법령 및 정부 유관기관들은 농작업의 기계화에 적극적이기 때문에 관련법령 및 법규에 의한 시장진입 장벽은 높지 않다. 다만, 사용자의 안정성 향상을 위하여 국내 및 국제 농기계 표준 규격을 준수하여야 하며, 사용자 안정성 향상을 위한 설계 및 제작을 하여야 하기 때문에, 기술력이 뛰어난 업체에서 영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기를 개발 및 사업화하여야 한다.

라. 수익 확보 전략

(1) 주요 고객군

- '영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기'의 주요 고객군은 국내의 파프리카재배단지 등의 농업 종사자와 전국의 농기계임대사업소 등 이다. '영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기'에 대한 필요성 및 요구는 증대하고 있으나, 이를 충족시켜줄 업체나 기계가 존재하지 않기 때문에, 진영종합기계에서 본 연구개발 과제에서 개발하는 '영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기'는 국내의 파프리카재배단지 등의 농업 종사자와 전국의 농기계임대사업소 등의 고객 니즈를 충족시킬 수 있을 것이다.

(2) BM의 수익창출 방안

- 본 연구과제의 사업화를 위한 비즈니스모델은 B2C와 B2G가 결합한 형태로, 실사용자인 농업 종사자가 '영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기'를 사용하는 방법이 진영종합기계에게 직접 구매하는 방법과 전국의 400여개소의 농기계임대사업소를 통하여 임대하여 사용하는 방법이 있다. 따라서 '영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기'를 이용하여 수익을 창출하는 길은 크게 두 가지가 있다. 농업 종사자의 구매를 촉진하기 위하여 한국농기계공업협동조합이 주최하는 농기계박람회 등 개발 제품을 홍보할 수 있는 방법을 최대한 사용하여 국내에서 처음으로 개발되는 '영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기'를 알리고, 파프리카재배단지 등을 직접 방문하여 판촉을 할 것이다. 또한, 농작업의 기계화를 위하여 설립된 전국 400여개소의 농기계임대사업소에 납품 할 수 있도록 노력할 것이다. 원활한 농기계임대사업소의 납품을 위하여, 농기계실용화재단 및 한국농기계공업협동조합 으로부터 개발할 '영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기'의 안정성과 국내 및 국제 표준 규격을 인증 받을 것이다.
- 개발 파프리카 수확기의 대당 가격은 재료비 및 제작 공임 등을 고려하면 1500만원으로 예상하며, 사업화 방안에서 서술한 농기계 임대 사업 등에 의한 보조를 받게 되면 실제 농가에서는 700만원 이하의 가격에 사용 가능 할 것으로 판단한다. 수확작업에 투입되는 인건비 등을 고려하면 개발 시스템의 경제성은 충분하다고 판단한다.

6. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

	코드번호	D-08
○ 해당사항 없음		

7. 연구개발결과의 보안등급

	코드번호	D-09
○ 해당사항 없음		

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	코드번호		D-10	
					구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록번호

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적

코드번호	D-11
------	------

○ 기술적 위험요소 분석

본 연구과제는 ‘영상처리를 이용한 파프리카 인식 자동 수확작업기 개발’로서, 해당 과제는 이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 기술을 응용하여 개발한다. 한국 산업규격(KS)에서는 농업기계 설계기준(총 76종)과 치수, 재료 등을 제시하고 있으며 이 중 특별히 사용상의 안전을 위한 규격은 “농업기계의 안전 통칙”에서 본체 및 그 주변에 부수된 안전 방호 설비에 관한 일반 사항에 대하여 규정하고 있다. 130여개 회원국으로 구성된 ISO에서도 농업기계 관련 규격을 정의하고 있으며 약 131종이 존재한다. KS와 마찬가지로 대부분 구조와 형태에 대한 표준규격에 대하여 서술적인 정의를 하고 있다. 따라서 연구개발의 안전성을 갖추기 위하여, 한국 산업규격 및 ISO 농업기계 관련 규격에 맞추어 개발한다. 또한 개발 기술을 결과인 수확 작업기를 사용하는 사용자의 편의를 위하여 아래 표와 같은 농업기계의 인간공학적 설계 지침을 세워 개발 기술의 안전성을 향상한다.

농업기계를 이용한 작업 시 위험요인에 대한 개선 방안

구분	순위	위험요인	개선 방안
농업 기계의 일반문제점	9	도로상태	농지조건 및 작업농지 개선
	8	작업환경	작업 환경 개선 및 캐빈(cabin)작업조건 개선
	6	엔진진동	진동감소, 진동전달 감소
	3	차체완충	완충장치 개선, 고급화, 진동전달 감소
농업기계의 인간공학적 문제점	2	시계성	전방, 후방, 야간 시계개선
	4	의자설계	의자개선, 등받이지개선, 조절성, 조작성 개선, 완충설계
	5	기기배치	인간공학적 개선, 조작력 개선, 배치개선
	1	작업기술, 상황판단	안전교육 강화, 주의 및 경고 시스템
	7	안전장치, 보호장치	전복안전장치, 보호구, 의류
	10	안전점검, 작업수칙	교육 안내, 라벨

기존의 농업기계가 안전측면을 설계에 고려하지 않고 기계적인 성능에만 중점을 두었다면, 본 연구개발에서는 인간 중심의 설계에 초점을 맞추고, 사용자 중심의 설계(UCD: User-Centered Design)를 개발과정에 포함시키도록 한다.

○ 안전관리대책

가. 연구실 안전 점검 체계 및 실시

1) 실험실 안전 점검

위험등급	점검주기	분류 기준
A등급	분기 1회	가연성가스, 인화성 시약, 유해화학물질, 다량의 폐액배출, 독극물, 생물 및 동물의 취급, 방사성 동위원소, 위험성이 높은 기계장비가 설치된 실험실
B등급	반기 1회	일반시약, 소규모 인화성 시약, 불연성가스, 소량의 폐수발생 실험실
C등급	연 1회	이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실

2) 실험실 정밀안전진단 실시

실험실안전관리규정에 의거 실험실의 위험정도에 따라, A,B,C로 관리등급을 분류하여, 실험실 환경안전점검을 실시하고 있으며, 안전점검실시 결과 실험실의 재해예방과 안전성 확보 등을 위하여 필요하다고 인정되는 경우에는 전무기관에 의뢰하여 정밀 안전진단을 실시함.

나. 교육 훈련

- 1) 관련근거 : 연구실 안전환경 조성에 관한 법령 제 18조, 동법 시행령 제 17조 및 동법 시행규칙 제 9조 실험실 안전관리 규정 제 16조(안전교육), 제 17조(안전교육의 관리)
- 2) 교육대상 : 실험실을 출입하는 모든 이용자 (교수, 대학원생, 실험조교, 전문직원, 소속연구원, 실험참여 학부생 및 업체직원 등)
- 3) 안전교육 시간 및 수료인정기간
 - 출입하는 실험실의 위험등급(A,B,C등급) 및 전공특성에 따라 안전교육을 받아야 하며, 1년에 8시간 이상 교육이수 필수
 - 수료인정기간은 수료증의 수료인정기간 까지(유효기간이 지나면 재교육 이수)
- 4) 안전교육 과정
 - 전공특성에 따라 A,B,C 코스로 구분하여 교육 실시
 - A코스 : 생물·방사선 취급
 - B코스 : 화학·가스 취급
 - C코스 : 전기·기계 취급

다. 안전관리추진계획

- 각 실험 단과대학별 안전관리실무위원회 구성 및 운영
- 교내 전체 건물 소방시설 통합관리체계(FMS) 구성
- 실험실 내부 점검실시 후 실험등급 지정표찰 부착
- 건물별 복도 및 비상계단 통로 확보와 불법 사무실 철거
- 사이버 안전 교육 훈련

라. 연구실 안전점검 정기적 실시

연구실의 기능 및 안전을 유지 관리하기 위하여 안전점검지침에 따라 연구실에 관한 안전점검을 정기적으로 실시함.

마. 참여 연구원의 안전관련 교육훈련 시행

산업안전보건법 제31조 (안전보건교육) 및 연구실 안전환경조성에 관한 법률 제 18조에 의거, 전 직원에 대한 안전보건교육을 매달 실시함. 교육 방법은 모든 직원에 대한 자체교육(2시간)을 실시하고, 안전보건교육 일지를 작성하여 관리함.

바. 연구 내용 및 결과물 안전 확보

정기적으로 인원 및 시설 보안 항목, 문서보안 항목 그리고 정보보안 항목의 보안점검을 실시하여 연구 내용 및 결과물의 안전을 확보하고 있음. 참여 연구원들을 대상으로 연구 결과의 안전한 관리를 위한 안전교육 실시

사. 연구실 안전 확보 계획

- 참여 연구원들이 안전관련 각종 법규, 규정 및 지침을 준수하도록 하며, 요구되는 안전교육 및 훈련 실시

- 실험에 관련된 위험 정보를 숙지하고 적절한 개인 보호 장비 착용 실험실에 노출된 위험을 안전 관리책임자에게 보고
- 연구실의 잠재되어 있는 위험성 발견 및 위험물질과 각종 실험장비 등 사용에 따른 안전수칙이 잘 이행될 수 있도록 지도점검 및 교육

10. 연구개발과제의 대표적 연구실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문게재지/ 특허등록국 가	코드번호		D-12	
						Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/인 용횟수 등)
1	특허 출원	파프리카 수확 시스템	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	대한민국	0	2015.07.23	단독사사	
2	특허 출원	파프리카 수확용 엔드이펙터	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	대한민국	0	2015.07.23	단독사사	
3	특허 출원	스테레오 영상을 이용한 피수확물의 위치정보 획득방법	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	대한민국	0	2016.08.29	단독사사	
4	특허 출원	파프리카 자동 수확용 엔드이펙터	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	대한민국	0	2016.08.29	단독사사	
5	특허 출원	위치 정보 기반의 수확 장치 및 방법	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	대한민국	0	2017.09.22	단독사사	
6	특허 등록	스테레오 영상을 이용한 피수확물의 위치정보 획득방법	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	대한민국	0	2017.02.15	단독사사	
7	특허 등록	파프리카 자동 수확용 엔드이펙터	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	대한민국	0	2017.03.13	단독사사	
8	특허 등록	파프리카 수확 시스템	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	대한민국	0	2017.03.22	단독사사	
9	특허 등록	파프리카 수확용 엔드이펙터	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	대한민국	0	2017.03.22	단독사사	
10	논문	파프리카 수확 자동화를 위한 파프리카 인식 및 대응점 획득 알고리즘 연구	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	생명공학연구	0	2014.12.30	단독사사	
11	논문	스테레오 영상을 이용한 파프리카 인식 및 좌표 정보 획득 영상처리 알고리즘 개발	성균관대 학교산학 협력단	주관기관	시설원예· 식물공장	0	2015.09.30	단독사사	

12	논문	파프리카 자동 수확을 위한 파프리카 재배 환경 스테레오 영상 정합 알고리즘 연구	성균관대학교산학협력단	주관기관	생명공학연구	0	2015.12.30	단독사사	
13	논문	영상처리와 인공 신경망을 이용한 파프리카 비정상 영역 인식 알고리즘 개발을 위한 연구	성균관대학교산학협력단	주관기관	생명공학연구	0	2016.12.30	단독사사	
14	학술 발표	파프리카 인식을 위한 영상처리 기초 알고리즘 개발	성균관대학교산학협력단	주관기관	한국농업기계학회	0	2014.10.30	단독사사	
15	학술 발표	무인 파프리카 수확기 개발을 위한 에피폴라 기하학을 이용한 스테레오 매칭 알고리즘 연구	성균관대학교산학협력단	주관기관	한국농업기계학회	0	2015.04.30	단독사사	
16	학술 발표	파프리카의 자동 수확 작업을 위한 파프리카 기하학적 특성 분석	성균관대학교산학협력단	주관기관	한국농업기계학회	0	2016.04.29	단독사사	
17	학술 발표	파프리카 자동수확을 위한 스테레오 영상 정합 알고리즘 연구	성균관대학교산학협력단	주관기관	한국농업기계학회	0	2016.04.29	단독사사	
18	학술 발표	파프리카 자동 수확기 개발을 위한 파프리카의 절단 특성 측정	성균관대학교산학협력단	주관기관	한국농업기계학회	0	2017.04.06	단독사사	
19	학술 발표	심층 신경망을 이용한 영상 내 파프리카 인식 알고리즘 연구	성균관대학교산학협력단	주관기관	한국농업기계학회	0	2017.04.06	단독사사	
20	홍보 실적	성균관대, 파프리카 자동 수확시스템 개발	성균관대학교산학협력단	주관기관	농업인신문	0	2016.07.28	단독사사	
21	홍보 실적	기업탐방-우수중소기업 진영종합기계	진영종합기계	협동기관	김천신문	0	2017.09.22	단독사사	

11. 기타사항

	코드번호	D-13
○ 최초 계획서의 정량적 성과 목표의 연구기반지표 중 인력양성의 목표는 설정되어 있지 않았으나 3년 차에 박사 2명의 인력을 양성하는 성과를 도출하여 해당 인력은 관련 산업 분야 취업을 통해 본 과제 성과를 산업현장에서 활용할 수 있도록 인적 네트워크를 형성하였음		

12. 참고문헌

	코드번호	D-14
<p>[1] Bac, C. W., T. Roorda, R. Reshef, S. Berman, J. Hemming, E.J.V. Henten, 2016. Analysis of a motion planning problem for sweet-pepper harvesting in a dense obstacle environment. <i>Biosystems Engineering</i>. 146:85-97.</p> <p>[2] Baum, E.B., D. Haussler. 1989. What Size Net Gives Valid Generalization?. <i>Neural Computation</i>. 1(1):151-160.</p> <p>[3] Barnea, E., R. Mairon, O. Ben-Shahar. Colour-agnostic shape-based 3D fruit detection for crop harvesting robots. <i>Biosystems Engineering</i>. 146:57-70.</p> <p>[4] Barth. R., J. Hemming, E.J.V. Henten. 2016. Design of an eye-in-hand sensing and servo control framework for harvesting robotics in dense vegetation. <i>Biosystems Engineering</i>. 146:71-84.</p> <p>[5] Bay, H., A. Ess, T. Tuytelaars, L. V. Gool. 2008. Speeded-Up Robust Features(SURF). <i>Computer Vision and Image Understanding</i>. 110(3):346-359.</p> <p>[6] Behnke, S. 2003. Hierarchical Neural Networks for Image Interpretation. Lecture notes in Computer Science no. 2766.</p> <p>[7] Bengio, Y., Y. LeCun. 2007. <i>Scaling Learning Algorithms towards AI</i>. MIT Press.</p> <p>[8] Bengio, Y. 2009. Learning Deep Architectures for AI. <i>Foundations and Trends in Machine Learning</i>. 2(1):1-127.</p> <p>[9] Bishop, C.M. 2006. <i>Pattern Recognition and Machine Learning</i>. Springer.</p> <p>[10] Cerutti, G., L. Tougne, J. Mille, A. Vacavant, D. Coquin. 2013. Understanding leaves in natural images - A model-based approach for tree species identification. <i>Computer Vision and Image Understanding</i>. 117:1482-1501.</p> <p>[11] Chen, H., F. Lei, G. Xing, W. Liu, H. Sun. 2013. Visual servo control system for narrow butt seam. <i>25th Control and Decision Conference</i>. May, 2013. 3456-3461.</p> <p>[12] Cheng, C., C. Chou. 2014. Visual servo with Template Update for a deformable moving object. <i>Control and Decision Conference</i>. May 2014. 5302-5307.</p> <p>[13] Chien, Y.P., A.J. Koivo. 1989. <i>The Autonomous Mobile Robots and Its Applications</i>. IEEE/RSJ International Workshop on 1989. 612-618.</p> <p>[14] Corke, P. I. 1993. Visual Control of Robot Manipulators - a Review. <i>Visual Servoing</i>. 1-31.</p> <p>[15] Correal, R., G. Pajares, J.J. Ruz. 2014. Automatic expert system for 3D terrain reconstruction based on stereo vision and histogram matching. <i>Expert Systems with Applications</i>. 41(4):2043-2051.</p>		

- [16] Glorot, X., Y. Bengio. 2010. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. *Proceedings of Machine Learning Research*. 13th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. 249-256.
- [17] Gonzalez, R.C., R.E. Woods. *Digital Image Processing Third Edition*. Pearson Prentice Hall.
- [18] Hashimoto, K., T. Kimoto, T. Ebine, H. Kimura. 1991. Manipulator Control with Image-Based Visual Servo. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2267-2272.
- [19] Haralick, R., M., K. Shanmugam, I. Dinstein. 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 3(6):610-621.
- [20] Hartley, R., A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision Second Edition*. Cambridge University Press.
- [21] Hinton, G.E., S. Osindero, Y. The. 2006. A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation*. 18(7):1527-1554.
- [22] Hirschmuller, H., D. Scharstein. 2007, Evaluation of Cost Functions for Stereo Matching. *Computer Vision and Pattern Recognitions. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*.
- [23] Husin, Z., A.Y.M. Shakaff, A.H.A. Aziz, R.S.M. Farook, M.N. Jaafar, U. Hashim, A. Harun. 2012. Embedded portable device for herb leaves recognition using image processing techniques and neural network algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*. 89:18-29.
- [24] Hutchinson, S. G.D. Hager, P.I. Corke. 1996. A Tutorial on Visual Servo Control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 12(5):651-670.
- [25] Jung, H., K. Lee, S. Lee. 2011. Stereo Reconstruction using High Order Likelihood. *IEEE International Conference On Computer Vision*. November, 2011.
- [26] Kagaya, H., K. Aizawa. M. Ogawa. 2014. Food Detection and Recognition Using Convolutional Neural Network. *22nd ACM international conference on Multimedia*. November, 2014. 1085-1088.
- [27] Kallas, M., P. Honeine, C. Richard, C. Francis, H. Amoud. 2013. Non-negativity constraints on the pre-image for pattern recognition with kernel machines. *Pattern Recognition*. 46:3066-3080.
- [28] Kitamura, S., K. Oka. 2009. A Recognition Method for Sweet Pepper Fruit Using LED Light Reflections. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*. 2(4):255-260.
- [29] Krizhevsky, A. I. Sutskever, G. E. Hinton. 2012. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 25th International Conference. December, 2012. 1097-1105.
- [30] LeCun, Y., L.D. Jackel, B. Boser, J.S. Denker, H.P. Graf, I. Guyon, D. Henderson, R.E. Howard, W. Hubbard. *Handwritten Digit Recognition: Applications of Neural Net Chips and Automatic Learning*. *IEEE Communication*. 41-46.
- [31] Lee, H. 2010. *Unsupervised Feature Learning Via Sparse Hierarchical Representations*. Stanford University.
- [32] Lehnert, C., A. English, C. McCool, A.W. Tow, T. Perez. 2017. *Autonomous Sweet*

- Pepper Harvesting for Protected Cropping Systems. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2(2):872-879.
- [33] Lehnert, C., I. Sa, C. McCool, B. Upcroft, T. Perez. 2017. Sweet Pepper Pose Detection and Grasping for Automated Crop Harvesting. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. May 2016. 2428-2434.
- [34] Lewis, A., P.L. Watts, B.K. Nagpal. 1983. Investment analysis for robotic applications. Technical paper. Society of Manufacturing Engineers.
- [35] Lowe, D. G.. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 60(2):91-110.
- [36] Lu, W., L. Anyu, T. Xin. 2013. Detection of Fruit Skin Defects Using Machine Vision System. *Sixth International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering*. 44-48.
- [37] Meng. Z., J. Cal, Z. Hu, P. Huang. 2015. A Short-Distance Visual Servo Control Method for the Tethered Space Robot System. *Journal of astronautics*. 36(1):40-46.
- [38] Mirchandani, G., W. Cao. 1989. On Hidden Nodes for Neural Nets. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 36(5):661-664.
- [39] Mohanaiah, P., P. Sathyanarayana, L. GuruKumar. 2013. Image Texture Feature Extraction Using GLCM Approach. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 3(5):1-5.
- [40] Nguyen, D., B. Widrow. 1990. Improving the learning speed of 2-layer neural networks by choosing initial values of the adaptive weights. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. 3:21-26.
- [41] Pacumbaba Jr., R.O., C.A. Beyl. 2011. Changes in hyperspectral reflectance signatures of lettuce leaves in response to macronutrient deficiencies. *Advance in Space Research*. 48:32-42.
- [42] Park, S., Y. Moon. 2014. Wild Image Object Detection using a Pretrained Convolutional Neural Network. *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing*. 3(6):366-371.
- [43] Ren, S., K. He, R. Girshick, J. Sun. 2015. Faster R-CNN: Towards Real-Time object Detection with Region Proposal Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems* 28. 91-99.
- [44] Reum, D., Q. Zhang. 2007. Wavelet based multi-spectral image analysis of maize leaf chlorophyll content. *Computers and Electronics in Agriculture*. 56:60-71.
- [45] Riedmiller, M., H. Braun. 1993. A Direct Adaptive Method for Faster Backpropagation Learning: The RPROP Algorithm. *IEEE International Conference on Neural Networks*. August, 2002. 586-591
- [46] Sa, I., C. Lehnert, A. English, C. McCool, F. Dayoub, B. Upcroft, T. Perez. 2017. Peduncle Detection of Sweet Pepper for Autonomous Crop Harvesting - Combined Color and 3-D Information. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2(2):765-772.
- [47] Scholz, M. 2006. Approaches to analyse and interpret biological profile data. Potsdam university.
- [48] Simard, P.Y., D. Steinkraus, J.C. Platt, 2003. Best practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis. *Document Analysis and Recognition*. Seventh International Conference on 2003. 958 - 963.

- [49] Sohn, K., X. Yan, H. Lee. 2015. Learning Structured Output Representation using Deep Conditional Generative Models. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 28th International Conference. December, 2015. 3483-3491.
- [50] Takenga, C.M. K.R. Anne, K. Kyamakya, J.C. Chedjou. 2004. Comparison of gradient descent method, Kalman filtering and decoupled Kalman in training neural networks used for fingerprint-based positioning. *Vehicular Technology Conference*.
- [51] Wang, H. W. Chen, X. Yu, T. Deng, X. Wang, P. Rolf. 2013. Visual Servo Control of Cable-Driven Soft Robotic Manipulator. *Intelligent Robots and Systems. IEEE/RSJ International Conference*. November, 2013. 57-62.
- [52] Xu, G., F. Zhang, S.G. Shah, Y. Ye, H. Mao. 2011. Use of leaf color images to identify nitrogen and potassium deficient tomatoes. *Pattern Recognition Letters*. 32, 1584-1590.
- [53] Yu, W., 2016. Visual Servo Hexapod Robot Control. *System Science and Engineering International Conference*. July, 2016. 1-2.
- [54] Yu, Z., Z. Cao, X. Wu, X. Bai, Y. Qin, W. Zhuo, Y. Xiao, X. Zhang, H. Xue. 2013. Automatic image-based detection technology for two critical growth stages of maize: Emergence and three-leaf stage. *Agricultural and Forest Meteorology*. 174-175. 65-84.
- [55] Zbontar, J., Y. LeCun. 2015. Computing the Stereo Matching Cost with a Convolutional Neural Network. *Computer Vision and Pattern Recognition. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, June 2015.
- [56] Zbontar, J., Y. LeCun. 2016. Stereo Matching by Training a Convolutional Neural Network to Compare Image Patches. *Computer Vision and Pattern Recognition*. 17(65):1-32.
- [57] 강동중, 하중은. Visual C++ 을 이용한 디지털 영상처리. SciTech.
- [58] 강병철. 2013. Golden Seed 프로젝트 품목별 상세기획 보고서. 농림수산물기술기획평가원.
- [59] 김상철, 김소현, 김유진, 류재석, 낭종호. 2014. 객체 인식을 위한 SIFT 템플릿 생성 및 매칭 방법. *정보과학회논문지 : 컴퓨팅의 실제 및 레터*. 20(6):364-368.
- [60] 김종훈. 2011. 저속 이동체 추적을 위한 영상기반 무인 항공기의 영상 처리 및 유도/제어. 부산대학교.
- [61] 김호철, 구양규, 이정현, 강종구, 배종향. 2012. 적색 계통 파프리카 품종 간 생육 및 착과 특성 비교. *Journal of Bio-Environment Control*. 21(3):247-251.
- [62] 류성필. 2013. 지능형 실시간 객체 인식 시스템을 위한 카메라 능동 제어. 충북대학교.
- [63] 박길흠, 조용호. 2014. SIFT 기반의 약통 분류 시스템. *J Korea Industr Inf Syst Res*. 19(1):77-85.
- [64] 박세진, 정우진, 문영식. 2014. Integral Feature를 적용한 효율적인 Convolutional Neural Network 기반 객체 위치 탐색 기법. *대한전자공학회 추계학술대회 논문집*. 380-383.
- [65] 박재용. 2010. 특정 객체 인식을 위한 내용 기반 영상 처리 시스템. 고려대학교.
- [66] 반재민, 이병래, 강현철. 2012. 도심 영상에서의 비음수행렬분해를 이용한 차량 인식. *한국통신학회 논문지*. 37(7):554-564.
- [67] 변기원, 주재흠, 남기곤. 2009. 능동 스테레오 비전을 이용한 실내환경의 3차원 형상 재구성 알고리즘. *한국신호처리시스템 학회 논문지*. 10(1):13-22.
- [68] 서상룡, 황금강. 2002. 기계시각에 의한 식물 잎의 분광분석시 조도 영향에 관한 연구. *한국농업기계학회 논문집*. 432-437.
- [69] 성내경. 실험설계와 분석 제2판. 자유아카데미.

- [70] 신중화, 손정익. 2015. 파프리카 재배에서 계절별 광환경 조건과 증산량 예측에 근거한 관수공급 기준 제시. *Protected Horticulture and Plant Factory*. 24(1):1-17.
- [71] 오일석. 패턴인식. 교보문고.
- [72] 오창석. 뉴로 컴퓨터. 지성출판사.
- [73] 엄영철, 최장선, 서태철, 이준구, 장윤아, 이상규, 오상석, 이혜진. 2013. 간척지 유리온실과 일반농가에서의 파프리카 품종별 성장특성 및 수량 비교. *Journal of Agriculture & Life Science*. 47(6):33-41.
- [74] 이기원, 전소희, 권병두. 2005. GLCM/GLDV 기반 Texture 알고리즘 구현과 고 해상도 영상 분석 적용. *Korean Journal of Remote Sensing*. 21(2):121-133.
- [75] 이숙윤, 장석우. 2012. 3차원 복원 정밀도 향상을 위한 영상처리 연구. 한국컴퓨터정보학회 동계학술대회 논문집. 20(1):193-195.
- [76] 이승태, 한영준, 한현수. 2010. 신뢰도 공간에 기반한 스테레오 정합 기법. 전자공학회 논문지. 47(6):82-90.
- [77] 이영대, 조성윤, 김경, 이동규. 2012. 스테레오 카메라와 균일 매시를 이용한 매립지의 환경감시를 위한 체적 계산 알고리즘. 한국인터넷방송통신학회 논문지. 12(3):15-22.
- [78] 임기택. 1998. 신경회로망을 이용한 오이영상의 특징형상 정보 인식. 성균관대학교.
- [79] 조성욱, 허성식, 심현철, 최형식. 2011. 무인항공기의 근거리 비행체 탐지 및 추적을 위한 영상처리 알고리즘. 한국항공우주학회지. 39(12):1115-1123.
- [80] 조인제, 채영호. 2004. 스테레오 정합과 중간 등위면 마칭 큐브를 이용한 3차원 재구성. 정보과학회논문지 : 소프트웨어 및 응용. 32(3):173-180
- [81] 최경진, 박세제, 임호, 박종국. 2013. 레이저 선 프로젝터와 USB 카메라를 이용한 자동차용 철밸런스 웨이트의 결합상태 검사. 반도체디스플레이기술학회지. 12(1):15-21.
- [82] 치엔징천, 안명수, 김장희, 강대성. 2009. PCA/SVM을 이용한 얼굴 인식에 대한 연구. Green IT 융합기술 워크숍 및 하계 종합 학술 대회 논문집. 287-292.
- [83] 편영범, 박찬웅, 이쾌희. 1994. 산업용 로봇을 이용한 비주얼 서보. 대한전기학회 학술대회 논문집. 299-301.
- [84] 하유신, 김태욱. 2014. 시설재배 참외 수확 로봇 개발. *Protected Horticulture and Plant Factory*. 23(2):123-130.
- [85] 한창호, 오춘석. 2012. 깊이 맵과 HMM을 이용한 인식 시스템 구현. 한국인터넷방송통신학회 논문지. 12(2):119-126.
- [86] 화지호, 송의한, 이민영, 이봉기, 이대원. 2015. 스테레오 영상을 이용한 파프리카 인식 및 좌표 정보 획득 영상처리 알고리즘 개발. *Protected Horticulture and Plant Factory*. 24(3):210-216.
- [87] 후영영, 정경석. 2012. 스테레오 영상을 이용한 자기보정 및 3차원 형상 구현. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 13(9):3856-3863.
- [88] 농림축산식품부 보도자료, 2014.
- [89] 농수산물수출지원정보, 2013.