

온실 내 살충제 최소화를 위한 작물 개체별
미량분사 시스템 및 해충 관리법 개발에 관한 연구

(Development of Automatic Microspray System and
Pest Management for Minimal Use of Insecticides
by Individual Plant Treatment in Green House)

살충제 미량 분사시스템 개발 및 정밀 방제법 개발,
파프리카 온실에서 농약 살포 및 방제 기술의
포장적용과 방제효율 개선 연구,
자동분무 시스템의 산업적 체제화 및 경제성 확보에
관한 연구

(A study on the beaf grading system)

부산대학교

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “온실내 살충제 최소화를 위한 작물 개체별 미량분사 시스템 및 해충 관리법 개발에 관한 연구” 과제(세부과제 “살충제 미량 분사시스템 개발 및 정밀 방제법 개발, 파프리카 온실에서 농약 살포 및 방제기술의 포장적용과 방제효율 개선 연구, 자동분무 시스템의 산업적 체제화 및 경제성 확보에 관한 연구”)의 보고서로 제출합니다.

2010년 7월 11일

주관연구기관명 : 부산대학교

주관연구책임자 : 전 태 수

협동연구기관명 : 경상대학교

협동연구책임자 : 송 유 한

연 구 원 : 이 장 명

협동연구기관명 : 경상남도 농업기술원

협동연구책임자 : 정 부 근

요 약 문

I. 제 목

온실 내 살충제 최소화를 위한 작물 개체별 미량분사 시스템 및 해충관리법 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

농업의 생산량을 증대시키고 생산성의 향상과 향상성을 유지하기 위해 많은 농업인들이 온실 농업을 실시하고 있다. 작물이 밀집하여 자라는 온실 농업에서 생산량에 중요한 영향을 미치는 요인은 병해충 관리이다. 병해충을 관리하기 위해서는 많은 인력과 비용을 필요하므로 생산성 증가, 경작자의 건강 유지 및 작물체와 환경의 독성 경감을 위해서는 살충제 사용을 최소화 할 필요가 있다. 이를 달성하기 위해서는 해충을 자동적으로 정확하게 인지하고 해충이 있는 장소에 대해 국소적으로 살충제를 분사할 수 있는 로봇 구현이 절실히 요구 된다.

본 연구에서는 온실 내에서 상시 운행하면서 주요 온실 해충(가루이)을 자동으로 인지하여 밀도를 파악하고 해충이 있는 곳에 선별적으로 살충제를 분사할 수 있는 로봇을 개발하고자 하였다. 아울러 해충의 자동 유인장치를 통해 해충을 조기에 감지하고 작물이나 재배환경을 모니터링하여 효율적 병해충 관리에 기여하고자 하였다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 해충학, 공학 및 생태 모델링이 협력하는 학제 연구인데 연구 효율을 위해 세 개의 세부과제로 나누었다. 제 1 세부과제는 해충의 인지와 생태적 분포에 대한 “작물 개체별 및 온실 내 해충 분포의 결정”, 제 2 세부과제는 로봇을 개발하고 방제 효과를 검증하는 “살충제 미량 분사시스템 개발 및 정밀 방제 법 구현”, 그리고 제 3 세부과제는 개발된 로봇을 직접 현장에서 효과를 검증하는 “파프리카 온실에서 농약 살포 및 방제기술의 포장적용과 방제효율 개선 연구”로 나누었다.

IV. 연구개발결과

1. 로봇 개발

연구 초기에 온실 바닥의 레일 위를 구동하는 레일형 로봇(춘사이)을 개발하고 농업기술관리센터 주관 2008농림수산식품과학기술대전에 참여하여 전시하였다. 이 후 농업 현장에서 실용성과 범용성을 감안(레일을 깔 수 있는 온실은 제한됨)하여 연구 후반부에는 케이블 카형 로봇(케봇)을 다시 개발하였다. 춘사이는 주로 파프리카에 적용될 수 있는 반면 케봇은 온실 상부에 레일 설치가 가능하므로 일반 작물에 적용될 수 있게 하였다.

2. 잎 및 해충 인지

로봇의 기계적인 개발과 함께 잎과 해충을 인지 할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 일차적으로 잎을 인지하는 프로그램을 개발하였는데, 자연 상태에서 겹쳐진 잎을 개체별로 인지하고, 모양, 자세 등을 판단하는 소프트웨어를 구현하였다. Adaptive shape model (ASM)의 알고리즘으로 잎을 인지하고(특허 출원번호: 10-2011-0067002), 다중 프렉탈 방법으로 해충을 검출하도록 하였다. 특히 다중 프렉탈 방법은 작은 크기의 곤충 이미지를 현장에서 인지하는데 효율이 높았다(논문 투고; 특허 출원 진행). 적절히 해충을 인지한 후에 해충을 계수하고 기록하도록 하였다.

3. 인지 및 방제 효과 야외 검증

온실 여건에서 상기 구성되어진 로봇을 장착하여 인지실험과 방제효율 시험을 수행하였다. 이를 위해 온실을 확보하고 작물과 해충이 일정 시기에 공급되도록 하였으며, 식물 잎, 해충 등의 촬영조건을 최적화하였다. 상기 춘사이와 케봇의 두 가지 로봇에 대해 인지 효과와 방제효과를 검증하였고, 아울러 트랩을 장착한 로봇의 유인효과를 검증하였다.

4. 해충분포 및 분산에 대한 모델

해충의 인지 및 약제 살포를 위해서는 적절히 밀도를 파악할 필요가 있었다. 해충은

시공간에서 확산을 하므로 해충분포가 다양하게 나타나므로 상시 순찰체제를 통해 해충의 분산양상을 파악하고, 해충의 공간 분포 및 분산양상을 규명하여 가루이 밀도를 분석하였다.

5. 정량적 결과

특허의 경우 등록 1건, 출원 2건을 예정하였으나 현재 4건을 출원하였으며 출원진행 중인 1건이 있다. 이 중 2건은 2009년, 2010년에 출원하였는데, 현재 등록 절차가 정상적으로 진행 중이다. 등록이 통상 2년이 걸리는 점을 감안하면 등록에 다소 시간이 더 소요될 것으로 여겨진다(특허 출원 대행 번리사 확인). 학술지는 SCI(E) 3편, 국내 학술지 3건을 목표로 하였는데, SCI(E)는 3 편(국내 SCIE지 1 건 포함)을 투고하였고, 국내 학술지는 1편을 투고하였다. 연구 진전에 따라 1-2 편(SCI급 포함)을 더 투고할 예정이다. 결과적으로 기술 개발 자체에 시간이 소요되어 이에 수반되는 특허 등록이나 논문 게재에 시간이 조금 더 요구되는데, 현재 특허 신청과정이나 논문 투고 되는 일정이 고려된다면 특허는 초과 달성하고 논문 게재도 계획에 큰 차질 없이 달성될 수 있으리라 여겨진다(투고 중 또는 투고 예정인 논문 제목 및 요약문과 신청한 특허 내용 등은 부록에 수록하였음).

V. 연구성과 및 성과활용 계획

1. 연구성과

- 레일형 로봇과 케이블카형 로봇을 개발하여 온실 로봇의 두 가지 전형을 제시함.
- 온실형 로봇의 제어기술을 확보(구동제어, 로봇 팔 제어, 정밀 분사제어, 국소 위치제어).
- 작물의 이미지로부터 현장 여건(겉치는 잎, 불완전한 잎 등)에서 개별 잎을 인지해 내는 알고리즘 개발
- 작물의 잎이나 트랩에서 소형 곤충을 인지하고 계수하는 알고리즘 개발
- 온실 내에서 낮은 밀도의 해충 출현을 조기에 검출해 내는 해충 자동 유인장치의 개발
- 로봇 구동, 잎과 해충의 인지 및 관리 프로그램을 운용하는 매뉴얼 개발(CD 첨부)

2. 연구개발에 따른 기대성과

- 앞으로 온실 작물의 생산성 제고뿐만 아니라 경작자 건강과 농약 잔류량의 최소화를 위해서는 해충 자동인지와 미량분사 구동시스템이 가능한 로봇의 “상시 해충 순찰 체제”가 요구 될 것으로 전망되며, 이는 우리나라뿐만 아니라 국제적으로도 급히 발전될 분야라 고려됨. 따라서 아래와 같은 기술적 성과를 이루리라 여겨짐.
 - 작물 및 해충의 인지를 통한 효과적인 방제 및 작물의 생산성 향상
 - 무인 방제에 의한 경작자 건강유지
 - 최소한의 농약 사용으로 인한 작물 및 환경오염 최소화
 - 앞으로 재배-해충관리-자동방제-온실로 연계되는 관리 시스템이 전체 작물과 해충을 대상으로 일반화 되어 질 수 있음을 고려할 때 본 선행 연구는 핵심적 기술보급에 기여하리라 여겨지며 아래와 같이 경제적, 사회적 성과가 기대됨.
 - 온실 내 작물의 경작 및 해충의 효율적 인지 및 방제를 위한 소프트웨어 구현
 - 타 작물, 해충 및 재배 환경에 적용
 - 관리 프로그램의 영농 활용
 - 온실 내 해충분포 및 동태에 관한 기초정보 제공
 - 기술 이전 및 특허 출원 등으로 경제적 부가가치 창출
 - 유사한 사례에 대한 해외 기술 보급 및 경제적 부가가치 창출

VI. 건의 사항.

실제 해충학 및 공학의 학제 연구를 수행한 결과 앞서 언급하였듯이 작물재배, 해충 사육, 로봇 적용 등이 종합적으로 수행되어야 하므로 앞으로 이와 유사한 과제의 경우 4-5년 정도의 연구 기간을 배려하면 좋으리라고 여겨집니다. 그리고 새로운 로봇 제작을 고려할 때, 연구비도 다소 증액이 될 수 있으면 보다 용이하게 연구가 진행될 것으로 사료됩니다.

SUMMARY

(영문요약문)

I. Title

Development of Automatic Microspray System and Pest Management for Minimal Use of Insecticides by Individual Plant Treatment in GreenHouse

II. Objectivity and Necessity

Greenhouse cultivation is highly demanded in order to increase agricultural productivity, to maintain production stability, and to keep health of cultivators and ecosystems. Pest damage, however, is one of the main factors leading to severe crop loss in greenhouse: since pest dispersal is critical in highly condensed vegetation in closed, homogeneous environment. Efficient control of pests is desired in this regard. Consequently, accurate detection of pests followed by on-site spray to the target areas is a prerequisite for practice by utilizing a robot system for achieving successful pest management.

III. Research contents and scope

This study is based on interdisciplinary fields, consisting of entomology, engineering and ecological modeling. The project was divided into three subprojects. The first subproject covers "Investigation of population distribution in individual plants and greenhouse". The second subproject regards "Microapplication of pesticides and precise controls method, while the third projects conducts "In situ application and evaluation of pesticide application in greenhouse".

IV. Research results

1. Robot development

In early study, we developed the rail-type robot (Chunshy) that could move along the rail on the ground in greenhouse. The robot consisted of observation arms with cameras for plant and insect detection and with a spray nozzle as well. Chunshy can move along the rail, can detect leaves and insects, and control the pesticide nozzle with two degrees of freedom for spray. After construction of Chunshy, the robot was at the "2008 Science and Technique Competition for Food, Agriculture, Forestry and Fishery" organized by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries(iPET).

By considering the practicality and generality of robot utilization in agricultural fields, a "cable car-type robot (Cabbot)" was subsequently developed in this project. While Chunshy can be mainly applied to paprika greenhouse on the ground-rail, Cabbot can be installed on the upper part of greenhouse to be applied to general greenhouse crops and vegetables. Algorithm of pattern recognition was developed to separate the pests (e.g., white fly) from leaf images in more complex situations (patent application; No. 10-2009-0025160).

2. Recognition of leaves and pests

We developed the software that can recognize leaves and pests along with mechanical construction of robot. Programs were developed for recognizing overlapping and incomplete leaves by utilizing Adaptive Shape Model (ASM) (patent application; No. 10-2011-0067002). Subsequently multi-fractal analysis was applied for detection of the small size pests collected on the sticky traps. The number of the detected pest individuals is automatically recorded in the computer.

3. *In situ* test for detection of pests and control in the field

Crops were cultivated and insects were reared in greenhouse in order for the developed robots to be tested in field conditions. The two robots, Chunshy and Cabbot, were tested for detecting pest insects and for controlling the pests in greenhouse conditions. While the robots continuously patrolled the greenhouse, spatial-temporal data of detected pests were automatically recorded in the computer.

An attraction device for collecting the insects on Cabbot was further tested. High pressure of air was sprayed with the nozzle installed on the robot to the plants in order to agitate the whiteflies. The agitated whiteflies escaping from the leaves were subsequently collected at the sticky traps attached on the Cabbot. The whiteflies were effectively collected on the trap even at low population density of pests in plants. The attached pests were accordingly recognized by the recognition system.

4. Modeling of pest distribution and dispersal

Pest distribution and dispersal were accordingly observed by rearing experiments with plants and pests in greenhouse conditions *in situ* in Jinju. The recorded data were used to present spatial and temporal distributions of pests, and dispersal pattern and parameters for diffusion were estimated for pest population. Crosscorrelation analyses were further conducted to reveal spatial association of pest densities in greenhouse conditions. The data were useful for sampling in different densities of pests in plants.

5. Quantitative research outcome

Two types of robots, Chunshy and Cabbot, were developed in this project as stated above. Consequently developing two types of robots required a high level of research effort in the early and intermediate phase of research, and technical establishment was achieved in the latter part of research. Five patents were prepared in total, while only two patents were planned in the original plan. Two early-submitted patents in 2009 and 2010 would be formally registered in the near future (generally 2 or more years required for formal registration).

Considering that papers could be submitted after patent application, papers were prepared in the latter part of research. The 3 SCI(E) and 3 domestic journals were planned for publication. At the present time 4 papers (3 SCI(E) journals and 1 domestic journal) were submitted. In the near future 1-2 papers will be more submitted possibly to SCI(E) journals. Detailed contents for the patents and papers were provided in appendix.

V. Research achievement and plan for applications

1. Research achievement

- Establishment of two type of robots in greenhouse - rail-type robot (Chunshy) and cable car-type robot (Cabbot)
- Program for the robot control (locomotion, robot arm, micro-spray, and precise location navigation)
- Development of algorithms recognizing individual leaves in field conditions (e.g., overlapping and damaged leaves)
- Development of algorithms recognizing and counting the number of small size pests
- Development of automatic attraction device assisting early detection of pest occurrence in greenhouse
- Development of manual for robot control, recognition of leaves and pests, and management

2. Expected achievement

- Robot patrolling system may be highly demanded in the near future to minimize amount of pesticide usage and to keep the health of cultivators and ecosystems, not only in Korea but also in international communities. The following techniques would be contributed to automation of agricultural practices.
 - Improvement of the production of crops due to effective pest control through detection of crops and pests

- Keeping the health of cultivator due to unmanned pest control
- Minimization of chemical residues in crops and environments
- The system of "cultivation-pest management-auto control-greenhouse" could be generalized in the future agricultural practices, especially in greenhouse cultivation. This research would be able to contribute to development of core technology in this field, along with social and economical benefits:
 - Software for recognition and management of pest and crops in greenhouse
 - Extrapolation of the techniques to general crops and pests in agriculture
 - Application of management techniques to other fields covering forestry, fishery, epidemics and conservation
 - Provision of necessary information on pest distribution and dispersal in greenhouse
 - Creation of economic values through practical techniques for pest detection, attraction and control
 - Distribution of related techniques to foreign countries

VI. Suggestion

This type of integrative study covering entomology, engineering and ecological modeling required a longer time for research period according to research participants' wide backgrounds. It would be desirable if the total research period could be extend to 5 years from 3 years in similar study in future, possibly with an increased amount of research fund.

CONTENTS

Chapter 1. Overview of research	----- 11
Section 1. Objectives of research	----- 11
Section 2. Requisition of research	----- 11
Section 3. Targets of research	----- 12
Section 4. Contents of research	----- 13
Chapter 2. Progress in foreign countries and domestic development	-- 14
Section 1 Current status of progresses in foreign countries	----- 14
1. Studies on the pattern recognition	----- 14
2. Studies on robots and automatic drive control	----- 15
Section 2 Current status of domestic progresses	----- 16
1 Studies on the management of pest in greenhouse	---- 16
2 Studies on the pattern recognition	----- 16
Chapter 3. Contents and results	----- 17
Section 1. Research Overview	----- 17
1. Research Topics	----- 17
2. Research Streering	----- 18
Section 2. Developmet of robot working in greenhouse	----- 20
1. Research outline	----- 20
2. Realization of rail-type robot	----- 20
3. Realization of cable car-type robot	----- 21
4. Controlling robots	----- 23
5. Designing and making localization system using ultasonic beacon	----- 31
Section 3. Recognition of leaf and pest	----- 37
1. Research outline	----- 37
2. leaf recognition: simple type	----- 37
3. leaf recognition: complex(field)-type	----- 40
4. Experiment on the leaf recognition	----- 44
5. Pest detection(simple leaf) : On the condition of light	- 46
6. Pest detection : Pests attached on a plant	----- 48
7. Recognizing the pattern of pest distribution	----- 49
8. Pest detection: Multifractal analysis method	----- 51
Section 4. Field test of recognition and pesticide effects	----- 59
1. Research outline	----- 59
2. Construction of greenhouse	----- 59
3. Deploying rail in greenhouse	----- 60

4. Survey research and commercialization	-----	61
5. Experiment for the evaluation of efficiency of the automatic precise microspray	-----	68
6. Experiment for the evaluation of validity of the pest attraction system	-----	73
Section 5. Modelling the pest distribution and dispersion	-----	81
1. Research outline	-----	81
2. The appearance of whitefly dispersion	-----	81
3. Calculation of diffusion coefficient in the diffusion model of the pest dispersion	-----	84
4. Cross-correlation and pattern of the pest dispersion	----	85
5. Sampling theory	-----	88
Chapter 4. Achievement of objectives and contribution to related fields	-	90
Section 1. Achievement of technical objectives	-----	90
1. Making robot and its control technique	-----	90
2. Development of leaf and pest recognition algorithm	----	90
3. Controlling precise micro-spray system	-----	90
4. Development of automatic pest attraction system	-----	91
Section 2. Achievement of quantitative objectives	-----	91
1. Patent	-----	91
2. Paper publication	-----	92
Section 3. Contribution to related fields	-----	92
Chapter 5. Research output and plan for application of research output	-	93
Chapter 6. Information obtained from overseas during research period	-	94
Section 1. Agro-robot related techniques	-----	94
1. Development of strawberry-harvesting robot	-----	94
2. 3D LIDAR sensor	-----	94
Section 2. Techniques related to pattern recognition	-----	94
1. Algorithm reconstructing 3D informations for a leaf	-----	94
2. SIFT based pest detection techniques	-----	95
Chapter 7. References	-----	96

목 차

제 1 장	연구개발 과제의 개요	11
제 1 절	연구개발의 목적	11
제 2 절	연구개발의 필요성	11
제 3 절	연구의 목표	12
제 4 절	연구의 내용	13
제 2 장	국내외 기술개발 현황	14
제 1 절	국외 현황	14
1.	형태 패턴 인지에 관한 연구	14
2.	로봇 및 자동 구동 제어장치에 대한 연구	15
제 2 절	국내 현황	16
1.	온실에서의 해충관리에 관한 연구	16
2.	패턴 인지에 관한 연구	16
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	17
제 1 절	연구 개괄	17
1.	연구 주제 구성	17
2.	연구 추진	18
제 2 절	온실형 로봇 개발	20
1.	연구 개요	20
2.	레일형 로봇 구현	20
3.	케이블카형 로봇 구현	21
4.	로봇 제어	23
5.	초음파 활성 무선표지를 이용한 위치확인 시스템의 설계, 제작	31
제 3 절	앞 및 해충 인지	37
1.	연구 개요	37
2.	앞 인지: 단순형	37
3.	앞 인지: 복잡(현장)형	40
4.	앞 인지 실험	44
5.	해충 인지(단순형) : 빛 조건에 따른	46
6.	해충 인지 : 식물체에 부착된 해충	48
7.	해충의 패턴 인지	49
8.	해충 인지: 다중프레탈 분석 방법	51
제 4 절	인지 및 방제 효과 야외 검정	59
1.	연구 개요	59
2.	온실 건설	59
3.	온실 내 레일의 설치	60

4. 현장 설문조사와 상업화	-----	61
5. 무인 미량분사 정밀방제기 시스템의 평가를 위한 실험	-----	68
6. 해충 유인실험 평가	-----	73
제 5 절. 해충 분포 및 분산에 대한 모델	-----	81
1. 연구 개요	-----	81
2. 가루이의 분산 양상	-----	81
3. 해충 분산의 확산모델에서의 확산계수	-----	84
4. 교차-상관과 해충 분포패턴	-----	85
5. 샘플링 이론	-----	88
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	-----	90
제 1 절 기술적 목표의 달성도	-----	90
1. 로봇 제작과 제어기술의 확보	-----	90
2. 인지 알고리즘 개발	-----	90
3. 정밀 미량 분사장치 제어기술 확보	-----	90
4. 자동 해충 유인 장치의 개발	-----	91
제 2 절 정량적 목표의 달성도	-----	91
1. 특허 목표	-----	91
2. 논문 출판 목표	-----	92
제 3 절 관련 분야의 기여도	-----	92
제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획	-----	93
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	-----	94
제 1 절 로봇 관련 기술	-----	94
1. 딸기수확 로봇의 개발	-----	94
2. 3차원 LIDAR 센서의 응용	-----	94
제 2 절 패턴 인지에 관련된 기술	-----	94
1. 잎의 3차원 정보 복원 알고리즘	-----	94
2. SIFT에 기반한 해충인식 기술	-----	95
제 7 장 참고문헌	-----	96

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적

온실 내에서 상시 운행하면서 주요 온실 해충(가루이)을 자동으로 인지하여 밀도를 파악하고 해충이 있는 곳에 선별적으로 살충제를 분사할 수 있는 로봇을 개발하고자 하였다. 아울러 해충의 자동유인장치를 통해 해충을 조기에 감지하고 작물이나 재배환경을 모니터링하여 효율적 병해충 관리에 기여하고자 하였다.

제 2 절 연구개발의 필요성

농업의 생산량을 안정적으로 증대시키기 위해 많은 농업인들이 온실 농업을 실시하고 있다. 작물이 밀집하여 자라는 온실 농업에서 생산량에 큰 영향을 미치는 요인은 병해충 관리이다. 병해충을 관리하기 위해서는 많은 인력과 비용을 필요로 한다. 생산성 증가, 경작자의 건강 유지 및 작물체와 환경의 독성 경감을 위해서는 살충제 사용을 최소화 할 필요가 있다. 이를 달성하기 위해서는 해충을 자동적으로 정확하게 인지하고 해충이 있는 장소에 대해 국소적으로 살충제를 분사할 수 있는 로봇 구현이 절실히 요구 된다. 따라서 본 연구를 통해 다음과 같은 사회적, 경제적, 기술적 필요성을 충족시키고자 한다.

1. 친 생태적 측면에서의 해충관리

- 가. 최근 환경교란 문제가 야기되어 농약사용을 최소화하면서도 효율적으로 해충을 방제할 수 있는 관리기법 개발이 절실히 요구된다.
- 나. 과도한 농약사용은 잘 알려져 있다시피 먹거리와 환경을 오염시켜 높은 경제적, 사회적 문제를 야기하고 있다.
- 다. 따라서 생산성을 제고하되 농약살포를 줄여 경작자의 건강을 유지할 뿐만 아니라 작물 및 환경오염을 최소화하는 친 생태적 해충관리기법이 절실히 요구된다.
- 라. 앞으로 재배-해충관리-자동방제-온실로 연계되는 관리 시스템이 전체 작물과 해충을 대상으로 일반화 되어 로봇의 “상시 해충 순찰체제”가 보급될 것으로 전망되고, 이는 우리나라뿐만 아니라 국제적으로도 급히 발전될 분야로 여겨진다. 본 선행 연구는 로봇 및 인지 기술의 핵심적 기술 보급에 기여할 것이며 다양한 경제적, 사회적 성과가 기대된다.

2. 해충밀도와 분포의 정확한 측정

- 가. 최대한 농약살포를 자제하고 효율적인 병해충 종합관리를 실현하기 위해서는 대상 작물 해충의 정확한 분포와 밀도 예측이 필수적으로 요구된다.
- 나. 그러나 해충 밀도 계수의 경우 전통적으로 주로 사람에 의존하여 실시되므로 정확한 밀도 파악에 어려운 점이 많았다.
- 다. 객관적이고도 정확한 밀도 및 분포 조사를 위해서 패턴 인지 등을 통한 해충 인지의 자동화기법이 요구된다.

3. 작물 개체별 미량 분사 및 관리법 구현

- 가. 해충밀도나 분포를 정확히 파악하며 작물 개체별로 해충이 서식하는 작물이나 주요 장소에 선택적으로 살충제 분사를 함으로써 경작자의 건강 유지와 농약의 최소 소비가 가능하다.
- 나. 로봇 원리를 이용한 자동구동시스템을 작동하여 해충 위치를 인지한 후 해충이 있는 위치에 자동적으로 미량 분사하는 “해충 항시 순찰 체제”를 갖출 수 있다.
- 다. 나아가 개발된 기술은 농약의 분사뿐만 아니라 관련 방제 기술(예 천적 패킷 부착 등)에 적용 될 수 있다.

4. 파프리카 등의 고부가 작물의 중요성 및 방제

- 가. 파프리카는 경제성이 매우 높고 대량 재배가 가능하여 농가 소득에 매우 유리하다. 나아가 양호한 시설의 온실에서 길러지므로 해충인지와 미량 살포시스템을 구동하기에 적합하다.
- 나. 해충(가루이)은 파프리카에 많은 피해를 주고 있는데, 본 연구에서는 비교적 인지가 용이하면서도, 사육법이 확립된 가루이류를 주요 대상 해충으로 하였다.

5. 일반 작물에 대한 방제

- 가. 아울러 상기 고부가 작물 뿐만이 아니라 앞으로 인건비가 올라가고 생산성 향상은 더 요구 됨을 고려할 때, 일반 작물에도 로봇의 적용이 필요하다.
- 나. 로봇의 구동 및 제어, 식물과 곤충의 인지에 대한 적절한 기술적 단계를 구분하여 경제성이 있는 인지 및 분사 시스템을 구현할 필요가 있다.

6. 작물경작-해충관리-전자·전산 학제 연구를 통한 농업분야 IT(Information Technology) 및 ET(Environmental Technology) 기술 개발의 필요성

- 가. 우리나라뿐만이 아니라 국제적으로도 친환경적 농업생산의 중요성이 대두되고 있다.
- 나. 친 환경, 친 생태적 농업기술을 효과적으로 달성하기 위해서는 작물 경작-해충-전자·전산의 연계 연구는 ET 및 IT 기술을 절실히 요구한다.
- 다. 그러나 이때까지는 장비나 분석방법의 제한으로 인해 형태 정보 추출이나 구동장치 구현에 관한 연구는 희소하고 최근에 시작되었다.
- 라. ET와 IT기술은 기타 발작물이나 과수원에 등에 응용성이 높을 뿐만 아니라 기타 수산업, 자연 보존, 의료 분야 등에 넓게 적용될 수 있다.
- 마. 중국 등 동아시아에서도 시설원예 등의 집약적 농업이 급속히 발전되고 있으므로 본 연구는 앞으로 국제적인 사업을 선도할 수 있는 미래형 연구가 될 수 있다.

제 3 절 연구의 목표

위에서 제시한 연구 목적을 달성하기 위한 구체적 목표를 다음과 같이 설정하였다.

1. 해충 자동인지와 미량분사 구동시스템을 장착한 로봇 팔 구동시스템을 구현하여 온실 내에서 “상시 해충 순찰 체제”를 확립하고 특허화한다. (특허출원 1건)
2. 정밀 방제를 위한 로봇 팔 자동구동 장치를 관련 기업체에 기술 이전한다. (기술 이전 1건)

3. 재배-해충관리-자동방제-온실로 연계되는 관리 시스템 프로그램을 개발하고 보급한다. (영농활용 1건)
4. 기타 해충의 작물체 및 온실 내 분포에 대한 정보를 경작자 및 연구자들에게 보급한다.

제 4 절 연구의 내용

본 연구는 해충학, 공학 및 생태 모델링이 협력하는 학제 연구인데 연구 효율을 위해 크게 세 개의 세부 과제로 나누었다. 제 1 세부과제는 해충의 인지와 생태적 분포에 대한 “작물 개체별 및 온실 내 해충 분포의 결정”을 위한 연구, 제 2 세부과제는 로봇을 개발하고 방제 효과를 검증하는 “살충제 미량 분사시스템 개발 및 정밀 방제 법 구현” 연구, 그리고 제 3 세부과제는 개발된 로봇을 직접 현장에서 효과를 검증하는 “파프리카 온실에서 농약 살포 및 방제기술의 포장 적용과 방제 효율 개선 연구”의 연구로 나누었다.

제 1 세부과제에서는 생태 모델링 전문가와 로봇 팀이 공동으로 참여하여 식물 잎과 해충의 인지 및 해충 분포 모델구현을 목표로 하였다. 적절한 알고리즘을 이용하여 식물 잎과 해충을 인지하고, 확산모델 등을 이용하여 온실 내에서 해충 군집의 시-공간적 분포 및 분산 양상을 파악하였다.

제 2 세부과제에서는 해충 방제 전문가와 로봇 팀이 협조하여 로봇을 제작하고, 상기 인지 프로그램 탑재 후 해충 인지 및 살충제 살포 효과를 평가하고 방제법 구축을 목표로 하였다. 레일형 로봇(이름: 춘사이)과 케이블카형 로봇(이름: 케봇)의 두 가지 로봇을 구현하였으며, 구동 시스템, 해충 채집 장치, 살충제 자동 미량 분사 장치 및 제어 시스템 등을 장착하였다.

제 3 세부과제에서는 진주농업기술원의 온실에서 작물, 해충, 로봇 구동 시설을 갖추고 로봇 동작을 종합적으로 현장에서 시험하도록 하였다. 온실을 확보하고, 작물 재배, 해충 사육, 로봇 구동 시설(예 레일 설치)을 갖추어, 제 1 및 제 2 세부과제 연구자와 협조하여 해충 인지에서부터 방제 효과 평가까지 제반 현장 시험을 수행하고 재배자의 입장에서 현장 요구 사항(예, 설문 조사)을 분석하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외 현황

1. 형태 패턴 인지에 관한 연구

가. 외부 대상물(target object)을 디지털화하여 입력하고 이를 적절히 인식하여 영상 정보처리 후 인식대상으로서 판단하는 기계시각시스템(Machine Vision System)이 형태 패턴에 적용되었다.

(<http://www.incubators.org.il/07018.html>)

나. 생물 영상처리는 주로 의학분야에서 많이 적용되었으며 1950년대 말 미국의 Bostrom, Tolls 등에 의해서 의학용 화상처리 기기로서 세포의 자동 진단장치가 제작되어 세포나 핵의 지름 및 핵의 농도를 이용하여 암세포를 진단하고자 하였다. 1996년에 시각정보를 활용하여 장애물을 피하여 목적지를 도달하는 효율적인 경로를 파악하여 이동이 가능한 로봇이 개발되었으며(Thrun 1996), 벌과 같은 곤충을 추적하여 얻은 초음파 영상을 분석하여 네비게이션에 사용할 수 있도록 하는 기술도 개발되었다(Walker 등 1996).

다. 기계시각시스템은 국외에서 최근 활발히 진행되고 있다. DSP(Digital Signal Processing)기반 고해상, 고속 범용 영상시스템 등의 신제품 출시가 급속히 증가되고 있고, 농업분야에서는 미국에서 영상시스템의 연구를 통해 우량 채소 씨앗 분별을 위한 연구가 수행되었다고 보고되었다.

(<http://www.incubators.org.il>).

라. 또한 이미지 분석을 통해 균류를 분류·계수하여 살충제의 사용을 줄이는 소프트웨어가 개발되고 있는데, 색깔 변화, 모양, 에너지 등의 특성에 따라 적절히 주요정보를 추출하여 목적물을 계수한다고 보고되었다.

(<http://agrenv.mcgill.ca>).

마. 최근 인공신경회로망 등의 인식 알고리즘의 발달로 영상인식이 급속히 증가하고 있다. 생물 형태의 복잡성과 비선형적인 특성 추출에 적합한 인공신경회로망이 문자인식(예, Drouhard et al., 1995)이나 얼굴인식(예, Lawrence, 1997) 등에 적용되었다.

바. 형태의 구조적 관점에서 형태상을 나타내는데 튜링(Alan M. Turing)은 동물의 모피 모양은 형태소라 불리는 화학물질이 집중하는 선구 패턴에 따라 형성된다는 것을 시사한 바 있다(Turing, 1952). 이후 생물형태 구성(stucture)을 분석하여 표피에 나타나는 문양(pattern)이나 골격구조 등을 수리적으로 해석하였다(Murray, 1989).

사. 이 후 튜링의 초기 연구를 보다 발전시켜서 무늬에 관한 반응확산 모델이 소개되었고, Murray(1982)는 나비 날개 문양 형성에 대해서 분석하였다. 최근 발생과정과 연계하여 생물의 유전정보가 구조·형태적으로 어떻게 표출되는가하는 관점에서 연구가 수행되고 있다.

아. 보이샤드 등(Boissard, Martin & Moisan, 2008)이 현장에서 장미로부터 가루이들을 분리해 내는데 적용할 수 있는 watershed 분리법에 기초한 다방면 인식 영상접근방법을 제안하였다. 솔리스 등(Solis et al., 2009)은 야외에서 끈끈이 트랩에 포획된 가

루이 이미지를 세그멘테이션을 탐사하기 위해서 Otsu 세그멘테이션에 따른 기계 영상 기법의 적용을 시도하였다. 그리고 이러한 연구들을 바탕으로 하여 곤충을 자동으로 유형화하는 연구가 발전하였다(Solis et al., 2011).

자. 또한 온라인 해충 모니터링 시스템도 최근 제안되었다. 여러 종류의 온실에서의 온라인 모니터링 시스템(Bechar, Moisan, Thonnat & Bremond, 2010; Kumar, Martin & Moisan, 2009)들이 고안되었으며, 이것들은 끈끈이 트랩, 실시간 관찰 카메라와 이미지 인지, 기록 소프트웨어들로 구성되었다.

2. 로봇 및 자동 구동 제어장치에 대한 연구

가. 최근 몇 십 년 동안 진보된 구동 및 제어 장치와 컴퓨터 인터페이스 개발로 로봇 기술은 급속히 발전하였다. 농업생산의 질적성장과 양적성장에 로봇기술이 기여하였다.

나. 로봇은 매우 다양한 농업분야에서 사용할 수 있는데 온실 등에서 사과를 수확하는 로봇, 잎을 따는 로봇, 살충제를 살포하는 로봇 등이 아래와 같이 소개되었다.

다. 사과를 수확하는 로봇은 1996년에 일본에서 개발되었다(Kondo 등, 1996). 이 로봇은 조종사, 광학센서, 기동장치 등으로 구성되고, 물리적 특성에 기초하여 개발되어 토마토, 오이, 포도 등을 수확할 수 있다.

라. 오이를 로봇 팔을 이용하여 수확하는 로봇은 2001년에 Henten 등에 의해 개발되었는데(Van Henten 등 2003), 1996년에 자동 오이 재배 로봇이 네덜란드농업성의 자연자원 및 음식 관리국(Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality)에 의해 the Institute of Agricultural and Environmental Engineering, IMAG B.V.에서 수행되었다.

마. 2003년에는 토마토 생산 로봇이 개발되었고(Sammons 등 2005), 2006년에는 자동으로 잎을 따는 로봇이 개발되었다(Ota 등 2007).

바. 최근에 새로운 재배 체계, 경제성제고, logistics, agro-robotic system 등의 다양한 측면에서 로봇 개발이 보고되었다.

사. 2007년에 자동 오이수확 로봇의 작동실험이 실제 농장에서 실행되었는데(Van Henten 등 2009), 평균적으로 74.4%의 오이 수확률을 나타내었다.

아. 온실에서도 최근 로봇이 성공적으로 운용되었고, 자동 살충제 방제기법이 1997년에 Austerweil M. 과 Grinstein에 의해 제안되었다(Austerweil 등 1997).

자. 온실에서의 살충제 살포 로봇은 2005년에 자세히 보고되었다(Sammons 등 2005). 온실에서의 로봇개발은 기온이 높고 습한 온실이라는 좁은 공간에서 잠재적으로 독성을 지닌 화학물질을 살포가 인간의 건강을 위협하는데 로봇은 이를 해결할 수 있다. 그러나 이 로봇은 식물지역 전역에 농약을 살포하였다. 이 로봇의 단점은 과도한 사용량과 살포가 정확하지 않았는데 본 연구에서는 해충이 있는 식물이나 온실 적정 부위에 미량 분사하여 살충제 살포를 최소화 하고자 한다.

차. Huang 등(Huang & Lee, 2010)은 조절된 빛 아래에서의 기계 영상을 기초로 하여 호접란 생체 조직 배양대를 위하여 자동으로 붙잡는 시스템을 개발하였다

카. 앵두 수확 로봇을 일본에서 개발(Tanigaki, Fujiura, Akase & Imagawa, 2008)하였으며, 딸기 수확 로봇도 개발(Hayashi et al., 2010)되었다.

제 2 절 국내 현황

1 온실의 해충관리에 관한 연구

- 가. 김 등(1986)에 의해 온실가루이의 서식식물 및 서식장소에 대한 연구가 보고되었다.
- 나. 가지(박 등 2007) 및 오이(전 등 2007)에서 온실가루이의 요방제 수준에 대한 연구가 있었다. 피망에서의 꽃노랑 총채벌레의 요방제 수준연구는 2007년 농과원에서 수행중이고 다음과 같이 온실에서의 주요 작물 및 해충에 대한 연구가 보고 되었다.
 - 요방제 설정관련 연구 현황 : 온실가루이(2004. 고려대. 토마토), 복숭아혹진딧물(04, 서울대, 고추), 담배나방(2004. 서울대, 고추), 꽃노랑총채벌레(04, 농과원, 고추), 온실가루이(06, 원예연, 오이), 온실가루이(06, 농과원, 가지)
- 그러나 파프리카에 대한 온실가루이의 요방제 수준 설정 및 방제에 관한 연구는 아직 수행되지 않았다.
- 다. 2007년 파프리카 온실 내에 대규모 농약 분사 로봇이 소개되었다.

2 패턴 인지에 관한 연구

- 가. 기계시각시스템의 세계적인 발전 추세에 부응하여 국내에서도 전자부품 검사기, 의약품 캡슐외관 검사기, 각종 기기의 결함 체크에 이용되었다.
- 나. 농업 관련 분야에서는 과일, 야채, 과자 등의 대소분별 등의 목적으로 이용되고 있다. 그러나 기술력 및 응용기술력 부족으로 대부분 외산 장비의 범용 영상시스템을 이용하는 상태이다.
- 다. 보다 복잡한 생물정보 인식에 관련하여서는 국내에서는 지문의 구조적 관계를 이용한 구문론적 방법으로 사람의 지문분류와 필기체 숫자의 모양의 수치적, 구조적 정보를 이용한 숫자 및 문자 인식 등에 연구가 있다(예, Lee 및 Kim 1995).
- 라. 농업 해충인지에 대해서는 본 연구진은 논에서 멸구류의 자동인지를 수행하였으며(박 등) “디지털 영상처리 알고리즘을 이용한 벼 멸구류의 밀도측정, 2003”의 논문을 발표한바 있다.
- 마. 조 등(Cho 등, 2007)은 생물 종에 관계하는 특정적인 색깔과 크기에 기초하여 가루이, 진디와 삼주벌레들을 포함하여 해충들을 자동적으로 확인해 내는 방법에 대하여 발표하였다.

제 3 장 연구 내용 및 방법

제 1 절 연구 개괄

1. 연구 주제 구성

본 연구는 해충학, 공학 및 생태 모델링이 협력하는 학제 연구인데 연구 효율을 증진하기 위해 크게 세 개의 세부과제로 나누었다. 제 1 세부과제는 해충의 인지와 생태적 분포에 대한 “작물 개체별 및 온실 내 해충 분포의 결정”을 위한 연구, 제 2 세부과제는 로봇을 개발하고 방제 효과를 검증하는 “살충제 미량 분사시스템 개발 및 정밀 방제 법 구현”, 그리고 제 3 세부과제는 개발된 로봇을 직접 현장에서 효과를 검증하는 “파프리카 온실에서 농약 살포 및 방제기술의 포장 적용과 방제 효율 개선 연구”로 하였다. 각 세부과제의 주요 주제는 아래와 같다.

가. 제 1 세부과제:

“작물 개체별 및 온실 내 해충 분포의 결정”(전 태수; 부산대학교)

- 해충 군집의 확산모델링
- 잎 인지 알고리즘 개발
- 해충 감지 알고리즘 구현

나. 제 2 세부과제:

“살충제 미량 분사시스템 개발 및 정밀 방제 법 구현”(송 유한; 경상대학교, 이 장명, 부산대학교)

- 로봇의 설계와 제작
- 로봇의 구동제어
- 정밀 미량분사 시스템 제어
- 국소 위치파악 항법 시스템 제어
- 자동 해충 유인장치 개발

다. 제 3 세부과제:

“온실에서 농약 살포 및 방제기술의 포장 적용과 방제 효율 개선 연구”(정 부근, 경남 농업기술원)

- 온실 건설
- 온실 내 로봇 운항용 레일 설치
- 시료용 작물과 해충 준비
- 온실 내에서의 현장 실험 주관

제 1 세부과제에서는 생태 모델링 전문가와 로봇 팀이 공동으로 참여하여 식물 잎과 해충을 인지하며 온실에서의 해충 분포 모델 구현을 목표로 하였다. 적절한 알고리즘을 이용하여 자연 상태의 식물 잎과 해충을 인지하고, 온실 내의 해충 공간 밀도에 대해 확산모델 등을 적용하여 온실 내에서 해충 군집의 시-공간적 동태를 파악하였다.

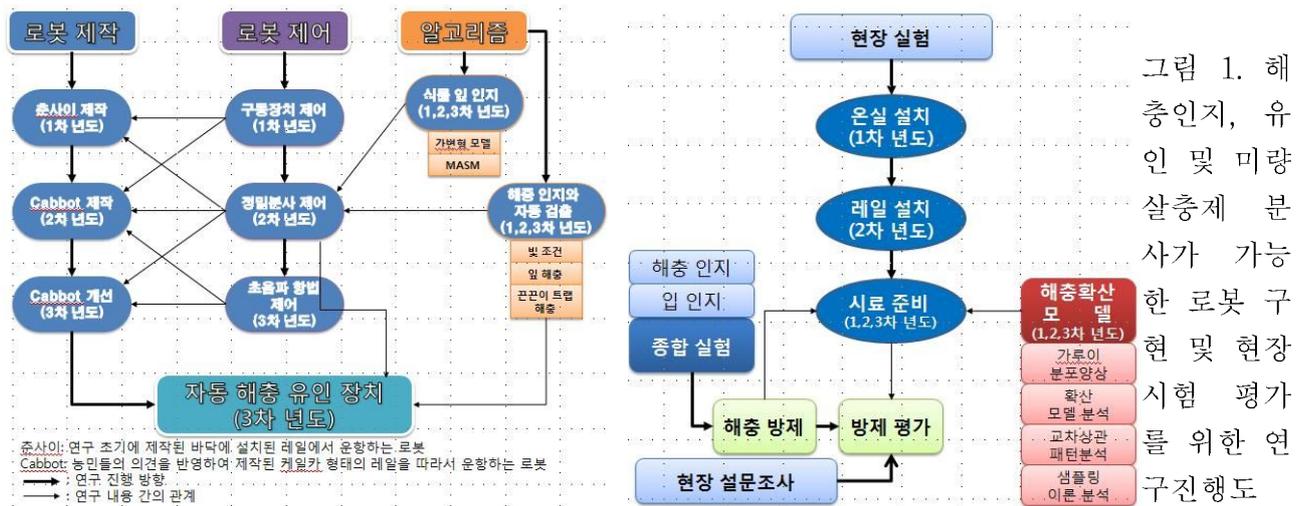
제 2 세부과제에서는 해충 방제 전문가와 로봇 팀이 협조하여 로봇을 제작하고, 상기 인지 프로그램 탑재 후 해충인지나 살충제 살포 효과를 평가하고 방제법 구축을 목표로 하였다. 레일형 로봇

(가칭: 춘사이)과 케이블카형 로봇(가칭: 케봇)의 두 가지 로봇을 구현하였으며, 구동 시스템, 해충 채집 장치, 살충제 자동 미량 분사 장치 및 제어 시스템 등을 장착하였다.

제 3 세부과제에서는 진주농업기술원의 온실에서 작물, 해충, 로봇 구동 시설을 전체적으로 갖추고 로봇 동작을 현장에서 시험하도록 하였다. 온실을 확보하고, 작물 재배, 해충 사육, 로봇 구동 시설(예 레일 설치)을 갖추어, 제 1 및 제 2 세부과제 연구자와 협조하여 해충 인지에서부터 방제 효과 평가까지 제반 현장 시험을 수행하였다. 나아가 재배자의 입장에서 개선 사항이나 현장 요구 사항(예, 설문 조사)을 분석하였다.

2. 연구 추진

해충학, 공학, 생태모델링 종합 연구이므로 유기적인 추진 전략을 수립하여 연구를 수행하였다. 연구 내용은 전체적으로 1) 하드웨어인 로봇을 제작하고, 2) 로봇이 감지해 낼 수 있는 잎과 해충의 인지 소프트웨어를 구현하며, 3) 인지 프로그램이 장착된 로봇을 작물과 해충이 갖추어진 온실 현지에서 인지율과 방제효과를 평가하며, 4) 해충 밀도 분포에 대한 모델을 구성하는 과제로 나누었다. 각 분야별 연구 수행과 협조는 그림 1과 같은 추진도에 따라 진행하였다.



가. 로봇 개발

로봇은 제 2 연구진과 제 1 연구진이 협조하여 레일형 로봇(춘사이)과 케이블카형 로봇(케봇)을 개발하였는데, 기계적인 구동과 기술적인 제어를 구현하였다(그림 1). 연구 1차 년도에 온실 바닥의 레일 위를 구동하는 레일형 로봇을 개발하고 제 2 연구진이 제시하는 인지 프로그램을 장착하고 식물 잎 인지와 곤충 인지 효과를 검정 하였으며, 농업기술관리센터 주관 2008농림수산식품과학기술대전에 참여하여 전시하였다.

연구 후반부에는 농업 현장에서의 실용성과 범용성을 감안(레일을 깔 수 있는 온실은 제한됨)하여 케이블카형 로봇(케봇)을 추가하여 개발하였다. 상기 레일형인 춘사이는 주로 파프리카에 적용 될 수 있는 반면, 케봇은 온실 상부에 레일이 설치가 가능하므로 일반 작물에 용이하게 적용 될 수 있다. 케봇에는 보다 정밀한 분사 장치, 초음파 항법 장치 및 온실 환경 측정 장치를 추가하였고, 특히 공기 분사 후 해충 인지가 가능하여 낮은 밀도에서도 해충을 채집할 수 있게 하였다. 로봇 운용을 위해 로봇의 구동과 잎 및 해충인지가 가능한 메뉴얼을 구현

하였다(부록에 첨부).

나. 잎 및 해충 인지

제 1 연구진은 로봇이 잎과 해충을 인지 할 수 있도록 제 2 연구진과 협력하여 연구를 수행하였다(그림 1). 1차 년도에는 비교적 단순한 상태에서 식물 잎과 해충을 구분하는 인지 프로그램(deformable template matching)을 개발하고 춘사이에 장착시켰다. 2차 년도에는 보다 섬세하게 자연 상태에서 Adaptive shape model(ASM) 등의 알고리즘을 이용하여 겹쳐지거나 불완전한 잎을 개체별로 인지하고, 모양 및 자세 등을 판단하는 소프트웨어를 구현하였다. 곤충의 경우 다중 프랙탈 분석(multifractal analysis)을 통해 끈끈이 트랩에 붙은 작은 개체를 인지할 수 있도록 하였다. 적절히 해충을 인지한 후 해충을 계수하고 기록되도록 하였다.

다. 인지 및 방제 효과 검증

구현된 로봇과 인지 프로그램이 과연 효율적인지 현장에서 확인하는 점이 매우 중요하므로, 제 3 연구진이 주가 되어 온실과 작물 및 해충을 확보하고 현장 평가 시험을 수행하였다(그림 1). 이를 위해 작물과 해충이 일정 시기에 공급되도록 재배 또는 사육하며 현장 여건에서 인지 및 방제 효율 등이 수행될 수 있도록 식물 잎, 해충 등의 촬영 조건 등을 최적화 하였다. 상기 춘사이와 케봇의 두 가지 로봇에 대해 인지효과와 방제효과를 온실에서 검증하였고, 트랩을 장착한 로봇의 유인효과를 검증하고 아울러 해충 관리 현장에서의 문제점을 제시하고 개선하도록 하였다.

라. 해충 분포 및 분산에 대한 모델

효과적으로 해충을 인지하고 약제를 살포하기 위해서는 포장(온실) 내의 해충 밀도와 동태를 적절히 파악할 필요가 있다. 특히 해충은 시공간에서 확산하므로 해충 분포가 다양하게 나타나는데, 해충의 공간 분포 및 확산 양상을 규명하기 위해서 제 1 세부 연구진이 제 3 연구진이 구한 자료에 대해 적절한 모델을 적용하였다(그림 1). 사육한 가루이를 온실 내에 접종시키어 밀도를 계수 한 후 밀도 변이를 분석하고 공간 분포에 대한 정보를 얻었다. 1년 차(2009년도)에는 파프리카 실험을 위한 작물이 준비되지 않았으므로 토마토를 대상으로 가루이를 접종하여 시공간분포를 확산모델로 분석하고 가루이 군집의 확산에 따른 계수를 계산하였다. 2년 차(2010년도)에는 파프리카를 재배하고 사육한 가루이를 접종하여 온실 내에서 분산을 연구하였다. 온실 내에서 가루이 군집의 시간에 따른 공간분포의 변화를 관찰하기 위해서 교차상관관계수를 구하였다. 3년 차(2011년도)에는 가루이 군집 분포에 대한 교차 상관관계 분석을 계속하고 샘플링 효과 등에 대하여 고찰하였다.

제 2 절 온실형 로봇 개발

1. 연구 개요

제 2 세부과제에서는 해충 방제 전문가와 로봇 팀이 협조하여 로봇을 제작하고, 제 1세부과제에서 구성한 인지 프로그램 탑재 후 해충 인지 및 살충제 살포 효과를 평가하고 방제법을 구축하는 것으로 목표 하였다. 레일형 로봇(가칭: 춘사이)과 케이블카형 로봇(가칭: 케봇)의 두 가지 로봇을 구현하였으며, 구동 시스템, 해충 채집 장치, 살충제 자동 미량 분사 장치 및 제어 시스템 등을 장착하였다 (연구 개괄의 그림 1 참조). 연구 1차 년도에 온실 바닥의 레일 위를 구동하는 춘사이를 개발하고 이에 따른 구동장치 제어를 완성하였다. 제 2 연구진이 제시하는 인지 프로그램을 장착하고 식물 잎 인지와 곤충 인지 효과를 하였으며, 농업기술관리센터 주관 2008농림수산식품과학기술대전에 참여하여 전시하였다.

연구 후반부에는 농업 현장에서 실용성과 범용성을 감안(레일을 깔 수 있는 온실은 제한됨)하여 케이블형 로봇(케봇)을 개발하였다. 상기 춘사이는 주로 파프리카에 적용 될 수 있는 반면 케봇은 온실 상부에 레일이 설치가 가능하므로 일반 작물에 적용 될 수 있게 하였다. 케봇에는 보다 정밀한 분사 장치, 초음파 항법 장치 및 온실 환경 측정 장치를 추가하였고 특히 공기 분사 후 해충 인지가 가능하여 낮은 밀도에서도 해충을 채집할 수 있는 유인 시스템을 장착하였다. 로봇 운용을 위해 로봇의 구동과 잎 및 해충인지가 가능한 매뉴얼을 구현하였다 (부록에 첨부).

2. 레일형 로봇 구현

연구 1년차에, 바닥에 설치된 레일을 따라서 운행하는 로봇, “춘사이”를 구성하였다. 고가 작물인 파프리카의 경우 온실 바닥이 평면이고 작물간 거리가 넓으며 바닥에 로봇이 탑재 될 수 있는 파이프가 있음을 고려하여 레일형으로 구현하였다. 춘사이는 2개의 자유도를 갖는 팔을 갖고 있으며, 팔에는 노즐을 장착할 수 있어서 위-아래로 움직이면서 다양한 높이의 작물에 농약을 살포할 수 있었다. 카메라를 춘사이의 팔에 설치하여 연구 초반부에 간단한 여건에서 농약 살포를 위한 표적(곤충)을 감지할 수 있었다.

가. 전체 구성

춘사이는 몸체와 팔로 구성되었다. 몸체는 온실 내 설치된 레일을 따라 전후로 이동이 가능하다. 이 후 식물 근처에서 로봇 팔이 움직여 잎이나 해충을 인지한다. 로봇의 몸체에는 한 개의 수직 팔과 두개의 수평 팔이 부착된다(그림 로봇1). 상부에 부착된 수평 팔에는 잎 검색용 이중 카메라(Dual camera) 및 해충 검색용 카메라가 장착되고 하부 수평 팔에는 살충제 노즐이 부착된다. 수직 팔이 상하로 움직임에 따라 수평 팔은 오르내릴 수 있으며 적절한 높이에서 잎 또는 해충을 인지하거나 약제 살포를 위해 수평 팔이 동작된다.

나. 제어

이중 카메라로 구성된 입체영상시스템이 일차적으로 대상 식물과 식물의 잎을 인정한 후 위치를 기록한다. 앞서 언급한 바와 같이 잎이 인지되면 대상 잎의 위치가 로봇이 접근할 수 있는 로봇좌표로 전환된다. 이 좌표 값에 따라 로봇의 상하부 수평 팔이 움직이고, 이후 상부 수평 팔에 부착된 카메라가 잎 면으로 이동하여 병해충을 인지한다. 병해충이 인지되면 하부

수평 팔에 있는 스프레이 노즐이 인지된 해충의 위치에 대해 살충제를 적절히 분사한다. 이후 다른 잎과 식물에 대해 이 같은 과정을 반복한다. 춘사이의 제어과정은 다음에 기술하는 케봇의 제어과정과 이론적으로 동일하다. 둘의 제어에서의 차이는 서로 다른 모터를 쓴다는 것뿐이므로, 춘사이의 제어에 대한 설명은 다음의 케봇 제어설명으로 대치하도록 한다.

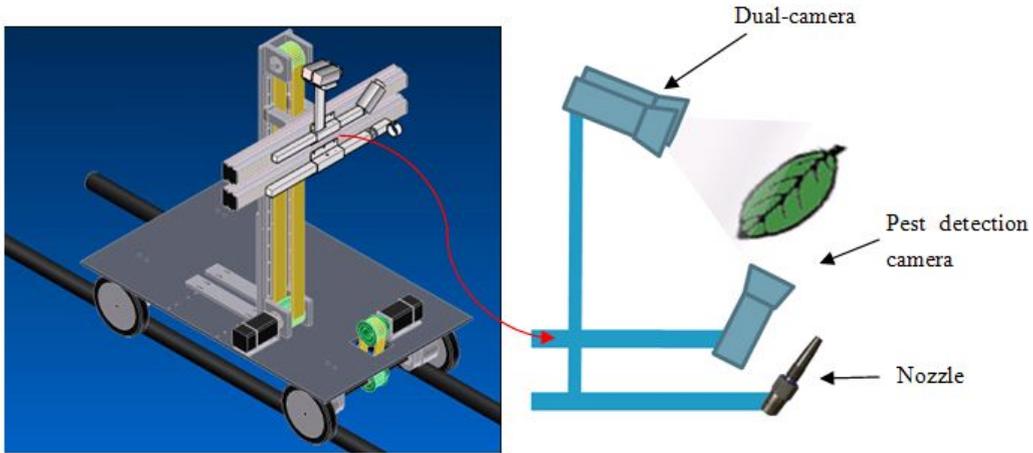


그림 로봇1. 자율 분사로봇의 전형. 잎 인지와 해충 감지를 위하여 사용되는 2중 카메라.



그림 로봇2. 제작된 자율 분사로봇의 사진.

3. 케이블카형 로봇 구현

2차 년도에는 1차 년도의 레일 위에서 구동하는 춘사이 로봇을 개선하여 온실 위의 레일에 로봇이 매달려서 케이블카 형태로 운용되도록 하는 새로운 로봇을 제작(케봇(Cabbot))하였다. 사전 답사 등을 통해 직접 농가에서 케이블카 형식으로 살충제 분사 시스템을 이용하는 점, 그리고 케이블카 형식의 로봇은 파프리카 외에 지상 레일 설치가 어려운 다른 온실의 작물에 대해서도 용이하게 적용될 수 있는 범용성을 고려하였다.

가. 전체 구성

케봇의 전체적인 크기는 약 1,800mm로 몸체와 팔로 구성되어 있다(그림 로봇3). 로봇의 구

동을 위해서 쓰이는 서브컨트롤러와 메인보드 등의 제어장치는 제어박스 안에 설치되어 있으며, 5ML의 살충제 통은 제어장치 위에 설치되어 있다. 로봇의 몸체에는 한 개의 수직 팔과 한 개의 수평 팔이 부착되어 있다. 수평 팔은 지면으로부터 200mm~1,000mm까지 움직일 수 있으며, 좌우 50mm를 움직일 수 있으며, 수평 팔의 상부에는 앞 스캔용 이중 카메라(Dual camera) 및 해충 검색용 카메라가 장착되어 있고 하부에는 살충제 분사를 위한 노즐이 부착되어 있다.

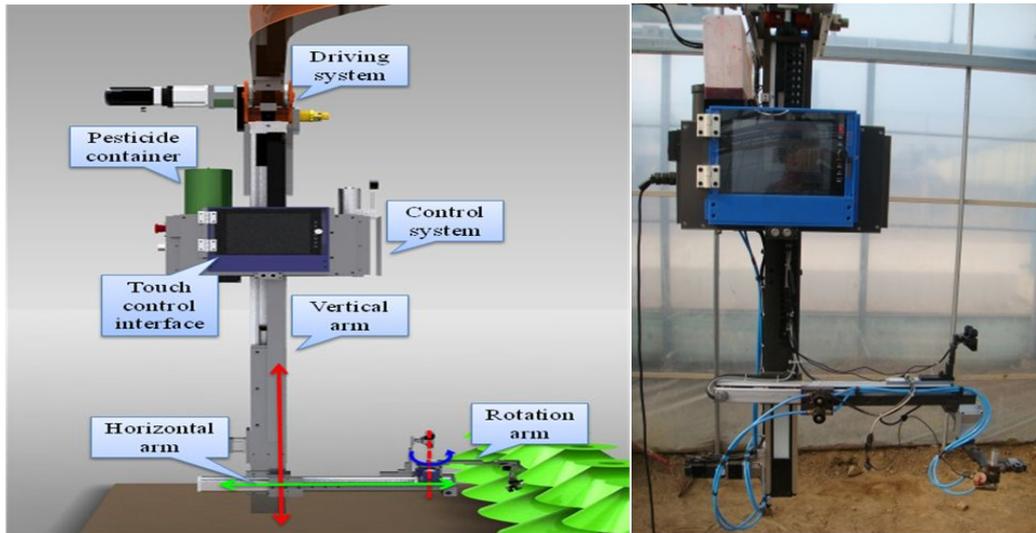


그림 로봇3. 로봇의 모식도

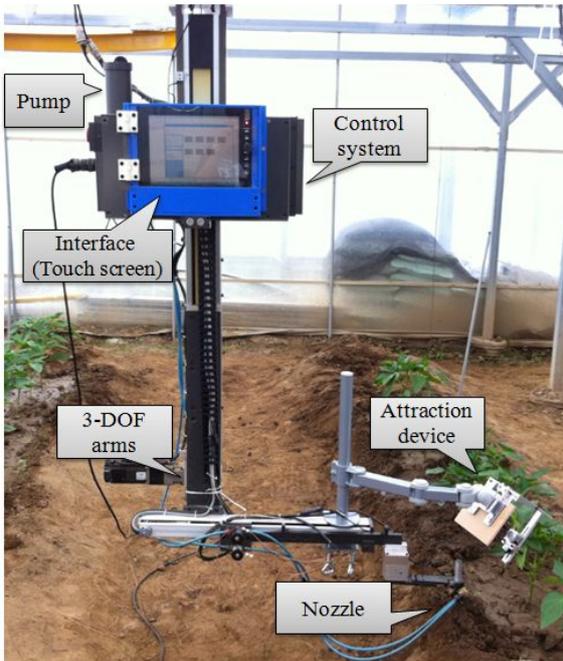
나. 기능과 제작

케봇은 로봇 제작회사에 발주((주)청송)하였고, 케봇의 개념적인 모습은 그림 로봇4A와 같다. 온실 바닥이 고르지 못하여 로봇이 자유롭게 움직일 수 없음을 고려하여 천정에 레일을 설치하고 로봇이 이에 매어 달리어 움직이는 “케이블카” 형태의 운용법을 택하였다. 케이블카 형태의 운용을 통해 신초 등이 있는 식물체 상부의 해충을 비교적 잘 감지할 수 있었다. 본 기기는 온실에 설치된 주행로를 따라서 모터로 움직이고, 식물체에 접근한 후 식물체의 잎에 붙은 해충을 인지하고 방제 등을 위한 상하좌우의 구동시스템을 작동하여 피사체를 인지하는데, 구동제어, 센서를 통한 자료수집, 제어용 컴퓨터, 해충인식을 위한 카메라 시스템, 및 방제를 위한 노즐과 약제보관 탱크로 구성되어 있다.

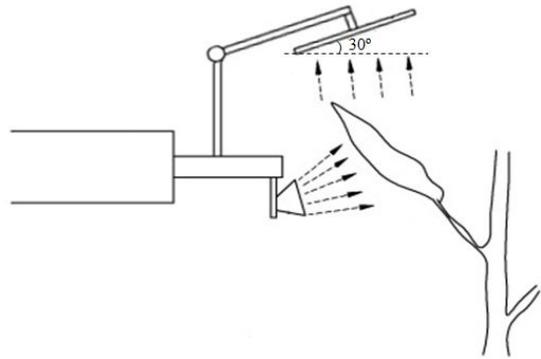
해충(담배가루이)의 유인 시스템을 별도로 장착하였다. 유인 시스템은 유인장치(끈끈이트랩), 카메라, 다중접합 연결 쇠 및 노즐로 구성되었다(그림 로봇4). 노즐은 해충 방제용으로 농약을 분무하기도 하지만 별도로 공기를 불어서(50 psi) 담배가루이가 비상하도록 하였다. 끈끈이 트랩((주)그린아그로텍, 경산)은 폭 100mm x 길이 150mm의 크기로 황색바탕에 녹색 격자가 그려진 평판이었다. 이 끈끈이 트랩을 두꺼운 판지에 붙여서 15mm의 테두리를 두른 다음 탈착이 가능한 케봇에 부착하였다(그림 로봇4).

카메라는 웹 카메라(Webcam)의 일종으로 Logitech Company회사 제품 모델(QuickCam C905)을 사용하였고, 2 메가픽셀(megapixel) 센서를 가지고 최대 1600 x 1200 pixels의 해상도를 나타내었다. 카메라는 끈끈이 트랩에서 100mm 떨어진 위치에 지면과의 각도가 0 - 180 도가 되

게 부착하였고 끈끈이 트랩에 유인된 바람으로 교란된 담배가루이가 부착되도록 하였다(그림 로봇4).



A. 케봇의 개념도



B. 유인정치에서의 트랩 각도

그림 로봇4. 자동 해충제어 로봇과 자체의 유인 시스템

4. 로봇 제어

본 과제에서 개발한 무인정밀 방제로봇은 재배-해충관리-자동방제-온실로 연계되는 관리 시스템 소프트웨어로 구현할 수 있도록 한다. 아울러 해충관리를 위한 일반적인 정보 시스템 자료는 로봇 동작법, 경작자 정보관리와 샘플링 및 분사시스템 전략 등으로 나누어 구현하였다.

가. 소프트웨어 설치 정보

소프트웨어는 C++로 쓰여 진다. 그림 로봇5 과 같은 interface로 나타내고 아래사항을 고려하도록 하였다.

- (1) 소프트웨어는 주 조정 컴퓨터와 작업기 본체에 전체 상황 모니터링 및 작업기 제어에 필요한 데이터 수집 및 분석에 적합하도록 설계함.
- (2) 얻어진 데이터는 케이블을 통해서 전송함.
- (3) 제어 프로그램은 크게 작업기 컨트롤러용과 카메라용 두 부분으로 나누어짐.
- (4) 제어 프로그램은 GUI(Graphical User Interface)를 이용하여 사용자가 손쉽게 사용할 수 있도록 함.
- (5) 연구 여건에 따라 환경모니터링 센서 모듈로부터 얻어진 정보를 이용, 시설하우스 내의 각종 장치 (환기창, CO2발생기, 가습기 등)를 제어할 수 있는 interface를 제공함.

(6) 작업 모드는 수동 모드와 자동 모드로 나뉜. 자동 모드는 방제 작업과 환경 모니터링 작업에 따라 적절히 나누어 사용되는데, 주 조정 컴퓨터에서 방제작업과 환경 모니터링 작업에 작업기를 자동으로 제어한다.

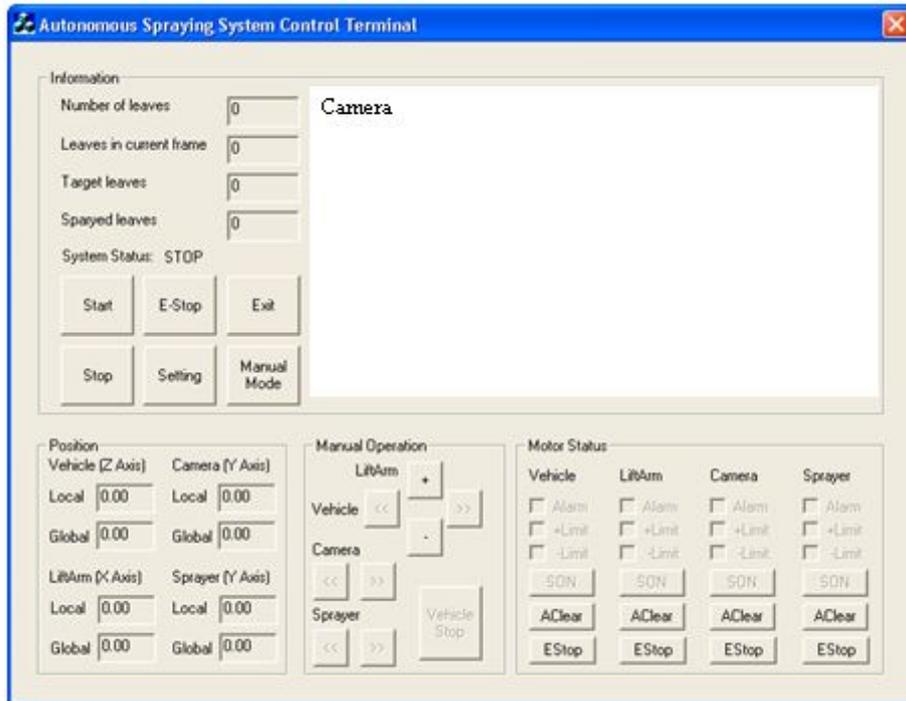


그림 로봇5. Software GUI interface (Example)

나. 로봇동작법

로봇 작동 모식도는 아래 그림 로봇6 와 같다

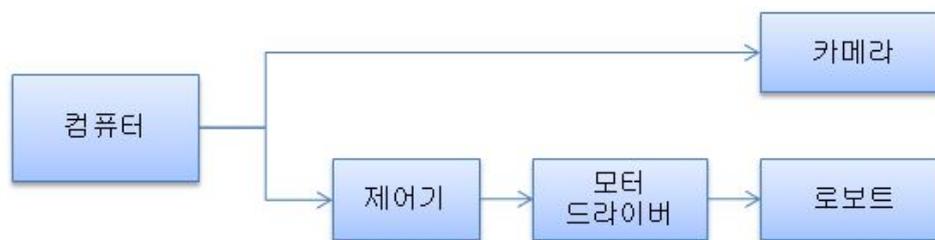


그림 로봇6. 작동을 위한 로봇 시스템 모식도

로봇 작동프로그램은 카메라 작동(camera operation), 로봇 운동(robot motion)의 두 부분으로 구성되어 있으며 다중 스레드 프로그램 기술(multi-thread program techniques)이 사용되어 졌다. 다중 스레드 프로그램 기술의 장점은 여러 개의 데이터들을 동시에 병렬로 실시간 처리할 수 있다는 점이다. 로봇과 인지 카메라로부터 수집된 데이터는 컴퓨터로 전달되어 영상자료를 분석하여 분사위치에 대한 정보를 얻는다. 이어서 컴퓨터가 로봇에게 작동 명령을 내리고 카메라가 해충을 인지하여 분사노즐이 정확한 위치에 분사를 하게한다. 로봇은 모터드라이버와

제어기를 매개로 컴퓨터에 연결되었다.

로봇 작동 프로그램 흐름도(그림 로봇7)에서 보듯이 두 개의 스레드가 있는데, 하나는 카메라 작동(camera operation)과 영상분석 스레드이다. 카메라가 영상을 연속적으로 캡처하면 사용자는 카메라의 현재 위치를 알 수 있으며, 영상을 통해 정확한 정보를 얻을 수 있다. 이어서 얻어진 정보를 분석 한 후 동작, 정지, 분사와 같은 로봇 작동 명령을 내린다.

또 다른 스레드는 로봇조종 스레드(robot control thread)로서 카메라 스레드로부터 받은 명령을 수행하고 로봇의 기계적 부분이 대응하는 일을 실행하도록 통제한다. 위의 두 스레드는 상호 협동이 되고 동시에 일을 처리하도록 설계된다.

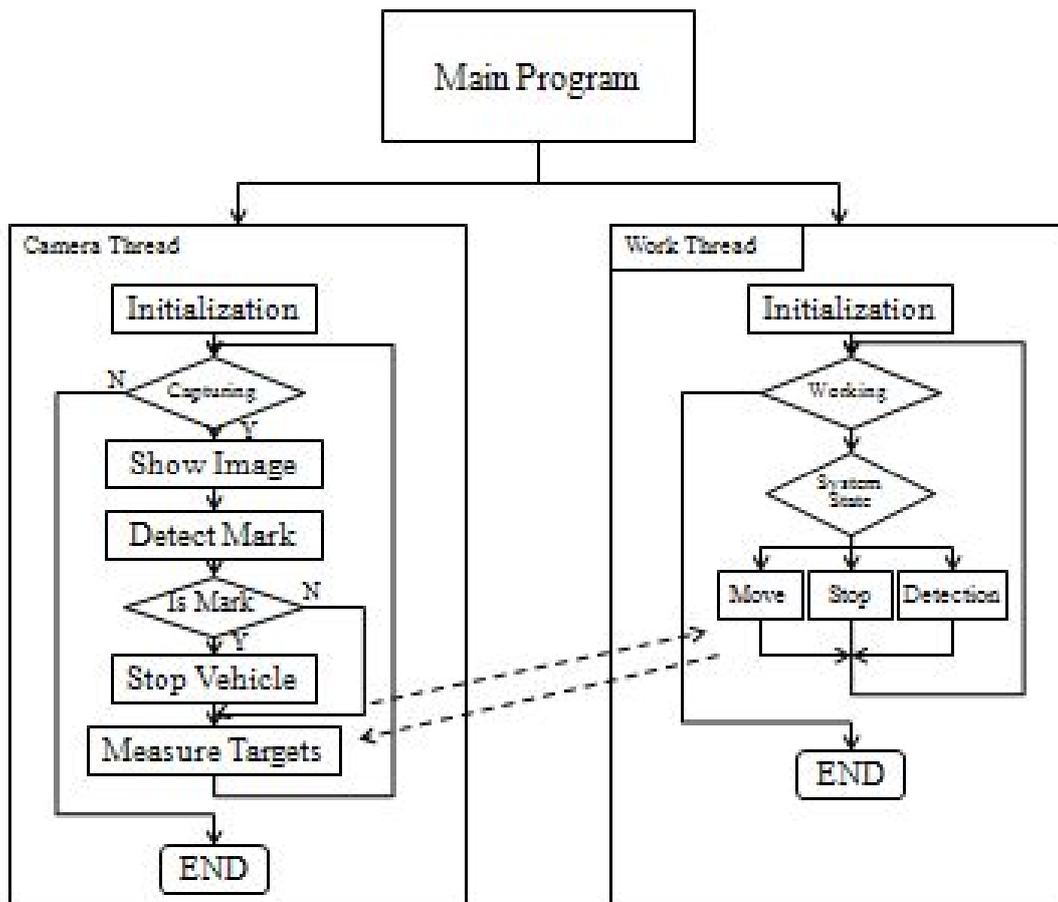


그림 로봇7. 로봇 제어 프로그램의 흐름도

다. 로봇 팔 제어(인지)

식물의 잎 뒷면에 서식하고 있는 해충을 인식하기 위해 로봇의 수평 팔에 설치된 렌즈 시스템은 그림 로봇8 과 같다. 앞의 식물 및 해충인지 과정에 추가하여 로봇팔의 구동 제어를 수행하였다.

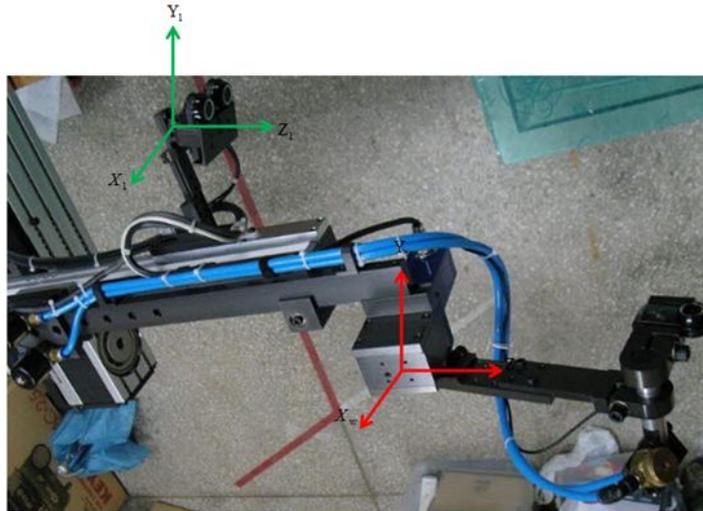
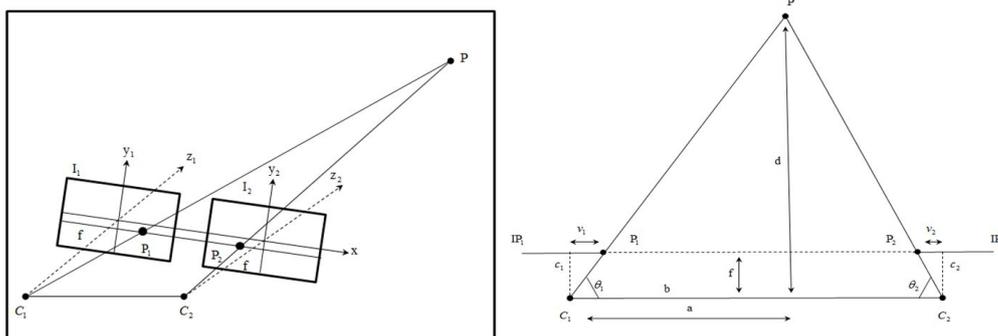


그림 로봇 8. 로봇 팔에 장착된 시각장치

로봇이 대상 앞의 위치를 인지하기 위해 로봇 팔에 장착된 카메라 렌즈를 통해 앞의 가장 자리의 좌표를 2차원 영상으로 인지하여 분석 가능한 3차원 좌표로 전환한다. 전환된 3차원 좌표를 통해 인지된 앞에 대한 로봇 팔의 위치제어와 분사노즐의 구동을 결정한다. 영상으로 인식된 이미지 좌표를 3차원 좌표로 변환하기 위해 삼각측정법을 이용한다(그림 로봇 9). 변환된 3차원 좌표를 통해 앞의 깊이를 계산하여 로봇 팔 및 노즐제어를 위한 정보를 제공한다.

얇은 삼각형(similar triangle)의 원리를 이용하여 카메라로 인식된 좌표 정보를 통해 앞의 깊이를 알 수 있다.

$$Z_c = b \cdot f/d \quad X_c = x \cdot Z_c/f \quad Y_c = y \cdot Z_c/f \quad (\text{로봇1})$$



- X_c, Y_c, Z_c : 카메라 좌표계중 앞의 X, Y, Z 축 좌표값
- x, y : 이미지 좌표계 중 앞의 X, Y축 좌표값
- b : 카메라 c_1 의 초점과 카메라 c_2 의 초점 사이에 있는 거리
- d : p_1, p_2 점 사이에 있는 거리
- f : 카메라의 초점거리

그림 로봇9. 로봇팔의 목표물 인지를 위한 삼각형 기법

로봇팔의 움직임은 직선운동과 회전운동으로 나누어진다. 로봇 팔의 전후/좌우/상하 운동으로 인해 3차원 공간에서 위치좌표(x, y, z)가 결정된다. 회전운동을 통해 로봇팔의 방향(카메라 및 노즐의 각도)이 결정된다. 매니플레이터(Manipulator; 로봇팔 조작기기)의 각 부분은 인지 및 살충제 살포작업을 수행하는 말단 부분의 위치 결정을 위해 동시에 움직이도록 한다. 따라서 매니플레이터의 움직임은 각 부분과 말단 부분 및 대상 작물을 좌표로 병렬적으로 나타내어야 한다.

카메라로 인식된 대상작물의 좌표는 로봇팔의 좌표를 기준으로 하여 새로운 좌표로 설정되는데, 기준점에 대해 좌표를 회전함으로서 대상작물의 상대적인 좌표를 새로 설정한다. 새로 설정된 좌표는 3x3 행렬로 나타낼 수 있는데 이러한 행렬을 회전행렬(rotation matrix)이라고 한다. 회전행렬은 작업 말단(렌즈 및 분사 노즐)부분의 위치를 나타내는데 적합하며 매니플레이터 및 로봇 팔 프레임을 기준으로 각각 렌즈와 노즐의 위치를 나타낼 수 있다. 3차원 공간에서 각 위치에 대한 벡터를 통해 회전 행렬을 하나로 결합하여 동차 행렬(Homogeneous matrix)을 생성한다. 식(로봇2)을 통하여 대상 작물 위치의 x, y, z 좌표 값을 구할 수 있다. Ry, Rz, Lx, Ly, Lz는 상수이며 이는 로봇 팔의 길이에 따라 측정하여 입력된다.

카메라 좌표계는 우측 카메라의 초점이 좌표계 원점으로서 가정하고 세 좌표계는 수평 팔 끝에 관절로서 좌표계 원점으로서 가정되었다. 좌표계를 변환해서 앞의 세 개의 좌표계 좌표 값을 구할 수 있다. 좌표 값에 따라서 노즐이나 회전각도를 제어할 수 있다(그림 로봇10).

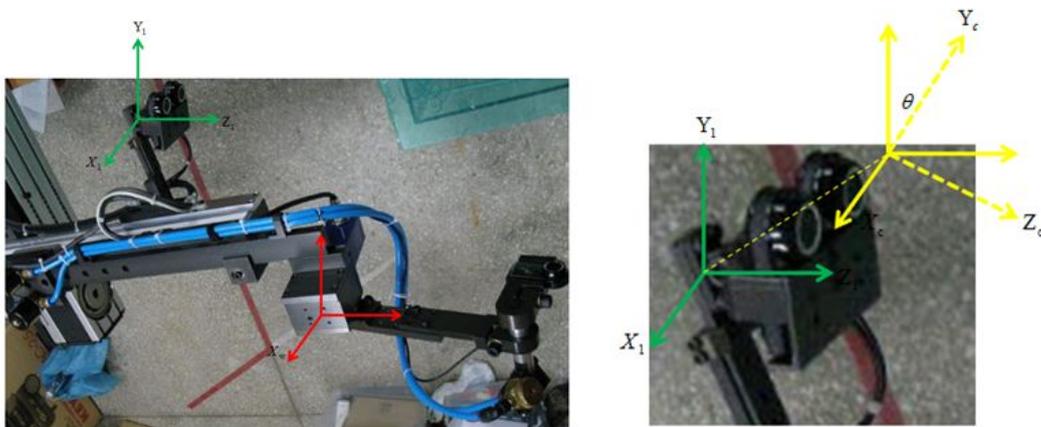


그림 로봇10. 좌표전환

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{b}{2} \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & R_y \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & R_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_x \\ 0 & 1 & 0 & L_y \\ 0 & 0 & 1 & L_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{로봇2})$$

라. 로봇 팔 제어(구동)

본 연구에서 어려운 점은 해충이 주로 앞 뒤에 서식하고 있다는 점이였다. 특히 앞이 밀식

하고 여러 잎이 겹쳐 있는 경우 로봇 팔이 적절히 접근하기 힘들었다. 일차적으로 연구를 용이하게 하기 위해 초반부에는 잎의 밀식여부나 자세를 판단하여 겹치지 않고 비교적 독립되어 로봇에 수평으로 놓여진 잎을 택하도록 하였다. 로봇 팔이 잎의 뒷면을 잘 인식할 수 있도록 2차 년도에서는 Horizontal arm과 Rotation arm(수평 로봇 팔과 회전 로봇 팔)을 제작하여 로봇 팔의 구동력을 증진하였다(그림 로봇11).



그림 로봇11. 로봇의 수평 팔이 수평으로 자란 잎에 접근하는 모양, 왼쪽: 접근 전, 오른쪽: 근접한 경우

해충 자동인지를 위해서는 총 4개의 카메라가 감지에 이용되었다. 이중 카메라 (dual-cameras) 장치는 잎의 3차원적 위치를 측정하는데 이용되며, 한 조의 카메라는 위에서 언급했다시피 잎 아래의 해충을 감지하고 다른 한 조의 카메라는 해충 샘플링 시스템에서 트랩 안에 채집된 해충을 인지하는데 사용된다.

로봇의 수평 팔에 설치된 분사기를 적절히 제어하기 위해 3 DOF(Degree of freedom)의 로봇 팔을 사용하였다. 3 DOF의 특징은 수직 이동(수직 팔), 수평 이동(수평 팔), 회전 이동(회전 팔)이 가능해 잎에 대한 접근이 자유롭다는 점에 있었다(그림 로봇12).



그림 로봇12. 3 DOF 로봇 팔

로봇 좌표에서 앞의 위치는 높이는 Y_w 축의 y 로 먼저 인식 되고, $O_w X_w Z_w$ 좌표축의 Z_w 축의 z 와 X_w 축의 x 로 그 지점을 찾아 P로 나타내어지며, P 점을 찾아 인식이 된다(그림 로봇13).

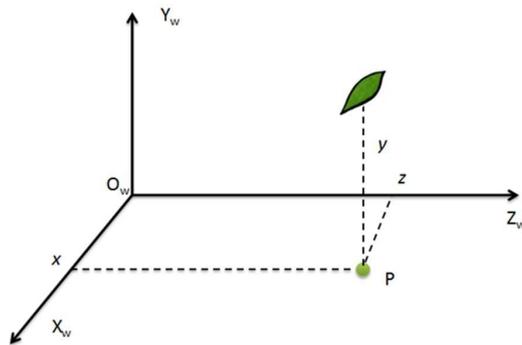


그림 로봇13. 로봇팔의 앞 인지

3 DOF의 로봇 팔에서 두 개의 팔은 선형적인 움직임을 가지고 나머지 하나의 팔은 회전의 움직임을 가지는데, 세로의 움직임이 Y_w 축의 y 값을 통해 인식이 되고, $O_w X_w Z_w$ 좌표축의 X, Z 는 수평 팔과 수직 팔의 움직임에 의해 인식이 된다(그림 로봇14).

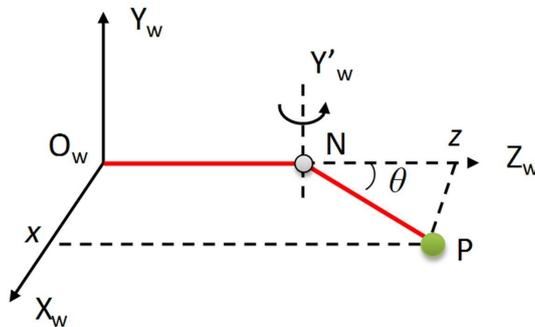


그림 로봇14. 수평 팔의 이동

길이가 일정한 회전 팔에 의해 생기는 선분 NP는 각 만큼 회전을 하여 의해 정확하게 지점 P에 이동이 가능하다. 이는 회전각의 값과 좌표(O_wN) 값이 계산 된다면 회전 팔이 목표지점(P)로 정확히 이동할 수 있다는 것을 의미한다. 수평 팔에 의한 X_w 축의 값이 계산 되어 고정되면, 회전각이 다음의 수식을 통해 계산된다.

$$\theta = \sin^{-1} \frac{O_w X}{NP} \quad (\text{로봇 3})$$

이후 수평 위치인 좌표(O_wN)의 위치는 다음의 식을 통해 계산된다.

$$O_w N = O_w z - \cos\theta \times NP \quad (\text{로봇 4})$$

이를 통해 회전각(θ)의 값과 이동 변수 좌표(O_wN)의 값이 얻어 진다.

마. 미량 분사장치 구현 및 제어

살충제 사용 시, 최소량을 정확히 분사하기 위해 미량 분사장치를 사용하였다. 미량분사장치는 본 연구의 기업 연구 책임자로 참여하는 신한그로회사의 미량분사장치를 사용하였다. 미량분사장치는 노즐, 공기 압축장치, 솔레노이드 잠금장치 그리고 살충제 보관 장치로 구성되어 있으며, 로봇 팔에 적절히 부착하였다(그림 로봇15).

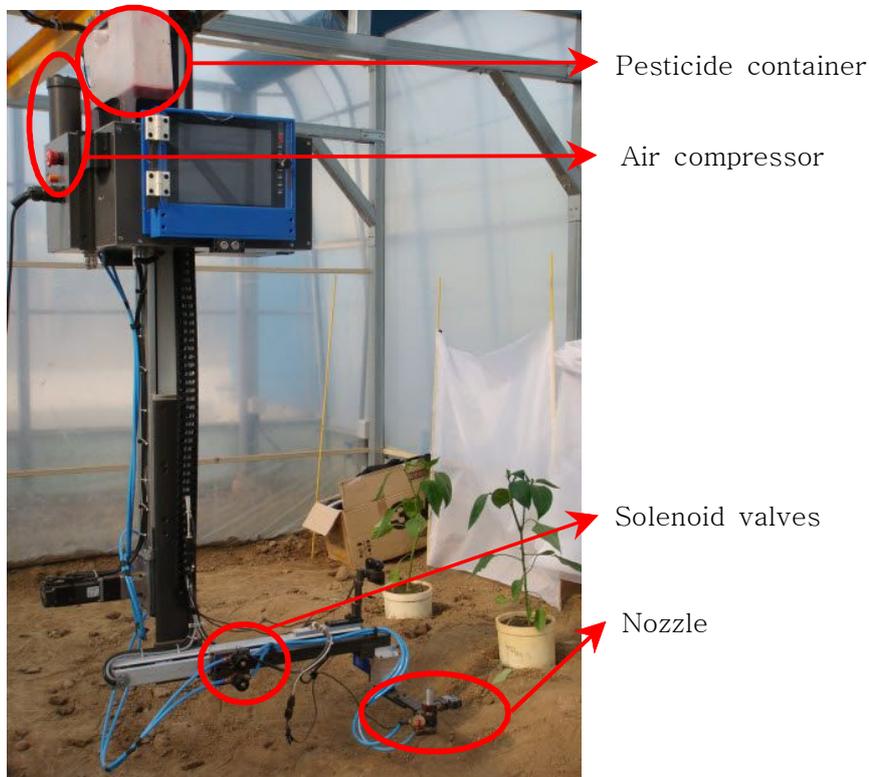


그림 로봇15. 미량분사 시스템

분사기는 로봇팔의 제어로 다음과 같은 과정을 통해 분사되었다.

- ① 조절장치의 명령 전달(해충 인지 후)
- ② 공기 압축기의 배선 조절
- ③ 솔레노이드 잠금장치 개방
- ④ 살충제 분사

노즐은 로봇의 팔 끝부분에 45°를 향하도록 설치되어 있어 식물의 잎을 향해 정확하게 분사할 수 있게 해주며, ULV(ultra-low-volume)노즐이 사용되어 최소한 양의 살충제가 사용된다.

공기 압력과 솔레노이드 잠금 장치를 조절하는 조절 장치는 시리얼 포트(RS232)를 통해 로봇과 신호를 교환한다. 탑재된 MCU(microcontroller)를 통해 로봇으로부터 명령을 받아 전기 신호로 바꾸는 방식으로 분사가 제어된다.

분사되는 살충제의 양은 분사되는 시간에 따라 계산 되어 지는데, 일반적으로 1회 분사에 1초의 시간이 소요된다.

이상의 장치들 이외에 여러종류의 환경 감지 센서들(예, 온/습도계, 이산화탄소 센서 등)도 장착하여 가동하였다.

5. 초음파 활성 무선표지를 이용한 위치확인 시스템의 설계, 제작

사용된 레일의 표면은 부분적으로 용접된 부분이 있어 부드럽지 않고, 바퀴에서는 미끄러짐 오류가 발생하였다. 이는 정밀한 제어에 난점이 되었다. 정밀한 제어를 위한 상대적인 위치 측정 시스템의 대응으로 GPS와 같은 위성 위치 시스템을 고려해 볼 수 있었다. 그러나 GPS는 좁은 지역에서 움직이는 로봇을 조종하기에는 정확하지 않으며 건물 안에서는 접근이 용이하지 않다. 그래서 많은 실내 유사-GPS 위치 정보 시스템이 개발되어 왔다.

본 연구에서 수 개의 활성 무선표지(Active beacon)들을 가상 위성 시스템의 대응으로 사용하였다. 활성 무선표지 시스템(ABS)은 라디오파 무선통신 장치와 초음파 송신기로 구성되어 있다. 위치 정보 시스템에서 각각의 무선표지는 유일한 식별번호를 갖는다. 레일 로봇은 라디오파 통신장치를 통해서 원하는 무선표지 식별번호를 보내어 특정한 무선표지를 선택할 수 있다. 무선표지가 로봇으로부터 자신의 식별번호 신호를 수신하면, 무선표지는 초음파를 다시 보내 무선표지에서 로봇 위에 설치된 초음파 수신기까지의 거리를 측정한다.

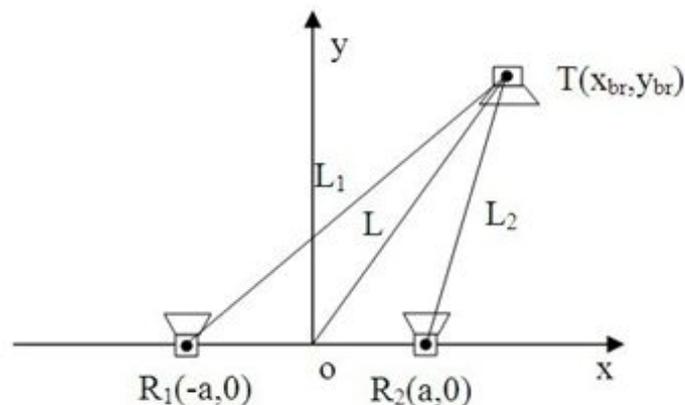


그림 로봇16. 초음파 센서들의 배치도

우리의 설계에서는 두 개의 초음파 수신기를 로봇의 중심에서 같은 거리에 설치하였다. 그림 로봇16 에서 O 는 로봇의 중심, R_1, R_2 는 로봇에 설치된 초음파 수신기이고, T 는 무선표지를 각각 표시한 것이다. 그림 로봇16 에서 볼 수 있듯이, 무선표지는 자신의 식별번호를 수신했을 때 초음파를 내보낸다. 그리고 두 초음파 수신기는 초음파 신호를 서로 다른 시간에 수신하게 될 것이다. 초음파 신호의 알려진 운동 속도와 시간을 사용하여 무선표지로부터 초음파 수신기까지의 거리가 계산된다. 초음파 수신기#1의 좌표를 $(-a, 0)$ 이라고 하고, 초음파 수신기#2의 좌표는 $(a, 0)$ 이라고 하고, 무선표지의 좌표는 (x_{br}, y_{br}) 이라고 가정한다. 그러면, 이 셋의 기하학적 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} (x_{br} - (-a))^2 + y_{br}^2 = L_1^2 \\ (x_{br} - a)^2 + y_{br}^2 = L_2^2 \\ x_{br}^2 + y_{br}^2 = L^2 \end{cases} \quad (\text{로봇5})$$

위의 방정식을 풀어서 양수 값의 y_{br} 을 포함하는 해를 선택하면, 로봇의 좌표계에서 기동로봇에 대한 무선표지의 상대적인 위치를 구할 수 있다. 좌표변환을 통하여 기동로봇의 위치는 기본적으로 전체 좌표계에서 절대적인 무선표지의 절대좌표 정보로부터 계산할 수 있다.

로봇 좌표계에서 무선표지 좌표계로의 좌표변환은 다음과 같이 되며

$$\begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \end{pmatrix} \quad (\text{로봇6})$$

이고, 여기서 $\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \end{pmatrix}$ 는 로봇 좌표계에서의 임의의 좌표이고, $\begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \end{pmatrix}$ 은 무선표지 좌표계로 변환한 좌표이며, θ 는 로봇 좌표계에 대한 무선표지 좌표계의 회전각도이다. 그리고 무선표지 좌표계에서부터 전체 좌표계로의 변환은 다음과 같은

$$\begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{bg} \\ Y_{bg} \end{pmatrix} \quad (\text{로봇7})$$

단순 평행이동변환이며, 여기서 $\begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \end{pmatrix}$ 는 무선표지 좌표계의 임의의 한 좌표이며 $\begin{pmatrix} X_{bg} \\ Y_{bg} \end{pmatrix}$ 는 전체 좌표계에서 무선표지의 위치좌표이고, $\begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \end{pmatrix}$ 는 전체 좌표계로 변환된 좌표이다. 위에서 언급한 대로, 반전된 전통적인 위치 설정 방법은 단지 하나의 무선표지를 사용한 위치 정보만 제공할 수 있다.

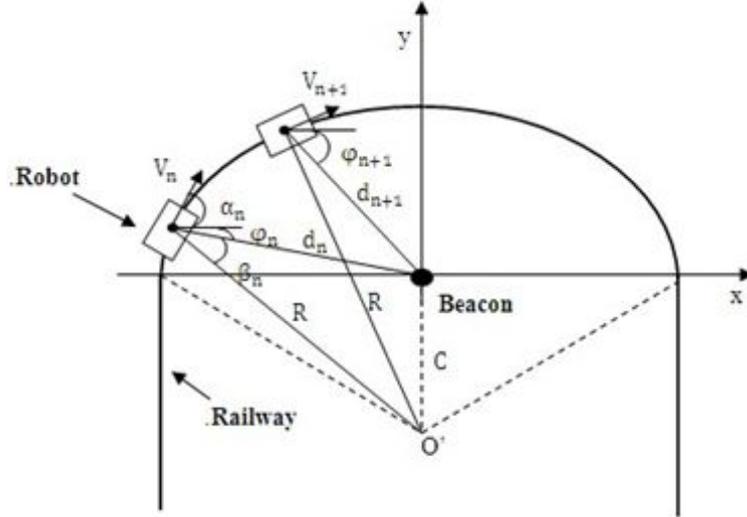


그림 로봇17. 곡선-원호 궤도위에서의 기동로봇의 움직임과 무선표지

로봇이 곡선-원호 레일에서 작동 될 때의 제어를 위해, 본 연구에서 동적 위치 설정 방법을 제안하였다. 그림 로봇17에서는 무선표지를 원점으로 하는 무선표지 좌표계에서 기동로봇의 위치좌표를 계산하는 과정을 설명하고 있다. 우선 기동로봇은 현재로 곡선-원호를 따라서 이동하고 있다고 하고 일정한 시간 간격 T 초 마다 무선표지에 신호를 보내면서 위치를 파악하고 있다고 가정한다. 또한 무선표지는 곡선-원호의 중심, O 와 원호의 중간을 잇는 선 위에 설치되어 있다고 가정한다.

이제 이 그림에서 도입된 기호와 변수에 대하여 설명하도록 한다. 우선 O 은 곡선-원호의 중심이고 무선표지의 좌표계는 무선표지의 위치를 원점, O , 으로 한다. 다음으로 무선표지와 원호의 중간을 잇는 선의 연장선을 y -축, 그것에 수직선을 x -축으로 한다. 그리고 곡선-원호의 반경을 R , 곡선-원호의 중심, O 에서 무선표지까지의 거리를 C 라고 한다.

이제 기동로봇이 무선표지에 n 번째 신호를 보냈을 때의 기동로봇의 위치를 $P_n = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix}$ 이라고 하자. 그리고 기동로봇의 위치에서 무선표지를 잇는 선분, $\overline{P_n O}$ 의 길이를 d_n , 이 선분과 x -축이 이루는 각도를 ϕ_n 이라고 하고, 또 이 선분과 기동로봇의 위치와 곡선-원호의 중심을 잇는 선분, $\overline{P_n O'}$ 이 이루는 각도를 β_n , 그리고 $\overline{P_n O}$ 와 기동로봇의 위치에서 원호의 접선이 이루는 각도를 α_n 이라고 정의한다.

또한 기동로봇의 속도가 충분히 느려서 기동로봇과 무선표지 간에 신호를 주고받으면서 로봇의 위치를 파악할 동안에는 로봇이 정지해 있는 것으로 가정하고, 다음 신호까지의 시간 간격은 로봇의 이동에 비해 충분히 짧아서 미분근사가 가능한 것으로 가정한다.

이상의 설정에서부터 로봇의 위치를 d_n, ϕ_n 으로 표현하면

$$P_n = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_n \cos \phi_n \\ d_n \sin \phi_n \end{pmatrix} \quad (\text{로봇 8})$$

이 되고, 이것을 시간에 관하여 미분하여 속도를 표현하면

$$\vec{v}_n \equiv \dot{P}_n = \begin{pmatrix} -\dot{d}_n \cos \phi_n + d_n \sin \phi_n \dot{\phi}_n \\ \dot{d}_n \sin \phi_n + d_n \cos \phi_n \dot{\phi}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \phi_n & d_n \sin \phi_n \\ \sin \phi_n & d_n \cos \phi_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{d}_n \\ \dot{\phi}_n \end{pmatrix} \quad (\text{로봇 9})$$

가 되고, 여기서 미분근사를 하여 $\dot{d}_n \approx \frac{\Delta d_n}{T}$, $\dot{\phi}_n \approx \frac{\Delta \phi_n}{T}$ 이라고 하면 Δd_n 과 $\Delta \phi_n$ 은

$$\begin{pmatrix} \Delta d_n \\ \Delta \phi_n \end{pmatrix} \approx T \begin{pmatrix} -\cos \phi_n & \sin \phi_n \\ \frac{1}{d_n} \sin \phi_n & \frac{1}{d_n} \cos \phi_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_n \\ \dot{y}_n \end{pmatrix} \quad (\text{로봇 10})$$

가 되고 여기서 $\Delta d_n = d_{n+1} - d_n$, $\Delta \phi_n = \phi_{n+1} - \phi_n$ 으로 근사한다. 이제 속도벡터에 대해 생각해 보면, 로봇은 원호를 따라 움직이므로 원운동을 하고 있다. 원운동을 하는 물체의 경우, 그 속도는

$$\vec{v}_n = \begin{pmatrix} \dot{x}_n \\ \dot{y}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_n \cos \alpha_n \\ v_n \sin \alpha_n \end{pmatrix} \quad (\text{로봇 11})$$

으로 표현할 수 있고 여기서 v_n 은 속력으로서 속도벡터 \vec{v}_n 의 크기이다. 그럼 로봇17 에서 설명되어 있는 α_n 은

$$\alpha_n = \frac{\pi}{2} - \phi_n - \beta_n \quad (\text{로봇 12})$$

의 방정식을 만족한다. 또한, cosine법칙에 따라서

$$\cos \beta_n = \frac{R^2 + d_n^2 - C^2}{2Rd_n} \quad (\text{로봇13})$$

$$\cos \left(\phi_n + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{C^2 + d_n^2 - R^2}{2Cd_n} \quad (\text{로봇 14})$$

가 되고, 위의 방정식들에서, 알려진 R , C 와 d_n 을 대입하고 $0 \leq \beta_n \leq \frac{\pi}{2}$, $0 \leq \phi_n \leq \frac{\pi}{2}$ 의 조건을 이용해서 β_n 과 ϕ_n 을 계산할 수 있다. 이제 β_n , ϕ_n 과 d_n 을 식(로봇13),(로봇8),(로봇11)에 대입하여 미소변이 Δd_n 과 $\Delta \phi_n$ 을 얻을 수 있어서 새로운 다음 번의 위치는

$$\begin{pmatrix} d_{n+1} \\ \phi_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_n + \Delta d_n \\ \phi_n + \Delta \phi_n \end{pmatrix} \quad (\text{로봇 15})$$

에 의해서 결정된다. 그래서 식(로봇8)에서 다음 위치의 x , y 좌표, x_{n+1} 과 y_{n+1} 을 결정한다.

측정신호에 노이즈가 있을 경우에는, 신호의 실제 값을 산정해 내기 위한 일반적인 도구로 Kalman filter의 방법이 있다. 기동로봇의 상태벡터, \vec{r} 은 2-차원 위치, (x, y) 와 지향방향, α 로 구성된다. 잘 알려진 점 모델의 상태벡터는 다음과 같이 정의되어

$$\vec{r}_{k+1} = \begin{pmatrix} x_k + Tv_k \cos \alpha_k + w_{1,k} \\ y_k + Tv_k \sin \alpha_k + w_{2,k} \\ \alpha_k + Tw_k + w_{3,k} \end{pmatrix} \quad (\text{로봇16})$$

이며, 여기서 T 는 샘플링 주기, $\vec{r} = (x, y, \alpha)^T$ 는 상태벡터, $w_k = (w_{1,k}, w_{2,k}, w_{3,k})^T$ 는 평균 0이고 분산 Q 인 Gaussian 노이즈, 즉, $w_k \sim N(0, Q)$ 이고, 아래첨자 k 는 시간 진행을 표현한다. 이러한 상태벡터의 정의에 따라, 기동로봇의 명령된 운동인 제어입력은 $u_k = (\vec{v}_k, \vec{\omega}_k)^T$ 로서 정의되며, 여기서 \vec{v}_k , $\vec{\omega}_k$ 는 각각 선형속도와 각속도이다.

이제 초음파신호에 의한 측정방정식은 다음과 같이

$$Z_k = h(\vec{r}_k, n_k) \quad (\text{로봇17})$$

놓고, 여기서 측정 노이즈, n_k 는 역시, Gaussian으로 잡아 $n_k \sim N(0, G)$ 이고, 함수 $h(\vec{r}_k, n_k)$ 는

$$h(\vec{r}_k, n_k) = \vec{r}_k + n_k \quad (\text{로봇18})$$

라고 한다. 이제, 다음에서 로봇의 상태벡터를 계산하기 위한 확장된 Kalman filter를 적용할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}
\hat{r}_{k+1} &= f(\hat{r}_k, u_k, w_k) \\
P_{k+1}^- &= A_k P_k A_k^T + Q_k \\
K_k &= P_k H^T (H_k P_k H_k^T + G_k)^{-1} \\
\hat{r}_k &= \hat{r}_k^- + K_k (Z_k - h(\hat{r}_k^-, n_k)) \\
P_k &= (I - K_k H_k) P_{k+1}^-
\end{aligned} \tag{로봇 19}$$

가 되고, 여기서 \hat{r}_k^- 와 \hat{r}_k 는 각각 교정을 하기 전과 후의 상태벡터 추정 값을 나타내고, K_k 는 Kalman filter 이득이다. 또한, P_k^- 와 P_k 들은 아래와 같이 정의되는 error covariance 행렬들이다: 즉,

$$\begin{aligned}
P_k^- &= E[(r_k - \hat{r}_k^-)(r_k - \hat{r}_k^-)^T] \\
P_k &= E[(r_k - \hat{r}_k)(r_k - \hat{r}_k)^T]
\end{aligned} \tag{로봇 20}$$

이다. 그리고 A_k , H_k 행렬들은 각각 비선형 함수 f 와 h 의 상태벡터 \vec{r} 주위에서의 Jacobian 행렬

$$\begin{aligned}
A_k &= \frac{\partial}{\partial r} f(\hat{r}_k, u_k, 0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -v_k \sin \alpha_k \\ 0 & 1 & v_k \cos \alpha_k \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
H_k &= \frac{\partial}{\partial r} h(\hat{r}_k, 0)
\end{aligned} \tag{로봇 21}$$

이다.

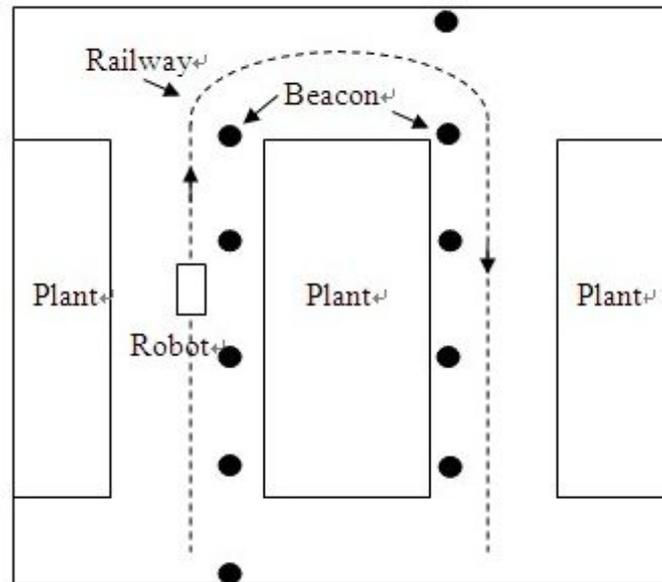


그림 로봇 18. 온실 안에서의 무선표지의 설치

온실 안에서의 무선 표지와 기동로봇의 궤도의 설치상황을 그림 로봇18 에서 설명하였다. 온실 안에서의 초음파 통신 거리와 장애물들의 분포 등을 고려하여, 온실 벽이나 철제 빔에 11개의 무선 표지를 설치하였다.

위치확인 시스템의 실험 결과를 그림 로봇19 에 제시하였다. 이웃하는 무선표지 범위의 중간에서의 오류를 제외하면, 심각한 오류는 발생시키지 않았다. 이상의 결과를 바탕으로 우리가 구축한 온실 내에서 기동로봇의 위치 확인 방법이 실현 가능하고 효과적임을 확인하였다.

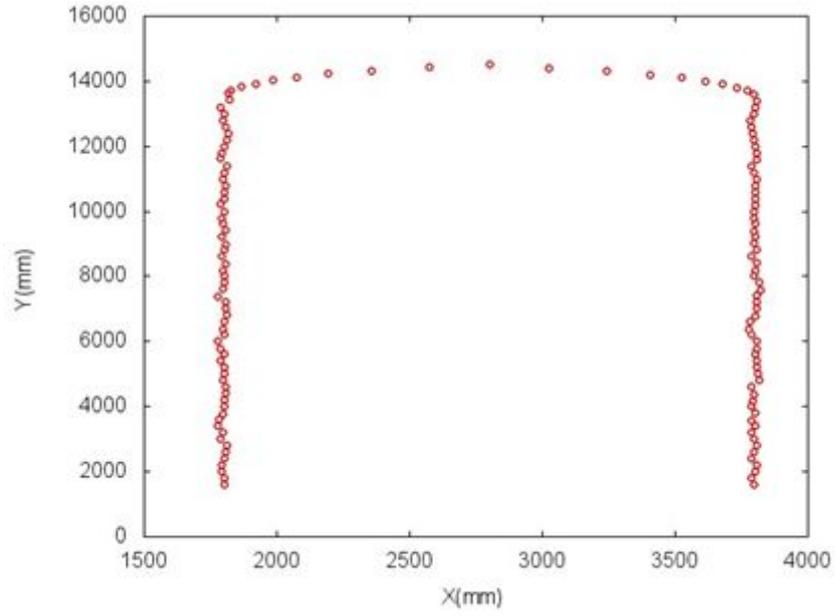


그림 로봇 19. 제시된 위치확인 시스템에 대한 실험 결과

실험을 통하여 검정하였을 때, 구축되어진 위치확인 시스템은 위치 제어 오류가 3mm 이내로 나타나 살충제 분사나 잎 및 해충 인지에서 요구하는 정확도를 만족하였다.

제 3절 잎 및 해충 인지

1. 연구 개관

로봇이 잎과 해충을 인지할 수 있도록 제 1 연구진이 제 2 연구진의 도움을 받아 수행하였다(그림 1). 1차 년도에는 비교적 단순한 상태에서 식물 잎과 해충을 구분하는 인지 프로그램(변형 주형방법)을 개발하고 춘사이에 장착시켰다. 곤충의 경우도 크기와 색깔(deformable templates)로 인지하도록 하였다. 2차 년도에는 보다 섬세하게 자연 상태에서 Adaptive shape model (ASM)의 알고리즘 등을 이용하여 겹쳐지거나 불완전한 잎을 개체별로 인지하고, 모양, 자세 등을 판단하는 소프트웨어를 구현하였으며, 곤충의 경우도 다중 프렉탈 분석 등을 통해 야외 조건에서 끈끈이 트랩에 붙은 작은 개체를 인지할 수 있도록 하였다. 적절히 해충을 인지한 후 해충을 계수하고 적절히 기록되도록 하였다.

2. 잎 인지: 단순형

해충 인지를 위해서는 일차적으로 해충이 붙어 있는 작물의 잎 인지가 선행되어야 하는데, 연구 초반부에 비교적 난이도가 낮은 상태에서 잎을 인지하도록 하였다. 독립적으로 비교적 떨어져 있고 겹치지 않은 잎을 대상으로 하였다. 입체 카메라를 통해 개개의 잎의 인지를 수행하고, 분사를 유도하거나, 해충 식별을 위해 3차원 위치를 알아내었다.

가. 잎 이미지 분석

식물의 잎은 많은 수가 겹쳐 달려 있으므로, 이들 중 한 개의 잎만 분리하여 식별하는 작업은 복잡하며 단독 경로로는 힘들다. 따라서 여러 가지의 방법을 통한 정보를 조합함으로써 구할 수 있다. 복잡한 배경으로부터 잎에 대한 정보를 얻기 위해서는 우선 개개 잎의 윤곽, 모양, 색상 등을 세부적으로 파악하고 이를 다시 종합적으로 분석하는 과정을 거쳐야 한다. 잎은 처진 것, 포개져 있는 것, 구부러진 것, 반쯤 잘려진 것 등 다양하게 달려있는데, 복잡한 배경으로부터 온전한 식물 잎을 찾기 위한 정보를 얻기 위해서 다음과 같은 인지 과정을 거쳤다.

(1) 격차지도(Disparity map) 구성

잎의 형태적 양상을 파악하기 위하여 일차적으로 잎의 영상으로부터 격차지도를 구성하여, 잎의 모양을 삼차원(3D) 공간에서 재구성하였다(그림 인지1). 격차지도를 통하여 식물 잎에 대한 상대적인 거리 차(심도 차)를 알 수 있고 거리 차의 불연속성에 따라 잎을 구분하고 잎들의 공간적인 배열에 관한 정보를 얻을 수 있었다. 그림 인지1에서 구현된 격차지도를 완성하기 위해 입체영상시스템에 사용되는 쌍안입체영상을 사용하였다(Nielsen et al., 2005). 쌍안 입체영상시스템을 통해서 잎의 윤곽, pose(자세), 깊이(심도)에 관한 정보를 제공하였다. 그림 인지1에서 보듯이 각 잎의 양태가 음영으로 표시되어, 잎의 3차원 형태적 정보를 추출할 수 있었다.

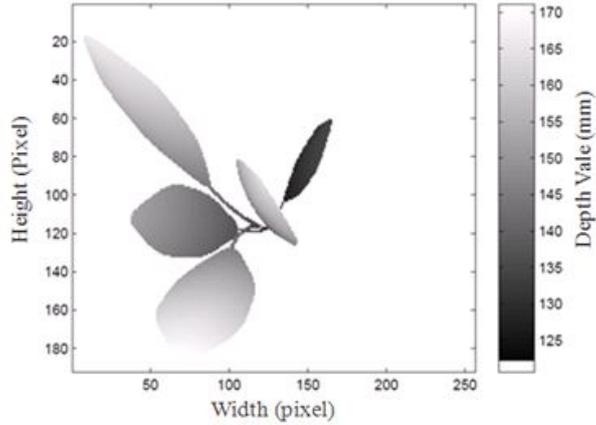


그림 인지 1. 입체영상 분석에 의한 격차지도

(2) 색상정보 처리

격차지도와 아울러 잎의 색상정보도 잎을 구분하는데 사용하였다. 색상은 식물 잎의 기본적인 특징이다. 그러나 실제 식물에서는 초록색이라도 대단히 다양하게 나타나므로, 개개의 잎을 색상으로만 구분하는 것은 그리 효율적이지 못하다. 색상은 다른 방법과 병용하여 사용하였다. 색상은 심도차이를 통한 세그멘테이션이나 잡음 제거를 도와줄 수 있는 보조 수단으로 적절히 이용되어 식물과 잎을 주위 배경으로부터 효과적으로 분리할 수 있다. 보통 이미지를 저장하고 디스플레이 하기 위한 디지털화된 포맷은 RGB(Red-Green-Blue)모델을 사용하지만 RGB모델은 색상정보에는 그리 효과적이거나 민감도가 높지 않아, 색상 정보를 기술하기 위해 HSI(Hue, Saturation, Intensity)모델을 도입하고, 색상의 채도와 명도에 대한 정보를 보완하여 색에 대한 정보를 세분화하였다.

(3) 잎의 선단 분석

독립된 잎으로 식별하기 위해서는 앞서 격차지도 및 색상비교와 함께 잎의 선단을 찾는 작업이 중요하다. 먼저 색상 세분화를 통해 일정 부분의 식물을 배경으로부터 분리해내어 일정한 창(window)안에 식물의 영상을 스캔한다. 이 스캔된 이미지를 분석하여 잎의 선단부를 판별하였다. 그림 인지 2에서 볼 수 있듯이 창 안에서 식물 픽셀의 빈도가 높은 부분은 개개의 잎이 모이는 부분인데, 여기서 픽셀 밀도가 낮은 부분(40%이하)이 잎의 선단부로 나타나짐을 알 수 있다. 잎마다 선단부의 끝이 뻗어나간 모양이나 각도가 다르게 보이므로, 잎 선단부와 유사한 반달영역을 타원형으로 만든 후 이를 회전시키면서 잎으로 판별된 픽셀을 계수한다(그림 인지 2). 이때 타원형 주형과 겹치는 최대 픽셀 값이 나타내는 위치를 잎의 선단부로 선택된다.

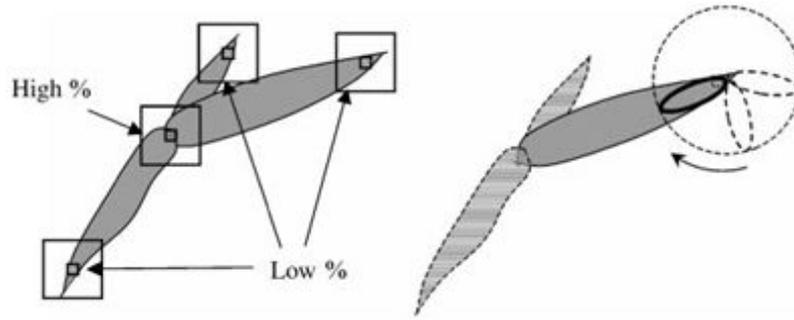


그림 인지 2. 잎의 선단 판별 방법

(4) 잎 모양 일치화

잎 선단부 검색을 통해 잎이 찾아지면 복잡한 배경에서 개개의 잎을 구분해내기 위해서 변형 주형(Deformable templates)을 적용하여 잎 모양을 판별한다. 이를 위해 능동 윤곽(Active contour) 또는 연쇄점 방법(snake method)을 적용한다. 이 방법은 입수된 이미지에서 식물 잎의 높이 차, 위치, 방향, 모양의 변형을 고려하기 때문에, 잎 윤곽을 찾는 최적의 보정조건을 제공하는 장점이 있다. 잎의 길이나 만곡(구부러짐, 휘어짐)을 고려함으로써 주형에 연속성과 평탄성(smoothness) 등을 효과적으로 부여할 수 있다.

변형 이미지(Deformable image)는 모수모델(Parametric model) 또는 연쇄적 점(snakes)으로 표현될 수 있다. 모수모델은 목적하는 잎의 모양을 변수의 집합으로 설정하여 모사할 수 있는데 변형 이미지를 모수의 변이로써 나타낸다(Marie-Pierre et al., 1996, Yuille, A.L et al., 1989). 아울러 최대로 많은 잎을 기술하기 위해 일반 모델(Generic Model)을 적용하였다. 사용된 모델 구조는 골격(skeleton)과 그 위에 얹혀지는 대칭봉투(symmetric envelope)로 나타내어진다(그림 인지 3). 골격과 대칭 봉투는 잎의 모양이나 휘어짐을 적절히 표출할 수 있었다.

모수모델은 아래와 같이 기술된다.

$$\begin{pmatrix} x(i) \\ y(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_s(i) \\ y_s(i) \end{pmatrix} + f_E(i) \begin{pmatrix} \bar{x}_N(i) \\ \bar{y}_N(i) \end{pmatrix}$$

위의 공식에서 현재지점 좌표 i 에 관련된 변수는 아래와 같이 정의 된다.

(x, y) : 현재지점의 x, y 좌표

(x_s, y_s) : 골격지점의 대응좌표

f_E : 골격의 가로축 기능

(x_N, y_N) : (x_s, y_s) 의 표준벡터

이 모델을 통해 골격과 대칭봉투의 변수 모형을 적절히 표출하고 영상에 나타나는 잎의 유형과 적절히 일치하게 하였다. 심도차 계산을 반복적으로 수행하여 최적의 잎이 찾아지도록 (matching) 하였다.

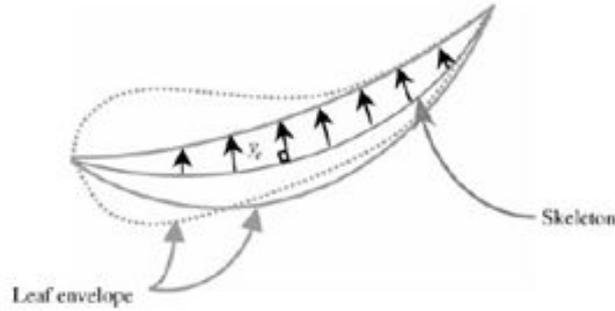


그림 인지 3. 잎 모델 구조와 서로 다른 봉투함수들

나. 잎 위치 측정

위의 방법을 통해 적절히 잎 정보가 결정되어지면 잎 위치를 측정한다. 앞에서 얻어진 잎의 정보로부터 아래와 같이 해충인지에 적용될 수 있는 잎의 심도와 자세에 대한 정보를 얻는다.

(1) 심도(Depth)

잎의 심도에 대한 정보는 계산되어진 격차지도에서 심도변이를 고려하여 얻을 수 있으며 각각의 잎의 위치는 잎의 가운데 부분의 심도 값으로 결정한다

(2) 자세(Pose)

심도 지도와 잎 세그멘테이션을 통해 잎의 위치, 방향, 각도가 산출되어 잎의 모양과 특징을 가지는 자세(예, 측정하기 수월한 자세)를 가지는 대상 잎을 선택할 수 있다.

3. 잎 인지: 복잡(현장)형

가. 흐름도

연구 전반부에 이어 후반부에는 현장에서 보다 복잡한 형태의 잎을 인지하도록 하여, 겹쳐진 잎이나 불완전한 잎을 독립적으로 인지할 수 있도록 하였다. 그러나 실제 야외 조건은 너무나 다양한 상태의 잎이 많고, 이를 전부 인지하기에는 여러 문제가 있으므로 비교적 잎의 수가 적은 어린 식물(파프리카)를 대상으로 하고 겹쳐짐이 심하거나 불완전한 정도가 많은 잎은 제외하였다.

그림 인지 4에서 잎 인지 과정의 전체적인 과정을 설명하였다. 배경을 제거한 후, Bezier곡선 맞추기 방법에 따라서 잎 가장자리와 잎맥을 포함하고 있는 이미지 경계들을 잘라내었다. Bezier 곡선에 의하여 주어지는 입력 자료에 기반한 잎의 경계들을 인지해내기 위해서 MLP(Multi-Layer Perceptron)를 사용하였다. 나아가 전체적인 잎모양 결정을 위해서는 ASM(Active Shape Model)(Cootes et al., 1995, Baumberg and Hogg., 1994)을 적용하였는데 전형적인 완전한 잎을 학습시킨 후 확률에 따라 입력되는 잎에 가장 맞게 변형을 하여 잎모양을 갖추게 하였다.

학습과정이 진행됨에 따라 온실에서 확보한 잎 이미지 모형으로부터 축적된 정보에 의해서 ASM(Active Shape Model)을 통해 잎 모양이 점차 개선되어졌다. 이로써 부분적인 잎 경계들에서의 정보를 종합하여 전체 잎의 이미지를 나타내도록 하는 변형 가능 모델이 형성되어졌다. 제 3연구진의 협조를 받아 실제로 온실에서 촬영한 잎 이미지를 훈련된 모델들에 맞추기 위해서 최적화하였다. 아래(그림 인지 4)는 자세한 잎 인지 과정을 설명한다.

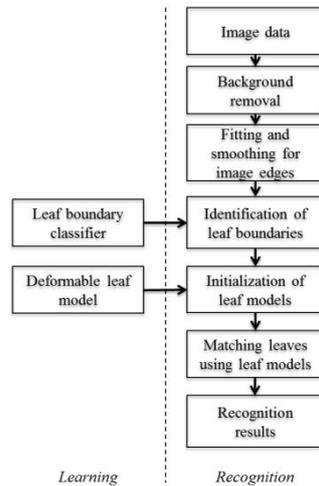


그림 인지 4. 변형 가능 모델과 경계 구분자에 기반한 다중 잎들의 학습과 인지 과정

나. 잎 경계의 분류

(1) 매개변수 곡선들을 사용한 이미지 가장자리의 평탄화

잎의 개별 인지를 위해서 잎의 가장자리 정보를 이용하였다. Canny 가장자리 검출법(Canny., 1987)을 사용하여 배경이 제거된 잎 이미지에서 가장자리를 결정하였다. 노이즈의 발생을 감안하여, 잎 경계들과 잎맥들을 많은 수의 부분적인 잎 경계와 잎맥들로 잘라낼 수 있었다. 부분적인 잎 경계들을 검출하고 평탄화(최소 자승법)하는(그림 인지 5) 데에는 제 2차 Bezier 곡선을 적용하였다. 이 연구에서는 노이즈들이 집단적으로 나타나서 생기는 짧은 가장자리들은 잎의 모양으로 간주하지 않았다. 긴 가장자리들(즉, 30 픽셀 이상의 길이)만 경계들을 분류하는데 사용하였다.

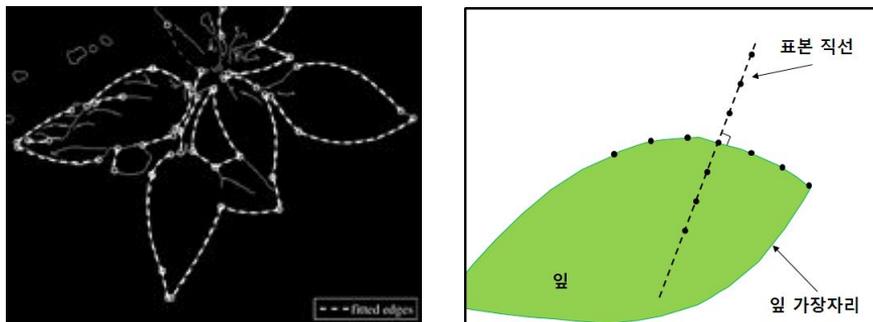


그림 인지 5. Bezier 곡선의 의해 제시된 가장자리 이미지.

(2) MLP를 이용한 잎 경계 분류자

정해진 가장자리에 대해 세 가지 유형의 가장자리들을 정의하였는데, 곧 엽맥, 잎의 외부 경계 그리고 중첩된 잎의 경계이었다. Bezier 곡선에 의해 조각난 부분 잎 경계들을 MLP 입력 데이터로 사용하였다. 이를 위해 가장자리를 수직으로 관통하는 표본 직선으로부터 얻어진 1차원

이미지 모양이 가장자리 점 주위의 국소 정보를 나타내는 데 사용되어 졌다. 표본 직선은 양 쪽으로 각각 3 픽셀과 중심의 한 픽셀(전체로 7 픽셀)로 구성되어 졌다. 회색 값으로 된 표본 벡터는 모양 벡터([0, 1] 사이의 값으로 정규화된)로 변환되고 MLP를 훈련시키기 위한 입력 데이터로서 사용되어 졌다.

잎의 외부 및 겹쳐지는 경계들 중 100개와 잎맥들 중 100개를 택해서 MLP 네트워크 학습의 입력 자료로 하였다. MLP 네트워크는 3개의 층으로 구성되는데, 입력 층에는 7개의 노드(표본 된 픽셀들의 개수와 동일), 은닉층에는 8개의 노드 그리고 출력 층에는 1개의 노드로 구성하였다. MLP의 출력 노드는 2진수로서 나타내고, 잎 경계(한 잎의 경계와 포개진/덮여진 잎의 경계를 포함하여)인 경우는 1이고 잎맥인 경우는 -1로 나타내었다. 가장자리 점의 60% 이상이 잎 경계점으로 인정된 경우에 그 가장자리를 잎 경계 또는 잎맥으로 분류하였다. 그림 인지 6 에서 야외 이미지에서부터 인식된 잎 경계의 예를 보여 준다.

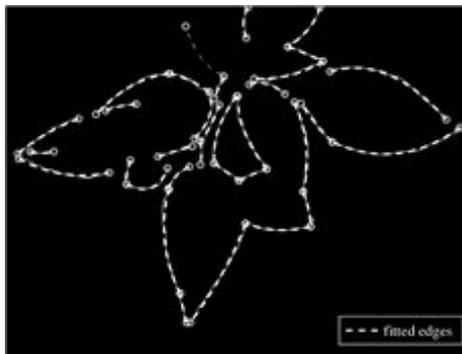


그림 인지 6. MLP에 기반하여 확인된 잎 경계들.

다. 잎의 인식

(1) 잎 모델의 구성

잘 알려진 변형가능 모형 모델인 ASM(Active Shape Model)을 적용하여 형체-변형 잎을 기술 하였다. ASM에서는, 목표 형체는 n개의 랜드마크들로 된 형체 벡터 로 나타낸다.

$$\mathbf{x}_i = (x_{i,0}, y_{i,0}, x_{i,1}, y_{i,1}, \dots, x_{i,n-1}, y_{i,n-1})^T, i = 1, \dots, N \quad (\text{인지1})$$

여기서 변량 $x_{i,j}$ 들은 훈련 집합에서 i-번째 형체의 j-번째 랜드마크의 좌표에 대한 경계정보 이고, N은 학습자료 집합에서의 이미지들의 갯수이며, T는 전치행렬 연산자이다. 변형가능 잎 모델을 만들기 위해서, 전형적인 잎을 선택하고 표본 잎들에 잎 외형을 따라서 수작업으로 랜드마크들을 표시하였다(그림 인지 7).

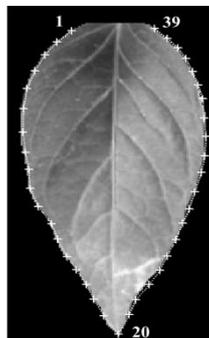


그림 인지 7. 랜드마크들로 표시된 훈련 집합에서의 잎 이미지.

형체변이들을 분석하기 전에, 학습 집합에서 해당하는 점들 사이에 가중치가 부여된 거리 제곱의 최소화를 통하여 형체들을 정렬하였는데, 평행이동, 회전 그리고 늘이기 등을 하였다. 학습을 한 후에는 훈련 집합 안에 있는 어떠한 형체들이라도 근사적으로 평균 형체와 가중치가 부여된 변이 모드들로 나타낼 수 있다.

$$x_i = \bar{x} + P b \quad (\text{인지 2})$$

여기서 P는 첫 t 개의 고유치-벡터들로 된 행렬이고 b는 가중치 벡터이다. 모델은 평균형체에 서 변형되어 가중치 벡터 b를 바꿈으로써 새로운 데이터에 맞추도록 할 수 있었다.

(2) 잎들의 근사적인 위치 알아내기

Bezier 곡선들에 따라서 구분된 부분적인 경계들은 잎 모델의 중심위치를 찾는 데 이용되었다. 곡률에 기반하여 그림 인지 8 에서와 같이, 잎 경계들은 두 가지의 서로 다른 유형으로 나누어 졌다. 유형A는 잎의 끝 부분에 가까운 경계를 나타내고 그것의 형체는 직선에 근접한다. 유형 B는 잎의 측면 경계부분에 위치하며 경계를 따라서 곡률 값을 갖고 있다.

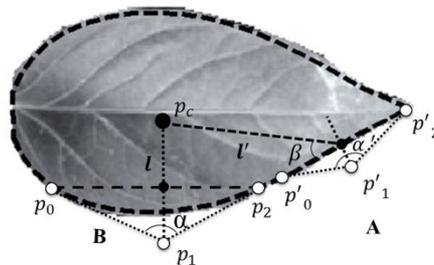


그림 인지 8. 부분적인 가장자리 유형의 정의와 잎의 근사적인 무게중심: A는 끝부분이고, B는 측면 경계이다.

Bezier 곡선의 조정점들은 곡선 모양을 기술하는데 사용되었다. 예를 들어, 측면 경계인 경우에, 조정 점 p_1 에서 각도 α 는 경계의 곡률을 기술하도록 정의되었으며, 반면에, 곡선 길이는 p_0-p_2 직선의 길이로 근사되었다(그림 인지 8). 중심점들을 정의한 후, 모델들은 차례로 야외 잎 이미지 근처에서 정렬되었다. 모델의 초기 위치를 정하는데 있어서 모델의 근사적인 중심점은 잎 이미지 근처에서 계산되어 졌다(그림 인지 8).

(3) 가변 변형 일치화(matching deformable model)

그림 인지 9 에 나타나듯이, 다음의 세 단계를 반복해서 모델이 최적의 위치에 수렴할 때까지, 또는 최대의 단계에 도달할 때까지 이미지 데이터를 일치시켰다.

(가) 형체 외형에서의 각각의 랜드마크에 대하여, 랜드마크에 대한 수직 방향으로 모델이 최적 위치들을 찾도록 한다. 모델은 각각의 랜드마크 주위에서 이미지의 최적 일치 위치(즉, 잎 경계)를 검색하고 현재의 위치에서부터 선호하는 위치로 움직이도록 이동 거리를 계산한다.

(나) 단계(가)에서부터 얻은 이동에 따라서, 최적의 형체는 평행이동, 회전, 늘이기 그리고 변이 매개변수들(즉, 가중치 벡터 b)에 의해서 조정한다.

(다) 모델의 변이와 위치 매개변수들을 갱신한다.

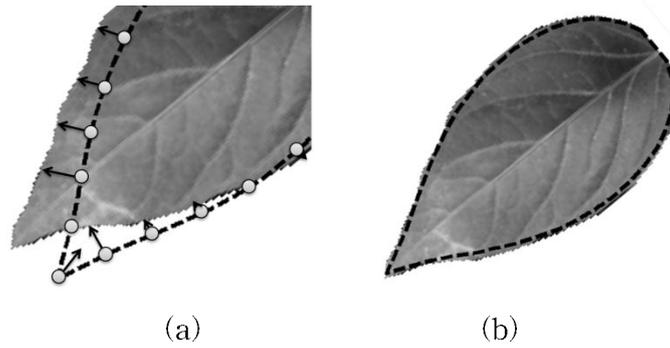


그림 인지 9. 변형 가능 모델들을 사용하여 잎 이미지의 검색과 수렴. (a) 최적 점들을 검색하는 과정과, (b) 이미지 데이터에 수렴한 잎 모델

식물의 잎 인지에 있어서, 원래의 ASM 기반 모양 일치를 위해 사용한 Mahalanobis 거리는 예비 조사에 의하면 잎의 경계와 잎맥을 구분할 수는 없었다.

이 연구에서의 ASM을 적용함으로써 이 문제에 대처하기 위한 두 개의 새로운 과정들을 고안하였다. 우선, 경계-ASM이라고 부르는 방법을 제안하여 MLP 분류자(그림 인지 6)에 의한 분류된 잎 경계들만(잎맥이 아닌)을 일치시키도록 한다. 이 방법은 2진 이미지(흰색과 검은색만으로 된 이미지)를 사용함으로써 일치화 과정이 상대적으로 간단히 수행되었다. 그러나 1차원에서 조그만 불연속 경계들은 잎 경계에서의 노이즈로 간주되기 쉽기 때문에, 경계 정보의 부분이 인지 과정 동안에 잃어버릴 수 있다. 이 문제를 고려하여, MLP-ASM을 추가적으로 제안하였다. 이 방법은 랜드마크들이 위치한데서 곡선의 수선을 따라서 가장자리의 양쪽 정보를 사용한다(그림 인지 10). 제안된 MLP 잎 경계 분류자는 일치화 과정에 대한 MLP-ASM과 병합되었다. MLP 분류자는 각 랜드마크에서 검색 방향을 따라서 각각의 픽셀을 검사하고 변형을 위한 경계 픽셀들을 확인한다(그림 인지 10).

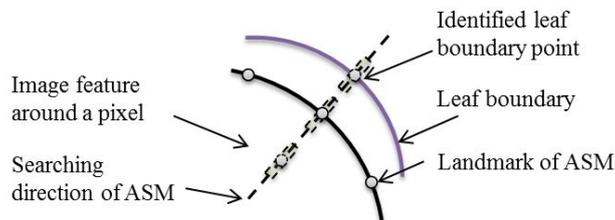


그림 인지 10. 잎 이미지를 검색하는 과정. 랜드마크를 관통하는 수선을 따라서 국소적 모양을 검사함.

4. 잎 인지 실험

현장 여건과 파프리카와 고추가 인근 분류군임을 고려하여 고추 잎을 대상으로 수행하였다. 이미지 자료(105개 잎의 24개 이미지)가 상기 제안된 인지 방법에 따라 인지된 후 평가되었다. 인지 결과는 그림 인지 11(a)에 예시되었다. 6개의 고추 잎(단독 혹은 겹쳐있거나 맞물린 잎)이 비교적 잘 인지되었다. 인지율을 표(인지1)에서 나타내었다. 단독 잎의 경우 85.7%의 가장 높은 인지율을 보였다. 그러나 새로 제안된 ASM과 전통적 ASM에서 큰 차이를 보이지는 않았다(표(인지1)). 반면 덮이거나 덮여진 잎의 경우 차이가 나타났다. 덮은 잎의 경우 MLP-ASM과 경계-ASM에서 76.7%로 높게 나타났으며 전통적 ASM에서는 23.3%로 낮게 나타났다. 덮혀진 잎의 경우 차이가 더 크게 나타났는데, MLP-ASM에서 가

장 높게 나타났으며 (87.8%), 다음으로 경계-ASM으로 나타났다(63.4%). 전통적 ASM에 의한 인지율은 가장 낮게 나타났다(29.3%) (표(인지1)).



그림 인지 11. MLP-ASM에 의한 (a) 고추 잎의 인지와 (b) 손상된 파프리카 잎의 인지.

표(인지1). 고추 잎에 대한 ASM, 경계-ASM, MLP-ASM의 인지율 차이 및 통계적 검정 (SPSS v.14: Multiple comparison). 연결되지 않은 막대는 통계적으로 유의함을 나타냄(유의수준 0.5)

	ASM	Boundary-ASM	MLP-ASM	Actual leaves
Single leaves	85.7% (18)	85.7% (18)	85.7% (18)	21
Overlapping leaves	23.3% (10)	76.7% (33)	76.7% (33)	43
Occluded leaves	29.3% (12)	63.4% (26)	87.8% (36)	41
Average	46.1%	75.3%	83.4%	

표(인지2). 파프리카 잎에 대한 ASM, 경계-ASM, MLP-ASM의 인지율 및 통계적 검정(SPSS v.14: Multiple comparison). 연결되지 않은 막대는 통계적으로 유의함을 나타냄(유의수준 0.5)

	ASM	Boundary-ASM	MLP-ASM	Actual leaves
Single leaves	66.7% (6)	66.7% (6)	77.8% (7)	9
Overlapping leaves	30.0% (9)	63.3% (19)	76.7% (23)	30
Occluded leaves	25.0% (5)	60.0% (12)	70.0% (14)	20
Average	40.6%	63.3%	74.8%	

위에서 언급한대로 시험된 두 종이 같은 과에 속하기 때문에, 고추 잎에서 훈련된 잎 모델을 다른 종인 파프리카에 대해서도 시험하였다 (표(인지2)). 그러나 파프리카는 고추와 달리 줄기에서 많은 잎이 겹쳐 자라기 때문에 많이 겹쳐진 잎은 제외하고 9개의 잎이 붙은 잎 무리를 인지에 사용하였다 (표(인지2)).

단독 잎에서 인지율은 전통적 ASM에서 다소 높게 나타났다. 그러나 겹쳐 있거나 맞물려 있는

잎에서의 인지율은 전통적 ASM에서 상대적으로 낮게 나타났다 (25.0-30.0%). 반면 겹쳐 있거나 맞물린 잎의 인지율은 개선된 ASM 방법에서는 상당히 높게 나타났다 (MLP-ASM: 70.0-76.7%, 경계-ASM: 60.0-63.3%). 구멍이 나거나 가장자리가 상당부분 손상된 파프리카 잎의 경우도 MLP-ASM 방법으로 인지 될 수 있었다 (그림 인지 11(b)).

파프리카에서 각각의 방법 간 인지율의 통계적 유의성을 다중 비교를 통해 검정하였다(표(인지 2)). 전체적으로 인지율은 조금 낮았지만 고추의 경우와 유사한 결과를 보였다. 단독 잎 인지율은 기존 ASM과 개선된 ASM 방법에서 유사하였다(66.7 - 77.8 %). 덮거나 덮혀진 잎의 경우 기존 ASM에 비해 개선된 ASM이 높았는데 MLP-ASM(70.0 - 76.7 %), 경계-ASM(60.0 - 63.3 %) 순으로 나타났는데 기존 ASM과 개선된 ASM에 통계적 차이가 있었다(표(인지2)).

ROC(Receiver Operating Characteristic) 곡선을 통해 제시된 방법의 예측성을 평가하였다(그림 인지 12). 전체 105개 고추 잎에서 648개의 학습된 ASM으로 시험되었다. 파프리카의 경우 59개 잎에서 824개의 학습된 ASM으로 시험하였다. 두 종의 식물 모두에서 MLP-ASM의 성능이 가장 좋았으며 다음으로 경계-ASM, ASM 순이었다. ROC에서 TPR(True positive rate)이 제시된 모델 사이에서 차이를 보였으며 FPR(False positive rate)는 두 종 공통적으로 큰 차이를 보이지 않았다.

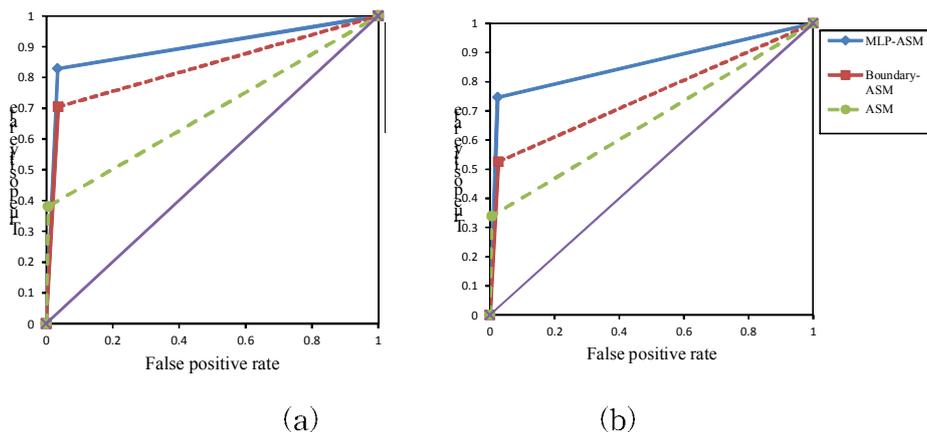


그림 인지 12. 기존 ASM과 개선된 ASM 방법에 따른 잎인지의 ROC 분석. (a) 고추 잎, (b) 파프리카 잎.

본 실험은 ASM으로 인지할 때 여러 개의 잎이 겹쳐져 있거나 맞물린 잎의 인지율의 개선에 주목할 만한 결과를 보였다(논문 투고: IEICE). MLP-ASM은 경계-ASM보다 겹쳐있거나 맞물린 잎을 인지하는데 다소 더 나은 것으로 나타났다.

5. 해충 인지(단순형) : 빛 조건에 따른

잎 인지 후 잎이나 채집기에 붙어있는 해충의 인지 프로그램을 구현하였다. 일차적으로 비교적 단순한 여건에서 빛 조건이나 크기에 따라 식별하도록 하였다.

가. 해충 식별

본 연구의 대상이 되는 해충(가루이)은 흰색을 띄어 초록색인 잎 색깔과 다르므로 색상 세

분화(color segmentation)을 적용하면 해충이 있는 지점을 효과적으로 식별할 수 있다. 이진화를 통해 해충과 잎을 구분하고 해충이 있을 가능성이 있는 지점은 방울지역(blob area)으로 나타난다. 가루이는 일정한 크기를 가지고 있으므로 blob area의 크기와 모양을 조사(blob checking)하여 가루이 유무를 판단하였다. 해충인지 과정은 그림 인지 13과 같다.



그림 인지 13. 잎에서의 해충 검출을 위한 작업 흐름도

(1) 색상 세분화(Color Segmentation)

얻어진 잎의 영상은 HSI 색모델로 변환되어 잎 색상이 세분화되고 배경은 제거된다. 앞서 언급하였듯이 선택된 잎에서 해충의 색깔(예 : 파프리카에 있는 가루이는 흰색)이 잎과 구별되므로 해충의 위치를 알아낼 수 있다.

(2) 2진화(Binarization)

전 단계에서 얻어진 세분화 결과를 2진 이미지(binary image)화 하면 흑과 백의 두 색상으로만 표현되어 구분이 더 뚜렷해진다. 즉, 잎 부분은 검게 해충이 있는 부분은 희게 나타나므로 희게 되어 있는 부분을 해충으로 간주하였다.

(3) 잡음 제거(Noise filtering)

많은 경우 온실내의 조명에 의해서 잎에 반사되는 빛으로부터 잡음(noises)이 생긴다. 반사는 주로 잎맥에서 생겼다. 이런 경우 잡음이 대개 해충보다 크기가 크므로 크기 비교를 통해 잡음을 제거하였다. 해충보다 더 작은 잡음은 지우기 방법(erase method)으로 적절히 색출하였다.

(4) 방울 결정 및 해충 계수

계산되어지는 방울의 크기와 수로 해충을 계수하였는데 해충의 평균크기(예 : 가루이의 경우 1mm-2mm)를 고려하여 해충의 평균크기보다 크거나 작은 방울은 잡음으로 판단한 후 제거하고 제거되지 않은 방울들의 수를 해충의 수로 계수하였다. 그림 인지 14는 이상의 과정을 거쳐 얻어진 결과이다.

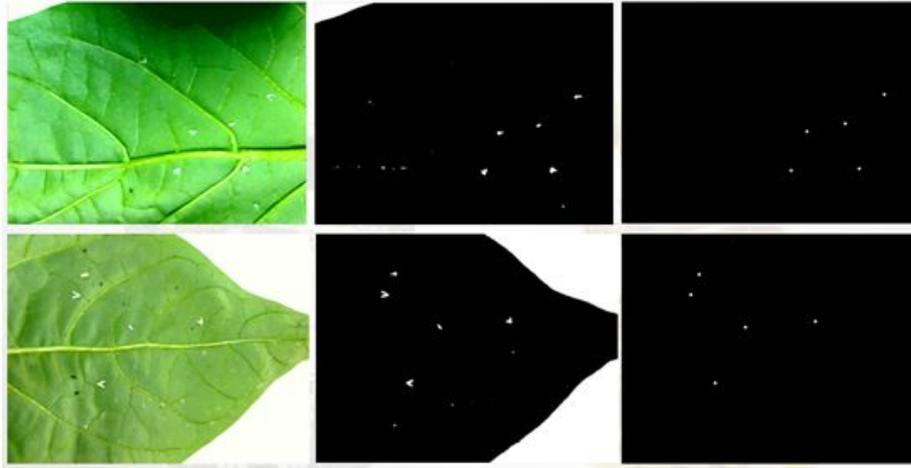


그림 인지 14. 해충 검출: 원 이미지(왼쪽), 추출된 이미지(중간), 검출된 결과(오른쪽).

6. 해충 인지 : 식물체에 부착된 해충

상기 해충 인지를 로봇이, 실제 잎이 부착된 식물에서 식물 잎을 먼저 인지하고 이후 해충을 인지하도록 하는 과정을 시험하였다. 영상을 통한 해충의 인지 순서는 다음과 같다.

가. 식물인식 알고리즘에 의거해 로봇이 설치된 레일을 따라 이동하고 식물 앞에서 정지한다. 앞서 언급한 식물체 거리 인식 및 식물체 잎 위치 측정과 심도 및 자세 등을 격차지도 (Disparity map)를 통해서 구하고 로봇 좌표 전환을 수행한다. 로봇 팔에 설치된 카메라에 식물이 인식될 경우 로봇 팔을 통해 식물에 접근한다.

전체적인 영상 인식 향상을 위해 식물영상을 HSI 컬러 공간에서 색상정보를 이용하여 색역과처리를 하고 적점탈락 알고리즘(erosion algorithm)을 통해 잎을 제외한 복잡한 배경을 제거하였다. 일반적인 RGB 컬러 공간에서는 Red 채널, Green 채널, Blue 채널 사이의 관계가 복잡하여 영상처리가 힘들기 때문에 RGB 컬러 공간을 HSV(Hue, Saturation and Value) 컬러 공간으로 바꿔서 영상을 처리하였다(그림 인지 15).

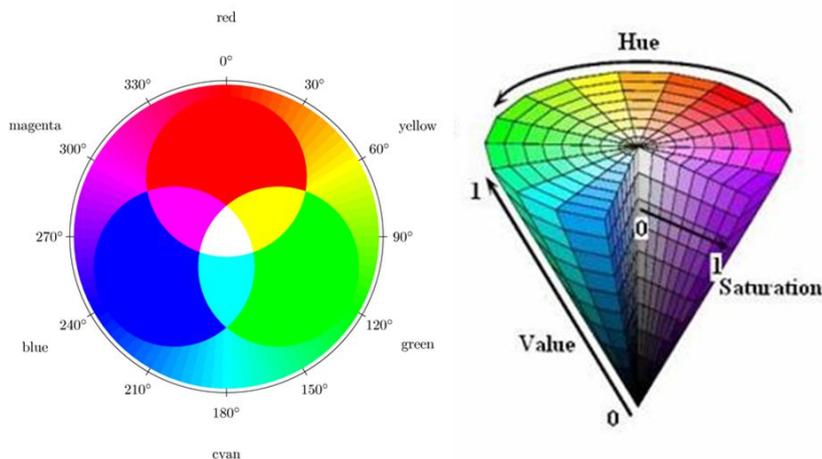


그림 인지 15. RGB와 HSV 컬러 공간

작물의 잎을 인지하기 위해서 먼저 Hue, Saturation과 Value 값을 넓은 범위의 녹색 범위 내에 설정하였다. 일차적으로 녹색부분만 인식하게 하고 비 녹색부분은 제거하였다. 식물 줄기의 경우 잎의 색과 유사하기 때문에 색 여과기(color filter)를 이용해서는 제거되지 않았다. 식물 줄기를 제거하기 위해 형태영상과정(morphological image processing) 중 적점탈락(erosion) 기능 알고리즘을 이용하여 식물의 줄기를 제거하였다(그림 인지 16).

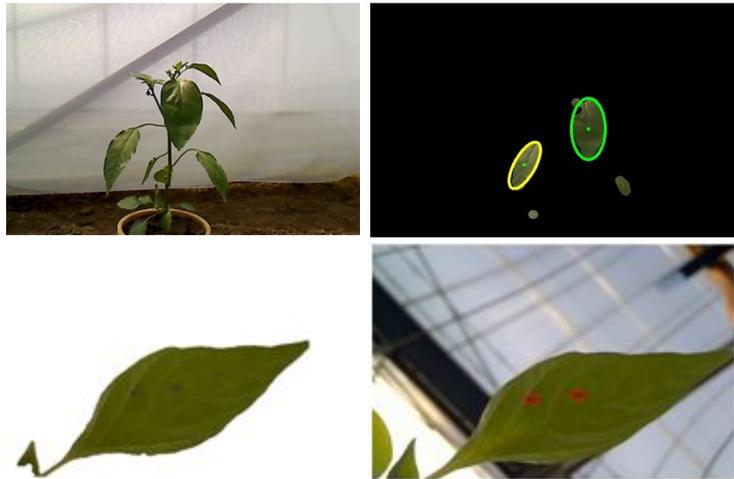


그림 인지 16. 잎 모양 추출, 왼쪽 위: 배경과 같이 있는 잎, 오른쪽 위: 색상 추출에 의해 별레 인지함. 왼쪽 아래: 별레가 있는 잎, 오른쪽 아래: 잎 위의 별레가 인지됨

나. 이후 배경과 줄기가 제거된 잎에 다시 한 번, 색 여과(color filtering)를 통해 초록색을 제외한 색깔만을 인지하도록 해서 해충을 인지한다. 해충 식별은 1차 년도에 보고한 바와 같이 색상 세분화(Color Segmentation), 2진법화(Binarization), 잡음 제거(Noise filtering), 방울형 결정(Blob determination) 및 해충 계수의 과정을 거친다(그림 인지 17).

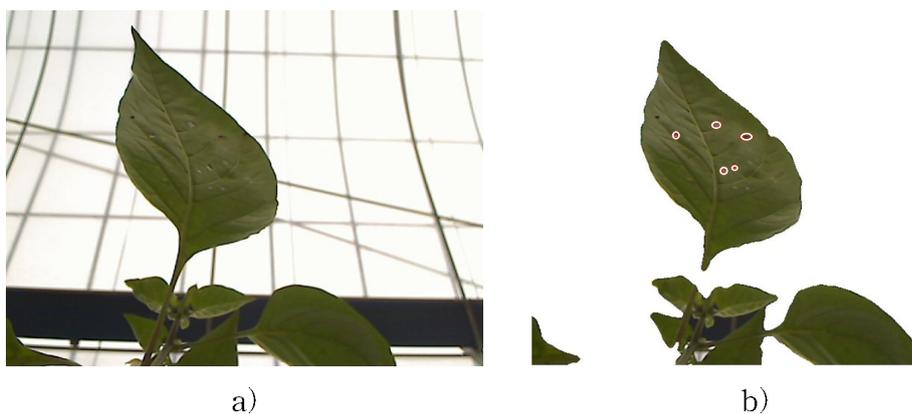


그림 인지 17. 해충 감지 a) 잎 아래 붙은 해충 이미지, b) 잎 이미지에서 배경을 제거한 해충 감지 결과

7. 해충의 패턴 인지

로봇 구동과 아울러 상기 잎 및 해충 인지 프로그램을 종합적으로 검정하기 위해 제 2 연

구진에서 개발한 춘사이(레일형 로봇)으로 현장인지를 수행하였다. 식물이 연속되어 나열된 상태에서 계속적으로 인지하도록 하였는데, 7주 연속적으로 나열된 파프리카 나무에 모형 및 표본 곤충을 택하여 수행하였다. 파프리카의 간격은 일반적으로 재배 간격(약 25cm)을 기준으로 하였다. 선별된 파프리카는 잎의 크기(350mm~600mm), 잎의 기울기(20°~70°) 및 잎의 처짐(20°~50°) 정도를 다양하게 하였다. 2010년 4월 해충들을 실험에 사용할 수 없어, 실제 해충(가루이류)의 색깔을 가진 흰색종이(2mm×2mm)와 곤충(썩덩나무노린재, *Halyomorpha halys* (Stal)) 표본(8mm)을 파프리카 잎 뒷면에 붙여서 인지하도록 하였다. 이것은 해충들이 주로 잎 뒷면에 붙어 있음을 고려하여 제작한 것이다.

총 8주의 식물에서 12개의 잎을 선택하여, 이 중 3개의 잎을 제외하고 나머지 9개의 파프리카의 잎에 앞서 언급한 종지와 곤충표본을 각각 붙여 인지하게 하였다(표 인지3). 로봇은 오전에 2시간 동안 총 8개의 화분을 8번 반복적으로 조사하였다. 조사 기간 동안 조도의 영향은 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 로봇 팔을 이용한 인지는 평균 86%의 성공률을 나타냈으며(최고 100%, 최소 75%), 화분 1, 7번의 1번 잎 그리고 화분 7번의 3번 잎과 같은 경우 반복 조사 때마다 높은 인지율을 보였다. 상대적으로 잎의 처짐 정도와 잎의 기울기는 로봇 팔의 인지율에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 화분 3과 화분 4의 1번 잎의 경우 다른 화분의 잎들에 비해 로봇의 인지율이 비교적 떨어지는 것으로 나타났는데, 이는 로봇팔에 설치되어 있는 카메라가 중복(overlap)된 잎이나 크기가 상대적으로 작은 잎의 경우는 제대로 인식하지 못하기 때문으로 나타났다. 이 문제는 연구 후반에 알고리즘들을 개발하여 해결하였다.

표(인지3). 로봇팔의 영상인지 시스템을 이용한 해충 인지

화분 번호	잎 수	잎의 형태		잎 뒷면	인지 여부								
		잎의 기울기	잎의 처짐		1	2	3	4	5	6	7	8	
화분 1	잎 1	70	오른쪽으로 20° 처짐	해충	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	잎 2	20			N	N	N	N	N	N	N	N	N
화분 2	잎 1	60		해충	Y	N	Y	Y	Y	N*	Y	Y	
화분 3	잎 1	60	오른쪽으로 50° 처짐	종지	N*	N*	N*	Y	Y	Y	Y	Y	Y
화분 4	잎 1	50		해충	Y	Y	N*	Y	N*	N*	Y	Y	
	잎 2	30	왼쪽으로 30° 처짐	해충	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N*
화분 5	잎 1	45	왼쪽으로 45° 처짐		N	N	N	N	N	N	N	N	N
	잎 2	30	오른쪽으로 60° 처짐	종지	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N*
화분 6	잎 1	45		해충 + 종지	N*	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
화분 7	잎 1	50	오른쪽으로 45° 처짐	종지	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	잎 2	70		해충	Y	N*	Y	Y	Y	Y	N*	Y	
	잎 3	20	왼쪽으로 30° 처짐		N	N	N	N	N	N	N	N	N

Y: 해충 인지, N: 해충이 없는 것을 인지, N*: 잎을 인지 못함, N-: 해충 인지 못함

8. 해충 인지: 다중프랙탈 분석 방법

앞서 언급한 현장 인지 시험은 제한된 조건에서 모형을 가지고 실시하였으나 본 실험은 보다 복잡한 현장 여건에서 실제 심겨진 파프리카에 붙어 있는 가루이를 인지하도록 하였다. 실제 현장 적용을 할 경우 숨어 있는 해충을 찾아내기 힘든 점을 고려하여 곤충에 자극을 주어 놀라게 한 후 날아가는 개체들이 로봇에 설치되어 있는 트랩에 유인 되도록 하였다. 그러나 채집기에 붙어 있는 곤충이 작고, 온실 현장에서는 여러 가지 잡음이 많으므로 적절한 인지 방법이 강구 되었다. 특히 끈끈이 트랩에 붙어 있는 소형 해충 인지를 위해 다중 프랙탈 이미지 분석을 적용하였다.

가. 다중 프랙탈 이미지 분석

(1) 다중 프랙탈 분석 원리

많은 자연적 물체나 현상들은 자체-유사성 또는 프랙탈 성질을 보인다. 전체적인 자기조직화를 특징하는 매개변수는 프랙탈 차원, D_f 이고, 이것은 일반적으로 정수가 아니며, 물체와/나 현상들의 불규칙적인 구조가 어떻게 조그만 것에서부터 큰 규모로 반복적인 방법으로 복제되는가를 기술한다. 프랙탈 차원을 계산하는 가장 대중적인 방법은 상자-계수 방법이다. 이것은 관찰된 구조, S 를 한 변의 길이가 ϵ 인 상자 격자로 덮고 비공의 일정 현상(예, 이미지)이 출현한 상자들의 개수, $N(\epsilon)$ 를 헤아린다. ϵ 이 0으로 근접하는 극한에서, $N(\epsilon)$ 의 극한은 지수 법칙을 따르게 되어 $N(\epsilon) \sim \epsilon^{-D_f}$ 가 된다.

$$D_f = - \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon} \tag{1}$$

다중 프랙탈의 성격을 정량적으로 기술하는 것은 몇몇 방식으로 유도될 수 있다. 대개, 이 과정은, Hölder 지수로 알려진, 비 정수 지수를 찾는 것으로 시작하며, 이 지수는 대상의 점별 이상(pointwise singularity)을 기술하고, 이 지수의 분포를 유도하는 것이며, 이 분포는 다중 프랙탈 스펙트럼, $f(a)$ 로 알려진 것이며 나중에 간략히 설명할 것이다.

전체 구조 S 가 중첩되지 않는 한 변이 ϵ 인 상자들, S_i 들로 나누어져 있다고 하고 $S = \bigcup_i S_i$ 가 된다고 하자. 각각의 상자 S_i 는 척도, $\mu(S_i)$ 의 어떠한 양에 의해서 특정화되고 통상의 프랙탈 차원과 동등한 매개변수로서 다중 프랙탈 분석에서 사용하기 위해 제안되는 것을 정의하면

$$a_i = \frac{\ln \mu(S_i)}{\ln \epsilon} \tag{2}$$

이고, 이것은 부분 집합 S_i 의 거친 Hölder 지수를 나타낸다. 만약 ϵ 이 영으로 수렴하면, 거친 Hölder 지수는 극한값 a 에 수렴하여

$$a = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} a_i \tag{3}$$

가 되고, 매개변수 a 는 프랙탈에서의 실제적인 위치에 의존하고 그 구조의 국소적인 규칙성을 기술한다. 전체 구조에 걸쳐서 일반적으로 같은 매개변수 a 를 가지는 많은 상자(점)들이 있다. 결과적으로, 다음단계는 이 양의 분포를 알아보는 것이다. 즉, a 에 의해서 특정화되는 부분집합에 걸쳐서, 다중 프랙탈 스펙트럼으로 알려진, 함수 $f(a)$ 를 찾는 것이다. 이 함수는 관측되는 구조의 전반적인 규칙성을 기술한다. 다중 프랙탈 스펙트럼은 a 에 의해서 특정화되는 부분집합에서의 프랙탈 차원으로 생각될 수 있으며

$$f_\epsilon(a) = -\frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon} \quad (4)$$

이고, 여기서 $N(\epsilon)$ 은 특정한 값 α_i 를 포함하는 S_i 상자들의 개수이다. 식(4)에서부터의 극한값

$$f(a) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} f_\epsilon(a) \quad (5)$$

이다. 위에서와 같이 다중 프렉탈 스펙트럼을 계산하고, 이것은 a 값 분포의 Hausdorff 차원으로 알려져 있다. 상자-계수 방법은 다중 프렉탈 스펙트럼을 계산하는 여러 가능한 방법들 중 하나이지만, 계산 과정의 간편성과 신속성 때문에 이 방법이 가장 자주 사용된다는 점을 주목하자. 다중 프렉탈 값들인 a , $f(a)$ 들을 유도하는 데에 특정한 기법을 사용한다는 점을 개의치 않으면, 그것들은 관측 대상이 되고 있는 구조에서의 국소적이고 전반적인 규칙성을 기술한다. 결과적으로, 데이터의 많은 부분에 있어서 아마도 숨어 있을 수 있는 어떤 면들을 기술하고(거나) 추출해 내는 확고한 방법으로서, 다중 프렉탈의 분석은 신호 처리 문제들의 광범한 분야에서 사용될 수도 있다.

(2) 디지털 이미지 처리에 있어서 다중 프렉탈 분석

식(2)-(5)에서 설명한 a 와 $f(a)$ 를 알아내기 위한 고전적인 과정들은 임의의 연속-공간 연속-크기 함수들에 관련되어 있다. 우리는 픽셀로 알려진 불연속 2차원 공간좌표를 갖는 디지털 그레이 스케일 이미지를 다룬다. 그레이 스케일은 각각의 픽셀에 정의된 불연속 K -레벨 불연속 크기 함수 $g(x, y) = g(m, n) = k \Delta g$, $k = 0, 1, 2, \dots, (K-1)$ 로 결정된다. 공간이 불연속이라는 점은 지수 a 와, 결과적으로, $f(a)$ 를 결정하는데 있어서 몇 가지의 제한과 어려움을 가져온다. 기본적인 제한은 이미지 공간을 덮는 상자의 크기의 불연속으로부터 나온다. - 가능한 크기는 픽셀 크기의 정수배이다.

연속 공간에서 적용되는 식(2) 대신에, 불연속 공간에서는 각각의 픽셀은 거친 Hölder 지수들의 불연속적 집합에 의하여 특정화 되며, 즉,

$$a_i(m, n) = \frac{\ln \mu_i(m, n)}{\ln i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, (K-1) \quad (6)$$

여기서 $\mu_i(m, n)$ 은 관측된, 한 변의 크기가 $\epsilon = i$ 인, 상자 내에서의 척도의 크기이다.

Hölder의 지수를 계산하기 위해서 척도 값의 자연 로그, $\ln \mu_i(m, n)$, 와 상자 크기의 자연로그 값, $\ln i$ 를 계산하고 $\ln \mu_i(m, n)$ 와 $\ln i$ 의 로그 도표에서 해당되는 점들을 그려 놓는다. 그리고 나서, $a(m, n)$ 의 극한값은 선형 회귀분석 선의 기울기로서 계산된다.

a 값들을 찾은 후, ‘ a -이미지’를 생성할 수 있다- 원래의 이미지와 같은 $M \times N$ 차원의 행렬이지만 이미지 픽셀에 1 대 1로 대응하여 $a(m, n)$ 값으로 행렬의 성분을 채운 행렬. 이 행렬로부터, 다중 프렉탈 스펙트럼 $f(a)$, 또한 행렬의 형식으로 $f(m, n) = f(a(m, n))$, $m = 1, 2, \dots, M$, $n = 1, 2, \dots, N$ 도 다음과 같이 계산된다. 우선, 연속적인 Hölder 지수는 a_r 의 R 값들로 불연속화 한다. :

$$a_r = a_{\min} + (r-1) \Delta a_r, \quad r = 1, 2, 3, \dots, R. \quad (7a)$$

우리는 다음과 같이 일정한 분할을 사용하도록 한다. 즉,

$$\Delta a_r = \Delta a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{R}. \quad (7b)$$

만약 a 의 실제 값이 r 번 째 영역 내에 있으면, 즉, $a_r \leq a \leq (a_r + \Delta a)$ 이면, 그러면 a_r 으로 대체한다. 그러한 a -이미지는 한 번의 크기가 정수인 정사각형 격자 상자들에 의해서 덮어 지게 된다. 적어도 한 개의 a_r 값을 포함하는 상자는 개수 $N_j(a_r)$ 에 더해지게 된다. 다른 크기를 갖는 상자들은 순차적으로 고려되어 해당하는 Hausdorff 척도들은 식(4)에 따라 다음과 같이 각각의 이미지 픽셀에 대하여 계산되어 진다.

$$f_j(a) = -\frac{\ln N_j(a_r)}{\ln j}, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

마지막으로, $\ln N_j(a_r) - \ln i$ 의 로그-로그 도표에서 불연속점들의 집합으로부터, a 를 계산하는 경우에 있어서와 같은 방식으로 다중 프렉탈 스펙트럼 $f(a)$ 를 계산한다. 이 과정들을 전체 a -행렬에 대하여 반복하여 ‘ $f(a)$ -이미지’를 얻게 된다.

다른 척도 $\mu(m, n)$ 이 a 를 계산하는 데에 사용될 수도 있다. 그것들 중 가장 자주 사용되는 것은 수용력 척도라고 알려진 것이며, 이것은 Levy, Vehel과 Mignot에 의해 도입되었다:

$$\text{최대값 : } \mu_i(m, n) = \max_{(k, l) \in \Omega} g(k, l) \quad (9a)$$

$$\text{최소값 : } \mu_i(m, n) = \min_{(k, l) \in \Omega^*} g(k, l) \quad (9b)$$

$$\text{합 : } \mu_i(m, n) = \sum_{(k, l) \in \Omega} g(k, l) \quad (9c)$$

$$\text{등방 척도 : } \mu_i(m, n) = \text{Card}\{(k, l) | g(m, n) = g(k, l), (k, l) \in \Omega\} \quad (9d)$$

여기서 i 는 관측 픽셀 (m, n) 을 둘러싼 척도영역의 크기이고, Ω 는 척도 영역 내의 모든 픽셀 (k, l) 들의 집합이고, Ω^* 는 척도 영역 내의 영이 아닌 모든 픽셀들의 집합이고, $g(k, l)$ 은 위치, (k, l) 에서의 그레이 스케일 값이다. 확실히, 다른 척도들은 다른 Hölder 지수를 이끌어 내게 되고 처리된 이미지에 다른 영향을 일으키게 될 것이다. 연구결과에 따르면 ‘최대’ 척도와 ‘최소’ 척도는 각각 조그만 상세부분을 추출해 내는데, 그리고 명암을 추출해 내는데 더 적합함을 발견하였다.

(3) 소형 곤충 이미지에 대한 적용

많은 이미지들에 대하여 시험한 후, ‘최소’ 척도에서 더 좋은 세분화를 제시한다는 것을 알았다. 그래서 제안되는 방법에서는 다중 프렉탈 분석에 대하여 ‘최소’ 척도를 채택하였다. 본 연구에서는 야외조건에서 채집된 작은 곤충류의 인지에 효과가 높음을 보였다. 끈끈이 트랩 이미

지에서 작은 물체들(즉, 가루이 같은 작은 곤충)을 추출해 내기 위해서 $f(a)$ -이미지에 문턱 값을 적용하였다. 다중 프렉탈 분석을 이용하여 조그만 물체 구역을 추출해 내는 예를 그림 인지 18에서 제시하였고, 여기서 문턱 값은 $f(a) < 0.8$ 로 하였다.

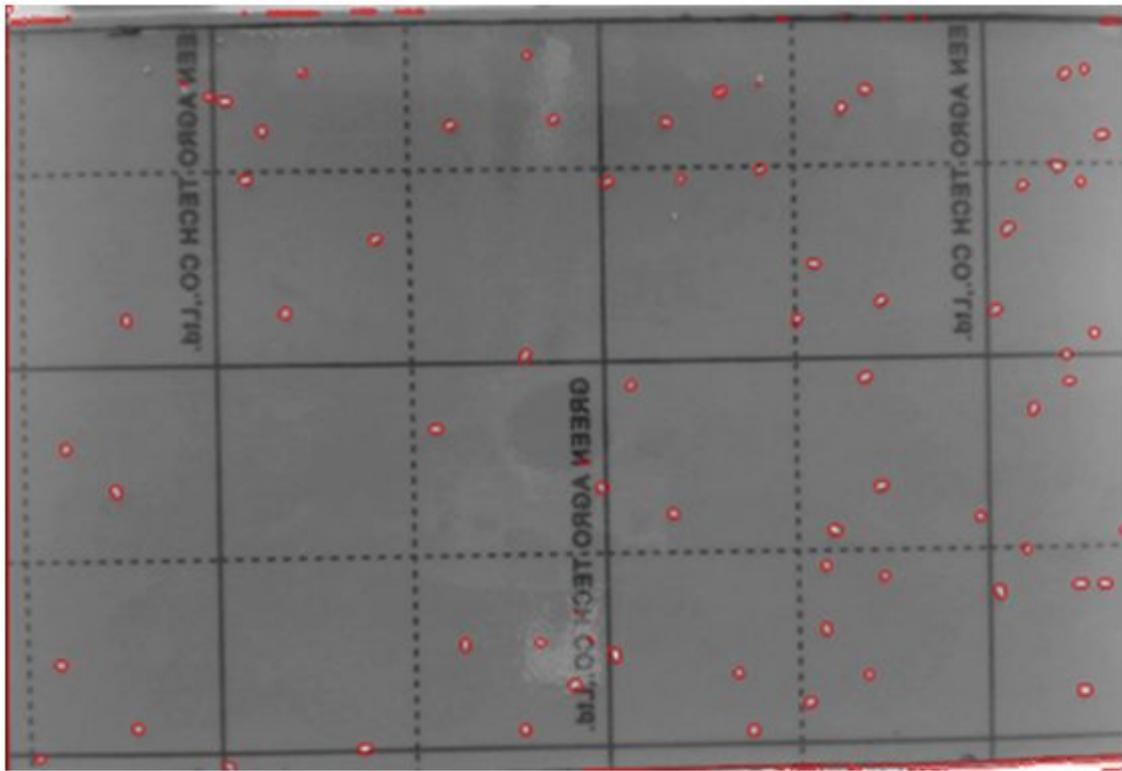


그림 인지 18. 다중 프렉탈 분석을 이용한 조그만 물체의 검출 예($f(a) < 0.8$)

그러나 검출된 물체들에는 가루이 이미지 뿐 만 아니라 변화하는 조명, 반사와 트랩의 표면에 인쇄되어 있는 격자무늬들에 의한 몇몇의 노이즈들도 포함되어 있다. 그래서 부차적으로 다중 프렉탈 분석 후, 노이즈들을 제거하는 작업들을 해 주어야 한다.

다중 프렉탈 분석에 의해서 생성된 조그만 이미지 구역에 대해서 순차적으로 형태학적인 연산(즉, 부식과 팽창)을 수행하도록 하였다. 이러한 형태학적인 연산을 수행함으로써 고립된 점들을 제거할 수 있었다. 이 단계에서 노이즈들로부터 가루이들을 식별하는 판정 값들은 물체의 높이(h)와 폭(w), 그리고 물체 구역에서의 최대 세기 값(I_{\max})들이다. 가루이 성충의 몸체의 크

기는 $2\text{mm} \times 1\text{mm}$ 이고, 이미지의 해상도가 640×480 일 때 가루이 이미지의 최대 길이는 5픽셀이다. 그러므로 가루이 이미지의 최대 높이와 폭은 5픽셀로 제한된다($h < 5, w < 5$). 가루이 이미지는 끈끈이 트랩 이미지에서 조그만 하얀 구역으로 나타나므로, 가루이 이미지의 세기 값은 배경 값 보다는 더 높아야 하고 격자들에 의해 생성된 노이즈 구역들은 배경 보다는 더 어두워야 한다. 문턱 값을 사용해서 가루이 이미지와 격자 이미지를 결정하였으며, 이 문턱 값은 사전 시험을 통해서 배경의 평균 세기 값으로 정하였다. 가루이 이미지의 최대 세기 값은 배경 평균값 보다 더 커야($I_{\max} > T_m$) 하고, 그렇지 않으면 물체 구역은 노이즈로 결정되어 제거하였다. 검출된 가루이를 그림 인지 19에서 제시하였고, 여기서 가루이 이미지라고 판단된 구역은 빨간 십자로 표시하였다.



그림 인지 19. 검출된 가루이들의 예

나. 실험 결과

온실에서 해충 검출 시험을 위해서 파프리카를 재배하고 가루이를 이식하여 증식시켜 밀도를 높인 후 상기 유인 실험을 수행하였다. 가루이가 유인된 88개의 트랩 이미지를 구하였다. 각각의 이미지에는 8마리부터 72마리에 이르는 가루이들이 촬영되었고, 전체적으로 3,055마리의 가루이들이 채집되었다. 컴퓨터의 계산능력을 고려하여 가루이 검출을 위해서 이미지 해상도는 640×480 픽셀로 하였는데, 이 경우 끈끈이 트랩에서 가루이 성충의 크기는 5×4 픽셀이 되었다.

다중 프렉탈 분석과 watershed segmentation 그리고 Otsu 알고리즘들을 적용하여 끈끈이 트랩 이미지에서 해충을 검출하였다. 이들 방법들의 검출 성능을 표(인지4)에서 제시하였다. 이들 방법들의 사실 긍정 비(TPR: True Positive Rate) 인식률은 모든 경우에서 90%를 넘어섰으며 특별히, watershed의 경우에는 97.8%를 보여주었다.

그러나 끈끈이 트랩의 표면에서 빛의 반사가 발생하고, 이것은 검출과정에서 가루이 이미지와 혼란을 일으킬 수 있는 반점 같은 노이즈들을 많이 생성하였다. 반사는, 은색의 카메라와 그 구조 틀과 같은, 끈끈이 트랩의 전방의 물체들에 의해서 주로 발생한다. 세 가지 모든 방법들에서 반사에 의해서 발생하는 오류를 보고하였으나, 다중 프렉탈 분석의 방법에서 11.2%의 가장 작은 오류 긍정 비(FPR: False Positive Rate) 인식률을 나타내었다(표(인지4)). Watershed 와 Otsu방법은 FPR이 각각 17.9% 36.7%로서 상대적으로 높은 값을 나타내었다.

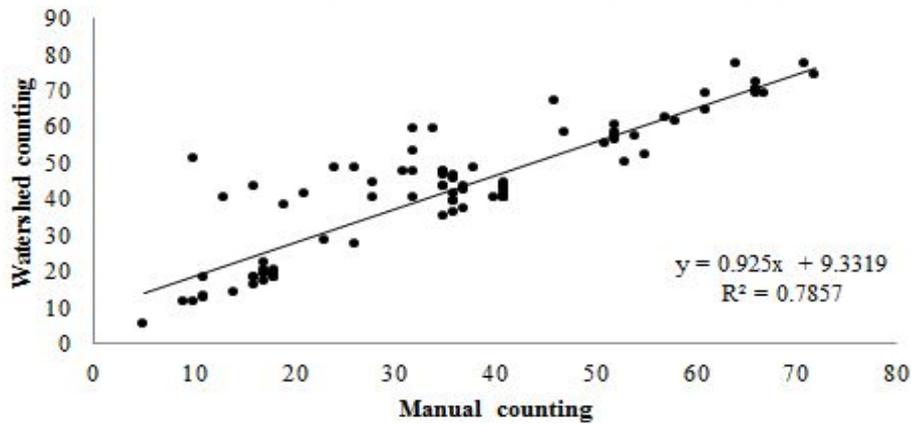
다중 프렉탈 분석 방법의 검출비는 TPR의 경우 watershed나 Otsu방법에 비해서 약간 낮기는 하지만, 노이즈 검출에 대한 신뢰도가 더 높아 종합적으로 보다 유용한 방법이 될 수 있다. 특히 노이즈가 심한 야외조건의 경우에는 watershed와 Otsu방법은 보다 높은 FPR을 생성시킬 가능성이 높다. 결과적으로 다중 프렉탈 분석법은 국소적인 정보뿐만 아니라 이미지의 전반적인 특성을 반영하기 때문에, 끈끈이 트랩에서의 반사와 변화하는 조명에 대하여 더 안정적인 결과들을 만들어 냄을 확인할 수 있었다.

표(인지4). 다중 프렉탈, watershed 그리고 Otsu 방법에 의한 가루이 검출 인지율 비교

	True Positive Rate	False Positive Rate
Multifractal analysis	0.9010.072	0.1120.099
Watershed	0.9780.030	0.1790.168
Otsu	0.9560.067	0.3670.216

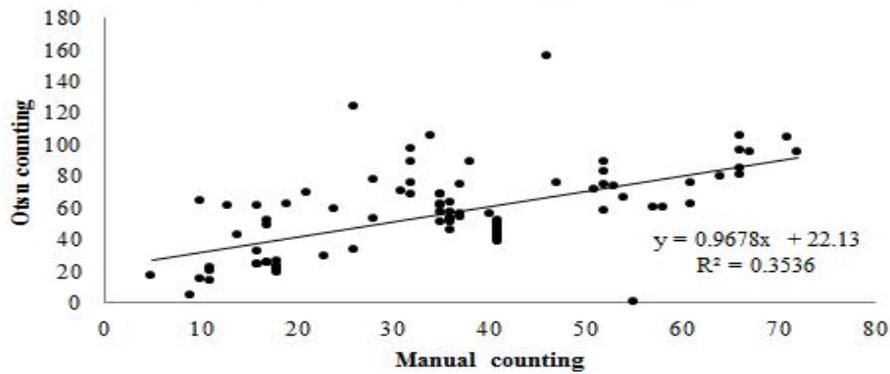
추가적으로 상기 방법들을 종합적으로 점검하기 위해 직접 인간이 계수한 개체수와 자동적으로 센 개체수 사이의 효과를 비교하여 보았다(그림 인지 20). 이 경우 계수인은 대상 해충에 대한 인지경험이 있는 사람을 택하였다(연구원 수준). 그림 인지 20에서 보면, 다중 프렉탈 분석에 의한 해충 검출 방법은 인력으로 센 실제의 데이터와 제일 높은 상관관계($R=0.95$)를 보여준다. 반면 watershed나 Otsu 방법의 경우에는 훨씬 낮은 상관관계($R=0.785$ 와 $R=0.372$)를 보여 주었다. 이는 이들 방법들이 더 높은 FPR값을 갖기 때문으로 여겨졌다. 이로써 다중 프렉탈 분석법이 야외 이미지로부터 가루이의 정보를 종합적으로 보다 정확하게 제공할 수 있음을 보였다. 또한 그림 인지 20에서 볼 수 있듯이 x축의 경우 낮은 밀도에서부터 높은 해충 밀도를 보이는데 다중 프렉탈 분석법은 곤충의 개체수가 많거나 적거나에 상관없이 안정적으로 채집할 수 있음을 보여주었다.

Watershed vs. manual counting



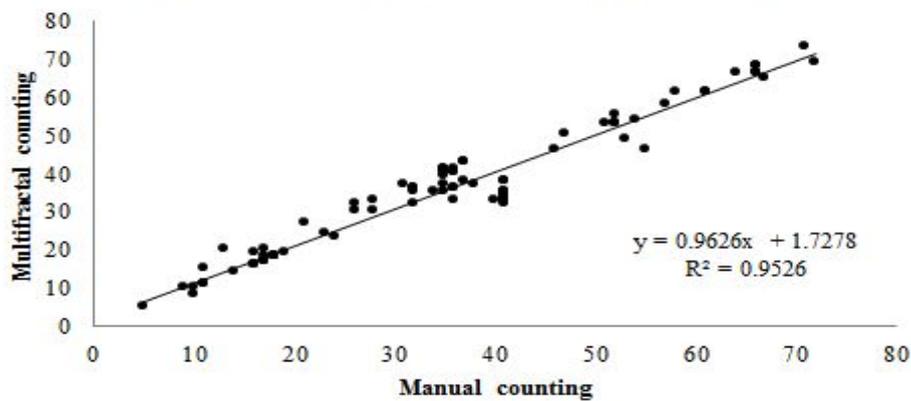
(a)

Otsu vs. manual counting



(b)

Multifractal vs. manual counting



(c)

그림 인지 20. 인력으로 계수한 경우와 자동적으로 계수한 경우의 상관관계. (a) 다중 프랙탈 분석법, (b) watershed 방법, (c) Otsu방법

끈끈이 트랩 이미지에서 소형 해충(가루이)를 검출해 내는 것뿐만 아니라, 다중 프렉탈 분석법은 작물의 잎에서 직접적으로 가루이를 검출해 내는 데에도 효과적이었다. 작물의 상태를 모니터링하거나 온실 해충관리를 위한 자동장치를 구현하기 위해서 작물의 잎에서 해충을 검출해 내는 것이 매우 중요하다. 잎에서는 더 많은 조직들과 노이즈가 있기는 하지만, 여전히 잎 표면에서부터 가루이 이미지를 인식해내는 것이 가능하였다. 그림 인지 21에서 제시하였듯이 굵은 잎맥과 노이즈들에서부터 가루이들이 검출되었다.



(a)

(b)

그림 인지 21. 다중 프렉탈 분석법을 이용한 작물 잎에서의 가루이 검출

더욱이, 본 연구에서 제안된 방법은 가루이 검출뿐만 아니라 진딧물 등의 유사한 소형 곤충들을 검출해 내는 데에도 적용될 수 있다. 본 연구에서 제안된 방법은 자동 해충 감지 시스템의 핵심 기술이 될 수 있으며, 또한, 온실 작물이나 곡물의 재배에 있어서 해충 관리 시스템의 구성에도 핵심 요소가 될 수 있다. 특히 다중 프렉탈 분석을 위한 계산을 하는 데에는 고가의 장비를 필요로 하지 않기 때문에, 본 연구에서 제안된 방법은 저비용과 고효율의 상업화에 장점을 가지고 있다.

제 4 절 인지 및 방제 효과 야외 검정

1. 연구 개관

구현되는 로봇과 인지 프로그램이 과연 효율적인지를 현장에서 확인하는 점이 매우 중요하므로, 제 3 연구진이 주가 되어 온실과 작물 및 해충을 확보하고 현장에서 평가 시험을 수행하였다. 이를 위해 작물과 해충이 일정 시기에 공급되도록 재배 또는 사육하고, 현장 여건에서 최적기에 인지 및 방제 등이 효율적으로 수행될 수 있도록 식물 잎, 해충 등의 촬영 조건 등을 최적화 하였다. 상기 춘사이와 케봇의 두 가지 로봇에 대해 인지효과와 방제효과를 온실에서 검증하였고, 트랩을 장착한 로봇의 유인효과를 검정(특허 출원번호: 10-2011-0067004)하였으며, 아울러 해충 관리 현장에서의 문제점을 제시하고 개선하도록 하였다.

2. 온실 건설

로봇을 구동시키기 위한 레일을 설치하고 시험작물과 가루이를 준비하기 위한 온실을 건설하였다. 당초 시험 수행예정이던 온실이 경남농업기술원 내 ATEC온실(대규모 마이스터대학 입교 농업인 훈련온실) 신축으로 인해 부서별 시험연구포장(온실)의 재배치를 하는 과정으로 인하여 온실 조성사업이 당초계획 보다 조금 늦은 2009년 4월말 경에 완성되었다. 그림 야외 1은 경남농업기술원의 시설전경 중 일부인데 A는 ATEC(농업기술교육센터)온실로서 농업기술원 시험연구국의 작물연구과 부지에 조성되어 2009년 2월에 준공되었다. B는 경남농업기술원 청사, C는 경남농업기술원 시험연구국 친환경연구과 소속 해충연구실이고, D가 해충연구실의 실험용 파일롯트 온실로서 여기에서 로봇 시운전 실험이 2009년 5월 말부터 실시되었다. 2008년도에는 기존의 파프리카 온실에서 기초적인 로봇 구동을 시험하였다.

그림 야외 2 는 조성중인 해충연구실의 파일롯 온실(그림 야외 1에서 보이는 D)의 내부 전경이며, 영상인식을 위한 해충 실내 사육, 작물 파종 및 정식 준비, 작물재배 및 관리가 원활히 이루어졌다.



그림 야외 1. 실험실 건물 전경

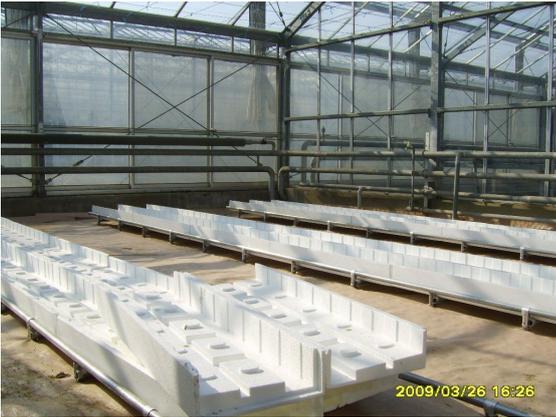


그림 야외 2 파일럿 하우스 내부 (그림 야외 1에서의 "D" 하우스)

3. 온실 내 레일의 설치

전체 구성은 레일과 로봇 두 부분으로 구성되어 있으며, 로봇의 구동장치는 크게 해충 자동인지 시스템과 미량분사 시스템으로 구성되었다. 해충 자동인지 시스템과 미량 분사 노즐은 로봇 팔에 설치되어 있으며, 미량분사를 위한 공기 압축 장비와 레일을 따라 움직이는 장치들은 로봇의 몸통에 설치되어 있다(그림 야외 3).

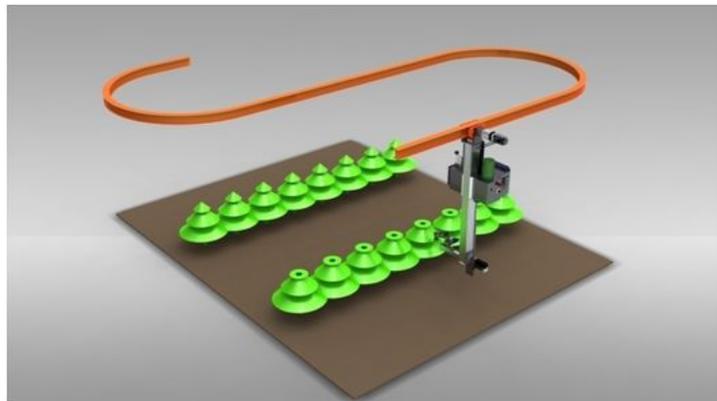


그림 야외 3 레일 시스템의 모식도

레일은 경남농업기술원 내 온실 안에 설치되었으며(그림 야외 4), 레일 높이는 2미터이고 케이블 로봇은 이 설치된 레일을 따라 이동하도록 하였다.



그림 야외 4. 온실 내 레일 설치

4. 현장 설문조사와 상업화

본 연구의 산업적 활용을 위해 다음과 같은 업무를 추진하였다.

- 경제적 평가를 위한 농가 대상 설문조사
- 특허출원
- 2008 농림수산물과학기술대전 출전

가. 경제적 평가를 위한 농가 대상 설문조사

자동살충 시스템의 연구결과에 대한 경제성을 알아보기 위해 진주 인근에 있는 파프리카 농가를 직접 방문하여 설문조사를 하고 무인정밀방제에 대한 농가의 요구사항을 알아보았다.

설문에 사용된 문항은 별첨에 붙이며 항목 중 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 파프리카 정식-수확까지 작물재배 기간 중 해야 할 농작업 중 심적부담이 큰 곳 (총점 100 점 중 많은 점수를 주는 방식으로 점수를 안배) - - - - -

그림 야외 5와 같이 병해충 조사 방제에 제일 많은 배점을 준 농가가 전체의 35%, 두 번째로 배점을 많이 준 농가가 약 53%로 나타나 대부분의 농가가 공통적으로 병해충 조사와 방제에 심적 부담을 가지고 있음을 알 수 있었다.

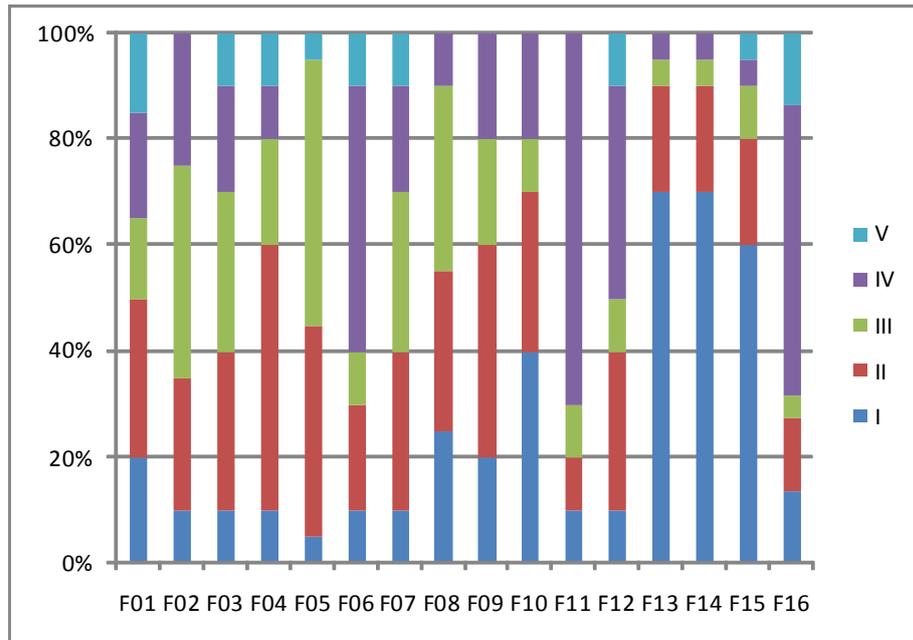


그림 야외 5. 작물 재배 기간중 심적 부담이 되는 항목의 우선순위

- I) 유인, 적과, 수분, 신초 가지치기,
- II) 병해충 조사, 방제 작업,
- III) 양액, 수분, pH, Ec 관리,
- IV) 차광, 채광, 가온, 보온, 온도조절,
- V) 과실수확, 선별, 포장

(2) 병해충 중 방제가 곤란하여 무인정밀방제기가 개발되었으면 하는 해충에는(주요 해충에 큰 점수를 부여함 (총 100%) - - - - - 방제가 제일 힘든 가루이류와 총채벌레가 각각 47%로 나타나 방제가 곤란함을 알 수 있었다 (그림 야외 6).

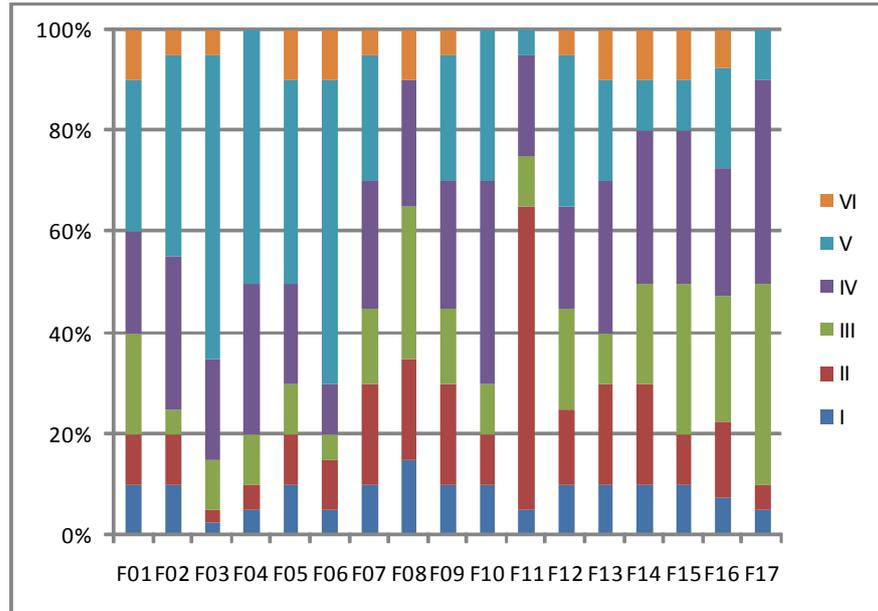


그림 야외 6. 방제가 어려운 해충에 대한 배점비교

I) 담배거세미나방, II) 담배나방, III) 진딧물류, IV) 총채벌레류, V) 가루이류, VI) 작은뿌리파리류)

(3) 농장에서 자동화가 진행되었으면 하는 기기(바람직한 순서를 가장 필요한 것부터 순서대로 고름) - - - - -

80%가 제1순위를 자동식 해충인식 및 방제기. 그다음이 반자동식 방제기, 반자동식 적과기 순서로 선택하였다(그림 야외 7).

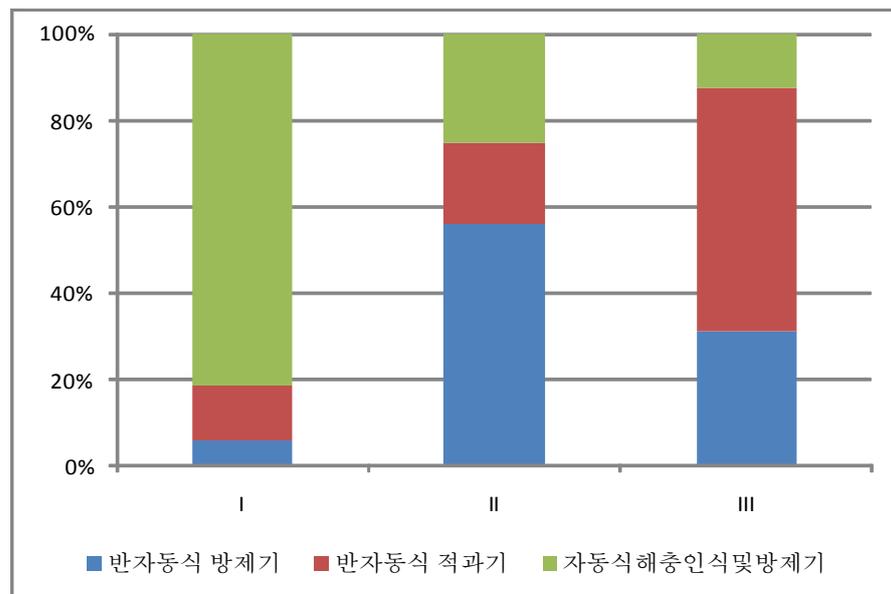


그림 야외 7. 방제기 자동화 요구 순서

(4) 방제하기 어려운 병해충(어려운 병해충을 선택함) - - - - -

그림 야외 8의 결과에서 알 수 있듯이 가루이류의 방제가 매우 어렵거나 어렵다로 답한 농가가 68% 정도로 나타나 응애나 식염성 해충에 비해 방제가 어려움을 알 수 있었다(그림 야외 8).

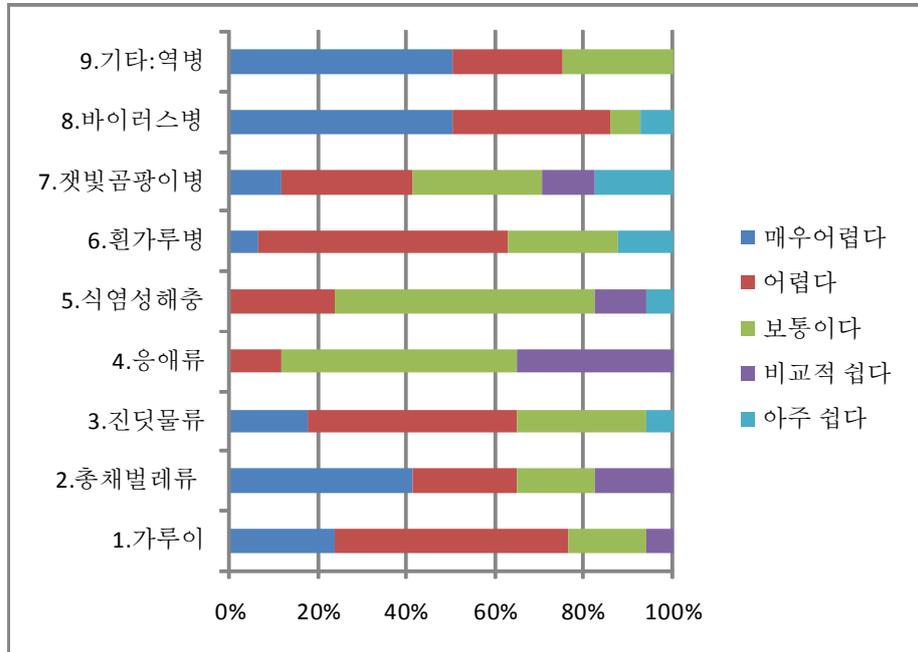


그림 야외 8. 병해충들을 방제 할 때 어려운 정도 조사

I) 가루이류, II) 총채벌레류, III) 진딧물류, IV) 응애류, V) 식염성 해충, VI) 흰가루병, VII) 젓빛곰팡이병, VIII) 바이러스병, IX) 기타 병해충

(5) 농약 살포시 가장 어렵거나 염려스러운 점은? - - - - -

64%정도의 농가가 농약으로 인해 작업자의 건강이 우려되는 것이 매우 그렇다고 답했으며 약 29%가 약간 그렇다고 답해 작업시간이나 인건비등 온실운영 시에 생기는 어려운 점들 중에 건강에 대한 염려가 가장 높게 나타났다(그림 야외 9).

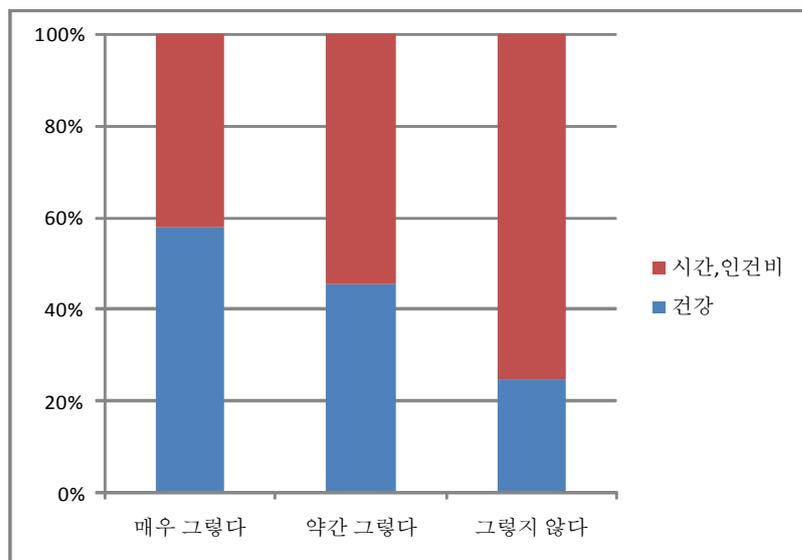


그림 야외 9. 농약 살포시 가장 어렵거나 염려스러운 점에 대한 조사

(6) 농약 살포기기의 자동화는 어느 정도가 좋은 지? - - - - -

무인 전자동 예약 시스템 3에 대한 요구도는 17농가 중 11농가로 약 65%, 전자동 시스템 2는 29%로 반자동 시스템 1은 1농가만 선택을 하였다(그림 야외 10).

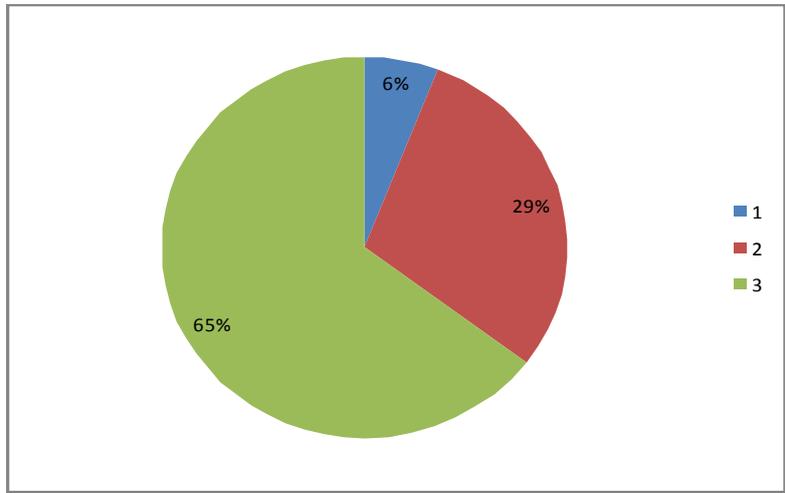


그림 야외 10. 농약살포기기의 자동화요구 정도 조사

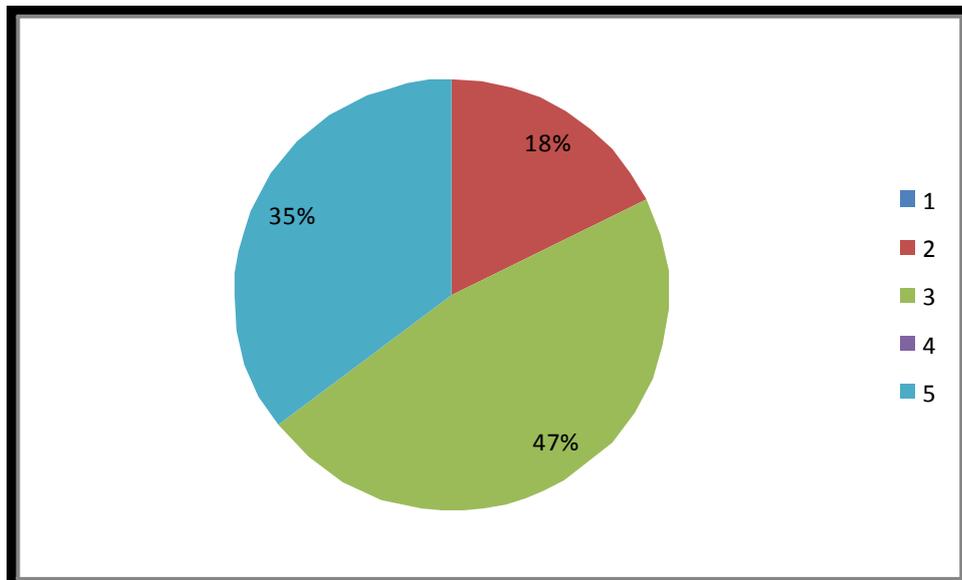
- 반자동 시스템 1: 무인으로 골골이 살포는 하되 골간 이동은 작업자가 수동으로 하며 농약 공급 호스를 수동으로 잡아 주어야 함.
- 전자동 시스템 2: 살포기가 전 농장에 무인으로 살포 가능하며 농약 공급 호스를 수동으로 잡아 주어야 함.
- 무인 전자동 예약 시스템 3: 모든 살포 과정을 자동으로 하며, 야간에 예약 작업이 가능하고 농약의 희석 및 준비는 수동.

(7) 농약 무인 살포기가 개발이 된다면 어떤 유형을 선택하겠는가? - - - - -
 위 질문의 결과는 아래 표1과 같다.

표 야외1. 농약 무인 살포기에 대한 선호도 조사

무인살포기 유형	기능	선택농가수
1.반자동+무감별	무인으로 골골이 살포 골간 이동은 수동으로 수행 작업자가 살포기를 골 안으로 끌고 다니며 살포하지 않아도 됨 작업자가 살포기의 살포 골을 수동으로 바꾸어 줌 농약 공급 호스를 수동으로 잡아 주어야 함. 농약은 국소 감별 없이 하우스 전체에 살포	0
2.전자동+무감별	살포기가 전 농장에 무인으로 살포 가능 농약 공급 호스를 수동으로 잡아 주어야 함. 농약은 국소 감별 없이 하우스 전체에 살포	3
3.전자동+수동감별	살포기가 전 농장에 무인으로 살포 가능 병해충 발생 지점을 순찰작업 등을 할 때 표시하여 표시된 부분만 살포	8
4.전자동 예약 및 수동감별	살포기가 전 농장에 무인으로 야간 등에 예약살포 가능 병해충 발생 지점을 순찰작업 등을 할 때 표시하여 표시된 부분만 살포	0
5.전자동 예약 및 전자동감별	살포기가 전 농장에 무인으로 야간 등에 예약살포 가능 병해충 발생 지점을 살포기가 자동으로 야간 순찰하며 감별한 후 발생한 지점에서만 약제살포	6

전자동+수동 감별형을 선택한 농가가 47%, 전자동 예약 및 전자동 감별형을 택한 농가가 35%, 전자동+무감별형을 택한 농가가 18%였다 (그림 야외 11).



그림야외 11. 농약 무인 살포기가 개발이 된다면 어떤 유형을 선택하겠는가에 대한 결과

(8) 당해 농가의 여건을 고려하여 얼마정도의 가격이면 자동화 기계를 구입 하시겠습니까? (구매가격은 3년간 분할하여 지급한다고 생각하시고 총금액을 기재함.) - -

결과는 300만원에서 1억까지 다양하였으나, 예외적으로 1억을 선택한 농가를 빼고 지출 가능한 기계의 평균가격은 1,612만원 정도였다.

이상의 설문 조사의 결과를 요약하면 파프리카 온실재배 농가의 어려운 점은 해충방제(특히 가루이류)에 있으며, 과거의 경제적이거나 시간적인 부담보다는 건강에 대해 고려하는 부분이 점차 증가하고 있음을 알 수 있었다.

이에 따라 농약 살포의 형태도 작업자가 직접 온실에 들어가 농약을 뿌리는 것보다 무인 살포기에 대한 요구도가 높았고, 더 나아가 해충의 출현위치를 전자동 감별(또는 수동 감별)하고 특히 자동적으로 농약을 살포하는 방제체제를 원함을 알 수 있었다. 방제기 가격도 1,600만원 이상으로 고가의 가격을 지불할 용의가 있음을 알았다.

나. 농업용 로봇 상용화 사례

(1) 국내현황

(가) 인터넷을 이용해 트랙터를 원격 조정할 수 있는 기술이 지난 2005년 농진청에서 개발을 완료하였다. 이 경우 원격제어모드로 전환, 관리자에 의해 시스템을 재설정해 경로 수정이나 원격운전에 따른 문제를 해소할 수 있도록 제작됐다.

(나) 승용이양기 자동직진시스템을 개발해 상용화 : 이 시스템에는 GPS신호를 병렬로 수신해 방위를 결정하는 벡터GPS방식으로 측방편차가 $\pm 10.5\text{cm}$ 에 불과하였다.

(다) 과채류 접목로봇(그림 야외 12)을 2008년 농진청이 개발을 완료했는데 국내에 23대가 보급됐고 이탈리아 등 외국에도 14대가 보급되어 있다. 접목로봇은 대목과 접수용 육묘트레이를 그대로 컨베이어에 올려놓으면 파지절단장치로 이송되어 절단되고 세라믹핀을 꽂아 접합해 배출하는 하나의 작업공정으로 되어있다.



그림야외 12. 과채류 접목로봇

전체적인 농업용 로봇기술 수준은 채소자동이식기, 과일선별기, 내 외부 비파괴 선별기술, 채소접목로봇, 축산용 개체관리 자동화 기술 등이 상용화 단계에 접어들었다.

연구개발을 마치고 실용화 시도단계에는 운반용인 파트너로봇과 식물공장에서 상추 등 채

소재배기술 등을 들 수 있으며 연구단계에 머물고 있는 분야는 착유로봇과 사과와 토마토 등의 수확로봇, 시비방제용 무인헬기 등은 연구단계에 머물러 있는 실정이다.

(2) 외국 사례

(가) Parkinson(Rekow, 1998)등은 항공기 착륙유도장치에 사용되고 있는 CDGPS기술을 응용해 트랙터의 항법장치를 설계하여 자율주행기술을 개발했다.

(나) 일본의 자율주행 농업 로봇기술(Hashimoto, 2001; Ito, 1990)은 경운과 제초 등에 적용 하고 있다.

5. 무인 미량분사 정밀방제기 시스템의 평가를 위한 실험

가. 실험작물 및 대상해충

“무인 미량분사 정밀방제기(그림 야외 13)”의 방제효율을 검정하기 위해 온실 내에서 재배되고 있는 파프리카 (품종: 스페셜)에 발생한 담배가루이(*Bemisia tabaci*) Type-Q를 사용하였다.

파프리카 종자를 2011년 1월 27일에 취아시킨 후, 3월 9일에 직경 10cm정도의 육묘용 포트에 정식하였다. 정식 후 파프리카용 양액을 주기적으로 관주하면서 재배하였다. 4월 6일과 10일에 실내에서 사육 중이던 담배가루이(Type-Q) 성충을 육묘중인 경남농업기술원 유리온실에 방사하여 산란을 유도하였다.

담배가루이가 산란된 파프리카 식물체를 2011년 5월 6일 가로 17.2m 세로 19.4m의 3연동 비닐온실에 정식하여 각 온실 당 3이랑씩 총 9이랑에 정식하였다. 정식 2주 전에 우분과 시비량을 토양분석 결과에 기초하여 표준시비량 기준으로 시비하였다. 재식거리는 220cm x 25cm이었고, 한 이랑 당 약 75주가 정식되었다.

나. 실험약제 및 처리방법

실험 살충제는 담배가루이 약인 thiamethoxam 10% 입상수화제 (상품명: 아타라, IUPAC name: 3-(2-chloro-1,3-thiazol-5-ylmethyl)- 1,3,5-oxadiazinan- 4-ylidene (nitro)amine)를 사용하였다. 실험 약제를 2000배로 희석하여 2011년 5월 24일 “무인 미량분사 정밀방제기” 처리, “일반 관행 엽면처리 (10리터 용량 배부식 농약살포기)”, “무처리” 등 3개구로 나누어 4반복 난괴법으로 살포하였다. 각 처리구는 9주의 파프리카를 대상으로 하였으며 처리구 사이에 4주의 완충 식물을 배치하여 총 148주의 파프리카가 사용되었다.

“무인 미량분사 정밀방제기” 처리구에서는 담배가루이의 존재 여부를 감지하여 최소량의 약량만 처리가 되도록 하였으며, “일반 관행 엽면처리구”에서는 약액이 식물체 전체에 흠뻑 묻을 정도로 처리하였다. 처리 후 소모된 약량을 조사한 결과 “무인 미량분사 정밀방제기” 처리구에서는 구당 평균 325ml 살포되었으며, “일반 관행 엽면처리구”에서는 구당 평균 1012ml 살포되었다.

처리직전 및 처리 3, 7, 10, 14일 후 각 처리구당 10개의 잎을 임의로 추출하여 성충, 약충, 그리고 우화 후 남아있는 탈피각의 수를 조사하였다. 조사 성적은 Minitab v15 (Minitab Inc.)로 분석하였으며, 백분율로 표시되는 “방제가”는 분산과 평균간 독립성을 부여하기 위해 Arcsine 변환을 한 후 통계분석을 진행하였다.



그림 야외 13. 작동 중인 무인미량분사정밀방제기

다. 방제효과

본 연구팀에 의해 개발된 “무인 미량분사 정밀방제기”의 효율성과 담배가루이의 방제효과를 “일반관행 엽면처리(관행처리)” 방법과 비교하여 검증하기 위해 “무처리”를 포함 3개 처리 난 피법 4반복으로 수행하고 약제처리 전 및 처리 3, 7, 10, 14일 후에 각 처리구당 10개의 잎을 임의로 추출하여 성충, 약충, 그리고 우화 후 남아있는 탈피각의 수를 조사한 결과 표 야외2와 같은 결과를 얻었다.

약제를 처리한 구에서는 무처리구에 비해 약제처리 3일 후 담배가루이의 밀도가 현저하게 적었으나, 대체적으로 약제처리구 간에는 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 처리 3일 후와 처리 10일 후 약충의 밀도가 “무인 미량분사 정밀방제기” 처리에서 “관행처리”에서보다 유의성 있게 적어 더 큰 방제효과를 보였다(그림 야외 15). 성충의 경우 통계적으로는 유의성이 없었으나 “관행처리구”에서 전체적으로 약간 낮게 나타났다(그림 야외 14). 이는 “관행처리”의 경우 해충의 존재 여부에 불문하고 식물체 전체에 고루 약제가 살포되어 성충에게 기피현상을 주었을 수도 있다고 생각된다.

담배가루이의 경우 약제를 살포한 후 살충력 검정을 위해 생존 약충의 수를 계수하는 것이 가장 확실한 방법이나, 현실적으로 잎에 붙어있는 약충의 생사를 판단하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 약충이 생존을 하였을 경우 우화를 하게 되므로 탈피각을 계수하여 유충의 생존 여부를 판단할 수 있다. 본 실험에서도 탈피각의 수를 조사하였는데, 표 야외2에서 보는 바와 같이 가장 명확하게 살충력을 판단해 볼 수 있다.

표 야외3은 성충, 약충, 탈피각의 조사내용을 근거로 방제가(防除價)를 백분율로 표시하였다. 앞서 설명한 바와 같이 탈피각의 수로 추정하는 것이 가장 확실한 방제효과 평가방법이므로, 이를 비교해 보면, 약제를 처리한 구 간에는 큰 차이가 없이 처리 7일 후 까지 90%에 가

까운 높은 방제효과를 보였다. 처리 10일 후에는 방제가가 75% 수준까지 감소하였고 14일 후에는 66-69% 정도의 방제가를 보였다. 그러나 처리구 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(그림 야외 16).

이상의 결과를 종합해 볼 때, “무인 미량분 사정밀방제기”를 사용한 약제살포에서 일반 “관행살포”에 비해 동등한 방제효과를 보였으며, 무처리에 비해 처리 14일 후 까지 69% 정도의 방제가를 유지하는 것을 알 수 있었다. “무인 미량분사 정밀방제기”의 경우 실제 사용된 살포량이 관행처리의 30% 밖에 살포되지 않았던 점을 고려하면 같은 방제효율을 달성하는데 사용 약제를 70% 정도 절감할 수 있는 효과를 보였으므로, 금후 “무인미량분사정밀방제기”가 실용 모델로 개선이 되어 농가에 보급할 가치가 있을 것으로 생각된다.

표 야외2. 로봇에 의한 농약살포, 전통적인 농약살포, 농약살포가 없는 세 가지 경우에 있어서 성충, 약충, 10장의 잎 당 성충 탈피각의 숫자의 변화

Treatment	0 DAT		3 DAT			7 DAT		
	Adults	Nymphs	Adults	Nymphs	Emergence Shell	Adults	Nymphs	Emergence Shell
Robot Spray	21.0 ^a	45.7 ^a	8.3 ^a	46.0 ^a	14.3 ^a	7.0 ^a	59.0 ^a	21.0 ^a
Foliar Spray	17.3 ^a	56.3 ^a	5.7 ^a	63.0 ^b	16.7 ^a	2.3 ^a	65.0 ^a	29.7 ^a
No Spray	24.0 ^a	49.7 ^a	28.0 ^b	129.0 ^c	137.0 ^b	28.0 ^b	183.3 ^b	198.0 ^b

Treatment	10 DAT			14 DAT		
	Adults	Nymphs	Emergence Shell	Adults	Nymphs	Emergence Shell
Robot Spray	14.0 ^a	76.0 ^a	75.3 ^a	22.3 ^a	132.3 ^a	133.7 ^a
Foliar Spray	13.3 ^a	109.7 ^{ab}	82.7 ^a	18.7 ^a	142.0 ^a	149.3 ^a
No Spray	23.7 ^b	159.3 ^b	319.3 ^b	26.0 ^a	281.0 ^b	434.0 ^b

* DAT: 처리 후 경과한 날짜(Days after treatment)

a,b,c 한 행에서, 뒤에 같은 문자가 따라오는 평균은 Duncan 의 다중범위검증에 의해 $p = 0.05$ 에서 크게 다르지 않다.

표 야외3. 성충, 약충와 탈피각들의 계수에 기초한 세 가지 처리방식 각각의 처리효과

Treatment	3 DAT			7 DAT		
	Adults	Nymphs	Emergence Shell	Adults	Nymphs	Emergence Shell
Robot Spray	66.0% ^a	61.2% ^a	89.5% ^a	71.4% ^a	65.0% ^a	89.4% ^a
Foliar Spray	72.0% ^a	56.9% ^a	87.8% ^a	88.5% ^b	68.7% ^a	85.0% ^a

Treatment	10 DAT			14 DAT		
	Adults	Nymphs	Emergence Shell	Adults	Nymphs	Emergence Shell
Robot Spray	32.4% ^a	48.1% ^a	76.4% ^a	1.8% ^a	48.8% ^a	69.2% ^a
Foliar Spray	22.0% ^a	39.3% ^b	74.1% ^a	0.6% ^a	55.4% ^a	65.6% ^a

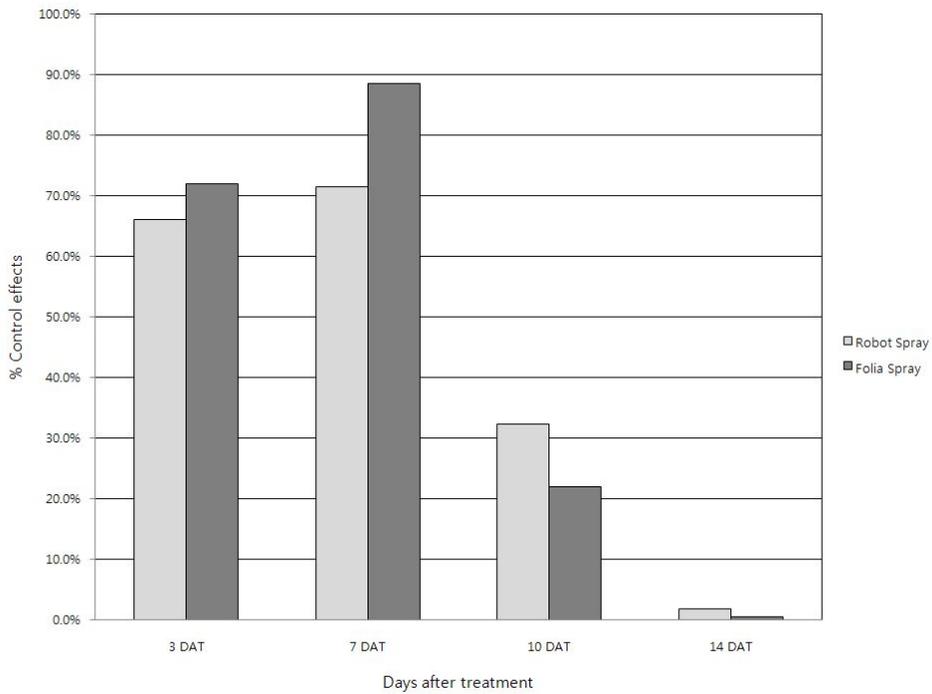


그림 야외 14. 처리 후 성충의 계수에 기초한 로봇에 의한 농약살포방법과 전통적인 농약살포방법에 의한 담배가루이에 대한 제어효능의 백분율

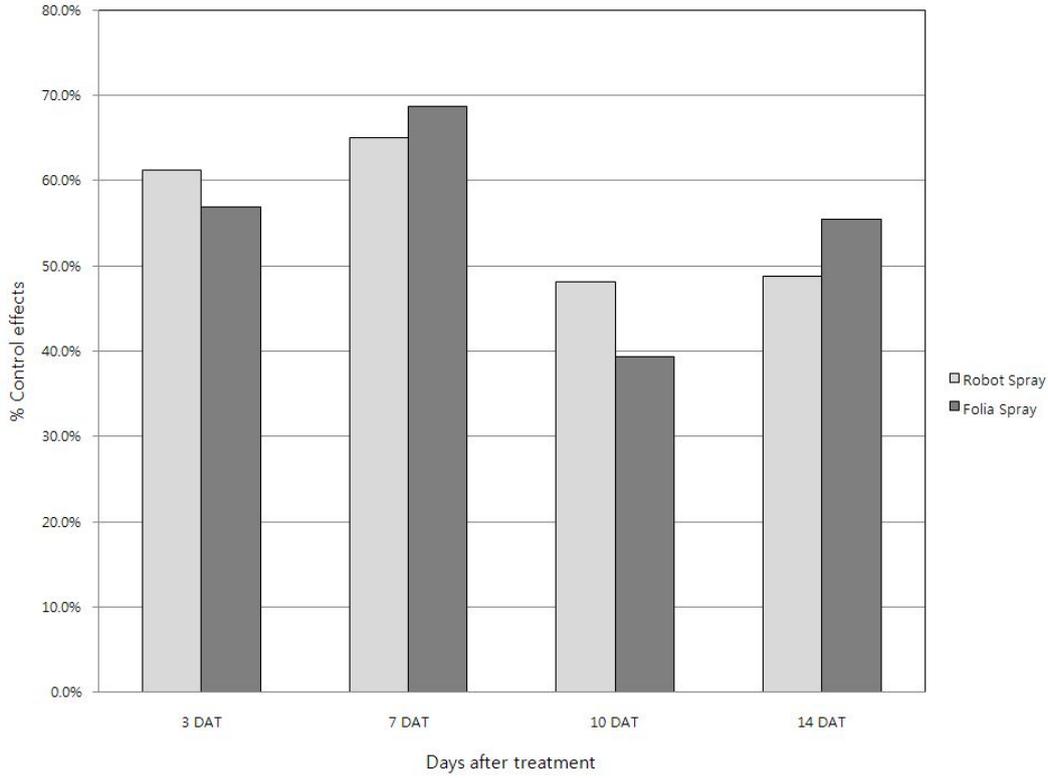


그림 야외 15. 처리 후 애벌레의 계수에 기초한 로봇에 의한 농약살포방법과 전통적인 농약살포방법에 의한 담배가루이에 대한 제어효능의 백분율

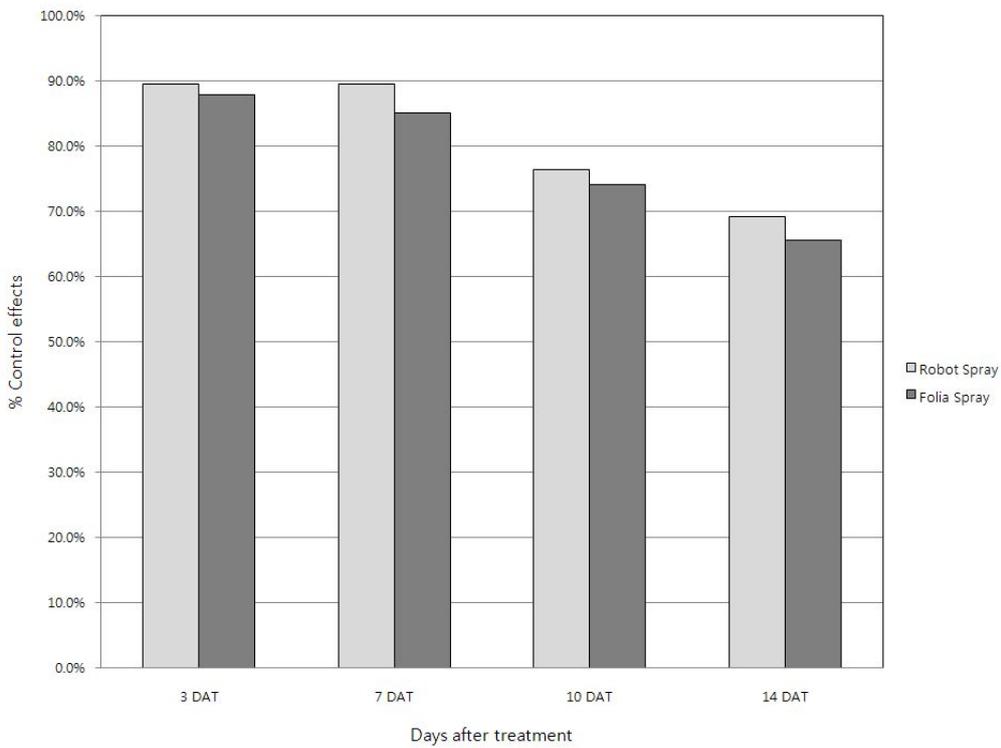


그림 야외 16. 처리 후 새로 탈피한 성충들의 껍데기 계수에 기초한 로봇에 의한 농약살포방법

과 전통적인 농약살포방법에 의한 담배가루이에 대한 제어효능의 백분율 비교. 로봇에 의한 농약살포방법과 전통적인 농약살포방법에는 큰 차이가 없었다.

6. 해충 유인실험 평가

가. 실험 배경

연구자들의 현장 경험에 의거할 때, 자동 분사를 통한 살충제 처리도 중요하지만 로봇을 통해 낮은 밀도의 해충을 감지하여 조기 경보할 수 있는 점이 경작자들에게 매우 중요하다고 여겼다. 실제 해충 밀도가 높으면 경작자가 용이하게 찾을 수 있고 이에 대해 직접 약제를 살포할 수 있다. 그러나 밀도가 낮은 상태에서는 해충을 찾기가 용이하지 않기 때문에 약제를 살포할 수 없다. 특히 가루이가 식물병 매개충이 될 수 있음을 고려할 때 낮은 밀도에서 해충의 존재 여부를 파악할 수 있는 점은 효율적 해충관리의 관점에서 중요하다고 여겨졌다. 나아가 로봇은 상시 예찰이 가능하므로 낮은 밀도해충을 찾을 수 있는 가능성이 높다고 여겨졌다. 따라서 낮은 밀도에서도 해충을 찾아 조기 경보할 수 있는 가능성을 제시하기 위해 연구 후반부에 유인 실험을 수행하였다.

진주 농업기술원의 온실 내에서 케이블카형인 케봇에 의한 담배가루이 성충의 유인 및 계수방법은 그림 야외 17과 같이 수행되었다. 케봇이 각각의 식물체 앞에서 멈추면 노즐로 공기를 분사하여 식물체 잎을 흔들고 일정시간이 경과한 후 카메라는 해충이 붙어 있는 끈끈이 트랩의 영상을 포착·기록한다. 후속적으로 케봇은 개별 해충을 감별하고 유인·포획된 해충의 수(즉 담배가루이 성충)를 계수하고 유인위치 데이터를 기록한다. 이러한 과정은 케봇이 모든 식물들을 검사할 때까지 계속 반복하여 해충을 계수한 다음 케봇은 온실에서 원래 출발했던 위치로 되돌아오게 된다.

실험을 수행한 2011년 5월 27일부터 30일까지 진주지역의 기상상태는 각각 비, 구름, 맑음이었다. 시험은 온실 내·외기와의 기온 차이로 공기의 유입이 적은 오전이나 늦은 오후에 수행되었다. 또한 시험 수행 중에는 날씨가 흐리거나 비가 오는 조건이었는데, 담배가루이 성충의 이동요인이 억제된 상태에서 시험을 수행할 수 있었다. 온실의 기온은 수은 온도계로 측정하였고, 5월 27일 오전 11시와 5월 28일과 29일 오전 9시 경, 그리고 매일 오후 5시 이후의 기온은 각각 다음과 같았다. 5월 27일 22.0 ± 0.2 , 23.5 ± 0.3 ; 5월 28일 25.3 ± 1.3 , 28.8 ± 1.0 ; 5월 29일 27.5 ± 3.1 , 29.7 ± 0.6 ($^{\circ}\text{C}$)이었다. 식물체 앞에서 수광되는 빛은 조도계(Fisher Scientific Model Traceable, Friendswood, Texas)로 측정하였는데 5월 27일부터 29일까지 5,770-5,960, 9,300-9,580, 9,250-13,900 Lux 이었다. 전반적으로 식물체의 초장은 평균 34cm이었고, 최대 42cm, 최소 24cm 이었다. 각각의 식물체는 평균 28장의 잎을 가지고 있었다. 파프리카 식물체 잎의 온도는 비접촉 적외선온도계(Model TN408LC, ZyTemp, Science-Based Industrial Park, HsinChu, Taiwan 300)로 측정하였고, 케봇처리구와 기존 대조구에서 각각 18.1 ± 4.1 , 20.9 ± 0.5 ; 25.4 ± 0.7 , 27.0 ± 0.5 ; 21.2 ± 0.7 , 21.9 ± 0.9 ($^{\circ}\text{C}$)이었다.

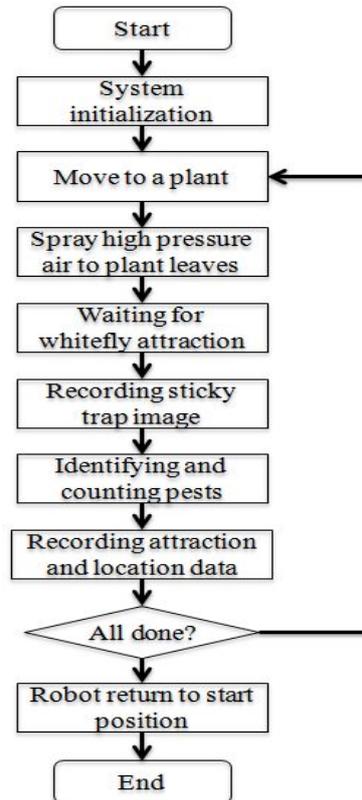


그림 17. 케봇의 가루이 유인 및 인지 수행을 위한 흐름도

나. 실험작물 및 대상 해충

파프리카(품종명 : 스페셜) 종자를 2011년 2월 7일에 취아시킨 후, 직경 10cm의 육묘용 포트에 2011년 3월 9일-10일에 정식하였다. 정식 후 파프리카용 양액을 주기적으로 관주하면서 재배하였다. 별도로 실험에 공시할 충을 확보하기 위하여 실내사육 중인 담배가루이 성충을 4월 6일과 14일에 육묘중인 초자온실에 방사하여 산란을 유도하였다.

담배가루이가 산란된 파프리카 식물체를 2011년 5월 6일 가로 17.2m 세로 19.4m의 3연동 비닐온실에 정식하여 각 온실 당 3이랑씩 총 9이랑에 정식하였다. 정식 2주 전에 우분과 시비량을 토양분석 결과에 기초하여 표준시비량 기준으로 시비하였다. 재식거리는 220cm x 25cm이었고, 한 이랑 당 약 75주가 정식되었다.

다. 실험 과정

파프리카에서 담배가루이의 유인효율을 측정하기 위하여 기존 방법(control)과 비교하였다. 기존 방법으로는 상단 10cm 위치에 끈끈이 트랩을 매달고 그 곳에 유인된 담배가루이 성충 개체수를 계수하였다. 이와 비교하여 케봇의 경우 움직이면서 담배 가루이를 유인하도록 하였는데 공기를 담배가루이 성충이 붙은 식물체 앞에 분사할 때 담배가루이가 날아올라 케봇에 부착된 끈끈이 트랩에 유인되도록 하였다. 끈끈이 트랩에 유인된 충들을 기기 스스로 인식하고 계수한 케봇 유인처리 구로 나누었다. 또한 케봇 유인 처리구는 유인된 담배가루이 마릿수 이외에도 유인트랩의 밝기, 온도, 온실 내 식물체의 위치 정보 등도 포함하였다. 처리구와 비처리구(Control)는 이웃하는 이랑이었고 이랑을 사이에 두고 담배가루이 성충의 이동을 최소화 할 필요가 있었다. 이를 위하여 이랑 사이에 흰색 망사 천으로 차단벽을 구축하였다. 동일한 이랑

내에 7주의 파프리카를 1 반복으로 하여 총 5반복으로 시험을 수행하였다. 각각의 반복별로 망사 차단벽을 한쪽 벽과 천정이 열린 형태인 C-자 모양의 망사 벽을 지면에서 약 100cm 높이로 설치하였다.

비처리구에서 끈끈이 트랩은 식물체의 Canopy로부터 10cm 위치에 그리고 각각의 Block의 중앙에 매달았다. 케봇 처리구에서 끈끈이 트랩은 식물체 잎들로부터 최대한 가까이 접근하였을 때 10cm 까지 떨어져 있었다. 트랩의 전면에 카메라 렌즈가 부착되어 있고 렌즈와 끈끈이 트랩의 거리는 10cm 이었다. 유인 효율을 측정하기 위하여 시험 수행 전에 식물체에 있는 담배가루이 성충의 밀도를 최대한 자극하지 않는 방법으로 식물체 전체의 잎에 부착된 담배가루이 성충을 계수하여 시험 전 밀도로 정하였다. 시험 수행 후에 조사된 밀도는 앞서 언급한바와 같이 조사하였다. 시험구 배치와 조사 성적은 완전 임의 배치법을 따랐고 통계분석은 SAS ver. 9.1로 분석하였고, 평균간 차이는 Tukey 검정을 하였다.

라. 실험 결과

케봇을 이용하여 담배가루이 성충을 유인하고 포획한 결과는 표 야외4에서 보는바와 같다. 유인효율이 일반 끈끈이 트랩을 이용하는 경우 30분간 평균 0.72마리의 성충을 유인하였으나 케봇을 이용한 경우 30분간 평균 3.11마리로 약 4배 이상의 높은 유인효율을 보였다.

표 야외4 재래식 트랩과 케봇을 이용한 유인효율성 사이의 비교

Attraction treatment	No. of whiteflies attracted before experiment (May 27)	Time for attraction (min/rep)	No. of whitefly attracted after treatment	Percent of whitefly attracted to the treatment against pre-survey in 30min
	Ave. ± SE		Ave. ± SE	Ave.± SE
Conventional	810 ± 201	150	27.4 ± 9.2	0.72 ± 0.30
케봇	586 ± 339	30	15.8 ± 7.1	3.11 ± 1.27**

**Highly significant at P<0.01

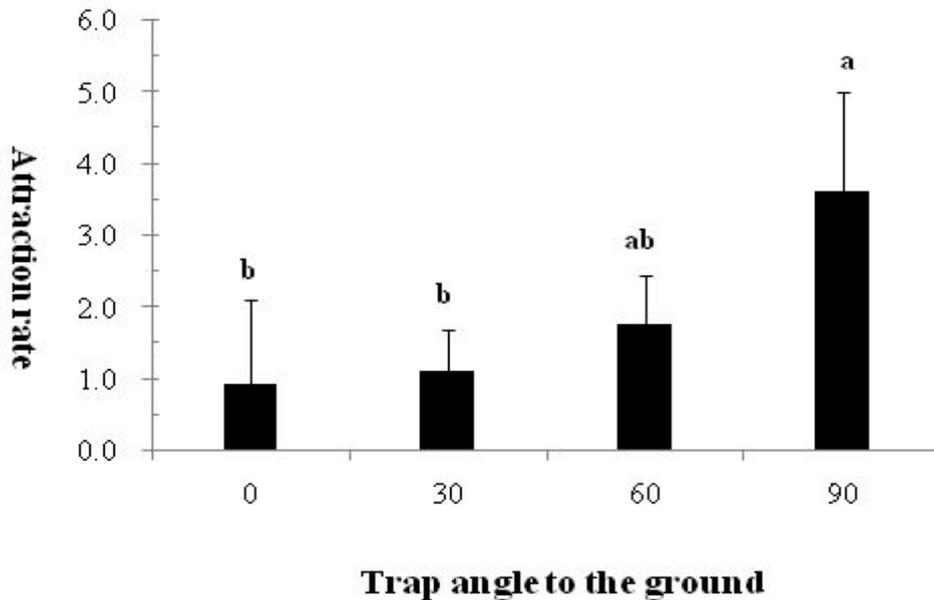


그림 18. 앞 형태의 방향에 대한 끈끈이 트랩의 여러 각도에 따른 케봇을 이용한 유인 비율

(1) 끈끈이 트랩의 자세와 유인효율성 결과

그림 로봇 4B에서 보는 바와 같이 케봇에 황색 끈끈이 트랩을 부착하고 노즐로 공기를 분사하고, 이때 비상하는 담배가루이 성충을 끈끈이 트랩에 채집하였다. 지면과 수평인 0도에서부터 지면과 수직인 90도로 설치한 끈끈이 트랩의 각도에 따라서 유인효율을 비교하였다. 그림 18에서는 끈끈이 트랩을 지면에 수직으로 설치하였을 때 유인 및 포획효율이 높은 것으로 나타났다.

(2) 해충 군집 개체수의 크기에 따른 결과

작물에 있는 가루이 개체수가 적다고 하더라도 로봇을 이용해 샘플링(즉, 바람을 불어서 작물과 잎을 흔든 후 끈끈이 트랩에 가루이들을 포집하는 것)하면 해충이 잡힐 수 있음을 보였는데 이는 해충 피해 예방에 주목할 만한 결과였다. 그림 19에서 작물 1주당 붙은 가루이 개체군의 크기(최대 260 개체 수) 수준이 달라짐에 따라 로봇에 의해서 포집된 곤충들의 개체수 실험 결과를 보여준다. 개체군의 크기가 커짐에 따라 포집된 곤충의 개체수도 증가하는 경향을 보여준다. 그러나 포집된 곤충의 최대 개체수는 트랩 당 8 개체수로 제한되었으며, 매 트랩에서 1~8 개체수 사이에서 변화하였다.

그림 19에서 보듯이 군집 개체군의 크기가 작은 경우에는 포집되는 개체수가 없는 빈도수가 여전히 많기는 하지만, 단위 작물 당 10 개체수 이하가 있는 데에서도 곤충이 여전히 포집된다는 점은 주목할 만하였다.

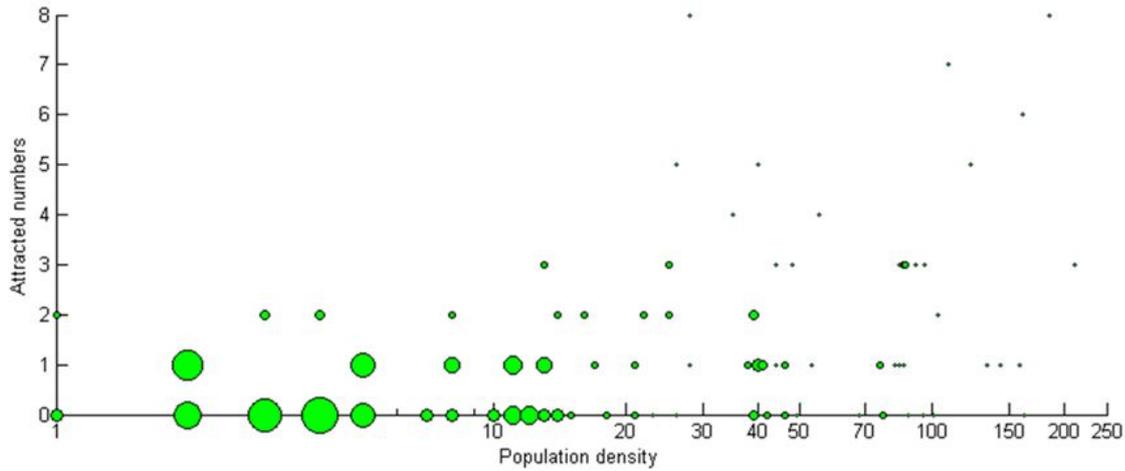
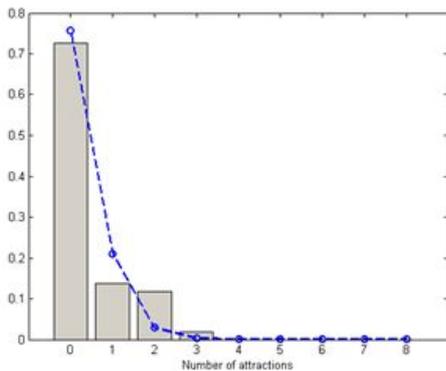
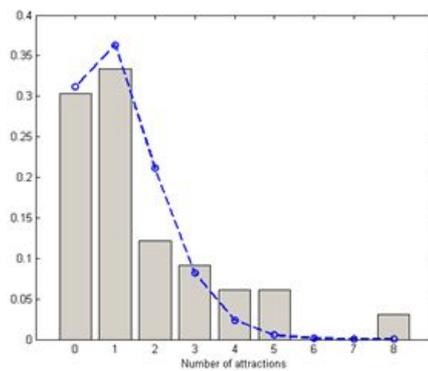


그림 야외 19. 다양한 개체군 크기에서의 해충 유인 실험 결과. 그림의 동그라미 크기는 채집 빈도를 의미함.

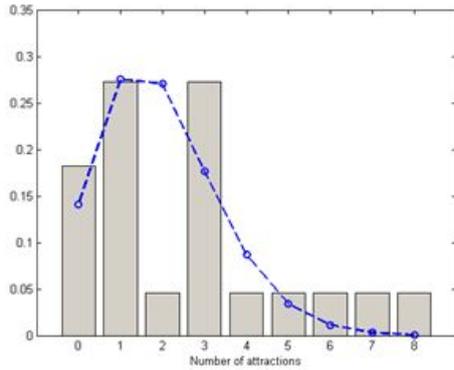
작물체에 있는 해충 개체군 크기에 따른 포집 효율성을 설명하기 위해, 두 가지 수준의 곤충 밀도(트랩 당 15 개체수와 트랩 당 80 개체수) 수준에 따라서 포집된 곤충의 빈도수를 보여주는 막대그래프(그림 야외 20)를 그렸다. 이 막대그래프에서는 낮은 개체군 밀도에서 적어도 1 개체가 유인되어 포집된 경우가 30%에 이르는 것을 보여주었다. 이 막대그래프의 경우, $\lambda = 0.84$ 인 Poisson 분포로 적합되었다. 개체수가 10~80인 개체군 크기인 경우에는 적어도 1 개체수의 곤충이 포집되는 경우가 대략 70%였으며(그림 야외 20b), 이 경우에도 $\lambda = 1.83$ 인 Poisson 분포로 피팅되었다. 높은 개체군 밀도(>80 개체 수)에서는 적어도 1 개체수의 곤충이 포집되는 비율은 대략 85%였으나 이 경우에는 Poisson 분포와 잘 맞지 않았다. 이는 작물에서의 아주 높은 밀도의 개체군의 경우(그림 야외 20)는 샘플 빈도수의 변이가 크기 때문으로 추정된다.



(a) $n \leq 16$



(b) $16 < n \leq 80$



(c) $n > 80$

그림 야외 20. 여러 수준의 개체군 군집의 크기에 따른 해충 포집수 빈도 및 Poisson 분포

(3) 반복 샘플링에 대한 고찰

로봇을 이용해서 샘플링을 할 경우에는 반복 샘플링(즉, 바람 불고 포집하는 과정의 반복)이 가능하기 때문에 반복 포집의 효과를 검토하였다(그림 야외 21). 샘플링을 반복함에 따라 작물에 부착된 곤충의 개체 수가 계속적으로 줄어든다고 하더라도, 평균적으로 10~45 개체수 수준에서 계속적으로 곤충을 포획되었다. 이것이 의미하는 바는 로봇이 야기하는 바람 불기는 국소적이지만, 최소한의 바람불기의 영향으로 계속적으로 곤충을 포집할 수 있다는 점인데, 이는 해충 모니터링에 잘 적용 될 수 있으리라 여겨진다. 또한, 작물에 붙은 곤충의 군집 개체 수는 한 번 반복 당 43.92마리 범위의 수준에서 계속적으로 감소하였다.

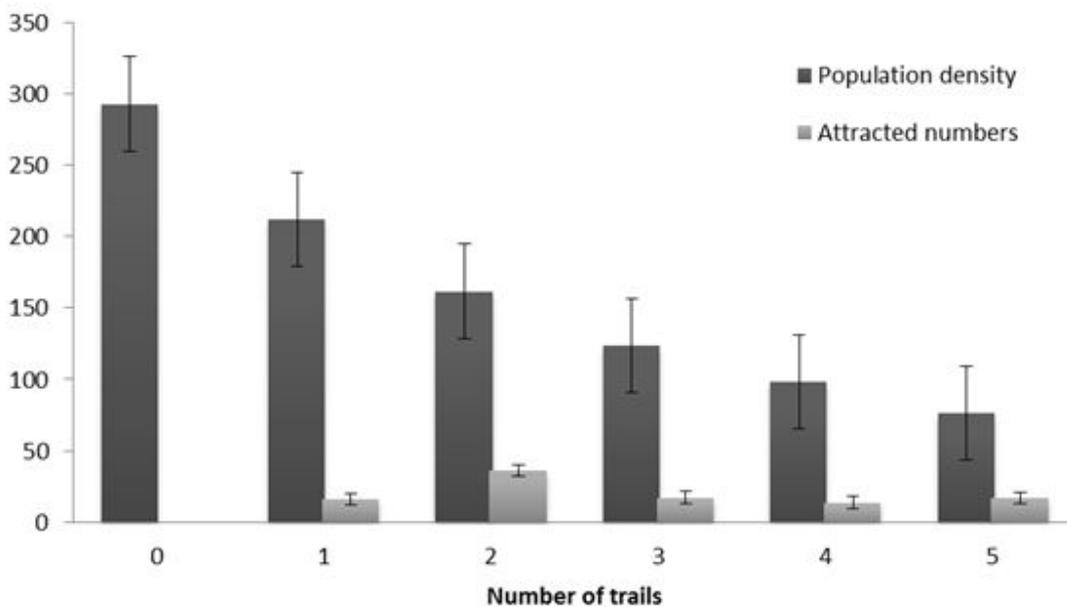


그림 야외 21. 반복 로봇 샘플링에 의한 해충 포획. 작물체에 있는 곤충의 개체군의 크기가 줄어들어도 일정수가 계속적으로 채집됨.

(4) 논의

파프리카 식물체를 가해하며 생활환을 유지하고 있는 담배가루이 성충을 케봇으로 유인하고

포획한 결과는 기존의 끈끈이 트랩을 이용하여 예찰하는 것보다 효율이 높았다(표 야외4). 온실 조건 하에서 가루이의 개체군 크기가 작은 경우에도 로봇에 의한 곤충 샘플링이 성공적이었다는 점은 주목할 만하다(그림 야외 21). 이에 대한 Poisson 분포 적합은 가루이 포집에 대한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 그렇지만 그림 야외21에서 보여진 바와 같이, 개체군 크기가 큰 경우에 포집되는 곤충들의 개체수 변이의 수준이 아주 높았다. 높은 개체군 밀도(>80)에서는 Poisson분포로의 피팅이 잘 맞지 않았다(그림 야외 20c). 그 이유는 아마도 개체군이 클 경우에는 포집되는 개체군 밀도의 빈도수 변이가 아주 크기 때문인 것으로 추정된다(즉, 그림 야외 20에서와 같이, 개체군 크기가 증가함에 따라서 포집되는 개체 수가 그대로 증가하지 않는다).

그러나 본 실험에서는 한 군데에서만 채집하였으므로 앞으로 많은 수의 샘플링을 통해 표본 효율을 검정할 필요가 있다. 아울러 이와 관련하여 끈끈이 트랩을 이용한 샘플링의 효율성 (Kim et al, 1999)에 대한 연구를 추가하여 로봇 샘플링 효과를 보완할 필요가 있다고 여겨진다.

이전의 연구들에서는 여러 샘플링 시간대에서 넓은 영역에 걸쳐서 많은 수의 샘플들을 수집하였다. 그렇지만, 본 연구에 있어서는 로봇을 제작하고 앞에 붙은 곤충들을 확인한 후에 국소적인 수준에서의 포집의 효율성을 검사하는 것에 초점을 맞추었다. 한 온실에서 많은 수의 로봇들이 작동될 수 없다는 점을 고려하여, 차후에는 제한된 수의 로봇이 작동할 때 샘플링 효율을 증가시키기 위한 더 많은 연구가 있어야 한다고 보인다.

그러나 유인 효율성을 고려하면, 로봇을 이용한 샘플링을 국소적으로 시행하는 것이 전망이 좋은 것으로 보인다. 특히 반복하여 유인·포획하였을 때 식물체 중에 있는 담배가루이 성충밀도의 1/3 이상을 유인 포획할 수 있는 것으로 나타났다(그림 야외 20). 각각의 반복에서, 가루이들이 계속해서 포집되었다. 그러므로 만약 로봇을 계속해서 동작시킬 수 있다면, 가루이들을 누적적으로 포집할 기회가 많아질 것이다. 우리의 연구에서는, 샘플링을 하는데 짧은 시간동안만 소모하였다. 그래서 샘플링 시간을 늘인다면 더 많은 포집 기회를 가지는 것이 가능할 것이다. 로봇은 원래 오랜 시간 동안 연속적으로 작동되도록 설계 되었다는 점을 고려할 때, 로봇을 이용한 반복 샘플링의 수행은 문제가 아니다. 필자가 아는 한, 여러 수준의 개체군 크기에 따른 로봇을 이용한 샘플링에 관한 연구가 수행된 적이 없다. 그러나 본 연구에서도 반복 샘플링이, 특히 낮은 개체군 크기에 대해서, 얼마나 효율적인가 하는 것을 측정하지는 않았다. 차후의 연구에서는 로봇을 이용한 반복 샘플링의 경우에 있어서 유인 효율성을 측정하기 위한 실험을 수행할 수도 있다.

끈끈이 트랩에 유인된 담배가루이를 카메라로 인식하고 계수하는 것은 Qiao et al.(2008)이 색깔과 크기에 기반을 둔 이미지 분석을 통하여 가능하였다. 이 방식을 적용하면 초기 담배가루이 성충의 발생위치 확인과 방제가 가능하고, 밀도를 예측하고 방제하는 데 있어서 샘플링 수단으로서 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 실제로 온실에서 병해충의 밀도가 형성된 이후보다도 형성을 시작하는 초기 단계에 방제하는 것이 매우 유용한 전략이라고 볼 수 있다. 이는 해충이 식물병을 매개할 때 조기경보의 중요성을 부각시킨다. 특히 담배가루이가 파프리카의 주요 해충인 점을 고려하면 그 의의가 크다 하겠다. 가루이들을 유인하는데 있어서, 특히 낮은 개체군 크기의 경우, 로봇에 의한 샘플링의 효율성은 결과적으로, 해충 발생에 대한 조기경보시스템의 발전으로 간주될 수 있다.

그러나 이 기법은 끈끈이 트랩에 곤충이 유인되어서 포획된 상태에서만 수행될 수 있고, 성충

을 대상으로 국한하여 밀도를 파악할 수 있어 알이나 약충의 밀도를 알 수 없는 한계를 가진다고 할 수 있다. 아울러 다른 종에도 적용할 필요가 있다. 또한 꽃노랑총채벌레와 같이 끈끈이 트랩에 유인이 되기는 하지만 가루이류 보다도 더 작고 가늘고 긴 벌레인 경우에는 지금보다도 더 높은 해상도를 가진 기술을 적용하는 것이 바람직할 것이다. 한편 끈끈이 트랩에 유인되기 보다는 식물체의 성장점에서 가해하는 목화진딧물이나 차면지응애의 경우에는 식물체에 붙어있거나 성장점의 잎이 기형화 되어가는 초기의 피해를 직접 관찰해서 분석할 수 있는 기술의 적용이 필요할 것이다. 이러한 기술의 적용에 있어서 Zhu and Zhang (2010)은 나비목 해충의 날개 영상으로 종 동정을 시도하였고 매우 효과적인 결과를 도출하였다. 이와 같은 기술을 적용할 경우 이들 미소해충에 대한 피해조사에 근거한 자동화된 방제체계를 수립할 수 있을 것으로 생각된다. 식물체 잎에 붙어있는 알이나 약충과 같은 경우에는 잎의 뒷면을 정밀하게 조사할 수 있어야 할 것이다. 하지만 현실적으로 담배거세미나방 유충과 같이 시시각각 크기가 변화하고 형태가 다양한 경우 방제하는 방법과 식물체 줄기나 파프리카 과실 속을 식해하는 해충인 경우에는 다소 한계가 있다고 생각된다.

케봇을 이용한 담배가루이의 유인을 통한 밀도예측 기술은 해충의 인지부터 방제까지 이르는 전 과정의 일부이다. 몇 가지 특징적인 면은 1) 유인효율을 짧은 시간에 높일 수 있고, 2) 정적인 끈끈이 트랩의 경우와 대비하여 수 회 반복유인이 가능하고 이렇게 함으로써 유인효율을 더 높게 할 수 있을 뿐만이 아니고 3) 전반적인 해충의 밀도를 줄이는 부수적인 효과도 기대되며 노동력을 필요로 하지 않는다는 점이다. 케봇을 이용하는 경우 해충의 방제측면에서 특징은 시간과 공간적인 해충 개체군에 대한 자료를 수집할 수 있다는 점이다. 공간적인 측면에서 고려할 때 식물체가 파프리카와 같이 높게 자랄 때 식물체의 높이와 더불어 입체분포자료도 얻을 수 있지만 본 시험에서는 식물체가 어려서 이러한 자료는 얻을 수 없었다. 부가적으로 케봇으로 온실내 탄산가스 농도, 실온, 습도 등을 컴퓨터 인터페이스를 통하여 센스 부착으로 간단하게 온실 내 시공간의 정보를 수집할 수 있다.

현재 다기능 로봇을 상상할 수 있지만 여기에는 비용의 문제가 발생할 수 있기 때문에 농가 현실에 맞게 최적화할 필요가 있다고 생각되며, 대규모 상업적 온실에 적용하는 데 시간효율을 향상시키는 샘플링 기술의 개발이 필요할 것으로 생각된다. 미래에는 야간에 유인자료를 수집하기 위한 적절한 광 조건을 로봇을 통하여 구현할 수 있다면 해충의 분포양상을 아침에 관리자가 파악하고 적절한 명령을 내리는 시기가 되면 좀 더 생력화한 방향으로 해충방제를 실현하는 시기를 앞당길 수 있을 것이다.

제 5 절. 해충 분포 및 분산에 대한 모델

1. 연구 개요

해충의 인지 및 약제 살포를 위해서는 포장(온실) 내의 해충 밀도를 적절히 파악할 필요가 있다. 특히 해충은 시공간에서 확산을 하므로 분포가 다양하게 나타나는데, 상시 순찰체제의 확립을 위해서는 해충의 분산 양상을 파악할 필요가 있다. 해충의 공간분포 및 확산 양상을 규명하기 위해서 제 1 세부 연구진이 주가 되고 제 3 연구진이 사육한 가루이를 온실 내에 접종시키어 시간에 따라 분산되도록 한 후, 밀도를 조사하여 그 변이를 분석하고 적절히 모델링하였다.

1년 차(2009년도)에는 파프리카 실험을 위한 작물이 준비되지 않았으므로 토마토(품종명 : 산타)를 대상으로 가루이를 접종하여 얻은 예비실험 자료를 이용하여 시공간분포를 확산모델로 분석하고 가루이 군집의 확산계수를 계산하였다. 2년 차(2010년도)에는 파프리카를 재배하고 사육한 가루이를 접종하여 온실 내에서 분산을 연구하였다. 온실 내에서 가루이 군집의 시간에 따른 공간분포의 변화를 관찰하기 위해서 교차상관관계를 분석하였다. 3년 차(2011년도)에는 가루이 군집 분포에 대한 교차상관관계 분석을 계속하고 샘플링효과 등에 대하여 고찰하였다. 온실 내에서 해충의 군집의 분포는 온실 내에서의 미묘한 변화나 차이에 많은 영향을 받으며 온실 내에서의 바람의 영향을 현저히 받음을 알 수 있었다. 가루이 군집의 시공간적 동태는 복잡하나 시간이 지남에 따라 적절히 확산 양상을 통해 분산됨을 알 수 있었다.

2. 가루이의 분산 양상

일정한 환경 여건에서 가루이가 이동과 생식을 통해 얼마나 많이 분산하는지를 알기 위해 분산되는 양상을 밀도 조사를 통해 추적하고, 밀도 동태에 대해 간단한 확산 모델을 적용하였다. 크기 625cm X 740cm의 온실 내에 각 식물의 크기가 40cm ~60cm인 포트를 40cm 간격을 두고 정렬하였다. 포트의 간격은 평균적으로 50cm 이었으며, 이를 격자간 거리로 간주하였다. 토마토 모종 포트를 가로×세로= 13×13=169 개를 정식한 후(그림 확모1) 담배가루이 (*Bemisia tabaci*)를 포트가 놓인 중간에 접종한 후 일주일 간격으로 토마토 잎에 산란된 알과 성충의 밀도를 관찰하였다.

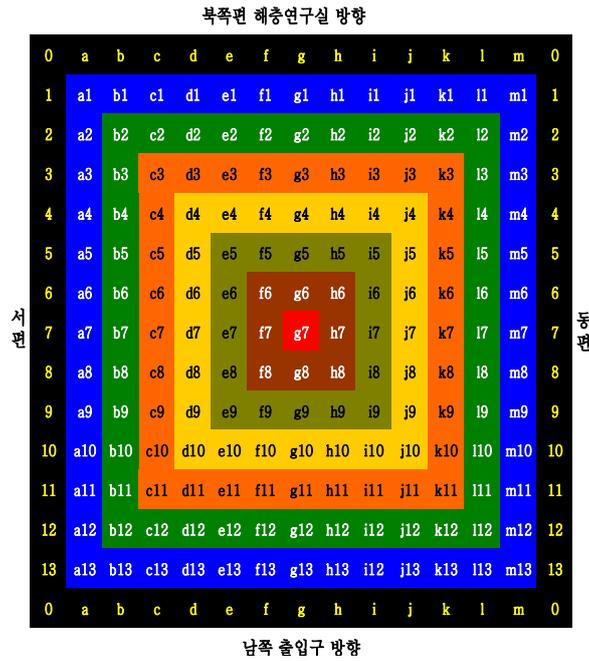


그림 확모1. 가루이 확산 모델링을 위한 토마토 포트 배치도

각 포트가 차지하는 공간을 하나의 격자로 간주하였다. 그림 (확모2 - 4)는 각 격자(각 포트)에서 집중 후 1주(그림 확모2), 집중 후 2주(그림 확모3), 집중 후 3주(그림 확모4)에 각각 계수한 가루이 개체수를 나타낸다.

확산 트랩 1주차 조사 (08.09)													
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
1	15	25	28	34	96	75	54	63	61	72	34	4	21
2	21	16	25	18	73	81	53	54	39	13	14	9	12
3	18	17	20	19	41	35	56	40	35	19	15	14	12
4	23	15	19	29	78	29	41	70	97	43	21	12	5
5	10	20	43	34	78	65	99	71	109	29	20	7	8
6	20	21	27	49	81	39	119	140	71	37	6	6	7
7	17	14	22	66	24	67	156	65	117	23	9	22	10
8	8	11	18	31	31	45	89	91	114	28	17	10	13
9	12	12	20	31	35	32	79	53	68	25	17	11	16
10	16	7	14	22	47	33	74	52	48	14	6	8	6
11	5	8	16	53	54	35	47	48	37	18	10	7	10
12	20	9	12	50	42	65	44	34	56	48	9	17	13
13	14	15	10	63	29	26	32	37	59	16	14	10	16

150 이상	40 ~ 60 미만
100 ~ 150 미만	20 ~ 40 미만
80 ~ 100 미만	10 ~ 20 미만
60 ~ 80 미만	10 미만

그림 확모2. 해충을 감염시킨 1주 후 가루이 균집분포(격자 당 가루이 개체수)

트랩별 가루이 성충 수 조사 3주차 (08.23)

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
1	108	132	208	196	254	224	156	187	309	272	113	79	143
2	136	125	201	206	257	225	211	218	162	114	73	100	87
3	101	156	146	188	116	130	218	101	172	126	103	56	76
4	105	153	205	98	166	152	138	152	296	202	113	120	62
5	140	125	328	105	176	204	210	187	300	182	138	76	62
6	154	156	377	135	184	258	206	332	248	182	88	66	89
7	155	92	156	212	201	166	173	220	367	138	101	82	81
8	58	92	79	246	204	186	184	257	416	199	120	51	81
9	59	115	101	172	135	180	197	244	278	156	89	67	89
10	111	37	67	153	202	137	202	163	239	148	111	81	60
11	110	56	119	110	183	189	214	164	217	141	100	61	91
12	98	85	123	99	192	344	168	211	234	362	101	100	52
13	113	49	57	104	92	138	141	107	200	102	119	53	67



그림 확모3. 해충을 감염시킨 2주 후 가루이 군집분포(격자 당 가루이 개체수)

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
1	36	57	93	87	122	170	155	166	234	211	74	36	75
2	53	54	73	97	200	174	139	148	120	63	52	57	19
3	34	65	49	108	119	94	139	114	121	66	49	34	35
4	46	47	76	55	110	81	106	129	171	157	81	71	19
5	35	46	11	56	111	131	276	138	178	104	63	35	27
6	62	65	11	59	124	149	229	283	177	113	35	20	34
7	53	35	55	127	102	107	251	170	218	94	63	44	26
8	38	33	49	100	93	158	166	177	344	126	68	24	39
9	27	30	54	95	64	94	162	139	156	99	61	44	43
10	56	26	36	78	123	91	169	107	183	89	53	46	27
11	43	26	64	72	116	111	174	112	148	93	49	34	44
12	51	28	30	69	103	190	108	123	149	144	56	71	21
13	47	30	34	75	52	71	76	66	104	54	56	27	39

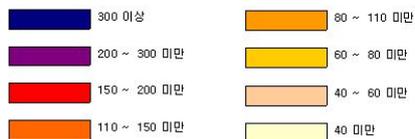


그림 확모4. 해충을 감염시킨 3주 후 가루이 군집분포(격자 당 가루이 개체수)

시간이 경과함에 따라 중간으로부터 온실 끝 쪽으로 퍼져나가는 양상을 알 수 있었다(그림 확모2 - 확모4). 정중앙의 격자에 있는 가루이 개체들을 계수한 결과 1, 2, 3주 후 각각 156, 251, 173마리이었다. 2주 후부터는 중앙 격자 주위에서 중앙 격자보다 많은 가루이 밀도가 관

찰되었는데, 이를 통해 중앙부 주변에서 2차로 개체군이 증식됨을 알 수 있었다. 한편 온실 북쪽방향(그림 확모2 - 확모4 윗부분)에 있는 격자의 가루이 밀도가 비정상적으로 증가하였는데 이는 열어놓은 온실의 측창을 통해 외부로부터 가루이의 유입이 있었던 것으로 여겨진다.

3. 해충 분산의 확산모델에서의 확산계수

위의 자료를 이용하여 가루이 분산에 관한 확산계수를 구하였다. 자료의 가용성과 편의성을 고려하여 1차원 수직방향으로 간주하고 각 격자당 수용한도는 없는 것으로 가정하였다. 1차원 확산방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + rN, \quad (\text{확모1})$$

여기서 N 은 시간 t 에서의 밀도, x 는 공간(1차원) 변수, r 은 개체군 증식계수, D 는 확산계수($40 \text{ cm}^2/\text{week}$)를 의미한다. 상기 개체군 확산방정식의 일반해는 아래와 같다.

$$N(x,t) = \frac{N(0,0)}{4\pi Dt} \exp\left(rt - \frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (\text{확모2})$$

모수를 구하기 위해 위의 공식에 대해 좌우변에 지수함수를 취해 회귀선형방정식으로 나타내었다.

$$\ln N(x,t) = \ln\left(\frac{N(0,0)}{4\pi Dt}\right) + rt - \frac{x^2}{4Dt} = \left(-\frac{1}{4Dt}\right)x^2 + rt + \ln\left(\frac{N(0,0)}{4\pi Dt}\right), \quad (\text{확모3})$$

위식의 주요 항은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y &= \ln N(x,t), \\ a &= \left(-\frac{1}{4Dt}\right), \\ b &= rt + \ln\left(\frac{N(0,0)}{4\pi Dt}\right), \\ X &= x^2, \end{aligned} \quad (\text{확모4})$$

위식 들을 이용하여 다음과 같이 선형회귀식으로 간단히 할 수 있다.

$$y = aX + b, \quad (\text{확모5})$$

위식에 상기 “2. 가루이 분산 양상”에서 구한 자료를 입력하면 확산계수를 구할 수 있다. 첫 제주 확산계수는 $D1 = 0.8763(0.5\text{m}^2/\text{week}) = 0.219 \text{ m}^2/\text{week}$, 둘 제주 확산계수는 $D2 = 0.5784(0.5\text{m}^2/\text{week}) = 0.1446 \text{ m}^2/\text{week}$ 가 되었는데 이를 평균하면 $D=0.7273(0.5\text{m}^2/\text{week}) = 0.1818 \text{ m}^2/\text{week}$ 이 되었다.

본 연구에서는 수용한도를 가정하지 않았는데 실제적으로 수용 최대 밀도를 측정하는데 어려움이 있었고, 연구 여건상 관찰 기간을 오래 할 수 없었으며, 본 연구에서는 초기 확산 속도를 주로 알고자 하였으므로 본 연구에서는 수용한도를 고려하지 않았다. 앞으로 장기간 연구와 높은 밀도 증식을 통해 수용한도에 대한 정보를 알아야 될 필요가 있다고 여겨진다.

4. 교차-상관과 해충 분포패턴

가. 교차-상관

교차-상관은 두 개의 서로 다른 시계열 데이터 사이의 정보량의 연관성을 측정하고자 할 때 사용된다. 신호처리에 있어서, 교차-상관관계는 두 개의 파형의 유사성 척도를 그들 중 하나에 대해서 시간지연을 매개로 하는 함수로서 표현한 것이다. 이것은 시간적으로 어긋난 내적(inner product)으로 잘 알려져 있다. 또한 확률이론과 통계학에서는 두 개의 무작위 벡터(또는 함수) f 와 g 사이의 공분산 $cov(f,g)$ 를 말한다. x-축으로 이동에 의한 차이만을 가지는 두 개의 실수 함수 f 와 g 를 생각했을 때, 얼마나 많이 g 를 x-축으로 이동시켜야 f 와 일치되는지 알아내기 위하여 교차-상관관계가 적용될 수 있다.

생태학에 있어서도, 해충 군집의 확산(Williams and Liebhold 2000), 피식자-포식자 계의 동태, 종 풍부도와 같은 확산과 동시성에 관한 주제(Raimondo et al. 2004; Tobin & Bjornstad 2005)에 교차-상관관계가 적용된 바 있고, 생물 군집들 사이에서의 동시성에 대해서도 교차-상관관계 계수가 보고되었다(Ims & Andreassen 2005).

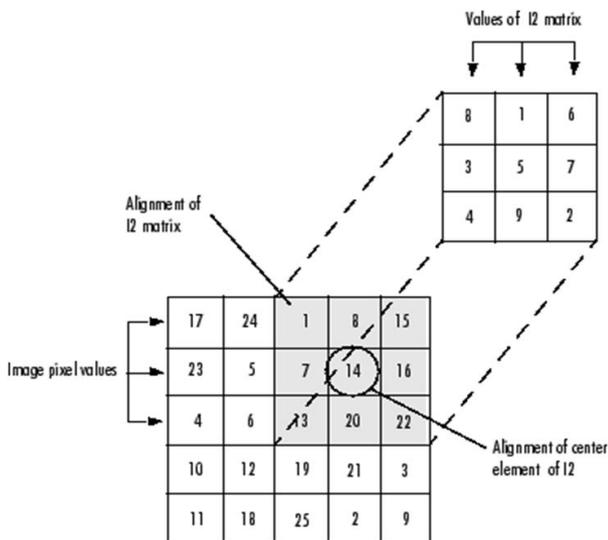


그림 확모5. 교차-상관관계 값을 계산하는 설명 예

$$(\text{교차-상관관계 값} = 1.8 + 8.1 + 15.6 + 7.3 + 14.5 + 16.7 + 13.4 + 20.9 + 22.2 = 585).$$

교차-상관은 식(확모1)에서 정의된다. 밀도의 공간분포 자료가 시간차를 가지고 채집되었다면 두 개의 채집 자료는 시간에 따라 두 개의 행렬이 주어지는 것으로 볼 수 있다(그림 확모5). 교차-상관계수를 계산하기 위해서, 두 개의 행렬들을 서로 교차시킨다(그림 확모5에서 회색). 그리고 그 두 행렬들의 중첩되는 성분들을 곱한다. 마지막으로 교차-상관계수는 앞에서 곱한 모든 값들을 합한 값이다. 두 개의 입력 행렬 데이터들 사이에 모든 중첩되는 경우에 대해서 이 과정을 반복한다.

$$C(i, j) = \sum_{m=0}^{M_1-1} \sum_{n=0}^{N_1-1} A(m, n) B(m+i, n+j)^* \quad (\text{확모6})$$

여기서 $0 \leq i \leq M_1 + M_2 - 1$, $0 \leq j \leq N_1 + N_2 - 1$ 이고, *는 복소수 켤레이다.

나. 해충 분포 자료 분석

교차 상관관계를 알기 위해 경남 진주 소재 경상남도 농업기술원의 온실(가칭 R 하우스)에서 제3세부 연구책임자 주관으로 담배가루이(*Bemisia tabasi* (Gonnadius))를 인공 접종시키고 2차원 분산 양상을 조사하였다.

2009년 7월 9일부터 8월 27일까지 일주일 간격으로 채집된 담배가루이 성충의 분포 양상을 조사한 결과는 그림 확모6 과 같이 나타났다.

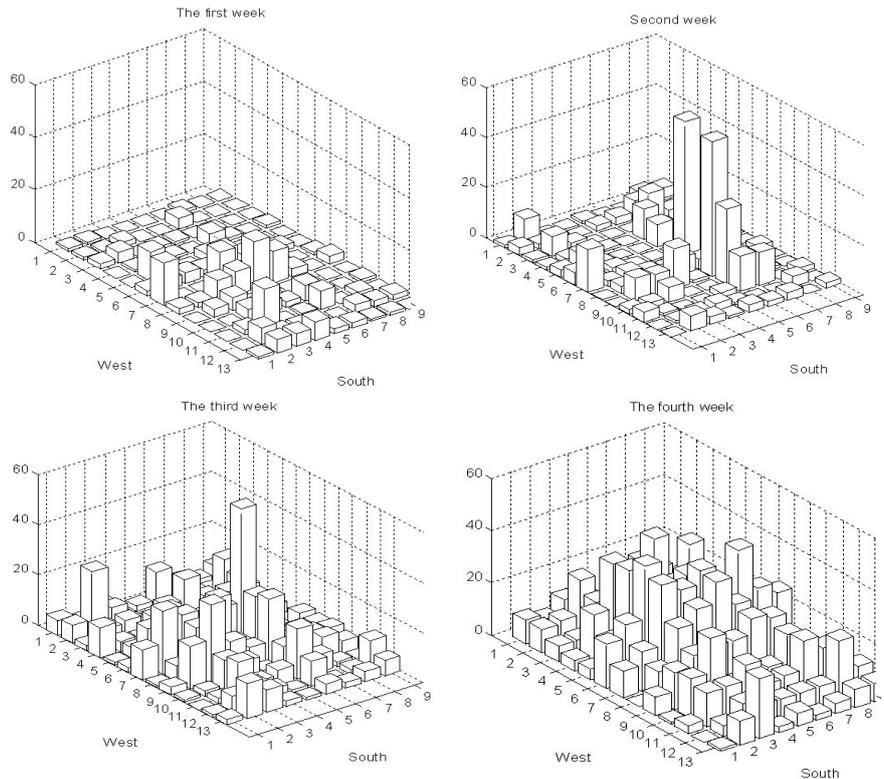


그림 확모6. 온실에서 담배가루이의 분포 자료

제 1세부 책임자는 상기 담배가루이의 시공간 동태 자료에 대해 교차-상관 분석을 통해 수행하였다. 총 8주 동안 채집된 자료에서 연속된 두 주씩 짝을 지어 만들어진 7개의 행렬 자료를 이용하여, 일주 사이에 나타나는 교차-상관계수를 종합한 결과 아래와 같은 사항을 파악할 수 있었다(그림 확모7). 단 교차연관성을 비교하기 위해 표준화(0과 1사이) 하지 않았다. 그림에서 막대의 높이가 크면 교차-상관계수가 높음을 나타낸다. 결과적으로 아래와 같은 세부 사항을 추적할 수 있었다.

- 두 번째, 세 번째 주의 교차-상관 값은 담배가루이의 무작위적 분포를 보여준다(그림 확모 7a).
- 3번째와 4번째 주와, 4번째와 5번째 주의 교차-상관 값은 담배가루이가 왼쪽에서 오른쪽으로 부는 바람의 영향을 받은 것을 보여준다(그림 확모7b-c).
- 5주부터 6주사이의 교차-상관 값을 분석하면 담배가루이는 다시 무작위적 분포를 보임을 알 수 있다(그림 확모7d).
- 마지막 두 그림(6주와 7주 교차상관, 7주와 8주 교차상관)은 담배가루이 개체군이 위에서 아래로 부는 수직 방향의 바람의 영향을 받은 것을 알 수 있다(그림 확모7e-f).
- 전체적으로 담배가루이의 분산은 외부 영향을 많이 받음을 알 수 있었으며 미세 환경에 따

라 복잡한 양상을 나타냄을 알 수 있었다.

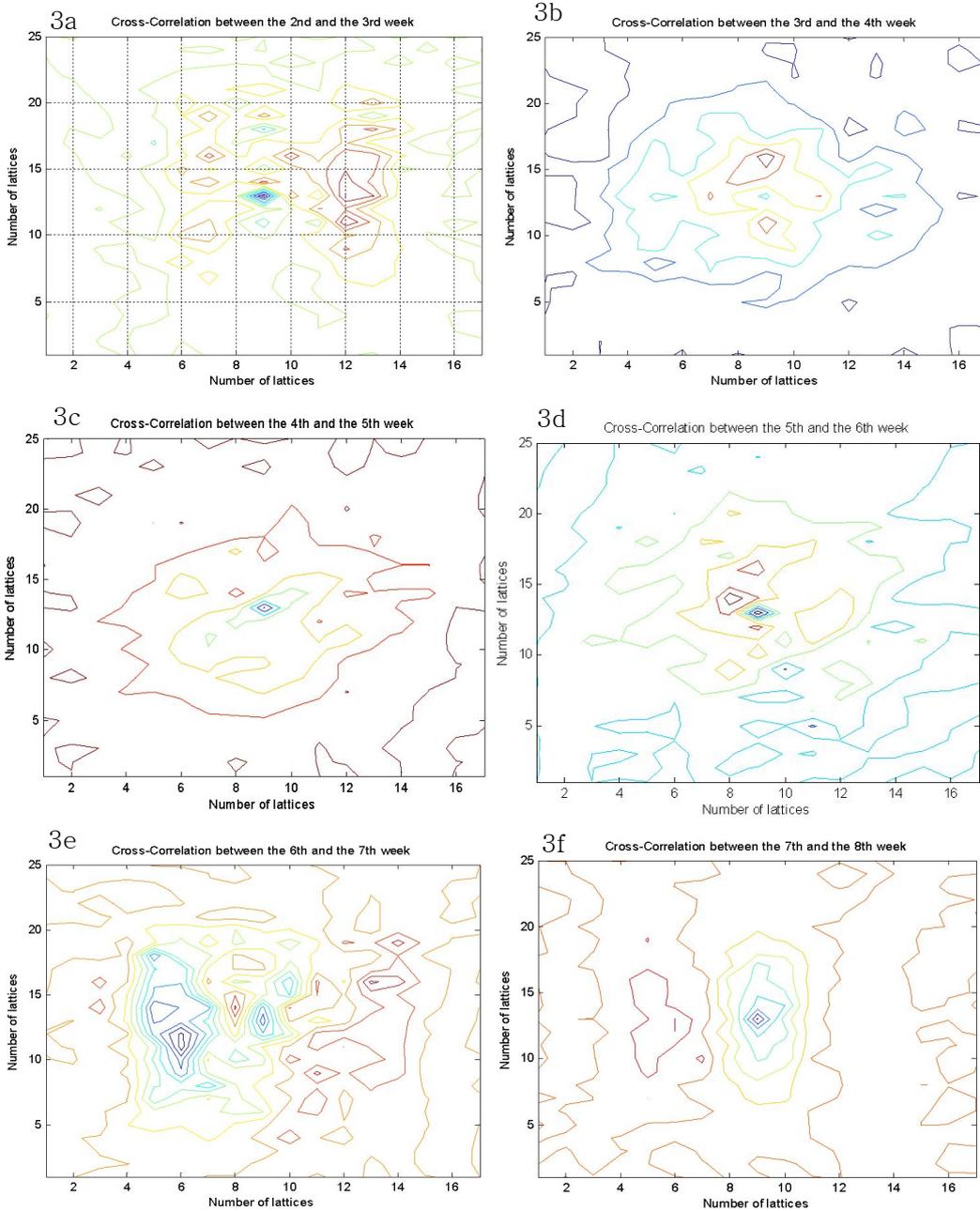


그림 확모7. 담배가루이 교차상관분석 결과

이를 통해 담배가루이의 개체군 동태 확산양상은 복잡한 분포양상을 보이나 단계적인 자료를 가질 수 있으면 상당부분 동태양상 기전을 추적할 수 있었다. 상기 교차상관 자료와 경험적인 자료를 종합하면 개체군 움직임이 무작위적인지, 아니면 일정한 양상을 가지고, 어느 방향으로 움직이는지 등을 파악하여 해충의 확산 양상에 대한 사전 예측이나 동태 기작 파악에 도움을 줄 수 있을 것으로 여겨진다.

다. 교차 상관관을 통한 해충의 분산양상 파악

인지시스템을 통해서 모든 잎에 있는 해충을 일일이 계수할 수 없으므로 적절한 샘플링을 통해 해충분포를 판별할 필요가 있다. 방제법 구축을 위해 1차 년도에는 샘플링을 통해 분산양상을 파악하여 분석하였다. 분산양상을 파악하기 위해 교차 상관분석(Tobin et al., 2003, Yamanaka et al., 2007)을 적용하였다.

교차 상관계수는 식(확모6)에서 정의되며 무작위 추출된(20%) 샘플링으로부터 시간차, 공간차에 따른 교차 상관관을 적용하였다.

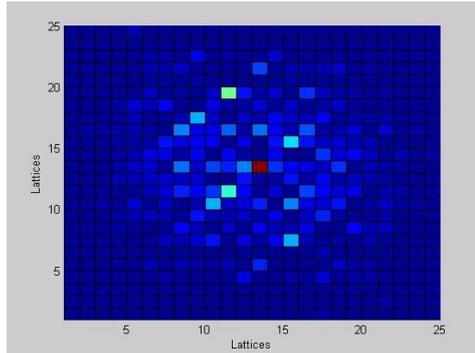


그림 확모8. 접종 후 1-2주

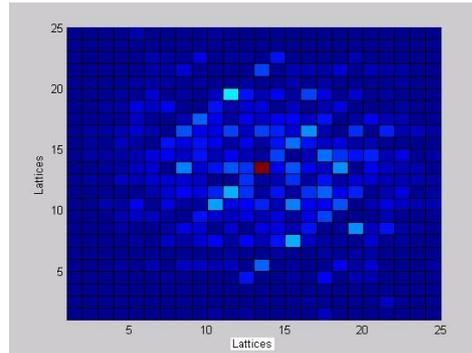


그림 확모9. 접종 후 2-3주

그림 확모8-9 는 분석 후 각 격자에 나타난 상관 항(편의상 표준화하지 않음)이다. 접종 후 1-2주(그림 확모8)와 접종 후 2-3주(그림 확모9)의 결과에서 해충의 확산양상을 보여준다. 확산계수가 나타난 지점(엷은 청색으로부터 붉은색 까지)을 통해 확산 영향권을 알 수 있다. 아울러 확산계수가 제일 높은 지점은 붉은 색으로 표시하였다. 곧 붉은 지점이 나타내는 것은 인지할 수 있었는데, 본 분석을 통해 실제 최초 집중지점을 확인하지 않고서도 실제 집중지점을 알 수 있다는 것을 의미한다. 실제로 붉은 지점은 실험한 집중지점과 일치하였다.

해충개체군은 개체군의 성장능력으로 인해 급속히 증식할 뿐만 아니라 개체가 동시에 움직이기 때문에 환경여건이 적절할 경우 매우 급속하고도 다양하게 확산한다. 확산속도 및 개체군 크기 예측은 해충관리의 핵심적인 요소가 되는데, 개체군 성장을 통한 시공간적 확산은 여러모로 수리물리적인 확산 현상과 대비되어 수리 생태학의 적절한 주제가 된다.

5. 샘플링 이론

상기 개체군 자료는 적절하게 샘플링 방법에 적용될 수 있다. 주어진 영역에서 해충 개체군 크기의 분산, σ^2 은 평균 밀도, μ 의 지수함수로 나타낼 수 있다(Green, 1970). 즉,

$$\sigma^2 = a\mu^b, \quad (\text{확모7})$$

또는

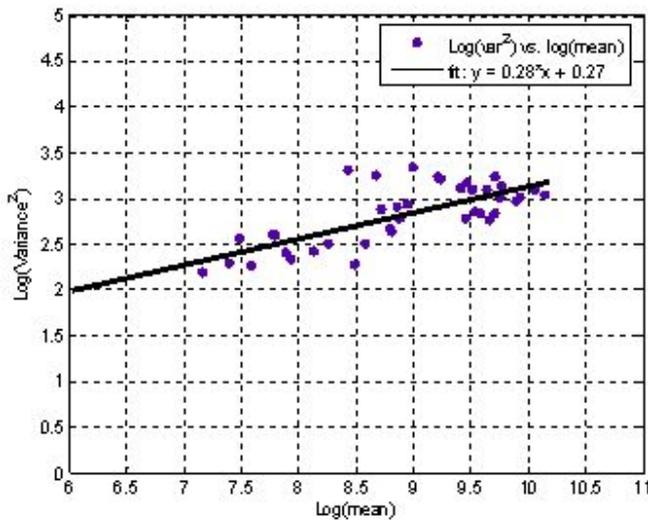
$$\log \sigma^2 = A + b \log \mu \quad (\text{확모8})$$

이고, 여기서 $A = \log a$ 는 절편이고 b 는 로그-스케일 평균-분산 관계의 기울기이다. Green(1970)이 Taylor의 지수법칙에 기반하여, 샘플 평균, $d_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n} \mu}$ 를 갖는 특정한 계수 변이에 해당하는 해충 밀도를 계산하기 위한 순차적인 샘플링에 대해서 상한선을 제시하였다. 이를 통해 적절히 샘플링한 후 추가 샘플링을 중지할 수 있는 역치는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\log T_n = \frac{\log\left(\frac{d_0^2}{a}\right)}{b-2} + \frac{b-1}{b-2} \log n \quad (\text{확모9})$$

여기서 T_n 은 샘플 크기 n 에서의 해충의 누적 마리 수이고 a 와 b 는 Taylor의 지수법칙에서의 계수들이다.

모수 a 와 b 를 구하기 위해 평균-분산 짝의 수열로부터 최소자승법을 적용하였다. 상기 가루이 확산 자료를 적용하면 그림 확모10과 같은 결과를 얻을 수 있는데, 식(확모8)에서부터 $b=0.28$, $A=0.27$, 그리고 $a=\exp(A)=1.31$ 의 값을 구할 수 있었다. 이러한 밀도의 평균과 분산은 로봇의 샘플링 전략(순찰 시간, 범위 등)에 적절히 적용 될 수 있는데, 앞으로 이에 대한 수리적 연구가 필요하리라 여겨진다.



```

Results
Linear model Poly1:
f(x) = p1*x + p2
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = 0.2866 (0.1985, 0.3748)
p2 = 0.2765 (-0.5091, 1.062)

Goodness of fit:
SSE: 1.979
R-square: 0.5327
Adjusted R-square: 0.5204
RMSE: 0.2282

```

그림 확모10. 가루이 확산 자료에 대한 평균과 분산의 관계

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 기술적 목표의 달성도

1. 로봇 제작과 제어기술의 확보

본 연구에서는 지면에 설치된 레일을 운행하는 레일형 로봇과 온실의 천정에 설치된 레일을 운행하는 케이블카형 로봇 두 가지 유형의 로봇이 개발되었다. 전자의 로봇은 파프리카 등의 작물에 특화된 것이고, 연구 진전에 따라 온실 상부의 공간을 이용할 수 있는 점에 착안해 후자의 로봇은 일반적인 작물에 적용될 수 있도록 하였다. 따라서 본 연구에서는 온실에서 지상형 및 상부형 로봇의 두 가지 프로토타입을 제시하였다.

이 두 로봇의 몸체, 구동장치, 로봇팔의 구동과 제어에 대해서 설계 및 실물을 구현하였다. 아울러 무선 표지를 이용한 항법시스템도 고안하였다. 그리고 로봇, 영상시스템, 항법시스템을 결합하여 작물의 성장상태, 해충 인지, 환경요인(예, 온도, 습도 등) 등을 실시간으로 현장에서 데이터를 수집, 관리하는 온실관리기법을 특허로 출원하였다(출원번호 : 10-2011-0067002).

따라서 연구목표에 따라서 로봇의 설계, 제작, 제어에 성공하였고 또한 적절히 특허 출원을 하여, 이 분야 연구의 기술적 목표를 달성하였다. 특히 지상형, 상부형 로봇 두 가지 프로토타입을 제시하였으므로 이 부분은 초과 달성으로 여겨질 수 있다.

2. 인지 알고리즘 개발

본 연구의 중요 목표는 로봇을 이용해서 효율적으로 해충을 방제하는 것이다. 이 작업을 위해서 선결되어야 하는 과제가 작물의 잎과 해충을 적절히 자동인지 하여야한다. 일차적으로 본 연구진에서는 로봇이 촬영한 영상을 분석하여 잎을 인지해내는 알고리즘을 개발하였다. 단순한 흠집을 인지해내는 기술부터 출발하여 복잡한 형태(겹쳐진 잎, 불완전한 잎 등)의 잎 영상을 처리하여 잎을 인지해 낼 수 있도록 하였다. 특히 잎들이 포개어져 있는 경우에도 높은 정도의 정확도로 잎을 인지해 내는 알고리즘을 개발 하였다(일부 내용이 상기 로봇 특허 출원에 포함됨).

또한 잎을 인지한 후에는 잎에 붙거나 트랩에 잡혀진 해충을 감지하는 인지 알고리즘을 개발하였다. 해충의 모양에 따른 적절한 알고리즘을 적용하여 해충을 인지해 내고, 해충의 개체수를 계수하는 알고리즘을 개발하여 특허 출원 하였다 (특허번호: 10-2009-0025160). 특히 다중 프렉탈 분석기법으로 소형의 곤충 이미지를 효과적으로 검출하는 알고리즘을 고안하였는데, 이는 별도로 특허 출원 준비 중이다. 상기 잎과 해충 인지에 대한 알고리즘의 기술적 목표는 적절히 달성했다고 볼 수 있다.

3. 정밀 미량 분사장치 제어기술 확보

잎을 인지하여 해충을 감지하였으면, 다음으로 해충을 방제하기 위한 작업을 수행하여야 한다. 이 작업을 수행하기 위하여 기존에 개발된 미량 분사장치를 사용하였다. 본 연구진은 이 미량 분사기를 로봇에 장착하여 제어하는 기술을 확보하였다. 인지 알고리즘과 결

합하여 정밀 미량 분사장치를 이용한 방제 효율 실험을 수행하였다. 기존의 방제 방법에 비해 같은 정도의 방제 효과를 올리기 위해 사용하는 농약의 사용량이 기존의 사용량의 30% 정도 사용되었다(논문 투고: 한국응용곤충학회지). 따라서 로봇을 이용한 방제 방법이 농약 사용량을 획기적으로 줄일 수 있다는 것을 확인하였으며, 이 분야의 기술적 목표를 달성하였다.

4. 자동 해충 유인 장치의 개발

본 연구의 원래 목표에는 없었으나, 연구가 진행됨에 따라서 확보한 기술이다. 본 연구진이 현장 종사자들의 조언에 따라, 온실내의 해충 관리를 위해서는 낮은 해충 밀도에서 해충의 침입을 조기에 진단해 내는 감지시스템을 고안하였다. 로봇이 작물에 붙어 있는 해충을 교란하고, 교란된 해충이 로봇에 장착된 트랩에 채집되도록 하고, 이를 상기 해충 인지 방법에 의해 밀도를 계수할 수 있도록 하였는데, 시험 결과 작물체에 적은 수의 해충이 있어도 해충을 채집할 수 있었고 이를 인지할 수 있었다. 이에 대해 특허출원 하였으며(출원 번호: 10-2011-0067004) 관련 사항에 대해 논문을 투고하였다(논문투고: J. Asia Pacific Entomology). 따라서 이 기술은 연구 목표에 추가적으로 초과 달성한 것으로 간주할 수 있다.

기술적 목표 달성도를 아래와 같이 요약할 수 있다.

기술적 목표의 달성도(650/500 = 130%)

개발 기술	세부 기술	목표(%)	달성(%)
로봇 기술	설계 제작	100	150
	제어	100	100
인지 알고리즘	일인지	100	100
	해충 관리	100	100
미량 분사 시스템	제어	100	100
자동 해충 유인장치	제작-제어	0	100

제 2 절 정량적 목표의 달성도

1. 특허 목표

본 연구는 경작자에 실제 도움을 줄 수 있는 연구를 수행하는 것이 목표이었으므로 새로운 기술 개발에 중점을 두었다. 연구 목표에서 특허에 관련된 목표는 원래 등록1, 출원 2건이었으나, 연구 진전에 따라 특허 신청을 목표보다 많이 하게 되었다. 현재로 4건의 특허 출원이 완료된 상태이며 관련된 출원 정보는 부록에 수록하였다.

통상적으로 특허 출원부터 등록까지 2년 정도의 시간이 소모된다고 하므로 연구개시 1년차와 2년차에 출원한 특허는 조만간 등록이 가능할 것으로 추정된다. 따라서 특허 관련 목표는 충분히 달성한 것으로 간주할 수 있다.

2. 논문 출판 목표

본 연구의 특성상 기술적인 문제를 해결하는 것이 우선이었으므로, 앞서 제시한 두 가지 유형의 로봇을 개발하면서 연구 진전에 따라 기술적 부분에 연구 시간을 더 사용하게 되었다. 또한 연구가 해충학, 공학, 생태 모델링 등의 학제 연구이므로 실제 기술을 고안하고 적용하는데 시간이 많이 소요되었다. 이를테면 기술의 현장 적용을 위해 온실, 작물, 해충이 미리 준비(재배시기, 사육기간 등 고려) 되어야하고, 이에 맞추어 로봇의 몸체와 부속체가 완성되고 인지 알고리즘을 탑재하여 현장에서 운용되어야 하므로, 시험 수행을 위해 사전 준비기간이 많이 소요되었다. 따라서 연구 후반부에 새로운 기술이 많이 제시되었는데, 이를 우선 특허화한 후에 논문 작성을 하게 되어, 결과적으로 논문 작성이 다소 늦어지게 되었다. 원래 논문출판의 목표는 국외논문(SCI급) 3편, 국내논문 3편 이었으나, 현재로 SCI(E) 논문 3편 및 국내 논문 1편을 투고하고 있다.

정량적 목표 달성도(333/600 = 56%)

		목표	완료	달성도(%)
특허	출원	2	4	200
	등록	1	0	0
논문	국내	3	1 투고	33
			0 게재	0
	국외(SCI)	3	3 투고	100
			0 게재	0

* 앞서 언급하였듯이 논문 투고는 시간이 조금 더 주어지면 게재될 수 있으리라 여겨짐.

제 3 절 관련 분야의 기여도

온실에서 운행하는 로봇의 설계에 있어서 지상형, 상부형 두 가지의 전형을 제시하였고, 또한 이들을 제어하는 기술을 완성하였다. 앞으로 농업 생산성의 증가와 경작자 건강보전 및 환경 오염 최소화를 고려할 때, 해충 방제에 따른 농업 기술화는 필수적으로 요구되어 진다고 볼 수 있으므로 핵심적 선행연구로서 중요하다고 사료된다.

나아가 로봇의 구동이나 인지의 기술 수준에 완성품을 단계적으로 구성할 수 있기 때문에, 경제적인 가격에 따라 적절한 수준의 시스템을 조정하여 보급할 수 있는 장점도 있다(예를 들면 간단하게 사용할 경우 인지 기술은 제외하고 정해진 장소에만 로봇으로 살충제를 분사하게 할 수도 있음. 이 경우 가격은 낮게 책정될 수 있음). 연구 보고서의 농가 설문조사에서도 밝힌 바와 같이 경작자가 건강에 관심을 많이 가지고 있고, 노동력 절감에 민감하므로 고가의 방제기를 구입할 의향을 파악할 수 있었으므로 로봇 기술 보급은 전망이 높다고 볼 수 있다.

아울러 곤충 인지 로봇기술이 일반화 되면 비단 온실에서 뿐만 아니라 일반적인 농작물 경작에 적용될 수 있고, 아울러 관련된 산림, 수산, 역학(Epidemics, Epizootics) 및 생태보전 분야에도 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 여겨진다.

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

3년에 걸쳐 수행된 본 연구를 통하여 두 대의 로봇을 개발하였다. 본 연구진에서는 차후 이 로봇을 상용화하기 위한 전초 단계로 많은 추가 데이터를 확보하기 위하여 인지 실험을 계속할 계획이다. 영상 이미지로부터 대상을 인지해내는 기술은 과학, 기술, 산업의 모든 분야에서 관심사이므로 이에 따르는 연구에 적용될 수 있으리라 여겨진다.

본 연구의 일차적 관심사인 파프리카뿐만 아니라 여러 종류의 작물과 식물의 잎을 인지해내는 알고리즘 그리고 카메라의 해상도를 높여서 곤충의 개체 수뿐만 아니라 종을 구별해내는 알고리즘을 개발하려고 계획하고 있다.

또한 이렇게 개발된 로봇을 온실에서의 활용에만 국한하지 않고 농업산림, 수산, 생태보전의 분야에도 활용할 수 있을 것으로 생각한다. 농업산림 분야에서의 활용의 예를 들면 산림의 일정 부분에 레일과 로봇을 설치하여, 그곳의 산림상태, 해충 출현 상태, 식물의 성장상태와 환경상태 등의 사항을 실시간으로 관찰할 수 있다. 이러한 방식의 적용은 앞서 열거한 분야 외에도 많은 분야에서 활용이 가능할 것이라고 생각한다.

궁극적으로 이들 로봇을 상용화하기 위해서는 현장 종사자(연구원, 농민)들의 의견과 요구사항들을 반영해야 하고, 연구진들도 그들의 로봇에 대한 기술, 능력과 한계 등에 관해서 잘 교육할 필요가 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 로봇 관련 기술

1. 딸기수확 로봇의 개발

최근에 온실에서 작동하는 딸기 수확 로봇을 개발하여 시험하였다는 보고가 있었다 (Hayashi et al, 2010). 개발된 딸기수확 로봇은 elevated substrate culture에 적용하기 위해서 원통형 조정기, end-effector, 기계 영상장치, 적재장치와 운행장치들로 구성되어 있다. 이 로봇은 야간 작동, 딸기의 꽃자루 처리 그리고 작업자들과 분업을 한다는 발전 개념을 기반으로 하고 있다. 이런 개념을 발전시킨 이유는 낮은 작업효율성, 낮은 성공비율, 과일의 손상, 불안정한 조명조건 하에서의 검출의 어려움, 그리고 높은 비용 등의 문제점들을 극복하기 위해서이다. 개발한 기계 영상장치는 60%의 비율로 목표 과일의 꽃자루를 정확하게 검출해 내었다. 딸기의 성숙도가 80% 이상일 때의 수확시기 동안 수확 시험을 시행하였는데, 꽃자루를 자르기 전에 흡입장치를 사용해서 과일을 집었을 때 시스템의 성공 수확비율은 41.3% 이었으나, 반면에 흡입 장치 없이 과일을 집었을 때는 34.9%의 성공 비율을 보여주었다. 집기 실패의 비율의 관점으로 봤을 때 두 가지의 집기 방법들에서 큰 차이를 보여주지는 않았다. 수확된 과일을 트레이(tray)에 옮기는데 걸리는 시간을 포함하여, 하나의 과일을 성공적으로 수확하는데 걸리는 시간은 11.5초였다.

2. 3차원 LIDAR 센서의 응용

자율 농업로봇에 대해서 국소적 위치파악을 수행하는데 중요한 필수적인 사항 중의 하나인 작물과 지면의 검출과 세분화를 하는데 3차원 LIDAR 센서를 적용하였다(Weiss & Biber, 2011). 제안된 알고리즘은 crop row 모델을 사용해서 지면과 작물을 구별해내고, 측정된 로봇의 자세에 따라서 작물의 국소적 위치를 파악해 내었다. 첫 번째 단계는 점들을 지면, 작물과 여러 구조들을 포함하는 부분집합들로 분할함으로써 레이저 스캔을 해서 작물들을 검출하였다. 따라서 LIDAR 센서에 의해서 측정된 3차원 데이터에서부터 작물들을 추출해낸다. 그 후에 로봇의 작동을 유도하기 위하여 작물의 위치들을 전체 지도에 표시할 수 있었다.

제 2 절 패턴 인지에 관련된 기술

1. 잎의 3차원 정보 복원 알고리즘

Chin-Hung Teng(Chin-Hung Teng, 2011)은 복잡한 알고리즘들을 결합하고 있는 시스템을 유형화하고 잎 세분화를 수행하였다. 이 시스템을 이용해서 살아있는 식물들의 이

이미지들로부터 잎들을 세분화하고 스케치된 잎 모양이나 실제의 잎들을 분류해 낼 수 있었다. 잎 세분화에 유용할 뿐만 아니라 이상의 3차원 모양의 복구에 도움이 되는 잎의 3차원 정보도 역시 계산해 낼 수 있었다. 3차원 구조를 재구성하기 위해 여러 개의 이미지가 필요하더라도, 가까운 뷰포인트를 갖는 단 몇 개의 이미지만으로 작업을 수행하는데 충분하게끔 설계되어 있어 이미지를 유연하게 획득하였다.

2. SIFT(Scale Invariant Feature Transform)에 기반한 해충인식 기술

Solis-Sanchez는 해충을 정찰하고 분류해 내기 위하여 SIFT에 기반한 방법을 제시하였다. 해충의 인식과 분류 체계를 수행하기 위하여 기계 영상시스템을 적용하여 LOSS V2라고 명명하였다(Solis-Sanchez, 2011). LOSS V2는 다음과 같은 해충의 종을 검출하고 인식하는데 사용되었다: *Diabrotica* (*Coleoptera: Chrysomelidae*), *Lacewings* (*Lacewings spp.*), *Aphids* (*Aphis gossypii Genn.*), *Glassy* (*Empoasca spp.*), *Thrips* (*Thrips tabaci L.*), and *Whitefly* (*Bemisia tabaci Genn.*). 이 알고리즘은 곡물에서 해충의 존재를 인식하고 온실 관리자로 하여금 적절한 예방적 또는 교정 방법을 취하도록 만들어 주었는데, LOSS V2는 초기의 해충 인식의 적용을 수반하고 축척 불변적인 특징의 변환(SIFT : Scale Invariant Feature Transform)으로 알려진 이미지 처리기술을 적용하였다.

제 7 장 참고 문헌

Austerweil, M., Grinstein, A., 1997.

Automatic pesticide application in greenhouses.

Phytoparasitica 25, 71-80.

Baumberg, A.M., Hogg, D.C., 1994.

An efficient method for contour tracking using active shape models.

IEEE, pp. 194-199.

Bechar, I., Moisan, S., Thonnat, M., Bremond, F., 2010.

On-Line Video Recognition and Counting of Harmful Insects.

Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on, 4068-4071.

Boissard, P., Martin, V., Moisan, S., 2008.

A cognitive vision approach to early pest detection in greenhouse crops.

Computers and Electronics in Agriculture 62, 81-93.

Canny, J., 1987.

A computational approach to edge detection.

Readings in computer vision: issues, problems, principles, and paradigms 184, 86.

Chin-Hung Teng, Y.-T. K. a. Y.-S. C. (2011).

Leaf segmentation, classification, and three-dimensional recovery from a few images with close viewpoints.

Opt. Eng., 50(3).

Cho, J., Choi, J., Qiao, M., Ji, C., Kim, H., Uhm, K., Chon, T., 2007. Automatic identification of whiteflies, aphids and thrips in greenhouse based on image analysis. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation 1, 244.

Cootes, T.F., Taylor, C.J., Cooper, D.H., Graham, J., 1995.

Active shape models-their training and application.

Computer vision and image understanding 61, 38-59.

Drouhard, J.P., Sabourin, R., Godbout, M., 1995.

A comparative study of the k nearest neighbour, threshold and neural network classifiers for handwritten signature verification using an enhanced directional PDF. 807.

Green R., 1970.

On fixed precision level sequential sampling,

- Researches on Population Ecology, 12, 249-251
- Hashimoto, Y., Murase, H., Morimoto, T., & Torii, T., 2001.
Intelligent systems for agriculture in Japan.
Control Systems, IEEE, 21(5), 71-85.
- Hayashi, S., Shigematsu, K., Yamamoto, S., Kobayashi, K., Kohno, Y., Kamata, J., Kurita, M., 2010.
Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test.
Biosystems Engineering 105, 160-171.
- Huang, Y.-J., Lee, F.-F., 2010.
An automatic machine vision-guided grasping system for Phalaenopsis tissue culture plantlets.
Computers and Electronics in Agriculture 70, 42-51.
- Ims, R.A., Andreassen, H.P., 2005.
Density-dependent dispersal and spatial population dynamics.
Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 272, 913.
- Ito, N., 1990.
Agricultural robots in Japan. Paper presented at the Intelligent Robots and Systems '90.
'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS'90. IEEE International Workshop on.
- Kim J-G, Park J-J, Pak CH, Park H & Cho K. 1999.
Implementation of yellow sticky trap for management of greenhouse whitefly in cherry tomato greenhouses.
Journal of the Korean Society for Horticultural Science 40, 549 - 553
- Kondo, N., Monta, M., Fujiura, T., 1996.
Fruit harvesting robots in Japan.
Advances in Space Research 18, 181-184.
- Kumar, R., Martin, V., Moisan, S., 2009.
Robust Insect Classification Applied to Real Time Greenhouse Infestation Monitoring.
Visual observation and analysis of animal and insect behavior (VAIB) Workshop at ICPR, Istanbul, Turkey, August 2010
- Lawrence, S., Giles, C.L., Tsoi, A.C., Back, A.D., 1997.
Face recognition: A convolutional neural-network approach.
Neural Networks, IEEE Transactions on 8, 98-113.
- Lee, S.W., Kim, Y.J., 1995.
A new type of recurrent neural network for handwritten character recognition.

- icdar, vol. 1, pp.38, Third International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR'95)
- Marie-Pierre Dubuisson-Jolly, Sridhar Lakshmanan, Anil K. Jain, 1996.
 Vehicle Segmentation and Classification Using Deformable Templates.
 IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 18(3), 293-308.
- Murray, A.W., Solomon, M.J., Kirschner, M.W., 1989.
 The role of cyclin synthesis and degradation in the control of maturation promoting factor activity.
 Nature 339, 280-286.
- Murray, M.G., 1982.
 The rut of impala: aspects of seasonal mating under tropical conditions.
 Zeitschrift für Tierpsychologie 59, 319-337.
- Nielsen, M., Andersen, H. J., & Granum, E., 2005.
 Comparative study of disparity estimations with multi-camera configurations in relation to descriptive parameters of complex biological objects. Towards benchmarking automated calibration, orientation and surface reconstruction from Images (ICCV 2005).
 ISPRS Working groups, Dresden, Germany, 63 - 68.
- Ota, T., Bontsema, J., Hayashi, S., Kubota, K., Van Henten, E., Van Os, E., Ajiki, K., 2007.
 Development of a cucumber leaf picking device for greenhouse production.
 Biosystems Engineering 98, 381-390.
- Qiao, M., Lim, J., Ji, C., Chung, B., Kim, H., Uhm, K., Myung, C., Cho, J., Chon, T., 2008.
 Density estimation of Bemisia tabaci (Hemiptera: Aleyrodidae) in a greenhouse using sticky traps in conjunction with an image processing system.
 Journal of Asia-Pacific Entomology 11, 25-29.
- Rekow, A., Bell, T., O'Connor, M., & Parkinson, B., 1998.
 CDGPS based identification of farm tractor steering effectiveness.
 Paper presented at the Position Location and Navigation Symposium, IEEE1998.
- Raimondo, S., Liebhold, A.M., Strazanac, J.S., Butler, L., 2004.
 Population synchrony within and among Lepidoptera species in relation to weather, phylogeny, and larval phenology.
 Ecological Entomology 29, 96-105.
- Sammons, P.J., Furukawa, T., Bulgin, A., 2005.

Autonomous pesticide spraying robot for use in a greenhouse. ARC Centre of Excellence for Autonomous Systems.

School of Mechanical and Manufacturing Engineering. The University of New South Wales. Australia.

Solis Sánchez, L.O., Castañeda Miranda, R., García Escalante, J.J., Torres Pacheco, I., Guevara González, R.G., Castañeda Miranda, C.L., Alaniz Lumbreras, P.D., 2011.

Scale invariant feature approach for insect monitoring.

Computers and Electronics in Agriculture 75, 92-99.

Solis Sánchez, L., García Escalante, J., Castañeda Miranda, R., Torres Pacheco, I., Guevara González, R., 2009.

Machine vision algorithm for whiteflies (*Bemisia tabaci* Genn.) scouting under greenhouse environment.

Journal of Applied Entomology 133, 546-552.

Tanigaki, K., Fujiura, T., Akase, A., Imagawa, J., 2008.

Cherry-harvesting robot.

Computers and Electronics in Agriculture 63, 65-72.

Thrun, S. Buecken, A.(1996).

Integrating Grid-Based and Topological Maps for Mobile Robot Navigation.

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 944-951.

Tobin, P.C., Bjørnstad, O.N., 2003.

Spatial dynamics and cross correlation in a transient predator-prey system.

Journal of animal ecology 72, 460-467.

Tobin, P.C., Bjørnstad, O.N., 2005.

Roles of dispersal, stochasticity, and nonlinear dynamics in the spatial structuring of seasonal natural enemy-victim populations.

Population ecology 47, 221-227.

Turing, A.M., 1952.

The chemical basis of morphogenesis.

Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences 237, 37.

Van Henten, E., Van't Slot, D., Hol, C., Van Willigenburg, L., 2009.

Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot.

- Computers and electronics in agriculture 65, 247-257.
- Van Henten, E., Van Tuijl, B., Hemming, J., Kornet, J., Bontsema, J., Van Os, E., 2003.
Field test of an autonomous cucumber picking robot.
Biosystems Engineering 86, 305-313.
- Walker, T.J., 1996.
Acoustic methods of monitoring and manipulating insect pests and their natural enemies. Pest Management in the Subtropics: Integrated Pest Management—a Florida Perspective.
Intercept, Andover, UK.[7296 KB], 245-257.
- Weiss, U., & Biber, P. (2011).
Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor.
Robotics and Autonomous Systems, 59(5), 265-273.
- Williams, D.W., Liebhold, A.M., 2000.
Spatial synchrony of spruce budworm outbreaks in eastern North America.
Ecology 81, 2753-2766.
- Yamanaka, T., Tanaka, K., Otuka, A., Bjørnstad, O.N., 2007.
Detecting spatial interactions in the ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) and the ragweed beetle (*Ophraella communa* LeSage) populations.
Ecological Research 22, 185-196.
- Yuille A.L., Cohen D.S. and Hallinan P.W., 1989.
Feature extraction from faces using deformable templates.
Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, June 1989.
- Zhu, L., Zhang, Z., 2010.
Insect recognition based on integrated region matching and dual tree complex wavelet transform.
Journal of Zhejiang University-Science C 12, 44-53.
- 金仁洙, 黃昌淵, 金貞煥, 李文弘, 1986.
溫室가루이의 宿主植物, 發育 및 株內分布에 關한 研究.
한국응용곤충학회지 25, 201-207.
- 박영석, 한만위, 김황용, 엄기백, 박창규, 이장명, 전태수, 2003.
디지털 영상처리 알고리즘을 이용한 벼멸구류의 밀도측정.
한국응용곤충학회지, 57-63.
- 박홍현, 엄기백, 한만중, 최병렬, 박형만, 2007.

시절재배 가지에서 온실가루이 요방제수준. 110-110.

전홍용, 김형환, 강택준, 양창열, 2007.

오이에서 온실가루이의 요방제 수준 설정. 213-213.

부록 1 정량적 성과 목록

1. 투고 논문

가. 제 1 세부과제

(1) 제목 : Plant leaf recognition using modified active shape models

저널 : IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics,
Communications and Computer Sciences

접수번호: 2011EAP1097

구분 : SCI

(2) 제목 : *In situ* detection of small size insect pests sampled on the traps using multifractal analysis

저널 : Optical Engineering

접수번호 : OE 110819

구분 : SCI

나. 제 2 세부과제

제목 : The Effects Automated Precision Micro Application Robot on the Control of Tobacco White fly, *Bemisia tabaci*, in Paprika Green House

저널 : 한국응용곤충학회지(국문지)

접수번호: KJAE11-35

구분 : 국내논문

다. 제 3 세부과제

제목 : Attraction of *Bemisia tabaci* adults by the pre-programmed autonomous pest control robot

저널 : JAPE(Journal of Asia Pacific Entomology)

접수번호 : 투고

구분 : SCIE

The screenshot shows the author's submission page for the Journal of Asia-Pacific Entomology. The page title is "Submissions Being Processed for Author Bu-Keun Chung". It displays a table with one submission entry. The table has columns for Action, Manuscript Number, Title, Initial Date Submitted, Status Date, and Current Status. The submission title is "Attraction of Bemisia tabaci adults by the pre-programmed autonomous pest control robot", submitted on Jul 12, 2011, and its status is "Submitted to Journal". The page also includes navigation links like "View Submission", "View QC Results", and "Send E-mail".

Action	Manuscript Number	Title	Initial Date Submitted	Status Date	Current Status
View Submission View QC Results Send E-mail		Attraction of Bemisia tabaci adults by the pre-programmed autonomous pest control robot	Jul 12, 2011	Jul 12, 2011	Submitted to Journal

2. 특허 출원

가. 발명 명칭: 자동 해충 인지 및 방제 시스템 및 방법

출원 번호: 10-2009-0025160 (접수번호 1-1-2009-0178246-12)

발명자: 전태수, 조종만, 이장명, 송유한, 정부근, 박영석, 정한택, 김황용,
하춘뢰, 지창우, 김종규, 이암, 이준호

나. 발명 명칭: 해충 방제 시스템 및 그 방법

출원 번호: 10-2010-0035471 (접수번호 1-1-2010-0244898-55)

발명자: 전태수, 송유한, 이장명, 정부근, 정한택, 하춘뢰, 옥광호, 규엔투엔반

다. 발명 명칭: 온실 작물 모니터링 방법 및 영상감지형 온실 작물 모니터링 시스템

출원 번호: 10-2011-0067002 (접수번호 1-1-2011-0518262-77)

발명자: 전태수, 이장명, 송유한, 정부근, 하춘뢰, 이암, 김홍수

라. 발명 명칭: 자동 유인형 곤충 방제로봇 시스템

출원 번호: 10-2011-0067004 (접수번호 1-1-2011-0518284-71)

발명자: 전태수, 이장명, 송유한, 정부근, 하춘뢰, 이암, 김홍수

3. 학술발표

가. A stereo vision based method for automonous spray of pesticides to plant leaves, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009), July 5-8, 2009

나. Vision-based Pest Detection and Automatic Spray of Greenhouse Plant, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009), July 5-8, 2009

다. Mathematical models applied to dispersal of pest populations in greenhouse, 2010 한국응용곤충학회 정기총회 및 춘계학술발표회, 2010년 5월 13일~15일

라. Automatic Pest Detection Implemented in Robotics in Green House, 2010 한국응용곤충학회 정기총회 및 춘계학술발표회, 2010년 5월 13일~15일

마. Mathematical models applied to dispersal of pest populations in greenhouse, 한국응용곤충학회 50주년 기념 국제 심포지움, 2011년 5월 12일~14일

부록 2 부록 CD의 수록 내용

1. 부록 CD(1/2) : 로봇의 작동과 운용

- 가. 레일 로봇 운용 프로그램
프로그램 소스 디렉토리: "ASS", 컴파일: MS Visual C++ 6.0
프로그램 디렉토리: "ASS\Debug"
- 나. CABBOT 운용 프로그램 (해충인지 및 정밀 분사)
프로그램 소스 디렉토리: "CABBOT\CABBOT0.8", 컴파일: C++ 2008
프로그램 디렉토리: "CABBOT\Release"
- 다. CABBOT 해충 유인 프로그램
프로그램 소스 디렉토리 : "Attraction\Attraction", 컴파일: Visual C++ 2008
프로그램 디렉토리: "Attraction\Debug"
- 라. 드라이버 및 모션 보드 매뉴얼
디렉토리: "Driver", "Motion Board"
내용: 모션 보드 드라이버, 카메라 드라이버, 터치스크린 드라이버

2. 부록 CD(2/2) : 인지 및 분석 소프트웨어,

- 가. 해충 감지 프로그램
점착 트랩 이미지를 통한 가루이 감지
디렉토리: "Pest detection", 구동 프로그램: MATLAB 9.0
- 나. 잎인지 프로그램
modified active shape model을 통한 잎 인지
디렉토리: "Leaf Recognition", 구동 프로그램: MATLAB 9.0
- 다. 해충 분포 모델 및 분석
교차-상관관계 분석
분포 추정
디렉토리: "CD_whitefly", 매뉴얼: "readme.docx", 구동 프로그램 MATLAB 9.0