

발간등록번호

11-1543000-002123-01

Development of Smart Multi-Drone System based on
Swarm Teleoperation for Enhancing Crop Production

농작물 생산 효율 극대화를 위한 군집
원격제어기술 기반 스마트 농업용 멀티
드론 시스템 개발
최종보고서

2018. 3. 15.

주관연구기관 / 전남대학교 산학협력단
협동연구기관 / 한국교통대학교 산학협력단
참여기관 / (주)진테크놀로지

농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농작물 생산 효율 극대화를 위한 군집 원격제어기술 기반 스마트 농업용 멀티 드론 시스템 개발”(개발기간 : 2015. 12. ~ 2017. 12.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 3. 15.

주관연구기관명 : 전남대학교 산학협력단 (대표자) 송진규 (인)
협동연구기관명 : 한국교통대학교 산학협력단 (대표자) 백종배 (인)
참여기관명 : (주)진테크놀로지 (대표자) 김진영 (인)

주관연구책임자 : 손형일

협동연구책임자 : 정성엽

참여기관책임자 : 김진영

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제고유번호	115062-2	해당단계 연구기간	2016.12.18.~ 2017.12.17	단계구분	(2)/ (2)
연구사업명	단위사업	농식품기술개발사업			
	사업명	첨단생산기술개발사업			
연구과제명	대과제명	(해당 없음)			
	세부과제명	농작물 생산 효율 극대화를 위한 군집 원격제어기술 기반 스마트 농업용 멀티 드론 시스템 개발			
연구책임자	손형일	해당단계 참여 연구원 수	총: 13명 내부: 13명 외부: 0명	해당단계 연구개발비	정부:100,000천원 민간: 33,334천원 계:133,334천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 17명 내부: 17명 외부: 0명	총 연구개발비	정부:200,000천원 민간:66,668천원 계:266,668천원
연구기관명 및 소속부서명	전남대학교 산학협력단 한국교통대학교 산학협력단			참여기업명 (주)진테크놀로지	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
				보고서 면수	
				108	

〈 요약 문 〉

		코드번호	D-01			
연구의 목적 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 연구 목적 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 농업 분야에서 드론을 활용하고자 하는 노력이 계속되고 있으나 기존 무인항공기 대비 낮은 가반하중, 짧은 체공시간 등의 문제점으로 인한 제약이 있음 ▪ 본 연구과제에서는 다수의 드론을 활용하여 농업용 멀티 드론 시스템을 개발하는 것을 목표로 함 ○ 연구 내용 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 농업용 멀티 드론 시스템을 위한 군집 원격제어기술 개발 ▪ 멀티모달 시스템을 통한 드론 시스템의 안정성 향상 기술 개발 ▪ 멀티 드론 제어를 위한 작업자 인터페이스기술 개발 ▪ 멀티 드론 제어를 위한 작업자 조작 편의성 향상 기술 개발 					
연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정성적 성과 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Distance-based formation control 등을 이용한 멀티 드론 군집제어 및 속도 원격제어기술 및 드론 자동/원격제어 가변 제어 알고리즘 개발 완료 ▪ Passivity 이론을 이용한 시스템 안정성 향상 기술 개발 완료 ▪ 스마트 농업용 멀티 드론 시스템의 조작 방법 분석을 통한 GUI & PUI 개발 및 다중영상 기반 작업자 조작 편의성 향상 기술 개발 완료 ○ 정량적 성과 <ul style="list-style-type: none"> ▪ (사업화지표)특허출원 3건 ▪ (연구기반지표) SCI급 3편, 비SCI급 6편 게재, 학술발표 8건 ▪ (인력양성) 석사 2명, 학사 1명 양성 ▪ (수상) 우수 논문발표상 1건 					
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 멀티 드론의 군집원격제어 등의 드론 관련 HW & SW 기술, 멀티 드론의 자동운항 및 충돌회피 제어, 스마트기기 연동 등의 다양한 편의 옵션을 통한 스마트 농업용 드론 제품을 출시하고 판매 다각화 ○ 개발된 연구성과를 방제 등의 주요 작업에 적용할 경우 적기에 최소 방제를 통한 환경 보호 등 농작업 효율을 극대화하고, 농업인 건강 보호 등 안전사고를 사전에 방지할 수 있는 스마트 농업환경의 구축을 기대할 수 있음 					
중심어 (5개 이내)	정밀농업	방제	스마트 멀티 드론 시스템	군집제어	작업자 중심 인터페이스	

< SUMMARY >

		코드번호	D-02		
Purpose& Contents	<ul style="list-style-type: none"> ○ Purpose <ul style="list-style-type: none"> ▪ Efforts to utilize drones in agriculture are continuing, but there are limitations due to problems such as low payload and short flight time compared to conventional unmanned aerial vehicles. ▪ In order to solve this problem, this research aims to develop a multidrone system for agriculture. ○ Contents <ul style="list-style-type: none"> ▪ Remote swarm control for an agricultural multi-drone system ▪ Improvement in stability of a multi-drone system using multi-modal interfaces ▪ User interface for a multi-drone system ▪ Improvement in usability for a multi-drone system 				
Results	<ul style="list-style-type: none"> ○ Results <ul style="list-style-type: none"> ▪ Remote swarm control using bearing-formation control method ▪ Remote velocity control and switching algorithm for autonomous and remote-control mode ▪ System stability enhancement using passivity theory ▪ Ground control station based on GUI and PUI for a multi-drone system ○ KPI(key performance index) Results <ul style="list-style-type: none"> ▪ Patent applications: 3 files ▪ Paper publications: SCI-3 papers, nonSCI-6 papers, conference: 8 papers ▪ Master's degree student: 2, Bachelor's degree student: 1 ▪ Best Conference Paper Presentation Award: 1 				
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> ○ A smart agricultural drone system is expected to be launched and sold through various H/W and S/W options such as remote swarm control for multiple drones, ground control station, automatic navigation and collision avoidance of multiple drones, and applications on smart devices. ○ The proposed system will contribute to precision agriculture through optimal pest control, advance prevention for safety problem of farmers, improvement of farmers health, and building of smart agricultural environment 				
Keywords	precision agriculture	pest control	smart multi-drone system	swarm control	user-friendly interface

< CONTENTS >

1. Summary	8
2. Important and state of domestic and foreign technologies	24
3. Research contents and results	29
4. Objective achievement and contribution of related area	59
5. Research results and application of research results	86
6. Foreign technologies collected during research project	91
7. Security Level of Research results	97
8. The present state of Research equipment in National Science and Technology Information System	98
9. Laboratory safety management implementation Performance	99
10. Typical research results	102
11. Other matters	103
12. Reference	104

<Attached> Opinion on Self-evaluation

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의개요	8
1-1. 연구개발의 목적	8
1-2. 연구개발의 필요성	8
1-3. 연구개발 범위	8
2. 국내외 기술개발 현황	24
3. 연구수행 내용 및 결과	29
3-1. 연구개발 추진전략 및 방법	29
3-2. 연구개발 추진체계	29
3-3. 연구개발 추진일정	31
3-4. 연구개발 수행내용 및 연구결과	32
3-5. 연구개발 성과	32
4. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	59
4-1. 목표달성도	59
4-2. 관련분야 기여도	72
4-3. 드론의 위치 오차에 대한 정량적 평가 결과	73
5. 연구결과의 활용계획 등	86
5-1. 핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과	86
5-2. 개발된 멀티드론 시스템 기술과 농업분야와의 상관관계	86
5-3. 연구결과 실용화 계획	88
5-4. 연구개발제품에 대한 활용성을 높이기 위한 법적 또는 환경적 조건 제안	88
6. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보	91
7. 연구개발결과의 보안등급	97
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비현황	98
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적	99
10. 연구개발과제의 대표적 연구실적	102
11. 기타사항	103
12. 참고문헌	104
〈별첨〉 자체평가의견서	

주 의

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

1. 연구개발과제의 개요

코드번호	D-03
------	------

1-1. 연구개발 목적

○ 드론은 배터리를 주전원으로 사용하고 있어 체공시간이 짧은 단점이 있고, 가반 하중의 제한 등으로 인해 방제 등에 적용 시 많은 양의 농약을 운반할 수 없는 제약점이 있다. 이러한 제약은 한 대의 드론이 아닌 여러 대의 드론을 동시에 사용함으로써 해결할 수 있다. 하지만, 한 명의 작업자가 여러 대의 멀티 드론을 동시에 조작하기 매우 어렵고 숙련자가 아닌 작업자가 드론을 조작한다고 가정 시 조작부를 포함한 작업자 인터페이스를 구축하기 어려운 기술적인 문제가 있다. 따라서 본 과제에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 “군집 원격제어기술 기반 농업용 멀티 드론 시스템”과 “멀티 드론 시스템의 원격제어를 위한 작업자 인터페이스 및 조작 편의성 향상”에 관한 연구를 하고자 한다.

1-2. 연구개발의 필요성

1-2-1. 군집 원격제어기술 기반 농업용 멀티 드론 시스템 개발

○ 한명의 작업자가 다수의 드론을 이용하여 작업한다면 작업 효율 향상, 작업자 인건비 절감 등의 효과를 극대화할 수 있다. 이를 위해 군집원격제어 알고리즘의 개발이 필요하며 작업자 및 시스템 보호를 위해 멀티 드론 시스템의 안정성이 보장되어야 한다. 특히 여러 대의 드론을 작업자가 원하는 대형으로 구성하여 제어할 수 있는 군집 원격제어기술에 대한 연구가 필요하다.

1-2-2. 멀티 드론 시스템의 원격 제어를 위한 작업자 인터페이스 및 조작 편의성 향상

○ 기존의 개인용 상용 드론의 경우 RC 조종기의 형태가 주류를 이루고 있으며, 최근에는 스마트폰 등의 모바일 디바이스와 연동하여 조작할 수 있는 제품이 출시되고 있다. 하지만 일반용 드론의 조종방식이 상당히 어렵기 때문에, 높은 위험에 노출되어 있다. 특히 멀티 드론 시스템의 경우 한명의 작업자가 다수의 드론을 동시에 제어하기가 실제로는 불가능하기 때문에 군집 제어를 통해 효율적으로 원격 조작할 수 있어야 하며, 이에 따라 대형 형성, 각 드론의 비행 상태, 통신 상태, 다수의 카메라 영상 피드백 등을 효율적으로 인터페이스 할 수 있는 장치와 방법에 대한 연구가 필요하다.

○ 다수의 드론이 동시에 비행하는 경우 작업자가 한 번에 각 드론에 장착된 카메라 영상을 확인할 경우 각 드론들의 위치와 방향을 파악하여 이후 원격 조작에 활용하는 것이 직관적으로 쉽지 않다. 또한 야외라는 특성상 외부에서 각 드론 사이의 상대 위치를 측정할 수 있는 센서를 설치할 수 없기 때문에 현재 원하는 군집 대형이 제대로 형성되었는지를 판단하기가 불가능하다. 따라서 각 드론의 카메라 영상들을 분석하고 재구성하여 작업자에게 원격 제어에 적절한 뷰를 제공해주고 드론의 군집 대형 상태를 파악할 수 있는 정보를 제공하기 위한 기술적인 연구가 필요하다.

1-2-3. 국내 연구 개발의 필요성

- 국내는 무인항공기분야에서 세계 7위의 기술력을 보유하고 있으나, 엔진, 항법, 통신 등의 핵심기술 분야는 선진국 대비 취약하다. 상업용 드론의 발전을 위해서는 기술 개발을 위한 HW, SW 개발인력, 자금 지원 등이 필요하지만 국내는 개발 기반이 취약하다.
- 기술력을 보유한 미국과 유럽의 선진국들과 가격경쟁력을 내세운 중국 사이에서 경쟁을 벌이는 상황에서 국내 업체들이 경쟁하기 위해서는 새로운 기술 경쟁력이 필요하다.
- 본 과제의 농용 멀티 드론 시스템에 대한 기술 개발을 통해 농용 멀티 드론 운영에 대한 기술선점 및 기술적 차별화를 구현하고, 이를 통해 세계시장 진출 및 경쟁력 확보, 수입대체 효과를 달성하고자 한다.

1-3. 연구개발 범위

개발목표 명확성	<ul style="list-style-type: none"> - 농업 생산력은 향상시키면서 고 비용, 높은 위험성, 조작 숙련의 어려움 등의 기존 무인항공기의 단점을 멀티 드론 시스템으로 극복하고자 함. - 개발하고자 하는 멀티 드론 시스템은 작업을 수행하는 세 대 이상의 드론, 드론의 대형을 모니터링하고 대형에 대한 정보를 제공하는 한 대의 관찰 드론 및 멀티 드론을 원격 제어할 수 있는 원격 제어 시스템으로 구체화하여 개발 목표를 명확히 하였음.
연구목표 달성 가능성	<ul style="list-style-type: none"> - 멀티 개체 제어, 작업환경 맞춤형 인터페이스 환경구축, 조작 편의성 향상 기술 등과 관련된 선행연구를 오랜 기간 진행하였으므로 본 과제 목표를 충분히 달성할 것으로 기대됨.
연구범위 타당성	<ul style="list-style-type: none"> - 멀티 드론 시스템 및 제어기술과 작업자 환경에 맞춘 인터페이스환경, 조작 편의성 향상 기술 및 현장 시연 적용까지 연구 범위에 포함시킴으로써 첨단 생산기자재로서의 농용 드론 개발의 산업화 및 활성화에 필요한 모든 개발요소를 연구 범위에 포함시킴.

1-3-1. 연구개발의 최종목표 및 주요내용

- 작물 작황, 병해충 예찰 및 방제 등 농용 작업의 자동화를 통한 첨단생산기술을 개발하고자 농업용 멀티 드론 시스템을 구축하고자 한다. 이를 통해 기존 농업용 무인항공기

보다 작업자가 안전하고 조작하기 쉬우며, 동시에 농용 작업의 효율을 극대화하고자 한다.

○ 기존 농업용 무인항공기 적용 사례들을 분석해보면 그림 1과 같이 대부분 고가의 시스템으로 농가에서 쉽게 구매하기가 어렵고 소형 헬기 이상의 사이즈가 대부분이었으며 작업자가 원활한 조작 수준에 이르기까지 비행교육원 등에서 별도의 교육을 이수해야 한다. 최근의 드론 시스템은 이에 비해 가격이 상대적으로 저가이며 소형사이즈에 농작물 근처까지 근접 비행이 가능하다는 장점이 있어 농업에 적용하려는 노력이 지속되고 있다. 하지만 배터리를 주전원으로 사용함에 따라 체공시간이 짧고 작은 사이즈 한계로 인해 가만하중도 작아지는 단점도 가지고 있다. 또한 여전히 드론 조종을 위한 작업자의 일정 수준의 조작 숙련도는 필요하다. 이러한 드론 시스템의 단점은 여러 대의 드론을 동시에 사용하는 멀티 드론 시스템을 도입함으로써 해결할 수 있다. 이때 가장 큰 기술적인 문제점은 한명의 작업자가 동시 조종이 매우 어렵다는 것과 여러 대의 드론이 일정한 대형을 유지할 수 있는 제어 기술이 필요하다는 것이다. 따라서, 본 과제에서는 멀티 드론 시스템의 대형 형성과 안정성을 보장하기 위한 군집 원격 제어 기술 개발과 한명의 작업자가 멀티 드론을 동시에 효율적으로 조작할 수 있도록 작업자 인터페이스 및 조작성 향상 기술 개발에 초점을 두고자 한다.



그림 1. 연구개발의 필요성 및 과제 연구 개발 내용

○ 최종목표 : 군집 원격제어기술 기반 농업용 멀티 드론 시스템 개발

-1세부(전남대) : 농업용 멀티 드론 시스템을 위한 군집 원격제어 및 안정성 향상 기술

개발

-1협동(한국교통대): 멀티 드론 원격 제어를 위한 작업자 인터페이스 및 조작 편의성 향상 기술 개발

1-3-2. 과제별(세부·협동) 연구개발의 목표 및 내용

○ 본 과제의 연구개발 목표는 그림 2에 나타낸 원격조작 및 군집 제어기술 기반의 농업용 멀티 드론 시스템 개발이다. 그림 2의 멀티 드론 시스템은 방제와 같은 작업을 수행하는 다수의 드론과 드론의 대형을 모니터링하고 대형에 대한 정보를 제공하는 한 대의 관찰 드론, 멀티 드론을 원격 제어할 수 있는 원격 제어 시스템으로 구성되어 있다. 원격 제어 시스템은 각 드론이 제공하는 영상 정보를 가공하여 작업자가 다수의 드론을 하나의 드론을 조종하는 것과 같은 효과를 주어 한명의 작업자가 다수의 드론을 효율적으로 제어할 수 있다.

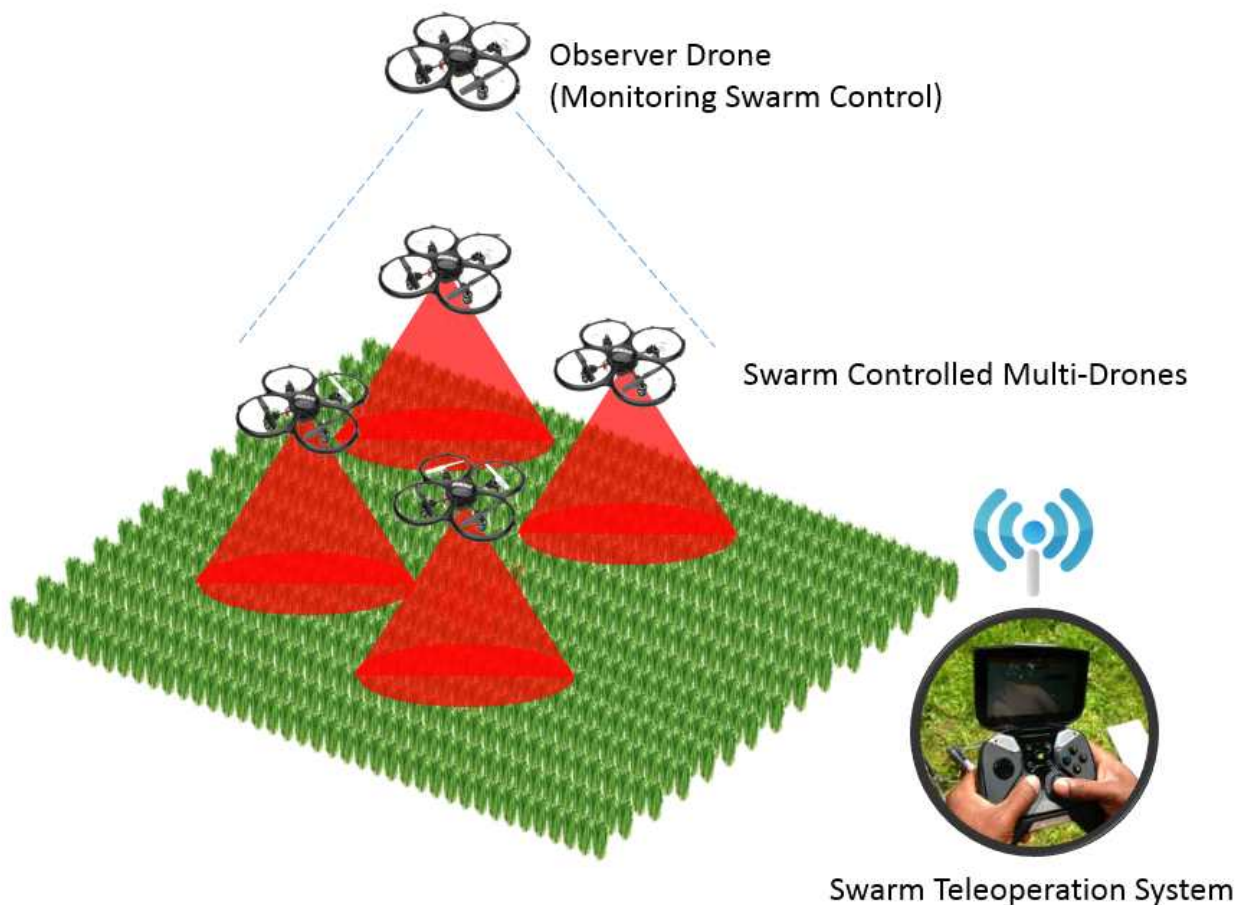


그림 2. 농업용 군집로봇의 원격조작 시스템 개념도

○ 과제 목표 달성을 위한 각 참여기관의 세부 연구 목표 및 내용은 다음과 같다.

1) 1세부: 농업용 멀티 드론 시스템을 위한 군집 원격제어 및 안정성 향상 기술 개발

(1) 멀티 드론 제어 알고리즘 개발

○ 본 과제에서는 UAV의 군집제어를 위해 그림 3와 같이 주변 환경에 대해서도 군집의 topology를 유지하는 고정형 topology 군집제어를 사용한다. UAV에 대한 고정형 topology 군집원격제어에 대한 개념도를 그림 4에 나타내었다.

○ 고정형 topology 개념은 군집로봇이 사전에 정의된 형상 대형을 유지하게 하는 것이다. 그리고 주변 상황에 대해 군집로봇의 rigidity는 변형 가능하도록 허용한다.

○ 고정형 topology 군집원격제어는 그림 4와 같이 군집로봇의 대형을 UAV간의 상대거리로써 정의한다. 그리고 작업자로부터의 제어명령은 모든 UAV에게 전달된다. 따라서 최종적으로 UAV의 제어입력은 군집로봇의 대형을 유지하기 위한 제어, 작업자로부터의 제어 그리고 장애물 회피 제어의 조합이 된다. 이렇게 조합된 군집원격제어으로써 군집로봇은 장애물을 자동으로 회피하며 장애물에 반응하여 군집로봇의 topology는 유지하면서 rigidity는 변화하게 되며 장애물을 회피하고 나면 자동으로 rigidity가 복원된다.

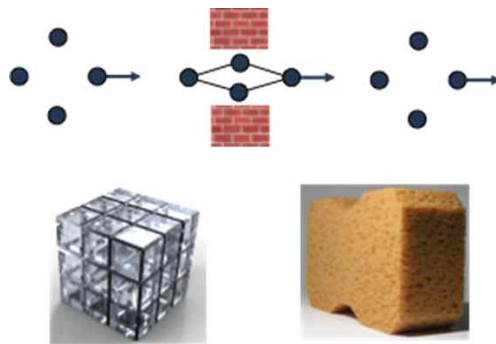


그림 3. 고정형 topology 개념

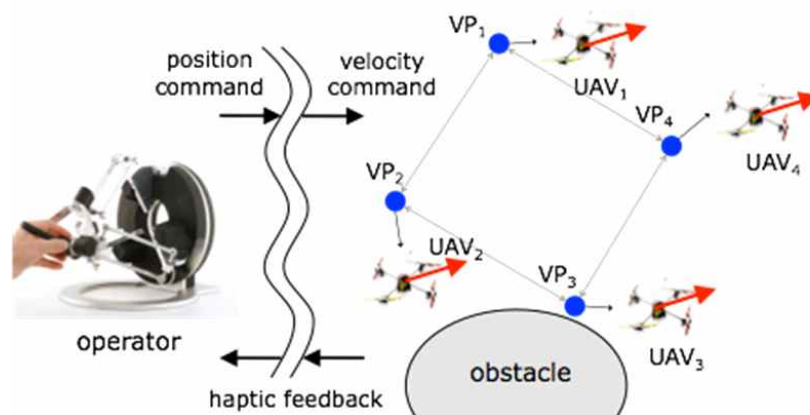


그림 4. 고정형 topology 군집원격제어

○ 본 과제에서는 다음의 3계층 제어구조를 가지는 군집원격제어 및 협조제어 알고리즘을 제안하고 이를 심화 연구하고자 한다. 3계층 제어구조는 그림 5에 나타내었다.

○ UAV 제어 계층: 각 무인로봇은 가상의 kinematic VP (virtual point)의 이상적인 경로를 추종하도록 제어한다. 그리고 i 번째 UAV의 Cartesian 좌표는 $x_i \in \mathbb{R}^3$ 으로 나타낸다.

○ VP 제어 계층: 각 VP의 모션은 원격제어명령과 군집제어명령에 따라 제어된다. 따라서 각 UAV의 i 번째 VP, p_i 의 운동은 다음 수식에 의해 결정된다.

$$\dot{p}_i(t) = u_i^c + u_i^o + u_i^h \quad (1)$$

○ 여기서, $u_i^c \in \mathbb{R}^3$ 는 VP 사이의 충돌방지제어, $u_i^o \in \mathbb{R}^3$ 는 장애물과의 충돌방지제어, $u_i^h \in \mathbb{R}^3$ 는 작업자로부터의 원격제어명령이다.

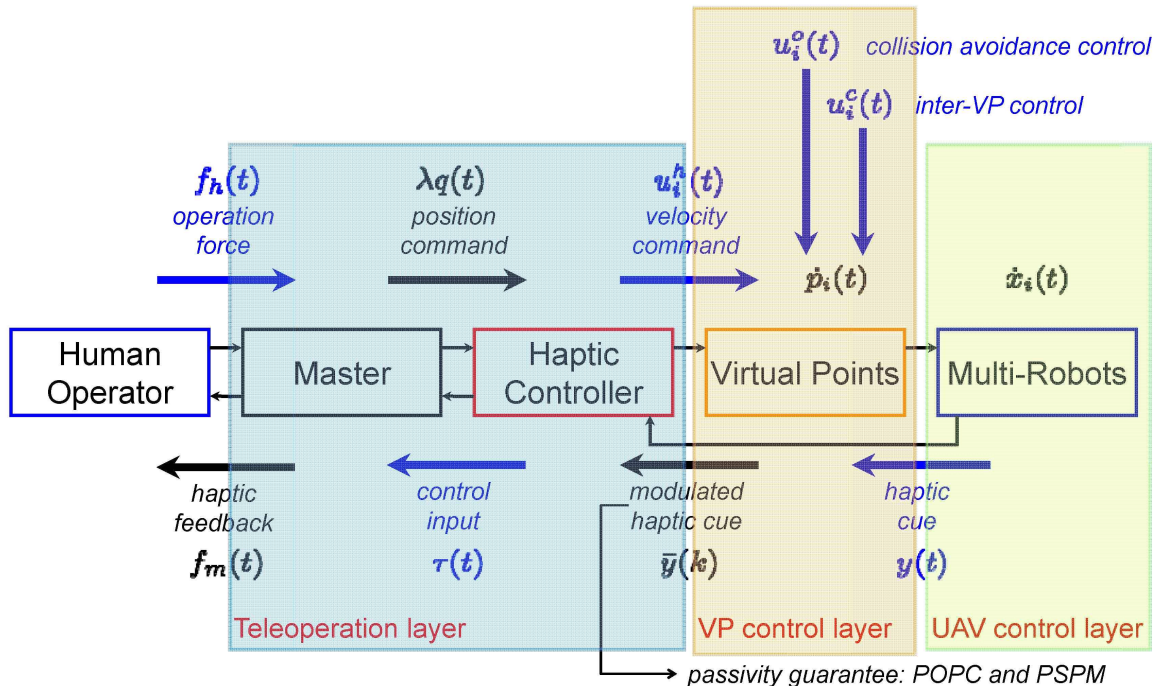


그림 5. 3계층 군집원격제어 구조

○ 원격제어 계층: 작업자는 식 (2)로 모델링되는 햅틱 인터페이스를 사용하여 VP의 속도를 제어함과 동시에 UAV의 상태정보를 햅틱 피드백 받는다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau + f_h \quad (2)$$

○ 여기서, $q \in \mathbb{R}^3$ 는 configuration, $M(q), C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 는 각각 inertia, Coriolis 행렬을 나타내고 $\tau, f_h \in \mathbb{R}^3$ 는 각각 제어입력과 작업자의 조작힘을 나타낸다. 이때 스케일 변수 $\lambda > 0$ 에 대해 u_i^h 는 다음으로 결정된다.

$$u_i^h(t) = \lambda q(t) \quad (3)$$

○ 마지막으로 햅틱 피드백 $y(t)$ 와 햅틱 인터페이스의 제어입력 τ 는 식 (4), (5)와 같이 정의한다.

$$f : (\dot{x}_i, u_i^o) \mapsto y(t) \quad (4)$$

$$f : (q, \dot{q}, y(t)) \mapsto \tau(t) \quad (5)$$

○ 제안된 topology 유지 군집원격제어 알고리즘은 그림 9에 나타난 실험시스템과 유사하게 UAV 군집원격제어 실험시스템도 구축하여 각종 실험을 통해 평가하고자 한다.

○ 본 실험시스템은 1차년도에는 실내환경에서 구축하고 2차년도에는 실외환경에서 구축하고자 한다. 실내환경에서는 GPS가 작동하지 않으므로 UAV의 기본적인 위치 추적은 모션 캡처/트래킹 장치를 활용하고자 한다. 그리고 UAV의 attitude 등은 내장된 IMU 등을 활용하여 추정한다. UAV와 원격조작 스테이션과의 통신은 무선으로 이루어진다. 마지막으로 실외환경에서는 UAV의 위치 추적을 위해 GPS를 사용한다.

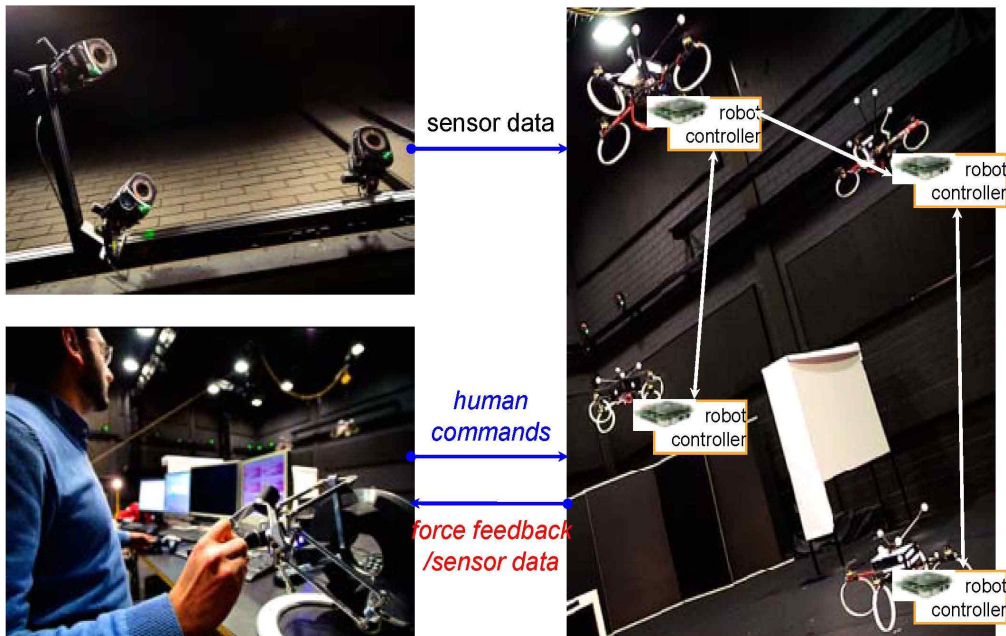


그림 6. Topology 유지 UAV 군집원격제어 실험시스템 모델

(2) 드론 속도 원격제어기술 개발

○ 식 (2)에 정의된 원격조작장치의 하드웨어 장치의 조작 workspace는 한정되어 있다. 따라서 햅틱 인터페이스의 kinematics에 기반한 위치 정보를 그대로 UAV의 제어입력으로 보내면 UAV의 workspace 역시 한정되게 된다. 이를 극복하기 위해 식 (1)에 정의되어 있듯이 작업자의 제어명령 u_i^h 는 UAV의 VP p_i 를 제어하지 않고 \dot{p}_i 을 제어한다.

○ 그리고 작업자의 제어명령 u_i^h 는 식 (3)과 같이 햅틱 인터페이스의 configuration에 의해 결정된다. 이로써 원격조작장치와 UAV 사이의 kinematic dissimilarity로부터 발생하는 workspace가 한정되는 문제를 해결할 수 있다.

○ 이러한 드론 속도 원격제어기술은 그림 5에 나타낸 원격제어계층에서 작업자로부터의 위치 제어명령이 속도제어명령으로 변환되는 것으로 확인할 수 있다.

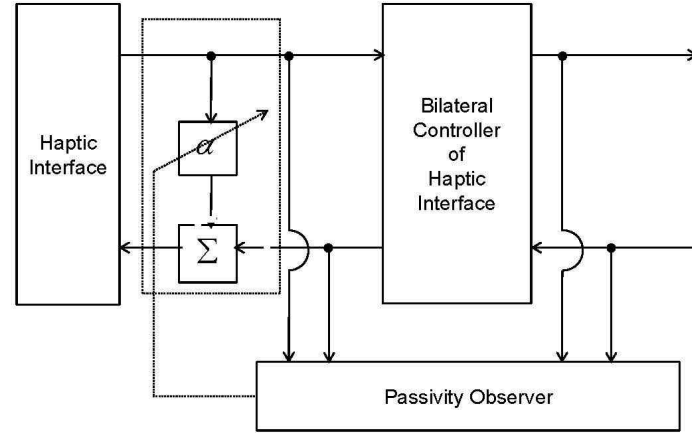
(3) 멀티 드론 시스템 안정성 보장 기술 개발

○ 원격조작장치와 UAV 사이의 kinematic dissimilarity로부터 발생하는 workspace가 한정되는 문제를 해결하기 위해 제안한 드론 속도 원격제어기술은 시스템의 passivity를 유지시키지 못한다. 따라서 드론 속도 원격제어기술로 인하여 시스템이 불안정해 질 수 있다.

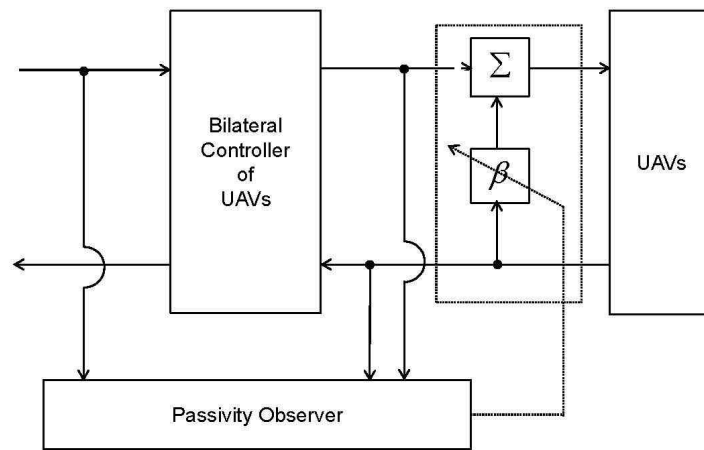
○ 이를 극복하기 본 과제에서는 그림 8에 나타내었듯이 VP 제어 계층에서 원격제어 계층으로 햅틱 피드백을 보낼 때 시스템의 passivity를 유지하기 위해 관련 에너지를 modulation시켜 햅틱 피드백을 전달한다.

○ Passivity를 유지하기 위한 modulation 방법은 속도변수에 적절한 damping 계인을 더해서 햅틱 피드백을 생성하면 된다. 이런 방법에는 대표적으로 POPC (passivity observer and passivity controller), PSPM (passive set-position modulation), Port Hamiltonian 기반 Tank method가 있다. 세가지 알고리즘은 서로 유사하며 본 연구에서는 POPC를 사용하기로 한다.

○ 그림 7에 햅틱 인터페이스와 UAV에 구현된 POPC를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 7. Passivity를 유지하기 위한 POPC (a) 햅틱 인터페이스 측, (b) 드론 측

○ 식 (3)에 구현된 드론 속도 원격제어기술에는 위치 스케일링 계수 $\lambda > 0$ 가 있다. 널리 알려져 있듯이 위치 및 힘 스케일링 계수는 안정성과 깊은 관계를 가지고 있다. 즉, 기존의 연구결과에 따르면 위치 스케일링 계수 \times 힘 스케일링 계수 = 1의 조건을 만족해야 안정성에 영향을 주지 않는다. 본 연구에서는 이 조건을 항상 만족시킬 수 없기 때문에 안정성을 보장하기 위한 방법을 추가로 연구한다.

○ 먼저 안정성 분석을 위해 절대 안정성 조건(absolute stability criteria)를 사용하여 원격조작시스템의 hybrid matrix에 기반한 식 (6)이 가장 중요한 조건이 된다.

$$\eta = -\cos(\angle h_{12}h_{21}) + 2 \frac{Re(h_{11})Re(h_{22})}{|h_{12}h_{21}|} \geq 1 \quad (6)$$

○ 이 조건을 기반으로 식 (7)과 (8)에 안정성 강건도(stability robustness)를 평가하기 위한 지표를 정의하였다. 따라서 식 (7)과 (8)에서 제안하는 안정성 강건도 지표로 농업용

멀티 드론 시스템의 안정성을 평가하고 보장하는 방법을 연구할 수 있다.

$$\omega_{bandwidth}^{stability} = \max\{\omega_k | \forall \omega \leq \omega_k, \eta(\omega) \geq 1\} \quad (7)$$

$$\Pi_{stability} = \int_0^{\omega_{bandwidth}^{stability}} [\eta(\omega) - 1] d\omega \quad (8)$$

(4) 자동/원격제어 가변 제어 알고리즘 구현

○ 앞 절에서 설명하였듯이 자동제어와 원격제어 사이의 가변 제어는 u_i^h 와 $u_i^{waypoint}$ 를 선택해서 사용하면 간단히 구현될 수 있다.

○ 단, 이 경우 알고리즘 가변 시 초기 위치 또는 속도의 불일치로 인한 시스템 안정성이 깨질 수 있다. 이를 방지하기 위해 초기 조건이 동일하도록 u_i^h 와 $u_i^{waypoint}$ 를 선택해야 된다.

○ 또한 이전 절에서 제안한 POPC 등의 안정성 보장 기술을 사용하여 자동/원격제어 가변 시 시스템 passivity를 면밀히 확인해야 된다.

2) 1협동 : 멀티 드론 원격 제어를 위한 작업자 인터페이스 및 조작 편의성 향상 기술 개발

(1) 스마트 농업용 멀티 드론 시스템 인터페이스 기술 개발

○ 작업자 인터페이스는 크게 GUI와 PUI로 나눌 수 있다. GUI는 Graphic User Interface를 의미하며 최근 터치 기술의 발달로 화면에 시각적인 출력과 입력을 동시에 구현할 수 있다. PUI는 Physical User Interface를 의미하며 GUI와 마찬가지로 출력 장치와 입력 장치로 나눌 수 있다. PUI의 출력 장치는 GUI 외에 전원 상태를 나타내는 LED 등을 의미하며 PUI의 입력 장치는 실제 작업자가 물리적인 조작을 통해 드론을 제어하는 조이스틱, 버튼, 레버 등을 의미한다. 그림 8은 드론 원격 제어 장치의 예로 1, 3, 4, 6, 10, 11, 12은 버튼 형태의 PUI 입력 장치이며, 2, 3, 13, 14번은 조이스틱 형태의 PUI 입력 장치이며, 7, 9번 PUI의 출력 장치로 LED를 이용하여 전원 상태를 나타내는 것이다. 그림에서 GUI 장치로 사용된 16번은 테블릿 PC이며, 통신 상태, 드론 전원상태, 고도 등 정보 출력과 화면 전환, 시점 변화, 시스템 세팅 등 정보 입력을 동시에 수행할 수 있다. 스마트 농업용 멀티 드론 시스템 인터페이스를 위해서는 드론 제어, 카메라 제어, 드론 모니터링, 작업 모니터링, 제어 시스템 입출력 등 복잡하고 다양한 기능이 필요하며, 작업자 중심의 인터페이스 설계를 위해서는 각 기능을 GUI로 구현할 것인지, PUI로 구현할 것인지에 대한 분석도 필요하다.



그림 8. 드론 원격 제어 장치 [Parrot Sky Controller]

○ 표 1은 드론 제어를 위한 기능 리스트의 예로, 표 4의 3번째와 4번째 열은 GUI의 화면의 입출력을 나타내며, 5번째와 6번째 열은 PUI의 입출력을 나타낸다. 예를 들어 속도의 경우에는 GUI를 통해 속도의 변화를 작업자가 인지할 수 있도록 구현되어야 하며, PUI를 통해 작업자가 드론의 속도를 변경할 수 있어야 한다.

표 1. 드론 제어를 위한 기능 분석 예

	Function	User Interface				비고
		GUI		PUI		
		Input	Output	Input	Output	
Operation Disp	Weather		○			
	Wind		○			
	Timer		○			
	Control Pad Battery etc				○	
Task Disp.	Task Status	○	○			
	Task Progress etc		○			Bar Gauge
Monitoring Disp.1 (Drone State)	View Mode	○	○	○		Toggle Button
	Zoom	○	○	○		Dial Switch
	etc					
Monitoring Disp. 2 (Drone Control)	Direction		○	○		Joystick (2D)
	Velocity		○	○		Throttle Stick
	UP/Down		○	○		Throttle Stick
	Spin		○	○		Dial
	Landing etc		○	○		On/OFF Button

○ 표 1과 같이 기능 분석을 수행한 후에는 GUI와 PUI를 설계한다. Velocity를 예로 들어 설명하면, GUI는 출력이며, PUI는 입력이다. 속도는 선형적으로 변하는 물리량으로 그림 9와 같은 다양한 방법으로 GUI 출력이 가능하다. 본 과제에서는 기능 분석을 통해 출력으로 분류된 각 기능을 가장 잘 표현할 수 있는 GUI를 설계하여 작업자의 편의성을 증대시킬 수 있는 인터페이스 방법을 제안한다.



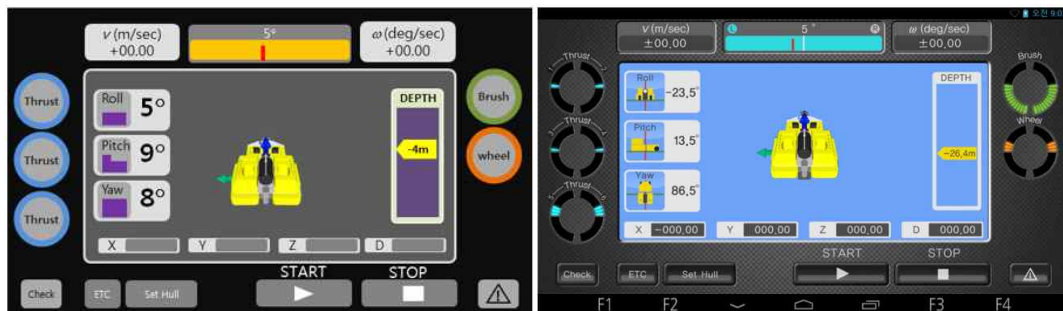
그림 9. 속도를 표시하기 위한 다양한 GUI

○ 그림 10은 속도 입력으로 사용할 수 있는 PUI 인터페이스 장치이다. 그림과 같이 다이얼 방식과 스틱 방식으로 작업자가 속도 입력을 줄 수 있다. 본 연구에서는 GUI와 마찬가지로 기능 분석을 통해 PUI 장치로 분류된 기능에 대해 작업자 편의성을 고려한 인터페이스 방법을 제안한다.



그림 10. 속도 입력을 위한 다양한 PUI

○ 그림 11은 GUI 인터페이스의 예로 (a)는 GUI의 개념 설계이며, (b)는 실제 프로그램 상의 구현을 위한 상세 그래픽 화면이며, (c)는 GUI 동작을 위해서 사용되는 상세한 GUI 소스이다. 본 과제에서는 그래픽 작업은 산업디자인학과와 협력하여 진행할 계획이다.



(a) GUI 개념 설계

(b) 최종 GUI 화면



(c) 프로그램에서 사용되는 그래픽 소스 화면

그림 11. GUI의 개념 설계 및 최종 GUI 화면의 예

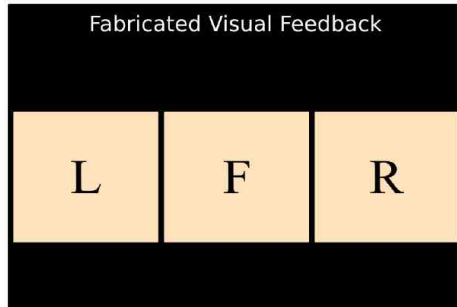
(2) 멀티드론의 조작 편의성 향상 기술 개발

○ 본 과제에서 연구 개발하고자 하는 멀티 드론 군집 원격제어기술은 군집제어를 위해 드론들을 개별적으로 제어하는 기술이다. 그러나 작업자 측면에서는 여러 대의 드론들을 동시에 개별 제어하는 것이 너무 어렵고 복잡한 작업이 될 수 있다.

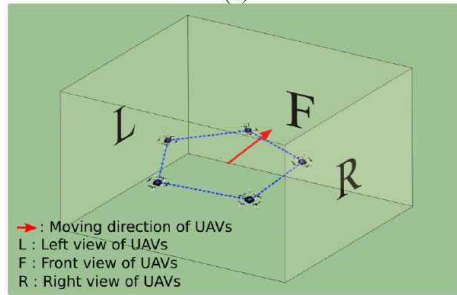
○ 특히, 개별 드론으로부터 전달되는 영상정보는 개별 드론의 위치에서 촬영된 한정적이고 지역적인 정보로서, 작업자가 실시간으로 이들 정보들을 종합 분석하여 전체 드론들의 작업위치와 방향 등을 결정하는 것은 매우 어려운 일이다.

○ 따라서 원격지에 있는 드론들의 상황을 작업자가 보다 쉽게 이해하고 실시간으로 상황을 판단할 수 있도록 시각적인 피드백 기술을 통해 조작 편의성을 향상시키고자 한다.

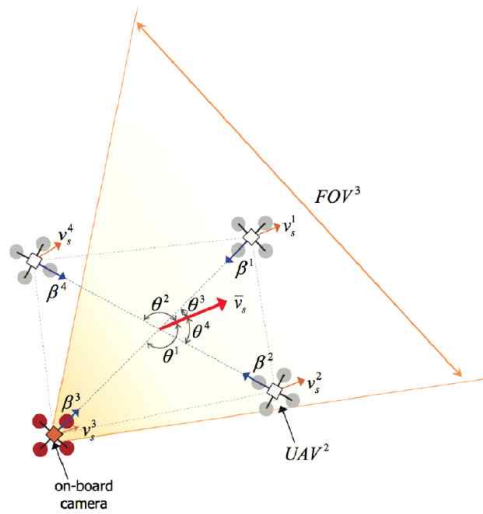
○ 시각적인 피드백 기술의 개요는 그림 12와 같다. 개별 드론들의 진행방향과 전체 대형의 진행방향을 고려하여 그림 12(a)와 같이 개별 드론들로부터 취득된 영상정보를 군집 대형에 대한 정면, 좌측, 우측 영상으로 재구성하는 것이다. 따라서 작업자의 입장에서는 전체 드론의 대형에 대한 움직임을 손쉽게 이해할 수 있으며, 그만큼 조작이 편리해진다. 그림 12(c)는 전체 대형의 운동방향을 결정하기 위한 방법을 개략적으로 표현한 것으로, 각 드론들의 운동 방향에 대한 평균으로 대형의 운동 방향을 결정한다. 그리고 이를 기반으로 대형에 대한 영상을 재구성한다.



(a)



(b)



(c)

(a) 대형을 기준으로 재구성된 대형에 대한 지역적 영상 (b) 드론들의 군집 대형 예제 (c) 시각적 피드백의 개략도

그림 12. 방향정보를 이용하여 재구성된 시각적 피드백 기술의 개요

○ 멀티 드론 모두를 작업자가 개별 제어하는 것은 비효율적이며, 또한 작업자에게 너무 어려운 일이다. 따라서 본 과제에서는 그림 13과 같은 멀티 드론 제어 시스템을 구현하고자 한다.

○ 작업자는 멀티 드론 중 리더 드론 또는 대형의 중심만을 제어하고, 대형 내 나머지 드론들은 대형을 유지하면서 주변 환경에 따라 자율적으로 topology를 변화시키는 제어 시스템을 개발한다.

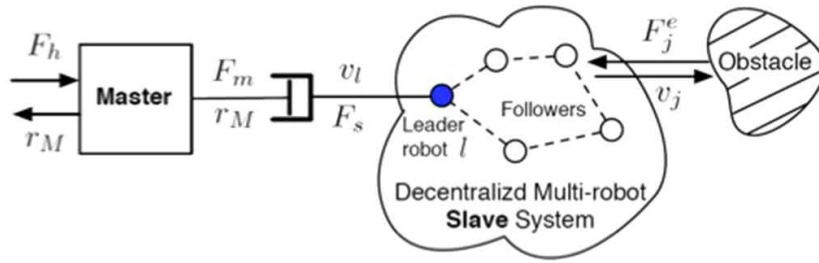


그림 13. 멀티 드론 조작 편의성 향상을 위한 개념도

1-3-3. 연차별 연구개발의 목표 및 내용

○ 연차별 연구개발 목표와 내용은 그림 14와 같다. 1차년도에서는 군집제어 및 원격제어에 기반한 멀티 드론 시스템과 작업자 인터페이스 환경을 구축하고 2차년도에서는 멀티 드론 시스템의 안정성 향상 및 조작 편의성 향상 기술을 개발한 후, 시연 평가를 통한 검증을 최종 목표로 한다.

구분	연도	연구개발의 목표		연구개발의 내용	
1차년도	2016	1세부	농업용 멀티 드론 원격 군집제어 시스템 구축	- 멀티 드론 군집제어 기술 - 멀티 드론 원격제어 기술	- 멀티 드론 하드웨어 시스템 구축
		1협동	멀티 드론 작업자 인터페이스 개발	- 작업자 인터페이스 (GUI, PUI) 개발	
2차년도	2017	1세부	멀티 드론 원격 제어 시스템 성능 향상	- 멀티 드론 속도 제어 기술 - 멀티 드론 안정성 향상 기술	- 시스템 통합 및 멀티 드론 운영 시스템 구축 - 현장 시연 평가
		1협동	멀티 드론 조작 편의성 향상 기술	- 작업자 인터페이스 개선 - 멀티 드론 조작 편의성 향상 기술 개발	



그림 14. 연차별, 세부과제별 연구개발 목표 및 내용

2. 국내외 기술개발 현황

코드번호 D-04

- 지난 30~40년간 농작업의 기계화 및 자동화가 추진되어서 노동 강도와 노동 투하시간이 줄어들고 있으나 방제를 비롯한 작업의 경우 아직도 상당 부분에서 인력에 의존하고 있다. 특히 방제작업은 병해충 방제작업의 시기가 무더운 여름철이며 호스를 끌면서 직접 작업을 하기 때문에 농약에 직접 노출되기 쉬운 매우 힘들고 기피하는 생산과정이다.
- 농업생산에 과도하게 투하되는 노동력과 노동 강도를 줄이기 위해 무인항공기를 이용한 농업기술이 관측, 방제작업, 파종 등에 적용되고 있다. 무인 항공방제 기술의 경우 병충해 발생에 대한 적기 방제, 지역농업실정에 맞는 소규모 정밀 방제, 유인 항공기에 비해 적은 소음 및 비산 등의 장점이 다른 방제 방법에 비하여 우수한 것으로 평가되고 있다. 소규모 지역에서도 효율적으로 작업이 가능하며 작업자의 안전을 도모할 수 있어 일본의 경우 무인헬리콥터에 의한 방제 면적이 계속적으로 증가하는 추세이고 우리나라도 수도 작 방제를 주도하는 경향을 보이고 있다. 또한 무인항공기에 장착된 분광카메라 등으로부터 취득한 영상을 이용하여 작황 예측 등에 활용한 사례 등이 있다.
- UAV(Unmanned Aerial Vehicle)의 분류는 고도, 체공시간, 이륙중량 등의 기준으로 국가별, 지역별로 다소 다르게 분류되나 국내 군용 무인기의 경우 표 2와 같이 분류되고 있다. 국내의 무인항공기 개발은 주로 한국과학기술원, 한국항공우주연구소 등에서 무인기 사업으로 이루어지고 있으나 임무반경과 비행고도에 따라 분류했을 때 농용에서 사용되는 분류에 드는 연구는 미비하였다.

표 2. 무인항공기 성능기준 분류
(2010 국방과학 기술조사서 일반본, 국방기술품질원)

구분	용어	비행거리 (km)	비행고도 (m)	체공시간 (hr)	이륙중량 (kg)
초소형	Micro	< 10	250	1	< 5
소형	Miniature	< 10	150~300	< 2	< 30
근거리	Close Range(CR)	10~30	3000	2~4	150
단거리	Short Range(SR)	30~70	3000	3~6	200
중거리	Medium Range(MR)	70~200	5000	6~10	1250
중거리 체공	Medium Range Endurance(MRE)	> 500	8000	10~18	1250
저고도 종심침투	Low Altitude Deep Penetration(LADP)	> 250	9000	0.5~1	350
저고도 장기체공	Low Altitude Long Endurance(LALE)	> 500	3000	> 24	< 30
중고도 장기체공	Medium Altitude Long Endurance(MALE)	> 500	14000	24~28	1500
고고도 장기체공	High Altitude Long Endurance(HALE)	> 2000	20000	24~48	4500

- 본 과제에서의 관심 연구대상 무인항공기는 총중량 30kg 미만, 고도 300m 이내의 소형경량, 멀티프롭 수직이착륙기이며, 이를 본 과제에서는 ‘드론’이라 지칭한다.
- 농업에 활용하고 있는 무인항공기는 주로 헬리콥터 형태로써 국외의 소경량 헬리콥터 생산 회사는 14개국, 35개 이상 제작사에서, 46개 이상의 모델이 생산되고 있다. 국내에서는 야마하社의 외산 무인헬기 및 성우엔지니어링社, 퍼스텍社(유콘시스템) 등의 국산 무인헬기 제품이 약 200여대 운영되고 있으며 소나무 방재나 영농작업에 쓰이고 있다.



(후지중공업) (무성항공) (성우엔지니어링)

그림 15. 국내외 주요 농업용 무인헬기

- 일본의 야마하는 농약 살포용 무인항공기를 개발하여, 20년 동안 2,400기 이상의 무인헬기를 판매했고, 이 무인헬기들이 일본 전체 면적의 40%에 비료와 살충제 살포에 이용하고 있다.
- 저속·저공 비행이 가능하고, 작업성능은 동력 분무기 대비 15배로 높으나 조종이 까다롭고 훈련이 필요하여 운용비용 상승 요인이 되며 조종 미숙 등으로 헬기 파손을 야기하는 실정이다.
- 농업용 무인헬기는 1.5억 이상의 고가이며 연간이용 가능일수도 약 60일로 짧아 경제적 부담이 크다.
- 이러한 기술적인 한계를 극복하고 농업에의 활용도를 높이기 위해 국내에서는 농촌진흥청을 중심으로 농업용 무인헬기를 이용한 다양한 기술을 개발 시도한 바 있다.
 - 무인헬기 부착 벼 직파장치 및 직파재배기술을 개발 (농업공학부)
 - 무인헬기를 이용한 살포농약의 이화학적 특성조사 (농산물안전성부)
 - 무인헬기를 이용한 살포농약의 약효·약해 분석 (농업생물부)
- 앞서 서술한 바와 같이 농업 분야에 무인항공기(UAV)를 적용 시 고가의 하드웨어시스템을 확보해야하는 경제적 문제점 외에도 실제 전문가의 조종이 필요하기 때문에 비행교육원 등에서 별도의 교육을 실시해야 한다. 또한 작업자의 조종 미숙 등으로 인한 안전사고

등의 문제를 방지하기 위한 방안 확보 등의 기술적인 해결 방안도 필요하다. 방제의 경우 무인항공기의 사이즈와 고도 등의 기술적인 제한 요소에 의해 소규모 정밀 방제가 어렵다는 단점도 가지고 있다.

- 최근에는 드론의 사업적 개발이 활발해져서 농작업에의 적용 또한 많이 연구되어져왔다. 드론은 최소 인력으로 농가당 연면적을 늘릴 수 있어 미래 농업 기술로 주목 받고 있다. 무인 헬기 등의 기존 시스템을 드론으로 대체 시 기존 시스템의 가격, 사이즈 등의 문제점을 해결할 수 있다. 이에 따라 해외에서 방제 등의 작업에 드론을 적용하려고 하는 노력이 계속되고 있다.
- AUVSI(국제무인시스템협회)에서는 2025년 정밀농업용 드론이 세계 민간 무인항공기 시장의 80% 이상을 점유할 것으로 예측하고 있다.
- 농업용 드론의 경우 초분광 카메라 기술을 활용한 영상 분석 및 작황 예측, 영상 매핑 기술, 드론의 제어 및 최적비행기술 등이 핵심 기술이다.
- 멀티 로터형 드론은 농작물 접근성이 우수하여, 카메라와 센서로 농장 어느 곳에 병충해가 발생했는지 빠르게 발견할 수 있어 직접 농작물의 건강 상태 관찰이 가능하여 병충해를 발견하며 농약이 필요한 작물에만 농약 살포가 가능하다.



(농약살포용 드론, 에어콤, 2014)

(방제 멀티 콥터, 코리아드론, 2013)

그림 16. 농업 방제용 드론 활용 사례

- 드론 제작 및 활용과 관련하여 세계적으로는 표 3과 같은 다양한 분야의 기업들이 있다. (출처 : 조선비즈) 특히 농업부문에 다양한 목적으로 드론을 적용하려고 하는 노력이 지속되고 있으며 국가별 농업 분야의 대표적인 활용 사례는 표 4와 같다. (농협경제연구소 주간 브리프(2014.7), 조선비즈) 최근에는 세계적인 드론 생산 업체인 3D Robotics 사 (<http://3drobotics.com>) 에서 포도농장을 비롯한 농업 분야에 드론을 적용하는 연구를 수행하고 있다. 드론에 장착된 카메라를 이용하여 취득 이미지로부터 3차원 이미지를 생성하는 기술과 S/W를 개발하여 농작물의 상태 모니터링에 적용하는 중이다.

표 3. 대표적인 드론 관련 기업

업체명	주요 특징
3D Robotics	- 크리스 앤더슨 전 와이어드 편집장이 세운 드론 업체 - DIY 드론스와 개방형 드론 플랫폼 구축 협업
Trimble	- 드론 GPS 측량 업체
PIX4D	- 3D 구현 소프트웨어 전문 업체
SKYCATCH	- 드론 하드웨어 제작 전문 업체
DroneDeploy	- 드론 랜드매핑 전문 업체
Ceres Imaging	- 드론 이용 물 부족, 질소 정도 등을 파악해 지도화
MATTERNET	- 드론을 이용한 자동 배달 소프트웨어 제공
TITAN	- 태양광 이용하는 드론 제작 업체(구글 인수)
YAMAHA RMAX	- 농약 살포용 드론 제작 업체

표 4. 국가별 농업 분야 드론 활용 사례

구분	활용 사례
미국	- 적외선 촬영을 통한 농산물 작황 점검(일리노이대) - 포도농장 작황 관리(프리스존호크사) - 가축의 이동 추적, 산불의 발생 여부 확인
EU	- 경작 규모에 대한 농업인과 보조금 지급 기관 간의 잦은 분쟁이 발생함에 따라 영농규모 확인하기 위해 사용
프랑스	- 병충해 점검 등 포도밭 모니터링(샤뜨리쉬알드) - 포도주의 과잉생산을 막기 위한 포도나무 제거 감시
일본	- 야마하 코퍼레이션은 20년 전부터 농업용 드론 개발 판매, 2013년 기준 2,400대 판매 - 드론 이용 살충제 및 비료 살포 비율은 일본 전체 논 40%에 이릅니다
호주	- 100여대의 드론을 수입하여 제조용으로 활용 - 최근에는 자체적으로 '사마귀'와 '새우'로 불리는 농업용 드론을 개발 시험비행을 마치고 현장에 투입 - 과실 성숙도 체크, 토양과 비료 상태, 그리고 영농관련 정보 수집
한국	- 농약 살포, 작물 파종, 질병 방제, 산림 보호 등 다양한 용도로 사용 - 농협의 경우 119개 조합에서 136대를 보유하고 있으며 2014년 17대를 추가로 구입

○ 미국의 경우, 환경보호기관은 가축농장의 모니터링에 드론 기술을 이미 사용하고 있으며, 일부 농부들은 곡물 재배에 드론 사용을 시작하였다.

- 최근 미 연방정부의 승인을 받아 율로 카운티에서는 야마하 헬리콥터 드론을 이용해 비료를 살포하였다.
- 기존 항공기가 하던 역할을 드론이 대신 수행한 것으로 이를 통해 비용을 줄일 수 있었으며, 무엇보다 안전하고 정확한 작업 수행이 가능함을 확인하였다.
- 최근 드론의 가격이 떨어지면서 농업인들이 드론을 구매하여 대규모 농경지를 모니터링 및 약제 살포 등 다양한 수송 장치로 드론을 사용하고 있으며, 또한 효율적인

농작물 모니터링으로 생산성이 향상된다.

- 국내의 경우, 2015년 7월 구미시농업기술센터에서 드론을 이용한 벼 병해충 방제를 실시한 사례가 있으며 헬셀 등과 같은 기존의 드론 관련 기업들이 농업에 특화된 드론을 개발 중이다. 또한 국토교통부에서는 드론의 활용 분야를 확장하기 위해 2015년 9월 무인비행장치(드론)를 활용한 실증 시범사업을 공고하고 지자체, 기업 등을 현재 선정중이다.

3. 연구수행 내용 및 결과

코드번호	D-05
------	------

3-1. 연구개발 추진전략 및 방법

○ 본 연구과제의 추진전략은 그림 17과 같다. 본 연구과제의 최종 목표인 군집 원격제어기술 기반 농업용 멀티 드론 시스템 개발을 위해 본 과제는 다음과 같이 단계별 목표를 수립하고, 1세부와 1협동이 각 목표에 따라 유기적으로 협력하여 과제를 추진하고 1참여기업이 지원한다.



그림 17. 연구개발 추진전략

- 1단계: 멀티 드론 하드웨어 및 원격제어 시스템 구축
 - 2단계: 작업자 인터페이스 및 조작 편의성 향상 기술 개발
 - 3단계: 시스템 통합 및 운영 시스템 구축, 현장 시연 평가
- 주관기관인 전남대학교는 해양플랜트, 생산시스템, 의료로봇 등 다양한 원격로봇 및 원격제어 기술, 무인항공기, 수중로봇을 기반으로 하는 모바일 매니플레이터 제어 기술 등에 대한 전문가로서 본 과제에서도 멀티 드론의 제어와 관련된 연구를 중점적으로 수행하고 있으며, 협동연구기관인 교통대학교는 로봇 설계제작 및 제어 기술, GUI, PUI를 통한 작업자 인터페이스 환경 구축 기술, 영상처리 기술 등에 대한 전문가로서 본 과제에서는 멀티 드론 조작 편의성 및 인터페이스와 관련된 연구를 중점적으로 수행하고 있음.

3-2. 연구개발 추진체계

연구개발과제		총 참여 연구원
과제명	농작물 생산 효율 극대화를 위한 군집 원격제어기술 기반 스마트 농업용 멀티 드론 시스템개발	주관연구책임자 손형일의 총 12명

기관별 참여 현황		
구분	연구기관수	참여연구원수
대기업		
중견기업		
중소기업	1	
대학	2	13
국공립(연)		
출연(연)		
기타		

제1세부과제 (전남대학교)
농업용 멀티 드론 시스템을 위한 군집 원격제어 및 안정성 향상 기술 개발
손형일의 4명
담당기술개발내용
- 멀티 드론 원격 군집제어 기술 개발 - 드론 속도 원격제어기술 개발 - 멀티 드론 시스템 안정성 보장 기술 개발 - 자동/원격제어 가변 제어 알고리즘 구현 - 멀티 드론 하드웨어 시스템 구축 - 시스템 통합 및 운영 시스템 구축



제1협동과제 (한국교통대학교)
멀티 드론 원격 제어를 위한 작업자 인터 페이스 및 조작 편의성 향상 기술 개발
정성엽의 7명
담당기술개발내용
- 멀티 드론 제어를 위한 작업자 인터 페이스 기술 개발 - 멀티 드론 조작 편의성 향상 기술 개발 - 멀티 드론 하드웨어 시스템 구축 - 시스템 통합 및 운영 시스템 구축

3-3. 연구개발 추진일정

1차년도														
일련 번호	개발내용	추진 일정												기간 (주)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	멀티 드론 하드웨어 시스템 구축	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			36주
2	멀티 드론 원격제어 기술				■	■	■	■	■	■				24주
3	멀티 드론 군집제어 기술							■	■	■	■	■	■	24주
4	작업자 PUI 개발				■	■	■	■	■	■	■			24주
5	작업자 GUI 개발				■	■	■	■	■	■	■			24주
6	시스템 통합 및 제어 실험										■	■	■	12주

2차년도														
일련 번호	개발내용	추진 일정												기간 (주)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	멀티 드론 속도 제어 기술	■	■	■	■									16주
2	멀티 드론 안정성 향상 기술			■	■	■	■	■	■					16주
3	작업자 인터페이스 개선	■	■	■	■	■	■	■	■					24주
4	멀티 드론 조작 편의성 향상 기술 개발	■	■	■	■	■	■	■	■					24주
5	시스템 통합 및 멀티 드론 운영 시스템 구축				■	■	■	■	■	■				24주
6	현장 시연 평가							■	■	■	■	■	■	24주

3-4. 연구개발 수행내용 및 연구결과

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
1차 년도 (2016)	농업용 멀티 드론 시스템을 위한 군집 원격제어 및 안정성 향상 기술 개발	멀티 드론 원격제어 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> - 햅틱장치를 이용한 사용 드론 제어시스템 구축 - 3개의 드론과 동시에 통신을 구현할 수 있는 멀티 드론 통신 플랫폼 구축 	<p>- 드론 통합 제어기를 이용한 드론 제어</p> <p>: 햅틱 장치를 이용하여 멀티 드론 제어를 위한 유사 인터페이스 환경을 구현하고 실험을 통하여 검증</p>   <p>그림 18. 드론 통합 제어기를 이용한 드론 제어 실험</p>
			<ul style="list-style-type: none"> - 교통대학교에서 시행한 원격제어를 통한 드론 1대 제어방법 교육이수 및 전남대학교에 시스템 구축 - 가장 효율적인 군집 원격 제어 방법 구상 - telemetry radio 를 사용한 멀티 	<ul style="list-style-type: none"> - 교통대학교에서 시행한 원격제어를 통한 드론 1대 제어방법 교육이수 및 전남대학교에 시스템 구축 : 군집 원격제어기술 기반 농업용 멀티드론 시스템 개발을 위해 드론 1대의 원격제어 연구를 교통대학교에서 먼저 진행 하였다. 전남대학교는 교통대학교에서 실행했던 방법을 인계 받아 동일한 시스템을 구축해 보았다.

			<p>드론 시스템 구축</p>	<div data-bbox="906 212 1412 504" data-label="Diagram"> </div> <p>그림 19. 드론 1대 원격제어 초기 시스템</p> <p>시스템은 다음과 같다(그림 19). 드론은 SSH 프로토콜을 이용한 wifi통신을 하고 개발자용 Dronekit 라이브러리를 제공하는 오픈소스 기반 멀티로터인 3DR SOLO를 사용하였고, 컨트롤러는 햅틱 디바이스인 Geomagic Touch를 사용하였다. 또한 드론 제어 소프트웨어는 visual studio MFC에서 제작되었는데, 이때 드론과 pc의 통신은 라즈베리파이를 통해 이루어진다. 통신을 좀 더 자세히 살펴보면 SSH 통신을 지원하는 라즈베리파이는 드론의 SSH 프로토콜의 wifi를 통해 드론의 정보를 받는다. (그림 20)</p> <div data-bbox="893 1422 1428 1646" data-label="Image"> </div> <p>그림 20. 주요 하드웨어</p> <p>이렇게 드론으로부터 받은 정보는 USB to Serial 모듈인 PL-2303을 통해 pc로 전달되며 또한 드론 제어명령을 pc에서 보내면 위에 쓰여진 역순의 통신을 통해 드론이 제어된다. 이 시스템을 토대로 생각한 멀티 드론</p>
--	--	--	------------------	---

플랫폼은 (그림 21) 다음과 같다.

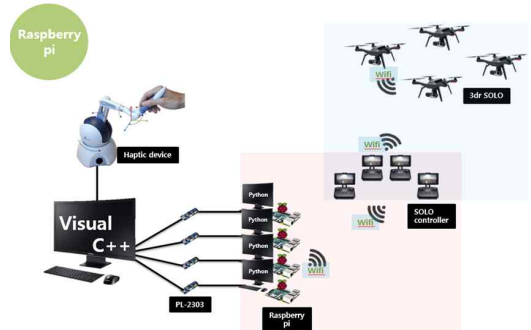


그림 21. 라즈베리파이를 이용한 멀티드론 시스템

라즈베리파이를 이용한 멀티드론 시스템은 많은 하드웨어가 필요로 한다. 4대의 드론을 군집제어 할 경우, 3DR SOLO 4대와 드론과 wifi통신을 위한 컨트롤러가 각각 필요하며 컨트롤러와 SSH 프로토콜 wifi 통신을 할 라즈베리파이 4개가 필요로 한다.

라즈베리파이를 이용한 시스템은 기존에 드론 1대로 진행한 시스템이 있기 때문에 바로 사용가능한 소프트웨어나 하드웨어가 있다는 장점이 있었지만, 많은 하드웨어의 사용으로 시스템이 너무 복잡해진다는 단점이 있었다.

- 가장 효율적인 군집 원격 제어 방법 구상

: 앞서 나온 그림 21의 라즈베리파이를 사용하는 멀티드론 시스템의 문제점을 인식하고 다른 방향의 보다 간단한 하드웨어 구성으로 군집제어를 하는 방법을 생각했다.

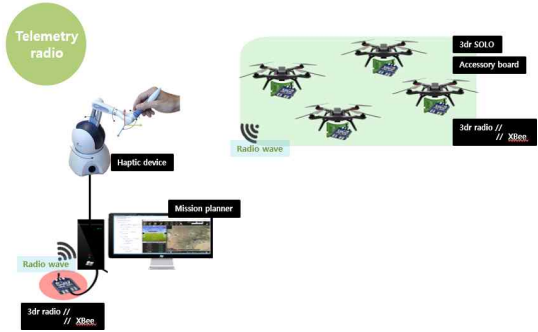


그림 22. 컨트롤러 wifi를 이용한 멀티드론 시스템

그렇게 두 가지의 새로운 시스템을 생각했는데, 첫 번째는 오픈소스 개발자용 드론제어 프로그램인 MissionPlanner와 3DR SOLO 컨트롤러의 wifi를 pc에서 직접적으로 연결하여 제어하는 방법이고 (그림 22), 두 번째는 zigbee나 3dr radio와 같은 telemetry radio를 각 3DR SOLO에 부착하고 그에 상응하는 telemetry radio들을 pc 한 대에 연결하여 MissionPlanner를 통해 제어하는 것이다. (그림 23)



그림 23. telemetry radio를 이용한 멀티드론 시스템

컨트롤러 wifi를 이용한 멀티드론 시스템은 wifi통신을 사용하기 때문에 통신 속도가 빨라 드론을 제어하는데 지연이 거의 없으며 MissionPlanner의 불완전한 swarm demo기능을 응

용 개발 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 현재 동일한 IP주소로 되어있는 드론들의 IP를 서로 다르게 바꾸어 주어야 한다는 것과 드론 수만큼 wifi를 만들어내는 컨트롤러가 각각 필요하다는 단점이 있다. 특히 3DR SOLO의 IP를 바꾸는 것은 SOLO 내부에 있는 소형 리눅스 pc의 고유 IP를 변경해야 하는 작업인데 해당 방법에 대한 자료가 거의 없었다.

Telemetry radio를 사용한 방법은 앞서 두 가지 방법과는 다르게 wifi대신 radio 통신을 사용한다. 이 방법의 장점은 하드웨어 시스템이 가장 간단하다는 것이다. telemetry radio는 드론에 직접적으로 연결되며 상응하는 telemetry radio 또한 pc에 직접적으로 연결된다. 연결된 드론들은 MissionPlanner에서 모두 다르게 인식하며 swarm demo기능을 응용 개발 가능하다. 그런데 이 시스템에서의 문제는 드론에 telemetry radio를 기존 상태로는 연결할 수 없다는 것이었다. 3DR SOLO에는 픽스호크 컨트롤러가 내장되어 있는데 일반적인 픽스호크는 telemetry radio를 연결하는 포트가 있다. 그러나 드론 분해 결과 3DR SOLO에 내장된 장치는 픽스호크2로 telemetry radio 포트가 없는 장치였다. (그림 24)



그림 24 픽스호크와 픽스호크 2

그래서 방법을 찾던 중 3DR SOLO의 accessory bay에 pcb기판을 연결 가능하다는 것을 알았고 pcb기판에 telemetry radio를 부착하는 방법을 사용했다. (그림 25)

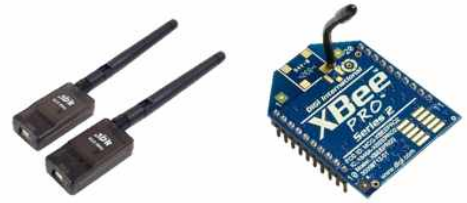


3DR Solo Accessory Bay Accessory Bay PCB

그림 25. accessory bay와 PCB 기판

- Telemetry radio를 사용한 멀티드론 시스템 구축

: 앞서 구상했던 라즈베리파이를 이용한 멀티드론 시스템, 컨트롤러 wifi를 이용한 멀티드론 시스템, telemetry radio를 이용한 멀티드론 시스템 중 하드웨어 구성이 가장 간단한 세 번째 방법으로 시스템을 구축하였다. 우리는 telemetry radio로 zigbee 통신을 하는 Xbee s2를 사용하여 각 드론의 통신을 mesh형태로 구성하기 위해 Xbee 설정 프로그램인 X-ctu를 사용하여 설정하였지만 드론과의 통신 프로토콜의 차이 때문인지 MissionPlanner와 연결이 되지 않아서 Xbee 대신 3dr radio로 변경하였다. (그림 26)



3DR Radio

Xbee S2

그림 26. 3DR radio와 Xbee S2


3dr radio는 MissionPlanner에서 설정이 가능하며 이후의 방법은 Xbee S2를 사용할 때와 동일했다.

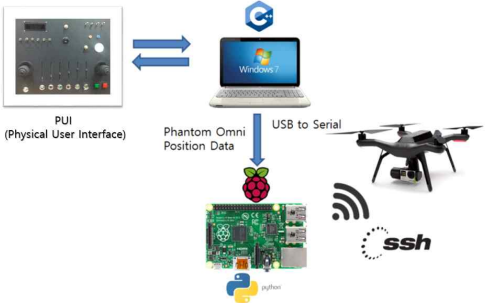
현재 MissionPlanner의 swarm demo 기능에 사용된 알고리즘은 각 드론을 인식하고 각 드론에 다른 지정한 드론과의 사이 거리를 정해주는 방식이다. (그림 27)



그림 27. 연결된 드론 인식 후 사이 거리 지정

우선적으로 드론 1대를 3dr radio통신을 통해 이동시켰을 때 상황에 따라 time delay가 심하게 발생했다. 그래서 우선적으로 leader 드론은 wifi로 통신하고 follow 드론은 radio 통신으로 군집제어를 시도 하였고 following 속도는 느리지만 군집제어가 되는 것을 확인하였다. (그림 28)

				 <p>그림 28. telemetry radio를 이용한 드론 3대 군집 제어</p> <p>위와 같은 결과를 바탕으로 radio 통신만 사용할 때에도 time delay 없이 원활한 군집 제어가 되게 하도록 연구 중에 있다.</p> <p>또한 MissionPlanner의 swarm 알고리즘처럼 드론 배열과 그 배열 위치의 드론을 정해주는 것이 아닌 배열만 정해주면 드론이 충돌 없이 가장 효율적인 움직임으로 스스로 배열하는 알고리즘을 개발하고 있다.</p>
<p>멀티 드론 원격 제어를 위한 작업자 인터페이스 및 조작 편의성 향상 기술</p>	<p>멀티 드론 작업자 인터페이스 개발</p>	<p>- 작업자 인터페이스 (Physical User Interface, PUI) 개발 : 드론 시스템 작업자 인터페이스 입출력 (PUI) 4종 비교분석 : 멀티 드론 시스템 제어를 위한 기능 정의 : 주요 기능을 포함한 PUI 설계 및 제작</p>	<p>- 멀티 드론 제어를 위한 인터페이스 환경 구성 : PUI 장치 1 대, 멀티 드론 통합 제어기 1 대, 드론별 통신 제어기 1대 (라즈베리파이), 멀티 드론 : 멀티 드론 제어를 위해 PUI 장치 1대가 필요하며, PUI 장치에서의 입출력 정보 (드론 전원 ON/OFF, 이착륙 신호, 카메라 관련 정보 등)는 멀티 드론 통합 제어기에 전송되며, 이 정보를 이용하여 다수의 드론을 동시에 제어함</p>	

				 <p>그림 29. 멀티 드론 제어를 위한 인터페이스 환경</p> <ul style="list-style-type: none"> - 멀티 드론 제어를 위한 PUI 기능 분석 비교 결과 4개의 기능으로 분류 <ul style="list-style-type: none"> : 카메라 조종 기능, 드론 운동 제어 기능, 드론 상태 제어 기능, 주요 상태 표시 기능으로 구분 확인 - 최대 6대의 드론을 제어할 수 있는 멀티드론 시스템 작업자 PUI 인터페이스 장치 프로토타입 개발
			<ul style="list-style-type: none"> - 작업자 인터페이스 (Graphic User Inerface, GUI) 개발 <ul style="list-style-type: none"> : 드론 시스템 GUI 3중 분석 : 멀티 드론 시스템 제어 및 정보 확인을 위한 GUI 기능 정의 : 주요 기능을 포함한 GUI 설계 및 프로그래밍 	<ul style="list-style-type: none"> - 멀티 드론 제어를 위한 GUI 기능 비교 분석 결과 3개의 기능으로 분류 <ul style="list-style-type: none"> : 드론 상태 및 제어 모니터링, 지도 및 경로 생성 및 모니터링, 카메라 영상 제어 및 모니터링 - 최대 6대의 드론의 상태를 제어하고 모니터링할 수 있는 멀티 드론 시스템 작업자 GUI 인터페이스 설계 - 3대의 10.1인치 모니터를 이용한 GUI 환경 구축 및 프로그래밍 진행 중

○ 멀티 드론 작업자 인터페이스 개발 연구결과 추가

- 상용 드론 4종의 PUI 기능 분석표

	기능	내용	PUI							
			Input				Output			
			3DR SOLO	Parr ot sky	DJI PHA NT OM3 Pro	DJI INS PIE R1	3DR SOLO	Parr ot sky	DJI PHA NT OM3 Pro	DJI INS PIE R1
카메라	짐벌각도 조절1	상하	○		○	○				
	짐벌각도 조절2	좌우			○	○				
	카메라 조절(짐벌 x)	카메라 앵글이동		○						
	촬영 버튼	사진촬영버튼	○	○	○	○				
	동영상녹화버튼	동영상녹화버튼		○	○	○				
조이스틱	조이스틱1	상승하강	○	○	○	○				
	조이스틱2	전진후진	○	○	○	○				
	조이스틱3	좌회전/우회전	○	○	○	○				
	조이스틱4	좌측/우측 수평이동	○	○	○	○				
드론	리턴홈 버튼	비행시작점이동	○	○	○	○				
	비상버튼	비상버튼, 호버링	○	○						
	take off/ landing									
	모드	비행모드버튼 (P=위치,A=자세,F=기능)			○	○				
	사용자지정모드	사용자 지정 x2 모드	○		○					
	외부포트1	HDMI					○	○		○
	외부포트2	USB, micro USB		○	○	○				
상태	기체 배터리						○	○		
	controller 배터리						○	○	○	○
	controller와 통신상태									
	와이파이						○	○		
	고도						○			
	GPS						○			
	고도									
	거리									
	가속도									
	속도									
조종기와 기체사이 높이										
map						○				

- 상용 드론 3종의 GUI 기능 분석

	기능	내용	GUI					
			Input			Output		
			3DR SOLO	Parro t sky	DJI GO	3DR SOLO	Parro t sky	DJI GO
카메라	짐벌각도 조절1	상하						
	짐벌각도 조절2	좌우						
	카메라 조절(짐벌 x)	카메라 앵글이동		○				
	촬영 버튼	사진촬영버튼	○	○	○			
	동영상녹화버튼	동영상녹화버튼	○	○	○			
조이스틱	조이스틱1	상승하강		○				
	조이스틱2	전진후진		○				
	조이스틱3	좌회전/우회전		○				
	조이스틱4	좌측/우측 수평이동		○				
드론	리턴홈 버튼	비행시작점이동			○			

	비상버튼	비상버튼, 호버링						
	take off/ landing			○	○			
	모드	비행모드버튼 (P=위치,A=자세,F=기능)						
	사용자지정모드	사용자 지정 x2 모드						
	외부포트1	HDMI						
	외부포트2	USB, micro USB						
상태	기체 배터리					○		
	controller 배터리						○	○
	controller와 통신상태					○		○
	와이파이						○	○
	고도						○	○
	GPS							○
	고도					○		○
	거리							○
	가속도							○
	속도						○	○
	조종기와 기체사이 높이					○		○
	map					○		○



- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| [1] 홈 | [11] 현재위치 |
| [2] 현재모드 및 표시 설정 | [12] Map |
| [3] GPS Signal Strength | [13] 고도 |
| [4] System Status | [14] 거리 |
| [5] Remote Controller Signal | [15] 가속도 |
| [6] HD Video Link Signal Strength | [16] 속도 |
| [7] Battery Level | [17] 조종기와 기체 사이 높이 |
| [8] General Settings | [18] Camera Operation Bar |
| [9] Auto Takeoff/Landing | |
| [10] Return Home | |

[DJI GO GUI 분석]



- [1] 메인메뉴
- [2] 설정
- [3] 보정
- [5] 플립메뉴
- [6] 동영상 촬영
- [7] 사진촬영
- [8] 속도
- [9] 고도
- [10] 이륙착륙버튼
- [11] GPS
- [12] 와이파이
- [13] controller 배터리
- [14] 컨트롤러 (상승/하강, 좌/우 회전)
- [15] 카메라 틸트 제어

[Parrot SKY Controller GUI 분석]



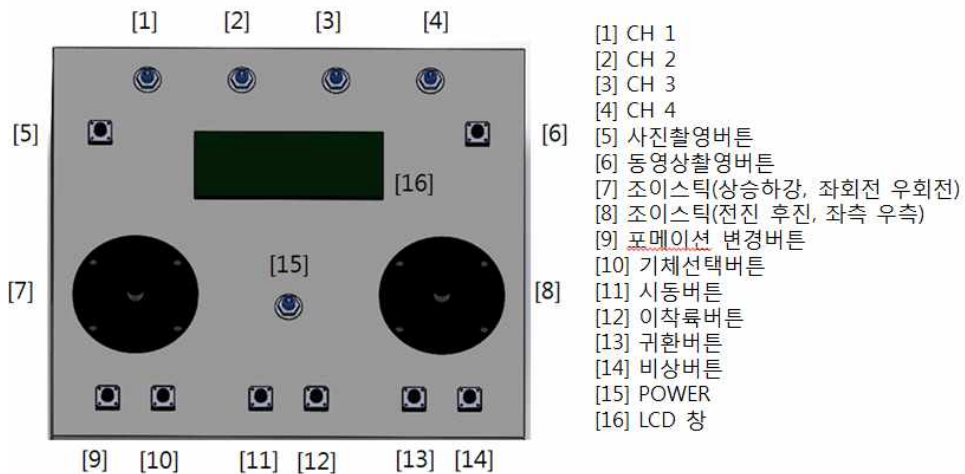
- [1] 실시간 화면
- [2] 메인 메뉴
- [3] 홈의 고도
- [4] 현재 고도
- [5] 현재 모드
- [6] 기체의 배터리
- [7] 통신 상태
- [8] SHOT List
- [9] 지도
- [10] 녹화 시작/중단
- [11] 상태 메시지 창

[3DR Solo GUI 분석]

- 상용 드론 4종의 GUI/PUI 기능 분석을 통해 멀티 드론 제어 및 모니터링을 위한 필요 기능도출

		기능	내용	User Interface			
				GUI		PUI	
				Input	Output	Input	Output
Muti drone	카메라	각도조절	카메라 짐벌 조절			O	
		zoom in/out				O	
		카메라 기체선택		O		O	
		촬영 버튼				O	
		동영상녹화버튼	동영상녹화버튼			O	
		카메라 영상			O		
	조이스틱	조이스틱1	상승하강			O	
		조이스틱2	전진후진			O	
		조이스틱3	좌회전/우회전			O	
		조이스틱4	좌측/우측 수평이동			O	
	드론	리턴홈 버튼	비행시작점이동			O	
		비상버튼	비상버튼, 호버링			O	
		모드		O		O	
		기체선택버튼				O	
		기체 시동버튼				O	
		ALL/ one				O	
		포메이션 변경		O	O	O	
		take off				O	
	상태	각각의 기체 배터리			O		
		각각의 controller 배터리			O		O
		지도			O		
		각각의 드론 번호			O		O
		각각의 와이파이			O		
		각각의 고도			O		
		각각의 GPS			O		

- GUI / PUI 도안 및 설계 (초안)



[PUI 설계 초안]

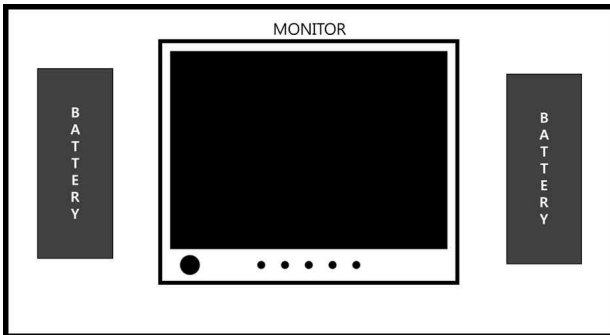


영상

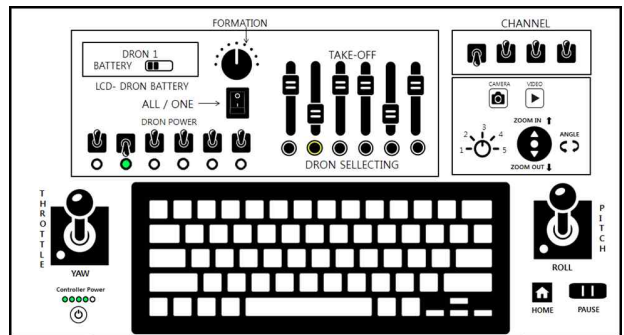
- [1] 홈
- [2] GPS 신호
- [3] 현재 모드
- [4] 통신 상태
- [5] controller 배터리
- [6] 총 비행시간
- [7] 상태 메시지 창
- [8] 총 비행거리
- [9] 선택된 기체표시
- [10] 선택된 기체의 고도
- [11] 선택된 기체의 속도
- [12] 선택된 기체의 배터리
- [13] 기체 사이의 거리

[GUI 설계 초안]

- PUI 최종안

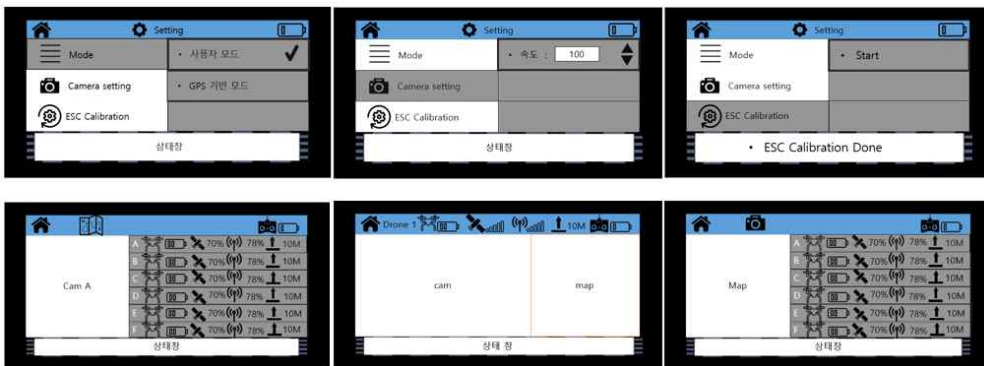


[GUI Console 최종안]



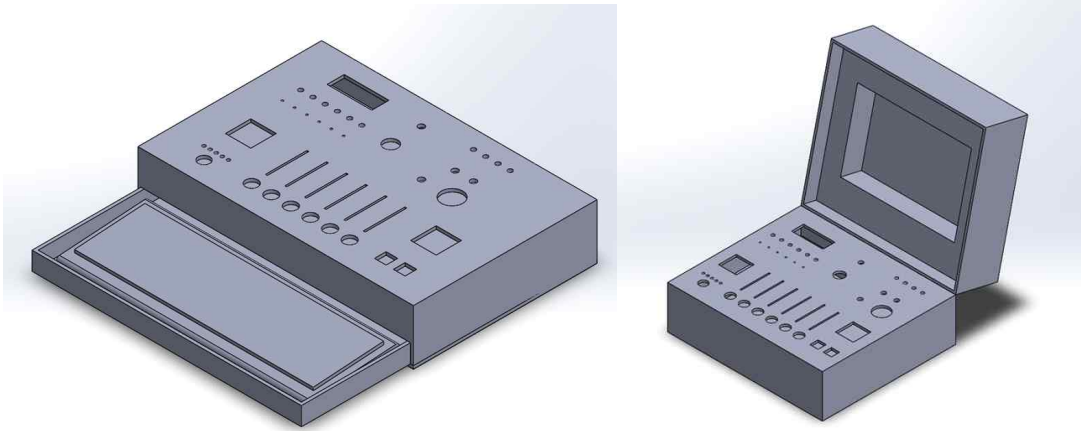
[PUI 최종안]

- GUI 최종안

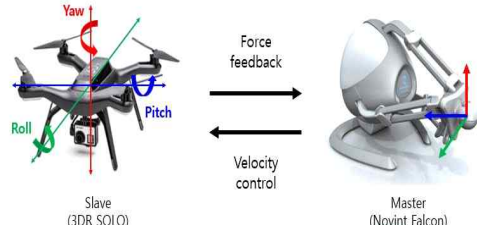


[GUI 최종안]

- PUI 장치 프로토타입 제작



- [1] 드론 배터리 상태 LCD 창
- [2] 드론 전체 파워 ON/OFF
- [3] 포메이션 선택 로터리 스위치
- [4] 컨트롤 모드 선택 스위치
- [5] 개별 드론 파워 스위치
- [6] 사진 촬영
- [7] 동영상 촬영
- [8] 카메라 선택 스위치
- [9] 카메라 줌/회전 각도 제어
- [10] 드론 트로틀/방향 제어
- [11] 드론 이착륙 제어
- [12] 드론 피치/롤 제어
- [13] 드론 조종기 파워 ON/OFF 및 배터리 상태
- [14] 드론 선택 스위치
- [15] 드론 Home 위치로 이동
- [16] 드론 호버링

				코드번호	D-05
구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과	
2차 년도 (2017)	멀티 드론 원격 제어 시스템 성능 향상	멀티 드론 속도 제어 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 햅틱 인터페이스를 통한 멀티 드론의 속도제어 기술 개발 $u_i^h(t) = \lambda q(t)$ <ul style="list-style-type: none"> - Robot Operation System(ROS)를 이용하여 드론의 속도제어 시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> - 햅틱 디바이스를 이용한 드론의 속도제어 : 작업자의 제어명령은 드론의 위치제어가 아닌 속도제어를 통해 한정된 workspace 극복 : 햅틱 인터페이스의 configuration에 의해 속도제어 명령이 결정되며, 본 연구에서는 End-effector의 위치를 configuration으로 사용 : 작업자가 햅틱 디바이스의 End-effector의 위치를 제어함으로써 변환된 속도제어명령이 멀티 드론에 각각 입력되어 다수의 드론을 효과적으로 제어 : 햅틱 디바이스의 위치는 드론의 Linear velocity를 제어하며, 햅틱 디바이스의 버튼 Event를 통해 드론의 Angular velocity를 제어  <p>그림 30. 햅틱 디바이스를 이용한 드론의 속도제어</p> <ul style="list-style-type: none"> - ROS를 이용하여 드론의 제어시스템 구축 : 드론에서 사용하는 통신 프로토콜인 mavlink를 ROS에서 사용하기 위해 MAVROS 패키지를 사용 : MAVROS와 개발자용 Flight Mode인 OFFBOARD mode를 적용하여 드론의 속도제어 시스템 구축 	

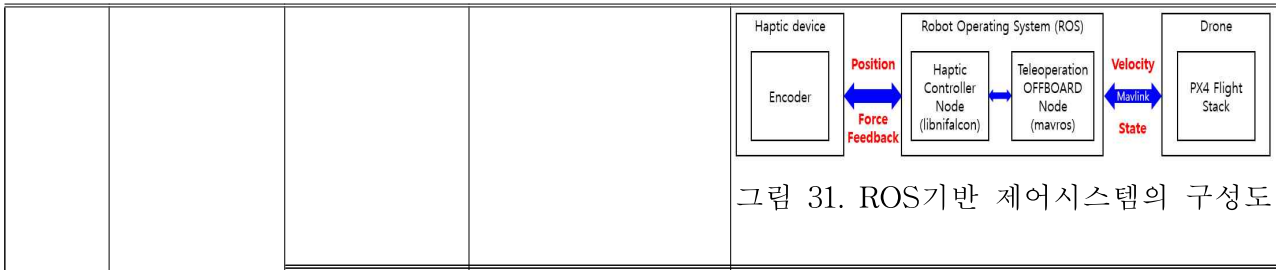


그림 31. ROS기반 제어시스템의 구성도

제어 알고리즘 및 멀티 드론 시스템의 성능평가를 위한 시뮬레이터 개발

- 3D 로봇 시뮬레이터인 Gazebo와 로봇용 메타 운영체제인 ROS를 사용한 시뮬레이터 개발

- 멀티 드론 시스템의 검증 및 평가를 위한 Hardware-In-the-Loop Simulator (HILS) 개발
 - : 3D Dynamic 환경의 시뮬레이터인 Gazebo에 실제 드론과 유사한 환경 구축
 - : 모델링된 멀티 드론에 로봇용 운영체제인 ROS를 사용하여 실시간 제어 및 입출력 데이터 처리, 제어 알고리즘 적용
 - : 멀티 드론 제어시스템의 개발 시간을 단축시킬 수 있으며, 알고리즘 및 다양한 농작업 시나리오 적용 후 테스트 가능

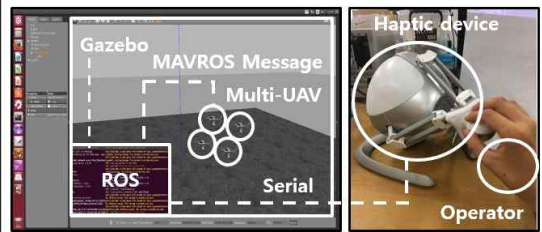


그림 32. 멀티 드론 HILS 시뮬레이터

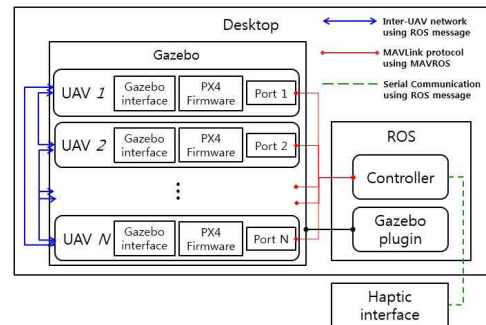


그림 33. 시뮬레이터의 블록 다이어그램

				<p>- 멀티 드론 원격 제어 시스템의 성능 향상을 위한 분산군집제어 알고리즘 개발</p> <p>: 주변 환경에 대해서도 군집의 topology를 유지</p> <p>: 2계층 원격제어구조를 가지며, 분산군집제어는 작업자로부터의 원격제어 명령, 장애물과의 충돌방지제어, 드론간의 충돌방지 및 대형유지제어로 구성</p> <p>: 대형제어</p> $u_i^c = - \sum_{j \in N_i} \frac{\partial \varphi_{ij}^c (\ p_i - p_j \ ^2)^T}{\partial p_i}$ <p>: 충돌제어</p> $u_i^o = - \sum_{r \in O_i} \frac{\partial \varphi_{ir}^o (\ p_i - p_r^o \ ^2)^T}{\partial p_i}$ <p>: 원격제어</p> $u_i^h(t) = \lambda q(t)$ <p>: ROS기반의 멀티 드론 시스템 개발 및 분산군집제어 알고리즘 구현 및 평가</p> <div data-bbox="906 1579 1412 1848"> </div> <p>그림 34. 2계층 제어구조</p>
	<p>분산군집제어 알고리즘 개발 및 구현</p>	<p>- 중앙집중형 제어 알고리즘이 아닌 분산형 군집제어 알고리즘 개발</p> $\dot{p}_i(t) = u_i^c + u_i^o + u_i^h$ <p>- 멀티 드론 시스템에 분산군집제어 알고리즘 구현 및 평가</p>		

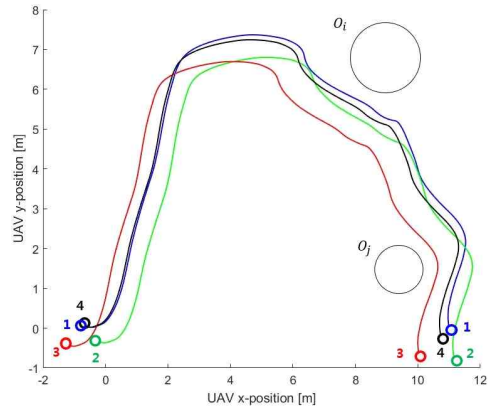


그림 35. 멀티 드론의 경로 (x-y 평면)

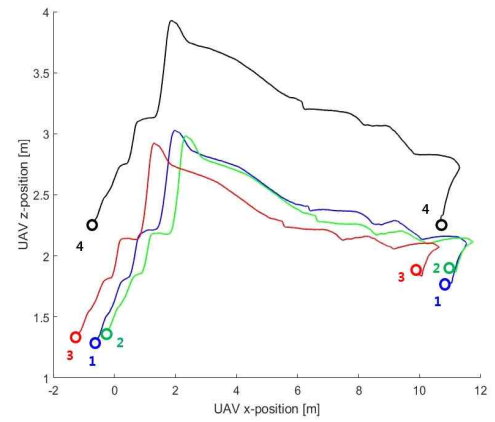


그림 36. 멀티 드론의 경로 (x-z 평면)

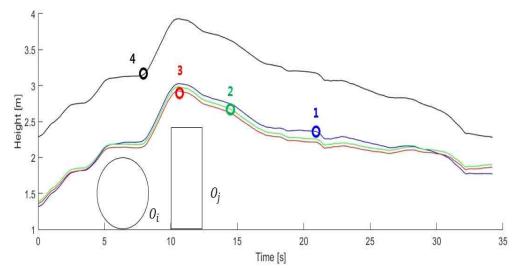


그림 37. 멀티 드론의 시간에 따른 높이

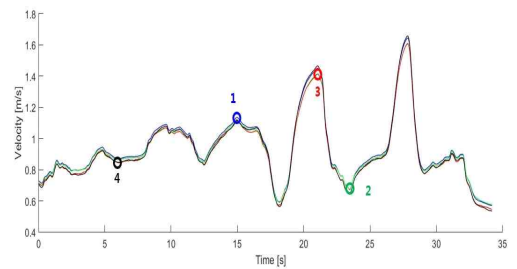


그림 38. 멀티 드론의 시간에 따른 속도

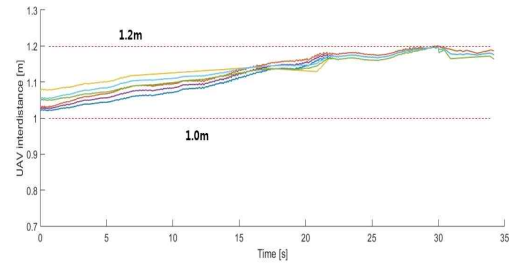


그림 39. 멀티 드론의 시간에 따른 상대거리

- 라우터를 이용한 1:N통신이 가능한 분산형 멀티드론 제어시스템 개발
 - : 기존의 시스템은 멀티 드론에 대해 각각의 송수신기가 필요했지만, 라우터를 이용하여 Ground Station과 다수의 드론을 하나의 통신 네트워크에 구축
 - : UDP 통신 프로토콜을 사용하여 ROS 기반의 분산 컴퓨팅 환경 구축

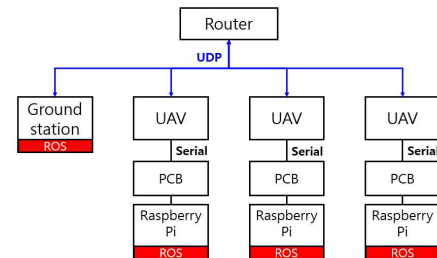


그림 40. 라우터를 이용한 분산형 제어시스템



그림 41. ROS 분산 컴퓨팅을 위해 제작된 PCB기판을 드론 및 라즈베리파이와 연결

멀티 드론의 제어시스템 개선

- 다수의 1:1통신의 중앙집중형 멀티드론 시스템에서 1:N통신의 분산형 멀티드론 제어시스템 개발

	<p>멀티 드론 원격 제어를 위한 작업자 인터페이스 개선 및 조작 편의성 향상 기술 개발</p>	<p>멀티 드론 작업자 인터페이스 개선</p>	<p>- 작업자 인터페이스(Physical User Interface, PUI) 개선</p> <ul style="list-style-type: none"> : 휴대가 가능한 형태의 통합 제어기 : 기존 PUI 장치의 개선 : 10.1인치 모니터 3대의 수납형 구조 	<p>- 주요 기능의 추가 및 구현 형태를 변경하여 PUI 설계 및 제작</p> <ul style="list-style-type: none"> : 비상 정지 버튼 추가 : 대형의 크기 설정이 가능한 슬라이더 추가 : 카메라 회전 각도 조절용 1축 조이스틱 : 개별적 제어 시 선택된 드론의 유무를 알 수 있는 LED 부착형 드론 선택 스위치 : 미션 수행을 위한 기능(재생, 일시 정지, 정지, 속도조절)의 추가 : 간단한 정보(카메라 각도, 비행 모드)를 표기 할 수 있는 LCD 화면 <div data-bbox="884 857 1433 1160" data-label="Image"> </div> <p>그림 42. 개선된 PUI 장치</p> <div data-bbox="928 1272 1388 1653" data-label="Image"> </div> <p>그림 43. 수납된 형태의 통합 인터페이스</p> <p>- 휴대가 가능한 형태의 멀티 드론 제어 통합 인터페이스 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> : 개선된 PUI 장치 1대, 멀티 드론 통합 제어기 1대, 드론 별 통신 제어기 3대, 영상 수신 장치 3대, 10.1인치의 모니터 3대등을 포함하는 일체형
--	---	---------------------------	--	--

				<p>: 10.1인치의 모니터 3대는 포개어지는 형태로 수납 가능</p>  <p>그림 44. 전개된 형태의 통합 인터페이스</p>
		<p>- 작업자 인터페이스(Graphic User Interface, GUI) 개선</p> <p>: 10.1인치 모니터 3대를 이용한 데이터 표시</p> <p>: 카메라 모니터링 및 각 모니터별 기능화면 표시</p>		<p>- 3대의 모니터를 통하여 다양한 정보를 선택적으로 표시 가능</p> <p>: 기본화면은 원하는 드론을 선택하여 카메라 정보를 모니터링 할 수 있는 화면</p> <p>: 모니터별로 개별적으로 카메라 선택 가능</p>  <p>그림 45. 3대의 모니터에 표기되는 카메라 정보</p> <p>: 카메라 정보 표기 화면 이외에 각 모니터별로 기능화면 표기 전환 가능</p> <p>: 좌측 - 드론 상태 및 제어 모니터링</p> <p>: 중앙 - 지도 및 대형</p> <p>: 우측 - 지도 및 경로 생성 과 미션 수행 제어</p>

				 <p>그림 46. 3대의 모니터별로 선택 가능한 기능화면</p> <p>- 드론 상태 및 제어 모니터링 화면 : 멀티 드론의 제어 및 데이터를 함축하여 표기하는 'Simple mode' 와 개별적으로 표기한 'Detail mode' 중 사용자가 선택 가능</p>  <p>그림 47. 좌-Simple mode, 우-Detail mode</p> <p>- 지도 및 경로 생성 과 미션수행 제어 : 지도상에 지점을 지정하여 웨이포인트(Waypoint)로 설정하여 경로를 생성할 수 있는 화면 : 경로데이터를 넘겨받아 미션을 수행하거나 제어할 수 있는 화면</p>  <p>그림 48. 좌-미션 작성, 우 - 미션수행 제어 화면</p>
<p>시스템 통합 및 멀티 드론 운영 시스템 구축과 현장 시연 평가</p>	<p>군집 원격제어기술 기반 스마트 멀티 드론 시스템 개발</p>	<p>- 시스템 통합 및 군집 원격제어기술 기반 멀티 드론 시스템 구축</p> <p>- 군집 원격제어기</p>	<p>- 개발 및 제작된 인터페이스(GUI, PUI)를 사용하여 분산군집제어 알고리즘 기반의 멀티 드론 시스템 구축</p> <p>: Java를 사용한 작업자 인터페이스 시스템을 기반으로 분산군집제어 알고리즘 적용</p>	

			<p>술 기반 멀티 드론 시스템을 이용하여 농작업 시나리오 적용 및 성능 평가</p>	<p>: 개발한 작업자 인터페이스는 다수의 드론에 대한 정보를 효과적으로 제시하며, 작업자의 조작 편의성을 향상</p> <p>: 분산형 제어 시스템은 기존의 중앙 집중형 제어 시스템보다 농업환경에 대해 안정성이 우수</p> <p>: 군집 원격제어기술 기반의 멀티 드론 시스템은 작업자가 다수의 드론을 효과적으로 제어하기 때문에 단일 드론 시스템보다 성능측면에서 매우 우수</p>  <p>그림 49. 분산군집제어 기반 멀티 드론 시스템</p> <p>- 분산군집제어 기반 멀티 드론 시스템을 이용한 정량적 실험 평가</p> <p>: 단일 드론 자동제어, 멀티 드론 자동제어, 단일 드론 원격제어, 멀티 드론 원격제어 총 4가지의 실험 case를 통해 시스템의 성능 평가 진행</p> <p>: 예찰(Remote sensing and Area coverage)을 통하여 멀티 드론 시스템을 이용한 농작업 수행</p> <p>:total time, flight time, setup time, battery state, coverage ratio 등의 성능 지표를 통해 정량적 목표 도달</p>
--	--	--	---	--

3-5. 연구개발 성과

3-5-1. 국내외 논문 게재

No	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호
1	스마트 농업용 멀티드론 시스템 개발: 진행 현황	융.복합기술 연구소 논문집	박영주	6(1)	대한민국	한국교통대학교 융.복합기술연구소	비SCI	2016.05.31	
2	미래 농업을 위한 바이오시스템공학	제어·로봇·시스템학회지	주찬영	22(3)	대한민국	제어·로봇·시스템학회	비SCI	2016.09.25	
3	Maintenance Robot for 5-MW Offshore Wind Turbines and its Control	IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	이동건	21(5)	미국	IEEE	SCI	2016.10.01	
4	A passivity criterion for real-time haptic simulation of viscoelastic soft tissues	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering Part I- Journal of Systems and Control Engineering	손형일	230(9)	영국	SAGE Publications	SCI	2016.10.07	
5	Multimodal feedback for teleoperation of multiple mobile robots in an outdoor environment	Journal on multimodal user interfaces	홍아영	11(1)	독일	Springer	SCI	2017.01.01	
6	일차홀드 방식을 포함한 햅틱 시스템의 안정성 영역에 대한 통신시간지연과 햅틱장치 물성치의 영향 분석	한국산학기술학회논문지	이경노	18(1)	대한민국	한국산학기술학회	비SCI	2017.01.31	
7	농업용 로봇 및	전원과 자원	박성준	59(3)	대한민국	한국농	비SCI	2017.0	

	자동화 기술 분석과 국내외 동향				국	공학회		8.01	
8	로봇 간류 진동 저감을 위한 모션 가감속 시간 설계 연구	로봇학회논문 지	강한솔	12(3)	대한민 국	한국로 봇학회	비SCI	2017.0 9.01	
9	원격제어 시스템에서 햅틱 가이던스의 위치 및 방향 오차가 작업 성증에 미치는 영향	Journal of Institute of Control, Robotics and Systems	주찬영	23(11)	대한민 국	제어·로 봇·시스 템학회	비SCI	2017.1 1.21	

3-5-2. 국내 및 국제학술회의 발표

No	회의명칭	발표자	발표일시	장소	국명
1	ICROS 2016	김형석	2016.03.11	코엑스	대한민국
2	2016 IEEE Conference on Robotics and Automation	이동건	2016.05.17	스톡홀름	스웨덴
3	2016 International Conference on IEEE IECON	황면중	2016.10.26	피렌체	이탈리아
4	한국로봇종합학술회 International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence	배인규	2017.02.06	평창군	대한민국
5	International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence	이현진	2017.06.28	제주도	대한민국
6	International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence	윤현중	2017.06.28	제주도	대한민국
7	한국농업기계학회 추계학술회	조성우	2017.10.27	광주광역시	대한민국
8	한국농업기계학회 추계학술회	주찬영	2017.10.27	광주광역시	대한민국

3-5-3. 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

No	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	무인 항공기를 이용한 말벌집 탐색 시스템	대한민국	전남대학교산학협력단	2016.11.23	10-2016-0156805				50
2	로봇의 엔드 이펙터	대한민국	전남대학교산학협력단	2017.10.12	10-2017-0132850				50
3	고품질의 수액을 채취하기 위한 지능형 수액 채취 시스템 및 방법	대한민국	전남대학교산학협력단	2017.11.28	10-2017-0160809				100

3-5-4. 전문연구 인력양성

No	분류	기준 년도	현황											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	
1	공학계열	2016		1			1			1				
2	공학계열	2017		1			1			1				
3	농공학계열	2017			1		1					1		

3-5-5. 수상

No	수상명칭	수상내용	수여기관	일시
1	우수 논문발표상	한국농업기계학회 춘계학술대회	한국농업기계학회	2017.04.06

4. 목표달성도 및 관련분야 기여도

코드번호 D-06

4-1. 목표달성도

4-1-1. 연구개발 성과 및 평가방법

(단위 : 건수)

성과목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권			기술 실시 (이전)		사업화					기술 인 증	학술성과		교육 지도	인 력 양 성	정책 활용 홍 보		기 타 (타 연구 활용 등)	
	특 허 출 원	특 허 등 록	품 종 등 록	건 수	기 술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치		논문				학 술 발 표	정 책 활 용		홍 보 전 시
												SC I	비 SC I						
최종목표	4	3		1		1						3	5	6		4			0
1차년도	목표	1	0		0		0					0	1	2		1			0
	실적	1	0		0		0					2	2	3		1			0
2차년도	목표	2	0		0		0					1	2	2		1			0
	실적	2	0		0		0					1	4	5		2			1
소계	목표	3	0		0		0					1	3	4		2			0
	실적	3	0		0		0					3	6	8		3			1
종료 1차년도		1	2		0		0					1	1	2		1			0
종료 2차년도		0	1		1		1					1	1	0		1			0
소계		1	3		1		1					2	2	2		2			0
실적합계		3	0		0		0					3	6	8		3			1

○ (사업화지표)

- 특허 3건 출원 완료
- 평가방법: 특허 출원증 등 증명서류 제출
- 목표달성도: 3건/3건 = 100%

○ (연구기반지표)

- SCI급 3편 게재 완료
- 비SCI급 6편 게재 완료

- 학술발표 8건 완료: 해외 4건, 국내 4건
- 우수 논문발표상 1건
- 평가방법: 논문출판본 등 증명서류 제출
- 목표달성도: (SCI급) 3편/1편 = 300%, (비SCI급) 6편/3편 = 200%, (학술발표) 8건/4건 = 200%, (수상실적) 목표 외 1건

○ (인력양성)

- 석사 2명, 학사 1명 양성 완료: 공학석사 2명 졸업 후 관련 분야 취업, 농공학사 1명 졸업 후 석사 진학
- 평가방법: 졸업증명서, 재직증명서 등 증명서류 제출
- 목표달성도: 3명/2명 = 150%

4-1-2. 정성적 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
멀티 드론 하드웨어 시스템 구축	8	100	<ul style="list-style-type: none"> - 3대의 상용 드론에 각각의 Telemetry radio를 통해 멀티 드론 하드웨어 시스템(자동제어)을 구축하였으며, 또한 라우터를 통한 ROS기반의 멀티 드론 하드웨어 시스템(원격제어)도 구축 함 - 상용드론에 자체 제작한 PCB 기반 및 Companion computer (라즈베리파이)를 연결하여 분산시스템을 구축
멀티 드론 원격제어 기술	8	100	<ul style="list-style-type: none"> - 3자유도 햅틱 디바이스를 이용해 드론의 위치를 원격제어할 수 있는 기술을 개발 함 - MFC 기반의 자체 제작한 Control station을 통해 드론의 상태를 출력함과 동시에 이·착륙, 비행모드 등을 원격제어 할 수 있음 - Ground Control Station인 Mission Planner를 통해 GPS 기반 target point를 설정 및 원격제어 할 수 있음
멀티 드론 군집제어 기술	8	100	<ul style="list-style-type: none"> - 햅틱 디바이스를 통해 작업자

			<p>의 원격제어 명령이 다수의 멀티 드론에 입력되면서 군집 제어를 할 수 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mission Planner의 Swarm 기능을 사용하여 드론간의 상대 거리를 설정 및 Centralized 방식의 제어기를 통해 멀티 드론을 군집 제어 할 수 있음
작업자 PUI 개발	8	100	<ul style="list-style-type: none"> - 3대의 상용 드론 조종기의 PUI를 분석하여 멀티드론을 제어하기 위한 PUI 설계하고, Ground Control Station에 구현하여 멀티드론을 성공적으로 제어함. 최대 5대까지 드론을 동시에 제어할 수 있음
작업자 GUI 개발	8	100	<ul style="list-style-type: none"> - 3대의 모니터를 통하여 다양한 정보를 선택적으로 표시 가능함. 3대 모니터를 이용하여 대형기반의 영상 재구성 및 군집대형에 대한 시각적 피드백 기술을 구현함. 드론 상태 및 멀티드론 대형정보/미션 수행 등을 실시간으로 모니터링 할 수 있음
시스템 통합 및 제어 실험	10	100	<ul style="list-style-type: none"> - 개발된 PUI 및 GUI를 적용시킨 Gound Control Station을 통해 멀티 드론의 햅틱 원격 제어 실험을 진행 함 - 멀티 드론에 각각의 Telemetry radio를 연결한 후 Mission Planner의 군집 제어 기술을 기반으로 제어 실험을 진행 함
멀티 드론 속도 제어 기술	8	100	<ul style="list-style-type: none"> - 햅틱 디바이스의 End-effector의 좌표를 통해 드론의 linear velocity를 제어할 수 있는 기술을 개발 - 햅틱 디바이스의 버튼 이벤트를 이용해 angular velocity

			<p>및 이·착륙을 제어 할 수 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기존의 위치제어기를 사용할 때 발생하는 제한적인 workspace를 멀티 드론 속도 제어 기술을 통해 해결 함
멀티 드론 안정성 향상 기술	8	100	<ul style="list-style-type: none"> - 작업자의 원격제어명령 뿐만 아니라 장애물 회피제어, 대형 제어 알고리즘을 통해 멀티 드론이 일정한 대형을 이루면서 비행을 하며, 그에 따라 작업자가 안전하게 멀티 드론을 군집제어를 할 수 있는 안정성을 향상시킴 - 작업자는 햅틱 디바이스와 드론의 속도오차 및 드론과 장애물과의 거리에 따라 적절한 햅틱 피드백이 작업자에 주어짐에 따라 멀티 드론의 안정성을 향상시킴
작업자 인터페이스 개선	8	100	<ul style="list-style-type: none"> - 사용자가 단일 제어기로 다수의 드론을 동시에 제어할 수 있도록 군집대형의 선정, 드론별 제어 등의 기능이 포함된 PUI와 GUI 작업자 인터페이스를 개선함
멀티 드론 조작 편의성 향상 기술 개발	8	100	<ul style="list-style-type: none"> - 멀티 드론 조작과 관련한 PUI와 GUI를 설계하고 구현하여 조작 편의성을 향상시킴 - PUI의 경우 대형 제어, 카메라 각도 제어, 미션 수행을 위한 기능을 구현하여 멀티 드론 조작 편의성을 향상시킴 - GUI의 경우 3대의 모니터를 통해 다양한 정보를 제공하며, 실시간으로 카메라를 선택적으로 출력할 수 있도록 설계함. 시각적으로 확인하기 어려운 대형 정보 등을 지도

			상에 표시하여 멀티 드론의 조작성을 높임
시스템 통합 및 멀티 드론 운영 시스템 구축	10	100	- 군집제어 알고리즘과 멀티 드론을 위한 PUI와 GUI를 통합 운영 시스템인 Ground Control Station에 성공적 구현함
현장 시연 평가	8	100	- 개발한 분산군집제어 알고리즘 기반의 멀티 드론 시스템을 통해 농경지 예찰작업을 수행하였으며, 그에 따른 정량적 평가 및 현장 시연 평가를 수행함
합계	100점	100	

4-1-3. 정량적 연구목표 달성도 및 평가방법

가. 멀티 드론 군집 원격제어 정량적 목표 평가

1) 연구 목표

- 분산군집제어 알고리즘 기반의 농업용 멀티 드론 시스템을 이용하여 농작업(농경지 예찰) 시연 평가

2) 실험 조건

- 평가 대상 : 농업용 멀티 드론 원격군집제어 시스템 및 운영 시스템
- 평가 장소 : 광주광역시 북구 용봉로 77, 전남대학교 농업생명과학대학 1호관 301호
- 실험 장비 : 분산군집제어 알고리즘 및 Robot Operation System(ROS) 기반의 멀티 드론 시스템

3) 실험 개요

- 한정된 배터리를 가진 드론을 이용하여 농작업을 수행할 때, 보편적으로 사용되는 단일 드론 시스템보다 멀티 드론 시스템을 이용하는 것이 효율적임. 이를 위해서는 단일 드론 시스템처럼 한명의 작업자가 멀티 드론을 제어할 수 있는 조작 용이성이 요구됨. 이때 다수의 드론을 효율적으로 제어할 수 있는 군집제어 알고리즘이 적용되면 작업자가 보다 원활하게 멀티 드론을 제어할 수 있고 농작업의 효율이 극대화 될 것임. 따라서 시연 평가에서는 개발된 분산군집제어 알고리즘을 적용한 멀티 드론 시스템과 단일 드론 시스템을 비교 분석 하고자 함. 본 평가에서는 농경지 예찰 작업을 대상으로 총 4가지의 실험 케이스(단일 드론 자동제어, 멀티 드론 자동제어, 단일 드론 원격제어, 멀티 드론 원격제어)를 진행하며, 어떤 조건일 때 가장 좋은 효율을 보이는지 정량적으로 평가하고자 함.

4) 실험 방법

- 작업 : 농경지 예찰
- 실험 케이스 : 총 4가지의 실험 케이스 진행
 - (1) 단일 드론 자동제어
 - (2) 멀티 드론 자동제어
 - (3) 단일 드론 원격제어
 - (4) 멀티 드론 원격제어(제안한 분산군집제어 알고리즘 적용)
- 평가지표 :
 - (1) Total Time [s] : 실험이 완료될 때까지의 시간으로, 실험이 시작된 순간부터 종료되는 순간까지의 총 시간
 - (2) Flight Time [s] : 실험 중 드론이 실제 비행한 시간으로, 고도고 상승한 순간부터 종료되는 순간까지의 총 시간
 - (3) Setup Time [s] : 실험이 시작된 순간부터 실제 드론이 비행하기 전까지 총 시간으로, Total Time - Flight Time으로 적용
 - (4) Coverage Ratio [%] : 사전에 정해진 일정한 면적의 농경지에 대해서 드론이 카메라를 통해 어느 정도의 면적을 예찰하는지 나타내는 지표로, $\frac{A_{covered}}{A}$ [%]으로 적용
 - (5) Battery Consumption [%] : 실험 중 드론이 소모한 배터리를 나타내는 지표로, 전체 100% 중에서 몇 %의 배터리를 사용했는지 나타냄
 - (6) Accuracy of Land [cm] : 농경지 예찰 후 착륙한 지점과 드론이 처음 이륙한 지점의 거리오차를 나타내는 지표로, $\|P_T - P_L\|$ 으로 적용하고 착륙의 정확성을 나타냄
 - (7) Control Effort [cm] : 햅틱 디바이스를 통해 농업용 드론을 원격제어 할 때 작업자가 얼마나 많은 제어 노력을 행했는지에 대한 지표로, 햅틱 디바이스의 총 움직인 거리를 나타냄
- 결과 분석 : 케이스별 총 3반복 실험 후 평균 데이터를 비교해 통계 분석 진행

5) 농경지 예찰 시연

- 작업자는 화면에 표시된 농경지에 대해서 예찰 작업을 수행
- 실험은 총 4가지의 케이스로 3반복으로 이루어져 있으므로, 총 12번의 실험 수행
- 자동제어인 경우 Ground Control Station (GCS)인 QGroundControl 소프트웨어를 사용하여 제어
- 원격제어인 경우 햅틱 디바이스의 configuration을 통해 드론의 속도를 제어
- 4번째 실험 케이스인 멀티 드론 원격제어를 통한 농경지 예찰 시나리오에 본 과제를 통해 개발된 분산군집원격제어 알고리즘 적용
- ROS 기반의 제어시스템으로 드론을 제어하며, 드론과의 통신은 UDP통신을 사용
- 농경지 예찰 작업에 사용된 센서는 RGB-D카메라로 실시간 매핑을 수행하며, 실험이 종료된 후 농경지 면적 계산

- 실제 시연 장면

(1) 단일 드론 자동제어를 통한 농경지 예찰 시나리오

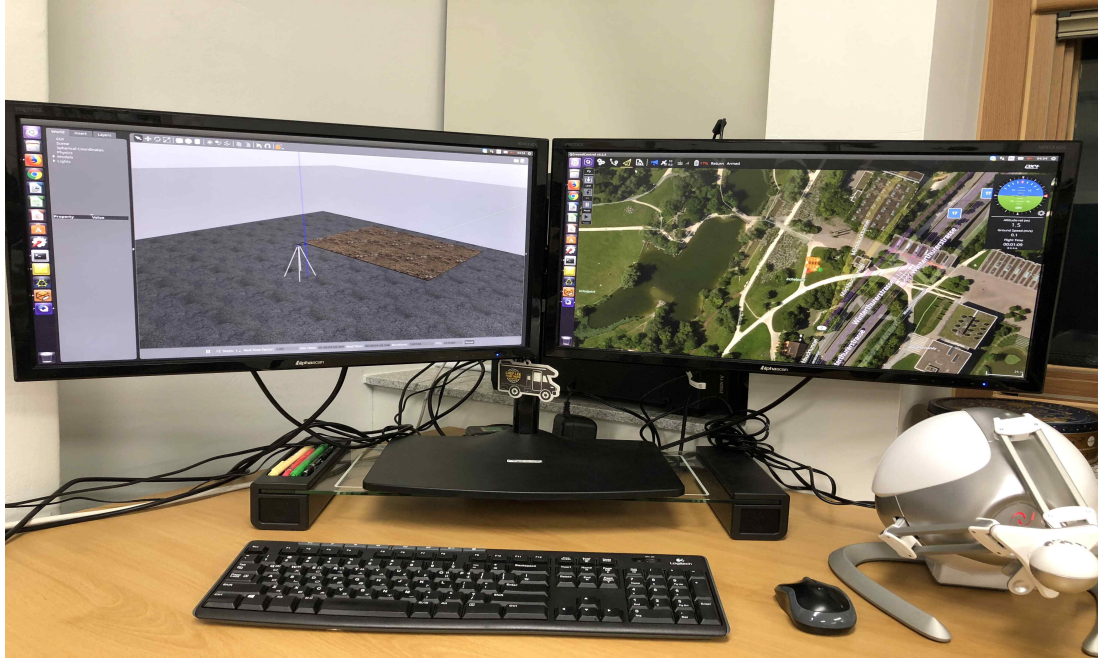


그림 50. 농경지 예찰 시연 장면 : 실험 케이스 1

(2) 멀티 드론 자동제어를 통한 농경지 예찰 시나리오

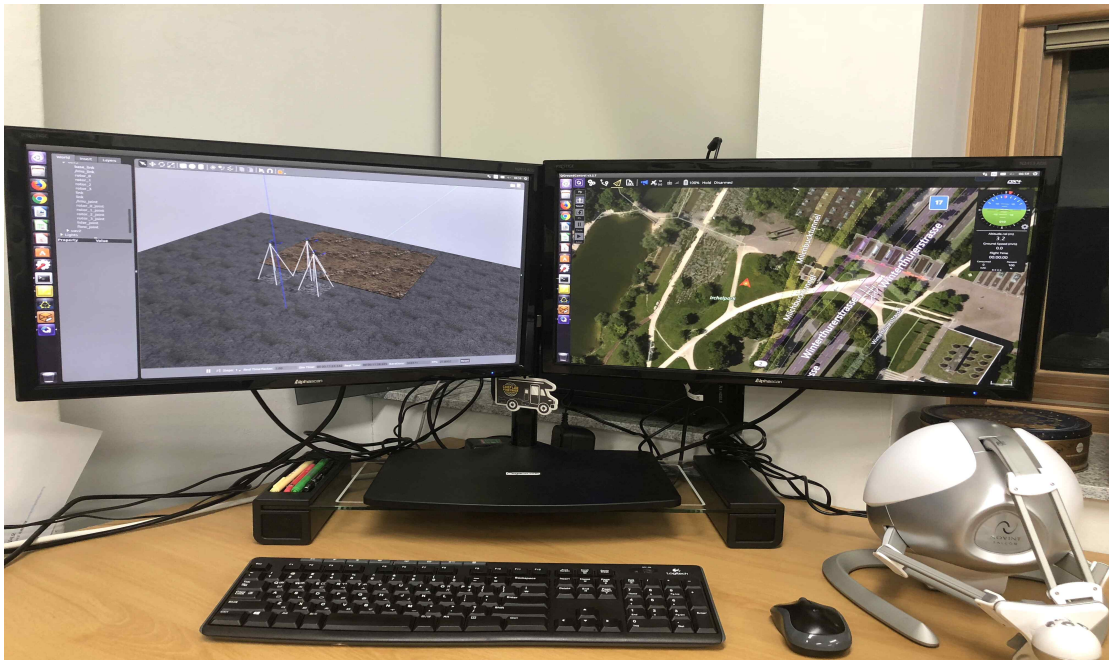


그림 51. 농경지 예찰 시연 장면 : 실험 케이스 2

(3) 단일 드론 원격제어를 통한 농경지 예찰 시나리오

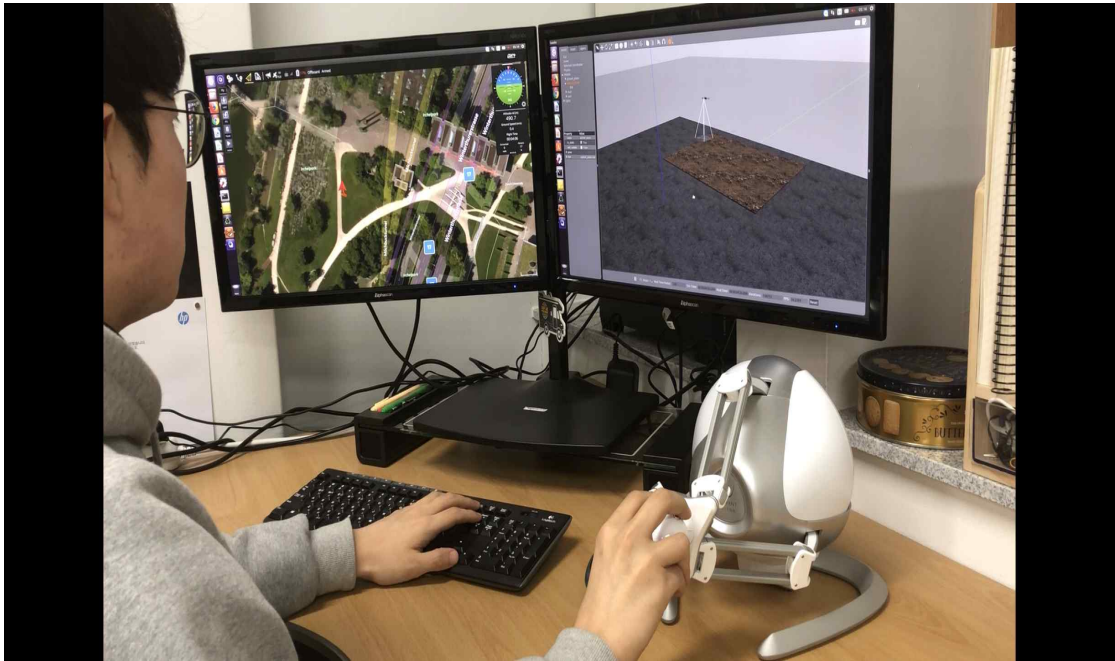


그림 52. 농경지 예찰 시연 장면 : 실험 케이스 3

(4) 멀티 드론 원격제어를 통한 농경지 예찰 시나리오



그림 53. 농경지 예찰 시연 장면 : 실험 케이스 4

6) 실험 결과

지표 케이스	Total Time	Flight Time	Setup Time	Coverage Ratio	Battery Consumption	Accuracy of Land	Control Effort
단일 드론 자동제어	138.04	69.29	69.81	92.17	80.74	3.94	·
멀티 드론 자동제어	112.35	29.13	83.02	97.04	37.85	4.25	·
단일 드론 원격제어	104.24	92.37	12.49	85.94	95.06	5.97	28.73
멀티 드론 원격제어	49.68	34.74	15.52	94.68	44.63	5.85	16.61

<농경지 예찰 결과>

- 실험이 완료되는 Total Time은 4번째 실험케이스인 멀티 드론 원격제어 시스템에서 가장 낮게 나왔으며, 이는 자동제어일 경우 보다 Setup Time에서 우수한 면을 보이며, 단일 드론 원격제어 시스템보다 Flight Time에서 우수하기 때문
- Flight Time은 일정한 농경지를 예찰한다고 했을 경우 단일 드론 시스템이 멀티드론 시스템보다 확연히 증가함. 자동제어일 때 57.96% 원격제어일 때 62.39% 감소한 것을 확인
- Setup Time은 원격제어 시스템보다 자동제어 시스템에서 월등히 높으며 이는 Ground Control Station을 사용했을 때 드론에 대해 각각 미션을 할당하고 입력하기 때문이며, 단일 드론 시스템보다 멀티 드론 시스템일 때 설정해주는 것이 기본적으로 많아 시간이 증가하는 경향을 보임
- Coverage Ratio의 경우 단일 드론 원격제어일 경우에 크게 감소한 경향을 확인할 수 있지만 나머지 3가지의 실험케이스에 대해 큰 차이가 없음
- Battery Consumption은 원격제어일 때 자동제어보다 기본적으로 더 많이 소모되었다. 이는 작업자가 드론을 일정한 농경지에 대해서 제어하는데 한계가 발생하기 때문이며, 추후 적절한 햅틱 피드백이 주어졌을 때 작업자의 불필요한 작업을 주어 배터리 소모량을 줄일 수 있을 것으로 보임
- Accuracy of Land의 경우 기본적으로 자동제어일 때 GPS를 통해 이륙 및 착륙이 이루어지므로 수동으로 이·착륙하는 원격제어 시스템보다 높은 성향을 보이며 이는 GPS의 성능에 따라 정확도가 달라질 것으로 판단 됨
- Control Effort측면에서는 단일 드론으로 광활한 농경지를 예찰해야하므로 기본적으로 멀티 드론 시스템보다 작업자의 제어 노력이 크며, 멀티 드론을 사용했을 때 42.19% 감

소한 것을 확인

- 원격제어 시스템의 경우 자동제어 시스템보다 Coverage Ratio, Battery Consumption, Accuracy of Land의 측면에서 다소 낮은 성능을 보였지만, Total Time에서 우수한 결과를 보임
- 단일 드론 시스템보다 멀티 드론 시스템일 때 약간의 Setup Time이 필요하지만 거의 모든 측면에서 더 나은 결과를 보임
- 따라서 본 연구 과제를 통해 개발한 분산군집제어 알고리즘 기반의 멀티 드론 시스템은 기존의 단일 드론 시스템보다 정량적인 측면에서 우수한 성능을 보이므로 연구목표를 달성 함.

나. 멀티 드론 조작자 인터페이스 정량적 목표 평가

1) Graphical User Interface (GUI)

- 기존에 1대의 모니터 장비를 3대로 확장하여 드론의 모니터링 및 제어할 수 있는 기능 화면들과 카메라 영상정보를 각기 다른 화면에 표시함으로써 카메라 영상 모니터링과 드론의 제어 나 지도표기, 비행경로생성 과 제어 등을 동시에 할 수 있음

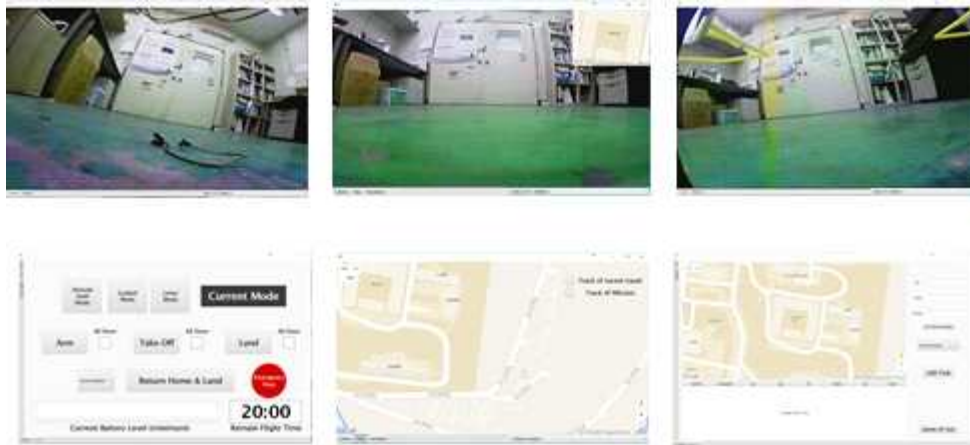


그림 54. 위 : 3대의 모니터를 통한 카메라 영상 표시화면, 아래 : 각 모니터별 기능화면들

- 드론의 제어 및 모니터링 화면은 다수의 드론 정보를 세부화 단계별로 표기 가능. 각 드론의 정보를 종합하여 간단하게 표기 및 제어 가능한 ‘Simple mode’ 화면과, 드론의 정보 및 제어를 각 드론별로 세분화 하며 표기한 ‘Detail mode’ 화면 중에서 사용자가 필요에 따라 두 가지 모드 중 하나를 선택하여 표기 가능
- 드론의 정보 및 제어는 배터리 잔량과 잔량에 따른 예상 비행 가능 시간, ARM / TAKEOFF / LAND 의 제어 및 확인기능, 비행 모드의 변경 및 현재 비행 모드 확인 기능 등이 있음

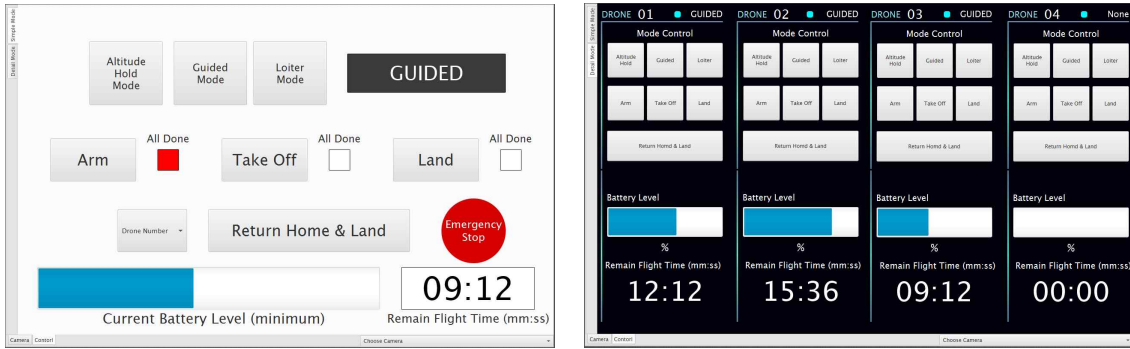


그림 55. 좌 : Simple mode 우 : Detail mode

- 지도 표기화면은 드론들의 현재 위치가 각각 표시되며, 목표 이동 위치와 Home 위치가 현재 위치 표시와는 다른 형태로 지도상에 표시됨



그림 56. 드론의 Home 위치와 현재 위치가 표시된 지도 표기 화면

- 미션수행관련 기능 화면은 지도상에 웨이포인트(WayPoint)를 지정하여 지정된 순서대로 비행경로를 생성하는 미션작성 화면과 작성된 미션의 수행을 시작, 일시정지, 정지, 비행속도 조절 등을 할 수 있는 미션제어화면으로 구성됨

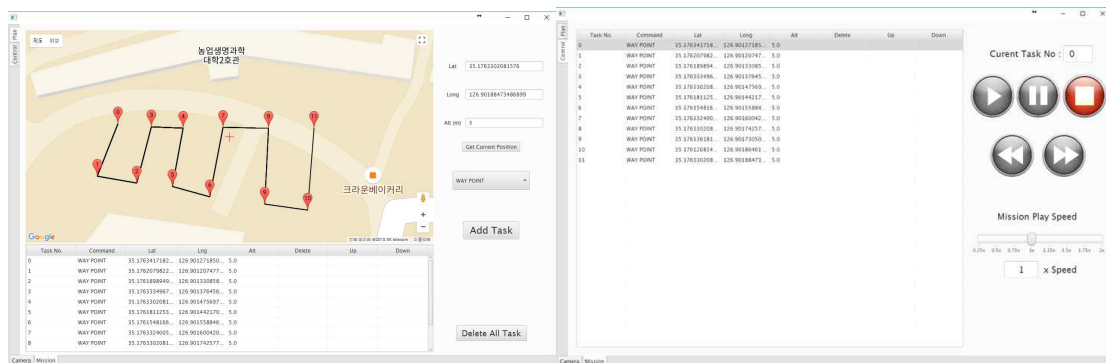


그림 57. 좌 : 미션작성 화면, 우 : 작성된 비행경로와 미션 수행 제어 화면

2) Physical User Interface (PUI)

- 1차년도 개발된 PUI를 이용하여 드론의 제어 실험 결과, 실제로 사용되지 않거나 사용하기 어려운 기능들을 제거, 조금 더 직관적이고 육안으로 PUI의 작동 상태를 확인하기 용이한 인터페이스 장치로 변경
- 1차년도에 생략되었던 미션수행 관련 기능 및 드론의 제어 기능을 세분화 하여 필요한 기능의 추가. 미션수행의 경우 GUI 와 동일하게 시작, 일시정지, 정지, 비행속도를 조절할 수 있는 기능들을 구현하였음



그림 58. 미션수행 관련 기능 버튼들

- 개발된 PUI의 기능 중에서 드론 선택방법 및 이착륙 제어 인터페이스가 실험결과 실제 드론의 제어에 적합하지 않음 -> 이착륙 제어 슬라이더 제거 후 군집/개별 제어 선택스위치의 추가 및 개별 드론 선택 기능을 기존의 누름버튼에서 직관적인 형태의 토글 (toggle)스위치로 변경 -> 개별 제어 시 드론의 선택과 비선택의 구분 및 확인이 용이해짐. 추가된 군집제어 또는 개별제어 선택 스위치는 제어방법의 선택을 직관적으로 알 수 있음. 최대 5대의 드론을 군집 또는 개별 제어할 수 있음



그림 59. 좌: 제어방법 선택스위치와 개별 드론 선택스위치, 우: 개별 선택된 드론 스위치 LED

- 1차년도에 생략되었던 드론의 비행모드 설정 및 비행 제어 기능은 드론을 세부 제어할 시 필요하다고 판단되어 추가
- 제거된 이착륙 제어 슬라이더는 세분화 하여 누름버튼으로 구현 -> 드론의 이착륙을 ARM / TAKEOFF / LAND 의 단계별로 나누어 군집비행 또는 개별드론 제어 시 이착륙을 과정을 선택적으로 제어할 수 있음



그림 60. 좌 : 비행 모드 변경버튼들, 우 : 세분화된 비행 제어 버튼들

- 외부 케이스는 휴대형으로 제작하기 위하여 3대의 모니터를 포개어 접어질 수 있는 형태로 디자인하였음

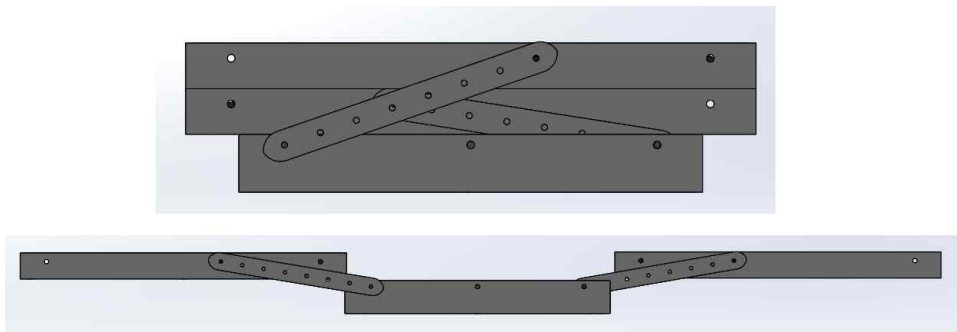


그림 61. 접어지는 형태의 모니터 수납부 설

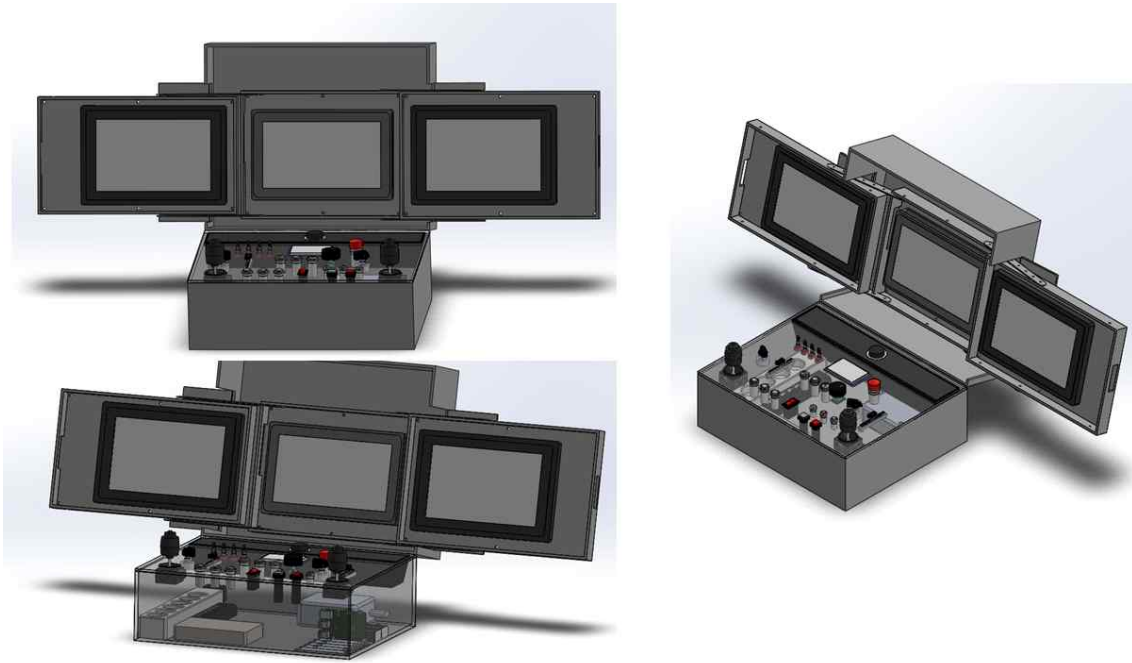


그림 62. 지상 제어기의 외형 설계



그림 63. 실제 제작된 장비 외형

4-2. 관련분야 기여도


핵심기술	관련분야 기여도
멀티 드론 원격제어 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 햅틱 디바이스의 configuration을 통해 드론의 속도를 원격제어 할 수 있는 기술을 개발하였으며, 개발된 속도 제어기는 햅틱 디바이스와 드론 사이의 kinematic dissimilarity로부터 발생하는 workspace가 한정되는 문제를 해결할 수 있음 - 개발된 원격제어기는 다수의 드론에 작업자의 원격제어 명령이 동시에 입력되면서 멀티 드론을 군집 원격제어 할 수 있으며, 이때 작업자는 상황에 적절한 햅틱 피드백을 받음 - 멀티 드론 원격제어 시스템은 Robot Operating System (ROS) 기

	반의 분산형 제어시스템을 기반으로 개발하였기 때문에 향후 추가적인 시스템 개발에 기반 기술이 됨
멀티 드론 군집제어 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 기존의 드론 제어기는 한 대의 드론에 대해서 원격 제어하는 부분에 초점에 맞추어져 있지만, 본 과제를 통해 개발된 제어기는 멀티드론을 군집제어 할 수 있는 기술을 개발함 - 원격제어뿐만 아니라 장애물 회피 알고리즘과 드론간의 충돌을 회피하면서 일정한 대형을 이룰 수 있는 대형제어 알고리즘도 개발 및 구현하였으며, 본 군집제어 기술은 드론의 개수에 상관없이 적용할 수 있음 - 해당 기술을 바탕으로 작업자는 다수의 드론에 대해서도 제어의 안정성 및 편의성이 보장 됨
멀티 드론 조작 편의성 향상 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 기존의 드론 조작기는 한 대의 드론 조작에만 초점이 맞추어져 있으며, 다수의 드론을 동시에 제어하기 위한 조작기는 전무함 - 군집제어에 필요한 기능을 분석하여 대형기반 영상재구성, 군집대형 선정, 드론별 제어 등의 PUI와 GUI를 설계하고 통합제어시스템을 구축하여 멀티 드론 조작 편의성을 향상시킴 - 세계 최초로 멀티 드론을 작업자 한명이 동시에 제어할 수 있는 기술을 개발함 - 해당 기술은 멀티드론의 응용 분야의 조작 편의성 기술에 기여함



4-3. 드론의 위치 오차에 대한 정량적 평가 결과

4-3-1. 시험성적서

시험성적서

<p style="text-align: center;">전남대학교</p> <p>광주광역시 북구 용봉로 77 (Tel: 062-530-5023, Fax: 062-530-1289)</p>	<p style="text-align: center;">페이지 (1) / (총 11)</p>	
---	---	---

1. 의 퇴 자
 - o 업체(기관)명 : 인간중심 로봇 및 자동화 연구실
 - o 주 소 : 광주광역시 북구 용봉로 77
2. 성적서 용도 : 과제 평가용 시험 성적서 제출용
3. 시험대상품목 : 군집 원격제어기술 기반 스마트 농업용 멀티 드론 시스템
4. 시험기간 : 2018. 03. 08 ~ 2018. 03. 09
5. 시험방법 : - 농업용 멀티 드론 시스템을 사용하여 농경지 예찰 작업의 현장 시연
- 총 4가지의 실험 케이스로 농경지 예찰을 수행한 후 정량적 목표 달성도 평가 및 평가지표를 이용한 멀티 드론 시스템의 성능 평가
6. 시험결과 : 최소 근접 작업 높이 = 2.85m, 동시 조작 가능 드론 = 4대,
동시간대 최대 촬영 면적 = 3582m² (20m 기준)

확 인	작성자 성 명 : 주 찬 영 	기술책임자 성 명 : 손 형 일 
-----	--	--

이 시험성적서는 용도 이외의 사용을 금하며 기타 상품광고, 법정소송 등의 목적으로 사용할 수 없음

2018. 03. 09.

전남대학교 산학협력단장 (인)

시 험 결 과

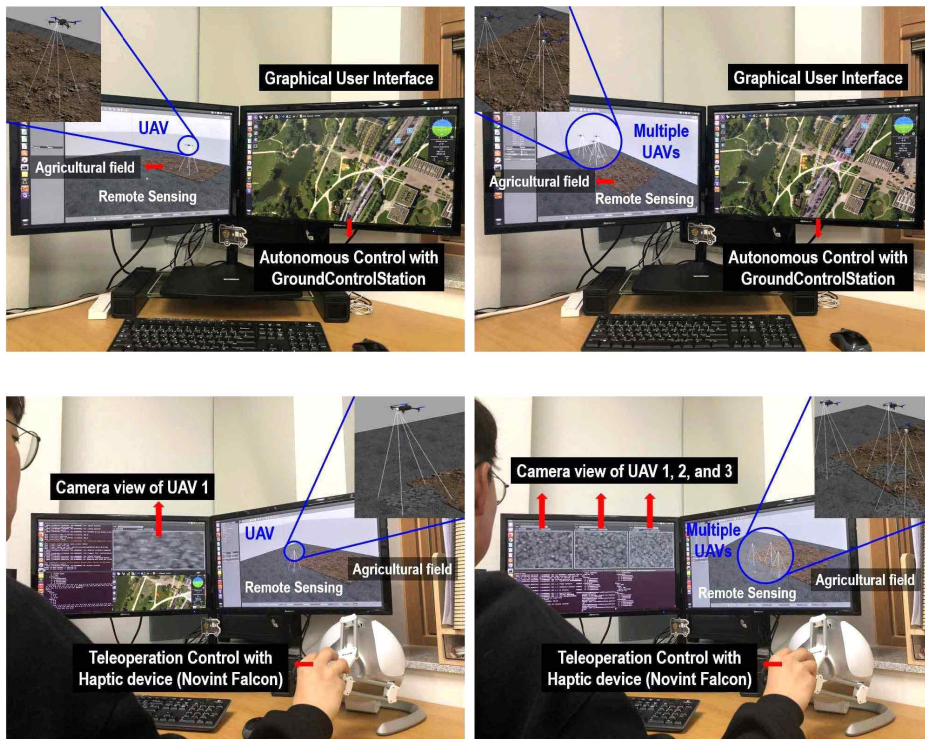
페이지 (2) / (총 11)

1. 시험 조건

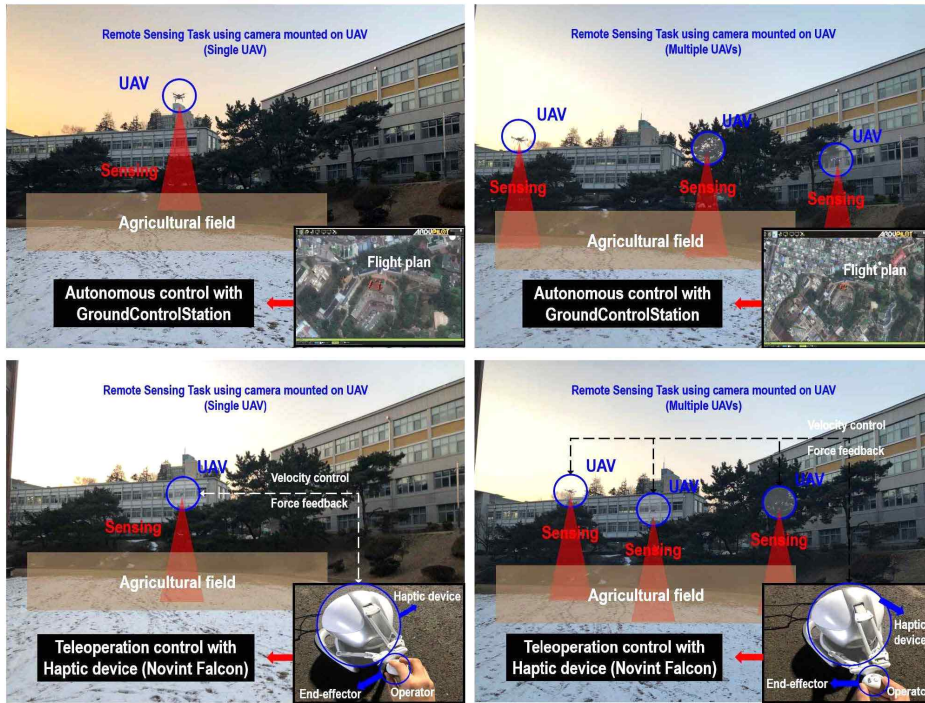
시험 대상 : 군집 원격제어기술 기반 스마트 농업용 멀티 드론 시스템

시험 장소 : 광주광역시 북구 용봉로 77, 전남대학교 농업생명과학대학1호관 301호
및 농업생명과학대학4호관 뒤편

시험 장비 : 분산군집제어 알고리즘 및 Robot Operating System (ROS) 기반의 멀티 드론 시스템 및 관련 프로그램



<시뮬레이션 시험장면>



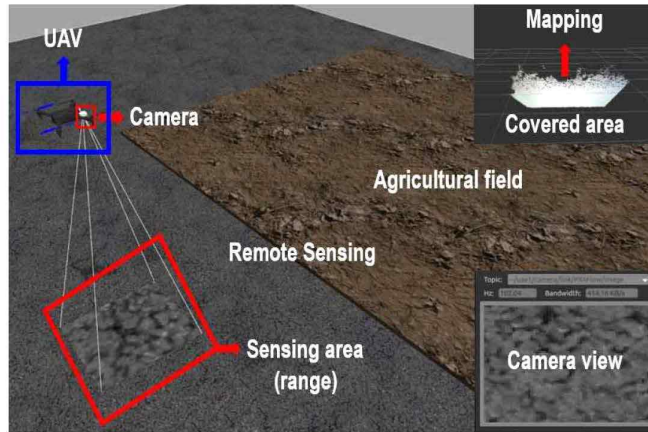
<야외 시험장면>

2. 시험 개요

- 한정된 배터리를 가진 드론을 이용하여 농작업을 수행할 때, 보편적으로 사용되는 단일 드론 시스템보다 멀티 드론 시스템을 이용하는 것이 효율적임. 이를 위해서는 단일 드론 시스템처럼 한명의 작업자가 멀티 드론을 제어할 수 있는 조작 용이성이 요구됨. 이때 다수의 드론을 효율적으로 제어할 수 있는 군집제어 알고리즘이 적용되면 작업자가 보다 원활하게 멀티 드론을 제어할 수 있고 농작업의 효율이 극대화 될 것임. 따라서 시연 평가에서는 개발된 분산군집제어 알고리즘을 적용한 멀티 드론 시스템과 단일 드론 시스템을 비교 분석 하고자 함. 본 평가에서는 농경지 예찰 작업을 대상으로 총 4가지의 실험 케이스(단일 드론 자동제어, 멀티 드론 자동제어, 단일 드론 원격제어, 멀티 드론 원격제어)를 진행하며, 어떤 조건일 때 가장 좋은 효율을 보이는지 그리고 목표 달성도를 정량적으로 평가하고자 함.

3. 시험 방법

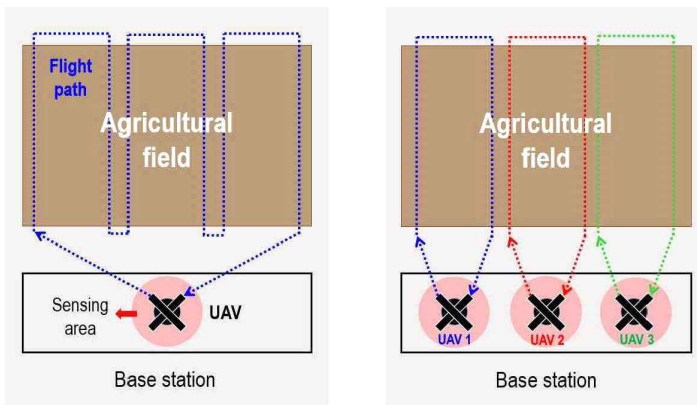
- 작업 : 농경지 예찰 (Remote sensing)



<농경지 예찰>

- 실험 케이스 : 총 4가지의 실험 케이스 진행

- (1) 단일 드론 자동제어 (Auto-Single-UAV)
- (2) 멀티 드론 자동제어 (Auto-Multi-UAV)
- (3) 단일 드론 원격제어 (Tele-Single-UAV)
- (4) 멀티 드론 원격제어 (Tele-Multi-UAV)



<실험 케이스 : 단일 드론 및 멀티 드론>

시 험 결 과

페이지 (5) / (총 11)

- 정량적 목표지표 :

- (1) P_{MH} (Minimum Height [m]) : 드론의 최소 근접 작업 높이
- (2) P_{CR} (Coverage Ratio at the same time [m^2]) : 동시간 최대 촬영 면적
- (3) P_{ND} (Number of Drone) : 동시 조작 가능 드론

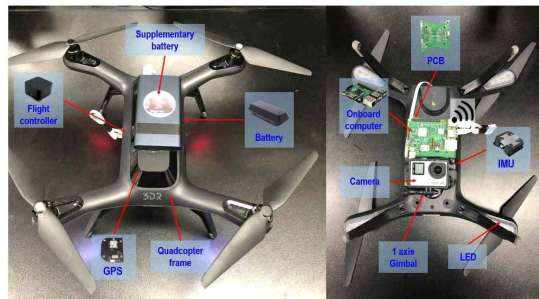
- 성능 평가지표 :

- (1) P_{TT} (Total Time [s]) : 실험이 완료될 때까지의 시간으로, 실험이 시작된 순간부터 종료되는 순간까지의 총 시간
- (2) P_{ST} (Setup Time [s]) : 실험이 시작된 순간부터 실제 드론이 비행하기 전까지 총 시간으로, Total Time - Flight Time으로 적용
- (3) P_{FT} (Flight Time [s]) : 실험 중 드론이 실제 비행한 시간으로, 고도고 상승한 순간부터 종료되는 순간까지의 총 시간
- (4) P_{BC} (Battery Consumption [%]) : 실험 중 드론이 소모한 배터리를 나타내는 지표로, 전체 100% 중에서 몇 %의 배터리를 사용했는지 나타냄
- (5) P_{IL} (Inaccuracy of Land [cm]) : 농경지 예찰 후 착륙한 지점과 드론이 처음 이륙한 지점의 거리오차를 나타내는 지표로, $\|P_T - P_L\|$ 으로 적용하고 착륙의 정확성을 나타냄
- (6) P_{HC} (Haptic Control effort [cm]) : 햅틱 디바이스를 통해 농업용 드론을 원격제어 할 때 작업자가 얼마나 많은 제어 노력을 행했는지에 대한 지표로, 햅틱 디바이스의 총 움직인 거리를 나타냄
- (7) - P_{CR}^1 (Coverage Ratio [%]) : 사전에 정해진 일정한 면적의 농경지에 대해서 드론이 카메라를 통해 어느 정도의 면적을 예찰하는지 나타내는 지표
- P_{CR}^2 (Coverage Ratio [%]) : 단위 촬영 면적 당 동시간 촬영 면적을 나타내는 지표
- (8) P_{ER} (Error of Relative distance [m]) : 멀티 드론의 상대 거리 오차에 대한 정량적 지표

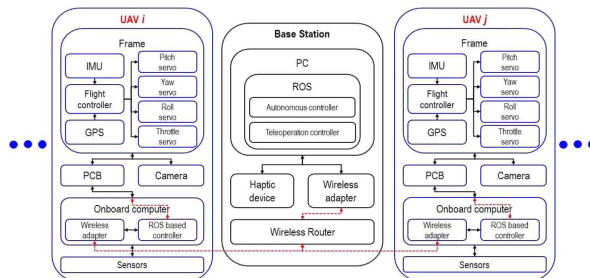
- 결과 분석 : 실험 케이스별 총 3반복 실험 후 평균 데이터를 비교해 통계 분석

4. 시험 셋업 및 과정

- 피실험자는 화면에 표시된 농경지에 대해서 예찰 작업을 수행
- 실험은 총 4가지의 케이스로 3반복으로 이루어져 있으므로, 총 12번의 실험 수행
- 자동제어인 경우 Ground Control Station (GCS)를 사용하여 제어
- 원격제어인 경우 햅틱 디바이스의 configuration을 통해 드론의 속도를 제어
- 4번째 실험 케이스인 멀티 드론 원격제어를 통한 농경지 예찰 시나리오에 본 과제를 통해 개발된 분산군집원격제어 알고리즘 적용
- ROS 기반의 제어시스템으로 드론을 제어하며, 드론과의 통신은 UDP통신을 사용
- 시뮬레이션 기반 농경지 예찰 작업에 사용된 센서는 RGB-D카메라로 실시간 매핑을 수행하며, 실험이 종료된 후 농경지 면적 계산
- 야외 농경지 예찰 작업에 사용된 센서는 RGB카메라로 동시간 촬영 면적 계산



<농경지 예찰에 사용된 드론>



<농업용 멀티 드론 시스템 구조>

시험 결과

페이지 (7) / (총 11)

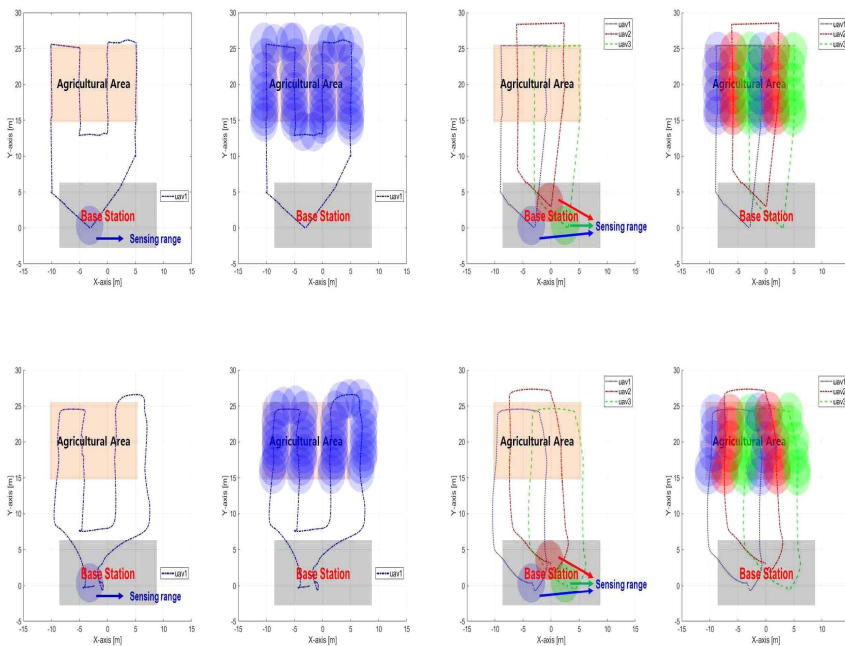
5. 시험 결과

(1) 정량적 목표지표

	Auto-Single-UAV	Auto-Multi-UAV	Tele-Single-UAV	Tele-Multi-UAV
P_{MH}	2.96m	3.07m	2.71m	2.83m
P_{CR}	895m ²	2686m ²	895m ²	2686m ²
P_{ND}	1	3	1	3

* P_{CR} 에 대한 결과는 20m 기준으로 산정 됨

<정량적 목표지표에 대한 실험 케이스별 결과>



<실험 케이스별 비행 결과>

시험 결과

페이지 (8) / (총 11)

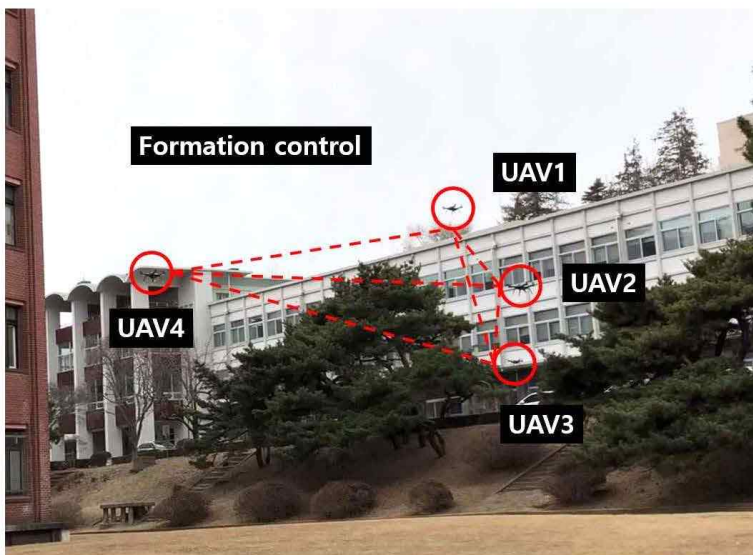
● 드론 4대 운용을 위한 추가 시연

- 분산군집원격제어 기반 멀티 드론(4대) 시스템을 이용한 농경지 예찰 시연

- P_{MH} : 2.85m

- P_{CR} : 3582m²

- P_{ND} : 4



<4대를 이용한 농경지 예찰 시연 장면>

시 험 결 과

페이지 (9)/(총 11)

(2) 성능 평가지표

Metric	Auto-Single-UAV	Auto-Multi-UAV	Tele-Single-UAV	Tele-Multi-UAV
P_{TT} [s]	138.04	112.35	104.24	49.68
P_{ST} [s]	69.81	83.02	12.49	15.52
P_{FT} [s]	69.39	29.13	92.37	37.74
P_{BC} [%]	80.74	37.85	95.06	44.63
P_{IL} [cm]	3.94	4.25	5.97	5.85
P_{HC} [cm]	0	0	28.73	16.61
P_{CR}^1 [%]	92.17	97.04	85.94	94.68

<성능 평가지표에 대한 시뮬레이션 결과>

Metric	Auto-Single-UAV	Auto-Multi-UAV	Tele-Single-UAV	Tele-Multi-UAV
P_{TT} [s]	96.20	78.82	65.13	32.58
P_{ST} [s]	48.69	64.48	13.52	18.91
P_{FT} [s]	47.51	14.34	51.61	13.67
P_{BC} [%]	3.86	1.57	4.21	1.24
P_{IL} [cm]	18.04	19.32	8.29	13.83
P_{HC} [cm]	0	0	31.10	15.27
P_{CR}^2 [%]	100	300	100	300

<성능 평가지표에 대한 실험 결과>

- P_{TT} 는 기본적으로 자동제어보다 원격제어일 때 낮으며, 단일 드론 시스템보다 멀티 드론 시스템일 때 감소함
- P_{ST} 에서 원격제어일 때 자동제어보다 훨씬 낮아 시스템의 간편함과 조작성 용이성을 보임
- P_{FT} , P_{BC} , P_{CR}^1 , P_{CR}^2 에서 멀티 드론 시스템을 사용했을 때 성능의 우수함을 보임
- P_{HC} 를 통해서 원격제어를 사용할 때 드론의 개수가 증가해도 작업자의 조작성 용이성이 감소하는 경향을 보임

시 험 결 과

● 군집제어 기반 멀티 드론의 상대 거리 오차에 대한 정량적 평가 지표 : P_{ER}

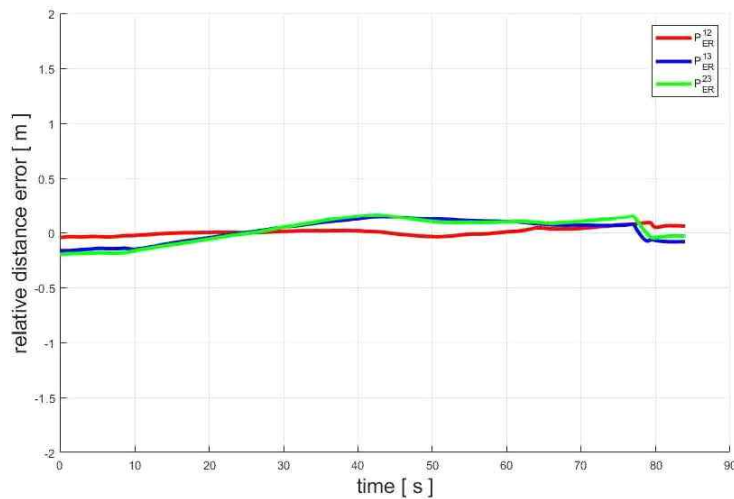
- $P_{ER}^{ij} = d_{desired} - d_{ij}$

- 드론간의 원하는 상대거리 값에 실제 드론간의 상대거리의 차이를 나타내는 오차 값

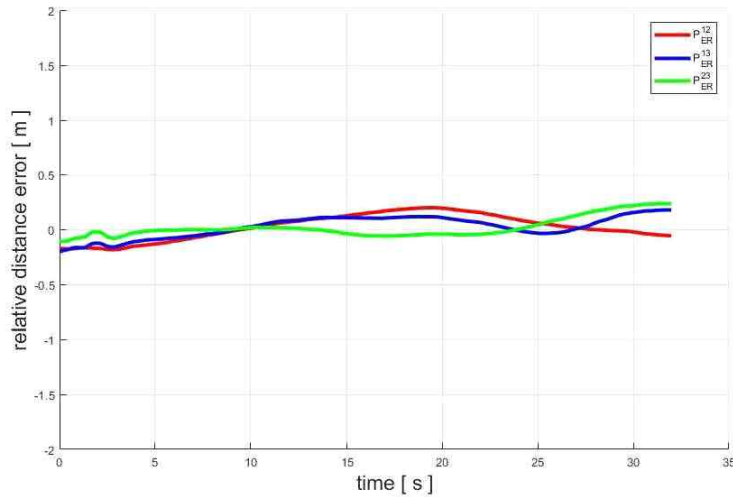
P_{ER}^{12}	Auto-Multi-UAV	Tele-Multi-UAV
평 균	0.006m	0.021m
표준편차	0.033m	0.117m

P_{ER}^{13}	Auto-Multi-UAV	Tele-Multi-UAV
평 균	0.019m	0.023m
표준편차	0.100m	0.097m

P_{ER}^{22}	Auto-Multi-UAV	Tele-Multi-UAV
평 균	0.024m	0.015m
표준편차	0.113m	0.089m



<Auto-Multi-UAV 케이스에 대한 P_{ER} >



<Tele-Multi-UAV 케이스에 대한 P_{BR} >

(3) 시험 결과 및 결론

- 정량적 연구 목표인 최소 근접 작업 높이 (20m), 동시간 최대 촬영 면적 (2000m²), 동시 조작 가능 드론(4대)이 현장 시연 평가를 통해 충족되었음.
- 각 시스템에 대한 성능이 평가 지표를 통해 정량적으로 잘 평가되었음.
- 군집제어에 대한 각각의 드론에 대해서 상대 거리 오차를 정량적 데이터와 그래프로 명확히 제시하였음.

시험평가에 대한 전문가 의견서

■ **과제명:** 농업 생산 효율 극대화를 위한 군집 원격제어기술 기반 스마트 농업용 멀티 드론 시스템 개발

■ **평가항목 및 검토의견**

평가항목	목표 (2차년도)	결과	점검내용	검토의견
무인 항공기를 이용하여 농경지 예찰 작업의 시연 평가	최소 근접 작업 높이 : 20m	2.85m	- 개발된 농업용 멀티 드론 시스템을 이용한 농작업(농경지 예찰) 시연 평가	- 괴상원사가 서지 시험 케이스별 3회에 대한 결과로 시험 설계 및 결과 분석 문제 없음
	동시간 최대 촬영 면적 : 2000m ²	3582m ² (20m 기준)	- 농경지 예찰 작업을 수행함에 있어서 농업용 멀티 드론 시스템을 평가할 수 있는 지표를 통해 총 4가지의 실험 케이스별 비교 및 분석	- 개발된 농업용 멀티 드론을 통해 농경지 예찰 시연을 위한 확인함
	동시 조작 가능 드론 : 4대	4대	- 현장 시연 평가를 통한 결과를 바탕으로 정략적 목표 달성도 검증 및 평가	- 모든 시험에 대해서 정략적 데이터의 분석을 위한 확인함

■ **종합의견**

- 농업용 멀티 드론 시스템을 사용하여 농경지 예찰 작업의 시연평가로 정략적 연구 목표를 달성함

- 각 시험 케이스별 드론 제기와 드론 개수를 통해 시험을 실시함으로써 시스템의 성능을 명확히 보여줄 수 있는 실험임.

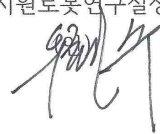
- 성능 지표와 시험을 잘 설계하였으며, 정략적 데이터를 명확히 제시함.

- 후속 시험에서는 동시간에 촬영 면적 뿐만 아니라 카메라를 통한 실시간 mapping을 수행하여 농경지 예찰 작업의 정확도 분석을 포함함.

2018년 03월 09일

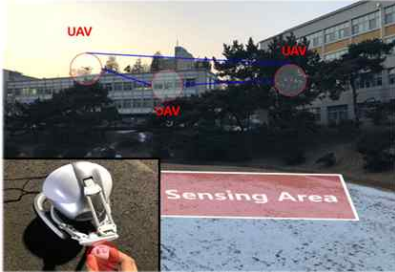
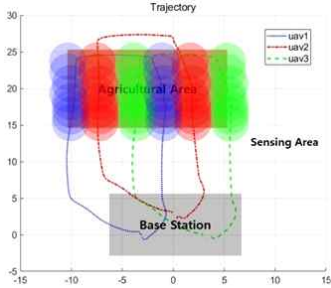
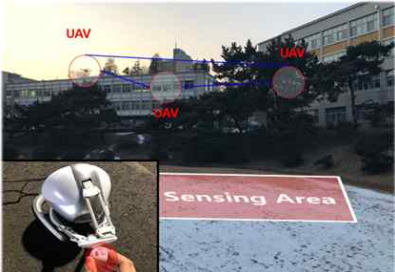


소 속: 한국기계연구원 의료지원로봇연구실장

검토인: 우 현 수



5. 연구결과의 활용계획

		코드번호	D-07
5-1. 핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과			
핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과		
멀티 드론 원격 제어 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 멀티 드론의 원격제어 기술 개발 결과는 농산물 재배 및 관리 등의 분야에 적용함으로써 궁극적으로 농업의 생산성 향상과 농작업 효율의 향상을 가져올 수 있으며, 본 기술을 열악한 농업환경의 원격화 및 자동화 기술에 도입하여 농업환경의 질을 개선하는데 기여할 수 있음 - 본 시스템과 변량제어장치를 결합할 경우, 벼농사는 물론 채소, 원예, 과수 등의 방제 작업 고성능 기계화가 가능하며, 드론의 저공비행을 활용하면 정밀방제 및 친환경 농업기술 향상에 기여할 수 있음. 		
멀티 드론 군집 제어 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 멀티 드론 군집제어 기술은 드론의 개수가 증가하더라도 기존 무인항공기 시스템보다 작업자의 안전과 운영 편의성을 향상시킬 수 있기 때문에 숙련자 또는 비숙련자라도 작업 효율을 증진시킬 수 있음 - 다수의 드론이 광활한 농경지에 대해서 협업 및 분업을 할 수 있으므로 작업 시간의 감소, 작업의 정확성 향상, 생산 효율 증대의 결과를 기대할 수 있으며, 일조량, 수분, 토양의 상태, 해충 피해의 정도를 실시간으로 빠르고 정확하게 측정해 관리하기 때문에 빅데이터 기반의 정밀 농업 및 스마트 농업의 확대에 기여함. 		
멀티 드론 조작 편의성 향상 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 멀티 드론 조작 편의성 향상 기술 결과는 멀티 드론의 운용이 필요한 대면적 농산물 작황 점검 이외에도 가축이동 추적, 산림 보호, 과수 관리 등에 활용하여 농축산업 환경 제어의 원격화, 자동화에 기여할 것임. - 특히 대면적 농경지에 대한 예찰 및 방제작업을 수행할 때 다수의 드론을 이용함으로써 작업의 신속성과 작업시간 단축 등의 생산 효율 극대화에 기여함. - 주요 병 조기진단 예찰로 발병적기 방제 실시로 무분별한 약제 살포를 줄여 방제 효율을 제고하며, 병피해 방지로 경제적 파급효과 기대. 또한 농약살포 양을 감소에 따른 친환경 농경환경 구축이 가능하여 농가소득 증대에 기여함. 		
5-2. 개발된 멀티드론 시스템 기술과 농업분야와의 상관관계			

활용분야	활용방법 및 기대효과
<p>농작물 생육감시, 병해충 감시 등의 예찰작업</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 농작물 생육감시, 병해충 감시, 농업지형 조사 등의 예찰작업에 활용 가능 - 드론을 활용함으로써 노동력 및 인건비 절감 효과와 예찰 인력에 의한 병의 전파를 방지할 수 있음. - 군집드론을 활용함으로써 작업시간 단축 및 동시작업이 가능하여 노동력을 추가적으로 절감할 수 있을 것으로 기대됨. <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>
<p>약액 살포 등의 방제작업</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 예찰 정보에 기반하여 해당 영역/지역에 약액을 살포하는 방제 작업 등에 활용가능. - 드론을 이용하여 방제함으로써 고령화된 농민의 육체적 부담을 감소시키고 농민의 농약 노출을 감소시킬 수 있음. - 농약중첩 영역을 최소화시키는 군집 방제드론을 활용함으로써 작업 효율을 극대화할 수 있으며, 과도한 농약 살포를 방지할 수 있음. <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>
<p>과수 방제작업</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 개발된 군집제어 기술을 자율주행 이동로봇 군집제어에 적용할 수 있음. - 대형 방제로봇은 과수의 생육 초기단계에는 약액을 남용할 가능성이 높으며, 좁은 과수원 길에는 부적합함. - 군집의 소형 자율주행 방제로봇을 활용함으로써 좁고 낮은 영역부터 넓고 높은 영역에 효율적인 약액 살포가 가능할 것으로 기대됨. <div style="text-align: center;">  </div>

5-4. 연구개발제품에 대한 활용성을 높이기 위한 법적 또는 환경적 조건 제안

조건	설명
드론 운용에 대한 법적 조건	<ul style="list-style-type: none"> - 최대이륙중량의 25kg 초과 여부, 자체 중량 12kg 초과 여부에 따라 규정이 일부 다르게 적용 (아래 그림 참고). - 고도 150m 이상, 비행장 주변, 비행금지구역 등에서는 무게나 목적에 관계없이 반드시 사전 승인 필요. - 항공사진 촬영의 허가권자는 국방부 장관으로 비행 승인과 별도로 촬영 허가 신청을 해야 함. - 농작물 생육감시, 병해충 감시 등의 예찰작업을 수행하는 드론의 경우 25kg을 초과하지 않는 경우 장치신고, 사업등록, 조종자 증명이 필요함. - 농약 살포, 비료 살포 등과 같은 작업을 수행하는 드론의 경우 25kg이 초과될 가능성이 있으며, 따라서 장치신고, 사업등록, 조종자증명 외에 추가로 안전성 인증을 받아야 함.
	<div style="text-align: center;"> <h3>드론 비행 절차</h3> <p>최대이륙중량 25kg 이하</p> <ul style="list-style-type: none"> 비사업용: 장치신고 (필수) 사업용: 장치신고 (지방항공청), 사업등록 (지방항공청), 조종자증명 (교통안전공단) <p>최대이륙중량 25kg 초과</p> <ul style="list-style-type: none"> 비사업용: 장치신고 (필수), 안전성인증 (필수) 사업용: 장치신고 (필수), 사업등록 (필수), 안전성인증 (필수), 조종자증명 (필수) <p>비행승인</p> <ul style="list-style-type: none"> 비사업용: 비행금지구역, 관제권에서 비행하거나 그 밖의 일반 공역에서 150m 이상의 고도를 비행하는 경우만 승인 필요 사업용: 조경량비행장치 전용구역(29개)을 비행하는 경우만 승인 불필요 <p>항공촬영을 하려는 경우는 국방부의 별도 허가 필요(국방부로 문의)</p> <p>“조종자 준수사항”에 따라 비행</p> <p><small>*최대이륙중량과 관계없이 자체중량 12kg을 초과하는 비사업용 및 모든 사업용의 경우 장치신고 필요 *자체중량 12kg을 초과하는 사업용의 경우 조종자증명 취득 필요</small></p> <p>< 출처 : 국토부 정책자료 > http://www.molit.go.kr/USR/policyTarget/dtl.jsp?idx=584 ></p> </div>

드론
대한
조건

운용에
환경적

- 드론의 안정적인 비행에 가장 중요한 환경적 요소 중 하나는 외부 바람 세기/속도임.
- 본 과제에서 사용한 드론 플랫폼인 3DR Solo 기체를 예로 들면, 바람 한계 속도를 25 mph(11 m/s)로 제시함. (출처 : <https://www.wellbots.com/content/3D%20Robotics/3D-Robotics-solo-drone.pdf>)
- 드론 자체의 비행에 대한 환경 조건도 중요하나, 드론이 수행할 농업 작업 특성에 대한 환경적 조건이 더 중요한 요소임.

작업
특성(방
제 등)에
따른
환경적
조건

- 멀티 드론 시스템이 수행할 수 있는 대표적인 작업인 방제를 예로 들면, 농약 살포의 효과를 높이기 위해 강우 여부, 농약 비산 방지를 위한 풍속 등을 고려해야 함.
- 기상청에서는 이와 관련하여 농업시설과 농약살포에 대한 농업지수를 주기적으로 제공함.
- 농약살포에 대한 농업지수를 예로 들면, ‘나쁨’, ‘보통’, ‘좋음’의 3단계로 구분하며 일평균풍속이 10 m/s 이상인 경우를 ‘나쁨’으로 정의함.
- 이는 위에서 제시한 드론 기체의 한계 속도 (11 m/s)와 유사한 속도로 해당 환경에서는 드론 기체의 안정적인 비행과 농약 살포의 효과가 나쁨을 알 수 있음.

■ 단계별 설명 및 주의사항

단계	기상조건	설명 및 주의사항
나쁨	일강수량 0.3mm 이상 또는 일평균풍속 10% 이상 또는 일최고기온 32℃ 이상 또는 일최저기온 2℃ 미만	농약 살포를 위한 기상조건이 매우 나쁘며, 방제효과가 매우 떨어짐
보통	일강수량 0.3mm 미만 또는 일평균풍속 8% 이상 10% 미만	농약살포는 가능하나 효과가 떨어짐
좋음	무강수이고 일평균풍속 8% 미만	농약살포 및 효과 좋음

< 출처 : 기상청 자료

https://www.kma.go.kr/HELP/basic/help_03_01.jsp >

6. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

○ 본 연구 과제를 수행함에 있어, 해외에서 사용되는 농업용 드론에 대해서 사전 조사 및 분석을 진행하였으며 아래 표에 간략하게 정리 함

Reference	Objective	Task	UAV	Control	Sensors	Crop
B. Allred et al. (2018)	Evaluation of VIS, NIR, and TIR imagery for drainage pipe mapping	Remote Sensing and Mapping	Single Fixed-wing type drone	Ground Control Station (Auto)	Multi-spectral camera, thermal camera	Corn, Soybeans
X. Xue et al. (2016)	To design an UAV based automatic control spraying system to perform plant-protection operations.	Spraying	Single Helicopter type drone	Ground Control Station (Auto)	Spraying control system	Field
L.G. Santesteban et al. (2017)	To estimate the instantaneous and seasonal variability of plat water status	Remote Sensing and Mapping	Single X8 type drone	Ground Control Station (Auto)	Multi-spectral camera, thermal camera	Vineyard
F.A Vega et al. (2015)	To determine the capability of an UAV system to acquire multi-temporal images	Monitoring	Single Quadcopter type drone	Ground Control Station (Auto)	Multi-spectral camera	Sunflower
P. Tokekar et al. (2016)	To study the problem of maximizing the number of points visited by the UAV	Remote Sensing	Single Octocopter type drone + Single UGV	Ground Control Station (Auto)	Multi-spectral camera	Field
J. Torres-Sanz et al. (2015)	To report an innovative procedure for a high-throughput and detailed 3D monitoring of agricultural tree plantations	Mapping	Single Quadcopter type drone	Remote Control (Teleoperation)	Visible-light camera, Multi-spectral camera	Olive plantation
A. Noriega et al. (2016)	Development of a path planning method to minimize the time required to scan a field	Monitoring	Single Octocopter type drone	Ground Control Station (Auto)	Multi-spectral camera	Field

Reference	Objective	Task	UAV	Control	Sensors	Crop
D. Campbell et al. (2017)	To describe a modular and generic system that is able to control the UAV using computer vision	Remote Sensing	Singe Quadcopter type drone	Ground Control Station (Auto)	RGB camera, Ultrasonic, Spraying system	Weed
R. Jannoura et al. (2015)	Evaluation of crop biomass using true colour aerial photographs	Monitoring	Single Hexacopter type drone	Remote Control (Teleoperation)	RGB digital camera	Pea, Oat
M. P. Christiansen et al. (2017)	Designing and testing a UAV mapping system for agricultural field surveying	Mapping	Single Quadcopter type drone	Ground Control Station (Auto)	Color camera, LiDAR	Wheat
B. S. Faical et al. (2017)	To propose a computer-based system that able to adapt the UAV control rules	Spraying	Single Helicopter type drone	Ground Control Station (Auto)	Spraying control system	Field
J. Torres-Sanchez et al. (2013)	To describes the specifications and configurations of a UAV for site-specific weed management	Remote Sensing	Signle Quadcopter type drone	Ground Control Station (Auto)	Point-and-shoot camera, Multi-spectral camera	Sunflower
P. J. Zarco-Tejada et al. (2013)	Development of methods for leaf carotenoid content estimation, using an UAV	Remote Sensing	Single Fixed-wing type drone	Ground Control Station (Auto)	Multi-spectral / Hyper-spectral camera	Vineyard
D. Doering et al. (2014)	Development of an autonomous system to perform inspections for agriculture based on the use of multiple UAVs	Monitoring	Multiple Quadcopter type drone	Ground Control Station (Auto)	RGB camera	Field
H. Xiang et al. (2011)	Development of an automatic aerial image georeferencing method for an UAV platform	Remote Sensing	Single Helicopter type drone	Onboard navigation system (Auto)	Multi-spectral camera	Field

Reference	Objective	Task	UAV	Control	Sensors	Crop
A. Barrientos et al. (2011)	Practical experimentation with an integrated tool to create a full map using multiple UAVs	Area Coverage and Path Planning	Multiple Quadcopter type drone	Ground Control Station (Auto)	IMU, pressure sensor, GPS	Vineyard
J. A. Arroyo et al. (2017)	To propose a model to estimate Nitrogen nutrition level in crops	Remote Sensing	Single Quadcopter type drone	Ground Control Station (Auto)	Multi-spectral camera	Corn

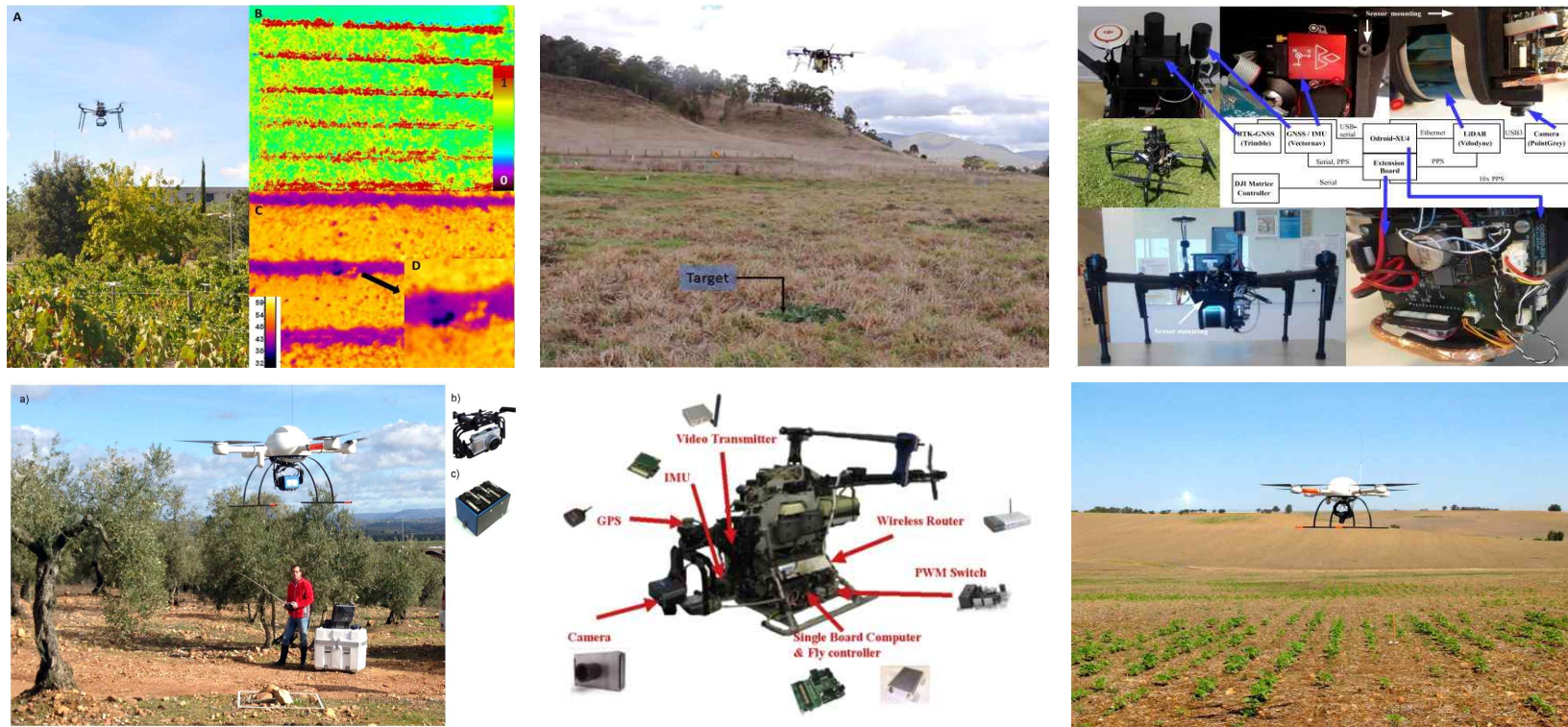


그림 64. 해외 농업용 드론 관련 연구들

- 최근 10여년간 농업분야에서 드론에 대해 많은 관심을 기울이고 있다. 위 표에서 알 수 있듯이, 해외에서 연구되고 있는 농업용 드론을 살펴보면 현재 대부분의 시스템은 단일 드론을 이용한 시스템으로 농작업은 주로 Remote Sensing, Mapping, Monitoring을 수행한다.
 - 아직까지는 다수의 드론을 적용한 농작업 시스템은 많이 구축되어 있지 않으며, 멀티 드론이 사용된 두 가지의 연구사례를 살펴볼 때 농작업 효율이 향상된 것을 확인할 수 있으며, 이는 향후 농업의 자동화 및 무인화에 필수적인 기술이라고 할 수 있다.
 - 본 과제가 목표하고 있는 분산군집제어 알고리즘 기반 농업용 멀티 드론 원격제어시스템에 대한 연구는 현재 많이 이루어지지 않았으며, 농업용 멀티 드론의 자동제어시스템의 경우 상용 S/W의 기술단계에 머물러 있다.
 - D. Campbell et al. 은 Robot Operating System (ROS) 기반의 Onboard 제어 시스템으로 Observation, Orientation, Decision and Action (OODA) loop를 사용하여 농업용 드론에 적용시켰다. 이는 향후 농업용 드론에 꼭 필요한 기술(이산이벤트시스템 제어)이라고 생각되며, 본 과제를 통해 개발된 멀티 드론 시스템에 적용하면 큰 효율을 가져올 것으로 판단된다.
 - A. Barrientos et al. 은 다수의 드론을 사용해 광활한 농경지에 대해 지역을 나누고 각각의 드론에 임무를 할당해 path planning을 수행한 연구로써, 멀티 드론을 사용했을 경우 향상된 결과를 확연하게 보여주지만 복잡한 시스템으로 구성되어 있다.
 - 위와 같은 해외과학기술 정보를 미루어 볼 때, 본 과제에서 개발하고자 하는 분산군집제어 알고리즘 기반의 농업용 멀티 드론 시스템은 향후 농업용 기술에 꼭 반영되어야 하며, 농작업의 효율 및 생산량도 향상될 것으로 예상할 수 있다.
- 본 연구과 유사한 연구인 Paul Bupe Jr. 의 Ultra-Fast, Autonomous, Reconfigurable Communication System 논문을 보면 재해지역에 긴급구호를 위한 통신망 구성을 위한 멀티 드론 시스템을 제안하였다. 이를 위하여 하드웨어는 Pixhawk를 사용한 드론을 이용하였고 Backend로는 Python 언어로 제작된 어플리케이션으로 Mavlink 프로토콜로 드론과 통신을 한다. 사용자와 상호작용을 하는 UI는 HTML 과 Angular.js 를 이용하여 개발하였으며, 또한 멀티 드론의 군집 형태는 통신망의 형태인 육각형 패턴의 7-Cell Clusters 구조를 기반으로 의 드론의 위치를 자동으로 제어하는 알고리즘을 개발하였다.

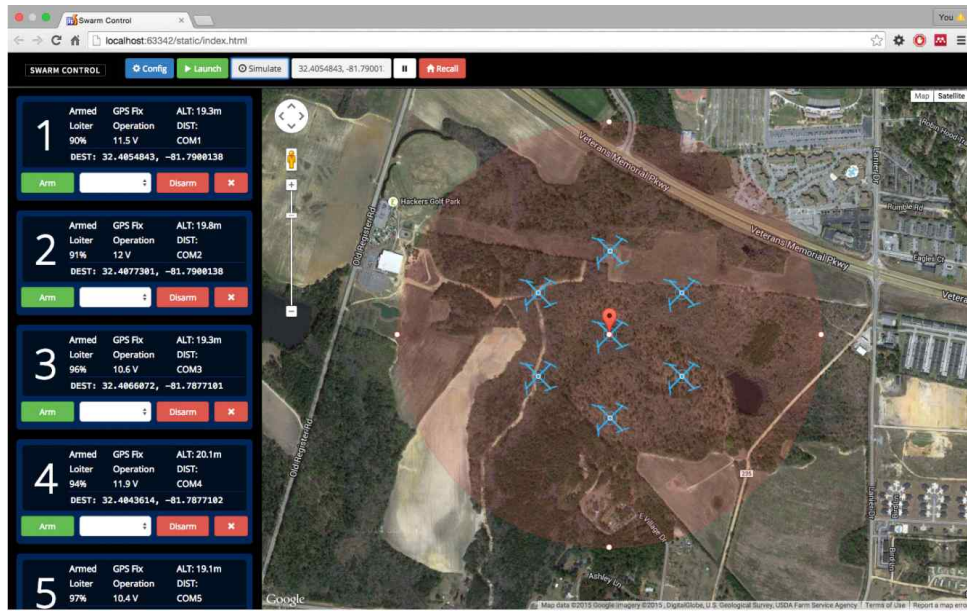


그림 64. Paul Bupe Jr. 의 논문에서 제안한 UI

7. 연구개발결과의 보안등급

코드번호	D-09
<input type="radio"/> 일반과제	

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	코드번호		D-10	
					구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록번호

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적

코드번호

D-11

○ 전남대학교 연구실 안전관리 추진도

- 안전관리추진내용 ⇒
1. 연구활동종사자 안전교육
 2. 연구실 정기안전점검 실시
 3. 연구실 정밀안전진단 실시
 4. 연구실 정기안전점검 및 정밀안전진단 결과에 대한 개선
 5. 연구실 안전장비 조사 및 공급(교육부 사업)
 6. 연구실 안전문화 확산을 위한 사업 등

○ 전남대학교 연구실 안전관리 항목

항 목	적 용 범 위	시행기관	비고
연구실 정기 안전점검 (년 1회 이상)	- 과학기술분야 모든 연구실	전남대학교	
연구실 정밀 안전진단 (2년 1회 이상)	- 유해물질 및 유해인자 취급 연구실 - 정기점검 결과 추가점검이 필요한 연구실	전남대학교	
연구실 실내 공기질 관리 (매년 실시)	- 측정 및 분석 - 유해화학물질 사용, 유해인자 보유, 정밀진단결과 4등급 연구실	전남대학교	
연구실 종사자에 대한 안전교육(매학기별 6시간이상)	- 과학기술분야 모든 연구활동종사자	전남대학교	
연구종사자 건강검진 (매년 실시)	- 과학기술분야 연구활동종사자	전남대학교	
연구활동종사자 안전공제 (매년 실시)	- 과학기술분야 연구활동종사자	전남대학교	

○ 전남대학교 연구실 안전환경관리자 현황

구 분	성 명	비 고
용봉캠퍼스	윤 찬, 이안승	
학동캠퍼스	송주현, 엄기용	
여수캠퍼스	김홍식, 염세원	

9-1. 연구실 정기 안전점검, 정밀안전진단

1) 대상 연구실

- 과학기술분야 모든 연구실
- 연구개발활동에 「화학물질관리법」 제2조제7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실
- 연구개발활동에 「산업안전보건법」 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실
- 연구개발활동에 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실
- ※ 위험등급별로 환경안전점검을 단계별로 체계화하여 관리
- ※ 관리위험등급의 지정

- A등급 : 가연성가스, 인화성 시약, 유해화학물질, 다량의 폐액배출, 독극물, 생물 및 동물,

방사성 동위원소, 위험성이 높은 기계장비가 설치된 실험실

- B 등급 : 일반시약, 소규모 인화성 시약, 불연성가스, 소량의 폐수발생실험실

- C 등급 : 이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실

2) 2017년도 안점점검 및 진단 시행 실적

구 분	안전점검 시행시기	대상 연구실	비 고
정기점검	2017. 4 ~ 6월	광주캠퍼스 해당 연구실	
	2017. 4 ~ 6월	여수캠퍼스 해당 연구실	
정밀진단	2017. 9 ~ 10월	광주캠퍼스 해당 연구실	
	2017. 9 ~ 10월	여수캠퍼스 해당 연구실	

9-2. 연구실 공기질 측정

1) 실시 일정 및 내용 : 연구실 정기점검 및 정밀진단 실시와 함께 유해물질농도 측정관리, 환기대책수립

9-3. 연구실 안전교육

1) 교육대상

- 과학기술분야 연구실에 종사하는 연구활동종사자 전원(대학생, 대학원생, 연구원, 연구보조원, 교수, 조교 등)

- 연구실(실험·실습실)을 출입하는 자(대학생, 대학원생, 연구원, 연구보조원, 교수, 조교 등)

(대학원을 수료한 자라도 연구실을 출입하는 경우하는 교육을 이수하여야 함)

- 희망하는 창업보육센터 업체의 직원

2) 교육 횟수

- 매학기별 1회 6시간(6차시) 이수를 기본으로 함(총 년 2회-12시간이상)

3) 전공특성별 안전교육 실시

- 연구활동종사자의 출입 실험실 위험등급에 따라 교육과정을 A,B,C로 편성

- 전공특성별 안전교육을 실시

- 연구활동종사자의 교육만족도 향상 및 실질적 안전교육이 되도록 실시하였음

교육 과정	분류 기준	비 고
공통과정	A,B,C공통 과정 - 연구실 안전 및 안전일반과정 : 연구실안전 및 일반적 위험성, 연구실 사고예방, 연구실 사고대처, 연구실 안전보건 - 화재 및 폭발 : 화재 및 폭발, 화재로 인한 신체피해, 소방안전설비 사용요령, 화재 시 행동요령 - 유해화학물질 취급과 관리 : 물질안전보건자료	
A과정	가스, 인화성시약, 유해화학물질, 생물 및 동물의 취급, 방사성동위원소	
B과정	일반시약, 소규모 인화성시약, 불연성 가스	
C과정	화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터	

※ 집합교육으로 순회안전교육 및 실험전 안전교육 실시하며, 전남대학교 연구환경안전망 홈페이지(<http://safety.jnu.ac.kr>)를 통해 사이버 교육 상시 실시함

9-4. 연구활동종사자 건강검진

1) 검진대상자 및 검진대상 물질

- 과학기술분야 연구실의 연구활동종사자로서 위 물질을 취급하지 않더라도 건강검진을 원하는 연구활동종사자
- 산업안전보건법에 따른 유해인자 보유 연구실(메탄올외 178종)
- 상기 물질을 취급하여 연구에 종사하는 자

2) 건강검진 종류

- 일반검진
- 유해인자별 건강검진 : 특수검진

3) 추진일정

- 기관별 유해인자 취급기준 설정(2016.07)
- 건강검진대상자 선정을 위한 조사표 작성 요청(2017.07-08)
- 건강검진대상자 선정을 위한 유해인자 노출정도 분석 및 평가(2017.08)
- 건강검진대상자 선정 및 통지(2017.08)
- 건강검진 실시기관 선정(2017.09)
- 건강검진 실시(2017.09-10)

9-5. 연구활동종사자 안전공제

1) 가입 대상자

- 과학기술분야 연구실에 종사하는 연구활동종사자 전원(4대보험가입자 제외)
- 실험·실습실을 출입하여 교육 또는 연구를 수행하는 자
(대학생, 대학원생, 연구원, 연구보조원)

2) 안전공제 재가입

- 가입회사명 : 교육시설재난공제회
- 재가입 년월일 : 2017. 10. 18.

3) 보상기준 및 내용

구 분		내 용	비 고
보상기준		<ul style="list-style-type: none"> ▪연구실에서 발생한 사고로 연구활동종사자가 부상·질병 -신체장해·사망 등 생명 및 신체상의 손해발생시 보상 	
보상내용	사망	▪1인당 1억원 보상	
	후유장해	▪1억원을 한도로 후유장해등급별 정액 보상	
	부상	▪1천만원을 한도로 1인당 상해등급별 정액 및 실손 보상	

10. 연구개발과제의 대표적 연구실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문게재지 / 특허등록국 가	코드번호		D-12	
						Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/ 인용횟수 등)
1	논문	Maintenance Robot for 5-MW Offshore Wind Turbines and its Control	전남대학교	제1저자, 교신저자	IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	4.357	2016.10.01	중복사사	SCI
2	논문	A passivity criterion for real-time haptic simulation of viscoelastic soft tissues	전남대학교	제1저자, 교신저자	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering Part I-Journal of Systems and Control Engineering	1.420	2016.10.07	중복사사	SCI
3	논문	Multimodal feedback for teleoperation of multiple mobile robots in an outdoor environment	전남대학교	제1저자, 교신저자	Journal on multimodal user interfaces	1.031	2017.01.01	중복사사	SCI
4	논문	로봇 잔류 진동 저감을 위한 모션 가속 시간 설계 연구	한국교통대학교	제1저자, 교신저자	로봇학회 논문지		2017.09.01	단독사사	학진등재지
5	특허	무인 항공기를 이용한 말벌집 탐색 시스템	전남대학교		대한민국		2016.11.23	중복사사	

11. 기타사항

코드번호	D-13

12. 참고문헌

	코드번호	D-14
[1] A. King, "Technology: The future of agriculture," <i>Nature</i> , vol. 544, no. 7651, pp. S21 - S23, 2017.		
[2] P. K. Freeman and R. S. Freeland, "Agricultural uavs in the us: potential, policy, and hype," <i>Remote Sensing Applications: Society and Environment</i> , vol. 2, pp. 35 - 43, 2015.		
[3] J. Das, G. Cross, C. Qu, A. Makineni, P. Tokekar, Y. Mulgaonkar, and V. Kumar, "Devices, systems, and methods for automated monitoring enabling precision agriculture," in <i>Automation Science and Engineering (CASE), 2015 IEEE International Conference on</i> , pp. 462 - 469, IEEE, 2015.		
[4] S. Candiago, F. Remondino, M. De Giglio, M. Dubbini, and M. Gattelli, "Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from uav images," <i>Remote Sensing</i> , vol. 7, no. 4, pp. 4026 - 4047, 2015.		
[5] P. Katsigiannis, L. Misopolinos, V. Liakopoulos, T. K. Alexandridis, and G. Zalidis, "An autonomous multi-sensor uav system for reduced-input precision agriculture applications," in <i>Control and Automation (MED), 2016 24th Mediterranean Conference on</i> , pp. 60 - 64, IEEE, 2016.		
[6] H. Xiang and L. Tian, "Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle(uav)," <i>Biosystems engineering</i> , vol. 108, no. 2, pp. 174 - 190, 2011.		
[7] D. Doering, A. Benenmann, R. Lerm, E. P. de Freitas, I. Muller, J. M. Winter, and C. E. Pereira, "Design and optimization of a heterogeneous platform for multiple uav use in precision agriculture applications," <i>IFAC Proceedings Volumes</i> , vol. 47, no. 3, pp. 12272 - 12277, 2014.		
[8] R. Beckers, O. Holland, and J.-L. Deneubourg, "From local actions to global tasks: Stigmergy and collective robotics," in <i>Artificial life IV</i> , vol. 181, p. 189, 1994.		
[9] C. Jones, D. Shell, M. J. Mataric, and B. Gerkey, "Principled approaches to the design of multi-robot systems," in <i>Proc. of the Workshop on Networked Robotics, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)</i> , pp. 71 - 80, 2004.		
[10] L. Merino, F. Caballero, J. R. Martínez-de Dios, J. Ferruz, and A. Ollero, "A cooperative perception system for multiple uavs: Application to automatic detection of forest fires," <i>Journal of Field Robotics</i> , vol. 23, no. 3-4, pp. 165 - 184, 2006.		
[11] J. Han, Y. Xu, L. Di, and Y. Chen, "Low-cost multi-uav technologies for contour mapping of nuclear radiation field," <i>Journal of Intelligent & Robotic Systems</i> , pp. 1 - 10, 2013.		
[12] A. Ahmadzadeh, A. Jadbabaie, V. Kumar, and G. J. Pappas, "Multi-uav cooperative surveillance with spatio-temporal specifications," in <i>Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on</i> , pp. 5293 - 5298, IEEE, 2006.		

- [13] H. Chao, M. Baumann, A. Jensen, Y. Chen, Y. Cao, W. Ren, and M. McKee, "Band-reconfigurable multi-uav-based cooperative remotesensing for real-time water management and distributed irrigation control," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 11744 - 11749, 2008.
- [14] D. Lee, A. Franchi, P. R. Giordano, H. I. Son, and H. Bulthoff, "Haptic teleoperation of multiple unmanned aerial vehicles over the internet," in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1341 - 1347, IEEE, 2011.
- [15] A. Franchi, P. R. Giordano, C. Secchi, H. I. Son, and H. H. Bulthoff, "A passivity-based decentralized approach for the bilateral teleoperation of a group of uavs with switching topology," in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 898 - 905, IEEE, 2011.
- [16] A. Franchi, C. Secchi, H. I. Son, H. H. Bulthoff, and P. R. Giordano, "Bilateral teleoperation of groups of mobile robots with time-varying topology," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 28, no. 5, pp. 1019 - 1033, 2012.
- [17] D. Lee, A. Franchi, H. I. Son, C. Ha, H. H. Bulthoff, and P. R. Giordano, "Semiautonomous haptic teleoperation control architecture of multiple unmanned aerial vehicles," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 4, pp. 1334 - 1345, 2013.
- [18] A. Franchi, C. Secchi, M. Ryll, H. H. Bulthoff, and P. R. Giordano, "Shared control: Balancing autonomy and human assistance with a group of quadrotor uavs," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 19, no. 3, pp. 57 - 68, 2012.
- [19] G. S. Avellar, G. A. Pereira, L. C. Pimenta, and P. Iscold, "Multi-uav routing for area coverage and remote sensing with minimum time," *Sensors*, vol. 15, no. 11, pp. 27783 - 27803, 2015.
- [20] F. Borrelli, T. Keviczky, and G. J. Balas, "Collision-free uav formation flight using decentralized optimization and invariant sets," in *Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on*, vol. 1, pp. 1099 - 1104, IEEE, 2004.
- [21] H. Yang, Y. Lee, S.-Y. Jeon, and D. Lee, "Multi-rotor drone tutorial: systems, mechanics, control and state estimation," *Intelligent Service Robotics*, vol. 10, no. 2, pp. 79 - 93, 2017.
- [22] H. I. Son, A. Franchi, L. L. Chuang, J. Kim, H. H. Bulthoff, and P. R. Giordano, "Human-centered design and evaluation of haptic cueing for teleoperation of multiple mobile robots," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 43, no. 2, pp. 597 - 609, 2013.
- [23] S. Grzonka, G. Grisetti, and W. Burgard, "A fully autonomous indoor quadrotor," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 1, pp. 90 - 100, 2012.
- [24] P. Sujit, S. Saripalli, and J. B. Sousa, "Unmanned aerial vehicle path following: A survey and analysis of algorithms for fixed-wing unmanned aerial vehicles," *IEEE Control Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 42 - 59, 2014.

- [25] E. J. Rodriguez-Seda, J. J. Troy, C. A. Erignac, P. Murray, D. M. Stipanovic, and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation of multiple mobileagents: Coordinated motion and collision avoidance,"IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 18, no. 4, pp. 984 - 992,2010.
- [26] H. I. Son, J. Kim, L. Chuang, A. Franchi, P. R. Giordano, D. Lee, and H. H. B"ulthoff, "An evaluation of haptic cues on the tele-operator' sperceptual awareness of multiple uavs' environments," in World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE, pp. 149 - 154, IEEE, 2011.
- [27] H. I. Son, L. L. Chuang, A. Franchi, J. Kim, D. Lee, S.-W. Lee, H. H. B"ulthoff, and P. R. Giordano, "Measuring an operator's maneuverability performance in the haptic teleoperation of multiple robots," inIntelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 3039 - 3046, IEEE, 2011.
- [28] D. V. Dimarogonas and K. J. Kyriakopoulos, "Connectedness preserving distributed swarm aggregation for multiple kinematic robots," IEEE Transactions on Robotics, vol. 24, no. 5, pp. 1213 - 1223, 2008.
- [29] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle
- [30] Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Multicopter>
- [31] http://www.kyongbuk.co.kr/?mod=news&act=articleView&idxno=10069_22
- [32] <http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=11645>
- [33] <http://www.jemin.com/news/articleView.html?idxno=483572>
- [34] http://www.digieco.co.kr/KTFront/report/report_issue_trend_view.action?board_seq=11776&board_id=issue_trend&sort_order=&kind=a01&list_page=&list_gubun=&searchtext=&etc1=385&etc2=#
- [35] <http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2016/10/10/0200000000AKR20161010163700063.HTML>
- [36] 김성환, 조상욱, 김성수, 유창경, 최기영, "복수 무인기 네트워크 통합 운영 시스템 개발", 한국항공우주학회지, pp 1042-1051, 2011
- [37] 이성호, 한경호, "군집 드론의 동시제어를 위한 멀티채널 송신 시스템 구현", 전기학회논문지 66(1), pp 179-185, 2017
- [38] 조동현, 문성태, 장종태, 류동영, "AR. Drone을 이용한 실내 군집비행용 충돌회피 기동 설계", 한국항공우주학회지 42(9), pp 752-761, 2014
- [39] 오장진, 신은철, 최성환, 임형진, 이민재, 김승균, 김병수, 양지현, "복수무인기 운용자의

임무과부하 분석을 위한 지상통제 시스템 개발”, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp 262-264, 2016

[40] 문성태, 최연주, 김도윤, 성명훈, 공현철, “RTK_GPS 기반 실외 군집 비행 시스템 개발”, 정보과학회논문지 43(12), pp 1315-1324, 2016

[41] 김찬호, 김영주, 방효충, “복수 무인기 운용을 위한 지상 통제 시스템 설계”, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp 13-15, 2014

[42] 3DRobotics,

<https://3dr.com/blog/the-solo-controller-a-controller-that-s-smarter-than-most-drones-5675479502cd/>

[43] Parrot-skycontroller, <https://www.parrot.com/global/accessories/drones/parrot-skycontroller>

[44] DJI Phantom3 Pro, <https://www.dji.com/phantom-3-pro/remote-controller>

[45] DJI INSPIRE1, https://www.dji.com/kr/inspire-1?site=brandsite&from=landing_page

[46] DJI INSPIRE1 Controller, <https://www.dji.com/kr/inspire-1/remote-controller#sub-feature>

[47] ThincUbe, <http://thinqb.com/dronetube/3dr-solo-drone-quadcopter-3drobotics/>

[48] Wikipdeia, https://en.wikipedia.org/wiki/3D_Robotics

[49] 3DR Solo Development Guide, <https://dev.3dr.com/concept-architecture.html>

[50] Dronekit, <http://python.dronekit.io/about/overview.html>

[51] Wkipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/ArduPilot#Supported_hardware

[52] Elinux, https://elinux.org/RPi_Hub

[53] Raspberry Pi, <https://www.raspberrypi.org/blog/raspberry-pi-3-on-sale>

[54] Elinux, https://elinux.org/RPi_Hardware

[55] ASRock Beebox, <http://www.asrock.com/microsite/Beebox>

[56] Waveshare, <https://www.waveshare.com/10.1inch-hdmi-lcd-b-with-case.htm>

[57] Waveshare, <https://www.waveshare.com/10.1inch-hdmi-lcd-with-case.htm>

[58] Ebay, <https://www.ebay.com>

[59] Ardupilot, <http://ardupilot.org/dev/docs/copter-commands-in-guided-mode.html>

[60] RXTXcomm, http://rxtx.qbang.org/wiki/index.php/Main_Page

[61] JavaFX Scene Builder, <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/javafxscenebuilder-info-2157684.html>

[62] Wikipedia,

<https://ko.wikipedia.org/wiki/%EB%AA%A8%EB%8D%B8-%EB%B7%B0-%EC%BB%A8%ED%8A%B8%EB%A1%A4%EB%9F%AC>

[63] JavaFX WebView, <https://docs.oracle.com/javafx/2/webview/jfxpub-webview.htm#>

[64] Webcam Capture API, <https://github.com/sarxos/webcam-capture>