

융합연구리뷰

Convergence Research Review

문성태 (한국항공우주연구원 선임연구원)
군집 비행 시스템의 동작 원리와 발전 방향

이현범 (경북대학교 전자공학부 조교수)
김표진 (Simon Fraser University 박사후과정)
무인비행체 개발 동향

CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 군집 비행 시스템의 동작 원리와 발전 방향
- 29 무인비행체 개발 동향



융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2020 April vol.6 no.4

발행일 2020년 4월 6일

발행인 김주선

편집인 최수영·권영만

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4980 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4783



군집 비행 시스템의 동작 원리와 발전 방향

지난 2018년 평창 동계올림픽 개막식 당시 밤하늘에 스노우보더가 지나가고 오리기 형상을 그려내었던 드론쇼를 통해 수많은 사람들이 여러 대의 드론을 활용한 기술과 군무 예술의 융합에 감탄하였다. 이러한 퍼포먼스가 가능했던 것은, 다수의 드론을 정확한 시간에 정밀히 계산된 위치로의 이동을 가능케 했던 군집 비행 기술이 있었기 때문이다.

이에, 본 호 1부에서는 2000년대 초기에 등장하여 불과 20년이 안되는 매우 짧은 개발 역사를 가진 군집 비행 기술에 대해 알아보았다. 군집 로봇 공학(Swarm Robotics)은 생명체의 군집행위를 모방하여 개별 로봇이 주변 로봇 및 환경과 상호작용하여 사용자가 원하는 임무를 수행하도록 군집 단위로 로봇을 제어하는 것을 목표로 한다. 실내에서의 군집 비행을 위해서는 대표적으로 모션캡처 기술을 통해 각 드론의 위치를 측정·인식하며, 실외에서는 RTK-GPS라는 기술을 통해 GPS보다 정밀한 위치 측정을 가능케 한다.

본 호 1부를 통해 여러 대의 드론을 활용한 군집 비행 시스템 동작 원리를 간략히 알아보았다. 드론쇼와 같은 예술 문화 산업에서의 적용을 넘어, 사회 안전망 구축, 농업, 측량 등 다양한 분야에서 군집 비행 드론을 활용한 데이터 수집, 단시간 내 결과물 창출 등이 가능해 보인다. 군집 비행 기술은 다양한 핵심 기술들이 어우러져야 비로소 이룩할 수 있는 시스템이기에 다양한 분야의 전문가들이 오픈 마인드로 협업할 수 있는 환경이 자리 잡을 수 있기를 기대해 본다.

무인비행체 개발 동향

드론은 원래 조종사 없이 무선전파의 유도에 의해 비행 및 조종이 가능한 비행 플랫폼으로, 고정익 비행기나 회전익 모양의 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle)를 모두 포함하는 개념이다. 과거 군수 및 취미용 제품 위주의 드론은 기술의 발전으로 인해 이제 촬영, 정밀지도 작성, 물류, 건설, 통신망, 에너지 등 수많은 분야에서 점차 그 활용도가 확장되고 있으며, 동시에 사람이 조종하지 않아도 입력된 목적을 위해 비행하는 인공지능 기반 자율비행 드론이 개발 중이다.

이에, 본 호 2부에서는 자율비행 드론의 시장 동향과 시스템 구성 및 핵심 기술에 대해 알아보았다. 현재 가장 적극적으로 자율비행 드론을 활용하고 있는 분야는 물류/배달 분야로, 지난 2015년 미국 아마존에서 드론 배달 시험 서비스를 시작한 이후 많은 나라에서 관련 서비스를 개발하고 있다. 다만, 소형의 동적 장애물을 인지하여 회피하기 힘들다는 점과 위치추정 오차 등으로 인해 주면 사물과 충돌 후 추락 가능성에 대한 대비가 아직은 미흡하여 일부 지역에 국한되어 이용되고 있다.

본 호 2부를 통해 관련 기술의 지속적인 발전으로, 단점이 빠르게 상쇄되고 있는 최신 드론 기술에 대해 알아보았다. 앞으로 필연적으로 다가올 드론 시대(Drone Age)로의 이행을 위해 장기적 안목에서 체계적인 준비가 필요해 보이며, 특히, 개인용 비행체, 드론 에어쇼, 재난현장 탐사를 위한 탐사 드론 등 고부가가치 창출이 가능한 분야의 핵심 기술 개발 및 확보를 통한 시장 창출을 기대해 본다.



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2020 April vol.6 no.4



01

군집 비행 시스템의 동작 원리와 발전 방향

문성태(한국항공우주연구원 선임연구원)

I 소개

4차산업혁명의 핵심 기술 중 하나로 드론에 대한 관심이 집중되면서 기존에 엔터테인먼트 분야에서만 사용되던 드론이 이제는 택배, 농업, 경찰 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 특히, 최근에는 하나의 드론이 아닌 다수의 드론이 협업하여 임무를 수행하는 군집 비행 기술의 발전이 이루어지면서 군집 비행 기술에 대한 관심이 높아져 가고 있다. 군집 비행 기술은 복잡한 임무 수행 시 다수의 드론이 협업을 통해 가능한 빠른 시간 내에 임무를 수행하고, 성공 확률을 증가시키는 것을 그 목적으로 한다. 뿐만 아니라, PAV(Personal Air Vehicle) 시대를 대비해 다수의 이동체들이 충돌 없이 운영 가능한 시스템 개발을 위해서도 군집 비행 기술이 연구되고 있다.

군집 비행 기술은 2000년대 초기에 등장하여 불과 20년이 안 되는 매우 짧은 개발 역사를 가진 신기술(Emerging Technology)에 속한다. 군집 로봇 기술은 개미, 벌, 새 등 생명체의 군집 활동을 모방해서 발달하였다. 이들 생명체는 각 개체의 기능은 단순하지만, 군집을 이루면 먹이 탐색, 이동, 수송, 집짓기, 공격 및 방어 등에 있어 각 개체에서는 볼 수 없는 초지능을 보인다. 군집 로봇 공학(Swarm Robotics)은 이러한 생명체의 군집행위를 모방하여 군집 로봇이 로봇 간 및 환경과 상호작용을 이용하여 우리가 원하는 임무를 수행하도록 군집 단위로 로봇을 제어하는 것을 목표로 한다.

초기 군집 로봇 연구는 주로 시뮬레이션 위주로 이루어졌다. 하지만, 최근 5년 사이에 군집 로봇 구현에 필요한 인공지능, 센서, 통신 및 구동기 등 4차산업혁명 주도의 기술 발달로 자율이동 기술이 급속히 발달함에 따라 군집 로봇은 미국, 중국, 유럽 등 선진국을 중심으로 현실화 연구가 활발히 진행되고 있다.

군집 비행 기술이 대중에 가장 알려진 것은 아마도 2018년 평창 동계 올림픽 드론쇼일 것이다(Kshetri et al, 2018). 평창 올림픽에서 군집 비행 기술을 활용하여 선보인 드론쇼는 드론이라는 기술과 군무라는 예술을 융합하면서 드론의 새로운 가능성을 보여준 의미 있는 발전이었다. 특히, 다수의 드론이 충돌 없이 정해진 궤적을 정확한 시간에 이동하는 정밀 위치 추정 기술을 통해 천여 대의 드론이 충돌 없이 밤하늘에 오륜기 형상을 보여준 것은 많은 사람들에게 감동을 선사했다. 이처럼 군집 비행은 문화 산업과 융합하면서 새로운 시장을 창출 할 수 있음을 보여주었다.

이 기술은 단지 문화 예술 분야와의 접목으로 멈추지 않고, 다른 분야로의 확장을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 군집 비행 기술은 민/군 구별 없이 다양한 분야에서 군집 드론을 이용한 응용 시스템 개발이 가속화되고 있는데, 군에서는 군집 드론을 현대전의 비용 대비 효과가 매우 우수한 게임 체인저(Game Changer)로 받아들여 첨단 국방의 핵심 전력 중 하나로 선정하였고, 민간에서는 군집 드론을 이용하여 광역 공간에서 짧은 시간 안에 임무를 수행하는 기술을 연구 중에 있다. 그 중 한 사례로 군집 비행 기반 생존자 수색의 경우를 들 수가 있다. 한 대의 드론 보다 여러 대의 드론이 탐색 구역을 나누어 동시에 수색함으로써 보다 짧은 기간에 생존자를 발견할 수가 있다. 이처럼 단일 드론 운용과 비교할 때 군집 비행은 공간적, 시간적으로 여러 드론을 배치하고 다른 기능을 가진 드론을 혼합 편성함으로써 국방 및 민간의 다양하고 복잡한 임무를 매우 효율적으로 수행할 수가 있어 큰 주목을 받고 있다. 로봇 전문가인 구글의 제임스 맥러킨 박사는 “로봇의 미래는 군집 로봇”이라고 언급한 바가 있는데 앞으로 군집 비행 기술은 4차산업혁명 기술과 더불어 개발에 상당한 가속력이 붙을 것으로 예상된다.

본 기고문에서는 우선 국내외 군집 비행 연구 동향 및 개발 사례에 대해 2장에서 설명한다. 3장과 4장에서는 평창 올림픽으로 큰 이슈를 받은 군집 드론 비행과 관련한 실제 운용 방법에 대해 설명한다. 3장에서는 실내 군집 비행 시스템의 동작 원리와 필요 기술에 대해 설명하고, 4장에서는 평창 올림픽에서 이루어졌던 군집 비행 시스템과 같은 실외 군집 비행 시스템의 원리 및 기술에 대해 설명한다. 이후 5장에서는 향후 군집 비행 기술이 발전하기 위해 필요한 향후 기술들에 대해 분리하여 정리한 다음 6장에서 결론을 맺었다.

II 국내외 동향

1. 국외 주요 선진국 개발 동향

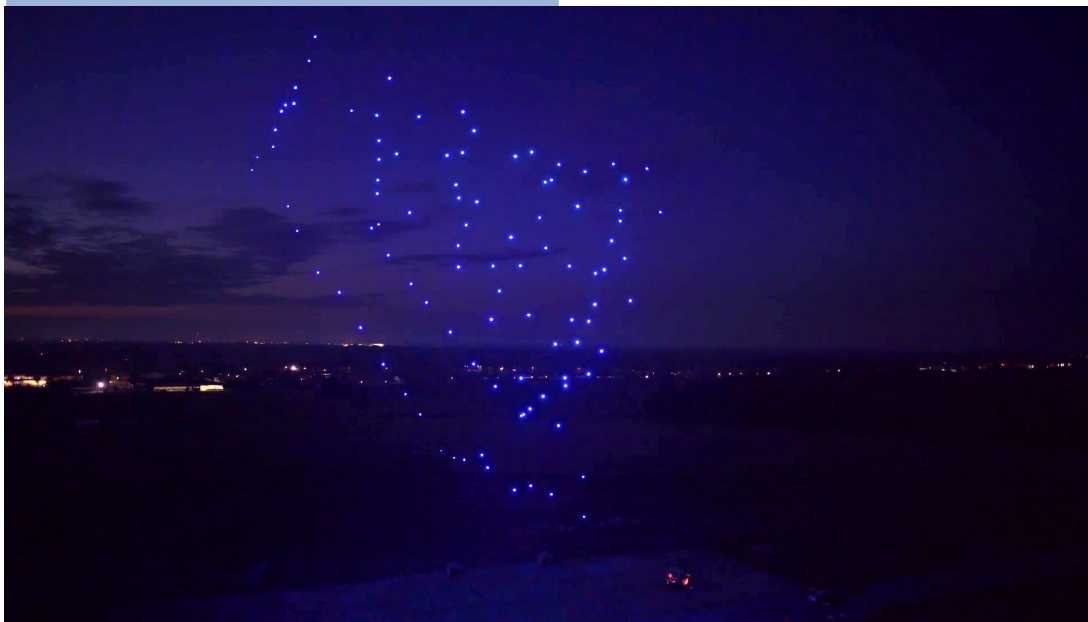
초기 군집 비행 연구는 드론 기술의 발전이 미약하고 다수의 드론을 동시에 운용하는 것이 현실적으로 불가능하여, 주로 시뮬레이션 위주로 이루어졌다. 하지만, 최근 5년 사이에 드론 기술이 급속히 발전함에 따라 미국, 유럽 등 선진국을 중심으로 군집 비행 연구가 활발히 진행되고 있다. 군집 비행 기술이 세상에 널리 알려지는 것은 미국 펜실베이니아 대학의 Kumar 교수팀이 작은 드론을 활용하여 실내에서 모션캡처(motion capture)를 활용한 군집 비행을 선보인 TED 강연이었다(Mellinger et al, 2013). 시뮬레이션으로만 가능성을 검증하던 중에 실제 드론을 가지고 시연을 보인 것은 실로 놀라웠다.

그림 1. Kumar 교수팀, TED 강연



오스트리아의 ARS Electronica는 2012년부터 실외 군집 비행에 대한 연구를 꾸준히 진행하여 실외 군집 비행 시스템을 개발, 2013년 겨울에 공개하였다(ARS Electronica). 처음 공개한 영상에는 실외에서 49대의 드론에 LED를 탑재하여 동시 제어하는 기술을 선보였다. 이후 이 기술은 100대의 드론을 군집 비행하면서 최초로 기네스북에도 기록되었다. 그 동안의 드론 기술은 택배, 군 임무 수행 등과 같은 분야에 집중되어 연구되고 있었지만 실제 환경에 적용하여 활용하기에는 부족한 상태였기 때문에 군집 비행 기술을 실제 환경에서 시연한 것은 좋은 사례가 되었다. 또한 실외에서 드론을 예술 문화 분야와 접목한 최초의 시도였고, 그 결과 세계 여러 나라에서 군집 비행을 연구하게 된 계기를 마련하였다.

그림 2. ARS Electronica 군집 비행 사례



미국의 인텔은 ARS Electronica가 군집 비행 기체로 사용했던 허밍버드를 개발한 Ascending Technologies를 인수합병하여 100대 군집 비행을 시연하였다. 이후, 군집 비행 시연에 적합하도록 설계한 슈팅스타라는 드론을 개발하고, 시나리오 제작 툴을 개발하면서 군집 비행 시스템을 개선하고 보완하였다. 그 결과, 인텔은 월트 디즈니 월드 리조트에서 드론 300대를 가지고 군집 비행 시연을 성공하였으며, 최근에는 슈퍼볼 게임에서 드론 500대의 군집 비행을 통해 성조기를 표현하는 등 군집 비행을 시연하였다.

그림 3. 인텔의 군집 비행 사례



일본 MicroAd의 경우, Sky Magic이라는 군집 비행 시스템을 개발하여 드론 25대를 이용하여 후지산을 배경으로 일본 전통 음악과 어울려 군집 비행을 선보였다. 비록 실외 군집 비행 규모는 다른 나라에 비해 적었지만, 다양한 LED 표현을 할 수 있도록 드론을 직접 제작하였으며, 인텔과 같은 수준의 기술을 개발하기 위해 연구 중이다.

그림 4. MicroAd의 Sky Magic



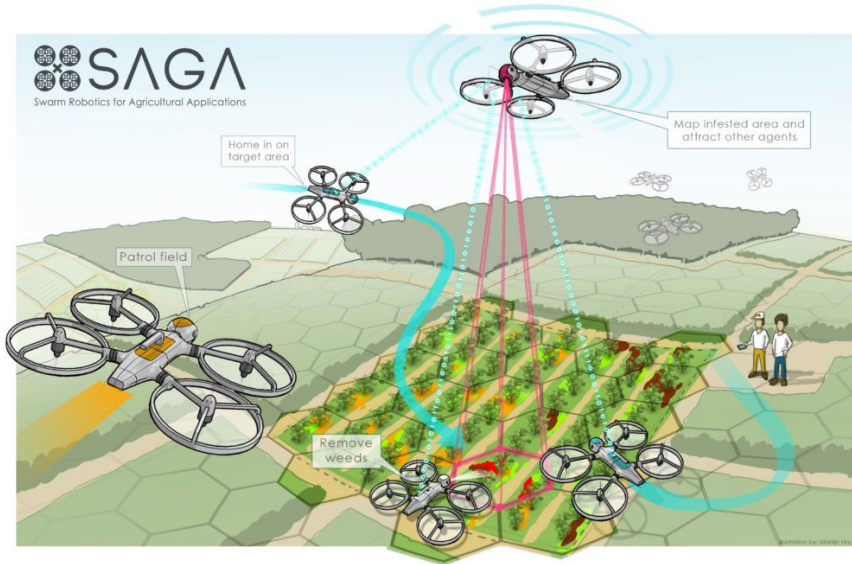
중국의 Ehang은 그동안 군집 비행에 대해서는 잘 알려져 있지 않았지만, 최근 미국이 기록하고 있던 동시 군집 비행 기네스북 기록인 500대를 넘어서, 1,000대의 군집 비행을 성공하였다. 참고로, Ehang은 CES에서 사람이 탑승할 수 있는 드론을 개발 중인 회사로 알려져 있다.

그림 5. Ehang의 군집 비행



민간에서는 군집 비행 기술을 문화 산업에 적용한 사례가 많지만, 농경 분야에 적용하는 시도도 이루어지고 있다. 최근 유럽연합은 농업 혁신을 이루기 위해 ECHORD++(The European Coordination Hub for Open Robotics Development) 프로젝트의 일환으로 SAGA(Swarm robotics for AGricultural Applications) 프로젝트를(SAGA)를 수행하였다. 프로젝트의 목적은 공중 군집 로봇을 통해 광역지역에서 정밀한 농업이 가능함을 실험적으로 검증하고자 하였다. 해당 시스템은 개별 드론에서 오류가 발생하더라도 집단의 힘을 빌려 센티미터(cm) 단위로 정확하게 농업 지도를 생성할 수 있다. 특히 드론은 아직 배터리 문제로 20~30분 정도만 비행할 수 있는데 이 시스템은 대형 농장의 경우 릴레이(Relay)로 군집 드론을 활용하면서 공백 시간 없이 임무를 수행할 수 있는 것이 특징이다.

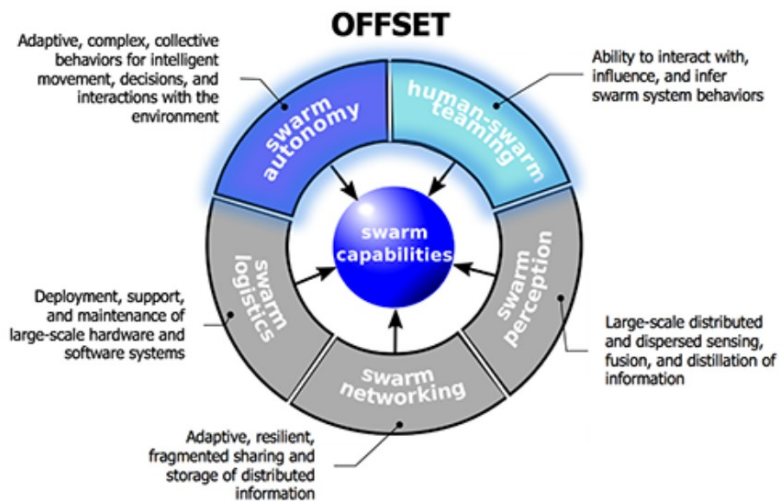
그림 6. SAGA 공중 군집 로봇



(출처: SAGA)

군에서는 군집 비행 기술을 다양한 목적으로 연구·개발하고 있다. 미국에서는 군집 비행 기술을 전장에서 활용하기 위해 미 국방성 방위고등연구계획국(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)이나 미 해군연구소(Office of Naval Research, ONR)를 중심으로 다양한 프로젝트를 진행하고 있다. DARPA 주관으로 추진 중인 그렘린(Gremlin) 프로젝트는 고정익 드론을 활용한 수송기 탑재 및 회수 가능 플랫폼을 개발하고 있으며 이를 정찰, 전자전 등의 임무에 사용할 계획이다. DARPA는 OFFSET(OFFensive Swarm-Enabled Tactics) 프로젝트(DARPA OFFSET)도 주관하고 있으며, 이 프로젝트 참여자들은 복잡한 도시 환경에서의 250대 규모의 군집 비행/지상 로봇을 활용하여 탐색, 지도 작성 등을 목표로 다양한 관련 기술과 체계를 개발·수립하고 있다. 또 다른 DARPA 주관 프로젝트 CODE는 사용자로부터 계속 명령을 전달받을 수 없는 환경에서도 UAS(Unmanned Aircraft System)들이 자체적으로 자신의 상태를 판단하고 대형을 유지하며 임무를 수행하는 자율성 높은 군집 비행 시스템을 만드는 것을 목표로 개발되고 있다. ONR 주관으로 개발 중인 LOCUST(LOW Cost Unmanned aerial vehicle Swarming Technology)는 선상/지상에서 발사된 30여 대의 군집 비행 로봇을 1명의 조종사가 조종하여 주어진 임무를 수행하는 것을 목적으로 한다.

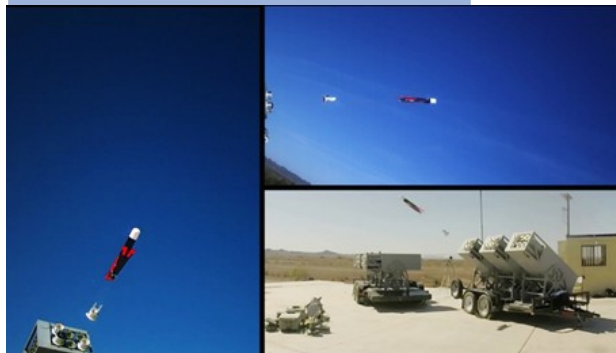
그림 7. OFFSET 자율 군집 비행 요소 기술



(출처: DARPA OFFSET)

미 해군은 LOCUST(Low-Cost UAV Swarming Technology) 프로그램의 일환으로 저가의 드론을 한 대가 아닌 다수의 군집 로봇 형태로 정해진 목표를 파괴력이 향상된 공격력으로 무력화하는 기술을 개발하였다(US Navy LOCUST). 저가의 군집 공중 로봇은 자율형 및 전장 상황 적응형으로 운용이 가능하며, 별도의 외부 지원 없이도 독립적으로 비행패턴을 스스로 결정하고, 보고할 수 있는 기술을 탑재하고 있다. 2015년 초반 Coyote 무인기 30대를 사용하여 발사와 군집 형성 시험을 수행하였다.

그림 8. 미 해군 LOCUST 발사대



(출처: US Navy LOCUST)

2. 국내 주요 개발 현황

국내에서도 군집 비행 기술의 중요성을 확인하고 다양한 분야에서 군집 비행을 연구하고 있다. 한국 항공우주연구원에서는 실내 군집 비행을 국내 최초로 개발하여 2013년 서울 ADEX(국제 항공우주 및 방위산업 전시회)에서 실내 군집 비행을 시연을 하여 많은 화제를 불러 모았다. 실내 위치 추정을 위해 모션 캡처를 활용하였으며, 다수의 드론이 군무를 수행하고, 큰 비행체에서 작은 비행체들이 이착륙을 하면서 임무를 수행하는 기술을 선보였다.

그림 9. 서울 ADEX 한국항공우주연구원 실내 군집 비행



(출처: SungTae Moon et al, 2013)

이후, 한국항공우주연구원에서는 실내 군집 비행에 이어 2016년부터 실외 군집비행에 관한 연구를 진행해왔고, 2018년에는 한국과학기술원에서 열린 국가과학기술자문회의에서 국내 최초로 30대 군집 비행을 선보였고, 2019년에는 삼일절 100주년을 맞아 국내 최초로 100대 드론 군집 비행을 성공시켰다(문성태 외 4인, 2016).

그림 10. 삼일절 100주년 기념을 위한 한국항공우주연구원 100대 군집 드론 쇼



서울대에서는 8개 로터가 링크에 장착된 ODAR(Omni-Directional Aerial Robot) 드론을 골격으로 하고, 줄로 연결되어 꿈틀거리며 비행하는 기계적으로 연결된 군집 로봇(Mechanically-Coupled Robot Swarm)인 LASDRA(Large-size Aerial Skeleton with Distributed Robot Actuation) 시스템을 개발하였다. 확장성(scalability)을 위하여 곤충거동모사 분산 임피던스 제어를 각 링크에 적용하였고, 다중 GNSS와 관성 센서, 구속조건을 부분적 집중형으로 융합 자율비행을 위한 5cm RMS 측위 오차를 얻었다(S. Park et al, 2019).

그림 11. 기계적으로 연결된 군집비행로봇 LASDRA 자율비행



III 실내 군집 비행

군집 비행을 운용하기 위해서는 운용자가 원하는 임무를 지상국 시스템에 전달하면 각각의 드론은 그 임무에 맞춰 정해진 개별 임무를 수행한다. 하지만, 다수의 드론을 동시 제어해야 하기 때문에 외부 환경에 강인한 제어 기술과 다수의 드론과 끊김 없이 메시지를 주고받을 수 있는 통신 기술이 필요하다. 마지막으로 가장 중요한 기술로, 드론 간의 충돌을 피하기 위해 각 드론의 정밀한 위치 인식 기술이 필요하다.

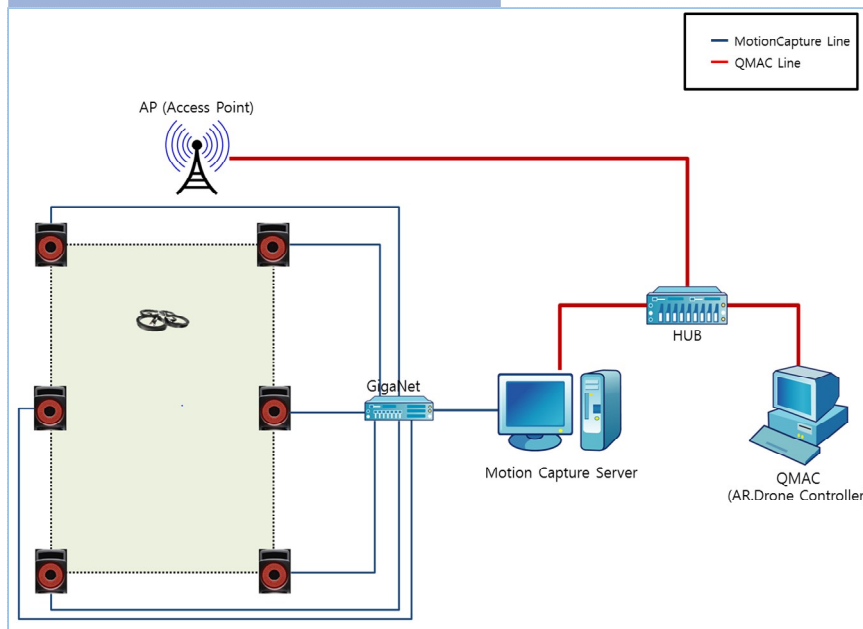
실내 군집 비행 연구는 군집 비행에서 필요한 세부 핵심 기술들에 대한 검증을 하고, 향후 실외 군집 비행 연구의 가능성을 확인시켜주는 연구로 수행이 되었다. 또한, 실내 GPS가 없는 환경에서 운용 가능한 시스템을 개발하는 목적으로 연구되었다. 실내 군집 비행 경우 바람, 비와 같은 자연환경에 대한 제약이 적기 때문에 실외 군집 비행에 비해 제어 기술에 대한 고려가 적지만, GPS 신호를 받을 수 없어 자체적으로 위치 인식이 어렵고, 간헐 있는 공간에서 운용하기 때문에 통신 주파수 혼선 등의 문제로 통신 문제가 자주 발생한다. 따라서, GPS 불용 환경에서 위치를 추정하기 위해 다양한 방식이 실내 군집 비행에 활용된다. 그 중 대표적인 방법이 모션캡처이다. 모션캡처는 1mm 이하의 정확도로 최대 1,000Hz까지 위치를 측정할 수 있는 시스템으로 초기에는 사람의 움직임 측정에 활용되었지만, 시험을 위해 실내에서 드론의 자세 및 위치 정보 획득용으로 많이 활용되고 있다. 모션캡처 기반의 실내 군집 비행에서는 드론의 위치 인식을 위해 드론에 마커를 붙여야 한다. 마커는 모션캡처 카메라와 같은 적외선 카메라에게 정반사를 시킬 수 있는 물질이 도포되어있는 구 형태의 표시장치로써 드론에 3개 이상의 마커를 붙여 각 마커의 위치 패턴을 통해 드론을 구분할 수 있게 된다. 이때 모션캡처 시스템은 보정작업이 완료된 3대 이상의 카메라에서 본 마커의 정보를 통해 삼각측량 방법으로 위치를 인식하게 된다.

그림 12. 마커를 부착한 드론



실내 군집 비행 시스템의 간략한 구조는 아래 그림과 같다. 모션캡처 카메라가 촬영한 영상은 이더넷을 통해 모션캡처 서버로 전달되고 이를 기반으로 위치 정보를 계산한다. 이후 드론 제어를 위한 지상국 시스템에 전달되면, 정해진 시나리오에 맞춰 정해진 위치로 이동하라는 명령을 와이파이를 통해 각각 드론에게 전달한다.

그림 13. 실내 군집 비행 시스템 구조



(출처: S Moon et al, 2013)

한국항공우주연구원에서는 실내 군집비행 연구를 위해 플라잉 플로어(Flying Floor) 환경을 설치하였다. 플라잉 플로어는 18m x 18m x 6.5m 크기의 비행 시험 공간으로 총 28대의 모션캡처 카메라가 설치되어있어서, 이 시스템을 통해 다수의 드론 위치를 매우 정밀하게 측정할 수 있다.

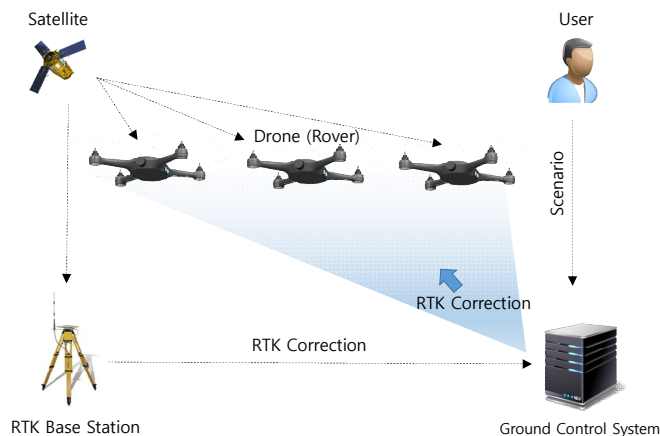
그림 14. 플라잉 플로어에서 수행 중인 실내 군집 비행 군무 장면



IV 실외 군집 비행

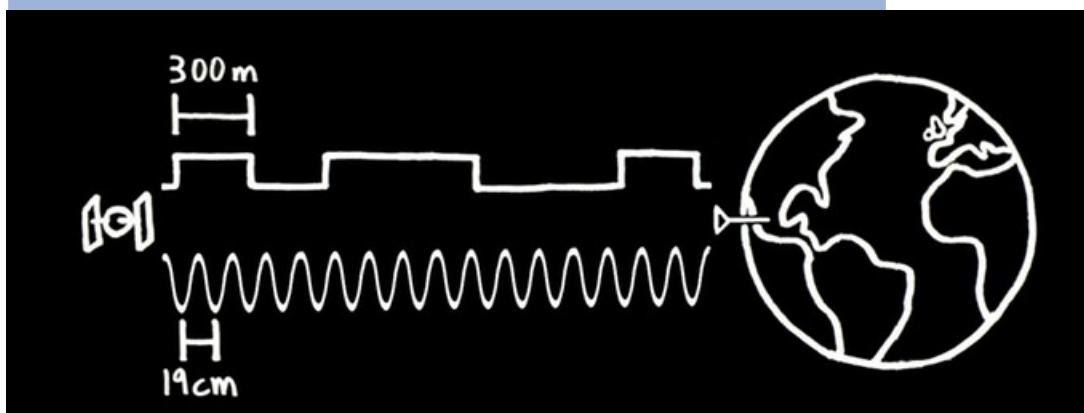
실외 군집 비행 시스템은 실내와 구조적인 측면에서는 유사하다. 다만, 모션캡처의 경우 직사광선이 있는 실외에서 사용할 수 없고, 매우 정밀하지만, 고가 측정 장비여서 비용적인 측면에서 넓은 지역을 커버할 수 없다. 또한, 모션캡처 특성상 드론의 위치를 측정하는 주체가 드론이 아닌 모션캡처 정보를 받는 지상국 시스템이다 보니, 드론의 이동 경로 및 명령을 지상국 시스템이 모두 보내주어야 하는 문제가 있다. 그 결과 드론의 대수가 많아지면 통신량도 그 대수에 정비례로 증가하기 때문에 운용 대수에 한계를 가질 수밖에 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 한국항공우주연구원에서는 군집 비행의 위치 추정을 위해 RTK-GPS를 사용하였다. RTK-GPS의 경우 DGPS와 달리 코드 처리 방식이 아닌 반송파 신호를 사용하는 방식으로 CDGPS(Carrier phase DGPS)라고도 한다. RTK-GPS가 동작하기 위해서는 Reference Receiver라는 Base Station을 지상에 설치하여 지상국 위치 좌표와 위성에 의한 좌표 차이값(위치 보정 데이터)을 취득하여 드론에 탑재된 GPS 수신기에 전달한다. 드론에 탑재된 GPS 수신기는 위성에 의해 취득한 좌표에 지상국으로부터 송신되는 위치보정 데이터(correction data)를 합성하여 현 지점의 정확한 좌표를 실시간으로 결정할 수 있다.

그림 15. RTK-GPS 동작 원리 및 실외 군집 비행 시스템 구성도



DGPS와 달리 RTK-GPS가 정밀할 수 있던 이유는 본 기고문의 목적에 벗어나 설명하지는 않지만, 간단하게 원리를 살펴보면 기존 코드 방식의 경우 신호의 구간이 300m인 반면, 반송파의 경우 19cm 밖에 되지 않아 정밀한 신호를 활용하여 삼각측량 기법으로 위치를 계산하게 되어, GPS에 비해 정밀한 위치를 측정할 수 있게 되는 것이다.

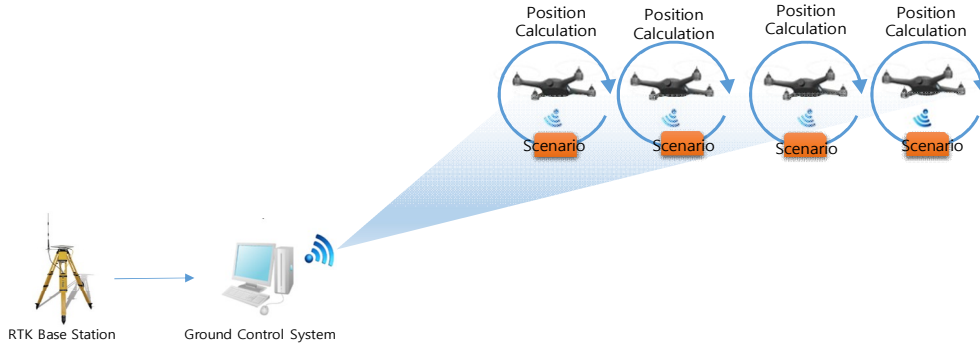
그림 16. 코드 방식의 GPS 주기와 반송파 방식의 RTK-GPS 주기 비교



따라서, RTK-GPS는 GPS에 비해 매우 정밀하게 cm급으로 위치를 추정할 수 있고, 위치를 인식하는 주체가 드론이기 때문에 지상국 시스템에서 드론에게 위치정보를 전달할 필요가 없다. 이러한 이유로, RTK-GPS는 군집 비행에서 활용하기에 매우 적합하다.

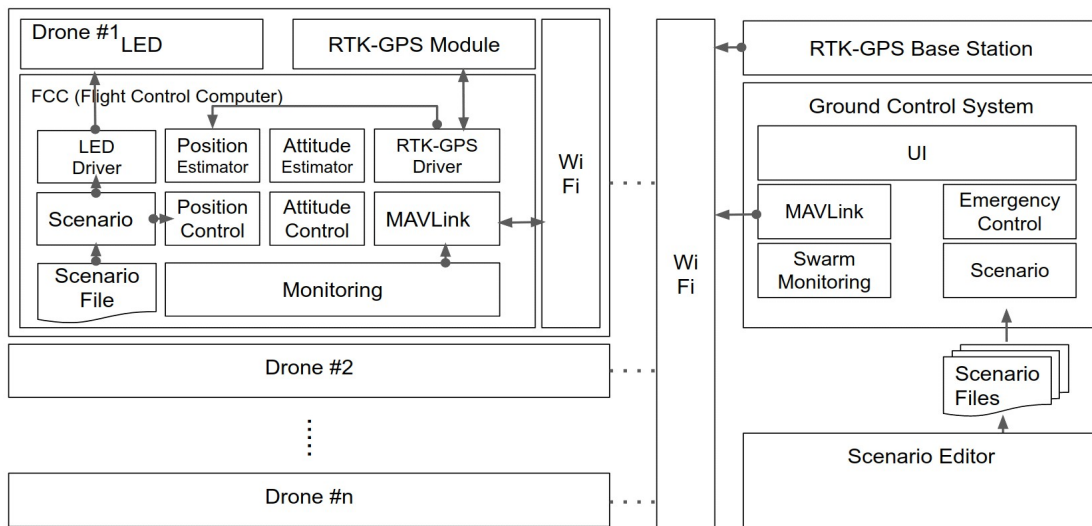
RTK-GPS 기반의 실외 군집 비행 시스템의 전체 구조는 다음과 같다. RTK-GPS를 이용하여 위치 추정을 위해 보정 신호를 브로드캐스트(broadcast)로 드론들에게 전달한다. 그리고, 이미 정해진 임무를 사전에 드론에 탑재함으로써 임무 정보를 드론에 전달하는 통신량을 없앴다. 그 결과, 실외 군집 비행에 필요한 데이터양을 대폭 줄이고 일정하게 변경하게 되어 대수와 무관하게 동작 가능한 시스템이 되었다.

그림 17. 드론-지상국 시스템 구조도



한편, 드론 내부와 지상국 시스템의 구조는 다음과 같다. 우선 드론과 지상국 시스템의 통신은 일반적으로 사용되는 WiFi를 사용하였고, 통신 프로토콜은 범용적으로 사용하는 MAVLink를 사용하였다. 드론 내부에 핵심 모듈인 비행 제어 컴퓨터는 오픈소스 기반의 PX4를 사용하여 개발하였으며, 내부 모니터링 모듈을 만들어 드론 상태를 실시간 체크하여 문제 발생 시 지상국 시스템에 전달하여 개별적으로 제어할 수 있는 구조로 개발하였다. 또한, 안정성 확보를 위해 RTK-GPS가 끊겼을 경우 GPS로 변경하는 모드 스위칭 알고리즘을 개발하여 보다 강건한 시스템으로 구축하였다.

그림 18. 군집 비행 시스템의 드론과 지상국 시스템 내부 구조



비행 시험 결과, GPS와 비교하여 최대 10cm 오차 내외로 운용이 가능하였고, 정확한 비행이 가능하여
편대 비행이 가능했다.

그림 19. (좌) GPS 기반 군집 비행, (우) RTK-GPS 기반 군집 비행 비교 시험



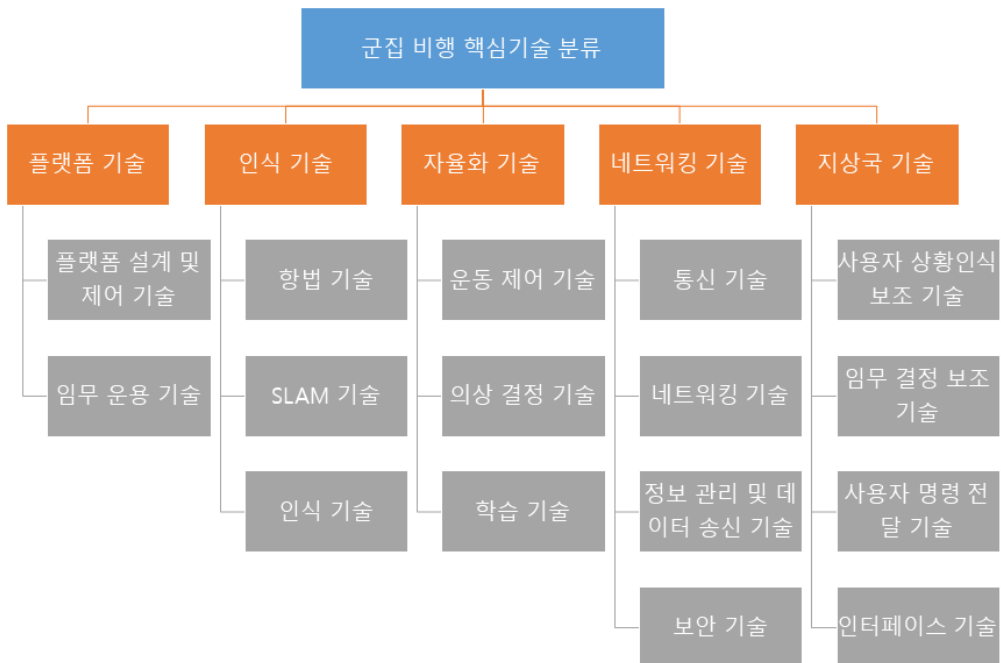
(출처: 문성태 외 4명, 2016)

V 핵심 기술 발전 방향

군집 비행 기술을 예술 문화 산업을 넘어 사회 안전망 등 보다 많은 분야에 활용하기 위해서는 보다 다양한 핵심 기술들이 필요하다. 군집 비행 발전을 위해 통신, 비행 제어, 위치 인식과 함께 컴퓨터 비전, 센서, 충돌 회피 등 다양한 분야의 기술들이 융합되어야 한다. 본 장에서는 앞으로 군집 비행 시스템 개발을 위해 어떠한 기술들이 융합되어야 하는가에 대해 설명하고, 어떤 분야에 집중하여 요소기술을 개발할 것인가에 대해 설명하고자 한다.

군집 비행 시스템을 발전시키기 위해 필요한 기술을 다양한 시각에서 분류할 수 있지만, 여기서는 플랫폼, 인식, 자율화, 네트워킹, 그리고 지상국 기술로 분류하였다(문성태 외 6명, 2019).

그림 20. 공중 군집 로봇 기술 트리



우선, 플랫폼 기술은 군집 드론을 운용하기 위해 필요한 드론 자체의 기술로, 회전익, 고정익, 혹은 이기종을 통합 운용할 수 있는 내부 시스템 제어기술과 및 임무 수행을 위한 센서와 같은 하드웨어 장비 기술을 말한다. 군집 드론은 하나의 단일 플랫폼을 이룰 수도 있지만, 하나의 임무 수행을 위해 다양한 드론들이 협업할 수도 있기 때문에, 군집 비행 플랫폼 설계 시 이러한 부분에 대한 반영이 필요하다. 이를 위해서는 공통된 개방형 구조의 시스템 개발이 필요하며, 재사용이 가능한 모듈 방식으로 플랫폼을 구축할 필요가 있다. 또한, 동종 부품에 대해서는 동일한 인터페이스를 개발하여 상호호환성이 확보될 수 있는 기술이 필요하다. 이를 위해 센서에 대한 정보를 어떻게 통합하여 관리할 수 있는가에 대한 표준화 방안도 연구되어야 한다. 또한, 운용 중인 드론의 파손 시 다른 드론이 대체하여 동작할 수 있는 매커니즘도 이 부분에서 연구가 되어야 한다.

인식 기술은 다수의 군집 비행 이동체를 군집 운용하는 항법기술과 서로 협업하여 현재 위치를 파악하고, 위험 요소를 인식하는 기술 등을 함축한다. 항법기술이란 일반적인 단일시스템의 항법기술과 비교하여 매우 높은 자유도와 정보 전달 특성 등으로 인하여, 상대 항법, 에이전트(Agent) 간의 충돌 회피, 정보 불일치와 불균형 등 다양한 관점들이 복합적으로 고려되어야 한다. 또한, 다수 항법 센서로부터 정보를 활용할 수 있으므로, 고성능의 단일 항법 센서를 활용한 항법 성능 대비 높은 정확도를 달성할 수 있다는 특징도 함께 가지고 있다. 이를 위해서는 다수의 공중 로봇을 이용하여 보다 효과적이고 정밀한 항법이 가능하도록 항법 센서 간 상호 협력하고, 융합할 수 있는 기술이 필요하다. 그뿐만 아니라, 군집 비행 이동체 중 일부 이동체에 고장이 발생하는 경우 이를 미리 인지하고 대체할 수 있는 기술 또한 필요하다. 현재 위치를 파악하는 기술로 GPS와 같은 직접적으로 위치를 추정할 수 있지만, GPS 불용환경에서는 직접적으로 위치를 추정할 수 없다. 이 경우 SLAM(Simultaneous Localization And Mapping) 기술을 이용하여 공간 내의 지도 및 현재 위치를 추정할 수 있다. 이 경우 군집으로 협조하며 위치를 추정하게 되면 미지의 환경을 단기간에 지도 및 현재 위치를 추정할 수 있어서 다양한 활용이 가능할 것으로 판단된다. 한편, 최근 딥러닝과 같은 인공지능 기술의 발전으로 객체 인식이 향상되었고, 이 기술을 드론 내부에 탑재하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 이용하게 되면 비협력적 충돌 회피에 활용이 가능하지만, 군집 비행에 활용하는 경우 집단 지능 능력을 학습시켜 보다 정확한 인식과 판단이 가능해질 것으로 판단된다.

자율화 기술은 편대 제어와 함께 동적으로 서로 간의 임무를 계획하고 수행하며, 군집 지능을 스스로 학습하여 더욱 효과적으로 임무를 완수할 수 있는 기술개발을 그 목표로 한다. 이 기술은 개별 로봇의 자율화를 넘어서 군집 전체의 자율화를 지향하는데 그 차별성이 있다고 볼 수 있다. 개별 개체에 직접적으로 운동 레벨 수준의

제어 명령을 보내는 개념은 군집 자율화라고 볼 수 없다. 즉, 군집 자율화 기술을 논의할 때에는 개별 개체는 스스로의 안정적인 비행을 위한 자율비행 능력을 갖춘 것으로 가정한다. 군집 자율화는 여기에 더하여 국지적인 정보를 바탕으로 상대적인 움직임을 제어하고, 궁극적으로는 군집 전체의 임무 성능 향상을 지향하는 기술을 말한다. 군집 자율화가 완성된 비행 로봇 군집은 인간이 매우 간헐적인 명령 확인만으로도 안정적으로 임무를 수행할 수 있다.

군집 운동 제어기술은 군집 내 개체의 움직임을 뉴턴 운동 법칙에 근거하여 표현하고 이들의 움직임을 제어하는 기술을 말한다. 비행 이동체 개체는 질점 또는 강체로 표현되며 기구학적 혹은 동역학적 방정식으로 그 운동이 표현된다. 이를 위한 필요 핵심 기술은 세부적으로 편대 제어, 군집 경로 계획, 이상 탐지 및 대응기술로 구분될 수 있다. 편대 제어는 각각의 비행 로봇이 주변에 있는 로봇들과의 상대적인 위치, 속도 정보를 바탕으로, 임무에 적합한 일정한 대형을 유지하고, 필요 시 대형을 적응적으로 변경하는 기술을 의미한다. 군집 경로 계획 기술은 각 개체가 서로 충돌을 피하며 이동을 위한 경로를 생성하고 이를 추종하는 기술을 말한다. 이상 탐지 및 대응기술은 군집 내 개체의 고장 혹은 외부의 사이버 공격 등에 의한 운동 상태의 이상을 탐지하고 편대 및 경로 제어 로직을 변경하여 적응적으로 대응하는 기술을 말한다.

군집 의사결정은 군집 내 개체를 임무를 수행하는 에이전트(Agent)로 보고 군집 전체적으로 수행해야 할 임무를 계획하여 이를 개별 개체에 할당함으로써 각각의 에이전트가 자율적인 행동을 통해 전체적인 임무가 완수될 수 있도록 하는 기술을 말한다. 이 핵심 기술은 세부적으로 동적 임무 계획, 동적 작업 할당, 건전성 관리기술로 나눌 수 있다. 공중 군집 로봇의 임무는 많은 경우 임무 환경의 불확실성이 크고, 상황인식이 동적으로 변화하는 상황에서 이루어지게 된다. 따라서 군집 전체로 혹은 그 부분이 수행할 임무 절차를 계획하고 수행 주체를 정하는 임무 계획기술은 변화하는 상황에 동적으로 적응할 수 있어야 한다. 임무 계획에 근거하여 개별 에이전트에게 개별 작업을 나눠주는 작업할당 문제 역시 동적으로 변화하는 환경적 요인을 고려하여 효과적으로 이루어져야 한다. 또한, 임무의 수행 상태, 기대되는 임무 성공률 및 임무 수행 개체의 임무 적합성 여부를 지속적으로 모니터링하고 관리함으로써, 임무의 건전성을 확보하는 기술 또한 매우 중요하다.

군집 자율화를 위한 대부분의 기존 연구들은 임무, 환경, 개체에 대한 물리적, 이론적 모델에 근거하여 제어 명령과 임무와 작업에 관한 의사결정을 수행하는 모델-기반의 방법론에 기인하고 있다. 이러한 모델-기반의 방법론은 불확실하고 동적인 임무 환경을 효과적으로 반영하는 데에는 한계가 있다. 따라서, 최근 급속하게 진보가 이루어지고 있는 데이터 기반의 학습 기법을 군집 자율화 분야에 적용되는 것에 대한 기대감이 커지고

있다. 학습의 대상과 활용 방식에 따라 이 핵심 기술은 운동 학습, 의사결정 학습, 임무 학습의 세 가지로 구분될 수 있다. 운동 학습 기술은 앞서 언급한 군집 운동 제어 문제를 데이터 기반의 방법론으로 해결하는 시도들을 포함한다. 예를 들어, 강화학습을 이용하여 불확실한 환경에서 편대를 최적으로 제어하는 기술, 딥러닝을 활용하여 충돌을 회피하고 경로를 생성하는 기술 등이 포함된다. 의사결정 학습은 임무와 작업 계획 문제를 데이터에 근거하여 해결하는 시도를 포함하며, 역시 강화학습과 딥러닝의 적용이 기대된다. 임무 학습은 군집 로봇들이 수행하는 임무가 데이터에 기반하여 추론하고 판단을 지원하는 경우의 학습을 말한다. 군집 로봇을 정보 획득의 목적으로 활용하는 경우, 획득된 데이터로부터 가치 있는 정보를 생성해 내는 기술 등이 포함된다.

네트워킹 기술은 각 공중 로봇 간 혹은 지상국 간의 정보 전달을 위해 배터리 사용을 최소화하고, 자연이 적게 전송하며, 데이터의 무결성 및 보안을 유지하는 방법에 관해 연구한다. 군집 비행 이동체 간의 정보 공유를 위해서는 서로 간의 네트워킹 기술이 필수적이다. 통신 네트워킹 구성을 위해서는 일반적으로 중앙 집중형 방식과 분산 네트워크 방식으로 구분할 수 있다. 일반적인 방식으로는 중앙 집중형 방식이 많이 활용되었지만, 이 경우 데이터 통신량이 분산되지 못해 한곳에 집중되는 병목 현상이 발생하므로 군집 로봇 시스템에는 적합하지 않다. 기존 단일 로봇의 경우 지상국과의 정보 전달을 위해 단일 네트워크망을 구성하고 1-hop으로 통신이 가능하지만, 다수의 로봇과 정보 공유를 위해서는 각 로봇과의 통신을 어떻게 효율적으로 진행할 것인가에 대한 연구가 필요하다. 특히 공중 군집 로봇의 경우 배터리의 제한으로 특정 로봇에 통신 전달이 집중되지 않도록 효과적으로 업무 할당을 위한 분배 기술이 필요하다. 이러한 효율성을 높이기 위해서 드론들이 서로 통신하고 협력하면서 자체적인 네트워크를 형성하는 UANET(UAV ad hoc Network) 연구가 활발히 진행되고 있다. 뿐만 아니라, 임무에 따라 어떠한 통신망을 사용할 것 인가에 대한 고려가 필요하며, 군집 비행 시스템의 무결성을 위해 데이터 보호 및 관리 기술이 필요하다. 이러한 이유로 임무를 수행하는 군집 비행 드론들은 접근 권한이 부여된 서버의 명령만을 수행하기 위해서 객체 상호 인증, 사용자 인증 및 키 관리 기능을 가지고 있어야 한다.

마지막으로 지상국 기술은 군집 드론의 전략 결정을 위해 직관적인 명령 전달 방법에 관한 연구를 목표로 한다. 군집 비행은 군집의 특성과 비행 이동체의 특성을 모두 갖고 있기 때문에 군집 비행 시스템용 HSI(Human System Interface)는 차별성을 가진다. 군집 비행 드론은 3차원 동작이 가능하며 군집 크기가 증가할수록 사용자가 수용해야 할 정보가 급격히 증가하고 명령 전달의 부담도 커진다. 따라서 기존 로봇에 주로 활용하는 태블릿이나 2차원 디스플레이 기반 HSI는 군집 비행 로봇의 성능을 최대한 끌어내는 데에 한계가 존재하고,

군집 비행 로봇을 최대한 활용하기 위해서는 기존의 HSI가 아닌 새로운 개념의 3차원 HSI가 필요하다. 군집 로봇은 단일 드론에 비해 정보량이 상대적으로 방대하기 때문에 정보를 어떻게 표현해야 할 것인가에 대한 고려가 필요하다. 군집 로봇의 전략 결정은 단일 로봇과 달리 다수 로봇의 행동을 결정해야 하므로, 매우 어려운 과정이다. 이를 위해서 의도 기반의 결정 보조 혹은 인공지능 기술이 필요하다.

V 결론

드론 산업의 발전으로 이제는 손쉽게 드론을 구할 수 있어서, 사진 촬영, 드론 레이싱 등 여가 활동에 드론이 활용되고 있다. 이와 함께 많은 가능성을 가지고 있는 드론을 활용하기 위해 정부 및 산업계에서는 사회 안전망 등 다양한 분야에 접목하여 다양한 결과물들이 창출되기 시작했다. 하지만 비행 가능 시간 및 영역 등 제약사항 때문에 드론이 할 수 있는 일에 제한이 있었고, 이러한 이유로 군집 비행 기술이 떠오르게 되었다. 처음에는 예상과 달리 예술 분야와 군집 기술이 접목되면서 드론쇼라는 새로운 시장을 창출하게 되면서 각광을 받게 되었다. 하지만, 점점 다양한 기술들과 접목이 되면서 군집 비행 기술의 가능성을 확인하게 되었고, 다양한 분야에서 융합하여 활용하려는 시도가 늘고 있다.

하지만, 군집 비행 기술이 발전하기 위해서는 통신, 제어, 상황 인식 등 다양한 기술이 더 필요하고 발전되어야 한다. 본 기고문에서는 현재까지 걸어진 군집 비행 기술에 대해 원리와 방법에 대해 설명하였고, 향후 군집 비행 기술의 발전을 위해 필요한 핵심 기술을 분류하여 세부 요소 기술들에 대해 상세히 설명하고, 그 발전 방향에 대해서도 모색하였다. 군집 비행 기술은 다양한 핵심 기술들이 어우러져야 비로소 이룩할 수 있는 시스템이기에 다양한 분야의 전문가들이 오픈 마인드로 협업해야 한다. 군집 비행 기술은 앞으로의 드론 기술 발전에 한 획을 그을 것으로 판단되기 때문에 많은 발전을 기대해 본다.

저자 _ 문성태(SungTae Moon)

• 학력

광주과학기술원 컴퓨터공학 석사
전남대학교 컴퓨터정보학부 학사

• 경력

現) 한국항공우주연구원 선임연구원
前) 국가보안기술연구소 연구원
前) 국방과학연구소 연구원

참고문헌

국내문헌

- 1) N. Kshetri and D. Rojas-Torres, "The 2018 Winter Olympics: A Showcase of Technological Advancement," in IT Professional, vol. 20, no. 2, pp. 19-25, Mar./Apr. 2018.
- 2) Mellinger D., Shomin M., Michael N., Kumar V. "Cooperative Grasping and Transport Using Multiple Quadrotors". In Distributed Autonomous Robotic Systems. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol 83. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013
- 3) ARS Electronica, <https://ars.electronica.art/futurelab/en/project/spaxels-klangwolke-quadrocopter>
- 4) SAGA, <http://lral.istc.cnr.it/saga/>
- 5) DARPA OFFSET, <https://www.darpa.mil/work-with-us/offensive-swarm-enabled-tactics>
- 6) US Navy LOCUST, https://www.navy.mil/submit/display.asp?story_id=86558
- 7) S. Moon, D. Cho, S. Han, D. Rew, E. Sim, "Development of Multiple AR.Drone Control System for Indoor Aerial Choreography," Trans. of The Japan Society for Aeronautical and Sapce Science (JSASS), Aerospace Technology Japan, pp 59-67, 2013
- 8) 문성태 외 4명, "RTK-GPS 기반 실외 군집 비행 시스템 개발", Journal of KIISE, Vol. 43, No. 12, pp. 1315-1324, 2016
- 9) S. Park, Y. Lee, J. Heo and D. J. Lee, "Pose and Posture Estimation of Aerial Skeleton Systems for Outdoor Flying", IEEE-ICRA 2019
- 10) 문성태 외 6명, "공중 군집 로봇 핵심기술 발전방향", 항공우주매거진, Vol 13, No. 2, pp. 65-74, 2019



02

무인비행체 개발 동향

이현범(경북대학교 전자공학부 조교수)
김표진(Simon Fraser University 박사후과정)

I 서론

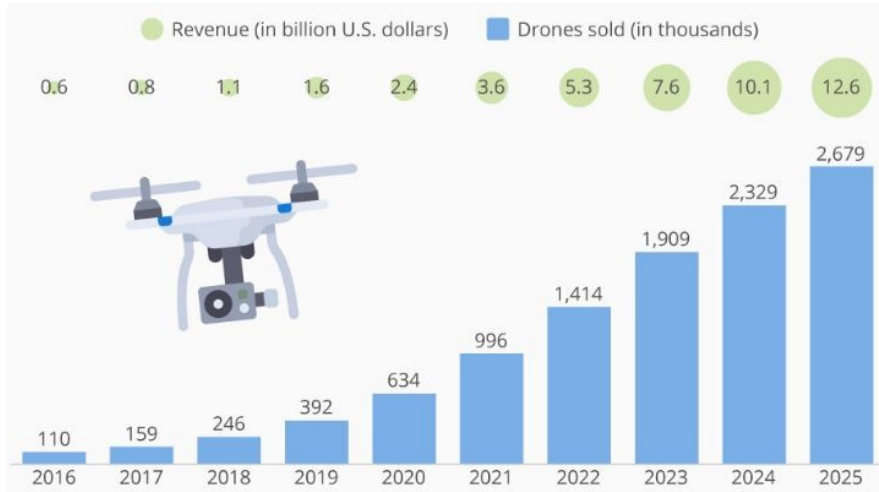
멀티로터 타입의 드론은 모터 직구동의 단순한 구동 방법과 다양한 장치와의 결합이 편리한 구조로 인해 많은 사람들의 관심을 받아 왔다. 기술의 발전과 더불어 드론 플랫폼은 단순한 취미형태의 RC 드론을 넘어, 감시 정찰이나 드론쇼, 건설 현장 등 다양한 현장에서 활용되고 있다. 드론은 원래 조종사 없이 무선전파의 유도에 의해 비행 및 조종이 가능한 비행 플랫폼으로, 고정의 비행기나 회전익 모양의 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle)를 모두 포함하는 개념이지만, 본 고에서는 최근 들어 사용빈도가 급증하고 있는 멀티로터 형태의 플랫폼에 대한 시장 동향 및 기술 분석을 수행하였다.

1.1 자율비행 드론의 시장 동향

2010년대에 이르러 싱글보드 컴퓨터(Single board computer)의 소형화와 영상처리 기술의 발달로 인해, GPS 및 영상 센서를 기반으로 스스로 위치를 추정하며 비행하는 자율비행 드론의 개발이 가속화되었다. 현재의 드론 플랫폼은 농약 방제, 항공 촬영, 우편물 배송 등 단순 업무를 넘어서 재난현장/건설 현장을 위한 자율 탐색 및 지도작성, 이동통신 네트워크 서비스 확대를 위한 플랫폼 및 미래형 자율비행 개인용 비행체 등 더욱 다양한 영역으로 활용성을 확장하고 있다.

통계 사이트인 Statista에 따르면 2019년 기준, 상업용 드론 수는 39만 2천 대로 16억 달러 가치로 추정되며, 2025년까지 매년 20~50만 대 증가할 것으로 예측하였다(그림 1).

그림 1. 글로벌 상업용 드론 시장 규모



(출처: Statista)

이와 더불어, 국토교통부에서 발표한 자료에 따르면, 드론 플랫폼의 하드웨어 제작 시장은 과거 군수/취미용 제품 위주의 드론 산업뿐만 아니라 촬영용/정밀 지도 작성용 등 사업용 드론 시장의 급격한 성장이 예상된다고 보고하였다. 특히, 중국의 DJI를 필두로 하는 취미용 드론 시장은 2022년 이후 성장세가 둔화할 것으로 예상되며, 다양한 활용·서비스 가능성을 바탕으로 한 사업용 드론 분야가 주도할 것으로 예상하였다(연평균 34.1%). 그러나 현재의 사업용 드론 시장은 농·임업(41%) 및 영상촬영(19%) 분야가 주도하고 있으나, 건설/통신망/에너지 분야 등으로 더욱 다변화될 것이라 예상하였다. 따라서 향후 사업용/군수용 드론의 비중이 증가할 것이며, 이를 중심으로 더욱 고도화된 인공지능 기반 자율비행 드론의 개발이 필요하다.

그림 2. 세계 드론제작 시장 전망

< 세계 제작시장 전망 (단위: 억불, 美 Teal Group, '17) >

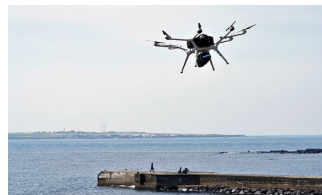
분야		'16	'19	'22	'26	성장률(%)
민수	취미용	22.0	36.0	42.8	47.3	7.9
	사업용	3.8	14.3	37.9	70.8	34.1
	소 계	25.8	50.3	80.7	118.1	16.4
군 수		29.9	72.1	93.9	103.1	13.2
합 계		55.7	122.4	174.6	221.2	14.8

(출처: 국토교통부 드론산업 발전 기본계획)

1.2 드론 물류 - 비행 매니플레이션(manipulation) 시스템

사업용 분야의 드론 활용 사례 중 가장 대표적인 것은 드론을 활용한 물류 서비스 분야이다. 물류 드론은 기존의 항공 촬영, 정찰 등의 수동적인 임무에서 벗어나 화물과 직접 결합하여 운송하는 더욱 적극적인 기법이라 할 수 있다.

그림 3. (좌) 아마존 Prime air, (중) 구글 자회사 Wing Aviation의 물류 드론, (우) 제주도 드론 실증 도시의 물류 드론



(출처: (좌) Amazon / (중) Wing Aviation / (우) 제주도민일보)

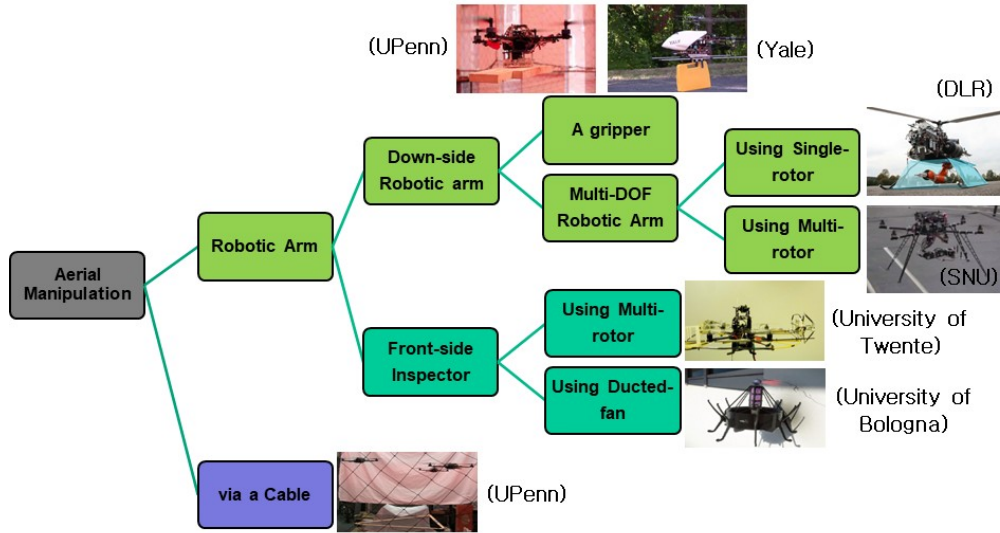
2015년 아마존에서 드론 배달 서비스가 시험 서비스된 이후, 많은 나라에서 드론을 이용한 배송서비스를 개발하고 있다(한경수 et al, 2020). 현재 세계 각국에서 시행되고 있는 드론 물류 서비스는 아래와 같이 정리할 수 있다.

표 1. 주요 국가 드론 물류 서비스 현황

국가	내용
미국	2019년 6월, 미국 라스베이거스에서 아마존의 새로운 드론 배달 시스템인 '프라임 에어(Prime Air)' 발표
	UPS(United Parcel Service)의 드론 사업 부문 자회사인 UPS Flight Forward Inc.는 2019년 10월 미국 FAA로부터 상업용 드론 운영을 위한 Part 135 승인 획득
스위스	2017년 3월부터 미국의 드론 업체인 Matternet과 공동으로 드론 우편배달 서비스를 진행. 하지만 2019년 1월과 5월에 배송 중이던 드론이 추락하는 사고가 발생하면서 서비스 중단
일본	2018년 11월 일본우편은 드론을 이용한 배송 서비스를 일본 최초로 시작. 방사선 수치가 높은 위험지역인 후쿠시마 나미에 우체국까지 약 15분 만에 이동
호주	구글의 자회사 Wing Aviation은 캔버라 북부 5개 지역에서 커피, 베이커리, 식료품, 의약품 등을 배송하는 배달 서비스를 진행
중국	알리바바 계열의 온라인 음식 배달업체 에러머(Ele.me)는 2018년 9월부터 드론 음식 배달 서비스를 시험 운영
한국	CJ대한통운은 2016년 1월부터 2017년 12월까지 2년에 걸쳐 드론 안전성 검증 시범사업을 실시
	'2020년 제주도-두산 모빌리티 이노베이션' 드론 이용해 도서주민에 마스크 전달

세계 각국에서 다양한 물류 드론 서비스를 출시하고 있음에도 불구하고, 물류 드론은 새와 같이 빠르게 이동하는 소형의 동적 장애물을 인지하여 회피하기 힘들다는 점으로 인해 주변 사물과 충돌할 수 있고, 위치추정 오차 등으로 인해 주변 사물과 부딪혀서 추락할 가능성이 있다. 특히, 한국과 같이 빌딩·아파트 등 고층 건물이 많은 지역에서는 GPS만을 이용한 비행이 더욱 어렵다. 추락 가능성을 대비하기 위해 드론용 낙하산을 개발하는 등 다양한 안전 관련 제품이 개발되고 있으나, 여전히 존재하는 추락 가능성 및 안전사고 등으로 인해 물류 서비스는 일부 지역에 국한되어 이용되고 있다.

그림 4. 화물 운송을 위한 비행 매니플레이션의 종류



(출처: 서울대학교)

현재 드론을 위한 다양한 장애물 회피 기술이 개발되고 있으며, GPS뿐만 아니라 영상을 활용한 위치추정기술도 개발이 가속화되고 있으므로 드론 물류 서비스 산업은 더욱 커질 것으로 예상된다. 또한, 현재의 물류 드론은 드론과 그리퍼(gripper)가 결합된 형태로 주로 개발되어 서비스되고 있으나, 현재 케이블을 이용한 협업 운송 기법이나 다자유도 매니플레이터를 장착한 드론의 공중작업기술과 같은 다양한 기술들이 연구되고 있으므로(그림 4), 드론은 물류 서비스를 넘어서, 교량 조사 시료 채취, 고층 빌딩 관리 등 더욱 다양한 분야에서 활용될 것으로 예상된다.

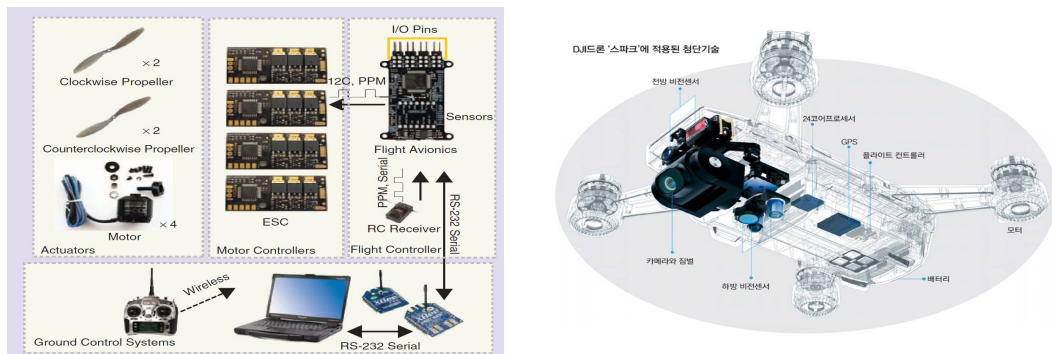
II 자율비행 드론 시스템 구성 및 핵심 기술

2.1. 드론 시스템 구성

멀티로터 형태의 드론은 복잡한 기어박스를 사용하여 프로펠러를 회전시키는 회전의 항공기와 달리 작은 4개의 모터에 직접 결합된 프로펠러를 회전시켜 비행하는 형태이다. 이러한 모터 직구동 방식은 복잡한 기어박스로 인해 발생하는 제조상의 문제를 해결하였고, 또한 수학적 모델링이 간단해진다는 장점으로 인해 2000년대 이후 관심이 크게 증가하였다.

멀티로터 타입의 드론은 복수개의 모터와 모터를 제어하기 위한 ESC(Electrical Speed Controller), 프로펠러, 자세제어를 위한 항법 시스템만 있으면 손쉬운 제작이 가능하다(그림 5 좌). 2010년부터 본격적으로 시작된 PX4와 같은 오픈소스 기반의 비행 제어 시스템으로 인해 누구나 드론 시스템을 개발할 수 있게 되었고, 이를 통해 드론의 대중화가 더욱 앞당겨지게 되었다.

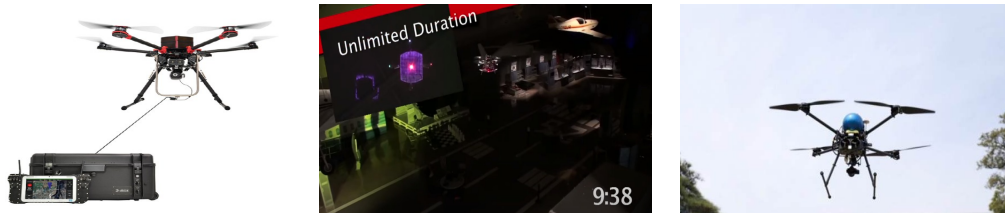
그림 5. (좌) 쿼드로터 하드웨어 구조, (우) 중국 DJI 드론에 탑재된 센서



(출처: (좌) H. Lim et al, 2012 / (우) 매일경제 Biz Focus)

최근 들어서 컴퓨터와 센서의 성능이 고도화되고 소형화됨에 따라, 이전보다 더욱 높은 수준의 비행성능을 가진 취미용 드론이 출시되고 있다. 개인 촬영용 드론으로 인기를 끌고 있는 DJI의 Mavic Mini 제품의 경우 249g의 드론 안에 장애물 회피를 위한 전방 카메라, 안정적인 비행을 위한 하방 비전 센서, 고도센서, GPS 센서, 및 연산을 위한 온보드(on-board) 컴퓨터 등이 탑재되었다(그림 5 우). 하지만 드론에 다양한 센서와 고성능의 온보드 컴퓨터가 탑재될수록 증가한 전력소모량으로 인해 비행시간은 감소 될 수 있다. 시중에 출시되는 취미용·연구용 드론 중 일반 배터리를 사용한 드론의 비행시간은 정지 비행 상태에서 최대 30분으로 보고되고 있다.

그림 6. (좌) 유선충전 드론, (중) 연료전지를 이용한 드론, (우) 무선충전 방식의 드론 충전



(출처: (좌) AirMast / (중) PowerLight Technologies / (우) MetaVista)

짧은 비행시간 문제를 해결하기 위한 다양한 형태의 멀티로터 드론이 출시되고 있다. 대표적으로는 유선 충전 드론(그림 6 좌)의 형태로, 지상에 있는 전원공급장치와 연결된 파워 케이블을 통해 전력을 전달받는 방식이다. 이러한 방식은 고정된 위치에서 비행하며 촬영이나 도로상황을 감시하는 임무에 적합한 구조이다. 유선충전 방식 외에도, 무선충전 방식이나 수소연료전지를 이용한 드론 등이 개발되고 있다. 무선충전 방식은 레이저나 유도코일을 이용한 충전방식으로 임무 수행 배터리 충전을 위해 지정된 장소에 와서 무선충전 후 다시 임무를 수행하는 구조이다. 이러한 무선충전 방식은 유선충전 방식에 비해 넓은 임무반경을 가질 수 있다는 장점이 있다. 2010년 PowerLight Technologies는 레이저를 이용한 무선 충전방식을 통해 멀티로터 드론의 12시간 30분 비행에 성공하였다.

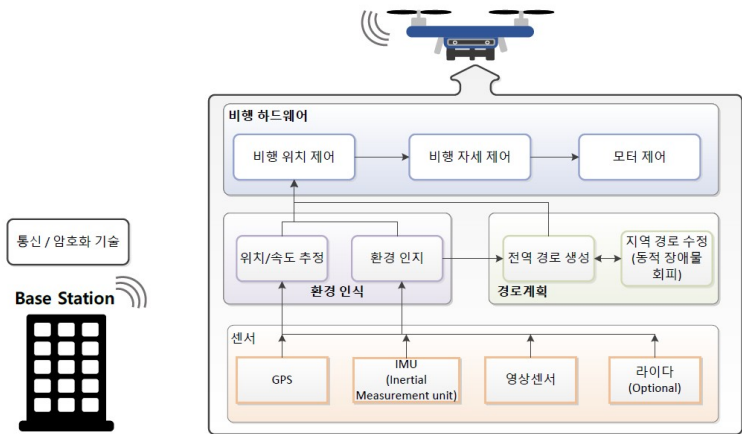
최근에는 수소연료전지를 활용한 드론의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 2019년 한국의 MetaVista는 800W급의 수소연료전지를 장착한 멀티로터를 개발하여 12시간 7분 비행에 성공한 바 있으며, 두산 모빌리티 이노베이션(Doosan Mobility Innovation)은 드론용 연료전지 파워팩(DP20)을 개발하였다.

2.2 자율비행 드론 핵심 기술

무인기의 자율 비행시스템이 주변 환경을 인지하고 스스로 임무를 수행하기 위해서는 다중 센서 융합, 환경 인식, 경로 계획 및 수정, 그리고 하드웨어 제어의 성능의 개발이 필수적이다(그림 7). 환경 인지를 위해서 카메라, 라이다(LiDAR, Light Detection and Ranging) 센서 등을 활용하여 환경 정보를 인식하고, 장애물이나 목표물을 탐지한다. 경로 계획기술은 주변에 존재하는 장애물을 회피하고 목표지점까지 충돌 없이 비행하기 위한 기술이며, 비행 제어기술은 바람, 시스템 모델링 오차에 관계없이 주어진 경로를 정확하게 추종하기 위한 핵심 기술이다. 복수의 드론 비행을 위해서는 드론-드론, 드론-지상국 시스템 간의 통신 기술이나, 임무 수행의 안정성 향상을 위한 통신 암호화 기술, 착륙 패드를 인식하고 안정적으로 착륙하기 위한 기술 등이 필요하다.

멀티로터 타입의 드론에 대한 제어기술은 2000년대 초반 PID제어기와 LQR(Linear quadratic regulator)과 같은 기존의 제어기술을 이용하여 4개의 모터를 구동하여 비행하는 멀티로터에 적용하기 위한 연구로부터 시작되었다. 이후, 미국의 MIT, 펜실베니아 대학 및 스위스 취리히 연방 공과대학 등을 중심으로 다양한 제어알고리즘의 개발이 가속화되었고, 개발된 제어기들이 오픈소스로 공개되어 다양한 곳에서 이용되고 있다. 현재의 시점에 봤을 때, 바람이 매우 강하게 부는 상황 등 일부 극한의 상황을 제외하고는 제어기 개발에 대한 이슈는 크지 않다. 이러한 관점에서 본 고에서는 제어기술을 제외한 위치추정기술 및 경로 계획 기술에 대한 분석을 수행하였다.

그림 7. 자율비행 드론의 핵심 기술



III 자율비행 드론 기술 연구 동향

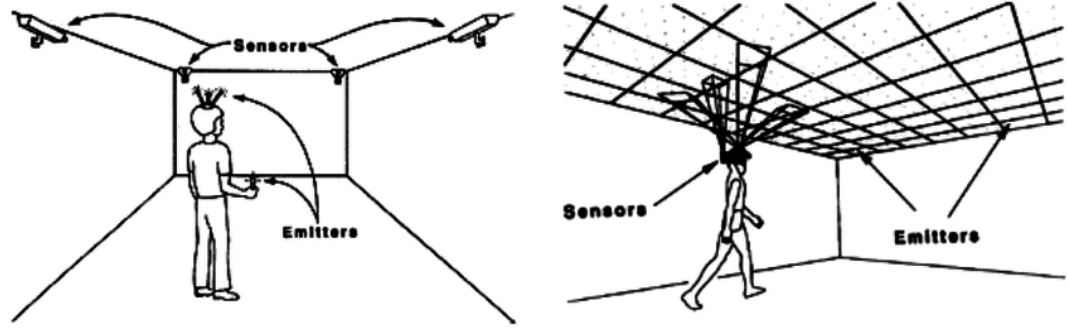
3.1. 항법기술(GPS, 시각)

드론에게 항법이란 지도 혹은 3차원 공간상에서 자기 자신이 정확히 어디에 위치해 있는지 파악하는 기술로써, 결국 “Where am I?”라는 질문에 답을 하는 기술이다. 대부분의 무인 드론 및 멀티로터 타입의 드론은 항공 촬영, 물류 배송, 야외 탐사 등과 같은 실외에서의 활동을 가정하기 때문에, 인공위성 기반 항법 시스템인 Global Navigation Satellite System(GNSS) 기반 항법이 주된 자율 항법 방법으로 사용되어왔다.

최근 들어 컴퓨터의 소형화, 경량화, 그리고 센서 융합 기술들의 발전으로 인해, 드론에 탑재된 영상 및 관성 항법 센서와 같은 온보드 센서만을 사용하여 드론의 실내 자율 항법이 어느 정도 가능해졌다. 특히 영상-관성 항법 센서를 기반으로 한 온보드 센서 기반 3차원 위치추정 기술은 드론의 실내 자율 항법을 위한 핵심 기술일 뿐만 아니라, 증강/가상 현실에서도 사용자의 3차원 위치를 추적하기 위해 반드시 필요한 기술 중 하나이다. 이러한 중요성으로 인해, 온보드 센서 기반 3차원 위치추정 기술들은 현재 전 세계적으로 기업, 국가 연구소 및 학교에서 매우 활발히 연구·개발되고 있다.

멀티로터 타입 드론의 자율 항법 기술은 크게 위성과 같이 외부의 인프라가 필요한 항법 기술(Outside-in Tracking), 그리고 드론에 탑재된 자체 센서들만을 이용하는 온보드 센서 융합 기반 항법 기술(Inside-out Tracking)로 나눌 수 있다(그림 8).

그림 8. (좌) Outside-in Tracking 방식, (우) Inside-out Tracking 방식



(출처: T. Mazuryk et. al. 1996)

3.1.1. Outside-in Tracking 기법(GNSS, VICON 등 외부 장치 기반)

미리 사람에 의해 설치된 외부의 인프라(infra)를 기반으로 드론의 현재 3차원 위치를 측정하는 기술로써, 실외에서는 GNSS 기반 위치 측위 기술이 주로 사용되며, 실내에서는 주로 모션캡처 장비를 사용한 위치 측위 기술이 사용되고 있다.

Outside-in Tracking 기법의 경우, 사전에 설치된 장비(ex. 위성, 모션캡처 카메라 등)가 지원하는 활동 범위 내에서는 매우 안정적이고 누적 오차(drift error) 없이 상대적으로 정확하게 드론의 3차원 위치를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 미리 사람에 의해 드론의 예상되는 활동 범위에 따라 사전에 인프라가 설치되어야 하므로, 제한된 공간에서만 위치 측위 시스템 운용이 가능하며, 만약 설정된 활동 범위를 벗어나거나 실내로 들어와 위성의 측정 신호가 약해질 경우 위치추정 정확도가 급격히 떨어지며 사용이 불가능하다는 단점이 존재한다.

1) GNSS 기반 위치 측위 방법

그림 9. (좌) 상용 GNSS 센서 모듈, (우) RTK GNSS를 이용한 군집 드론 비행



(출처: (좌) 3DR (우) Intel)

전통적으로 수많은 드론은 지구 주위 궤도를 돌고 있는 인공위성 시스템을 이용해 다수의 위성이 발신하는 전파를 이용하여 비행하는 드론의 실외 위치를 측정하였다. 이렇게 수신된 위성의 위치정보 및 전파 속도를 기반으로 한 삼각측량법을 통해, 지구상에서 드론의 3차원 위치정보를 계산할 수 있다. 대표적으로 미국의 Global Positioning System(GPS), 중국의 BeiDou Navigation Satellite System(BDS), 러시아의 GLONASS, 유럽의 Galileo가 상용 GNSS 센서에 널리 사용되고 있다.

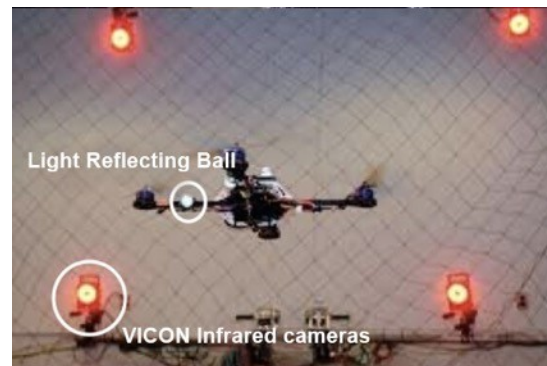
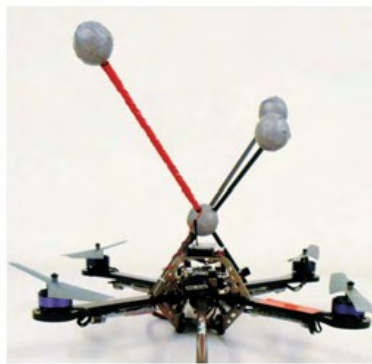
GNSS 기반 방식은 온보드 센서 융합 기반 방식과 다르게 누적 오차가 없어 시간이 지남에도 드론의 위치추정 오차가 누적되지 않는다는 장점이 있다. 하지만 정밀도는 위성 신호 수신 환경 및 실외/실내에 따라 수 미터에서 수십 킬로미터까지 변하며, 초기 위성을 발견하기까지의 시간이 오래 걸릴 수 있고, 위치 측정 주기가 수 Hz 수준으로 낮다는 단점이 존재한다(홍유경 et al, 2019). 일반적으로 소형 드론에 탑재된 GNSS 상용 센서의 실외 위치 측정 오차는 최소 5m 이상으로 알려져 있으며, 이로 인해 다수의 드론을 활용한 정밀 임무 비행 수행 시, 드론 간 충돌 확률이 높아져 군집 드론 비행운용에 어려움을 겪어왔다.

최근 기존의 GNSS보다 훨씬 더 정확한 Real-Time Kinematic(RTK)-GNSS 기술의 발전으로, 실외에서도 수 센티미터급의 정확도를 가진 드론의 3차원 위치 측정이 가능해졌다. 이러한 RTK-GNSS 기술의 높은 정확도를 이용하여, Intel, EHang, 유비파이 등의 국내외 많은 상용 드론 업체 및 기업들은 다양한 군집 비행 드론쇼를 시연한 바 있다(그림 9 우). 하지만 기존의 GNSS 기법과는 다르게, RTK-GNSS 기반 위치 기법의 경우 높은 정확도를 획득하기 위해 지상에 이를 위한 추가적인 기준점(base stations)이 설치되어야 하며, 기준점과의 거리가 멀어질수록 위치추정 정확도가 떨어진다는 단점이 존재한다. 또한, RTK-GNSS 구축비용도 기존 GNSS 센서 대비 수십~수백 배에 이를 정도로 비싸다.

2) OPTICAL MOTION CAPTURE SYSTEM 기반 위치 측위 방법

모션캡처 기반 드론의 3차원 위치 측정 기술은, 비행하고자 하는 드론의 3차원 활동 범위를 고려하여 사전에 적외선 카메라를 실내 벽면 및 천장에 설치한 후에, 위치를 측정하고자 하는 드론에 적외선 반사 마커를 붙이고, 이 마커들의 위치를 실시간으로 추적함으로써 드론의 3차원 위치를 측정한다(그림 10).

그림 10. (좌) 드론에 부착된 적외선 반사 마커, (우) 모션 캡처 장비를 이용한 자율비행



(출처: Guillaume Ducard et al, 2009)

적외선 불빛이 나오는 적외선 카메라로 드론에 부착된 적외선 반사 마커를 촬영한 후, 이들 마커의 영상 내 2차원 위치를 조합하여 모션캡처 소프트웨어가 3차원 데이터로 변환하는 과정을 통하여 드론의 3차원 위치정보를 매우 정확하게 측정할 수 있다. 대표적으로 VICON, OptiTrack의 모션캡처 장비가 널리 사용되고 있다.

위치추정 정확도는 수 밀리미터에 달할 정도로 매우 높은 정확도를 보장하며, 위치 측정 주기 또한 200Hz 이상으로 매우 빠른 위치 갱신 주기를 갖고 있다. 하지만 사전에 적외선 카메라가 설치된 장소에서만 사용할 수 있으므로, 처음 방문하는 곳이나 복잡한 환경에서의 사용이 불가능하며, 적외선 카메라, 마커 및 모션캡처 소프트웨어 등의 모션캡처 환경 초기 구축비용으로 수백~수천만 원 이상이 필요하므로, 주로 기업 연구소 및 대학교 연구실과 같은 연구 기관 및 학교에서만 제한적으로 사용되고 있는 실정이다.

3.1.2. Inside-out Tracking 기법(카메라, IMU, 라이다 등 온보드 기반)

어떠한 외부 도움 없이, 드론 자체에 탑재된 온보드 센서(ex. 카메라, 기압계, 라이다, 관성 항법 장치 등)만을 사용하여 공간상에서 드론의 3차원 위치를 측정하는 기술로써, 사용되는 센서 조합 및 융합 알고리즘에 따라 다양한 센서 융합 기술이 개발돼 왔다.

Inside-out Tracking 기법의 경우, 사전에 미리 사람에 의해 인프라가 설치될 필요 없이 실시간으로 드론에 탑재된 온보드 센서들로부터 측정되는 센서 값만을 사용해서 위치추정이 가능하므로, 이론적으로 어떤 환경에서나 제한 없이 위치 측위가 가능하다는 장점이 있다. 하지만 각 센서별 특징 및 한계, 그리고 사용되는 알고리즘의 세팅 값과 같은 다양한 요소들로 인해 정확도, 정밀도 및 안정성이 크게 좌우된다. 또한, Outside-in Tracking 기법에 비해 불안정하며, 3차원 위치추정 오차가 시간이 지남에 따라 누적될 수 있다는 단점이 존재한다.

그림 11. (좌) Skydio 드론 항법 센서, (중) 구글 ARCore, (우) Oculus QuestVR



(출처: (좌) Skydio / (중) 구글 / (우) Oculus)

온보드 센서, 특히 카메라와 Inertial Measurement Unit(IMU)을 사용하여 자기 자신의 3차원 위치 및 주변 환경을 추정하는 기술인 Visual-Inertial Odometry(VIO) 및 Simultaneous Localization and Mapping(SLAM)은 소형 무인 드론의 실내 자율 항법, 가상/증강 현실 등에서 반드시 필요한 핵심 기술 중 하나로써, 그 중요성으로 인해 전 세계적으로 많은 대기업 및 학교에서 연구가 진행되고 있다(그림 11). 이러한 VIO 및 SLAM 기술들은 최근 15년간 급격히 연구·개발이 진행되었기 때문에, 아직까지 이렇다 할 합의된 표준 항법 알고리즘이 정립되지 않았고, 각 기업 및 학교별로 독자적으로 연구·개발이 이루어지고 있다.

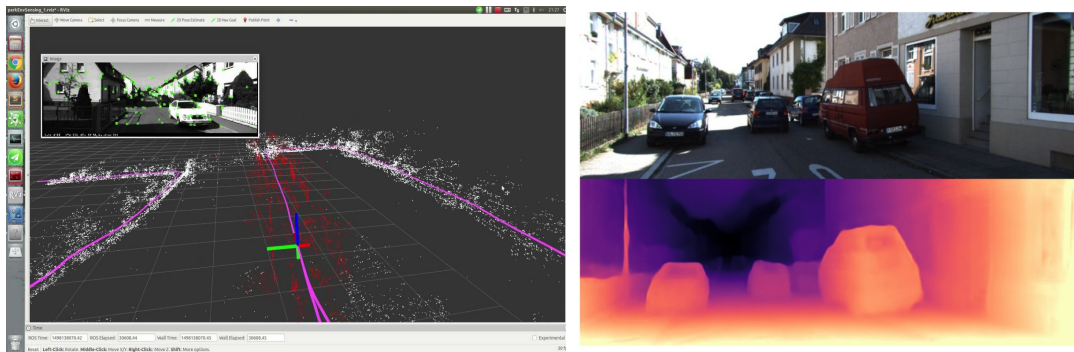
소형 무인 드론에는 수많은 센서가 탑재되어 있지만, 그중에서도 특별히 자율 항법 목적으로 자주 사용되는 카메라, IMU 및 레이저 스캐너(LiDAR) 센서들을 중심으로 각 센서 조합별 대표적인 특징 및 장·단점을 정리해보았다.

1) 단안 카메라 기반 위치 측위 방법

단안 카메라 기반 위치 측위 방법은 한 대의 카메라만을 사용하여 자기 자신의 3차원 위치 및 자세를 추정하는 기술로써, 2004년 Visual Odometry(D. Nistér et al, 2004) 및 2007년 MonoSLAM(A. Davison et al, 2007)에 의해 본격적으로 연구가 이루어진 이래로, 최근 15년간 학계 및 산업계에서 활발한 연구·개발이 이루어져 왔다. 크게 영상 내 특징점을 검출하고 추적하여 이를 기반으로 위치를 추정하는 방식과 영상 내 이미지 밝기를 직접 사용하여 위치를 추정하는 방식으로 나눌 수 있다. 개발의 용이성 및 위치추정 정확성, 강건성으로 인하여 영상 내 특징점 기반 방식이 널리 사용되며, PTAM(G. Klein et al, 2007), ORB-SLAM(R. Mur-Artal et al, 2015) 알고리즘이 높은 강건성과 위치추정 정확성으로 인해 학계 및 산업계에서 큰 주목을 받았다.

단안 카메라 기반 3차원 위치 측위 기술은 카메라 한 대만을 사용하므로, 다른 센서들과의 시간 및 공간 정합을 따로 수행할 필요가 없으며, 다른 센서에 비해 상대적으로 저렴하다는 장점이 존재한다. 하지만 단안 카메라의 물리적 한계인 스케일 모호성(Scale Ambiguity) 문제가 존재하며, 카메라의 이동 거리를 이용한 삼각 측량 기법에 기반을 둔 위치추정 방식이기에, 카메라의 제자리 회전과 같은 특수한 움직임에 매우 불안정한 위치추정 성능을 보여준다. 또한, 영상처리를 위해 깨끗하고 흔들리지 않는 영상을 필요로 하므로, 자율비행 드론에서는 단안 카메라만을 사용한 자율 항법은 거의 사용되지 않는 추세이다.

그림 12. (좌) ORB-SLAM 위치 측위 기법, (우) 단안 카메라 기반 깊이 추정 결과



(출처: (좌) R. Mur-Artal et al, 2015 / (우) C. Godard et al, 2017)

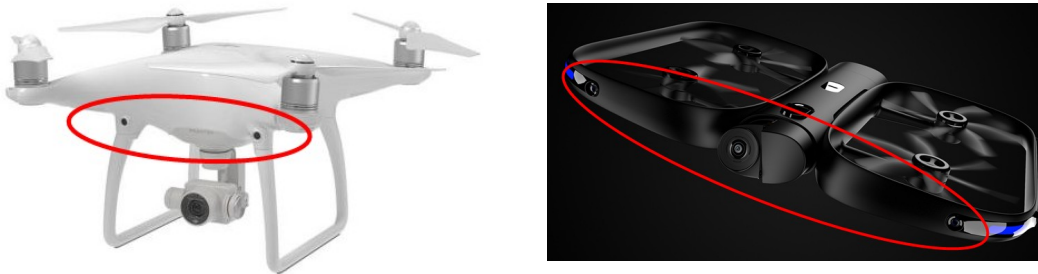
최근 들어 딥러닝 기술의 발달로 카메라 한 대만을 사용하여 영상의 깊이 추정, 사물 인식, 주변 3차원 환경 복원 등 다양한 기술 및 알고리즘들이 개발되고 학계에 발표되고 있지만, 아직 그 성능이 실험적인 단계로써 소형 무인 드론의 주된 항법 방식으로는 사용되지 않고 있다(그림 12).

2) 양안 및 복수 대의 카메라 기반 위치 측위 방법

양안 및 복수 대의 카메라 기반 위치 측위 방법은 앞서 설명한 단안 카메라의 물리적 한계인 스케일 모호성 문제 및 깊이 추정 문제를 해결하기 위해 사용되는 카메라 센서 조합이다. 단안 카메라를 기반으로 개발된 영상 기반 항법 알고리즘들을 거의 그대로 적용할 수 있으며, 새롭게 얻어진 깊이 값을 추가로 사용함으로써, 드론의 실제 3차원 위치를 정확히 추정할 수 있다. 카메라를 여러 대 설치하고, 이러한 여러 대의 카메라 시차를 기반으로 깊이 영상을 추정함으로써 실제 주변 환경의 거리 및 크기를 알아낼 수 있고, 이를 통하여 스케일 모호성 및 깊이 추정 문제를 해결할 수 있다.

양안 카메라 조합의 경우 두 카메라 사이의 거리가 사람의 눈과 같이 고정되어 있으며, 이 거리를 이용하여 각 픽셀의 깊이 값을 추정할 수 있으므로, 단안 카메라에서는 추정이 불가능했던 제자리 회전 운동과 같은 특수한 움직임들도 모두 추정할 수 있다. 하지만 2대 이상의 카메라 사이의 시간 및 공간 정합을 반드시 필요로 하며, 카메라 간 충분한 거리(baseline)가 확보되지 않을 경우, 깊이 추정 정확도가 매우 떨어진다는 단점이 존재한다. 또한, 추가되는 카메라만큼 처리해야 할 영상의 수도 증가하므로 단안 카메라 환경에 비해 더 많은 연산량을 요구한다. 무인 드론의 소형화 및 경량화 추세로 인하여 일반적으로 스테레오 카메라 조합이 가장 널리 사용되고 있다(그림 13).

그림 13. (좌) Phantom의 양안 카메라, (우) Skydio의 양안 카메라



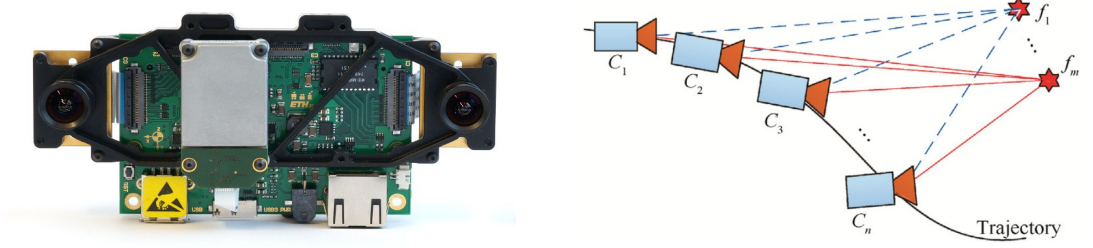
(출처: (좌) DJI / (우) Skydio)

3) 영상 및 관성 항법 센서 기반 위치 측위 방법

카메라와 관성 항법 센서(IMU)를 같이 사용하는 센서 조합으로, 카메라와 IMU는 서로의 단점을 상쇄시킬 수 있는 상보적인 관계에 놓인 센서이다. 즉, 각각의 센서 기반 위치추정 알고리즘이 갖고 있는 서로의 단점을 상쇄시켜주며, 카메라 및 관성 항법 센서 모두 가볍고 많은 연산량을 필요로 하지 않는다. 특히 IMU의 경우 언제 어디서나 작동한다는 안정성이 있어서 카메라만 사용한 위치추정 기법 대비 매우 안정적이라는 장점이 존재한다. 이러한 다양한 장점으로 인하여 대부분의 소형 무인 드론뿐만 아니라 Oculus의 VR 기기, 구글의 ARCore, Apple의 ARkit 등과 같이 3차원 자가 위치 측위 알고리즘이 필요한 거의 모든 곳에 가장 널리 그리고 많이 사용되는 센서 조합이다.

단안 카메라 구성과 비교해보았을 때, 카메라 및 IMU 사이의 시간 및 공간 정합(Temporal and Spatial Calibration)을 정확히 해주어야 원하는 높은 위치추정 성능을 얻을 수 있다는 단점이 존재하지만, 카메라와 관성 항법 센서의 경량성, 소형화, 그리고 높은 정확도라는 특징으로 인해 현재 많은 수의 무인 드론 및 가상/증강 현실 솔루션에 널리 사용되고 있는 자가 위치추정 기법이다.

그림 14. (좌) Visual-Inertial 센서 모듈, (우) MSCKF의 위치 측위 원리



(출처: (좌) Skybotix (GoPro) / (우) A. Mourikis et al, 2007)

영상-관성 항법 기반 위치추정 알고리즘(Visual-Inertial Odometry and SLAM)은 그 조합의 단순성, 경량화 및 상보적인 특성으로 인해 특히 많은 연구가 이루어져 왔으며, 대표적으로 칼만 필터링 기반 Multi-State Constrained Kalman Filter(MSCKF)(A. Mourikis et al, 2007), 그리고 비선형 최적화 기법 기반 OKVIS(S. Leutenegger et al, 2015)가 가장 널리 알려져 있다. 특히 칼만 필터링 기반 MSCKF 알고리즘은 원래 NASA JPL과 미네소타 대학(University of Minnesota)에서 우주선의 재진입 및 착륙 시에 사용하기 위해 개발된

항법 알고리즘이었는데(A. Mourikis et al, 2009), 매우 적은 연산량 대비 높은 위치추정 정확도로 인하여 사람들의 주목을 받게 되었고, 현재는 구글 ARCore(구글 Tango) 및 소형 무인 드론 등 다양한 분야에서 3차원 자가 위치 측위 알고리즘으로 널리 사용 및 응용되고 있다(그림 14).

최근 소형 무인 드론의 자율 항법기술을 연구하는 홍콩과학기술대(HKUST) Aerial Group에서 VINS-MONO(Tong Qin et al, 2018)를 인터넷상에 오픈소스로 공개하고, 기존의 방법인 MSCKF와의 성능 비교를 통하여 전 세계 연구자들의 주목을 받고 있다.

4) 영상 및 라이다(LiDAR) 기반 위치 측위 방법

영상 및 라이다(LiDAR) 기반 위치 측위 방법은 카메라 및 라이다(LiDAR) 센서를 함께 사용하는 조합으로써, 라이다의 매우 정확한 깊이 측정 성능 덕분에, 정확한 3차원 자가 위치추정 성능을 보여주었다. 대표적으로 카네기멜론 대학교(Carnegie Mellon University)의 LOAM(Ji Zhang et al, 2014)(Ji Zhang et al, 2017) 알고리즘이 3차원 위치 측위를 위해 연구되었고, 드론 하부에 탑재되어 정확하고 안정적인 자율비행 및 무인 탐사 능력을 보여준 바 있다(그림 15). 하지만 카메라와 라이다 사이의 시간 및 공간 정합을 정확히 해주어야 원하는 높은 위치추정 성능을 얻을 수 있으며, 라이다 센서의 높은 가격 및 무거운 무게로 인하여, 소형화 및 경량화 목적의 무인 드론에 탑재하기에는 큰 제약이 존재한다. 따라서 전문가용 대형 드론 및 고정밀 위치 측위가 필요한 부분에 한하여 제한적으로 적용되어 사용되고 있다.

그림 15. 멀티콥터형 무인 드론에 탑재된 카메라 및 라이다 센서 모듈



(출처: Ji Zhang et al, 2017)

3.2. 자율 비행을 위한 경로계획 기술

그림 16. (좌) 혼합정수 계획법을 이용한 경로생성, (우) 실시간 최저 경로생성



(출처: (좌) A. Kushleyev et al, 2013 / (우) F. Gao et al, 2017)

멀티로터 형태의 드론은 바퀴를 통해 이동하는 지상 모바일 로봇과 달리 전방향의 이동이 가능하므로 이동 방향의 제한에 대한 구속조건은 고려하지 않아도 된다는 장점은 있으나, 3차원 공간에서 경로를 생성해야 하므로 2차원 이동로봇보다 많은 계산이 필요하다. 또한, 짧은 비행시간으로 인해 이동 거리를 최소화해야 한다. 이러한 이유로 인해, 장애물 회피를 위한 자율비행 드론의 경로생성 알고리즘은 드론에 장착 가능한 저사양의 컴퓨터에서도 빠르게 최적의 경로 계산이 가능한 알고리즘 위주로 발전해왔다.

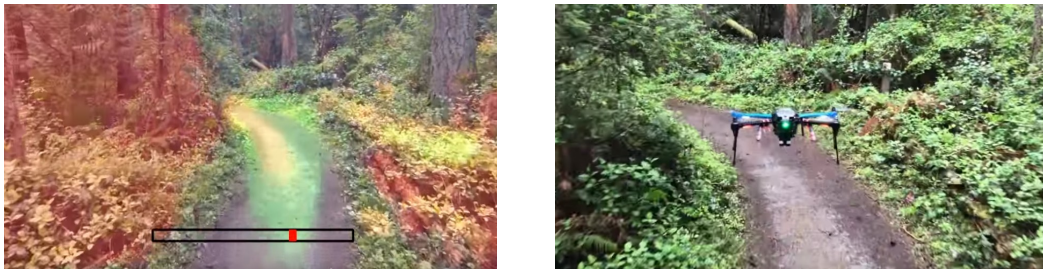
3.2.1. 최적화 기반 경로 생성

2010년대 초반의 드론을 위한 최적 경로생성 알고리즘은 주어진 선형 조건들을 만족시키면서 선형인 목적 함수를 최소화하는 선형 최적화 기법 중 하나인 혼합정수 계획법(Mixed Integer Linear Programming)과 같은 최적화 알고리즘을 활용한 경로생성 기법이 제안되었다(그림 16 우). 그러나 당시에는 복잡한 환경에 대해 경로를 생성하는 시간이 10분 내외로 길었으며, 또한 경로를 생성하기 위한 컴퓨터를 소형 드론에 장착하기에는 너무 무거웠고 많은 전력을 소모했기 때문에 지상의 컴퓨터에서 최적의 경로를 생성하여 드론에 전송하는 방법으로 구현되었다. 이러한 이유로, 당시에는 자율비행 드론의 실험은 비교적 정형화된 환경에서 이동 가능한 공간에 랜덤한 샘플들을 뿌려서 경로를 찾는 기법인 RRT(Rapidly-exploring Random Tree)나 PRM(Probabilistic Roadmap Method)을 활용한 실험이 수행되었다(R. He et al, 2008).

이후, 고성능 컴퓨터의 소형화, 저전력화와 더불어 컨벡스 최적화 알고리즘의 발전으로 계산속도가 비약적으로 향상된 다양한 최적화 소프트웨어가 출시됨에 따라, 최적화 기반의 경로생성알고리즘의 실시간성이 비약적으로 개선되었다. 홍콩과학기술대의 연구진들은 다항식으로 표현되는 경로를 2차 계획법(Quadratic optimization)을 통해 최적화하여 지역적 경로(Local path)를 생성하는 알고리즘을 제안하였으며(그림 16 좌), 경로생성을 위해 i5-4570 CPU급의 컴퓨터에서 0.2초 미만의 시간 소요되기 때문에 실시간 경로생성이 가능하다는 장점이 있다.

3.2.2. 심층 학습을 활용한 자율비행

그림 17. (좌) 심층 학습을 이용한 비행 가능 영역 탐지, (우) 비행 사진



(출처: Nvidia)

최적화 기반의 경로생성 알고리즘은 개선된 실시간성과 안정성을 기반으로 다양한 어플리케이션에 활용될 수 있지만, 복잡한 수학적 문제를 지속적으로 풀어야 하며, 실시간 최적화 소프트웨어 툴의 성능에 크게 의존한다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 최근에는 딥러닝 기술을 활용한 자율비행 기술이 제안되고 있다. Nvidia에서는 드론에 장착된 카메라에서 획득되는 이미지를 바탕으로 드론이 비행 가능한 공간의 지도학습(Supervised learning) 기법과 심층 인공신경망(Deep Neural Network)을 통해 인식하고, 스스로 목표 비행 지점을 생성하는 알고리즘을 제안하였다(그림 17). 호버링(hovering) 비행의 안정성을 위해 옵티컬 플로우(optical flow) 카메라를 이용해 속도를 추정하였으며, 인식 정확도를 향상시키기 위한 학습 알고리즘을 제안하여, 총 13시간 동안 학습된 이미지를 바탕으로 실험을 수행하였다. 이외에도, 딥러닝을 이용한 드론 레이싱 기술의 개발이 가속화되고 있다(그림 18). 딥러닝 기반 자율비행 드론 레이싱은 드론에 장착된 단안 카메라를 통해 관측된 이미지에서 CNN(Convolution Neural Network)을 통해 관측된 물체의

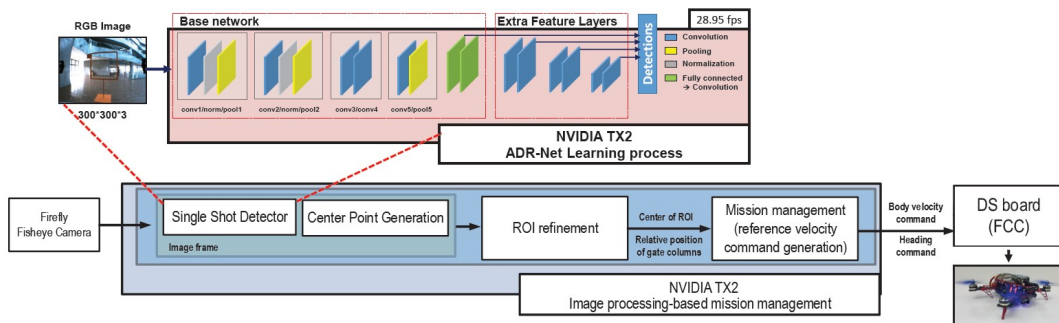
중심점을 이동하기 위한 경로를 생성하며 비행하는 기법(그림 19)이 대표적이다. 딥러닝을 활용한 기법은 드론 레이싱 전문가의 비행 기록보다 레이싱 시간은 다소 느렸지만, 더 높은 임무 성공률을 보였다(A. Loquercio et al, 2020).

그림 18. 심층 학습을 이용한 드론 레이싱



(출처: A. Loquercio et al, 2020)

그림 19. 딥러닝 기반 드론 레이싱 알고리즘 구조 예시



(출처: S. Jung et al, 2018)

기계학습을 이용한 자율비행 기법은 학습을 위해 GPU(Graphics Processing Unit)가 필수적이며, 안전한 비행을 위해서는 오랜 학습시간이 필요하다. 이러한 이유로, 딥러닝 기반 자율비행 알고리즘은 우리 주변에 존재하는 일반적인 상황보다는 드론 레이싱이나 비교적 정형화된 상황에서 검증되고 있다. 그럼에도 불구하고, 주변 환경을 스스로 인식하여 비행하는 기법은 복잡한 최적화 문제를 풀지 않아도 되기 때문에 고성능의

CPU가 장착된 컴퓨터가 필요하지 않다는 장점 또한 존재한다. 또한, 최근 개발되고 있는 단안 카메라를 이용한 깊이 이미지 추정 알고리즘(그림 12 참고)의 성능이 고도화된다면, 드론은 고가의 라이다 센서나 단안 카메라에 비해 무거운 스테레오 카메라를 사용하지 않고 아주 작은 카메라만을 이용한 장애물 회피가 가능해질 것이므로, 딥러닝 기반의 자율비행 기법의 발전 가능성은 크다고 할 수 있다.

IV 사업용 자율비행 드론 발전 방향

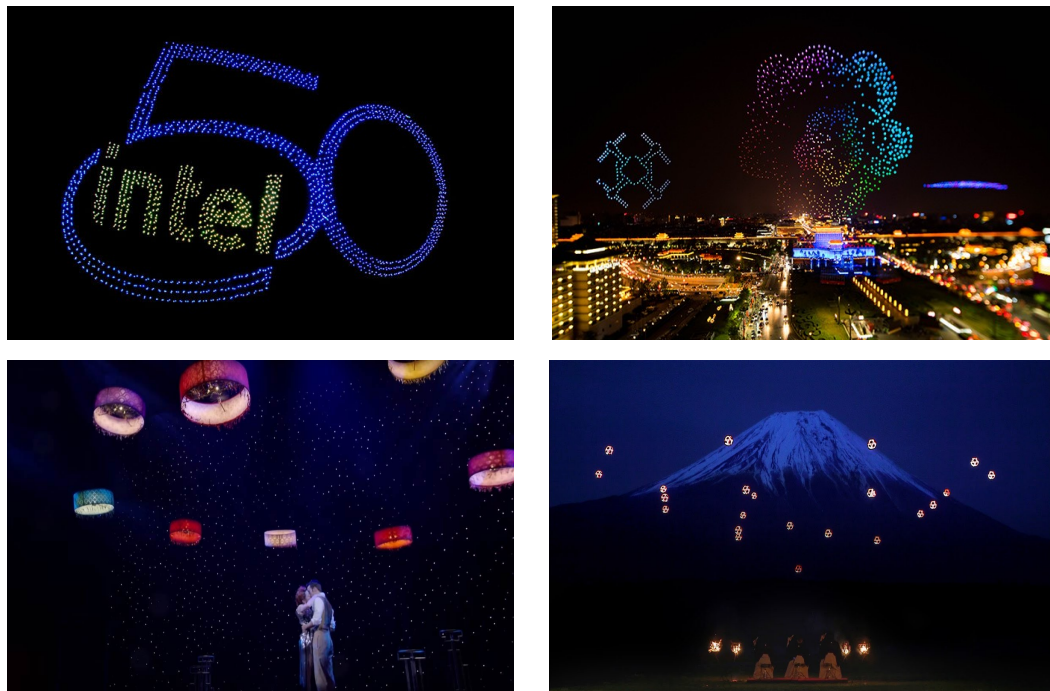
4.1. 드론 에어쇼

2018 평창 동계 올림픽에서 Intel의 군집 비행 드론을 통해 Drone Entertainment Light Show를 처음 보여준 이래로, 엔터테인먼트 시장에서 무인 드론의 활용 및 역할이 크게 부각되어 관련 시장이 전 세계적으로 성장하고 주목을 받고 있다. 본 장에서는 해외 및 국내에서 드론 엔터테인먼트 관련 사업 및 관련된 기술에 대해 연구·개발하고 있는 기업 및 기관에 대해 간략히 살펴보았다.

미국 Intel은 2016년 독일의 드론 전문 기업 Ascending Technology를 인수·합병한 이래로 가장 적극적이고 선도적으로 드론 관련 기술 및 드론 엔터테인먼트 분야를 개척해나가고 있다. Intel은 군집 비행에 적합하도록 슈팅스타(Shooting Star)라는 군집 드론을 직접 제작하였고, 동시에 군집 비행 시스템 전체를 개발하고 연구하였다. 그 결과, Intel은 평창 동계올림픽, 월트 디즈니 리조트, 미국 슈퍼볼 게임 등에서 500대 이상의 드론으로 군집 비행 에어쇼 시연에 성공하였다.

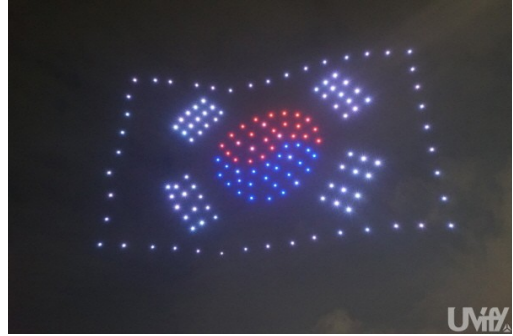
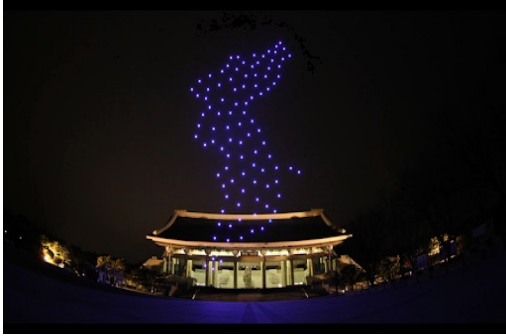
중국 EHang은 Intel에 비해 많이 알려지지 않았지만, Intel의 500대 군집 비행 기네스북 기록을 깨고, 1,000대 이상의 군집 비행 에어쇼에 성공하였다. 또한, 유인 드론인 에어 택시 제품도 개발하는 등 유·무인 드론 관련된 기술을 활발히 개발하고 있다. 이외에도 스위스 ETH 연방공대의 스타트업으로 시작한 베리티 스튜디오는 드론에 예술·엔터테인먼트 산업을 결합하고, 이를 위한 드론 아트 시스템을 연구·개발하고 있다(그림 20).

그림 20. 해외 기업 드론 에어쇼 모습, (상좌) 미국 Intel, (상우) 중국 EHang, (하좌) 스위스 Verity Studios, (하우) 일본 Sky Magic



국내의 경우, 한국항공우주연구원에서 지속적으로 군집 비행 드론 관련 기술을 연구하고 있으며, 최근 인공지능 연구실에서 각각의 드론에 내부 프로그램을 담아 스스로 움직이게 하고, 위치정보를 방송처럼 송출해서 감지하도록 하는 분산형 시스템을 스스로 개발하여, 100대의 드론으로 100주년, 한반도와 같은 모습을 연출하는 군집 비행 드론 기술을 선보였다. 유비파이는 자체 연구·개발한 상용 군집 드론 하드웨어인 IFO를 이용하여, 총 150대의 군집 드론을 이용하여 세계에서 가장 큰 태극기를 하늘에 그려내는 데 성공하였다. 이외에도 파블로항공, 네온테크 등 국내 여러 드론 업체에서 군집 드론 비행 기술에 대해 연구·개발하고 있다(그림 21). 이처럼 실외 군집 비행 기술은 엔터테인먼트 산업 및 공연 산업에 접목되면서 드론의 새로운 모습으로, 새로운 시장을 개척해나가고 있다.

그림 21. 국내 기업 드론 에어쇼 모습, (좌) 한국항공우주연구원, (우) 유비파이



4.2. Drone Challenge(드론 챌린지)

무인 드론 및 로봇 시장의 폭발적인 성장 속에서 기술 주도권을 획득하기 위하여, 전 세계 많은 연구소, 기업 및 학교에서 무인 드론 관련 핵심 기술 및 알고리즘들에 대해 연구·개발하고 있다. 특히 민간 차원의 인공지능 및 드론 관련 연구 개발 의욕을 고취하고, 진작하기 위해 정부 기관 및 대학 주도로 다양한 무인 드론 관련 그랜드 챌린지가 전 세계적으로 개최되고 있다.

미국의 국방고등연구계획국(DARPA)에서는 무인 드론 및 로봇 관련 다양한 챌린지를 개최하는데, 최근에 열린 Fast Lightweight Autonomy(FLA)의 경우, 건물 내부와 같은 정형 환경에서 사람의 개입 없이 빠른 속도로 비행하며 실내를 탐색·조사하는 챌린지를 개최한 바 있다. 이를 확장하여, 더 도전적이고 위치 측위가 쉽지 않은 실내 비정형 환경에서의 무인 드론 기반 탐색·조사 미션인 Subterranean(SubT) 챌린지를 현재 진행 중이다. 지하 동굴 및 터널과 같이 빛이 들어오지 않는 어두운 비정형 환경에서 사람의 개입 없이 자율비행을 통하여 내부를 탐색하고 조사할 수 있는 드론을 연구·개발하는 것이 목표이며, 2021년에 최종 실내 비행 실험을 앞두고 여러 나라의 팀들이 현재 활발히 연구·개발이 진행 중이다.

그림 22. (상좌) 미국 DARPA FLA, (상우) 미국 DARPA Subterranean 챌린지,
(하좌) 아랍에미리트 MBZIRC 2020, (하우) 한국 인공지능 R&D 그랜드 챌린지



다른 유명한 드론 관련 챌린지로는 아랍에미리트 아부다비의 갈리파 대학교가 주관하는 모하메드 빈 자예드 국제 로봇 경진대회(Mohamed Bin Zayed International Robotics Challenge, MBZIRC 2020)가 존재한다. MBZIRC 2017 이후 2번째로 열리는 드론 및 로보틱스 챌린지로서, 드론이 침입자 UAV를 자율적으로 추적, 포착, 제거할 수 있는지 시험하는 제1 챌린지, 실외 환경에서 드론과 무인 차량의 협력을 통해 서로 다른 유형의 벽돌형 물체를 식별, 선택하여 사전에 정의된 구조로 조립할 수 있는지 시험하는 제2 챌린지, 고층 빌딩에서 드론과 무인 차량이 협력하여 화재를 자율적으로 진화할 수 있는지 시험하는 제3 챌린지, 그리고 이를 전체적으로 동시에 진행하는 그랜드 챌린지로 구성되어 있다. 총상금 500만 달러를 두고, 2020년 2월에 전 세계 팀들이 참가하여 최종 토너먼트가 펼쳐졌으며, 그 결과 Czech Technical University-University of Pennsylvania-NYU 팀이 최종적으로 우승하였고, University of Bonn 팀은 2위, Polytechnic University of Madrid, University Pablo Olvide 팀이 3위를 차지하였다.

국내의 경우, 미국의 DARPA 챌린지 모델을 참고하여 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원이 인공지능 R&D 그랜드 챌린지를 2019년에 개최한 바 있고, 드론을 활용하여 다양한 복합재난에 대응할 수 있는 기본 인지기능에 대해 시험하는 트랙들로 이루어져 있다. 드론의 인공지능 및 인지기능 관련 원천기술 확보 및 개발에 목표를 두고, 주로 국내 대학 및 기업들을 중심으로 참가가 이루어지고 있으며, 2020년 12월에 2단계 최종평가를 앞두고 있다(그림 22).

4.3. 개인 비행 이동체

감시 정찰, 미지영역 탐색 및 드론 에어쇼와 같은 소형 무인 드론을 이용한 활용사례와 함께 최근 개인용 비행체 시장에 대한 관심도 높아져 가고 있다. 드론을 활용한 개인용 비행체 시장은 미국의 투자은행 모건스탠리의 분석에 따르면 2040년까지 글로벌 PAV(Personal Aerial Vehicle) 시장이 1조 5,000억 달러 규모로 성장할 것으로 전망된다. 드론을 활용한 PAV 플랫폼은 기존의 헬기보다 안정적인 비행이 가능하고, 대형 디젤 엔진이 아닌 소형모터를 사용함으로써 얻는 친환경적인 장점 등 다양한 이유로 인해, 포화되어가는 2차원적인 교통체계를 대비할 신개념 교통망의 대안으로 떠오르고 있다.

현재 세계 각국은 미래시장인 PAV 시장을 선점하기 위해 다양한 플랫폼을 출시하여 시험비행을 하고 있다(그림 23). 두바이와 독일은 이미 유인 PAV 시범비행을 수년 전에 마쳤으며, 싱가포르는 2016년도에 에어버스(Airbus)-싱가포르 민간항공관리국 공동으로 'Skyways' 프로젝트를 출범시킨 이후 2018년도 2월에 시범비행을 수행하였고, 독일 Volocopter의 PAV 기종으로 항공택시 서비스의 시범 운영을 실시할 것으로 알려졌다. 중국에서도 자국 기업인 Ehang이 지난해 광저우 등지에서 자체 기종으로 시범비행을 마쳤다(한국항공 우주연구원 보고서, 2019). 최근 한국에서도 PAV 시장에 진입하기 위해 현대자동차와 미국의 Uber가 결합하여 CES2020에서 선보인 바 있다.

그림 23. (좌) 두바이 드론 택시 테스트, (우) 도심비행을 위한 개인용 비행체



(출처: (좌) Volocopter, (우) 현대자동차)

수소전지 기술개발로 인해 드론 플랫폼의 비행시간이 비약적으로 늘어나고 있으며, GPS 및 영상기반의 인지 및 위치추정 알고리즘이 점점 고도화되고 있는 현실을 생각해 볼 때 PAV의 비행안정성은 앞으로도 더욱 향상될 것이다. 또한, 세계 각국에서 PAV 시장을 선점하기 위해 관련 규제를 검토하고 있는 상황을 생각해 볼 때, 자율비행 드론을 활용한 PAV 시장은 앞으로 더욱 폭발적으로 커질 것이다.

V 결론

4차 산업혁명 시대를 맞이하여 전 세계적으로 드론 플랫폼의 개발이 가속화되었으나, 드론의 짧은 비행시간 및 킬러 애플리케이션(Killer Application) 발굴 실패 등으로 인해 드론의 미래에 대한 회의적인 시각도 존재했다. 그러나 최근 연료전지 기술의 발달과 최적 설계 기술의 발달로 인해 드론의 비행시간이 점점 늘어가고 있으며, 드론 에어쇼, 개인용 비행체와 핵심 어플리케이션 발굴로 인해 드론에 대한 관심이 다시 높아져 가고 있다. 이러한 시대적 관심으로 인해 최근 드론과 관련된 다양한 대회 등이 개최되고 있으며, 세계 각국의 연구단체에서 자율비행 드론의 기술개발이 활발히 이루어지고 있다.

우리나라도 앞으로 필연적으로 다가올 드론 시대(Drone Age)로의 이행을 위해 장기적 안목에서 체계적으로 준비해야 할 때이며, 특히, 개인용 비행체, 드론 에어쇼, 재난현장 탐사를 위한 탐사 드론 등의 분야의 핵심 기술 개발 및 확보를 위해 노력해야 할 것이다.

저자 _ 이현범(Hyeonbeom Lee)

• 학력

서울대학교 우주항공 박사
 서울대학교 우주항공 석사
 한동대학교 기계/제어 학사

• 경력

現) 경북대학교 전자공학부 조교수
 前) 한국기계연구원 선임연구원

저자 _ 김표진(Pyoo Jin Kim)

• 학력

서울대학교 박사
 서울대학교 석사
 연세대학교 학사

• 경력

現) Simon Fraser University 박사후과정
 前) NASA AMES Research Center,
 Graduate student researcher
 前) Google, Graduate student researcher

참고문헌

국내문헌

- 1) 윤승환, "미국 운송용 드론(UAV) 시장동향," 대한무역투자진흥공사, 2019.07.10.
- 2) 국토교통부, "드론산업 발전 기본 계획," 2017
- 3) 한경수, 정훈, "드론 물류 배송 서비스 동향," Electronics and Telecommunications Trends, 2020
- 4) H. Lim, J. Park, D. Lee and H. J. Kim, "Build Your Own Quadrotor: Open-Source Projects on Unmanned Aerial Vehicles," IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 19, no. 3, pp. 33-45, Sept. 2012.
- 5) 매일경제, "'드론계의 애플' DJI...첨단기술로 새처럼 날다," 매일경제 Biz Focus, 2017.07.25.
- 6) M. N. Boukoberine, Z. Zhou and M. Benbouzid, "Power Supply Architectures for Drones – A Review," 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 5826-5831.
- 7) 홍유경, 김유경, 김수성, 이희수, 차지훈. "무인 비행체의 환경 인지 및 경로 계획 연구동향", Electronics and Telecommunications Trends, 2019
- 8) M. Tomasz, and M. Gervautz. "Virtual reality-history, applications, technology and future," 1996.
- 9) D. Guillaume, and R. D'Andrea. "Autonomous quadrotor flight using a vision system and accommodating frames misalignment," IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems. IEEE, 2009.
- 10) D. Nistér, O. Naroditsky, and J. Bergen. "Visual odometry," Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004.
- 11) A. Davison et al. "MonoSLAM: Real-time single camera SLAM." IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence vol. 29, no. 6, pp. 1052-1067, 2007.
- 12) G. Klein and D. Murray. "Parallel tracking and mapping for small AR workspaces." 2007 6th IEEE and ACM international symposium on mixed and augmented reality. IEEE, 2007.
- 13) R. Mur-Artal et. al. "ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system." IEEE transactions on robotics vol. 31, no. 5, pp. 1147-1163, 2015.
- 14) C. Godard et. al. "Unsupervised monocular depth estimation with left-right consistency." Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017.
- 15) A. Mourikis et. al. "A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation." Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007.
- 16) S. Leutenegger et. al. "Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization." The International Journal of Robotics Research 34.3 (2015): 314-334.
- 17) A. Mourikis et al. "Vision-aided inertial navigation for spacecraft entry, descent, and landing." IEEE Transactions on Robotics 25.2 (2009): 264-280.

- 18) T. Qin et. al. "Vins-mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator." *IEEE Transactions on Robotics* 34.4 (2018): 1004-1020.
- 19) J. Zhang et. al. "LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time." *Robotics: Science and Systems*. Vol. 2. No. 9. 2014.
- 20) J. Zhang et. al. "Low-drift and real-time lidar odometry and mapping." *Autonomous Robots* 41.2 (2017): 401-416.
- 21) A. Loquercio, E. Kaufmann, R. Ranftl, A. Dosovitskiy, V. Koltun and D. Scaramuzza, "Deep Drone Racing: From Simulation to Reality With Domain Randomization," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 1, pp. 1-14, Feb. 2020.
- 22) A. Kushleyev, D. Mellinger, C. Powers, and V. Kumar, "Towards a swarm of agile micro quadrotors," *Autonomous Robots*, vol. 35, no. 4, pp. 287-300, 2013.
- 23) R. He et. al. "Planning in information space for a quadrotor helicopter in a GPS-denied environment," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008.
- 24) F. Gao, Y. Lin and S. Shen, "Gradient-based online safe trajectory generation for quadrotor flight in complex environments," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2017, pp. 3681-3688.
- 25) N. Smolyanskiy, A. Kamenev, J. Smith and S. Birchfield, "Toward low-flying autonomous MAV trail navigation using deep neural networks for environmental awareness," *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 4241-4247.
- 26) S. Jung, S. Hwang, H. Shin and D. H. Shim, "Perception, Guidance, and Navigation for Indoor Autonomous Drone Racing Using Deep Learning," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 2539-2544, July 2018.
- 27) 한국항공우주연구원, "개인용항공기(PAV) 기술시장 동향 및 산업환경 분석 보고서," 2019. 05



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2020 April vol.6 no.4