

자율 수색구조 임무를 위한 쿼드-틸트로터 VTOL 드론의 설계 및 실증

Quad-Tiltrotor VTOL Drone for Autonomous Search and Rescue : Design and Demonstration

장민석* · 이윤찬* · 박준규* · 신지환* · 이광모* · 김민준* · 임서현* · 조근희* ·
손혁제* · 송순호[†]

Minsuk Jang*, Yoonchan Lee*, June-Kyoo Park*, Jihwan Shin*, Gwangmo Lee*, Minjun Kim*, Seohyeon Lim*, Keunhee Cho*, Hyukje Son*, Sun-ho Song[†]

Abstract Search and rescue operations in hazardous environments require unmanned aerial systems capable of both victim detection and physical retrieval. This paper presents an end-to-end autonomous SAR system based on a quad-tiltrotor VTOL UAV architecture. Unlike conventional twin-rotor designs, our distributed quad-tiltrotor configuration provides enhanced stability and redundancy. The system integrates four subsystems: an active thermal management system enabling 22.2 minutes hover by reducing temperatures from 70°C to 42°C; a vision system combining CNN-based detection with OpenCV precision alignment achieving $\pm 0.31\text{m}$ accuracy; an autonomous winch-gripper mechanism with 500g payload capacity; and a multirotor-stabilized gripper resistant to propeller downwash. Experimental validation demonstrates complete autonomous missions within 15 minutes, including victim detection at 15-30m altitude, precision approach, and mechanical retrieval. Flight testing confirms stable mode transitions with 40-minute total endurance enabling 15km range. Structural analysis shows maximum stress of 67.3 MPa with safety factor of 29.7. The system completed field demonstrations at the Korea Robot Aircraft Competition, validating practical autonomous rescue capability beyond detection-only systems.

Keywords: Quad-tiltrotor VTOL, search and rescue, physical retrieval, thermal management, autonomous systems, object detection, Computer Vision

1. 서 론

원격지나 산악 지형 등 접근이 어려운 환경에서 발생하는 조난 상황은 신속한 인명구조가 생존율을 크게 좌우하는 결정적 요소이다.^[1] 전통적인 지상 기반 구조 활동은 지형의 제약을 받으며, 유인 항공기는 소형 영역의 정밀한 작업이 어렵고 기상 악화 또는 2차 재해 위험 등으로 운용이 제한된다. 무인항공기(UAV)는 이러한 제약을 극복하고 신속한 대응 및 현장 적응이 가능한 플랫폼으로 주목받고 있으며, 특히 수색구조(SAR) 임무에서 그 활용도가 빠르게 증가하고 있다.^[2]

기존의 고정익 항공기는 넓은 지역을 빠르게 탐색할 수 있고 우수한 에너지 효율을 제공하나, 활주로나 발사 장치가 필요하며 정밀한 호버링이 불가능하여 조난자와

의 상세한 상호작용이 어렵다.^[3] 반면 멀티로터 드론은 정밀한 위치 제어와 수직 이착륙(VTOL)이 가능하고 조난 현장에서 신속하게 배치될 수 있으나, 비행 시간이 통상 10-15분 수준으로 제한되어 광범위한 탐색 영역의 커버가 어렵고 현장 체류 시간이 부족하다는 본질적 제약이 있다.^[4] 이러한 두 플랫폼의 상반된 특성을 보완하기 위해 VTOL(수직 이착륙) 항공기가 주목받고 있으며, 고정익의 장거리 비행 능력과 멀티로터의 정밀 제어 및 현장 유연성을 결합한 이상적인 해결책으로 평가받는다.^[4]

최근 자율 수색구조 시스템 연구는 주로 조난자 탐지 및 위치 보고 기능에 집중되어 왔다. Albanese 등은 조난자 위치 추적 기능을 갖춘 SARDO 시스템을 개발하였고^[5], Khosravi 등은 베이지안 추론과 딥러닝을 결합한 자동 탐지 시스템을 산불 시나리오에 적용하였다.^[6] Alotaibi 등은 다중 UAV 협력을 통한 대규모 탐색 시스템을 제시하기도 했다.^[7] 그러나 이러한 시스템들은 대부분 탐지 및 보고 기능에 중점을 두고 있어, 실제 인명 구조에 필수적인 정밀한 위치 제어, 복잡한 환경에서의 안정적 비행, 그리고 기계적 조작 능력이 제한적이다. 따라서 탐지부터

※ This project was funded by Korea AeroSpace Administration(KASA).

* These authors contributed equally, Student Researcher, Yonsei University, Seoul, Korea (droneyonseil@gmail.com)

† Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea (soonhosong@yonsei.ac.kr)

정밀 접근, 기계적 회수까지 완전한 자율 구조 작업을 수행할 수 있는 엔드투엔드 통합 시스템에 대한 연구 필요성이 높다. 쿼드-틸트로터 VTOL 항공기는 기존의 쌍발(twin-rotor) 틸트로터 대비 향상된 중복성, 분산된 추력 배치에 따른 더욱 우수한 비행 제어 특성, 그리고 비상 상황에서의 안정성을 제공한다.^[9]

본 논문에서는 수색구조 임무를 수행하기 위해 쿼드-틸트로터를 기반으로 기체 형상 설계, 제어, 컴퓨터비전 시스템을 이용한 조난자의 식별 및 구조 임무를 통합한 엔드투엔드 시스템을 제안하며, 기여는 다음과 같다 :

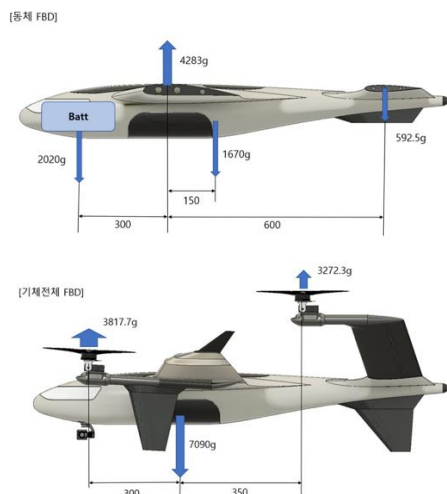
- (1) 엔드투엔드 자율 구조 시스템: 광역 탐색에서 정밀 접근, 비전 기반 자동 정렬($\pm 0.31m$ 정확도), 기계적 회수에 이르는 완전한 자율 미션을 15분 이내에 수행
- (2) 능동 열관리 시스템: 6개 냉각 팬으로 내부 온도를 $85^{\circ}C$ 에서 $42^{\circ}C$ 로 저감하여 22분 이상 호버 가능, 일반 멀티로터의 약 2배 현장 체류 시간
- (3) 정밀 자율 구조 메커니즘: CNN 기반 탐지 모델 및 정렬, 자동 원치-그리퍼 시스템 및 멀티로터 안정화 그리퍼의 통합으로 완전 자동화된 물리적 구조 작업 실현

본 시스템은 23회 한국로봇항공기대회에서의 1위를 통해 실제 현장 조건에서 검증되었으며, 기존의 탐지 전용 시스템에서 물리적 인명 구조가 가능한 완전 자율 SAR 플랫폼으로의 진전을 나타낸다.

2. 시스템 설계

2.1 항공기 구성 및 공기역학

본 논문에서 제시하는 쿼드-틸트로터 VTOL 무인기는 광역 탐색과 정밀 구조 작업의 이중 요구사항을 충족하도록 설계되었다. 고정익 모드에서는 넓은 지역을 신속하게 탐색할 수 있으며, 멀티로터 모드에서는 조난 지점에서의 정밀한 기동과 구조 작업을 수행할 수 있다.

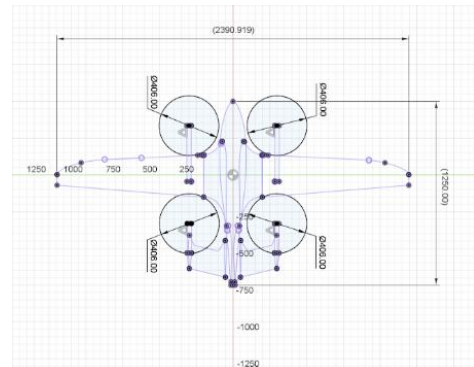


[Fig. 1] Aircraft overall configuration diagram. fuselage FBD(Top), airframe FBD(bottom).

항공기는 2,450mm 날개폭과 $0.448m^2$ 날개 면적을 가

진 고정익으로 설계되었다. 동체 길이는 1,048.66mm이며, 높은 중형비(10.34)는 저속 비행에서 우수한 양항비를 제공한다. 분산된 쿼드-틸트로터 배치 방식은 기존의 쌍발(twin-rotor) 틸트로터 대비 다음의 장점을 제공한다: (1) 향상된 중복성 - 4개 로터 중 1개 고장 시에도 멀티로터 비행 가능, (2) 개선된 하중 분배 - 4개 점에 분산된 추력으로 동체 응력 감소, (3) 향상된 요 제어 - 비틀림 짝 로터 조합으로 효율적인 요 모멘트 생성.

동체는 CFRP 피부-폼 코어 샌드위치 구조로 설계되었으며, 3k 탄소섬유 직조는 굽힘과 비틀림에 대해 균형잡힌 강성을 제공한다. 유한요소 해석(FEA) 결과, 최대 폰미세스 응력은 응급착륙 시물레이션에서 67.3 MPa로 나타났다으며, 최소 안전계수는 29.7로 설계 요구사항을 충분히 만족한다. 비행 테스트에서 측정된 고정익-멀티로터 전환 시간은 평균 3.2초이며, 전환 중 자세 편차는 $\pm 8^{\circ}$ 로 제어되어 안정성을 입증하였다.

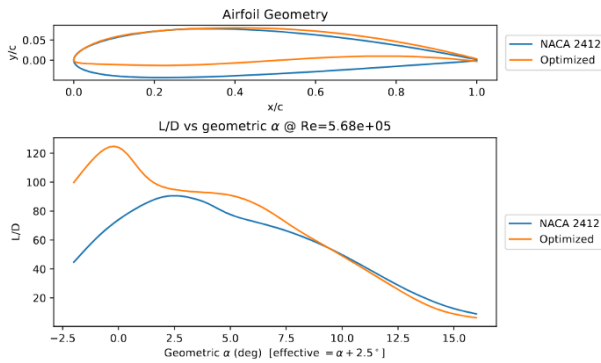


[Fig. 2] Aircraft overall configuration diagram, Quad-tiltroter deployment diagram. Distributed deployment of four tiltrotors.

4개의 틸트로터는 날개 끝과 동체 후미에 각각 배치되어 비행 모드에 따라 능동 각도 제어를 통해 추력 방향을 조정한다. 고정익 비행 모드에서는 모든 로터가 후진 방향(0°)으로 정렬되어 추진력을 제공하며, 멀티로터 모드로의 전환 시 로터들이 상향 방향(90°)으로 회전하여 수직 이착륙을 가능하게 한다. 전환 과정에서 프로펠러 각도는 부드럽게 변화하며, 이중 제어 시스템(자동 조종 장치 + 수동 조종기)에 의해 조종사가 원활한 비행 모드 전환을 달성할 수 있다.

2.2 에어포일 최적화

저속 비행 성능 향상을 위해 NACA 2412 에어포일에 대한 전산 최적화를 수행하였다. Class-Shape Transformation (CST) 기반 에어포일 기하학과 신경망 에어로다이나믹 모델을 이용한 반복 최적화를 통해 양항비(L/D)를 최대화하면서 안정적인 피칭 특성을 유지하는 설계를 도출하였다. 최적화된 에어포일은 기존 NACA 2412 대비 양항비를 약 38% 향상시켰으며($90.6 \rightarrow 124.7 @ Re=5.68 \times 10^5$), 최대 두께를 12%에서 9%로 감소시키면서도 구조 안정성을 확보하였다.



[Fig. 3: Airfoil performance analysis] - Airfoil shape before and after optimization(top), Comparison of lift-to-drag ratio characteristics according to angle of attack(bottom).

2.3 능동 열관리

장시간 호버링 시 ESC, 배터리, 비행제어보드에서의 열 발생으로 인한 전자부품 과열을 해결하기 위해 6개 냉각 팬으로 구성된 능동 열관리 시스템을 통합하였다. 흡입 측 3010 팬 4개(16 CFM)와 배출 측 4010 팬 2개(14 CFM)로 총 30 CFM 기류를 생성한다.

능동 냉각으로 내부 피크 온도는 70°C 에서 42°C 로 저감되며, 열 제약 호버 시간은 10분에서 22분 이상으로 연장된다. 팬 전력 소비는 약 12W로 배터리 용량의 약 3%에 해당한다.

3. 수색 및 구조 시스템

3.1 컴퓨터비전 기반 탐지 및 정밀 정렬

자율 SAR 시스템의 핵심은 신뢰할 수 있는 조난자 탐지와 정확한 위치결정이다. 본 시스템은 YOLOv8 기반 객체 탐지기를 전이학습으로 Fine-tuning하여 구현하였다.

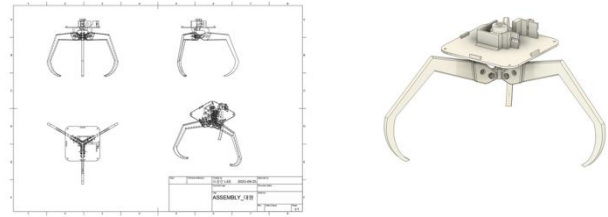
비행 중 수집한 2,847개 이미지 데이터셋으로 학습하였으며, 회전($\pm 15^\circ$), 스케일(0.8-1.2배), 색상 공간 변화 등의 데이터 증강을 적용하여 다양한 조명과 환경 조건에서의 강건성을 확보했다. Intel RealSense D455 스테레오 카메라에서 30 fps로 실시간 비디오를 처리하며, 신뢰도 임계값을 최적화하여 위양성을 최소화하면서 높은 탐지 민감도를 유지한다. 모델은 15-30m 작동 고도에서 신뢰할 만한 조난자 초기 위치결정을 달성한다.



[Fig. 4] CNN detection System, transfer learned.

탐지 후 시스템은 정밀 정렬 모드로 전환하여 색상 기반 마커 추적을 통해 조난자 중심에 접근한다. 위치 오차는 PD 속도 제어기로 구동되며, 최종 정렬 정확도는 $\pm 0.31m$ 이다.

3.2 구조 모듈



[Fig. 5] Design of rescue gripper module..

정밀 정렬 후 자동 구조 작업이 개시된다. 구조 모듈은 조난자 인식용 USB 카메라 및 미션컴퓨터를 별도로 탑재하며, 구조 트레이를 포함한 총 무게는 1.5kg으로 제한하였다. 10m 길이의 진자에 매달린 상태에서 $1 \times 1m$ 범위 내에서 자유롭게 움직이려면 약 1N($\sim 102g$)의 추력이 필요하다.

구조 모듈의 추진을 위해 별도의 IMU센서 및 4개의 액추에이터를 사용하며, 이는 106g의 추력을 제공하여 필요 추력 요구사항을 충족한다. Tri-hook 폴딩 메커니즘은 철사로 제작된 손잡이를 확실히 걸기 위해 고안된 구조이다. ODrive 기반의 위치제어가 가능한 모터가 리드스크류를 회전시켜 lead nut이 Tri-hook을 조작하는 방식으로 작동한다. 조난자 포획 후 12V DC 모터와 웜기어 구동 풀리로 구성된 윈치 시스템이 자동으로 1.5kg 페이로드를 회수한다. Dyneema DM20 테더는 신축 유도 위치 오차를 방지하며, 백드라이브 방지 특성으로 인해 안전한 정지 상태를 유지한다.



[Fig. 6] Performing Rescue.

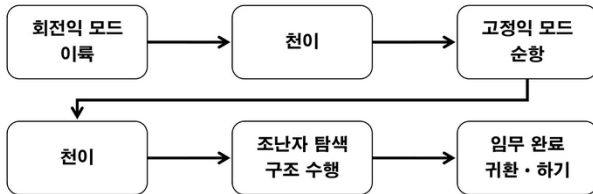
강하 중 프로펠러 다운위시의 영향을 보정하기 위해 구조 모듈 내에 추진 시스템이 통합되어 엔드이펙터를 능동적으로 제어한다. 이러한 설계는 기존의 수동 구조 방식에서 완전 자동화된 물리적 인명 회수를 가능하게 한다.

Table 1. SAR system performance

Metric	Value	Test Condition
Detection Accuracy	95.7%	15-30m altitude
Alignment Accuracy	$\pm 0.31m$	Final approach stage
Mission Time	15 minute	End-to-end operation($\sim 5km$)
Gripper Payload	500g	Maximum load

4. 통합 시스템 작동

본 절에서는 광역 탐색부터 물리적 구조까지 엔드투엔드 자율 SAR 미션의 전체 작동 프로세스를 기술한다. 시스템은 회전익 모드 이륙, 천이, 고정익 모드 순항, 천이, 조난자 탐색 구조 수행의 단계로 구성되며, 각 단계는 통합 제어 알고리즘에 의해 순차적으로 실행된다.



[Fig. 7] Mission system overview.

회전익 모드 이륙: 시스템은 멀티로터 모드로 수직 이륙을 수행한다. 4개의 틸트로터가 모두 상향(90°)으로 정렬되어 최대 양력을 생성하며, 안정화 제어를 수행하여 수직 이륙을 달성한다. 이륙 고도는 조난 추정 지역의 지형에 따라 자동으로 설정된다.

천이 I (회전익 → 고정익): 높이 200m 도달 후 시스템은 고정익 모드로의 자동 천이를 시작한다. 틸트로터들이 점진적으로 후진 방향(0°)으로 회전하며, 고정익의 양력이 증가함에 따라 로터 추력은 감소한다. 전환 시간은 평균 3.2초이며, 이 과정에서 자세 편차는 $\pm 8^\circ$ 이내로 제어된다.

고정익 모드 순항: 고정익 모드로 완전 전환 후 시스템은 57.2 km/h 순항속도로 조난 추정 지역을 광역 스캔한다. PX4 오토파일럿은 사전 정의된 웨이포인트를 따라 자동 경로 추적을 수행하며, Intel RealSense D455 카메라는 15-30m 고도에서 연속 촬영한다. CNN 탐지 모델은 실시간으로 30 fps 비디오를 처리하여 조난자 후보를 식별한다. 조난자 탐지 시 위치 좌표가 기록되고 시스템에 전송된다.

천이 II (고정익 → 회전익): 조난자 탐지 후 시스템은 탐지 좌표 상공으로 비행하여 고정익-멀티로터 역전환을 실행한다. 틸트로터들이 상향 방향으로 회전하면서 멀티로터 양력이 증가하고, 고정익 양력이 감소하며 자동으로 호버링 모드에 진입한다. 이 과정에서 자세 안정성을 유지하기 위해 자동 조종 장치의 게인이 동적으로 조정된다.

조난자 탐색 및 구조 수행: 정밀 호버링 모드에서 능동 냉각 시스템이 작동하여 내부 온도를 42°C 이하로 유지하며 22분 이상의 호버 시간을 확보한다. 색상 기반 마커 추적 알고리즘이 적십자 마크를 인식하여 PD 제어기를 통해 $\pm 0.31\text{m}$ 정렬 정확도로 조난자 중심에 위치한다. 정밀 정렬 완료 후 윈치 시스템이 자동으로 테더를 하강시키고, 구조 모듈의 추진 시스템이 조난자 방향으로 움직인다. Tri-hook 그리퍼가 조난자의 손잡이를 포

획하면 장력 센서가 이를 감지하고, 윈치가 1.5kg 페이로드(포함 구조 모듈 무게)를 기체로 회수한다.

귀환 및 착륙: 구조 완료 후 시스템은 멀티로터-고정익 천이를 통해 출발 지점으로 귀환하고, 최종 목적지에 도착하여 고정익-멀티로터 천이로 역전환하여 수직 착륙한다. 전체 미션은 15분 이내에 완료된다.

5. 결론

본 논문은 극한 환경에서의 자율 수색 및 구조 작업을 수행하기 위한 쿼드-틸트로터 VTOL 무인기의 완전 자동화 시스템을 제시하였다. 분산된 추력 배치, 능동 열관리, 비전 시스템, 자동화된 구조 메커니즘이 단일 플랫폼에 통합되어 광역 탐색에서 물리적 인명 회수까지 엔드투엔드 자율 구조 작업을 실현한다. 이 시스템은 기존의 탐지 중심 SAR 플랫폼의 한계를 극복한다. 고정익 모드의 57.2 km/h 순항속도는 광역 조난 지역을 스캔하고, 22.2분의 호버 시간은 구조 작업에 필요한 현장 체류 시간을 확보한다. 능동 냉각을 통한 28°C 의 온도 감소는 열 제약이라는 설계 문제를 해결하며, YOLOv8 전이학습과 정밀 정렬($\pm 0.31\text{m}$)은 신뢰할 수 있는 자동 대상 추적을 제공한다. 윈치-그리퍼 시스템은 기존 해상 구조 작업의 수동 개입을 완전히 자동화한다. 이러한 기술 통합은 재난 대응 시스템의 패러다임 전환을 시사한다. 급속한 탐지, 정밀 위치결정, 자동 회수의 완전 자동화 흐름은 생명 구조의 골든타임 확보에 결정적 역할을 할 수 있다. 모듈화된 아키텍처는 향후 다양한 구조 도구의 통합과 확장성을 지원하며, 악천후 대응 능력 강화, 페이로드 용량 확대, 실제 재난 환경에서의 적응 알고리즘 개발로 운영 한계를 지속적으로 개선할 수 있다. 본 연구는 완전 자율 SAR 시스템으로의 기술적 가능성을 입증하며, 향후 산림 구조, 해상 조난, 자연재해 구출 활동 등 다양한 공공 안전 분야로의 응용을 기대할 수 있다.

References

- [1] P. S. Agrawal, S. R. Nair, M. R. Ahmed, S. K. Singh, and R. P. Sharma, "Advancements and challenges in drone technology: A comprehensive review," in Proc. 4th Int. Conf. Pervasive Comput. Social Netw. (ICPCSN), IEEE, 2024, pp. 1-8.
- [2] H. Shakhathreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, N. S. Othman, A. Khreishah, and M. Guizani, "Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges," IEEE Access, vol. 7, pp. 48574-48634, 2019.
- [3] P. K. Garg, "Characterisation of fixed-wing versus multirotors UAVs—drones," J. Geomatics, vol. 16, no. 2, pp. 152-159, 2022.
- [4] S. Park, J. Kim, and H. Lee, "Design considerations for VTOL aircraft," in Proc. Int. Conf. Robot. Autom., IEEE, 2023, pp. 2150-2156.

- [5] A. Albanese, V. Sciancalepore, and X. Costa-Perez, "SARDO: An automated search-and-rescue drone-based solution for victims localization," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 21, no. 9, pp. 3312–3325, Sep. 2022.
- [6] M. Khosravi, S. Ahmad, P. Kumar, and R. Singh, "A search and detection autonomous drone system: From design to implementation," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 21, no. 3, pp. 1234–1245, 2024.
- [7] E. T. Alotaibi, S. S. Alqefari, and A. Koubaa, "LSAR: Multi-UAV collaboration for search and rescue missions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 55818–55832, 2019.
- [8] L. Bauersfeld, L. Spannagl, G. J. J. Ducard, and C. H. Onder, "MPC flight control for a tilt-rotor VTOL aircraft," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 57, no. 4, pp. 2395–2409, Aug. 2021.

저자 약력



장 민 석
2021 연세대학교 건설환경공
학과 (학사)

2025~현재 한국과학기술원
시각지능연구실 석사
과정

관심분야: 디지털 트윈, UAV, 엣지컴퓨팅



이 윤 찬
2019 연세대학교 기계공학과
(재학)

관심분야: 항공, 무인기, UAM, 모빌리티



박 준 규
2025 연세대학교 기계공학과
(학사)
2026~현재 한국과학기술원
무인시스템 및 제어
연구실 석사과정

관심분야: 자율비행, 강화학습, 로봇틱스



신 지 환
2021 연세대학교 컴퓨터과학
과 (재학)

관심분야: UAM, 드론, 메카트로닉스, 임베디드, 자율주행



이 광 모
2020 연세대학교 기계공학과
(재학)

관심분야: 강화학습, 제어, 로봇틱스



김 민 준
2021 연세대학교 응용정보공
학과 (재학)
2024~현재 Elytas 전기담당

관심분야: 드론, 3D 프린팅, CNC, 로봇틱스



임 서 현
2023 연세대학교 기계공학과
(재학)

관심분야: 드론, 3D 프린팅, CNC, 로봇틱스



조 근 희
2025 연세대학교 기계공학과
(학사)
2025~현재 연세대학교 기계
공학과 석사과정

관심분야: 드론, 3D 프린팅, CNC, 로봇틱스



손 혁 제
2021 연세대학교 기계공학과
(재학)

관심분야: 항공제어, 모빌리티, 방산



송 순 호
1996 연세대학교 기계공학과(공
학사)
1998 연세대학교 기계공학과(공
학석사)
2005 Stanford, Mechanical
Engineering (공학박사)
2008~현재 연세대학교 교수

관심분야: Drone, Vehicle power trains, Defense

