

3-leg 랜딩 시스템 기반 쿼드콥터의 험지 착륙 기법

Rough Terrain Landing Technique of Quadcopter Based on 3-Leg Landing System

박진우¹·최지욱²·천동훈¹·이승준[†]

Jinwoo Park¹, Jiwook Choi², Donghun Cheon¹, Seungjoon Yi[†]

Abstract: In this paper, we propose an intelligent three-legged landing system that can maintain stability and level even on rough terrain than conventional four-legged landing systems. Conventional landing gear has the limitation that it requires flat terrain for landing. The 3-leg landing system proposed in this paper extends the usable range of the legs and reduces the weight, allowing the quadcopter to operate in various environments. To do this, kinematics determine the joint angles and coordinates of the legs of the two-link structure. Based on the angle value of the quadcopter detected via the IMU sensor, the leg control method that corrects the posture is determined. A force sensor attached to the end of the leg is used to detect contact with the ground. At the moment of contact with the ground, landing control starts according to the value of the IMU sensor. The proposed system verifies its reliability in various environments through an indoor landing test stand. Finally, in an outdoor environment, the quadcopter lands on a 20 degree incline and 20 cm rough terrain after flight. This demonstrates the stability and effectiveness of the 3-leg landing system even on rough terrain compared to the 4-leg landing system.

Keywords: Quadcopter, UAV, Landing System, Kinematics, Robotics

1. 서론

1.1 배경

최근 무인기 산업의 성장으로 쿼드콥터와 같은 드론의 사용 범위가 확장되고 있다. 농업, 배송, 산업 및 재난 상황까지 범위가 넓어지고 있고^[1], 다양한 연구가 진행 중이다.

농산업의 경우 비료와 농약 살포, 건축 산업에서 드론을 이용한 측량 기술 및 모니터링 업무도 실시한다^[2]. 또한, 물류 무인 배송 시스템의 상용화를 앞당기고 있으며^[3], 접근하기 어려

운 위치에 드론을 보내는 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 이와 같은 드론 시장의 성장으로 센서, 카메라 등 관련된 부품^[4]들과 자율비행에 따른 자동 이착륙 등 여러 방법으로 연구가 진행 중이다^[5-7].

무인기는 크게 고정익과 회전익으로 나뉜다. 본 논문에서는 쿼드콥터를 사용했으며, 쿼드콥터는 회전익의 형태를 가진다. 회전익 비행체는 수직으로 이/착륙이 가능하고, 공간상 제약이 크지 않다는 장점이 있다^[8]. 하지만 평지뿐만 아니라 흔들리는 선박 위의 경사면이나 산과 같은 험지에서 쿼드콥터를 운용하기에는 한계점이 존재한다.

쿼드콥터가 흔히 사용하는 스키드 방식이나 수직 막대 방식의 랜딩기어는 고정된 형태^[9]를 가지기 때문에 경사면 혹은 험지에 착륙 시 쿼드콥터가 뒤집히는 flip over가 발생하는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존에 여러 연구가 진행되고 있다^[10-15]. 하지만 이러한 연구는 비용적인 측면과 무게 측면에서 상용화에는 어려움이 있다. 이 외에도 쿼드콥터의 로터 추력을 이용한 연구^[16]도 진행 중이지만, 쿼드콥터의 프로펠러가 경사면에 닿아 파손의 위험이 발생하거나

Received : May. 27. 2022; Revised : Jul. 27. 2022; Accepted : Aug. 2. 2022

※ This work was partially supported by IITP grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2021-0-01202) and KIAT grant funded by the Korea Government (MOTIE) (P0008473, HRD Program for Industrial Innovation)

1. MS Student, Pusan National University, Busan, Korea (jinwoo7379, donghun7379@pusan.ac.kr)

2. PhD Student, Pusan National University, Busan, Korea (jiwook7379@pusan.ac.kr)

† Associate Professor, Corresponding author: Pusan National University, Busan, Korea (seungjoon.yi@pusan.ac.kr)

경사면 이외의 불규칙한 험지에서는 한계점이 있다.

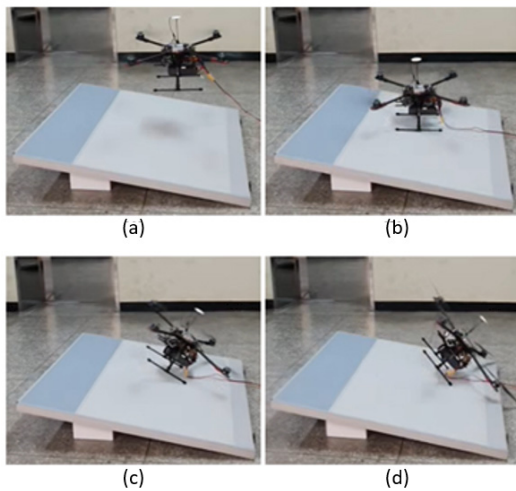
1.2 기존 연구의 한계점

1.2.1 기존 랜딩기어 테스트

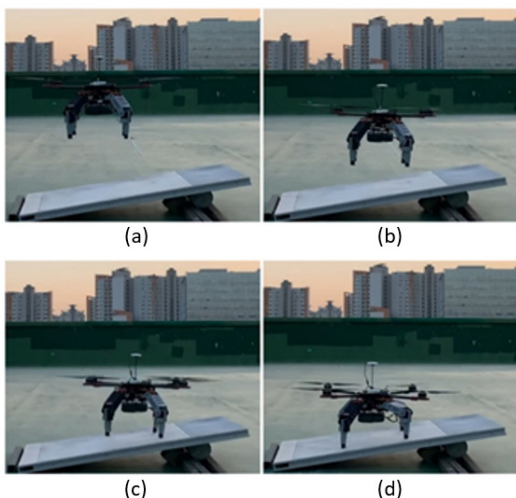
기존 쿼드콥터에 사용되는 랜딩기어와 제안하는 랜딩 시스템과의 비교를 위해 [Fig. 1]과 같이 약 10도 경사면에 비행 후 착륙하는 실험을 진행했다. 착륙하는 순간 쿼드콥터가 경사면에 의해 기울면서 flip over가 발생하며 뒤집히는 문제가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

1.2.2 기존 4-leg 랜딩 시스템 착륙 실험

기존에 개발한 4-leg 랜딩 시스템^[17,18]과 본 논문에서 제안하는 3-leg 랜딩 시스템의 비교를 통해 3-leg 랜딩 시스템의 이점을 강조한다. 4-leg 랜딩 시스템으로 실제 비행을 하며 10도 경사면에 착륙을 시도하였다. [Fig. 2]에서 10도 경사면에서도



[Fig. 1] Skid landing gear experiment



[Fig. 2] 4-leg landing system experiment

수평을 유지하며 착륙하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 기존에 개발한 4-leg 랜딩 시스템의 경우 쿼드콥터의 arm과 다리의 충돌로 착륙 가능한 경사는 10도가 한계인 점을 확인할 수 있다. 또한 다리가 4개이기 때문에 적재하중(payload)와 비행 시간에 상당한 손해를 보게 되어 차후 비전 시스템을 추가하는 경우 문제가 있을 수 있다^[19].

이러한 한계점을 해결하기 위해 본 논문에서는 다리의 개수를 3개로 줄이고, 다리와 쿼드콥터 arm과의 간섭을 최소화해 가능한 착륙 경사도를 2배 이상 증가시켜 험지 및 경사면에서 안정적으로 착륙이 가능한 지능형 랜딩 시스템을 제안한다. 랜딩 시스템은 착륙 시 지면의 상황에 따라 형태를 변경할 수 있는 2-link 구조의 3개의 다리로 구성되어 있고, IMU센서로 감지한 쿼드콥터의 자세 데이터에 따라 제안하는 수식을 통해 3개의 다리를 제어하며 안정적인 착륙을 수행한다. 2장은 3족 랜딩 시스템의 모델링 및 제작과 기구학을 다루고, 쿼드콥터의 기울기를 보상해주는 수식을 정립한다. 3장에서는 실내 및 실외의 다양한 착륙 환경을 가정하고 실험을 진행한다. 제안하는 3족 랜딩 시스템과 기존의 4족 랜딩 시스템간의 비교를 통해 차이를 확인하고, 우수성을 검증한다. 마지막으로 4장에서 연구의 결론을 맺는다.

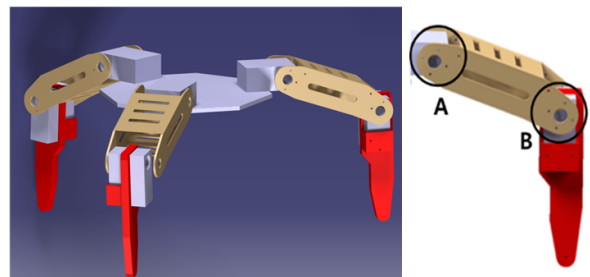
2. 이론적 배경

2.1 3-leg 랜딩 시스템 모델링

경사면 혹은 험지에서 쿼드콥터가 안정적으로 착륙하기 위해서는 관절을 가진 형태로 지면에 맞게 대응할 수 있어야 한다. 기존의 드론 랜딩 기어는 형태가 고정되어 있기 때문에 착륙지점에 한계가 있다. 랜딩 시스템이 지면의 상황에 맞게 변할 수 있다면 드론의 활용 범위가 넓어진다.

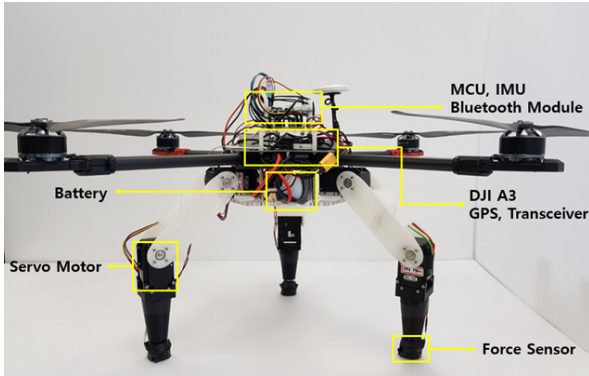
CATIA 3D Tool을 이용해 [Fig. 3]과 같이 구부릴 수 있는 2-link 구조의 다리 3개를 모델링하였다.

[Fig. 4]와 같이 모델링 기반으로 3D프린터로 제작을 하였으며, 각 다리와 쿼드콥터의 arm은 [Fig. 5]와 같이 배치하였다.

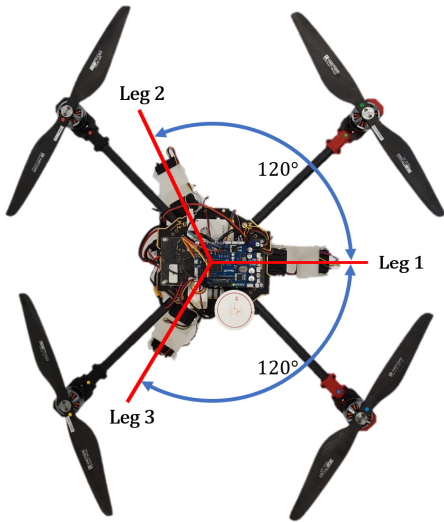


[Fig. 3] Landing system modeling

[Fig. 3]에서 θ_1, θ_2 에 해당되는 관절 A, B에는 쿼드콥터의 무게와 착륙 충격을 견디기 위한 서보모터를 사용했다. 그리고 다리가 지면에 닿는 순간을 감지하기 위해 다리 끝에 힘 센서를 부착하고, 쿼드콥터의 자세 데이터를 감지하기 위해 IMU 센서를 추가했다. 다리의 θ_1, θ_2 각도를 제어함으로써 착륙시 수평을 유지하도록 한다. 자세한 스펙은 [Table 1]에 나타내었다.



[Fig. 4] Landing system assembly



[Fig. 5] Bird's-eye view

[Table 1] Landing system specifications

Size	300 mm (W)×270 mm (H)×300 mm (D)
Weight	Total 4.0 kg (Landing system 1.5 kg + Quad-copter 2.5 kg)
DOF	6 DOF (Leg 2 DOF × 3)
Motor	Dynamicixel MX106 × 6
Sensors	EBIMU9DOFV5 × 1 Force Sensor RP-C18.3 × 3
MCU	OPEN CR

2.2 기구학 모델

쿼드콥터가 경사면에 안정적으로 착륙하기 위해서는 지면이 기울어진 각도만큼 다리를 제어하여 수평을 유지해야 한다. 이를 위해 다리의 목표 end-effector 좌표가 필요하며, 목표 좌표를 이용하여 다리의 joint 각도를 계산해야 된다. [Fig. 6]은 논문에서 사용된 다리의 좌표계를 나타내었다²⁰⁾.

다리 end-effector의 좌표는 정기구학을 통해 구할 수 있다.

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

정기구학에서 역기구학을 유도해 θ_1, θ_2 를 구한다. 식 (1), (2)를 정리하면 식 (3)이 되고, θ_2 로 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (3)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \quad (4)$$

θ_1 을 구하기 위해 α, β 를 구하면 식 (5), (6)이 되고, θ_1 은 α 에서 β 을 뺀 각도를 나타낸다.

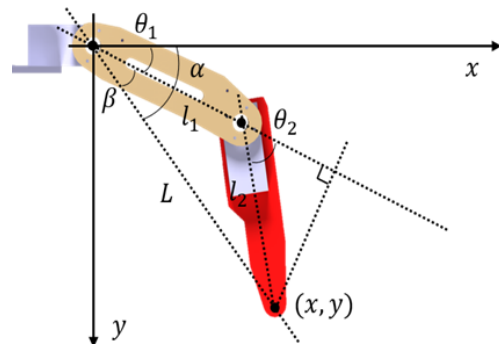
$$\alpha = \text{atan2}(y, x) \quad (5)$$

$$\beta = \text{atan}\left(\frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2}\right) \quad (6)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) - \text{atan}\left(\frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2}\right) \quad (7)$$

2.3 수평 유지 알고리즘

쿼드콥터가 험지에 착륙할 때 지면의 형태에 따라 쿼드콥터의 자세는 기울어지게 된다. 이때 쿼드콥터에 부착되어 있는

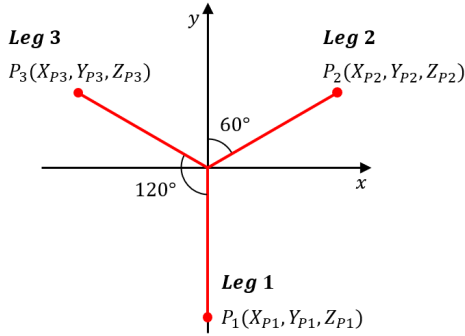


[Fig. 6] Schematic of 2-link leg

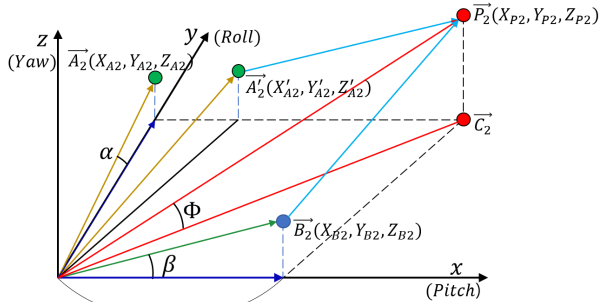
IMU 센서를 통해 자세데이터를 획득하고, 이를 기반으로 자세의 기울기만큼 다리를 제어하여 쿼드콥터의 안정적인 착륙을 수행할 수 있다^[21]. 수평 유지 알고리즘은 PD제어기, 다리 기구학, 기울기 보정 수식으로 이루어져 있다.

[Fig. 7]은 각 다리의 부착 위치를 나타낸다. 기울기에 따른 다리 제어를 위해서는 roll, pitch 자세 데이터 기반으로 다리 방향의 각도 추정이 필요하다. Pitch 방향 축의 기울기는 1번 다리의 각도 방향과 일치하기 때문에 IMU 센서의 pitch 각도 데이터를 1번 다리 방향 각도로 사용한다. 2번, 3번 다리의 경우 roll, pitch 축과 60도, 30도 떨어져 있기 때문에 2번, 3번 다리 방향 각도를 roll, pitch 데이터를 이용해 추정한다.

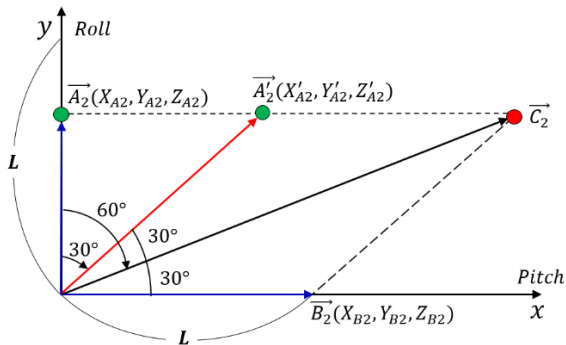
[Fig. 8]에서 2번 다리 방향의 각도 ϕ 를 추정하기 위해 표현한 좌표계이며 ϕ 는 \vec{P}_2 의 Z_{p2} 성분과 \vec{C}_2 를 이용하여 유도할 수 있다.



[Fig. 7] Landing leg position



[Fig. 8] Schematic of 2-link leg



[Fig. 9] 2D coordinate system of leg 2

Roll축 각도 β , pitch축 각도 α 만큼 기울어져 있고 기준길이 L 일때의 위치를 각각 \vec{B}_2, \vec{A}_2 라 한다. Leg2는 roll 축으로부터 60도 만큼 떨어져 있으며 이를 보상해주어야 한다.

[Fig. 9]와 같이 \vec{B}_2, \vec{A}_2 벡터의 합을 이용할 경우 \vec{C}_2 는 \vec{B}_2, \vec{A}_2 벡터 사이 각의 이분점을 지나게 된다. 이를 고려하여 벡터 \vec{A}_2 를 pitch 축으로 30도 만큼 이동시켜 \vec{A}'_2 가 되도록 하고 \vec{C}_2 가 roll 축으로부터 60도 떨어질 수 있도록 한다. 벡터 합을 위해 Z'_{A2} 와 Z_{B2} 를 구하면 아래 식 (8), (9)와 같다.

$$Z'_{A2} = \frac{L \tan \alpha}{\cos 30^\circ} \quad (8)$$

$$Z_{B2} = L \tan \beta \quad (9)$$

Z_{p2} 는 Z'_{A2}, Z_{B2} 의 벡터 합으로 식 (10)과 같다.

$$Z_{p2} = L \left(\frac{\tan \alpha}{\cos 30^\circ} + \tan \beta \right) \quad (10)$$

벡터 \vec{C}_2 는 식 (11)과 같고, 식 (10)과 식 (11)을 이용해 식 (12), (13)과 같이 다리 방향의 각도 ϕ 가 계산된다.

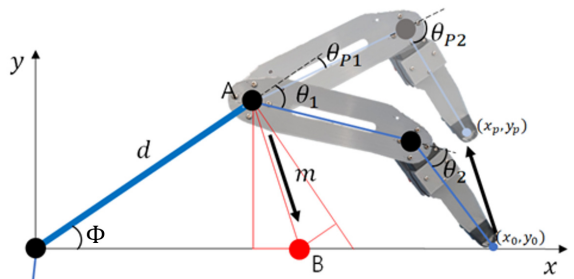
$$\vec{C}_2 = L + \frac{L}{\cos 30^\circ} \quad (11)$$

$$\tan \phi = \frac{Z_{p2}}{C_2} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{L \left(\frac{\tan \alpha}{\cos 30^\circ} + \tan \beta \right)}{L + \frac{L}{\cos 30^\circ}} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha + \cos 30^\circ \tan \beta}{\cos 30^\circ + 1} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

2.3.1 기울기 보정 수식

[Fig. 10]과 같이 쿼드콥터가 험지에 착륙 시 다리가 지면에 닿으면서 ϕ 만큼 기울어지는 상황을 가정한다. ϕ 는 쿼드콥터의 roll, pitch 각도이고, d 는 랜딩 시스템의 중심으로부터 다리



[Fig. 10] Coordinate for leveling formula

까지의 길이이다. θ_1, θ_2 는 초기 다리 자세의 관절 각도이고, θ_{p1}, θ_{p2} 는 쿼드콥터가 수평이 되기 위한 다리의 관절 각도이다.

제안하는 수식은 쿼드콥터가 수평이 되기 위해 A점을 B점으로 이동해야 한다. A점에서 B점으로 이동하기 위한 거리 m 만큼 다리의 end-effector를 들어주는 방식을 고안했다. 다리 end-effector의 초기 위치를 x_0, y_0 , 수평을 만들기 위해 m 만큼 이동한 다리 end-effector의 위치를 x_p, y_p 로 나타내었다.

[Fig. 10]과 같이 A점에서 B점으로 m 만큼 이동하였을 때 x 축과 y 축의 이동거리 x_m, y_m 은 아래와 같다.

$$x_m = 2d \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (14)$$

$$y_m = d \sin \phi \quad (15)$$

다리 end-effector의 초기 위치 x_0, y_0 는 식 (1), (2) 기구학을 통해 구할 수 있다. 그리고 θ_1, θ_2 도 초기 자세를 위한 모터 펄스값을 바탕으로 계산이 가능하다.

$$x_0 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (16)$$

$$y_0 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (17)$$

식 (14), (15)를 통해 구한 x_m, y_m 이동거리만큼 다리의 end-effector를 이동시켜준 x_p, y_p 의 좌표는 아래와 같다.

$$x_p = x_0 - x_m \quad (18)$$

$$y_p = y_0 + y_m \quad (19)$$

다리를 x_p, y_p 로 이동하기 위한 θ_{p1}, θ_{p2} 값은 식 (4), (7)의 역 기구학을 이용해 구할 수 있다.

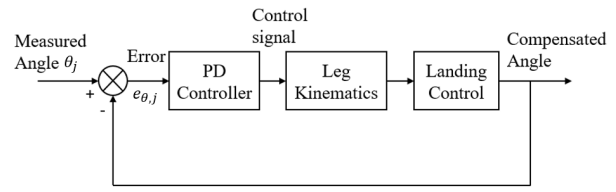
$$\theta_{p2} = \pm \operatorname{atan2}(\sin \theta_{p2}, \cos \theta_{p2}) \quad (20)$$

$$\theta_{p1} = \operatorname{atan2}(y_p, x_p) - \operatorname{atan}\left(\frac{l_2 \sin \theta_{p2}}{l_1 + l_2 \cos \theta_{p2}}\right) \quad (21)$$

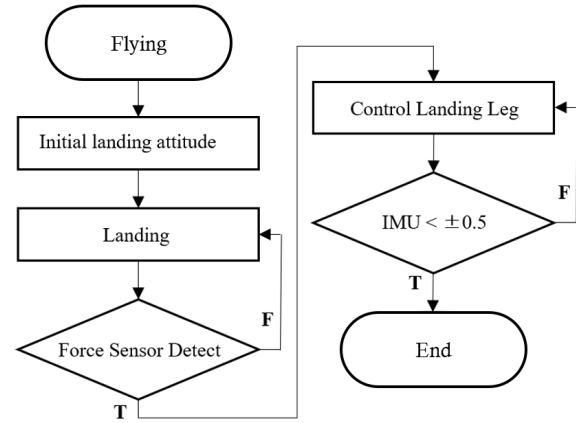
수식을 통해 구한 식 (20), (21)의 값으로 모터를 제어함으로써 A점이 B점으로 내려오며 수평을 만들게 된다.

[Fig. 11]은 랜딩시스템의 제어 블록도를 나타내며 이는 모든 다리에 동일하게 적용된다. 쿼드콥터의 착륙은 실시간으로 이루어지기 때문에 다리가 지면에 접촉했을 때 빠른 제어가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 속응성이 뛰어난 PD-(Proportional-Derivative)제어기를 설계했다.

IMU센서로 현재 쿼드콥터의 자세 데이터를 측정하고, 기울기 보정 수식을 통해 보정된 각도 데이터를 피드백 받아 현



[Fig. 11] Landing system block diagram



[Fig. 12] Landing process

재 자세 데이터와 오차를 계산한다. PD제어기 출력값은 각 다리의 기울기 보정 수식에 적용된다.

$$Q_j = K_{p,i}(\theta_j^{ref} - \theta_j) + K_d \frac{d\theta_j}{dt} \quad (22)$$

Q_j 는 쿼드콥터의 자세 데이터이고, i 는 1~3번 다리의 번호를 나타내고, j 는 roll 또는 pitch를 나타낸다. θ_j^{ref} 는 쿼드콥터 수평을 위한 목표 각도이고, θ_j 는 IMU를 통해 측정된 현재 자세 데이터이다. $e_{\theta,j}$ 는 현재 각도값과 보정된 각도값의 오차를 나타내고, K_p, K_d 는 PD제어기의 이득값이다.

제어기의 출력값을 기울기 보정 식 (14), (15)에 대입한다.

$$x_{Q_j} = 2d \sin^2\left(\frac{Q_j}{2}\right) \quad (23)$$

$$y_{Q_j} = d \sin Q_j \quad (24)$$

쿼드콥터의 자세 오버슈트를 최소화하고, 목표치에 빠르게 수렴 할 수 있도록 제어기의 K_p, K_d 이득값을 설정한다.

힘지 및 경사면에 착륙할 때 수평을 유지하기 위한 동작 과정은 [Fig. 12]과 같다. 쿼드콥터가 착륙을 위한 자세를 취한 후 하강을 하면서 다리의 힘센서를 통해 지면 접촉을 감지한다. 지면과 접촉이 감지된 각 다리는 지면에 접촉한 시점부터 IMU센서를 통한 쿼드콥터 자세 데이터를 기반으로 제안한 기

울기 보정을 수행하며 수평을 유지하도록 랜딩 시스템을 제어한다. 쿼드콥터의 roll, pitch 자세 데이터가 0.5도 이내가 될 때까지 위 과정을 반복하며, 지면과 접촉이 되지 않은 다리는 지면과 접촉이 감지될 때까지 초기 자세를 유지한다.

3. 실험

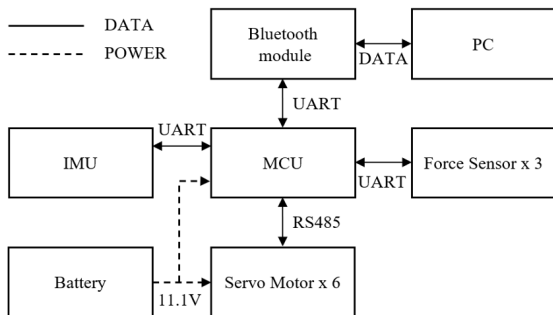
3.1 실험 및 시스템 개요

착륙 실험에 사용된 전체 시스템 구성도는 [Fig. 13]과 같다. 제어를 위한 MCU 보드는 OPEN CR을 사용했고, 각 다리의 관절에는 8N.m의 고토크 서보모터를 장착했다. 타 연구^[13]에서는 각 다리마다 IMU 센서를 사용했지만, 본 논문에서는 9DOF EBIMU 센서 1개만을 이용해 쿼드콥터의 roll, pitch를 측정하고 다리의 기구학 해석을 통해 수평유지를 수행한다. 지면과 닿는 다리 end-effector에는 flexible 힘 센서를 부착하고, ADC를 사용하여 얻은 힘 값으로 지면에 닿는 순간을 감지한다^[22].

3.2 실내 착륙 실험

3.2.1 실내 착륙 테스트 베드

실제 쿼드콥터가 착륙하는 환경을 유사하게 재현하기 위해 [Fig. 14]와 같이 스텝모터를 이용한 테스트 베드를 제작하였다.



[Fig. 13] System configuration



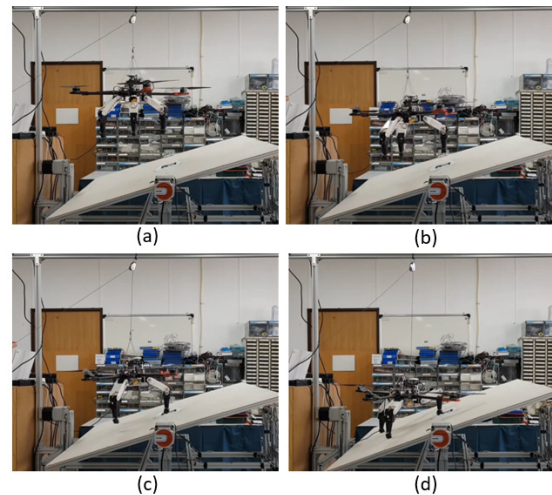
[Fig. 14] Indoor landing testbed

그리고 착륙속도를 구현하기 위해 도르래와 모터를 이용했고, 모터의 RPM속도에 따라 샤프트에 줄이 감기는 길이로 속도를 계산하였다. 테스트 베드를 통해 일정한 착륙 속도를 유지하며 정량적인 데이터를 측정한다. 쿼드콥터에서 RTL(Return To Launch) 모드의 하강 속도는 10~500 cm/s로 동작하지만^[23], 실제 비행의 외란을 감안하여 12 cm/s의 착륙 속도로 테스트를 진행하였다. 실내 테스트의 험지 환경은 20도 경사면과 20 cm 계단형을 선정하고, ±0.5도에 도달하는 시간을 측정하였다.

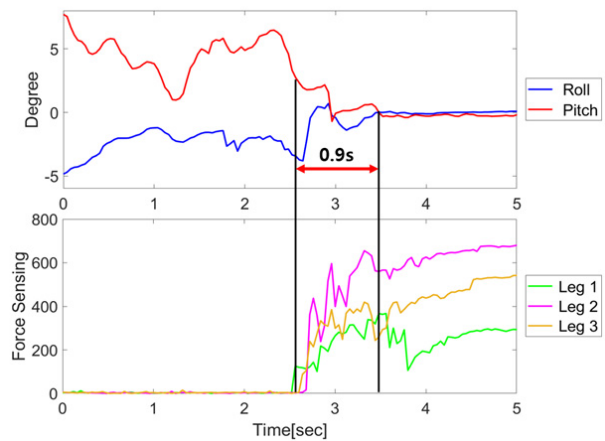
3.2.2 20도 경사면 착륙 실험

[Fig. 15]과 같이 테스트 베드를 이용해 20도 경사면 환경을 구현하고 12 cm/s의 속도로 착륙 실험을 진행했다. 착륙하는 과정에서 발생하는 흔들림 이후 힘센서가 지면에 닿는 시점부터 쿼드콥터의 자세를 감지하고 실시간으로 다리를 제어함으로써 20도 경사면에서도 빠르게 수평을 유지하며 안정적인 착륙을 보였다.

착륙하는 과정동안 쿼드콥터의 자세 데이터와 힘센서의



[Fig. 15] Indoor landing experiment (20 degrees)

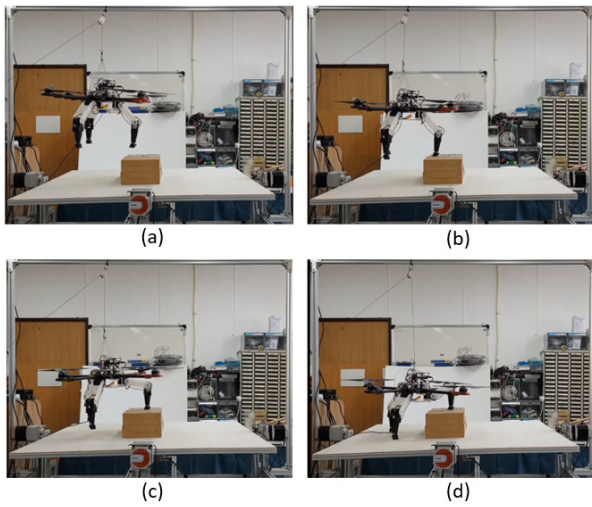


[Fig. 16] Indoor landing graph (20 degrees)

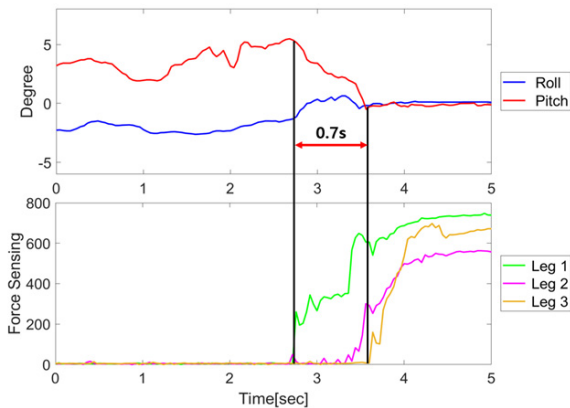
ADC 값을 [Fig. 16] 그래프에 나타냈다. ADC값이 50이상인 순간을 접촉 기준으로 했을 때 약 2.6초에 지면에 닿았고, 이후부터 기울기 보상을 통한 다리 제어 통해 roll, pitch가 ± 0.5 도 이내로 수렴하여 안정적인 착륙을 수행하였다. 이때 수평 유지에 걸린 시간은 약 0.9초이다. 쿼드콥터의 자세를 감지하고 0.9초 이내에 roll이 0.1도, pitch가 -0.3도로 수평이 되는 것을 그래프로 확인할 수 있다.

3.2.3 20 cm 계단 지형 착륙 실험

[Fig. 17]는 20 cm 높이의 박스를 사용하여 착륙 환경을 구성하였다. 20도 경사면의 실험과 마찬가지로 12 cm/s의 속도로 착륙을 진행하며, 지면에 다리가 한 개라도 먼저 닿는 순간 쿼드콥터의 기울어짐을 감지하고 실시간으로 다리를 제어함으로써 빠르게 수평을 유지한다. [Fig. 18]은 착륙하는 과정에서 힘센서에서 측정된 힘 값과 쿼드콥터의 기울기 데이터를 보여준다. 그래프를 통해 지면에 접촉한 후 0.7초만에 ± 0.1 도로 수렴하여 수평이 되는 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 17] box terrain landing experiment (20 cm)



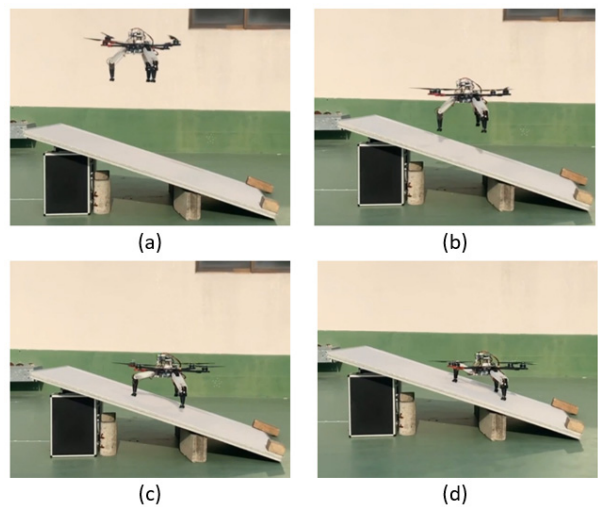
[Fig. 18] box terrain landing graph (20 cm)

3.3 실외 착륙 실험

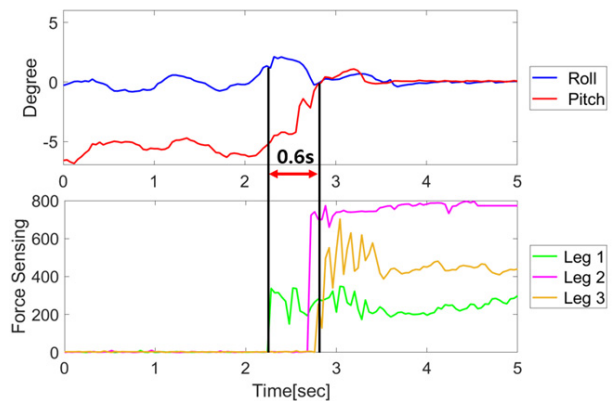
3.3.1 3-leg 랜딩 시스템 20도 경사면 착륙 실험

[Fig. 19]과 같이 20도 경사면에 비행한 후 착륙 실험을 진행하였다. 경사면에 먼저 닿는 다리부터 제어해 쿼드콥터의 자세를 유지하며 안정적인 착륙을 보여주었다. [Fig. 20]는 착륙하는 과정의 쿼드콥터의 자세데이터와 힘센서 측정값을 나타내었다.

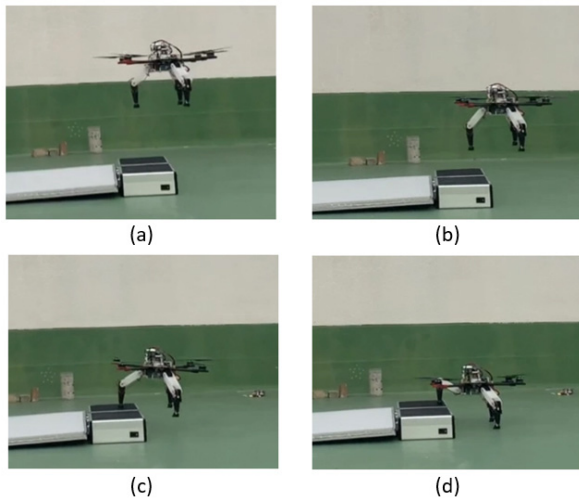
착륙하는 동안 블루투스 모듈을 이용해 쿼드콥터의 자세 데이터를 수신하고 roll, pitch가 각각 0.5도로 이내로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. [Fig. 20]는 힘 센서의 측정값을 통해 파악한 지면 접촉 순간부터 쿼드콥터의 자세 데이터가 ± 0.5 도 이내로 들어가는 시간을 측정한 결과이다. 바람과 같은 외란에 의해서 흔들림이 발생했지만, 1번 다리의 지면 접촉부터 약 0.6초만에 Roll은 0.08도, Pitch는 0.09도로 수평을 만들어 기존 4-leg 착륙 시스템의 최대치보다 높은 20도의 경사면에서도 안정적으로 착륙하는 것을 확인할 수 있었다.



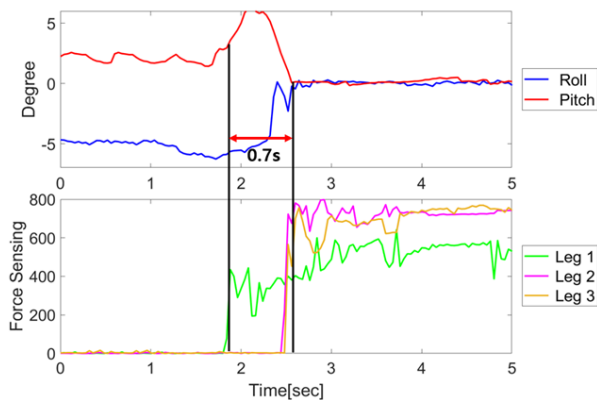
[Fig. 19] Outdoor landing experiment (20 degrees)



[Fig. 20] Outdoor landing graph (20 degrees)



[Fig. 21] Outdoor terrain landing experiment (20 cm)



[Fig. 22] Outdoor terrain landing graph (20 cm)

3.3.2 3-leg 랜딩 시스템 20 cm 계단 지형 착륙 실험

경사면 실험과 같은 환경에서 3-leg 랜딩 시스템이 계단 지형에서도 정상적으로 동작하는지 확인해보기 위해 20 cm 높이의 험지를 만들어 실험을 진행했다. 앞선 실험과 같이 비행 후 20 cm 험지에 착륙하는 과정을 [Fig. 21]에 나타냈다.

[Fig. 22]과 같이 20 cm 높이의 계단 지면에 착륙 시 roll이 -0.2 도, pitch가 -0.3 도로 ± 0.5 도 이내로 들어가는 시간은 0.7초로 경사면보다 길게 나왔다. 하지만 초기 목표인 1초 이내에 쿼드콥터가 안정적인 착륙을 수행했고, 4-leg 랜딩 시스템보다 더 다양한 환경의 험난한 지형에서도 운용이 가능함을 보여주었다.

4. 결론

본 논문에서는 험난한 지형에서 flip over가 발생하지 않고, 최소한의 부품과 센서만으로 안정적인 착륙이 가능한 3-leg 랜딩 시스템을 제안하였다. 특히 기존 개발한 4-leg 랜딩 시스템의 한계점이었던 다리의 가용범위를 크게 높여 기존보다 2

배 이상인 20도 경사면과 20 cm의 높이에서도 안정적인 착륙이 가능했고, 쿼드콥터의 적재하중 측면에서도 이점을 가질 수 있었다.

IMU센서와 힘 센서만을 사용해서 지면 접촉과 쿼드콥터의 자세를 감지하고, 센싱된 데이터에 따라 다리를 제어하기 위한 수평유지 알고리즘을 고안했다. 쿼드콥터의 기울기에 따라 각 다리 관절의 목표 각도를 계산하고 제어함으로써 쿼드콥터가 빠르게 수평에 수렴하도록 했다. 제안한 수평유지 알고리즘과 제어기를 적용한 랜딩 시스템을 직접 제작한 실내 착륙용 테스트 베드에서 실험을 진행하면서 신뢰성을 검증했다. 실의 실제 비행 실험에서 기존 랜딩기어를 사용한 착륙에서 flip over가 발생하는 환경보다 더 험난한 지형에서 1초 이내에 빠르게 수평을 유지하며 안정적인 착륙을 확인할 수 있었다. 향후 카메라 비전 시스템을 추가하여 경사면의 각도와 험지의 상황을 미리 판단 후 착륙을 진행할 수 있도록 연구를 진행할 것이다. 이는 차세대 무인기의 활용범위를 넓히고 기술을 향상시킬 수 있을 것이다.

References

- [1] C. Y. Ju and H. I. Son, "Multiple UAV systems for agricultural applications: control, implementation, and evaluation," *Electronics*, vol. 7, no. 9, 2018, DOI: 10.3390/electronics7090162.
- [2] D. Y. Shin, "Construction and drone technologies," *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, vol. 68, no. 1, pp. 28-39, 2020, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NODE09284271>.
- [3] S. H. Kim, D. K. Lee, J. H. Cheon, S. J. Kim, and K. H. Yu, "Design and flight tests of a drone for delivery service," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 204-209, 2016, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06615701>.
- [4] C. H. Joe, S. J. Park, I. S. Um, and H. N. Kim, "Exploring trends and technologies in drone development," *Communications of the Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, vol. 37, no. 1, pp. 10-19, 2019, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07610029>.
- [5] H.-Y. Ko, J.-H. Baek, and H.-S. Choi, "Autonomous flight system of UAV through global and local path generation," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 13, pp. 15-22, 2019, DOI: 10.20910/JASE.2019.13.3.15.
- [6] J. W. Choi, D. K. Hwang, J. W. An, and J. M. Lee, "Object Detection using CNN for automatic landing of drones," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 56, no. 5, pp. 82-90, 2019, DOI: 10.5573/ieie.2019.56.5.82.
- [7] S. G. Park and D. H. Kim, "Autonomous flying of drone based on PPO reinforcement learning algorithm," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 26, no. 11, pp. 955-963, 2020, DOI: 10.5302/J.ICROS.2020.20.0125.

- [8] Y. M. Kim and W. B. Baek, "Gyro Effect Control of the Quadrotor UAV using Feedback Linearization," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 15, no. 3, pp. 248-255, Sept., 2020, DOI: 10.7746/jkros.2020.15.3.248.
- [9] DJI, *Phantom 4 Pro V2.0*, [Online], <https://www.dji.com/kr>, Accessed: May 2, 2021.
- [10] D. W. Felder, "Slope landing compensator system," US-0765196, Feb. 3, 1977, [Online], <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchPatent.do?cn=USP1977124062507>.
- [11] S. Mason, "Helicopter self-leveling landing gear," US3857533A, Jan. 28, 1974, [Online], <https://patents.google.com/patent/US3857533A/en>.
- [12] D.-J. Lee, "Autonomous unmanned flying robot control for reconfigurable airborne wireless sensor networks using adaptive gradient climbing algorithm," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 6, no. 2, pp. 97-107, Jun., 2011, DOI: 10.7746/jkros.2011.6.2.097.
- [13] S. Baker, D. Soccol, A. Postula, and M. V. Srinivasan, "Passive landing gear using coupled mechanical design," *Australasian Conference on Robotics and Automation, Sydney, Australia*, pp. 1-8, 2013, [Online], <https://www.araa.asn.au/acra/acra2013/papers/pap175s1-file1.pdf>.
- [14] Y. S. Sarkisov, G. A. Yashin, E. V. Tsykunov, and D. Tsetserukou, "Dronegear: A novel robotic landing gear with embedded optical torque sensors for safe multicopter landing on an uneven surface," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 1912-1917, 2018, DOI: 10.1109/LRA.2018.2806080.
- [15] S. Lee, J. Kawk, and B. Chu, "Study of a leveling mobile platform for take-off and landing of unmanned aerial vehicles," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, vol. 19, no. 4, pp. 85-92, 2020, DOI: 10.14775/ksmpe.2020.19.04.085.
- [16] J. Bass and A. L. Desbiens, "Improving multicopter landing performance on inclined surfaces using reverse thrust," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5850-5857, 2020, DOI: 10.1109/LRA.2020.3010208.
- [17] D. H. Cheon, J. W. Lee, S. H. Woo, J. W. Choi, H. S. Kang, and J. M. Lee, "Research on Adaptive Landing System on the Rough Terrain for Quad-copter," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 247-254, 2021, DOI: 10.5302/J.ICROS.2021.20.0195.
- [18] J. Choi, D. Cheon, and J. Lee, "Robust Landing Control of a Quadcopter on a Slanted Surface," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 22, no. 6, pp. 1147-1156, 2021, DOI: 10.1007/s12541-021-00523-z.
- [19] S. Jung, J. Koo, K. Jung, H. Kim, and H. Myung, "Vision-based Autonomous Landing System of an Unmanned Aerial Vehicle on a Moving Vehicle," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 11, no. 4, pp. 262-269, Dec., 2016, DOI: 10.7746/jkros.2016.11.4.262.
- [20] S. Muslimin and D. Istardi, "Inverse kinematics analysis for motion prediction of a hexapod robot," *2018 International Conference on Applied Engineering (ICAE)*, Batam, Indonesia, 2018, DOI: 10.1109/INCAE.2018.8579402.
- [21] H. S. Jung, Y. H. Choi, and J. B. Park, "Posture control of quadruped robot using gyroscope," *The Korean Institute of Electrical Engineers Conference*, 2010, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01534635>.
- [22] R. Jia, W. Jizhen, L. Xiaochuan, and G. Yazhou, "Terrain-adaptive bionic landing gear system design for multi-rotor UAVs," *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Nanchang, China, 2019, DOI: 10.1109/CCDC.2019.8833311.
- [23] Ardupilot, [Online], <https://ardupilot.org/copter/index.html>, Accessed: Sept. 2, 2021.



박진우

2021 동서대학교 메카트로닉스융합공학부 학사
2021~현재 부산대학교 전기전자공학과 석사과정

관심분야: 마이크로프로세서 응용 및 제어 SW



천동훈

2017 부경대학교 전자공학과 학사
2019~현재 부산대학교 전기전자공학과 석사과정

관심분야: 마이크로프로세서 응용 및 제어, 로봇 설계, 모델링



최지욱

2017 경남과학기술대학교 전자공학과 학사
2019 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사
2019~현재 부산대학교 전기전자공학과 박사과정

관심분야: 로봇시스템 설계 및 제어, 마이크로프로세서 응용



이승준

2000 서울대학교 전기공학부 학사
2002 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2013 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2017~현재 부산대학교 부교수

관심분야: 지능로봇, 인공지능