http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.6.141
JIWIT 2012-6-18

영상 기반 자동 착륙용 멀티로터 시스템 설계 및 개발

Design and Fabrication of Multi-rotor system for Vision based Autonomous Landing

김규범*, 송승화**, 윤광준***

Gyou-Beom Kim, Seung-Hwa Song, Kwang-Joon Yoon

요 약 본 논문에서는 영상 기반 자동 착륙 시스템 개발과 이 시스템을 사용하는 멀티로터 플랫폼 개발에 대해서 소개 한다. 멀티로터 플랫폼은 뉴턴 오일러 개념을 근간으로 하는 강체 운동 모델링을 하였고, LQR 제어 기법을 통한 제어기 튜닝 및 시뮬레이션을 하였다. 영상기반 자동 착륙 시스템은 멀터로터 시스템에 탑재된 단일 카메라를 사용하여 추가적인 임무장비 없이 증강 현실 알고리즘을 사용하여 마커를 탐지하고 정밀한 착륙을 유도하도록 GCS와 연동 코드를 구현 하였다.

Abstract This paper introduces development of multi-rotor system and vision based autonomous landing system. Multi-rotor platform is modeled by rigid body motion with Newton Euler concept. Also Multi-rotor platform is simulated and tuned by LQR control algorithm. Vision based Autonomous Landing system uses a single camera that is mounted Multi-rotor system. Augmented reality algorithm is used as marker detection algorithm and autonomous landing code is test with GCS for the precision landing.

Key Words : Vision, Autonomous landing, quadrotor, multi-rotor, control

Ⅰ. 서 론

이착륙 시 공간의 제약을 받지 않고 다양한 임무를 수행하기 위해 수직 이착륙이 가능하며 공중 정지 비행을 할 수 있는 헬리콥터는 무인 비행체 플랫폼으로 적합 하다. 그러나 로터 블레이드 허브의 구조적인 복잡함과 로터 블레이드의 공기 역학적인 커플링으로 인해 시스템이 매우 불안정하다. 따라서 소형화하여 무인기로 사용하기에는 제작상 크기의 한계가 있으며, 시스템의 복잡함으로 인한 모델링 및 제어기 구현이 쉽지가 않다. 그에 반하여, 다수의 프로펠러를 사용하는 멀티로터는 프로펠러의 직접적인 체결로 인해 기구적으로 단순하고 헬리콥터 보다 적은 공기역학적 커플링으로 인해 시스템 모델링 및 제어기 구현이 유리하다. 이러한 장점으로 인하여 쿼드로터 등의 멀티로터 비행체에 대한 활발한 연구들이 진행되어 왔다.

멀티로터 플랫폼 개발과 더불어 자동 비행에 관한 연구도 활발히 진행 되어 왔는데, 그중 자동 착륙은 하강 비행 시에 발생할 수 있는 돌풍이나 대형 건물들의 위치 등 환경적 위험요소를 극복하고, 정확한 위치 안내를 하

*정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
**정회원, (주)아이디스 주임 연구원
***정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
접수일자 : 2012년 11월 12일, 수정완료 : 2012년 12월 7일
게재확정일자 : 2012년 12월 14일

Received: 11 November 2012 / Revised: 7 December 2012 / Accepted: Revised: 14 December 2012
***Corresponding Author: kjyoon@konkuk.ac.kr
Dept. of Aerospace Information Engineering, Konkuk University, Korea

여 무인기의 생존성을 높이는 역할을 한다. 통상 위치 안내는 GPS 신호로 유도를 하는데, 그 오차 범위가 3미터 내외 이다. 하지만 환경에 따라 GPS 수신이 어려워 질 때가 있으므로 이를 보완할 대안이 필요 하다. 여기서, 멀티로터 무인기의 기본 임무 장비인 카메라를 사용하여 마커 인식을 통한 정밀 유도 제어를 한다면 별도의 센서나 임무장비의 추가 없이 보다 정밀한 자동 착륙 유도를 할 수 있다.

II. 멀티로터 모델링 및 제어

1. 멀티로터 구성

멀티로터 시스템의 구성은 FCC(Flight Control System), AHRS(Attitude Heading Reference System), ESC (Electronic speed controller), RF 모뎀, 영상 카메라 및 영상 전송 장치로 이루어져 있고, GCS(Ground Control System)는 멀티 로터의 자세정보와 멀티로터에서 전송된 카메라 이미지를 수집하는 일을 한다.

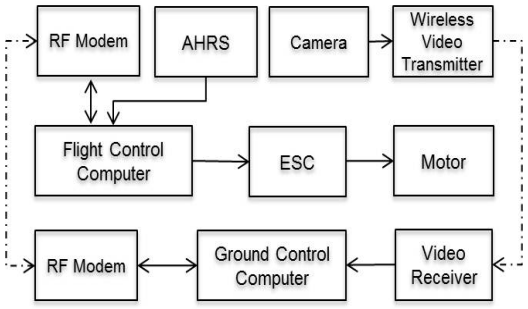

그림 1. 멀티로터 시스템 구성
Fig 1. Configuration of Multi-rotor system

그림 1에서 FCC는 자세 측정 센서인 AHRS, RF 모뎀 그리고, ESC와 연결 되어 자세 제어를 하게 된다. 그리고 독립된 카메라와 영상 전송 장치는 별도로 운용 된다.

2. 멀티로터 모델링

멀티로터는 강체라고 가정 하여, 6자유도 강체 운동 방정식을 뉴턴 오일러 개념으로 모델링 하였다. 그림 2는 멀티로터에서 발생하는 힘과 모멘트를 보여준다. 멀티로터의 자세는 각 모터의 회전수로 제어 되며, throttle, roll, pitch 그리고 yaw는 다음과 같다.[1]

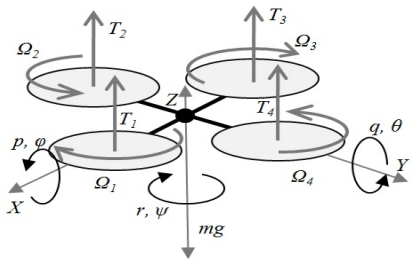

그림 2. 멀티로터의 힘과 모멘트
Fig 2. Force and Moment of Multi-rotor

$$Throttle: U_1 = b\,(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (1)$$

$$Roll \quad : U_2 = l\,b\,(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \quad (2)$$

$$Pitch \quad : U_3 = l\,b\,(-\Omega_1^2 + \Omega_3^2) \quad (3)$$

$$Yaw \quad : U_4 = d\,(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (4)$$

여기서 $b\ (Ns^2)$는 추력 계수이고, $l\ (m)$은 기체 중심에서 프로펠러 중심까지의 거리이며, $d\ (Nms^2)$는 항력 계수이다.

$$\ddot{x} = (\sin\psi \sin\phi + \cos\psi \sin\theta \cos\phi)\,\frac{U_1}{m} \quad (5)$$

$$\ddot{y} = (-\cos\psi \sin\phi + \sin\psi \sin\theta \cos\phi)\,\frac{U_1}{m} \quad (6)$$

$$\ddot{z} = -g + (\sin\theta \cos\phi)\,\frac{U_1}{m} \quad (7)$$

$$\ddot{\varphi} = (q\,r(I_{YY} - I_{ZZ}) - J_{TP}\,q\Omega + U_2)\,\frac{1}{I_{XX}} \quad (8)$$

$$\ddot{\theta} = (p\,r(I_{ZZ} - I_{XX}) + J_{TP}\,p\,\Omega + U_3)\,\frac{1}{I_{YY}} \quad (9)$$

$$\ddot{\psi} = (p\,q(I_{XX} - I_{YY}) + U_4)\,\frac{1}{I_{ZZ}} \quad (10)$$

식 (5)에서 (7)은 x, y, z축의 병진 운동 식이며 식 (8)에서 (10)은 roll, pitch, yaw에 대한 회전운동을 나타낸다. 여기서 $g(m/s^2)$은 중력 가속도, $m(kg)$은 멀티로터의 질량, I_{ii}는 각 축에 대한 관성모멘트, 그리고 $J_{TP}(Nms^2)$ 총 회전 관성 모멘트이며, J_{TP}는 무시하는 것으로 가정했다.[1][2]

3. 멀티로터 제어

멀티로터 모델의 검증을 위해서 PID 제어기를 사용한 멀티로터 플랫폼을 제작 하였고, 비행테스트를 통해서 시뮬레이션 값과 비교 하였다.[3] 상태 변수로는 roll rate(p), roll angle(ϕ), pitch angle(q), pitch rate(Θ), yaw angle(r), yaw rate(ψ)이 사용 되었고, 제어 입력으로는

vertical control(δ_{col}), longitudinal cyclic(δ_{long}), lateral cyclic(δ_{lat}), directional control (δ_{ped})이 사용되었다. 그리고 입력 감도는 $K_{\delta col}$, $K_{\delta long}$, $K_{\delta lat}$, $K_{\delta ped}$ 으로 조정 된다. 시스템 입력은 식 (11) - (14)와 같다.[4]

$$u_1 = K_{\delta_{col}}\delta_{col} + \left(\varphi_K + K_{\delta_{ped}}\delta_{ped}\right) + \left(\varphi_K - K_{\delta_{long}}\delta_{long}\right) \quad (11)$$

$$u_2 = K_{\delta_{col}}\delta_{col} - \left(\varphi_K + K_{\delta_{ped}}\delta_{ped}\right) + \left(\theta_K + K_{\delta_{lat}}\delta_{lat}\right) \quad (12)$$

$$u_3 = K_{\delta_{col}}\delta_{col} + \left(\varphi_K + K_{\delta_{ped}}\delta_{ped}\right) - \left(\varphi_K - K_{\delta_{long}}\delta_{long}\right) \quad (13)$$

$$u_4 = K_{\delta_{col}}\delta_{col} - \left(\varphi_K + K_{\delta_{ped}}\delta_{ped}\right) - \left(\theta_K + K_{\delta_{lat}}\delta_{lat}\right) \quad (14)$$

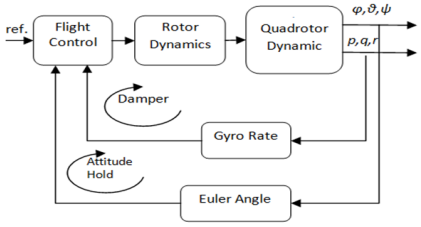

그림 3. 멀티로터 자세 제어 시스템
Fig 3. Attitude control system of Multi-rotor

그림 3은 멀티로터 자세 제어 시스템을 보여 준다. 자세 제어를 위해서 오일러 각을 사용 했으며, 자이로 센서 값을 댐퍼로 사용하여 제어를 하였다.

제어기는 단일입력 단일출력(Single Input Single Output) 시스템으로 설계 되었으며, 각 축에 대한 회전 운동 안정화를 위한 댐퍼(damper)는 식 (15)와 같다.[2]

$$C_D(s) = g_r * k_p \quad (15)$$

$$C_{AH}(s) = \left(\Theta_{ref}(s) - \Theta(s)\right)\left(k_p + k_d s\right) \quad (16)$$

$$C(s) = C_{AH}(s) + C_D(s) \quad (17)$$

비례 제어를 위해서 롤, 피치, 요의 각속도를 사용 했으며, 자세 제어를 위한 PD 제어는 식 (16)과 같다. 식 (15)와 (16)으로부터 전체 제어기는 식 (17)과 같이 유도 된다. 여기서 $C_D(s)$는 각속도 댐퍼 제어기이며, gr은 각속도 출력(p, q, r)이다. k_p는 각속도 댐퍼 비례제어 게인이며, $C_{AH}(s)$는 자세 제어기이다. 그리고 $\Theta_{ref}(s)$와 $\Theta(s)$는 입력 참조 값과 현재 입력 값이며, k_p+$k_d s$는 자세 제어를 위한 PD 게인 이다. $C(s)$는 전체 제어 출력을 나타낸다.

초기 게인 튜닝 값은 LQR(Linear Quadratic Regulation) 제어기를 통해서 설정 되었다.

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u)\mathrm{dt} \quad (18)$$

$$A^T P + PA + C^T Q C - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (19)$$

$$K = R^{-1}B^T P \quad (20)$$

LQR 제어기는 최적 제어 기법의 하나로 성능지수(Performance Index)를 최소화 시키는 K를 찾는 것으로 여기서는 성능 지수 함수 J는 식 (18)과 같이 주어지며, 제어기 K는 식 (19)의 리카티방정식(Riccati Equation)을 통해서 구할 수 있다. Q와 R은 가중 함수 이며 최종적으로 구해지는 제어기 K는 식 (20)과 같다. 상태공간 방정식은 식 (21) 이며, 입력 벡터는 식 (22) 일 때 시스템 식별(System Identification)을 통해서 구한 A, B 행렬은 다음과 식 (23), (24)와 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (21)$$

$$u = -Kx \quad (22)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0058 & 0 & -0.0051 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0058 & 0 & 0 & 0 & -3.475\mathrm{e}^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6.872\mathrm{e}^{-5} & 0 & 0 & 8.004\mathrm{e}^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4.055\mathrm{e}^{-5} & 9.083\mathrm{e}^{-6} & 1.186\mathrm{e}^{-5} & 0.3316 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$K = \begin{bmatrix} -0.4833 & -3.4466 & -0.5032 & -3.5066 & -0.5926 & -1.277 \\ 157.33 & 83.91 & -0.1806 & -0.7051 & -0.4910 & -0.8500 \\ -0.2178 & -0.6493 & 157.33 & 83.91 & -0.5144 & -0.8375 \\ -0.0381 & -0.1040 & -0.0271 & -0.0673 & 87.55 & 27.78 \end{bmatrix} \quad (25)$$

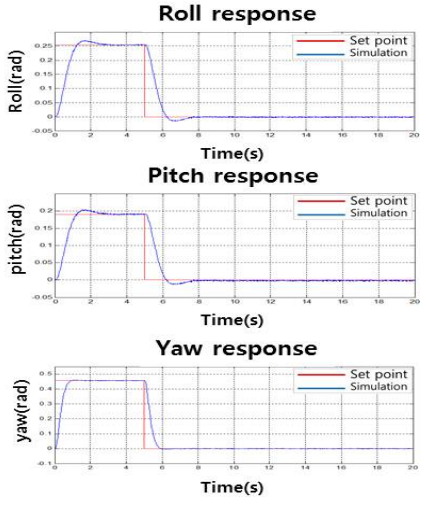

그림 4. 멀티로터 LQR 제어기 시뮬레이션결과
Fig 4. Simulation result of Multi-rotor LQR control

식 (20)을 통해서 구한 K 행렬은 식 (25)와 같다. 그림 4는 멀티로터 LQR 제어기 시뮬레이션 결과를 보여준다. 롤, 피치, 요의 제어는 세팅 포인트를 잘 따라 가는 결과를 보여 준다.

Ⅲ. 비전센서 기반 자동 착륙 시스템

1. 비전센서 기반 자동 착륙 시스템 구성

멀티로터의 임무장비 탑재 무게에 대한 제약이 있어, 영상처리는 FCC에서 전송된 이미지를 GCS에서 처리하는 시스템으로 구축했다. 비전 센서 기반 자동 착륙 시스템에 대한 개요는 그림 5와 같다.

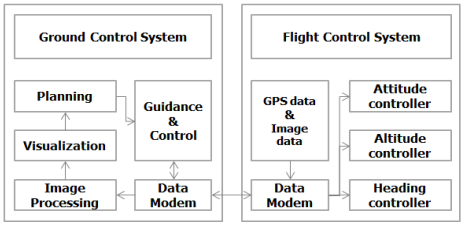

그림 5. 자동 착륙 시스템 개요
Fig 5. Overview of Autonomous landing system

그림 6은 영상 처리를 통해 비행제어를 하는 자동 착륙 절차를 보여 준다. 우선 GPS를 통해 착륙 지역으로 이동 한 후, 마커를 찾는다.[5][6] 마커를 찾은 뒤에는 마커를 기준으로 헤딩을 고정 시킨 뒤에 마커의 중심점과 카메라의 중심점을 일치 시킨다. 그리고 고도 제어를 통해 착륙을 하게 된다.

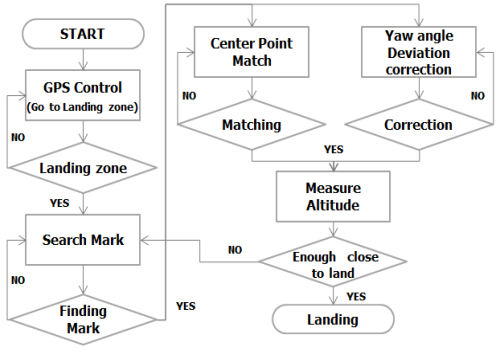

그림 6. 자동 착륙 절차
Fig 6. Autonomous landing Procedure

2. 마커 탐지

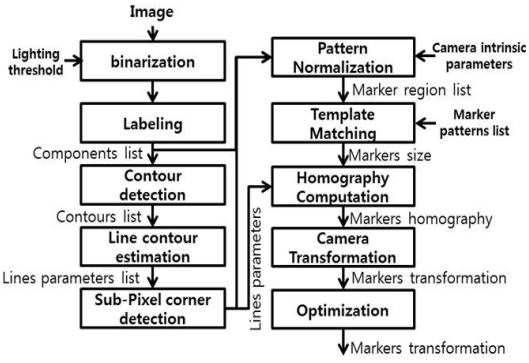

그림 7. 마커 인식을 위한 영상처리 과정
Fig 7. Image procedure of marker detection

그림 7은 마커 인식 알고리즘의 과정을 묘사한다. 원본 이미지의 명암도 정보에서 threshold를 추출하여 마커의 정확한 영역을 검출하는데 유리한 이진 영상을 추출하고, 윤곽 추적 알고리즘을 이용해 마커의 윤곽을 감지한 후 라인 윤곽을 예측한다. 이렇게 검출된 영역은 pattern normalization과 template matching 과정을 통해 정확한 타겟을 인식하게 된다. 정확한 마커인식을 위해서 homography computation을 통해 이미지를 보정한다. 그림 8은 샘플 이미지와 템플릿 매치가 된 마커를 찾은 결과를 보여준다.

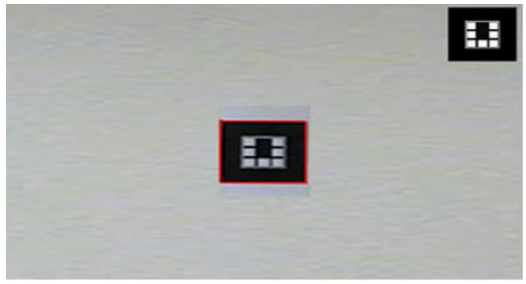

그림 8. 원본 마커와 템플릿 매치된 마커
Fig 8. Original marker and template-matched marker

Ⅳ. 결과 및 고찰

그림 9는 멀티로터의 호버링 비행 데이터이다. 호버링 비행에서 롤과 피치는 0도, 그리고 요는 -1.6 라디안으로 세팅이 되었다.

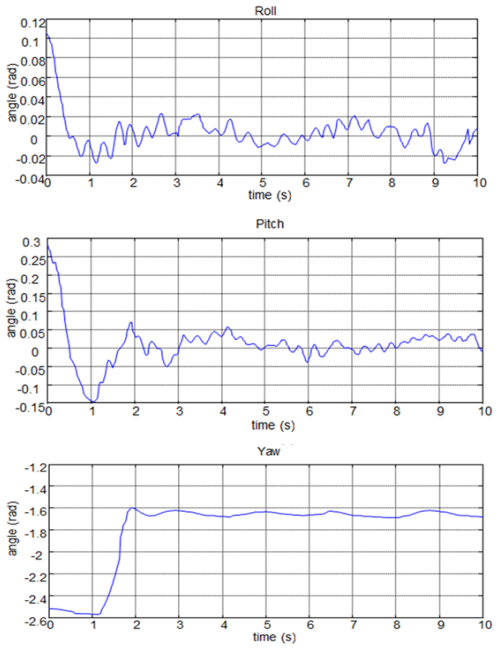

그림 9. 멀티로터 호버링 비행 데이터
Fig 9. Hovering flight data of Multi-rotor

그림 9에서와 같이 롤, 피치 그리고 요 데이터는 세팅된 값으로 따라가고 있음을 볼 수 있다. 그림 10은 GCS와 비전 센서를 연동 하여 마커를 인식하는 테스트를 보여 준다. GCS에서는 마커와 화면의 중심점에서의 상대 거리 및 헤딩 각도 정보를 출력 한다.

그림 10. GCS 연동 비전센서 테스트
Fig 10. Vision sensor test with GCS

V. 결 론

본 연구에서 멀티로터 시스템의 모델링을 하였고, 그것을 근간으로 하여 제어기 구현 및 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에서 제거기는 설정된 값으로 수렴 하는 것을 보여 주었고, PID 초기 게인 입력은 LQR 제어기를 통해 얻은 값을 사용하였다. 또한, 호버링 비행 테스트를 통해 제어기가 안정적인 호버링 비행이 가능 하도록 멀티로터 비행체를 제어함을 검증 했다. 비전센서 기반 자동 착륙 시스템에서는 증강현실 알고리즘을 사용하여 마커 탐지를 하였고, GCS와 연동 테스트를 통해 마커와 화면의 중심점에서의 상대 거리 및 헤딩 각도 정보를 출력하는 것을 확인 하였다. 향후에는 고도제어기를 구현 하여 실외 비행 테스트를 통하여 전체 시스템을 검증 하는 테스트가 필요 하다.

참 고 문 헌

[1] G Hoffmann, G. M., Huang, H., Waslander, S. L., and Tomlin, C. J., “Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment”, Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Hilton Head, South Carolina, USA, 2007.8

[2] Keun Uk Lee, Young Hun Yun, Wook Chang, Jin Bae Park, Yoon Ho Choi “Modeling and Controller Design of Quadrotor UAV” The Korean Institute of Electrical Engineers conference, p1922-1923, Kangwon, Kor, 2011.7.

[3] Jun-Sang Wang, Sang-Yong Lee, Seung-Hyun Yang, Suk-Won Lee, Sung-Jun Joo “Attitude Control of the Quad-rotor using the Modified PID Controller” The Korean Institute of Electrical Engineers conference, p1800-1801, Kangwon, Kor, 2011.7,

[4] Altug, E, James P. Ostrowski, Robert Mahony, “Control of a Quadrotor Helicopter Using Visual Feedback.“ Intl. Conf. on Robotics &Automation, p72-77, Washington, USA, 2002.5

[5] Markus Achtelik, Abraham Bachrach, Ruijie He, Samuel Prentice and Nicholas Roy "Autonomous Navigation and Exploration of a Quadrotor Helicopter in GPS-denied Indoor Environments" Robotics Science and System conference,

Mayagüez, Puerto Rico, 2008.1

[6] Sven Lange, Niko Sünderhauf, and Peter Protzel, “Autonomous Landing for a Multirotor UAV Using Vision,” Intl. Conf. on SIMULATION, MODELING and PROGRAMMING for AUTONOMOUS, pp. 482-491. Venice, Italy, 2008.11

저자 소개

김 규 범(정회원)

- 2005년 2월 : 건국대학교 항공우주공학 석사
- 2008년~현재 : 건국대학교 항공우주정보시스템공학 박사과정

<주관심 분야 : UAV, 구조설계>

송 승 화(정회원)

- 2012년 8월 건국대학교 인터넷미디어공학 박사 수료
- 2012년 11월 ~ 현재 : (주)아이디스 주임연구원

<주관심 분야 : UAV, 비전센서응용>

윤 광 준(정회원)

- 1990년 : Perdue Univ. 항공우주공학 박사
- 1991년~현재 : 건국대학교 항공우주정보시스템공학 교수

<주관심 분야 : UAV, 구조설계>