

## 모바일 로봇의 경사면 극복 주행 제어를 위한 적응 퍼지 제어기 설계

박종호<sup>1</sup>, 백승준<sup>2</sup>, 정길도<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>서남대학교 전기전자공학과, <sup>2</sup>전북대학교 전자공학부

### Design of adaptive fuzzy controller to overcome a slope of a mobile robot for driving

Jong-Ho Park<sup>1</sup>, Seung-Jun Baek<sup>2</sup> and Kil-To Chong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical & Electronic Engineering, Seonam University

<sup>2</sup>Division of electronic engineering, Chonbuk University

**요 약** 본 논문에서는 모바일 로봇이 이동함에 있어 경사면을 만났을 경우 이를 극복하여 주행하는 경우가 발생할 수 있는데 이때 모바일 로봇 시스템 자체가 가지고 있는 슬립 문제가 주행을 진행함에 있어서 더욱 심하게 나타날 수 있기에 이를 해결하고 목표점까지의 안전한 직진 주행을 하기위한 모델 적응 퍼지 제어 방법을 기반으로 하는 모바일 로봇의 주행 제어 알고리즘을 제안하고자 한다.

제안하고자 하는 모델 기반 적응 퍼지 제어기의 경우 먼저, 모바일 로봇의 등반 조건을 확인한 후 경사면을 모바일 로봇이 극복 주행을 할 수 있는지를 판단하고 만약 가능하다면 모바일 로봇의 동역학 모델을 포함한 모델 기반 제어기를 설계하여 극복 주행 제어를 하고자 한다. 이러한 경우 모바일 로봇 시스템의 안정성 보장 및 지면 마찰력 그리고 외란 보상 등이 충분히 고려된 제어기 설계가 가능할 것이다. 또한, 설계하고자 하는 제어 기법 중 적응 퍼지 제어 방법의 경우 모바일 로봇의 동특성을 충분히 반영한 모델인 비선형 Non-holonomic 시스템과 모바일 로봇의 슬립 문제 해결 등에 충분히 유용할 것이고 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

**Abstract** In this paper, this may appear to exacerbate it met slopes of the mobile robot moves to overcome this by driving can occur if the mobile robot system has its own sleep problems driving progress in until you hit the target and solvedriving straight driving safer model for adaptive fuzzy control method of mobile robot based control algorithm is proposed.

First, we propose a model based adaptive fuzzy controller, if possible, the dynamics model of the mobile robot, including model-based controller is designed to determine if you can check the condition of the mobile robot climbing and driving the mobile robot to overcome the slope and the to overcome driving control. Enough considering the ground friction forces and ensure the stability of the mobile robot system and the disturbance compensation, etc. In this case, the controller design will be possible. In addition, the nonlinear model, the dynamic characteristics of the mobile robot control method of adaptive fuzzy control techniques in the design that you want to fully reflect Non-holonomic system of mobile robots and solve sleep problems, and will be useful enough, it was verified through computer simulations.

**Key Words** : Adaptive fuzzy control, Mobile robot, Disturbance compensation, Nonlinear Non-holonomic mobile robot system, Sleep problems

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구임 (No. 2012-0002434)

\*Corresponding Author : Kil-To Chong (Chonbuk University)

Tel: +82-63-270-2478 email: kitchong@jbnu.ac.kr

Received November 14, 2012

Revised November December 4, 2012

Accepted December 6, 2012

## 1. 서론

바퀴형 자율 이동 로봇의 경우 실내 서비스 로봇의 일반적인 형태이며, 로봇의 동작 지형은 비정형화된 공간이다. 그리고 이러한 모바일 로봇의 주요 임무는 주어진 공간에서 자율적으로 주행하며 이미 부여된 임무를 수행하거나 인간과의 상호작용을 수행하는 것을 목적으로 하는 경우가 많을 것이다.

이럴 경우 실제 로봇이 운영되는 실내 환경은 여러 타입의 장애물이 많고 또한 문턱이나 경사면 혹은 불규칙한 바닥면 등도 고려 대상이 되어야 할 것이다. 특히 낮은 경사면이나 문턱 같은 장애물의 경우에는 피해가는 것만이 아니라 극복 즉, 넘어가야 하는 경우도 발생할 수 있다.

자율 이동 로봇의 Non-holonomic 특성에 의하여 이동 로봇이 낮은 경사면이나 문턱 등을 넘어가는 경우 로봇의 슬립 현상이 수행하는 임무에 따라 문제가 될 소지가 있다. 따라서 본 연구에서는 이동 로봇의 동역학과 기구학 등을 포함한 수학적 모델을 기반으로 제어기를 설계하고자 한다[1-8]. 특히 이동 로봇의 동역학 모델을 고려하는 경우 마찰력과 외란 보상을 충분히 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

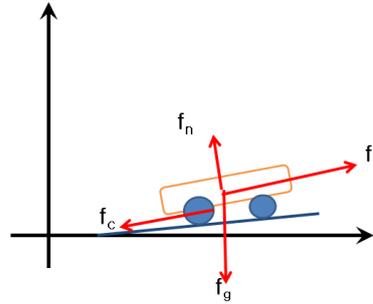
본 논문에서 구현하고자 하는 모델 기반 적응형 퍼지 제어기의 경우 비선형 시스템에서도 제어 기법의 특성상 어느 정도 시스템의 안정성을 기대할 수 있으며, 특히 퍼지 제어기의 경우 기존의 여러 비선형 시스템에서 좋은 제어 성능을 나타내고 있으며[9-11], 기존에 연구된 적응 제어 방식의 경우 시스템의 동특성이 바뀌는 경우에도 적용이 가능하다는 장점이 있기에 본 연구에서는 모바일 로봇의 시스템 모델 기반 적응형 퍼지 제어기를 설계하고자 하며 이를 통하여 모바일 로봇의 슬립 문제를 충분히 반영된 그리고 낮은 경사면 통과 직진 주행 제어에서 좋은 결과를 나타낼 것이며, 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 모바일 이동 로봇의 등반 능력

다음 [Fig. 1]은 모바일 이동 로봇의 경사면 주행 시 작용하는 힘의 성분들을 정리한 것이다. 이 중  $f_r$  은 로봇의 운동을 일으키는 주행력(Necessary Traveling Force)을 나타내고,  $f_n$  은 도로면에 의해 로봇이 받혀지는 힘의 법선 성분을 나타내며,  $f_g$  는 중력장에 의한 로봇의 힘 성분이

며 도로에 작용되는 힘 성분(Backward Traveling Force)  $f_b$  이다[4].



[Fig. 1] Mobile robot driving on a sleep space

더불어 모바일 로봇이 경사면을 주행할 경우 다음과 같은 두 가지 조건을 고려해야 한다. 먼저 조건 1은 모바일 로봇이 경사면에서 정지하고 있어야 하며, 조건 2는 경사면에서 모바일 로봇이 역주행하지 않아야 한다는 것이다. 더불어 위의 조건을 만족하는 조건식을 정리하면 다음과 같다.

$$f_r - f_b - f_c \geq 0 \quad (1)$$

그리고  $f_b = mg \sin \theta$ , 바퀴와 도로면의 마찰력을 나타내는  $f_c = \mu mg \cos \theta$  이며, 단,  $m$  은 로봇의 총 무게이고,  $g$  는 중력 가속도를 나타내고,  $\theta$  는 등반각을 나타내며,  $\mu$  는 마찰계수이다.

따라서 위 식(1)을 다시 정리하면 다음 식 (2)로 정리할 수 있다.

$$f_r \geq f_b + f_c = mg \sin \theta + \mu mg \cos \theta = mg(\sin \theta + \mu \cos \theta) \quad (2)$$

$$f_r \geq mg(\sqrt{1 + \mu^2} \sin(\theta + \alpha)) \quad ,$$

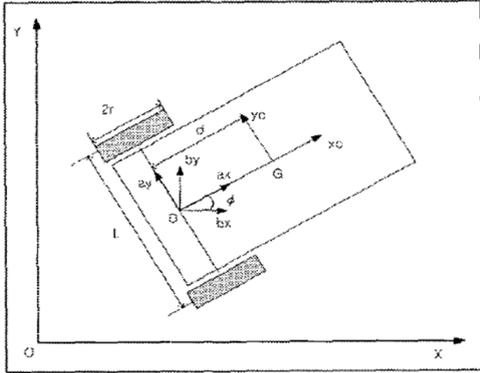
$$\sin \alpha = \frac{\mu}{\sqrt{1 + \mu^2}} \quad (3)$$

$$\theta + \alpha \leq \sin^{-1}\left(\frac{f_r}{mg \sqrt{1 + \mu^2}}\right), \quad \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\mu}{mg \sqrt{1 + \mu^2}}\right) \quad (4)$$

그리고  $f_r = m \frac{dv}{dt}$  이며, 마찰계수 및 모바일 로봇의 최대 운동 속도 등을 알 수 있다면 우리는 등반이 가능한 최대 등반 각도를 알 수 있을 것이다.

### 2.2 모바일 이동 로봇의 운동학 모델링

다음 [Fig. 2]는 본 논문에서 활용하고 있는 모바일 로봇의 일반 형태를 나타내고 있으며, 구체적으로 본 논문에서 다루는 모바일 로봇은 2차원 카테시안 좌표계에 3-자유도를 가지고 두 개의 바퀴로 이동하는 모델로서 이동 로봇의 움직임은 이동 로봇의 선속도(Linear Velocity)와 회전 속도(Rotational Velocity)에 의하여 결정된다.



[Fig. 2] Model of mobile robot

주어진 모바일 이동 로봇의 운동학(Dynamic) 모델은 아래의 식과 같다.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -d\sin\theta \\ \sin\theta & d\cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\dot{q} = S(q)v(t) \quad (6)$$

단, 여기서 (x, y)는 로봇의 기준 좌표계에서의 위치이고  $\theta$ 는 로봇의 이동 방향을 나타낸다. 더불어  $v$ 는 로봇의 선속도이며,  $\omega$ 는 로봇의 회전 속도를 나타내고  $S(q)$ 는 자코비안 행렬이며,  $v(t) = [v \ \omega]^T$  로 정의된다.

그리고 무게 중심에서의 이동 로봇의 선속도  $v$ 는 다음과 같다.

$$v = \frac{1}{2}(v_R + v_L) \quad \text{그리고} \quad \omega_r = \theta_R, \quad \omega_L = \theta_L$$

$$\begin{aligned} v_R &= w_R \times r = w_R r \sin\theta = w_R r \\ v_L &= w_L \times r = w_L r \sin\theta = w_L r \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 모바일 이동 로봇의 운동학 모델을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos\theta - \frac{rd}{L} \sin\theta & \frac{r}{2} \cos\theta + \frac{rd}{L} \sin\theta \\ \frac{r}{2} \sin\theta + \frac{rd}{L} \cos\theta & \frac{r}{2} \sin\theta - \frac{rd}{L} \sin\theta \\ \frac{r}{L} & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_R \\ w_L \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 2.3 모바일 이동 로봇의 동역학 모델링

모바일 이동 로봇의 운동학 모델을 고려할 때 모바일 로봇의 각 바퀴의 운동에너지를 고려해야 하고 바퀴의 3차원 방향의 각 속도를 고려해야 한다. 더불어 외란과 마찰력을 추가로 고려한다면 주어진 모바일 이동 로봇의 전체 동력학식은 다음과 같다[1][2][3][7].

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + \tau_d = P(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (9)$$

단, 여기서  $M(q)$ 는  $n \times n$  관성행렬이며,  $V_m(q, \dot{q})$ 는 코오리올스 벡터이며,  $F(\dot{q})$ 는 마찰력 벡터 그리고  $\tau_d$ 는 외란이며,  $B(q)$ 는 입력 변환 행력,  $\tau$ 는 입력 벡터이며,  $A(q)$ 는  $m \times m$  자코비안 행력 그리고  $\lambda$ 는  $m \times 1$  라그란지안 멀티플렉서(multiplier)이다. 더불어 각 행렬에 대한 보다 자세한 내용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M(q) &= \begin{bmatrix} m & 0 & -m_c d \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & m & m_c d \cos\theta & 0 & 0 \\ -m_c d \sin\theta & m_c d \cos\theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix} \\ V(q, \dot{q}) &= \begin{bmatrix} -m_c d \dot{\theta}^2 \cos\theta \\ -m_c d \dot{\theta}^2 \sin\theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \tau = [\tau_r \ \tau_l] \\ A^T(q) &= \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & -d & 0 & 0 \\ \cos\theta & -\sin\theta & L/2 & 0 & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & -L/2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (6)을 미분하여 식 (9)에 대입하면  $S^T(q)A^T(q) = 0$ 을 만족하게 되고 이를 이용하여 식 (10)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{M}(q)\dot{v} + \bar{V}(q, \dot{q})v + \bar{F}(\dot{q}) + \bar{\tau}_d = \bar{B}(q)\tau \quad (11)$$

여기서  $v = [v \ \omega]^T$ ,  $\bar{M} = S^T M S$ ,  $\bar{V} = S^T V S$ ,  $\bar{F} = S^T F$ ,  $\bar{\tau}_d = S^T \tau$ ,  $\bar{B} = S^T B$ 이다

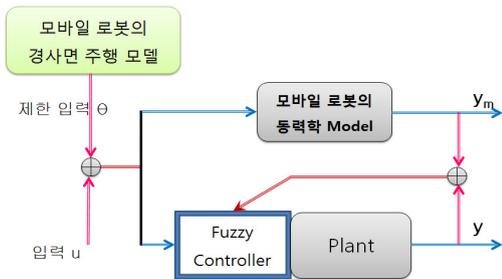
그리고 동역학 모델을 기반으로 위치를 추정할 때 Error Transformation 설정하게 되는데 이는 목표 위치 자료에서 현재 로봇의 좌표를 뺀 좌표로 변환하게 된다. 이에 새로운 좌표계에서의 출력 오차식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= wy_e - v + v_r \cos(\theta_e) \\ \dot{y}_e &= -wx_e + v_r \sin(\theta_e) \\ \dot{\theta}_e &= w_r - w \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $x_e = x_r - x, y_e = y_r - y, \theta_e = \theta_r - \theta$  이며,  $x, y_r, \theta_r$  는 목표 위치 자료이며,  $v_r, w_r$  는 기준 궤적에 대한 기준 선속도와 기준 회전 속도이다.

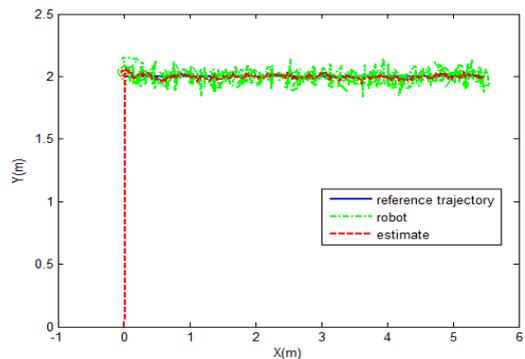
### 2.4 모델 기반 적응 퍼지 제어기 설계 및 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하고 있는 모바일 로봇의 경사면 극복 주행을 위해 모델 기반 적응 퍼지 제어 시스템의 제어 단계를 보면 다음과 같이 구성되어진다. 먼저 모바일 로봇의 경사면 주행 모델을 바탕으로 제한 입력을 활용하여 경사면 주행 가능 여부를 판단하고 이후 모바일 로봇의 동역학 모델을 바탕으로 에러 및 기준 입력 등을 기반으로 퍼지 규칙 등을 산정하고 적응 제어 방식을 활용하고자 한다. 더불어 모델 기반 제어 즉, MRAC (Model Reference Adaptive Controller) 타입의 제어 기법을 활용하고 있으며, MRAC 제어 기법의 장점은 시스템의 수학적 Model을 기반으로 하고 있기에 시스템의 출력을 예측할 수 있으며 또한, 시스템을 수학적으로 안정화할 수 있기에 외란 혹은 시스템 제어에 도움이 되지 못하는 노이즈 신호에 강인한 제어기 설계가 가능하며, 적응 제어 방식을 활용하므로 시스템의 일부 동특성이 변화하는 경우에도 시스템 제어 효과가 좋음을 기존 연구를 통하여 알 수 있다. 본 연구에서 제안하는 모델 기반 적응 퍼지 제어 시스템의 보다 자세한 구성은 아래 [Fig. 3]과 같다.

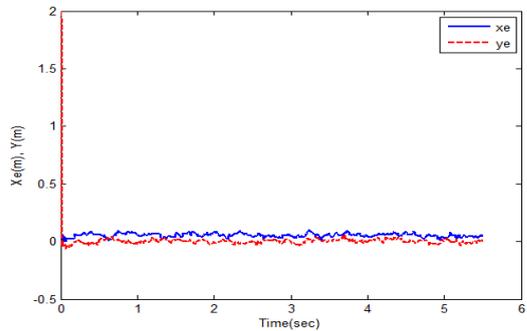


[Fig. 3] Model based adaptive fuzzy controller

모델 기반 적응 퍼지 제어 방식에 관한 내용을 좀 더 구체적으로 설명하면 먼저, 모바일 로봇의 경사면 주행 모델을 바탕으로 모바일 로봇의 속도를 기반으로 하는 최대 등반각을 계산하여 모바일 로봇의 제한 조건으로 활용하고, 기본 등반각 및 모바일 로봇의 속도 그리고 기준 입력값을 모바일 로봇에 인가한 후 모바일 로봇의 운동학 및 동역학 모델을 기반으로 시스템 제어를 수행하며, 목표 지점과 모델 출력과의 차이를 활용한 에러 Dynamics 구성하고 이를 퍼지 제어기에 이용하여 전체 시스템을 제어하는데 활용하는 것이다. 더불어 제안된 제어기를 활용한 결과는 다음 [Fig. 4]와 [Fig. 5]와 같다.



[Fig. 4] Lower slopes of the mobile robot driving straight overcome control



[Fig. 5] Straight driving position error of the mobile robot

### 3. 결론

본 논문에서는 모바일 로봇의 주행 방식 중에서 낮은 경사면이나 문턱 같은 장애물을 만났을 경우에 피해가는 것이 아닌 장애물을 극복하여 주행하는 경우를 제어 조건으로 산정하였다. 그러나 모바일 로봇이 경사면을 극복 주행할 경우 모바일 로봇의 Non-holonomic 특성에 의하

여 슬립 현상이 발생하여 직진 주행을 하지 못하는 경우가 발생할 수 있기에 모바일 로봇의 직진 주행 능력을 강화하는 제어 방법으로 모델 기반 적응 퍼지 제어를 설계하였으며, 모바일 로봇 모델의 경우 운동학 모델 및 동역학 모델을 함께 고려함으로써 보다 외란에 강하고 직진 주행 제어에 도움이 되고자 하였다.

제한된 모델 기반 적응형 퍼지 제어기의 경우 어느 정도 시스템의 안정성을 기대할 수 있으며, 비선형 시스템 많이 적용되는 퍼지와 시스템 동특성 변환에 강한 적응 제어 방식을 함께 고려함으로써 모델 기반 적응형 퍼지 제어기가 이동 로봇의 슬립 문제를 반영한 낮은 경사면 통과 직진 주행 제어에서 좋은 결과를 나타내었다.

## References

- [1] Jin-Hwan Kim, "Trajectory Tracking Control for A Wheeled Mobile Robot", The Institute of Electronics Engineers of Korea, pp. 73-77 vol. 46, Dec, 2009.
- [2] Yong-Geun Lee, "Direct Adaptive Tracking Control For a Wheeled Mobile Robot", Journal of The Korea Institute of Electrical Engineers, pp.201-204, vol. 53, Dec, 2004.
- [3] Sun-ku Kwon, Uk-youll Huh, Jin-whan Kim, Hak-il Kim, "Anti-Slip Control Based on Disturbance Observer", Information and Control Symposium , p.50-52, May, 2004.
- [4] Byoung-Ho Kim, "Analysis on Climbing Capability of Wheel Drive Robotic Mechanisms", Korean Institute of Intelligent System, p.329-334, vol. 18, Mar, 2008.
- [5] Shin Teak Lim, Sung Goo Yoo, Yeong Chul Kim, and Kil To Chong, "Design of a Cross-obstacle Neural Network Controller using Running Error Calibration", Institute of Control, Robotics and Systems, p.463-468, vol. 16, Apr, 2010, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [6] Park Jong Ho, Lim Shin Taek, Baek Seung Jun, Chong Kil To, "Control for the slopes of the mobile robot driving adaptive fuzzy controller design", 2012 Conference on Information and Control Systems, p. 478 - 479, Oct, 2012.
- [7] Zhong-Ping Jiang, David J. Hill, "A Robust Adaptive Backstepping scheme for Nonlinear Systems with Unmodeled Dynamics", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 44, p.1705-1711, 1999, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [8] Ti-Chung Lee, Ching-Hung Lee, Ching-Cheng Teng "Tracking Control of Mobile Robots without

Constraint on Velocities", ICARCV '98, p.1715-1719, Dec, 1998.

- [9] Dong-Jun Ahn, "Multi-Channel Active Noise Control System Designs using Fuzzy Logic Stabilized Algorithms", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol.13, No.8 pp.3647-3653, 2012.
- [10] Sang-dae Kim and Seung-woo Kim,, "A study on Tracking Control of Omni-Directional Mobile Robot Using Fuzzy Multi-Layered Controller", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol.12, No. 4 pp.1786-1795, 2011.
- [11] Chong-Deuk Lee, "Adaptive Multi-level Streaming Service using Fuzzy Similarity in Wireless Mobile Networks", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol.11, No. 9 pp.3502-3509, 2010.

## 박 종 호(Jong-Ho Park)

[정회원]



- 1999년 2월 : 전북대학교 전기공학 학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 전북대학교 전자공학 학과 (공학박사 수료)
- 2009년 3월 ~ 2010년 12월 : 전북대학교 공과대학 시간강사
- 2011년 2월 ~ 현재 : 서남대학교 전기전자공학과 교수

<관심분야>

로봇 제어, 임베디드 시스템, 비선형 제어 이론 등

## 백 승 준(Seung-Jun Baek)

[준회원]



- 2012년 2월 : 전북대학교 전자공학 학부 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 전자공학부 석사과정

<관심분야>

자동제어, UAV, 인공지능

정 길 도(Kil-To Chong)

[정회원]



- 1984년 8월 : Oregon State University 기계공학(공학사)
- 1986년 8월 : Georgia Institute of Technology 기계공학(공학석사)
- 1992년 8월 : Texas A&M University 기계공학 (공학박사)

- 1996년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 전자공학부 교수 및 학부장, 전북대 전자정보신기술연구소 소장

<관심분야>

Time-Delay, Robotics, 인공지능, 센서네트워크.