

상태 공간 외란관측기 기반의 임피던스 제어와 ISMC를 이용한 메카넘 휠 AGV의 강인 궤도 추적 제어

Robust Trajectory Tracking Control of Mecanum Wheeled AGV Using State Space Disturbance Observer Based Impedance Control and ISMC

천 효석¹, 박승규[†]

Hyoseok Cheon¹, Seungkyu Park[†]

Abstract: Auto Guided Vehicle (AGV) equipped with mecanum wheels can move in all directions, unlike ordinary wheeled AGVs. In this paper, we propose a robust trajectory tracking control method for the mecanum wheeled AGVs in the presence of disturbances. It is constructed by combining impedance control with Integral Sliding Mode Control (ISMC), which shows robust performance against disturbances, and adding a disturbance observer (DOB) that estimates and removes disturbances. Simulation result using MATLAB/SIMULINK shows that the proposed control method has robust performance in tracking the reference trajectory under the circumstance with disturbance. The control performance is further improved when the disturbance observer is additionally used. In addition, the performance of the proposed control method was verified through experiment. It shows the result of tracking the set trajectory well.

Keywords: ISMC, Impedance Control, DOB, Mecanum Wheeled AGV, Trajectory Tracking

1. 서 론

로봇들은 산업 전반에 걸쳐 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 필요에 맞게 그 기능과 특징들을 조금씩 변화시켜 왔다. 생활수준의 향상과 노동비용의 상승으로 인해 인력을 대체할 로봇의 수요가 증가했으며, 이를 토대로 다양한 요구가 뒤따르고 있으며 이는 생산 효율 향상을 가져왔다^[1].

특히 공장 자동화 및 물류, 생산 라인에서의 로봇의 필요성이 제기되면서 바퀴를 사용하여 위치를 이동하는 이동로봇 형태를 차용하여 AGV 라는 하나의 분야로 로봇이 산업현장에 투입되기 시작하였다. 상품의 이송과 포장, 그리고 큰 틀에서는 물품의 배송까지의 로봇시스템을 AGV (Auto Guided Vehicle)

안에 정의하기에 이르렀다. 뿐만 아니라 사무실, 병원 등에서도 사용되고 있으며 사용처는 더욱 확대되고 있다^[2]. 국내에서는 4차 산업혁명으로 로봇틱스 분야의 산업규모가 커지면서 AGV에 대한 분류도 상세화되어 제조용 AGV와 비제조용 AGV로 나뉘지게 되었으며, 분류와는 무관하게 AGV는 정해진 경로 즉 유도선을 잘 따라가면서 임무를 수행하여야 하기 위한 제어 능력이 요구되었다. 또한 공장의 좁은 공간과 같은 로봇의 주행조건에 의해서 일반 휠을 장착한 로봇보다 메카넘 휠과 같은 전 방향 바퀴를 장착한 AGV에 대한 연구가 더욱 활발히 이루어졌다^[3].

메카넘 휠은 1973년 스웨덴의 Mecanum AB사에 의해 항공기 정비용 캐리어에 적용할 목적으로 처음 개발되었다^[4]. 기존에 존재한 전방향 구동 바퀴와는 다르게 휠에 여러 개의 물러가 45도로 기울어진 형태로 부착이 되어^[5], 바퀴가 회전할 때 바퀴의 회전방향과 힘의 방향이 달라진다^[6-8]. 이와 같은 이유로 전후/좌우/대각의 주행이 가능하며^[9-11], 회전 반경이 일반적인 휠을 장착한 로봇에 비해 아주 작다. 또한 로봇의 헤딩을

Received : Dec. 29. 2022; Revised : Feb. 1. 2023; Accepted : Feb. 20. 2023

※ This work was supported by research fund from Changwon National University in 2021-2022

1. Ph.D. Student, Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea (1000hyosok@naver.com)

† Professor, Corresponding author: Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea (skpark@changwon.ac.kr)

한쪽 방향으로 고정하여 이동이 가능하고 회전 반경 없이 제자리 회전도 가능하다⁹⁾. 이러한 특징으로 인해 좁은 공간에서의 구동과 동선의 최적화에 유리하고, 유도선의 구성이 더 자유로울 수 있다.

위와 같은 특징으로 인해 AGV 적용 분야인 공장과 창고의 이송로봇과 지게차 등의 다양한 장비에 메카넘 휠이 장착되어 운용되고 있다⁶⁾. 또한 제어의 적용이 용이한 형태의 동특성 방정식을 가지고 있다.

이러한 메카넘 휠 AGV는 산업과 생활 분야에 적용하기 위해 적응제어, 적응 슬라이딩 모드 제어, 모델 예측제어, 임피던스 제어와 ISMC를 결합한 제어 방식 등 다양한 제어방법을 이용해 궤도 추적에 대한 연구가 이루어졌다. 적응제어 기반의 추적 연구에서는 파라미터의 불확실성에 대해서는 제어가 잘 되었지만 외란의 영향을 많이 받고¹¹⁾, 적응 슬라이딩 모드 제어는 외란의 영향을 이겨내는 특성을 가지지만 시스템의 동특성을 잘 반영하지 못하는 문제가 있었다¹⁷⁾. 모델 예측 제어¹⁸⁾는 응답 속도가 느린 문제가 있었다. 이에 외란에 강인한 제어를 위해 임피던스 제어와 ISMC를 결합한 외란에 강인한 제어가 제안되었다¹⁹⁾. 하지만 외란이 커지거나 실제 시스템 구성에 따라 입력의 샘플링 주기가 늘어날 경우 이를 보완하기 위한 D_{max} 에 의한 채터링이 커지면서 생기는 결과를 극복하지 못하는 문제가 발생하였다.

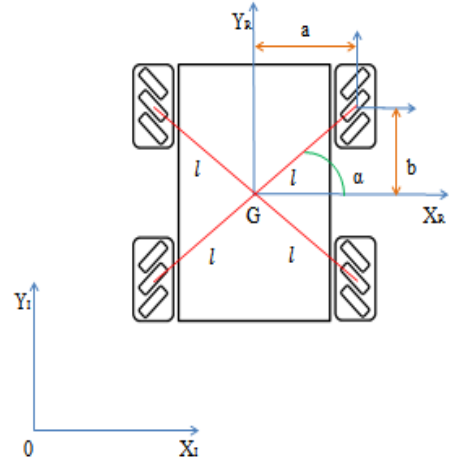
본 논문에서는 임피던스 제어^[20-23] 및 ISMC^[24,25]의 잇점을 결합하고 이로 인한 문제점을 보완하기 위해 추가로 외란을 추정하여 추정 오차를 줄이는 DOB¹⁸⁾를 구성하여 메카넘 휠 AGV의 강인한 궤도 추적 제어 방법을 제시하고자 한다. 메카넘 휠 AGV의 동특성을 고려한 동역학 모델을 이용하여 DOB 기반의 임피던스 제어와 ISMC 제어 기법을 설계한다. 그리고 제시된 제어 방법을 시뮬레이션을 통해 궤도 추적 결과를 확인하고, 실제 제작한 메카넘 휠을 장착한 AGV에 적용하여 그 성능을 확인한다.

2. 본론

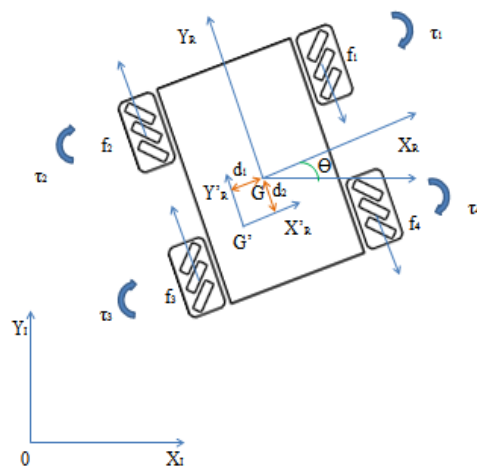
2.1 메카넘 휠 AGV의 동특성 방정식

메카넘 휠의 정확한 제어를 위해서 불확실성이나 외란의 영향에 강인한 특성을 가지는 제어 기법을 사용해야 하는데 이를 위해 AGV의 동역학 모델²⁶⁾이 기반이 되어야 한다. 이를 표현하기 위해서 메카넘 휠 AGV의 각종 파라미터와 기준좌표계와 로봇좌표계 사이의 파라미터들을 구해야 한다.

[Fig. 1]에서 알 수 있는 파라미터들은 다음과 같다. X_b, Y_b 는 기준이 되는 좌표계 X, Y 축이고, X_R, Y_R 은 로봇의 기하학



[Fig. 1] Mecanum Wheeled AGV



[Fig. 2] Schematic of Mecanum Wheeled AGV

위치 중심인 G 를 기반으로 한 로봇좌표계 X, Y 축이다. l 는 위치 중심과 각 바퀴 축 간의 거리이며 α 는 X_R 과 바퀴 축 간의 각이다.

[Fig. 2]에서 X'_R, Y'_R 은 이동로봇의 무게 중심인 G' 을 기반으로 한 로봇좌표계 X, Y 축이고, θ 는 기준좌표계를 기준으로 한 로봇의 헤딩 각이다. d_1 은 G 와 G' 간 X 축 거리이고 d_2 는 G 와 G' 간 Y 축 거리이다. f_i ($i = 1, 2, 3, 4$)는 1~4번의 각 바퀴에 걸리는 마찰이고 τ_i ($i = 1, 2, 3, 4$)는 각 바퀴의 토크이다. r 은 메카넘 휠의 반지름이다.

메카넘 휠을 장착한 이동로봇의 동역학 모델을 표현하면 식 (1)과 같다²⁶⁾.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B^T S f = F \tag{1}$$

여기서 q 는 로봇의 자세 $q = [x \ y \ \theta]^T$ 이고, F 는 메카넘 휠 이

동로봇에 인가되는 힘으로 이동로봇의 입력이며 M 은 관성력행렬, C 는 전향력행렬, f 는 각 바퀴에 걸리는 마찰력 $f = [f_1 f_2 f_3 f_4]^T$ 을 나타낸다. 먼저 관성행렬 M 을 나타내면 식 (2)와 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} M &= [m_{ij}]_{3 \times 3}, m_{11} = m_b + 4 \left(m_w + \frac{I}{r^2} \right); \\ m_{22} &= m_b + 4 \left(m_w + \frac{I}{r^2} \right); m_{12} = m_{21} = 0; \\ m_{13} &= m_{31} = m_b (d_1 \sin \theta + d_2 \cos \theta); \\ m_{23} &= m_{32} = m_b (-d_1 \cos \theta + d_2 \sin \theta); \\ m_{33} &= m_b (d_1^2 + d_2^2) + I_b + 8 \left(m_w + \frac{I}{r^2} \right) l^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right); \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식에서 m_b 는 AGV 플랫폼 질량, m_w 는 AGV 바퀴 질량, I 는 각 바퀴가 가지는 관성 모멘트, I_b 는 AGV 플랫폼이 가지는 관성 모멘트다. 그리고 전향력행렬 C 는 식 (3), 행렬 S 는 식 (4), 맵핑 행렬 B 는 식 (5)와 같다.

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m_b \dot{\theta} (d_1 \cos \theta - d_2 \sin \theta) \\ 0 & 0 & m_b \dot{\theta} (d_1 \sin \theta + d_2 \cos \theta) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S = \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{\phi}_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sgn}(\dot{\phi}_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{sgn}(\dot{\phi}_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{sgn}(\dot{\phi}_4) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} -(\cos \theta - \sin \theta) - (\sin \theta + \cos \theta) - l \sqrt{2} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) \\ -(\cos \theta + \sin \theta) - (\sin \theta - \cos \theta) - l \sqrt{2} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) \\ \cos \theta - \sin \theta & \sin \theta + \cos \theta & -l \sqrt{2} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) \\ \cos \theta + \sin \theta & \sin \theta - \cos \theta & -l \sqrt{2} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

위의 행렬 S 에서 $\dot{\phi}_i$ ($i=1, 2, 3, 4$)는 각 바퀴의 각속도이다. $\dot{\phi}_i$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix} = -(\sqrt{2}/r) \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \\ \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \\ -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \\ -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 - \alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

앞에서 설명한 파라미터들을 정리하면 [Table 1]과 같다.

[Table 1] Parameters of Mecanum Wheel AGV

Parameter	Explanation
X_f	Reference coordinate system X -axis
Y_f	Reference coordinate system Y -axis
G	Geometry position center of robot
X_R	Robot coordinate system X -axis based on G
Y_R	Robot coordinate system Y -axis based on G
l	Distance from the center of position to each wheel axis
α	Angle between X_R and the wheel axle
G'	Robot's center of mass
X'_R	Robot coordinate system X -axis based on G'
Y'_R	Robot coordinate system Y -axis based on G'
θ	Heading angle of the robot based on the reference coordinate system
d_1	X -axis distance between G and G'
d_2	Y -axis distance between G and G'
$f = [f_1 f_2 f_3 f_4]^T$	Frictional force on each wheel from 1 to 4
$\tau = [\tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4]^T$	Torque of each wheel from 1 to 4
m_b	Mass of the robot platform
m_w	Mass of the robot wheel
I	Moment of inertia of robot wheel
I_b	Moment of inertia of robot platform

2.2 각 메카넘 휠의 토크 계산

메카넘 휠 AGV의 입력인 힘 F 를 모터로 입력되는 토크 τ 로 변환하여 AGV의 입력으로 사용한다. F 는 식 (7)과 같이 τ 와의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{1}{r} B^T \tau \quad (7)$$

위 식의 관계식에서 τ 는 $\tau = [\tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4]^T$ 로 각 바퀴에 걸리는 토크이며 제어입력은 F 로 계산되며 토크는 B^T 의 유사(pseudo) 역행렬을 곱해 구할 수 있다. τ 로 변환된 식으로 다시 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\tau = r B (B^T B)^{-1} F \quad (8)$$

위의 식을 사용하여 메카넘 휠 이동로봇에 인가되는 힘을 가지고 각 바퀴의 토크를 계산할 수 있다.

2.3 임피던스 제어

임피던스 제어는 로봇의 위치와 속도, 그리고 힘의 관계를

원하는 동특성으로 만들어 줄 수 있는 제어방법이다. 임피던스 제어는 외부에서의 힘과 위치, 속도 및 가속도 간의 관계로 정의된 임피던스를 제어한다. 일반적으로 위치 혹은 속도나 가속도로부터 힘의 크기를 결정한다²⁰⁻²³.

미지의 외란이 있다고 가정할 경우의 메카닉 휠 이동로봇의 동역학 모델링은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B^T S f = F + D \quad (9)$$

여기서 D 는 미지의 외란이고 나머지는 식 (1)과 동일하게 정의된다.

본 논문에서 사용하는 PD 형태의 임피던스 제어입력을 다음과 같이 정할 수 있다²⁷.

$$F_0 = M(\ddot{q}_d + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q)) + C(q, \dot{q})\dot{q} + B^T S f \quad (10)$$

이 경우 $F = F_0$ 이고, 식 (10)을 식 (9)의 F 에 대입하여 정리하면 식 (11)이 나온다.

$$M(\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e) = D \quad (11)$$

그러므로 오차 e 는 $q - q_d$ 이고, e 의 동특성 방정식은 식 (12)와 같이 정리된다.

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = d \quad (12)$$

여기서 $d = M^{-1}D$ 이다.

위의 오차 동특성은 외란의 영향을 받기 때문에 외란에 강한 오차 동특성을 갖도록 해야 한다.

2.4 ISMC

ISMC는 초기시간부터 오차 동특성이 슬라이딩 평면에 존재하도록 하여 외란이 있는 경우 또한 공칭 제어 시스템의 동특성을 유지할 수 있도록 하는 제어방법이다^{24,25}.

식 (10)의 임피던스 제어 입력을 F_0 , ISMC 제어입력을 F_{smc} 라 하면 식 (9)에서 임피던스 제어입력과 ISMC 제어입력을 동시에 고려한 입력은 $F = F_0 + F_{smc}$ 가 되며, 이 경우 오차 동특성 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = d + u_{smc} \quad (13)$$

여기서 $d = M^{-1}D$ 이고 $u_{smc} = M^{-1}F_{smc}$ 이다.

ISMC의 제어입력 F_{smc} 를 설계하기 위해 식 (13)을 상태 방정식으로 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ x_2 &= -K_p x_1 - K_d x_2 + d + u_{smc} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 $x_1 = e$, $x_2 = \dot{e}$ 이고 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(u_{smc} + d) \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

ISMC를 적용하기 위한 슬라이딩 평면을 다음 식과 같이 정의한다.

$$S = x(t) + z(t) = 0 \quad (16)$$

여기서 보조변수 $z(t)$ 의 동특성은 다음과 같다.

$$\dot{z}(t) = -Ax(t) \quad (17)$$

식 (17)의 슬라이딩 평면은 그 위에 상태들이 머물 때, 시스템이 공칭 시스템의 동특성을 갖도록 한다. 제어입력을 구하기 위해 Lyapunov 함수를 다음 식과 같이 정의한다.

$$V(t) = \frac{1}{2} S^T(t) P S(t) \quad (P > 0) \quad (18)$$

$\dot{V}(t) < 0$ 를 만족시키는 입력 u_{smc} 을 구하기 위해 \dot{V} 을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T \dot{S} = S^T(\dot{x} + \dot{z}) \\ &= S^T(Ax + B(d + u_{smc}) - Ax) \\ &= S^T B(d + u_{smc}) \end{aligned} \quad (19)$$

위의 식에서 u_{smc} 를 다음과 같이 결정하면 $\dot{V}(t) < 0$ 이 되도록 만들 수 있으며 $S = 0$ 가 되도록 할 수 있다.

$$u_{smc} = -d_{\max} \text{sign}(S^T B) \quad (20)$$

여기서, d_{\max} 는 외란 d 의 최대 크기이다.

그리고 $u_{smc} = M^{-1}F_{smc}$ 이므로 F_{smc} 는 다음 식처럼 된다.

$$F_{smc} = M u_{smc} \quad (21)$$

결과적으로 임피던스 제어와 ISMC를 적용한 시스템의 전체 입력 F 는 $F = F_0 + F_{smc}$ 가 된다.

2.5 상태공간 DOB

상태공간에서의 보조 변수를 사용한 DOB를 이용하여 외란을 추정할 수 있다²⁸⁾.

식 (10)에서 임피던스 제어 입력을 F_0 라 하고, ISMC 제어 입력을 F_{smc} 라 한다. 그리고 외란 제거 입력을 F_D 라 하면 식 (9)에서 $F = F_0 + F_{smc} + F_D$ 가 되며, 제어기의 제어 입력 F 는 다음 식과 같이 정리된다.

$$F = M(\ddot{q}_d + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q)) + C(q, \dot{q})\dot{q} + B^T Sf + F_{smc} + F_D \quad (22)$$

이 때, $F_D = -\hat{D}$ 이고, \hat{D} 은 외란 D 의 추정 값이다.

식 (22)를 식 (9)에 대입하면 DOB가 적용된 오차 동특성 방정식을 구할 수 있다.

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = d + u_{smc} + u_d \quad (23)$$

여기서 $u_d = M^{-1}F_D = -M^{-1}\hat{D} = -\hat{d}$ 이다. d 와 u_{smc} 는 식 (13)에서 설명하였다.

ISMC의 제어입력 F_{smc} 와 DOB를 설계하기 위해 식 (23)을 상태 방정식으로 표현하면 식 (24)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -K_p x_1 - K_d x_2 + d + u_{smc} + u_d \end{aligned} \quad (24)$$

(24) 식을 (15) 식과 같이 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + B(u_{smc} + u_d + d) \quad (25)$$

식 (25)로부터 상태 공간에서의 DOB식은 다음 식 (26)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\hat{d}} = z - Lx \quad (26)$$

\hat{d} 은 외란 추정 값이고, L 은 관측기 이득이다. 보조변수 z 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\dot{z} = L(Ax + B(u_{smc} + u_d) + B\hat{d}) \quad (27)$$

마지막으로 외란 제거 입력 F_D 는 다음 식 (28)와 같다.

$$F_D = -\hat{D} = Mu_d = -M\hat{d} \quad (28)$$

최종적으로 임피던스 제어와 ISMC 그리고 DOB를 적용한 시스템의 입력 F 는 $F = F_0 + F_{smc} + F_D$ 가 된다.

2.6 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 제안된 제어기의 강인한 추적 성능에 대한 시뮬레이션을 MATLAB / SIMULINK를 사용하여 검증하였다. 시뮬레이션에서의 메카넘 휠 AGV의 파라미터는 실제 사용된 AGV의 파라미터와 같으며 시뮬레이션과 제어기에서 사용된 파라미터 값은 각각 [Table 2], [Table 3]와 같다.

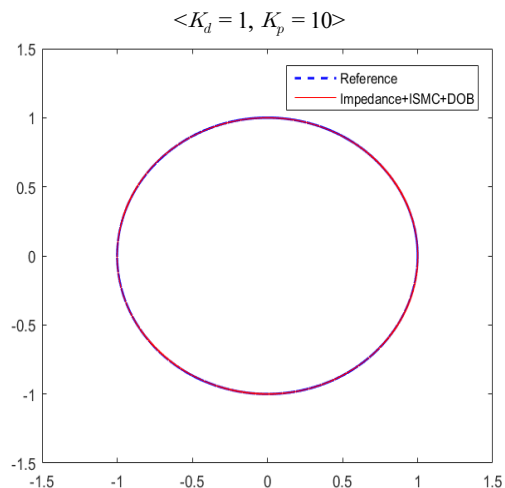
위의 [Table 3]에서의 제어기 파라미터 K_d 와 K_p 는 다음과 같이 구하였다. 외란이 없는 상태에서의 임피던스 제어만을 사용하여 원형의 기준궤적에 대한 궤도 추적 시뮬레이션을 수

[Table 2] Parameters of Mecanum Wheel AGV

parameter	value [unit]
m_b	10 [kg]
m_w	2 [kg]
I	0.039 [kgm ²]
I_b	0.2278 [kgm ²]
r	0.105 [m]
d_1	0 [m]
d_2	0 [m]
l	0.6 [m]
α	$\pi/6$ [rad]

[Table 3] Controller parameters

parameter	value [unit]
K_d	diag ([1 1 1])
K_p	diag ([10 10 10])
L	[[0 0 0; 0 0 0; 0 0 0], [-50 0 0; 0 -50 0; 0 0 -50]]



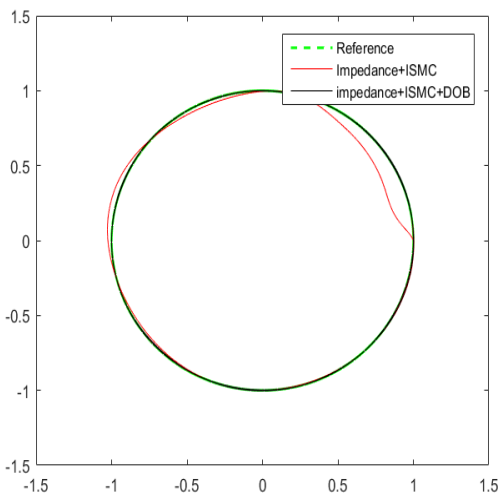
[Fig. 3] Trajectory tracking simulation result about K_d and K_p

행했을 경우 K_d 와 K_p 가 각각 1과 10일 때 최적의 성능을 나타내는 것을 확인하여 시뮬레이션에 적용하였다. [Fig. 3]을 통해 결과를 확인할 수 있다. 이 때 K_d 와 K_p 는 원하는 임피던스 특성에 따라 이득이 결정된다. 외란 관측기 이득인 L 은 빠른 외란 추정 응답 특성을 고려했다.

이동로봇의 초기 위치는 (0,0)이고 역 시계 방향으로 이동하였다. 로봇의 방향은 0 [rad]로 두었다. 외란은 sine파를 F_x , F_y , F_θ 에 각각 넣었다. 각 sine파의 크기는 1, 각주파수는 0.5 [rad/sec]으로 설정했으며 각 sine파는 1 [rad]씩 위상차를 가지게 설정하였다.

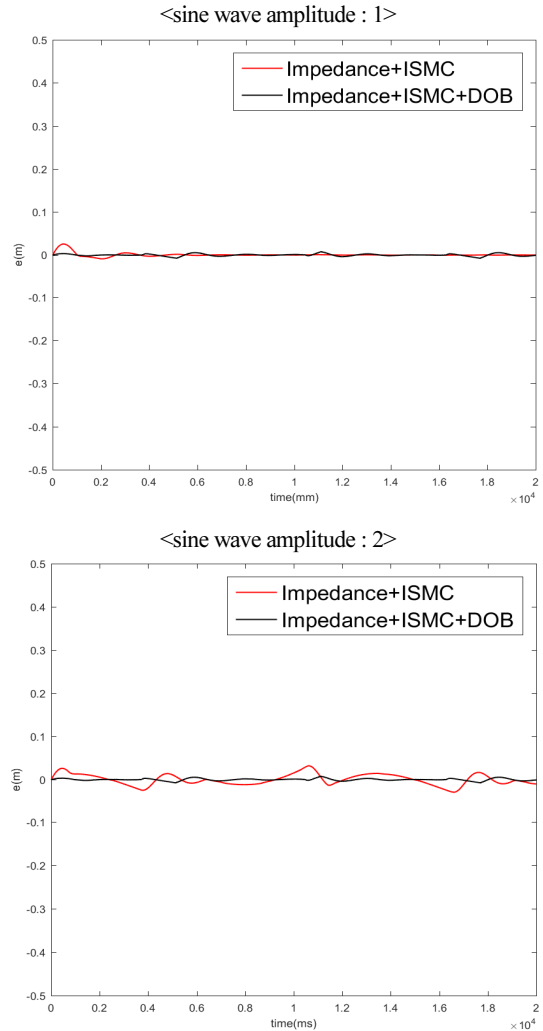
제시된 궤도 추적 제어 방법에 대한 시뮬레이션 결과는 아래와 같다. 이동 로봇이 기준궤도를 0~20 [sec] 동안 주행한 경로를 보여준다. [Fig. 4]에서 보여주는 것은 기준 궤도와 추적 궤도 간의 최단거리이며, 두 점 사이의 거리 d 를 나타낸다. 녹색 점선은 기준 궤도를 나타낸다. 적색 실선은 임피던스 제어와 ISMC만을 이용한 궤도 추적 결과를 보여주고, 흑색 실선은 임피던스 제어와 ISMC에 DOB를 추가한 제어 방법의 궤도 추적 결과를 보여준다. [Fig. 3]을 보면 외란이 존재하는 상황에서 DOB 없이 임피던스 제어와 ISMC 제어를 사용한 것보다 DOB를 추가로 사용한 제어 기법의 궤도 추적 성능이 더 좋을 수 있다. [Fig. 5]는 이 때의 기준 궤도와의 오차를 보여준다. 역시 DOB를 추가한 제어 방법이 전 영역에 걸쳐 오차가 적은 것을 볼 수 있으며, 외란의 크기가 커져도 큰 변화 없이 여전히 오차가 적은 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 궤도 추적 성능 향상이 되었음을 확인할 수 있다.

또한 입력단에 들어가는 D 와 이를 추정한 \hat{D} 의 결과 그래프를 [Fig. 6]을 통해 확인할 수 있다. 시뮬레이션에서 만들어진 D 는 앞서 설명한 다른 위상을 가지는 Sine파를 보여주고

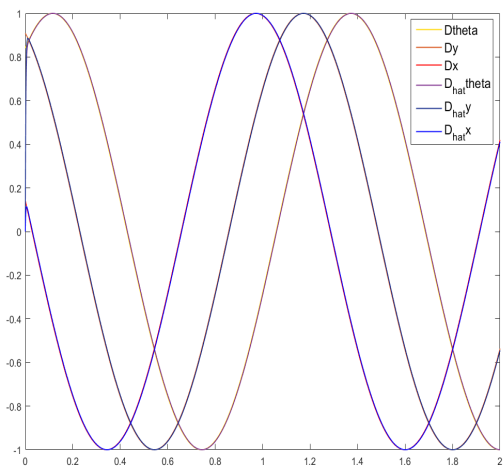


[Fig. 4] Comparison of trajectory tracking results before and after using DOB

있으며 이 D 를 추정한 \hat{D} 과 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이를 통해 DOB가 외란에 대해 잘 대응함을 확인할 수 있다.



[Fig. 5] Comparison of error with or without DOB



[Fig. 6] Comparison of D and estimated \hat{D}

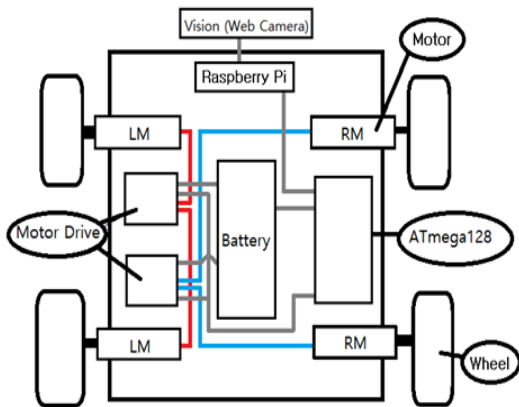
2.7 실험 및 결과

실험은 제작된 4개의 메카넘 휠이 장착된 이동로봇을 이용하여 진행하였다. 로봇의 구성도는 [Fig. 7]와 같다.

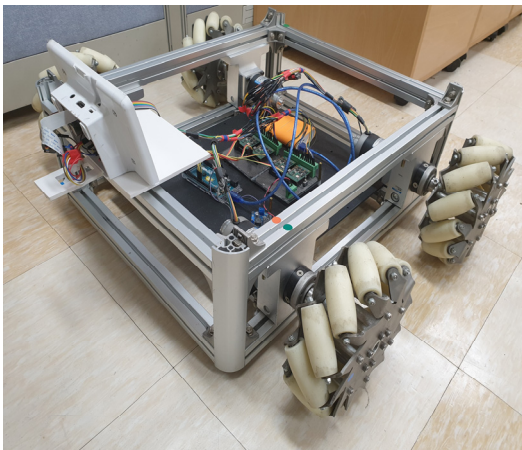
메카넘 휠 이동로봇은 BL5740-24V BLDC모터 4개와 각 모터를 제어할 ESCON Module 50/5 모터 드라이브, 각 모터에 NX-14138 메카넘 휠을 장착했으며, 마이크로 컨트롤러는 차체 제어를 위한 아두이노 메가와 영상 처리를 위한 라즈베리 파이 3 Model-B가 사용되었다. 카메라는 라즈베리 전용 카메라를 사용하였다.

실험은 로봇을 이용하여 기준 궤적을 제공하고 이를 추적하는 방식을 스마트 공장에 사용하는 AGV와 같은 방식인 유도선을 이용한 라인 트레이싱 방식을 차용하여 실험을 진행하였다.

로봇에 [Fig. 8]과 같이 영상처리가 가능한 라즈베리 파이를 장착하여, 바닥에 레퍼런스 라인을 긋고 이를 인식하여 이미징 처리를 거친 후 라인의 위치에 대한 데이터가 계산되면 이 데이터를 가지고 라인을 추적하도록 로봇 차체를 제어하였다.



[Fig. 7] Configuration diagram of Mecanum wheel AGV



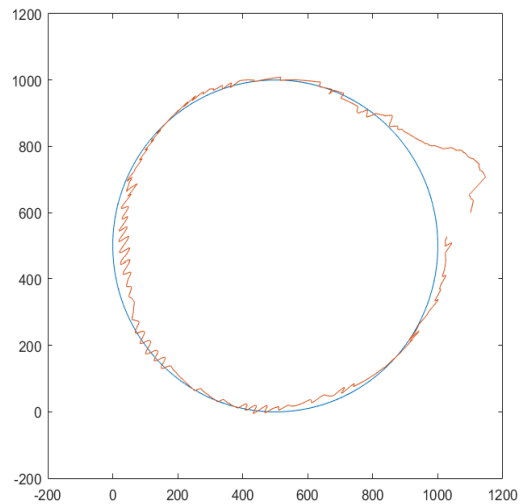
[Fig. 8] Mecanum wheel AGV and camera used in the experiment

기준궤도를 지름이 1000 [mm]인 원을 사용하였고, 로봇이 인식하는 0을 실제로는 -10 [mm]~10 [mm]의 범위를 가지도록 제어하였다. 초기오차는 X축으로 100 [mm]의 거리 오차를 주었다.

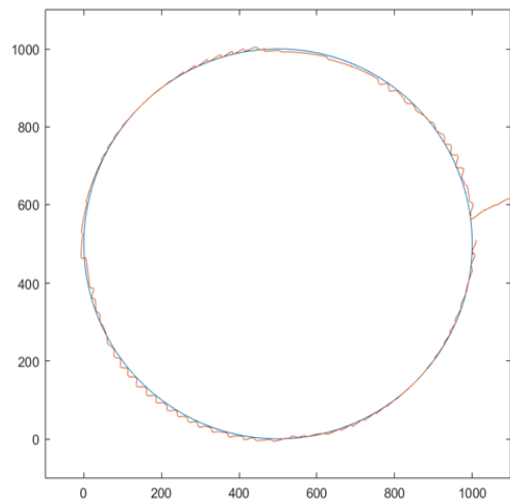
궤적 주행시 AGV의 평균 속도는 0.57m/s이다.

[Fig. 9]과 [Fig. 10]은 메카넘 휠 로봇을 이용하여 실험한 결과로 각각 제어기에 DOB를 미적용한 것과 적용한 것의 기준 궤적을 추적하는 로봇의 위치를 보여준다. 결과 그래프를 통해 실험에서도 DOB를 적용한 제어기가 그렇지 않은 것보다 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 같은 초기 오차가 있을 경우 얼마만큼 빠르게 기준궤도를 추적하느냐의 성능이 가장 큰 차이로 나타났다.

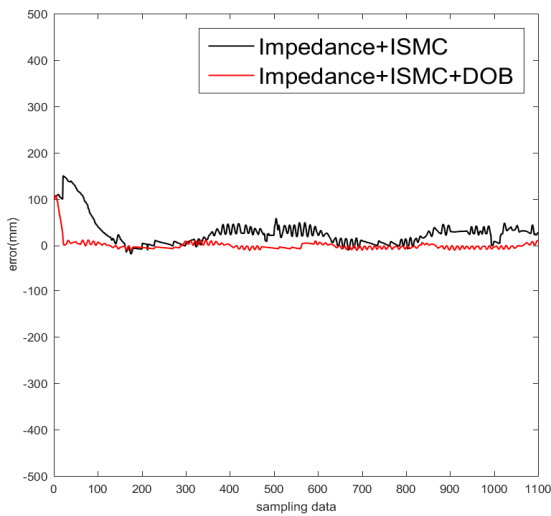
다음 [Fig. 11]는 DOB 적용 전과 적용 후의 결과 비교이다. 기준 궤적과의 오차 값을 비교하였다.



[Fig. 9] Tracking performance of AGV without DOB



[Fig. 10] Tracking performance of AGV with DOB



[Fig. 11] Comparison of error with or without DOB

[Table 4] Error data comparison using RMS

method	distance error (mm)
Non DOB	39.96
DOB	12.03

위의 그림을 볼 때 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 DOB를 사용함으로써 추적 성능이 훨씬 개선되었음을 확인할 수 있다.

결과 그래프의 데이터를 RMS를 이용하여 오차의 정도를 정량화된 데이터로 확인하면 [Table 4]와 같다.

실험에서는 바퀴의 슬립, 바닥면과의 마찰, 진동 등의 불확실성과 로봇 파라미터의 오차로 인해 시뮬레이션 결과보다 오차의 크기가 큼을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 메카넘 휠을 장착한 AGV의 강인 궤도 추적 방법에 대해서 연구를 진행하였다. 메카넘 휠 AGV의 동역학 모델링을 기반으로 하고 임피던스 제어와 ISMC의 장점을 결합한 다음 결합된 제어기의 문제점을 상쇄시키기 위해 상태 공간 DOB를 추가적으로 구성하여 외란에 더욱 강인한 궤도 추적 제어 방법을 제시하였다. 외란이 존재하는 환경에서 MATLAB / SIMULINK 시뮬레이션을 통하여 궤도 추적 성능을 확인하였고, 실제 공장에서 환경을 조성하고 제작한 AGV에 적용하여 실험한 결과 제안된 시스템이 향상된 제어 성능을 보임을 확인하였다. 결과적으로 임피던스 제어에 ISMC만을 사용한 경우보다 DOB를 추가적으로 구성한 경우의 제어 성능이 더 우수함을 확인할 수 있었다. 메카넘 휠 AGV의 제어에 DOB를 도입한 결과는 향후 실제 현장에서 많이 응용될 것으로 기대된다.

References

- [1] B. Wu, D. Qin, Y. Chen, T. Cao, and M. Wu, "Structure design of an omni-directional wheeled handling robot," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1885, no. 5, 2021, DOI: 10.1088/1742-6596/1885/5/052013.
- [2] J. M. Park and K. S. Park, "Position Compensation for Automatic Guided Vehicle Using Ultrasonic and Infrared Sensors," *Journal of Engineering Research*, 1996, <http://oak.ulsan.ac.kr/handle/2021.oak/3981>.
- [3] I. Oh, G. Kwon, and H. Yang, "A Study of Position Estimation Considering Wheel Slip of Mecanum Wheeled Mobile Robot," *Journal of the KIMST*, vol. 22, no. 3, pp. 401-407, 2019, DOI: 10.9766/KIMST.2019.22.3.401.
- [4] R. Rojas, "A short history of omnidirectional wheels," [Online], <http://robocup.mi.fu-berlin.de/buch/shortomni.pdf>.
- [5] O. Diegel, A. Badve, G. Bright, J. Potgieter, and S. Tlale, "Improved Mecanum wheel design for omni-directional robots," *2002 Australasian Conference on Robotics and Automation*, Auckland, Australia, pp. 117-121, 2002, [Online], <http://ftp.mi.fu-berlin.de/pub/Rojas/omniwheel/Diegel-Badve-Bright-Potgieter-Tlale.pdf>.
- [6] F. Adăcăiți and I. Doroftei, "Practical applications for mobile robots based on Mecanum wheels - a systematic survey," *The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics*, no. 40, 2011, <https://www.incdmtm.ro/editura/documente/page/2021-29.%20Practical%20Applications%20for%20Mobile%20Robots%20based%20on%20Mecanum%20Wheels%20-%20A%20Systematic%20Survey.pdf>.
- [7] A. Gferrer, "Geometry and kinematics of the mecanum wheel," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 25, no. 9, pp. 784-791, Dec., 2008, DOI: 10.1016/j.cagd.2008.07.008.
- [8] S. D. Kamdar, "Design and manufacturing of a Mecanum wheel for the magnetic climbing robot," Master's thesis, Embry-Riddle Aeronautical University, Florida, USA, 2015, [Online], <https://commons.erau.edu/edt/269>.
- [9] J. E. M. Salih, M. Rizon, S. Yaacob, A. H. Adom, and M. R. Mamat, "Designing Omni-directional mobile robot with Mecanum wheel," *1st International Workshop on Artificial Life and Robotics*, pp. 101-106. 2005, DOI: 10.3844/ajassp.2006.1831.1835.
- [10] Y. Jia, X. Song, and S. S.-D. Xu, "Modeling and motion analysis of four-Mecanum wheel omni-directional mobile platform," *International Conference on Automatic Control (CACs)*, Nantou, Taiwan, 2013, DOI: 10.1109/CACS.2013.6734155.
- [11] H. Taheri, B. Qiao, and N. Ghaeminezhad, "Kinematic model of a four Mecanum wheeled mobile robot," *International Journal of Computer Applications (0975-8887)*, vol. 113, no. 3. Mar., 2015, DOI: 10.5120/19804-1586.
- [12] S. Soni, T. Mistry, and J. Hanath, "Experimental analysis of Mecanum wheel and omni Wheel," *IJISET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, vol. 1, no. 3, May, 2014, [Online], http://www.academia.edu/85546609/Experimental_Analysis_of_Mecanum_wheel_and_Omni_wheel.

- [13] B. Chu, "Performance evaluation of Mecanum wheeled omnidirectional mobile robot," *31st ISARC*, Sydney, Australia, pp. 784-789, 2014, DOI: 10.22260/ISARC2014/0106.
- [14] M. Abdelrahman, I. Zeidis, O. Bondarev, B. Adamov, F. Becker, and K. Zimmermann, "A description of the dynamics of a four-wheel Mecanum mobile system as a basis for a platform concept for special purpose vehicles for disabled persons," *58th ILMENAU SCIENTIFIC COLLOQUIUM*, Ilmenau, Germany, 2014, [Online], urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk:3.
- [15] A. F. M. Fuad, I. A. Mahmood, S. Ahmad, N. M. H. Norsahperi, S. F. Toha, R. Akmelawati, and F. J. Darsivan, "Modeling and simulation for heavy-duty Mecanum wheel platform using model predictive control," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 184, Jul., 2017, DOI: 10.1088/1757-899X/184/1/012050.
- [16] L. Xu and B. Yao, "Adaptive robust control of mechanical systems with nonlinear dynamic friction compensation," *International Journal of Control*, vol. 81, no. 2, pp. 34-45, 2008, DOI: 10.1080/00207170701390132.
- [17] M. J. Zhang and Z. Z. Chu, "Adaptive sliding mode control based on local recurrent neural networks for underwater robot," *Ocean Engineering*, vol. 45, pp. 56-62, May, 2012, DOI: 10.1016/B978-0-12-820271-5.00012-2.
- [18] J. Park, D.-Y. Koh, and J.-J. Kim, "Vibration Reduction Control of an Omnidirectional Mobile Robot with a High Center of Mass Based on Model Predictive Control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 27, no. 10, pp. 728-735, Oct., 2021, DOI: 10.5302/J.ICROS.2021.21.0101.
- [19] C. Woo, M. Lee, and T. Yoon, "Robust Trajectory Tracking Control of a Mecanum Wheeled Mobile Robot Using Impedance Control and Integral Sliding Mode Control," *Journal of Korea Society*, vol. 14, no. 4, pp. 256-264, Dec., 2018, DOI: 10.7746/jkros.2018.13.4.256.
- [20] C.-C. Cheah and D. Wang, "Learning impedance control for robotic manipulators," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 3, pp. 452-465, Jun., 1998, DOI: 10.1109/70.678454.
- [21] S. Jung, T. C. Hsia, and R. G. Bonitz, "Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 474-483, May, 2004, DOI: 10.1109/TCST.2004.824320.
- [22] M. Kollmitz, D. Buscher, T. Schubert, and W. Burgard, "Whole-Body Sensory Concept for Compliant Mobile Robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), Brisbane, Australia*, 2018, DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460510.
- [23] T. C. Hsia and S. Jung, "Studies of Lateral Impedance Force Control for an Autonomous Mobile Robot with Slip," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 161-167, Feb., 2006, DOI: 10.5302/J.ICROS.2006.12.2.161.
- [24] Q. Gao, L. Liu, G. Feng, Y. Wang, and J. Qiu, "Universal fuzzy integral sliding-mode controllers based on T-S fuzzy models," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 350-362, Apr., 2014, DOI: 10.1109/TFUZZ.2013.2254717.
- [25] D. S. Baek, S. K. Park, and T. S. Yoon, "Trajectory tracking control system design of mobile robot based on WIPDC and ISMC," *KIEE Summer Conference 2015*, Muju, Korea, pp. 1337-1338, 2015, [Online], <https://koreascience.kr/article/CFKO201531751956299.pdf>.
- [26] L.-C. Lin and H.-Y. Shin, "Modeling and adaptive control of an omni-mecanum-wheeled robot," *Intelligent Control and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 166-179, 2013, DOI: 10.4236/ica.2013.42021.
- [27] A. Dietrich, *Whole-Body Impedance Control of wheeled Humanoid Robots*, 1st ed, Springer Cham, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-40557-5.
- [28] H. Shim, G. Park, Y. Joo, J. Back, and N. H. Jo, "Yet another tutorial of disturbance observer: Robust stabilization and recovery of nominal performance," *Control Theory Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 237-249, Sept., 2016, DOI: 10.1007/s11768-016-6006-9.



천 효 석

2010 창원대 전기공학과(공학사)
2012 창원대 전기공학과(공학석사)
2012~현재 창원대학교 박사 과정

관심분야: 이동로봇, 영상처리, 강인제어



박 승 규

1984 고려대 전기공학과(공학사)
1986 고려대 전기공학과(공학석사)
1990 고려대 전기공학과(공학박사)
1990~현재 창원대학교 전기공학과 교수

관심분야: 강인제어, whole body control