

임피던스 제어와 적분 슬라이딩 모드 제어를 이용한 메카넘 휠 이동로봇의 강인한 궤도 추적 제어

Robust Trajectory Tracking Control of a Mecanum Wheeled Mobile Robot Using Impedance Control and Integral Sliding Mode Control

우철민¹·이민욱²·윤태성[†]

Cheolmin Woo¹, Min-uk Lee², Tae-sung Yoon[†]

Abstract: Unlike normal wheels, the Mecanum wheel enables omni-directional movement regardless of the orientation of a mobile robot. In this paper, a robust trajectory tracking control method is developed based on the dynamic model of the Mecanum wheel mobile robot in order that the mobile robot can move along the given path in the environment with disturbance. The method is designed using the impedance control to make the mobile robot to track the path, and the integral sliding mode control for robustness to disturbance. The good performance of the proposed method is verified using the MATLAB /Simulink simulation and also through the experiment on an actual Mecanum wheel mobile robot. In both the simulation and the experimentation, we make the mobile robot move along a reference trajectory while maintaining the robot's orientation at a constant angle to see the characteristics of the Mecanum wheel.

Keywords: Mecanum wheel, Mobile robot, Trajectory tracking, Impedance control, Integral sliding mode control

1. 서론

오늘날 산업 현장에서 사용하는 대부분의 이동로봇들은 일 반적인 형태의 바퀴를 사용하고 있다. 이러한 이동로봇의 경 우, 이동 방향이 전·후로 제한되며 현재 로봇의 자세 또는 방 향을 바꾸기 위해서는 어느 정도의 회전반경이 필요하다는 단 점이 있다. 불필요한 공간과 동선을 최소화할 필요가 있는 산 업 현장에서 이러한 단점은 작업의 효율을 저하시키게 된다. 따라서 더욱 효율적인 이동로봇의 필요성이 대두되었고 일반 적인 바퀴가 아닌 전방향 휠(omnidirectional wheel)을 장착한 이동 로봇에 대한 연구가 이루어지게 되었다. 전방향 휠 이동

로봇에는 많은 종류가 있는데, 본 논문에서는 전방향 휠 이동 로봇 중에서도 비교적 제어하기 쉬운 동특성 방정식을 가지고 있는 메카넘 휠(Mecanum wheel)을 장착한 이동로봇에 대해 논하고자 한다.

메카넘 휠은 이동로봇의 전 방향 이동이 가능하도록 설계 된 바퀴로서 1973년에 고안되었다^[1]. 메카넘 휠과 일반적인 바퀴의 가장 큰 차이점은 작은 롤러들이 바퀴에 일정한 각도를 이루며 부착되어 있다는 점이다^[2]. 아래 [Fig.1]과 같이 바퀴에 부착된 롤러들은 바퀴의 회전 방향과 45°의 각도를 이루고 있 는데, 이는 바퀴가 회전하면서 지면과 맞닿을 때 힘의 방향이 바퀴의 회전 방향과 달라지게 만든다^[3-5]. 따라서 각각의 바퀴 를 회전시키는 방법에 따라 이동로봇의 진행 방향을 자유롭게 조절할 수 있다^[6-8]. 물론 로봇이 바라보는 방향을 고정한 채로 움직이거나 제자리에서 회전을 하는 것 또한 가능하다^[9-13]. 이 러한 다양한 특성을 가진 메카넘 휠 이동로봇을 실생활 또는 각종 산업 현장에서 효율적으로 사용하기 위해 적음 제어^[14], 적음 슬라이딩 모드 제어^[15], 모델 예측 제어^[13] 등을 비롯한 다

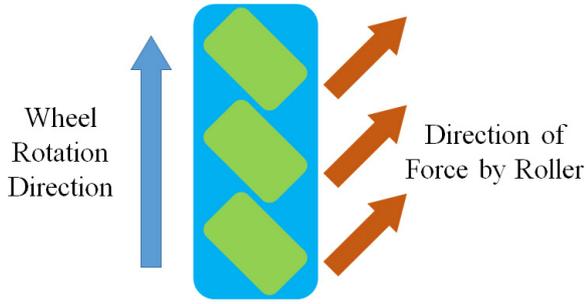
Received : Sep. 12. 2018; Revised : Nov. 13. 2018; Accepted : Nov. 16. 2018

※ This research is financially supported by Changwon National University in 2017~2018.

1. Researcher, CNU, Changwon, Korea (kangshot2@naver.com)

2. Researcher, IREA, Changwon, Korea (alsdnr0716@naver.com)

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



[Fig. 1] Principle of Mecanum wheel

양한 제어 기법을 적용한 궤도 추적 제어 방법에 대한 연구가 이루어져 왔다. 적응 제어의 경우는 파라미터가 불확실하거나 변동이 있어도 제어가 잘되는 반면에 외란에는 다소 약해지는 특징이 있다. 적응 슬라이딩 모드 제어의 경우는 외란을 잘 이겨내지만 초기 입력이 크고 시스템의 동특성을 잘 따라가지 못한다는 단점이 있다. 모델 예측 제어는 오버슈트가 적은 대신 응답속도가 느리다는 단점이 있다. 본 논문에서는 임피던스 제어 (impedance control)^[16,17]와 적분 슬라이딩 모드 제어 (integral sliding mode control: ISMC)^[18,19]의 장점을 결합한 외란에 강인한 제어 방법을 제안하고 이를 메카넘 휠 이동로봇의 궤도 추적 제어에 적용하고자 한다.

본 논문에서는 시스템이 원하는 임피던스를 갖도록 해주는 즉, 원하는 오차 동특성을 갖도록 시스템의 고유치 설정을 가능하게 해주는 임피던스 제어를 이용하여 기준 궤도 추적을 위한 공칭 제어 입력을 만든다. 그리고 여기에 초기 시간부터 슬라이딩 평면에 있게 하며 적절한 제어 입력에 의해 지속적으로 그 평면상에 머물러 있도록 하여 외란이 있는 경우에도 공칭계통의 동특성을 유지할 수 있도록 하는 ISMC를 이용하여 제어 입력을 설계하여 더해줌으로써 초기 입력의 크기를 낮추고 궤도 추적 중 발생할 수 있는 외란에 강인하게 해주는 궤도 추적 제어 방법을 제시한다. 또한, 본 논문에서는 MATLAB/Simulink을 이용한 시뮬레이션과 실제 제작한 메카넘 휠 이동로봇에 의한 실험을 통하여 제안한 궤도 추적 제어 방법에 대한 성능을 검증한다.

2. 본 론

2.1 메카넘 휠 이동로봇의 동역학 모델

메카넘 휠을 장착한 이동로봇의 동역학 모델은 다음과 같다^[6].

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

여기서 $q = [x \ y \ \theta]^T$ 는 로봇의 자세(posture)이고, F 는 메카넘 휠 이동로봇에 인가되는 힘으로서 이동로봇의 입력이다. M 은 관성, C 는 전항력, $f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]^T$ 는 각 바퀴에 걸리는 마찰을 나타낸다. 각 행렬은 아래의 식 (2) - (5)와 같이 표현할 수 있다.

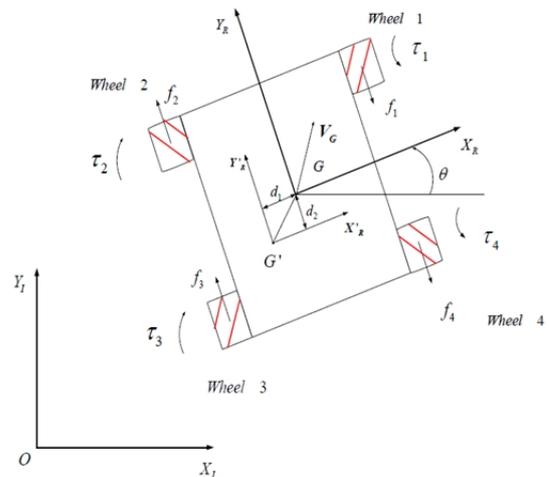
$$\begin{aligned} M &= [m_{ij}]_{3 \times 3}, m_{11} = m_b + 4\left(m_w + \frac{I}{r^2}\right); \\ m_{22} &= m_b + 4\left(m_w + \frac{I}{r^2}\right); m_{12} = m_{21} = 0; \\ m_{13} &= m_{31} = m_b(d_1 \sin\theta + d_2 \cos\theta); \\ m_{23} &= m_{32} = m_b(-d_1 \cos\theta + d_2 \sin\theta); \\ m_{33}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

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

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

$$\tilde{S} = \text{diag}[sgn(\dot{\phi}_1) \quad sgn(\dot{\phi}_2) \quad sgn(\dot{\phi}_3) \quad sgn(\dot{\phi}_4)] \quad (5)$$

위의 식에서 $\dot{\phi}_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$)는 각 바퀴의 각속도, m_b 는 로봇 플랫폼의 질량, m_w 는 로봇 바퀴의 질량, r 은 바퀴의 반경, I 는 각 바퀴의 관성 모멘트, I_b 는 로봇 플랫폼의 관성 모멘트이다.


 [Fig. 2] Schematic of Mecanum wheel robot^[14]

다. d_1 과 d_2 는 위치 중심과 질량 중심사이의 거리, l 은 위치 중심으로부터 각 바퀴 축까지의 거리, α 는 X_R 과 바퀴 축 사이의 각으로서 [Fig. 2]에 나타내어져 있다.

2.1.1 각 바퀴의 입력토크 계산

식 (1)의 우변의 힘 F 는 메카넘 휠을 장착한 이동로봇의 입력이다. 그러나 실제 로봇에의 입력으로 사용하기 위해서는 힘 F 는 각 바퀴의 모터에 입력되는 토크로 계산되어야 한다. 힘 F 는 아래의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{1}{r} \tilde{B}^T \tau \tag{6}$$

위의 식 (6)에서 $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4]^T$ 는 각 바퀴에 걸리는 토크로서, 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\tau = r\tilde{B}(\tilde{B}^T\tilde{B})^{-1}F \tag{7}$$

식 (6)에서 \tilde{B}^T 는 3×4 행렬이므로 역행렬이 존재하지 않는다. 따라서 \tilde{B}^T 의 pseudo 역행렬을 이용하여 식 (7)과 같이 τ 를 구할 수 있다. 위의 식 (7)을 이용함으로써, 메카넘 휠 이동로봇에 인가되는 힘으로부터 각 바퀴에 입력되는 토크를 계산할 수 있다.

2.2 제어기 설계

본 논문에서는 이동로봇이 주어진 기준 궤도를 추적, 유지하게 하기 위한 공칭 제어 입력을 만들어주기 위해 임피던스 제어를 사용하였다. 임피던스 제어는 시스템이 확실하지 않아도 안정적인 상태를 유지하기가 비교적 용이하기 때문이다. 그러나 임피던스 제어는 외란에 비교적 약하다는 단점이 있다. 따라서 이를 보완하고 시스템에 강인성을 부여하기 위하여 적분 슬라이딩 모드 제어를 사용하였다. 이 두 가지의 제어기를 통해 외란의 영향에도 공칭 시스템의 특성을 유지하는 제어기를 설계한다.

먼저 식 (1)에서 이동로봇에 작용하는 마찰력을 측정할 수 없을 경우 시스템에 입력되는 외란으로 가정하고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + D = F_0 + F_{smc} \tag{8}$$

2.2.1 임피던스 제어를 이용한 제어 입력 F_0 설계

식 (8)의 F_0 는 공칭 제어 입력으로 본 논문에서는 임피던스

제어를 이용하여 설계한다. 임피던스란 제어하고자 하는 시스템과 외부 환경이 가지고 있는 힘을 의미하는데 이것을 이용하여 시스템의 특성을 원하는 대로 결정해 줄 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주어진 메카넘 휠 이동로봇의 동특성 방정식을 활용한 임피던스 제어를 통해 이동로봇이 일정한 궤도를 추적하기 위한 공칭 입력을 만들어 주었다. 시스템이 원하는 임피던스를 갖도록 하는 공칭 제어 입력 F_0 는 다음 식 (9)와 같이 설계한다.

$$F_0 = M(q)(\ddot{q}_d - K_d\dot{e} - K_p e) + C(q,\dot{q})\dot{q} \tag{9}$$

여기서, K_d 와 K_p 는 시스템이 갖고자하는 감쇠 계수와 탄성 계수이다. 그리고 $e = q - q_d$ 로서 이동로봇의 현재의 자세 q 와 목표로 하는 기준 궤도의 자세 q_d 와의 오차이다.

위의 식 (9)를 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음 식 (10)과 같은 오차 동특성 방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e - d - u_{smc} = 0 \tag{10}$$

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

2.2.2 ISMC를 이용한 제어 입력 F_{smc} 설계

슬라이딩 모드 제어란 우리가 설정한 슬라이딩 평면을 통해 시스템의 동특성을 결정하고, 실제 시스템의 동특성이 이 평면에 수렴하도록 하는 제어 기법이다. 슬라이딩 모드 제어의 가장 큰 장점은 비선형성과 불확실성에 대한 영향이 적고 외란에 대해 큰 강인성을 가진다는 것이다. 그러나 슬라이딩 평면을 설정하는 과정에서 제어하고자 하는 시스템의 상태가 다른 상태에 종속되기 때문에 기존 시스템의 동특성을 잃게 되고, 초기에 슬라이딩 평면에 도달하는 과정에서 외란의 영향을 받는다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 일반적인 슬라이딩 모드 제어의 단점을 보완한 적분 슬라이딩 모드 제어(ISMC)를 임피던스 제어와 결합하여 강인성을 추가하였다.

ISMC에 의해 제어 입력 F_{smc} 를 설계하기 위해 식 (10)을 정리하면 다음 식 (11)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= E_2 \\ \dot{E}_2 &= -K_p E_1 - K_d E_2 + d + u_{smc} \end{aligned} \tag{11}$$

위 식에서 $E_1 = e$, $E_2 = \dot{e}$ 이며, 식 (11)은 다음 식과 같이 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{E} &= AE + B(u_{smc} + d) \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

ISMC를 사용하기 위해서 슬라이딩 평면을 다음과 같이 선정한다¹⁹⁾.

$$S = E(t) + z(t) = 0 \quad (13)$$

여기서, $\dot{z}(t) = -AE(t)$ 로 설정하였다. 이는 상태가 슬라이딩 평면 위에 존재할 때, 시스템이 공칭 계통의 동특성을 갖도록 해준다. ISMC 제어 입력을 구하기 위해 Lyapunov 함수를 다음 식 (14)와 같이 정의한다.

$$V(t) = \frac{1}{2} S^T(t) P S(t) \quad (P > 0) \quad (14)$$

$\dot{V}(t) < 0$ 을 만족시키는 입력 u_{smc} 를 구하기 위해 \dot{V} 를 다음 식 (15)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T \dot{S} = S^T (\dot{E} + \dot{z}) \\ &= S^T (AE + B(d + u_{smc}) - AE) \\ &= S^T B(d + u_{smc}) \end{aligned} \quad (15)$$

외란의 최대 크기를 d_{max} 라고 할 때, $S^T \dot{S} < 0$ 을 만족하는 u_{smc} 를 구하면 다음 식과 같다.

$$u_{smc} = -d_{max} \text{sign}(S^T B) \quad (16)$$

$u_{smc} = M^{-1} F_{smc}$ 이므로, F_{smc} 는 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$F_{smc} = M u_{smc} \quad (17)$$

2.3 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션에 사용된 메카닉 휠 이동로봇의 파라미터 및 제어기에 사용된 파라미터 값은 [Table 1]과 같다.

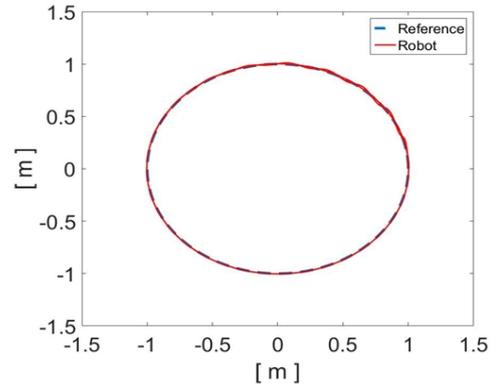
먼저 임피던스 제어의 성능을 확인하고 K_p 와 K_d 에 대한 gain tuning을 위해 기준 궤도에 대한 궤도 추적 시뮬레이션을 수행하였다. 효과적인 gain tuning을 위해 ISMC를 적용하지 않고 외란이 없는 상태에서 진행하였다.

[Fig. 3]는 외란이 없는 상태에서 임피던스 제어만을 사용했을 경우 원형의 기준 궤도에 대한 궤도 추적 시뮬레이션 결과

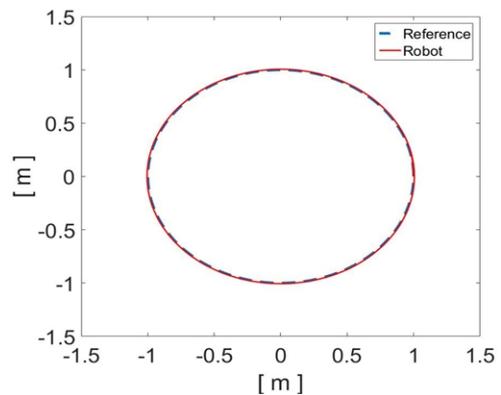
를 나타낸다. 처음의 K_p 와 K_d 는 각각 20, 0.1로 설정하였으며 궤도 추적 성능은 나쁘지 않으나 초기 위치인 (1,0)에서 출발한 직후 약간의 떨림이 확인되었다. 따라서 이에 대한 추가적

[Table 1] Simulation parameters

parameter	value[unit]
m_b	10[kg]
m_w	2[kg]
I_b	0.2278[kgm ²]
I	0.039[kgm ²]
r	0.105[m]
d_1	0[m]
d_2	0[m]
l	0.3[m]
α	$\pi/6$ [rad]
K_d	diag([1, 1, 1])
K_p	diag([10, 10, 10])



[Fig. 3] Trajectory tracking simulation result using impedance control without disturbance ($K_d = 0.1$, $K_p = 20$)



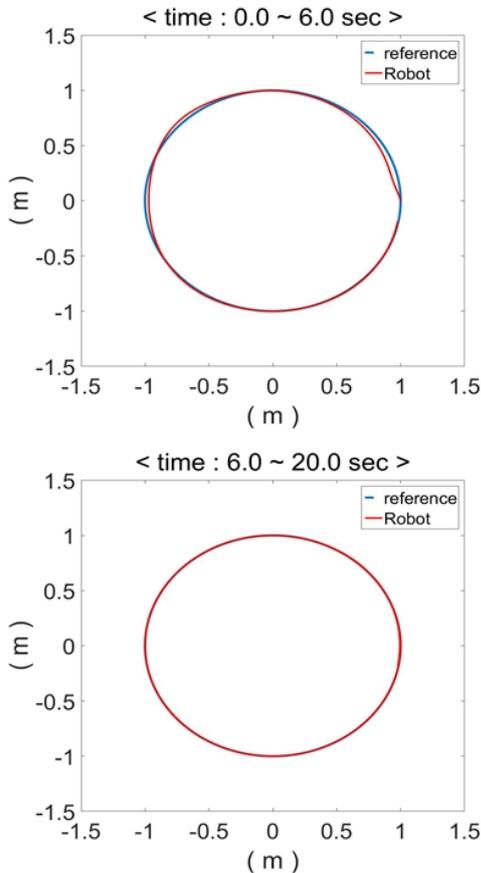
[Fig. 4] Trajectory tracking simulation result using impedance control without disturbance ($K_d = 1$, $K_p = 10$)

인 gain tuning을 진행하여 [Fig. 4]와 같이 K_p 와 K_d 가 각각 10과 1 일 때 최적의 성능을 내는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문의 모든 시뮬레이션과 실험에서 $K_p = 10$, $K_d = 1$ 을 적용하였다.

[Fig. 5]는 임피던스 제어와 ISMC를 함께 사용한 경우의 기준 궤도와 이동로봇의 이동 경로를 나타낸다. 파란색 선은 기준 궤도를 나타내고 주홍색 선은 로봇이 이동한 궤적을 나타낸다. 초기 위치는 (1, 0)이고 시계 반대 방향으로 이동하였다. 또한 원 궤도를 따라 이동하는 동안 로봇이 바라보는 방향 (orientation)은 0 [rad]을 유지하도록 설정하였다.

외란으로 sine 파를 F_x , F_y , F_θ 에 각각 넣어주었다. 각 sine 파의 크기(amplitude)는 1, 각 주파수(angular frequency)는 0.5 [rad/sec]로 설정하였으며 각 sine 파마다 1 [rad]씩 위상차를 두었다. 이 때 F_x 와 F_y 에 대한 외란의 크기의 단위는 [N]이며 F_θ 에 대한 단위는 [rad]이다.

[Fig. 5]에서 위의 그래프는 $t = 0$ [sec] 부터 $t = 6$ [sec] 까지 로봇이 움직인 경로를 나타낸다. 초기 위치인 (1, 0)에서 출발한 직후에 주어진 경로에 대해 약간의 오차가 존재하지만 약



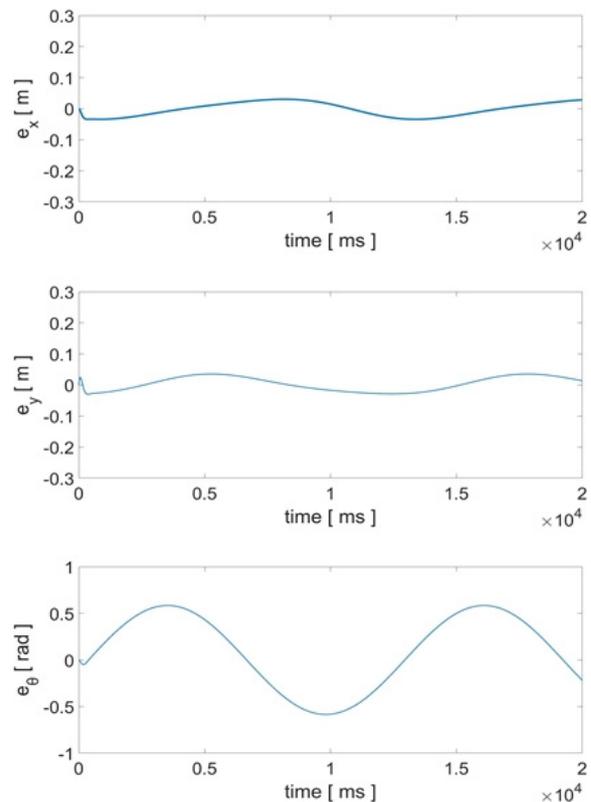
[Fig. 5] Trajectory tracking result using impedance control + ISMC (simulation)

반 바퀴를 주행한 이후로는 오차가 거의 존재하지 않는 것을 확인할 수 있으며, [Fig. 5]의 아래 그래프에서 보다시피 $t = 6$ [sec] 부터 $t = 20$ [sec] 구간에선 주어진 궤도에 거의 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

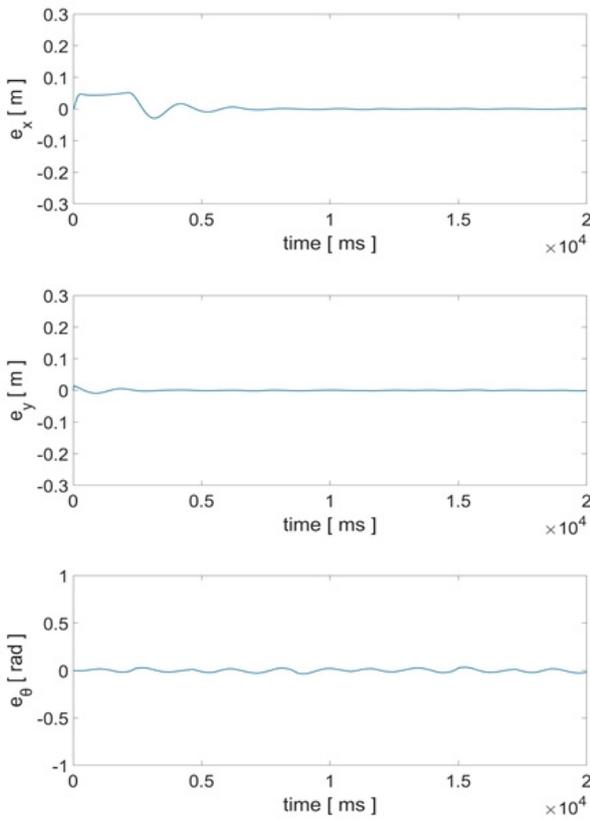
[Fig. 6]와 [Fig. 7]은 기준 궤도와 로봇의 실제 위치(x, y) 및 각도(θ) 사이의 추적 오차를 나타낸 그래프이다. [Fig. 6]는 임피던스 제어만을 사용했기 때문에 로봇이 외란에 의한 영향을 많이 받는 것을 볼 수 있다. [Fig. 7]은 임피던스 제어와 ISMC를 같이 사용했을 때의 그래프로서 외란의 영향이 눈에 띄게 줄어든 것을 확인할 수 있다.

[Fig. 8]은 각 변의 길이가 1 [m]인 정사각형 형태의 기준 궤도에 대하여 임피던스 제어와 ISMC를 함께 적용했을 때 이동로봇의 이동경로를 나타낸 것이다. 파란색 점선은 기준 궤도를 나타내며 주홍색 실선은 로봇의 이동경로를 나타낸다. 이 때 로봇의 기준 orientation은 0 [rad]으로 설정하였다.

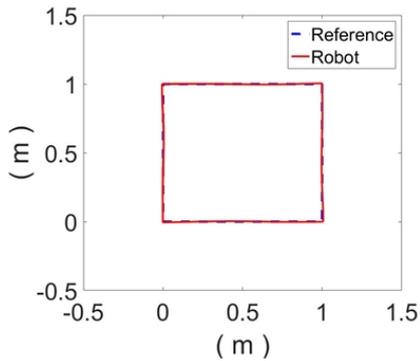
[Fig. 9]과 [Fig. 10]은 사각형 기준궤도에 대한 로봇의 위치 및 orientation 오차를 나타낸 것이다. [Fig. 9]의 경우 임피던스 제어만을 적용했을 때의 이동로봇의 오차이다. 전체적으로 외란의 영향을 크게 받으며 x와 y의 경우 로봇이 방향 전환을 할 때마다 조금씩 오차가 튀는 것을 볼 수 있다. [Fig. 10]은 임피



[Fig. 6] Trajectory tracking errors using impedance control only (simulation)



[Fig. 7] Trajectory tracking errors using impedance control + ISMC (simulation)

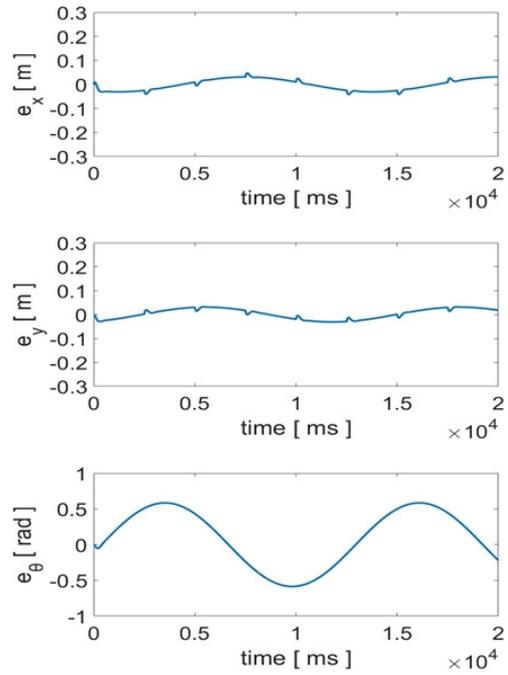


[Fig. 8] Square trajectory tracking result using impedance control + ISMC (simulation)

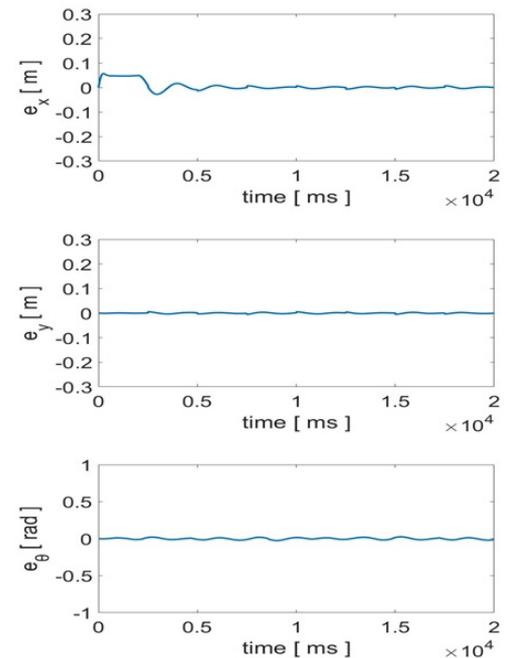
던스 제어와 ISMC를 함께 적용했을 때의 이동로봇의 오차로서 임피던스 제어만을 적용했을 때보다 오차가 눈에 띄게 줄어든 것을 확인할 수 있다.

2.4 실제 실험 및 결과

[Fig. 11]은 실제 실험을 위해 제작된 메카넘 휠 이동로봇이

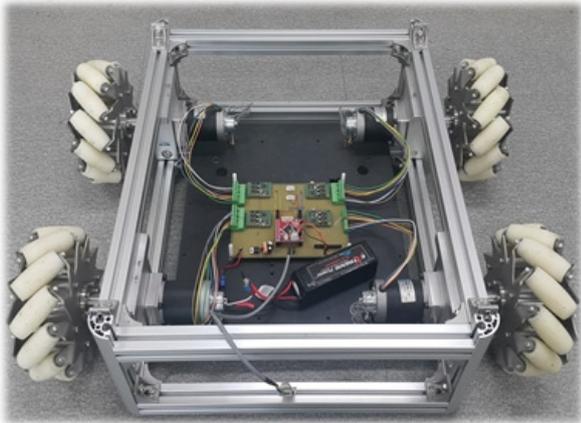


[Fig. 9] Square trajectory tracking errors using impedance control only (simulation)



[Fig. 10] Square trajectory tracking errors using impedance control + ISMC (simulation)

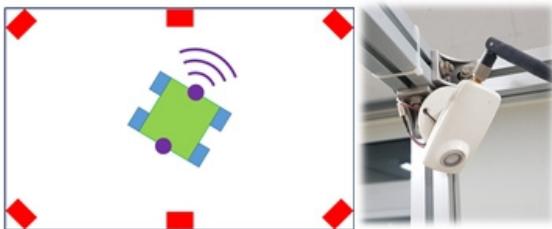
다. 모터는 Motorbank 사의 BL5740-24V(80W) 감속 모터를 사용하였고, 모터 드라이브는 Maxon 사의 ESCON Module 50/5를 사용하였다. 마이크로프로세서는 ATMEGA128A, 바



[Fig. 11] Mecanum wheel mobile robot used in actual experiments



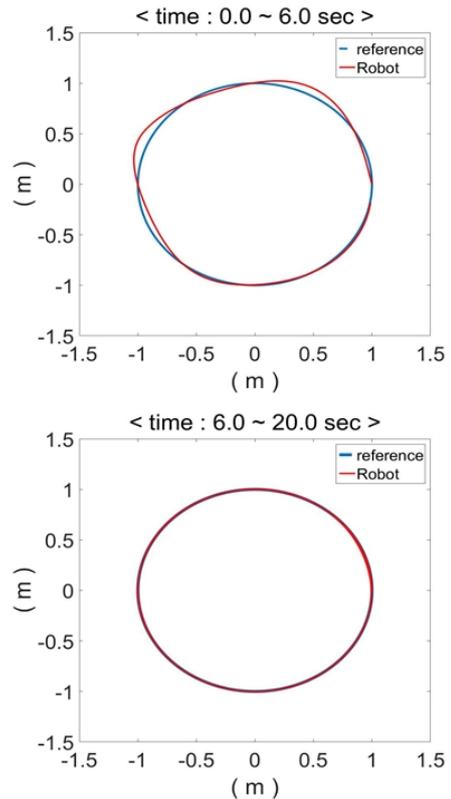
[Fig. 12] Ultrasonic sensor network



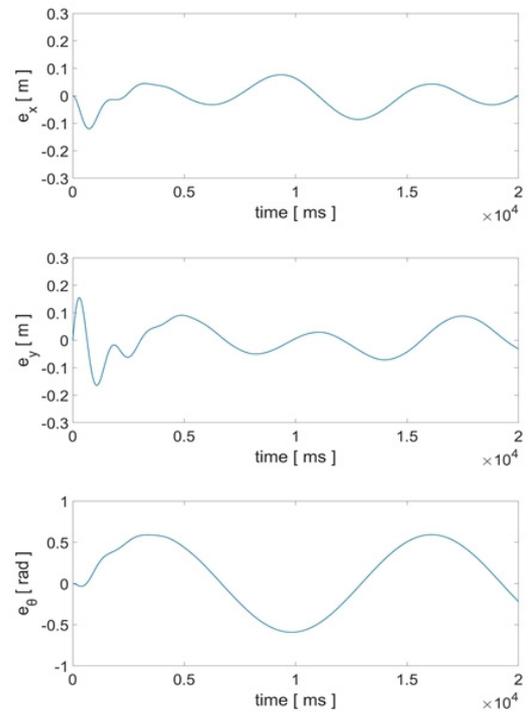
[Fig. 13] Sensor network concept illustration(left) and ultrasonic sensor for experiment(right)

키는 NEXUS Robot 사의 NX- 14138을 사용하였다.

로봇의 실제 자세를 측정하기 위해 [Fig. 12]와 [Fig. 13]과 같이 초음파 센서 네트워크를 구성하였다. 로봇의 윗면의 앞, 뒤에 부착한 2개의 발신기([Fig. 13]의 보라색 원)에서 발생시킨 초음파를 6개의 수신기([Fig. 13]의 적색 사각형)로 수신하여 발신기와 수신기 사이의 거리 정보를 측정된 후 로봇의 현



[Fig. 14] Trajectory tracking result using impedance control + ISMC (experiment)

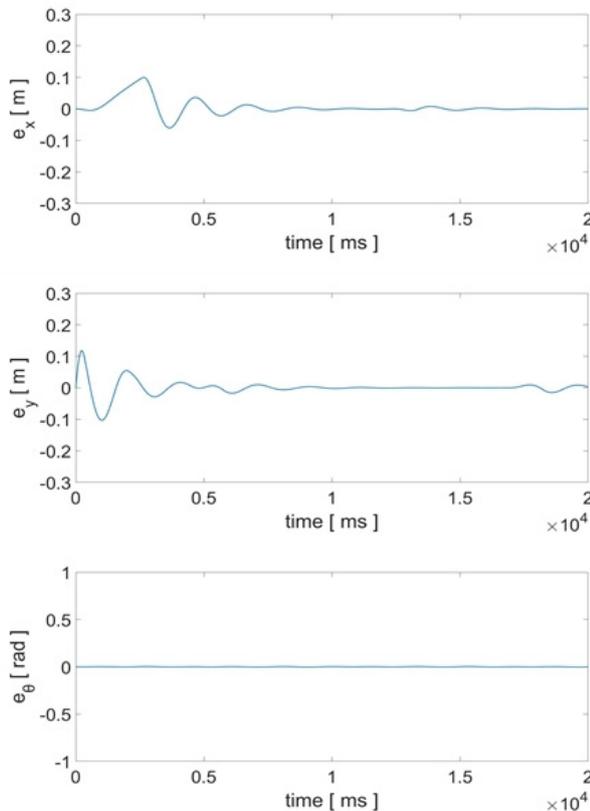


[Fig. 15] Trajectory tracking errors using impedance control only (experiment)

재 위치와 orientation을 구하였다.

[Fig. 14]은 실제 메카넘 휠 이동로봇으로 실험한 결과이다. 외란은 2.3절의 시뮬레이션과 동일하게 설정하였다. 그림에서 파란색 선은 기준 궤도를 나타내고 주황색 선은 로봇이 실제 이동한 궤적을 나타낸다. 초기 위치인 (1,0)에서 출발한 뒤 기준 궤적에 대해 약간의 오차가 존재하지만([Fig. 14]의 위 그래프), 한 바퀴이상 주행한 이후로는([Fig. 14]의 아래 그래프) 기준 궤적에 잘 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 바닥과의 마찰이 생각보다 적어 미끄러짐이 조금 있었고 메카넘 휠 특성상 진동에 의해 약간의 오차가 존재하지만²⁰⁾, 거의 기준 궤적에 근접하게 움직이는 것을 볼 수 있다.

위 그림 [Fig. 15]과 [Fig. 16]은 각각 실제 이동로봇에 임피던스 제어만을 적용했을 때와 ISMC를 추가했을 때의 x, y, θ 에 대한 오차 성분을 나타낸 것이다. [Fig. 15]은 임피던스 제어만을 적용한 결과로서 x, y, θ 모든 영역에서 외란에 의한 영향이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. [Fig. 16]은 실제 로봇에 임피던스 제어와 ISMC를 같이 적용시켰을 때의 결과이다. 임피던스 제어만을 사용했을 때 보다 오차가 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 16] Trajectory tracking errors using impedance control + ISMC (experiment)

[Fig. 16]의 실제 실험 결과를 [Fig. 7]의 시뮬레이션 결과와 비교해 보면, 시뮬레이션의 경우에 비해 x 와 y 에 대한 오차의 크기는 실제 실험의 경우가 더 큰 것을 알 수 있다. 그렇지만, θ 에 대한 오차의 크기는 실제 실험의 경우가 시뮬레이션의 경우에 비해 더 작게 나온 것을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 실제 실험에 사용된 로봇으로부터 구해진 시뮬레이션 파라미터 값들에 불확실성이 존재하고, 또한 로봇의 하드웨어 시스템이 가지게 되는 자체적인 저주파 통과 필터링 효과에 의한 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 임피던스 제어와 적분 슬라이딩 모드 제어의 장점을 결합하여 메카넘 휠을 장착한 이동로봇의 주행을 위한 외란에 강인한 궤도 추적 제어 방법을 제안하였다. 또한, 시뮬레이션을 바탕으로 하여 실제 메카넘 휠 이동로봇에 이를 적용하여 실제로 로봇이 외란에 대해 강인성을 가지고 주어진 궤도를 원활하게 추적하는 것을 확인하였다. 또한, 이동로봇이 바라보는 방향을 일정하게 유지한채 기준 궤도를 따라가는 주행 실험 결과를 통해 메카넘 휠 이동로봇이 일반적인 바퀴를 장착한 이동로봇 보다 더욱 실용적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] R. Rojas, "A short history of omnidirectional wheels," [Online], Available: <http://robocup.mi.fu-berlin.de/buch/shortomni.pdf>.
- [2] 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.
- [3] A. Gferrer, "Geometry and kinematics of the mecanum wheel," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 25, no. 9, pp. 784-791, Dec., 2008.
- [4] F. Adăcăiți and I. Doroftei, "Practical applications for mobile robots based on Mecanum wheels - a systematic survey," *International Conference On Innovations, Recent Trends And Challenges In Mechatronics, Mechanical Engineering And New High-Tech Products Development -MECAHITECH'11*, Bucharest, Romania, vol. 3, pp. 112-123, 2011.
- [5] S. D. Kamdar, "Design and manufacturing of a Mecanum wheel for the magnetic climbing robot," *Master of Science in Mechanical Engineering*, Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, Florida, USA, 2015.
- [6] J. E. M. Salih, S. Yaacob, and M. M. R. M. Juhari, "Omni-directional mobile robot with Mecanum wheel," *1st International Workshop on Artificial Life and Robotics*, pp.101-106. 2005.

[7] Y. Jia, X. Song, and S. S.-D. Xu, "Modeling and motion analysis of four-Mecanum wheel omni-directional mobile platform," *2013 CACS International Automatic Control Conference*, Nantou, Taiwan, pp. 328-333, 2013.

[8] 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, pp. 6-9. Mar. 2015.

[9] J. E. M. Salih, M. Rizon, S. Yaacob, A. H. Adom, and M. R. Mamat, "Designing omni-directional mobile robot with Mecanum wheel," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 3, no. 5, pp. 1831-1835, Oct. 2006.

[10] 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, pp. 292-295, May. 2014.

[11] B. Chu, "Performance evaluation of Mecanum wheeled omni-directional mobile robot," *31st ISARC*, Sydney, Australia, pp. 784-789, 2014.

[12] 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, pp. 1-10, 2014.

[13] A. F. M. Fuad, I. A. Mahmood, S. Ahmad, N. M. H. Norsahperi, S. F. Toha, R. Akmeliawati 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, 2017, DOI: 10.1088/1757-899X/184/1/012050.

[14] 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.

[15] V. Alakshendra and S. S. Chiddarwar, "A robust adaptive control of Mecanum wheel mobile robot: simulation and experimental validation," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, Korea, pp. 5606-5611, 2016.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] D. S. Baik, 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.

[20] J.-J. Bae and N. Kang, "Design optimization of a Mecanum wheel to reduce vertical vibrations by the consideration of equivalent stiffness," *Shock and Vibration*, vol. 2016, Article ID, 2016, DOI: 10.1155/2016/5892784.



우철민

2017 창원대 물리학과(학사)

2017~현재 창원대 전기공학과 석사 과정

관심분야: Mobile Robot, Quadcopter, Control Theory, Robotics



이민욱

2016 창원대 전기공학과(공학사)

2018 창원대 전기공학과(공학석사)

2018~현재 이레산업 기술연구소

관심분야: Mobile Robot, Control Theory, Robotics, Programming



윤태성

1978 연세대 전기공학과(공학사)

1980 연세대 전기공학과(공학석사)

1988 연세대 전기공학과(공학박사)

1994~1995 미국 Vanderbilt대 visiting professor

1989~현재 창원대학교 전기전자제어 공학부 교수

관심분야: Signal Processing, Intelligent Control, Mobile Robot Control and Navigation