

## 전방향 모바일 로봇에서 유전알고리즘을 이용한 적분 슬라이딩 기반 동적 제어 기법

박진현<sup>1</sup> · 최영규<sup>2\*</sup>

### Integral Sliding-based Dynamic Control Method using Genetic Algorithm on an Omnidirectional Mobile Robot

Jin-Hyun Park<sup>1</sup> · Young-Kiu Choi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Mechatronics Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725 Korea

<sup>2\*</sup>Professor, Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan, 46241 Korea

#### 요 약

전방향 모바일 로봇은 로봇의 방향을 바꿀 필요 없이 어떤 방향으로든 움직일 수 있어 여러 응용 분야에서 적용이 쉽고 뛰어난 기동성을 제공한다. 전방향 모바일 로봇은 마찰과 같은 비선형 동적 성분을 가지고 있어 정확히 모델링하기에 어렵다. 본 연구에서는 이러한 비선형 성분을 제거하기 위하여 모바일 로봇의 역 다이내믹과 적분 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하여 모바일 로봇 시스템을 선형화하고, 제안된 제어기법의 최적 성능을 구현하기 위하여 유전 알고리즘을 사용하여 위치 및 속도 이득을 최적화한다. 성능 평가 결과 유전알고리즘을 적용한 제어기법이 임의의 이득을 갖는 제어기법보다 뛰어난 성능을 나타내었다. 그리고 제안된 역 다이내믹과 적분 슬라이딩 모드 제어기법은 다른 제어기법에서도 적용될 수 있으며, 특히 선형제어시스템 설계에 유용하게 사용될 수 있다.

#### ABSTRACT

Omnidirectional mobile robots can be mobile in any direction without changing the robot's direction, making them easy to apply in many applications and providing excellent maneuverability. Omnidirectional mobile robots have non-linear dynamic components such as friction, making them difficult to model accurately. In this paper, we linearize the mobile robot system using the mobile robot's inverse dynamics and integral sliding mode control method to remove these nonlinear components. And the position and velocity gains are optimized using a genetic algorithm to realize the optimal performance of the proposed system control method. As a result of the performance evaluation, the genetic algorithm's control method showed superior performance than the control method with an arbitrary gain. And the proposed inverse dynamic and integral sliding mode control method can be applied to other control methods. It can be beneficial for designing a linear control system.

**키워드** : 유전알고리즘, 적분 슬라이딩 모드, 비선형 동역학, 전방향 모바일 로봇

**Keywords** : Genetic algorithm, Integral sliding mode, Non-linear dynamic, Omnidirectional mobile robots

Received 18 August 2021, Revised 24 August 2021, Accepted 27 September 2021

\* **Corresponding Author** Young-Kiu Choi(E-mail:ykichoi@pusan.ac.kr, Tel:+82-51-510-2371)  
Professor, Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241 Korea

**Open Access** <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.12.1817>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

최근까지 일륜 진자 로봇(one-wheeled pendulum robot)[1], 휴머노이드 로봇(humanoid robot)[2], 물고기 로봇(fish robot)[3], 뱀 로봇(snake robot)[4], 전방향 모바일 로봇(omnidirectional mobile robot)[5] 등 다양한 유형의 모바일 로봇에 대하여 첨단 제어 기술이 적용되고 있다. 전방향 모바일 로봇은 로봇의 방향을 바꿀 필요 없이 어떤 방향으로든 모바일 할 수 있어 애커먼 차동 구조(Ackerman /Differential structure)를 갖는 비홀로노믹 로봇과 비교해 여러 응용 분야에서 적용이 쉬우며, 뛰어난 기동성을 제공한다[6].

모바일 로봇과 관련된 최근 연구 동향은 전기 기계 부품의 고장이나 마모를 방지하거나 정밀한 제어를 위해 일부 플랜트의 제약조건을 충족하면서 최적의 방식으로 제어하는 것에 중점을 두고 있다[7-8]. 그러므로 구조가 간단한 일반적 PID 제어기만으로는 이러한 문제를 해결하지 못할 수 있다. 최근 많이 연구되고 있는 MPC(Model Predictive Control)는 이러한 종류의 문제를 해결하기 위한 효과적인 해결책으로 복잡한 제약조건이 있는 동적 제어시스템에 대하여 최적의 제어 방법을 제공하였다[9-10]. 그러나 MPC는 일반적인 제어기법과 비교하여 많은 계산 시간이 요구되며, 마찰과 같은 비선형 모델의 파라메타를 정확히 식별하여 시스템의 동적 모델을 정확히 알아야 한다. 그러므로 피할 수 없는 시스템 모델링의 불확실성과 외란 등에 의해 모바일 로봇 시스템에 적용은 여전히 제한적이다[11-12].

많은 연구자가 모델과 비모델 기반으로 외란 및 마찰 문제를 해결하였다[13-15]. 모델 기반 기술은 오프라인으로 식별된 고정 마찰 모델 또는 마찰 계수를 온라인으로 추정하는 적응 알고리즘을 사용하나[13-14], 로봇 환경의 변화에 따른 파라메타의 올바른 추정을 보장하기 위해 시스템의 여기 조건이 충족되어야 하고 많은 센서를 사용하여 제어기 구현이 훨씬 더 복잡하다[16]. 비모델 기반 기술은 마찰의 비선형 효과에 대처하기 위해 PID 제어기의 이득을 수정하여 정확한 모델이 필요하지 않을 뿐만 아니라 교란과 같은 마찰 이외의 다른 현상을 보상할 수 있는 이점이 있다[16].

최근 비선형 동역학 관점에서 전방향 모바일 로봇에 대해 쿨롱 마찰과 같은 비선형 항을 상쇄시켜 속도 차원의 간단한 선형 동역학식을 만들어 적용한 예가 있다

[17]. 이렇게 설계된 제어시스템은 전방향 모바일 로봇에 대하여 속도 차원에서 MPC를 구축하여 속도제어가 가능하지만, 기준 좌표계에 대한 위치제어가 잘 된다는 보장은 없다. 이것은 외란에 의해 발생하는 작은 속도오차가 누적되어 커다란 위치오차가 발생할 수 있기 때문이다. 실제 이 논문의 실험 결과에서도 위치제어의 오차가 매우 크음을 알 수 있으며, 비선형 쿨롱 마찰을 제거하기 위해서 정확히 값을 알아야 하는 문제가 있다. 이와 유사한 로봇 매니퓰레이터의 제어에 있어 시스템의 역다이내믹(inverse dynamics)과 적분 슬라이딩 모드 제어기(integral sliding mode controller)를 사용하여, 로봇 매니퓰레이터의 각 관절을 SISO(Single-Input Single-Output)로 분리하여 선형 동역학 시스템으로 구현하였다[16, 18].

본 연구에서는 삼륜 전방향 모바일 로봇(3-wheels omnidirectional mobile robot)을 로봇 매니퓰레이터에 적용된 역 다이내믹과 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하여 선형시스템으로 설계하고, 구조가 단순한 PI 제어기를 사용하여 속도 루프를 구현한다. 또한, 위치제어를 위해 모바일 로봇의 역기구학을 사용한다. 그리고 정밀한 위치 및 속도제어를 위해 위치 제어기 이득과 PI 제어기의 이득을 유전알고리즘(genetic algorithm)을 사용하여 최적의 이득을 구하고자 한다. 성능 평가 결과 유전 알고리즘을 적용한 제어기법이 임의의 이득을 갖는 제어기법보다 뛰어난 성능을 나타내었다. 그리고 제안된 역 다이내믹과 적분 슬라이딩 모드 제어기법은 다른 제어기법에서도 적용될 수 있으며, 특히 선형제어시스템 설계에 유용하게 사용될 수 있다.

## II. 로봇 모델

### 2.1. 삼륜 전방향 모바일 로봇의 기구학

그림 1은 삼륜 전방향 모바일 로봇 좌표계를 표시하였으며, 로봇의 자세는 식(1)과 같이 직교좌표와 각도로 나타낼 수 있다.

$$q(t) = [x_r(t) \ y_r(t) \ \theta(t)]^T \quad (1)$$

위에서  $x_r(t)$ 과  $y_r(t)$ 은 모바일 로봇의 무게중심 위치 좌표이고,  $\theta(t)$ 는 모바일 로봇의 진행 방향 각도를 나타낸다.

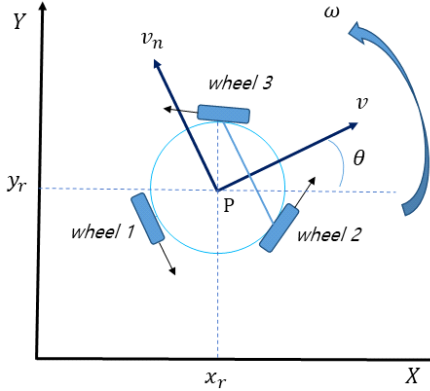


Fig. 1 Coordinate systems and geometric parameters

식(1)의 미분 값으로부터 선속도와 각속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_r(t)}{dt} \\ \frac{dy_r(t)}{dt} \\ \frac{d\theta(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & \sin(\theta(t)) & 0 \\ -\sin(\theta(t)) & \cos(\theta(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ v_n(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

단  $v(t)$ 는 로봇의 선속도,  $v_n(t)$ 는 선속도의 직교 성분,  $\omega(t)$  각속도를 나타낸다.

로봇 바퀴의 각속도( $\omega_{mi}(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ )와 로봇 속도 ( $v(t)$ ,  $v_n(t)$ ,  $\omega(t)$ ) 사이의 관계는 식(3)과 같다[17].

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ v_n(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r_2\sqrt{3}}{3} & -\frac{r_3\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{2r_2}{3} & \frac{r_2}{3} & \frac{r_3}{3} \\ \frac{r_1}{3b} & \frac{r_2}{3b} & \frac{r_3}{3b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{m1}(t) \\ w_{m2}(t) \\ w_{m3}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $b$ 는 로봇 질량 중심과 바퀴 사이의 거리이고  $r_i$ 는 바퀴  $i$ 의 반경이다.

## 2.2. 삼륜 전방향 모바일 로봇의 동역학

삼륜 전방향성 모바일 로봇 모델은 로봇의 기구학과 동역학 및 DC 모터의 동역학을 기초로 표현하였다 [17,19]. 이 모델은 모바일 로봇의 포화(saturation) 및 마찰(friction)과 같은 요소를 고려하여, 로봇 질량 중심에 작용하는 힘의 구성을 나타내기 위해 쿨롱 및 점성 마찰

을 고려하였다. 쿨롱 마찰(coulomb friction)은 로봇과 지면 사이의 마찰을 모델링하고, 점성 마찰력(viscous friction)은 속도와 선형 관계를 갖는 것으로 가정한다 [19]. 그림 1에 정의된 좌표와 뉴턴 제 2법칙에 의해 로봇에 작용하는 병진 및 회전력과 관련된 방정식은 다음과 같다[17].

$$F_v(t) - B_v v(t) - C_v \text{sgn}(v(t)) = \frac{Mdv(t)}{dt} \quad (4)$$

$$F_{v_n}(t) - B_{v_n} v_n(t) - C_{v_n} \text{sgn}(v_n(t)) = \frac{Mdv_n(t)}{dt} \quad (5)$$

$$\Gamma(t) - B_w w(t) - C_w \text{sgn}(w(t)) = \frac{I_n dw(t)}{dt} \quad (6)$$

$$\text{sgn}(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha > 0 \\ 0, & \alpha = 0 \\ -1, & \alpha < 0 \end{cases}$$

여기서  $F_v$ 와  $F_{v_n}$ 은 모바일 로봇 좌표계의 힘을 나타내고,  $\Gamma$ 는 로봇 질량 중심에 대한 모멘텀(momentum)을 나타낸다.  $M$ 은 로봇의 질량이고,  $I_n$ 은 관성 운동량(inertial momentum)이다. 점성력(viscous forces)과 토크는  $B_v v(t)$ ,  $B_{v_n} v_n(t)$  그리고  $B_w w(t)$ 로 표시되고, 쿨롱 힘(coulomb forces)과 토크는  $C_v \text{sgn}(v(t))$ ,  $C_{v_n} \text{sgn}(v_n(t))$  그리고  $C_w \text{sgn}(w(t))$ 로 표시된다.

로봇 견인력(traction forces)과 바퀴의 견인력 간의 관계는 다음과 같다[17].

$$F_v(t) = (f_2(t) - f_3(t))\sin(\pi/3) \quad (7)$$

$$F_{v_n}(t) = -f_1(t) + (f_2(t) + f_3(t))\cos(\pi/3) \quad (8)$$

$$\Gamma(t) = (f_1(t) + f_2(t) + f_3(t))d \quad (9)$$

단,  $f_i(t) = \frac{T_i(t)}{r_i}$ 이며,  $T_i(t)$ 는 각 바퀴의 토크를 나타낸다.

DC 모터 방정식( $i = 1, 2, 3$ )은 식(10)-(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{ai}(t) = L_{ai} \frac{di_{ai}(t)}{dt} + R_{ai} i_{ai}(t) + K_{vi} w_{mi}, \quad (10)$$

$$T_i(t) = l_i K_{ti} i_{ai} \quad (11)$$

단,  $v_{ai}$ 는 전기자 전압,  $L_{ai}$ 는 전기자 인덕턴스,  $R_{ai}$ 는 저항,  $l_i$ 는 모터의 감속비,  $w_{mi}$ 는 로터의 각속도,  $i_{ai}$ 는 전기자 전류이다.

### 2.3. 삼륜 전방향 모바일 로봇의 상태 공간 방정식

삼륜 전방향 모바일 로봇을 상태 공간 방정식으로 나타내면 식(12)-(13)과 같다. 식(12)로부터 모바일 로봇이 비선형 항  $K \text{sgn}(x(t))$ 을 가지고 있음을 알 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bv_a(t) + K \text{sgn}(x(t)) \quad (12)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (13)$$

여기서  $v_a(t) = [v_{a1}(t) v_{a2}(t) v_{a3}(t)]^T$ 는 제어 입력,  $y(t) = [v(t) v_n(t) w(t)]^T$  시스템의 출력을 나타내고  $l = l_{1...3}$ ,  $R_a = R_{a1...3}$ ,  $K_i = K_{i1...3}$ 라고 가정하였으며, 상태 변수 행렬  $A, B, K, C$ 는 아래와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{3l^2K_i^2}{2MR_a^2} - \frac{B_v}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3l^2K_i^2}{2MR_a^2} - \frac{B_m}{M} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{3b^2l^2K_i^2}{I_nR_a^2} - \frac{B_w}{I_n} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos(\delta)}{M} & -\frac{\cos(\delta)}{M} \\ \frac{1}{M} & \frac{\cos(\delta)}{M} & \frac{\cos(\delta)}{M} \\ \frac{b}{I_n} & \frac{b}{I_n} & \frac{b}{I_n} \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} -\frac{C_v}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{C_m}{M} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{C_w}{M} \end{bmatrix}, C = I$$

여기서  $v_a(t) = [v_{a1}(t) v_{a2}(t) v_{a3}(t)]^T$ 는 제어 입력이며,  $y(t) = [v(t) v_n(t) w(t)]^T$  시스템의 출력을 나타내며,  $l = l_{1...3}$ ,  $R_a = R_{a1...3}$ ,  $K_i = K_{i1...3}$ 라고 가정하였다.

### III. 적분 슬라이딩 모드 제어기 설계 및 유전 알고리즘

식(12), (13)의  $A, K, C, I$  행렬은 대각행렬(diagonal matrix)이나,  $B$ 행렬은 대각행렬이 아니다. 입력  $v_a(t) = B^{-1}z(t)$ 라고 두면 새로운 입력  $z(t) = [z_1(t) z_2(t) z_3(t)]^T$ 에 대해서 입력행렬은 항등행렬( $I = BB^{-1}$ )이다. 그리고  $B$ 행렬의 행렬식(determinant)이 0이 아니고 정칙행렬(non-singular)이므로  $B^{-1}$ 는 항상 존재한다.  $\eta(t) = -K \text{sgn}(x(t))$ 로 두면 식(12)는 식(14)와 같이 수정할 수 있다. 그러므로 식(14)는 3개의 SISO 시스템으로 구현된다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Iz(t) - \eta(t) \quad (14)$$

단  $x(t) = [x_1(t) x_2(t) x_3(t)]^T$ ,  $z(t) = [z_1(t) z_2(t) z_3(t)]^T$ ,  $\eta(t) = [\eta_1(t) \eta_2(t) \eta_3(t)]^T$ 이다.

그림 2는 식(14)의 선형시스템과 적분 슬라이딩 모드 제어기가 포함된 삼륜 전방향 모바일 로봇의 제어 블록이다. 제어시스템은 3개의 루프로 구성되어 있다. 가장 안쪽의 1번째 루프는 식(14)에 의해 모바일 로봇을 선형화하여 적분 슬라이딩 모드를 통한 제어방식이며, 2번째 루프는 속도제어를 위한 PI 제어기로 구성되었으며,

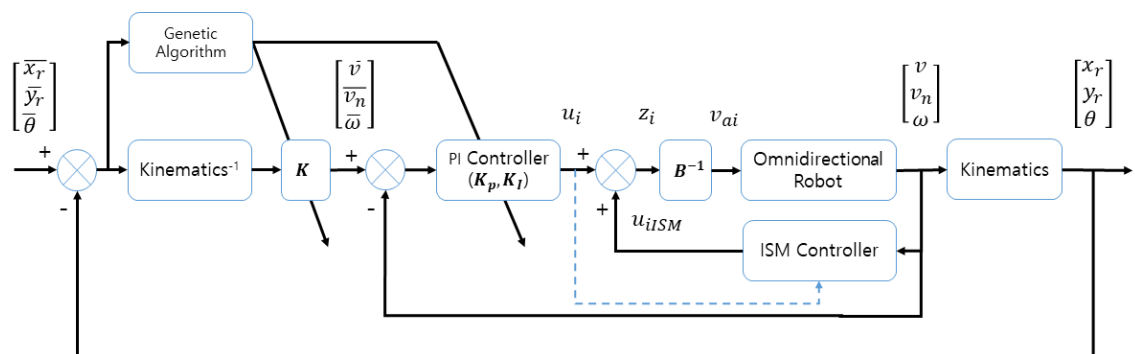


Fig. 2 Block diagram of the integral sliding mode control system using genetic algorithm for the omnidirectional robot

3번째 루프는 위치제어를 위한 모바일 로봇의 역기구학에 기초한 제어 루프를 설계하였다. 선형화 시스템의 새로운 입력 변수  $z_i(t)$ 는 다음과 같다.

$$z_i(t) = u_i(t) + u_{iISM}(t) \quad (15)$$

여기서  $u_i(t)$ 는 각 휠의 PI 제어기 출력이며,  $u_{iISM}(t)$ 는 적분 슬라이딩 모드 제어기 출력이다.

### 3.1. 적분 슬라이딩 모드 제어기 설계

모델링되지 않거나 불확실한 외란을 제거하기 위해 적분 슬라이딩 모드 제어를 제안한다. 동적 시스템 식(14)을 고려하여 각 바퀴에 대해 적분 슬라이딩 변수  $\sigma_i \in R$ 를 다음과 같이 정의하였다[17, 20].

$$\sigma_i(x_i(t)) = S_i \left( x_i(t) - x_i(t_0) - \int_{t_0}^t [x_{2i}(\zeta), u_i(\zeta)]^T d\zeta \right) \quad (16)$$

여기서  $\sigma_i(x_i(t)) = 0$ 는 적분 슬라이딩 면이며,  $t_0$ 는 초기시간,  $S_i = [c_i, 1]$ ,  $c_i$  양의 상숫값이다.

식(15)를 식(16)에 대입하면 아래 식과 같이 슬라이딩 변수를 구할 수 있다.

$$\sigma_i(x_i(t)) = S_i \left( x_i(t) - x_i(t_0) - \int_{t_0}^t [a_{ii}x_i(\zeta), z_i(\zeta) - u_{iISM}(\zeta)] d\zeta \right) \quad (17)$$

적분 슬라이딩 모드 제어기 출력은 식(18)과 같이 표현되며, 식(18)은 불연속 입력 신호이므로 채터링 방지를 위해 1차 선형 필터를 통해 식(19)와 같이 등가 제어 신호를 사용한다[17, 20].

$$u_{iISM}(t) = -U_{imax} \operatorname{sgn}(\sigma_i) \quad (18)$$

$$\tilde{u}_{iISMeq}(t) = \frac{1}{\mu_i} \int_{t_0}^t e^{-\frac{1}{\mu_i}(t-\zeta)} u_{iISM}(\zeta) d\zeta \quad (19)$$

여기서  $U_{imax} > D^{sup}$ 은 적절하게 선택하며,  $D^{sup}$ 는 시스템에 따라 다르게 선택되어야 한다.

### 3.2. 유전알고리즘에 의한 제어이득 최적화

유전알고리즘은 생물의 진화과정을 모사하여 병렬적이고 전역적인 탐색알고리즘으로 60년대 John Holland에 의해 기본적 개념이 확립되고, 그 후 제어 및 최적화

기법에서 크게 주목받고 있다. 다른 최적화 기법과 달리 목적함수의 미분가능과 같은 제약조건이 필요 없으며, 전역 탐색과 병렬연산이 가능한 많은 분야에서 최적화 방법으로 적용되고 있다[21, 22].

그림 2의 제안된 제어기법이 모바일 로봇의 역 다이내믹과 적분 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하여 모바일 로봇의 마찰과 같은 비선형 동적 성분을 제거할 수 있다. 그러나 외란 등에 의해 발생하는 작은 속도오차가 누적되어 커다란 위치오차가 발생할 수 있어 기준 좌표계에 대한 위치제어가 잘 된다는 보장은 없다. 또한, 역 다이내믹 기법을 적용하기 위해서는 비선형 쿨롱 마찰값을 정확히 알아야 하는 문제도 존재한다. 그러므로 외란 및 비선형 쿨롱 마찰 값이 정확하지 않은 상태에서 임의로 위치제어 이득  $K$ 와 속도제어기 이득  $K_p, K_f$ 를 선택할 경우, 제어성능이 최적화되지 못한다. 따라서 본 연구에서는 제어성능 향상을 위하여 제안된 제어기법의 제어 루프 이득 값들을 유전알고리즘을 사용하여 최적화하고자 한다. 따라서 제어이득  $K, K_p, K_f$ 를 유전알고리즘의 최적화 변수로 선정하고, 모바일 로봇의 위치와 각도 오차 값들을 적합도 함수로 선정하여 최적화하였다.

$$f = \sum [C_x(\bar{x} - x)^2 + C_y(\bar{y} - y)^2 + C_\theta(\bar{\theta} - \theta)^2] \quad (20)$$

여기서  $C_x, C_y, C_\theta$ 는 적합도 요소의 가중치이다.

## IV. 모의실험 및 고찰

설계된 제어기의 성능 평가를 위한 모바일 로봇 모델의 파라미터는 표 1과 같다. 그리고 제안된 제어기의 위치제어기 이득  $K$ 와 속도제어기 이득  $K_p, K_f$ 의 학습을 위한 유전알고리즘의 학습 조건과 적합도 함수의 가중치 설정값은 다음과 같이 설정하였다. 유전알고리즘 집단의 개체 수는 40개로 설정하고, 교차율 0.8, 돌연변이율 0.2로 설정하였으며, 집단의 세대 수는 70으로 하였다. 학습을 위해 식(20)의 적합도 함수 가중치 값은  $[C_x, C_y, C_\theta] = [5 \ 5 \ 1]$ 로 설정하였다.

모바일 로봇의 주행 궤적은 급격한 방향 전환과 회전 및 병진 움직임을 위하여 다음과 같이 설정하였다. 초기 로봇 자세는  $[0(m) \ 0(m) \ 0(rad)]^T$ 이고 초기 속도는

**Table. 1** Model parameters

Symbol	Description	Value
$B_v$ (N/m/s)	viscous friction relative to $v$	2
$B_{v_n}$ (N/m/s)	viscous friction relative to $v_n$	1.5
$B_w$ (N/m/s)	viscous friction relative to $w$	0.024
$C_v$ (N)	Coulomb friction relative to $v$	1.2
$C_{v_n}$ (N)	Coulomb friction relative to $w_n$	0.8
$C_w$ (Nm)	Coulomb friction relative to $w$	0.0035
$b$ (m)	robot radius	0.1
$M$ (kg)	robot mass	1.5
$I_n$ (kgm <sup>2</sup> )	robot inertial momentum	0.025
$\delta$	angle	30°
$r_{1...3}$ (m)	wheels' radius	0.035
$l_{1...3}$	reduction	19:1
$L_{a1...3}$ (H)	armature inductances	0.00011
$R_{a1...3}$ ( $\Omega$ )	armature resistances	1.66
$K_{v1...3}$ (V/rad/s)	emf constants	0.0059
$K_{t1...3}$ (Nm/A)	torque constants	0.0059

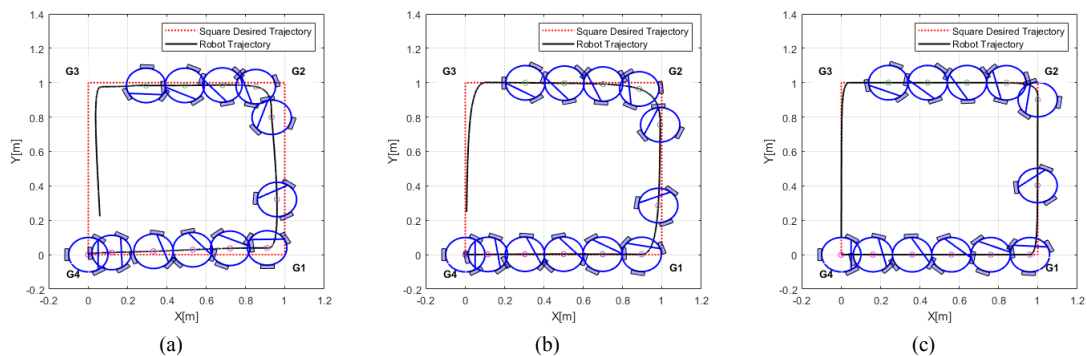
0 m/sec이다. 궤적의 선속도는 목표점 G1과 G3에 도달하기 위해  $v = 0.2$  m/sec이며, 목표점 G2와 G4에 도달하기 위해  $v = 0.5$  m/sec이다.

그림 3은 로봇의 성능 평가를 위한 비교 대상으로 위치제어기 이득과 속도제어기 이득을 각각 다르게 설정하여 궤적 추적 결과를 보여준다. 그림 3(a)는  $[K, K_p, K_I] = [2, 10, 0.0001]$ 로 설정하였으며, 그림 3(b)는  $[2, 1, 0.0001]$ , 그림 3(c)는  $[5, 3, 0.01]$ 로 설정한 궤적 추적 결과이다. 제안된 제어기법이 모바일 로봇의 역 다이내믹과 적분 슬

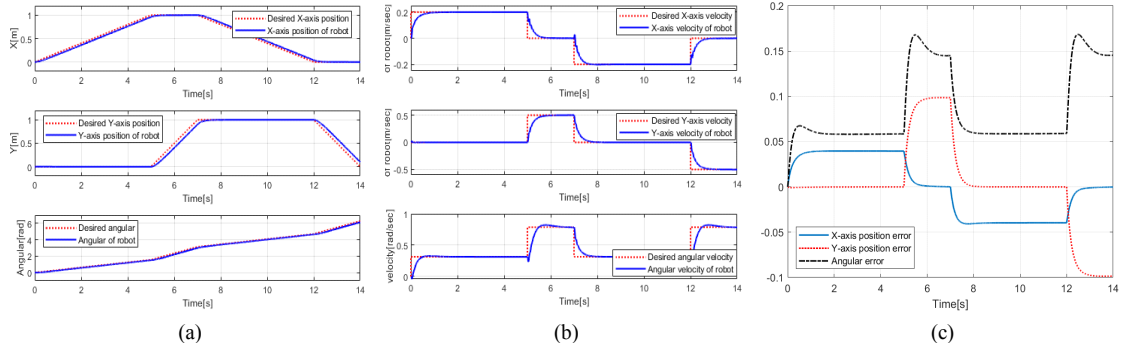
라이딩 모드 제어기법을 사용하여 모바일 로봇의 마찰과 같은 비선형 동적 성분을 제거하나, 최적의 성능을 구현하지 못한다. 이것은 작은 속도오차가 누적되어 커다란 위치오차가 발생할 수 있기 때문이다. 그러므로 모의 실험한 3가지 제어이득에 대해 위치 궤적 추종은 정밀하게 추종하지 못함을 알 수 있다. 제어기 이득 값이 다른 제어기에 비하여 높은 그림 3(c)는 그림 3(a), (b)와 비교하여 위치 궤적 추종은 양호하나, 최종 좌표에 도달하지 못함을 알 수 있다.

그림 4는 3가지 제어이득 중 가장 양호한 성능을 나타낸 그림 3(c)의 궤적 추적 결과에 대해 로봇 자세와 속도에 대한 성능 평가 결과를 상세히 나타내었다. 그림 4(a)는 로봇 자세의 오차를 나타내며 가변 속도 구간에서 일정한 오차가 발생한다. 그림 4(b)로부터 초기에 속도 오차가 누적되어 그림 4(a)의 자세 오차가 발생함을 알 수 있다. 그림 4(c)는 로봇의 자세 오차값을 전체적으로 표시하였다. 최종의 위치와 각도가 크게 발생함을 알 수 있다.

다음은 유전알고리즘에 의해 최적화 수렴된 이득은  $K, K_p, K_I = [16.5240 \ 3.4659 \ 0.000010467]$ 이며, 그림 5는 최적화된 이득을 사용하여 제어기를 설정한 모바일 로봇의 궤적, 위치 및 속도에 대한 성능 평가 결과이다. 그림 5(a)는 모바일 로봇의 궤적 추적 결과이며, 그림 3과 비교하여 매우 정밀하게 추종함을 알 수 있으며, 최종 좌표에도 정확히 도달함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 로봇의 자세를 나타내며, x축과 y축 그리고 로봇의 각도 궤적에 대하여 그림 4(a)와 비교하여 큰 오차 없이 궤적을 추적한다. 특히 그림 5(c)는 적분 슬라이딩 모드에 의해 로봇의 비선형 항목이 상쇄되어 정밀한 속도 추적 결과



**Fig. 3** Square tracking performances( $[K, K_p, K_I]$ ). (a)  $[2, 10, 0.0001]$ . (b)  $[2, 1, 0.0001]$ . (c)  $[5, 3, 0.01]$

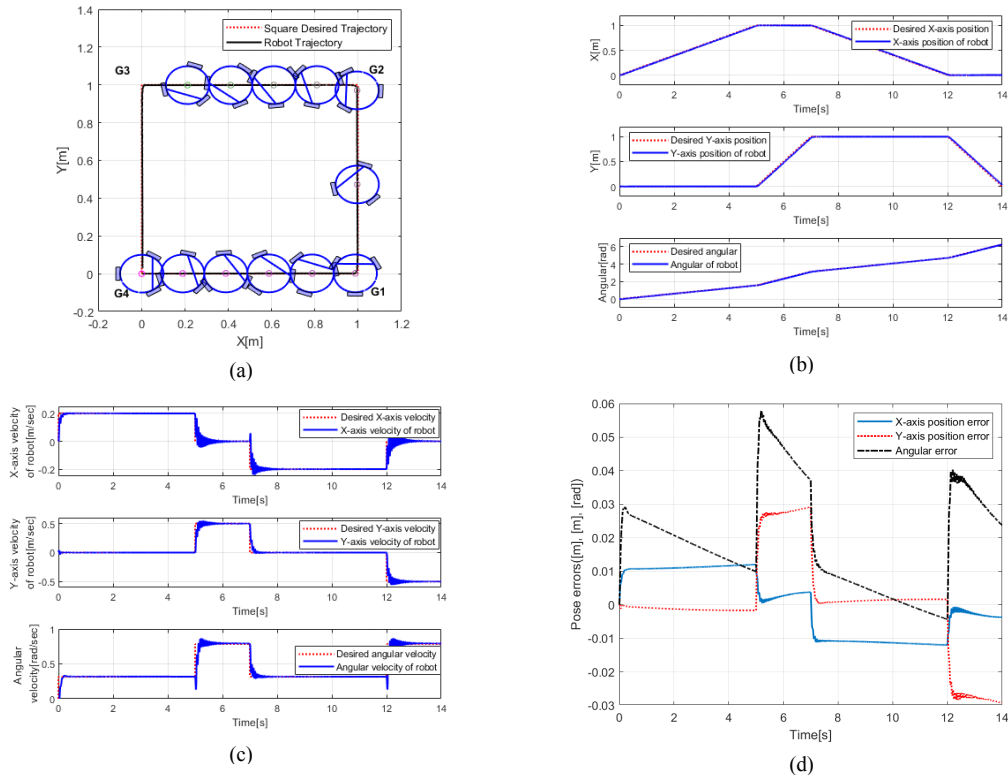


**Fig. 4** Square tracking performance with gains  $([K, K_p, K_d]=[5, 3, 0.01])$ . (a) Robot trajectory. (b) Robot pose. (c) Robot velocities (d) Robot pose errors

를 나타낸다. 그림 5(d) 모바일 로봇의 자세 오차를 나타내며 그림 4(c)와 비교하여 매우 작은 오차가 발생함을 알 수 있다.

## V. 결론

본 연구에서는 유전알고리즘과 적분 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하여 삼륜 전방향 모바일 로봇의 제어에 적용하였다. 전방향 모바일 로봇은 마찰과 같은 비선



**Fig. 5** Square tracking performance using the proposed method. (a) Robot trajectory. (b) Robot pose. (c) Robot velocities (d) Robot pose errors

형 동적 성분을 가지고 있어 정확히 모델링하기에 매우 어렵다. 이러한 비선형 성분을 제거하기 위하여 모바일 로봇의 역 다이내믹과 적분 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하여, 모바일 로봇 시스템을 선형화하였다. 또한 구현된 제어기법의 최적 성능을 구현하기 위하여 유전알고리즘을 사용하여 위치 및 속도 이득을 최적화하였다.

성능 평가 결과 유전알고리즘을 적용한 제어기법이 최적화되지 않은 임의의 이득을 갖는 제어기법 보다 뛰어난 성능을 나타내었다. 제안된 전방향 모바일 로봇의 역 다이내믹과 적분 슬라이딩 모드 제어기법은 다른 제어기법에서도 적용될 수 있으며, 특히 선형제어시스템 설계에 유용하게 사용될 수 있다.

## References

- [ 1 ] S. Lee and J. Seul, "Design of a fuzzy compensator for balancing control of a one-wheel robot," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 188-196, Apr. 2016.
- [ 2 ] M. Mende, M. L. Scott, J. van Doorn, D. Grewal, and I. Shanks, "Service robots rising: How humanoid robots influence service experiences and elicit compensatory consumer responses," *Journal of Marketing Research*, vol. 56, no. 4, pp. 535-556, 2019.
- [ 3 ] T. Takemori, T. Motoyasu, and F. Matsuno, "Gait design for a snake robot by connecting curve segments and experimental demonstration," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 5, pp. 1384-1391, 2018.
- [ 4 ] Y. Wang, R. Wang, S. Wang, M. Tan, and J. Yu, "Underwater bioinspired propulsion: From inspection to manipulation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 9, pp. 7629-7638, 2019.
- [ 5 ] A. Saenz, V. Santibañez, E. Bugarin, A. Dzul, H. Ríos, and J. Villalobos-Chin, "Velocity Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot Using Computed Voltage Control with Visual Feedback: Experimental Results," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1089-1102, 2021.
- [ 6 ] H. Kim and B. K. Kim, "Minimum-energy cornering trajectory planning with self-rotation for three-wheeled omni-directional mobile robots," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1857-1866, 2017.
- [ 7 ] B. Siciliano and O. Khatib, and T. Kröger, *The Handbook of Robotics*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008.
- [ 8 ] B. Siciliano, L. Sciacivco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics-Modelling, Planning and Control*, 3rd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 248-302, 2009.
- [ 9 ] J. B. Rawlings and D. Q. Mayne, *Model Predictive Control: Theory and Design*, Madison, WI, USA: Nob Hill, 2009.
- [ 10 ] P. Karamanakos, E. Liegmann, T. Geyer, and R. Kennel, "Model predictive control of power electronic systems: Methods, results, and challenges," *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 1, pp. 95-114, 2020.
- [ 11 ] J. Yang, W. X. Zheng, S. Li, B. Wu, and M. Cheng, "Design of a prediction accuracy-enhanced continuous-time MPC for disturbed systems via a disturbance observer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5807-5816, Sep. 2015.
- [ 12 ] E. Kayacan, H. Ramon, and W. Saeys, "Robust trajectory tracking error model-based predictive control for unmanned ground vehicles," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 21, no. 2, pp. 806-814, Apr. 2016.
- [ 13 ] A. J. Spiers, B. Calli, and A. M. Dollar, "Variable-friction finger surfaces to enable within-hand manipulation via gripping and sliding," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 4116-4123, 2018.
- [ 14 ] L. Mostefai, M. Denai, and Y. Hori, "Robust tracking controller design with uncertain friction compensation based on a local modeling approach," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 15, no. 5, pp. 746-756, Oct. 2010.
- [ 15 ] B. Xu, C. Pradalier, A. Krebs, R. Siegart, and F. Sun, "Composite control based on optimal torque control and adaptive Kriging control for the CRAB rover," in Proc. *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1752-1757, May. 2011.
- [ 16 ] G. P. Incremona, A. Ferrara, and L. Magni, "MPC for robot manipulators with integral sliding modes generation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 1299-1307, Jun. 2017.
- [ 17 ] J. C. L. Barreto S, A. G. S. Conceição, C.E.T. Dorea, L. Martinea, and E. R. de Pieri, "Design and implementation of model-predictive control with friction compensation on an omnidirectional mobile robot," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol.19, no. 2, pp. 467-476, Apr. 2014.
- [ 18 ] M. Rubagotti, D. M. Raimondo, A. Ferrara, and L. Magni, "Robust model predictive control with integral sliding mode in continuous-time sampled data nonlinear systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 3, pp. 556-570, Mar. 2011.
- [ 19 ] H. Olsson, K. J. Astrom, C. Canudas de Wit, M. Gafvert, and P. Lischinsky, "Friction models and friction compensation,"



- Eur. J. Contr.*, vol. 4, pp. 176-195, 1998.
- [20] V. I. Utkin and J. Shi, "Integral sliding mode in systems operating under uncertainty conditions," in *Proc. 35th IEEE Conf. Decis. Control*, vol. 4, pp. 4591-4596, Dec. 1996.
- [21] J. H. Park and Y. K. Choi, "Control gain optimization for mobile robots using neural networks and genetic algorithms," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 698-707, Apr. 2016.
- [21] J. H. Park and Y. K. Choi, "Design of Model Predictive Controllers with Velocity and Acceleration Constraints," *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, vol. 20, no. 6, pp. 809-817, 2018.



**박진현(Jin-Hyun Park)**

1992년 2월 부산대학교 전기공학과 공학사  
1994년 2월 부산대학교 대학원 전기공학과 공학석사  
1997년 2월 부산대학교 대학원 전기공학과 공학박사  
1997년 3월 ~ 1999년 2월 부산과학기술대학교 전자과 전임강사  
2006년 7월 ~ 2007년 8월 Dept. of System Engineering, Arkansas Univ, at Little Rock, Visiting Scholar  
1999년 3월 ~ 현재 경상국립대학교 메카트로닉스공학과 교수  
※ 관심분야: 지능제어, 최적제어, 로봇틱스, 딥러닝



**최영규(Young-Kiu Choi)**

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 공학사  
1982년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학석사  
1987년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사  
1986년 ~ 현재 부산대학교 전기공학과 교수  
※ 관심분야: 로봇제어, 지능제어, 신경회로망 등