

# 이동 로봇의 추종 제어를 위한 이중 슬라이딩 표면에 기반한 슬라이딩 모드 제어

## Double Sliding Surfaces based on a Sliding Mode Control for a Tracking Control of Mobile Robots

이 준 구, 최 윤 호, 박 진 배\*

(Jun Ku Lee<sup>1</sup>, Yoon Ho Choi<sup>2</sup>, and Jin Bae Park<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

<sup>2</sup>Department of Electronic Engineering, Kyonggi University

**Abstract:** This paper proposes a double sliding surfaces based on a sliding mode control for a tracking control of nonholonomic mobile robots in the Cartesian coordinates. In order to remove sliding surface constraints, we design the additional sliding surface for the heading angle with respect to the newly defined coordinates. Then, we define the switching law based on the posture error to combine the designed sliding surface with the previous one. By using the double sliding surfaces and the switching law, we obtain the control law for arbitrary trajectories. It is proved that the position tracking error and the heading direction error asymptotically converge to zero, respectively, with the Lyapunov stability theory. Finally, through computer simulations, we demonstrate the effectiveness of the proposed control system.

**Keywords:** mobile robot, double sliding surfaces, sliding mode control, Lyapunov function, tracking control, kinematics

### I. 서론

이동 로봇의 추종 제어의 경우 이동 로봇의 비홀로노믹 제약 조건(nonholonomic constraint)들 때문에 제어에 많은 어려움이 존재한다[1]. 특히 일부 제어 이론은 비홀로노믹 제약 조건 때문에 이동 로봇에 적용하기 어렵다. 연속 미분 가능하고 시불변 상태 피드백(state feedback)을 이용한 제어 이론의 경우, [2]에 의하면 리아프노프(Lyapunov) 안정도 해석 관점에서 이동 로봇의 안정성을 보장할 수 없다. 따라서 비홀로노믹 제약 조건을 가지는 이동 로봇의 추종 제어를 위해 적응 제어 기법, 강인 제어 기법, 퍼지 이론 등을 이용한 많은 제어 기법들이 연구되었다[3-14].

특히, 슬라이딩 모드 제어(SMC: Sliding Mode Control) 기법은 일반적으로 파라미터 변화에 따른 강인성, 빠른 응답성 등의 장점을 가지므로 많은 연구자들이 SMC 기법을 이용한 이동 로봇의 추종 제어에 대한 연구를 활발히 진행하였다[9-14]. J. M. Yang은 위상 좌표계(polar coordinates)에서의 이동 로봇의 기구학 및 동역학을 동시에 고려한 추종 제어기 설계 방법을 제안하였다[10]. 또한 [11]과 [12]에서는 새로운 슬라이딩 표면에 기반한 SMC 설계 방법을 제안하였으며, 제어기의 성능과 수렴 속도를 향상시켰다. 하지만 위상 좌표계의 경우 출발 지점이 (0, 0)인 경우 이동 로봇의 동역학식에 오류가 발생하는 문제점을 가진다.

이와 같은 위상 좌표계에서 이동 로봇의 기구학 모델 식이 가지는 문제점을 해결하기 위해 S. O. Lee은 직교 좌표계(cartesian coordinates)에서의 이동 로봇의 기구학 모델식을 제안하였고 앞서 서술한 문제점을 해결하였다[13]. 이후에는 직교 좌표계에서의 이동 로봇의 기구학 및 동역학을 동시에 고려한 추종 제어기 설계 방법이 제안되었고, 주어진 기준 경로(reference trajectory)에 대한 수렴 성능 또한 검증되었다. 또한 일부 연구에서는 백스테핑(backstepping) 기법을 이용하여 슬라이딩 모드 제어 입력을 간소화하는 설계 방법을 제안하였다. 하지만 제어 입력을 단순한 형태로 설계하는 과정에서 슬라이딩 표면에 제한 조건이 발생하고, 이로 인해 특정 조건, 이동 로봇의 현재 지점과 목표 지점 간에 오차가 발생하며 선속도가 0에 가까운 경우, 주어진 기준 경로에 정확하게 수렴하지 못하는 문제점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 이중 슬라이딩 표면에 기반한 SMC 기법을 이용하여 이동 로봇의 새로운 추종 제어기의 설계 방법을 제안한다. 상기의 슬라이딩 표면 제한 조건을 해결하기 위해 진행 각도 (heading angle,  $\theta$ )에 대한 추가적인 슬라이딩 표면과 이에 기반한 SMC 설계 방법을 제안한다. 또한 자세 오차에 대한 스위칭 법칙을 설정하여 기존의 SMC에 연결함으로써 이동 로봇의 새로운 추종 제어기를 설계하며, 이를 통해 주어진 기준 경로에 대한 이동 로봇의 경로 추종이 가능한 제어 입력을 구한다. 또한 리아프노프(Lyapunov) 함수를 이용하여 본 논문에서 제안한 이중 슬라이딩 표면에 기반한 SMC가 점진적으로 안정함을 증명한다. 마지막으로, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received January 21, 2013 / revised March 26, 2013 / accepted April 18, 2013

이준구, 박진배: 연세대학교 전기전자공학과

(genezero@yonsei.ac.kr/jbpark@yonsei.ac.kr)

최윤호: 경기대학교 전자공학과(yhchoi@kyonggi.ac.kr)

**II. 이동 로봇의 기구학 모델**

본 논문에서 고려하는 이동 로봇은 그림 1과 같이 2개의 구동 바퀴로 구성되며, 구동축과 중심축이 같은 이동로봇을 고려한다. 직교 좌표계상에서 이동 로봇의 현재 위치를  $(x_c, y_c)$ , 현재 위치에서 진행 방향과  $x$ 축과의 각도를  $\theta_c$ 라 정의하면 이동 로봇의 비홀로노믹 제약 조건을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_c \sin \theta_c - \dot{y}_c \cos \theta_c = 0 \tag{1}$$

이동 로봇의 선속도와 각속도를 각각  $v, w$ 라 정의하고 현재 위치 자세 (current posture)을  $q_c = (x_c, y_c, \theta_c)^T$ , 현재 위치에 대한 제어 입력을  $z_c = (v_c, w_c)^T$ 라 정의한 후 식 (1)을 이용하면 식 (2)을 유도할 수 있다.

$$\dot{q}_c = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_c \cos \theta_c \\ v_c \sin \theta_c \\ w_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & 0 \\ \sin \theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} z_c \tag{2}$$

기준 위치 자세 (reference posture)와 제어 입력을 같은 방법에 의해 각각  $q_r = (x_r, y_r, \theta_r)^T$ ,  $z_r = (v_r, w_r)^T$ 으로 정의하고, 정의된 현재 위치 자세와 기준 위치 자세를 이용하면 두 자세 사이의 차이인 자세 오차 (posture error)를 식 (3)과 같이 유도할 수 있다.

$$q_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} \tag{3}$$

식 (3)에서 미분을 취하면 이동 로봇의 각속도, 선속도 오차를 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{q}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e w_c - v_c + v_r \cos \theta_e \\ -x_e w_c + v_r \sin \theta_e \\ w_r - w_c \end{bmatrix} \tag{4}$$

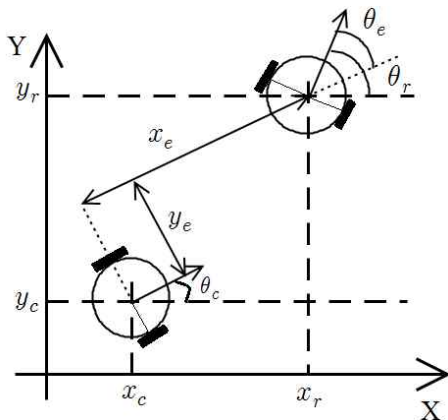


그림 1. 이동 로봇의 좌표 설정.  
Fig. 1. Coordinates assignment for the mobile robot.

**III. 이동 로봇의 경로 추종 제어기 설계**

서론에서 서술한 바와 같이 본 논문에서는 슬라이딩 표면의 제한 조건을 고려한 새로운 슬라이딩 표면의 설계와 이에 기반한 제어기 설계 방법을 제안한다.

1. 슬라이딩 모드에 기반한 경로 추종 제어기

이동 로봇의 추종 제어의 궁극적인 목적은 제어 입력  $z_c$ 을 조절하여 시간이 경과함에 따라 자세 오차  $q_e$ 을 0으로 수렴하게 함으로써 이동 로봇이 목표 지점 혹은 경로로 이동하게 제어하는 것이다. 하지만 식 (3)을 보면 알 수 있듯이 자세 오차  $q_e$ 는 다수의 입력 값을 갖는 비선형 시스템이다. 따라서 제어기의 설계 또한 복잡해지는데 슬라이딩 표면을 단순화시키기 위해서 기존의 연구에서는  $x_e = 0$ 을 첫 번째 슬라이딩 표면  $s_1$ 으로 선택한다. 또한  $(y_e, \theta_e)$ 를 0으로 수렴시키기 위한 슬라이딩 표면을 구하기 위해 리아프노프 함수를 식 (5)과 같이 정의한다.

$$V_{y_e} = \frac{1}{2} y_e^2 \tag{5}$$

식 (5)을 미분하면 식 (6)을 유도할 수 있다.

$$\dot{V}_{y_e} = y_e \dot{y}_e = y_e (-x_e w_c + v_r \sin \theta_e) \tag{6}$$

식 (6)의  $\theta_e$ 에  $-\tan^{-1}(v_r y_e)$ 을 대입하면 식 (7)이 유도된다.

$$\dot{V}_{y_e} = -y_e x_e w_c - v_r y_e \sin(\tan^{-1}(v_r y_e)) \tag{7}$$

여기서  $y = x \sin(\tan^{-1}(x)) \geq 0$ 이므로  $\dot{V}_{y_e} \leq 0$ 이 된다. 따라서  $V_{y_e}$ 는 양정치 (positive definite)이고  $\dot{V}_{y_e}$ 는 음정치 (negative definite)이기 때문에,  $\theta_e$ 가  $-\tan^{-1}(v_r y_e)$ 으로 수렴하면  $y_e$ 은 0으로 수렴함을 알 수 있다. 또한  $y_e$ 가 0으로 수렴하면  $\theta_e$ 도 0으로 수렴한다. 따라서 기존의 연구에서는 두 번째 슬라이딩 표면  $s_2$ 으로  $\theta_e + \tan^{-1}(v_r y_e) = 0$ 을 선택하여 제어기를 설계한다.

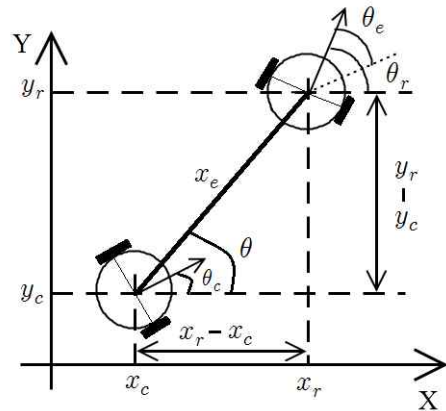


그림 2. 새로운 슬라이딩 표면  $s_2$ 을 위한 이동 로봇의 좌표 설정.  
Fig. 2. Coordinates assignments for new sliding surface  $s_2$ .

2. 새로운 슬라이딩 표면에 기반한 경로 추종 제어기 설계

III. 1절에서 서술한 SMC의 경우 특정 조건에서는 이동 로봇의 동작이 제한되는 문제점을 가진다. 이것은 두 번째 슬라이딩 표면  $s_2$ 으로 설정한  $\theta_c + \tan^{-1}(v_r y_e) = 0$  때문인데, 선속도  $v_r \approx 0$ , 초기 오차  $|y_e| > \epsilon$ 의 경우  $y_e \neq 0$ 임에도 불구하고  $v_r y_e \approx 0$ 이기 때문에  $\theta_c = 0$ 이 된다. 따라서 이 조건의 경우  $y_e$ 는 0으로 수렴하지 않고, 이동 로봇의 움직임은 제한을 받는다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 그림 2의 좌표 설정을 이용하여 진행 각도에 대한 추가적인 슬라이딩 표면과 SMC를 설계하고, 스위칭 법칙을 이용하여 기존 SMC와 연결한다.

추가한 슬라이딩 표면은  $\theta_c \rightarrow \theta = \tan^{-1}(\frac{y_r - y_c}{x_r - x_c})$ 으로, 이를 만족할 때  $y_e$ 이 0으로 수렴하고 이때  $(x_r, y_r)$ 와  $(x_c, y_c)$ 을 연결한 점은  $x_e$ 가 된다. 추가한 슬라이딩 표면은 기존의 슬라이딩 표면의 제한 조건하에서 이동 로봇을 주어진 기준 경로로 이동시킨다. 따라서 제한 조건  $(|x_e|, |y_e| > \epsilon)$ 을 기준으로 기존의 슬라이딩 표면과 추가한 슬라이딩 표면을 스위칭하여 사용할 수 있도록 스위칭 법칙을 식 (8), (9)와 같이 정의한다.

$$sw(X) = \begin{cases} 1 & \text{where } X \geq 0 \\ 0 & \text{where } X < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} w_1 &= sw(K_w - D), \quad w_2 = sw(D - K_w) \\ \Rightarrow &\begin{cases} \text{if } D \geq K_w & : w_1 = 0, w_2 = 1 \\ \text{if } D < K_w & : w_1 = 1, w_2 = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $D = \sqrt{(x_r - x_c)^2 + (y_r - y_c)^2}$ 이고  $K_w$ 는 양수로 주어진 값이다. 즉, 기존의 슬라이딩 표면의 제한 조건, 초기 오차가 일정 수치 이상인 경우 추가한 슬라이딩 표면을 사용하도록 설계한다. 또한  $y_r = y_c, x_r = x_c$ 을 만족하면  $\tan^{-1}(\frac{0}{0})$ 이 되어 오류가 발생하므로 매우 작은 값인  $\epsilon$ 을 분자와 분모에 추가하여 이를 방지한다. 최종적으로, 본 논문에서 제안하는 새로운 슬라이딩 표면은 식 (10)과 같다.

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ (\theta_e + X)w_1 + (-\theta_c + Y)w_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서  $X = \tan^{-1}(v_r y_e)$ 이고  $Y = \tan^{-1}(\frac{y_r - y_c + \epsilon}{x_r - x_c + \epsilon})$ 이다. 또한 2개 슬라이딩 표면 사이의 스위칭은 단 한 번만 발생한다. 이동 로봇이 초기에 기존의 슬라이딩 모드 제어기의 제한 조건이 발생하는 구역  $(|x_e|, |y_e| > \epsilon, v_r \approx 0)$ 에 있을 경우 새로 추가한 슬라이딩 표면을 이용하여 이동 로봇을 기준 경로상으로 이동시킴으로써 이동 로봇은  $|x_e|, |y_e| < \epsilon$ 인 구역에 위치하게 된다. 또한 한번 기준 경로상으로 위치하여 주어진 기준 경로를 따라 이동할 경우 이동 로봇은  $|x_e|, |y_e| < \epsilon$ 인 구역을 벗어나지 않는다. 따라서 새로 추가한 슬라이딩 표면으로부터 기존의 슬라이딩 표면으로

스위칭은 한 번만 발생하게 된다.

이제 슬라이딩 모드 제어기를 설계해야 하는데 첫 번째 슬라이딩 표면  $s_1$ 과 두 번째 슬라이딩 표면  $s_2$ 가 0으로 수렴하도록 한다. 본 논문에서는 슬라이딩 모드에서 접근 법칙 방법 (reaching law approach)을 이용하여 각 상태와 조건들이 제한한 슬라이딩 표면들로 수렴되게 한다. 접근 법칙 방법으로  $\dot{S} = -k \operatorname{sgn}(S)$ 을 이용하며 이때  $k$ 는 양수이다. 또한 슬라이딩 표면에 수렴함과 동시에 시스템의 기구학 방정식을 만족시키도록 식 (11)을 유도한다.

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\ -k_2 \operatorname{sgn}(s_2) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_c \\ (\dot{\theta}_e + \frac{d}{dt} X)w_1 + (-w_c + \frac{d}{dt} Y)w_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 정리하면 목표 위치 자세에 도달하기 위한 현재 위치 자세에 대한 제어 입력  $u$ 을 식 (12)와 같이 유도할 수 있다.

$$u = \begin{bmatrix} v_c \\ w_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e w_c + v_r \cos \theta_e + k_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\ (w_r + \frac{d}{dt} X)w_1 + (\frac{d}{dt} Y)w_2 + k_2 \operatorname{sgn}(s_2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

본 논문에서 제안한 슬라이딩 표면의 경우 슬라이딩 표면이 갖는 제한 조건을 고려하여 설계한다. 따라서 제안한 슬라이딩 모드 제어기에 기반한 새로운 이동 로봇의 추종 제어기의 경우 제한 조건 구역  $(v_r \approx 0, |x_e|, |y_e| > \epsilon)$ 에서도 주어진 기준 경로에 정확하게 수렴한다.

3. 리아프노프 함수를 이용한 안정도 해석

본 논문에서 제안한 제어기의 안정도 해석을 위해 리아프노프 함수를 이용한 안정도 해석 기법을 사용한다. 우선 리아프노프 함수를 식 (13)과 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (13)$$

식 (13)을 미분하여 식 (11)을 대입하면 식 (14)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T \dot{S} = s_1 \dot{s}_1 + s_2 \dot{s}_2 \\ &= -k_1 s_1 \operatorname{sgn}(s_1) - k_2 s_2 \operatorname{sgn}(s_2) \\ &= -k_1 |s_1| - k_2 |s_2| \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $k_1 > 0, k_2 > 0$ 이다. 이때  $V$ 는 양정치이고  $\dot{V}$ 는 음정치이므로 슬라이딩 표면  $S$ 는 0으로 수렴하며 이에 따라 첫 번째 슬라이딩 표면  $s_1$ 와 두 번째 슬라이딩 표면  $s_2$ 도 0으로 수렴한다. 첫 번째 슬라이딩 표면  $s_1$ 와 두 번째 슬라이딩 표면  $s_2$ 이 0으로 수렴하면  $x_e$ 와  $\theta$ 가 각각 0과  $\theta_c$ 로 수렴하고, 이에 따라  $y_e$ 도 0으로 수렴하므로 자세 오차  $q_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$ 는 0으로 수렴한다. 따라서 식 (12)의 제어 입력은 식 (10)의 슬라이딩 표면을 안정화시킬 수 있다.

IV. 모의실험

본 논문의 모의실험에서는 기존의 슬라이딩 표면에 기반한 제어기와 본 논문에서 제안한 슬라이딩 모드 제어기의 결과를 비교 및 분석하여 제안한 제어기의 성능을 검증하였다. 모의실험에 사용한 이동 로봇의 설계 파라미터 값은  $K_w = 0.1$ ,  $k_1 = k_2 = 10$ 으로 설정한다. 한편 기준 경로에 대한 조건은 다음과 같다.

조건 1: 기준 경로의 초기 위치  $[x_r, y_r, \theta_r] = [3, 3, \frac{\pi}{4}]$ , 선속도  $v_r$ 는 0 m/s, 각속도  $w_r$ 는 0 m/s로 설정하였고, 이동 로봇의 초기 위치  $[x_c, y_c, \theta_c] = [0, 0, 0]$ 로 설정하였다.

조건 2: 기준 경로의 초기 위치  $[x_r, y_r, \theta_r] = [3, 3, \frac{\pi}{4}]$ , 선속도  $v_r$ 는 0.1 m/s, 각속도  $w_r$ 는 0.1 m/s로 설정하였고, 이동 로봇의 초기 위치  $[x_c, y_c, \theta_c] = [0, 0, 0]$ 로 설정하였다.

조건 3: 기준 경로의 초기 위치  $[x_r, y_r, \theta_r] = [3, 3, \frac{\pi}{4}]$ , 선속도  $v_r$ 는 5 m/s, 각속도  $w_r$ 는  $3\sin(t)$  m/s로 설정하였고, 이동 로봇의 초기 위치  $[x_c, y_c, \theta_c] = [0, 0, 0]$ 로 설정하였다.

그림 3과 4는 기준 경로가 정지한 점인 조건 1에 대한 각 제어기의 성능을 보여준다. 그림 3의 결과로부터 기존의 슬라이딩 표면을 이용한 제어기의 경우 주어진 기준 경로에 제대로 수렴하지 않으나, 본 논문에서 제안한 제어기의 경우 제대로 기준 경로인 정지한 점 (3,3)에 수렴함을 확인할 수 있다. 또한 그림 5로부터 이동 로봇이 기준 경로에 수렴할 때 두 번째 슬라이딩 표면  $s_2$ 에서 스위칭은 한 번만 발생함을 확인할 수 있다.

그림 6과 7는 기준 경로가 느리게 움직이는 조건 2에 대한 각 제어기의 성능을 보여준다. 이를 통해 기존의 슬라이딩 표면을 이용한 제어기의 단점을 본 논문에서 제안한 제어기가 어떻게 개선하는지를 보다 확실하게 알 수 있다. 기존 제어기의 경우 기준 경로에 정확히 수렴하고 있지 못하는 반면, 본 논문에서 제안한 제어기의 경우에는 기준 경로에 정상적으로 수렴하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 그림 8로부터 이동 로봇이 기준 경로에 수렴할 때 두 번째 슬라이딩 표면  $s_2$ 에서 스위칭은 한번만 발생함을 확인할 수 있다.

그림 9와 10은 복잡한 기준 경로로 설정한 조건 3에 대한 각 제어기의 성능을 보여준다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 제어기가 복잡한 기준 경로에 대해서도 제대로 수렴하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 그림 11로부터 이동 로봇이 기준 경로에 수렴할 때 두 번째 슬라이딩 표면  $s_2$ 에서 스위칭은 한 번만 발생함을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 비홀로노믹 이동 로봇의 추종 제어를 위한 슬라이딩 표면의 제한 조건을 해결하기 위해, 진행 각도에 대한 추가적인 슬라이딩 표면을 설계하고 이에 기반한 SMC 설계 방법을 제안하였다. 또한 자세 오차에 대한 스위칭 법칙을 설정하여 기존 슬라이딩 표면과 연결함으로써

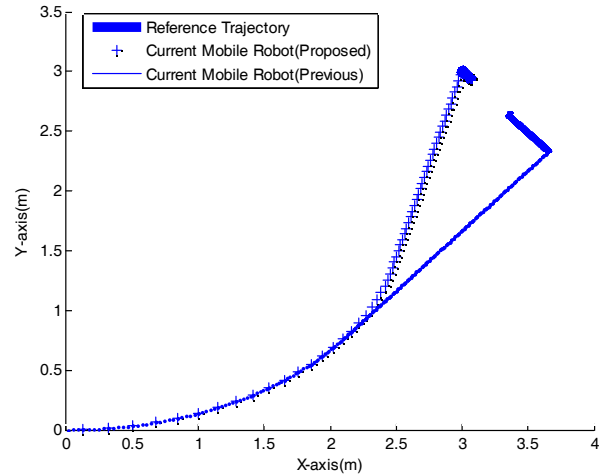


그림 3. 조건 1에 대한 경로 추종 결과 비교.

Fig. 3. Comparison of trajectory tracking results for Condition 1.

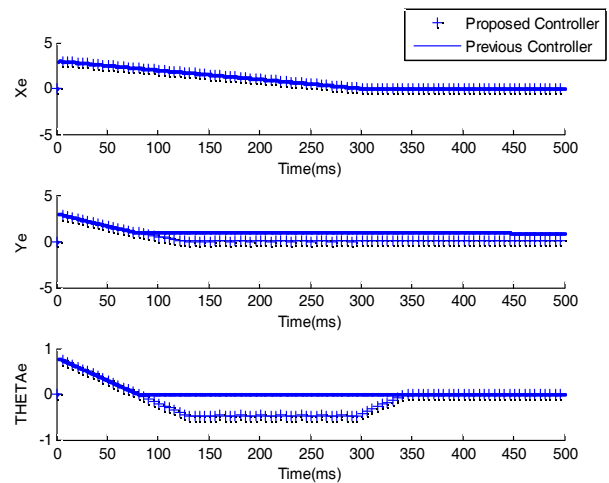


그림 4. 조건 1에 대한 경로 추종 오차 비교.

Fig. 4. Comparison of trajectory tracking errors for Condition 1.

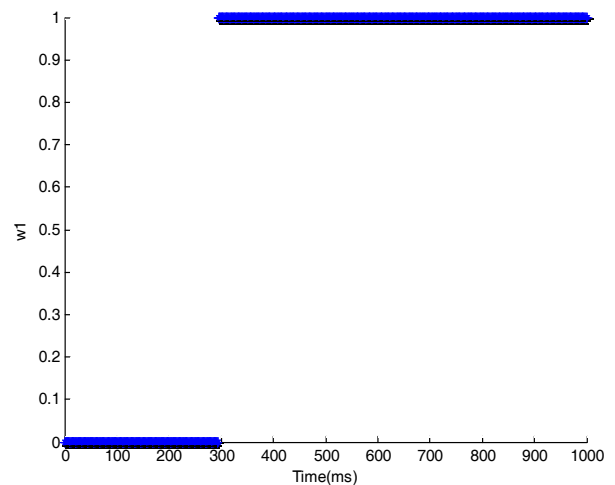


그림 5. 조건 1에 대한 스위칭 상태.

Fig. 5. Switching state for Condition 1.

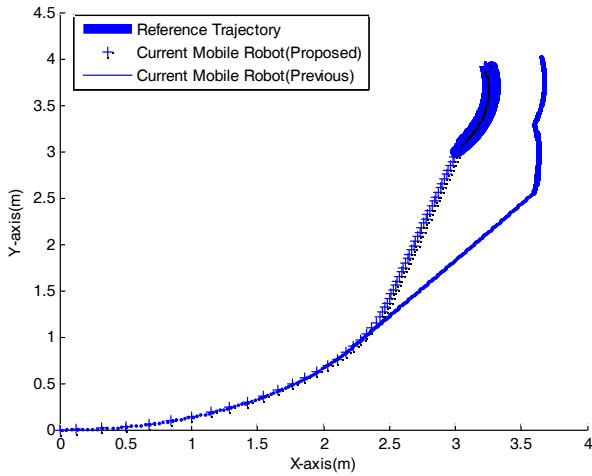


그림 6. 조건 2에 대한 경로 추종 결과 비교.  
Fig. 6. Comparison of trajectory tracking results for Condition 2.

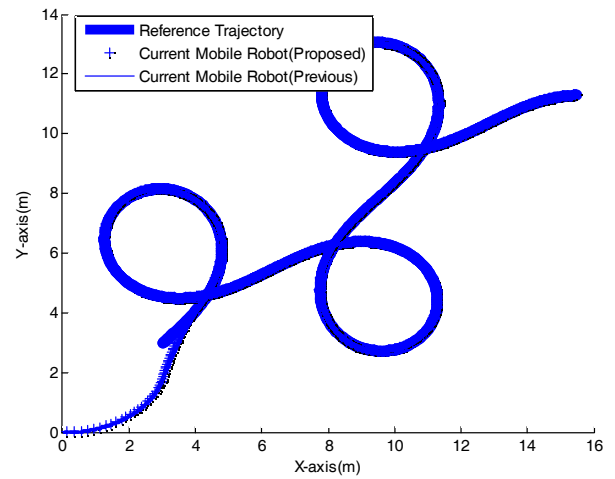


그림 9. 조건 3에 대한 경로 추종 결과 비교.  
Fig. 9. Comparison of trajectory tracking results for Condition 3.

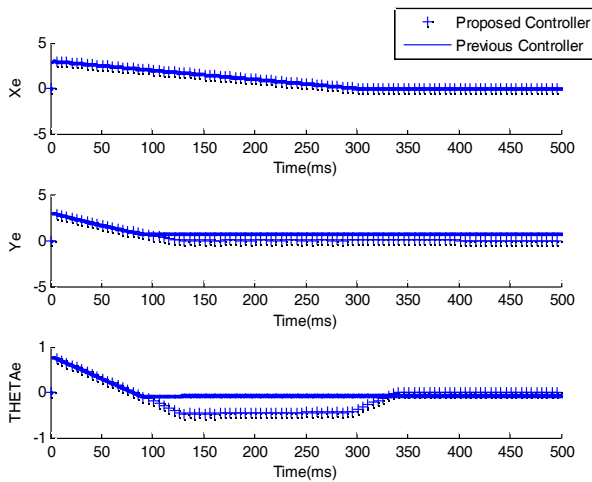


그림 7. 조건 2에 대한 경로 추종 오차 비교.  
Fig. 7. Comparison of trajectory tracking errors for Condition 2.

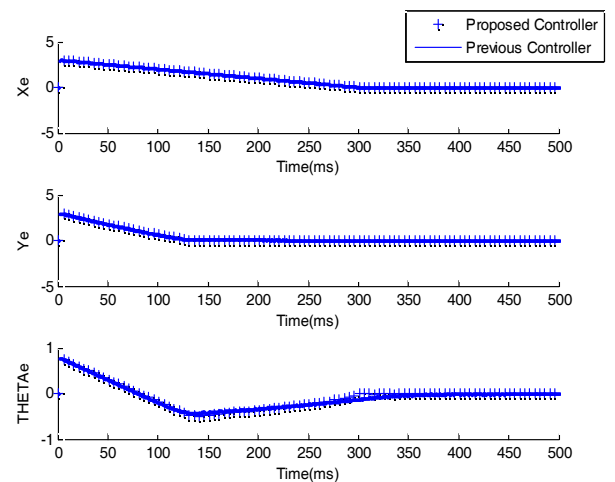


그림 10. 조건 3에 대한 경로 추종 오차 비교.  
Fig. 10. Comparison of trajectory tracking errors for Condition 3.

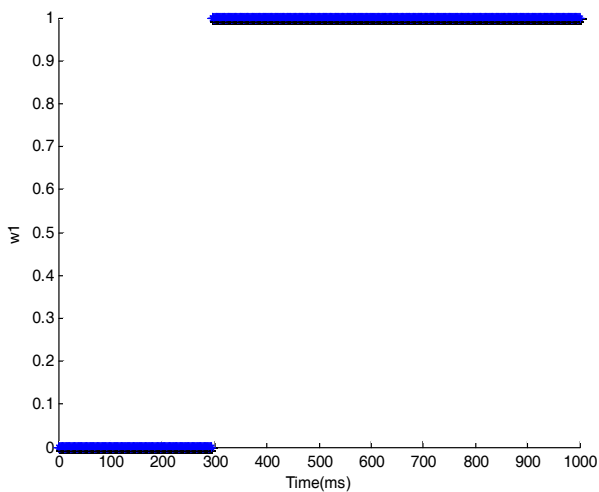


그림 8. 조건 2에 대한 스위칭 상태.  
Fig. 8. Switching state for Condition 2.

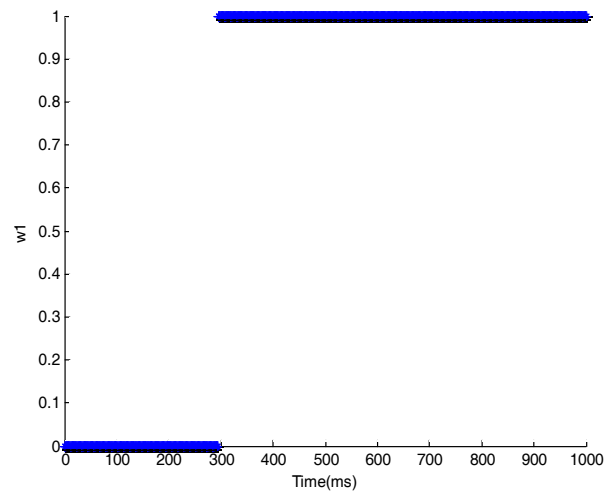


그림 11. 조건 3에 대한 스위칭 상태.  
Fig. 11. Switching state for Condition 3.

문제 해결 과정을 단순화하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 이중 슬라이딩 표면에 기반한 SMC을 이용하면 이동 로봇을 주어진 경로에 정확하게 수렴시키는 제어 입력을 구할 수 있다. 본 논문에서는 리아프노프 함수를 이용한 안정도 해석 이론을 이용하여 제안한 제어기의 안정도를 증명하였고, 각 오차가 0으로 수렴함을 증명하였다. 또한 모의 실험 결과를 통해 본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 검증하였다. 향후에는 본 논문에서 제안한 스위칭 기법과 접근 각도를 접목한 슬라이딩 모드 제어기를 실제 로봇에 적용하여 실제 환경에서의 유용성을 확인하고자 한다.

#### REFERENCES

- [1] I. Kolmanovsky and N. H. McClamroch, "Developments in non-holonomic control problems," *IEEE Control Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 20-36, 1995.
- [2] R. W. Brockett, "Asymptotic stability and feedback stabilization," in *Differential Geometric Control Theory*, Eds. Boston, MA: Birkhauser, pp. 181-191, 1983.
- [3] Y. Kanayanma, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 384-389, 1990.
- [4] T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi, "Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 5, no. 3, pp. 609-615, 2000.
- [5] V. Sankaranarayanan and A. D. Mahindrakar, "Switched control of a nonholonomic mobile robot," *Commun Nonlinear Science Numerical Simulation*, vol. 14, no. 5, pp. 2319-2327, 2009.
- [6] W. G. Wu, H. T. Chen, and Y. J. Wang, "Global trajectory tracking control of mobile robot," *Acta Automatica Sinica*, vol. 27, no. 3, pp. 326-331, 2001.
- [7] H. S. Cheon, and B. K. Kim, "Circle list based obstacle avoidance for omni directional mobile robots in dynamic environments," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1227-1233, Dec. 2011.
- [8] H. K. Kim, H. B. Shim, and J. H. Back, "Formation control algorithm for coupled unicycle type mobile robots through switching interconnection topology," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 5, pp. 439-444, May 2012.
- [9] N. M. Dung, B. H. Duy, N. T. Phuong, S. B. Kim, and M. S. Oh, "Two-wheeled welding mobile robot for tracking a smooth curved welding path using adaptive sliding-mode control technique," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 283-294, Jun. 2007.
- [10] J. M. Yang and J. H. Kim, "Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 3, pp. 578-587, 1999.
- [11] D. Chwa, "Sliding-mode control of nonholonomic wheeled mobile robots in polar coordinates," *IEEE Trans. Control System Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 637-644, July 2004.
- [12] B. S. Park, S. J. Yoo, Y. H. Choi, and J. B. Park, "A new sliding surface based tracking control of non-holonomic mobile robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, IEEE Trans. Control System Technology*, vol. 14, no. 8, pp. 842-847, Aug. 2008.
- [13] S. O. Lee, Y. J. Cho, M. Hwang-Bo, B. J. You, and S. R. Oh, "A stable target-tracking control for unicycle mobile robots," *Proc. of IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1822-1827, 2000.
- [14] J. H. Lee, C. Lin, H. Lim, and J. M. Lee, "Sliding mode control for trajectory tracking of mobile robot in the RFID sensor space," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 429-435, Jun. 2009.



**이준구**

2012년 연세대학교 전기전자공학과(공학사). 2012년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정. 관심분야는 비선형 강인 제어, 스위칭 이론, 이동 로봇, 무인 수중 잠수정.



**최윤호**

1980년 연세대학교 전기공학과(공학사). 1982년 연세대학교 전기공학과(공학석사). 1991년 연세대학교 전기공학과(공학박사). 1993년~현재 경기대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 비선형 적응 제어, 지능 제어, 군집 제어, 로보틱스, 웨이블릿 변환 및 응용, ADP기반 최적 제어.



**박진배**

1977년 연세대학교 전기공학과(공학사). 1985년 Kansas 주립대학교 전기공학과(공학석사). 1990년 Kansas 주립대학교 전기공학과(공학박사). 1992년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야는 강인제어, 필터, 비선형 제어, 로보틱스, 퍼지 이론, 신경망 회로 이론.