

미끄럼 조향 로봇의 강인한 궤적 추종 제어에 관한 연구

백운보*, 김원호⁺

(논문접수일 2009. 12. 07, 심사완료일 2010. 01. 07)

A Study on Robust Trajectory Tracking Control of a Skid Steering Robots

Woon-Bo baek*, Won-Ho Kim⁺

Abstract

We consider the robust trajectory tracking control problem for a skid steering mobile robots. A dynamic model is derived accounting for the effects of wheel skidding. The control design utilizes the dynamic feedback linearization techniques, so as to obtain a predictable behavior for the instantaneous center of rotation thus preventing excessive skidding. The additive controller using the sliding mode type is then robustified against the unmodelled dynamics and parameter uncertainty. Simulation results show the good performances under excessively uncorrected estimations of the longitudinal forces and the lateral resistive forces caused by the skidding of the wheels in tracking trajectories.

Key Words : Skid Steering(미끄럼 조향), Feedback Linearization(궤환 선형화), Sliding Mode(슬라이딩 모드)

1. 서론

조향장치가 없이 독립적으로 구동되는 각 바퀴 사이의 토크 차이에 의해 지면과 타이어 사이의 미끄러짐을 통해 조향을 하는 로봇을 미끄럼 조향 로봇(Skid Steering Robot, SSR)이라고 한다. 이 로봇은 조향 장치가 없어 구조가 단순하고 기계적으로 튼튼한 구조를 가지게 할 수 있으므로 다양한 지형이나 험지탐사용 로봇, 전투용 로봇 등의 특수목적용 이동 로봇에 활용되고 있다. 일반적으로 SSR은 독립적으로

구동되는 4륜을 가지고 있는데 전륜과 후륜 사이의 미끄러짐을 최소화하기 위하여 전 후륜에 같은 크기의 토크를 가하게 되므로 2륜 로봇으로 단순화 할 수 있다. 하지만 2륜 로봇에서는 일반적으로 횡방향 마찰력을 무시하는 반면에 SSR은 진행 방향을 바꾸기 위해 횡방향의 강한 마찰을 이겨내야 한다. 전륜 조향장치가 있는 4륜 로봇과 달리 순간 회전중심(Instantaneous Center of Rotation, ICR)이 후륜축의 연장선 부근에 있는 것이 아니므로 주어진 궤적추종에 어려움이 발생하며 ICR이 전륜과 후륜축 사이를 벗어나게 되면 로봇

* 동의대학교 메카트로닉스공학과 (wbbaek@deu.ac.kr)
주소: 614-714 부산시 부산진구 엄광로 995

+ 동의대학교 메카트로닉스공학과

궤적제어가 불가능하게 된다⁽¹⁾. 바퀴와 지면사이의 마찰력은 반드시 고려해야하는 요소로서 모델 불확실성에 큰 영향을 미치는데 4륜 이동 로봇의 2자유도 모델과는 달리 3자유도 모델을 이용하여 추진력과 조향의 제어를 설계하여야 하므로 여전히 어려운 과제로 남아 있다^(2,3).

기존의 궤환 선형화 기법의 적용^(4,5)에서는 부가적인 선형 피드백을 갖는 동적 피드백 선형화 방법을 적용하였으며, 비선형 피드백 제어기법의 적용⁽⁶⁾에서는 부가적인 상태 피드백을 갖는 계산 토크법을 적용하여 슬라이딩 모드 타입의 안정화를 보여 주었으나 종방향 마찰력이 없는 경우 직선 추종성을 보였다. 백스테핑(Backstepping) 기법의 적용⁽⁷⁾에서는 기구학을 기반으로 한 제어를 설계하고 안정성을 해석하였으나, 마찰력 변동에 대한 추종성은 보여 주지 않았으며, 슬라이딩 모드 제어의 적용⁽⁸⁾에서는 종방향 및 횡방향 마찰력 변동에 대한 추종성을 보였다.

본 연구에서는 SSR의 3자유도 비선형 모델에 SSR의 ICR이 특정한 지점에 항상 위치하게 하기 위한 기구학적 구속조건을 포함하여 일반화된 좌표에 대하여 동적 궤환 선형화되는 모델을 기반으로 하여 마찰력 변동에 따른 선형화 오차에 강인하도록 하는 부가적인 슬라이딩 모드 타입 제어를 설계하였다. 그리고 종방향 및 횡방향 마찰력 변동에 대해 주어지는 경로에 대한 추종성을 확인하는 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 동적 모델링

2.1 SSR의 기구학

본 연구에서 사용된 로봇은 미끄럼 조향방식의 강제 로봇으로 평면 이동을 하며, 바퀴와 지면 사이의 마찰력은 각 바퀴에 작용하는 수직항력에만 영향을 받으며, 종방향의 바퀴 미끄러짐은 없는 것으로 가정하였으며 그 기구학을 Fig. 1에 도시하였다. 로봇에 고정된 지역 좌표계 $f(x, y)$ 에서 각 바퀴 속도는 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_4 = \dot{x} - t\dot{\theta}, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = \dot{x} + t\dot{\theta} \quad (1a)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{y}_2 = \dot{y} + a\dot{\theta}, \quad \dot{y}_3 = \dot{y}_4 = \dot{y} - b\dot{\theta} \quad (1b)$$

여기서 \dot{x}_i 는 각 바퀴의 종방향 속도, \dot{y}_i 는 횡방향 속도이며, a 와 b 는 각각 무게중심 G 에서 앞바퀴 및 뒷바퀴까지의 거리이며, t 는 로봇 폭의 1/2, $\dot{\theta}$ 는 각속도이다. ICR의 좌표

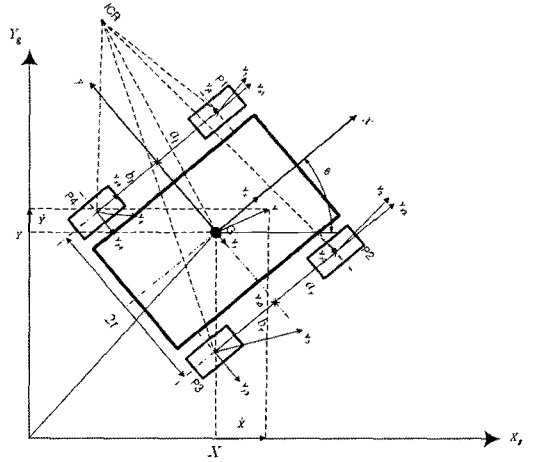


Fig. 1 Kinematics of SSR

를 (x_{ICR}, y_{ICR}) 로 두면 각 속도와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_{ICR} \\ y_{ICR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{y}/\dot{\theta} \\ x/\dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

직선으로 로봇이 이동할 때는 x_{ICR} 는 0, y_{ICR} 는 y 축 상의 무한대 지점에 존재하게 된다. 곡선 경로에서 측면 미끄러짐이 존재할 때는 ICR이 $|x_{ICR}|$ 만큼 무게중심에서 앞쪽으로 이동하며, $y_{ICR} = 0$ 일 경우 y 축 상에 ICR이 존재하게 되고 횡방향 미끄러짐은 발생하지 않는다. Fig. 1에서와 같이 전역 좌표계 $F(X_g, Y_g)$ 와 지역 좌표계 $f(x, y)$ 의 속도 및 가속도 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \cos \theta - \dot{y} \sin \theta \\ \dot{x} \sin \theta + \dot{y} \cos \theta \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} \ddot{x} - \dot{y}\dot{\theta} \\ \ddot{y} + \dot{x}\dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3b)$$

여기서,

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3c)$$

2.2 SSR의 동역학

Fig. 2의 자유물체도와 같이 각 바퀴에 작용하는 추진력, 종방향 마찰력, 횡방향 마찰력은 각각 F_{xi}, R_{xi}, F_{yi} ($i = 1, \dots, 4$),

회전저항력은 M_r 로 표기하면 각 바퀴사이의 중방향 미끄러짐을 최소화하기 위하여 $F_{x1} = F_{x4}$, $F_{x2} = F_{x3}$ 의 조건이 요구되므로 로봇의 질량을 m , 회전 관성을 I 라고 하면 f 좌표계에 대한 동역학은 다음과 같다.

$$ma_x = m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\theta}) = 2F_{x1} + 2F_{x2} - R_x \quad (4a)$$

$$ma_y = m(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\theta}) = -F_y \quad (4b)$$

$$I\ddot{\theta} = 2t(F_{x2} - F_{x1}) - M_r \quad (4c)$$

여기서,

$$2F_{x1} = F_{x1} + F_{x4}, \quad 2F_{x2} = F_{x2} + F_{x3} \quad (5a)$$

$$R_x = \sum_{i=1}^4 R_{xi} \quad (5b)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^4 F_{yi} \quad (5c)$$

$$M_r = a(F_{y1} + F_{y2}) - b(F_{y3} + F_{y4}) + t(R_{x2} + R_{x3}) - (R_{x1} + R_{x4}) \quad (5d)$$

비교적 저속으로 이동한다고 가정하면 무게 중심으로부터 양쪽 바퀴까지의 거리는 같으므로 수직항력 및 각 마찰력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{z1} + F_{z4} = F_{z2} + F_{z3} = mg/2$$

$$aF_{z1} = bF_{z4}, \quad (1 + a/b)F_{z1} = mg/2 \quad (6a)$$

$$F_{z1} = F_{z2} = \frac{b}{a+b} \frac{mg}{2}$$

$$R_x = f_r \frac{mg}{2} (sgn(x_1) + sgn(x_2)) \quad (6b)$$

$$F_y = \mu \frac{mg}{a+b} (b sgn(y_1) + a sgn(y_3)) \quad (6c)$$

$$M_r = \mu \frac{abmg}{a+b} (sgn(y_1) - sgn(y_3)) + f_r \frac{tmg}{2} (sgn(x_2) - sgn(x_1)) \quad (6d)$$

여기서 f_r 과 μ 는 각각 중방향 및 횡방향 마찰계수이며, sgn 은 부호함수이다. F 좌표계에 대한 동역학을 일반화된 좌표 $q = (X, Y, \theta)$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$M\ddot{q} + C(q, \dot{q}) = E(q)\tau \quad (7a)$$

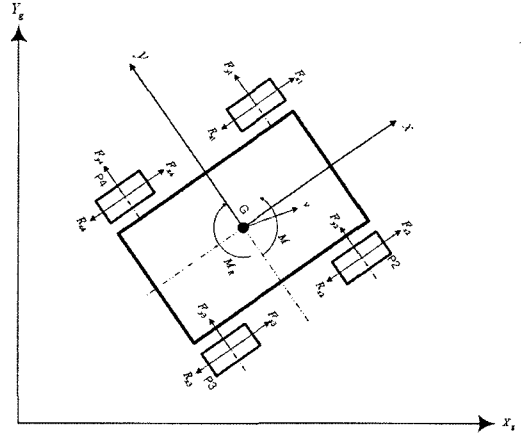


Fig. 2 Free body diagram of SSR

여기서,

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (7b)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} R_x \cos \theta - F_y \sin \theta \\ R_x \sin \theta + F_y \cos \theta \\ M_r \end{bmatrix} \quad (7c)$$

$$E(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta / r & \cos \theta / r \\ \sin \theta / r & \sin \theta / r \\ -t/r & t/r \end{bmatrix} \quad (7d)$$

여기서 $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]$, $\tau_i = 2rF_{xi}$ ($i=1,2$)는 양쪽 바퀴에 인가되는 토크, r 은 바퀴의 반경이다. SSR이 횡방향으로 미끄러질 때 ICR이 앞쪽으로 이동하므로 안정한 제어를 유지시키기 위해서는 $\dot{y} + d_0\dot{\theta} = 0$, ($d_0 = x_{ICR} < a$)를 만족해야 하므로 이 조건을 포함한 동역학은 다음과 같이 정리된다.

$$M\ddot{q} + C(q, \dot{q}) = E(q)\tau + A^T(q)\lambda \quad (8a)$$

$$\begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & d_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = A(q)\dot{q} = 0 \quad (8b)$$

여기서 λ 는 라그랑주 승수이다. $\eta = [\dot{x} \ \dot{y}]^T$ 로 두면 \dot{q} 과 η 사이의 관계는 다음과 같고,

$$\dot{q} = S(q)\eta \quad (9a)$$

여기서,

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \\ 0 & -\frac{1}{d_0} \end{bmatrix} \quad (9b)$$

동역학은 다음과 같다.

$$\dot{\eta} = (S^T M S)^{-1} S^T (E\tau - M\dot{S}\eta - C) \quad (10a)$$

토크에 대해 풀어서 나타내면 다음과 같다.

$$\tau = (S^T E)^{-1} (S^T M \dot{S} \eta + S^T M \dot{S} \eta + S^T C) \quad (10b)$$

3. 궤적 추종 제어기 설계

3.1 동적 궤환 선형화

식 (10a)에서 $\dot{\eta}$ 을 ζ 로 치환하면 다음과 같다.

$$\dot{q} = S(q)\eta \quad (11a)$$

$$\dot{\eta} = \zeta \quad (11b)$$

이를 풀어서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \cos\theta\eta_1 - \sin\theta\eta_2 \\ \dot{Y} &= \sin\theta\eta_1 + \cos\theta\eta_2 \end{aligned} \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= -\frac{1}{d_0}\eta_2 \\ \dot{\eta}_1 &= \zeta_1 \\ \dot{\eta}_2 &= \zeta_2 \end{aligned} \quad (12b)$$

새로운 변수 z 를 다음과 같이 도입하고,

$$z = \begin{bmatrix} X + d_0 \cos\theta \\ Y + d_0 \sin\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

제어입력이 명시적으로 나타날 때까지 z 를 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \ddot{z} &= \begin{bmatrix} \cos\theta & \frac{1}{d_0}\eta_1 \sin\theta \\ \sin\theta & -\frac{1}{d_0}\eta_1 \cos\theta \end{bmatrix} w \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{2}{d_0}\xi\eta_2 \sin\theta - \frac{1}{d_0^2}\eta_1 \eta_2^2 \cos\theta \\ -\frac{2}{d_0}\xi\eta_2 \cos\theta - \frac{1}{d_0^2}\eta_1 \eta_2^2 \sin\theta \end{bmatrix} \\ &\equiv \alpha(q, \eta)w + \beta(q, \eta) = v \end{aligned} \quad (14a)$$

여기서 $w = [w_1, w_2]^T$ 는 다음과 같다.,

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \xi, \quad \dot{\xi} = w_1 \\ \zeta_2 &= w_2 \end{aligned} \quad (14b)$$

그러면 제어칙은 다음과 같다.

$$w = \alpha(q, \eta)^{-1}(v - \beta(q, \eta)) \quad (15)$$

3.2 강인한 제어기 설계

식 (7c)에서 공칭 마찰력의 추정값 $\widehat{R}_x, \widehat{F}_y, \widehat{M}_r$ 을 적용하면 식 (14a)는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 + \delta_1(q, \epsilon) \\ \dot{z}_3 &= v + \delta_2(q, \eta, \epsilon) \end{aligned} \quad (16a)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \delta_1(q, \epsilon) &= \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \epsilon_1 \\ \delta_2(q, \eta, \epsilon) &= \frac{1}{d_0} \begin{bmatrix} 2\eta_2 \sin\theta & \eta_1 \sin\theta \\ -2\eta_2 \cos\theta & -\eta_1 \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16b)$$

여기서,

$$\epsilon_1 = \frac{1}{m} (\widehat{R}_x - R_x) \quad (16c)$$

$$\epsilon_2 = \frac{d_0^2}{m d_0^2 + I} ((\widehat{F}_y - F_y) - (-\frac{\widehat{M}_r}{d_0} - \frac{M_r}{d_0})) \quad (16d)$$

오차 벡터를 식 (17)과 같이 정의하고, 슬라이딩 평면

$s = [s_1, s_2]^T$ 를 식 (17)과 같이 구성한다.

$$\begin{aligned} e_1 &= z_1 - z_r \\ e_2 &= z_2 - \dot{z}_r \\ e_3 &= z_3 - \ddot{z}_r \end{aligned} \quad (17)$$

$$s = e_3 + A_0 \int e_1 dt + A_1 e_1 + A_2 e_2 \quad (18)$$

여기서 A_0, A_1, A_2 는 양의 정부호 행렬이다. 식 (18)의 미분과 식 (16a)로 부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= v - r + \delta_2(q, \eta, \epsilon) \\ &+ A_0 e_1 + A_1 e_2 + A_2 e_3 + A_2 \delta_1(q, \epsilon) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 r 은 기준 궤적의 가가속도(Jerk)이다. 제어칙을 다음과 같이 구성한다.

$$v = v_{eq} + v_R \quad (20a)$$

여기서,

$$v_{eq} \equiv r - A_0 e_1 - A_1 e_2 - A_2 e_3 \quad (20b)$$

그러면 식 (19)와 (20a)로부터 다음과 같다.

$$\dot{s} = v_R + A_2 \delta_1(q, \epsilon) + \delta_2(q, \eta, \epsilon) \quad (21)$$

이제 제어칙 v_R 을 다음과 같이 선정한다.

$$v_R = -sgn(s)K(t) \quad (22a)$$

$$K(t) = |A_2 \delta_1 + \delta_2| + \Gamma \quad (22b)$$

여기서 $sgn(s) = diag[sgn(s_1), sgn(s_2)]$, $\Gamma = [\gamma_1, \gamma_1]^T$, $\gamma_1, \gamma_1 \in R^+$ 이며, 식 (21), (22a), (22b)로부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s^T \dot{s} &= s^T (v_R + A_2 \delta_1 + \delta_2) \\ &= s^T (-sgn(s)K(t) + A_2 \delta_1 + \delta_2) \\ &= -|s|^T (|A_2 \delta_1 + \delta_2| + \Gamma) + s^T (A_2 \delta_1 + \delta_2) \\ &\leq -|s|^T \Gamma = \sum (-\Gamma_i |s_i|) \end{aligned} \quad (23)$$

$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s_i^2 = |s_i| \frac{d|s_i|}{dt} \leq -\Gamma_i |s_i|$ 이므로 $\frac{d|s_i|}{dt} \leq -\Gamma_i$ 이다. 따라서 $|s_i|$ 는 유한한 시간 내에 0에 도달한다,

4. 시뮬레이션 결과

구성된 제어기의 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션 도구로서 Matlab을 이용하였으며, 시뮬레이션 로봇 모델에 사용된 데이터는 Table 1과 같다.

SSR의 특성상 조향장치가 없고 전 후륜 사이의 간섭을 최소화하기 위하여 각각의 전 후륜에 대하여 같은 크기의 토크를 인가하여 실제 2륜 구동의 형태로 작동하게 된다.

추종경로는 $X_r(t) = 6 \sin(t/10)$, $Y_r(t) = 6 \cos(t/10)m$ 로 두고, 제어기 파라미터는 식 (20b)에서 $A_0 = diag[1, 1]$, $A_1 = diag[5, 5]$, $A_2 = diag[2, 2]$, 식 (22b)에서 $\Gamma = [1, 1]^T$ 로 두었다. 그리고 $X(0) = 0m$, $Y(0) = 5m$, $\theta(0) = 0$, $\dot{X}(0) = 0.5m/s$, $\dot{Y}(0) = 0m/s$ 로 초기 조건을 설정하였다.

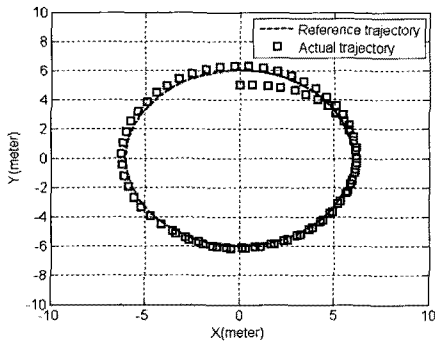
그리고 종방향 및 횡방향 마찰계수의 공칭값이 적용되었을 경우, 그리고 30% 잘못된 추정치가 사용될 때, 즉, $f_r = 0.07$, $\hat{\mu} = 0.626$ 의 경우에 대해 각각 시뮬레이션을 하였다.

Table 1 Parameters of SSR system and friction coefficients

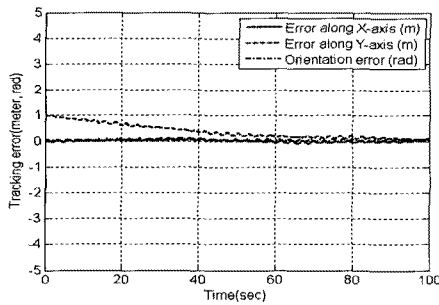
Mechanical property	Symbol	Values	Unit
로봇무게	W	116	kg
회전관성	I	20	kgm ²
바퀴의 반경	r	0.2	m
로봇 폭	t	0.63	m
무계중심에서 앞 바퀴까지의 거리	a	0.37	m
무계중심에서 뒷 바퀴까지의 거리	b	0.55	m
x축 ICR 위치	d ₀	0.18	m
모터 최대 토크	τ _{max}	125	Nm
횡방향 마찰계수	f _r	0.10	-
종방향 마찰계수	μ	0.895	-
추정 횡방향 마찰계수	f _r	0.070	-
추정 종방향 마찰계수	μ̂	0.626	-

시뮬레이션 결과, 공칭값이 적용되었을 경우 Fig. 3(a)에서와 같이 우수한 궤적추종 성능을 나타낸다. 위치 추종은 횡방향 및 종방향의 강한 마찰력과 초기 오차에도 불구하고 Fig. 3(b)에서와 같이 우수한 추종성을 보여 준다. 그리고 속도 추종은 횡방향 미끄러짐이 있어도 Fig. 3(c)에서와 같이 급속하게 제어되며 우수한 조향 성능을 보여 준다.

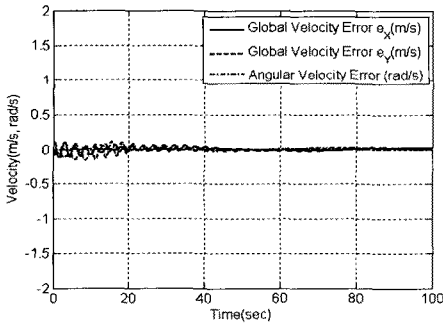
종방향 및 횡방향 마찰계수가 각각 30% 잘못된 추정치가



(a) Reference trajectory and actual trajectory



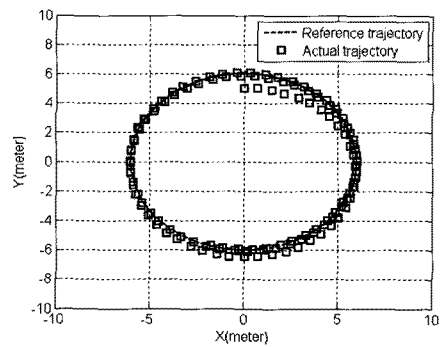
(b) Positioning errors



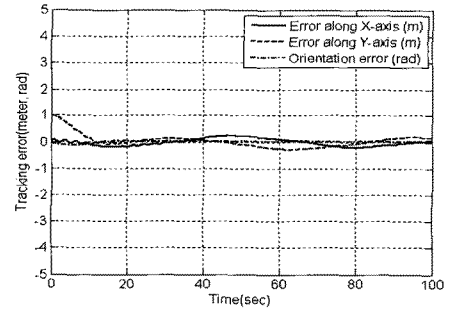
(c) Velocity errors

Fig. 3 Simulation results for trajectory tracking with nominal values of the coefficients for rolling resistance and the lateral friction

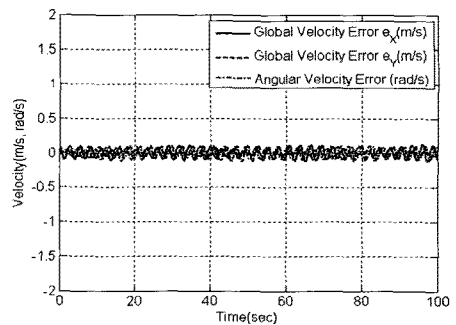
사용될 때 Fig. 4(a)에서와 같이 여전히 우수한 궤적추종 성능을 나타내고 있으나, 속도 추종 오차는 Fig. 4(c)에서 보는 바와 같이 마찰력들에 대해 잘못 추정된 값의 적용으로 인해, 공칭값이 적용된 Fig. 3(c)에 비해 보다 큰 오차를 보여 준다. 종방향 및 횡방향으로는 각각 0.15m/sec의 요동을 나타내고, 각속도는 0.1rad/sec의 좌우 요동을 보여 준다. 그러나 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 마찰력에 대한 잘못된 추정



(a) Reference trajectory and actual trajectory



(b) Positioning errors



(c) Velocity errors

Fig. 4 Simulation results for trajectory tracking with excessively underestimated values of the coefficients of rolling resistance and the lateral friction

치 및 초기 횡방향 오차에도 불구하고 초기에 횡방향 위치 오차를 감소시켜 효과적인 횡방향 제어가 가능함을 보여 준다. 횡방향으로 0.2m, 종방향으로 0.3m 정도로 위치 오차의 요동을 계속 보여 주나, 0.1rad 이내의 적은 좌우 요동 각을 나타내며 지속적으로 강인한 조향 성능을 유지하고 있어 설계된 제어기의 우수성을 보여 준다.

5. 결론

조향제어가 가능한 ICR의 위치를 특정한 지점에 위치하게 하기 위한 기구학적 구속조건을 포함한 모델에 대해 동적 궤환 선형화 기법을 적용하고, 선형화 오차에 주요한 요인으로 작동하는 마찰력 변동에 강인하도록 하는 부가적인 슬라이딩 모드 타입의 제어기를 설계하였다. 바퀴와 지면사이의 마찰계수 변동에 대한 시뮬레이션을 통하여 종방향 및 횡방향 마찰력에 대해 과도하게 잘못된 추정값이 적용된 경우에서도 선정된 궤적 경로에 대해 우수한 추종성을 보였다. 향후 마찰계수와 슬립율과 관계를 이용한 지능적인 제어 기법 및 강인한 적응제어 기법을 이용한 궤적 추종 및 수렴 특성에 관해 연구가 계속될 것이다.

후 기

이 연구는 동의대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음 (과제번호 2008AA165).

참 고 문 헌

(1) Dixon, W. E., Dawson, D. M., Zergeroglu, E., and

- Behal, A., 2001, *Nonlinear Control of Wheeled Mobile Robots*, Springer-Verlag, London, pp. 49-64.
- (2) Morin, P. and Samson, C., 2002, "Feedback Control of Nonholonomic Wheeled Vehicles, A survey," *Archive of Control Science*, Vol. 12, pp. 7-36.
- (3) Han, S. H., 2004, "An Intelligent Control of Mobile Robot Using Genetic Algorithm," *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 126-132.
- (4) Oriolo, G., De Luca, A., and Venditelli, M., 2002, "WMR Control via Dynamic Feedback Linearization: Design, Implementation, and Experimental Validation," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 10, No. 6, pp. 835-852.
- (5) Caracciolo, L., De Luca, A., and Iannitti, S., 1999, "Trajectory Tracking Control of a Four Wheel Differentially Driven Mobile Robots," *Proc. of IEEE*, Vol. 12, pp. 2632-2638.
- (6) Petrov, P., de Lafontaine, J., Bigras, P., and Tetreault, M., 2000, "Lateral Control of a Skid-steering Mining Vehicle," *Intelligent Robots and Systems*, pp. 1804-1809.
- (7) Pazderski, D., Kozlowski, K., and Lawniczak, M., 2004, "Practical Stabilization of 4WD Skid-steering Mobile Robot," *Fourth Int. Workshop on Robot Motion and Control*, pp. 174-180.
- (8) Back, W. B., 2007. "Trajectory Tracking of Skid Steering Robot by the Sliding Mode Control Techniques," *KI-IT*, Vol. 5, No. 4, pp. 18-24.