

외란 관측기를 이용한 이동 로봇의 슬립 제어

Anti-Slip Control for Wheeled Robot Based on Disturbance Observer

권 선 구*, 허 육 열**, 김 진 환***, 김 학 일****
(Sun-ku Kwon, Uk-youl Huh, Jin-whan Kim, Hak-il Kim)

Abstract – Mobility of an indoor wheeled robot is affected by adhesion force that is related to various floor conditions. When the adhesion force between driving wheels and the floor decreases suddenly, the robot has slip state. First of all, this paper models adhesion characteristics and slip in wheeled robot. Secondly, the paper proposes estimation method of adhesion force coefficient according to slip velocity. In order to overcome this slip problem, optimal slip velocity must be decided for stable movement of wheeled robot. The paper proposes an anti-slip control system based on an ordinary disturbance observer, that is, the anti-slip control is achieved by reducing the driving torque enough to give maximum adhesion force coefficient. These procedure is implemented using a Pioneer 2-DXE parameter.

Key Words : Mobile Robot, Adhesion Force, Adhesion Force Estimation, Slip Velocity Control, Disturbance Observer

1. 서 론

실내에서 이동하는 Wheeled Robot의 요구 조건은 목표까지 안전하고 빠른 주행을 하는 것이다. 그러나 Robot의 구동에 있어서 바퀴와 바닥의 상관관계에 따른 Robot의 구동 특성 변화는 불안정한 구동을 일으킨다[1]. 기존 연구는 전기 기차나 자동차와 같이 대형의 시스템에 대해 진행되어 왔으나, 지능형 Robot의 발전 추세에 따라 Wheeled Robot 구동의 정밀 제어에 대한 관심이 증대되고 있다.

이러한 측면에서 Wheeled Robot의 구동을 살펴보면, Robot의 바퀴와 바닥 사이에 작용하는 점착력(Adhesion Force)은 Robot의 무게 및 바퀴와 바닥 사이의 점착력 계수(Adhesion Force Coefficient)와의 함수로 정의된다[2][4]. 점착력 계수는 다양한 바닥 조건에 따라 달라지며, 운동 특성 변화를 가져온다[3]. 그러나 점착력 계수는 비선형적 요소이며 추정하기 어려울 뿐만 아니라, 급격한 감소는 Slip 현상을 초래하고 점착력을 저하시켜 불안정한 주행을 야기한다.

본 논문에서는 먼저 점착력과 Slip 현상에 대해서 모델링을 하고, 비선형적인 요소인 점착력 계수를 추정하기 위한 외란 관측기(Disturbance Observer)를 설계하였다. 또한 Anti-Slip 제어기는 점착력 계수의 급격한 감소에 따른 Slip 현상의 방지를 위해 추정된 점착력 계수를 최대로 유지하도록 하였다. 이러한 제어 알고리즘을 Pioneer 2-DXE에 구현하기 위해 시뮬레이션을 통해 확인한다.

2. 본 론

2.1 Wheeled Robot에서의 Slip 현상

Wheeled Robot은 일반적으로 2개의 모터 또는 추가되는 1개의 Caster로 구성되어 있다. Robot의 Slip 현상을 방지하기 위한 Anti-slip 제어를 제안하기 위해 먼저 Slip 현상에 대해 모델링 하고자 한다. 바퀴와 바닥면의 재질 차이라는 물리적 특성에 의해 필연적으로 바퀴의 속도와 Robot의 속도는 상대적인 속도 차이가 발생한다. 두 개의 값이 동일하면 이상적으로 '0'이 되고 Slip 현상은 발생하지 않는다.

Fig. 1은 바닥의 조건에 따른 점착력 계수의 변화를 나타낸 것이다[1]. 모터에서 발생한 토크는 기어를 통해 바퀴에 전달되는데 바퀴와 바닥의 조건에 따라 점착 구간(Adhesion Area)과 Slip 구간(Slip Area)으로 구분이 된다[4]. 점착이란 서로 다른 물체 간에 표면이 맞물려서 서로에게 힘을 전달할 수 있는 상태를 말하며, 바퀴와 바닥 사이에 점착력의 크기는 외부 환경에 따라 변화하는 점착력 계수와 바퀴의 무게(축중량)에 비례하는 특성을 보인다.

본 논문은 구동 바퀴에 대한 모델을 통해 Slip에 대한 분석을 하고자 한다. Fig. 2는 바퀴와 바닥 사이의 점착 특성 관계를 나타낸 것으로써 모터의 구동력은 바퀴와 바닥 사이의 점착력에 의해 Robot에 전달이 된다. Robot의 운동은 식 (1)~(3)으로 표현이 된다. 식 (2)는 로봇의 운동에 관한 방정식이고 식 (3)은 구동 바퀴의 운동방정식이다.

$$v_d = v_r + v_s \quad (1)$$

$$M \frac{d}{dt} v_r = \mu(v_s) \cdot W \cdot g - F_d(v_r) \quad (2)$$

$$J \frac{d}{dt} w_d = T_d - \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (3)$$

저자 소개

- * 權 宣 九 : 仁荷大學校 電氣工學科 碩士課程
** 許 旭 烈 : 仁荷大學校 電氣工學科 教授 · 工博
*** 金 真 煥 : 仁荷工業專門大學 電氣情報科學科 助教授 · 工博
**** 金 學 一 : 仁荷大學校 情報通信工學部 教授 · 工博

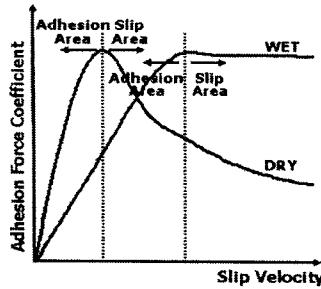


Figure 1 : 점착력 계수 - Slip 속도 특성

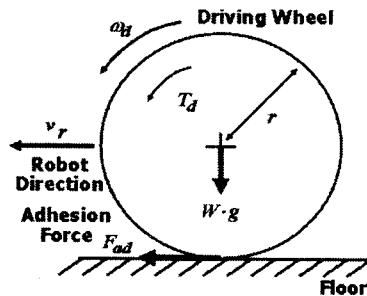


Figure 2 : Wheeled Robot 모델

점착력 F_{ad} 는 $\mu(v_s)Wg$ 이고 이것에 해당되는 토크와 속도는 $T_{ad} = F_{ad}r$, $\omega_d = (v_r + v_s)/r$ 가 된다. v_r 는 바퀴의 속도, v_s 는 로봇의 속도, v_s 는 Slip의 속도, ω_d 는 바퀴의 각속도이다. T_d 는 바퀴의 구동 토크, $\mu(v_s)$ 는 점착력 계수, W 는 마찰력으로써 외란의 형태로 나타난다. W 는 Robot의 축중량, M 은 바퀴의 무게, J 는 바퀴의 관성력, r 는 중력 가속도, r 은 바퀴의 반지름이다.

$v_d = \omega_d \cdot r$, $M_j = J/r^2$, $F_t = T_d/r$ 의 관계와 구동 바퀴와 기어의 관계를 나타낸 수식인 $T_d = T_m \cdot R_g$, $\omega_m = R_g \cdot \omega_d$, $J_m = J/R_g^2$ 를 이용하여 식(3)을 다시 쓰면, 구동 바퀴와 모터 사이의 수식은 식 (4)로 표현이 된다.

$$M_j \frac{d}{dt} v_d = F_t - \mu(v_s) \cdot W \cdot g \quad (4)$$

여기에서 T_m 은 모터에서 발생되는 구동 토크, ω_m 은 모터의 각속도, R_g 는 기어비, J_m 은 모터의 관성력, F_t 는 구동력이다.

Fig. 3은 수식 (1)~(4)에 나타난 Wheeled Robot의 바퀴와 모터 사이의 관계식을 통해 구현된 시스템을 표현하고 있다.

또한 모터의 토크 방정식은 식 (5)로 나타낼 수 있으며, 모터의 각속도에 대한 함수로 주어진다. 여기서 T_L 은 모터의 외란 토크, \hat{T}_L 은 추정된 외란 토크, $\hat{\mu}$ 는 추정된 점착력 계수이다.

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - T_L \quad (5)$$

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (6)$$

$$\hat{T}_L = \frac{K}{s + K} (T_m - s \cdot J_m \cdot \omega_m) \quad (7)$$

$$\mu(v_s) = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} T_L \quad (8)$$

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{d\mu(v_s)}{dt} = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{T}_L \quad (9)$$

식(1)~(9)의 수식에 의해서 Fig. 3의 블록도는 Wheeled Robot의 Slip 속도와 점착력 계수를 추정하기 위한 관측기를 구성하고 있다. 관측기는 입력 T_m 과 ω_m 으로 점착력 계수의 추정값 $\hat{\mu}(v_s)$ 를 출력으로 나타낸다. 제안된 관측기의 성능은 Fig. 4에서 추정된 $\hat{\mu}(v_s)$ 가 실제 $\mu(v_s)$ 를 정확하게 추정함을 통해 알 수 있고 관측기 설계의 적합성을 확인하였다[5].

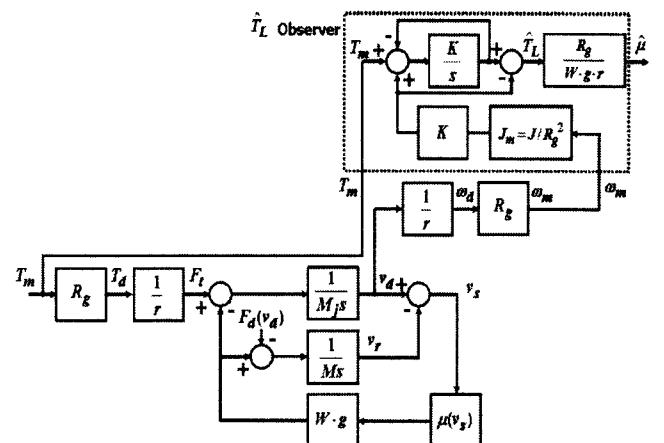


Figure 3 : Slip 및 점착력 계수 추정 시스템 블록도

2.2 Anti-slip 제어

점착력의 최대를 최대 점착력이라 하고, Fig. 1에서 볼 수 있듯이 구동 토크가 최대 점착력 계수 $\mu(v_s)_{max}$ 에 해당하는 토크보다 크게 되면 Slip 현상이 생긴다[1]. 즉, Fig. 1과 식 (10), (11)에서 나타난 바와 같이 $d\mu(v_s)/dv_s < 0$ 이 되지 않도록 Robot이 구동이 되어야 하고 식 (11)은 Robot의 구동 조건과 범위를 의미한다[4][6].

$$\frac{d\mu(v_s)}{dv_s} = \frac{d\mu(v_s)}{dt} \cdot \frac{dt}{dv_s} \quad (10)$$

$$\frac{d\mu(v_s)}{dt} > 0 \quad (\Theta \frac{dv_s}{dt} \approx 0) \quad (11)$$

Anti-slip 제어는 관측기에 의해 추정된 $\hat{\mu}(v_s)$ 를 이용하여 점착력 계수를 최대로 유지하기 위해서는 $d\hat{\mu}(v_s)/dt$ 의 값이 항상 0보다 크도록 하는 것이 핵심이 된다. 이를 위해 PI 제어기를 사용하고 점착력 계수의 미분이 0이나 음이 될 경우에는 로봇의 구동 토크 T_m 을 0으로 만들어 Slip 현상을 방지 한다. PI제어기의 출력을 T_{PI} 라고 하면 식 (12), (13)과 같이 표현이 된다. \bar{T}_m 은 Slip 발생할 때의 구동 제어 토크이다.

$$\bar{T}_m = T_m - T_{PI} \quad (12)$$

$$T_{PI} = K_P s \hat{\mu}(v_s) + K_I \hat{\mu}(v_s) \quad (13)$$

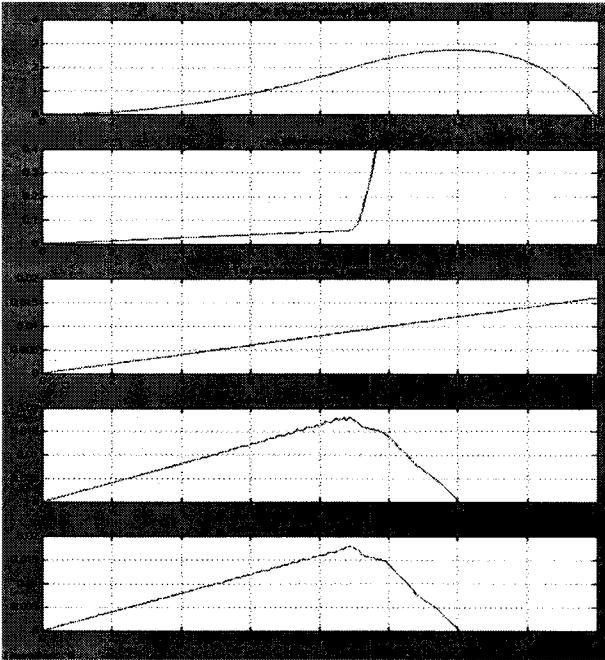


Figure 4 : 관측기에 의한 점착력 계수 추정 결과

Fig. 1에서와 같이 점착력 계수의 미분이 음이면 T_{PI} 를 Slip 속도를 감소시키기 위해 증가시키고, 양일 경우에는 T_{PI} 를 최대 점착력에 해당하는 최적의 Slip 속도를 만들기 위해 감소시킨다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 Pioneer 2-DXE의 사양을 나타낸다. Fig. 5는 Anti-Slip 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 4에서 점착력 계수가 감소하는 순간(9초)부터 Slip 현상이 발생하고 Robot의 속도가 감소함을 확인할 수 있는데, Fig. 5의 Anti-Slip 제어의 경우도 Slip이 발생(14초)하지만 Anti-Slip 제어에 의해 Slip의 영향이 감쇄되어 Robot의 속도가 지속적으로 증가함을 확인하였다. 이것은 Fig. 5에서 점착력 계수의 미분치가 음이 되는 순간(13초)에 구동 토크를 '0'으로 감소시켜서 Slip의 영향을 최소화시킨 결과이다.

Table 1 : Specification of Pioneer 2-DXE

Gear Ratio(R_g)	19.7
Radius of Wheel(r)	0.191 [m]
Wheel Inertia Moment(J)	7.06×10^{-6} [kg · m ²]
Weight of Robot(W)	4.5 [kg]
Gravity Acceleration(g)	9.8 [m/s ²]
Weight on the Wheel(M)	0.5 [kg]
$M_f(J/r^2 = J_m R_g^2/r^2)$	7.51×10^{-6} [kg]

3. 결 론

본 논문에서 제안한 Anti-Slip 제어는 외란 관측기를 통해 점착력 계수 추정하고, 추정한 점착력 계수의 미분치를 이용하여 PI 제어기에 의한 토크 제어를 하는 것이다. 이를 위해 최대 점착력에 해당하는 구동 토크를 유지했으며, 시스템의 내

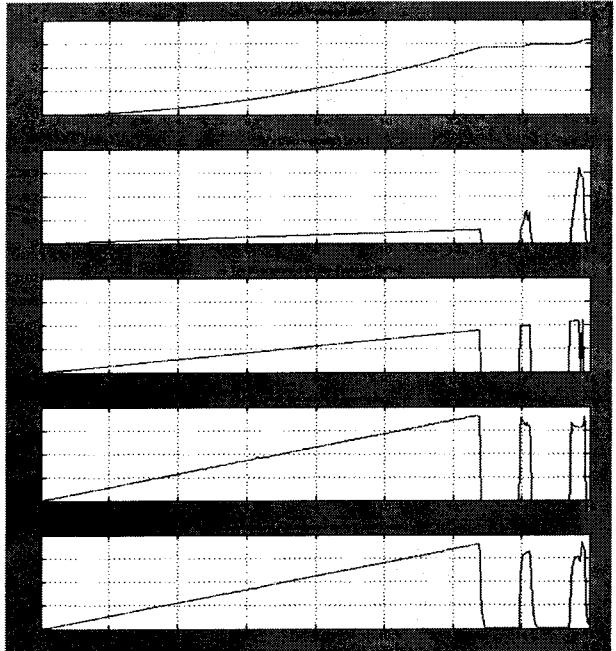


Figure 5 : Anti-Slip 제어기에 의한 토크 제어 결과

부 파라미터에 영향을 받지 않는 점착력 계수를 추정하여 견실한 제어가 되도록 하였다. 또한 Anti-Slip 제어기의 성능은, Slip에 의한 점착력 계수의 변화에도 Robot의 속도는 안정적으로 증가함을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Ohishi, K., Ogawa, Y., Miyashita, I., and Yasukawa, S., "Anti-slip re-adhesion control of electric motor coach based on force control using disturbance observer," Conf. IEEE Industry Applications Conference, 2(8-12), pp. 1001-1007, Oct 2000.
- [2] Kadokami, S., Ohishi, K., Miyashita, I., and Yasukawa, S., "Re-adhesion control of electric motor coach based on disturbance observer and sensor-less vector control," Proc. Power Conversion Conference, 3(2-5), pp. 1020-1025 April 2002.
- [3] Sado, H., Sakai, S., and Hori, Y., "Road condition estimation for traction control in electric vehicle," Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2(12-16), pp. 973-978, July 1999.
- [4] Sakai, S., Sado, H., and Hori, Y., "New skid avoidance method for electric vehicle with independently controlled 4 in-wheel motors," Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2(12-16), pp. 934-939, July 1999.
- [5] Furuya, T., Toyoda, Y., and Hori, Y., "Implementation of advanced adhesion control for electric vehicle," Proc. Advanced Motion Control, 2(18-21), pp. 430-435, March 1996.
- [6] Sakai, S.-I., Sado, H., and Hori, Y., "Anti-skid control with motor in electric vehicle," Proc. Advanced Motion Control, pp. 317-322, April 2000.