

퍼지 제어를 이용한 이동 로봇의 재점착 제어

권 선 구¹, 허 옥 렬², 김 학 일²
 인하대학교 전기공학과¹, 인하대학교 정보통신공학부²

Re-adhesion Control for Wheeled Robot Using Fuzzy Logic

Sun Ku KWON, Uk Youl HUH, and Hak Il KIM

Dept. of Electrical Engineering¹, School of Information & Communication Engineering, INHA Univ.²

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(AFC) 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 re-adhesion control is achieved by reducing the driving torque enough to give maximum adhesion force coefficient. fuzzy logic controller(FLC) is petty useful with slip through that compare fuzzy with PI control for the controller performance. These procedure is implemented using a Pioneer 2-DXE parameter.

2. 점착력 특성

이동 로봇은 일반적으로 2개의 모터 또는 추가되는 1개의 Caster로 구성되어 있다. 로봇의 공전 현상을 방지하기 위한 재점착 제어를 제안하기 위해 먼저 공전 현상에 대해 모델링을 한다. Fig. 1에서와 같이 바퀴와 바닥면의 재질 차이라는 물리적 특성에 의해 필연적으로 바퀴와 로봇의 속도는 상대적인 속도 차이가 발생하고, 이 차이를 공전 속도(Slip velocity)라고 한다. 이동 로봇의 정량화 때문에, 상대적으로 감소한 점착력에 비해 구동 토크는 증가하여서 공전의 영향은 더 커지고 있다.

이러한 측면에서 이동 로봇의 구동을 살펴보면, 점착력 특성은 바퀴와 바닥의 재질 특성, 접촉면의 형상, 이물질 함유에 대한 마찰 상태를 나타내는 힘이므로 마찰력 특성과 유사하다. 바퀴와 바닥 사이에 점착력의 크기는 외부 환경에 따라 변화하는 점착력 계수와 바퀴의 무게(축하중)에 비례하는 특성을 보인다. 따라서 점착력 계수는 가정환경에서의 다양한 바닥 조건에 따라 달라지며, 점착력 계수의 변화는 로봇의 운동 특성 변화를 가져온다[1].

Fig. 2는 바닥의 조건에 따른 점착력 계수의 변화를 나타낸 것이다[2]. 모터에서 발생한 토크는 기어를 통해 바퀴에 전달되는데 바퀴와 바닥의 조건에 따라 안정적인 점착 구간(Adhesion Area)와 불안정한 공전 구간(Slip Area)으로 구분이 된다[6][7]. 안정 구간은 구동 토크의 증가에 따라 점착력도 증가하여, 서로 다른 물체 간에 표면이 맞물려서 서로에게 힘을 전달할 수 있는 상태를 말한다. 불안정 구간은 구동 토크의 증가에 대해 점착력이 감소하게 되는 구간이다. 두 구간의 경계에서 최대 점착력 특성이 나타나며, 최대의 구동 토크를 전달할 수 있다.

1. 서 론

실내 환경에서의 이동 로봇의 요구 조건은 목표까지 안전하고 빠른 주행을 하는 것이다. 그러나 로봇의 구동에 있어서 바퀴와 바닥의 상관관계에 따른 로봇의 구동 특성 변화는 불안정한 구동을 일으킨다[1][2][3]. 기존 연구는 전기 기차나 자동차와 같이 대형의 시스템에 대해 진행되어 왔으나, 지능형 로봇의 발전 추세에 따라 이동 로봇 구동의 정밀 제어에 대한 관심이 증대되고 있다.

본 논문에서는 먼저 점착력(Adhesion force : 粘着力)과 공전 현상(Slip phenomena : 空轉)에 대해서 모델링을 한다. 점착력은 바퀴와 바닥 사이에 작용하는 힘으로 로봇의 무게와 점착력 계수(Adhesion force coefficient)와의 함수로 정의된다. 또 점착력 계수는 바닥 면의 조건에 따라 달라지고, 비선형적 요소로써 추정이 곤란하다. 점착력 계수의 급격한 감소는 공전을 일으키고 점착력을 저하시켜 불안정한 주행을 야기한다[2][4]. 이러한 점착력 계수를 추정하기 위해 외란 관측기(Disturbance observer)를 설계하였다[2]. 외란 관측기는 모터의 각속도와 구동 토크의 정보를 이용하여 외란 토크를 추정하고 이것으로 점착력 계수를 추정한다.

또한 안정적인 구동 토크의 전달을 위해 재점착(Re-adhesion : 再粘着) 상태를 유지하고, 공전 제거 후 최대 점착력으로 점착력을 회복시키기 위해 재점착 제어(Re-adhesion control)를 제안한다. 재점착 제어는 공전 현상의 방지 및 공전의 제거를 위한 공전 제어(Anti-slip control) 뿐만 아니라, 구동 토크 손실을 최소화하기 위해 최대 점착력에서 구동 토크를 제어하도록 하였다[4]. PI 제어기에 의한 공전 제어의 문제점을 퍼지 제어(Fuzzy logic controller : FLC)에 의한 재점착 제어로써 보완한다[5]. 이러한 제어 알고리즘을 Pioneer 2-DXE에 구현하기 위해 시뮬레이션을 통해 확인한다.

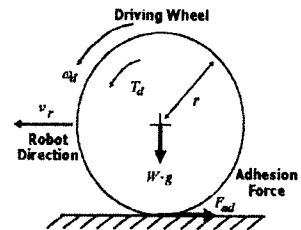


Fig. 1 Wheeled Robot Model

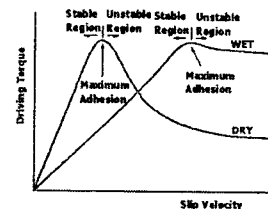


Fig. 2 Characteristics of adhesion force

3. 공전 현상 및 관측기 설계

본 논문은 구동 바퀴에 대한 모델을 통해 공전에 대한 분석을 하고, 이를 통해 관측기를 설계하여 재점착 제어기를 설계한다. Fig. 1은 바퀴와 바닥 사이의 점착 특성을 나타낸 것으로 모터의 구동력은 바퀴와 바닥 사이의 점착력에 의해 로봇에 전달이 된다. 로봇의 운동은 식 (1)~(3)으로 표현이 된다. 식 (2)는 로봇의 운동에 관한 방정식이고 식 (3)은 구동 바퀴의 운동방정식이다. 점착력 $F_{ad} = \mu(v_s)Wg$ 이고 이것에 해당되는 토크와 속도는 $T_{ad} = F_{ad} \cdot r$, $\omega_d = (v_r + v_d)/r$ 가 된다. v_d 는 바퀴의 속도, v_r 는 로봇 속도, v_s 는 공전 속도, ω_d 는 바퀴의 각속도이다. T_d 는 바퀴의 구동 토크, $\mu(v_s)$ 는 점착력 계수, $F_d(v_r)$ 은 마찰력으로써 외란의 형태로 나타난다. W 는 로봇의 축하중, M 은 바퀴의 무게, J 는 바퀴의 관성력, g 는 중력 가속도, r 는 바퀴의 반지름이다.

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

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

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

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - T_L \quad (4)$$

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (5)$$

$$\hat{T}_L = \frac{K}{s+K} (T_m - s \cdot J_m \cdot \omega_m) \quad (6)$$

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{d\mu(v_s)}{dv_s} = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{T}_L \quad (7)$$

$$\frac{d\mu(v_s)}{dv_s} = \frac{d\mu}{dv_s} \cdot \frac{dv_s}{dt} \quad (8)$$

식 (3)을 다시 쓰면, 구동 바퀴와 모터 사이의 수식은 식 (4)로 표현이 되고, 식 (5)는 모터의 토크 방정식을 나타낸다. 따라서 식 (6)~(8)을 이용해 외란 관측기를 구성한다[2][4][5]. T_m 은 모터에서 발생하는 구동 토크, ω_m 은 모터의 각속도, R_g 는 기어비, J_m 은 모터의 관성력, F_d 는 구동력이다. 또 T_L 은 모터의 외란 토크, $\hat{\mu}$ 는 추정된 외란 토크, $\hat{\mu}$ 는 추정된 점착력 계수, K 는 관측기의 극점으로써 100[rad/s]에서 시물레이션을 하였다.

Fig. 4는 식(1)~(8)의 수식에 의해 외란 토크와 점착력 계수를 추정하기 위한 관측기를 나타낸다. 관측기는 입력 T_m 과 ω_m 으로 점착력 계수의 추정값을 출력으로 나타낸다. 관측기의 성능은 Fig. 5에서 추정값이 실제값을 정확하게 추정함을 통해 관측기 설계의 적합성을 확인하였다[9]. 표 1은 시물레이션에 사용된 Pioneer 2-DXE의 사양을 나타낸다.

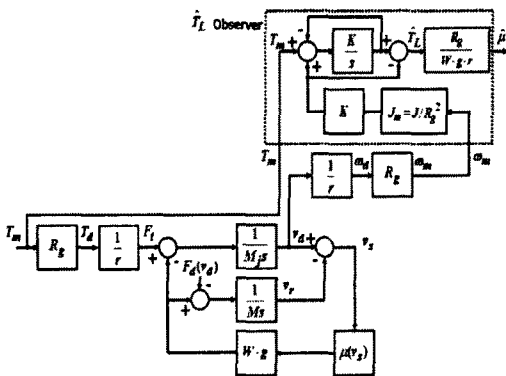


Fig. 4 Block Diagram of slip and AFC estimator

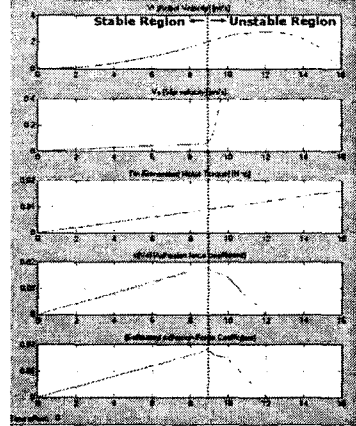


Fig. 5 Estimation of adhesion force coefficient

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^{-5} [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]

4. 퍼지 제어가 설계

공전의 검출에 있어서 공전 속도나 모터의 가속도를 검지하여 공전을 검출하는 방식이 있으나, 검지의 지연이나 시스템의 오차로 인해 재점착 제어 특성이 저하된다[8]. 따라서 공전의 검출에 있어서 공전 가속도에 해당하는 점착력 계수의 미분값을 제어 입력으로 사용한다.

공전 현상은 점착력을 저하시켜 구동력의 전달 특성을 저하시키는데, 공전 속도의 제어를 위한 제어를 공전 제어라 하고, 구동 토크를 점착력 이하로 감소시키면 제어가 가능하다[5]. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 구동 토크가 최대 점착력 계수 $\mu(v_s)_{max}$ 에 해당하는 토크보다 크게 되면 공전 현상이 생긴다[2]. 따라서 최대 점착력에서 구동 토크를 제어하는 것이 가장 효율적이다. 즉, Fig. 5와 식 (8)에서 항상 $dv_s/dt \neq 0$ ($dt/dv_s = 0$)이므로 공전의 검출은 $d\mu/dt = 0$ 인 조건에서 이루어진다. 따라서 로봇의 구동 조건과 범위는 $d\mu/dt > 0$ 인 구간이다[2][4][6].

공전 제어를 위한 PI 제어기에 있어서, 추정된 점착력 계수를 입력으로 하는 제어기의 출력이 구동 토크에 비해 작은 경우에 출력이 구동 토크의 감소 목표값이 되어 공전 현상을 제거한다. 반대로 제어기의 출력이 구동 토크보다 큰 경우에는 입력 구동 토크가 출력이 되어서 구동 토크는 '0'이 된다[5]. 이러한 구동 토크의 급격한 상승과 감소로 인해 로봇 속도의 직선적인 상승이 제한되고, 불안정한 주행이 되어 PI 제어로는 만족한 성능을 얻을 수 없다. 반복되는 공전 제어는 구동 토크의 리플(ripple) 성분이 많아서 성능의 한계가 있다. 또한 점착력이 저하되어 있는 경우 빠르게 회복하려는 구동력으로 인해 오히려 재공전(Re-slip : 再空轉)이 발생한다[5].

일반적인 경우, 재점착 제어는 공전 가속도를 검출하고 공전 속도가 감소할 때에 재점착을 감지하여 견인력을 회복시키는 방법이다. 기존의 방법이 있어서 구동 토크를 직선적으로 감소시키다가 재점착이 검지되면 회복 구동 토크를 직선적으로 상승시키는 방법이 제안되었다[2][7]. 또한 일정 크기로 감소된 구동력을 일정시간 유지한 후 회복시키는 방법도 제안되었다[4]. 그러나 재공전의 발생 크기는 줄일 수 있으나 공전의 완전한 제거 및 구동 토크의 손실을 크게 감소시키지 못하였다.

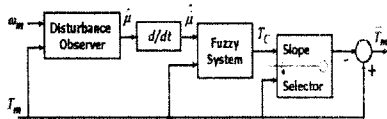


Fig. 6 Re-adhesion controller using fuzzy system

따라서 본 논문은 적정 공전 속도를 유지한 상태로 구동 토크를 제어하는 방식을 제안한다. Fig. 6에 표현된 퍼지 제어를 이용한 재점착 제어는 점착력 계수의 감소가 감지되면 구동 토크의 감소를 통해 제어가 시작된다. 공전속도는 감소된 구동 토크가 점착력과 같아질 때 증가를 멈추게 된다. 이 때에 감소되는 비율은 최적의 구동 토크로 감소시켜서 구동 토크 손실을 최소화하도록 하고, 재점착 상태의 유지를 위해 안정적으로 구동 토크를 상승시킨다. 특히 반복적인 공전으로 인해 제어기의 출력이 커질 경우에는 구동 토크의 상승 기울기를 변화시키는 방법을 사용한다. 퍼지 제어를 이용하여 PI 제어기에 의한 공전 제어보다 향상되고 발전된 재점착 제어 방식을 제안한다[3].

Fig. 6에서 퍼지 제어기의 입력은 구동 토크와 점착력 계수의 미분으로 선정하였다. 구동 토크의 크기에 따라 공전의 영향과 제어기의 목표값이 달라지고, 점착력 계수의 미분값에 따라 제어기의 동작 시점이 결정되기 때문이다. Fig. 7은 퍼지 제어기의 멤버십 함수(MF)를 나타내는데 구동 토크는 음이 되는 경우가 없으므로 음의 영역에 대해서 정의하지 않았고, 점착력 계수의 미분값은 음인 경우는 정밀한 제어가 필요하므로 구간을 세분화하였다. 퍼지 제어기의 출력이 음인 경우 상당히 큰 구동 토크를 전달하게 되므로, Fig. 6에서와 같은 퍼지 제어기 출력을 조절하는 부분도 필요하다. 표 2는 퍼지 제어기의 룰 베이스(Rule base)를 나타낸다. 구동 토크가 클 때에 공전이 발생하는 경우는 제어기의 출력이 커진다.

Fig. 8은 퍼지 시스템에 의한 재점착 제어의 결과를 나타낸다. 공전이 감지되었을 때에 구동 토크를 감소시키는 공전 제어가 이루어지고 있다(1~2초, 7~11초). 또한 구동 토크의 회복에 있어서도 퍼지 제어기에 의해 구동 토크 손실을 최소화시키고, 재공전이 발생하지 않는 공전 속도를 유지하면서 구동 토크를 증가시켜 로봇 속도가 직선적으로 증가한다. 그리고 제어기 출력이 구동 토크에 비해 커질 때(12~20초)에는 구동 토크의 증가 기울기를 변화시켜서 성능을 보다 향상시켰다.

퍼지 제어기의 성능을 PI 제어에 의한 공전 제어에 비해 지속적으로 로봇 속도가 증가하고, 구동 토크와 공전 속도의 리플이 제거되었다[5]. 또한 공전 속도가 로봇 속도의 2~10%의 비율에서 퍼지 제어의 경우에는 1~4%로 감소하여 공전 속도도 감소하였다[5].

Table 2 Rule base

T_c	T_m			
	ZE	PS	PM	PL
μ	NM	PS	PS	PM
	NS	ZE	PS	PM
	ZE	ZE	ZE	PS
	PS	ZE	ZE	PS

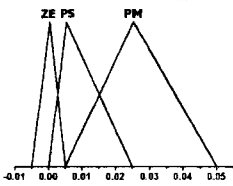
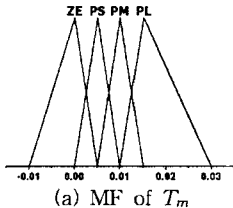
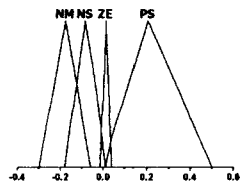


Fig. 7 (a), (b), (c) Membership function of FLC

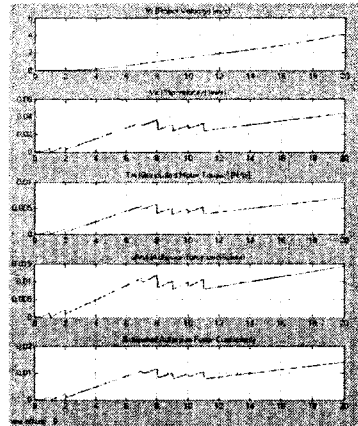


Fig. 8 Simulation results using FLC

5. 결 론

본 논문에서 제안한 재점착 제어는 외란 관측기를 통해 점착력 계수 추정하고, 추정한 점착력 계수의 미분치를 이용하여 퍼지 제어기에 의한 토크 제어를 하는 것이다. 이를 위해 최대 점착력에 해당하는 구동 토크를 유지했으며, 시스템의 내부 파라미터에 영향을 받지 않는 점착력 계수를 추정하여 견실한 제어가 되도록 하였다. 또한 최적의 공전 속도에 해당하는 구동 토크를 결정하고 공전 방지 및 재점착 상태를 유지하였다. 퍼지 제어기의 성능은 공전에 의한 점착력 계수의 변화에도 로봇의 속도는 직선적으로 증가함을 통해 확인하였다. 또 공전 제어에 있어서 구동 토크의 급격한 감소로 인해 야기 되는 구동 토크의 손실과 불안정성이 제거되었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 슈퍼지능형 개발 및 응용 기술 개발 과제 (과제번호 : 13078) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Senini, F. Flinders, and W. Oghanna, "Dynamic simulation of wheel rail interaction for locomotive traction studies," in *Proceeding of the IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, pp. 27-34, 1993
- [2] K. Onishi, Y. Ogawa, I. Miyashita, and S. Yasukawa, "Adhesion control of electric motor coach based on force control using disturbance observer," in *Proceeding of the Advanced Motion Control*, pp. 323-328, 2000
- [3] R. Pusca, Y. Ait-Amirat, A. Berthon, and J. M. Kauffman, "Fuzzy logic based control for electric vehicle with four separate traction drives," in *Proceeding of the Vehicular Technology Conference*, vol. 4, pp. 2089-2096, 2002
- [4] S. Kadowaki, et al., "Re adhesion control of electric motor coach based on disturbance observer and sensor-less vector control," in *Proceeding of the Power Conversion Conference*, vol. 3, pp. 1020-1025, 2002
- [5] S. K. Kwon et al., "Anti-slip control for wheeled robot based on disturbance observer," in *Proceeding of the ICS 04*, pp. 50-52, 2004
- [6] H. Sado et al., "Road condition estimation for traction control in electric vehicle," in *Proceeding of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2, pp. 973-978, 1999
- [7] Y. Matsumoto, et al., "Novel re-adhesion control for train traction system of the "Shinkansen" with the estimation of wheel to rail adhesive force," in *Proceeding of the IECON*, vol. 2, pp. 1207-1212, 2001
- [8] H. Miki, et al., "New AC traction drive system with transistor VVVF inverter," in *Proceeding of the Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 1, pp. 291-297, 1991
- [9] T. Furuya, Y. Toyoda, and Y. Hori, "Implementation of advanced adhesion control for electric vehicle," in *Proceeding of the Advanced Motion Control*, vol. 2, pp. 430-435, 1996