정보 및 제어 심포지엄(ICS '05) 2005. 5. 14

이동 로봇의 퍼지 재점착 제어

Fuzzy Re-adhesion Control for Wheeled Robot

권 선 구*, 허 욱 열**, 김 진 환***
(Sun-Ku Kwon, Uk-Youl Huh, Jin-Hwan 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 floor decreases suddenly, the robot begins slip. In order to overcome this slip problem, optimal slip velocity must be decided for stable movement of wheeled robot. First of all, this paper shows that conventional PI control can not be applied to a wheeled robot of the light weight. Secondly, proposed fuzzy logic is applied to the Takagi-Sugeno model for the configuration of fuzzy sets. For the design of Takagi-Sugeno model and fuzzy rule, proposed algorithm uses FCM(Fuzzy c-mean clustering method) algorithm. The proposed fuzzy logic controller(FLC) is pretty useful with prevention of the slip phenomena for the controller performance in the re-adhesion control strategy.

Key Words : Wheeled Robot, Re-adhesion Control, Takagi-Sugeno Model, Fuzzy Logic Controller

1. 서 론

가정용 로봇의 발전 및 수요의 급증에 따라 실내 환경에서의 이동 로봇의 주행에 대한 연구는 센서 융합(Sensor fusion)의 기술 없이 위치센서(Encoder)의 사용으로 인한 오차를 보상하는 방식을 취해왔다[1][2]. 이러한 센서의 부정확함에 의한 오차와 구동에 있어서 바퀴와 바닥의 상관관계에 따른 점착 특성 변화는 로봇의 불안정한 구동을 유발시킨다[3]. 또한 점착 특성의 변화로 인한 공전 현상(Slip phenomena : 空轉) 때문에 로봇의 자기 위치 식별 및 정확한 목표 지점으로의 이동은 제한된다. 재점착 제어에 관한 기존 연구는 전기 기차나 자동차와 같은 대형 시스템에 대해 진행되어 왔으나, 지능형 로봇의 발전 추세에 따라 로봇의 구동에 있어서 안정한 동작에 대한 정밀 제어의 필요성이 증대되고 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위해서 본 논문에서 제안하는 바는, 첫째로 점착력 추정의 문제점을 극복하기 위해서 외부 외란과 모델링 불확실성을 보상하기 위한 외란 관측기를 적용한다[3][4]. 외란 관측기는 모터의 각속도와 구동 토크의 정보를 이용하여 점착력 계수를 추정한다. 두 번째로는 고전적인 PI 제어기를 대체하기 위해 이동 로봇의 특성을 반영한 TS(Takagi-Sugeno) 모델 기반 재점착 제어기를 구성한다. 퍼지 제어 이론은 제어 대상 플랜트의 정확한 수학적인 모델이 불필요하고 강인한 특성과 구현이 용이하도록 한다[5]. 안정적인 구동 토크의 전달을 위해 재점착(Re-adhesion : 再粘着) 상태를 유지하고, 공전 제거 후 최대 점착력(Adhesion force : 粘着力)으로 점착력을 회복시키며, 구동 토크 손실을 최소화하기 위해 최대 점착력에서 구동 토크를 제어하도록 하였다[4]. 마지막으로 퍼지 모델을 설계하기 위해 FCM (Fuzzy c-mean clustering method)을 적용하여 비교 퍼지 집합과 제어 규칙을 결정하고 퍼지 제어기를 설계한다. 이러한 제어 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 기존 알고리즘과 비교·분석을 한다.

* 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 敎授·工博
*** 金 眞 煥 : 仁荷工業專門大學 電氣情報科學科 助敎授·工博

2. 점착력 특성

점착력은 바퀴와 바닥 사이에 작용하는 힘으로 로봇의 무게와 점착력 계수와의 함수로 정의된다. 또 점착력 계수는 바닥 면의 조건에 따라 달라지는 특성이 있으며 비선형적 요소로써 추정이 곤란하다. 뿐만 아니라 바퀴와 바닥면의 재질 차이라는 물리적 특성에 의해 필연적으로 바퀴와 로봇의 속도는 상대적인 속도 차이가 발생하고, 이 차이를 공전 속도(Slip velocity)라고 한다. 바퀴와 로봇의 속도가 같으면 공전 속도는 이상적으로 '0'이 되어서, 공전 현상은 발생하지 않는다. 이동 로봇의 경량화와 상대적으로 감소한 점착력에 비해 구동 토크는 증가하는 추세로 인해 공전 현상의 영향은 더 커지고 있다.

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

3. TS 퍼지 모델을 이용한 재점착 제어기 설계

공전의 검출에 있어서 공전 속도나 모터의 가속도를 검지하여 공전을 검출하는 방식이 있으나, 검지의 지연이나 시스템의 오차로 인해 재점착 제어 특성이 저하된다[6][7]. 따라서 공전의 검출에 있어서 공전 가속도에 해당되는 점착력 계수의 미분치를 제어 입력으로 사용한다. 이로써 점착력의 감소 및 증가의 크기를 추정 점착력 계수에 의해 결정함으로써 재공전(Re-slip : 再空轉)의 발생빈도를 줄이고 구동 토크의 손실을 감소시켜 최대 점착력을 이용할 수 있다[6]. 일반적으로 공전 속도에 대한 점착력 계수는 하나의 최대점이 존재한다. 따라서 $d\mu(v_s)/dv_s$=0의 관계를 통해 최대 점착력 계수를 구할 수 있다. 그러나 센서의 정밀도가 낮기 때문에 계산된 속도는 정확도가 떨어지고, 이러한 속도로부터 구한 공전 속도 미분치는 잡음에 극히 민감하게 된다. 따라서 최대 점착력 계수는 공전 속도에 대한 점착력의 미분치가 '0'인 부분을 구하는 것이므로 분자인 점착력 계수의 시간 미분치가 '0'인 부분을 구하는 것이 효율적이다[8].

공전 현상은 점착력을 저하시켜서 구동력의 전달 특성을 저하시키는데, 공전 속도는 구동 토크를 점착력 이하로 감소시키면 제거가 가능하다[9]. 이를 위해 최대 점착력 점에서 구동 토크를 제어하는 것이 가장 효율적이다. 구동 토크가 최대 점착력 계수 $\mu(v_s)_{max}$에 해당하는 토크보다 크게 되면 공전 현상이 생긴다[3]. 즉, $d\mu(v_s)/dt$>0을 유지하도록 하여야 하고, 이 관계는 로봇의 구동 조건과 범위 및 제어 구간을 의미한다[3][4][9].

그림 1과 같이 퍼지 제어기의 입력은 구동 토크와 점착력 계수의 미분치로 선정하였다. 구동 토크의 크기에 따라 공전의 영향과 제어기의 출력이 달라지고, 점착력 계수의 미분치에 따라 제어기의 동작 시점이 결정되기 때문이다. 퍼지 제어기의 출력이 음이 되는 경우도 있으므로 절체기(Slope selector)에 의해 퍼지 제어기 출력을 조절한다.

Takagi-Sugeno(TS) 퍼지 모델을 이용한 제어 방법은 비선형 시스템을 선형 시스템으로 근사화하여 이들을 퍼지 추론을 이용하여 융합함으로 비선형 시스템을 표현한다[5][10][11]. 이 모델의 장점은 후건부의 구성이 선형 방정식 형태로 구성되어 있어 엄밀한 수학적 성능 및 안정성 증명이 가능하다. 또한 퍼지 규칙의 수가 선형 방정식의 수로 되어 전체적인 구성이 간단해지는 장점이 있다.

FCM 알고리즘은 각 데이터와 각 클러스터 중심과의 거리를 고려한 목적함수를 최소화 할 수 있도록 데이터 집합을 분류하는데, 반복 횟수와 목적함수를 최소화하고 클러스터의 크기를 동일하게 분할하기 위한 최적의 클러스터 수를 결정해야한다. 클러스터의 수는 소속 함수(Membership function : MF)의 수를 결정하고, 이를 통해 결과적으로 규칙의 수를 최종 결정하게 되는 요소이다. 구동 토크-제어기 출력 관계와 점착력 계수 미분치-제어기 출력 관계에 있어 공통적으로 최적 조건은 클러스터가 4개의 경우에 반복 횟수와 목적함수가 최소화된다. T_m-T_C와 $d\mu/dt$-T_C의 개별 클러스터에 해당하는 방정식 및 상수를 서로 결합하여 TS 퍼지 모델링을 하고, 이를 통해 표 2와 같이 후건부의 언어적 형태의 소속 함수 대신에 후건부 변수들의 선형 결합에 의한 방정식의 형태인 TS 모델을 적용한다[10][11]. 표 1은 퍼지 제어기의 제어 규칙을 나타내며 구동 토크가 크거나 공전이 검출되었을 때에 감소 지령치가 크도록 설계하였다. 또한 비교 퍼지 집합을 기준으로 하여 적절히 튜닝 하여 최종적으로 그림 2의 최적의 소속 함수를 결정하였다.

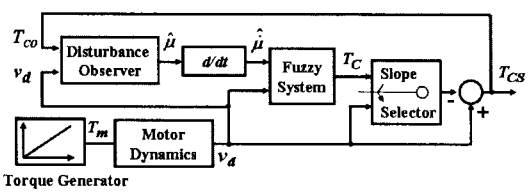


그림 1 퍼지 제어기를 이용한 재점착 제어 블록도

4. 성능 평가 및 결과 분석

그림 3은 퍼지 제어기에 의한 재점착 제어의 결과를 나타낸다. 15초에서 v_s가 급격히 상승하고 $d\mu/dt$<0이 됨으로, 공전이 검지되었을 때에 순시적으로 구동 토크를 감소시킴으로 공전 속도를 최소화시킨다. 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 15~16초에서 제어기 출력이 구동 토크에 비해 커질 때에는 구동 토크의 증가 기울기를 변화시켜서 성능을 보다 향상시켰다.

퍼지 제어기의 후건부를 TS 모델이 아닌 일반 모델을 적용했을 때는 현격한 공전의 감소를 일으키지 않아서 일정한 공전 속도를 유지할 수 는 있으나, 출발할 때에 불필요하게 구동 토크를 감소시키고, TS 모델과 비교하여 구동토크의 리플 성분이 많아 손실이 증가함을 확인할 수 있다. 또한 로봇 속도 증가도 10% 정도 저하된다.

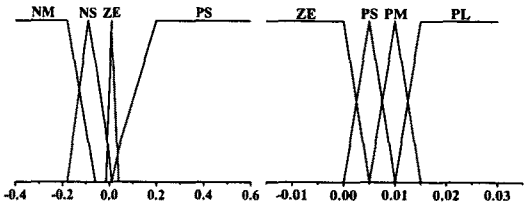
TS 모델 기반 퍼지 제어기의 성능을 기존 재점착 제어 방법과 비교하였을 때에, 로봇 속도의 증가 기울기가 거의 일정하고 구동 토크의 손실이 없으며 구동 토크와 공전 속도의 리플이 제거되었다. 또한 로봇의 속도도 4m/s로써 로봇의 안정한 구동과 더불어 제어 효율 측면에서도 우수함을 알 수 있다. 또한 로봇 속도 대비 공전 속도의 비율이 3~12%에서 퍼지 제어기의 경우에는 2~5%로 감소하여 공전 현상도 효과적으로 제거하였다[9].

표 1 퍼지 제어 규칙

$T_C(y)$		$T_m(x_1)$			
		ZE	PS	PM	PL
$d\mu/dt$ (x_2)	NM	PS^2	PS^2	PM^3	PL^4
	NS	ZE^1	PS^2	PS^2	PM^3
	ZE	ZE^1	ZE^1	PS^2	PS^2
	PS	ZE^1	ZE^1	ZE^1	PS^2

표 2 T_C에 대한 Takagi-Sugeno 퍼지 모델링

구 분	표 현	후건부
1	T_C is ZE	0.0267
2	T_C is PS	$2.788T_m$ + 0.0022
3	T_C is PM	$1.723T_m$ + 0.0048114
4	T_C is PL	0.0234036



(a) 구동 토크(T_m)의 소속 함수 (b) 점착력 계수 미분치 ($d\mu/dt$)의 소속 함수

그림 2 소속 함수

기존의 순시 견인력과 패턴에 의한 재점착 제어는 이동 로봇의 작은 관성 모멘트와 동적 특성으로 인해서 구동 토크의 손실이 커지고, 제안된 제어 방법이 적용이 되지 않음을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 급격히 회복되는 구동력으로 인해 소형 로봇의 불안정한 주행을 유발한다. 또한 관성 모멘트가 작은 이동 로봇의 동적 특성으로 인해 기존 논문에서 제안된 축차적인 구동 토크 제어 또는 지수 함수적인 패턴 제어가 이루어지지 않는다. 기존 연구에서의 PI 제어기에 의한 재점착 제어는 대형 시스템과는 동적 특성이 다른 경량의 이동 로봇에는 적용이 어려움을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 이동 로봇에 적합한 추정 점착력 계수를 이용한 퍼지 기반의 재점착 제어기를 제안한다. 점착력 계수 추정을 위해 외란 관측기를 사용하고, 추정한 점착력 계수의 미분치를 이용하여 퍼지 제어기에 의한 구동 토크를 제어한다. 이를 위해 최대 점착력에 해당하는 구동 토크를 유지하며, 시스템의 내부 파라미터에 영향을 받지 않는 점착력 계수를 추정하여 견실한 제어가 되도록 한다. 또한 최적의 공전 속도에 해당하는 구동 토크를 결정하고, 공전 방지 및 재점착 상태를 유지한다. 이동 로봇의 동적 특성을 고려하여 제어기를 설계하고, 입·출력 관계를 통한 클러스터링 기법을 통해 퍼지 모델을 설계하며, 클러스터링 수에 의해 소속 함수와 퍼지 규칙을 결정한다. 제안된 TS 퍼지 모델 기반의 제어기의 성능은 공전 현상에 의한 점착력 계수의 변화에도 로봇의 속도는 직선적으로 증가함을 통해 확인한다. 또한 기존 PI 제어기 기반 재점착 제어에서 구동 토크의 급격한 감소로 인해 야기되는 구동 토크의 손실과 불안정성이 제거되었고, 이를 통해 본 연구의 타당성을 입증한다.

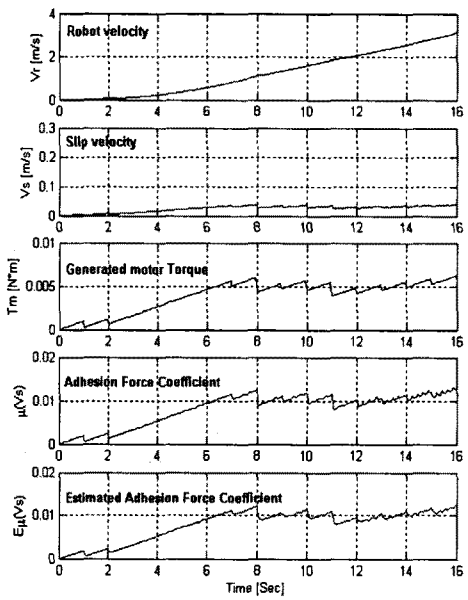


그림 3 제안한 TS 모델 퍼지 제어기의 제어 시뮬레이션 결과

참 고 문 헌

[1] Nakju Doh, et al., "Accurate Relative Localization Using Odometry Error Model", in *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1606-1612, 2003.

[2] J. Borenstein and L. Feng, "Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, pp. 869-880, 1997.

[3] K. Ohishi, 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.

[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] 장욱, 주영훈, 박진배, "TS 퍼지 모델을 이용한 최적 제어기 설계 및 비선형 시스템에의 응용", 대한전기학회 논문지, 제49D권, pp. 68-73, 2000.

[6] 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.

[6] 서광덕, "견인능력 향상을 위한 추정점착력을 이용한 점착제어기법에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제48B권, 12호, pp. 709-714, 1999.

[7] 황돈하 외, "유도 전동기 병렬 제어형 고속전철 추진시스템의 혼합형 재점착 제어기법", 대한전기학회 논문지, 제51B권. 1호, 2002.

[8] 김우석 외, "최대점착력 추정을 이용한 철도차량의 재점착 제어 성능 개선", 대한전기학회 논문지, 제49B권, 1호, pp. 32-39, 2000.

[9] 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.

[10] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, Addison-Wesley, 1998.

[11] M. Sugeno and T. Yasukawa, "A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 1, No. 1, pp. 7-31, 1993.