

점착력 계수 추정을 이용한 이동 로봇의 퍼지 재점착 제어기 설계

Design of a Re-adhesion Controller using Fuzzy Logic with Estimated Adhesion Force Coefficient for Wheeled Robot

권 선 구*, 허 옥 열**, 김 진 환***

(Sun-Ku Kwon, Uk-Youl Huh, Jin-Hwhan 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 a slip state. 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 weigh. Secondly, proposed fuzzy logic applied by 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. In additionally, this algorithm controls recovered driving torque for the restrain the re-slip. The proposed fuzzy logic controller(FLC) is pretty useful with prevention of the slip phenomena through that compare fuzzy with PI control for the controller performance in the re-adhesion control strategy. These procedures are implemented using a Pioneer 2-DXE wheeled robot parameter.

Key Words : Mobile Robot, Adhesion Force Coefficient Estimation, Fuzzy Logic Controller

1. 서 론

가정용 로봇의 발전 및 수요의 급증에 따라 실내 환경에서 이동 로봇의 주행에 대한 연구에서는 센서 융합(Sensor fusion)의 기술 없이 위치센서[Encoder]를 사용함에 따른 오차를 보상하는 방식을 취해왔다[1]. 이러한 센서의 부정확함에 의한 오차와 로봇의 구동에 있어서 바퀴와 바닥의 상관관계에 따른 점착 특성 변화는 로봇의 불안정한 구동을 유발하고, 자기 위치 식별은 제한시킨다[2]. 재점착 제어에 관한 기존 연구는 전기 기차나 자동차와 같은 대형 시스템에 대해 진행되어 왔으나, 지능형 로봇의 발전 추세에 따라 로봇의 구동에 있어서 정밀 제어의 필요성이 증대되고 있다.

제어기 설계 측면에서 기존 추정 점착력 계수(Adhesion force coefficient : AFC)를 이용한 순시 재점착 제어와 미리 설정한 재점착력 감소 패턴에 의한 공전검지 및 패턴에 의한 방법에 대한 연구가 진행되었다[3][4]. 그러나 경량에 비해 비교적 큰 구동 토크로 동작하는 이동 로봇의 동적 특성을 고려하지 않고, 고전적인 제어 기술을 사용한 제어기의 성능으로는 만족시킬 수 없는 정밀도가 요구된다.

이러한 문제점을 극복하기 위해서 본 논문에서 제안하는 바는 먼저 외부 외란과 모델링 불확실성을 보상하기 위한 외란 관측기를 적용한다[2][5]. 고전적인 PI 제어기를 대체하기 위해 이동 로봇의 특성을 반영한 TS(Takagi-Sugeno) 퍼지

모델 기반 퍼지 제어기를 적용한다. 재점착(Re-adhesion : 再粘着) 상태를 유지하고, 공전(Slip phenomena : 空轉) 제거 후 최대 점착력(Adhesion force : 粘着力)으로 점착력을 회복 시키며, 구동 토크 손실을 최소화하기 위해 최대 점착력에서 구동 토크를 제어하도록 하였다[5]. 마지막으로 FCM(Fuzzy c-mean clustering method)을 적용하여 제어 규칙과 비교 퍼지 집합을 결정하고 퍼지 제어기를 설계한다.

2. 점착력 특성 및 관측기 설계

점착력은 바퀴와 바닥 사이에 작용하는 힘으로 로봇의 무게와 점착력 계수와와의 함수로 정의된다. 또 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[2].

바퀴와 바닥의 조건에 따라 안정적인 점착 구간(Adhesion Area)과 불안정한 공전 구간(Slip Area)으로 구분이 된다[5]. 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, 이 경계에서 최대의 구동 토크를 전달할 수 있다.

본 논문은 점착력 계수 추정을 위해 외란 관측기를 적용하

저자 소개

* 學生會員 : 仁荷大學校 電氣工學科 碩士課程

** 終身會員 : 仁荷大學校 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 仁荷工業專門大學 電氣情報科學科 助教授 · 工博

표 1 Pioneer 2-DXE 사양

기어비 (R_g)	19.7
구동 바퀴 반지름 (r)	0.191 [m]
구동 바퀴의 관성 모멘트(J)	7.06×10^{-6} [kg · m ²]
로봇의 축 하중 (W)	4.5 [kg]
중력 가속도 (g)	9.8 [m/s ²]
구동 바퀴의 무게 (M)	0.5 [kg]

고 관련된 구체적인 수학적 모델링은 생략하기로 한다[6]. 관측기는 입력 T_m 과 ω_m 으로 접착력 계수의 추정값을 출력으로 나타낸다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 ActivMedia사 Pioneer 2-DXE 로봇의 사양을 나타낸다.

3. TS 퍼지 모델을 이용한 제어기 설계

공전의 검출에 있어서 공전 가속도에 해당되는 접착력 계수의 미분치를 제어 입력으로 사용한다. 이로써 재접착력의 감소 및 증가의 크기를 추정 접착력 계수에 의해 결정함으로써 재공전(Re-slip : 再空轉)의 발생빈도를 줄이고 구동 토크의 손실을 감소시켜 최대 접착력을 이용할 수 있다[3][6].

제어기 설계에 있어서 비교 모델을 PI 제어기로 하고 제어기의 출력을 T_C 라고 하면 식 (9), (10)처럼 표현이 된다. T_{CS} 은 공전 현상이 발생할 때의 구동 제어 토크이다. 즉, 공전이 발생하면 적절한 제어기 출력을 결정하여 모터 출력을 감소시킨다.

$$\bar{T}_m = T_m - T_C \tag{9}$$

$$T_C = \frac{K_I + K_{PS}}{s} \cdot s\hat{\mu}(v_x) \tag{10}$$

Takagi-Sugeno(TS) 퍼지 모델을 이용한 제어 방법은 비선형 시스템을 선형 시스템으로 근사화하여 퍼지 추론을 이용하여 융합함으로써 비선형 시스템을 표현한다[7][8]. 먼저 TS 퍼지 모델을 설계하기 위해 전건부(Premise) 변수와 퍼지 집합(Fuzzy sets)을 결정한다[7]. 이런 과정을 위해 클러스터링이 필요한데, 기본 개념은 데이터 공간상에서 데이터가 밀집한 영역과 그렇지 않은 영역에 대하여 서로 다른 분할을 통하여 표 2와 같이 적절한 퍼지 제어 규칙을 생성하는 것이다[9]. 따라서 클러스터링을 통해 입 · 출력 관계의 규명하고 규칙의 수와 입력 데이터 공간에서의 비교 퍼지 집합을 결정할 수 있다. 이러한 규칙의 수는 입력 데이터 공간의 분할 수를 뜻하는 것이고, 비교 퍼지 집합을 이용하여 퍼지 집합의 초기치를 결정하게 된다. 이러한 절차는 FCM(Fuzzy c-mean clustering method)을 적용해서 간략화 시키도록 한다[9].

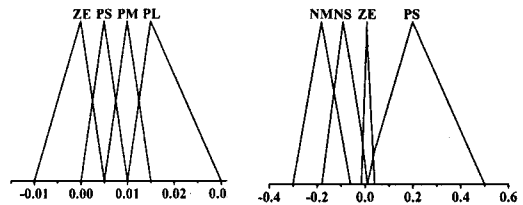
FCM 알고리즘은 각 데이터와 각 클러스터 중심과의 거리를 고려한 목적함수를 최소화 할 수 있도록 데이터 집합을 분류하는데, 반복 횟수와 목적함수를 최소화하고 클러스터의 크기를 동일하게 분할하기 위한 최적의 클러스터 수를 결정해야한다. 클러스터의 수는 소속 함수(Membership function : MF)의 수를 결정하고, 이를 통해 결과적으로 규칙의 수를 최종 결정하게 되는 요소이다. 구동 토크 - 제어기 출력 관계와 표 2 퍼지 제어 규칙 및 Takagi-Sugeno 퍼지 모델링

규칙	전건부 (Premise)	후건부 (Consequent)
R ¹	$T_m(x_1)$ is ZE and $d\mu/dt(x_2)$ is NS	T_C is ZE (=0.0267)
R ²	$T_m(x_1)$ is ZE and $d\mu/dt(x_2)$ is ZE	
R ³	$T_m(x_1)$ is ZE and $d\mu/dt(x_2)$ is PS	
R ⁴	$T_m(x_1)$ is PS and $d\mu/dt(x_2)$ is ZE	
R ⁵	$T_m(x_1)$ is PS and $d\mu/dt(x_2)$ is PS	
R ⁶	$T_m(x_1)$ is PM and $d\mu/dt(x_2)$ is PS	
R ⁷	$T_m(x_1)$ is ZE and $d\mu/dt(x_2)$ is NM	T_C is PS (=2.788x ₁ +0.0022)
R ⁸	$T_m(x_1)$ is PS and $d\mu/dt(x_2)$ is NM	
R ⁹	$T_m(x_1)$ is PS and $d\mu/dt(x_2)$ is NS	
R ¹⁰	$T_m(x_1)$ is PM and $d\mu/dt(x_2)$ is NS	
R ¹¹	$T_m(x_1)$ is PM and $d\mu/dt(x_2)$ is ZE	
R ¹²	$T_m(x_1)$ is PL and $d\mu/dt(x_2)$ is ZE	
R ¹³	$T_m(x_1)$ is PL and $d\mu/dt(x_2)$ is PS	T_C is PM (=1.723x ₁ +0.0048114)
R ¹⁴	$T_m(x_1)$ is PM and $d\mu/dt(x_2)$ is NM	
R ¹⁵	$T_m(x_1)$ is PL and $d\mu/dt(x_2)$ is NS	T_C is PL (=0.0234036)
R ¹⁶	$T_m(x_1)$ is PL and $d\mu/dt(x_2)$ is NM	

접착력 계수 미분치 - 제어기 출력 관계에 있어 공통적으로 클러스터가 4개의 경우에 반복 횟수와 목적함수가 최소화됨을 확인할 수 있다.

따라서 제어기 입력인 구동 토크 x_1 (T_m)와 접착력 계수 미분치 x_2 ($d\mu/dt$) 및 제어기 출력인 y (T_C) 사이의 상관관계를 4개의 클러스터로 구분한다. 개별 클러스터의 중심점과 각각의 데이터 사이의 거리를 확률변수로 표현하면 비교 퍼지 집합을 얻을 수 있다. 비교 퍼지 집합을 기준으로 하여 최적의 소속 함수를 결정하기 위해 적절히 튜닝 하여 최종적으로 그림 1의 소속 함수를 구하였다. 이를 통해 후건부의 언어적 형태의 소속 함수 대신에 후건부 변수들의 선형 결합에 의한 방정식의 형태인 TS 모델을 적용한다.

표 2는 퍼지 제어기의 제어 규칙을 나타내며 구동 토크가 크고 공전이 검출되었을 때에 감소 지령치가 크도록 설계하였다. 또한 $T_m - T_C$ 와 $d\mu/dt - T_C$ 의 개별 클러스터에 해당하는 방정식 및 상수를 서로 결합하여 TS 퍼지 모델링을 하였다.



(a) 구동 토크의 소속 함수 (b) 접착력 계수 미분치의 소속 함수

그림 1 소속 함수

4. 성능 평가 및 결과 분석

그림 2는 퍼지 제어기에 의한 재점착 제어의 결과를 나타낸다. 공전이 검지되었을 때에 순시적으로 구동 토크를 감소시킴으로 공전 속도를 최소화시킨다(15초). 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 때에는 구동 토크의 증가 기울기를 변화시켜서 성능을 보다 향상시켰다(15~16초).

TS 모델 기반 퍼지 제어기의 성능을 기존 재점착 제어 방법과 비교하였을 때에, 로봇의 속도의 증가 기울기가 거의 일정하고 구동 토크의 손실이 없으며 구동 토크와 공전 속도의 리플이 제거되었음을 확인할 수 있다. 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.

기존의 재점착 제어 방법들은 이동 로봇의 작은 관성 모멘트와 동적 특성으로 인해서 구동 토크의 손실이 커지고 제안된 제어 방법이 적용이 되지 않는다. 순시 견인력 제어 방법은 구동 토크의 손실이 크고, 구동 토크의 회복으로 인해 공전 속도가 증가하여 이동 로봇의 주행을 불안정하게 한다. 또한 패턴에 의한 재점착 제어는 공전의 영향을 최소화시켜 로봇을 안정적으로 구동시킬 수 있으나, 로봇 속도의 증가 속도가 너무 느려 비효율적이다. 또한 기존 논문에서 제안된 축차적인 구동 토크 제어 또는 지수 함수적인 패턴 제어가 이루어지지 않는다. 기존 연구에서의 PI 제어기에 의한 재점착 제어는 대형 시스템과는 동적 운동 특성이 다른 경량의 이동 로봇에는 적용이 어려움을 확인할 수 있다.

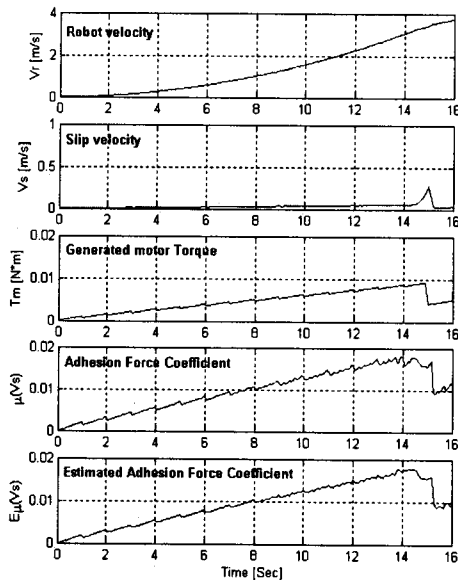


그림 2 TS 모델 기반 퍼지 제어기의 제어 시뮬레이션 결과

5. 결 론

본 논문에서는 이동 로봇에 적합한 외란 관측기에 의해 추정된 점착력 계수를 이용한 퍼지 제어기 기반 재점착 제어를 제안한다. 산업 현장에서 많이 사용되는 외란 관측기를 통해 점착력 계수 추정하고, 추정된 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 하였다. 또한 최적의 공전 속도에 해당하는 구동 토크를 결정하고, 공전 방지 및 재점착 상태를 유지하였다. 이동 로봇의 동적 특성을 고려하여 제어기를 설계하고, 입·출력 관계를 통한 클러스터링 기법을 통해 퍼지 모델을 설계하였으며 이를 통해 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 확인할 수 있다. 또한 기존 PI 제어기 기반 재점착 제어에서 구동 토크의 급격한 감소로 인해 야기되는 구동 토크의 손실과 불안정성이 제거되었고, 이를 통해 본 연구의 타당성을 입증하였다.

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] 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
- [3] 서광덕, "견인능력 향상을 위한 추정점착력을 이용한 점착제어기법에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 제48B권, 12호, pp. 709-714, 1999
- [4] 김우석 외, "최대점착력 추정을 이용한 철도차량의 재점착 제어 성능 개선," 대한전기학회 논문지, 제49B권, 1호, pp. 32-39, 2000
- [5] 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
- [6] 권선구 외, "퍼지 제어기를 이용한 이동 로봇의 재점착 제어," 대한전기학회 하계학술대회 논문집 D권, pp. 2423-2425, 2004
- [7] K. M. Passino and S. Yurkovich, Fuzzy Control, Addison-Wesley, 1998
- [8] 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
- [9] 김승석, 김성수, 유정용, "새로운 클러스터링 알고리즘을 적용한 향상된 뉴로-퍼지 모델링," 대한전기학회 논문지, 제53D권, pp. 536-543, 2004