

이동 로봇의 퍼지 재점착 제어기 설계

Design of a Fuzzy Re-adhesion Controller for Wheeled Robot

權 宣 九[†] · 許 旭 烈^{*} · 金 眞 煥^{**}

(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. In additionally, this algorithm adjusts the driving torque for restraining re-slip. 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. These procedures are implemented using a Pioneer 2-DXE wheeled robot parameter.

Key Words : Wheeled Robot, Re-adhesion Control, Disturbance Observer, 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 오차 또는 구동에 있어서 바퀴와 바닥의 상관관계에 따른 점착 특성 변화는 로봇의 불안정한 구동을 유발시킨다[3][4][5]. 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.

기존 연구에서는 제어 입력 결정에 대해서 칼만 필터를 이용한 상태 추정기 또는 전차원 관측기에 의한 점착력 추정 방법을 이용하거나 속도정보를 이용한 기준속도 생성 방법을 적용한 제어에 대한 연구가 진행되었다[6][7][8]. 그러나 관측기 설계 파라미터는 실제 시스템에서 정확히 알아내기 어렵고, 또 기준속도 생성 방법에서는 속도 정보의 지연을 네트워크 시스템으로 해결하고자 하지만 균일한 제어 특성을 얻기 어려우며 이동 로봇에는 적용하기 어려운 방법이다[7][8][9].

제어기 설계 측면에서 기존의 추정 점착력 계수(Adhesion force coefficient : AFC)를 이용한 순시 재점착 제어는 추정된 점착력 계수를 재점착 제어의 주 요소로 사용하며, 마찰력 급변시의 점착특성 향상을 위하여 공전요소에 의한 제어를 보조적으로 사용한다. 공전검지 및 패턴에 의한 방법은 공전이 발생하면 미리 설정한 재점착력 감소 패턴에 따라 구동력을 줄여 공전을 제거하고, 재점착을 감지하면 구동력을 원상태로 회복하는 방법이다[6][7]. 구체적인 방법에 있어서는 구동 토크를 직선적으로 감소시키다가 재점착이 감지되면 회복 구동 토크를 직선적으로 상승시키는 방법이 제안되었다[9][10]. 일정 크기(88%)로 감소된 구동력을 일정시간 유지한 후 회복시키는 방법[10]과 2차 지수 함수에 의해 제어치 감소분을 결정하는 방법도 제안되었다[6]. 그러나 경량에 비해 비교적 큰 구동 토크로 동작하는 이동 로봇의 동적 특성을 고려하지 않고, 고전적인 제어 기술을 사용한 제어기로는 정밀한 이동 로봇의 재점착 제어의 요구 성능을 만족시키기 어렵다.

이러한 문제점을 극복하기 위해서 본 논문에서 제안하는 바는, 첫째로 점착력 추정의 문제점을 극복하기 위해서 외부 외란과 모델링 불확실성을 보상하기 위한 외란 관측기를 적용한다[4][10]. 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 수학적 모델이 불필요하고 강인한 특성과 구현이 용이하도록 한다[11]. 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

[†] 교신저자, 學生會員 : 仁荷大學校 電氣工學科 碩士課程
E-mail : withhim153@hanmail.net

^{*} 終身會員 : 仁荷大學校 電子電氣工學部 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
接受日字 : 2004年 11月 2日
最終完了 : 2004年 11月 26日

최소화하기 위해 최대 점착력에서 구동 토크를 제어하도록 하였다[10]. 마지막으로 퍼지 모델을 설계하기 위해 FCM (Fuzzy c-mean clustering method)을 적용하여 비교 퍼지 집합과 제어 규칙을 결정하고 퍼지 제어기를 설계한다[12]. 이러한 제어 알고리즘의 성능을 기존 알고리즘과 비교·분석하고, Pioneer 2-DXE 이동 로봇의 파라미터를 적용한 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

2. 이동 로봇의 바퀴 모델

2.1 점착력 특성

점착력은 바퀴와 바닥 사이에 작용하는 힘으로 로봇의 무게와 점착력 계수와와의 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.

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 사이에서 작용하는 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[3].

그림 1에서와 같이 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[9][13]. 그림 2는 바닥의 조건에 따른 점착력 계수의 변화를 나타낸 것이다[4]. 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.

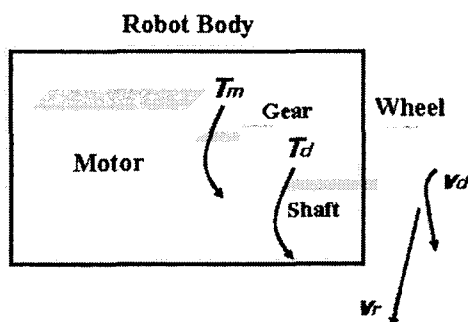


그림 1 구동부의 구성
Fig. 1 Configuration of driving part

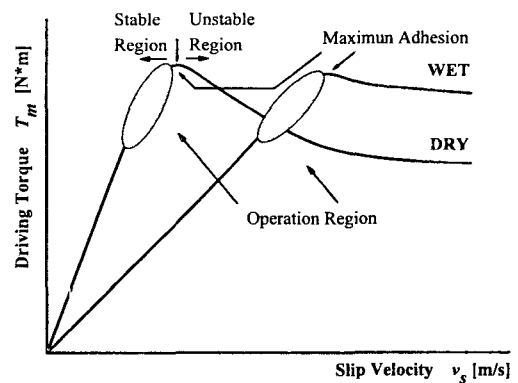


그림 2 공전 속도와 점착력 특성 관계
Fig. 2 Relation between adhesion force and slip velocity

2.2 공전 현상 및 관측기 설계

본 논문에서는 구동 바퀴에 대한 모델을 통해 공전 현상에 대한 분석을 하고, 이를 통해 관측기를 설계 및 재점착 제어기를 설계한다. 그림 3은 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.

$$v_d = v_r + v_s \tag{1}$$

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

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

여기서 점착력 F_{ad} 는 $\mu(v_s)Wg$ 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 은 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 은 바퀴의 반지름이다.

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)~(7)을 이용해 외란 관측기를 구성한다 [4][10][14].

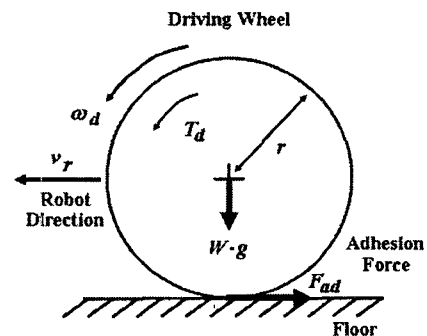


그림 3 이동 로봇의 공전 현상
Fig. 3 Slip phenomenon of wheeled robot

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

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

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

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

여기서 T_m 은 모터에서 발생하는 구동 토크, ω_m 은 모터의 각속도, R_g 는 기어비, J_m 은 모터의 관성력, F_t 는 구동력이다. 또 T_L 은 모터의 외란 토크, \hat{T}_L 은 추정된 외란 토크, $\hat{\mu}$ 는 추정된 점착력 계수, K 는 관측기 극점으로써 100[rad/s]에서 시뮬레이션을 하였다.

관측기는 입력 T_m 과 ω_m 으로 점착력 계수의 추정값을 출력으로 나타낸다. 관측기의 성능은 그림 4에서 추정값이 실제값을 정확하게 추정함을 통해 관측기 설계의 적합성을 확인하였다. 공전 현상은 공전 속도의 급격한 상승에 따라 로봇 속도의 증가율이 감소하여 16초에서 v_r 이 '0'이 되어서 결국에는 로봇이 정지하게 됨을 나타낸다. 또한 최대 점착력 계수를 경계로 안정 동작 구간과 불안정 동작 구간이 9초에서 나누어지며, $\mu(v_s)$ 의 미분치가 양에서 음으로 변화하면서 v_s 는 급격히 상승하고 v_r 의 증가율이 감소하게 됨을 확인할 수 있다.

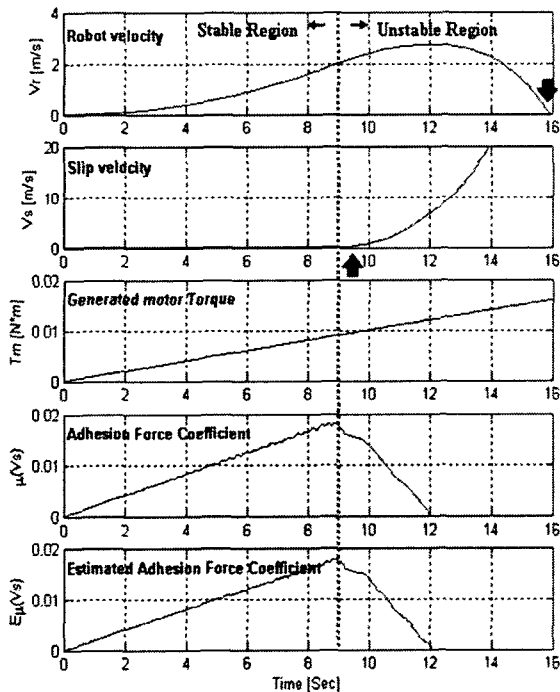


그림 4 외란 관측기에 의한 점착력 계수 추정 결과 (위로부터 로봇 속도, 구동 토크, 공전 속도, 실제 점착력 계수, 추정된 점착력 계수)

Fig. 4 Estimation results of AFC using disturbance observer (From top, robot velocity, slip velocity, generated motor torque, AFC, estimated AFC)

3. 퍼지 재점착 제어기 설계

3.1 점착력 계수 추정에 의한 재점착 제어

공전의 검출에 있어서 공전 속도나 모터의 가속도를 검지하여 공전을 검출하는 방식이 있으나, 검지의 지연이나 시스템의 오차로 인해 재점착 제어 특성이 저하된다[8][9]. 따라서 공전의 검출에 있어서 공전 가속도에 해당되는 점착력 계수의 미분치를 제어 입력으로 사용한다. 이로써 재점착력의 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 $d\mu(v_s)/dv_s=0$ 의 관계를 통해 최대 점착력 계수를 구할 수 있다. 점착력 계수에 대한 공전 속도의 미분은 식(8)과 같다. 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 식(8)의 분자인 점착력 계수의 시간 미분치가 '0'인 부분을 구하는 것이 효율적이다[7].

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

공전 현상은 점착력을 저하시켜서 구동력의 전달 특성을 저하시키는데, 공전 속도는 구동 토크를 점착력 이하로 감소시키면 제거가 가능하다[14]. 이를 위해 최대 점착력 점에서 구동 토크를 제어하는 것이 가장 효율적이다. 그림 2, 4에서 볼 수 있듯이 구동 토크가 최대 점착력 계수 $\mu(v_s)_{max}$ 에 해당하는 토크보다 크게 되면 공전 현상이 생긴다[4]. 즉, 그림 2와 식(8)에서 나타난 바와 같이 $d\mu(v_s)/dt > 0$ 을 유지하도록 하여야 하고, 이 관계는 로봇의 구동 조건과 범위 및 제어를 의미한다[4][10][14].

제어기 설계에 있어서 비교 모델을 PI 제어기로 하고 제어기의 출력을 T_{CS} 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.

$$T_{CS} = T_m - T_C \quad (9)$$

$$T_C = \frac{K_I + K_P s}{s} \cdot s \hat{\mu}(v_s) \quad (10)$$

그러나 그림 13, 14에 나타난 바와 같이, PI 제어기 기반의 재점착 제어는 구동 토크의 급격한 상승과 감소로 인해 발생하는 구동 토크의 리플(ripple) 성분으로 인한 손실과 성능 한계로 안정적인 주행을 보장할 수 없다. 이동 로봇의 특성상 잦은 단거리 주행에서의 빈번한 재점착 제어는 점착력이 저하되어 있는 경우 빠르게 회복하려는 구동력으로 인해 오히려 재공전의 발생 빈도를 높이는 요인이 된다[14]. 또한 PI 제어기는 비선형 시스템의 고성능 제어에서 많은 문제점이 나타나고 있으며, 특히 외란, 속도 및 부하 등의 파라미터가 변동할 경우 고성능 및 강인제어를 실현하기 어렵다[15].

또 검지의 지연이나 시스템의 오차와 무관한 점착력 계수의 미분치를 제어기 입력으로 사용하여 완전한 공전의 제거를 위한 구동 토크의 손실보다는 적정 공전 속도를 유지한 상태로 구동 토크를 제어하는 방식을 통해 급격한 공전 속도의 상승을 억제하는 것을 제어기 설계의 목적으로 한다. 또한 구동 토크의 크기에 따라 공전의 영향과 제어기의 지령치가 달라지고, 구동 토크를 공전이 발생할 때의 점착력 계수에 해당되는 토크 이하로 감소시킴으로써 공전이 제거되기 때문에 구동 토크를 제어기 입력으로 사용한다. 즉 공전 속도가 최적 공전 속도보다 작으면 점착력 미분치가 양이 되어 제어기 출력 지령치를 감소하여 최적 공전 속도 쪽으로 증가시키고, 역(逆)으로 공전 속도가 최적 공전 속도보다 크면 점착력 미분치가 제어기 출력을 최적 공전 속도 쪽으로 감소시킨다[7].

일반적으로 2개의 구동 바퀴와 추가되는 1개의 보조바퀴(Caster)로 구성된 이동 로봇의 특성으로 인해, 레일을 따라 움직이는 전기 기차나 전철으로 구동하는 전기 자동차와는 달리 개별 바퀴의 독립 구동으로 주행하는 이동 로봇의 특성을 고려해야한다. 기존의 연구는 각 바퀴의 점착력을 추정 한 후, 그 중 최소의 점착력을 나타내는 전동기의 출력 토크를 최대 점착력 근처에서 제어하였다[7][8]. 하지만 이동 로봇의 경우에 있어서 바퀴 각각의 공전 현상에 대해 고찰하지 않으면 정확한 목표 지점에서의 이동 및 자기 위치 인식은 불가능하다[1][2].

3.2 TS 퍼지 모델을 이용한 제어기 설계

그림 5에 표현된 퍼지 제어기를 이용한 재점착 제어는 점착력 계수의 감소가 감지되면 구동 토크의 감소를 통해 제어가 시작된다. 이 때에 감소되는 비율은 최적의 구동 토크로 감소시켜서 구동 토크 손실을 최소화하도록 결정하고, 회복시에는 재점착 상태를 유지하며 구동 토크를 상승시킨다. 특히 반복적인 공전으로 인해 제어기의 출력이 커질 경우에는 구동 토크의 상승 기울기를 변화시키는 방법을 사용한다. 이러한 퍼지 제어기를 이용하여 PI 제어기에 의한 재점착 제어보다 향상되고 발전된 재점착 제어 방식을 제안한다[5].

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.

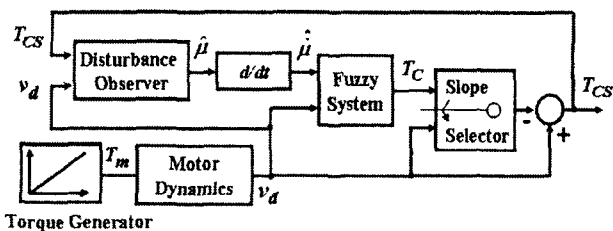


그림 5 퍼지 제어기를 이용한 재점착 제어 블록도
Fig. 5 Block diagram of re-adhesion control using fuzzy logic controller

Takagi-Sugeno(TS) 퍼지 모델을 이용한 제어 방법은 비선형 시스템을 선형 시스템으로 근사화하여 이들을 퍼지 추론을 이용하여 융합함으로써 비선형 시스템을 표현한다[11][16][17][18]. 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[19]. 식 (11)은 TS 모델의 일반적인 퍼지 표현식을 나타낸다.

$$R^i : \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^i \\ \text{THEN } y_i = p_0^i + p_1^i x_1^i + \dots + p_n^i x_n^i \quad (11)$$

여기서 R^i 는 i 번째 퍼지 추론 규칙, $x_1 \dots x_n$ 는 전건부 변수, $A_1^i \dots A_n^i$ 는 퍼지 집합, $p_0^i \dots p_n^i$ 는 후건부 변수, y_i 는 제어기 출력이다.

먼저 TS 퍼지 모델을 설계하기 위해 식 (11)과 같은 전건부(Premise) 변수와 퍼지 집합(Fuzzy sets)을 결정한다[16]. 이러한 비교 퍼지 집합을 결정하기 위해 클러스터링이 필요한데, 기본 개념은 데이터 공간상에서 데이터가 밀집한 영역과 그렇지 않은 영역에 대하여 서로 다른 분할을 통하여 표 1과 같은 적절한 퍼지 제어 규칙을 생성하는 것이다[19]. 결과적으로 클러스터링을 통해 입·출력 관계를 규명하고 규칙의 수와 입력 데이터 공간에서 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 한다[12].

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. 그림 6, 7은 최적의 클러스터 수를 찾기 위한 과정을 나타내며, 구동 토크-제어기 출력 관계와 점착력 계수 미분치-제어기 출력 관계에 있어 공통적으로 최적 조건은 클러스터가 4개의 경우에 반복 횟수와 목적함수가 최소화됨을 확인할 수 있다.

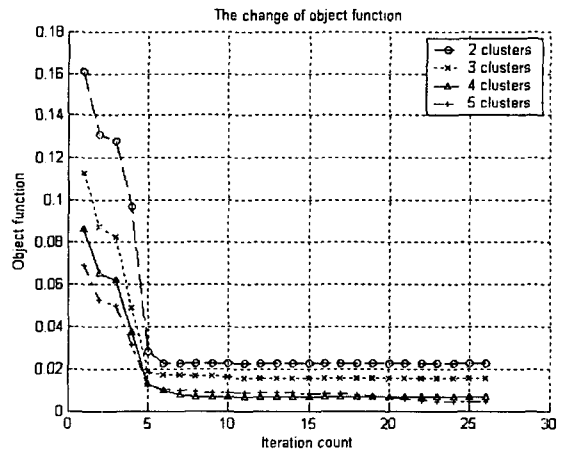


그림 6 구동 토크-출력 관계의 목적함수 변화
Fig. 6 The change of object function (T_m-T_c)

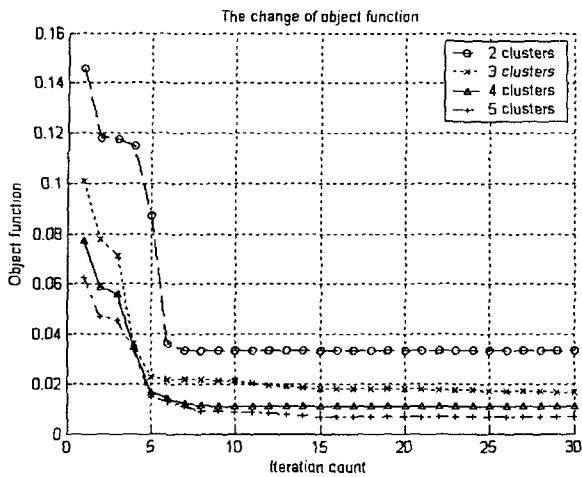


그림 7 점착력 계수 미분치-출력 관계의 목적함수 변화
Fig. 7 The change of object function ($d\mu/dt-T_c$)

따라서 제어기 입력인 구동 토크 $x_1(T_m)$ 와 점착력 계수 미분치 $x_2(d\mu/dt)$ 및 제어기 출력인 $y(T_c)$ 사이의 상관관계를 4개의 클러스터로 구분한다. 그림 8은 FCM을 이용하여 클러스터링한 결과를 나타낸다. 중심점과 각각의 데이터 사이의 거리를 확률변수로 표현하면, 그림 9의 비교 퍼지 집합을 얻을 수 있다. 또한 비교 퍼지 집합을 기준으로 하여 최적의 소속 함수를 결정하기 위해 적절히 튜닝 하여 최종적으로 그림 10의 소속 함수를 구하였다. 또한 그림 8에서 점선으로 표시된 T_m-T_c 와 $d\mu/dt-T_c$ 의 개별 클러스터에 해당하는 방정식 및 상수를 서로 결합하여 TS 퍼지 모델링을 하였다. 이를 통해 표 2와 같이 후건부의 언어적 형태의 소속 함수 대신에 후건부 변수들의 선형 결합에 의한 방정식의 형태인 TS 모델을 적용한다[16][17][18]. 표 1은 퍼지 제어기의 제어 규칙을 나타내며 구동 토크가 크고 공전이 검출되었을 때에 감소 지령치가 크도록 설계하였다.

표 1 퍼지 제어 규칙

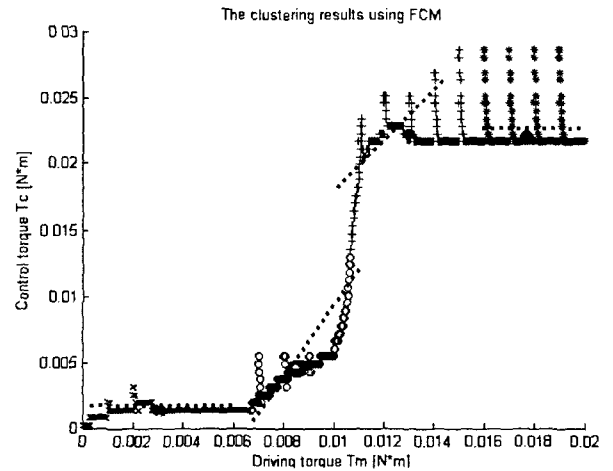
Table 1 Rule base of fuzzy logic

$T_c(y)$		$T_m(x_1)$			
		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

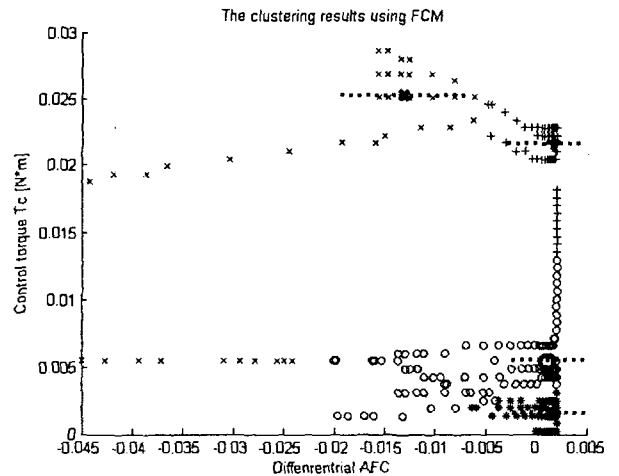
표 2 T_c 에 대한 Takagi-Sugeno 퍼지 모델링

Table 2 Takagi-Sugeno fuzzy modeling of T_c

구분	표현	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

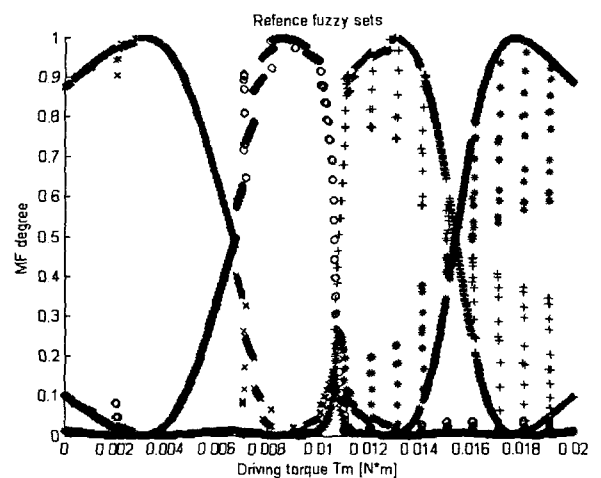


(a) 구동 토크-제어기 출력(T_m-T_c)의 클러스터링 결과
(O, X, +, * : 개별 클러스터의 중심점)

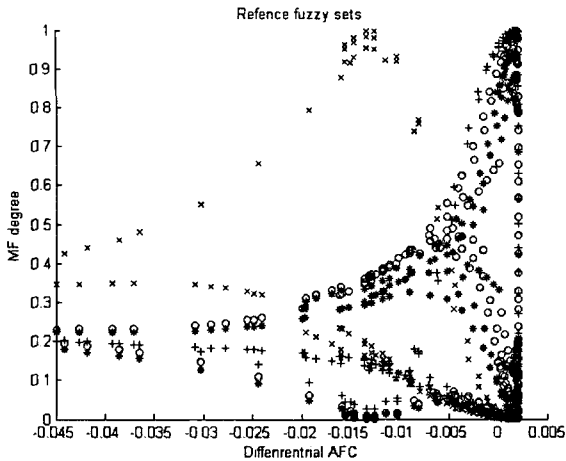


(b) 점착력 계수 미분치-제어기 출력($d\mu/dt-T_c$)의 클러스터링 결과
(O, X, +, * : 개별 클러스터의 중심점)

그림 8 FCM을 이용한 클러스터링 결과
Fig. 8 The clustering results using FCM



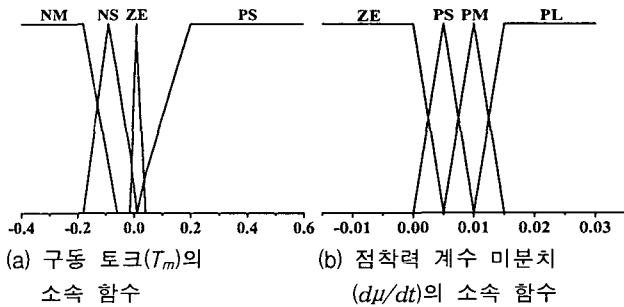
(a) 구동 토크-제어기 출력(T_m-T_c)의 비교 퍼지 집합



(b) 점착력 계수 미분치-제어기 출력($d\mu/dt-T_c$)의 비교 퍼지 집합

그림 9 비교 퍼지 집합

Fig. 9 Reference fuzzy sets



(a) 구동 토크(T_m)의 소속 함수

(b) 점착력 계수 미분치($d\mu/dt$)의 소속 함수

그림 10 소속 함수

Fig. 10 Membership functions

4. 성능 평가 및 결과 분석

그림 11는 퍼지 제어기에 의한 재점착 제어의 결과를 나타낸다. 15초에서 v_s 가 급격히 상승하고 $d\mu/dt < 0$ 이 됨으로, 공전이 검지되었을 때 순서적으로 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.

그림 12는 퍼지 제어기의 후건부를 TS 모델이 아닌 일반 모델을 적용했을 때와의 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 현격한 공전의 감소를 일으키지 않아서 일정한 공전 속도를 유지할 수는 있으나, 출발할 때에 불필요하게 구동 토크를 감소시키고, TS 모델과 비교하여 구동토크의 리플 성분이 많아 손실이 증가함을 확인할 수 있다. 또한 16초에서 로봇 속도 증가도 10% 정도 저하된다.

TS 모델 기반 퍼지 제어기의 성능을 그림 13, 14에 나타난 기존 재점착 제어 방법과 비교하였을 때에, 로봇 속도의 증가 기울기가 거의 일정하고 구동 토크의 손실이 없으며 구동 토크와 공전 속도의 리플이 제거되었음을 확인할 수 있

다. 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[14].

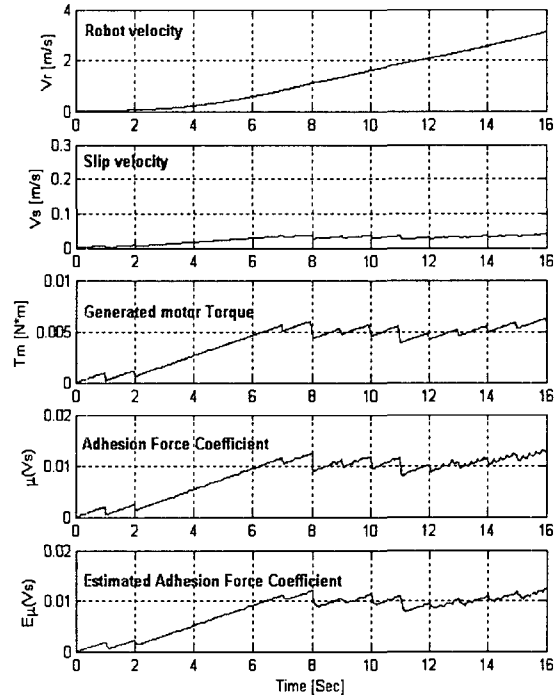


그림 11 제한한 TS 모델 퍼지 제어기의 제어 시뮬레이션 결과
Fig. 11 Simulation results of TS fuzzy logic controller

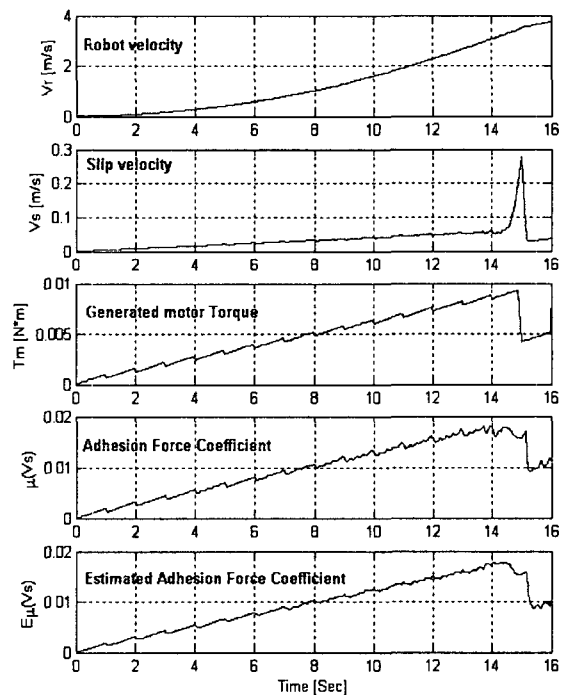


그림 12 일반 퍼지 제어기에 의한 제어 시뮬레이션 결과
Fig. 12 Simulation results of fuzzy logic controller

그림 13과 14는 각각 순시 견인력과 패턴에 의한 재점착 제어 방법을 이동 로봇에 적용하여 각각 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 앞서 말한 기존의 재점착 제어 방법들은 이동 로봇의 작은 관성 모멘트와 동적 특성으로 인해서 구동 토크의 손실이 커지고, 제안된 제어 방법이 적용이 되지 않음을 확인할 수 있다. 그림 13에서 순시 견인력 제어 방법은 구동 토크의 손실이 크고, 구동 토크의 회복으로 인해 공전 속도가 증가하여 이동 로봇의 주행을 불안정하게 함을 확인할 수 있다. 이것은 일단 공전 현상이 발생하면 제어가 힘들고, 발생된 공전 속도가 증가하면 급격한 구동 토크의 감소를 통해서만 제어가 가능하기 때문이다. 따라서 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 이동 로봇에 있어서 이 방법은 구동 토크의 손실이 크고, 급격히 회복되는 구동력으로 인해 소형 로봇의 불안정한 주행을 유발한다.

그림 14에서 나타난 패턴에 의한 재점착 제어는 공전의 발생에 따라 구동 토크를 감소시켜 공전의 영향을 최소화시켜 로봇을 안정적으로 구동시킬 수 있으나, 로봇 속도가 너무 느려 비효율적이다. 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. 표 3은 시뮬레이션에 사용된 ActivMedia사 Pioneer 2-DXE 로봇의 사양을 나타낸다.

표 3 Pioneer 2-DXE 사양

Table 3 Specification of Pioneer 2-DXE

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]

5. 결 론

본 논문에서는 이동 로봇에 적합한 추정 점착력 계수를 이용한 퍼지 기반의 재점착 제어기를 제안한다. 점착력 계수 추정을 위해 외란 관측기를 사용하고, 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 건설한 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.

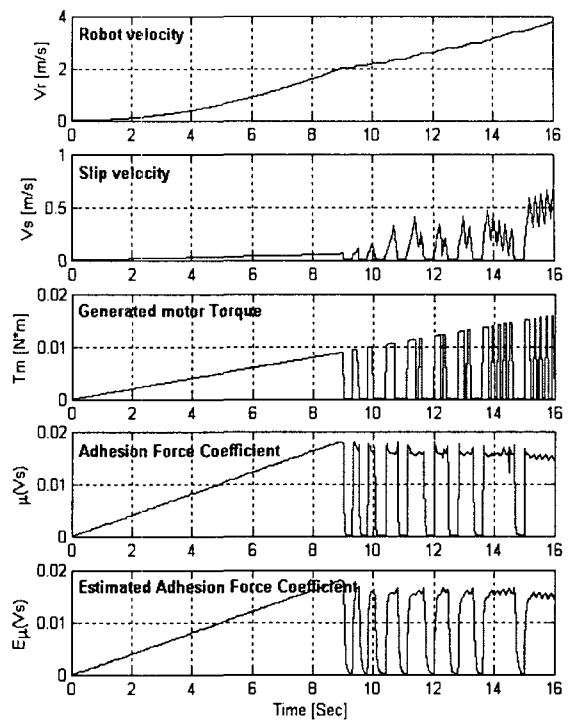


그림 13 순시 견인력 제어 의한 시뮬레이션 결과

Fig. 13 Simulation results of instantaneous traction control

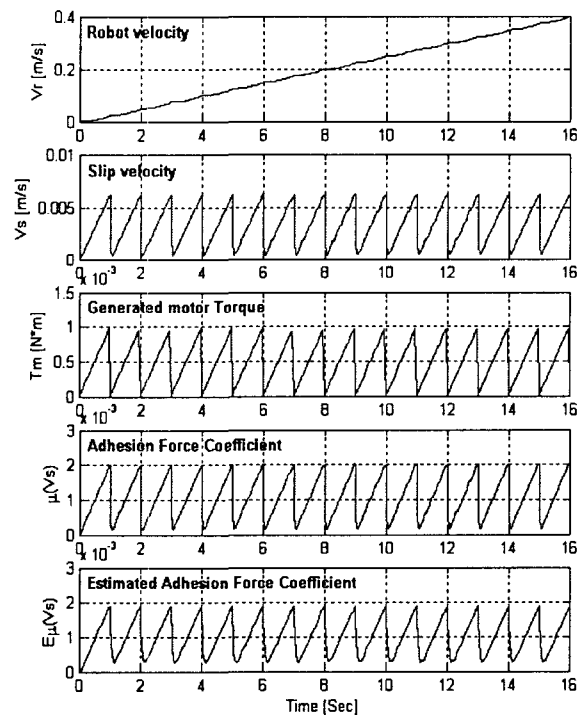


그림 14 패턴에 의한 제어 시뮬레이션 결과

Fig. 14 Simulation results of control by pattern

감사의 글

본 논문은 한국 과학재단 목적기초연구 (R01-2003-000-10364-0) 지원으로 수행되었음.

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] 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.

[4] 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.

[5] 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.

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

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

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

[9] 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.

[10] 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.

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

[12] W. Pedrycz, "An identification algorithms in fuzzy relational systems", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 13, pp. 153-167, 1984.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 이홍균, 이정철, 김종관, 정동화, "퍼지-ANN 제어를 이용한 유도전동기의 속도 추정 및 제어", 대한전기학회 논문지, 제53D권, pp. 545-550, 2004.

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

[17] 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.

[18] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", *IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber.*, vol. 15, No. 1, pp. 116-132, 1985.

[19] 김승석, 김성수, 유정웅, "새로운 클러스터링 알고리즘을 적용한 향상된 뉴로-퍼지 모델링", 대한전기학회 논문지, 제53D권, pp. 536-543, 2004.

[20] 엄광식, 서일홍, "외란 관측기에 기반을 둔 힘 추정기 설계", 대한전기학회 논문지, 제48A권, pp. 1140-1146, 1999.

저 자 소 개

권 선 구 (權 宣 九)



2000년 인하대학교 전기공학과 졸업.
현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : 032-860-7394
Fax : 032-864-6442
E-mail : withhim153@hanmail.net

허 욱 렬 (許 旭 烈)



1978년 서울대학교 전기공학(공학석사).
1982년 서울대학교 전기공학과(공학박사). 1985~1986 미국 일리노이대 방문교수. 1997~현재 대한 전기 학회 이사 및 부회장. 2004~현재 한국과학재단 전기정보분과 전문위원. 현재 인하대학교 전자전기공학부 교수
E-mail : uvhuh@inha.ac.kr

김 진 환 (金 眞 煥)



1996년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1997년~2001년 두원공과대학 디지털정보제어과 교수. 2001~현재 인하공업전문대학 전기정보과학과 조교수
Tel : (032)-870-2193
E-mail : jhkim@inhac.ac.kr