

로봇 매니플레이터의 포화요소를 갖는 퍼지견실 제어

최형식*

A Fuzzy Robust Controller with Saturation for Robot Manipulators

Choi, Hyeung-Sik*

ABSTRACT

A robust controller design to coordinate a robot manipulator under unknown system parameters and bounded disturbance inputs is presented in this paper. Generally, robust controllers require high input torque so that they may face input saturation in actual application due to the power limitation of the actuator. To solve this problem, an improved robust controller with saturated input torque using a fuzzy logic control is proposed. Numerical examples are shown to validate the proposed controller using two degree-of-freedom planar arm.

Key Words: Robust controller (견실 제어기), Fuzzy Logic(퍼지논리), Input Saturation(한계입력), Bounded disturbance inputs(임계외란 입력).

1. 서론

최근 산업이 고도로 발달하여 생산 시스템에서 공정의 자동화 및 고속화에 로봇 매니플레이터는 중요한 장비로서 사용된다. 이러한 로봇 매니플레이터는 제어정밀도를 높이기 위하여 여러 파라미터에 대한 정확한 정보가 요구된다. 하지만 각 링크의 질량이나 관성모멘트, 각 관절에 작용하는 정적 및 동적 토크의 정확한 측정이 어렵고, 불확실한 작업물체를 집어 이동하거나 이동 중에 외부환경과의 접촉 시에 발생하는 접촉력과 같은 외란으로 인하여 원하는 경로로 정밀하게 매니플레이터를 제어하기가 어렵다. 이와 같은 불확실한 로봇 매니플레이터의 경로제어

를 위하여 여러 비선형 형태의 견실 제어 알고리즘이 소개되었다. 이러한 견실제어기에 대한 논문들로는 각 링크의 질량이나 관성모멘트 그리고 각 관절에 작용하는 정적 및 동적 토크를 추정하여 역모델 제어기에 반영하여 원하는 경로를 추적하는 적응제어기에 대한 여러 연구가 있었다⁽¹⁻²⁾. 한편으로 불확실한 파라미터에 대한 추정오차와 임계외란의 추정치를 정의하여 슬라이딩조건을 만족하면 추적오차가 슬라이딩 면에 수렴하는 슬라이딩모드 제어 알고리즘의 매니플레이터에의 적용에 관한 연구가 있었다⁽³⁻⁴⁾. 또 한편으로 일반적인 비선형시스템의 불확실한 파라미터에 대한 추정오차와 외란의 추정치를 정의하여 이를 제어입력에 반영하는 견실 제어 알고리즘에 관한 연

* 한국해양대 기계시스템공학부

구가 있었다⁽⁶⁻⁹⁾. 이러한 견실제어기를 로봇 매니플레이터의 경로제어에 계산토크 형태의 제어기와 함께 적용한 논문들이 있었다⁽⁷⁻⁹⁾. 적용 제어기 외에 위에 설명된 견실제어기들은 불확실한 파라미터에 대한 추정오차와 임계외란의 추정치를 주된 제어입력으로 사용하기 때문에 추정오차나 외란이 클 경우 매우 큰 입력토크를 요구한다. 하지만 모든 물리적인 시스템에는 구동부의 동력원의 한계 즉 포화(Saturation)가 존재한다. 시스템을 설계할 때는 이러한 포화조건을 고려하여 용량이 큰 구동기를 선택한다. 하지만 로봇 매니플레이터의 경우 링크들을 구동하는 모터가 직렬로 연결되어 모터의 자중이 누적되므로 충분히 큰 용량의 모터를 선정할 수 없다. 따라서 구동기의 포화문제는 매니플레이터의 제어에서 반드시 고려되어야 할 부분이다. 포화요소가 있는 시스템에 대한 연구로는 선형시스템에서 와인드업 방식을 위한 PID나 PI에 대한 연구가 있었고⁽¹⁰⁾ 시간지연을 이용하여 와인드업 문제를 해결하는 연구가 있었다⁽¹¹⁾. 이 외에도 여러 기법을 이용한 논문들이 있지만 본 논문에서는 비선형운동의 대표적인 매니플레이터의 운동제어를 위하여 논문^(6,8)에서 제안된 견실 제어 알고리즘을 개선하여 시스템의 안정도 조건을 만족하면서 제어입력의 한계를 벗어나지 않는 새로운 견실 제어 알고리즘에 관하여 연구하였다. 적용하기 쉬운 퍼지 논리를 이용하여 위치나 속도오차가 일정이상 증가하면 제어입력의 입력한계 토크 크기를 줄여주는 논리를 적용하였다. 제안된 퍼지견실 제어기는 기존견실제어기의 강건성과 입력한계를 벗어나지 않는 안정한 새로운 제어기이다.

2. 로봇 매니플레이터의 운동방정식

n 개의 강체링크로 구성된 로봇 매니플레이터의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + F_r(q, \dot{q}) - D(t) = \tau \quad (1)$$

여기서 $q \in R^{n \times 1}$ 는 매니플레이터의 관절 각, $\tau \in R^{n \times 1}$ 는 제어입력, $H(q) \in R^{n \times n}$ 는 관성행렬, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times 1}$ 는 원심력, 코리올리력 및 중력을 포함하는 비선형 힘벡터이고 $F_r(q, \dot{q}) \in R^{n \times 1}$ 는 각 축에 작용하는 정적 및 동적 마찰력이다. 또한 $D(t)$ 는 입력외란 (input disturbance)이다. 식 (1)에서 로봇의 $H(q)$ 와 $C(q, \dot{q})$ 를 구성하는 질량이나 관성은 정확히 측정하기 힘들며 더구나 질량과

관성이 알려지지 않은 작업물체의 이동시에 정확한 측정은 더욱 어렵다. 이러한 불확실한 환경 하에 로봇 매니플레이터의 운동을 제어하기 위해 견실제어기를 포함하는 다음의 계산토크 형태의 제어알고리즘이 적용된다.

$$\tau = \hat{H}(q)(\ddot{q}_d + k_v \dot{e} + k_p e + U) + \hat{C}(q, \dot{q}) + \hat{F}_r(q, \dot{q}) \quad (2)$$

여기서 $\hat{H}(q)$, $\hat{C}(q, \dot{q})$ 와 $\hat{F}_r(q, \dot{q})$ 는 각각 $H(q)$, $C(q, \dot{q})$ 와 $F_r(q, \dot{q})$ 를 구성하는 질량, 관성 및 마찰력과 같은 불확실한 변수에 대한 추정치로 구성되어 있다. U 는 불확실한 변수의 추정오차와 외란의 영향을 견실하게 제어하기 위한 견실제어기이며, $q_d \in R^{n \times 1}$ 는 원하는 관절 각이고 $e = q_d - q$ 는 상태 오차벡터이다. 제어입력식 (2)을 로봇 운동방정식 (1)에 적용하면 다음의 식이 된다.

$$H\ddot{q} + C + F_r = \hat{H}(v + U) + \hat{C} + \hat{F}_r + D \quad (3)$$

여기서 $v = \ddot{q}_d + k_v \dot{e} + k_p e$ 이고 $k_v, k_p \in R^{n \times n}$ 는 제어이득으로 양의 대각행렬이다. 식 (3)을 정리하면

$$\hat{H}(\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e) = \hat{H}\ddot{q} + \hat{C} + \hat{F}_r - D - \hat{H}U \quad (4)$$

여기서 $\bar{H} = H - \hat{H}$, $\bar{C} = C - \hat{C}$, $\bar{F}_r = F_r - \hat{F}_r$ 이다. 위의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = \hat{H}^{-1} \{ \bar{H}\ddot{q} + \bar{C} + \bar{F}_r - D \} - U \quad (5)$$

여기서 $\varphi_1 = \bar{C} + \bar{F}_r - D$ 이다. 식 (3)에서 \ddot{q} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{q} = H^{-1} \{ \hat{H}(v + U) - \varphi_1 \} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 적용하고 정리하면

$$\begin{aligned} \ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e &= \hat{H}^{-1} \{ \bar{H}H^{-1} \{ \hat{H}(v + U) - \varphi_1 \} + \varphi_1 \} - U \\ &= (I - H^{-1}\hat{H})(v + U) + H^{-1}\varphi_1 - U \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $I - H^{-1}\hat{H} = \hat{H}^{-1}\bar{H}H^{-1}\hat{H}$ 이고 $I \in R^{n \times n}$ 는 단위행렬이다. 식 (7)은 다음의 간략한 식으로 표현된다.

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = \Omega - U \quad (8)$$

여기서

$$\Omega = E_1(v+U) + H^{-1}\varphi_1 \quad (9)$$

식 (9)에서 $E_1 = I - H^{-1}\hat{H}$ 이다. 식 (8)에서 불확실한 항들의 추정이 정확하다면, 즉 $H = \hat{H}$, $C = \hat{C}$, $F_r = \hat{F}_r$ 이 만족되면 $\Omega = 0$ 이 되며 따라서 시스템의 추적오차는 점근적으로 0에 수렴하여 견실제어기 U 의 적용이 필요가 없다.

3. 견실제어기의 설계

시스템의 불확실한 변수들의 추정오차와 외부로부터의 외란을 제어하기 위하여 견실제어기 U 의 설계가 요구된다. 본 논문에서는 Corless와 Dawson 이 제안한 견실제어기를 개선하여 시스템의 입력한계(input saturation)를 초과하지 않는 제어기를 설계한다. 이 견실제어기는 리아푸노프 함수를 이용하여 추적오차가 일정한 작은 상수에 유계되는 u.u.b.(uniform ultimate boundedness)를 만족하는 제어기로 그 정리와 증명이 자명하게 나타나 있다^(6,8). 식 (8)에 나타난 견실제어기는 매니퓰레이터의 제어를 위하여 다음과 같이 정의된다.

$$U = \frac{(B^T Px)\rho^2}{\|B^T Px\|\rho + \varepsilon} \quad (10)$$

여기에서 ε 는 미소한 양의 상수이고 B, P 및 ρ 는 이후에 정의된다. 식 (10)의 견실제어기의 적용을 위해 식 (8)을 다음의 상태 식으로 표현한다.

$$\dot{x} = Ax + Bw \quad (11)$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -k_p & -k_v \end{bmatrix}$, $x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$,

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, w = (\Omega + U)$$

여기서 A 는 $2n \times 2n$ 행렬이고 x 는 $2n \times 1$ 오차벡터이다. 또한 식 (8)에서 Ω 는 다음의 부등식과 같이 유계되고 식 (10)을 이용하면 다음의 두 번째 부등호의 조건을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|\Omega\| &\leq \|E_1 v\| + \|H^{-1}\Psi_1\| + \|E_1 U\| \\ &\leq \|E_1 v\| + \|H^{-1}\Psi_1\| + \|E_1\|\rho = \rho \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\|U\| \leq \rho$ 이고 $\|\cdot\|$ 는 L_2 놈을 의미한다. 또한

식(12)에서 등호를 만족하는 함수 ρ 가 존재한다고 가정하면 ρ 에 대한 정의를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = (1 - \|E_1\|)^{-1} (\|E_1 v\| + \|H^{-1}\Psi_1\|) \quad (13)$$

식 (12)을 만족하기 위한 조건은 $\rho > 0$ 이고 따라서 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$\max\|E_1\| < 1 \quad (14)$$

추정오차에 대한 견실제어기의 안정도의 결과를 얻기 위해 리아푸노프함수를 안정도의 조건을 만족하는 양의 값을 갖는 다음의 식으로 정의된다.

$$V = x^T Px \quad (15)$$

여기서 행렬 P 는 $2n \times 2n$ 양의 대칭행렬(positive definite symmetric matrix)이고 식 (15)은 양의 스칼라 λ_1, λ_2 에 의하여 아래와 같이 유계된다.

$$\lambda_1 \|x\|^2 < x^T Px < \lambda_2 \|x\|^2 \quad (16)$$

리아푸노프함수 V 를 시간에 관하여 미분하고 식 (11)과 리아푸노프식(Lyapunov Equation)(18)을 이용하면 시간에 관한 V 의 미분 식이 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{x}^T Px + x^T P\dot{x} \\ &= -x^T Qx + 2x^T PBw \end{aligned} \quad (17)$$

$2n \times 2n$ 정정대각 행렬 Q 의 조건을 만족하는 리아푸노프식은 다음과 같다.

$$A^T P + PA = -Q \quad (18)$$

식(11)의 정의를 이용하여 식 (17)을 정리하면 다음의 부등식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -x^T Qx + 2\|x^T PB\|\rho + 2x^T PBU \\ &\leq -x^T Qx + 2(B^T Px)^T (U + \frac{B^T Px}{\|B^T Px\|}\rho) \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)에 식 (10)의 견실제어기를 적용하면 \dot{V} 에 대한 다음의 결과가 얻어진다.

$$\dot{V} \leq -\lambda \|x\|^2 + 2\epsilon. \quad (20)$$

여기서 $\lambda = \min\{Q\}$ 이다.

식 (20)의 안정도에 관한 이론과 증명은 논문⁽⁶⁾에 나타나 있다. 이 논문에 나타난 것과 같이 상태오차 x 는 궁극적으로 $\sqrt{\epsilon}$ 에 어떤 상수를 곱한 값에 유계된다. 따라서 ϵ 의 크기가 작을수록 추적오차는 작아진다. 하지만 식 (10)의 견실제어기에 나타난 바와 의하면 작은 ϵ 을 선택하면 ρ 의 변수인 추적오차 x 가 클수록 ρ 가 증가하여 입력토크의 크기는 증가하므로 실제 시스템에의 적용시에 하드웨어적으로 제한된 제어입력 때문에 입력포화에 달한다. 식 (12)에서 ρ 의 크기는 $\|\Omega\|$ 의 크기보다 크다는 조건을 만족해야 하나 실제 시스템의 입력토크는 제한되어 있고 따라서 ρ 가 커서 식 (12)을 만족하지 못하면 안정도를 만족하지 못하게 된다. 본 논문에 제안된 견실제어기는 만약 입력포화에 도달할 정도로 ρ 의 크기가 증가하면 ϵ 의 크기를 증가시켜 견실 제어입력을 입력한계 이하로 제어하고 ρ 가 감소하면 추적오차를 줄이기 위해 ϵ 을 감소시키는 논리구조를 갖는다. 식 (10)의 견실제어기에서 ϵ 의 조정은 ρ 의 크기가 추적오차 x 의 함수이므로 x 의 증가에 따라 ϵ 의 크기를 퍼지 변수화시켜 제어하는 퍼지견실제어기에 관하여 연구하였다.

4. 입력한계를 갖는 퍼지제어기의 설계

퍼지제어는 1974년에 Mamdani등에 의해 제어에 도입되었고⁽¹²⁾ 이의 구성은 일반적으로 퍼지화, 규칙베이스, 추론엔진과 비퍼지화로 구성된다. 본 논문에서 퍼지제어 규칙은 "if - then" 형식의 정성적이고 언어적인 규칙으로 표현되며 이는 퍼지제어기의 특성을 결정하게 된다.

본 논문에서 견실제어입력의 크기를 결정하는 ρ 의 변수인 위치오차 e 와 속도오차 \dot{e} 의 값을 다음과 같이 퍼지화 시키고 다음과 같이 분할한다.

$$e = \{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\} \quad (21)$$

$$\dot{e} = \{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\} \quad (22)$$

e_i 와 \dot{e}_i 를 각각 e 와 \dot{e} 의 i 번째 벡터성분이라 하고 관측에 의한 확정된 수치라 하면사용된 퍼지 제어규칙은 49개로 다음과 같이 or로 결합된다.

R1: if e_i is PL and \dot{e}_i is PL, then y_i is L1, where L1 = P6

or

R2: if e_i is PL and \dot{e}_i is PM, then y_i is L2, where L2 = P5

or

⋮ ⋮ ⋮

R49: if e_i is NL and \dot{e}_i is NM, then y_i is L49, where L49 = P6

여기서 오차와 속도오차 벡터의 각 성분 e_i 와 \dot{e}_i 에 대해서 각각의 y_i 을 적용한다.

위의 제어규칙을 Table 1과 같이 표로 나타낼 수 있다.

Table 1. Fuzzy rule base

$\dot{e} \setminus e$	PL	PM	PS	ZO	NS	NM	NL
PL	P6	P5	P4	P3	P4	P5	P6
PM	P5	P4	P3	P2	P3	P4	P5
PS	P4	P3	P2	P1	P2	P3	P4
ZO	P3	P2	P1	P0	P1	P2	P3
NS	P4	P3	P2	P1	P2	P3	P4
NM	P5	P4	P3	P2	P3	P4	P5
NL	P6	P5	P4	P3	P4	P5	P6

퍼지제어 규칙에 적용된 퍼지집합의 소속함수는 다음과 같다.

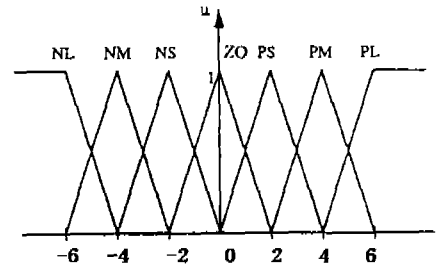


Fig. 1 Membership function of input variables

퍼지 추론은 Max-Min 추론법칙을 사용하였다. 즉 제어 규칙 R1부터 R49까지의 각 전건부의 최소치인 적합도를 퍼지화된 제어입력에 곱하여 더한 전체의 합을 추론결과로 정하였다. 실제의 제어입력으로 적용하기 위하여 추론결과 의 비퍼지화를 행하였고 이 비퍼지화 방법은 무게 중심법 (Center of gravity)을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 매 니플레이터의 각 축의 제어를 위한 식 (10)의 견실제어기 의 ϵ 을 정한다.

5. 시뮬레이션 및 고찰

로봇 매니플레이터의 제어를 위해 제안된 퍼지견실제어의 성능을 입증하기 위하여 대상으로 2축 수평관절형 로봇을 사용하였다. 제어기를 적용한 페루프식이 비선형 식이어서 4차 Runge-Kutta 알고리즘을 이용하였다. 사용된 각 로봇 링크의 질량과 길이는 다음의 Table 2와 같이 정의되었고 (.)는 실제변수의 추정치를 나타낸다. 질량 중심은 각 팔의 중심점에 있다고 가정하였다.

Table 2. Mass and moment of inertia of manipulator

로봇 팔	길이	질량(추정치)	관성(추정치)
L1	0.4 m	8 kg (4 kg)	1.0 Kg-m*m (0.5)
L2	0.5 m	5 kg (3 kg)	0.8 Kg-m*m (0.4)

원하는 궤적의 시작 및 도착점은 링크 1, 2가 각각 $[(1/6)\pi, (3/2)\pi], [0, (1/2)\pi]$ 이며 경로함수는 3차 다항식을 사용하여 3초동안 이동하였다. 동적 마찰력이 존재하고 이의 계수는 각각 1.2와 1.5이며 추정치는 1.0과 1.2로 가정하였다. 시스템의 입력외란으로는 로봇 동작후 2초경에 외부환경과의 충돌로 인하여 링크 2의 말단에 0.04초간 7(Newton)의 충격력이 발생하였다고 가정하였다. 계산토크 제어기의 이득은 각 링크에 $k_r = 10, k_p = 25$ 를 사용하였고 매니플레이터의 각 축에 대하여 견실제어기의 ϵ 은 10^{-6} 로 하였고 퍼지견실제어기의 제어변수 $p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ 은 각각 $10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10$ 로 정하였다.

이상과 같은 제어조건과 외부환경하에서 시뮬레이션한 결과는 Fig 2, 3, 4, 5에 나타나 있다. Fig 2.에서 횡축은 운동시간을 종축은 추적오차를 나타낸다. 긴 점선, 짧은

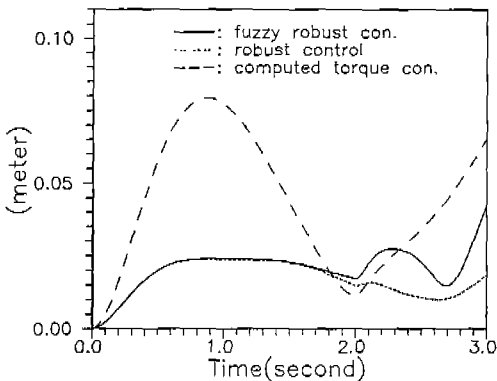


Fig. 2 Position error of the manipulator

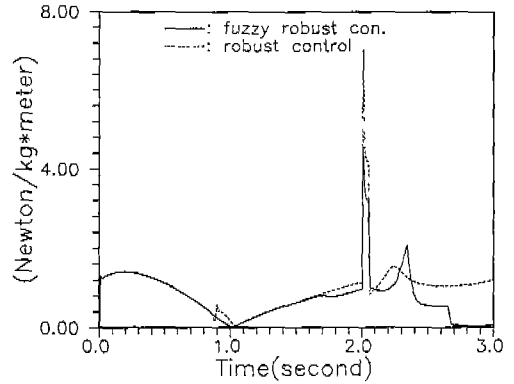


Fig. 3 Input of robust controller for the link 1

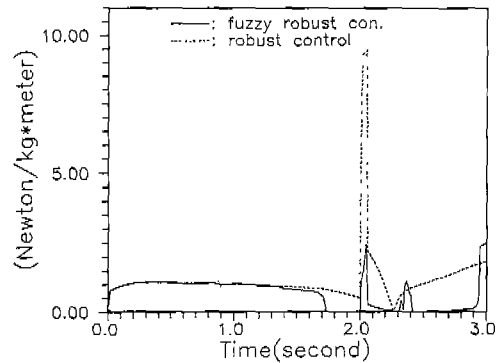


Fig. 4 Input of robust controller for the link 2

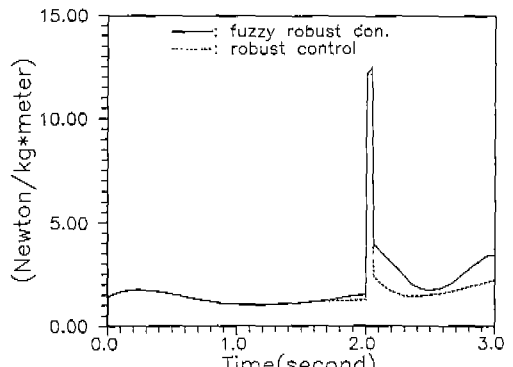


Fig. 5 Magnitude of ρ

은 점선 및 실선은 각각 계산토크 제어기만 적용한 경우, 견실제어기를 적용한 경우 그리고 퍼지견실제어기를 적용한 경우의 추적오차를 나타낸다. 이들 중에서 견실제어기를 적용한 경우 추적오차가 가장 작은 것을 알 수 있다. 2초경에 충격으로 인하여 상대적으로 큰 추적오차 및

속도오차와 외란이 발생하여 큰 입력토크가 적용됨을 Fig 3, 4를 통하여 알 수 있다. Fig 3, 4는 견실제어기를 적용한 경우와 퍼지견실제어기를 적용한 경우의 링크 1 과 링크 2에 가한 입력토크의 크기를 나타낸 것이다. 점선은 견실제어기를 적용한 경우이고 입력외란이 있는 2 초경에 퍼지제어기보다 상대적으로 제어 입력토크가 크다는 것을 알 수 있다. 실선은 퍼지견실제어기를 적용한 경우이고 견실제어기의 경우보다 추적오차가 크므로 ε 을 조정하지 않으면 입력토크가 커진다. 이는 Fig 5를 통하여 알 수 있다. Fig 5에서 실선과 점선은 각각 퍼지견실제어기와 견실제어기 ρ 의 크기를 나타내며 추적오차가 더 큰 퍼지견실제어기의 ρ 가 더 큼을 알 수 있다. Fig 2, 3, 4, 5에서 나타난 바와 같이 퍼지견실제어기의 추적오차는 견실제어에 비해 상대적으로 클 수 있으나 퍼지논리제어에 의해 제어입력을 조정하여 입력한계를 갖는 실제 시스템에 적용 가능함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 불확실한 로봇 매니퓰레이터의 동작 제어를 위한 새로운 견실 제어의 설계에 관한 연구이다. 기존의 견실 제어는 추정오차와 외란의 크기에 준하는 유한하지만 매우 큰 입력토크의 가정 하에 정의되어 입력토크의 한계(saturation)가 존재하는 실제 시스템의 적용 및 유제이론 적용이 성립될 수가 없다. 제안된 제어기는 이러한 문제를 극복하기 위해 퍼지논리를 이용하여 입력토크를 한계이하로 유지할 수 있도록 개선하였다. 추적오차는 견실제어기보다 크나 적절한 퍼지논리를 적용하면 향상된 추적오차를 가지며 입력토크한계를 만족하는 제어를 설계할 수 있을 것이다. 향후 제안된 제어기의 실제 시스템에의 구현에 대한 연구가 계속 수행 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Craig, J. J., Hsu, P., and Sastry, S., "Adaptive Control of Mechanical Manipulators", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, San Francisco, CA, March 1986.
2. Ortega, R. and Spong, M.W., "Adaptive Motion Control of Rigid Robots: a Tutorial", Proc. of the 27th Conf. on Decision and Control, 1988.

3. Slotine, J. J. E., "Sliding Controller Design for Nonlinear Systems" Int. Journal Control, 40, 2, 1984.
4. Slotine, J. J. E. and Sastry, S., "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces With Applications to Robot Manipulators", Int. Journal Control, 39, 2, 1983.
5. Leitmann, G., "Guaranteed Asymptotic Stability for Some Linear Systems with Bounded Uncertainties", J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 101, Sep. 1979.
6. Corless, M and Leitmann, G., "Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems", J. Automatic Controls, AC-26, 1139-1143, 1979.
7. Chen, Y. H., "Robust Computed Torque Scheme for Mechanical Manipulators: Nonadaptive Versus Adaptive", J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 113, pp. 324-327 1991.
8. Dawson, D.M., Lewis, F.L., and Dorsey, J.F., "Robust Force Control of a Robot Manipulators", Int. J. of Robotics Research, vol. 11, No. 4, Aug. 1992.
9. Cai, L. and Goldenberg, A.A., "Robust Control of Unconstrained Maneuver and Collision for a Robot Manipulator with Bounded Parameter Uncertainty", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1010-1015 1988.
10. Astrom, K. J. and Wittenmark, B., "Computer Controlled System -theory and design", 2nd edi, Prentice Hall, 1990.
11. Chang, P. H., Park, S. H., and Lee, S. U., "Robust Control of the System With Saturation Element Using TDC", Proc. of KACC, pp732-737, 1994
12. Mamdani, E.H. and Appilian, S., "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", Int. J. Man-Machine Stud., Vol. 7, pp.1-13, 1975.