

# 미지의 마찰력을 갖는 로봇 매니플레이터에 대한 적응보상기

## An Adaptive Compensator for Robot Manipulator with Unknown Frictions

유 병 국, 한 종 길, 양 근 호

Byung-Kook Yoo, Jong-Kil Han, Keun-Ho Yang

### 요 약

본 논문은 미지의 마찰력을 갖는 로봇 매니플레이터에 대하여 퍼지시스템을 이용한 적응보상기를 제안한다. 일반적인 로봇제어이론에서는 대부분 마찰력을 무시하거나 단순히 다이나믹 마찰력만을 고려한다. 본 논문에서는 다이나믹 마찰력뿐만 아니라 비스코스 마찰력까지도 고려한 제어방식이다. 마찰력이 관절마다 결부되지 않는다는 성질을 이용하여 각 관절에 해당하는 마찰력을 SISO 퍼지시스템으로 근사하며 전체제어시스템이 안정도를 Lyapunov 안정도 이론을 이용하여 증명하고 적절한 적응법칙을 설계한다. 제안된 제어방식의 타당성을 보이기 위해 2-링크 로봇 매니플레이터에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 보이고 각 링크에 대한 마찰력을 퍼지시스템이 잘 근사한다는 것을 보인다.

### Abstract

This paper presents an adaptive compensator using the fuzzy systems for robot manipulator with unknown frictions. In general, frictions are neglected or dynamic frictions are only considered in robot control theories. The proposed control method considers viscous frictions as well as dynamic frictions. Using the property that the frictions of joints are decoupled, SISO-fuzzy systems are utilized to approximate each friction. The stability of overall control system is proven and the adaptive laws are derived based on Lyapunov stability theory. To verify the validity of the proposed control strategy, the results of computer simulations are shown for 2-link robot manipulator. The ability of approximating of the fuzzy system is also shown.

**Key words** : Viscous friction, Dynamic friction, Fuzzy system, Adaptive law

### I. Introduction

마찰력은 기계시스템이면 어디에나 존재하는 것으로서 그 모델을 정확히 아는 것은 쉽지 않으며 대부분 기계장치 연결부위의 구성과 윤활유의 점성 등으로 인해 시변의 특성을 갖는다. 이러한 기계시스템의 제어에서 마찰력은 제어성능을 좌우할 정도로 매우 중요한 문제임에도 불구하고 대부분의 제어이론에서는 마찰력을 무시한다. 이러한 마찰력을 제어입력으로 보상하기 위해 최근 여러 연구가 진행되어왔다[1-7]. 그러나 이러한 연구에서는 대

부분 간단한 mass-damping-spring 시스템에 대하여 다이나믹 마찰력, 즉 쿨롬(Coulomb) 마찰력만을 고려하였으며 로봇 매니플레이터와 같은 고차 시스템에 적용하기 적절하지 않다. [8]은 이러한 마찰력을 포함한 선형화될 수 있는 불확실성에 대한 보상기를 제안하였고 [9]는 SG 알고리즘을 이용한 불확실성 보상기를 제안하였다. 그러나 이러한 방식 또한 로봇 매니플레이터 제어에 적용하기는 쉽지 않다. 그러나 로봇 매니플레이터의 추적제어(tracking control)는 로봇 공학에서 매우 중요한 문제이며 로봇 동력학은 비선형 시변이고 특히 마찰력과 같은 불확실성(uncertainty)으로 인해 원하는 제어성능을 얻기 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 Slotine 등[10]에 의해 제안된 제어방식을 토대로 미지의 마찰력을 갖는 로봇 시스템을 고려한다. 특히 여기서는

\*한려대학교 멀티미디어정보통신공학과  
접수 일자 : 2005. 6. 22    수정 완료 : 2005. 7. 26  
논문 번호 : 2005-2-8

마찰력을 쿨롬 마찰력뿐만 아니라 여러 기존 연구에서 다루지 않았던 비스코스 마찰력까지를 고려한다. 또한 마찰력은 로봇 매니플레이터의 각 조인트에서 서로 결부되지 않고 작용한다는 성질을 이용한다.

본 논문에서는 마찰력을 보상하기 위해  $n$ -개의 퍼지 시스템을 사용하는 방식을 제안하며 일반적으로 마찰력을 다룰 때 마찰계수를 적응시키는 데에 비하여 마찰력 전체에 대한 근사기로서 퍼지보상기를 이용하는 것이다. 즉, 기존의 연구에서 쿨롬 마찰력을 다룰 때 마찰력 항  $ksgn(\dot{q})$ 에서 파라미터  $\theta$ 를 적응시키는 반면 본 연구에서는 비스코스 마찰력까지를 고려한  $v\dot{q} + ksgn(\dot{q})$ 를 하나의 퍼지시스템  $\theta^T \zeta(\dot{q})$ 으로 구성하고 퍼지시스템의 파라미터벡터  $\theta$ 에 대한 적응 법칙을 설계한다. 구성된 각 퍼지시스템의 입력변수는 각 관절의 속도성분 하나만을 이용하기 때문에 퍼지규칙의 수 또한  $\dot{q}$  변수에 설정된 퍼지 집합의 수로 제한된다.

본 논문의 구성은 II 장에서 로봇 매니플레이터 동력학에 대하여 간단히 살펴본다. 특히 마찰력의 표현과 성질에 대하여 언급한다. III 장에서는 Slotine이 제안한 제어 방식에 대하여 간략히 설명하고 이 방식을 이용한 제안된 제어입력에 대한 오차방정식과 퍼지시스템을 이용한 마찰력 퍼지보상기, 그리고 Lyapunov 안정도 이론에 근거하여 적응법칙을 설계하고 전체 시스템의 안정도를 증명한다. IV장에서는 2-링크 로봇 매니플레이터에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 고찰한다. 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

## II. 로봇 매니플레이터의 동력학 방정식

$n$ -링크 로봇 매니플레이터의 동력학 방정식은 다음과 같다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}) \quad (1)$$

여기서  $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 관성행렬,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 코리올리스 힘과 원심력행렬,  $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 는 중력벡터,  $F(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ 는 마찰력 벡터를 나타낸다.  $\tau \in \mathbb{R}^n$ 는 관절에 대한 입력토크 벡터이며  $q \in \mathbb{R}^n$ 는 관절각도벡터이다. 일반적으로 로봇 동력학에서  $M(q)$ 와  $C(q, \dot{q})$ 는 다음과 관계가 성립한다.

$$c_{kj} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial m_{ki}}{\partial q_j} + \frac{\partial m_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial m_{ij}}{\partial q_k} \right\}, \quad (2)$$

여기서  $c_{ij}$ 는  $C(q, \dot{q})$ 의  $(i, j)$ 요소이며  $m_{ij}$ 는  $M(q)$ 행렬의  $(i, j)$ 요소이다. 즉,  $M(q, \dot{q}) - 2C(q, \dot{q})$ 는

skew symmetric이다. 그러나 본 논문에서는 이러한 성질을 이용하지 않으므로 (1)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + F(\dot{q}), \quad (3)$$

여기서  $H(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$ . (3)에서 마찰력  $F(\dot{q})$ 는 일반적으로 정지마찰력은 무시되고 비스코스 마찰력  $F_v$ 와 다이내믹 마찰력  $F_d$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\dot{q}) = F_v\dot{q} + F_d(\dot{q}) \quad (4)$$

이러한 마찰력은 정확한 수식으로 표현하기 어려우며 대부분의 로봇제어이론에서는 근사식으로 표현된 수학식을 사용하고 있다. 또한 마찰력의 특성을 보면 각 관절에서 작용되는 부분적인 물리량이며 다음과 같이 각각의 관절에 대하여 결부되지 않았다고 가정하여 표현한다.

$$F(\dot{q}) = \text{vec} \{ z_i(\dot{q}_i) \} \equiv \begin{bmatrix} z_1(\dot{q}_1) \\ \vdots \\ z_n(\dot{q}_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $z_i(\dot{q}_i)$ 는 스칼라 함수이며  $\text{vec} \{ \cdot \}$ 는 벡터함수를 나타낸다. 또한 비스코스 마찰력과 다이내믹 마찰력은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} F_v\dot{q} &= \text{vec} \{ v_i\dot{q}_i \} \\ F_d(\dot{q}) &= \text{vec} \{ k_i sgn(\dot{q}_i) \} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $v_i$ 와  $k_i$ 는 알 수 없는 마찰계수로 가정한다.

원하는 궤적  $\tilde{q}_d$ ,  $\dot{\tilde{q}}_d$ , 그리고  $q_d$ 가 bounded된다고 가정하고 궤적오차벡터  $\tilde{q}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{q} = q - q_d. \quad (7)$$

이제 제어목적은 주어진 궤적을 따라  $\tilde{q}$ 와  $\dot{\tilde{q}}$ 를 가능한 빠르게 0 벡터로 보내는 입력을 설계하는 것이다.

## III. 오차 방정식과 적응제어법칙

본 절에서는 Slotine 등[10]에 의해 유도된 오차방정식과 제어법칙에 대하여 간단히 살펴본다. 추적의 정도를 나타내는 것으로서 벡터  $s$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$s = \tilde{q} + \Lambda \bar{q}. \tag{8}$$

여기서  $\Lambda \in \mathcal{R}^{n \times n}$ 는 안정한 행렬이다. 이 식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s = \dot{q} - \bar{q}_r \tag{9}$$

여기서  $\bar{q}_r$ 은 다음과 같다.

$$\bar{q}_r = \bar{q}_d - \Lambda \bar{q} \tag{10}$$

제어법칙은 다음과 같다.

$$\tau = M(q)\ddot{q}_r + H(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) - \frac{1}{2} M(q, \dot{q})s - Ks \tag{11}$$

여기서  $K$ 는 임의의  $n \times n$  양정실 행렬이고  $F(\dot{q})$ 는 (5)의 성질로부터  $F(\dot{q}) = [f_1(\dot{q}_1), f_2(\dot{q}_2), \dots, f_n(\dot{q}_n)]^T$ 이다.

제어법칙 (11)를 구현하기 위해서는 로봇 매니플레이터의 마찰력을 알아야 한다. 그러나 이것은 실제 시스템에서 매니플레이터의 기계적 장치에 의해 결정되며 또한 윤활유의 점성과도 관계되므로 그 값을 알아내는 것은 쉽지 않은 것이다. 따라서 여기서는 (6)에서의  $v_i$ 와  $k_i$ 을 알 수 없다고 가정한다. 결국 실제 제어입력에서는 마찰력  $F(\dot{q})$ 의 추정  $\widehat{F}(\dot{q})$ 를 이용하여야 하며 전체시스템의 안정도를 보장할 수 있도록 적응법칙을 찾아야 한다. 이러한 마찰력에 대한 함수에서 파라미터  $v_i$ 와  $k_i$ 를 정확히 알 수 없으므로 입력에 사용되는  $\widehat{F}(\dot{q})$ 를  $n$ 개의 SISO 퍼지시스템(퍼지보상기)으로 대치한다. 일반적으로 퍼지시스템은 compact한 공간상에 어떠한 비선형 함수도 근사할 수 있는 특성을 가지고 있다. 마찰력  $F(\dot{q})$ 의 추정을 퍼지보상기  $\widehat{F}_f(\dot{q}|\theta)$ 로 놓으면 제어입력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau = & M(q)\ddot{q}_r + H(q, \dot{q}) + \widehat{F}_f(\dot{q}|\theta) \\ & - \frac{1}{2} M(q, \dot{q})s - Ks - Wsgn(s) \end{aligned} \tag{12}$$

여기서  $\widehat{F}_f(\dot{q}|\theta)$ 는 (5)의 성질을 이용하여 다음과 같이  $n$ 개의 SISO 퍼지보상기로 구성한다.

$$\widehat{F}_f(\dot{q}|\theta) = \begin{bmatrix} \theta_{1\zeta}^T(\dot{q}_1) \\ \vdots \\ \theta_{n\zeta}^T(\dot{q}_n) \end{bmatrix} \tag{13}$$

여기서  $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_n]$ 이며,  $\theta_i \in \mathcal{R}^{M \times 1}$ 는 각 퍼지보상기의 파라미터벡터이다. 그리고  $\zeta(\dot{q}) \in \mathcal{R}^{M \times 1}$ 는 퍼지기준함수벡터(fuzzy basis function vector)이고  $M$ 은 퍼지보상기의 전체 규칙 수이다.

이제 실제 마찰력  $F(\dot{q})$ 과 퍼지보상기  $\widehat{F}_f(\dot{q}|\theta)$ 의 근사오차를 정의한다. 즉,

$$F(\dot{q}) - \widehat{F}_f(\dot{q}|\theta^*) = w \tag{14}$$

여기서  $\theta^*$ 는 최적파라미터이며  $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 는 최소근사오차벡터이다. 일반적으로 퍼지시스템은 비선형 함수를 매우 작은 오차범위 이내로 근사할 수 있기 때문(Universal Approximation Theorem)에  $w_i = 0$  또는  $w_i < \varepsilon$ 이다.

제어입력 (12)에서  $W = \text{diag}[w_{m1}, w_{m2}, \dots, w_{mn}]$ 이고 여기서  $w_{mi} \geq |w_i|, i = 1, 2, \dots, n$ 이다. 그리고 파라미터 오차행렬  $\Theta = \theta^* - \theta$ 로 정의한다.

제어입력 (12)를 (3)에 대입하면 오차방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Ms = & -(F(\dot{q}) - \widehat{F}_f(\dot{q}|\theta)) - \frac{1}{2} Ms - Ks - Wsgn(s) \\ = & -(\widehat{F}_f(\dot{q}|\theta^*) - \widehat{F}_f(\dot{q}|\theta) + w) - \frac{1}{2} Ms - Ks - Wsgn(s) \\ = & -\widetilde{\Theta}^T \zeta(\dot{q}) - w - \frac{1}{2} Ms - Ks - Wsgn(s) \end{aligned} \tag{15}$$

이제 전체 제어시스템이 안정할 수 있도록 파라미터 적응법칙을 Lyapunov 안정도 이론에 근거하여 설계한다. 먼저 다음과 같은 Lyapunov 후보함수를 고려한다.

$$V(s, \theta) = \frac{1}{2} \left( s^T M(q)s + \sum_{i=1}^n \widetilde{\Theta}_i^T \gamma_i^{-1} \widetilde{\Theta}_i \right) \tag{16}$$

여기서  $\gamma_i > 0, i = 1, 2, \dots, n$ 이다. (16)을 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= s^T \dot{M}s + \frac{1}{2} s^T \dot{M}s + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i^T \gamma_i^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_i \\
 &= s^T (-\tilde{\Theta}^T \xi(\dot{q}) - w - \frac{1}{2} \dot{M}s - Ks - W \text{sgn}(s)) \\
 &\quad + \frac{1}{2} s^T \dot{M}s + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i^T \gamma_i^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_i \\
 &= -s^T Ks - s^T w - s^T W \text{sgn}(s) - s^T \tilde{\Theta}^T \xi(\dot{q}) + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i^T \gamma_i^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_i \\
 &\leq -s^T Ks - \sum_{i=1}^n s_i \tilde{\theta}_i^T \xi(\dot{q}) + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i^T \gamma_i^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_i \\
 &= -s^T Ks + \sum_{i=1}^n (\tilde{\theta}_i^T \gamma_i^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_i - s_i \tilde{\theta}_i^T \xi(\dot{q}))
 \end{aligned} \tag{17}$$

따라서 퍼지보상기의 파라미터 적응법칙은 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\dot{\Theta}_i = -\gamma_i s_i \tilde{\theta}_i^T \xi(\dot{q}) \tag{18}$$

#### IV. 컴퓨터 시뮬레이션

제안된 제어법칙의 타당성을 보이기 위해 다음과 같은 2-링크 로봇 매니플레이터를 고려한다.

$$\tau = M(q) \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + F(\dot{q}), \tag{16}$$

여기서

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_2 r_2^2 + 2m_2 r_1 r_2 c_2 + m_{12} r_1^2 & m_2 r_2^2 + m_2 r_1 r_2 c_2 \\ m_2 r_2^2 + 2m_2 r_1 r_2 c_2 & m_2 r_2^2 \end{bmatrix}$$

$$H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 r_1 r_2 s_2 \dot{q}_2 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + m_2 r_2 g c_{12} + m_{12} r_1 g c_1 \\ m_2 r_1 r_2 s_2 \dot{q}_1^2 + m_2 r_2 g c_{12} \end{bmatrix}$$

$$F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 3 \tilde{q}_1 + 10 \text{sgn}(\tilde{q}_1) \\ 2 \tilde{q}_2 + 5 \text{sgn}(\tilde{q}_2) \end{bmatrix}$$

여기서  $m_{12} = (m_1 + m_2)$ 이고  $c_i = \cos(q_i)$ ,  $s_i = \sin(q_i)$ ,  $c_{ij} = \cos(q_i + q_j)$ ,  $s_{ij} = \sin(q_i + q_j)$ 를 나타낸다. 그리고 첫 번째와 두 번째 링크의 질량은 각각  $m_1 = 1.0 \text{kg}$ ,  $m_2 = 0.8 \text{Kg}$ , 각각의 길이  $r_1 = 1.0 \text{m}$ ,  $r_2 = 0.8 \text{m}$ 로 하였다. 또한 (8)과 (12)에서  $s$ 와  $K$ 는

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{q}_1 \\ \tilde{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.0 & 0 \\ 0 & 3.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{q}_1 \\ \tilde{q}_2 \end{bmatrix}, \quad q_r = \begin{bmatrix} q_{r1} \\ q_{r2} \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} 15 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix}$$

로,  $\gamma_1 = 120$ ,  $\gamma_2 = 35$ , 원하는 궤적  $q_{1d} = q_{2d} = -0.3 \cos(\pi t)$ 로 설정하였다.

2개의 퍼지보상기는 각각 다음과 같은 퍼지규칙으로 구성된다. 즉, 각 퍼지시스템의  $l$ -번째 규칙은

$$R_l^i: \text{If } q_i \text{ is } A^l, \text{ then } y_i \text{ is } B^l \tag{17}$$

각 퍼지보상기에서

$\xi(\dot{q}_i) = [\xi_1(\dot{q}_i), \xi_2(\dot{q}_i), \dots, \xi_M(\dot{q}_i)]^T$ 는 단일값 퍼지화, 곱추론, 무게중심법 비퍼지화 방법을 사용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\xi_l(\dot{q}_i) = \mu_{A^l}(\dot{q}_i) / \sum_{l=1}^M \mu_{A^l}(\dot{q}_i) \tag{18}$$

또한  $\Theta_i = [\overline{y}_i^1, \overline{y}_i^2, \dots, \overline{y}_i^M]^T$ 이고 여기서  $\overline{y}_i^l$ 은  $\mu_{B^l}(y)$ 이 가지는 소속정도 중에서 가장 큰 값을 가지는 점에 대응되는 출력공간상의 실수 값을 나타낸다. 퍼지보상기의 입력 변수  $\tilde{q}_i, i=1, 2$ 상에 각각 5개의 퍼지집합, 즉 NB, NS, ZO, PS, PB로 설정하였으며 각 퍼지시스템의 입력변수가 하나이므로  $M=5$ 가 된다. 그리고 각 퍼지집합  $A^l$ 는 Gaussian 퍼지집합을 사용하였고 각 집합의 중심점의 위치를  $-\pi/6, -\pi/12, 0, \pi/12, \pi/6$ 로 설정하였다. 시뮬레이션에서 초기 파라미터  $\Theta_1(0) = \Theta_2(0) = [0, 0, \dots, 0]^T$ 로 하였으며 초기상태벡터는  $q(0) = [0.8, 0.5]^T$ 로 하였다.

그림 1과 2는 제안된 제어입력에 대한 각 관절각의 제어결과를 나타내며 그림 3과 4는 각 관절에 작용하는 마찰력과 각 퍼지보상기의 출력, 즉 마찰력의 추정치를 나타낸다. 그림 5와 6은 각 퍼지보상기의 파라미터 변화를 보인 것이다. 이 결과로부터 제안된 제어방식이 제어 목적을 충분히 달성하고 있음을 알 수 있고 또한 각 퍼지보상기가 각각의 마찰력을 허용 오차 내에서 잘 추정하고 있음을 확인할 수 있다.

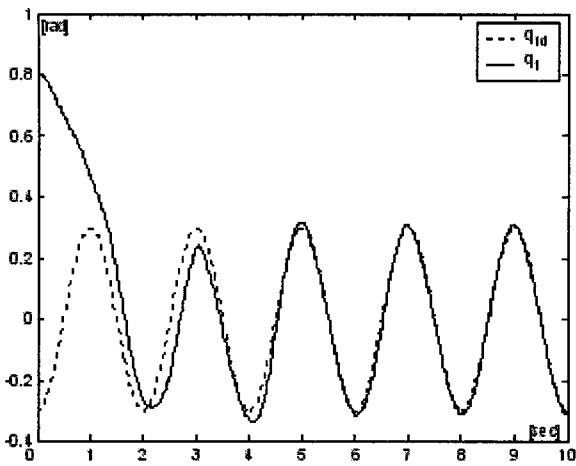


그림 1. 제어결과(관절 1의 각)  
Fig. 1. Control result(the angle of the joint 1)

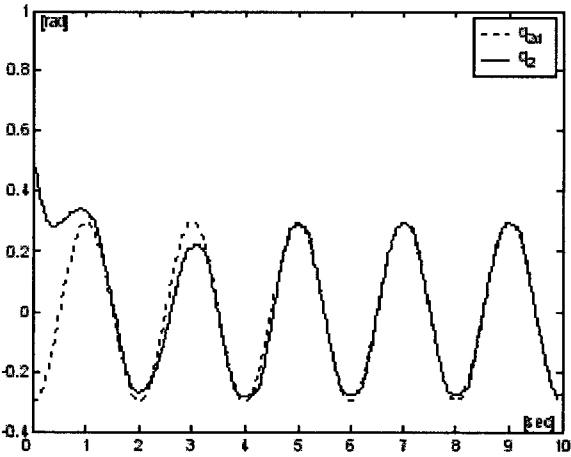


그림 2. 제어결과(관절 2의 각)  
Fig. 2. Control result(the angle of the joint 2)

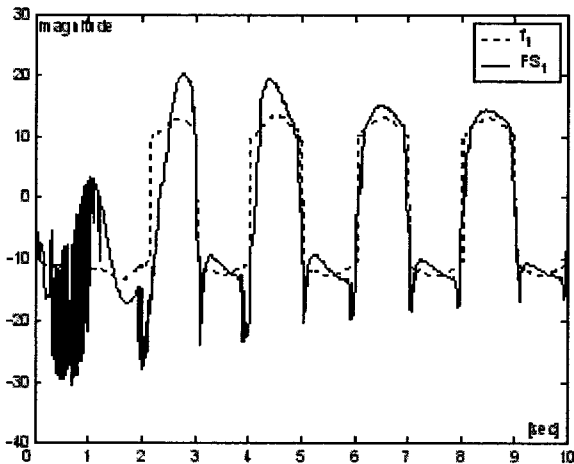


그림 3. 실제 마찰력-1과 퍼지시스템(퍼지보상기)-1 비교  
Fig. 3. Comparisons with real friction-1 and FS-1

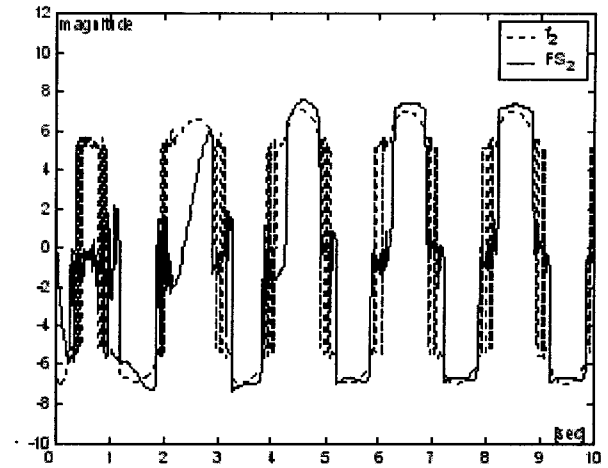


그림 4. 실제 마찰력-2와 퍼지시스템(퍼지보상기)-2 비교  
Fig. 4. Comparisons with real friction-2 and FS-1

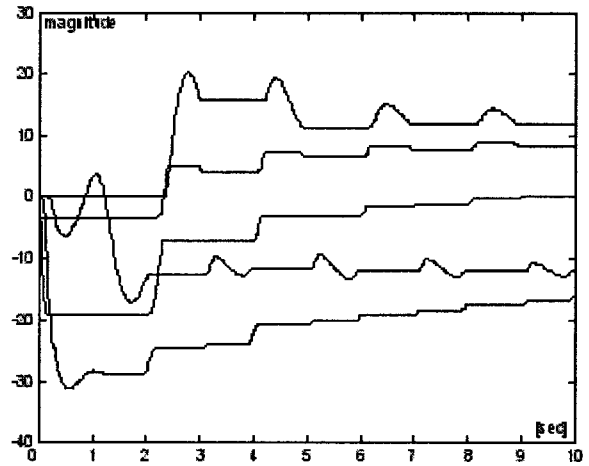


그림 5. 퍼지시스템(퍼지보상기)-1의 파라미터 변화  
Fig. 5. The updated parameter values of FS-2

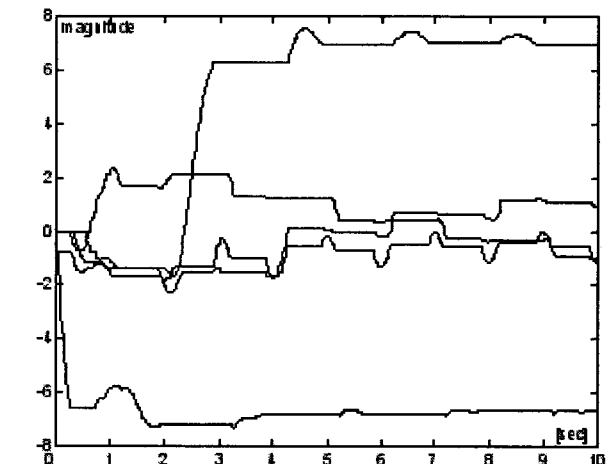


그림 6. 퍼지시스템(퍼지보상기)-2의 파라미터 변화  
Fig. 6. The updated parameter values of FS-2

## V. 결론

본 논문에서는 미지의 마찰력을 갖는 로봇 매니플레이터에 대한 적응보상기를 제안하였다. 여기서의 마찰력은 쿨롬 마찰력뿐만 아니라 비스코스 마찰력까지를 고려한 것이며 마찰력에 대하여 퍼지시스템을 이용하여 보상하는 방식을 제안하였다. 제안된 제어방식에 대한 전체시스템의 안정도를 Lyapunov 안정도 이론에 근거하여 증명하였고 타당한 적응법칙을 설계하였다. 제안된 제어방식이 로봇 매니플레이터 추적제어에서 원하는 제어성능을 보인다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 각 퍼지시스템이 실제 마찰력을 잘 근사함을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] B. Friedland and Y. Park, "On adaptive friction compensation," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 37, pp. 1609-1612, Oct. 1992.
- [2] B. Friedland, "A simple nonlinear observer for estimating parameters in dynamic systems," in *Proc. IFAC World Congr.*, Sydney, Australia, vol. 5, pp. 227-230, 1993.
- [3] A. Yazdizadeh and K. Khorasani, "Adaptive friction compensation based on the Lyapunov scheme," in *Proc. IEEE Int. Conf. Contr. Applicat.*, Dearborn, MI, pp. 1060-1065, Sept. 1996.
- [4] E. W. Bai, "Parametrization and adaptive compensation of friction forces," *Int. J. Adaptive Contr. Signal Processing*, vol. 11, pp. 21-31, 1997.
- [5] T.-L. Liao and T.-I. Chien, "An exponentially stable adaptive friction compensator," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 45, no. 5, pp. 977-980, May 2000.
- [6] G. Song, L. Cai, Y. Wang, and R. W. Longman, "A sliding-mode based smooth adaptive robust controller for friction compensation," *Int. J. Robust Nonlinear Contr.*, vol. 8, pp. 725-739, 1998.
- [7] B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont, and C. Canudas deWit, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," *Automatica*, vol. 30, no. 7, pp. 1083-1138, 1994.
- [8] J.-T. Huang, "An adaptive compensator for a class of linearly parameterized systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 47, no. 3, pp. 483-486, Mar. 2002.
- [9] B. K. Yoo and K. H. Yang, "An integration type adaptive compensator for a class of linearly parameterized systems," *Journal of Institute of Signal Processing and Systems(KISPS)*, vol. 6, no. 2, pp. 82-88, 2005.
- [10] J. J. E. Slotine and W. Li, "On the adaptive control of robot manipulators," *Int'l J. of Robotics Research*, vol. 6, no. 3, pp.49-59, 1987.
- [11] W. C. Ham and J. J. Lee, "Adaptive control based on speed gradient algorithm for robot manipulators," *IECON'94*, pp. 776-781, 1994.
- [14] B. K. Yoo and W. C. Ham, "Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 186-199, 2000.



### Byung-Kook Yoo

received the B.S. and M.S. and Ph.D. degrees in electronic engineering from Chonbuk National University in 1992, 1995 and 1999, respectively.

He is currently a full time lecturer in Hanlyo University.

His research interests include the areas of fuzzy system, adaptive control, robot control, biomedical engineering, orthotics and prosthetics



### 한 중 길

1992년 전북대학교 전자공학과(공학사)

1994년 전북대학교 전자공학과(공학석사)

2002년 전북대학교 전자공학과(공학박사)

현재 한려대학교 멀티미디어정보통신공학과 전임강사

관심분야 : 적응제어, VSS, 유전알고리즘



### Keun-Ho Yang

received the B.S. and M.S. and Ph.D. degrees in electronic engineering from Chonbuk National University in 1987, 1992 and 1999, respectively.

He is currently a full time lecturer in Hanlyo University.

His research interests include the areas of fuzzy system, adaptive signal processing, image processing, DSP applications