

퍼지논리 제어를 이용한 힘계환 제어

Force Feedback Control using Fuzzy Logic Controller

신 동 목, 서 삼 준*, 박 귀 태*, 김 동 식**

*고려대학교 전기공학과 (Tel: 926-6448; Fax: 923-1325; E-mail: dongmok@eeserver.korea.ac.kr)

**순천향대학교 제어계측공학과 (Tel: (0418)530-1370; E-mail: dongsik@asan.sch.ac.kr)

Abstracts The objective of this paper is to design a force feedback controller for bilateral control of a master-slave manipulator system. In a bilateral control system, the motion of the master device is followed by the slave one, while the force applied to the slave is reflected on the master. In this paper, a fuzzy logic controller is applied to the system. Using the fuzzy logic controller, the knowledge of the system dynamics is not needed. Simulations and experimental results show the performance of the proposed controller.

Keywords Fuzzy , Bilateral , Master-Slave, Force-feedback

1. 서 론

힘계환제어기법은 원격조종 매니플레이터 시스템의 조작자에게 유용한 정보를 제공하여 작업 능률을 향상시키는데 기여한다. 힘계환이 어셈블리 작업에 적용되면 접촉에 의해 야기된 힘과 토크를 조작자가 직접 느낄 수 있어 보다 빨리 작업을 수행할 수 있고, 안정도가 증가할 뿐만 아니라 다루어질 물체나 매니플레이터에 과도한 힘이 인가되어 발생하는 손상을 줄일 수 있는 장점이 있다.

기존의 master slave 시스템의 제어기는 시스템의 정확한 파라미터를 토대로 설계되기 때문에 정확한 모델링이나 파라미터를 얻기 어려운 매니플레이터에 대한 제어를 설계하기 어려운 점이 있었다.

본 논문에서는 1 자유도의 master slave 시스템의 제어기로서 퍼지논리제어를 제안하였다. 퍼지논리 제어기는 수학적 모델이 불필요하고 숙련자의 복잡한 작업지식을 표현하는 능력이 있어 정확한 파라미터를 알기 힘들거나 모델링이 어려운 시스템에 적용하는 것이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 간략화된 1자유도 시스템을 모델링하고 3장에서는 master-slave 시스템의 이상적 응답을 정의하여 퍼지논리 제어를 적용한 시스템을 제시하였다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션으로 제안된 제어기의 성능을 검증하였고, 마지막으로 5장에 결론을 실었다.

2. 1자유도 시스템

대부분의 master-slave 시스템은 다수의 자유도(multiple DOF)를 갖는 암으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 문제를 간단히 하기 위해 1 자유도 시스템만을 고려하기로 한다.

Master-slave 암의 특성방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_m + f_m = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m \quad (1)$$

$$\tau_s - f_s = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s \quad (2)$$

여기서 x_m, m_m, b_m 은 각각 master 암의 변위, 질량, 마찰계수이며 x_s, m_s, b_s 는 각각 slave 암의 변위, 질량, 마찰계수이다. f_m 과 f_s 는 각각 작업자가 master 암에 인가하는 힘과 slave 암이 작업대상에 인가하는 힘이다. τ_m 과 τ_s 는 각각 master 와 slave 암에 인가되는 제어기의 출력 토크이다.

slave 암과 작업대상 사이에 작용하는 동특성식은 다음과 같다.

$$f_s = m_w \ddot{x}_s + b_w \dot{x}_s + c_w x_s \quad (3)$$

여기서 m_w, b_w, c_w 는 각각 작업대상의 질량, 마찰계수, 탄성계수이다. (3) 에서 작업대상의 변위를 slave 의 변위로 쓴 것은 작업대상과 slave 암이 강체로 연결되어 있다고 가정하기 때문이다.

작업자의 동특성 또한 다음과 같이 근사화될 수 있다고 가정한다.

$$\tau_{op} - f_m = m_{op} \ddot{x}_m + b_{op} \dot{x}_m + c_{op} x_m \quad (4)$$

여기서 m_{op}, b_{op}, c_{op} 는 각각 작업자의 질량, 마찰계수, 탄성계수이며, τ_{op} 는 작업자의 근육에 의한 힘이다. (3) 에서와 마찬가지로 작업자는 master 암을 꼭 잡고 있는 것으로 가정한다.

실제적으로 작업자의 파라미터는 상수가 아니라 동작점에 따라 변하는 변수이다.

3. master-slave 시스템의 제어기 설계

3.1. 이상적 응답

본 논문에서는 master-slave 시스템의 이상적인 응답을 다음

과 같이 정의하기로 한다.[1]

Ideal Response: 작업자의 힘 τ_{op} 에 의한 위치응답 x_m 과 x_s . 힘응답 f_m 과 f_s 가 작업대상의 동특성에 관계없이 각각 같다.

위의 조건이 만족되면 작업자는 실제로 작업대상을 조작하는 것처럼 느끼게 된다.

3.2. 일반화된 제어구조

일반화된 제어구조는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\tau_m = \begin{bmatrix} K_{mpm} + K'_{mpm} \frac{d}{dt} + K''_{mpm} \frac{d^2}{dt^2} & K_{mfm} \\ -[K_{mps} + K'_{mps} \frac{d}{dt} + K''_{mps} \frac{d^2}{dt^2}] & K_{mfs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\tau_s = \begin{bmatrix} K_{spm} + K'_{spm} \frac{d}{dt} + K''_{spm} \frac{d^2}{dt^2} & K_{sfm} \\ -[K_{sps} + K'_{sps} \frac{d}{dt} + K''_{sps} \frac{d^2}{dt^2}] & K_{sfs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 K_{mpm} , K'_{mpm} , K''_{mpm} , K_{mfm} 은 각각 master 암의 위치, 속도, 가속도, 힘의 반환 이득이며, K_{mps} , K'_{mps} , K''_{mps} , K_{mfs} 은 각각 slave 암의 위치, 속도, 가속도, 힘의 반환 이득이다. 위의 8개의 반환이득을 이용해 τ_m 을 계산한다. 같은 방법으로 K_{spm} , K'_{spm} , K''_{spm} , K_{sfm} , K_{sps} , K'_{sps} , K''_{sps} , K_{sfs} 로 τ_s 를 계산할 수 있다.

(5) 와 (6) 에서, 모든 정보가 유효하고 master 와 slave 간의 전송 지연은 무시할만큼 작다고 가정하였다. 또한 master 와 slave 의 위치 및 힘의 척도가 같다고 가정하였다. 대부분의 실제 상황에서는 그렇지 못하나, 적절한 비례상수를 곱해주면 척도를 같게 놓을 수 있다.

3.3. master-slave 시스템의 퍼지 제어기의 구조

퍼지 제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고 부정확하여 불확실한 경우 기존 제어기들 보다 우수한 제어 성능을 나타내며 기존의 정확한 수학적 모델을 기초로 한 제어기의 단점을 보완하고, 인간의 의사 결정 방식을 도입하여 보다 인공지능적인 제어기가 될 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 제어기를 설계하는데 있어서 일반적인 체계가 정립되어 있지 않고 안정성과 제어 성능을 해석할 수 있는 이론적 바탕이 구축되어 있지 않다.

일반적인 퍼지 제어기의 구조는 측정값으로부터 유도된 오차값을 퍼지 입력으로 만드는 퍼지화부(Fuzzifier), 퍼지 입력으로부터 퍼지 출력을 추론하는 추론부(Inference engine), 퍼지 출력으로부터 실제 이용 가능한 값인 제어 입력을 계산하는 비퍼지화부(Defuzzifier), 소속 함수와 제어 규칙등의 정보를 제공하는 지식 기반(knowledge base)으로 구성되어 있다.

퍼지 논리 제어기를 적용한 master-slave 시스템의 구성은 다음 그림과 같다.

제어기는 master 와 slave 간의 위치오차와 힘오차를 0으로 만드는 역할을 한다. master 측에는 slave 에 인가되는 힘과 master 에 인가되는 힘의 차를 줄이는 방향으로 토크를 인가하며 slave 측에는 master 의 변위와 slave 의 변위의 차를 줄이는 방향으로 토크를 인가한다.

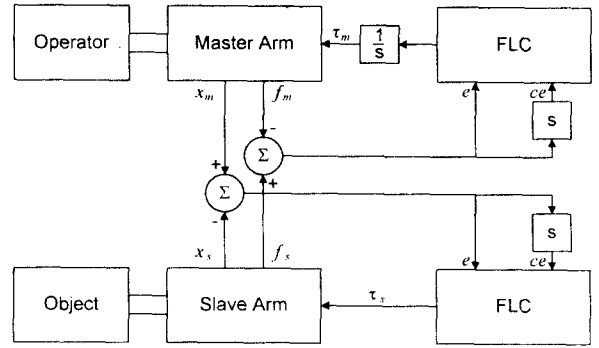


그림 1 master-slave 시스템의 구조

master 암의 제어기는 다음과 같이 PI-like FLC 로 구성하였다.

$$\begin{aligned} \Delta \tau_m(n) &= F(e_f(n), ce_f(n)) \\ e_f(n) &= f_s(n) - f_x(n) \\ ce_f(n) &= e_f(n) - e_f(n-1) \end{aligned}$$

반면 slave 암의 제어기는 다음과 같이 PD-like FLC 로 구성하였다.

$$\begin{aligned} \tau_s(n) &= F(e_x(n), ce_x(n)) \\ e_x(n) &= x_m(n) - x_s(n) \\ ce_x(n) &= e_x(n) - e_x(n-1) \end{aligned}$$

여기서 $F(\cdot)$ 는 퍼지 제어 규칙이며, master 측 제어기를 PI-like FLC 로 구성한 이유는 시스템에 인가되는 힘이 제어기 출력의 기울기에 비례하기 때문에 PD-like FLC 의 급격히 변하는 출력은 전체 시스템을 불안정하게 만들 위험이 있기 때문이다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

master-slave 시스템에 퍼지논리 제어기를 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

제어 규칙은 표 1의 규칙을, 소속함수는 입력 변수에 대해 7개의 언어 변수를 갖는 그림 2와 같은 삼각형 형태를 사용하였으며 각각 정규화 하였다. 퍼지화 방법으로는 단일화법, 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을, 퍼지 관계의 합성은 Mamdani가 사용한 최대 최소 합성법을 사용하였다.

표 1. 사용된 퍼지 규칙

ce-e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO

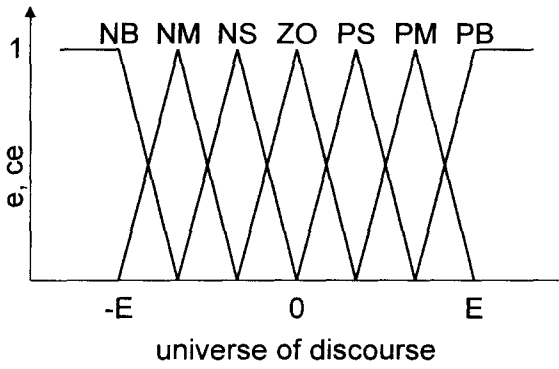


그림 2. 사용된 소속함수

시뮬레이션은 작업자의 조작 토크를

$$\tau_{op} = 5 - 5 \cos(4\pi t)$$

와 같이 인가했을 때 master 와 slave 암의 응답을 비교하였다.

시뮬레이션 파라미터는 다음과 같다.

샘플링 시간: $h = 0.002s$

master 암: $m_m = 6kg, b_m = 0.1 Ns/m$

slave 암: $m_s = 6kg, b_s = 0.1 Ns/m$

작업자: $m_{op} = 2kg, b_{op} = 2 Ns/m, c_{op} = 10 N/m$

작업대상: $m_w = 0.5kg, b_w = 0.1 Ns/m, c_w = 1.0 N/m$

master 측 FLC: SE = 0.1, SCE = 0.01, SU = 0.5

slave 측 FLC: SE = 0.005, SCE = 0.0005, SU = 0.5

퍼지 논리 제어기의 성능을 비교하기 위해 3.2 절에서 제안된 제어구조에서 force reflecting servo type 의 제어기를 사용하여 얻은 결과를 실었다. 그 파라미터는 다음과 같다.

$$k_{mfm} = 2.5, k_{mfs} = 2.5, k_{sps} = 400$$

$$k_{spm} = 400, k'_{sps} = 50$$

그림 3 은 force reflecting servo type 의 제어기를 사용한 master-slave 시스템의 변위그래프이며 그림 4, 5 는 각각 힘, 제어기 출력 토크 의 그래프이다.

그림 6,7,8 은 퍼지논리 제어기를 이용한 master-slave 시스템의 변위, 힘, 제어기 출력 토크의 그래프이다.

여기서 x_m, f_m, t_m 은 는 각각 master 암의 변위, 힘, 제어기 출력, x_s, f_s, t_s 은 는 각각 slave 암의 변위, 힘, 제어기 출력이다.

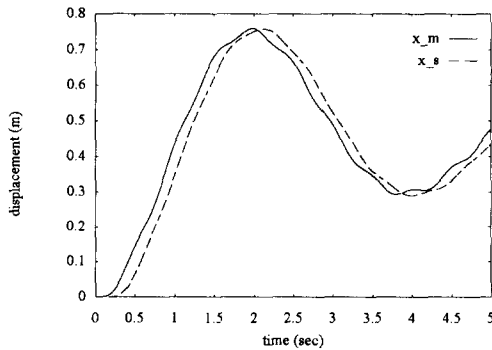


그림 3. force reflecting servo type, displacement graph

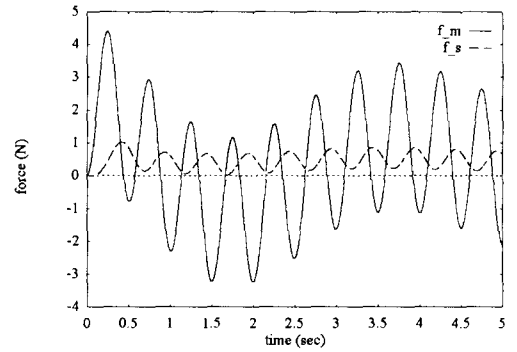


그림 4. force reflecting servo type, force graph

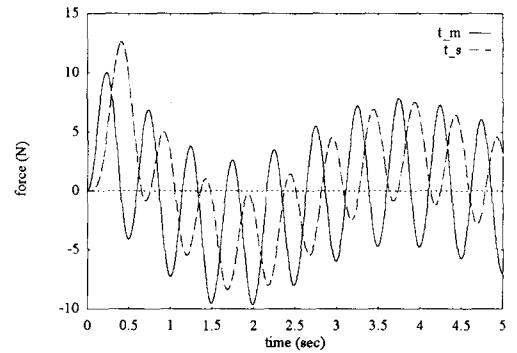


그림 5. force reflecting servo type, controller output graph

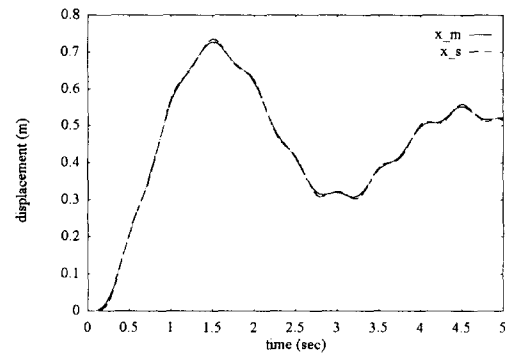


그림 6. FLC, displacement graph

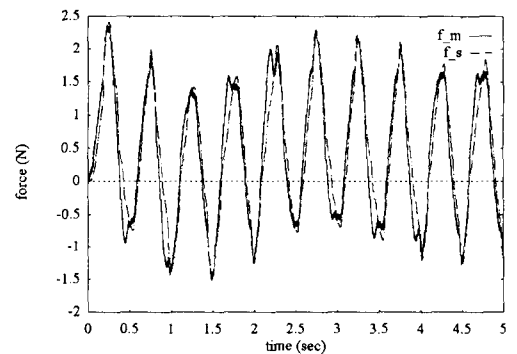


그림 7. FLC, force graph

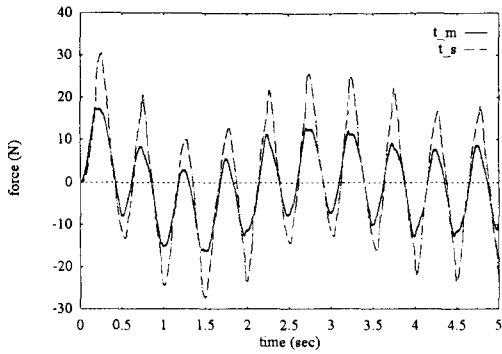


그림 8. FLC, controller output graph

5. 결론

본 논문에서는 master-slave 시스템의 제어기로서 퍼지 논리 제어기를 설계하였다. master 측 제어기로는 PI-like FLC 를 구성하였고 slave 측 제어기로는 PD-like FLC 를 구성하였다.

시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 force reflecting servo type 의 제어기의 결과보다 퍼지논리 제어기의 성능이 더 나은 성능을 보였다.

향후 연구과제로는 시스템 변수의 취득시 첨가되는 노이즈와 master-slave 간의 통신지연에 의한 시스템 안정성의 저하를 극복하는 것을 들 수 있겠다.

6. 참고 문헌

- [1] Y.Yokokohji and T.Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling -Formulation and experiment," in *IEEE trans. on Rob. and Aut.*, vol. 10, no. 5, pp. 605-620, 1994.
- [2] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback," in *IEEE trans. Robotics Automat.*, vol. 5, no. 4, pp.426-434, 1989.
- [3] R. Yager, P. Filev, "*Essentials of Fuzzy Modeling and Control*," John Wiley & Sons, 1994
- [4] M.Jamshidi, N.Vadiee and T.Ross, "*Fuzzy Logic and Control*", Prentice-Hall, 1993