

퍼지 슬라이딩 모드 제어를 이용한 Master-Slave System의 Bilateral Control

서삼준*, 서호준**, 김동식**, 박귀태***

*안양대 전기전자공학과, **순천향대 정보기술공학부, ***고려대 전기전자전파공학부

Bilateral Control of Master-Slave System using Fuzzy Sliding Mode Control

Sam-Jun Seo, Ho-Joon Seo, Dong-Sik Kim, Gwi-Tae Park
Anyang University, SoonChunHyang University, Korea University

Abstract - The objective of this paper is to design a force feedback controller for bilateral control of a master-slave manipulator system using fuzzy sliding mode control. In a bilateral control system, the motion of the master device is followed by slave the one. While the force applied to the slave is reflected on the master. In this paper, a proposed controller applied to the system. Adding a switching control term to the input, robustness is improved. Also the knowledge of the system dynamics is not needed. The computer simulation results show the performance of the proposed fuzzy sliding mode controller.

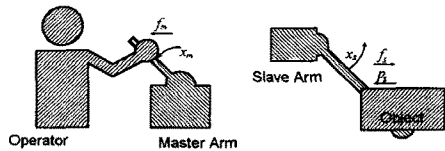


그림 1 자유도 1 시스템

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

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

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 master와 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 은 각각 작업대상의 질량, 마찰계수, 탄성계수이다. 식(3)에서 작업대상의 변위를 slave의 변위로 쓴 것은 작업대상과 slave 암이 강체로 연결되어 있다고 가정하였기 때문이다.

작업자의 동특성식 또한 다음과 같이 근사화할 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. 식(3)에서와 마찬가지로 master 암을 작업중에 꼭 잡고 있는 것으로 가정한다. 실제로 작업자의 파라미터는 상수가 아니라 동작점에 따라 변하는 변수이다.

3. master-slave 시스템의 제어기 설계

3.1 가변구조 제어기

작업자의 힘 τ_{op} 에 의한 위치 응답 x_m 과 x_s , 힘 응답 f_m 과 f_s 가 작업대상의 동특성에 관계없이 추종하는 이상적인 응답을 얻기 위해 다음과 같은 형태의 제어기를 고려해 보자.

$$\tau_m = m_m u_m + b_m \dot{x}_m - k_{mf} \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) - \frac{f_s - f_m}{2} \quad (5)$$

$$\tau_s = m_s u_s + b_s \dot{x}_s - k_{sf} \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) + \frac{f_s + f_m}{2} \quad (6)$$

여기서, k_{mf} , k_{sf} 는 힘 이득이고, u_m , u_s 는 새로운 입력이다.

식(5),(6)을 식(1), (2)에 각각 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

1. 서론

힘 제한 기법은 원격 조종 매니퓰레이터 시스템의 조작자에게 유용한 정보를 제공하여 작업 능력을 향상시키는데 기여한다. 힘 제한이 조립작업에 적용된다면 접촉에 의해 야기된 힘과 토크를 조작자가 직접 느낄 수 있어 보다 빨리 작업을 수행할 수 있고, 안정도가 증가할 뿐만 아니라 다루어질 물체나 매니퓰레이터에 과도한 힘이 인가되어서 발생하는 손상을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

기존의 master-slave 시스템의 제어기는 시스템의 정확한 파라미터를 토대로 설계되기 때문에 정확한 수학적 모델이나 파라미터를 얻기 어려운 매니퓰레이터에 대한 제어기를 설계하기가 어려웠다.

본 논문에서는 1 자유도의 master-slave 시스템의 제어기로서 퍼지 슬라이딩 모드를 도입한 새로운 제어기를 제안하였다. 제안한 제어기는 slave 암이 master 암의 위치 응답과 힘 응답까지 정확하게 추종하는 이상적인 응답 특성을 가지고 제어기 설계시 master slave 시스템의 정확한 수학적 모델이 필요하지 않을 뿐만 아니라 가변 구조 제어기가 가지고 있는 장점인 파라미터 변동이나 외란에 대해서도 강인한 특성을 가지고 있다. 또한 체계적인 획득 방법이 없어 시행 착오법이나 숙련된 전문가의 직관과 경험에 의존하던 퍼지 규칙을 스스로 생성해 주는 장점을 가지고 있다.

컴퓨터 모의실험을 통해 제안한 퍼지 슬라이딩 모드 제어기의 우수성을 입증하였다.

2. 1 자유도 master-slave 시스템

대부분의 master-slave 시스템은 다수의 자유도를 갖는 암으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 문제를 간단히 하기 위해 1 자유도 시스템만을 고려하기로 한다.

그림 1에 1 자유도를 갖는 master-slave 시스템을 나타내었다. Master-slave 암의 특성 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\ddot{x}_m = u_m - \frac{1}{m_m}(1 + k_{mf})\left(\frac{f_s - f_m}{2}\right) \quad (7)$$

$$\ddot{x}_s = u_s - \frac{1}{m_s}(1 + k_{sf})\left(\frac{f_s - f_m}{2}\right) \quad (8)$$

식(8), (9)의 양변을 더하면 다음과 같다.

$$\ddot{x}_m + \ddot{x}_s = u_m + u_s - \left(\frac{1 + k_{mf}}{m_m} + \frac{1 + k_{sf}}{m_s}\right)\left(\frac{f_s - f_m}{2}\right) \quad (9)$$

식(9)에서 식(10)의 관계가 성립되면 식(11)을 얻을 수 있다.

$$\ddot{x}_m + \ddot{x}_s = u_m + u_s \quad (10)$$

$$f_m - f_s = 0 \quad (11)$$

식(11)이 만족되면 이상적인 힘 응답 특성을 얻을 수 있다.

식(7)에서 식(10)을 뺀 후 식(11)이 만족되면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e} = u_m - u_s \quad (12)$$

여기서, $e = x_m - x_s$ 는 두 암 사이의 위치 오차이다.

가변구조 제어 개념을 도입하기 위해 스위칭 평면을 다음과 같이 선정하자.

$$s = \dot{e} + k_1 e = 0 \quad (13)$$

슬라이딩 모드 존재 조건 $ss' < 0$ 을 만족하기 위하여 다음과 같이 제어 입력을 선정하자.

$$\dot{s} = \ddot{e} + k_1 \dot{e} = -K \text{sgn}(s) \quad (14)$$

식(14)는 도달 법칙이 만족되도록 제어 입력이 선정되기 때문에 e 가 점진적으로 수렴하게 되어 이상적인 위치 응답 즉, $x_m = x_s$ 를 얻을 수 있다.

식(14)에서 식(12)를 이용하여 \ddot{e} 를 치환하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$u_m - u_s = -k_1 \dot{e} - K \text{sgn}(s) \quad (15)$$

식(10)과 (15)를 이용하면 u_m 과 u_s 에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$u_m = \frac{1}{2}(\ddot{x}_m + \ddot{x}_s - k_1 \dot{e} - K \text{sgn}(s)) \quad (16)$$

$$u_s = \frac{1}{2}(\ddot{x}_m + \ddot{x}_s + k_1 \dot{e} + K \text{sgn}(s)) \quad (17)$$

마지막으로 식(5)와(6)을 이용하여 τ_m 과 τ_s 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\tau_m = m_m \left[\ddot{x}_{ms} + k_1 (\dot{x}_{ms} - \dot{x}_m) - K \text{sgn}(s) \right] + b_m \dot{x}_m - k_{mf}(f_{ms} - f_m) - f_{ms} \quad (18)$$

$$\tau_s = m_s \left[\ddot{x}_{ms} - k_1 (\dot{x}_{ms} - \dot{x}_m) - K \text{sgn}(s) \right] + b_m \dot{x}_m - k_{mf}(f_{ms} - f_m) + f_{ms} \quad (19)$$

여기서, $x_{ms} = \frac{x_m + x_s}{2}$ 이고 $f_{ms} = \frac{f_m + f_s}{2}$ 이다.

식(18)을 등가입력과 스위칭 입력으로 나누어 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_m = \tau_m^{eq} + \tau_m^s \quad (20)$$

$$\tau_m^{eq} = m_m \left[\ddot{x}_{ms} + k_1 (\dot{x}_{ms} - \dot{x}_m) \right] + b_m \dot{x}_m - k_{mf}(f_{ms} - f_m) - f_{ms} \quad (21)$$

$$\tau_m^s = -m_m K \text{sgn}(s) \quad (22)$$

가변구조 제어기는 식(11)을 만족하여 힘 응답을 추종하고 식(14)에 의해 위치 응답을 추종하여 이상적인 응답 특성을 가지게 될 뿐만 아니라 파라미터 변동이나 외란에 강인한 특성을 가지며 m_m , m_s , b_m , b_s 와 같은 master-slave 시스템의 물리적 파라미터를 정확히 모를 경우에는 가변 이득의 K 를 크게하여 파라미터 불확실성을 보상하여야 한다. 그러나, 스위칭 입력 K 의 크기가 클수록 외란이나 불확실성에 대한 강인성은 증가

하고 기준입력을 안정하게 추종하게 되지만 채터링을 발생시켜 시스템의 모델화되지 않은 동특성을 여기하는 문제점을 가지고 있다.

3.2 제안한 퍼지 슬라이딩 모드 제어기

퍼지 논리 제어기에 사용되는 퍼지 규칙은 체계적인 획득 방법이 없어 시행 착오법이나 숙련된 전문가의 직관과 경험에 주로 의존하여 퍼지 제어기의 실제 적용을 어렵게 한다. 따라서, 본 연구에서는 퍼지 규칙을 스스로 생성하여 주는 최대 경사법을 이용한 자기 동조형 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 제안한다.

제어 규칙을 동조시키기 위한 적응 알고리즘은 시스템 재적을 슬라이딩 모드에 머무르게 하는 제어 규칙의 결론부 파라미터를 수정하는 방법을 이용하였다. 슬라이딩 모드 조건 ($ss' < 0$)이 만족된다면 스위칭 함수는 0이 되고 원하는 시스템의 동특성을 얻을 수 있다. 이러한 슬라이딩 모드 조건에 의해 ss' 의 값을 최소화하는 방향으로 결론부 파라미터를 수정하면 채터링이 감소하고 도달 법칙에 의해 슬라이딩 모드 조건도 만족이 된다.

최대 경사법 (gradient descent method)에 의해, 결론부 파라미터는 다음과 같이 수정된다.

$$\dot{K}_j = -\gamma \frac{\partial ss'}{\partial K_j} \quad (23)$$

여기서, Γ 는 적응 이득이다. chain rule에 의해, 식(23)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{K}_j &= -\gamma \frac{\partial ss'}{\partial u} \frac{\partial \tau_m}{\partial K_j} \\ &= -\gamma \frac{\partial ss'}{\partial \tau_m^s} \frac{\partial \tau_m^s}{\partial K_j} - \gamma \frac{\partial ss'}{\partial \tau_m^{eq}} \frac{\partial \tau_m^{eq}}{\partial K_j} \end{aligned} \quad (24)$$

식(24)에서 등가 제어 입력 u_m^{eq} 는 상태에만 의존하기 때문에 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \tau_m^{eq}}{\partial K_j} = 0 \quad (25)$$

따라서, 식(24)은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{K}_j = -\gamma \frac{\partial ss'}{\partial \tau_m^s} \frac{\partial \tau_m^s}{\partial K_j} \quad (26)$$

식(14)을 이용하여 $\frac{\partial ss'}{\partial \tau_m^s}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial ss'}{\partial \tau_m^s} = s m_m \quad (27)$$

스위칭 제어 입력 τ_m^s 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_m^s = -\hat{m}_m^{-1} \text{sgn}(s) \frac{\sum_{j \in J} \mu_j K_j}{\sum_{j \in J} \mu_j} \quad (28)$$

따라서 $\frac{\partial \tau_m^s}{\partial K_j}$ 는 식(29)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \tau_m^s}{\partial K_j} = -\hat{m}_m^{-1} \text{sgn}(s) \frac{\mu_j}{\sum_{j \in J} \mu_j} \quad (29)$$

따라서 식(27)과 식(29)를 식(26)에 대입하면 제어 규칙의 결론부 파라미터를 수정하는 적응 알고리즘은 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{K}_j = \gamma \frac{m_m}{\hat{m}_m} |s| \frac{\mu_j}{\sum_{j \in J} \mu_j} \quad (30)$$

식(30)에서 일반적으로 m_m 의 부호는 정이므로 결론부 파라미터의 수정칙은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\dot{K}_j \cong \gamma |s| \frac{\mu_j}{\sum_{j \in J} \mu_j} \quad (31)$$

3.3 컴퓨터 모의실험

MATLAB을 이용한 컴퓨터 모의실험에서 작업자의 작업 토크를 아래와 같이 인가하였을 때 master와 slave 압의 응답을 비교하였다.

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

master-slave system의 파라미터는 다음과 같이 사용하였다.

master 압 : $m_m = 6\text{Kg}$, $b_m = 0.1\text{Ns/m}$

slave 압 : $m_s = 6\text{Kg}$, $b_s = 0.1\text{Ns/m}$

작업자 : $m_{op} = 2\text{Kg}$, $b_{op} = 2\text{Ns/m}$, $b_{op} = 10\text{N/s}$

작업대상 : $m_w = 0.5\text{Kg}$, $b_w = 0.1\text{Ns/m}$, $b_w = 0.1\text{N/s}$

샘플링시간 : $h = 0.002\text{sec}$

제한한 제어기의 성능을 입증하기 위하여 master-slave system을 제어하기 위한 대표적인 force reflecting servo type 제어기와 비교하였다.

컴퓨터 모의실험에 사용된 force reflecting servo type 제어기의 형태와 파라미터는 다음과 같다.

$$\tau_m = K_{mfm}f_m - K_{mfs}f_s$$

$$\tau_s = K_{spm}x_m - K_{sps}x_s - K'x'_s$$

여기서, $K_{mfm} = 2.5$, $K_{mfs} = 3.5$, $K_{mfm} = 400\text{N/m}$,

$K_{mfm} = 400\text{N/m}$, $K'_{sps} = 50\text{Ns/m}$ 이다.

그림 2에 force reflecting servo type 제어기를 이용한 master-slave 시스템의 위치 응답을 그림 3에 힘 응답을 각각 나타내었다.

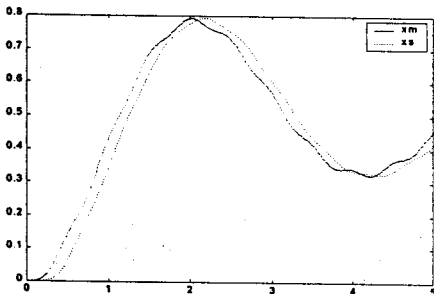


그림 2 위치 응답(force reflecting servo type)

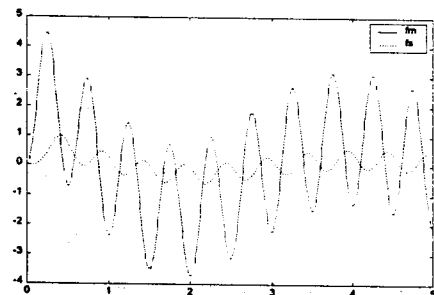


그림 3 힘 응답(force reflecting servo type)

그림 4에 제안한 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 master-slave 시스템의 위치 응답을 그림 5에 힘 응답을 각각 나타내었다. 컴퓨터 모의실험 결과 제안한 제어기는 기존의 제어기와 비교해 slave 압이 master 압의 위치 응답과 힘 응답까지 정확하게 추종하는 이상적인 응답 특성을 가진다.

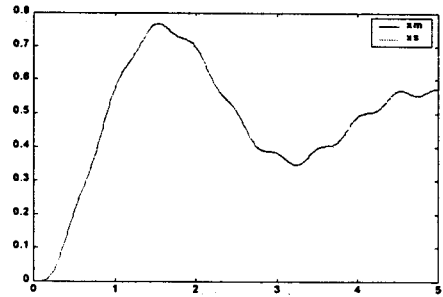


그림 4 위치 응답(제안한 제어기)

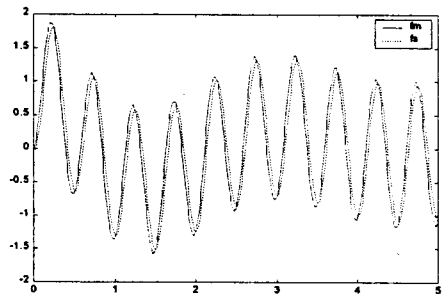


그림 5 힘 응답(제안한 제어기)

3. 결 론

본 논문에서는 1 자유도의 master-slave 시스템의 제어기로서 퍼지 슬라이딩 모드를 도입한 새로운 제어기를 제안하였다. 제안한 제어기는 slave 압이 master 압의 위치 응답과 힘 응답까지 정확하게 추종하는 이상적인 응답 특성을 가지고 제어기 설계시 master-slave 시스템의 정확한 수학적 모델이 필요하지 않을 뿐만 아니라 가변 구조 제어기가 가지고 있는 장점인 파라미터 변동이나 외란에 대해서도 강인한 특성을 가지고 있다. 또한 체계적인 획득 방법이 없어 시행착오법이나 숙련된 전문가의 직관과 경험에 의존하던 퍼지 규칙을 스스로 생성해 주는 장점을 가지고 있다.

컴퓨터 모의실험 결과 force reflecting servo type의 제어기보다 위치 응답과 힘 응답 모두 우수한 성능을 보인다.

(참 고 문 헌)

- [1] Y.Yokokohji & 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] M.Jamshidi, N.Vadiee and T.Ross, "Fuzzy Logic and Control," Prentice-Hall, 1993
- [4] H. Kazerooni, Tsing-Iuan Tsay, Karin Hollerbach, "A controller Design Framework for Telerobotic Systems," in *IEEE trans. on Control System Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 50-62, 1993.