

이상적인 응답 특성을 갖는 Master-Slave System의 Bilateral Control

서삼준*, 김동식, 박귀태
 안양대 전기전자공학과, 순천향대 정보기술공학부, 고려대 전기전자전파공학부

Bilateral control of Master-Slave System with Ideal Response

Sam-Jun 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. 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 proposed controller applied to the system. Adding a switching control term to control input, robustness is improved. Also the knowledge of the system dynamics is not needed. The computer simulation results show the performance of the proposed controller.

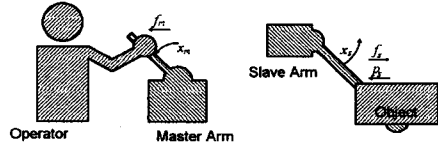


그림 1 자유도 1 시스템

Master-slave 암의 특성 방정식은 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 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 는 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 작업자는 master 암을 작업중에 꼭 잡고 있는 것으로 가정한다. 실제적으로 작업자의 파라미터는 상수가 아니라 동작점에 따라 변하는 변수이다.

2.2 master-slave 시스템의 제어기 설계

2.2.1 이상적인 응답

본 논문에서는 master-slave 시스템의 이상적인 응답을 다음과 같이 정의하기로 한다. [1]

Ideal response : 작업자의 힘 τ_{op} 에 의한 위치 응답 x_m 과 x_s . 힘 응답 f_m 과 f_s 가 작업대상의 동특성에 관계없이 각각 같다.

위의 조건이 만족되면 작업자는 실제로 작업대상을 조작하는 것처럼 느끼게 된다.

1. 서 론

힘 궤환 기법은 원격 조종 매니퓰레이터 시스템의 조작자에게 유용한 정보를 제공하여 작업 능력을 향상시키는데 기여한다. 힘 궤환이 조립작업에 적용되면 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 인가되어 발생하는 손상을 줄일 수 있는 장점이 있다.

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

본 논문에서는 1 자유도의 master-slave 시스템의 제어기로서 가변구조 형태의 새로운 제어기를 제안하였다. 제안한 제어기는 slave 암이 master 암의 위치 응답과 힘 응답까지 정확하게 추종하는 이상적인 응답 특성을 가질 뿐만 아니라 master-slave 시스템의 정확한 파라미터가 필요하지 않을 뿐만 아니라 가변구조 제어기가 가지고 있는 장점인 파라미터 변동이나 외란에 대해서도 강한 특성을 가지고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서는 간략화된 1 자유도 master-slave 시스템을 모델링하고 2.2절에서는 master-slave 시스템의 이상적인 응답을 정의하여 가변구조 형태의 새로운 제어기를 제안하였다. 2.3절에서는 컴퓨터 시뮬레이션으로 제안한 제어기의 성능을 검증하였고 마지막으로 3장에 결론을 실었다.

2. 본 론

2.1 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 2는 1 자유도를 갖는 master-slave 시스템을 나타낸다.

2.2.2 일반화된 제어 구조

일반화된 제어 구조는 아래와 같은 식으로 주어진다.

$$\tau_m = \begin{bmatrix} K_{m_{pm}} + K'_{m_{pm}} \frac{d}{dt} + K''_{m_{pm}} \frac{d^2}{dt^2} & K_{m_{fm}} \\ K_{m_{ps}} + K'_{m_{ps}} \frac{d}{dt} + K''_{m_{ps}} \frac{d^2}{dt^2} & K_{m_{fs}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\tau_s = \begin{bmatrix} K_{s_{pm}} + K'_{s_{pm}} \frac{d}{dt} + K''_{s_{pm}} \frac{d^2}{dt^2} & K_{s_{fm}} \\ K_{s_{ps}} + K'_{s_{ps}} \frac{d}{dt} + K''_{s_{ps}} \frac{d^2}{dt^2} & K_{s_{fs}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $K_{m_{pm}}, K'_{m_{pm}}, K''_{m_{pm}}, K_{m_{fm}}$ 은 각각 master 암의 위치, 속도, 가속도, 힘의 계환 이득이며 $K_{m_{ps}}, K'_{m_{ps}}, K''_{m_{ps}}, K_{m_{fs}}$ 은 각각 slave 암의 위치, 속도, 가속도, 힘의 계환 이득이다. 위의 8개의 계환 이득을 이용해 τ_m 을 계산한다. 같은 방법으로 τ_s 를 계산할 수 있다.

식 (5)와 (6)에서 모든 정보가 유효하고, master와 slave 간의 전송지연은 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 또한 master와 slave의 위치 및 힘의 척도가 같다고 가정하였다. 대부분의 실제 상황에서는 그렇지 못하나, 적절한 비례상수를 곱해주면 척도를 같게 할 수 있다.

일반적 제어구조 중 어떤 이득을 사용하는지 여부에 따라 아래와 같은 3가지 형태의 제어가 주로 많이 사용되고 있다.

1) Symmetric Position Servo Type

$$K_{m_{pm}}, K_{m_{ps}}, K'_{m_{pm}}, K_{s_{pm}}, K_{s_{ps}}, K'_{s_{ps}}$$

2) Force Reflecting Type

$$K_{m_{fs}}, K_{s_{fm}}, K_{s_{ps}}, K'_{s_{ps}}$$

3) Force Reflecting Servo Type

$$K_{m_{fm}}, K_{m_{fs}}, K_{s_{pm}}, K_{s_{ps}}, K'_{s_{ps}}$$

2.3 제안한 제어기의 설계

이상적인 응답을 얻기 위해 다음과 같은 형태의 제어를 고려해 보자.

$$\tau_m = m_m u_m + b_m \dot{x}_m - k_m \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) - \frac{f_s - f_m}{2} \quad (7)$$

$$\tau_s = m_s u_s + b_s \dot{x}_s - k_s \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) + \frac{f_s + f_m}{2} \quad (8)$$

여기서, k_m, k_s 는 힘 이득이고 u_m, u_s 는 새로운 입력이다.

m_m, m_s, b_m, b_s 와 같은 물리적 파라미터를 모두 정확히 안다고 가정하고 식 (7), (8)을 식 (1), (2)에 각각 대입하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{x}_m = u_m - \frac{1}{m_m} (1 + k_m) \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) \quad (9)$$

$$\ddot{x}_s = u_s - \frac{1}{m_s} (1 + k_s) \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) \quad (10)$$

식 (9), (10)의 양변을 더하면 다음과 같다.

$$\ddot{x}_m + \ddot{x}_s = u_m + u_s - \left(\frac{1 + k_m}{m_m} + \frac{1 + k_s}{m_s} \right) \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) \quad (11)$$

식 (11)에서 식 (12)의 관계가 성립하면 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\ddot{x}_m + \ddot{x}_s = u_m + u_s \quad (12)$$

$$f_m - f_s = 0 \quad (13)$$

식 (13)이 만족되면 이상적인 힘 응답 특성을 얻을 수 있다.

식 (9)에서 식 (10)을 뺀 후 식 (13)이 만족되면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e} = u_m - u_s \quad (14)$$

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

가변구조 제어 개념을 도입하기 위하여 스위칭 평면을 다음과 같이 선정하자.

$$s = \dot{e} + k_1 e = 0 \quad (15)$$

슬라이딩 모드 존재 조건 $s\dot{s} < 0$ 을 만족하기 위해 다음과 같이 제어 입력을 선정하자.

$$\dot{s} = \ddot{e} + k_1 \dot{e} = -K \operatorname{sgn}(s) \quad (16)$$

식 (16)은 도달법칙이 만족되도록 제어 입력이 선정되기 때문에 e 가 점근적으로 수렴하게 되어 이상적인 위치 응답 즉, $x_m = x_s$ 를 얻을 수 있다.

식 (16)에서 식 (14)를 이용하여 \dot{e} 를 치환하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$u_m - u_s = -k_1 \dot{e} - K \operatorname{sgn}(s) \quad (17)$$

식 (12)와 (17)을 이용하면 u_m 과 u_s 에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$u_m = \frac{1}{2} (\ddot{x}_m + \ddot{x}_s - k_1 \dot{e} - K \operatorname{sgn}(s)) \quad (18)$$

$$u_s = \frac{1}{2} (\ddot{x}_m + \ddot{x}_s + k_1 \dot{e} + K \operatorname{sgn}(s)) \quad (19)$$

마지막으로 식 (7)과 (8)을 이용하여 제안한 새로운 제어를 τ_m, τ_s 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\tau_m = m_m \left[\ddot{x}_m + k_1 (\dot{x}_m - \dot{x}_m) - K \operatorname{sgn}(s) \right] + b_m \dot{x}_m - k_m (f_{ms} - f_m) - f_{ms} \quad (20)$$

$$\tau_s = m_s \left[\ddot{x}_s - k_1 (\dot{x}_m - \dot{x}_m) + K \operatorname{sgn}(s) \right] + b_s \dot{x}_s - k_s (f_{ms} - f_m) + f_{ms} \quad (21)$$

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

제안한 제어기는 식 (13)을 만족하여 힘 응답을 추종하고 식 (16)에 의해 위치응답을 추종하여 이상적인 응답 특성을 가지게 된다. 또한 스위칭 이득 K 를 적당히 선정함으로써 파라미터 변동이나 외란에 강인한 특성도 얻을 수 있을 뿐만 아니라 m_m, m_s, b_m, b_s 와 같은 물리적 파라미터를 정확히 모를 경우에도 적용이 가능하다는 장점을 가진다.

2.4 컴퓨터 모의실험

MATLAB을 이용한 컴퓨터 모의실험에서 작업자의 조작 토크를 아래와 같이 인가하였을 때 master와 slave 암의 응답을 비교하였다.

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

master-slave system의 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같이 사용하였다.

샘플링 시간 : $h = 0.002$ sec

master 암 : $m_m = 6$ Kg, $b_m = 0.1$ Ns/m

slave 암 : $m_s = 6$ Kg, $b_s = 0.1$ Ns/m

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

작업대상 : $m_w = 0.5$ Kg, $b_w = 0.1$ Ns/m, $c_w = 0.1$ N/s

force reflecting servo type의 제어기 구성에 사용한 파라미터는 다음과 같다.

$$K_{m_{fm}} = 2.5, K_{m_{fs}} = 3.5$$

$$K_{s_{ps}} = K_{s_{pm}} = 400$$
 N/m, $K'_{s_{ps}} = 50$ Ns/m

그림 2에는 force reflecting servo type의 제어기를

이용한 master-slave 시스템의 위치 응답을 그림 3에
는 힘 응답을 각각 나타내었다.

위치 응답은 약간의 오차를 보이면서 지연이 일어나서
추종하는 반면에 힘 응답은 master 측과 slave 측의
응답이 완전히 다르게 나타나 이상적인 응답특성을 얻을
수는 없었다.

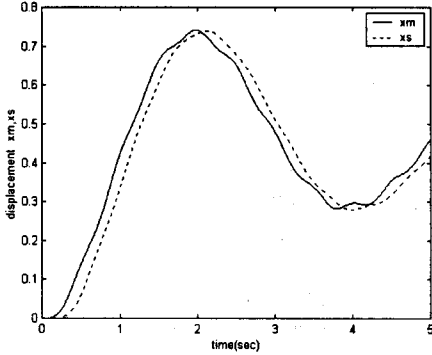


그림 2 force reflecting servo type의 위치 응답

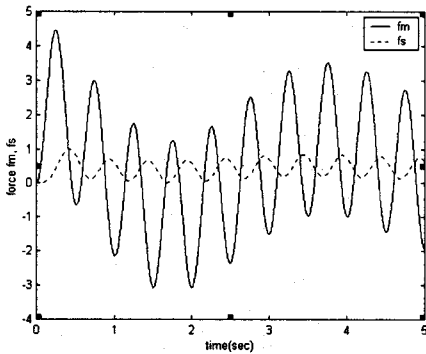


그림 3 force reflecting servo type의 힘 응답

스위칭 이득 $K = 0.01$, $k_1 = 4$ 로 두고 제한한 제어
기를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 행하였다.

그림 4에는 제한한 제어를 이용한 master-slave
시스템의 위치 응답을 그림 5에는 힘 응답을 각각 나타
내었다.

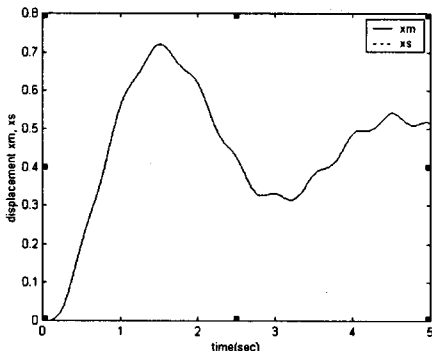


그림 4 제한한 제어기의 위치 응답

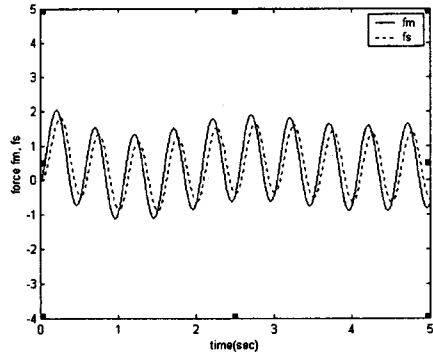


그림 5 제한한 제어기의 힘 응답

그림 4에 나타난 것과 같이 slave 압은 정확하게
master 압의 궤적을 추종하고 그림 5를 보면 힘 응
답에서도 slave 압이 master 압을 잘 추종함을 볼
수 있다. 위치 응답과 힘 응답 모두 잘 추종하여 마
치 조작자가 실제 작업대상을 조종하는 것과 같은
이상적인 응답 특성을 갖는 master-slave 시스템이
구현됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 이상적인 응답 특성을 가지는
master-slave 시스템의 제어를 제안하였다. 제안
한 제어기는 slave 압이 master 압의 위치 응답과 힘
응답까지 정확하게 추종하는 이상적인 응답 특성을 가
질 뿐만 아니라 master-slave 시스템의 정확한 파라
미터가 필요하지 않을 뿐만 아니라 가변구조 제어기가
가지고 있는 장점인 파라미터 변동이나 외란에 대해서도
강인한 특성을 가지고 있다.

컴퓨터 모의실험 결과 force reflecting servo type
의 제어기보다 위치 응답과 힘 응답 모두 우수한 성능을
보여 이상적인 응답 특성을 가짐을 알 수 있었다.

{참 고 문 헌}

- [1] Y.Yokohji and T.Youshikawa, "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] K. Furuta *et al.*, "Master-slave manipulator based on virtual internal model following control concept," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 567-572, 1987
- [4] T. B. Sheridan, "Telerobotics," *Automatica*, vol. 25, no. 4, pp. 487-507, 1989
- [5] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *IEEE Trans. on. Automatic Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494-501, 1989