

시간지연을 가진 매스터-슬레이브 시스템의 제어에 관한 연구 Control of Master-Slave System with Time Delay

정원진(성균관대 대학원)*, 최혁렬(성균관대 기계공학부)**

W. J. Jung (Graduate School, S.K.K.Univ.), H. R. Choi (Department of Mechanical Engineering, S.K.K.Univ.)

ABSTRACT

In master-slave teleoperation system, time delay may be a critical problem because a task is performed over a distance. Even if the system is stable without time delay, time delay can make the system unstable. In this paper a new control scheme applicable to the system with time delay would be proposed, which is based on the conventional position-position feedback type controller. The stability of this control system is proved using scattering theory, and is compared with the conventional ones. By performing the simulation of a one-d.o.f master-slave system, the validity of the proposed algorithm is verified.

Key Words : master-slave teleoperation system(매스터-슬레이브 원격조작시스템), time delay(시간지연), stability(안정성)

1. 서 론

매스터-슬레이브 원격조작 시스템(master-slave teleoperation system)은 인간이 직접 작업하기 힘든 심해, 우주 공간, 방사능지역 등과 같은 극한 작업 환경에서 인간 대신에 로봇으로 하여금 작업을 수행하도록 하는 것이다[1]. 일반적인 매스터-슬레이브 시스템에서는 조작자에 의해 조작되는 매스터 매니퓰레이터(master manipulator)의 위치 또는 속도 정보가 슬레이브(slave)측으로 보내지고 슬레이브측의 힘정보는 매스터 측으로 되돌려지게 된다[4]. 따라서 이러한 시스템에서는 상호 정보의 교환을 위하여 통신블럭(communication block)이 필요하게 되며 일반적으로 조작자측과 작업공간 사이의 거리가 멀어지게 되면 시간지연(time delay)은 피할 수 없는 문제가 된다. 시간지연이 없는 시스템이 비록 안정할지라도 동일한 시스템에 시간지연이 발생하게 되면 시스템이 불안해지게 된다. 지금까지 시간지연에 의한 문제점을 극복하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.

Anderson과 Spong은 통신블럭의 안정성을 유지하여 일정한 시간지연이 존재하는 시스템에서 시스템을 안정하게 유지할 수 있는 제어법칙을 제안하였으나 이 방법에서는 통신블럭의 안정성만을 고려하였다.[3].

Yoshikawa와 Ueda는 시간지연이 존재하는 시스템에서 안정성을 유지할 수 있는 4가지 형태의 제어 방법을 정의하고 이들 이론을 기본으로 안정성을 유지하면서 시스템의 조작성을 높일 수 있는 새로운 제어방법을 제안하였다[5].

↳ Kosuge등은 Anderson이 제안한 제어방법을 기본으로

가상시간지연(virtual time delay)을 제안하여 컴퓨터 네트워크(computer network)상에서의 불규칙한 시간지연에 적용 가능한 제어방법을 제안하였으나 시간지연의 양상을 먼저 알고 있어야 한다는 단점이 있다[6].

본 논문에서는 일정한 시간지연에 의한 문제를 해결하기 위한 새로운 제어법칙을 제안한다. 전통적인 제어방법인 위치-위치 피드백(position-position feedback) 형태의 제어기를 기본으로 시간지연을 고려한 제어기를 설계할 것이다. 스캐터링(scattering) 이론을 사용하여 제안된 제어방법을 사용한 시스템의 안정성 해석을 수행하게 될 것이며, 또한 1자유도 매스터-슬레이브 시스템의 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어방법의 유효성을 보이게 될 것이다.

2. 매스터-슬레이브 시스템

2.1 매스터-슬레이브 시스템의 모델링

매스터-슬레이브 시스템은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 조작자, 매스터 매니퓰레이터, 통신블럭, 슬레이브 매니퓰레이터, 그리고 작업환경의 5가지 부분으로 구성된다.

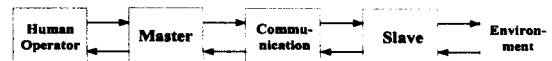


Fig. 1: Block diagram of teleoperation system

일반적으로 매스터-슬레이브 시스템에서 매스터와 슬레이브 매니퓰레이터는 다자유도 로봇팔(arm)로 구성되나,

본 논문에서는 문제의 단순화를 위하여 1 자유도의 마스터와 슬레이브 매니플레이터로 이루어진 시스템을 기본으로 고려하였다. Fig. 2는 마스터-슬레이브 시스템의 개략도를 보여준다.

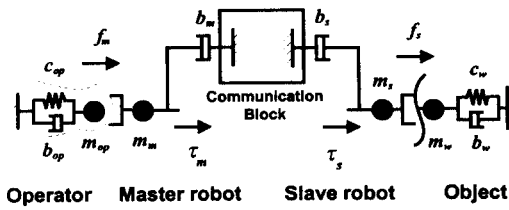


Fig. 2: Schematic diagram of teleoperation system

먼저 마스터, 슬레이브 매니플레이터의 동역학적 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

여기서 x_m 와 x_s 는 각각 마스터와 슬레이브 매니플레이터의 변위를 나타내고, m_m , m_s , b_m , 과 b_s 는 각각 마스터와 슬레이브의 질량과 점성계수(viscous coefficient)를 나타낸다. τ_m , τ_s 는 마스터와 슬레이브 매니플레이터의 액추에이터구동력(actuator driving force)을, f_m , f_s 는 각각 조작자와 마스터 사이의, 슬레이브와 작업환경사이의 상호작용력을 나타낸다. 또한 조작자와 작업대상물체의 동역학식은 다음과 같은 선형방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_{op} - f_m = m_{op} \ddot{x}_m + b_{op} \dot{x}_m + c_{op} x_m \quad (3)$$

$$f_s = m_w \ddot{x}_s + b_w \dot{x}_s + c_w x_s \quad (4)$$

여기서 m_{op} , b_{op} , 와 c_{op} 는 조작자의 질량(mass), 점성계수(viscous coefficient), 그리고 강성계수(stiffness)를 나타낸다. 또한 τ_{op} 는 조작자가 마스터에 가해주는 힘을 의미하고, m_w , b_w , c_w 는 작업대상인 물체의 질량, 점성계수, 그리고 강성계수를 나타낸다.

식 (3)과 (4)에서 작업중 조작자는 마스터 매니플레이터를 굳게 잡고 있고 슬레이브 매니플레이터와 작업 물체는 굳게 접촉하고 있다고 가정한다.

2.2 마스터-슬레이브 시스템의 안정성

스캐터링(scattering) 이론을 이용한 시스템의 수동성(passivity)의 판별을 기본으로 마스터-슬레이브 시스템의 안정성을 평가할 수 있다. 먼저 마스터-슬레이브 시스템은 Fig. 3과 같이 전기회로로 모델링할 수 있으며, Fig. 3으

로부터 다음과 같이 입력과 출력사이의 관계를 구할 수 있다[2]. Fig. 3에서 V_{op} 는 조작자의 힘(τ_{op})을 나타내고,

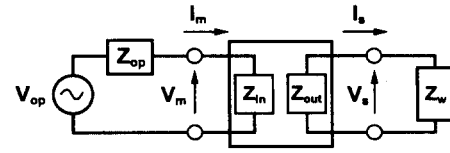


Fig. 3: Circuit representation of master-slave system

V_m 과 V_s 는 마스터측과 슬레이브측의 힘(f_m , f_s)을, I_m 과 I_s 는 마스터와 슬레이브의 속도(\dot{x}_m , \dot{x}_s)를 각각 의미한다. 이를 이용하여 관계식을 구해보면

$$\mathbf{b} = \mathbf{S} \mathbf{a} \quad (5)$$

를 얻을 수 있으며 여기서 $\mathbf{a} \triangleq [a_1 \ a_2]^T$ 와 $\mathbf{b} \triangleq [b_1 \ b_2]^T$ 는 각각 입력과 출력파형(wave)을 나타내며 $\mathbf{V} \triangleq [V_m \ V_s]^T$, $\mathbf{I} \triangleq [I_m \ -I_s]^T$ 이라 하면 \mathbf{a} 와 \mathbf{b} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{a} = [a_1 \ a_2]^T \triangleq \frac{(\mathbf{V} + n^2 \mathbf{I})}{2} \quad (6)$$

$$\mathbf{b} = [b_1 \ b_2]^T \triangleq \frac{(\mathbf{V} - n^2 \mathbf{I})}{2} \quad (7)$$

여기서 n 은 보상계수(scaling factor)이다.

시스템에서 소비되는 동력이 음수가 아닐 경우 그 시스템은 “수동적(passive)이다”라고 말할 수 있으며 다음과 같은 조건을 만족하는 경우가 된다.

$$P \triangleq \text{Re}(V_m^* I_m - V_s^* I_s) \geq 0 \quad (8)$$

여기서 $(\cdot)^*$ 는 켈레복소전치(conjugate transpose)를 의미하며, $\text{Re}(\cdot)$ 는 복소수의 실수부를 의미한다. 식 (8)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{n^2} (\mathbf{a}^* \mathbf{a} - \mathbf{b}^* \mathbf{b}) \\ &= \frac{1}{n^2} \mathbf{a}^* (\mathbf{E}_2 - \mathbf{S}^* \mathbf{S}) \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\mathbf{E}_2 \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ 는 항등행렬(identity matrix)이다.

따라서, 아래의 식 (10)이 성립하면 위의 부등식 (9)는 만족될 수 있다.

$$\|\mathbf{S}\|_\infty \leq 1 \quad (10)$$

여기서 $\|\cdot\|_\infty$ 는 (\cdot) 의 무한 노름(infinity norm)을 의미하며 이것을 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} \|\mathbf{S}\|_\infty &= \bar{\sigma}(\mathbf{S}(j\omega)) \\ &= \sup_{\omega} \lambda^{\frac{1}{2}}(\mathbf{S}^* \mathbf{S}), \quad \forall \omega \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $\bar{\sigma}(\cdot)$ 는 (\cdot) 최대 특이값(maximum singular value)을 말한다.

3. 매스터-슬레이브 시스템의 제어

본 절에서는 시간지연에 의한 불안정성을 극복하기 위하여 매스터-슬레이브 시스템의 새로운 제어법칙을 제안한다. 먼저 시간지연이 없는 경우 매스터-슬레이브 시스템을 위한 제어법칙을 소개한 후, 이 제어법칙을 이용하여 시간지연현상을 고려한 새로운 제어법칙을 제안하고자 한다. 제안된 시스템의 안정성은 다음 장에서 평가될 것이다.

3.1 시간지연이 없는 경우

본 논문에 적용된 매스터-슬레이브 시스템의 제어법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_m &= m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m - f_m \\ &\quad - k_p(x_m - x_s) - k_d(\dot{x}_m - \dot{x}_s) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tau_s &= m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s + f_s \\ &\quad + k_p(x_m - x_s) + k_d(\dot{x}_m - \dot{x}_s) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 k_p 와 k_d 는 제어기의 변위와 속도 게인값이며 일반적으로 위치-위치 피드백(position-position feedback) 제어기라 부른다. 시스템의 모델링 오차를 무시할 수 있을 때, 식 (12)와 (13)을 식 (1)과 (2)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k_d \dot{e} + k_p e = 0 \quad (14)$$

여기서 $e \triangleq x_m - x_s$ 이며, 이와 같은 제어기를 사용할 경우 k_p , k_d 값을 적절히 선택함으로써 매스터와 슬레이브 매니플레이터의 변위오차를 0으로 수렴하도록 만들 수 있다.

3.2 시간지연이 있는 경우

매스터-슬레이브 시스템에 시간지연이 존재한다면 통신블럭에서 전달되는 정보는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_{md}(t) = \dot{x}_s(t-T) \quad (15)$$

$$\dot{x}_{sd}(t) = \dot{x}_m(t-T) \quad (16)$$

여기서 아래첨자 md , sd 는 각각 매스터와 슬레이브에 지연되어 들어오는 데이터를 의미한다. 식 (15)과 (16)을 식 (12)와 (13)에 대입하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_m &= m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m - f_m \\ &\quad - k_p(x_m - x_{md}) - k_d(\dot{x}_m - \dot{x}_{md}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \tau_s &= m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s + f_s \\ &\quad + k_p(x_{sd} - x_s) + k_d(\dot{x}_{sd} - \dot{x}_s) \end{aligned} \quad (18)$$

통신블럭에 시간지연이 존재하는 경우 통신블럭을 손실이 없는 트랜스미션(transmission)으로 모델링하면 다음과

같은 입력과 출력사이의 관계를 구할 수 있다[3].

$$f_m(s) = \tanh(sT)\dot{x}_m(s) + \operatorname{sech}(sT)f_s(s) \quad (19)$$

$$-\dot{x}_s(s) = -\operatorname{sech}(sT)\dot{x}_m(s) + \tanh(sT)f_s(s) \quad (20)$$

위의 식 (19)과 (20)을 이용하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} (f_m - n^2\dot{x}_m)/2 \\ (f_s + n^2\dot{x}_s)/2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & e^{-sT} \\ e^{-sT} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (f_m + n^2\dot{x}_m)/2 \\ (f_s - n^2\dot{x}_s)/2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)에 의하여 식 (22)과 같은 스캐터링(scattering) 행렬을 구할 수 있고, 이것의 최대 특이값을 구해보면 식 (23)가 된다.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-sT} \\ e^{-sT} & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \|S\|_\infty &= \sup_\omega \lambda^{\frac{1}{2}}(S^*S) \\ &= \sup_\omega \lambda^{\frac{1}{2}}\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\right) = 1 \end{aligned} \quad (23)$$

위의 식 (21)를 시간영역으로 변화시키면 다음과 같은 시간지연이 있는 통신블럭의 관계식을 얻을 수 있게 된다.

$$f_m(t) - n^2\dot{x}_m(t) = f_s(t-T) - n^2\dot{x}_s(t-T) \quad (24)$$

$$f_s(t) + n^2\dot{x}_s(t) = f_m(t-T) + n^2\dot{x}_m(t-T) \quad (25)$$

본 논문에서는 매스터측과 슬레이브측 모두 속도 정보를 이용하고 있으므로 식 (24)와 (25)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{x}_{md}(t) \triangleq \dot{x}_s(t-T) + \frac{1}{n^2}(f_m(t) - f_s(t-T)) \quad (26)$$

$$\dot{x}_{sd}(t) \triangleq \dot{x}_m(t-T) + \frac{1}{n^2}(f_m(t-T) - f_s(t)) \quad (27)$$

따라서 식 (26)과 (27)을 식 (17)과 (18)에 대입하면 다음과 같은 제어법칙을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_m &= m_m \ddot{x}_m(t) + b_m \dot{x}_m(t) - f_m(t) \\ &\quad - k_p[x_m(t) - x_s(t-T) - \frac{1}{n^2}\{ \int f_m(t) - \int f_s(t-T) \}] \\ &\quad - k_d[\dot{x}_m(t) - \dot{x}_s(t-T) - \frac{1}{n^2}\{ f_m(t) - f_s(t-T) \}] \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \tau_s &= m_s \ddot{x}_s(t) + b_s \dot{x}_s(t) + f_s(t) \\ &\quad + k_p[x_m(t-T) - x_s(t) + \frac{1}{n^2}\{ \int f_m(t-T) - \int f_s(t) \}] \\ &\quad + k_d[\dot{x}_m(t-T) - \dot{x}_s(t) + \frac{1}{n^2}\{ f_m(t-T) - f_s(t) \}] \end{aligned} \quad (29)$$

4. 제안된 시스템의 안정성 평가

2.2절에서 스캐터링 이론을 이용한 안정성의 조건을 살펴 보았다. 이번 절에서는 제안된 제어법칙의 안정성을 평가하려고 한다. 먼저 안정성 평가를 하기 위해서는 제어기를 포함한 시스템의 스캐터링 행렬을 구해야 하며 이는 입력과 출력사이의 관계인 하이브리드 행렬(hybrid matrix)로부터 구할 수 있다. 시스템의 하이브리드 행렬은 식 (28)와 (29)을 식 (1)과 (2)에 대입하여 입력과 출력사이의 관계를 정리하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H = \frac{1}{H_y} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (30)$$

여기서

$$H_y = e^{-2sT} + 1 \quad (31)$$

$$H_{11} = 1 - e^{-2sT} \quad (32)$$

$$H_{12} = 2e^{-sT} \quad (33)$$

$$H_{21} = -2e^{-sT} \quad (34)$$

$$H_{22} = 1 - e^{-2sT} \quad (35)$$

또한 스캐터링 행렬은 위의 하이브리드 행렬에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-sT} \\ e^{-sT} & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

식 (36)과 같은 스캐터링 행렬의 특이값을 구해보면 식 (37)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \|S\|_{\infty} &= \sup_{\omega} \lambda^{\frac{1}{2}}(S_{m,ss}^* S_{m,ss}) \\ &= \sup_{\omega} \lambda^{\frac{1}{2}} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) = 1 \end{aligned} \quad (37)$$

따라서 앞의 조건식 (10)으로부터 제안된 제어기를 이용한 시스템은 안정하다고 말할 수 있다.

5. 시뮬레이션

제안된 제어법칙의 유효성을 판별하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 시스템의 파라미터는 다음과 같으며,

$$m_m = m_s = 6[\text{kg}], b_m = b_s = 2.0[\text{Ns/m}] \quad (38)$$

문제의 단순화를 위하여 조작자의 동역학적 파라미터를 다음과 같이 일정한 상수로 설정하였다.

$$m_{op} = 2.0[\text{kg}], b_{op} = 2.0[\text{Ns/m}], c_{op} = 10.0[\text{N/m}] \quad (39)$$

시뮬레이션은 조작자가 마스터 매니플레이터에 다음과 같은 입력을 가해주는 것으로 수행하였고 슬레이브 매니플레이터는 마스터에 의하여 자유롭게 움직이도록 설정하였다. 시뮬레이션에 사용된 샘플링 시간은 2[ms]이다.

$$\tau_{op} = 5 - 5 \cos(4\pi t) \quad (40)$$

5.1 시간지연이 없는 경우

시간지연이 없는 경우 식 (12)과 (13)의 제어법칙을 이용한 시뮬레이션 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 마스터와 슬레이브 매니플레이터의 변위응답을 보여주는 것인데 응답이 거의 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 이 경우의 조작자와 마스터 매니플레이터 사이의 상호작용력을 보여준다.

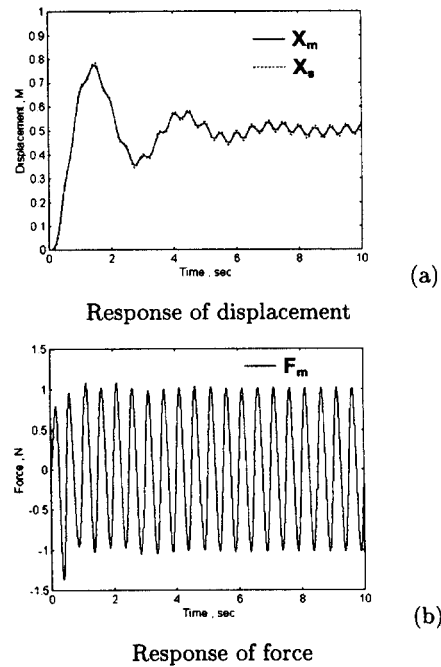
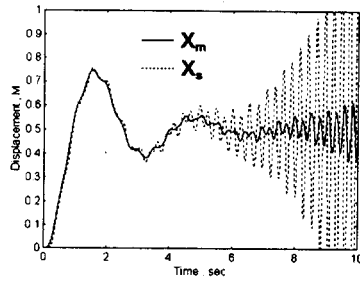


Fig. 4: Result of simulation without time delay

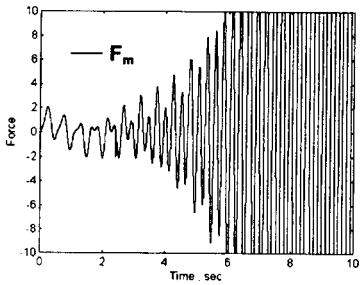
5.2 시간지연이 있는 경우

시간지연이 존재하는 경우 식 (17), (18)의 제어법칙을 이용한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다. 시뮬레이션에 사용된 시간지연은 40[ms]로 설정하였다. Fig. 5에서 보여지는 것과 같이 시간지연의 영향으로 시스템이 불안한 응답을 보이는 것을 알 수 있다.

앞에서 식 (28)과 (29)에 의해 제안된 제어법칙을 사용하였을 경우 시뮬레이션 결과는 Fig. 6과 같다. 앞의 경우와 마찬가지로 시간지연은 40[ms]로 설정하였다. 시뮬레이션



Response of displacement



Response of force

Fig. 5: Result of simulation with 40ms time delay

결과 제안된 제어법칙을 사용한 시스템의 경우 1초 정도까지의 시간지연에도 안정한 응답을 보였다.

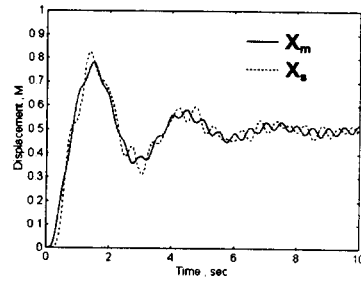
6. 결론

마스터-슬레이브 원격제어 시스템이 시간지연이 없는 경우에는 안정할지라도 시간지연이 발생하게 되면 시스템이 불안해지게 된다. 이러한 안정성을 유지하기 위하여 본 논문에서는 시간지연을 극복할 수 있는 새로운 제어방법을 제안하였다.

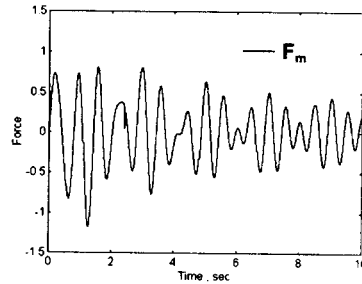
제안된 시스템의 안정성 평가를 위하여 스캐터링 이론을 이용한 수동성(passivity) 판별을 하였고 시물레이션을 통하여 유효성을 입증하였다. 시물레이션에서도 알 수 있듯이 제안된 제어방법을 이용하였을 경우 시스템이 안정하게 유지됨을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] H. L. Martin and W. R. Hamel, "Joining Teleoperation with Robotics for Remote Manipulation in Hostile Environment", *RI/SME Robotics Conf.*, pp. 3-18, 1984.
- [2] G. J. Raju, G. C. Verghese and T. B. Sheridan, "Design Issues in 2-Port Network Models of Bilat-



Response of displacement



Response of force

Fig. 6: Result of simulation using proposed controller

eral Remote Manipulation", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1764-1767, 1989.

- [3] 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.
- [4] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling - Formulation and Experiment", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 5, pp. 605-620, 1994.
- [5] T. Yoshikawa and J. Ueda, "Analysis and Control of Master-Slave Systems with Time Delay", *Proc. of '96 IROS*, pp. 1366-1373, 1996.
- [6] K. Kosuge, H. Murayama, and K. Takeo, "Bilateral Feedback Control of Telem manipulators via Computer Network", *Proc. of '96 IROS*, pp. 1380-1385, 1996.