

시간 지연을 포함한 원격제어 시스템

장진규*(부산대 대학원 지능기계공학과), 한명철(부산대 기계공학과)

Teleoperator Control Systems with Short Time Delay

J. K. Jang(Intel.Mech. Eng. Dept., PNU), M.C Han(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

This paper has been demonstrated to be essential to successful telemanipulator control when the communication delay between master arms in the operator control station and telemanipulators in the remote site. This paper includes the human dynamics to generate a control command, the monitoring force feedback in order to robust under short time delays and the controller not to require the derivative of interaction forces. Simulation results suggest that the proposed control system should be superior to conventional systems in terms of performance and robustness under short time delays.

Key Words : telemanipulator control (원격제어), time delays(시간 지연), force feedback(힘 반영).

1. 서론

해저, 우주공간 등 인간이 직접 작업하기 힘들거나 위험한 상황에서는 많은 작업들을 로봇이 대신 작업을 할수 있다. 이런 작업을 수행하기 위한 이상적인 로봇 시스템은 인간과 같이 작업의 목적에 맞게 스스로 주위 환경을 인식하며 작업 수행을 위한 절차를 결정하고 실행 할 수 있는 능력이 있어야 한다. 그러나, 현재 이러한 이상적인 로봇시스템을 구현하는 것은 매우 힘들고 제한적이므로 작업에서의 인식 및 판단은 많은 부분에서 원격지에 있는 인간에 의존할 수 밖에 없다. 원격제어시스템은 크게 인간이 직접 조작을 가하는 마스터 시스템과 원격지에서 실제 작업을 수행하는 슬레이브 시스템으로 나뉜다. 그리고 인간과 슬레이브의 결합을 위해 사용되는 많은 방법 중 Monitoring Force Feedback을 사용하였다. 이 Monitoring Force Feedback는 슬레이브에서 출력되는 힘의 에러와 위치 에러를 이용하여 인간과 슬레이브 시스템을 결합시켰다. 그리고 이 Monitoring Force Feedback은 마스터 시스템과 슬레이브 시스템과의 거리에 의한 시간 지연에 대해 강인한 제어를 위해 사용되고 있다. 또한, 마스터와 슬레이브의 시스템 동특성을 수정하기 위해서 본 논문에서

는 GIC(Generalized impedance control)을 이용하였다. 이 제어기는 접촉하는 지점의 원하는 힘의 값을 제어 할수 있는 장점이 있다. 특히, 본 논문에서 사용되어진 제어기는 환경과의 접촉력 미분값을 사용하지 않는다는 것이다.

2. 시스템 모델링

2.1 Generalized impedance control

기존의 임피던스 제어는 접촉하는 부분의 f_d 를 지정 할 수 없었다. 이런 점을 보완하기 위해서 나오게 된 것이 GIC이다.

$$M_d \ddot{e}_p + B_d \dot{e}_p + K_d e_p = K_f f_f \quad (1)$$

여기서, M_d, B_d, K_d, K_f 가 양 한정 대각 행렬이면 시스템은 점근적 안정하다고 말 할 수 있다.

2.2 인간 팔의 모델링

시뮬레이션을 위해서는 가상의 조정자가 필요하다. 가상의 조정자는 슬레이브 시스템으로부터 전송되어온 시각과 감각 정보로부터 다음 동작을 판단하여 마스터 암에 힘을 가한다. 위치 오차를 e_p , 힘의 오차를 e_f 라 하자. f_h 를 인간의 의지에 의한 힘, $B_{hw}, K_{hw}, B_{hf}, K_{hf}$ 를 위치 오차와 힘에 대한 임피던스 파라미터라 하면 인간팔의 모델링을 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned} f_h &= f_{hw} + f_{hf} \\ f_{hw} &= B_{hw}\dot{e}_p + K_{hw}e_p \\ f_{hf} &= B_{hf}\dot{e}_f + K_{hf}e_f \end{aligned} \quad (2)$$

f_{eh} 를 인간의 팔에 작용하는 내력, m_h 를 인간 팔의 물리적 질량, x_m 을 마스터 암의 위치라 할 때 인간팔의 운동 방정식은 아래와 같다.

$$f_h - f_{eh} = m_h \ddot{x}_m \quad (3)$$

2.3 마스터 암의 모델링

직교좌표계에서의 마스터 암의 동특성은 아래와 같다.

$$f_{am} + f_{em} = m_{am} \ddot{x}_m + u_{bm} \quad (4)$$

여기서 f_{am} 은 마스터 암의 말단부에 가해지는 액추레이터의 힘, f_{em} 은 조정자가 마스터 암에 가하는 힘, m_{am}, u_{bm} 은 각각 마스터 암의 질량, 바이어스 힘(중력과 코리올리스 부분을 포함)이다.

마스터 암의 동특성을 수정하기 위해 원하는 GI를 아래와 같이 두자.

$$f_{ref} + f_{em} = m_{dm} \ddot{x}_m + b_{dm} \dot{x}_m \quad (5)$$

m_{dm}, b_{dm} 은 원하는 마스터 암의 질량 과 댐핑 파라미터이고, f_{ref} 는 감지하는 힘이다.

(4)과(5) 식의 결합에 의해 마스터 암의 제어법칙이 아래와 같다.

$$f_{am} = -f_{em} + m_{am} m_{dm}^{-1} (f_{em} + f_{ref} - b_{dm} \dot{x}_m) + u_{bm} \quad (6)$$

그리고, (3) 와 (5)의 결합으로 명령을 만들어 내는 수정된 동특성은

$$f_h + f_{ref} = (m_h + m_{dm}) \ddot{x}_m + b_{dm} \dot{x}_m \quad (7)$$

$$Z_h \cong m_h s^2, Z_m \cong m_{dm} s^2 + b_{dm} s$$

위의 것은 인간과 마스터 암의 임피던스이다.

2.4 슬레이브 암의 모델링

직교 좌표계에서 슬레이브 암의 동특성은 아래와 같다.

$$f_{as} + f_{es} = m_{as} \ddot{x}_s + u_{bs} \quad (8)$$

f_{as} 는 슬레이브 암 말단부에 작용하는 액추레이터의 힘, f_{es} 는 환경과 접촉하면서 발생하는 힘이다. m_{as}, u_{bs} 는 각각 슬레이브 암의 질량 행렬, 바이어스 힘이다. 환경과 접촉하는 것에 기인하여 슬레이브의 말단부에 발생하는 힘은 아래와 같다.

$$f_{es} = Z_e(x_e - x_s) \quad (9)$$

Z_e 와 x_e 는 각각 환경의 임피던스 행렬이고, 접촉점의 위치 벡터이다.

슬레이브 암 동특성을 수정하기 위해 원하는 GI를 아래와 같이 둔다.

$$k_{fs} f_{es} = m_{as} \ddot{x}_s + b_{ds} (\dot{x}_s - \dot{x}_{ds}) + k_{ds} (x_s - x_{ds}) \quad (10)$$

$k_{fs}, m_{ds}, b_{ds}, k_{ds}$ 는 양 한정 대각 행렬이고 x_s 와 x_{ds} 는 각각 실제 그리고 원하는 위치 벡터이다. (8)와 (10)의 결합에 의해 슬레이브 암의 제어 법칙은 아래와 같다.

$$f_{as} = -f_{es} + m_{as} m_{ds}^{-1} [k_{fs} f_{es} - b_{ds} (\dot{x}_s - \dot{x}_{ds}) - k_{ds} (x_s - x_{ds})] + u_{bs} \quad (11)$$

2.5 Monitoring Force Feedback

슬레이브로부터 위치 에러와 힘의 에러를 되먹임 받는 것으로 마스터 시스템과 슬레이브 시스템을 연결한다. 이것을 표현한다면,

$$f_{ref} = e_f - f_{rp} = e_f - G_{rp} e_s \quad (12)$$

G_{rp} 는 위치 에러 보상 행렬이고,
 $e_s \cong x_{ds} - x_s$, $e_f = f_d - f_r = f_d + k_{cs}f_{cs}$ 이다.

3. 전체시스템의 안정성

전체 시스템의 전달함수를 구하기 위해서 각각의 전달 함수를 아래와 같이 둔다.

$$G_d(s) \cong x_{ds}/f = \frac{k_{sc}}{Z_h + Z_m} \cong \frac{k_{sc}}{D_m} \quad (13)$$

$$G_s(s) \cong x_s/x_{ds} = \frac{b_{ds}s + k_{ds}}{m_{ds}s^2 + b_{ds}s + k_{ds} + Z_e k_{fs}} e^{-T_s} \quad (14)$$

$$G_{rp}(s) = f_{rp}/e_s \cong \frac{N_{rp}}{D_{rp}} \quad (15)$$

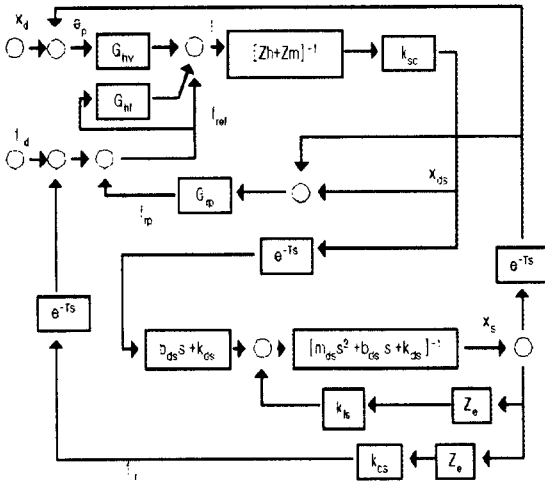


Fig 1 Overall structure of the system.

3.1 시간 지연이 존재하지 않을 때

블록 다이어그램을 이용하여 x_s 의 값을 x_d 와 f_d 로 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$x_s = \frac{N_p}{1+L} x_d + \frac{N_f}{1+L} f_d \quad (16)$$

$$N_p \cong G_{nv} G_s G_d = G_{nv} \frac{N_s k_{sc}}{D_s D_m} \quad (17)$$

$$N_f \cong (G_{hf} + 1) G_s G_d = (G_{hf} + 1) \frac{N_s k_{sc}}{D_s D_m} \quad (18)$$

$$L = \frac{[G_{nv} D_{rp} N_s k_{sc} + (G_{hf} + 1) \times D_{rp} N_s k_{cs} Z_e k_{sc}] + (G_{hf} + 1) \times N_{rp} (D_s - N_s) \times k_{cs}}{D_{rp} D_s D_m} \quad (19)$$

전체 시스템 중 $1+L=0$ 인 페루프 시스템의 모든 근이 좌반평면에 있도록 하면 시스템은 안정하다.

3.2 시간 지연이 존재할 때

$$x_s = \frac{\hat{N}_p}{1+\hat{L}} x_d + \frac{\hat{N}_f}{1+\hat{L}} f_d \quad (20)$$

$$\hat{N}_p = N_p e^{-T_s} \quad \hat{N}_f = N_f e^{-T_s} \quad (21)$$

$$\hat{L} = \frac{[e^{-2T_s} \times G_{nv} D_{rp} N_s k_{sc} + e^{-2T_s} \times (G_{hf} + 1) \times D_{rp} N_s k_{cs} Z_e k_{sc}] + e^{-2T_s} \times k_{cs} N_{rp} (G_{hf} + 1) \times (D_s e^{2T_s} - N_s)}{[D_{rp} D_s D_m]} \quad (22)$$

\hat{L} 을 보면 그 내부에 e^{-2T_s} 가 있기 때문에 위상 지연이 발생하여 시스템의 위상 여유를 줄여준다. 하지만, N_{rp} 의 성분에 e^{2T_s} 가 곱해져서 다시 위상 여유를 증가시켜 준다. 그러므로, 이 식에서 알 수 있듯이 G_{rp} 가 존재하기 때문에 시간 지연에 대해 강한 제어가 될 수 있다.

4. 시뮬레이션

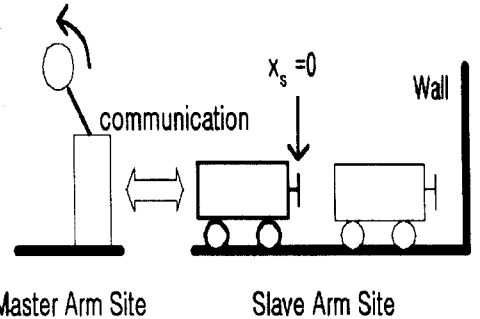


Fig 3 The simulation environment

4.1 벽과 부딪치지 않을 때

x_d 의 값은 2cm이고, 초기엔 정지해 있다.

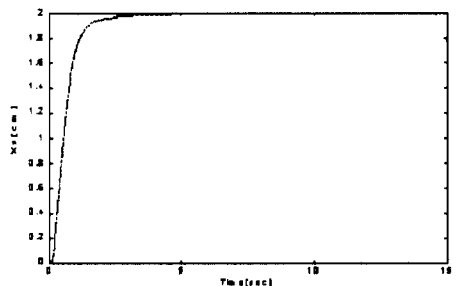


Fig 2 Position control without time delay

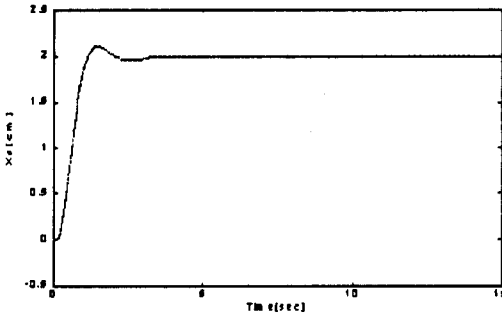


Fig 4 Position control with time delay ($T=0.1\text{sec}$)

Fig.3의 그래프에서 보듯이 시간 지연이 없는 위치 제어는 오버슈트도 없이 5초 후 정상상태에 도달한다. 하지만, 시간 지연이 있는 위치 제어는 잠깐의 오버슈트는 발생한다. 하지만, 5초 후 정상상태에 도달한다. 이것은 G_{cp} 가 시간 지연에 강한 제어를 만들어 주기 때문이다.

4.2 벽과 부딪칠때

x_d 의 값은 2cm이고, $f_d=5N$ 이다. 그리고, 벽은 1.5cm인 곳에 존재한다.

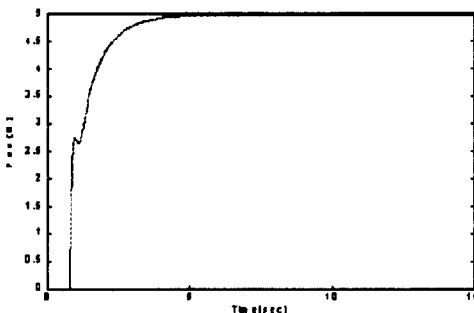
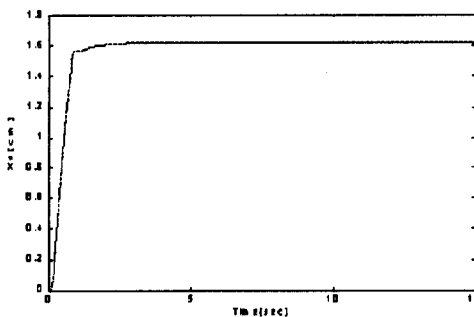


Fig 5. The position and force control

벽이 있는 경우는 힘과 위치 둘 모두 제어를 합니다. Fig.5를 보면 부딪치기 전까지는 위치 제어를 하다가 벽과 부딪친 후 힘 제어를 함을 알 수 있다.

5.결론

본 논문에서는 선행연구에서 제안한 원격제어 시스템의 제어기²를 수정하여 접촉력의 미분값을 사용하지 않고 안정성을 보장할 수 있음을 보였다. 제안된 제어기는 현장에서 더욱 실용적임을 알 수 있다. 그리고 다른 제어기 보다 더욱 시간 지연에 대해 강인하다.

참고문헌

1. S.P.Chan, H.C.Liaw, "Generalized Impedance Control of Robot for Assembly Tasks Requiring Compliant Manipulation" in IEEE Transactions on industrial electronics Vol.43. No.4. pp.453-461,1996.
2. S.Lee, H.S.Lee "Modeling, Design, and Evaluation of Advanced Teleoperator Control Systems with short time delay" in IEEE Transactions on robotics and automation Vol 9 .No.5. pp607-623,1993.
3. S.Lee, H.S.Lee "Intelligent control of manipulators interacting with an uncertain environment based on generalized impedance" in Proc.6th IEEE pp.61-66,1991.
4. N.Hogan, " Impedance control : An approach to manipulation : Part I- Theory " in ASME J. Dynamics Syst. vol.107. pp 1-7,1985.
5. 최홍석, 차덕순, "힘 반영 원격제어 시스템의 모델링," 한국자동제어학술회의 pp. 440-444, 1993.