

구조적 특이값(μ)을 이용한 시간지연이 있는 원격조작 로봇시스템의 견실제어기 설계

Robust Controller Design using SSV (μ) for Teleoperated Robot System with Time-Delay

정 규 원
(Kyuwon Jeong)

Abstract : A design method for a teleoperator robot system is presented in this paper. The control system consists of two phases; approach phase and contact one. The end-effector position of the estimated slave robot and the contact force between the end-effector and wall are displayed on the monitors at control site, using which the operator controls the teleoperator system. The approach phase controller is designed using Smith's principle and the contact one designed based upon the structured singular value μ in order to increase the robustness of the system. The uncertainties such as communication time delay and the variations of system parameters are considered as a multiplicative perturbation. Computer simulations are conducted in order to evaluate the performance of the proposed design method. It is found that desirable control performance, especially in the contact phase, is obtained if the control mode is switched into contact phase when the estimated position of the slave robot end-effector is in front of the wall.

Keywords: teleoperator robot system, time delay, robust control, H infinity norm, structured singular value, approach phase, contact phase

1. 서론

원격조작은 제어(C) 스테이션에 있는 조작자의 감지기능과 조작능력을 원격(R) 스테이션에 연결하여, 조작자가 원격 스테이션에서 직접 조작을 하는 것과 같은 효과를 주는 것이다. 제어 스테이션과 원격 스테이션간에는 거리가 가깝고, 서로간에 전달해야 할 데이터가 적을 경우에는 통신에 따른 시간지연이 발생하지 않을 수도 있다. 그러나, C-R 스테이션간 거리가 멀 경우 또는 전달해야 할 데이터가 많을 경우에는 통신에 따른 지연시간이 발생한다. 이 시간지연은 대부분의 지상의 원격조작이나 우주의 원격조작에서 수백 밀리초정도는 일반적으로 발생된다. 우주왕복선에 설치되어 있는 매니퓰레이터를 지상에서 조작할 때는 수 초정도의 긴 시간지연이 있으며, 달 또는 화성에 설치되어 있는 매니퓰레이터의 조작에는 수 분정도의 시간지연이 예상된다. 또한 최근에는 주로봇과 종로봇의 기구학적인 형태가 서로 다른 시스템을 사용하는 추세이나, 이때에 기구학 해석에 따른 시간지연이 발생한다. 이와 더불어 조작자와 기계사이의 시각적 또는 근육직각운동의 연결에 있어서 시간지연은 조작자의 감지성을 둔화시켜서, 원격조작의 실현성을 크게 저하시키며, 제어에 있어서 불안정성을 야기할 수 있다[1-4]. 이와 같은 불안정성은 원격조작 시스템의 밴드위드를 극도로 작게 제한하면 극복할 수 있으나[3], 이때는 시스템의 성능을 과도하게 저하시킨다. 따라서 시스템의 성능을 보장하면서 안정성을 확보하는 것이 원격조작시스템의 설계에 있어서 중요하게 되었다. 또한 원격조작 시스템의 특성상 원격 스테이션의 각종 매개변수들의 정수값을 정확히 미리 아는 것은 매우 어려우며, 통신에 따른 시간지연도 통신상태에 따라 변동될 가능성이 있다. 따라서 이와 같은 시스템에서 견실한 제어 방법이 개발될 필요가 있다.

임의의 시간지연이 있는 원격조작시스템의 설계에 있어서 크게 두 가지의 방법이 제안되어 왔다. 그 첫번째는 제어 스테이션과 원격 스테이션간에 지연시간이 있으므로 조작자가 원격스테이션의 진행상황을 진행단계별로 조작자 앞에 있는 모니터등의 조작스테이션에서 확인을 한 후에 다

음조작을 하는 방법을 사용해 왔으며, 이의 개선된 방법으로 시간 클러치[5-11] 개념을 이용하여 시간지연을 갖지 않는 시뮬레이션된 환경에서 종로봇의 모델을 사용하여 작업을 수행시킴에 의하여 원격지의 매니퓰레이터나 센서를 원격프로그램하는 방법이다. 이 방법에 있어서는 만일 시뮬레이션된 환경이 정확하고, 원격의 매니퓰레이터가 시뮬레이션된 환경의 어떠한 부정확성에 기인한 오차들을 자동적으로 수정할 수 있는 기능이 있다면, 이 방법은 성능을 저하시키지 않고 최적의 원격조작을 할 수 있도록 한다.

두 번째 방법은 앞에서 언급한 방법과 다르게, 조작스테이션의 조작자가 지속적으로 원격스테이션의 제어 루프에 포함되어 원격스테이션을 제어하는 것이다. 이와 같은 접근 방법에서는 조작자를 시간지연이 없는 일반적인 서보제어시스템의 제어기의 하나로 간주하는 것인데, 본 논문에서와 같은 시간지연이 있는 시스템에서는 시스템의 안정성과 제어성능을 충족시키는 것이 매우 어렵고 중요한 일로 인식되어 왔다. 여기에는 패시비티(passivity) 이론에 의한 방법과, 최근의 H_∞ 제어이론을 적용한 방법들이 있다[12-18].

패시비티 이론을 적용하는 방법은 원격조작의 통신 채널을 손실이 없는 전달라인으로 간주하여 모델링한 2항 네트워킹 모델(two port networks) [12]에 대하여 제어를 설계하는 것이다. 이 방법은 주로 임의의 통신지연이 있는 경우에 시스템의 안정성을 보장하기 위한 방법이다. 그러나 이 방법은 제어변수들에 주어지는 과도한 제약으로 인하여 성능을 최적화하는데 여유가 없기 때문에 시스템의 성능이 열악해질 수 있다. 여러 가지 제어변수들에 불확실성이 있는 경우에 대한 견실성에 대한 연구는 되어 있지 않으며, 더욱이 시각 귀환채널과 힘 귀환채널에 시간 지연을 포함시키면 위의 방법들은 더이상 안정성을 보장하지 않으며, 이 경우에 패시비티 이론을 적용하는 방법은 아직 연구되어 있지 않다. 한편 조작자를 제어루프에 포함시켜서 제어성능과 안정성을 추구한 연구가 있었다[19, 20]. 여기에서는 조작자의 동특성을 모델링하여 제어루프에 포함시켰으며, 지연시간에 대하여 Smith 방법을 이용하여 설계자가 요구한 성능을 시간지연이 있는 시스템에서도 만족시키도록 하였다. 따라서 이 방법에서는 시스템에 관련된 매개변수들에 대한 정확한 값들이 설계단계에서 미리 알려져야 한다. 그러나 원격조작

시스템의 특성상 이것은 매우 어려운 조건이 된다.

시스템에 관련된 변수들이 정확하지 않거나, 섭동이 있을 경우에도 안정성과 제어성을 추구한 연구가 최근에 발표되었다[21, 23]. 참고문헌 [22]에서는 원격조작시스템의 조작 단계를 피접촉물체까지 중 로봇의 선단부가 이동하도록 하는 접근단계와 중 로봇의 선단부가 피접촉물체에 접촉하는 접촉단계로 나누어서 조작하도록 하였다. 이는 중 로봇이 물체에 접촉하게 되면 중 로봇의 동특성이 물체의 동특성을 포함하게 되어 변화하기 때문이다. 접근단계의 제어기는 주 중 로봇 모두에 임피던스 제어기를 사용하여 요구된 임피던스를 갖도록 하고, 시간지연을 처리하기 위하여 Smith 방법을 이용하여 설계하였다. 접촉단계에서는 조작자, 주중 로봇을 모두 포함하는 시스템에 대하여 지연시간을 시스템에 대한 승적 섭동 (multiplicative perturbation)으로 간주하고, H_∞ 제어이론을 사용하여 제어기를 설계하였으며, 이 방법에 의한 제어기가 시스템의 변수들의 섭동에 대하여 견실성을 갖고 있음을 보였다. [21]에서도 같은 이론을 적용하여 견실한 제어성을 갖는 제어기를 설계하였으나, 시간지연이 없는 시스템을 다루었다. 그러나 H_∞ 제어 이론에 의한 제어기 설계는 특이값을 이용하여 제어기가 계산되기 때문에 과도하게 시스템의 성능을 제약하는 점이 있음이 최근에 발표되었으며 [24], 구조적 특이값 (structured singular value) μ 를 이용하는 것이 보다 적절한 제어기를 설계할 수 있음이 밝혀졌다[23]. [23]에서는 접근단계에서 주 로봇과 중 로봇에 사용하는 제어기를 이 이론을 이용하여 설계하였으며, 접촉단계에서 중 로봇으로부터 주 로봇으로 힘귀환을 시키는 제어기도 이 이론을 적용하여 설계하였다. 그러나 이 논문에서는 조작자의 시각적, 근육지각적인 귀환 특성을 포함시키지 않고 제어기를 설계하였으므로 앞에서 언급한 것과 같은 문제가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 [22]에서와 같이 조작자를 제어 루프에 포함시켜서 원격조작 시스템을 모델링하였으며, 여기에 μ 이론을 사용하여 접촉단계의 제어기를 설계함으로써, 제어 성능이 향상됨을 보였다. 제2장에서는 조작자를 포함한 원격조작시스템을 기술하였으며, 제3장에는 접근단계에서 중로봇을 피접촉물체인 벽으로 접근하는 과정에 사용되는 제어기와, 로봇을 벽에 접촉시켜 일정한 힘을 가하기 위한 제어기를 설계하였으며, 제4장에서는 원격조작시스템의 제어 성능과, 제어시스템에 관련된 여러 가지의 변수들에 대한 강인성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검토하였다.

II. 기본형 원격조작시스템

이 절에서는 강인한 원격조작시스템을 설계하기 위한 출발점으로서 조작자를 제어회로에 포함시킨 기본적인 원격조작 시스템을 도입한다 [19, 20]. 그림 1에 이와 같은 기본적인 형태의 원격조작 시스템의 블럭선도를 보였다. 일반적으로 중로봇과 주로봇의 형태, 즉 기하학적인 구조는 조작자의 편의성과 범용성을 위하여 반드시 같을 필요가 없다. 조작자 앞에는 모니터들이 있으며, 여기에는 CCTV 카메라를 이용하여 원격조작에 필요한 여러가지 정보들과, 중로봇과 피접촉물체의 영상이 표시되어 조작자가 원격스테이션의 상황을 알 수 있도록 하며, 중로봇에 설치되어 있는 힘 센서로부터 측정된 접촉힘도 표시된다. 제어 스테이션과 원격스테이션간에는 일방향으로 지연시간이 T 초 있다고 가정한다. 조작자가 주로봇을 제어하기 편리하도록 주로봇에는 조작자의 특성에 맞는 일반화된 임피던스제어기를 사용하고, 중로봇에도 일반화된 임피던스 제어기를 사용한다.

원격조작 시스템의 제어모드를 2단계 즉 접근 (위치제어) 단계와 접촉 (힘제어) 단계로 나눈다. 접근 단계에서는 중로봇은 자유공간상에서 이동하며, 조작자는 CCTV 카메라 또는 위치센서를 이용하여 피접촉물체의 위치를 잡음의 영향이 있으나 파악할 수 있으며, 이를 이용하여 중로봇의 선

단부를 피접촉물체로부터 미리 정해진 일정 거리까지 오게 할 수 있다. 이 단계의 원격조작 시스템은 Smith원리를 적용하여 설계하였다. 접촉단계에서는 접촉력을 조작자가 원하는 값으로 하기 위하여, 접촉력을 직접적으로 조작자와 제어기에 귀환시켰으며, 이 단계에서 사용되는 제어기는 시스템에 관련된 여러 가지 변수들의 불확실성 및 변동에 대하여 강인하도록 μ 이론을 바탕으로 설계되었다.

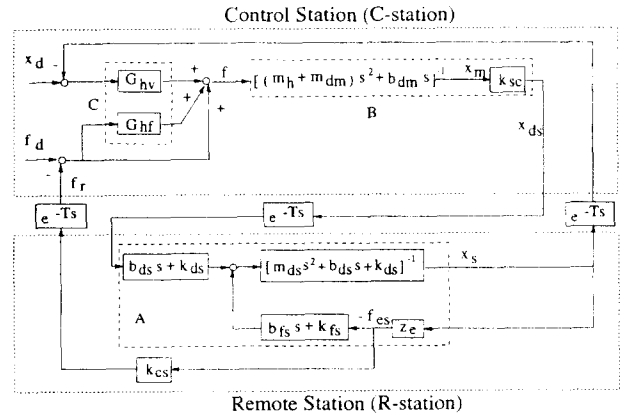


그림 1. 기본적인 형태의 원격조작시스템.
Fig. 1. A basic teleoperator control system.

그림 1을 각각의 블록들은 다음과 같이 결정된다[20].

- 1) 중로봇의 동특성식은 직교좌표계에서 다음과 같다 가정한다.

$$f_{as} + f_{es} = m_{as} \ddot{x}_s + u_{bs} \quad (1)$$

$$f_{es} = \begin{cases} z_c(x_s - x_c) & \text{if } x_s \geq x_c \\ 0 & \text{if } x_s < x_c \end{cases}$$

여기에서 f_{as} 는 중로봇에 주어지는 구동력이며, f_{es} 는 중로봇의 선단부가 피접촉물체로부터 받는 접촉력이며, m_{as} 는 유효질량행렬, u_{bs} 는 원심력, 코리올리 힘과 중력을 포함한 편향힘이다. x_s 는 중로봇의 선단부의 위치, x_c 는 피접촉물체의 벽면의 위치이고, z_c 는 피접촉물체의 벽면의 임피던스이다.

중로봇의 동특성이 환경에 적합하도록 직교좌표계 임피던스 제어기를 설계한다. 중 로봇의 선단부에서 위치와 힘의 일반적인 전달함수로서 중 로봇의 요구된 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

$$b_{fs} \dot{f}_{es} + k_{fs} f_{es} = m_{ds} \ddot{x}_s + b_{ds} (\dot{x}_s - \dot{x}_{ds}) + k_{ds} (x_s - x_{ds}) \quad (2)$$

여기에서 b_{fs} 는 외력의 미분에 적용되는 계수, k_{fs} 는 외력에 적용되는 계수, m_{ds} 는 기준임피던스의 질량행렬, b_{ds} 는 댐핑계수, k_{ds} 는 스프링계수이며, x_s, \dot{x}_s 들은 각각 직교좌표로 나타낸 중로봇의 선단부의 실제의 위치와 속도 벡터이며, x_{ds} 는 중로봇의 선단부의 위치지령값, \dot{f}_{es} 는 f_{es} 의 시간에 대한 미분 값이다. (2)로 표현된 요구된 임피던스를 갖는 매니퓰레이터에 대한 제어기는 먼저 (2)로부터 가속도 \ddot{x}_s 를 구하고, 그것을 직교좌표로 표현된 매니퓰레이터의 동역학 (1) 에 적용함으로써 구해진다. (1)과 (2)는 그림 1의 블럭 A와 같이 실현된다. 매니퓰레이터의 동역학은 관성좌표계에서 표시될 수도 있으나, Smith 원리는 어떠한 특정한 형태에도 적용될 수 있다. 이와 같은 의미에서 x_{ds} 와 x_s 간의 블럭 A의 전달함수 행렬을 G_s 로 표시할 수 있다.

- 2) 주로봇의 임피던스도 조작자와의 바람직한 상호작용

을 위하여 적극적으로 수정될 수 있다. 주로봇의 요구된 임피던스는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_e + f_{em} &= m_{dm} \ddot{x}_m + b_{dm} \dot{x}_m \\ f_e &= f_d - f_r \\ f_r &= k_{cs} f_{es} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 f_e 는 접촉힘 오차로서, 요구된 접촉힘 f_d 와 귀환된 접촉힘 f_r 의 차이이며, f_{em} 은 조작자의 팔이 주로봇에 가하는 내부적인 힘이며, m_{dm} , b_{dm} 들은 각각 요구된 주로봇의 기준임피던스의 관성행렬과 댐핑계수이다. 주로봇의 요구된 임피던스를 실행하기 위한 제어법칙은 (3)에서 가속도를 구하여, 주로봇의 동역학식에 대입하여 구할 수 있다.

한편 주로봇과 상호작용을 하는 인간팔의 동역학은 직교좌표계에서 가장 단순화시켜서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_h + f_{eh} = m_h \ddot{x}_m \quad (4)$$

여기에서 f_h 는 조작자의 팔에 주어지는 조작자의 의도적인 힘이며, f_{eh} 는 주로봇이 조작자의 팔에 가하는 내부적인 힘, m_h 는 인간 팔의 관성행렬이다. 조작자가 주로봇을 잡고 있기 때문에 위의 식에서 조작자 팔의 위치는 주로봇의 선단부의 위치와 같다. 조작자의 팔과 이와 상호작용하는 주로봇을 하나의 로봇 팔로서 간주할 수 있으며, 이와같은 이중적인 팔의 동역학은 (3)과 (4)를 $f_{eh} = -f_{em}$ 와 조합하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_h + f_e = (m_h + m_{dm}) \ddot{x}_m + b_{dm} \dot{x}_m \quad (5)$$

그림 1의 블록 B는 (5)를 표시한다. 여기에서 $Z_h \triangleq m_h s^2$ 와 $Z_m \triangleq m_{dm} s^2 + b_{dm} s$ 는 각각 인간 팔의 임피던스와 주로봇의 임피던스이다. 또한 k_{sc} 는 주로봇의 위치를 종로봇의 위치명령으로 줄 때의 크기변환계수이다.

3) 시각/근육지각에 의한 자극에 반응하는 조작자의 동적 특성이 전체 제어시스템의 거동에 큰 영향을 주기 때문에, 조작자의 특성을 제어루프에 포함하여 원격제어시스템을 설계한다 [4,9,19,20].

원격조작에 있어서 요구된 시각적 추적과 힘의 추적을 달성하기 위하여 주로봇에 주어진 의도적인 힘 f_h 를 발생시키는 인간의 동특성은 시각적 자극에 대응한 인간의 동특성 G_{hv} 와 힘자극에 대응한 동특성 G_{hf} 의 선형적인 합으로 모델링할 수 있다. 시각적 자극은 모니터 스크린 상에 표시된 매니퓰레이터의 요구된 위치와 실제위치의 차이; $x_d - e^{-Ts} x_s$ 이다. 또한 힘자극은 요구된 힘과 반영된 힘의 차이; $f_d - e^{-Ts} f_{es}$ 이다. 시각과 힘 자극에 대응한 힘 f_h 를 발생시키는 동특성은 그림 1의 블록 C 에 표시한 바와 같이 제어 루프에 포함시켰다.

그림 1에서 보인 것과 같이 조작시스템과 원격시스템사이에는 통신에 필요한 지연시간이 일방향으로 T 초가 있다. 주로봇의 위치는 크기변환계수 k_{sc} 에 의하여 변환되어 종로봇으로 전달되며, 종로봇이 벽과 접촉하여 발생된 반력은 크기변환계수 k_{cs} 에 의하여 변환되어 조작시스템으로 전달되어 주로봇의 힘반영에 사용되며, 모니터에도 표시되어 조작자의 제어에 이용된다.

III. 견실한 원격조작시스템의 설계

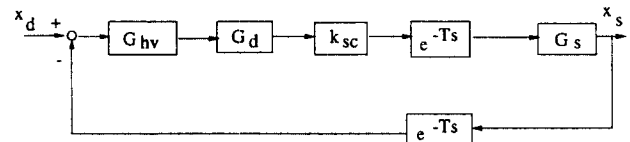
1. 접근 (위치제어) 단계의 설계

원격제어시스템의 접근 즉 위치제어 단계의 설계는 2단계로 이루어진다. 첫단계에서는 시간지연을 고려하지 않은 원격제어 시스템에 대하여 최적의 시스템이 되도록 설계한다.

두번째 단계에서는 시간지연을 갖는 원격제어 시스템이 설계된 성능을 갖도록 첫단계에서 설계된 시스템에 대하여 Smith원리를 적용한다[25]. 첫단계로서 시간지연이 없는 것으로 가정하고, 인간을 제어루프에 포함시킨 최적원격시스템을 도입한다. 그림 2에 접근단계의 설계순서를 보였다. 앞에서 언급한 바와 같이 종로봇의 선단부가 외부와 접촉하지 않으므로 힘제어 기능에 관련된 항들은 그림 2(a)와 같이 그림 1로부터 제외하였다. 이 시스템에 대하여 Smith원리를 적용하여 접근단계의 제어기를 다음과 같이 설계한다 [19,22]. 이 그림에서, 주로봇과 종로봇의 임피던스 제어기들은 주어진 성능지수에 의하여 $T=0$ 인 경우의 시스템의 응답 $x_s(t)$ 가 최적이 되도록 설계되었다고 가정하고, 지연시간 T 가 있는 시스템의 요구된 응답은 $x_s(t)$ 가 시간적으로 이동된 응답 $x_s(t-T)$ 으로 한다. 그림 2(a)에서 $T=0$ 인 경우에 x_d 와 x_s 의 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$C = G_{hv} G_d k_{sc} \quad (6)$$

$$G = \frac{C G_s}{1 + C G_s}$$



(a) Approach (position control) phase

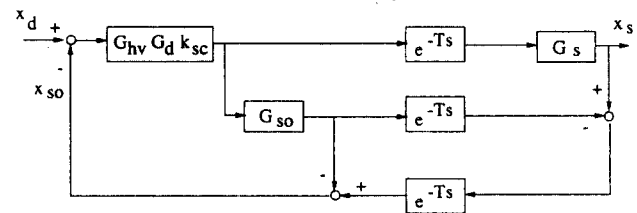


그림 2. 접근단계의 제어기 설계.

Fig. 2. Controller Design of the Approach Phase.

(6)의 제어기 C 대신에 지연시간이 있는 경우에 시스템의 안정성에 영향을 주지 않으면서 $x_s(t-T)$ 를 갖도록 하는 제어기를 C_T 라고 하자. x_d 와 x_s 간의 전달함수는 다음과 같다.

$$\hat{G} = \frac{C_T G_s}{1 + C_T G_s \cdot e^{-2Ts}} \cdot e^{-Ts} \quad (7)$$

한편 시간지연이 있는 경우에 목적하는 응답 $x_s(t-T)$ 를 주는 목적 전달함수 G_{goal} 은 다음과 같다.

$$G_{goal} = \frac{C G_s}{1 + C G_s} \cdot e^{-Ts} \quad (8)$$

G_{goal} 과 \hat{G} 를 같게 하면 수정된 제어기 C_T 는 다음과 같이 주어진다.

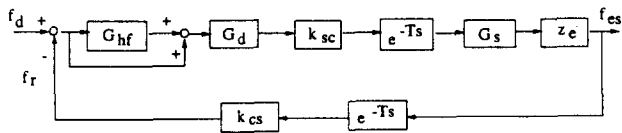
$$C_T = \frac{C}{1 + C G_s (1 - e^{-2Ts})} \quad (9)$$

C_T 는 그림 2(b)와 같이 구성되며, 여기에서 G_{so} 는 G_s 의 모델이다. 이와같은 과정으로 최적의 접근단계를 설계할 수 있다.

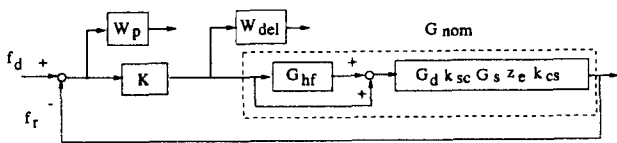
2. 접촉 (힘 제어) 단계의 설계

접근단계를 통하여 종로봇의 선단부는 접촉대상 물체로

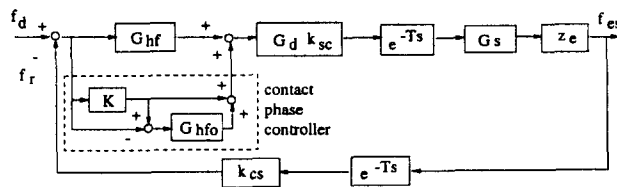
부터 일정 거리이내로 위치시킬 수 있다. 이 지점에서 제어 모드를 접촉단계로 전환시킨다. 이 접촉단계는 조작자의 의도적인 힘과 반영힘에 의하여 제어된다. 그러나 전환시점에 대하여 위치센서로부터의 잡음, 통신의 시간지연, 조작자의 오판등 불확실한 점들이 있다. 또한 접촉대상물체의 위치 또는 임피던스특성들의 변수들의 정확한 값을 미리 구하는 것은 더욱 어렵다. 본 논문에서는 이러한 불확실성이 있는 시스템에서도 안정된 접촉힘을 갖도록 하는 제어방법을 연구한다. 원격지에 있는 종로봇의 선단부가 물체와 접촉하고 있는 동안은 종로봇의 동특성은 물체의 임피던스와 종로봇의 동특성이 결합되어 나타난다. 이러한 동특성은 비선형성을 포함하고 있으나, 동작범위내에서 선형화 하며, 또는 임피던스제어 방법등을 이용하여 선형시스템으로 변형시킬 수 있는 것으로 한다. 이때에 발생하는 실제 동특성과의 차이는 본 논문에서 다루는 건설제어 방법으로 극복될 수 있다. 또한 본 논문에서 다루고 있는 지연시간도 통신의 상태에 따라 변동되는 점이 있다. 따라서 본 절에서는 접촉단계에서 이와 같은 여러 가지 불확실성이 있을 경우에 대하여 건설한 안정성을 가지며 또한 요구된 성능을 만족시키는 제어기를 설계한다. 접촉단계의 제어루프 즉 힘제어 루프는 그림 3(a)와 같다.



(a) Contact (force control) phase



(b) Robust performance design model



(c) Implementation of the robust controller

그림 3. 접촉단계의 제어기 설계.

Fig. 3. Controller design of the contact phase.

접촉단계에서는 종로봇의 선단부가 외부의 물체에 접촉하여 접촉반력이 주어지므로, 동특성이 자유공간상에서 운동할 때와는 다르게 바뀐다. 이를 그림 3(a)를 참고하여 구하면 다음의 G_{sc} 와 같이된다.

$$G_{sc} = \frac{b_{ds}s + k_{ds}}{m_{ds}s^2 + b_{ds}s + k_{ds} + (b_{ds}s + k_{ds})z_e} \quad (10)$$

μ 제어기 K 에 의하여 제어되는 플랜트 G_{nom} 는 그림 3(b)와 같이 다음과 같이 정의된다.

$$G_{nom} \triangleq (1 + G_{hf})G_dG_{sc}z_ek_{cs} \quad (11)$$

이와 같은 시스템에 대하여 건설한 제어기를 설계하기

위하여 2개의 가중함수 즉 성능 가중함수 W_p 와 건설성 가중함수 W_{del} 를 명시하여야 한다. 앞에서 언급한 것과 같이 G_p 는 지연시간과 시스템의 매개변수들의 불확실성이라는 두 개의 섭동 (perturbation)을 갖고 있는데, 이들은 모두 같은 형태의 섭동으로 표현된다. 따라서 건설성 가중함수 W_{del} 는 이 두 가지의 섭동을 포함하도록 결정하여야 하나, 지연시간을 갖는 원격조작시스템에서는 지연시간에 대한 영향이 매우 크므로, 이를 기준으로 건설성 가중함수 W_{del} 를 결정한다 [26,27].

지연시간 τ 가 $0 \leq \tau \leq T$ 의 범위의 값을 갖는다고 가정한다. 이 시간지연항 $e^{-\tau s}$ 는 공칭 플랜트에 대한 승적섭동 (multiplicative perturbation) 으로 처리할 수 있는데, 시간지연이 포함된 동특성, 즉 G_p 는 다음과 같이 표현되는 함수들에 속한다고 할 수 있다.

$$(G_p | (1 + \Delta W_{del})G_{nom} : \|\Delta\|_{\infty} \leq 1) \quad (12)$$

이를 위하여 가중함수 W_{del} 는 단위화된 섭동이 다음 식을 만족하도록 선정된다.

$$\left| \frac{G_p(j\omega)}{G_{nom}(j\omega)} - 1 \right| \leq |W_{del}(j\omega)|, \quad \forall \omega, \tau \quad (13)$$

즉,

$$\left| e^{-\tau j\omega} - 1 \right| \leq |W_{del}(j\omega)| \quad \forall \omega, \tau \quad (14)$$

이와 같이 구해진 건설성 가중함수 W_{del} 이 시간지연에 의한 섭동뿐만 아니라, 매개변수들의 불확실성도 반영하도록 위의 (14)에서 주어진 것보다 충분히 크게 한다.

성능 가중함수 W_p 는 설계자가 원하는 시스템의 성능을 나타내도록 결정한다. 본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여, 설계의 기준이 된 시스템이 최적의 성능을 갖도록 시행착오적으로 결정하였다. 위에서 결정된 두개의 가중전달함수와 공칭플랜트에 대하여 건설한 제어기 K 를 SSV (Structured Singular Value) μ 를 이용하여 설계한다.

시스템에 주어지는 불확실한 섭동들에 대하여 시스템의 건설성들을 다음과 같이 건설안정성 (robust stability)과 건설성능 (robust performance)으로 알아볼 수 있다. 건설안정성은 공칭모델에 대한 섭동의 주어진 집합에 대하여 시스템이 안정되어 있는가를 나타내는 것이다. 이 조건은 다음의 식으로 표시된다.

$$\|W_{del}KG_{nom}(I + KG_{nom})^{-1}\|_{\infty} \leq 1 \quad (15)$$

건설성능은 공칭모델에 대한 섭동의 주어진 집합에 대하여 시스템이 건설안정성을 만족시키면서, 요구된 성능을 만족시키는가를 나타내는 것이다. 이 조건은 다음의 식으로 표시된다.

$$\|W_p(I + G_pK)^{-1}\|_{\infty} \leq 1 \quad \forall G_p \quad (16)$$

건설성능을 조사하는 전통적인 방법은 몇 개의 미리 선정된 섭동에 대하여 공칭 성능에 대한 시험을 하는 것이다. 그러나 이런 방법은 매우 시간을 소모하는 것이며, 시험되지 않은 섭동에 대해서는 성능을 만족시킬 수 없다. 그러나 μ 해석 방법에서는 불확실한 이득과 같은 시스템에 대한 모든 섭동이 Δ 블록들로 표시되어, 주어진 범위내의 모든 가능한 섭동에 대하여 성능을 보장할 수 있다. 건설성능을 만족시키는 제어기를 μ 방법에 의하여 구하기 위해서는 그림 4와 같이 제어 대상인 플랜트와 가중함수들을 포함한 일반화된 시스템 매트릭스 P 행렬을 구한다.

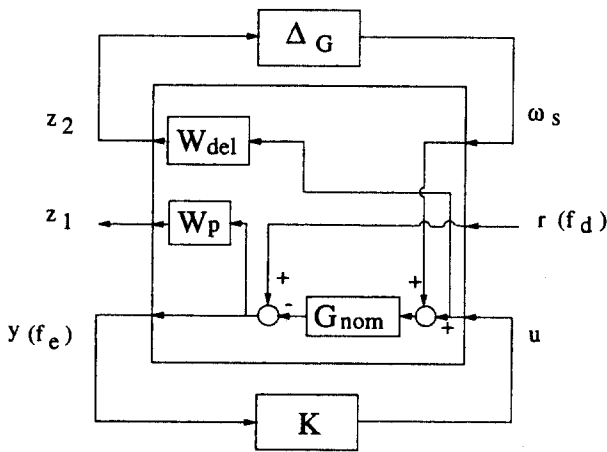


그림 4. μ 설계기법을 위한 시스템 구성.
Fig. 4. μ synthesis setup.

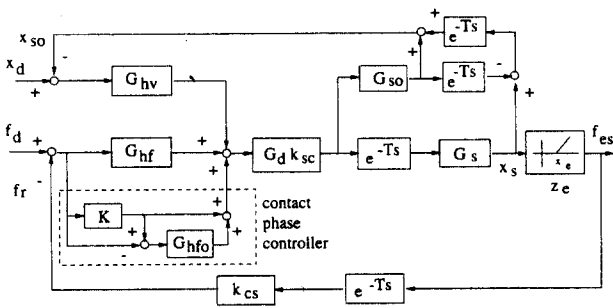


그림 5. 견실한 성능을 갖는 시간지연이 있는 원격조작 제어 시스템.
Fig. 5. Robust teleoperator control system with time delay.

$$P = \begin{bmatrix} W_p & -W_p G_{nom} & : & -W_p G_{nom} \\ 0 & 0 & : & W_{del} \\ \dots & \dots & : & \dots \\ I & -G_{nom} & : & -G_{nom} \end{bmatrix} \quad (17)$$

P 에 입출력되는 신호들은 다음과 같다.

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} r \\ w_s \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} z &= P_{11} w + P_{12} u \\ y &= P_{21} w + P_{22} u \end{aligned} \quad (19)$$

일반화된 시스템 매트릭스 P 에 대하여 위의 (16)과 같은 견실성능을 만족시키는 제어기 K 는 다음과 같이 구한다. 그림 4에 대한 LFT (Linear Fractional Transformation) $F_l(P, K)$ 는

$$F_l(P, K) = P_{11} + P_{12} K (I - P_{22} K)^{-1} P_{21} \quad (20)$$

이 되며, 만일 모든 주파수에 대하여 $\| \mu(F_l(P, K)) \|_\infty < 1$ 이면, 성능과 견실성에 대한 요건이 충족된다. 따라서 이와같은 K 를 구하면 시스템에 주어지는 섭동들에 대하여 시스템이 견실성능을 갖도록하는 제어기가 된다. 이 제어기는 H_∞ 방법을 이용하여 구하는데, 섭동을 나타내는 Δ 블럭에 적합한 임의의 대각행렬 D 에 대하여

$$\mu(F_l(P, K)) < \bar{\sigma}(D F_l(P, K) D^{-1}) \quad (21)$$

이므로 위의 조건은 $\| D F_l(P, K) D^{-1} \|_\infty$ 를 최소화 하는 것으로 된다. 이 최소화 과정은 D, K 를 반복적으로 변화시키면서 구한다[28,29].

이 논문에서 다루고 있는 원격조작 시스템에서는 조작자의 동특성이 제어루프에 포함되어 있지만, 제어기 K 는 조작자에게는 부가시킬 수 없으므로 블록선도를 바꾸어서 앞에서 구한 μ 제어기 K 를 그림 3(c)와 같이 실현시킨다. 접근단계와 접촉단계를 모두 포함시킨 전체적인 시스템의 블럭선도를 그림 5에 보였다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 토의

1. 원격조작 시스템

μ 설계방법에 의하여 설계된 원격조작 시스템의 제어성능을 검토하기 위하여, 제어에 관련된 여러 가지 변수들을 변화시키면서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 시스템은 제어방법의 타당성을 검토하기 위하여 단순화시킨 시스템으로, 그림 6에 보인 것과 같이, 주로봇으로는 선형운동하는 1 자유도를 가지며, 조작자가 손으로 잡고 전후방향으로 조작하며, 토크모타 등의 구동장치를 사용하여 그림 1과 같은 힘 반영기능을 갖도록 하였으며, 동특성은 (5)로 나타낼 수 있다고 가정한다. 종로봇도 역시 선형이동하는 1 자유도를 가지며 동특성은 (1)식에 의하여 나타낼 수 있으며, 힘센서를 장치하고 있어서 외부의 물체와 접촉할 경우에 접촉힘을 측정하여 조작 스테이션으로 전송한다. 주로봇과 종로봇간에는 통신에 따른 시간지연이 있다. 원격지에 있는 종로봇 선단부와 피접촉물체의 예측된 위치가 조작자의 앞에 있는 모니터에 나타나며, 접촉힘도 모니터에 표시된다. 주종로봇 모두 초기에 정지하고 있다고 가정하고 다음의 작업을 수행한다.

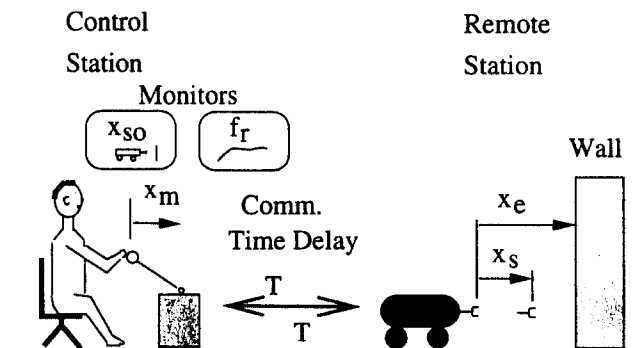


그림 6. 시뮬레이션에서 사용된 1 자유도 원격조작 시스템.

Fig. 6. Simulation set up of a single degree of freedom teleoperation.

종로봇은 위치와 강성도가 정확히 알려져 있지 않은 벽 앞에 놓여져 있다. 조작자가 종로봇을 초기위치로부터 벽 앞으로 순간적으로 이동시키고, 벽에 닿기 전에 제어방법을 접촉단계로 전환시켜, 종로봇의 선단부가 벽에 접촉하여 벽에 일정한 정적인 힘 21.8N(5lb)을 가한다.

이 작업은 종로봇이 이동한 후 벽과 접촉한 후 그 상태를 계속 유지하여야 한다. 종로봇과 벽과의 거리는 $3.81 \times 10^{-2}M$ (1.5 in) 이나 작업 초기에 조작자는 $5.08 \times 10^{-2}M$ (2.0 in) 으로 추정하였다고 가정하자. 또한 접촉물체의 벽면은 일반적으로 임피던스로 모델링되고 있으나 본 시뮬레이션에서는 강성도만으로도 대표될 수 있는 경우로 가정하였으며, 또한 이 강성도의 정확한 값은 주어지지 않은 경우이다. 조작스테이션과 원격스테이션간의 통신에 필요한 시

간지연은 일 방향으로 1 초 이하로 추정을 하였다고 가정한다. 각각의 로봇들이 갖는 마찰력은 편향힘에 포함되었으며, 관절의 각도와 작업범위의 제한은 고려하지 않았다. 접근단계에서 사용되는 종로봇의 모델 G_{so} 가 요구된 전달함수 G_s 와 같이 위해서는 (1)의 m_{as} 와 u_{bs} 들의 정확한 값이 있어야 하는데 현실적으로는 불가능하다. 시뮬레이션에서는 $\pm 10\%$ 의 오차범위내에서 m_{as} 가 계산될 수 있고, $\pm 5\%$ 의 오차범위내에서 u_{bs} 를 알 수 있다고 가정하였다. 또한 접촉단계의 제어를 구현하기 위해서는 조작자의 모델이 사용되는데 여기에도 $\pm 10\%$ 의 오차가 있는 것으로 가정하였다. 여기에 사용된 원격조작시스템에 관한 수치적인 데이터는 참고문헌 [20,22]과 비교하기 용이하도록 이들에게서 사용된 값들을 사용하였으며, 표 1에 보였다.

표 1. 시뮬레이션에서 사용된 전달함수.
Table 1. Transfer functions used in simulation study.

Group	Transfer Function
Human operator	$G_{hv} = 0.5s + 7.0, G_{hf} = 0.5s + 1.0$
Model of G_{Hf}	$G_{hfo} = 0.55s + 1.1$
G_s	$(7.2s - 9)/(s^2 + 7.22s + 9)$
G_{so}	$(8s + 10)/(s^2 + 8.0s + 10)$
G_{sc}	$(8s + 10)/(s^2 + 8.0s + 10 + (0.75s + 1)z_e)$
Force Scaling Factor	$k_{cs} = 0.2$
Wall Stiffness	$z_e = 6944.82N/M(40lb/in)$
Wall location	$x_e = 38.1mm(1.5in)$

2. 시뮬레이션 방법

시뮬레이션에서 사용한 제어를 설계하기 위한 접촉단계의 공칭플랜트는 (1)과 표 1 (Table 1)을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$G_p = \frac{160s^2 + 840s + 800}{s(s^3 + 58s^2 + 810s + 1000)} \quad (22)$$

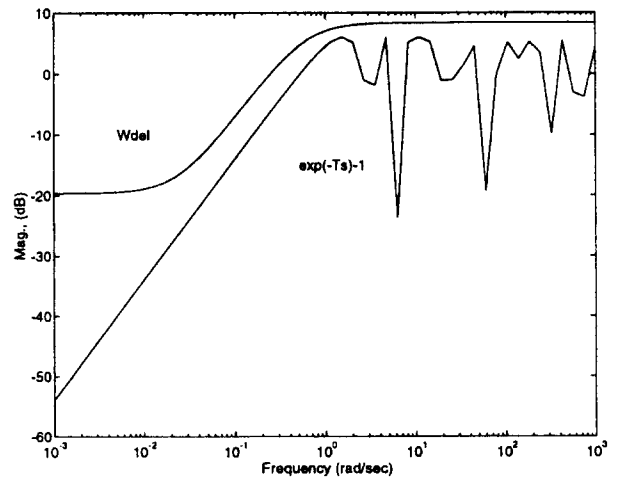
이 논문에서 가정된 지연시간은 $T = 1 \text{ sec}$ 이므로, (14)가 만족되는 함수를 선정하여야 하는데, 그림 7 (Fig.7)과 같이 되도록 W_{del} 는 다음 (23)과 같이 선정되었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 선정된 W_{del} 은 모든 주파수 범위에서 시간지연 불확실성보다 크기가 더 크도록 되었다.

$$W_{del} = \frac{2.1s + 0.005}{0.8s + 0.48} \quad (23)$$

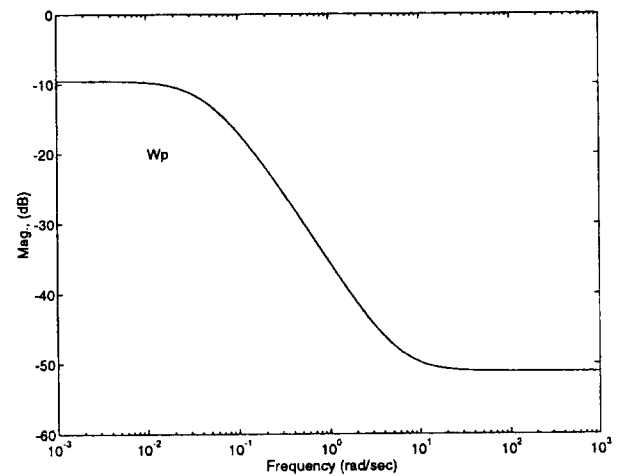
제어기 설계에 필요한 또하나의 가중함수인 성능에 관한 가중함수 W_p 는 시스템이 요구된 성능을 갖도록 선정한다. 이 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다음과 같이 선정하였다.

$$W_p = \frac{1.11s^2 + 6.67s + 0.5}{10(40s^2 + 5.3s + 0.15)} \quad (24)$$

이들 가중함수들은 앞 장에서 언급한 것과 같이 공칭 플랜트 G_p 에 그림 4와 같이 부가하여, 건설성능을 줄 수 있는 제어기 K 를 앞 장에서 언급한 방법에 의하여 구한다. 4회의 $D-K$ 반복과정을 거쳐서 그림 8과 같이 $\mu \leq \bar{\sigma} = 0.664$ 가 얻어졌으며, 이때에 D 행렬은 제어기의 차수가 과도하게 높아지지 않도록 1차 시스템으로 곡선맞춤을 하였다. 수치적인 계산과 시뮬레이션은 Matlab을 이용하였다 [28].



(a) Weighting function W_{del} .



(b) Weighting function W_p .

그림 7. 건설 원격 조작을 위한 가중함수.
Fig. 7. Weighting function for robust teleoperation.

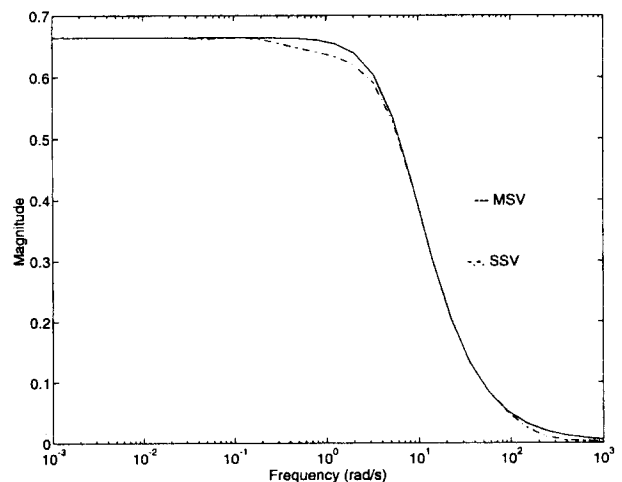


그림 8. 설계된 원격조작시스템 (접촉단계) 의 $\bar{\sigma}$ and μ .
Fig. 8. $\bar{\sigma}$ and μ for the designed teleoperator system(contact phase).

본 논문의 시스템에 대한 제어기는 차수가 9가 되는데, 시스템에 잡음이 있는 경우에는 바람직하지 않으므로

Hankel의 최적 근사화 방법을 사용하여 4차로 하였으며, 이때의 제어기는 다음과 같다.

$$K = \frac{2.6 \times 10^2 s^3 + 1.5 \times 10^4 s^2 + 2.0 \times 10^5 s + 1.2 \times 10^5}{s^4 + 2.4 \times 10^2 s^3 + 2.5 \times 10^4 s^2 + 2.3 \times 10^5 s + 5.1 \times 10^5} \quad (25)$$

이와 같은 시스템에 대하여 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검토하기 위하여

- 지연시간에 대한 부정확한 추정 또는 변동

이 있는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 본 논문의 방법과 참고문헌 [20,22]의 결과와 비교하기 위하여

- 외부물체의 위치가 부정확할 경우
- 외부물체의 강성도가 부정확할 경우

들에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 토의

그림 9와 그림 10들은 지연시간의 변화 또는 불확실성이 원격조작시스템의 제어에 미치는 영향을 보여주고 있다. 제어기는 지연시간이 1.0초일 때를 기준으로 설계되었으나, 지연시간에 불확실성이 있기 때문에 이의 영향을 보기 위해서, 지연시간을 0.5 초부터 3.0 초까지 변화시켰다. 접근단계로 부터 접촉단계로 전환 때의 종로봇의 선단부의 위치 (x_{eo})는 초기위치로부터 $3.30 \times 10^{-2}M$ (1.3 in)이며, 벽의 강성도는 $7,000N/M$ 이다.

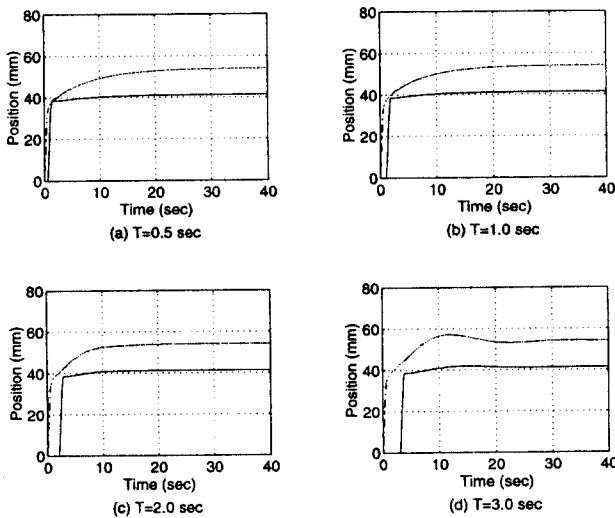


그림 9. μ 제어기를 사용했을 때 지연시간 T 의 변화에 따른 위치응답 ($x_{eo} = 3.30 \times 10^{-2} M, z_e = 7,000N/M$).

Fig. 9. Position responses with various delay time T using μ controller ($x_{eo} = 3.30 \times 10^{-2} M, z_e = 7,000N/M$).

위치응답에서 볼 수 있듯이 주로봇은 초기위치로 부터 전환위치까지는 급격히 이동하나, 종로봇은 지연시간 만큼 늦게 출발하여 이동한다. 제어모드가 접촉단계로 전환된 후에는 원격조작시스템은 μ 제어기와 조작자에 의하여 제어되는데, 주.종로봇 위치응답은 모두 매우 안정적임을 알 수 있다. 또한 접촉힘은 종로봇이 벽에 접촉한 이후에 발생되기 때문에 위치응답보다 더욱 늦어진다. 또한 지연시간때문에 접촉힘이 조작스테이션에 전송될 때까지 접촉힘이 귀환되지 않는 시간이 있으며, 이후에 접촉힘이 귀환된다. 따라서 초기의 반응에 변곡점이 있음을 볼 수 있으며, 설계에 가졌던 지연시간이 1.0초임에도 불구하고 $T=2.0 \text{ sec}$ 까지의 반응에서는 오버슈트가 없이 정상상태에 도달하고 있다.

5% 오차범위이내의 정상상태에 도달하는 정정시간 (整定時間) t_s 는 $T=0.5 \text{ sec}$ 일때는 23.4초, $T=2.0 \text{ sec}$ 일때는 15.7초가 된다. 지연시간이 길어질수록 접촉힘의 발생이 늦어지나 접촉후의 반응은 빨라지며, 시간지연이 더욱 길어짐에 따라 불안정해지는 경향이 있다.

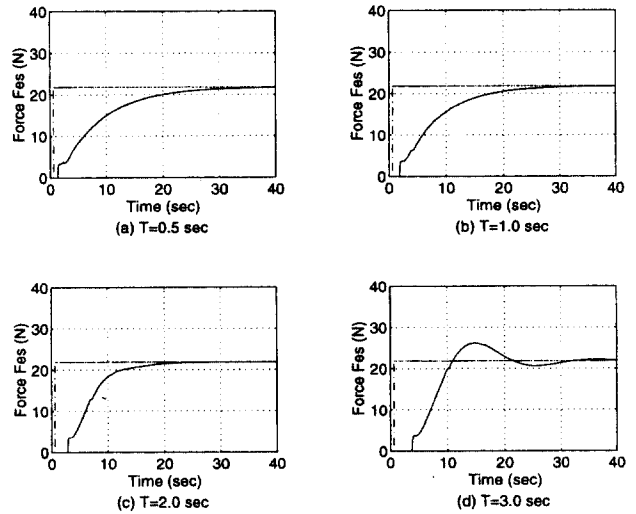


그림 10. μ 제어기를 사용했을 때 지연시간 T 의 변화에 따른 접촉힘 응답 ($x_{eo} = 3.30 \times 10^{-2} M, z_e = 7,000N/M$).

Fig. 10. Force responses with various delay time T using μ controller ($x_{eo} = 3.30 \times 10^{-2} M, z_e = 7,000N/M$).

다음은 전환 위치의 변동이 원격조작 시스템에 미치는 영향을 알아보았다. 그림 11은 위치응답이며, 그림 12는 접촉힘이 요구된 힘을 추종하는 성능을 보였다.

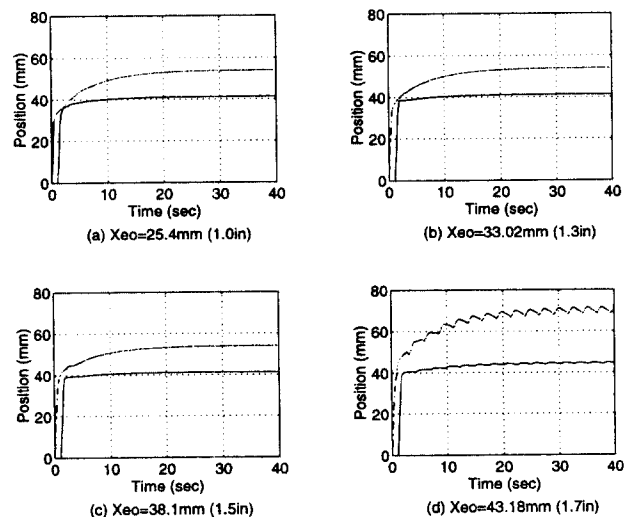


그림 11. 전환위치 x_{eo} 의 변화에 따른 위치응답, ($T = 1 \text{ sec.}, z_e = 7,000N/M$).

Fig. 11. Position responses with various switching position x_{eo} , ($T = 1 \text{ sec.}, z_e = 7,000N/M$).

그림 11에서 보면, 전환위치가 벽에서 너무 앞쪽으로 선정되면 (그림(a)), 종로봇의 선단부가 벽에 접촉할 때까지 자유공간상에서 이동하는 동안에도 시스템의 제어는 힘제어 루프에 의하여 이루어지기 때문에 매우 늦게 벽에 접촉하게

되며, 전환위치가 접촉물체에 가까울수록 더욱 빨리 접촉이 이루어진다. 이들의 경우에 위치응답은 앞의 시뮬레이션 결과와 매우 유사하다. 반면에 제어모드의 전환위치가 벽의 위치를 지난 지점으로 선정되면, 주로봇의 위치가 미소한 진동을 하면서 계속 증가한다. 이는 종로봇은 벽의 위치에 구속되는 반면 조작자는 선정된 지점까지 종로봇을 보내려고 하기 때문이다.

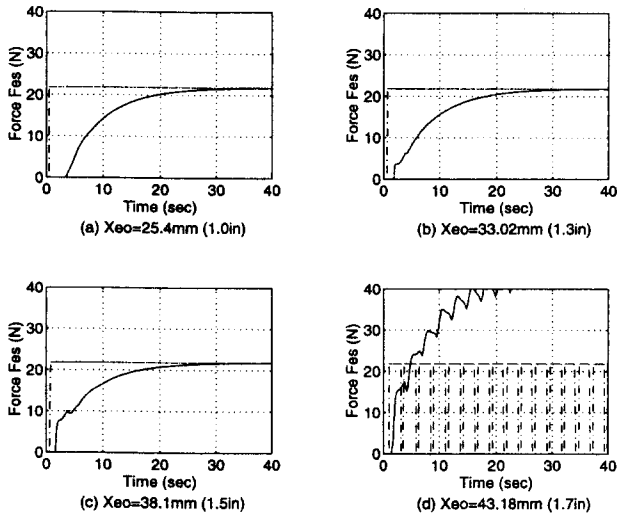


그림 12. 전환위치 x_{eo} 의 변화에 따른 접촉힘 응답 ($T=1\text{sec.}, z_e=7,000\text{N/M}$).

Fig. 12. Force responses with various switching position x_{eo} ($T=1\text{sec.}, z_e=7,000\text{N/M}$).

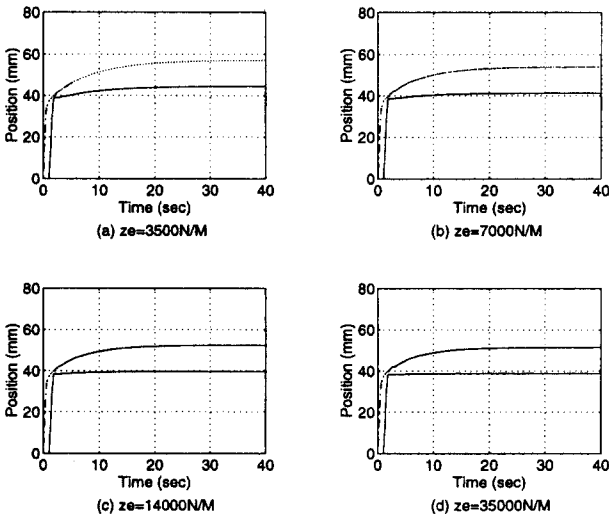


그림 13. 벽의 강성도 z_e 변화에 따른 위치 응답 ($T=1\text{sec.}, x_{eo}=3.30 \times 10^{-2}\text{M}$).

Fig. 13. Position responses with various wall stiffness z_e ($T=1\text{sec.}, x_{eo}=3.30 \times 10^{-2}\text{M}$).

이들에 대한 그림 12의 접촉힘의 응답을 보면, 선정된 전환위치가 벽의 위치보다 앞일 경우에는 접촉힘의 응답은 오버슈트없이 모두 안정되어 있으며, 접촉힘이 목표값의 5%에 도달하는 정정시간 t_s 가 그림 12(a)의 경우 22.5초, (c)의 경우 20.0초로 짧아진다. 그러나 전환위치가 벽의 위치를 지나칠 경우에는 작은 진동을 하면서 접촉힘이 점차 증가한다. 이는 접촉단계의 제어기가 접촉힘을 요구된 값으로 제어하려고 하지만, 앞에서 설명한 것과 같이 조작자는 계속

하여 종로봇이 전환위치로 가도록 주로봇을 조작하기 때문이다. 이는 그림 13(d)의 그림에서와 같이 제어모드가 전환단계와 접촉단계로 반복적으로 바뀌고 있는 것으로 부터 알 수 있다. 이와 같은 시뮬레이션 결과들로 부터, 접촉단계로의 전환은 가능한한 벽의 앞쪽, 가까운 지점에서 이루어지는 것이 바람직함을 알 수 있다.

다음은 외부의 피접촉물체인 벽의 강성도가 설계시에 고려되었던 값과 다른 경우의 시스템의 응답을 보였다. 설계시에 벽의 강성도 z_e 는 $7,000\text{N/M}$ (40 lb/in) 이나 시뮬레이션에서는 $3,500\text{ N/M}$ (20 lb/in) 부터 $35,000\text{N/M}$ (200 lb/in) 까지 변화시켜 보았다.

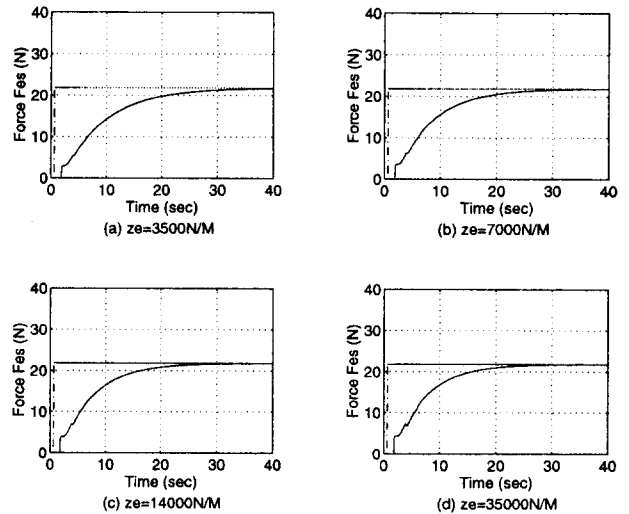


그림 14. 벽의 강성도 z_e 변화에 따른 접촉힘 응답 ($T=1\text{sec.}, x_{eo}=3.30 \times 10^{-2}\text{M}$).

Fig. 14. Force responses with various wall stiffness z_e ($T=1\text{sec.}, x_{eo}=3.30 \times 10^{-2}\text{M}$).

그림 13에서 보면, 위치응답은 강성도의 변화에도 불구하고 모두 비슷한 경향을 보이고 있다. 종로봇 선단부의 정상상태 위치는 접촉힘과 벽의 강성도의 크기에 따라 결정되므로 벽의 강성도가 작을 때는 더 멀리 위치하며, 강성도가 커짐에 따라 벽의 변형이 작아짐으로 초기의 벽의 위치가 가깝게 된다.

접촉힘의 응답들을 그림 14에 보였다. 이 그림들에서 볼 수 있듯이 강성도가 10배로 변화되었음에도 불구하고 오버슈트 없이 전체적으로 안정되어 있으며, 서로 비슷한 반응을 보여주고 있다. 강성도가 커짐에 따라 정정시간 t_s 가 (a)의 경우 24.8초이나 점점 짧아져서 (d)의 경우에는 18.3초가 되었다. 이 결과로 볼 때 본 논문에서 설계된 제어기는 피접촉물체인 벽의 강성도의 변화에도 상당한 견실성이 있음을 알 수 있다.

V. 결론

이 논문에서 시간지연이 있는 원격조작시스템에 대하여 강인한 제어를 설계하는 방법을 제안하였다. 원격조작시스템은 2단계 즉 접근(위치제어) 단계와 접촉(힘제어) 단계로 나누었으며, 접근단계의 제어를 설계하기 위하여 Smith원리를 사용하였고, 접촉단계에서는 힘제어의 강인성을 증대하기 위하여 지연시간과 원격스테이션의 섭동들을 승적섭동으로 포함시켜서 구조적 특이값 μ 를 이용하여 제어를 설계하였다. 이와같이 설계된 시스템에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 설계시 고려된 지연시간의 범위 이내에서는 오버슈트 없이 안정된 접촉을 이루며, 이들 경우에 지연시간의

크기에 크게 영향을 받지 않는다.

- 시간지연이 길어질수록 접촉힘의 응답은 빠르나, 불안정화되는 경향이 있다.
- 접근단계로부터 접촉단계로 전환은 예측된 종로봇의 선단부가 피접촉물체인 벽의 앞에서 이루어 질때 안정된 접촉상태를 얻을 수 있으며, 벽에 가까울수록 빨리 정상상태에 이른다.
- 피접촉물체인 벽의 강성도가 증가할수록 접촉응답이 빨라지나, 접촉힘의 응답성능에 크게 영향을 주지 않는다.

참 고 문 헌

- [1] W. R. Ferrell, "Remote manipulation with transmission delay", *IEEE Tr. on Human Factors in Electronics*, pp. 24-32, 1965.
- [2] J. M. E. van de Vegte, P. Hilgram and R. H. Kwong, "Teleoperator control models: Effects of time delay and imperfect system knowledge", *IEEE Tr., on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 6, pp. 1258-1272, Nov. /Dec. 1990.
- [3] T. L. Brooks, *Telerobot Response Requirements*, Report No. STX/ROB/90-03, ST Systems Corp., March 1990.
- [4] J. D. Chapel, "Performance limitations of bilateral force reflector imposed by operator dynamic characteristics", *Proc. of NASA Conf. on Space Telerobotics*, vol. IV, pp. 91-100, 1989.
- [5] G. Hirzinger, J. Heindl and K. Landzettel, "Predictive and knowledge based telerobotic control concepts", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1768-1777, 1989.
- [6] S. Hayati and S. T. Venkataraman, "Design and implementation of a robot control system with traded and shared control capability", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1310-1315, 1989.
- [7] L. Conway, R. A. Volz and M. W. Walker, "Teleautonomous system: Projecting and coordinating intelligent action at a distance", *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 2, pp. 146-158, Apr. 1990.
- [8] J. Funda, *Teleprogramming: Towards Delay-Invariant Remote Manipulator*, Ph. D. Thesis, University of Pennsylvania, CIS Dept., Moore School, Philadelphia, PA 19104, Aug. 1991.
- [9] H. Das, H. Zak, W. S. Kim, A. K. Bejczy and P. S. Schenker, "Operator performance with alternative manual control modes in teleoperation", *Presence*, vol. 1, no. 2, Spring, 1992.
- [10] G. Hirzinger, J. Heindl, K. Landzettel and B. Brunner, "Multisensory shared autonomy: A key issue in the space robot technology experiment ROTEX", *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 221-230, July 1992.
- [11] R. Paul, T. Lindsay and C. Sayers, "Time delay insensitive teleoperation", *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 247-254, July 1992.
- [12] G. J. Raju, G. C. Verghese and T. B. Sheridan, "Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1316-1321, 1989.
- [13] B. Hannaford, "Stability and performance trade-offs in bi-lateral telemanipulation", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1764-1767, 1989.
- [14] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling: Formulation and experiment", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 849-858, May 1992.
- [15] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback", *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, pp. 426-434, Aug. 1989.
- [16] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1618-1625, 1989.
- [17] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay", *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, pp. 494-501, 1989.
- [18] J. F. Jansen and R. L. Kress, "Control of a teleoperator system with redundancy based on passivity conditions", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 478-484, Apr. 1991.
- [19] Sukhan Lee and Hahk Sung Lee, "Design of optimal time delayed teleoperator control system", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 3252-3258, May 1994.
- [20] Sukhan Lee and Hahksung Lee, "Modeling, design and evaluation of advanced teleoperator control systems with short time delay", *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 607-623, Oct. 1993.
- [21] H. Kazerooni, T. I. Tsay and K. Hollerbach, "A controller design framework for telerobotic systems", *IEEE Tr. on Control System Technology*, pp. 50-62, 1993.
- [22] S. Lee and K. W. Jeong, "Design of robust time delayed teleoperator control system", *Proc. of IROS '94*, pp. 1413-1420, Munchen, Sept. 12-16, 1994.
- [23] G. M. H. Leung, B. A. Francis and J. Apkarian, "Bilateral controller for teleoperators with time delay via μ -Synthesis", *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 1, pp. 105-116, Feb. 1995.
- [24] J. D. Chapel and R. Su, "Attaining impedance control objectives using H_∞ design methods", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp.

- 1482-1487, Sacramento, California, April 1991.
- [25] O. J. M. Smith, *Feedback Control System*, McGraw-Hill, 1959.
- [26] J. C. Doyle, B. A. Francis and A. R. Tannenbaum, *Feedback Control Design*, Macmillan Publishing Co., 1992.
- [27] J. M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*, Addison Wesley, 1989.
- [28] G. J. Balas, J. C. Doyle, K. Glover, A. Packard and R. Smith, " μ -analysis and synthesis toolbox", Math works Inc., *Matlab User Guide*, 1991.
- [29] R. L. Dailey, "Lecture notes for the workshop on H_∞ and μ methods for robust control", *IEEE Conf. on Decision and Control*, Seattle, Washington, USA., 1991.



정 규 원

1960년 3월 9일생. 1982년 한양대 공대 기계공학과졸업. 1984년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1989년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(공학박사). 1989년 3월 ~ 1995년 9월 (재) 산업과학기술연구소 책임연구원. 1995

년 10월 ~ 현재 충북대학교 기계공학부 조교수. 주관심분야는 원격조작로봇시스템, 지능제어시스템, 시각서보로봇시스템 등임.