

모델링 불확실성이 존재하는 원격조작기에서 강인 안정을 보장하는 양방향 제어기 설계

Design of the robust bilateral controller for teleoperators with modeling uncertainties

이 형 기, 정 명 진

한국 과학 기술원 (Tel: 869-8029; Fax: 869-3410; E-mail: lhk@donghae.kaist.ac.kr)

Abstracts Teleoperation is the extension of a person's sensing and manipulation capability to a remote location. Teleoperators generally can be modeled as linear transfer function inherently including modeling uncertainty. Modeling uncertainties can make the system unstable and its performance poor. Thus I'm studying about a design framework for a bilateral controller of teleoperator systems with modeling uncertainties. In this paper, a method based on the H_∞ -optimal control and μ -synthesis frameworks are introduced to design a controller for the teleoperator that achieves stability and performance in the presence of the modeling uncertainties.

Keywords Bilateral control, Robust control, teleoperator, μ synthesis, Modeling uncertainty

1. 서론

마스터 로봇과 슬레이브 로봇으로 구성된 원격 조작 시스템에서 슬레이브 로봇은 작업 환경과의 접촉을 통해 접촉 힘(contact force)을 발생시키며, 이 힘은 슬레이브 로봇에 장착된 힘 센서에 의해 측정된 후 마스터 로봇을 경유하여 조작자에게 전달된다. 위의 방법으로 원격 로봇 시스템을 제어하는 것을 양방향 제어라고 한다. 이 때, 조작자는 마스터 로봇을 통하여 슬레이브 로봇의 접촉 힘을 느낄 수 있기 때문에 매우 섬세하고 정교한 작업을 수행할 수 있어서, 작업 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

양방향 제어기를 제어기를 설계하려는 많은 연구 중에서 Hannaford[4]와 Raju[8]는 선형화된 시스템으로부터 유도된 2 단자 네트워크(two port network)모형을 제안하여, 힘 반사 이득을 포함하는 원격 조작 제어기를 설계하였다. 그러나 작업자와 작업 환경의 불확실한 동적 특성하에서, 마스터 로봇과 슬레이브 로봇의 모델링 불확실성에 강인한 제어기를 설계하지 못했다.

공유 제어(shared control)는 컴플라이언스 제어와 양방향 제어를 합친 구조를 가지고 있다. 앞에서 살펴보았듯이 양방향 제어에서는 시스템이 안정한 범위 내에서 큰 힘 반사 이득을 보장할 수록, 작업자는 접촉힘을 섬세하게 느낄 수 있어서, 보다 정교한 작업을 수행할 수 있다. 일반적으로 슬레이브 로봇은 마스터 로봇보다 더 큰 강성(stiffness)을 가지고 있는데, 컴플라이언스 제어기를 사용하여 슬레이브 로봇의 유효 강성을 줄임으로써 더 힘 반사 이득을 보장할 수 있다. Kim[5](1992)등은 1 차의 컴플라이언스 제어기를 양방향 제어기와 함께 사용하여 peg-in-hole 작업을 수행하여 작업 성능을 크게 개선하였다. 그러나 이 방법에서도 불확실한 작업 환경과 모델링 오차가 존재할 때 힘 반사 이득과 컴플라이언스 제어기를 설계하는 것은 해결해야 할 문제로 남아있다.

양방향 임피던스 제어(bilateral impedance control)은 공유 제어에 마스터 로봇 측에 컴플라이언스 제어를 추가한 구조를 가지고 있다. 마스터 컴플라이언스 제어기는 마스터 로봇의 컴플라이언스를 작업자가 원하는 값으로 임의로 설정할 수 있다. 일반적으로 마스터

로봇의 관성과 질량이 크면 작업자는 마스터 로봇을 운전하는 데 많은 힘을 소모하게 되게 슬레이브 로봇에서 피드백되는 접촉 힘에 둔감하게 된다. 이 때 마스터 로봇의 컴플라이언스를 능동적으로 변화시켜 유효 강성을 줄임으로써 작업자는 적은 힘으로 용이하게 마스터 로봇을 운전할 수 있으며 접촉 힘을 좀 더 예민하게 감지할 수 있다.

본 논문에서는 위의 구조를 이용하여 모델링 불확실성에 강인한 제어기를 강인 선형 제어 기법을 사용하여 설계한다. 이를 위해서 마스터 로봇과 슬레이브 로봇을 선형 시스템으로 모델링하고 고주파 영역에 존재하는 모델링되지 않은 동특성이나 위상 지연과 같은 모델링 불확실성을 비구조적 불확실성으로 모델링한다. 한편 작업 물체의 임피던스 $Z(s)$ 는 일반적으로 감쇠 상수를 갖는 스프링으로 모델링하며, 이는 작업 물체에 따라 변화하는 양이므로 모델링 불확실성을 가지고 있다. 이러한 모델링 불확실성에도 불구하고 각각의 성능을 만족하는 국소 제어기와 양방향 제어기를 설계하기 위하여 강인한 선형 제어 기법의 하나인 μ 설계 기법을 도입한다. μ 설계 기법은 모델링 불확실성이 시스템 내부에 산재하는 복잡한 시스템의 제어에 쉽게 응용될 수 있고 힘 센서 등에 부과되는 센서 잡음에 대한 강인성을 보장하고, 강인 안정(robust stable)과 강인 성능(robust performance)을 보장할 수 있는 일반적인 제어 알고리즘이다.[1,2,3]

2. 비접촉 운동 시 국소 로봇 제어기 설계

2.1 마스터 컴플라이언스 제어기

f_h 는 작업자가 마스터 로봇에 가하는 힘이며 u_m 은 구동기(actuator)에 의하여 로봇에 가해지는 힘을 의미하고 y_m 은 마스터 로봇의 위치를 의미할 때, 마스터 로봇의 동력학 식은 다음과 같이 주어진다.

$$y_m = \tilde{G}_m(s)(f_h - u_m)$$

$\tilde{G}_m(s)$ 는 실제 마스터 로봇의 전달 함수를 나타낸다. 로봇은 상호 축

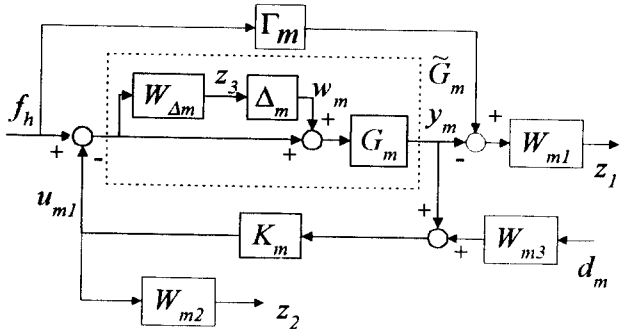


그림 1. 마스터 컴플라이언스 제어기($K_m(s)$)의 설계
Fig. 1. Design of $K_m(s)$

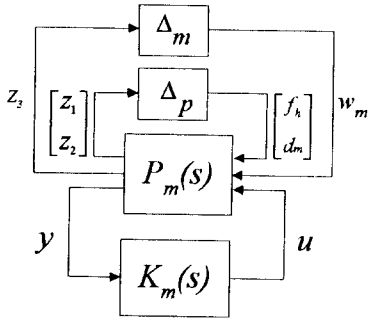


그림 2. 마스터 로봇의 μ 설계
Fig. 2. Setup for μ -synthesis

간에 coupling이 존재하는 비선형 시스템이지만 모델링 불확실성을 포함한 선형 시스템으로 모델링할 수 있다고 가정한다. 즉 실제 로봇 $\tilde{G}_m(s)$ 는 공칭 모델 $G_m(s)$ 와 모델링 불확실성 가중 함수 $W_{\Delta m}(s)$ 에 의하여 $\tilde{G}_m(s) = G_m(s)(1 + \Delta_m(s)W_{\Delta m}(s))$ 의 곱셈형 불확실성을 가진 시스템으로 표현할 수 있다고 가정한다.

마스터 컴플라이언스 제어기는 마스터 로봇의 컴플라이언스 y_m/f_h 를 작업자가 원하는 값으로 임의로 설정할 수 있다. 그림 1은 마스터 로봇을 위한 국소 제어기 설계 과정을 도시한다. 그림에서 f_h 는 작업자가 가하는 힘이며 y_m 은 마스터 로봇의 위치이며 기준 위치 입력으로 슬레이브 로봇에 보내어진다. u_{m1} 은 구동기에 의하여 로봇에 가해지는 토크를 의미하고 $K_m(s)$ 은 설계하고자 하는 마스터 컴플라이언스 제어기이다. 제어기를 설계할 때 고려해야 할 설계 사항은 다음과 같다.

1. 작업자의 조작성을 향상시킬 수 있는 마스터 로봇의 컴플라이언스가 설정되어야 한다. 마스터 로봇의 컴플라이언스를 Γ_m 으로 설정하고자 할 때 $y_m = \Gamma_m f_h$ 의 관계식이 성립되어야 한다. 결국 컴플라이언스 오차(compliance error) $\Gamma_m f_h - y_m$ 를 줄이는 것이 제어 목적이다.
2. 마스터 로봇의 입력 토크 u_{m1} 은 서보의 특성에 의하여 포화 임계치(saturation limit)를 가지므로, 미리 설정된 포화 임계치를 넘어가서는 안된다. 그러므로, u_{m1} 은 제어 출력 z 에 포함되어야 한다.

그림 1에서 W_{m1}, W_{m2} 과 W_{m3} 는 설계자가 임의로 설정하는 주파수에 의존하는 가중 행렬이고 제어 출력 z , 외부 입력 w , 측정 출력 y 와 제어 입력 u 를 다음과 같이 정의한다.

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} W_{m1}(\Gamma_m f_h - y_m) \\ W_{m2} \tau_{m1} \\ W_{\Delta m}(f_h - \tau_{m1}) \end{bmatrix}, \quad w := \begin{bmatrix} f_h \\ d_m \\ w_m \end{bmatrix}$$

$$y := y_m + W_{m3} d_m, \quad u := u_{m1}$$

μ 설계 기법을 사용하기 위하여 위의 플랜트를 그림 2로 변환하면 일반화된 플랜트 P 는 다음과 같다.

$$z = P_{11}w + P_{12}u$$

$$y = P_{21}w + P_{22}u$$

$$P_{11} = \begin{bmatrix} W_{m1}(\Gamma_m - G_m) & 0 & -W_{m1}G_m \\ 0 & 0 & 0 \\ W_{\Delta m} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ W_{m2} \\ -W_{\Delta m} \end{bmatrix}$$

$$P_{21} = [G_m \quad W_{m3} \quad G_m], \quad P_{22} = [-G_m]$$

그림 2에서 Δ_m 는 플랜트의 모델링 불확실성 블럭이고 Δ_p 는 성능을 보장하기 위한 가상의 불확실성 블럭이다. 불확실성 블럭 $\Delta = \text{diag}[\Delta_m, \Delta_p]$ 로 정의할 때, 하위 분수 변환에 의하여 $M = F_{zw}(P_m, K_m)$ 로 구해지며 $\mu_{\Delta}(M)$ 를 1보다 작게 하는 제어기를 설계한다.

2.2 슬레이브 로봇 위치 제어기

슬레이브 로봇이 작업물과 접촉하지 않고 운동하는 경우 슬레이브 로봇은 마스터 로봇의 위치 명령을 정확하게 추종하여야 한다. 그림 3은 슬레이브 로봇을 위한 국소 제어기 설계 과정을 도시한다. τ_s 은 구동기(actuator)에 의하여 로봇에 가해지는 토크를 의미하며 y_s 은 슬레이브 로봇의 위치를 의미할 때, 슬레이브 로봇의 동력학식은 다음과 같이 주어진다.

$$y_s = \tilde{G}_s(s)\tau_s$$

$\tilde{G}_s(s)$ 는 실제 슬레이브 로봇을 나타내고 $G_s(s)$ 는 마스터 로봇의 공칭 모델을 의미한다. 실제 로봇 $\tilde{G}_s(s)$ 는 공칭 모델 $G_s(s)$ 와 모델링 불확실성 $W_{\Delta s}(s)$ 에 의하여 $\tilde{G}_s(s) = G_s(s)(1 + \Delta_s(s)W_{\Delta s}(s))$ 의 곱셈형 불확실성을 가진 플랜트로 표현될 수 있다고 가정한다. y_m 은 마스터 로봇에서 보내어지는 기준 위치 입력이며 $K_s(s)$ 는 설계하고자 하는 위치 제어기이다. 슬레이브 로봇의 위치 y_s 가 마스터의 기준 입력 y_m 을 추종하는 것이 제어 목적이므로 $y_m - y_s$ 를 제어 출력 z 에 포함시켜 최소화하여야 한다.

그림 3에서 추종 성능을 좋게 하기 위하여 단위 이득 피드백 구조를 사용하였고 W_s 은 추종 성능을 결정하는 주파수에 의존하는 가중 행렬(weighting matrix)이다. z, w, y, u 를 다음과 같이 정의할 때, 일반화된 플랜트 P 는 다음과 같다.

$$z = P_{11}w + P_{12}u \quad \text{여기서 } z := \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad w := \begin{bmatrix} y_m \\ w_s \end{bmatrix}$$

$$y = P_{21}w + P_{22}u$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_s & -W_s G_s \\ 0 & 0 \\ I & -G_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -W_s G_s \\ W_{\Delta s} \\ -G_s \end{bmatrix}$$

이 때, 그림 3의 시스템은 그림 4으로 표현될 수 있고 그림 4의 시스템에 μ 설계 기법을 사용하여 제어기를 설계한다.

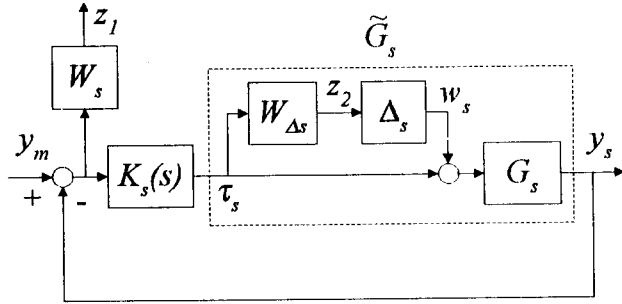


그림 3. 슬레이브 로봇 위치 제어기 ($K_s(s)$)의 설계

Fig. 3. Design of $K_s(s)$

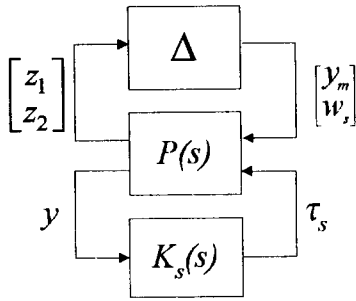


그림 4. μ 설계 재배치

Fig. 4. Setup for μ -synthesis

3. 접촉 운동 시 제어기 설계

3.1 슬레이브 컴플라이언스 제어기

이 절에서는 슬레이브 로봇이 작업물과 접촉하고 있는 경우, 즉 접촉힘이 존재하는 상황에서의 슬레이브 컴플라이언스 제어기[7] 설계에 대해서 살펴본다. 컴플라이언스 제어에서는 슬레이브 로봇이 작업 물체와 접촉하여 생기는 접촉힘이 슬레이브 로봇에 피드백 되어 기준 경로를 수정하는데 사용된다. 슬레이브 로봇이 작업물과 접촉하여 생기는 접촉힘은 다음과 같이 표현된다.

$$f_s = m_e \ddot{y}_s + b_e \dot{y}_s + k_e y_s$$

여기서 m_e, b_e 와 k_e 는 작업물의 질량, viscous 상수, 강성을 나타낸다. 작업물의 임피던스 $\tilde{Z} = f_s/y_s = m_e s^2 + b_e s + k_e$ 로 나타낼 수 있다.

1. 작업 대상물의 임피던스의 변화에도 불구하고 마스터 로봇의 위치 y_m 과 슬레이브 로봇의 위치 y_s 가 일치하여야 한다.
2. 작업자의 힘 f_h 가 슬레이브 로봇 측의 힘 f_s 로 그대로 전달 되어야 한다. 즉 f_h 와 f_s 가 일치하여야 한다.

본 절에서는 설계 지침 1 을 만족하기 위하여 슬레이브 로봇에 컴플라이언스 제어기를 설계하는 방법을 살펴본다. 그림 5 은 접촉 운동 시 슬레이브 제어기를 설계하기 위한 블록도이다. 그림에서 $\tilde{Z}(s)$ 는 작업물의 임피던스를 의미하며 $\tilde{Z}(s) = Z(s)(1 + \Delta_z(s)W_{\Delta_z}(s))$ 의 곱셈형 블록실성을 가지고 있다. K_s 는 전 절에서 설계된 위치 제어용 국소 슬레이브 제어기이다. f_w 는 힘 센서에 부가되는 잡음을 의미하며, z_1 은 설계 지침 1 을 만족하기 위해 $y_m - y_s$ 를 포함하고 있고, z_2 는 슬레이브 로봇의 입력 토크를 제한하기 위하여 설정되었다. W_{z1} 과 W_{z2} 는 제어 출력 z 의 주파수에 대한 중요성을 가중

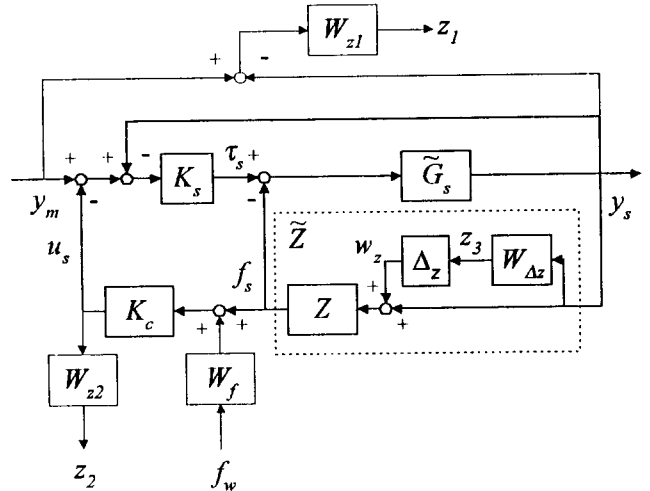


그림 5. 컴플라이언스 제어기 (K_c)의 설계

Fig. 5. Design of K_c

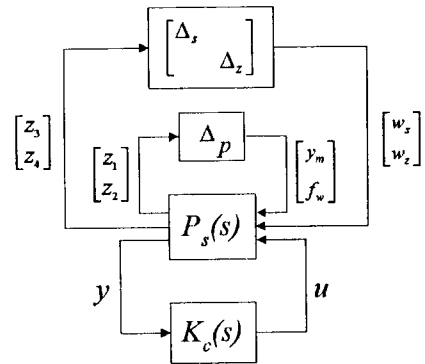


그림 6. 컴플라이언스 제어기를 위한 μ 재배열

Fig. 6. Setup for μ -synthesis

하는 함수이고 W_f 는 잡음 f_w 의 주파수 특성을 결정하는 함수이다.

μ 설계 기법을 사용하기 위하여 제어 출력 z , 외부 입력 w , 제어 입력 u , 측정 출력 y 를 다음과 같이 정의한다.

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} W_{z1}(y_m - y_s) \\ W_{z2}u_s \\ W_s(K_s(y_m - \tau_s - u_s) - f_s) \\ W_z y_s \end{bmatrix}, w := \begin{bmatrix} y_m \\ f_w \\ w_s \\ w_z \end{bmatrix}$$

$$y := f_s + W_f f_w, u := u_s$$

일반화된 플랜트는 P 는 다음과 같다.

$$z = P_{11}w + P_{12}u$$

$$y = P_{21}w + P_{22}u$$

$$P_{11} = \begin{bmatrix} W_{z1}(1 - \Gamma^{-1}G_s K_s) & 0 & -\Gamma^{-1}W_{z1}G_s & -\Gamma^{-1}W_{z1}G_s Z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Gamma^{-1}W_s K_s & 0 & -\Gamma^{-1}W_s G_s (K_s - Z) & -\Gamma^{-1}W_s Z \\ \Gamma^{-1}W_z G_s K_s & 0 & \Gamma^{-1}W_z G_s & -\Gamma^{-1}W_z G_s Z \end{bmatrix}$$

$$P_{12} = \begin{bmatrix} -\Gamma^{-1}W_{z1}G_s K_s \\ W_{z2} \\ -\Gamma^{-1}K_s \\ -\Gamma^{-1}W_z G_s K_s \end{bmatrix}$$

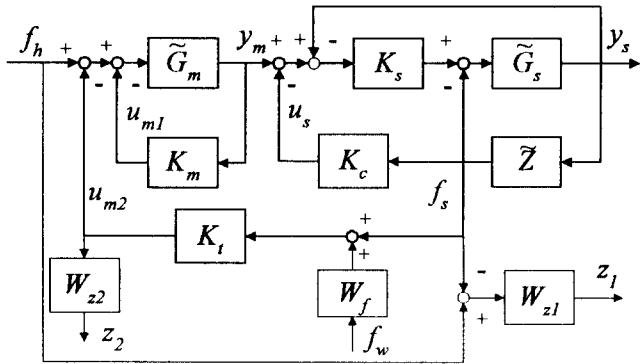


그림 7. 양방향 제어기 K_i 의 설계

Fig. 7. Design of K_i

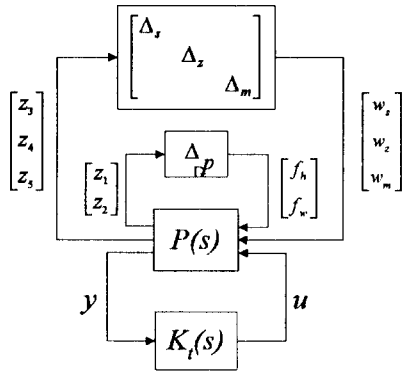


그림 8. μ 설계를 위한 재배열

Fig. 8. Setup for μ -synthesis

$$P_{21} = [\Gamma^{-1}G_s Z K_s \quad W_f \quad \Gamma^{-1}Z G_s \quad \Gamma^{-1}(1 + G_s K_s)Z]$$

$$P_{22} = [-\Gamma^{-1}Z G_s K_s]$$

여기서 $\Gamma = 1 + G_s Z + G_s K_s + G_s Z K_s K_c$ 이다.

그림 6에서 Δ_x 는 슬레이브 로봇의 모델링 불확실성 블록이고 Δ_z 는 작업물의 임피던스의 불확실성 블록이고 Δ_p 는 성능을 보장하기 위한 가상의 불확실성 블록이다. 불확실성 블록 $\Delta = \text{diag}[\Delta_x, \Delta_z, \Delta_p]$ 로 정의할 때, 하위 분수 변환에 의하여 $M = F_{zw}(P, K_i)$ 로 구해지며 $\mu_\Delta(M)$ 를 1 보다 작게 하는 제어기를 설계한다.

3.2 양방향 임피던스 제어기(bilateral impedance controller) 설계

양방향 임피던스 제어는 컴플라이언스 제어와 양방향 제어를 합친 구조를 가지고 있다. 슬레이브 로봇이 작업물과 접촉하여 운동하는 상황에서 컴플라이언스 제어기는 슬레이브 로봇에 국소적인 피드백 루프를 형성하고 양방향 제어기는 마스터 로봇으로의 힘 피드백 루프를 생성한다. 앞 절의 설계 지침 1,2 를 만족하는 제어기를 설계하기 위하여 마스터 로봇과 슬레이브 로봇과 각각의 국소 제어기로 이루어지는 전체 시스템에 대하여 제어기를 설계한다. 그림 7에서 $\tilde{G}_m(s)$ 과 $\tilde{G}_s(s)$ 과 $\tilde{Z}(s)$ 는 불확실성을 포함하는 마스터 로봇, 슬레이브 로봇과 작업물의 임피던스를 의미하고 $K_m(s)$ 는 마스터 컴플라이언스 제어기, $K_s(s)$ 는 슬레이브 위치 제어기, $K_c(s)$ 는 슬레이브 컴플라이언스 제어기이다. $K_f(s)$ 는 설계하고자 하는 양방향 제어기이다. f_w 는 힘 센서에 부과되는 잡음을 의미하며, 설계 지침 2 를 만족하기 위하여 $f_h - f_s$ 를 제어 출력 z_1 에 포함시키고 로봇의

입력 토크가 한계값을 넘지 않도록 입력 토크를 제어 출력 z_2 에 포함시킨다. 제어 출력 z , 외부 입력 w , 제어 입력 u , 측정 출력 y 를 다음과 같이 정의한다.

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} W_{z1}(f_h - f_s) \\ W_{z2}u_{m2} \\ W_s(K_s(y_m - y_s - u_s) - f_s) \\ W_z y_s \\ W_m(f_h - u_{m1} - u_{m2}) \end{bmatrix}, w := \begin{bmatrix} f_h \\ f_w \\ w_x \\ w_z \\ w_m \end{bmatrix}$$

$$y := f_s + W_f f_w, u := u_{m2}$$

μ 설계 기법을 사용하기 위하여 그림 8와 같이 시스템을 재정렬할 수 있다. 그림에서 제어 출력 $[z_3 \ z_4 \ z_5]$ 과 외부 입력 $[w_x \ w_z \ w_m]$ 를 잇는 불확실성 블록 $\text{diag}[\Delta_x, \Delta_z, \Delta_m]$ 는 모델링 불확실성 블록을 의미하고 $[z_1 \ z_2]$ 와 $[f_h \ f_w]$ 를 잇는 불확실성 블록 Δ_p 는 강인 성능을 보장하기 위하여 도입된 가상의 불확실성 블록이다. 일반화된 플랜트 $P(s)$ 에 대하여 제어 출력 z 에서 외부 입력 w 를 잇는 불확실성 블록 $\Delta = \text{diag}[\Delta_x, \Delta_z, \Delta_m, \Delta_p]$ 를 설정한다. 하위 분수 변환에 의하여 $M = F_{zw}(P, K_i)$ 로 구해지며 $\mu_\Delta(M)$ 를 1 보다 작게 하는 제어기를 설계한다.

4. 결론

마스터 로봇과 슬레이브 로봇을 모델링 불확실성을 갖는 선형 시스템으로 모델링하고, 이 모델링 불확실성과 작업 대상물의 임피던스의 모델링 불확실성에 강인 안정과 강인 성능을 보장하는 양방향 제어기를 강인 선형 제어 기법인 하나인 μ 설계 기법을 사용하여 설계하였다. 설계된 제어기가 로봇의 모델링 불확실성에도 불구하고 강인 안정과 강인 성능을 보장함을 모의 실험을 통하여 확인하였다. 모의 실험 결과는 지면의 제한 때문에 본 논문에 첨가하지 못했다.

참고 문헌

- [1] Doyle, J.C., Francis, B.A., and Tannenbaum, A.R., *Feedback Control Theory*, Maxwell Macmillan, 1992
- [2] Francis, B.A., *A course in H^∞ Control Theory*. New York: Springer-Verlag, 1987
- [3] Grace, A., Laub, A.J., Little, J.N., and Thompson, C.M., *Control System Toolbox: User's Guide*. The Mathworks Inc., 1992
- [4] Hannaford, B., and Anderson, R., "Experimental and simulation studies of hard contact in force reflecting teleoperation", *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 584-589, 1988
- [5] Kim, W.S., Hannaford, B., and Bejczy, A.K., "Force-reflection and shared compliance control in operating telemanipulators with time delay", in *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 8, no. 2, pp. 176-185, 1992
- [6] Leung, G.M.H., Francis, B.A. and Apkarian, J. "Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via μ -Synthesis," in *IEEE Trans. Robotics and Autom.* vol.11, no.1, pp.105-116, 1995
- [7] Patarinski, S.P. and Botev, R.G., "Robot force control : a review", in *Mechatronics*, vol.3, no.4, pp.377-398, 1993
- [8] Raju, G.J., Verghese, G.C. and Sheridan, T.B., "Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1316-1321