

시간 지연이 있는 양방향 원격제어 시스템의 예측 제어

Predictive Control of Bilateral Teleoperation with Short Time Delay

임 흥 재, 정 완 균, 서 일 흥
(Heung Jae Im, Wan Kyun Chung, and Il Hong Suh)

Abstract : In the teleoperation system, force and velocity signals are communicated between a master and a slave robot. The addition of force feedback to a teleoperation system benefits the operator by providing more information to perform given tasks especially for tasks requiring contact with environment. When the master and slave arms are located in different places, time delay is unavoidable and it is well known that the system can become unstable when even a small time delay exists in the communication channel. The control scheme proposed in this paper is based on the estimator with virtual master model. Delayed signal from the master robot can be replaced by the estimated signal with the virtual master model. This control scheme makes the teleoperation system stable for the given time delay while the conventional scheme is not. This new control scheme is verified through numerical simulations and an experiments using the dual axis testbed of the teleoperation system.

Keywords : teleoperation, time delay, disturbance observer, predictive control, force reflection

I. 서론

과학이 발달함에 따라 로봇의 이용이 보편화되었으나 로봇은 단순 작업밖에 할 수 없다고 인식이 되어왔고 사실 대부분의 응용이 그러한 범주를 크게 벗어나지 않았다. 그러나 최근 수 년 간의 눈부신 연구 업적들에 의해 로봇이 단순한 작업만을 반복할 수 있다는 고정 관념들이 깨지고 있다. 미약하지만 스스로 감지하고, 배우며 판단할 수 있는 알고리즘들이 제안되었고, 이를 바탕으로 인간의 조작 없이 스스로 간단한 경기를 할 수 있는 로봇이나 인간과 친근하게 함께 생활할 수 있는 애완 로봇, 나아가서는 인간과 비슷한 걸모습과 구조를 가진 인간형 로봇이 등장하고 있다. 이러한 비약적인 발전에도 불구하고 로봇이 인간을 대신할 수 없는 부분은 여전히 남아 있다. 작업 절차가 표준화되어 있지 않거나 돌발적인 상황이 발생할 가능성이 있는 작업의 경우에는 단순한 자동화나 완전하지 않은 로봇의 대처 능력으로는 한계가 있다. 우주 공간에서의 작업, 원자력 발전소의 유지와 보수, 심해저에서의 작업, 광산에서의 작업 등이 그러한 예이다. 이러한 작업들에 로봇을 투입하고 작업자는 원거리에서 위기 상황에 대비한다면 작업의 위험을 최소화함과 동시에, 뜻하지 않은 돌발 상황에도 능동적으로 대처할 수 있다는 장점이 있다. 원격제어 시스템(teleoperating system)은 이러한 작업을 가능하도록 한다. 원격지에 있는 인간의 동작을 작업 현장의 로봇이 추종하는 형태이므로 작업자의 의도를 로봇에게 적용할 수 있기 때문이다. 원격 제어 시스템의 개념이 그림 1에 나타나 있다.

원격 제어 시스템은 기본적으로 주로봇(master robot)

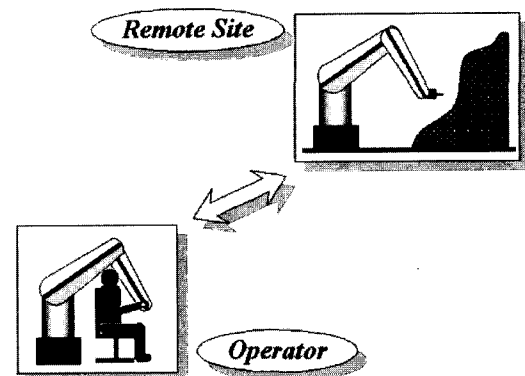


그림 1. 원격 제어 시스템의 개념.

Fig. 1. Concept of teleoperating system.

과 종로봇(slave robot)으로 구성된다. 주로봇은 작업자의 조작을 직접적으로 받으며 종로봇에 내려질 명령을 생성하고, 종로봇은 주로봇으로부터 전달된 명령을 추종한다. 종로봇이 주로봇의 명령에 추종함은 물론이고, 종로봇의 센서 신호가 주로봇의 조작에 영향을 미치는 경우, 이러한 시스템을 양방향 원격 제어 시스템이라고 한다. 양방향 원격 제어 시스템의 목적은 마치 작업 현장에 있는 듯한 투명성을 작업자에게 전달하는 데 있다. 이 때, 종로봇측으로부터 주로봇측으로 전달되는 정보에는 시각적인 정보, 위치 정보, 힘 정보 등이 포함되는데 이 중에서 힘의 정확한 반영은 주로봇을 조작하는 작업자에게 현장에서 직접 작업하는 듯한 느낌을 주기 위한 정보로서 원격 제어 시스템에 반드시 요구되는 기본 사항이 되어가고 있다. 그러나 힘반영을 함에 있어서 주로봇과 종로봇간의 통신 채널에 시간 지연이 존재하는 경우에 전체 시스템이 불안정해질 수 있다. 시간 지연이 존재하는 경우에 작업자가 작업 대

접수일자 : 1999. 3. 29., 수정완료 : 1999. 12. 6.

임흥재, 정완균 : 포항공과대학교 기계공학과

서일흥 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부

※ 본 논문은 정보통신부의 "정보통신우수시범학교지원사업"의 지원으로 연구하였습니다.

상의 강성을 정확히 느끼고, 작업 대상에게 작업자가 주는 힘을 정확히 전달하는 상태를 구현하는 것은 불가능하다. 즉 투명성과 안정성을 동시에 추구하는 데에는 한계가 있다[3]. 본 논문에서는 외란 관측기(disturbance observer)와 가상모델(virtual model)을 이용한 추정 기법을 도입함으로써 수십ms 이내의 짧은 시간 지연에 대하여 기존의 제어 기법보다 안정하게 힘반영을 할 수 있는 원격제어 알고리즘을 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 원격 제어에 대한 연구의 동기 및 목적이 기술되었고, 2장에서는 1-자유도 원격 제어 시스템의 모델링에 대하여 논의한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 추정 기법에 기초한 제어 알고리즘에 대하여 소개하며, 4장에서 기존의 제어 알고리즘과 제안된 알고리즘을 비교하는 모의 실험 결과에 대하여 기술한다. 포항공과 대학교 로봇 연구실에 있는 1-자유도 원격 제어 시스템에 대한 소개와 실험 결과가 5장에 기술되고, 6장에서 본 연구의 결론을 논하는 것으로 끝을 맺는다.

II. 1-자유도 원격 제어 시스템의 모델링

대부분의 원격제어 시스템은 다자유도를 갖는다. 그러나 해석의 편의를 위해 1-자유도 시스템에 대하여 모델링을 하도록 하겠다.

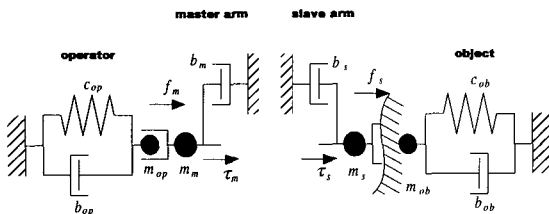


그림 2. 주로봇과 종로봇, 조작자와 작업대상.
Fig. 2. Master, slave, operator and object.

1. 원격 제어 시스템의 모델링

원격제어 시스템의 개략적인 모델이 그림 2에 나타나 있다. 이 시스템의 동역학적 특성은 아래와 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \tau_m + f_m &= m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m \\ \tau_s - f_s &= m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x_m 과 x_s 는 주로봇과 종로봇의 변위, m_m 과 m_s 는 주로봇과 종로봇의 질량, b_m 과 b_s 는 각각의 감쇠 계수(damping coefficient)를 나타낸다. f_m 은 조작자가 주로봇에 가하는 힘, f_s 는 종로봇이 작업대상에 가하는 힘(N)을 표현하며 τ_m 과 τ_s 는 각각 주로봇과 종로봇을 제어하기 위해 제어기로부터 가해지는 힘(N)이다. 전통적인 표현에서 τ 는 모터의 토크(Nm)를 표현하는 기호이지만 여기서는 1-자유도이므로 편의를 위해 힘으로 환산한 제어 입력으로

로 취급한다. 종로봇과 접촉하는 작업 대상의 동역학적 특성을 선형 시스템으로 간주하면 다음과 같이 모델링을 할 수 있다.

$$f_s = m_{ob} \ddot{x}_s + b_{ob} \dot{x}_s + c_{ob} x_s \quad (2)$$

m_{ob} , b_{ob} 와 c_{ob} 는 각각 작업 대상의 질량과 감쇠 계수, 그리고 스프링 상수를 나타낸다. 종로봇이 작업 대상과 접촉하여 작업을 할 때 서로 강체처럼 접촉하여 움직인다는 가정하에 작업대상의 변위와 종로봇의 변위를 같은 x_s 로 표현하였다.

작업자의 동역학적 특성은 다음과 같이 모델링한다.

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

m_{op} , b_{op} 와 c_{op} 는 각각 작업자의 질량과 감쇠 계수, 그리고 스프링 상수를 나타낸다. 원격제어 시스템에서 가장 모델링하기 곤란한 부분이 작업자의 동역학적 특성이다. 작업자를 정확히 모델링하려면 근육에서 발생하는 힘, 뼈와 근육사이의 감쇠 계수, 그밖에 생체 역학적으로 수없이 얽혀있는 많은 관계들이 모델링되어야 한다. 그러나 그것을 아는 것은 실제로 불가능하며 설사 안다고 하더라도 작업하는 동안 큰 범위 내에서 변화하는 것이 그 특징이다. 이러한 이유로 작업자는 시스템을 불안정하게 하는 동작을 하지 않는다는 등의 가정하에 해석을 진행하거나, 작업자의 동역학적 특성에 상관없이 원격 제어 시스템을 해석하려는 노력들이 행해졌다[2].

모델링하고자 하는 시스템에 대해서 다음과 같은 가정을 하겠다.

- 주로봇과 종로봇 측의 정보를 모두 알고 있다.
- 위치, 속도, 가속도, 힘 정보 등
- 주로봇과 종로봇은 같은 형태와 크기를 가진다.

첫번째 가정에서 문제는 가속도 신호를 쉽게 이용할 수 없다는 데 있다. 그러나 가속도를 이용하지 않고서는 힘반영을 제대로 할 수 없다고 알려져 있으므로 수치미분한 가속도 신호를 얻을 수 있다는 가정하에 모델링을 하도록 하겠다. 두번째 가정에서 만일 로봇이 크기가 다르거나 반영하고자 하는 힘의 스케일이 다르다면 적절한 비례인자(scale factor)를 도입하여 모델링에 적용할 수 있다[1]. 위와 같은 가정하에 원격 제어 시스템의 제어 입력은 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_m &= \begin{bmatrix} k_{mm1} + k_{mn2} \frac{d}{dt} + k_{mm3} \frac{d^2}{dt^2} & k_{mms4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} k_{ms1} + k_{ms2} \frac{d}{dt} + k_{ms3} \frac{d^2}{dt^2} & k_{mst4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \\ \tau_s &= \begin{bmatrix} k_{sm1} + k_{sm2} \frac{d}{dt} + k_{sm3} \frac{d^2}{dt^2} & k_{smt4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} k_{ss1} + k_{ss2} \frac{d}{dt} + k_{ss3} \frac{d^2}{dt^2} & k_{sst4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 k_{mm1} , k_{mn2} , k_{mm3} 와 k_{mms4} 는 각각 주로봇으로 피드백되는 주로봇의 위치, 속도, 가속도, 힘의 게인이고,

$k_{ms1}, k_{ms2}, k_{ms3}, k_{ms4}$ 는 주로봇으로 피드백되는 종로봇의 위치, 속도, 가속도, 힘의 게인이다. 이상의 여덟가지 게인에 의해서 주로봇에 인가되는 제어 입력 τ_m 이 결정된다. 마찬가지로 종로봇에 인가되는 제어입력 τ_s 는 $k_{sm1}, k_{sm2}, k_{sm3}, k_{sm4}, k_{ss1}, k_{ss2}, k_{ss3}, k_{ss4}$ 에 의해서 결정된다. (4)는 일반적인 형태로 표현되었기 때문에 위치 서보(position servo), 힘반영 서보(force reflection servo)와 같은 기존의 제어 기법들은 모두 이러한 제어 기법의 특수한 경우라고 볼 수 있다.

시간 영역에서 표현된 (1)과 (4)를 s -영역으로 변환시키면

$$T_m + F_m = (m_m s + b_m) V_m \equiv Z_m V_m \tag{5}$$

$$T_s - F_s = (m_s s + b_s) V_s \equiv Z_s V_s$$

$$T_m \equiv [A_m \quad B_m] \begin{bmatrix} V_m \\ F_m \end{bmatrix} - [C_m \quad D_m] \begin{bmatrix} V_s \\ F_s \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$T_s \equiv [A_s \quad B_s] \begin{bmatrix} V_m \\ F_m \end{bmatrix} - [C_s \quad D_s] \begin{bmatrix} V_s \\ F_s \end{bmatrix}$$

이고, 여기에서 $A_m, B_m, C_m, D_m, A_s, B_s, C_s$ 와 D_s 는 주로봇과 종로봇의 속도와 힘에 대한 피드백 게인으로 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{1}{s} k_{mm1} + k_{mn2} + s k_{mn3}, & B_m &= k_{mm4}, \\ C_m &= \frac{1}{s} k_{ms1} + k_{ms2} + s k_{ms3}, & D_m &= k_{ms4}, \\ A_s &= \frac{1}{s} k_{sm1} + k_{sm2} + s k_{sm3}, & B_s &= k_{sm4}, \\ C_s &= \frac{1}{s} k_{ss1} + k_{ss2} + s k_{ss3}, & D_s &= k_{ss4} \end{aligned} \tag{7}$$

마찬가지로 (2)와 (3)을 s -영역으로 변환시키면

$$\begin{aligned} Z_{ob} &= m_{ob} s + b_{ob} + c_{ob} \frac{1}{s} \\ Z_{op} &= m_{op} s + b_{op} + c_{op} \frac{1}{s} \end{aligned} \tag{8}$$

이고, 여기서 $F_s = Z_{ob} V_s$ 의 관계가 성립한다.

2. 시간 지연이 있는 원격 제어 시스템의 모델링

데이터를 송수신 하는 동안 시간 지연이 존재하는 경우에 주로봇측에서는 종로봇측의 정보를 즉시 이용할 수 없으며, 마찬가지로 종로봇측에서도 주로봇측의 정보를 시간 지연이 지난 다음에야 이용할 수 있게 된다. 따라서 시간 지연이 존재하는 경우에는 이전 절에서 논의한 내용에 시간 지연의 효과를 반영하여야 한다. 한쪽 방향으로의 시간 지연이 T 라고 할 때, (4)와 (6)은

$$\begin{aligned} \tau_m &= \left[k_{mm1} + k_{mn2} \frac{d}{dt} + k_{mn3} \frac{d^2}{dt^2} \quad k_{mm4} \right] \begin{bmatrix} x_m(t) \\ f_m(t) \end{bmatrix} \\ &\quad - \left[k_{ms1} + k_{ms2} \frac{d}{dt} + k_{ms3} \frac{d^2}{dt^2} \quad k_{ms4} \right] \begin{bmatrix} x_s(t-T) \\ f_s(t-T) \end{bmatrix} \\ \tau_s &= \left[k_{sm1} + k_{sm2} \frac{d}{dt} + k_{sm3} \frac{d^2}{dt^2} \quad k_{sm4} \right] \begin{bmatrix} x_m(t-T) \\ f_m(t-T) \end{bmatrix} \\ &\quad - \left[k_{ss1} + k_{ss2} \frac{d}{dt} + k_{ss3} \frac{d^2}{dt^2} \quad k_{ss4} \right] \begin{bmatrix} x_s(t) \\ f_s(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_m &\equiv [A_m \quad B_m] \begin{bmatrix} V_m \\ F_m \end{bmatrix} - [C_m \quad D_m] \begin{bmatrix} V_s e^{-sT} \\ F_s e^{-sT} \end{bmatrix} \\ T_s &\equiv [A_s \quad B_s] \begin{bmatrix} V_m e^{-sT} \\ F_m e^{-sT} \end{bmatrix} - [C_s \quad D_s] \begin{bmatrix} V_s \\ F_s \end{bmatrix} \end{aligned}$$

으로 바꿀 수 있다.

이러한 일반적인 형태로 표현할 수 있는 많은 형태의 제어기들이 어느 정도 이상의 시간 지연에 대하여 불안정한 것은 이미 잘 알려져 있는 사실이다.

III. 원격 제어 시스템의 예측 제어

이 장에서는 시간 지연에 대하여 안정한 원격 제어 알고리즘을 제안하고자 한다. 기존의 제어기들은 제어기를 하나의 식으로 표현하고자 하는 것에 비하여 본 논문에서는 좀더 물리적인 현실성에 근거한 제어기를 설계할 것이다.

시간 지연에 대한 근본적인 해결 방안은 미래를 예측할 수 있을 때에만 가능하다. 본 논문에서 제안하는 제어 알고리즘은 종로봇측에서 가상 모델(virtual model)을 통해 주로봇의 힘과 위치를 추정함으로써 시간 지연을 해결하고자 하는 것이다. 지금까지의 연구 결과들은 주로봇측에서 종로봇측의 상황을 예측하는 것이 대부분이었다. 그러나 조작자가 직접 조작을 하고 있는 주로봇보다는 상당히 높은 강성을 지닌 작업 대상과 접촉함으로써 쉽게 불안정해질 수도 있는 종로봇측에서 주로봇의 상황을 예측하는 것이 합리적이라는 생각에서 이러한 제어기를 설계했다. 주로봇측에 외란 관측기(disturbance observer)를 적용함으로써 종로봇측에서 사용하는 가상 모델이 실제 주로봇을 잘 추종하도록 하였다.

1. 외란관측기

제어하고자 하는 시스템이 주어졌을 때 그 시스템의 모델링을 아무리 정확하게 한다고 하더라도 실제 시스템이 모델링된 공칭 모델(nominal model)과 같을 수는 없다. Ohnishi에 의하여 처음 제안된 외란 관측기는 실제 모델의 출력(output)과 공칭 모델의 출력의 차이를 가상적인 외란(disturbance)으로 간주하고 그 외란을 상쇄시킬 수 있는 부가적인 제어 입력을 이용하여 실제 시스템을 외란 관측기에 설계한 시스템의 공칭 모델(nominal model)처럼 동작하게 하는 특징을 가지고 있다. 이러한 외란관측기의 특성은 최근 강인 제어 및 외란 제거 제어의 여러 분야에 널리 적용되고 있다[8]. 실제 시스템을 공칭 모델처럼 동작하게 함으로써 모델링 오차와 매개 변수의 변화, 그리고 외란을 함께 제거 할 수 있다. 외란 관측기의 구조가 그림 3에 나타나 있다.

여기서 P 는 실제 시스템이며, P_n 은 실제 시스템의 공칭 모델이다. d 는 토크 외란, ξ 는 측정잡음이고, δ 가 관측된 외란이다. u, ϵ, y 는 각각 제어 입력, 외란이 보상된 제어 입력, 출력을 나타낸다. 그리고, Q 는 P_n^{-1} 의 구현이 물리적으로 불가능한 것을 해결하기 위한 저주파수 통과 필터이다. 따라서 Q 필터는 QP_n^{-1} 의 분모 차수가 분자 차수보다 같거나 크도록 선택되어야 한다.

그림 3으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

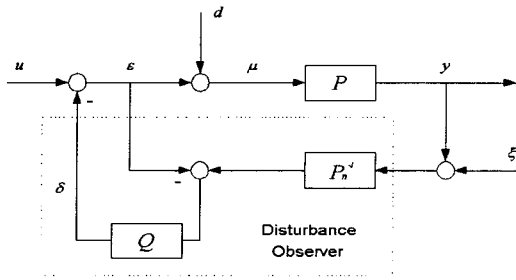


그림 3. 외란 관측기의 개념도.
Fig. 3. Disturbance observer.

$$y = G_{wy}(s)u + G_{dy}(s)d + G_{\xi y}(s)\xi \quad (9)$$

여기에서 G_{wy} , G_{dy} , $G_{\xi y}$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{wy} &= \frac{P P_n}{P_n + (P - P_n)Q} \\ G_{dy} &= \frac{P P_n(1 - Q)}{P_n + (P - P_n)Q} \\ G_{\xi y} &= -\frac{PQ}{P_n + (P - P_n)Q} \end{aligned} \quad (10)$$

표 1. 가상 모델의 구조.

Table 1. Structure of virtual model.

	Input	Initial Value	Output
Step 1	$f_m(t-n\Delta T) + r_m(t-n\Delta T)$	$\hat{x}_m(t-n\Delta T)$ $\hat{\dot{x}}_m(t-n\Delta T)$	$\hat{x}_m(t-(n-1)\Delta T)$ $\hat{\dot{x}}_m(t-(n-1)\Delta T)$
Step 2	$\hat{f}_m(t-(n-1)\Delta T) + r_m(t-(n-1)\Delta T)$	$\hat{x}_m(t-(n-1)\Delta T)$ $\hat{\dot{x}}_m(t-(n-1)\Delta T)$	$\hat{x}_m(t-(n-2)\Delta T)$ $\hat{\dot{x}}_m(t-(n-2)\Delta T)$
Step 3	$\hat{f}_m(t-(n-2)\Delta T) + r_m(t-(n-2)\Delta T)$	$\hat{x}_m(t-(n-2)\Delta T)$ $\hat{\dot{x}}_m(t-(n-2)\Delta T)$	$\hat{x}_m(t-(n-3)\Delta T)$ $\hat{\dot{x}}_m(t-(n-3)\Delta T)$
⋮	⋮	⋮	⋮
Step (n-1)	$\hat{f}_m(t-\Delta T) + r_m(t-\Delta T)$	$\hat{x}_m(t-\Delta T)$ $\hat{\dot{x}}_m(t-\Delta T)$	$\hat{x}_m(t)$ $\hat{\dot{x}}_m(t)$

외란 관측기의 설계는 강인성(robustness)과 외란 제거(disturbance suppression) 성능을 결정하는데 가장 중요한 매개변수(parameter)중 하나인 $Q(s)$ 에 달려있다고 볼 수 있다. 만일 이상적인 경우에 $Q(s) \approx 1$ 이라면 아래의 (11)처럼 근사될 수 있다.

$$G_{wy} \approx P_n, \quad G_{dy} \approx 0, \quad G_{\xi y} \approx -1 \quad (11)$$

앞에서 언급한 바와 같이 Q 필터는 저주파수 통과 필터를 사용하므로 $Q(s) \approx 1$ 는 입력 신호가 저주파수 대역임을 의미한다. 이러한 경우에 (11)은 외란 관측기가 외란을 제거하고, 실제 시스템과 공칭 모델과의 차이를 상쇄시킴을 보여준다.

2. 예측 제어 기법

본 논문에서 제안하는 예측 제어 알고리즘의 특징은 다

음과 같이 요약된다.

- 종로봇측에서 주로봇측의 상황을 추정한다.
 - 기존에는 종로봇을 예측하는 것이 대부분이다.
 - 주로봇측에는 외란 관측기를 이용한다.
 - 주로봇이 공칭 모델과 동일한 동역학적 특성을 보이도록 제어한다.
 - 종로봇측에서는 가상모델을 이용한다.
 - 주로봇의 공칭 모델과 입력들로 이루어진 가상 모델을 이용해서 주로봇의 상태를 추정하고, 그 추정된 주로봇의 신호를 이용하여 제어 입력을 계산해낸다.
 - 주로봇의 입력을 종로봇측에서 계산한다.
 - 종로봇 측에서 예측할 수 없는 신호는 주로봇에서 이용하지 않는다.

주로봇과 종로봇 사이의 통신 시간 지연 T 가 존재할 때 예측 기법을 간단히 설명하겠다. 우선 주로봇은 외란 관측기를 이용하여 공칭 모델과 동일한 동역학적 특성을 갖도록 제어한다. 한편, 종로봇측에서는 외란 관측기에 사용한 것과 같은 공칭 모델을 이용한 가상 모델로부터 주로봇의 현재의 정보를 예측한다. 다시 말하면 종로봇측에 존재하는 가상 모델은 현재 받은 T 시간 이전의 주로봇에 대한 정보로부터 현재 시간의 주로봇의 정보를 예측하는 것이다.

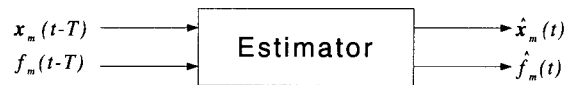


그림 4. 가상 모델의 개념.

Fig. 4. Concept of virtual model.

3. 가상모델의 구성

가상 모델은 일종의 추정기(estimator)로서 현재 종로봇측에 전달되는 T 시간 이전의 주로봇측의 정보 $x_m(t-T)$, $f_m(t-T)$ 로부터 현재의 주로봇측의 정보 $\hat{x}_m(t)$, $\hat{f}_m(t)$ 를 예측하는 것이다. 이 가상 모델의 역할이 그림 4에, 그 구조는 표 1에 나타나 있다. 가상 모델에서 현재의 주로봇의 위치와 힘 정보를 예측하는 순서는 다음과 같다. 여기서 n 과 ΔT 는 $T = n\Delta T$ 를 만족하는 값으로써 ΔT 는 가상 모델을 수치 적분하는 시간 간격이다.

• 과거의 주로봇의 힘 정보들 $f_m(t-n\Delta T)$, ..., $f_m(t-5n\Delta T)$ 을 extrapolation하여 현재까지의 주로봇이 받을 힘 $\hat{f}_m(t-(n-1)\Delta T)$, ..., $\hat{f}_m(t)$ 를 추정한다. 즉, 시스템의 시간 지연보다 4배의 이전 정보로부터 extrapolation한다.

• 제어 입력 $r_m(t-n\Delta T)$, ..., $r_m(t-\Delta T)$ 와 추정된 $\hat{f}_m(t-n\Delta T)$, ..., $\hat{f}_m(t-\Delta T)$ 를 가상모델에 인가하여 현재의 위치 $\hat{x}_m(t)$ 와 속도 $\hat{\dot{x}}_m(t)$ 을 추정한다.

이러한 가상 모델이 주로봇측의 상태를 정확하게 추정하기 위하여 전체 시스템에 대하여 다음과 같은 두가지 과정을 한다.

- 외란 관측기를 적용한 주로봇은 공칭모델과 같이 동

작한다.

- 조작자가 내는 힘은 주파수가 비교적 작고 가장 예측하기가 쉽다.

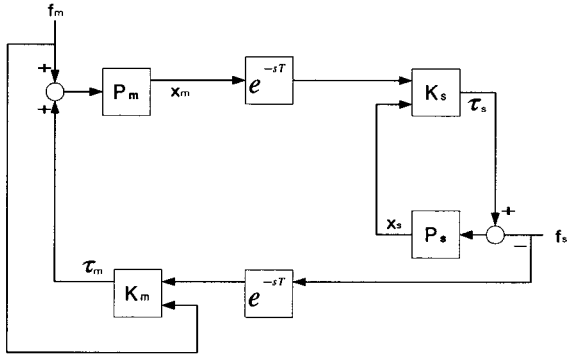


그림 5. 기존의 제어 방법.
Fig. 5. Conventional control scheme.

첫번째 가정은 이미 앞에서 언급한 바가 있으므로 부연 설명을 하지 않겠다. 두번째 가정은 그 물리적인 의미와 조작자(사람)의 움직임을 고려하면 충분히 가능한 가정이다. 조작자는 종로봇이 자유 운동을 할 때는 물론이고, 갑자기 작업 대상에 충돌을 하거나 접촉을 유지하는 동안에도 수 ms정도의 빠른 반응은 보일 수 없고, 부드러운 신호를 낼 수 밖에 없다. 이러한 가정하에 조작자의 힘 $\hat{f}_m(t)$ 는 이전의 힘 정보들 $f_m(t-T), \dots, f_m(t-5T)$ 로 extrapolation하여 구한다면 상당히 실제 값에 근사하리라는 것이다.

이러한 제어 알고리즘을 구현하는데 있어서 반드시 따라야 할 전제는 다음과 같다.

- 종로봇측에서 예측할 수 없는 신호는 주로봇에서 이용하지 않는다.
- 주로봇의 입력보다는 종로봇에 주어지는 신호의 시간지연으로 인한 영향을 줄이는데 중점을 둔다.

주로봇의 움직임은 주로봇에 입력으로 주어지는 신호들, 즉 f_m 과 τ_m 에 의하여 결정된다. 이러한 사실은 종로봇에서 주로봇의 상황을 예측하는 가상 모델에 f_m 과 τ_m 이 필요하다는 것을 의미한다. 그런데 만일 주로봇의 입력에 종로봇측에서 모르는 f_m 과 τ_m 을 인가한다면 같은 입력을 가상 모델에 인가할 수가 없게 되므로 그러한 상황이 발생하지 않도록 하겠다는 의미이다. 이러한 전제가 실제로 어떻게 적용되어야 하는지 살펴보겠다. 기존의 제어 기법이 그림 5에 나타나 있다. 이 흐름도는 기존의 Force reflecting type으로 주로봇측에서는 주로봇으로 인가되는 제어 입력 $\tau_m(f_m(t), f_s(t-T))$ 만을 계산하고, 종로봇측에서는 종로봇으로 인가되는 제어 입력 $\tau_s(x_m(t-T), x_s(t))$ 만을 계산한다. 따라서 이러한 형태의 제어기를 사용하면 현재에 종로봇측에서 가상 모델에 인가할 주로봇측의 제어 입력 $\tau_m(t-n\Delta T), \dots, \tau_m(t-\Delta T)$ 를 알지 못하고 이 제어 입력마저 추정해야하는 문제점이 생기게 된다.

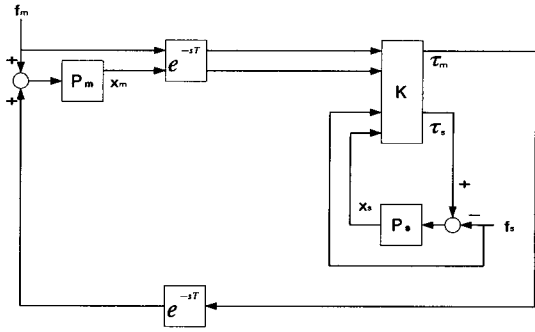


그림 6. 새로운 제어 방법.
Fig. 6. Proposed control scheme.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 제안된 새로운 제어 방법의 흐름도가 그림 6에 나타나 있다. 이 흐름도에 의하면 종로봇측에서 주로봇의 제어 입력을 계산해서 보내고 있다. 이런 방식으로 제어를 하면 종로봇측에서 주로봇에 주어진 제어 입력의 모든 값을 알게 되므로 가상 모델에 적용하기가 수월해진다. 다시 말하면 τ_m 을 추정해야 하는 번거로움과 그 오차로 인한 영향을 줄일 수 있게 된다. 이렇게 제어기를 구성할 경우 주로봇측으로부터 종로봇측으로의 시간 지연은 고려가 되나 그 반대의 경우는 아무런 고려를 할 수 없게 되는 문제점이 있지만 한쪽 방향의 시간 지연만이라도 보상한다는 목표로 제어기를 설계했다. 이러한 개념을 모두 반영한 원격 제어 시스템의 전체 흐름도가 그림 7이다.

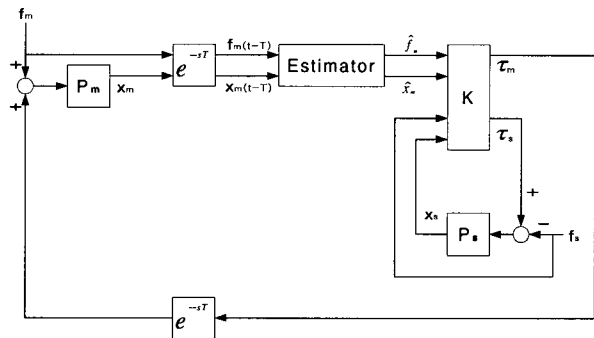


그림 7. 제안된 제어기의 전체 구성.
Fig. 7. Overall structure of proposed controller.

IV. 모의 실험

이 장에서는 2장과 3장에 논의된 내용에 대해 모의 실험한 결과를 살펴보도록 하겠다. 이 장에 제시되는 모든 그래프의 단위는 x축은 시간(s), y축은 위치일 경우는 m, 힘일 경우는 N이다. 주로봇과 종로봇을 함께 나타낸 그래프에서 굵은 실선은 주로봇의 위치와 힘을 표시하고, 가는 실선은 종로봇의 위치와 힘을 나타낸다. 모의 실험에 사용한 제어 알고리즘은 다음과 같은 두 가지이다. 결과는 이 두 가지 제어 알고리즘 중에서 한가지씩만 보이도록 하겠다.

• Conventional Force Reflecting Type (CFR-Type)

$$\begin{aligned} \tau_m(t) &= -f_s(t) - K_f\{f_s(t) - f_m(t)\} \\ \tau_s(t) &= K_v\{\dot{x}_m(t) - \dot{x}_s(t)\} + K_p\{x_m(t) - x_s(t)\} \end{aligned} \quad (13)$$

• Intervening Impedance Type (II-Type)

두번째 알고리즘은 Yokokohji[2]에 의해 제안된 방법으로 원격 제어 시스템을 안정하게 하는 특성을 지니고 있다. 모의 실험은 기본적인 두가지 작업에 대하여 실시하였다.

- 모의 실험 1
 - 주로봇에 사인파의 힘을 가했을 때의 자유 운동
- 모의 실험 2
 - 주로봇에 사인파의 힘을 가했을 때의 접촉 운동

자유 운동은 작업 대상이 없이 주로봇과 종로봇 모두 빈 공간에서 움직이는 운동을 말하고, 접촉 운동은 종로봇으로부터 0.1m의 거리에 비교적 강성이 작은 벽이 있을 때 그 벽에 충돌하고 힘을 변화시키며 접촉을 유지시키는 운

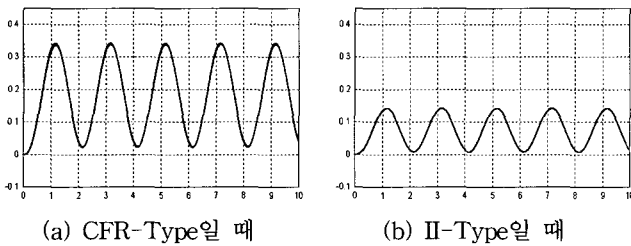


그림 8. T=0 : 자유 운동-주로봇과 종로봇의 위치.
Fig. 8. T=0 : Free motion-Position of master and slave.

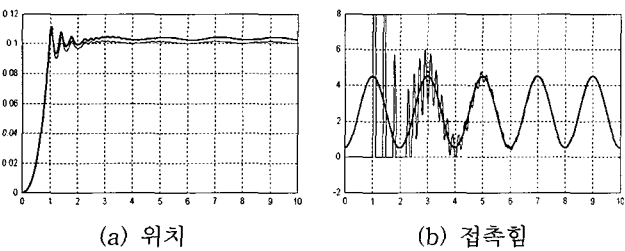


그림 9. T=0 : 접촉 운동 : CFR-Type일 때.
Fig. 9. T=0 : Constraint motion : CFR-Type.

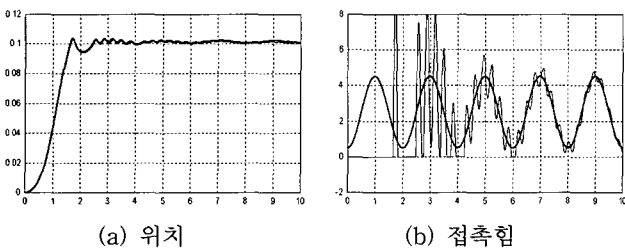


그림 10. T=7ms : 접촉 운동 : II-Type일 때.
Fig. 10. T=7ms : Constraint motion : II-Type.

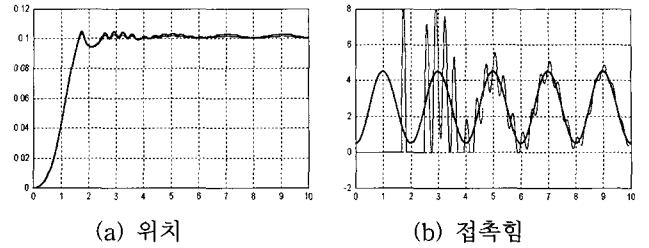


그림 11. T=30ms : 접촉 운동 : 제안된 제어기.
Fig. 11. T=30ms : Constraint motion : proposed scheme.

동을 말한다.

1. 시간 지연이 없는 경우 기존의 제어 알고리즘

그림 8은 두가지 제어 알고리즘을 이용하여 자유 운동시켰을 때 위치를 각각 보여주고 있다. 주로봇의 위치와 종로봇의 위치가 거의 일치하여 하나의 그래프처럼 보인다. 시간 지연도 없고, 접촉도 하지 않는 상황이므로 안정한 상태로 종로봇이 주로봇의 위치를 잘 추종함을 볼 수 있다. 다만 Intervening Impedance를 이용할 경우에 움직임이 느리고 대신에 오차가 적어진다. 그림 9는 두가지 제어 알고리즘중 CFR-Type을 적용하여 접촉 운동을 행한 것이다. 충돌을 해서 정상 상태(steady state)에 도달하기까지의 과정은 다른 연구 분야이므로 여기서는 정상 상태에서의 결과만 살펴보기로 한다. 이 그래프 역시 시간 지연이 없을 경우에는 안정함을 나타낸다. 본 논문에 보이지는 않았으나 Intervening Impedance를 이용할 경우에 움직임이 느리고 주로봇과 종로봇간의 오차는 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이 모의 실험에서 알 수 있듯이 시간 지연이 존재하지 않는다면 그 오차의 차이는 있지만 전체적인 원격 제어 시스템은 안정하게 유지된다.

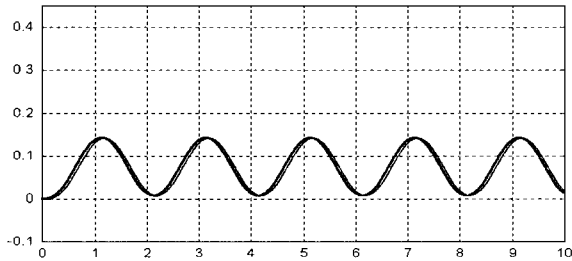
2. 시간 지연이 있는 경우 기존의 알고리즘

다음으로 실시한 모의 실험은 시간 지연이 존재할 때, 두가지 기존의 제어 알고리즘의 안정성이 어떻게 변화하는가에 대한 것이다. 그림 10은 시간 지연이 7ms일 때 II-Type의 접촉 운동 결과이다. 시간 지연이 7ms보다 작을 때까지는 안정한 성질을 보이지만, 7ms가 되면서부터 힘을 제대로 반영하지 못하고 상당히 불안정한 경향을 보인다. 참고로 같은 모의 실험에 대하여 CFR-Type은 2ms의 시간 지연에도 매우 불안정하게 된다.

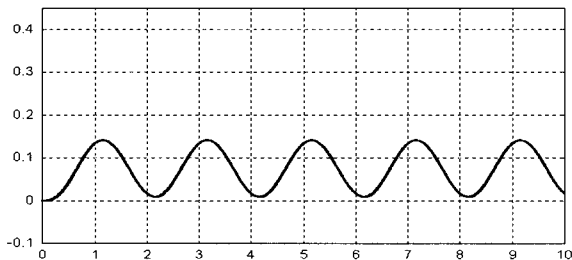
3. 추정 기법을 적용한 제어 알고리즘

그러면 이제 추정 기법을 접촉 운동에 적용한 모의 실험을 살펴볼 것이다. 그림 11은 II-Type의 알고리즘에 가상 모델을 이용한 추정 기법을 추가로 적용한 형태이다. 그림 10과 비교할 때 기존의 II-Type보다 4배 정도 긴 30ms의 시간 지연에 이르러야 불안정한 경향을 보인다. 가상 모델을 이용한 추정 기법이 어떤 효과를 보이는지 확인하게 하기 위하여 시간 지연을 50ms로 크게 주고 자유 운동을 해보았다. 그림 12의 (a)에 나타난 것처럼 기존의 제어 알고리즘(II-Type)은 당연히 종로봇이 주로봇의 50ms이전의

위치만을 추종한다. 그러나 II-Type에 추정 기법을 도입하면 종로봇은 현재 들어온 정보로부터 주로봇의 위치를 추정하고 그 추정된 위치를 추종하기 때문에 그림 12의 (b)와 같이 시간 지연으로 인한 효과를 거의 상쇄시키고 있다.



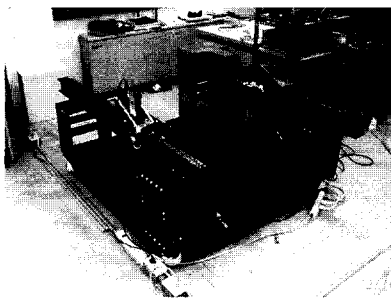
(a) 기존의 II-Type



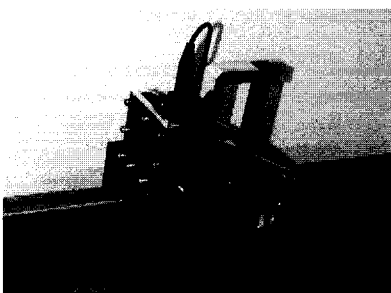
(b) II-Type에 추정 기법을 도입한 제어기

그림 12. 시간 지연이 50ms일 때 기존의 제어기와의 비교

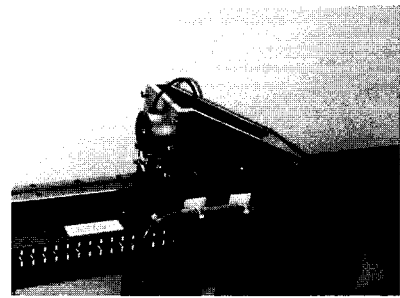
Fig. 12. Comparison with conventional scheme : $T=50ms$



(a) 전체 시스템



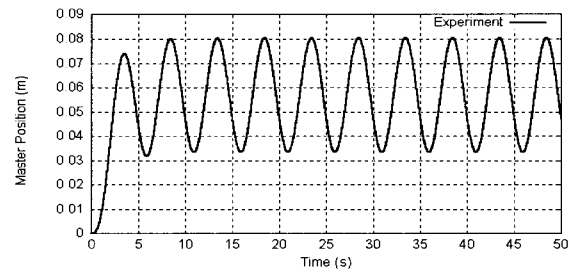
(b) 주로봇



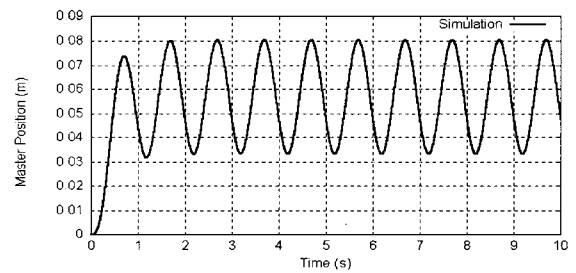
(c) 종로봇

그림 13. 포항공대 1-자유도 원격 제어 시스템.

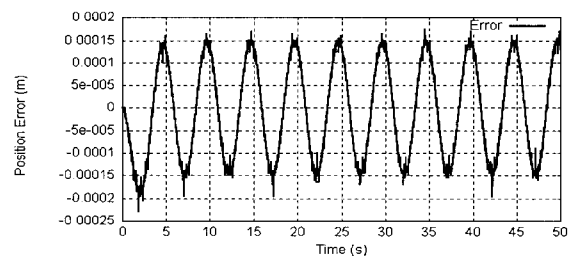
Fig. 13. POSTECH 1-DOF teleoperating system.



(a) 실제 시스템의 위치



(b) 가상 모델의 위치



(c) 실제 시스템과 가상 모델의 위치 오차

그림 14. 공칭 모델과 실제 모델에 똑같은 힘을 가했을 때.

Fig. 14. Responses of nominal model and real system.

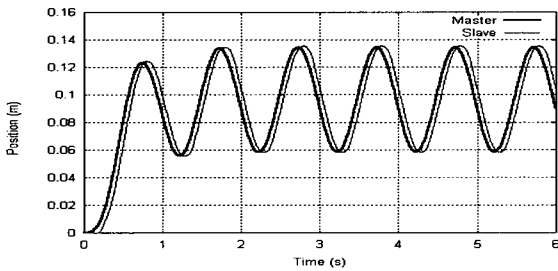
이상의 모의 실험 결과로부터 본 논문에서 제안한 추정 기법을 이용하면 기존의 제어 알고리즘으로 안정하게 제어될 수 있는 시간 지연의 한계가 2배 내지 4배로 늘어남

을 알 수 있다. 따라서 시간 지연이 존재할 때 본 논문에서 제안한 추정 기법을 이용하면 훨씬 안정한 원격 제어 시스템을 구현할 수 있고, 기존보다 먼 원격지에 있는 종로봇을 안정하게 제어할 수도 있다. 이 장에서 모의 실험으로 보인 결과들은 다음 장에서 실험 결과로 증명할 것이다.

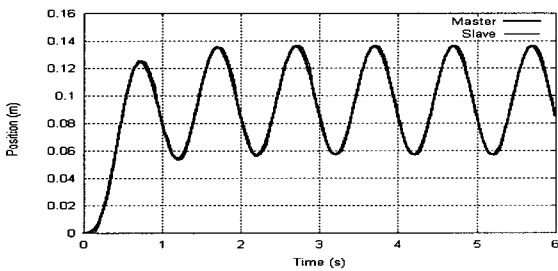
V. 실험 결과

포항공대 1-자유도 원격 제어 시스템은 동일한 두개의 고정밀도 선형 모터로 구성되어 있다. 하나의 선형 모터는 주로봇으로 사람이 조작을 할 수 있으며, 나머지 하나의 선형 모터는 종로봇으로 주로봇의 움직임을 추종하며 작업 대상과 접촉하여 그 힘을 주로봇에 반영한다. 주로봇과 종로봇은 모두 선형 모터에 결합된 테이블 위에 설치된 형태로 되어 있다. 전체 시스템 및 주로봇과 종로봇의 외관이 그림 13에 나타나 있다. 제안된 알고리즘이 타당함을 보이기 위하여 다음과 같은 순서로 실험을 했다.

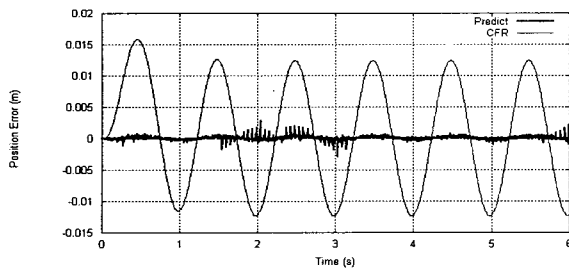
- 가상 모델의 타당성 검증
- 사람이 조작하며 작업 대상과 접촉하는 실험



(a) 기존 제어기의 위치



(b) 예측 제어의 위치



(c) CFR-Type의 $\{x_m(t) - x_m(t - T)\}$ 와 예측 제어를 했을 때의 $\{x_m(t) - \hat{x}_m(t)\}$

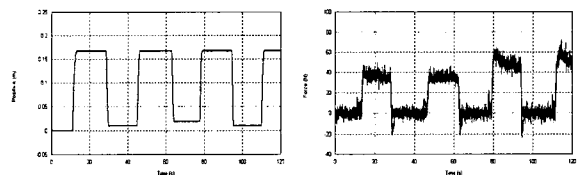
그림 15. 기존의 CFR-Type과 예측 제어의 비교.
Fig 15. Comparison with CFR-Type.

- 시간 지연 영향을 비교할 수 있는 정량화된 실험
1. 가상 모델의 타당성 검증

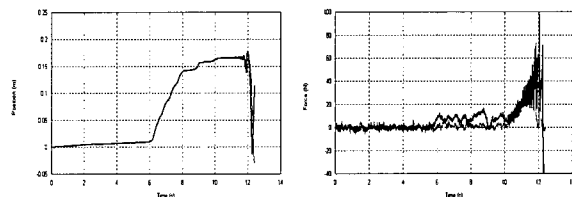
가상 모델을 이용한 추정 방법이 타당하려면 외란 관측기를 적용한 주로봇이 공칭 모델과 똑같은 동역학적 특성을 보여야 한다. 똑같은 특성을 보이지 않는다면 가상 모델을 거쳐 나온 $\hat{x}_m(t)$ 와 $\hat{f}_m(t)$ 이 현재 주로봇의 $x_m(t)$, $f_m(t)$ 와 차이가 많이 생기게 되고, 그렇게 되면 가상 모델을 이용한 추정 방법은 이용할 수 없게 된다. 그림 14는 똑같은 제어 입력을 주었을 때 외란 관측기를 적용한 실제 시스템의 위치와 공칭 모델을 이용한 가상 모델의 위치를 비교하고 있다. 결과에서 오차가 매우 작음을 볼 수 있고, 이는 가상 모델을 이용할 수 있는 근거가 된다. 그림 15는 시간 지연이 50ms일 때, CFR-Type의 제어기와 제안된 제어기로 각각 자유 운동을 한 것이다. (a)에서 보듯이 기존의 제어기는 시간 지연으로 인하여 당연히 종로봇이 주로봇보다 50ms 늦게 움직인다. 그러나 예측 제어를 하면 시간 지연의 효과를 상당 부분 보상하는 결과를 보인다.(b). 추정을 통한 오차 $\{x_m(t) - \hat{x}_m(t)\}$ 가 통신 채널간 시간 지연으로 인한 오차 $x_m(t) - x_m(t - T)$ 보다 훨씬 작으므로 이는 제안된 제어기가 기존의 제어기보다 유리한 증거가 된다.(c).

2. 작업 대상과 접촉하는 실험

조작자가 주로봇을 움직이면 종로봇은 작업 대상에 접촉하여 움직임에 제약을 받게 되고 그 접촉 힘을 주로봇을 움직이고 있는 조작자에게 반영하는 실험을 행하였다. 시간 지연이 없을 때부터 시작하여 점점 시간 지연을 늘리고, 어느 정도의 시간 지연에서 불안정해지는가 살펴보았다. 그림 16과 17은 주로봇과 종로봇의 위치와 힘 신호를 함께 그린 결과들이다. 두 신호를 구분할 수 없을 정도로 거의 일치하나 안정할 경우에는 서로 잘 추종하고 불안정할 경우에는 함께 발산하는 것을 알 수 있다. 그림 16의 (a)와 (b)는 시간 지연이 없을 경우에 기존의 Intervening



(a) T=0 : 위치 (b) T=0 : 접촉힘



(c) T=4ms : 위치 (d) T=4ms : 접촉힘

그림 16. 기존 제어 알고리즘의 힘 반영 원격 제어.
Fig. 16. Force reflecting teleoperation : II-Type.

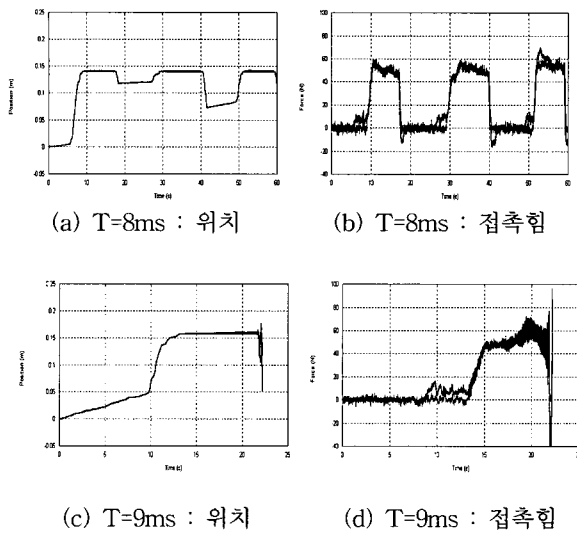


그림 17. 제안된 알고리즘의 힘 반영 원격 제어.
 Fig. 17. Force reflecting teleoperation : proposed scheme.

Impedance type의 제어 알고리즘으로 실험한 것이다. 위치는 거의 일치함을 보이고 양방향의 힘도 비교적 잘 반영되며 전체적으로 50N 이상의 강한 힘에도 안정하게 유지됨을 알 수 있다. 시간 지연이 2ms 이상 되면 시스템이 조금씩 진동하기 시작하고, 종로봇이 작업 대상과 접촉을 한 상태에서 주로봇에 힘을 더 가하면 진동 현상이 더욱 심해진다. 이 경우 조작자의 힘이 그 떨림을 상당 부분 감쇠시키는 역할을 할 수 있으며, 그로 인해 전체 시스템은 안정하게 유지될 수 있었다. 그러나 시간 지연이 4ms가 되면 주로봇과 종로봇이 모두 심하게 진동을 하면서 시스템 전체가 불안정하게 된다. 그 실험 결과가 그림 16의 (c)와 (d)에 나타나 있다. 이 경우에 극도로 천천히 움직이는 실험에는 진동을 하는 가운데서도 위치를 추종할 수 있지만 속도를 높이거나 힘반영을 하는 작업을 하면 그 즉시 불안정한 특성을 보인다.

이에 비해 제안된 추정 제어 알고리즘은 4ms 이상의 시간 지연에 대해서도 안정한 특성을 보이고 있다. 그 결과가 그림 17에 나타나 있다. 제안된 알고리즘을 적용하면 시간 지연이 9ms일 때부터 불안정해지는데 이는 기존의 알고리즘보다 2배 이상의 시간 지연에 안정함을 증명한다.

3. 시간 지연의 영향을 비교할 수 있는 정량화된 실험
 앞 절에서 제시한 실험 결과들은 시간 지연에 대한 경향을 분석할 수는 있으나, 그 안정성을 정량적으로 비교하기에는 적당하지 못하며, 그 이유는 다음과 같다.

첫째로, 이미 알려진 바와 같이 접촉 힘이 크면 클수록 시스템은 빨리 불안정해지게 된다. 조작자인 사람이 얼마나 힘을 주는가에 따라서 같은 시간 지연을 가진 시스템이 안정할 수도 불안정할 수도 있다. 앞 절의 실험에서 되도록 힘을 일정하게 주려고 했으나 그래프들에서 보듯이 사람의 능력으로는 불가능하다. 둘째로 강성이 강한 보통의 작업 대상과는 달리 사람의 신체는 감쇠 계수가 아주 큰

시스템으로 취급할 수 있다. 따라서 흔들리면서 발생할 가능성이 많은 시스템의 경우 사람이 힘을 가해 흔들림을 막아주면 어느 정도까지는 불안정해지는 경향을 완화시켜줄 수 있다. 마지막으로, 종로봇이 작업 대상과 접촉(impact)하는 순간에 힘센서로부터 들어오는 신호는, 그 값의 정확도를 신뢰할 수 없을 정도로 임펄스(impulse)에 가까운 형태를 가진다. 이 신호의 크기 변화에 따라서 시스템의 안정성이 변화할 수 있는데, 본 논문의 연구 대상은 충격에 대한 안정성이 아닌 힘 반영에 대한 안정성이므로 이러한 충격으로 인해 불안정해지는 차이를 없애주어야 한다.

이러한 점을 감안하여 새로운 실험을 하였다. 조작자의 힘을 컴퓨터가 일정하게 주는 방식인데 이렇게 함으로써 위에서 제기한 세가지 문제들을 모두 해결할 수 있다. 그림 18은 시간 지연을 2ms로 하고 주로봇에 일정한 진폭의 사인파형 힘을 주었을 때 힘반영 원격 제어 결과이다. 안정하게 힘이 잘 반영되고 있음을 알 수 있다. 그러나 같은 파형의 힘을 3ms의 시간 지연을 갖는 시스템에 가했을 때는 전체 시스템이 불안정해진다. 따라서 기존의 제어 알고리즘은 이러한 실험에 대하여 2ms까지만 안정하다는 결론을 내릴 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안된 추정 알고리즘을 적용하면 같은 실험에 대하여 6ms의 시간 지연에도 안정하고, 7ms에 이르러서야 발산하는 것을 볼 수 있다. 따라서 안정하게 동작할 수 있는 시간 지연의 한계가 2ms였던 시스템을 6ms까지 안정하게 유지시키는 결과를 얻었다. 또한 사람이 직접 조작을 할 때보다 안정하게 동작할 수 있는 시간 지연의 한계가 훨씬 줄어든 것으로 보아 사람의 감쇠(damping) 효과가 시스템을 안정하게 하는데 큰 역할을 한다는 것을 확인했다.

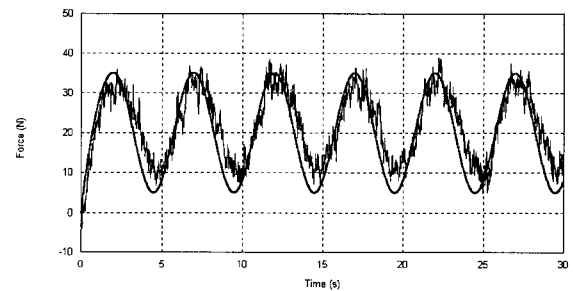


그림 18. 사인파의 일정한 힘을 주었을 경우의 접촉 힘.

Fig. 18. Contact force of quantified experiment.

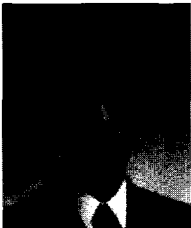
V. 결론

원격 제어 시스템에서 통신 채널간에 시간 지연이 존재하는 경우는 전체 시스템이 불안정하게 되기 쉽다. 본 논문에서는 시간 지연이 존재할 경우에도 원격 제어 시스템을 안정하게 제어할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 종로봇측에서 주로봇의 위치와 힘을 추정하여 제어에 이용하는 형태로써 기존의 제어기에 추가할 수 있는 구조로 되어 있다. 주로봇은 외란 관측기를 이용하여 주로봇의 공칭 모델과 동일한 동역학적 특성

을 지니도록 제어한다. 종로봇측에서는 주로봇의 가상 모델을 이용하여, 지연된 주로봇의 힘과 위치로부터 현재의 힘과 위치를 추정한다. 이렇게 추정된 신호가 제어에 이용되므로 시간 지연을 상쇄시키는 효과를 얻을 수 있다. 기존의 제어 방법으로는 40N 이내의 힘으로 사람이 직접 조작을 할 경우 시간 지연에 안정하게 동작하는 한계가 3ms 이하였으나, 제안된 알고리즘을 적용하면 힘 반영을 충실하게 하면서 8ms에서도 안정한 특성을 가진다. 기계로 똑같은 힘을 가하는 실험을 한 경우에도 기존의 제어 방법은 2ms, 제안된 새로운 제어 방법으로는 6ms의 시간 지연에 까지 안정하게 동작한다. 따라서 제안된 방법은 기존의 시스템에 비해 2~3배의 시간 지연에도 안정하다는 결론을 얻을 수 있다.

참고문헌

- [1] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 34, no. 5, pp. 494-501, 1989.
- [2] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for idea kinesthetic coupling-formulation and experiment," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 5, pp. 605-620, 1994.
- [3] D.A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 624-637, October, 1993.
- [4] B. Hannaford, "A design frame work for teleoperators with kinesthetic feedback," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 4, pp. 426-434, 1989.
- [5] G. M. H. Leung, B. A. Francis, and J. Apkarian, "Bilateral controller for teleoperators with time delay via μ -synthesis," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 1, pp. 105-116, February, 1995.
- [6] A. Eusebi and C. Melchiorri, "Force reflecting telemanipulators with time - delay : stability analysis and control design," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 4, pp. 635-640, August, 1998.
- [7] W. S. Kim, B. Hannaford and A. K. Bejczy, "Force reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 2, pp. 176-185, April, 1992
- [8] H. S. Lee, "Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 1, pp. 48-55, 1996.



임 흥 재

1997년 서울대학교 공과대학 기계공학과 졸업, 포항공과대학교 대학원 석사(1999), 1999년~현재 동대학원 박사과정 수학중. 관심분야는 원격 제어 시스템의 제어 기법.



서 일 홍

1977년 서울대 공과대학 전자공학과 졸업. KAIST 전자공학과 석사(1979), KAIST 전자공학 박사(1982). 1985년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 햅틱인터페이스, 원격제어, 기계학습 및 지능제어, 개방형 제어기설계.



정 완 균

1981년 서울대학교 기계공학과 졸업. KAIST 기계공학 석사(1983), KAIST 생산공학박사(1987), 1994~현재 포항공과대학교 기계공학과 부교수. 관심분야는 여유자유도 로봇의 제어 와 로봇의 힘제어 및 극한작업용 원격제어기술.