한국지능시스템학회 논문지 2008, Vol. 18, No. 6, pp. 746-753

네트웍 환경에서의 강건상태추정을 이용한 원격조작시스템 제어

Teleoperatoin System Control using a Robust State Estimation in Networked Environment

진태석* · 김현식**
TaeSeok Jin and Hyun-Sik Kim

* 동서대학교 메카트로닉스공학과
** 동명대학교 로봇시스템공학과

요 약

본 논문에서는 원격 제어 시스템에 있어 조작자와 기계사이의 시각적 또는 근육지각운동의 연결에 있어서 조작자의 안정된 작업환경을 확보하기 위해 가상 모델을 이용하고, 또한 가변 시간 지연의 추정 및 예측 기법을 적용함으로써 원격조작의 실현성을 향상시키기 위한 방법을 제시하고 있다. 원격제어시스템에서의 실현성 향상을 위해 가상 모델을 설계하고, 가상의 모델이 원격의 로봇과 시간적으로 동일한 움직임을 할 수 있도록 구성함으로서 조작자는 원격의 로봇을 가상의 모델을 통해 조작할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 원격조작으로 가상의 모델을 제어함으로써 원격의 로봇을 제어하고, 가상의 모델을 통해 원격의 로봇의 실시간 제어에 가능성을 제시하였다.

키워드 : 원격제어, 가상모델, 시간지연, 네트워크, 강건제어

Abstract

In this paper, we introduce the improved control method are communicated between a master and a slave robot in the teleoperation systems. When the master and slave robots are located in different places, time delay is unavoidable under the network environment and it is well known that the system can become unstable when even a small time delay exists in the communication channel. The time delay may cause instability in teleoperation systems especially if those systems include haptic feedback.

This paper presents a control scheme based on the estimator with virtual master model in teleoperation systems over the network. As the behavior of virtual model is tracking the one of master model, the operator can control real master robot by manipulating the virtual robot. And LQG/LTR scheme was adopted for the compensation of un-modeled dynamics. The approach is based on virtual master model, which has been implemented on a robot over the network. Its performance is verified by the computer simulation and the experiment.

Key Words : Teleoperation, Virtual model, Time-delay, Network, LQG/LTR

1. 서 론

매스터-슬래이브 시스템은 조작자(operator), 매스터로봇(master robot), 통신블록(communication block), 슬래이브로봇(slave robot), 그리고 작업 환경으로 구성되며, 인간이 직접 작업하기 힘든 심해, 우주공간, 방사능지역 등과 같은 극복 작업 환경에서 인간을 대신하여 로봇이 작업을 수행하도록 구성된다. [1],[2]. 이러한 매스터-슬래이브 시스템의 제어방법은 조작자에 의해 조작되는 매스터 로봇이 위치 또는 속도 정보가 슬이브측으로 전달되고 인간을 대신하여 원격지에서 작업하는 로봇의 힘 정보를 매스터측으로 되돌림으로써 이루어진다[3]. 이 때, 작업효율과 현장감을 위해서는 매스터 로봇과 슬래이브 로봇이 서로 정보를 주고받는 양방향 제어가 요구되는데 이를 위한 상호 정보의 교환을 위한 통신블럭이 필요하게 된다[2, 3]. 일반적으로 조작자측과 작업공간 사이의 거리가 멀어지게 되면 시간지연(time delay)은 필연적으로 발생하게 되며, 시간지연의 존재는 시스템을 불안정하게 하여 조작자의 작업 효율을 저하시키는 요인으로 작용하게 된다 [2]-[6]. 이와 같은 시간지연에 관한 문제점을 극복하고자 많은 연구가 진행되어 왔다. Strassberg 등은 조작자는 매스터를 조작하고 이에 의한 프로그램을 슬래이브로 전송하여 전달된 프로그램대로 슬래이브 로봇이 자체적으로 작업을 수행하도록 하는 원격프로그램(teleprogramming)을 제안하였으나 이 방법은 이용할 경우 슬래이브 측의 작업 정보를 얻기가 어렵다는 단점이 있다 [6]. Hannaford 등이 제안한 SCC(Shared Compliance Control)기법은 슬래이브의 제어를 매스터의 명령뿐만 아니라 슬래이브 자체의 제어기를 동시에 사용하여 제어하는 방법을 제시하였다 [7][8]. Anderson과 Spong

접수일자 : 2008년 3월 27일
완료일자 : 2008년 11월 11일
본 연구결과는 교육인적자원부의 출연금으로 수행한 지방기업 주문형 인력양성사업의 연구결과입니다.

은 통신블럭의 안정성을 유희하여 일정한 시간지연이 존재하는 시스템에서 시스템을 안정하게 유지할 수 있는 제어법칙을 제안하였으나, 이 방법에는 스캐터링(scattering)이론을 이용한 시스템을 수동성 판별을 기본으로하여 통신블럭의 안정성만을 고려하였다 [9]. Yoshikawa와 Ueda는 시간지연이 존재하는 시스템에서 안정성을 유지할 수 있는 4가지 형태의 제어방법을 정의하고 이들 이론을 기본으로 안정성을 유지하면서 시스템의 조작성을 높일 수 있는 새로운 제어방법을 제안하였다 [10]. Bejczy와 Kim은 슬래이브 측의 상황을 시뮬레이션을 통하여 예측하고 이를 매스터 측의 화면에 보여주는 예상화면기법(Predictive display)을 제안하였다 [12]. 이들이 제안한 방법은 실제의 화상 정보와 예측된 화상정보를 이용하여 조작자가 매스터 매니퓰레이터를 조작하는 것으로 구체적으로 제어기내에 시간지연에 대한 보완 방법을 포함시키지는 않았다.

본 논문에서는 원격 제어 시스템에 있어 조작자와 기계 사이의 시각적 또는 근육지각운동의 연결에 있어서 조작자의 안정된 작업환경을 확보하기 위해 가상 모델을 이용하고, 또한 가변 시간 지연의 추정 및 예측 기법을 적용함으로써 원격조작의 실현성을 향상시키기 위한 방법을 제시하고 있다.

원격제어시스템에서의 실현성 향상을 위해 가상 모델을 설계하고, 가상의 모델이 원격의 로봇과 시간적으로 동일한 움직임을 할 수 있도록 구성함으로서 조작자는 원격의 로봇을 가상의 모델을 통해 조작할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 원격로봇의 가상모델 추정을 위해 시간지연에 대해 조작지에서 라운드 트립 방식을 사용한 시간지연을 추정하고, 추정된 시간을 바탕으로 TSE(Taylor series expansion)을 이용하여 입력을 예측하였으며 예측된 정보를 원격 로봇에 입력으로 이용하였다. 이 때 실제 입력은 조작지의 가상 모델의 입력으로 이용된다. 또한 조작지에서 가상 모델과 원격 로봇의 출력 사이의 오차는 가상 모델의 입력을 보정함으로써 조작가는 가상 모델을 이용하여 원격로봇의 동작을 추정할 수 있게 된다. 이러한 구성을 통해 조작자가 마치 가상 모델을 제어함으로써 원격의 로봇을 제어하고, 가상의 모델을 통해 원격의 로봇의 실시간 제어에 가능성을 확인하고자 한다.

논문의 구성으로는 II장에서 제시한 원격제어시스템의 구성을 소개하고, III장에 가상모델 및 제어기 설계를 설명한다. IV장에서는 제시한 방법에 대한 시뮬레이션 및 실험을 제안한 방법의 실효성과 그 결과에 대한 고찰하는 것으로 본 논문을 구성한다.

2. 시스템구성

본 논문에서 제시하는 원격제어 시스템은 그림 1과 같이 원격지와 조작지를 연결하는 네트워크로 구성된다. 또한 원격지와 조작지는 각각의 상위 제어기인 PC와 하위 제어기인 CAN기반의 로봇 컨트롤러로 구성되어져 있다. 그리고 제어기의 동작 상황 및 결과는 각종 센서 수치의 피드백이나 CCD 카메라의 영상 전송 등으로 클라이언트에 전달되어 원격지와 조작지에게 표현됨으로써 보내진 제어정보가 제대로 수행되었는지 확인한다.

2.1 원격제어시스템

원격제어시스템을 표현한 그림 1은 시스템의 원격지와 조작지가 각각의 하위 제어기를 가지고 있으므로 오픈 루프 제어라 할 수 있다. 그리고 조작지의 입력은 원격지의 하위 컨트롤러에 의해 원격의 로봇을 제어하므로 원격의 시스템은 안정성을 유지할 수 있다. 또한 마스터 로봇과 슬레이브 로봇간은 네트워크로 연결되어 있으며 마스터에서 조정한 제어값이 네트워크를 통해서 전달될 수 있도록 구성하였다.

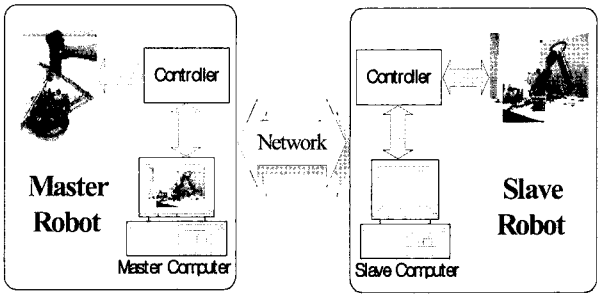


그림 1. 원격조작 제어시스템
Fig 1. Teleoperation System

원격시스템의 상태를 조작지에서 관찰할 때는 시간 지연으로 인한 정확한 상태를 관찰할 수 있도록 시스템을 그림 2와 같이 구성하였다.

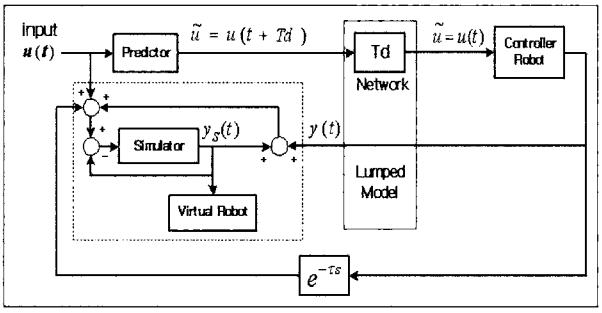


그림 2. 원격조작 제어시스템의 구성
Fig 2. Control Structure of Teleoperation System

그림 2와 같은 시스템에서 3 가지 가정을 설정하였다. 시간 지연을 lumped delay라 하고 시간지연이 일정하다고 가정하였다. 그리고 시간 지연에 대한 정확한 예측된다고 가정할 경우, 그림 2에서의 시스템은 결과적으로 가상의 로봇과 실제 원격의 로봇은 실시간적으로 동일한 동작을 추정할 수 있다. 이러한 가정은 얼마나 정확한 시간을 추정하고, 얼마나 정확한 예측을 할 수 있는가에 따라 원격 로봇의 가상 모델 추정의 가능성이 결정된다.

2.2 테일러 급수의 확장

테일러 급수의 확장은 다항식 근사화 방법으로서 그림 3과 같이 테일러 급수 형태로 표현되는 비선형 항인 3차 이상의 고차 항들을 무시한 2차 도함수를 가지는 랜덤한 신호 함수가 있다고 가정하였다.

여기서 $[t,t+T]=\{t,t+1,t+2,\cdots,t+T\}$ 이다.

이 신호 함수를 $[t,t+T]$ 까지를 적분에 대한 근사화를 미분한 것은 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$f(t+T)=f(t)+Tf'(t)+\frac{T^2}{2!}f''(t)+\cdots \qquad (1)$$

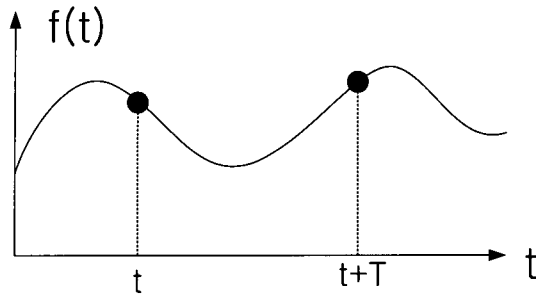


그림 3. 랜덤 신호 함수
Fig 3. Fuction of Random Signal

식 (1)로부터 현재 시간 t에서의 $f(t)$와 그것의 고차 미분항으로부터 시간T 후의 $f(t+T)$값의 근사값을 추정할 수 있다. 이러한 방법을 통해 임의의 신호에 대한 예측을 모의실험을 통해 확인해 보았다.

본 논문에서는 조작자의 동작을 예측하기 어렵기 때문에 어느 정도의 오차는 예측 기법에 의한 추정치에는 항상 존재하기 마련이다. 그러므로 가변시간 지연의 보상을 위한 테일러급수 확장을 이용한 예측기법에서의 오차에 대해서는 중요하게 다루지 않는다. 오차에 대해서 가상로봇의 입력에 오차만큼을 더한 입력을 줌으로써 원격 로봇의 동작을 추종하도록 함으로써 결과적으로 동일한 움직임을 확인할 수 있다. 예측 실험으로써 테일러급수 확장을 이용한 예측기법에 대한 모의실험을 결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

그림 4는 원 신호(실선)와 예측되어진 신호(점선)를 나타내고 있다. 그림 5는 원래의 신호의 $t+T$ 시간에서의 값 $x(t+T)$와 t 시간에서의 예측값 사이의 오차를 보여주고 있다.

모의실험을 통하여 가변 시간지연에 대한 예측이 가능함을 확인할 수 있고 입력에 대한 예측은 짧은 시간에 대해 어느 정도 실제 값을 동일하게 추정됨을 확인할 수 있었다. 또한 에러는 입력의 변화가 빠르면 빠를수록 에러가 커지지만 예측시간이 짧을수록 에러 없이 정확한 값을 예측할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

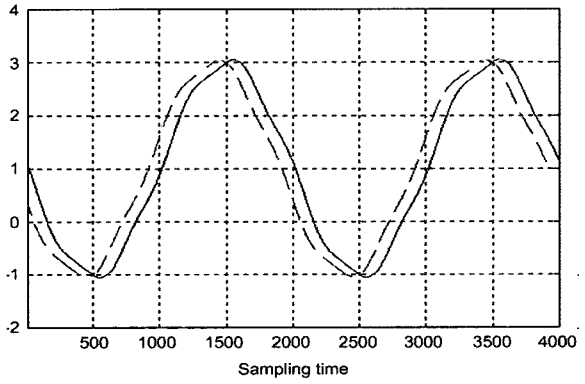


그림 4. 예측값(점선)과 실제값(실선)
Fig 4. Etimation(Dot) and Real Value(Solid)

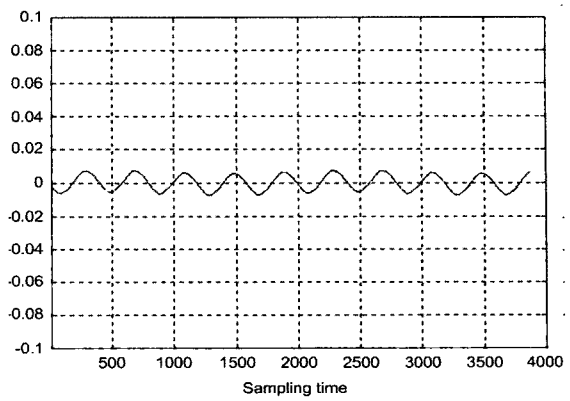


그림 5. 예측값과 실제 미래값의 오차
FIg 5. Error of Estimation and Real Value

3. 가상모델 및 제어기 설계

3.1 가상모델

가상모델의 설계를 위한 시뮬레이터 모델은 5축 수직 다관절 로봇의 2축과 3축에 대해서 동역학을 구하고 이것을 가상 로봇의 동역학으로 가정하여 제어기를 설계 하도록 하였다[8]. 제어기로는 데이터 송수신 시간지연의 차이에 대해 모델링 오차로 두고 LQG/LTR의 제어기 설계 기법을 이용하여 제어기를 설계하였다[13, 14].

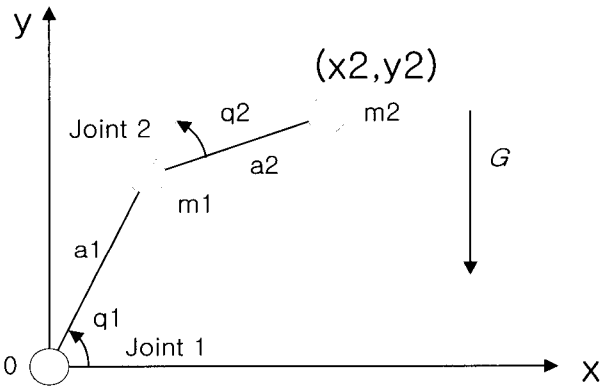


그림 6. 2-링크 매니퓰레이터
FIg 6. 2-Link Manipulator

그림 6과 같은 2 링크 매니퓰레이터의 기구학, 동역학의 폐루프 형식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M(q)\ddot{q}+ V(q,\dot{q})+ G(q)=\tau \qquad (2)$$

여기서, M(q)는 관성행렬이며, V(q)는 코리올리/구심력 항이며, G(q)는 중력항이다.

일반적인 로봇의 동역학 식은 매우 복잡한 비선형 식으로 나타나게 되는데 이를 선형화 할 필요가 있고 이를 위해 계산 토크법을 사용하여 비선형 항을 제거하고 선형화 할 수 있다. 외란 및 마찰을 고려한 로봇 동역학은 다음 식과 같이 나타난다.

$$M(q)\ddot{q}+ N(q,\dot{q})+\tau_d=\tau \qquad (3)$$

여기서 N(q,'q)는 비선형 항, τd는 외란이다.

선형시스템화 하기 위하여 다음 식과 같이 추적오차를 출력으로 정의한다.

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \tag{4}$$

입력 토크에 대한 추적오차의 동역학을 구하기 위하여 다음 식과 같이 이차 미분을 구하여 제어입력함수(u)와 외란 함수(w)를 다음과 같은 식으로 정의하였다.

$$\begin{aligned} u &= \ddot{q}_d + M^{-1}(N - \tau) \\ w &= M^{-1}\tau_d \end{aligned} \tag{5}$$

또한 상태 $x(t) \in R^{2n}$로 표현할 때 선형화된 추적 오차에 대한 동역학을 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} w \tag{7}$$

설정한 로봇은 2 링크 매니퓰레이터이므로 추적 오차에 대한 동역학에서 플랜트 모델을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{8}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 \end{bmatrix}$$

그림 7은 계산 토크법에 의한 선형화된 시스템의 구조를 나타내고 있다.

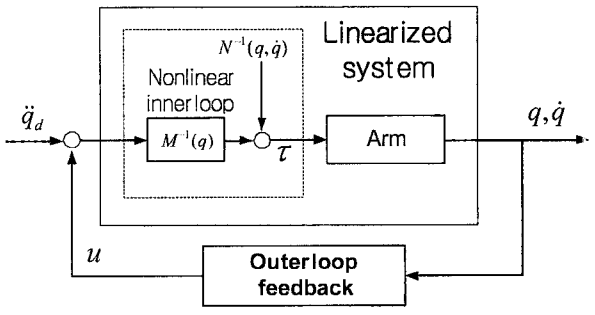


그림 7. 계산된 토크 제어 방법에 의해 선형화된 구조.
FIg 7. Linearized System Structure

3.2 제어기 설계 및 모델링 오차

제어기의 설계로는 조직적으로 안정도-강인성 및 주파수 역 성능을 고려할 수 있는 강인한 선형제어기 설계가 가능할 수 있도록 LQG/LTR 방법을 이용하여 설계한다[13,14]. 본 논문은 시뮬레이터가 데이터의 송수신 시간지연 차이를 시뮬레이터에서의 출력 시간지연으로 간주하여 시간지연에 강인한 제어기를 설계하는 것이 목적이므로 시간지연의 모델링 오차를 구하여 나타내고 안정도-강인성 성능을 만족하도록 목표필터루프(TFL)를 설계하여 LTR에 의해 전체 시스템의 루프형상을 목표필터루프에 일치시켜 시스템을 시간지연에 대하여 강인하도록 하였다.

LQG/LTR 제어시스템의 구조를 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 설계절차는 먼저, 설계플랜트모델에 대해 바람직한 루프형상을 얻을 수 있는 목표필터루프(target filter loop)를 설계하고 둘째로, 보상된 시스템의 루프전달함수의 특이값을 목표필터루프의 특이값 형상으로 회복하는 루프전달회복(loop transfer recovery) 단계로 구분된다. 일반적으로 LQG/LTR 제어기를 설계시 플랜트는 안정가능(stabilizable)하고 검출가능(detectable)해야 하며 최소위상(minimum phase), 비특이(nonsingular) 시스템이어야 한다.

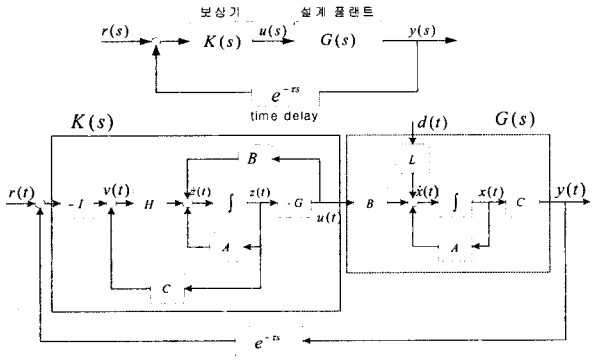


그림 8. LQG/LTR 제어시스템의 구조.
FIg 8. LQG/LTR Control System Structure

시간지연을 가지는 시스템은 $G_A(s) = G(s)e^{-s\tau}$ 으로 나타낼 수 있으며, 모델링 오차 $E(s)$와 크기는 다음 식으로 된다.

$$E(s) = e^{-s\tau} - 1 \tag{9}$$

$$| E(jw) | = \left| 2\sin\left(\frac{w\tau}{2}\right) RIGHTvert \right. \tag{10}$$

여기서 τ는 지연시간이며, 원격제어시스템의 송수신 시간지연의 최대 100 msec로 설정하였다.

τ= 100 msec 의 시간지연에 대한 모델링 오차의 크기 Bode 선도는 그림 9와 같다. 안정도-강인성 조건을 만족하기 위해서는 I+T-1(jw)의 최소 특이값이 항상 |E(jw)| 보다 크게 나타나야 한다.

3.2.1 목표필터루프의 설계

목표필터루프 설계는 페루프 시스템이 요구되는 명령추종 성능 및 안정도-강인성 조건을 만족하도록 루프의 형상을 결정하는 과정으로서 필터게인행렬 H, 설계파라메타 L을 선정한다 [9]. 시간지연에 대하여 강인한 제어기를 설계하기 위해서 먼저 모델링 오차에 대하여 안정도-강인성 조건을 만족하도록 목표필터루프를 설계한다.

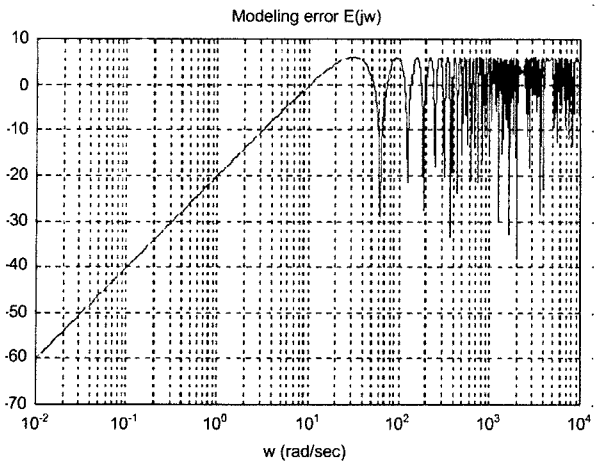


그림 9. 시간지연의 모델링 오차 크기(100ms)
FIg 9. Modelling Error by Time Delay

선형화된 플랜트가 각 채널에 적분요소가 포함된 형태로 전달함수행렬(TFM)이 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 구해진 플랜트의 특이값 선도가 그림 10과 같이 모든 주파수 영역에서 일치된 형태로 나타나고 이중 적분요소의 형태이므로 기울기는 -40 dB/dec로 나타나는 것을 알 수 있다.

$$G(s) = C(sI-A)^{-1}H = \begin{bmatrix} \frac{1}{s^2} \\ \frac{1}{s^2} \end{bmatrix} \tag{11}$$

따라서 필터의 설계파라미터 L은 별도로 정의할 필요없이 플랜트의 입력 행렬 B를 그대로 적용하면 된다. 다음으로 설계파라미터 μ를 선정한다. 전달함수행렬에서 특이값은 다음 식과 같이 표현 된다

$$\sigma_i[G_{KF}(jw)] \simeq \frac{1}{w^2\sqrt{\mu}} \tag{12}$$

설계파라미터 μ는 식 (13)과 같이 안정도-강인성 조건을 만족하도록 루프형상을 설계함으로써 설정할 수 있었다. 안정도-강인성 문제를 만족시키기 위해서는 공칭 루프의 대역폭이 $\varpi_C < \varpi_m$ (ϖ_C: 교차주파수, ϖ_m: $\sigma_{\max}=1$인 주파수)의 조건을 만족해야 하므로 안정하면서 최대한 응답속도가 빠르도록 루프의 대역폭을 8 rad/sec로 설정하고 μ는 0.001로 설정하였다. 그림 11과 같이 안정도-강인성 조건을 나타내는 시스템의 보드 선도를 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{\max}[E(jw)] &< \sigma_{\min}[\mathrm{I}+\mathrm{T}^{-1}(jw)] \\ \sigma_{\max}[C(jw)] &< \sigma_{\max}^{-1}[E(jw)] \end{aligned} \tag{13}$$

공칭 폐루프 전달함수를 $C(j\omega)$, 출력측으로 반영되는 최대 모델링오차를 $E_{\max}(\omega)$라고 할 때, 윗 식을 만족하는 교차주파수의 범위는 아래와 같이 제한되어야 한다.

$$\omega_c < \omega_m \tag{14}$$

여기서 ω_c는 교차주파수이며, ω_m은 $|E(j\omega)|=1$ 되는 주파수이다. 설계파라메타 μ에 따라 루프형상이 아래 위로 이동하게 되는데 이로써 요구되는 교차주파수 혹은 대역폭을 만족시킬 수 있다.

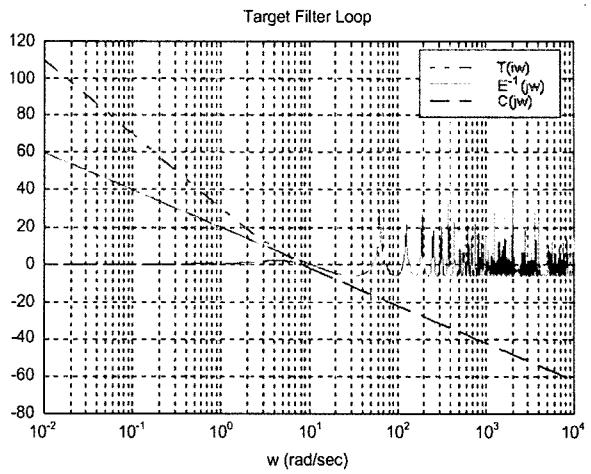


그림 10. 안정도-강인성 판별에 의한 특이값 선도
FIg 10. Singular Value Line by Stability-Robust Criterion

안정도-강인성을 만족하도록 목표필터루프를 설계하는데 있어서 시간지연에 의한 모델링 오차의 범위를 100 msec로 설정하였으므로 설계된 시스템은 100 msec 이내의 시간지연에서는 매우 안정적으로 제어될 것이다. 설계파라미터에 의해 필터 게인 H는 다음과 같이 구해졌다.

$$H = [0.5772 \;\; 0.5772 \;\; 0 \;\; 0]^{-T} \tag{15}$$

3.2.2 루프전달회복

목표필터루프가 설계되면 LQ 저가제어 방법을 이용해서 전체시스템의 루프를 목표필터루프에 일치시키는 루프전달회복(LTR) 과정을 거친다. 루프전달회복은 폐루프시스템을 목표루프필터에 근사적으로 일치시키는 과정으로 제어게인행렬 G를 선정하는 과정이다. 루프전달회복은 저가제어 LQR문제(cheap control linear quadratic regulator problem)로 다음 식(13)의 제어대수 Riccati식의 해 K를 구하여 아래의 식(14)의 제어게인행렬 G를 구한다.

$$KA + A^TK + C^TC - \frac{1}{\rho}KBB^TK = 0 \tag{16}$$

$$G = \frac{1}{\rho}B^TK \tag{17}$$

선정된 제어게인행렬 G로써 보상기의 전달함수 $K(s)$는 다음과 같이 정의된다.

$$K(s) = G(sI-A+BG+HC)H \tag{18}$$

로봇의 제어기의 전달함수 및 상태방정식은 다음 식 (19)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} K(s) &= G(sI-A+HC+BG)^{-1}H \\ \dot{z}(t) &= (A-BG-HC)z(t) - He(t) \\ u(t) &= -Gz(t) \end{aligned} \tag{19}$$

LQG/LTR 제어시스템은 차수가 2n차이므로 고주파에서는 루프가 일치하지 않고 이득이 더욱 감쇠되는 형태를 나타낸다. 이는 센서잡음 및 모델링 오차에 더욱 강인한 특성

을 나타내므로 설계시 공칭 루프의 대역폭까지 루프전달 회복을 수행하고 그 이후의 고주파 영역에서는 이득이 더욱 낮도록 루프전달함수(TFM)를 설계하였다.

그림 11은 설계파라미터 $\rho = 2\times10^{-3}$ 으로 설정하여 회복된 루프전달함수의 특이값 선도를 나타낸다. 결과에서 공칭루프 대역폭 이하의 저주파에서는 목표필터루프와 정확히 일치되고 그 이상의 고주파 영역에서는 더욱 감쇠되어 고주파 동역학 및 모델링 오차에 대하여 더 강인한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 이 때, 구해진 제어게인 행렬 G는 다음과 같다.

$$G = [213.994 \quad 9.611 \quad 38.728 \quad 3.433] \qquad (20)$$

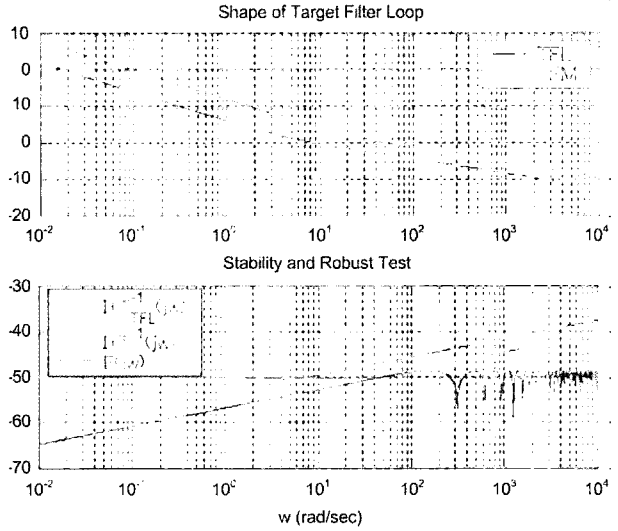


그림 11. TFL과 회복된 루프 TFM 및 안정도 강인성을 표시한 특이값 선도

FIg 11. Singular Value Line by Target Filter Loop and Stability Robust Test

4. 실 험

4.1 실험환경

원격의 로봇으로써 그림 12와 같이 5축 수직 다관절 로봇과 제어기를 사용하였다. 본 제어기는 원격로봇의 실시간 제어를 위해, 상용 로봇 제어기를 대체할 목적으로 자체 개발 사용되어진 로봇제어기로 CAN(controller area network)을 기반으로 하는 실시간 분산 제어 방식의 로봇 제어기이다. 각 축의 제어를 담당하는 하위제어기와 이들을 관장하는 상위제어기로 구성되어 있고, 실시간을 보장하는 CAN 통신으로 서로 데이터를 주고받는 구조로 설계되어 있다. 최고 1 Mbps의 데이터 전송 속도로, 기존의 상용 로봇제어기와 사용자 프로그램과의 인터페이스에서 문제가 되었던 데이터 전송 시간 지연을 최소화했으며, 분산제어방식으로 각 축을 직접 접근해서 상위제어기의 부하를 줄여 유연하고 안정된 동작을 가능하게 하였다.

실험으로서 그림 13과 같이 5축 수직 다관절 로봇에 대해 두 개의 가상 로봇을 조작지와 원격지에 두고 2축과 3축에 대해서만 적용하고 시간지연의 추정과 예측의 방법을 적용하여 실험을 하였다.

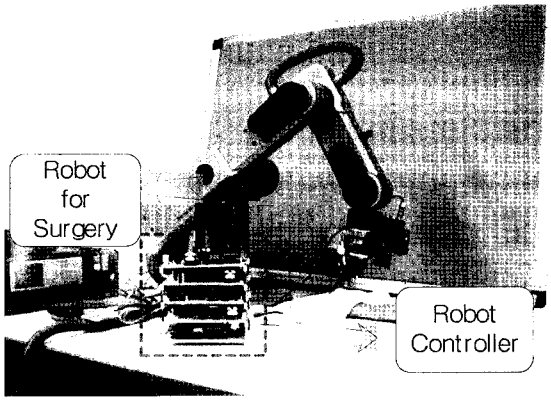


그림 12. 실험용 원격로봇과 제어기

FIg 12. Teleoperation Robot and Controller for Experiments

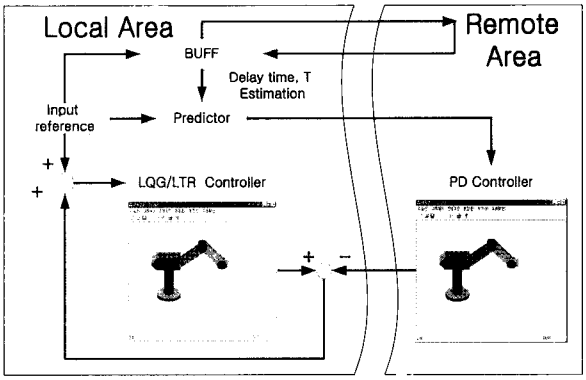


그림 13. 원격 제어 시스템의 실험 환경.

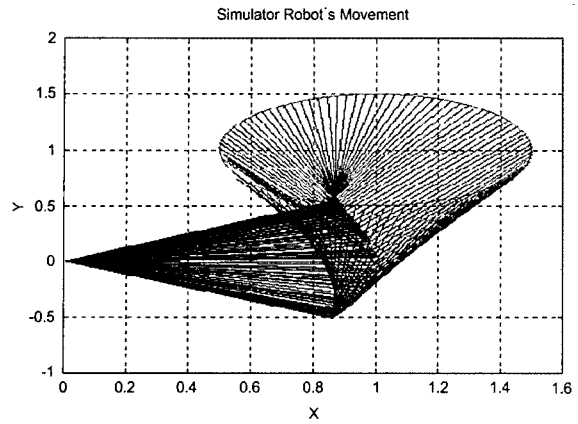
FIg 13. Experiemental Environment of Teleoperation Control System

시간 지연의 추정 및 예측, 가상 모델의 설계를 바탕으로 전체 시스템의 200ms의 시간지연에 대해 원격로봇과 가상로봇의 궤적에 대해 모의실험 하였다. 그림 14에서 시뮬레이션을 통한 가상 로봇의 출력 궤적의 추종과 실제 로봇의 궤적 추종을 상호비교를 제시하고 있다. 본 모의 실험에서 두 출력궤적 결과가 거의 동일한 추종 결과를 보여줌을 알 수 있다.

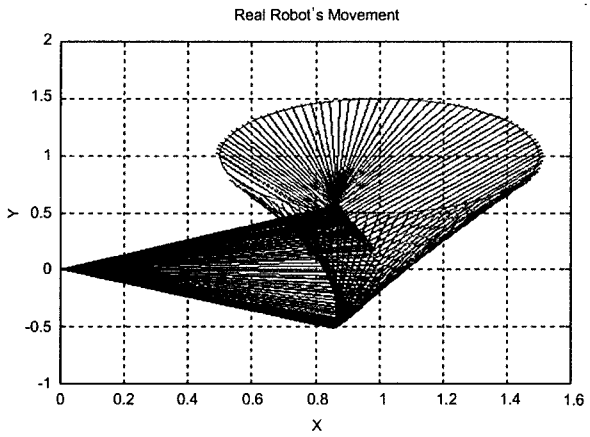
제시한 방법에 대한 예측 결과를 비교하기 위하여 다음과 같이 실제입력과 예측된 입력의 비교와 실제로봇과 시뮬레이터를 통한 관절오차를 비교하고자 하였다.

그림 15에서는 실제 입력과 예측되어진 입력을 나타내며 거의 예측입력이 실제입력과 유사함을 볼 수 있다. 그림 16은 로봇과 시뮬레이터사이의 관절오차를 나타내고 거의 0에 수렴함을 볼 수 있다.

그림 16에서는 통신제어 프로그램이 윈도우 프로그램에서 실행됨으로써 발생되는 시간지연이 생겼으며 향후 RT-OS를 이용한 보정이 필요하다고 생각된다. 그림 17은 곡선형태의 입력궤적에 대한 실제 로봇과 가상로봇의 궤적 추종을 보이고 있으며 거의 동일한 궤적을 추종함을 알 수 있다. 그림 17(a)와 (b)사이의 가로 2cm, 세로 2cm 정도의 오차가 발생하였으며, 이러한 것은 시뮬레이터상의 위치가 실제로봇의 로봇의 위치로 변환시 모터의 백레쉬로 인한 위치의 변환이 발생하였다.



(a) 실제로봇의 이동궤적



(b) 가상로봇의 이동궤적

그림 14. 실제로봇과 가상로봇의 원 궤적실험.
FIg 14. Trajectroy Experiment of Real Robot and Virtual Robot

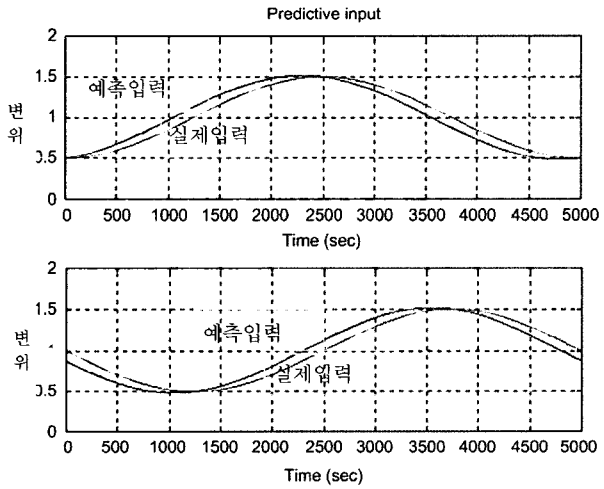


그림 15. 실제 입력과 예측되어진 입력
FIg 15. Real Input Data and Estimated Input Data

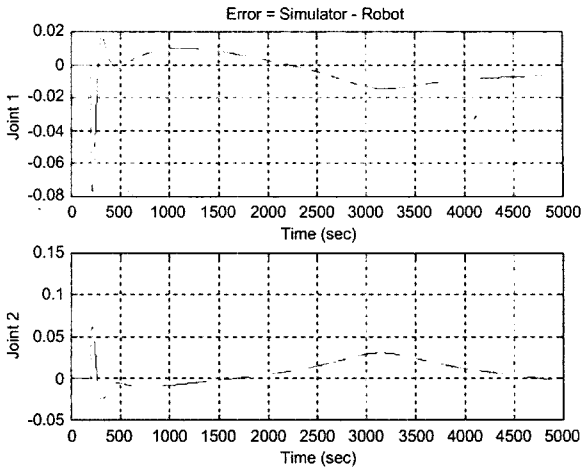
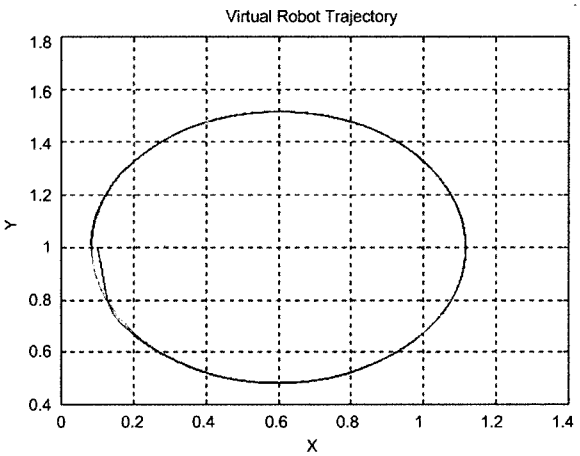
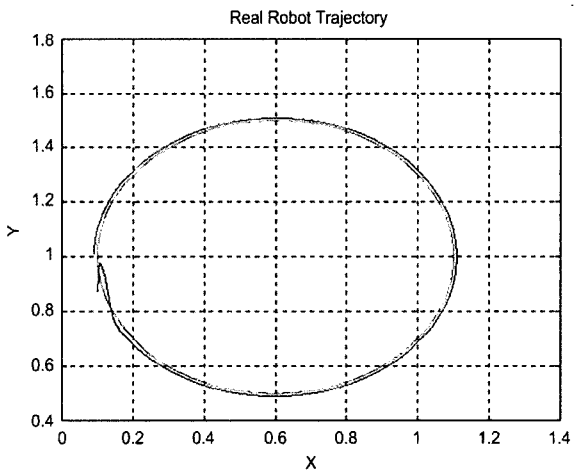


그림 16. 실제 로봇과 시뮬레이터 관절오차.
FIg 16. Lint Error of Real Robot and Simulator



(a) 시뮬레이터의 원 궤적



(b) 실제로봇의 원 궤적

그림 17. 시뮬레이터 및 로봇의 원궤적 실험 결과.
FIg 17. Experiment Result of Simulator and Robot

5. 결 론

본 논문에서는 네트워크 환경에서의 원격 로봇을 가상 모델을 통해 제어함으로써 조작의 실현성 및 안정성을 향상시키기 위한 기법을 제안하였다. 제시된 방법을 위해 시간지연의 추정 방법으로 라운드 트립 방식의 시간 태크를 이용하였다. 예측 기법으로 테일러 급수 확장은 다소 오차는 존재하지만 현재의 상태로부터 정확한 예측 정보를 제공해 줄 수 있음을 알 수 있었다. 또한 가상 모델은 원격로봇의 모델을 기반으로 모델링 되지만 실제 로봇의 파라메터, 즉 각 링크의 질량 등을 모두 사용할 필요 없이 가능한 시스템의 불안정하게 하는 요소를 설계자에 의해 간략화 시킬 수 있었다. 이렇게 설계자에 의해 구해진 모델의 제어기를 모델링 오차에 강인하도록 설계함으로서 가상 모델의 안정하게 제어할 수 있고 또한 실제 원격 로봇과 시뮬레이터 출력의 오차를 입력에 추가되어도 안정한 동작을 기대할 수 있다. 이러한 제안된 기법들은 조작자의 능동적인 조작을 가능하게 하고 개선된 성능을 나타내는 것을 알 수 있었다.

향후 연구로써 불규칙한 시간지연에 대한 시스템의 예측과 가상모델 추정에 관한 연구와 더불어 원격지 로봇의 접촉모델을 고려한 강인한 제어 알고리즘에 대한 연구가 수행되어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling Formulation and Experiment," *IEEE Tans. on Robotics and Automantion*, Vol. 10, No. 5, pp. 605-620, 1994.

[2] Y. Strassberg, A. A. Goldenberg, and J. K. Mills, "A New Control Scheme for Bilateral Teleoperating Systems:Performance Evaluation and Comparison," *IROS'92 Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems*, No. 2, pp. 865-872, 1992.

[3] W. S. Kim, B. H. Hannaford, and A. K. Bejczy, "Force Reflection and Shared Compliant Control in Operating Tele-manipulators with Time Delay," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 2, pp. 176-185, 1992.

[4] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilatral Control of Teleoperators with time delay," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 34, No. 5, pp. 494-501, 1989.

[5] T. Yoshikawa and J. Ueda, "Analysis and Control of Master Slave Systems with Time Delay," *Proc. of IROS'96*. pp. 1366-1373, 1996.

[6] T.B. Sheridan, "Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis", *IEEE Trans.on Rob. and Aut.*, Vol. 9, No. 5, Oct. 1993, pp. 592-606.

[7] C. Preuscher, T. Ortmaier, G. Hirzinger, "Teleoperation Concepts in Minimal Invasive Surgery", *Control Engineering Practice*, Vol. 10, 2002, pp. 1245-1250.

[8] W. S. Kim and B. Hannaford, "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, 1992.

[9] G. Niemeyer and J-J. Slotine, "Stable Adaptive Teleoperation", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 152-162, 1991.

[10] Neal A. Tanner and G. Niemeyer, "Practical Limitations of Wave Variable Controllers in Teleoperation", *Proc. IEEE Conf. on Robotics, Automation, and Mechatronics*, pp. 25-30, Singapore, 2004.

[11] P. Arcara, C. Melchiorri, "Control Schemes for Teleoperation with Time Delay: A Comparative Study", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 38, pp. 49-64, 2002.

[12] K. Ogata, *"Ingenier a de Control Moderna"*, 3rd. edition, Prentice Hall, 1998.

[13] S. S. Haykin, *"Active Network Theory"*, Addison Wesley, 1970.

[14] Sira-Ramrez H., Spurgeon S. K., "On the Robust Design of Sliding Obervers for Linear Systems", *Systems and Control Letters*, Vol. 23, pp. 9-14, 1994.

저 자 소 개

진태석(Jin TaeSeok)

퍼지 및 지능시스템학회 논문지 17권 3호 참조

김현식(Hyun-Sik Kim)

1994년 : 부산대학교 전기공학과 졸업.
1996년 : 부산대학교 전기공학과 졸업 (공학석사)
2001년 : 부산대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)
1998년~2007년 : 국방과학연구소 선임 연구원
2007년~현재 : 동명대학교 로봇시스템공학과 전임강사

관심분야 : 인공지능/퍼지이론/진화연산, 로보틱스,수중운동체 제어, 수중표적 탐지/추적/식별, 정보융합, 협력무인체계
Phone : 051-629-1565
Fax : 051-629-1529
E mail : hyunskim@tu.ac.kr