

## LQG/LTR 기법을 적용한 원격제어시스템의 가상모델과 강건제어기의 설계

### Design of Robust Controller and Virtual Model of Remote Control System using LQG/LTR

진태석<sup>1\*</sup>

Tae-Seok Jin<sup>1\*</sup>

#### 〈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.

*Keywords : Teleoperation, Industrial Robot, LQG, LTR, Time Delay*

---

<sup>1\*</sup> 교신저자, 정회원, 동서대학교 메카트로닉스공학과 교수 <sup>1\*</sup> Corresponding Author, Professor Dept. of Mechatronics,  
부산대학교 졸업(공학박사) Ph.D Dongseo University

E-mail : jints@gdsu.dongseo.ac.kr

### 1. 서론

최근 언택트 원격 제어 시스템 도입이 활성화되면서 조작자와 기계사이의 시각적 또는 근육지각운동의 연결에 있어서 조작자의 안정된 작업환경을 확보하기 위해 가상 모델을 이용하여 가변시간 지연의 추정 및 예측 기법을 적용함으로써 원격조작의 실현성을 향상시키기 위한 방법이 고도화되고 있다.

원격제어시스템에서의 구현성 향상을 위해 가상 모델을 설계하고, 가상의 모델이 원격의 로봇 시스템과 시간적으로 동일한 움직임을 할 수 있도록 구성함으로써 조작자는 원격의 로봇을 가상의 모델을 통해 조작할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 원격로봇의 가상모델 추정을 위하여 시간지연에 대한 조작자의 라운드 트립 방식을 사용한 시간지연을 추정하고, 추정된 시간을 바탕으로 TSE(Taylor series expansion)을 이용하여 입력을 예측하였으며 예측된 정보를 원격 로봇에 입력으로 이용하였다. 이때 실제 입력은 조작자의 가상 모델의 입력으로 이용하고 조작지에서 가상 모델과 원격 로봇의 출력 사이의 오차는 가상모델의 입력을 보정함으로써 조작자는 가상모델을 이용하여 원격로봇의 동작을 추정하는 실험적 결과에 대한 이론적 근거와 성능을 검증하였다.

### 2. 원격제어 시스템 구성

본 논문에서 제시하는 원격제어 시스템은 Fig. 1과 같이 원격지와 조작지를 연결하는 네트워크로 구성하여 원격지와 조작지는 각각의 상위 제어기인 PC와 하위 제어기인 CAN기반의 로봇 컨트롤러로 구성하였다. 제어기의 동작 상황 및 결과는 각종 센서 수치의 피드백 데이터 전송 등으로 클

라이언트에 전달되어 원격지와 조작지에게 표현하여 목표 제어성능이 수행되었는지 확인하였다.

Fig. 1은 원격의 로봇으로써 2축 다관절 로봇과 제어기를 사용하였다. 원격로봇의 실시간 제어를 위하여 상용 로봇 제어기를 대체할 목적으로 자체 개발 사용되어진 로봇제어기는 CAN(controller area network)을 기반으로 하는 실시간 분산 제어 방식의 로봇 제어기와 최고 10 Mbps의 데이터 전송 속도로 동작을 가능하게 하였다.

원격시스템의 상태를 조작지에서 관찰할 때는 시간 지연으로 인한 정확한 상태를 관찰할 수 있도록 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 이때, 시간 지연을 lumped delay라 하고 시간지연이 일정하다고 가정하였다. 시간 지연에 대한 정확한 예측된다고 가정할 경우, Fig. 2의 시스템은 가상 모델의 설계를 위한 시뮬레이터 모델은 2축 다관절 로봇의 1축과 2축에 대해서 동역학을 구하고 이것을 가상 로봇의 동역학으로 가정하여 제어기

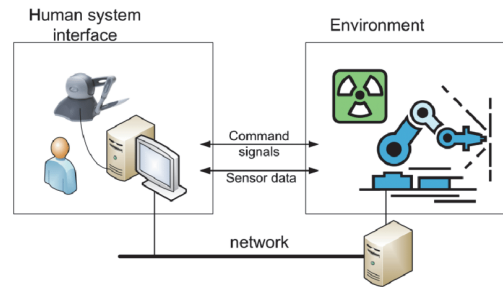


Fig. 1 Teleoperation system

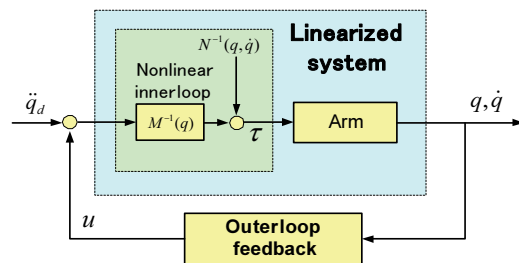


Fig. 2 Control structure of teleoperation system

를 설계하였고, 데이터 송수신 시간지연의 차이에 대해 모델링 오차로 두고 LQG/LTR의 제어기 설계 기법을 이용하여 제어기를 구성하였다

### 3. 원격 제어기 설계

제어기의 설계로는 조직적으로 안정도-강인성을 고려하여 선형제어기 설계가 가능한 LQG/LTR 방법을 적용하였다. 시뮬레이터가 데이터의 송수신 시간지연 차이를 시뮬레이터에서의 출력 시간지연으로 간주하여 시간지연에 강인한 제어기를 설계하였고, 시간지연 모델링 오차를 구하고 안정도-강인성 성능을 만족하도록 목표필터루프(TFL) 설계와 LTR에 의해 전체 시스템의 루프형상을 목표필터에 일치시켜 시스템을 시간지연에 강인하도록 하였다.

Fig. 2는 LQG/LTR 제어 구조를 나타내었고, 설계절차는 설계모델에 대해 루프형상을 얻을 수 있는 목표필터루프(target filter loop)를 설계하고, 보상된 시스템의 루프전달함수의 특이값을 목표필터루프의 특이값 형상으로 회복하는 루프전달회복(loop transfer recovery) 단계로 진행된다.

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

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

$$|E(j\omega)| = \left| 2\sin\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \right| \quad (2)$$

여기서  $\tau$ 는 지연시간, 원격제어시스템의 송수신 시간지연의 최대 100 msec로 설정하였다.  $\tau = 100$  msec 의 시간지연에 대한 모델링 오차의 크기 Bode 선도는 Fig. 3과 같다. 안정도-강인성 조

건을 만족하기 위해서는  $1+T^{-1}(j\omega)$ 의 최소 특이값이 항상  $|E(j\omega)|$  보다 크게 나타나야 한다.

목표필터루프 설계는 페루프 시스템이 요구되는 명령추종 성능 및 안정도-강인성 조건을 만족하도록 루프 형상을 결정하는 과정으로서 필터계인행렬  $H$ , 설계파라메타  $L$ 을 선정한다. 시간지연에 대하여 강인한 제어기를 설계하기 위해서 모델링 오차에 대하여 안정도-강인성 조건을 만족하도록 목표필터루프를 설계하였다.

선형화된 플랜트가 각 채널에 적분요소가 포함된 형태로 전달함수행렬(TFM)이 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 구해진 플랜트의 특이값 선도가 Fig. 4와 같이 모든 주파수 영역에서 일치된 형태

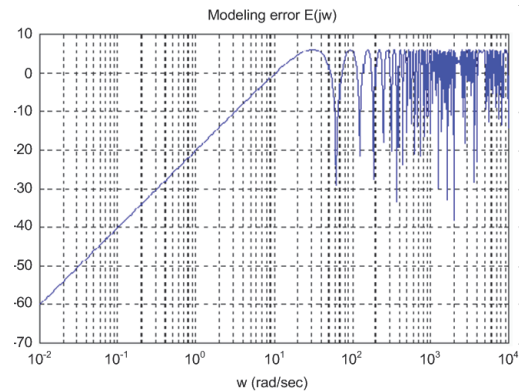


Fig. 3 Modelling error by time delay (100ms)

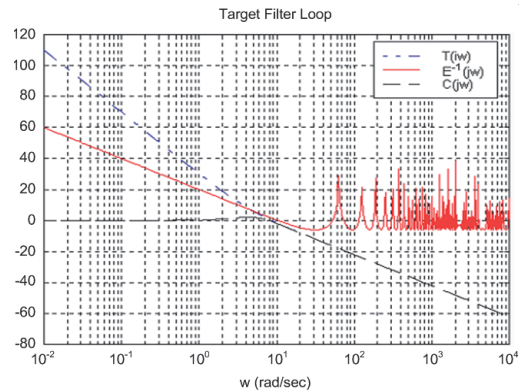


Fig. 4 Singular value line by stability-robust criterion

로 나타나고 이중 적분요소의 형태이므로 기울기는 -40 dB/dec로 나타나는 것을 알 수 있다.

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}H = \begin{bmatrix} \frac{1}{s^2} \\ \frac{1}{s^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서 필터의 설계파라미터 L은 별도로 정의할 필요없이 플랜트의 입력 행렬 B를 그대로 적용하면 된다. 다음으로 설계파라미터  $\mu$ 를 선정한다. 전달함수행렬에서 특이값은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\sigma_i[G_{KF}(j\omega)] \approx \frac{1}{\omega^2 \sqrt{\mu}} \quad (4)$$

설계파라미터  $\mu$ 는 식 (5)와 같이 안정도-강인성 조건을 만족하도록 루프형상을 설계함으로써 설정할 수 있었다. 안정도-강인성 문제를 만족시키기 위해서는 공칭 루프의 대역폭이  $\omega_c < \omega_m$  ( $\omega_c$ : 교차주파수,  $\omega_m$ :  $\sigma_{\max}=1$ 인 주파수)의 조건을 만족해야 하므로 안정하면서 최대한 응답속도가 빠르도록 루프의 대역폭을 8 rad/sec로 설정하고  $\mu$ 는 0.001로 설정하였다. Fig. 4와 같이 안정도-강인성 조건을 나타내는 시스템의 보드 선도를 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{\max}[E(j\omega)] &< \sigma_{\min}[I + T^{-1}(j\omega)] \\ \sigma_{\max}[C(j\omega)] &< \sigma_{\max}^{-1}[E(j\omega)] \end{aligned} \quad (5)$$

공칭 페루프 전달함수를  $C(j\omega)$ , 출력측으로 반연되는 최대 모델링오차를  $E_{\max}(\omega)$ 라고 할 때, 윗식을 만족하는 교차주파수의 범위는  $\omega_c < \omega_m$ 으로 제한되어야 한다.

안정도-강인성을 만족하도록 목표필터루프를 설

계하는데 있어서 시간지연에 의한 모델링 오차의 범위를 100 msec로 설정하였다. 설계시스템은 100 msec 이내의 시간지연에서는 안정적으로 제어되었고 설계파라미터에 의해 필터 게인 H는 다음과 같이 구해졌다.

$$H = [0.5772 \ 0.5772 \ 0 \ 0]^{-T} \quad (6)$$

#### 4. 제어 예측 실험

실험으로서 2축 수직 다관절 로봇에 대해 두

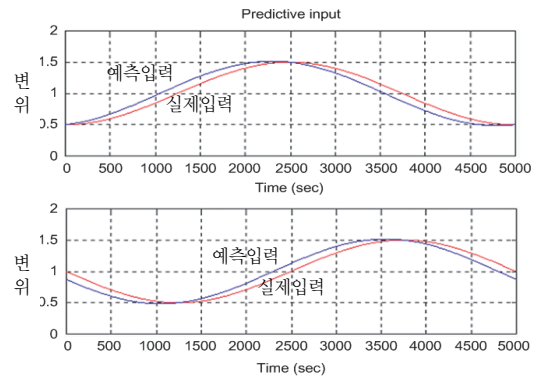


Fig. 5 Real input data and estimated input data

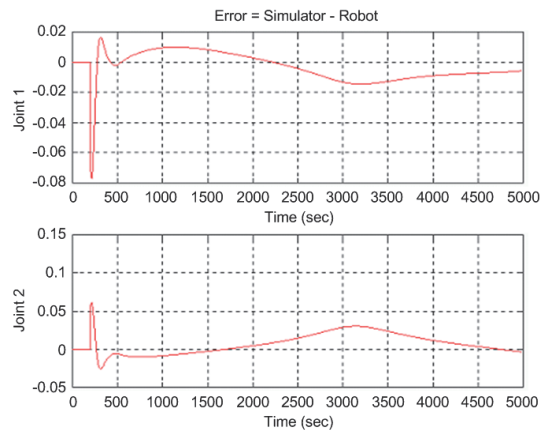


Fig. 6 Robot link error of real robot and simulator

개의 가상 로봇을 조작지와 원격지에 두고 2축과 3축에 대해서만 적용하고 시간지연의 추정과 예측의 방법을 적용하여 실험 결과를 Fig. 5와 Fig. 6으로 제시하였다.

목표필터루프가 설계되면 LQ 저가제어 방법을 이용해서 전체시스템의 루프를 목표필터루프에 일치시키는 루프전달회복(LTR) 과정을 거친다. 루프 전달회복은 폐루프시스템을 목표루프필터에 근사적으로 일치시키는 과정으로 제어게인행렬  $G$ 를 선정하였고, 루프전달회복은 저가제어 LQR문제(cheap control linear quadratic regulator problem)로 다음 식(7)의 제어대수 Riccati식의 해  $K$ 와 식(8)의 제어게인행렬  $G$ 를 구할 수 있다.

$$KA + A^TK + C^TC - \frac{1}{\rho}KBB^TK = 0 \quad (7)$$

$$G = \frac{1}{\rho}B^TK \quad (8)$$

Fig. 5에서는 실제 입력과 예측되어진 입력을 나타내며 거의 예측입력이 실제입력과 유사함을 볼 수 있다. Fig. 6은 로봇-시뮬레이터사 간의 관절오차를 나타내고 거의 0에 수렴함을 볼 수 있다. 제시한 방법에 대한 예측 결과를 비교하기 위하여 다음과 같이 실제입력과 예측된 입력의 비교와 실제로봇과 시뮬레이터를 통한 관절오차를 비교하였다.

Fig. 7은 곡선형태의 입력궤적에 대한 실제 로봇과 가상로봇의 궤적 추종 결과를 제시하였다. Fig. 7(a)와 (b)사이의 가로 2cm, 세로 2cm 정도의 오차가 발생하였으나, 시뮬레이터상의 위치가 실제로봇의 로봇의 위치로 변환시 모터의 백래쉬로 인한 위치 변환 오차인 것으로 판단된다.

### 5. 결론

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 파라미터, 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 제어를 모

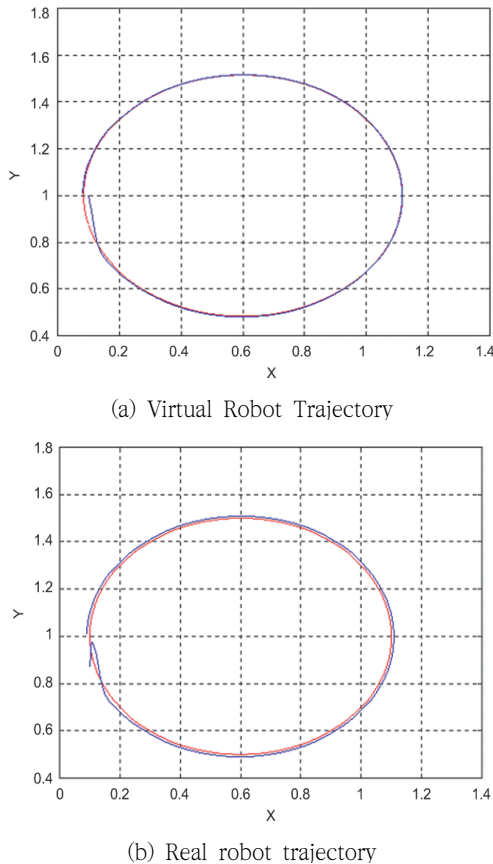


Fig. 7 Experiment result of simulator and robot

텔링 오차에 강인하도록 설계함으로써 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.

### 참고문헌

- [1] G. Stein and M. Athans, "The LQG/LTR procedure for multivariable feedback control design", *IEEE Trans. Autom. Control*, 32(2), pp. 105-114, (1987).
- [2] Nobuto. Matsuhira, Hideki. Ogawa and Taku. Yoshimi, "Life support robot that coexists with humans", *Toshiba Review*, pp. 112-115, (2005).
- [3] F. H. D. Guaracy, D. L. F. Silva and L. H. C. erreira, "On the properties of augmented open-loop stable plants using LQG/LTR control", *IEEE Trans. Autom. Control*, 60(8), pp. 2172-2176, (2015).
- [4] M. Rakotondrabe, C. Clévy and P. Lutz, "Complete Open Loop Control of Hysteretic Creeped and Oscillating Piezoelectric Cantilevers", *IEEE Trans. on Autom. Science and Eng.*, 7(3), pp. 440-450, (2010).
- [5] B. Bhikkaji and S.O.R. Moheimani, "Integral resonant control of a piezoelectric tube actuator for fast nanoscale positioning", *IEEE Transactions on Mechatronics*, 13(5), pp. 530-537, (2008).
- [6] I. Mahmood and S.O.R. Moheimani, "Improvement of accuracy and speed of a commercial AFM using positive position feedback control", *American Control Conf.(ACC 2009)*, pp. 973-978, (2009).

---

(접수: 2022.01.04. 수정: 2022.01.24. 게재확정: 2022.02.04.)