

## 인공신경망을 이용한 지연시간이 일정치 않은 시스템의 제어 Neural Network-based Control for Uneven Delay-time Systems

\*이 미경, 이 지홍

충남대학교 메카트로닉스 공학과(Tel: +82-42-821-7783, E-mail: mklee@snoopy.chungnam.ac.kr)

**Abstract** We propose a control law in discrete time domain of the bilateral feedback teleoperation system using neural network and the reference model type of adaptive control. Different from traditional teleoperation systems, the transmission time delay irregularly changes. The proposed control method controls master and slave systems through identification of master and slave models using neural networks.

**Keywords** Teleoperation, Adaptive Control, Identification

### 1. 서론

제어기로부터 제어대상시스템에까지 명령이 전달되는데 시간 지연이 있는 시스템은 제어가 까다롭다고 알려져 있다. 특히 그 지연시간이 변하는 경우에는 더욱 제어가 어려울 가능성이 있다. 시간지연이 있는 대표적인 시스템으로 텔레로봇은 W.R.Ferrell[1] 이후 꾸준히 연구되어 시스템의 불안정을 없애기 위한 방법들도 다양하게 연구되었다. 1988년 Hannaford등은[2] 환경과의 접촉시 힘교환 방법을 사용하여 원격조작로봇시스템을 구현하였고, Anderson등은[3] 패시비티 이론과 스키테어링이론을 이용하여 이상적인 제어법을 제안하였다. 이후 패시비티 이론은 시스템의 안정성을 증명하는데 많이 사용되었다. 또 다른 시도로 이석환등은 [4,5] 원격조작로봇시스템의 제어모드를 접근단계와 접촉단계로 나누어 접근단계에서는 스미스(Smith) 원리를 적용하고, 접촉단계에서는  $H_\infty$  최적화 기법을 기반으로 건설한 제어시스템을 설계하였다. 이는 시스템의 파라미터를 모르거나 불확실한 환경, 시간지연의 부정확한 측정등에 대해 강인한 제어라는 면에서 기존의제어방법과 다르다고 할 수 있다. 건설제어와 비슷하지만 파라미터가 변하게 되는 경우 적응제어를 이용하여 해결할 수 있는데, Hashtrudi-Zaad등은[6] 조작자의 힘명령에 의한 임피던스가 종로봇이 환경측에 가하게 되는 힘에 의한 임피던스와 같도록 하여 "Transparency Teleoperation"을 적응제어법으로 구현하였다. 본논문은 이와같이 시간지연이 있는 원격조작 로봇시스템에 적응제어방법 중 한가지 방법인 간접적용방법을 적용하였다. 주로봇과 종로봇의 모델을 만들고 각각의 시스템 출력이 모델의 출력과 같아지도록 신경회로망학습을 이용하여 시스템을 동화(Identification)한 후 제어입력을 주었다.

### 2. 원격조작로봇시스템

원격조작로봇시스템은 그림 1과 같이 크게 조작자, 주로봇, 통신블록, 종로봇, 환경의 다섯 개의 부시스템으로 나눌 수 있다. 조작자의 속도명령은 통신블록을 통해 종로봇에 전달되고, 환경과의 접촉시 힘센서에 의해 측정된 힘은 다시 통신블록을 통해 조작자에게 귀환된다. 시스템 블록 다이어그램과 수식에서 사용된 변수들은 표 1에 표기하였다.

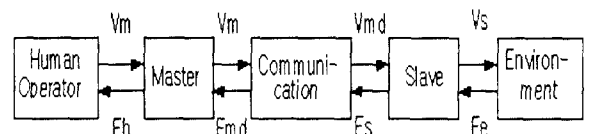


그림 1. 원격조작로봇 시스템의 블록 다이어그램  
Fig. 1 Block diagram of the teleoperation system.

본 연구에서 다루어지고 간단한 로봇과 종로봇의 동력학식은 다음과 같다.

$$M\dot{v}_m + Dv_m + K \int^t v_m dt = f_h - f_{md} \quad (1)$$

$$M\dot{v}_s + Dv_s + K \int^t v_s dt = f_s - f_e \quad (2)$$

연속시간영역에서 표현되는 동력학식은 본 논문에서 사용될 간접 적응 제어를 위해 차분 방정식으로 표현하여야 한다. 따라서 주로봇과 종로봇의 시스템을 차분방정식으로 나타내면 식(3).

식(4)와 같다.

표 1 시스템 매개변수  
Tabel 1 Teleoperator variables

		Variables	
Human Operator	$F_h$	applied force	
Master	$F_m$	force	
	$v_m$	velocity	
	$\tau_m$	motor torque	
	$x_m$	position	
Communication Block	$F_{md}$	desired force	
	$v_{sd}$	desired velocity	
Slave	$v_s$	velocity	
	$F_s$	force	
	$x_s$	position	
	$\tau_s$	motor torque	
Environment	$F_e$	contact force	

주로봇:  $G_d = \frac{1}{0.2s^2 + 4.0s}$

$$y[(k+1)T] = \frac{1}{(0.2+4T)} \times \{ (0.4+4T)y[kT] - 0.2y[(k-1)T] + T^2x[(k+1)T] \} \quad (3)$$

종로봇:  $G_s = \frac{7.2s+9}{s^2+7.22s+9}$

$$y[(k+1)T] = \frac{1}{(1+7.22T+9T^2)} \times \{ (2+7.22T)y[kT] - y[(k-1)T] + (7.2T+9T^2)x[(k+1)T] - 7.2Tx[kT] \} \quad (4)$$

### 3. 신경망을 이용한 원격조작로봇시스템 적응제어

#### 3.1 시스템 동화(Identification) 및 적응제어

플랜트의 매개변수가 불확실하거나 미지의 변수가 있음에도 불구하고 목표한 시스템의 성능을 유지하기 위한 제어 방법으로 적응제어를 들 수 있다. 불확실한 매개변수의 예로는 로봇제어시의 로봇의 하중이나 배 운행시 물 깊이나 바람, 파도의 상태등을 들 수 있다. 이는 일단 제어를 한 뒤에는 결과적으로 얻는 시스템의 성능이 유지되는 건설제어와는 달리 업데이트 범칙에 의해 계속해서 성능을 향상시켜 나가는 것이 적응제어의 특징이다. 적응제어는 크게 모델참조형 적응제어(Model Reference Adaptive

Control)와 자기조준형 적응제어(Self Tuning Adaptive Control)로 나눌 수 있다[8]. 모델참조적응제어는 적응제어 시스템의 이상적인 응답이 모델의 출력과 같도록 제어법을 갱신하는 것이고, 자기조준적응제어는 온라인 파라미터 예측기를 이용하여 제어대상 입력출력쌍을 맞추어나가는 것이다. 지금까지의 모델참조적응제어는 미지의 매개변수를 갖는 LTI(Linear Time Invariant)플랜트에 많이 치중하여 왔다. 이와는 달리 본문에서는 비선형 미분 방정식이나 차분 방정식으로 표현되는 플랜트를 적응 제어하려고 한다. 적응제어를 하기전에 주로봇과 종로봇의 비선형 동력학식은 시스템을 알지 못하므로 같은 입력에 대해 비슷한 출력을 낼 수 있도록 하는 동화과정이 필요하다. 동화(Identification)의 목적은 모델의 인자들을 적당히 맞추고 플랜트와 동화모델과의 오차를 줄이도록 하는 성능 함수를 최적화하는데 있다. 플랜트를 적응제어하기 위한 방법은 크게 직접 제어와 간접 제어 두 가지로 나눌 수 있다. 직접 제어는 제어기의 매개변수들이 출력오차의 놈을 줄이는 방향으로 정하여지고, 간접 제어에서는 플랜트의 매개변수들이 매 반복  $k$  마다  $\hat{p}(k)$  를 실제 제어 매개벡터  $p(k)$  로 여겨 제어기의 매개벡터  $\theta(k)$  를 선택한다. 이런 직접, 간접 적응 제어는 비선형 시스템의 전 영역에서 이루어져 같은 시스템으로 여겨질 수 있다. 그림 2, 그림 3은 LTI시스템의 두 가지 방법, 직접 적응제어와 간접 적응 제어에 대한 시스템의 구조를 나타낸 것이다. LTI 시스템의 적응제어를 신경회로망을 이용하여 비선형시스템으로 확장하는 것은 3.2절에서 다룬다.

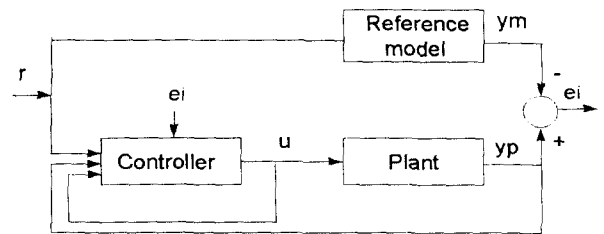


그림 2. 직접 적응 제어  
Fig. 2 Direct adaptive control

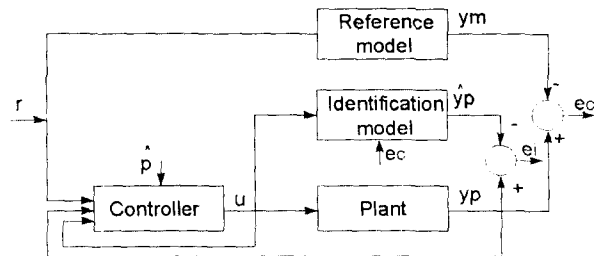


그림 3. 간접 적응제어  
Fig. 3 Indirect adaptive control

그림 2, 그림 3에서  $r$  는 참조입력,  $u$  는 제어입력,  $e_c(k)$  는 플랜트와 시스템 등화모델과의 출력오차를 나타내고,  $e_c(k)$  는 참조모델과 플랜트와의 출력오차를 나타낸다.

우리가 사용하고 있는 모델참조적응제어에서 모델의 다음스테이스트  $\hat{y}_p(k+1)$  를 생성해 낼 때 플랜트를 등화하기 위해 모델의 출력에 의한 다음 상태변수를 식(5)와 같이 등화모델의 현재와 과거상태변수  $\hat{y}_p(k)$ ,  $\hat{y}_p(k-1)$  로 계산을 하게되는 병렬 등화 모델인 경우 파라미터가 일정한 값으로 수렴하거나 모델과 실제 플랜트의 출력간의 오차가 0으로 감을 보장할 수 없다.

$$\hat{y}_p(k+1) = \hat{a}_0 \hat{y}_p(k) + \hat{a}_1 \hat{y}_p(k-1) + N[u(k)] \quad (5)$$

따라서 등화모델대신 플랜트의 실제 출력  $y_p(k)$ ,  $y_p(k-1)$  를 등화모델로 귀환하여 모델의 다음 상태변수  $\hat{y}_p(k+1)$  를 생성해 내는 직렬-병렬 등화 모델을 사용한다. 이를 수식으로 나타내면 다음 식(6)와 같다.

$$\hat{y}_p(k+1) = \hat{a}_0 y_p(k) + \hat{a}_1 y_p(k-1) + N[u(k)] \quad (6)$$

여기서  $N[u(k)]$  는 신경회로망에 의해 생성되는 입력이다. 이와 같이 허용오차안에서 시스템 등화가 끝나면 제어를 시작한다. 그림 4, 그림 5는 무작위 함수 입력에 대한 주로봇과 종로봇의 시스템 등화 결과이다. 그림 4와 그림 5에서 각각  $y_p$  는 주로봇과 종로봇의 시스템 출력이고  $\hat{y}_p$  는 신경회로망에 의해 학습된 시스템 등화 출력이다. 신경회로망 학습에 사용된 스텝크기  $\eta = 0.25$  이고 반복횟수  $k$  는 5,000 번이다. 그림에서 알 수 있듯 시스템의 무작위 입력에 대한 시스템 출력을 신경회로망 출력이 잘 추종함을 알 수 있다.

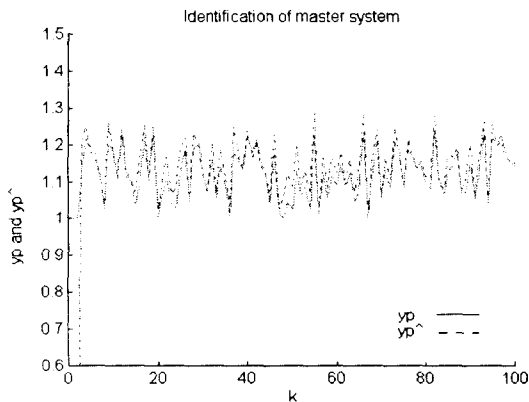


그림 4 주로봇의 시스템 등화  
Fig. 4 System identification of master robot

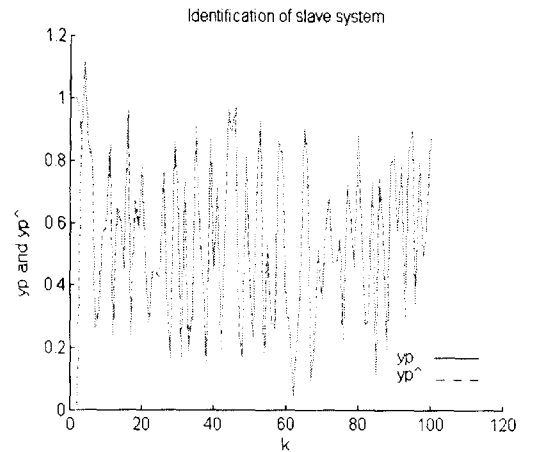


그림 5. 종로봇의 시스템 등화  
Fig. 5 System identification of slave robot

### 3.2 신경회로망을 이용한 비선형 시스템의 적응제어

인공신경망을 이용한 비선형 시스템의 적응제어에서 사용한 간접제어를 시간지연이 있는 원격조작 로봇시스템에 적용한다. 그림 6은 본문에서 적은 신경회로망에 의한 적응제어과정을 나타낸 그림으로 제어 목표는 플랜트와 참조모델 출력의 오차  $e_c(k) = y_p(k) - y_m(k)$  이  $\lim_{k \rightarrow \infty} e_c(k) = 0$  이 되도록 제어 입력  $u(k)$  를 결정해 주는 것이다. 주로봇과 종로봇은 각각 참조모델을 가지고 모델의 출력을 내도록 학습된다. 이 때 과거의 상태변수를 종로봇에게 전해주므로써 통신블록의 시간지연을 나타내었다.

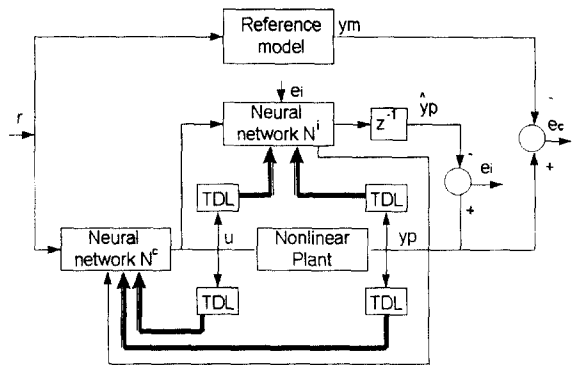


그림 6. 신경회로망을 이용한 비선형시스템의 간접적응제어  
Fig. 6 Adaptive control of nonlinear systems using neural network

그림에서  $y_p(k-2)$ ,  $y_p(k-1)$  과 같은 과거 상태변수는 TDL을

이용하여 표현하였다.

모델의 출력  $y_m$ 를 따라감을 알 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

주 로봇과 종 로봇의 시스템은 각각 식(3)과  $0.6y_m(k) +$  식(4)와 같이 구성하였고, 참조모델은  $y_m(k+1) = 0.2y_m(k-1) + r(k)$ , 참조 입력은  $r(k) = \sin(2\pi k/25)$ 를 사용하였다. 시스템 등화 후 제어시 사용된 스텝크기  $\eta = 0.01$  이고 반복횟수  $k$ 는 5,000 번이다.

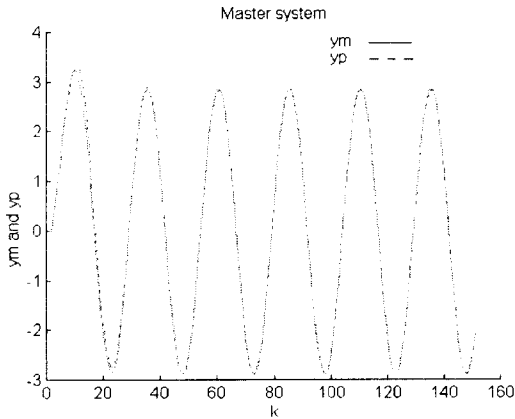


그림 7. 주 로봇의 출력과 참조모델의 출력  
Fig. 7 Outputs of master robot and reference model

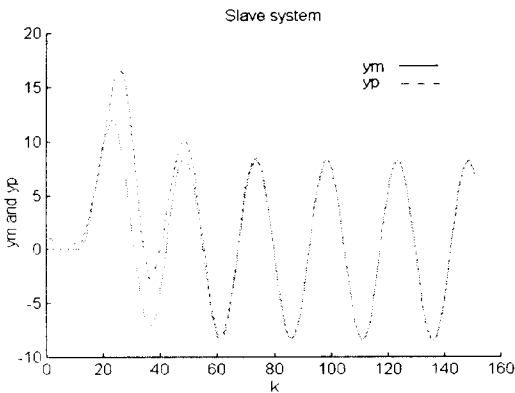


그림 8. 종 로봇의 출력과 참조모델의 출력  
Fig. 8 Outputs of slave robot and reference model

그림 7과 그림 8은 주 로봇과 종 로봇에 각각의 참조 모델을 두고, 주 로봇의 출력과 종 로봇의 입력 사이에 시간지연을 둔 하나의 시스템으로 만든 후 시스템 등화의 결과를 이용하여 제어한 결과이다. 그림과 같이 주 로봇과 종 로봇의 출력  $y_p$ 가 각각의 참조

#### 5. 결론

시간지연이 있는 원격조작로봇 시스템에 시스템 파라미터가 변하더라도 목표하는 성능을 그대로 유지할 수 있는 특성을 가지는 적응제어를 적용하여 조작자의 조작명령이 통신블럭을 거쳐 종로봇에게 전달되고 환경으로 그대로 전달되도록 하는 원격 환경을 구성하였다. 이때 참조모델의 출력과 같은 출력을 얻기 위한 제어입력은 신경회로망 학습을 이용하였다. 본문에서는 비선형 과거 상태변수와 선형입력으로 구성된다고 보고 시뮬레이션하였으나 실제 시스템은 그렇게 간단하지 않으며 단순한 조작명령을 추종하는 것 외에 접촉시의 힘깨환이나 탄성계수등의 고려가 빠져있다.

#### 알림

본 연구는 정보통신부 “초고속정보통신 응용기술개발사업”의 지원으로 이루어졌음.

#### 참고문헌

- [1] W.R.Ferrell, "Remote Manipulation with Transmission delay," *IEEE Trans. Human Factors in Electronics HFE-6*, no. 1, 1965.
- [2] B. Hannaford and R.J.Anderson, "Experimental and Simulation Studies of Hard Contact in Force Reflecting Teleoperation," in *Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, 1988.
- [3] R.J.Anderson, M.W.Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 34, No. 5, pp. 494-501, May 1989.
- [4] Sukhan Lee, Kyuwon Jeong, "Design of Robust Time Delayed Teleoperator Control System," *Proc. of the IEEE International Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 1413-1420, Sep. 1994.
- [5] Sukhan Lee and Hahk Sung Lee, "Design of Optimal Time Delayed Teleoperator Control System," *Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3252-3258, May 1995.
- [6] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Adaptive Transparent Impedance Reflecting Teleoperation," *Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, Minneapolis, pp. 1369-1374, April 1996.
- [7] K.S. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification and Control Dynamical Systems Using Neural Networks", *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 1, No. 1, pp. 4-27, March 1990.
- [8] J E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.