

# Teleoperating system의 적응학습제어에 관한 연구 Study of adaptive learning control for teleoperating system

\*최 병 현\*, 국 태 용\*\*, 최 혁 렬\*\*\*

\*성균관대학교 대학원 메카트로닉스공학과 ( Tel: (0331) 290-7481; E-mail: xevious@yurim.skku.ac.kr )

\*\*성균관대학교 전기·전자 및 컴퓨터공학부 ( Tel: (0331) 290-7137; E-mail: tykuc@yurim.skku.ac.kr )

\*\*\*성균관대학교 기계공학부 ( Tel: (0331) 290-7449; E-mail: hrchoi@yurim.skku.ac.kr )

**Abstract** In master-slave teleoperating system, it is important that the system has good maneuverability. In this paper, it is addressed an adaptive learning control method applicable to the master-slave system. This control scheme has the ability to estimate uncertain dynamic parameters included intrinsically in the system and to achieve the desired performance without the nasty matrix operation. The proposed method is applied to a master-slave teleoperating system composed of two SCARA robots and verified experimentally.

**Keyword** Teleoperation, Adaptive learning control, Maneuverability, Master-slave system

## 1. 서론

원격조작 시스템(teleoperating system)은 마스터 로봇(master robot)을 조작하는 조작자, 조작자의 명령을 원거리에 전달하는 마스터-슬레이브 시스템(master-slave system), 그리고 원거리에 있는 작업대상과 같이 크게 3가지로 구성되어 있으며, 여기서 마스터슬레이브 시스템은 다시 마스터 로봇과 슬레이브 로봇, 통신 채널로 구분할 수 있다.

원격조작 시스템에서 가장 중요하게 생각되는 것은 조작성능에 관한 문제이다[7]. 그러나 원격조작 시스템은 조작자와 작업대상의 불확실한 동역학적 특성을 필연적으로 포함하게 되므로, 조작성능을 높이기 위해서는 조작자와 작업대상의 동역학적 특성에 상관없이 항상 원활하게 동작하는 제어기를 필요로 하게 된다. 이를 위해 수많은 연구가 진행되어 왔으며 Raju 등은 조작자와 작업대상의 동역학적 특성을 impedance로 다룬 2-port-network-model을 제안하였다[6]. 이 모델은 시스템이 안정하기 위한 충분조건을 제시하고는 있지만, 제어변수들에 주어지는 과도한 제약으로 인하여 시스템의 성능이 저하될 수 있는 단점이 있다[7,8]. Kim 등은 외력에 비례하여 제어 개인을 감소시킴으로써 시스템의 안정성을 높이는 SCC(Shared Compliance Control)를 제안하였다[1,2]. SCC는 슬레이브 로봇이 작업대상과 접촉함으로써 인하여 발생하는 힘/토크 신호를 저주파 필터를 거쳐 슬레이브 로봇 자체 내에서 피드백시키는 형태를 취함으로써 슬레이브 로봇에 능동적인 compliance를 제공하여 보다 더 유연하게 동작하도록 하였다. Otsuka와 Kosuge는 조작 성능을 높이기 위한 방법으로 VIM (Virtual Internal Model)을 이용한 force-sum-driven 방식을 제안하였다[5]. 이들이 제안한 방법은 시스템의 안정성을 위하여 마스터와 슬레이브 로봇에서 감지된 힘/토크 신호만을 교환하며, 힘/토크의 두 벡터합을 VIM에 대한 입력으로 하여 엔드이펙터(end-effector)의 위치를 결정하게 된다. 따라서 VIM은 저주파 필터로 작용하게 되어 입력된 힘이 고주파 성분을 포함하고 있더라도 마스터 로봇과 슬레이브 로봇 모두 부드럽게 동작을 하게 된다.

한편 로봇 매니플레이터에 대하여 모델링 오차와 외란에 대한 안정성을 보장하기 위한 방법으로 강인제어와 학습제어를 적용한 사례가 있다. Kuc과 Nam 등은 로봇의 경로제어에 대하여 비

례미분제어와 적응학습을 혼합한 반복학습 제어기를 제안하였다 [3,4]. 이들이 제안한 제어기는 피드백루프에 비례미분 제어기를, 피드포워드루프에 적응학습 제어기를 적용하였으며, 파라미터 추정을 위해 시스템의 가속도나 추정된 관성행렬의 역행렬을 사용하지 않은 것이 특징이다.

본 연구에서는 이와 같은 적응학습제어기를 이용하여 원격조작 시스템에 적용할 수 있는 새로운 적응학습제어기를 제안하고자 한다. 제안된 제어기는 실시간 파라미터 추정기를 이용하여 조작자와 작업대상의 불확실한 동역학적 특성까지도 추정하게 되므로 조작자에 관계없이 항상 원활한 조작이 가능한 장점이 있다.

## 2. 적응학습 제어이론을 이용한 원격조작 시스템

### 2.1 적응학습 제어이론

본 논문에서 사용한 적응학습제어기법의 파라미터 추정기는 시스템의 가속도나 추정된 관성행렬의 역행렬을 사용하지 않기 때문에 어떠한 필터나 추정된 관성행렬의 역행렬 존재에 관한 조건을 필요로 하지 않는다. 여기서는 본 논문에서 사용한 적응학습 제어이론에 대하여 간단히 알아보도록 하자.

n개의 강체로 구성된 로봇 시스템의 수학적 모델은 j번째 반복에 대하여 다음과 같이 기술된다.

$$\Sigma: D(q^j(t)) \ddot{q}^j(t) + B(q^j(t), \dot{q}^j(t)) + F(q^j(t), \dot{q}^j(t)) + T_a(t) = T^j(t) \quad (1)$$

여기서 첨자 j는 반복회수를 나타내며,  $q^j(t)$ 는 일반화된 관절 좌표,  $D(q^j(t))$ 는 관성행렬,  $B(q^j(t), \dot{q}^j(t))$ 는 원심력과 코리올리 힘의 합,  $F(q^j(t), \dot{q}^j(t))$ 는 중력과 마찰력,  $T_a(t)$ 는 외란,  $T^j(t)$ 는 각 관절의 토크 입력을 의미한다. 시스템에 대한 완전한 지식이 없기 때문에 이상과 같은 문제를 일반적인 방법으로 풀어낸다는 것은 상당히 어려운 일이다. 또한 미지의 시스템 파라미터가 부하의 변화 등에 의해 시간에 따라 변하게 되면 더욱

어려워진다. 이러한 형태의 시스템에서 외란  $T_d(t)$ 까지 변화가 되면 적응 제어기법을 사용하기도 상당히 어려워진다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 제안된 것이 반복학습기법이다.

반복학습 제어 전략에서 j번째 반복에 대하여 토크입력  $T'(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$T' = E'_o + E' + H' \quad (2)$$

여기서  $E'_o$ ,  $E'$ ,  $H'$ 는 각각 피드백 에러 입력, 추정오차 입력, 그리고 피드포워드 학습 입력이다.  $E'_o$ 는 비례미분 형태의 제어항이며 다음과 같다.

$$E'_o = L(\dot{e}' + ae') \quad (3)$$

여기서  $e' \triangleq q_d - q'$  이고,  $L$ 은 대칭 positive definite 행렬이며,  $a$ 는 양(+)의 비례상수이며 초기조건으로, 모든  $j$ 에 대하여  $e'(0)$ 와  $\dot{e}'(t)$ 는 모두 0이다.

추정오차 입력  $E'$ 는 다음과 같이 구할 수 있으며

$$E' = \hat{D}_e(q')\dot{q}_d + \hat{B}_e(q', \dot{q}')\dot{q}_d + \hat{F}_e(q', \dot{q}') + a(\hat{D}_e(q')\dot{e}' + \hat{B}_e(q', \dot{q}')\dot{e}') \quad (4)$$

여기서  $(\hat{\cdot})$ 은 추정된 시스템을 의미하고,  $\hat{D}_e(q') \triangleq \hat{D}(q') - \hat{D}(q_d)$ ,  $\hat{B}_e(q', \dot{q}') \triangleq \hat{B}(q', \dot{q}') - \hat{B}(q_d, \dot{q}_d)$ ,  $\hat{F}_e(q', \dot{q}') \triangleq \hat{F}(q', \dot{q}') - \hat{F}(q_d, \dot{q}_d)$ 이다.

피드포워드 학습입력  $H'$ 는 다음과 같은 학습법칙에 의해 계산된다.

$$H'^{j+1} = H' + \beta E'_o \quad (5)$$

여기서  $\beta$ 는 학습률이며,  $0 < \beta < 2$ 의 범위를 갖는다.

이제 동역학적 시스템  $\Sigma$ 를 오차에 관한 식으로 정리를 하게 되면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D(q')\dot{z}' + B(q', \dot{q}')z' + Lz' \\ = \bar{D}_e(q')\dot{q}_d + \bar{B}_e(q', \dot{q}')\dot{q}_d + \bar{F}_e(q', \dot{q}') \\ + a(\bar{D}(q')\dot{e}' + \bar{B}(q', \dot{q}')\dot{e}') + \bar{U}' \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\bar{D}_e(q') \triangleq D_e(q') - \hat{D}_e(q_d)$ ,  $\bar{B}_e(q', \dot{q}') \triangleq B_e(q', \dot{q}') - \hat{B}_e(q_d, \dot{q}_d)$ ,  $\bar{F}_e(q', \dot{q}') \triangleq F_e(q', \dot{q}') - \hat{F}_e(q_d, \dot{q}_d)$ ,  $\bar{U}' \triangleq T_d - H'$ ,  $z' \triangleq \dot{e}' + e'$ 이고,  $D_e(q') \triangleq D(q') - \hat{D}(q_d)$ ,  $B_e(q', \dot{q}') \triangleq B(q', \dot{q}') - \hat{B}(q_d, \dot{q}_d)$ ,  $F_e(q', \dot{q}') \triangleq F(q', \dot{q}') - \hat{F}(q_d, \dot{q}_d)$ 이다.

또, 위의 에러에 관한 식 (6)을 미지의 파라미터에 대하여 정리하면 다음과 같이 간단히 된다.

$$\begin{aligned} D(q')\dot{z}' + B(q', \dot{q}')z' + Lz' \\ = Y(q', \dot{q}', q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)\bar{\theta}' + \bar{U}' \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $Y(q', \dot{q}', q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d) \in R^{n \times l}$ ,  $\bar{\theta}' \in R^l$ 이다.

파라미터 에러 벡터  $\bar{\theta}'$ 는 미지의 시스템 파라미터  $\theta$ 와 추정된 시스템파라미터  $\hat{\theta}'$ 에 대하여 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\theta}' \triangleq \theta - \hat{\theta}'$$

동역학적 시스템  $\Sigma$ 의 시스템 파라미터 벡터  $\theta$ 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\theta}^{j+1} = \hat{\theta}^j + \beta S^{-1} Y^{jT} z' \text{ for all } t \in [0, t_f] \quad (8)$$

여기서  $Y^j \triangleq Y(q^j, \dot{q}^j, q_d^j, \dot{q}_d^j)$ 이고,  $S$ 는 대칭 positive definite 계인행렬이다.

## 2.2 원격조작 시스템에 대한 적응학습 제어

적응학습제어기는 시스템의 파라미터 추정이 가능하므로 이를 원격조작 시스템에 적용할 경우 일반적인 마스터-슬레이브 시스템은 관절좌표계에서 다음과 같이 기술된다.

$$\tau_m + J_m^T f_m = D_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m + F_m \quad (9)$$

$$\tau_s - J_s^T f_s = D_s \ddot{q}_s + B_s \dot{q}_s + F_s \quad (10)$$

여기서 첨자  $m, s$ 는 각각 마스터 로봇과 슬레이브 로봇을 의미하며,  $q_m, q_s$ 는 로봇의 관절좌표,  $D_m, D_s$ 는 질량,  $B_m, B_s$ 는 원심력과 코리올리 힘의 합,  $F_m$ 과  $F_s$ 는 중력과 마찰력을 의미한다.  $f_m$ 은 조작자가 마스터 로봇에 가하는 힘,  $f_s$ 는 슬레이브 로봇이 작업대상에 가하는 힘을 의미하며,  $\tau_m$ 과  $\tau_s$ 는 각 관절에 입력되는 구동입력 토크를 나타낸다.

한편, 원격조작 시스템을 조작하는 조작자와 원격조작 시스템을 이용하여 작업하게될 작업대상의 동역학적 특성은 직교좌표계에서 다음과 같이 단순하게 나타낼 수 있다.

$$f_{op} - f_m = m_{op} \ddot{x}_m + b_{op} \dot{x}_m + k_{op} x_m \quad (11)$$

$$f_s = m_o \ddot{x}_s + b_o \dot{x}_s + k_o x_s \quad (12)$$

여기서 첨자  $op$ 와  $o$ 는 각각 조작자와 작업대상을 나타내며,  $x_m$ 과  $x_s$ 는 직교좌표계에서의 엔드이펙터의 좌표를 의미한다. 이제 조작자와 마스터 로봇을 학습제어기에 포함을 시키기 위해 조작자의 동역학적 특성을 마스터 로봇의 관절좌표계에 대하여 다시 쓰게 되면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} J_m^T f_{op} - J_m^T f_m = J_m^T m_{op} J_m \ddot{q}_m \\ + J_m^T (m_{op} J_m + b_{op} J_m) \dot{q}_m + F_{op} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $F_{op} \triangleq J_m^T k_{op} x_m$ 을 의미하며, 이제 식 (9)와 (13)으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_m + J_m^T f_{op} = (D_m + J_m^T m_{op} J_m) \ddot{q}_m \\ + (B_m + J_m^T m_{op} J_m + J_m^T b_{op} J_m) \dot{q}_m \\ + F_m + F_{op} \\ = M_m \ddot{q}_m + G_m \dot{q}_m + \Gamma_m \end{aligned} \quad (14)$$

이때  $M_m \triangleq D_m + J_m^T m_{op} J_m$ ,  $G_m \triangleq B_m + J_m^T m_{op} J_m + J_m^T b_{op} J_m$ ,  $\Gamma_m \triangleq F_m + F_{op}$ 이다.

또 슬레이브 로봇과 작업대상에 대한 학습제어는 마스터 로봇과 마찬가지로 하여 다음과 같이 정리된다.

$$\tau_s = M_s \ddot{q}_s + G_s \dot{q}_s + \Gamma_s \quad (15)$$

여기서  $M_s \triangleq D_s + J_s^T m_o J_s$ ,  $G_s \triangleq B_s + J_s^T m_o J_s + J_s^T b_o J_s$ ,  $\Gamma_s \triangleq F_s + F_o$ 이고,  $F_o \triangleq J_s^T k_o x_s$ 이다.

이제는 식 (14)와 (15)에서 구한 새로운 2개의 시스템에 대하여 각각 2개의 독립적인 적응학습제어기를 구성하여 원격조작 시스템의 적응학습 제어를 구현하여 보자. 그림 1은 전체적인 원격조작 시스템의 구성을 나타낸 것이며, 이때 마스터 로봇의 적응학습제어를 위한 궤적을 구하기 위하여 조작자와 마스터 로봇의 엔드이펙터 사이에 가상의 물체를 가정하였다. 이 가상물체는 다음과 같은 식으로 표시할 수 있으며

$$f_m = m_v \ddot{x}_m + b_v \dot{x}_m + k_v x_m \quad (16)$$

첨자  $v$ 는 가상물체를 의미한다. 이 가상물체는 마스터 로봇의 엔드이펙터에 고정되어 있는 것으로 가정하며 조작자의 힘에 의해 궤적을 발생시키고, 마스터 로봇은 이 궤적을 추종하도록 하였다.

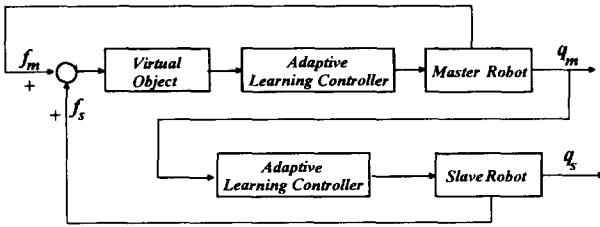


그림 1. 원격조작 시스템의 적응학습제어 블록다이어그램  
Fig. 1 Blockdiagram of Teleoperating system

매스터 로봇은 관절좌표에 대한 정보만을 슬레이브 로봇으로 전달하고, 슬레이브 로봇은 이를 추종하며 작업대상과의 접촉으로 인하여 발생한 힘을 매스터 로봇으로 전달함으로써 작업 대상에 대한 정보를 조작자에게 전달하게 된다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

실험장치의 전체적인 개략도는 그림 2에 나타내었다. 매스터 로봇과 슬레이브 로봇은 동일한 기구학적 구조를 가지고 있으며 각 관절의 길이는 각각 0.25[m], 0.18[m]이고, 한 대의 PC를 통하여 학습제어를 하게 되어 있으며 각각의 학습제어 모듈은 서로 독립적으로 동작하도록 설계되어 있으며, 각각의 로봇팔에 제어 명령을 주기 위한 D/A-보드와 조작자와 작업대상으로부터 힘을 감지하기 위한 힘/토크 센서를 장착하고 있다. 매스터-슬레이브 시스템은 매 1[m sec]마다 외부로부터의 힘과 위치 정보를 감지하고 서로 필요한 정보를 주고받으며 학습제어를 실시한다.

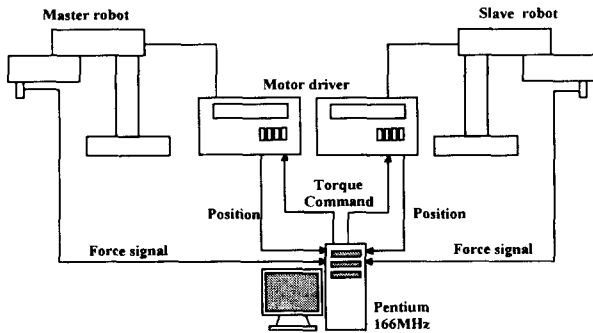


그림 2. 실험 장치의 개략도  
Fig. 2 Schematic diagram of Teleoperating system

#### 3.2 실험과정 및 결과

제안된 적응학습 제어기의 성능은 비례미분 제어기와 실험을 통하여 비교하였다. 실험과정은 조작자가 매스터 로봇을 조작하여 슬레이브 로봇으로 하여금 작업대상과 접촉하도록 하였으며 이때 슬레이브 로봇의 거동과 매스터 로봇의 힘반응을 중심으로 비교하였다.

##### 3.2.1 비례미분 제어기를 이용한 경우

그림 3과 4는 비례미분 제어기를 적용한 경우 매스터 로봇과 슬레이브 로봇에 대한 힘 반응을 보인 것이다.

초기 4초 동안은 조작자가 매스터 로봇에 아무런 힘을 가하지 않고 있는 상태이며, 4초이후는 조작자가 매스터 로봇을 이용하여 작업을 실시하고 있는 것을 나타낸다. 그림 3에 나타난 힘은

매스터 로봇과 조작자 사이의 힘을 x 방향과 y 방향으로 분해하여 도시한 것이다. 그림 3에서 매스터 로봇에 작용한 힘이 14초 이후 그 변화폭이 크게 나타나는 데 이것은 슬레이브 로봇이 작업대상과 접촉하여 발생한 힘이 매스터 로봇에 반영이 된 것이다. 그림 4에서 슬레이브 로봇이 작업 시작후 약 14초일 때 작업대상과 접촉한 것을 알 수 있다.

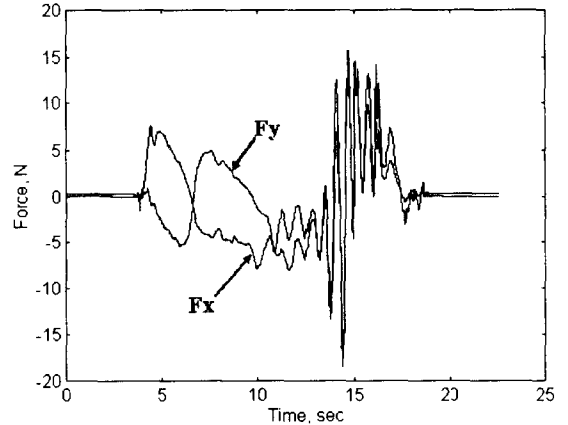


그림 3. 비례미분 제어에 대한 매스터 로봇의 힘 반응  
Fig. 3 Force of Master Robot for PD control

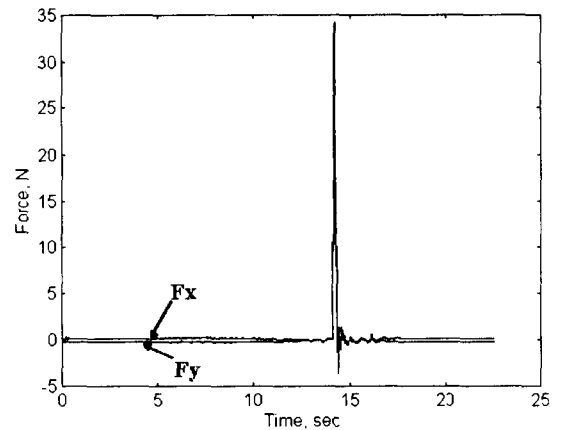


그림 4. 비례미분 제어에 대한 슬레이브 로봇의 힘 반응  
Fig. 4 Force of Slave Robot for PD control

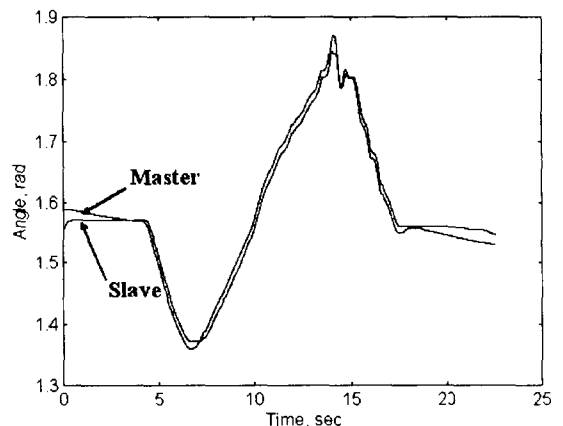


그림 5. 비례미분 제어에 대한 관절1의 위치 응답  
Fig. 5 Position of link 1 for PD control

그림 5와 6은 매스터 로봇과 슬레이브 로봇의 위치 응답을 도시한 것이다. 그림 5에서 초기 4초 동안은 슬레이브 로봇이 매스터 로봇과의 초기 오차를 줄이는 과정이고 4초 이후는 조작자가 매스터 로봇을 조작한 경로를 나타내고 있다. 그림 5에서 슬레이브 로봇의 관절 1은 매스터 로봇을 제대로 추종하지 못하는 것을 알 수 있으며 이로 인해 오차가 크게 나타나고 있다. 반면 그림 6에서 관절2는 어느 정도 매스터 로봇을 추종하는 것을 보이고 있다.

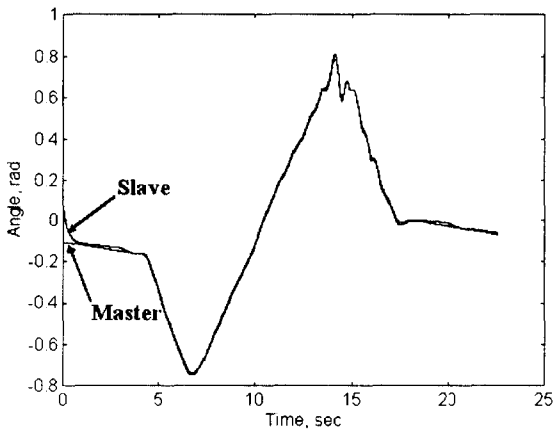


그림 6. 비례미분 제어에 대한 관절2의 위치 응답  
Fig. 6 Position of link 1 for PD control

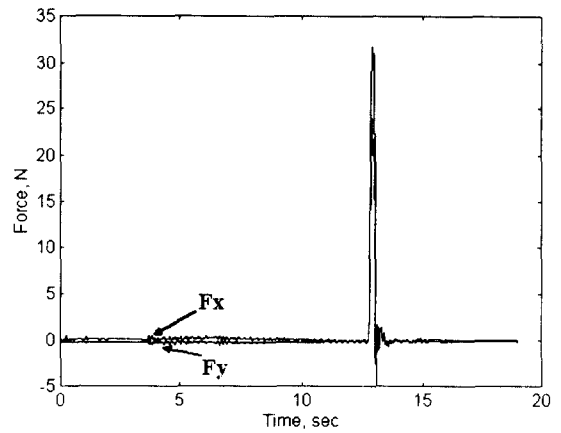


그림 8. 적응학습 제어에 대한 슬레이브 로봇의 힘 반응  
Fig. 8 Force of slave robot for adaptive learning control

그림 9와 10은 조작자의 조작에 따른 매스터 로봇과 슬레이브 로봇의 위치를 도시한 것이다. 초기 3초간 슬레이브 로봇이 매스터 로봇과의 초기 오차를 줄이는 것을 알 수 있으며, 슬레이브 로봇의 관절 1, 2 모두 매스터 로봇의 위치를 잘 추종하고 있다. 따라서 조작자는 정확한 작업을 수행할 수 있다.

### 3.2.2 적응학습 제어를 이용한 경우

그림 7에서 10은 적응학습 제어를 이용한 경우 매스터 로봇과 슬레이브 로봇의 거동을 도시한 것이다. 이 때 적응학습 제어기의 비례 게인과 미분게인은 비례미분 제어기와의 비교를 위해 비례미분 제어기의 게인을 그대로 사용하였으며 학습률  $\beta = 0.8$ 로 하였다.

그림 7과 8은 매스터 로봇과 슬레이브 로봇의 힘반응을 도시한 것이다. 그림 7에서 약 3초 후 조작자가 매스터 로봇을 이용하여 작업을 시작한 것을 알 수 있으며 그림 8에서 슬레이브 로봇의 힘반응에서 약 13초일 때 작업 대상과 접촉했음을 알 수 있다. 작업대상과 접촉후 매스터 로봇과 조작자 사이의 힘이 비례미분제어기를 사용한 것보다 변화폭이 줄어든 것을 알 수 있으며, 이것은 학습제어기에 의한 영향으로 생각된다.

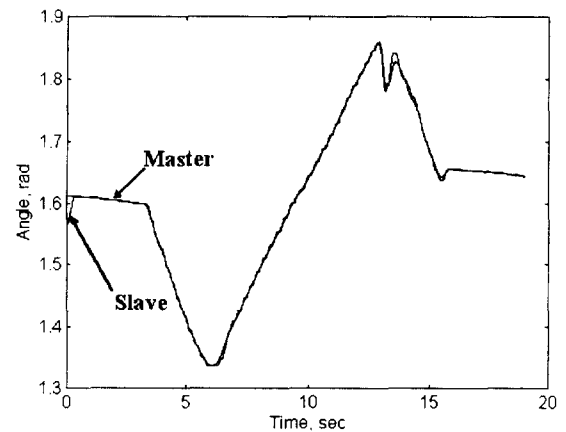


그림 9. 적응학습 제어에 대한 관절1의 위치 응답  
Fig. 9 Position of link 1 for adaptive learning control

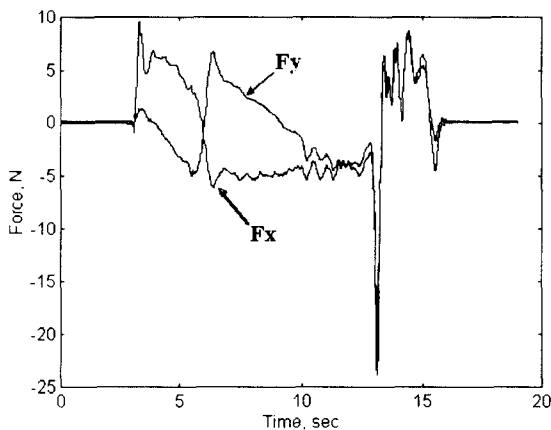


그림 7. 적응학습 제어에 대한 매스터 로봇의 힘 반응  
Fig. 7 Force of master robot for adaptive learning control

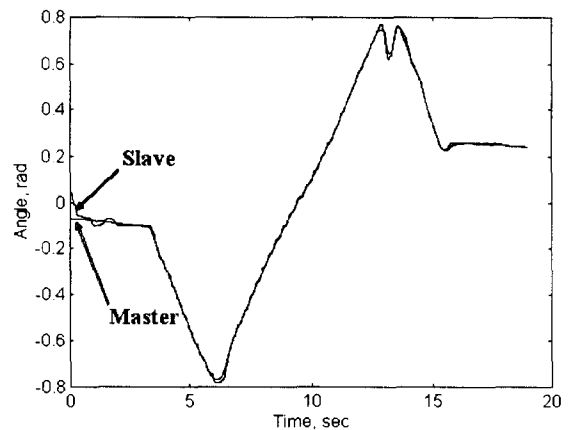


그림 10. 적응학습 제어에 대한 관절2의 위치 응답  
Fig. 10 Position of link 1 for adaptive learning control

#### 4. 결론

이상에서 우리는 원격조작 시스템에 대한 적응학습제어 방법을 제안하였다. 제안된 적응학습제어기는 슬레이브 로봇이 매스터 로봇의 위치를 추종하도록 설계하였고, 또한 매스터 로봇에 가상의 물체를 가정하고 이를 이용하여 매스터 로봇을 움직이는데 필요한 궤적을 만들었다. 실험 결과로부터 적응학습제어기를 사용한 경우 슬레이브 로봇은 매스터 로봇을 정확하게 추종하는 것을 알 수 있었고, 기존 제어기와 비교하여 월등히 좋은 성능을 보여주었다. 또한 작업 대상과 접촉시 매스터 로봇으로 힘을 전환하는 경우에 있어서도 기존 제어기보다 안정하다는 것을 보여주었다.

#### 참고문헌

- [1] W. S. Kim, B. H. 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, 1992.
- [2] W. S. Kim, P. G. Bakes, S. Hayati, and E. bokor, "Orbital replacement unit changeout experiments with a telerobot testbed system", *Proc. of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 2, pp. 2061-2031, 1991.
- [3] T. Kuc, and J. S. Lee, "An Adaptive Learning Control of Uncertain Robot System", *Proc. of IEEE the 30th Conf. on Decistion and Control*, pp. 1205-1211, 1991.
- [4] T. Kuc, K. Nam, and J. S. Lee, "An Iterative Learning Control of Robot Manipulators", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 6, pp. 835-842, 1991.
- [5] M. Otsuka and K. Kosuge, "Bilateral Telemanipulator System with Communication Time Delay Based on Force-Sum-Driven Virtual Internal Model", *Proc. IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, pp.344-350, 1995.
- [6] G. J. Raju, G. C. Vergheese and T. B. Sheridan, "Design issues in 2-port network models of bilateral remote mainpulation", *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1764-1767, 1989.
- [7] Y. Yokokohji, "Analysis and Design of master-Slave Teleoperation systems", Ph-D thesis, Department of mechanical engineering, Kyoto university, 1991
- [8] 정규원, "구조적 특이값( $\mu$ )을 이용한 시간지연이 있는 원격 조작 로봇시스템의 견실제어기 설계", *제어·자동화·시스템 공학 논문지*, 제2권, 1호, pp. 35-44, 1996.