

## 강인적응 알고리즘을 통한 Haptic Interface의 임피던스 제어

### A Robust Adaptive Impedance Control Algorithm for Haptic Interfaces

박 현, 이상철, 이수성, 이장명  
(Heon Park, Sang-Chul Lee, Su-Sung Lee, and Jang Myung Lee)

**Abstract** : Teleoperation enables an operator to manipulate remote objects. One of the main goals in teleoperation researches is to provide the operator with the feeling of the telepresence, being present at the remote site. For these purposes, a master robot must be designed as a bilateral control system that can transmit position/force information to a slave robot and feedback the interaction force. A newly proposed impedance algorithm is applied for the control of a haptic interface that was developed as a master robot. With the movements of the haptic interface for position/force commands, impedance parameters are always varying. When the impedance parameters between an operator and the haptic interface and the dynamic model are known precisely, many model based control theories and methods can be used to control the device accurately. However, due to the parameters' variations and the uncertainty of the dynamic model, it is difficult to control haptic interfaces precisely. This paper presents a robust adaptive impedance control algorithm for haptic interfaces.

**Keywords** : impedance control, robust control, adaptive control, master robot, teleoperation

#### I. 서론

원격조종 작업 시 조작자는 실제 작업장의 상황을 모니터를 통해 파악하면서 마스터 로봇을 이용하여 원격지의 슬레이브 로봇을 작동시키게 된다. 원격작업으로 가벼운 물체를 옮기는 경우는 단순히 모니터를 통한 영상정보만으로 원격지의 상황을 확인하며 마스터 로봇의 힘/위치 정보를 슬레이브 로봇에 전달하는 단방향 제어만으로도 어느 정도의 성능을 보장할 수 있다. 하지만 조립작업이나 그라인딩 작업의 경우와 같이 슬레이브 로봇과 작업대상물과의 접촉력이 생기는 경우는 약간의 위치오차도 커다란 힘오차를 유발하므로 슬레이브 로봇의 말단 장치뿐만 아니라 대상물체에도 커다란 손상이 가해질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 여러가지 힘제어 방식이 제안되었다. 먼저 임피던스 제어는 Hogan에 의하여 제안된 방식으로 힘과 위치 사이의 관계를 임피던스의 관계로 보고, 이 관계로부터 매니퓰레이터의 위치를 제어함으로써 힘제어를 하게 되는 방식이다[1]. 하이브리드 위치/힘제어 방식은 힘제어 방향과 위치제어 방향을 분리하여 각각 독립적으로 수행하는 방법이다[2]-[4]. 그리고 앞의 두 가지 방식의 장점을 결합시킨 하이브리드 임피던스 제어 방식이 있다[5][6]. 이처럼 힘제어 방식을 통한 원격작업의 경우, 원격지의 조작자가 대상물체의 변화에 대해 능동적으로 대처하기 위해서는 영상정보 뿐만 아니라 접촉힘에 관한 정보가 피드백 되는 양방향 제어가 이루어져야 한다. 또, 미세수술과 같은 정밀한 작업의 경우는 아주 작은 힘이라도 원격지의 조작자에게 정확히 피드백되어 복원되어야 한다. 이러한 정밀작업을 위해 마스터 로봇은 6자유도의 힘/위치 정보를 슬레이브 로봇에 정확히 전달할 수 있어야

할 뿐만 아니라, 슬레이브 로봇의 말단장치에 부착된 F/T 센서를 통해 측정된 정보를 정확히 피드백을 받아 복원할 수 있어야 한다. 이때 조작자는 슬레이브 로봇에서 피드백 되어 오는 힘 뿐만 아니라, 마스터 로봇의 마찰, 관성, 중력 등을 함께 느끼게 되므로 피드백 되어오는 힘이 작을 경우 조작자는 전달되어 온 힘을 제대로 느낄 수 없다. 그러므로 원격수술과 같은 미세한 힘을 복원하기 위해서는 마스터 로봇의 동역학 특성을 고려하여야 한다. 하지만 현재까지 이루어진 마스터 로봇 제어에 관한 연구는 기구의 기계적 동역학은 무시하고, 환경 접촉 모델에 대한 접촉안정성 및 성능에 관한 연구가 대부분이었다[7]-[10]. 본 논문에서는 6자유도 Haptic Interface를 마스터 로봇으로 사용하였으며[11], 동역학 특성을 고려한 힘복원 방식으로는 임피던스 제어방식을 사용하였다[1][12]. 본 Haptic Interface 기구는 병렬형 매니퓰레이터의 형태로서 폐쇄형 해가 존재하는 역기구학을 통해 동역학 방정식을 유도하였다. 하지만, 이러한 역동역학 방정식은 그 계산과정의 복잡성으로 인해 실시간 제어에 어려움이 있다. 따라서 실시간 제어를 위한 단순화된 동역학 방정식을 구하였으며, 이로 인해 발생하는 모델링 오차를 보상하기 위해 강인제어 알고리즘을 사용하였다[13]-[16]. 뿐만 아니라 임피던스 제어방식을 통한 힘복원을 위해 조작자와 Haptic Interface사이의 상호 접촉력의 관계를 접촉 임피던스로 모델링하였으며, 조작자가 슬레이브 로봇에 힘/위치 정보를 명령으로 전달하기 위해 Haptic Interface를 움직이면, 이때 가하는 힘의 변화와 작업의 종류에 따라 접촉 임피던스 파라메타 값이 변화하게 된다. 이러한 파라메타는 작업도중 수시로 변동하는 값이므로 언제나 불확실성을 포함하게 되어 Haptic Interface의 안정성을 저해하는 요인으로 작용하게 된다. 한편 조작자가 Haptic Interface에 가하는 힘의 변화가 커지면 임피던스 파라메타의 값 또한 큰 폭으로 변화하게 되므로, 강인제어 알고리즘만으로는 안정성을 보장할 수 없으며,

접수일자: 2001. 10. 22., 수정완료: 2002. 8. 8.

박 현, 이상철, 이수성, 이장명 : 부산대학교 전자공학과(blueheon@pusan.ac.kr/ss2110@hyowon.pusan.ac.kr/lsora@dreamwiz.com/jmlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

파라메타 추종 알고리즘이 필요하다.

그러므로 본 논문에서는 Haptic Interface의 모델링 오차 및 조작자와 Haptic Interface 사이의 접촉 임피던스 파라메타의 변화에 강인하고 안정한 제어를 설계하고자 한다. 먼저 II장에서 선행 연구로 개발된 6자유도 Haptic Interface기구와 같은 혼합 병렬형 기구의 동역학 해석방법에 대해 설명하고, III장에서 변화하는 임피던스 파라메타 값을 추종하는 적응 제어 알고리즘에 대해서 설명하며, IV장에서 양방향 임피던스 제어 및 강인제어 알고리즘에 대해서 설명하고, V장, VI장에서는 시뮬레이션 및 실험을 통해 앞 장에서 설명한 알고리즘에 대해 확인하며, 마지막으로 VII장에서 결론을 맺는다.

II. Haptic Interface의 동역학 해석

그림 1에 선행연구를 통해 설계된 Haptic Interface 기구를 나타내었다[11]. 본 기구는 병렬기구로 6개의 능동관절과 3개의 수동관절을 갖는 6자유도 기구이다. 이와 같은 병렬형 로봇의 경우 기구의 동특성 영향이 적고 해석이 어려우므로 동특성 연구는 크게 진행되어 있지 않으며, 기구적으로는 직렬형 로봇과 듀얼형태를 갖는다. 본 연구에서는 병렬형 매니퓰레이터의 형태로서 폐쇄형 해가 존재하는 역기구학을 통해 동역학방정식을 유도한다. 하지만 이러한 역동역학 방정식은 그 계산과정의 복잡성으로 인해 실시간 제어에 어려움이 있다. 따라서 실시간 제어를 위한 간단한 동역학 방정식을 위해 다음과 같이 가정하였다.

[가정] Haptic Interface의 각 Link질량을 무시하고 모든 질량이 상판에 집중되어 있다고 가정한다.

위의 가정에 의해 각 직렬링크의 운동에너지와 위치에너지는 무시하고, 상판만을 고려한 동역학 방정식을 구하였다.

1. 상판의 운동에너지와 위치에너지

먼저 상판의 운동에너지는 직교좌표상의 속도와 각속도에 의해 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$K_m = \frac{1}{2} m_m v^T v + \frac{1}{2} \omega^T I \omega = \frac{1}{2} \dot{x}^T M_m \dot{x} \quad (1)$$

여기서,  $\dot{x} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]^T = [v^T \ \omega^T]^T$ 는 직교좌표상의 속도와 각속도를 나타내는 벡터이며,  $m_m$ 은 상판의 질량,  $I$ 는 상판의 관성 행렬을 나타내며 상판의 모양이 좌표계를 중심으로 대칭일 경우  $M_m$ 은 다음과 같은 대각행렬이 된다.

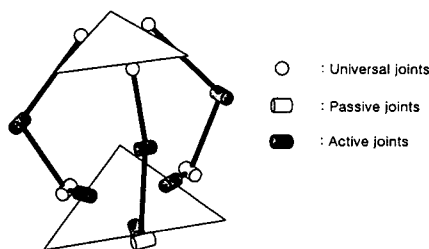


그림 1. Haptic Interface.  
Fig. 1. Haptic Interface.

$$M_m = \begin{bmatrix} m_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_m \end{bmatrix}$$

상판의 위치에너지는 다음과 같이 간단히 구해진다.

$$P_m = m_m g z \quad (2)$$

2. Haptic Interface의 동역학

이상과 같이 구해진 운동에너지와 위치에너지로부터 직교좌표 공간상의 Lagrange's equation을 사용하여 운동방정식을 구할 수 있다. 그러면 직교좌표상의 힘  $F$ 는 다음과 같다.

$$F = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} \quad (3)$$

여기서,  $L$ 은 Lagrangian 연산자로 운동에너지와 위치에너지의 차로 정의되며 다음과 같다.

$$L = K - P \quad (4)$$

이와 같이 계산된 동역학방정식은 고차의 비선형 미분 방정식으로 구해지며, 이를 행렬의 형태로 정리하면 일반적으로 다음과 같은 모양으로 구해진다.

$$M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) = F \quad (5)$$

여기서,  $F$ 는 직교좌표상에서 end-effect가 받는 힘이며,  $M(x)$ 는 관성행렬,  $V(x, \dot{x})$ 는 Coriolis 및 원심력벡터, 그리고  $G(x)$ 는 중력항이다.

III. 임피던스 파라메타 값 추종을 위한 적응제어

임피던스 제어란 로봇 매니퓰레이터의 운동과 접촉 환경과의 힘의 관계를 일정하게 유지시키는 방법이다. 즉, 로봇의 운동제어 문제와 힘제어 문제를 분리시키지 않고, 힘과 운동의 관계를 제어함으로써 동시에 두 가지 제어문제를 고려할 수 있는 방법이다[1]. 힘과 운동과의 관계를 다음의 선형 전달함수의 관계식으로 나타낸다[13].

$$F_e(s) = Z_e(s) \dot{X}(s) \quad (6)$$

여기서,  $s$ 는 라플라스 변환의 변수이며,  $F(s)$ 는 대상환경과 로봇이 접촉한 점에서의 힘을 나타내며,  $\dot{X}(s)$ 는 접촉점에서의 속도를 나타낸다.  $Z_e(s)$ 는 접촉점에서의 힘과 속도의 관계를 나타내는 환경 임피던스를 나타낸다. 주어진 환경 임피던스 모델에 대하여 목적 임피던스라고 하는 로봇의 임피던스 모델을 설정하여 임피던스 제어를 설계할 수 있다. 즉, 환경과 로봇의 전체 임피던스를 로봇 임피던스의 보상에 의해 제어할 수 있으며, 따라서 접촉한 힘과 속도의 관계를

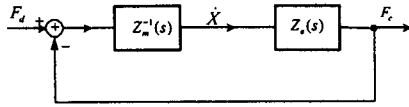


그림 2. 힘제어 블록다이아그램.  
Fig. 2. Force control block diagram.

제어할 수 있다. 로봇의 임피던스 모델이 제어기가 되며 힘과 속도사이의 관계를 결정하는 임피던스 필터라고도 한다 [17]. 로봇의 임피던스를  $Z_m(s)$ 라고 하고 속도와 접촉힘의 관계로서 정의한다. 로봇의 임피던스는 힘의 오차를 입력 받아 접촉점의 속도를 생성하는 형태가 된다.

1. 조작자와 Haptic Interface와의 접촉 임피던스

먼저, 임피던스 제어를 구성하기 위해서는 조작자와 Haptic Interface 사이의 접촉 모델링이 필요하다. 임피던스 모델에 의해 Haptic Interface와 조작자 사이에 작용하는 힘,  $f$ 를 다음과 같이 모델링한다[18].

$$f = b\dot{x} + kx \tag{7}$$

여기서  $b$ ,  $k$ 는 조작자의 댐핑계수 및 강성을 나타낸다. (7)을 라플라스 변환하여 접촉 임피던스를 구하면 다음과 같다.

$$Z_e(s) = b + \frac{k}{s} \tag{8}$$

2. Haptic Interface 의 임피던스

Haptic Interface는 실제 수술하는 슬레이브 로봇의 F/T센서를 통해 전송되어 온 힘값을 원격지에 위치한 조작자에게 정확히 복원시켜 주는 기능을 가져야 한다. 즉, 슬레이브 로봇의 F/T센서에서 측정된 값  $f_d$ 이 마스터 로봇의 입력이 되고, 이때 마스터 로봇이 조작자에게 가하는 힘  $f_c$ 가  $f_d$ 에 수렴해야 한다. 임피던스 제어에 의해 Haptic Interface와 조작자 사이의 힘을 제어하기 위해서 그림 2와 같이 힘의 오차를 입력으로 하여 접촉점의 속도를 생성하는 어드미턴스의 형태가 되어야 한다.

$$\dot{X}(s) = Z_m^{-1}(s)\{F_d(s) - F_c(s)\} \tag{9}$$

최종값 정리를 이용하면 정상상태 오차는 다음과 같다.

$$E_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s\{F_d(s) - F_c(s)\} \tag{10}$$

따라서, 단위기준 힘 입력  $F_d(s) = \frac{1}{s}$ 에 대하여 다음과 같은 정상상태 오차를 얻게 된다.

$$E_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{Z_m(s)}{Z_m(s) + Z_e(s)} \tag{11}$$

(8)에  $|Z_e(0)| = \infty$ 이므로,  $|Z_m(0)| = 0$  혹은  $|Z_m(0)|$

$= c(0 < c < \infty)$ 가 되도록 로봇 임피던스를 설계하면, 정상상태 오차  $E_{ss} \rightarrow 0$ 이므로, 출력이 입력에 정확하게 추종하게 된다. 따라서 로봇 임피던스를 정상상태 오차가 안정적으로 0이 되도록 다음과 같이 설계한다.

$$Z_m(s) = \gamma s \quad (0 < \gamma < \infty) \tag{12}$$

3. 접촉 임피던스의 매개변수 모델

슬레이브 로봇에서 전달되어 오는 입력  $f_d$ 와 조작자가 실체 느끼는 힘  $f_c$ 의 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$\frac{F_c(s)}{F_d(s)} = \frac{\alpha_2 s + \alpha_1}{s^2 + \alpha_2 s + \alpha_1} + \tag{13}$$

여기서,  $\alpha_1 = \frac{k}{\gamma}$ ,  $\alpha_2 = \frac{b}{\gamma}$  이고, (13)을  $\lambda(s)$ 로 양변을 나누고 정리하면 다음과 같다.

$$F_c(s) = \frac{n_a(s)}{\lambda(s)} F_d(s) + \frac{n_b(s)}{\lambda(s)} F_c(s) \tag{14}$$

여기서,  $\lambda(s) = s^2 + \lambda_2 s + \lambda_1$ ,  $n_a(s) = \alpha_2 s + \alpha_1$ ,  $n_b(s) = (\lambda_2 - \alpha_2)s + (\lambda_1 - \alpha_1)$ 로 정의한다.

미지의 실제 파라메타 값  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 와 선형의 출력 방정식을 얻고, 적응제어 알고리즘을 사용하기 위해  $\psi_p^{(1)}$ ,  $\psi_p^{(2)}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \psi_p^{(1)} &= A\phi_p^{(1)} + Bf_d \\ \psi_p^{(2)} &= A\phi_p^{(2)} + Bf_c \end{aligned} \tag{15}$$

여기서,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\lambda_1 & -\lambda_2 \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$  이고, (15)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi_p^{(1)}(s) &= (sI - A)^{-1} B F_d(s) + (sI - A)^{-1} \psi_p^{(1)}(0) \\ \psi_p^{(2)}(s) &= (sI - A)^{-1} B F_c(s) + (sI - A)^{-1} \psi_p^{(2)}(0) \end{aligned} \tag{16}$$

위의 식에서 일반적으로  $\psi_p^{(1)}(0)$  및  $\psi_p^{(2)}(0)$ 는 0이 되며  $F_c(s)$ 는  $\alpha_1, \alpha_2$ 에 의해 선형의 방정식으로 표시된다.

$$F_c(s) = a^T \psi_p^{(1)}(s) + b^T \psi_p^{(2)}(s) \tag{17}$$

여기서,  $a^T = [\alpha_1 \ \alpha_2]$ ,  $b^T = [\lambda_1 - \alpha_1 \ \lambda_2 - \alpha_2]$ 이다. (17)을 시간 영역으로 나타내면 다음과 같다.

$$f_c(t) = a^T \psi_p^{(1)}(t) + b^T \psi_p^{(2)}(t) = \theta^T \Psi_p(t) \tag{18}$$

여기서,  $\theta^T = [a^T \ b^T]$ ,  $\Psi_p(t)^T = [\psi_p^{(1)T}(t) \ \psi_p^{(2)T}(t)]$ 이며,

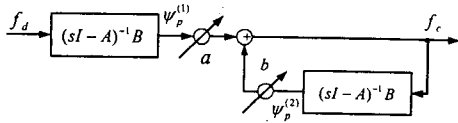


그림 3. 접촉 임피던스의 매개변수모델.  
Fig. 3. Parameterization model of contact impedance.

(18)처럼 표현되는 플랜트를 블록 다이어그램으로 나타내면 그림 3과 같다.

4. 적응제어기 모델

a, b는 조작자가 Haptic Interface에 가하는 힘의 크기에 따라 변화하는 값이므로, f\_d, f\_c의 측정값으로부터 a, b의 값을 추종해 가고자 한다. 실제 파라메타 값  $\theta$ 의 추종값  $\hat{\theta}$ 을 얻기 위해 관측기를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \psi^{(1)} &= A\psi^{(1)} + Bf_d \\ \psi^{(2)} &= A\psi^{(2)} + Bf_c \end{aligned} \quad (19)$$

플랜트의 출력은 다음과 같다.

$$f_c(t) = \theta^T \Psi(t) + \varepsilon(t) \quad (20)$$

여기서,  $\Psi(t)^T = [\psi^{(1)T}(t) \ \psi^{(2)T}(t)]$ ,  $\varepsilon(t) = \theta^T(\Psi_p(t) - \Psi(t))$  이고, 적응제어기의 출력은 다음과 같다.

$$f_i(t) = \hat{\theta}^T \Psi(t) \quad (21)$$

여기서,  $\hat{\theta}^T = [\hat{a}^T \ \hat{b}^T]$ 이다. 파라메타 오차를 다음과 같이 정의하면,

$$\phi(t) = \hat{\theta}(t) - \theta(t) \quad (22)$$

적응제어기 오차는 다음과 같이 표현된다

$$e(t) = f_i(t) - f_c(t) = \phi^T(t) \Psi(t) + \varepsilon(t) \quad (23)$$

5. 적응제어 알고리즘

추종값  $\hat{\theta}$ 는 미지의 실제 파라메타의 값  $\theta$ 을 다음과 같은

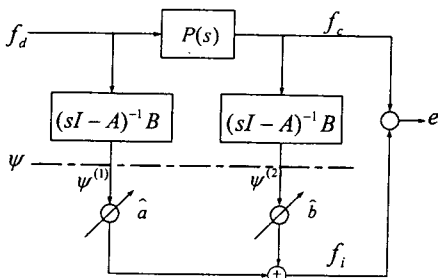


그림 4. 적응제어기 모델.  
Fig. 4. Model of adaptive controller.

법칙에 의해 추종해간다.

$$\dot{\phi} = \dot{\hat{\theta}} = -\eta e \Psi, \quad 0 < \eta < \infty \quad (24)$$

Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$v = \phi^T \phi = \frac{\eta}{2} \int_0^\infty \varepsilon^2(\tau) d\tau \quad (25)$$

(25)를 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= 2\phi \dot{\phi} - \frac{\eta}{2} \varepsilon^2 \\ &= -2\eta(\phi^T \Psi)^2 - 2\eta(\phi^T \Psi)\varepsilon - \frac{\eta}{2} \varepsilon^2 \\ &= -2\eta(\phi^T \Psi + \frac{\varepsilon}{2})^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

모든 시간  $t \geq 0$ 에 대해  $0 \leq v(t) \leq v(0)$ 이고, 다음과 같이 근사 및 부등식이 성립하므로  $e \rightarrow 0$ 로 수렴한다.

$$-\frac{1}{2\eta} \int_0^\infty \dot{v} dt \approx \int_0^\infty \varepsilon^2 dt \leq \infty \quad (27)$$

여기서, 퍼센트오버슈트, 정착시간 등 조작자가 편안하게 작업을 할 수 있는 파라메타 영역의 범위를 다음과 같이 설정하고, 이 영역 내에서 각 파라메타 값을 추종해 간다.

$$\hat{\theta} \in [\theta^-, \theta^+] \quad (28)$$

IV. 양방향 임피던스 제어

조작자가 Haptic Interface를 통해 위치/힘 명령을 내리면 슬레이브 로봇이 명령을 추종하는 단방향 위치/힘제어와 슬레이브 로봇이 대상환경과 접촉하여 힘이 발생하면 Haptic Interface를 통해 조작자에게 접촉힘을 전달하는 단방향 힘제어기를 결합하여 양방향 제어기를 설계한다. 현재까지 이루어진 Haptic Interface 제어에 관한 연구는 기구의 기계적 동역학은 무시하고, 환경 접촉 모델에 대한 접촉안정성 및 성능에 관한 연구가 대부분이었다[7]-[10]. Haptic Interface 제어기 설계에 있어 가장 중요한 사항은 가능한 넓은 영역에서 기구의 기계적 임피던스를 제어할 수 있도록 하는 것이다. 즉, 자유상태에서는 조작자가 기구를 사용하는 것을 느낄 수 없어야 하고, 슬레이브 로봇이 대상환경과의 접촉시 발생하는 접촉힘을 조작자가 정확히 느낄 수 있어야 한다. 이를 위해서는 조작자의 운동을 인식하여 그에 대응하는 Haptic Interface 기구의 동특성을 보상함으로써 가능하다. 기구의 동특성을 보상하면서 일정힘  $f_h$ 를 발생시키기 위해서는 (5)의 직교공간상의 동역학방정식을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$f = M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) + f_h \quad (29)$$

여기서,  $f_h$ 를 (7)과 같이 모델링 하였으며, 조작자가

Haptic Interface에 가하는 힘의 크기에 따라 의 값이 변화한다. 그러므로 III장에서 설명한 적응제어 알고리즘에 의해 추종된  $\hat{b}$ ,  $\hat{k}$  값을 (7)에 대입하여 구한  $\hat{f}_h$ 를 사용한다. 이때 힘-토크 관계식이 다음과 같으므로

$$f = J(x)^T \tau \quad (30)$$

(29)에서 능동관절토크를 구하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\tau = J^{-T} [M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) + \hat{f}_h] \quad (31)$$

(31)의 관절토크는 기구의 동특성을 포함하기 때문에 기구의 관성 및 중력 등에 의한 동역학적 특성을 보상할 수 있다. 이 경우 관절토크는  $\hat{f}_h$ 에 의해 제어되며, 이를 통해 Haptic Interface와 조작자 사이에 발생하는 힘을 제어할 수 있게 된다. 제안된 Haptic Interface의 제어블록도를 다음 그림과 같이 나타내었다.

그림 5에서  $f_c$ 는 Haptic Interface의 상판에 부착된 F/T 센서에 의해 측정되는 힘  $f_c$ 를 기준 좌표계로 좌표 변환한 값이다.

$$f_c = R^{-1} f_s \quad (32)$$

여기서,  $R$ 은 하판에 대한 상판의 회전관계를 나타내는 행렬이다. 즉  $f_c$ 는 (31)에서의 능동관절 토크에 의해 Haptic Interface가 조작자에게 가하고자 하는 힘  $\hat{f}_h$ 의 실제 측정치가 된다. 또한 슬레이브 로봇은 Haptic Interface의 위치/힘 정보를 추종함으로써 운동이 결정되며, 이때 슬레이브 로봇이 대상물체와 접촉하면 슬레이브 로봇에 부착된 F/T센서에 의해 측정된 힘  $f_d$ 는 Haptic Interface의 제어입력이 된다. 그림 5에서 임피던스 제어를 유도하기 위해 (31)에서  $\dot{x}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{x}(t) = \mu(t) \quad (33)$$

초기치를 제로로 하고 라플라스 변환하면 다음과 같다.

$$s\dot{X}(s) = M(s) \quad (34)$$

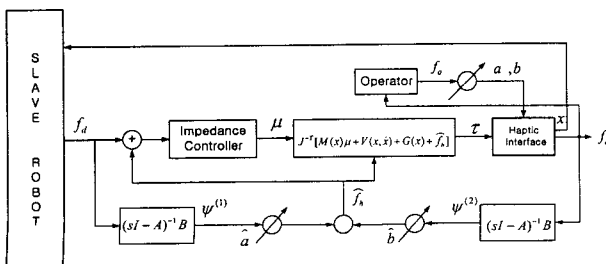


그림 5. Haptic Interface의 제어블록도.  
Fig. 5. Control block diagram of Haptic Interface.

(9)의 임피던스 제어 모델로부터 (34)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s\dot{X}(s) = sZ_m^{-1}(s)[F_d(s) - F_f(s)] \quad (35)$$

(34)와 (35)로부터 임피던스 제어기는 다음과 같다.

$$\mu(t) = L^{-1} [sZ_m^{-1}(s)\{F_d(s) - F_f(s)\}] \quad (36)$$

여기서,  $L^{-1}$ 는 역라플라스 변환이다. (12)를 (36)에 대입하여 역라플라스 변환하면 로봇 임피던스는 다음과 같이 된다.

$$\mu(t) = \frac{1}{\gamma} (f_d(t) - f_f(t)) \quad (37)$$

로봇 동역학 방정식과 파라메타가 정확히 알려져 있을 때, 힘/위치제어를 위한 비선형 제어를 설계하기 위해 사용될 수 있는 많은 모델기반 제어이론과 설계방법이 있다 [1][5][19][20]. 하지만 (5)는 각 직렬링크의 질량을 무시하였기 때문에 모델링 오차를 포함하고 있다. 그러므로 (5)를 다음과 같이 나타낸다.

$$\hat{M}(x)\ddot{x} + \hat{V}(x, \dot{x}) + \hat{G}(x) = F \quad (38)$$

이러한 모델링 오차와 불확실성을 보상하기 위하여 강인 제어 알고리즘이 필요하다. 강인제어 알고리즘의 기본적인 이론은 바로 전 샘플링 시간에서의 로봇방정식의 정보를 이용하여 불확실성을 없애는 것이다[13][14]. 이때, 샘플링 시간이 짧을수록 보다 정확하게 보상할 수 있다. 조작자에게 일정힘  $\hat{f}_h$ 을 발생시키기 위한 로봇의 능동관절 토크를 나타내는 (31)에서  $A = J^{-T}(x)M(x)$ ,  $B = J^{-T}(x)[V(x, \dot{x}) + G(x)]$ ,  $\mu = \dot{x}$ 라 하면, (31)는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$A\mu + B = \tau - \hat{\tau}_h \quad (39)$$

$A$ 의 모델링 값을  $\tilde{A}$ 라고 하면 (39)는 다음과 같다.

$$\tilde{A}\mu + c = \tau - \hat{\tau}_h \quad (40)$$

여기서,  $C = B + (A - \tilde{A})\mu$ 이다. (40)에서  $C(t)$ 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$C(t) = \tau(t) - \tilde{A}(t)\mu(t) - \hat{\tau}_h(t) \quad (41)$$

(41)은 좌우항이 동시에 계산되어야 하므로  $C(t)$ 를 구할 수 없다. 하지만 Haptic Interface는 외과수술과 같은 정밀작업을 위해 사용되므로 매우 천천히 움직인다고 가정하면, Haptic Interface의 자세가 매우 천천히 변하므로 동역학정보도 역시 매우 천천히 변한다고 할 수 있다. 그러므로 이전 정

보를 사용하여 근사값을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{C}(t) &= C(t-\delta) \\ &= \tau(t-\delta) - \bar{A}(t-\delta)\mu(t-\delta) - \hat{\tau}_h(t-\delta) \end{aligned} \quad (42)$$

여기서,  $\delta$ 는 샘플링 시간이다. (42)을 (40)에 대입하여 새로운 제어법칙을 구하면 다음과 같다.

$$\tau = \bar{A}\mu + \bar{C} + \hat{\tau}_h \quad (43)$$

**V. 시뮬레이션**

조작자는 슬레이브 로봇에 힘/위치 정보를 전달하기 위해 Haptic Interface를 움직이게 되는데, 이때, 조작자가 가하는 힘의 변화에 따라 (7)에서 표현된 접촉 임피던스의 파라메타  $k, b$  값이 변화하게 된다. 그러므로 앞에서 제안한 강인제어 및 적응제어 알고리즘을 통한 임피던스 파라메타 추종 성능을 확인하고자 한다.

그림 6은 실제 파라메타 값  $k, b$ 를 각각 3N/m, 3Ns/m로 설정하고, 추종값  $\hat{k}, \hat{b}$ 는 초기값으로 0N/m, 0Ns/m로 설정했을 때, 적응제어 알고리즘을 통한 추종 성능을 나타낸다. 이때 추종속도는 (26)에서 값의 크기가 클수록 빨라진다. 그림 7은 실제 파라메타 값  $k, b$ 이 각각 3N/m, 3Ns/m에서 6N/m, 6Ns/m으로 변화할 때, 적응제어 알고리즘을 통한  $\hat{k}, \hat{b}$ 의 추종 성능을 나타낸다.

**VI. 실험**

실험에서 사용한 시스템의 구성도는 그림 8과 같다. 시스템에 사용한 주제어기는 PC Pentium 300MHz를 사용하였으며, PC에서의 제어명령은 CAN BUS를 통해 250Kbps의 통신 속도로서 Haptic Interface 기구의 관절토크를 발생시키는 하부제어기로 전달된다. Haptic Interface의 각 관절을 제어하는 하부제어기는 87C196CA Micro Processor를 사용한 6개의 관절모터 제어기로 구성하였고, 외부로부터의 힘과 토크를 입력받을 수 있는 F/T sensor는 ATI INDUSTRIAL AUTO-

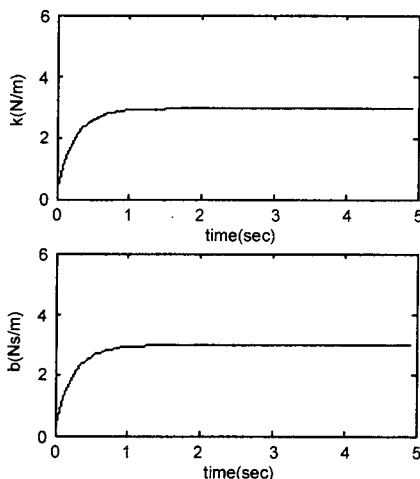


그림 6.  $\hat{k}, \hat{b}$ 의 추종 성능.  
Fig. 6. Estimation of  $\hat{k}, \hat{b}$ .

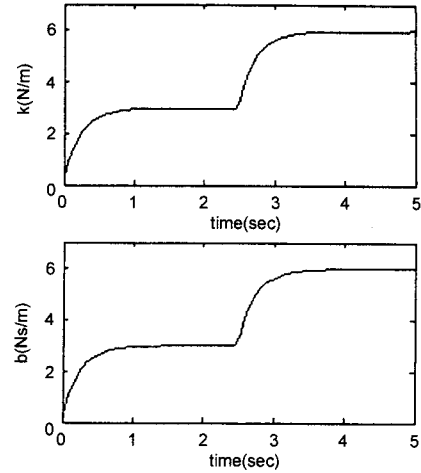


그림 7.  $\hat{k}, \hat{b}$ 의 추종 성능.  
Fig. 7. Estimation of  $\hat{k}, \hat{b}$ .  
( $k=3N/m, b=3Ns/m$ )  
( $k=3 \rightarrow 6N/m, b=3 \rightarrow 6Ns/m$  at 2.5s)

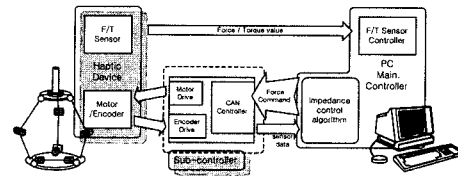


그림 8. Haptic Interface 시스템의 전체구성.  
Fig. 8. Structure of Haptic Interface System.

MATION의 ISA F/T-16 model을 사용하였다. 본 논문에서는 생략하였지만 Haptic Interface의 기구학 해석 시, 각 직렬링크의 길이를  $l_1=l_2=16cm$ , 상판의 반지름을  $r_m=9.6cm$ , 하판의 반지름을  $r_b=19.2cm$ 로 하였으며, II장에서 동역학방정식을 단순화 하기 위해 각 링크의 질량을 무시하였으므로, 상판의 질량을  $m_m=10kg$ 으로 실제 기구보다 무겁게 설정하였다. 그리고 앞 장에서 소개한 강인적응 알고리즘을 통한 임피던스 제어방식을 사용하여 각각 실험하였다. 먼저 Haptic Interface를 움직이지 않고, 조작자가 쥐고있는 상태에서 기준 입력  $f_d$ 를 2초 후에 0N에서 4N으로 변화시켰을 때,  $x, y, z$ 축에 대한 힘복원 성능을 그림 9~11에 각각 나타내었다.

그림에서처럼 어느 정도의 시간지연을 가지지만 기준 입력  $f_d$ 를 그대로 복원하고 있음을 알 수 있다. 여기서  $f_c$ 는 Haptic Interface의 상판에 부착된 F/T 센서에서 측정된 값으로 조작자가 실제로 느끼는 힘이다. 그림 12는 기준 입력  $f_d$ 를 6N의 스텝입력으로 하고, 조작자가 Haptic Interface를 쥐고 z축 방향으로 움직일 때의 힘복원 성능을 나타내었다. 이때 앞 장의 시뮬레이션 결과를 통해서도 알 수 있듯이 변화하는 파라메타 값을 추종해 감으로써 보다 정확한 힘복원 성능을 나타낼 수 있다. 그러므로 조작자가 Haptic Interface를 쥐고 정지해 있을 때 뿐만 아니라, 슬레이브 로봇에 힘/위치정보를 전달하기 위해 힘을 가하며 움직이는 동안에도 변화하는 접촉 임피던스의 값을 추종하며, 슬레이브 로봇으로부터 전달되어 오는 힘  $f_d$ 를 그대로 복원할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

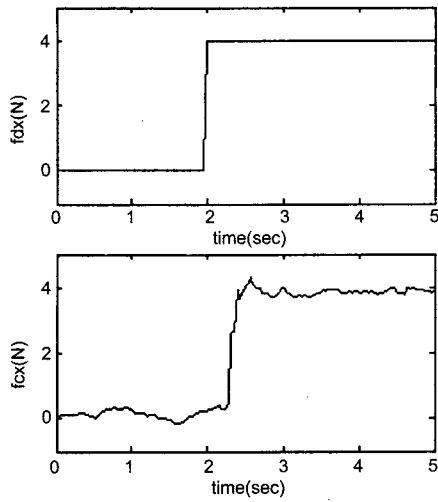


그림 9. x축 방향의 스텝입력 및 힘 응답특성.  
Fig. 9. Step response at x axis ( $f_d=4N$ ).

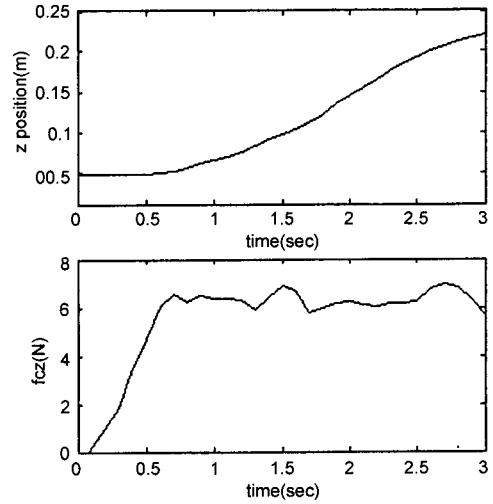


그림 12. z축 방향의 위치변화 및 힘 응답특성.  
Fig. 12. Position & force response at z axis.

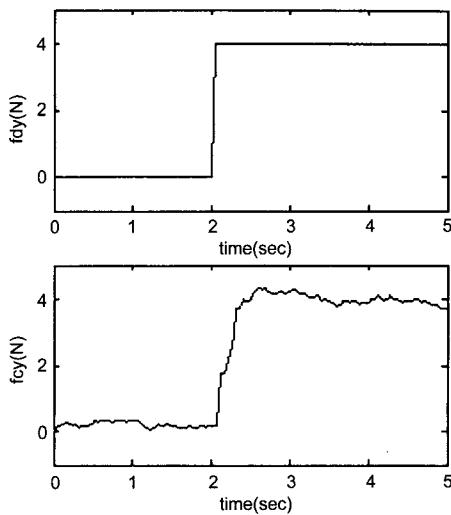


그림 10. y축 방향의 스텝입력 및 힘 응답특성.  
Fig. 10. Step response at x axis ( $f_d=4N$ ).

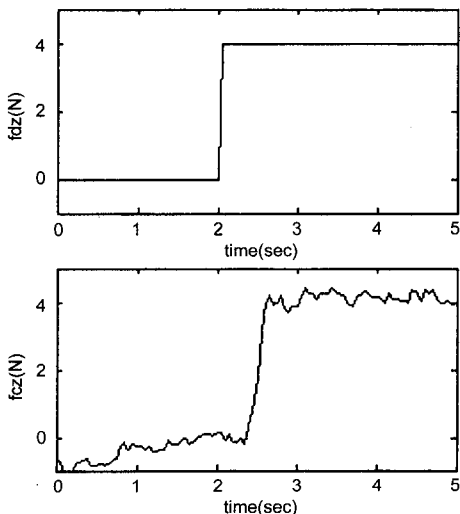


그림 11. z축 방향의 스텝입력 및 힘 응답특성.  
Fig. 11. Step response at z axis ( $f_d=4N$ ).

### VII. 결론

본 논문에서는 6자유도 운동을 자유롭게 생성하고 복원하기 위해 Haptic Interface 기구를 사용하여 슬레이브 로봇에 명령을 내리고, 슬레이브 로봇에 장착된 F/T센서를 통한 힘 정보를 이용하여 조작자가 실제 작업장에 위치한 듯한 감각을 느끼도록 하였다. 이때 조작자는 슬레이브 로봇에서 전달되어 온 힘뿐만 아니라 기구의 마찰, 관성, 중력 등을 느끼게 되므로 이를 보상해 주기 위해 기구의 동특성을 고려한 임피던스 제어 방식을 사용하였다. 본 기구는 병렬형 매니플레이터의 형태로서 폐쇄형 해가 존재하는 역기구학을 통해 동역학방정식을 유도하였다. 하지만, 이러한 역동역학 방정식은 그 계산과정의 복잡성으로 인해 실시간 제어에 어려움이 있다. 따라서 실시간 제어를 위한 간단한 동역학 방정식을 구하였고, 이로 인해 발생하는 모델링 오차를 보상하기 위해 강인제어 알고리즘을 사용하였다. 뿐만 아니라 조작자가 슬레이브 로봇에 힘/위치 정보를 명령으로 전달하기 위해 Haptic Interface를 움직이게 되면, 이때 가하는 힘의 변화에 따라 접촉 임피던스 파라메타 값이 변화하게 되고, 이때 가하는 힘의 변화가 커지면 임피던스 파라메타의 값 또한 큰 폭으로 변화하게 되므로, 이런 파라메타의 값을 추종해가는 적응제어 알고리즘을 사용하였다. 이처럼 본 논문에서는 Haptic Interface의 모델링 오차와 접촉 임피던스 파라메타 변화에 강인하고 안정한 제어를 위해 강인적응 알고리즘을 통한 임피던스 제어 방식을 제안하였으며, 조작자가 Haptic Interface를 쥐고 정지해 있을 때 뿐만 아니라, 슬레이브 로봇에 힘/위치 정보를 전달하기 위해 힘을 가하며 움직이는 동안에도 변화하는 접촉 임피던스 파라메타 값을 추종하며 슬레이브 로봇으로부터 전달되어 오는 힘을 정확히 복원할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다. 앞으로 진행되어야 할 연구 과제로는 실제 원격의 네트워크 환경을 고려하여 시간에 따라 변화하는 시간지연에 강인한 제어에 대한 연구가 필요할 것이다.

**참고문헌**

- [1] N. Hogan, "Impedance control : An approach to manipulator, part I,II,III," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 3, pp. 1-24, 1985.
- [2] M. H. Railbert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *Trans. ASME: J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, pp. 101-133, 1981.
- [3] T. Yoshikawa, "Dynamic hybrid position /force control of robot manipulators-Description of hand constraints and calculation of joint driving force," *IEEE J. Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 386-392. 1987.
- [4] Y. H. Chen and S. Pandey, "Robust hybrid control of robot manipulators," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 236-241, 1989.
- [5] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Hybrid impedance control of robotic manipulators," *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 5, pp. 549-555, 1988.
- [6] Yonghwan Oh, W. K. Chung, and Y. Youm, "Hybrid impedance control for free and contact motion," *Proc. Of KACC*, pp. 448-451, 1995
- [7] J. E. Colgate and J. M. Brown, "Factors affecting the Z-width of a haptic display," *Proc. of the 1994 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, 1994.
- [8] P. Millman and J. Edward Colgate, "Design of a high performance interface to virtual environments," *IEEE Annual Virtual Reality International Symposium*, 1993.
- [9] Manuel Moreyra and Blake Hannaford, "A practical measure of dynamic response of haptic devices," *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998.
- [10] Richard J. Adams and Blake Hannaford, "Stable haptic interaction with virtual environment," *IEEE Transactions on robotics and Automation*, 1999.
- [11] 이수성, 한승준, 이원구, 하성기, 이장명, "원격 작업을 위한 6자유도 Haptic 인터페이스 설계," 대한전자공학회 부산경남지부 추계합동 학술논문발표회 논문집, pp. 323~328, 1998.
- [12] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, and D. M. Dawson, "Control of robot manipulators," Macmillan, 1993.
- [13] T. A. Lasky and T. C. Hsia, "On force-tracking impedance control of robot manipulators," *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 61-66, 1991.
- [14] 정술, 하천장, "로봇 팔의 힘 추종 적응 임피던스 제어의 안정도 분석," *Proc. Of the 13<sup>th</sup> KACC*, pp. 1803-1806, 1998.
- [15] Sukhan Lee and Hahk Sung Lee, "Intelligent control of manipulators interfacing with an uncertain environment based on generalized impedance," *Proc. Of IEEE Symposium on Intelligent Control*, pp. 61-66, 1991.
- [16] S. Jung and T. C. Hsia, "Neural network impedance force control of robot manipulators," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, vol. 45, No. 3, pp. 451-461, 1998.
- [17] D. Gershon and V. Baruch, "Impedance control with autonomous mode switching," *5th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 482-486, 1991.
- [18] E. Kristiansen and A. Lindstad, "A new concept for underwater manipulator control," *Automation for Safety in Shipping and Offshore Petroleum Operations*, pp. 35-39, 1980.
- [19] D. Wang and N. H. McClamroch, "Position/force control design for constrained mechanical systems : Lyapunov's direct method," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 9, pp. 308-313, 1993.
- [20] T. Yoshikawa, T. Sugie, and M. Tanaka, "Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators : Controller design and experimen," *IEEE J. Robot. Automat.*, vol. 4, pp. 699-705, 1988.



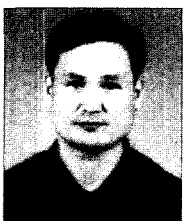
**박 현**

1998년 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 부산대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 관심분야는 원격제어, 비전응용시스템 등.



**이 상 철**

2000년 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 부산대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 관심분야는 원격제어, 실시간 운영체제 등.



**이 수 성**

1998년 충남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 부산대학교 박사(공학박사). 주요 관심분야는 원격제어 기반의 의료용 로봇 등.



**이 장 명**

현재 부산대학교 공과대학 전자공학과 교수. 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 소장. 제어 자동화 시스템공학 논문지 제5권, 제1호, 참조.