

# 투명성과 강인 안정성을 고려한 1자유도 햅틱 인터페이스 제어기 설계

論 文

49D-4-6

## 1-DOF Haptic Interface Controller Design Considering Transparency and Robust Stability

嚴光植\* · 徐一弘\*\*

(Kwang-Sik Eom · Il-Hong Suh)

**Abstract** - In this paper, a controller design method is proposed for haptic interface considering transparency and robust stability. For this, a performance index for the transparency as performance measure is defined in the points of impedance matching and the optimal solution which is minimizing the performance index is obtained by solving  $H_2$  optimal problem. In haptic interface, the modeling uncertainties can be restricted to that of haptic device. To implement the robust stabilizing haptic controller to the uncertainties of haptic device, a robust stable condition using  $H_\infty$  norm from small gain theorem is proposed. To verify the effectiveness of the proposed haptic controller design scheme, numerical examples and experimental results are illustrated for virtual wall consisting of stiffness and damping factor.

**Key Words** : haptic interface, transparency, robust stability

### 1. 서 론

햅틱이라는 단어는 “만지다”라는 의미의 그리스어에서 유래한 것으로서, 햅틱 감각이란 손을 사용하여 느끼는 모든 지각을 의미하는데, 인간의 햅틱 시스템은 인간과 주위 환경 간의 상호작용을 쉽고 정밀하게 해주는 것으로 일상 생활에서 운전을 하거나 글을 쓰는 등의 햅틱 감각이 없으면 불가능한 작업이 매우 많다. 이와 같이 인간이 가상환경(Virtual Environment)속에서 컴퓨터 시스템과 상호 작용하는데 있어서 햅틱 시스템은 매우 중요한 역할을 담당하는바, 시각이나 청각 정보와는 달리 햅틱 감각은 환경을 감지하는 것뿐만 아니라 환경에 영향을 미칠 수도 있다. 인간이 햅틱 시스템으로 들어가는 입력은 힘 출력 장치와 같은 햅틱 감각 표시 장치를 통해 제공되고, 햅틱 시스템에서 나오는 출력은 주요 변수의 값이 힘과 위치에 따라 주어지는 동작 명령의 형태를 띄게 된다. 따라서, 가상환경을 효과적으로 응용하기 위해서는 햅틱 시스템에 적절한 감각 입력을 제공하고 그 결과를 사용자에게 나타내주어야 한다.

이러한 햅틱 인터페이스는 기계적인 임피던스를 생성하는 디바이스로 간주될 수 있으며, 여기서의 임피던스는 속도와 힘간의 동역학적 관계를 의미한다. 햅틱 디스플레이의 목적은 가상 환경과 사용자가 잡고 있는 햅틱 디바이스 사이의 충실한 신호(힘, 속도, 위치) 전달에 있으며[1], 가상 환경에서의 신호를 그대로 사용자가 느낄 수 있는 것이 이상적인 경우이다[2]. 그러나, 이러한 이상적인 힘 반향을 위해서는

햅틱 디바이스의 질량 및 점성력에 의한 영향이 최소화되어야 하는 반면, 햅틱 디바이스의 구조적인 강성, 힘을 표현할 수 있는 액추에이터의 극대화가 요구되는 바 상호 배타적 관계에 있다. 따라서, 사용자와 가상 환경 사이의 완벽한 신호 전달은 불가능하며, 어느 정도 근접하게 느낄 수 있도록 해주는 가에 대한 척도로 햅틱 디바이스를 포함하는 시스템의 임피던스 관계로 표현되는 투명성(transparency)을 정의할 수 있다. 햅틱 시스템의 투명성은 가상 환경과 사용자를 포함한 전체 시스템이 안정한 경우 정의될 수 있으며[4], 주어진 가상 환경에 대한 안정성의 문제는 햅틱 시스템의 투명성 이상의 중요한 성능으로 간주되어 진다.

최근 햅틱 시스템의 안정도는 이단자망 네트워크에서 사용되는 수동성 원리에 근거한 해석이 연구되어 왔다[2,3,4]. Colgate등은 가상 환경과 햅틱 인터페이스를 포함한 시스템에서의 안정도를 위한 수동성 조건을 제시하였으며[3], 이 연구 결과를 이용하여 햅틱 시스템이 수동적인 조건에서 표현할 수 있는 임피던스의 범위를 정의하고, 이 범위에 영향을 줄 수 있는 요소들을 제시하였다[4]. 그러나, Colgate의 연구 결과는 햅틱 시스템과 구현하고자 하는 가상 환경이 페루프로 연결된 경우에 대한 해석에 제한되었으며, 구현하려는 가상환경에 대해 안정한 햅틱 디스플레이를 위한 제어기 설계 방법에 대한 언급이 없고, 햅틱 디바이스 설계 시에 점성 계수 설정 조건을 제시하는데 국한되었다. Adams등은 [2]에서, 햅틱 디스플레이를 인간, 햅틱 인터페이스 그리고 가상 환경의 세부분으로 나누고, 각 부분이 수동적이면, 전체 시스템은 무조건 안정하다는 이단자망의 이론을 토대로 한 햅틱 인터페이스의 수동 조건을 제시하였다. 그리고, 이 수동 조건을 만족시키기 위해 가상 간섭 장치(virtual coupling)를 제안하고, 이 가상 간섭 장치가 전체 시스템을 안정화시키는데 도움을 준다는 연구 결과를 제시했다. 그리

\* 正 會 員 : 漢陽大 電子工學科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 漢陽大 電子工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 1月 29日

最終完了 : 2000年 3月 9日

나, 이 연구에서 제시된 내용은 가상 환경의 수동성 조건만 만족하면, 어떠한 환경을 구현하더라도 시스템이 안정할 수 있기 때문에 가상 환경과 햅틱 인터페이스를 독립적으로 설계가 가능하다는 점에서 매우 유용하지만, 수동성 이론은 전체 시스템의 안정성을 위한 충분 조건이고 이를 만족시키는 제어기를 설계하는 것은 매우 엄격한 조건이기 때문에, 투명성 측면에서 햅틱 시스템의 성능이 좋지 않을 수 있는 단점이 있다.

본 논문에서는, 표현하고자 하는 가상 환경 모델이 주어진 경우에 대하여, 햅틱 시스템의 투명성(transparency)과 강인 안정성의 두가지 관점에서의 최적 성능을 낼 수 있는 제어기 설계 방법을 제안한다. 이를 위해 햅틱 시스템의 성능을 측정할 수 있는 투명성에 대한 성능 지수를 어드미턴스의 관점에서 정의하고, 이를 최적화하기 위해  $H_2$  제어 문제로 푸는 방법을 제안한다. 한편, 햅틱 인터페이스에 있어서의 모델링 불확실성은 햅틱 디바이스에 국한되는 문제로 볼 수 있다. 햅틱 디바이스 모델링 불확실성에 대해 강인 안정한 시스템을 구현하기 위해 소이득 정리로부터  $H_\infty$ 음을 이용한 불확실성 강인 조건을 제시하고, 이를 이용한 불확정성에 대해 강인한 제어기 설계 방법을 제안한다. 제안된 알고리즘의 성능을 보이기 위해, 가상환경으로 가상력을 설정한 경우에 대해 모의 실험과 실험을 실시하여 그 효용성을 보였다.

제 2 장 햅틱 시스템 모델링

가상 환경에서의 힘을 표현하기 위한 햅틱 시스템은 일반적으로 그림 1과 같은 제어 구조를 가진다[3,4]. 햅틱 시스템의 기본 구성은 사용자가 잡고 있는 서보 모터와 같은 액추에이터를 기반으로 엔코더 등의 센서에 의해 피드백된 신호가 컴퓨터의 입력 신호로 연결되고, 이 신호를 이용하여 가상 환경(virtual environment) 모델에 따른 힘 명령을 생성하여, 생성된 힘을 조작자가 느낄 수 있도록 구성되어 있다. 이와 같이 측정되는 위치 변위에 대한 힘을 생성하도록 구성되는 경우 임피던스형 햅틱 디스플레이라고 한다[2]. 그림 1에 나타내어진 햅틱 인터페이스의 개념도는 그림 2와 같은 블록도로 표현할 수 있다. 여기서,  $P(s)$ 은 햅틱 디바이스의 동역학 모델이고,  $ZOH$ 는 영차출당장치(zero-order holder)를 나타내며,  $V(s)$ 는 표현하고자 하는 가상 환경 모델이다. 가상 환경은 컴퓨터에 의해 모델링 되어진 것으로 구현시에 햅틱 디바이스에 연결된 위치 센서를 컴퓨터로 받아들일 때의 샘플링 효과와 DA 변환기에 의한 효과등이 고려되어야 한다. 인간 조작자에 대한 동역학은 시간 가변적으로 동작하는 비선형 시스템으로 표현되지만, 로봇 매니퓰레이터와 상호 작용하는 인간은 수동적이라는 사실을 바탕으로 인간 조작자의 동역학은 전체 시스템의 안정도에 나쁜 영향을 미치지 않는다고 가정한다.

햅틱 인터페이스를 그림 3과 같은 1 자유도를 가진 질량이  $m$ 이고 점성이  $b$ 인 매니퓰레이터로 표현하면, 햅틱 인터페이스의 운동 방정식은 (1)과 같다.

$$m \dot{v}_d + bv_d = f_h - f_d, \quad v_d = v_h \tag{1}$$

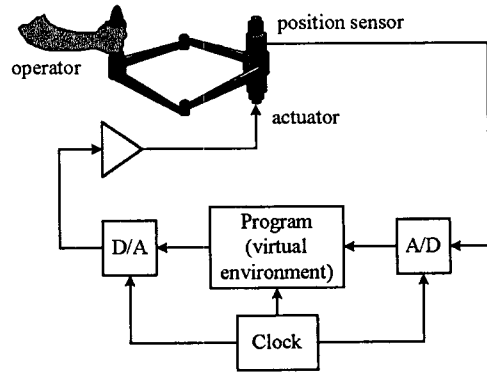


그림 1 햅틱 인터페이스의 개념도  
Fig. 1 Schematic of a haptic interface

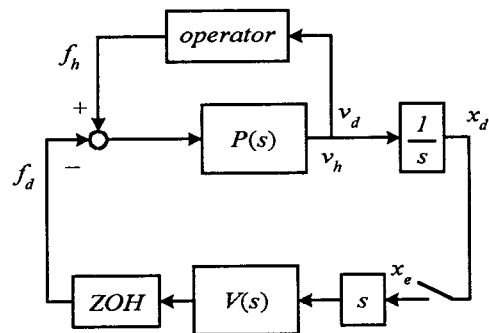


그림 2 햅틱 인터페이스의 블록도  
Fig. 2 Block diagram of haptic interface

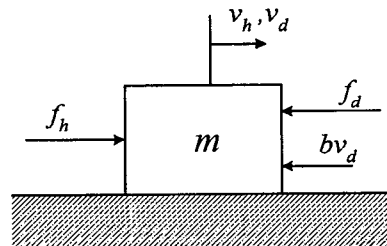


그림 3 1 자유도 햅틱 인터페이스 모델  
Fig. 3 One DOF haptic interface model

여기서,  $v_h$ 와  $f_h$ 는 조작자가 잡고 있는 지점에서의 속도 및 힘이고,  $v_d$ 와  $f_d$ 는 햅틱 디바이스의 구동점에서의 속도 및 힘이다. 햅틱 인터페이스의 임피던스 모델에서의 사용자에게 전달되는 힘은 측정되는 위치 정보에 대한 응답으로 나타내어진다. 연속시간영역에서의 전달함수는 (1)을 라플라스 변환을 이용하여 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$P(s) = \frac{1}{ms + b} \tag{2}$$

가상환경 구현을 위해 생성된 힘 명령은 DA변환기를 통하여 액추에이터로 전달되며, DA 변환기의 효과는 그림 2에 나타낸 것과 같이 ZOH와 제어기를 직렬 연결한 것으로 표현할 수 있다. ZOH는 (3)과 같이 단위 정상 상태 이득을

나타내고, 나이퀴스트(Nyquist) 주파수에서 90도의 위상 지연을 갖는 저역 통과 필터로 근사화 할 수 있다[2].

$$ZOH(s) = \frac{1}{1 + Ts/2} \quad (3)$$

일반적으로 많이 사용되는 가상 환경은 가상 스프링과 댐퍼가 기계적으로 병렬 연결된 가상벽으로 표현되며[2,3,4], 접촉점에서의 속도에 대한 힘 정보의 관계로 (4)와 같은 전달 함수로 나타낼 수 있다.

$$V(s) = \frac{K + Bs}{s} \quad (4)$$

여기서,  $K$ 와  $B$ 는 각각 가상벽의 스프링 상수와 점성 계수를 나타내며, 그림 2와 같이 구성된 햅틱 인터페이스에서는 표현하고자 하는 가상벽의 동역학식이 페루프시스템에 포함되기 때문에, 안정한 햅틱 시스템을 만족시키기 위해서는 표현하고자 하는 가상 환경의 제한을 받게된다[4].

햅틱 시스템의 성능은 사용자와 햅틱 디스플레이간의 상호 작용에 의해 발생하는 임피던스 또는 어드미턴스 관계로 정의되는 투명성(transparency)으로 나타내어 질 수 있다. 여기서의 임피던스와 어드미턴스는 속도와 힘의 관계를 나타낸다. 햅틱 인터페이스는 표현하고자하는 가상 환경의 임피던스 또는 어드미턴스와 피드백 시스템의 전달 임피던스 또는 어드미턴스가 같은 경우가 이상적이다[5]. 그림 2와 같이 구성된 햅틱 시스템에 의한 전달 어드미턴스  $Y_t$ 는 (5)와 같다.

$$Y_t(s) = \frac{P(s)}{1 + ZOH(s)P(s)V(s)} \quad (5)$$

Colgate 등은 [4]에서 피드백 제어기로 가상환경을 사용하는 경우에 대하여 표현 가능한 가상 환경의 범위를 Z-width라고 정의하고, 이를 햅틱 시스템의 성능 평가 기준으로 사용하였다. 그러나, 표현하고자하는 임피던스가 Z-width 범위 내에 존재하지 않는 경우에는 투명성뿐 아니라 안정도까지도 보장할 수 없다. 이러한 경우의 주파수 영역에서의 어드미턴스 응답을 그림 4에 나타내었다.

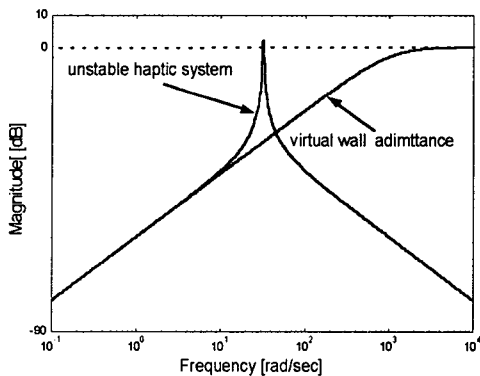


그림 4 불안정 햅틱시스템의 전달 어드미턴스 응답  
Fig. 4 Transmitted admittance response of unstable haptic system

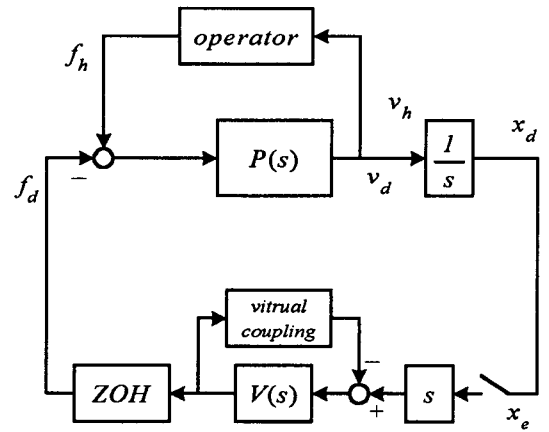


그림 5 가상커플링을 이용한 햅틱 인터페이스 블록도  
Fig. 5 Block diagram of the haptic interface using virtual coupling

전형적인 가상 환경의 어드미턴스 응답은 고주파 통과 필터의 주파수 응답을 나타내며, 저주파 영역에서의 불안정 햅틱 시스템의 어드미턴스 응답은 가상 환경에 대한 응답과 동일하지만, 전체 피드백 시스템은 공진점(peak resonance)이 존재하여 떨림 현상을 보이거나 불안정해진다. 한편, 가상 환경의 동역학  $V(s)$ 은 컴퓨터 내에서 생성하는 부분이므로, 프로그램에 의해서 변경이 가능하고, 햅틱시스템의 어드미턴스 응답이 그림 4와 같이 나타나는 경우, 공진점을 제거하여 안정한 시스템이 되도록 햅틱 피드백 제어기를 설계해야 한다. Adams등은 [2]에서 안정된 햅틱 인터페이스를 구현하기 위해서, 이단자망의 수동성 이론을 바탕으로 가상 커플링(virtual coupling)을 이용한 햅틱 인터페이스를 제안하였다. Adams에 의해 제안된 가상커플링을 이용한 햅틱 인터페이스의 블록도를 그림 5에 나타내었다. Adams에 의해 제안된 가상커플링의 설계는 수동적인 가상환경에 대한 안정 조건을 제시하여, 수동 성질을 만족하는 어떠한 가상환경에 대해서도 안정한 햅틱 인터페이스의 구현을 가능케하였다. 그러나, 가상환경의 동역학은 사용자에 의해서 소프트웨어로 주어지므로 이에 대한 불확실성이 없음에도 불구하고, 수동성이론에 의한 안정 조건은 매우 엄격하며, 햅틱 시스템의 투명성이 저하될 수 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 주어진 가상환경의 동역학에 대해서, 투명성을 극대화하기 위한 햅틱 제어기의 설계 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 제안되는 햅틱 제어기의 구조를 그림 6에 나타내었으며, 이 경우의 전달 어드미턴스 함수는 다음 식과 같다.

$$Y_t(s) = \frac{P(s)}{1 + ZOH(s)P(s)(V(s) + C(s))} \quad (6)$$

햅틱 시스템의 제어 문제는 주어진 가상 환경  $V(s)$ 에 대하여 전체 시스템을 안정하게 하고, 투명성 면에서 가상 환경 모델을 최적으로 표현할 수 있는 제어기  $C(s)$ 를 설계하는 것으로 볼 수 있다.

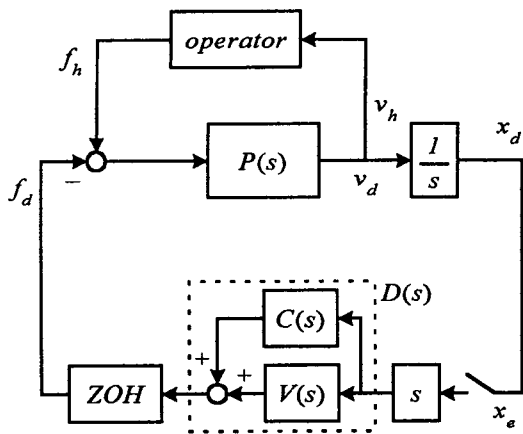


그림 6 제안된 햅틱 인터페이스 블록도  
Fig. 6 Block diagram of the proposed haptic interface

3. 햅틱 시스템을 위한 강인 제어기 설계

햅틱 피드백 제어기 설계의 목적은 햅틱 인터페이스 시스템을 안정하게 하고 표현하려는 가상벽의 어드미턴스와 햅틱 피드백 시스템의 어드미턴스간의 오차를 최소화하는 제어기  $C(s)$ 를 구하는 것이다. 햅틱 인터페이스의 투명성을 측정하기 위한 성능 지수에 대한 정의는 동일한 힘 입력에 대해, 표현할 가상 환경의 속도 출력  $v_o(t)$  과 햅틱 피드백 시스템에 의한 속도 출력  $v_h(t)$  차이의 제곱을 적분한 형태로 (7)과 같이 나타낼 수 있다. (7)은 파시발 정리와 (6)의 임피던스 정의를 이용하여 (8)과 같은 주파수 영역에서의 성능 지수로 표현할 수 있다.

$$J = \int_0^{\infty} (v_o(t) - v_h(t))^2 dt \tag{7}$$

$$J = \|w_1(Y_t - Y_v)\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |w_1(j\omega)(Y_v(j\omega) - Y_t(j\omega))|^2 d\omega \tag{8}$$

여기서,  $Y_v(s)$ 는 주어진 가상 환경에 대한 어드미턴스 모델이며,  $w_1(s)$ 는 가중치 함수이다.  $H_2$  최적 문제에 있어서 가중 함수는 입력 신호의 종류에 따라 적절히 설정할 수가 있으며, 가중 함수를 사용하므로써, 여러 가지 관점에서의 최적 문제로 설정할 수가 있다[6]. 본 논문에서는 인간이 움직일 수 있는 주파수 영역이 저주파라는 고찰 결과를 토대로 가중 함수를 저역 통과 필터로 설정하였다. 햅틱 인터페이스의 성능은 (8)에 정의된 성능 지수의 값이 적을수록 투명성이 우수하다고 할 수 있으며, 이는  $w_1(s)$ 에 의해 가중된 어드미턴스 차이의  $H_2$ 놈이 최소화되어야 한다는 것을 의미한다. 따라서, 투명성 관점에서 (8)의 성능 지수를 최소화하는 제어기  $C(s)$ 의 설계 문제는  $H_2$  최적해를 구하는 문제이다. 만일, 피드백 제어기  $D(s)$ 가 가상환경의 동역학과 동일한 차수를 지니고 있다면,  $C(s)$ 는 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$C(s) = \frac{K_c + B_c s}{s} \tag{9}$$

여기서,  $K_c$ 와  $B_c$ 는 각각 위치와 속도에 대한 계인을 나타낸다. 동일한 힘 입력에 대해서, 햅틱 피드백 시스템과 가상 환경의 정상 상태 위치 오차는 계인  $K_c$ 가 0인 경우에만 발생하지 않는다. 따라서,  $K_c$ 는 0으로 설정하여야 하며, 만일  $K_c$ 가 0으로 설정되지 않는다면, (8)에 정의된 성능 지수가 제한되지 않기 때문에 성능지수에 의미를 상실하게 된다. 결과적으로,  $H_2$  최적 제어기 설계 문제는 (4)에 정의된 가상벽에 대하여 전체 시스템을 안정하게 하고, 가상벽에서 나타내는 어드미턴스와 전달 어드미턴스의 차이를 최소화하는  $B_c$ 를 구하는 파라미터 최적화 문제로 간략화 될 수 있다.

(2)에 정의된 햅틱 디바이스의 공칭 모델에서, 파라미터에 대한 모델링 불확실성이 존재하면, 공칭 성능(normal performance)는 보장될 수 없으며, 불확실성이 큰 경우에는 안정성까지도 보장할 수 없게 된다. (2)의 모델의 파라미터  $m, b$ 를 공칭 모델 파라미터라 하면, 불확실성을 갖는 햅틱 디바이스의 전달함수는 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(s) = \frac{1}{m(1 + \alpha\Delta)s + b(1 + \beta\Delta)} \tag{10}$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 질량과 점성에 대한 불확실성을 나타내는 상수 값을 갖는 파라미터이고,  $\Delta$ 는  $-1 \leq \Delta \leq 1$ 의 조건을 만족하는 불확실성 변수이다. (10)을 공칭 모델  $P(s)$ 와 불확실성 전달함수  $W(s)$ 에 대해 정리하면,

$$\tilde{P}(s) = \frac{P(s)}{1 + W(s)\Delta P(s)}, \tag{11}$$

$$P(s) = \frac{1}{ms + b}, \tag{12}$$

$$W(s) = \alpha ms + \beta b, \tag{13}$$

이며, 불확실성을 갖는 햅틱 시스템의 블록도를 그림 7에 나타내었다.

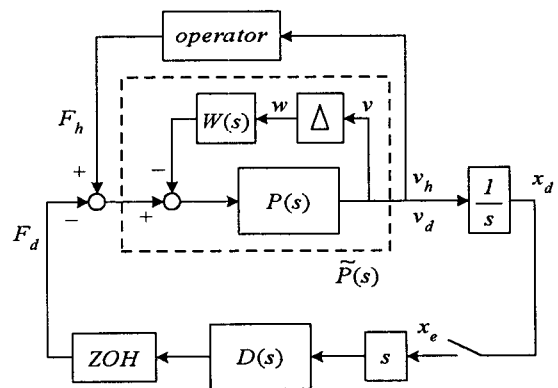


그림 7 불확실성을 갖는 햅틱 시스템의 블록도  
Fig. 7 Block diagram of perturbed haptic system

소이득 정리(small-gain theorem)에 의한 안정성 조건을 구하기 위하여, 불확실 파라미터  $\Delta$ 의 출력에 대한 입력 관계를 구하면, (14)와 같으며, 불확실성에 대해 강인한 제어기 설계에 대한 다음과 같은 정리를 구할 수 있다.

$$L(s) = \frac{v}{w} = \frac{-W(s)P(s)}{1 + ZOH(s)P(s)D(s)} \quad (14)$$

[정리 1] 불확실성에 대한 안정 조건[7]

공칭 모델  $P(s)$ 에 대해 전체 시스템을 안정하게 하는  $D(s)$ 가 존재하고, 다음 조건을 만족하면, 제어기  $D(s)$ 는 불확실성  $\Delta$ 에 대하여 강인 안정하다.

$$\|L(s)\|_{\infty} \leq 1 \quad (15)$$

따라서, 햅틱 시스템의 강인 제어기 설계는 제한된 불확실성에 대하여, (15)의 조건을 만족하는  $B_c$ 를 정하는 문제이다.

햅틱 시스템에서의 설계 파라미터  $B_c$ 의 값을 정하는 데 있어서 풀어야 할 문제는 (15)의 제한 조건을 갖는 성능 지수를 최소화하는  $B_c$ 를 구하는 최적 해를 구해야 하며, ZOH의 동역학을 고려한 전달 함수를 이용하여 해석적으로 구하는 것은 매우 어려운 문제이므로, 이와 동일한 결과를 얻기 위한 방법으로 공칭 모델에 대한 성능을 만족하는 최적의 파라미터를 구한 뒤에 (15)의 제한 조건을 만족하는지에 대해 검증하고, 이 조건을 만족하지 않을 경우, 이 조건을 만족하는 적절한  $B_c$ 를 그래프를 이용하여 설정하여 결정한다.

4. 실험 결과

제안된 알고리즘의 효용성을 보이기 위해 그림 8에 나타난 2 자유도 병렬 구조형 햅틱 시스템을 이용하여 실험을 시행하였으며, 이때 사용된 햅틱 시스템은 관절의 길이가 0.2[m]이고, 액추에이터는 PWM에 의해 전류 제어 모드에서 동작되는 AC 서보 모터이며, 기어비가 20:1인 기어가 장착되어 있다. 사용자가 잡고있는 핸들의 위치 피드백을 위해서 모터 축상에 4000[pulse/rev]의 분해능을 갖는 엔코더를 장착하였고, 컴퓨터에 의해 생성된 토크 명령은 12비트 DA 변환기 통해 서보 증폭기로 전달된다. 실험을 위한 코드는 PC의 윈도우즈 환경에서 C 코드를 이용하여 작성되었으며, 이산 시간 제어를 위한 샘플링 시간은 1[msec]로 설정하였다.

먼저, 햅틱 디바이스의 공칭 모델을 위해 동역학 신호 분석기를 이용하여 주파수 특성을 구하였다. 직교 좌표상에서의 주파수 특성을 구하기 위해 디바이스의 관절 속도와 직교 좌표계에서의 속도 관계를 나타내는 자코비안 행렬을 이용하였다. 그림 9에 직교 좌표상에서의 주파수 특성 측정을 위한 블럭도를 나타내었으며, 그 결과, 그림 10과 같은 주파수 특성을 얻었다. 이 그림으로부터 햅틱 장치의 공칭 파라미터인  $m=0.063[ Kg ]$ 과  $b=0.15[ Nsec/m ]$ 를 구할 수 있다.

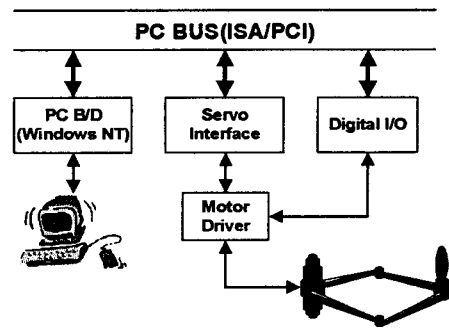


그림 8 실험 환경  
Fig. 8 experimental setup

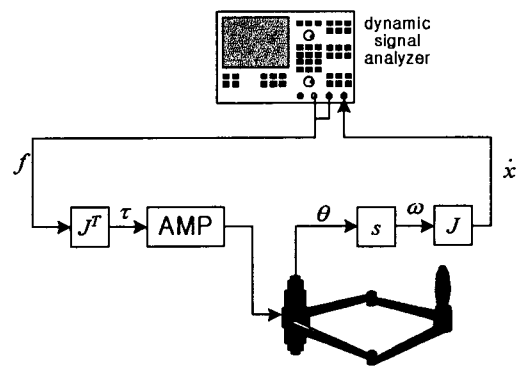


그림 9 주파수 특성 측정을 위한 블럭도  
Fig. 9 Block diagram for measurement of frequency response

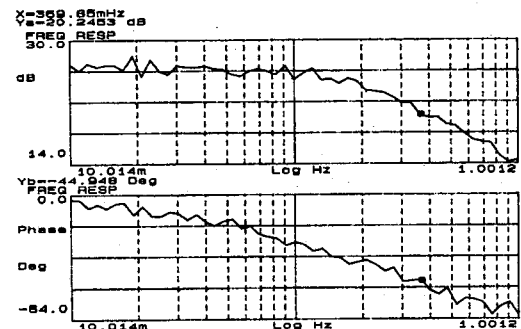


그림 10 햅틱 디바이스의 주파수 특성  
Fig. 10 frequency response of haptic device

가상 환경은 (4)에 나타난 것과 같이 스프링과 댐퍼로 구성된 가상 벽을 사용하였으며, 이때 가상벽의 스프링 상수값과 댐퍼 상수는 각각 1000[N/m]와 1[Nsec/m]로 주어졌다. 제안된 제어기에 대한 성능을 보이기 위해서는 사용자가 일정한 힘을 가하는 경우에 대해 컴퓨터에서 생성되는 힘과 햅틱 디바이스의 위치 응답을 보아야 한다. 그러나, 햅틱 인터페이스는 입력 힘이 사용자에게 의해 생성이 되어야 하고, 사용자가 상황에 따른 일정한 힘을 생성하는 것은 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 사용자에게 의해 생성되는 힘을 컴퓨터에 의한 단위 입력으로 가정하고 실험을 수행한

다. 사용자로부터  $-8[N]$ 의 힘이 가해졌을 때 대해, 가상벽의 전달 함수를 피드백 제어기로 사용하는 경우, 컴퓨터 내의 가상환경에서 생성되는 힘( $F_d$ )에 대한 응답과 사용자가 잡고 있는 디바이스의 위치에 대한 응답을 그림 11에 나타내었다. 이 경우 과도 상태에서 어드미턴스 불일치에 의한 공진 현상이 나타남을 알 수 있다.

주어진 가상 환경에 대한 투명성 관점에서의 최적 게인  $B_c$ 를 구하기 위해,  $B_c$  변화에 따른 (8)에 정의된 성능 지수의 값을 그림 12의 (a)에 나타내었으며, 이 그림으로부터 성능 지수를 최소화하는 값이  $B_c=8[Nsec/m]$ 임을 알 수 있다. 파라미터 불확실성에 대한 강인성을 보이기 위해 불확실성을 나타내는 전달함수  $W(s)$ 가  $0.5ms+0.5b$ 로 주어졌을 때,  $\|L(s)\|_\infty$ 를  $B_c$  값 변화에 따라 도식적으로 그림 12의 (b)에 나타내었다. 주어진  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 질량과 댐퍼 상수의 불확실성이  $0.0315 \leq \tilde{m} \leq 0.0945$ 와  $0.075 \leq \tilde{b} \leq 0.225$ 로 제한된다는 것을 의미한다.  $H_\infty$  게인이 1보다 작은 경우 강인 안정하며, 만일  $B_c$ 가 0인 경우는  $\|L(s)\|_\infty = 20dB$  이상으로 강인 안정성을 만족하지 못하지만,  $B_c=8[Nsec/m]$ 로 설정되는 경우에는  $H_\infty$  게인이  $0dB$ 이하로 강인 안정성 조건을 만족하는 것을 알 수 있다. 주파수 영역에서의 어드미턴스 응답을 그림 13에 나타내었으며, 이로부터 제안된 알고리즘에 의해 게인이 설정된 경우에 공진점이 생기지 않고 주어진 가상환경에 가까운 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 정해진 게인을 사용하는 경우에 대한 힘 응답과 위치 응답을 그림 14에 나타내었으며, 이 그림으로부터, 제안된 게인 설정 방법에 의해 응답에서의 오버슈트나 떨림 현상이 없어진 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문을 통해 가상 현실 구현을 위한 힘 반향 장치로 햅틱 디바이스를 이용하는 경우, 햅틱 인터페이스의 성능을 투명성과 강인 안정성 관점에서 해석하였다. 특히, 투명성을 극대화하기 위해 가상 환경과 햅틱 디스플레이의 어드미턴스 일치 관점에서 성능 지수를 정의하고,  $H_2$  최적 제어 방법을 이용한 제어기 설계방법을 제안하였다. 또한, 햅틱 시스템에서 발생할 수 있는 불확정성을 햅틱 디바이스 모델링 불확정성으로 국한하고, 이에 대해 강인 안정한 제어기를 구현하기 위한 조건을 제시하였다. 제안된 알고리즘의 효용성을 보이기 위해, 가상 환경을 스프링-점성 모델로 구성된 가상벽에 대하여 실험을 실시하여, 그 결과를 보였다.

추후 연구 분야로는 본 연구에서 제안된 제어기는 가상환경의 파라미터 값이 변경되는 경우 정의되는 가상환경에 대한 제어기를 재설계 해야하는 단점이 있는 바, 이를 극복하기 위해 정의된 제어 문제의 해를 해석적으로 구하여, 제어 파라미터를 정의되는 가상환경의 함수로 표현하는 것에 관한 연구가 진행될 예정이다. 또한, 제안된 알고리즘을 다축 햅틱 디바이스에 적용하기 위해 고려해야할 문제인 축간 간섭 등에 의한 불확실성에 대한 강인 제어 조건을 구하는 문제에 대해 연구가 진행 중에 있다.

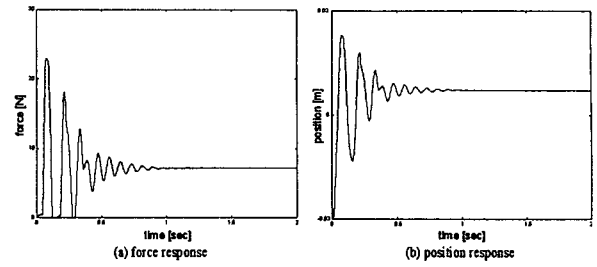


그림 11  $B_c = 0$ 인 경우의 힘 응답과 위치 응답  
Fig. 11 Force and position response for the case of  $B_c = 0$

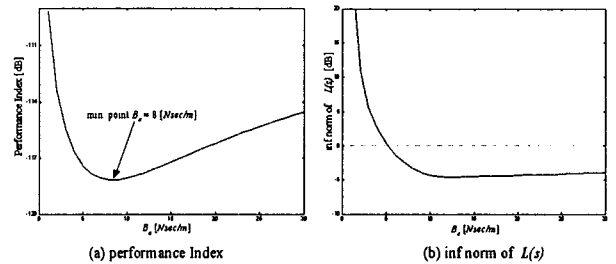


그림 12  $B_c$  변화에 따른 성능 지수와  $H_\infty$  놈  
Fig. 12 Performance index and  $H_\infty$  norm vs  $B_c$

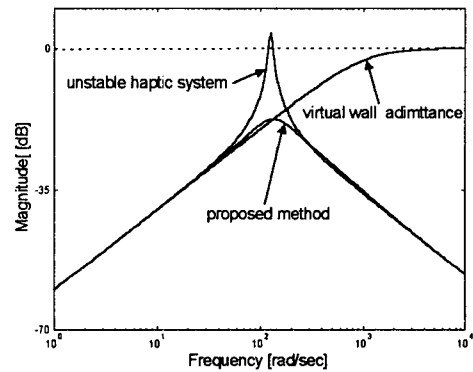


그림 13 햅틱시스템의 전달 어드미턴스 응답  
Fig. 13 Transmitted admittance of haptic system

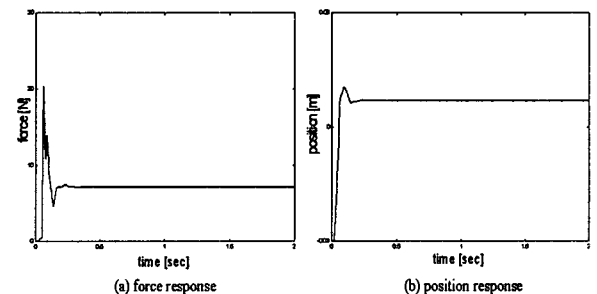


그림 14  $B_c = 8$ 인 경우의 힘 응답과 위치 응답  
Fig. 14 Force and position response for the case of  $B_c=8$

참 고 문 헌

- [1] R.J.Anderson and M.W.Spong, "Asymptotic Stability for Force Reflecting Teleoperators with Time Delay," *International Journal of Robotics Research*, vol. 11, No. 2, pp. 135-149, 1992
- [2] R.J.Adams and B.Hannaford, "A Two-Port Framework for the Design of Unconditionally Stable Haptic Interfaces," *Proceedings of 1998 IEEE/RSJ International Confernece on Intelligent Robotics and Systems*, pp.1254-1259, Victoria, 1998
- [3] J.E.Colgate and G.Schenkel, "Passivity of a Class of Sampled-Data System: Application to Haptic Interface," *Proceedings of American Control Conference*, pp. 3236-3240, Baltimore, 1994
- [4] J.E.Colgate and J.M.Brown, "Factors Affection the Z-width of a Haptic Display," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3205-3210, San Diego, May 1994
- [5] D.A.Lawrence, "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp.624-637, October 1993
- [6] M. Morari and E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice Hall, 1989
- [7] J.C. Doyle, B.A. Francis and A.R. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Company, 1992

저 자 소 개



엄 광 식 (嚴 光 植)

1970년 2월 5일 생. 1993년 한양대 공대 전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 기전 공학과 졸업(석사). 1995년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정



서 일 홍 (徐 一 弘)

1955년 4월 16일 생. 1977년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 졸업(공학). 1982~1985년 대우중공업 기술연구소 근무. 1987~1988년 미국 미시간대 객원 연구원. 현재 한양대 공대 전자공학과 교수