

가상반발력을 생성하는 햅틱장비의 안정성과 성능한계에 관한 연구

채 영 호*, Greg R. Luecke**

On the Stability and Performance Limits of the Force Reflecting Haptic Manipulator

Young-Ho Chai*, Greg R. Luecke**

ABSTRACT

The stability and theoretical performance limits of the feedback controlled force reflecting haptic manipulator have been discussed. All the virtual environment which interact physically with the haptic system have its own stable performance limit. Three different realization of the interfaces have been compared using the driving point admittance. The haptic system which is separated from the human hand or finger is superior to its stable interaction provided that there is a means to apply a direct damping between the haptic manipulator and the human finger. Electro-magnetic force is used for its digital implementation of the simple separated type haptic device. The stable limits of a virtual wall is calculated and experimental results show that there is performance limits in this implementation.

Key Words :Haptic interfaces(햅틱 인터페이스), Virtual reality(가상 현실), Virtual environments(가상 환경), Force control(힘 제어), Stability(안정성), Performance limits(성능한계), Robotics(로봇 공학)

1. 서 론

컴퓨터 영상과 대화형 화면의 이용이 설계나 시뮬레이션, 그리고 생산자동화 분야에서 뿐 만 아니라 의학분야 특히 미세 수술 분야 등에서 광범위하게 사용되고 있다. 최근에 가상환경을 통한 시뮬레이션에서는 이를 좀 더 정교하고 실제상황에 근접시키려는 노력이 환경으로부터 사용자에게로 힘의 전달을 통한 구현으로 시도되고 있다.

이와 같이 구현된 촉각과 감각은 가상의 물체를 다루고 조절함에 있어 아주 유용하게 사용될 수 있다. 햅틱(Haptic)요소를 이용한 가상환경의 구현은 많은 연구가 활발하게 진행되고 있으나 대부분이 환경과 사용자 사이의 안정적인 인터페이스를 위한 장비의 개발에 초점이 모아지고 있다.^(1,2,3)

힘을 통해 제어되는 로봇의 동력학적인 안정성, 특히 환경과 접촉을 필요로 할 경우에 정밀하고 넓은 대역에

* 중앙대학교 기계공학부

** Dept. of Mechanical Engineering, Iowa State Univ.

걸친 힘의 제어는 안정성 측면에서 상당히 어렵게 인식되고 있다.^(4,5,6) 안정적으로 상호작용을 하는 제어기의 이론적인 성능한계와 그 최종 성능을 구현하기 위한 제어기법이 구동점에서의 어드미턴스(Admittance)를 이용해서 설명될 수 있다.⁽⁷⁾ 움직이면서 상호작용을 하는 시스템에 관한 제어⁽⁸⁾와 연관안정성⁽⁹⁾에 관한 연구에서 햅틱 인터페이스의 이론적인 안정성의 한계를 유도하였고, 하나의 성능척도로서 최대한 얻을 수 있는 임피던스의 동적 범위를 제안하였는데, 이는 수동성(Passivity)과 같은 강인성요소를 만족시키면서 얻을 수 있는 임피던스를 의미한다. 또한 시스템에 내재한 감쇠요소가 구현 가능한 가상의 임피던스를 결정하는 중요한 역할을 한다는 것을 나타내는 완성된 형태의 수식을 유도하였다.⁽¹⁰⁾

햅틱 시스템은 로봇형태의 매니플레이터와 상호작용을 하는 사용자로 구성되는데 전자는 힘을 통한 로봇제어에서의 수동적인 환경으로 생각할 수 있다. 상호작용을 하는 손가락을 아주 유연하게 취급하여 간단한 힘 제어 방법으로 로봇을 안정적으로 구동하게 할 수 있는데, Kazerooni의 연구 결과에서 손 혹은 손가락의 제어기 또는 로봇 팔에 있는 약간의 유연성을 전체 시스템을 안정적으로 구동시키기 위한 필수조건으로 유도하였다.⁽⁶⁾

본 논문에서는 두 가지 전형적인 햅틱장비의 안정성을 이상적으로 힘이 생성되는 경우와 비교하고자 한다. 처음의 방법은 장비가 손과 직접 연결되어 있을 경우이고 다른 하나는 전자기력에 의해 힘을 발생시켜 햅틱장비로 하여금 사용자와의 직접연결을 피한 경우이다. 먼저 가상 접촉작업의 일반적인 안정성을 간략화된 연관시스템 전달함수와 리아프노프(Liapunov)함수에 의해 증명하고, 다음은 햅틱시스템의 이론적인 성능한계를 상호작용점의 어드미턴스와 근래적법을 통해 보여주고자 한다. 마지막으로 전자기력에 의한 인터페이스를 디지털 영역에서 위치추적과 힘의 상호작용 이득을 포함하여 모델링 하고, 적용된 힘의 대역과 가상의 벽의 최대성능을 라우프-허위츠(Routh-Hurwitz)시험을 통해 구하며, 실험을 통해 안정적인 한계의 예를 보여주고자 한다.

2. 가상 접촉작업의 안정성

햅틱장비는 장비와 상호작용을 하는 사용자와 힘을 전달하는 수단 그리고 가상 물체의 동역학적인 특성을 포함하는 수학적 모델로 이루어진다. 손가락과 가상의 벽의 개략적 특성을 Fig. 1에서 보여준다.

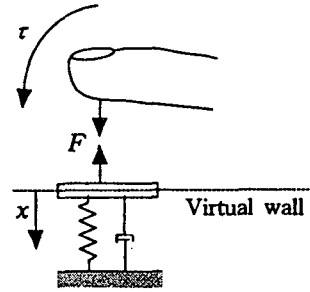


Fig. 1 Virtual contacting environment

본 논문에서 손가락의 동역학적인 특성은 시간에 독립적이고 기구학적인 구조에 관한 함수로 나타낼 수 있다고 가정하였다. 이를 이용하여 손가락의 운동방정식을 관절을 중심으로 한 좌표계에서 나타내면 다음과 같다.

$$H(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau - J^T F \quad (1)$$

여기서, $H(\theta)$ 는 손가락의 관성특성, $C(\theta, \dot{\theta})$ 는 원심력과 코리올리스효과, $G(\theta)$ 는 중력의 영향 그리고 τ 는 손가락 관절에서의 토크이다. x 를 작업공간 좌표계, $x = h(\theta)$ 로 나타내고 미분하여 $J \equiv \partial h / \partial \theta$ 로 정의하면 $\dot{x} = J\dot{\theta}$, $\ddot{x} = J\ddot{\theta} + \dot{J}\dot{\theta}$ 로 나타낼 수 있다.

사용자의 손가락이 항상 작업공간의 특이점에 해당하지 않는다고 가정하면, $|J| \neq 0$ 이고 $\ddot{\theta}$ 은 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = J^{-1}\ddot{x} - J^{-1}\dot{J}\dot{\theta} = J^{-1}\ddot{x} - J^{-1}\dot{J}J^{-1}\dot{x} \quad (2)$$

크로넬커(Kronecker)곱의 해석을 이용하여 C행렬에서 $\dot{\theta}$ 를 분리한 나머지를 C_m 으로 정의하면 C행렬은 다음식과 같고 손가락의 운동방정식은 식 (4)와 같다.

$$C(\theta, \dot{\theta}) = C_m(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = C_m(\theta, \dot{\theta})J^{-1}\dot{x} \quad (3)$$

$$HJ^{-1}\ddot{x} + (C_m - HJ^{-1}\dot{J})J^{-1}\dot{x} + G(\theta) = \tau - J^T F \quad (4)$$

손가락의 토크에서 중력보상을 가상토크와 분리하면 $\tau = \tau_v + G(\theta)$ 이며 이를 이용한 작업공간 좌표상의 손가락의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J^{-T}HJ^{-1}\ddot{x} + J^{-T}(C_m - HJ^{-1}\dot{J})J^{-1}\dot{x} = J^{-T}\tau_v - F \quad (5)$$

가상의 물체로부터의 힘을 간단한 질량, 스프링, 감쇠

시스템의 모델을 이용하면

$$F = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx \quad (6)$$

와 같고 여기서 M, B, K 는 각기 가상물체의 질량, 감쇠, 스프링 상수에 해당한다.

이를 연결한 사용자와 가상물체의 운동방정식은

$$(J^{-T}HJ^{-1} + M)\ddot{x} + [J^{-T}(C_m - HJ^{-1}\dot{J})J^{-1} + B]\dot{x} + Kx = J^{-T}\tau_v \quad (7)$$

이며, 리아푸노프(Lyapunov)함수를

$$V = \frac{1}{2}\dot{x}^T(J^{-T}HJ^{-1} + M)\dot{x} + \frac{1}{2}x^TKx \quad (8)$$

라고 하면

$$\dot{V} = \dot{x}^T[(J^{-T}HJ^{-1} + M)\ddot{x} + \frac{1}{2}(j^{-T}HJ^{-1} + J^{-T}\dot{H}J^{-1} + J^{-T}Hj^{-1} + J^{-T}Hj^{-1})\dot{x} + Kx] \quad (9)$$

이다. 이를 운동방정식 (7) 과 결합하면

$$\dot{V} = \dot{x}^T[J^{-T}\tau_v - B\dot{x} + \frac{1}{2}(j^{-T}HJ^{-1} + J^{-T}\dot{H}J^{-1} + J^{-T}Hj^{-1} - 2J^{-T}(C_m - HJ^{-1}\dot{J})J^{-1})\dot{x}] \quad (10)$$

이다. 여기서, $\dot{j}^{-1} = -J^{-1}\dot{J}J^{-1}$ 이고 $\dot{H} - 2C_m = 0$ 이므로

$$\dot{V} = \dot{x}^T[J^{-T}\tau_v - B\dot{x} - J^{-T}(j^T J^{-T}H + HJ^{-1}\dot{J} - 2HJ^{-1}\dot{J})J^{-1}\dot{x}] \quad (11)$$

이다. H 는 대칭이므로,

$j^T J^{-T}H + HJ^{-1}\dot{J} - 2HJ^{-1}\dot{J} = 0$ 이고, 이를 식 (11)에 대입하면,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\dot{x}^TB\dot{x} + \dot{x}^T J^{-T}\tau_v \\ &= -\dot{x}^TB\dot{x} + \dot{x}F_v \end{aligned} \quad (12)$$

이다. 안정적인 시스템을 위한 조건은 $\dot{V} < 0$ 이므로

$$\dot{x}^TB\dot{x} > \dot{x}F_v \quad (13)$$

이다. 식 (13)는 시스템을 안정적으로 유지하면서 구현하는 가상의 힘에는 일정한 한계가 있고 시스템의 감쇠효과를 늘이면 좀 더 큰 가상의 힘을 안정적으로 생성할 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 시스템의 물리적 한계에 따라 가능한 감쇠효과가 정해지므로 임의의 가상의 힘을 안정적으로 제공하는 햅틱시스템은 구현될 수 없다고 생각한다.

상호작용을 하고 있는 시스템의 또 다른 면은 가상환경으로부터의 힘을 사용자에게 전달하는 기구물과 사용자와의 상호연관관계이다. 힘을 전달하는 로봇 매니퓰레이터를 임피던스 $Z(s) = F/\dot{x}_v$ 로 사용자의 손을 어드미턴스 $Y(s) = \dot{x}_v/(F_h - F)$ 로 모델링하면 Fig. 2와 같이 입력력이 둘이고 출력력이 둘인 시스템으로 표시할 수 있다. 여기서 첨자 h 는 손을 r 은 로봇을 나타낸다.

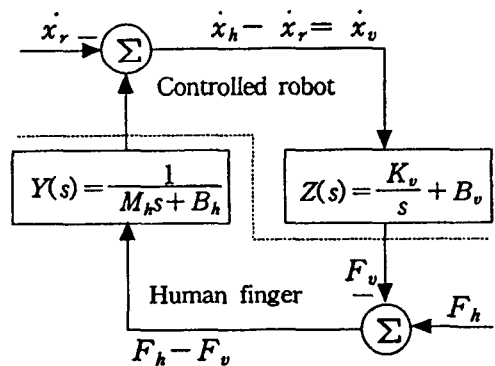


Fig. 2 Block diagram of the coupled system

연관시스템의 전달함수는

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ F_h - F_v \end{bmatrix} = \frac{1}{[1 + Y(s)Z(s)]} \begin{bmatrix} -1 & Y(s) \\ Z(s) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ F_h \end{bmatrix} \quad (14)$$

이다. 여기서 $x_v = x_h - x_r$ 이고 연관시스템은 왼쪽 아래항에 해당하는 식 (15), $[1 + Y(s)Z(s)]^{-1}Z(s)$ 와 $Y(s)$ 가 안정적이면 내부적으로는 안정된 시스템이라고 할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$[1 + Y(s)Z(s)]^{-1}Z(s) = \frac{(M_h s + B_h)(B_v s + K_v)}{M_h s^2 + (B_h + B_v)s + K_v} \quad (15)$$

위의 전달함수를 지수 함수적으로 안정적이게 하기 위한 풀과 제로는 적절한 가상환경 K_v , B_v 를 선정함으로 얻을 수 있고 이는 햅틱 장비의 물리적인 한계에 의해 결정된다.

3. 가상환경과 상호작용의 어드미턴스 비교

가상의 힘, $F_v = M\ddot{x}_v + B\dot{x}_v + Kx_v$,는 햅틱장비 즉 일련의 기계장치에 의해서 생성되는데 일반적인 기계장치의 경우 질량과 스프링 그리고 감쇠기에 의해 간단하게 표현되지 않고 수동적인 환경으로도 표현할 수 없다. 힘에 의해 제어되는 로봇의 동적 현상을 예측하기 위한 집중매개변수 모델이 개발되었고, 이들 로봇의 불안정성은 힘을 발생하는 구동부와 외력을 측정하는 센서부위의 불일치로 인해서 발생하게 된다고 알려져 있다.⁽¹²⁾ 하지만, 많은 햅틱장비가 힘을 측정하는 센서를 포함하지 않고 위치보정에 의해 힘을 사용자에게 전달하는 방식을 사용하고 있다. 본 논문에서 햅틱장비는 자체구동 능력을 가진 능동적인 환경으로 표현되었으며 이는 사용자의 손 혹은 손가락을 추적하면서 위치의 차이에 의해 발생하는 임피던스를 가상의 힘으로 발생시킨다. Fig. 3과 같은 1차원 모델이 햅틱장비인 능동적인 환경을 나타내고 있다.

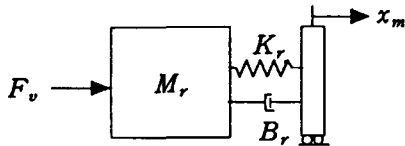


Fig. 3 Impedance model of the haptic manipulator

스프링 강성 K_r 은 링크의 컴플라이언스와 동력전달, 감쇠효과 B_r 은 질량과 입력 점과의 분리를 나타내고 x_m , F_v 는 각각 장비의 구동거리와 대상이 되는 가상의 힘을 나타낸다. 여기서 첨자 m 은 모터를 의미한다. 일반적인 힘제어 응용의 대상인 수동적 환경은 선형 혹은 비선형의 질량, 강성 그리고 감쇠기의 조합이라고 말할 수 있다. 이와 같은 임의의 수동환경과 안정적으로 상호작용을 할 수 있는 조건은 제어되는 시스템 역시 수동적인 어드미턴스를 포함해야만 한다.⁽⁹⁾

이 햅틱장비와 상호작용을 하는 사용자의 손가락의 모델에서는 신경과 근육의 이상적인 분포에 의해서 일반적인 매니플레이터에서 나타나는 센서의 구동점과의 불일치 측면은 배제될 수 있다. 때문에, 진동 모드를 포함하지 않는 간단한 강체가 사용자의 손가락을 모델링하는데 사용되었다. 실험결과⁽¹³⁾에서 손가락 끝에 해당하는 질량(평균 21.5g)은 모든 실험 대상자와 힘의 강약에 관계없이 일정한 값을 유지하고 있다. Fig. 4에서 이상적인 힘의 반발을 구현하는 햅틱장비와 상호작용을 하는 손가락의 결합된 시스템을 보여준다.

3.1 이상적인 가상 힘의 피드백

어떠한 구조적 상황에서도 안정적이고 평형상태의 가상의 힘인 F_v 를 제공할 수 있다면, 그 시스템의 어드미턴스는 항상 안정적이다.

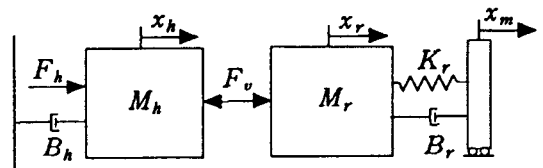


Fig. 4 Coupled system model with the ideal force feedback

식 (16)이 Fig. 4의 상호작용점에서 어드미턴스를 나타내고 Fig. 5는 $x_r = x_h$ 일 경우에 가능한 근궤적을 나타낸다.

$$Y(s) = \frac{\dot{x}_r}{F_h} = \frac{s}{(M_r + M_h)s^2 + (B_r + B_h)s + K_r} \quad (16)$$

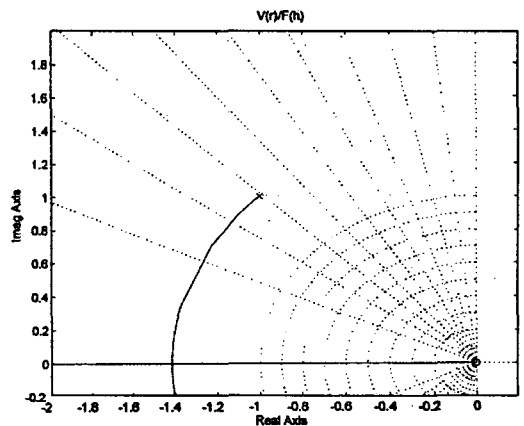


Fig. 5 Root locus plot shape for the figure 4

하지만 로봇 매니플레이터 햅틱장비에 의해 구현된 가상의 힘은 언제나 그 구성 위치에 독립적이지 못하므로 위와 같은 이상적인 가상 힘의 피드백은 비현실적이다.

3.2 장비와 사용자가 물리적으로 연결된 형태의 힘피드백

이 경우 가상의 힘은 햅틱장비와 프로그램에 의해 정의된 가상표면과의 위치차이에 의해 만들어지고 로봇의 위치 x_r 은 손가락의 위치 x_h 와 같은 위치에 있지 않는다. 이는 Fig. 6과 같이 모델링 될 수 있고, 상호작용점에서의 어드미턴스인 식 (17)의 관점에서 Fig. 7과 같이 조건부 안정적인 시스템이다.

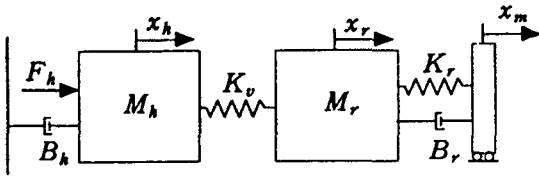


Fig. 6 Coupled system model with the direct connection type force feedback

$$Y(s) = \frac{\dot{x}_r}{F_h} = \frac{K_v s}{D_1} \quad (17)$$

여기서,

$$D_1 = M_h M_r s^4 + (M_r B_h + M_h B_r) s^3 + \{K_v (M_h + M_r) + B_h B_r + M_h K_v\} s^2 + \{K_v B_r + B_h (K_v + K_r)\} s + K_v K_r$$

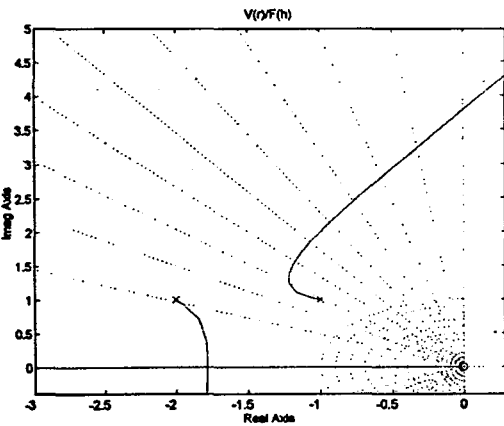


Fig. 7 Root locus plot shape for the figure 6

직접 연결된 형태에서 가상의 힘을 발생시키는 경우

상호작용 포트에서의 감쇠효과는 없거나 무시할 수 있을 정도로 작다. 이 감쇠효과는 구동점에서 모터를 제어하여 간접적으로 구현할 수 있다. 이 때 구동점의 움직임이 식 (18)과 같이 표현 될 경우, 힘의 피드백 없이 구동점 비례 미분제어를 이용하면 어드미턴스는 식 (19)와 같게되고 이 전달함수는 식 (17)과 같은 차원이기 때문에 직접연결 형태와 같은 조건부 안정적인 근계적을 보여준다.

$$x_m = K_s (\dot{x}_{rd} - \dot{x}_r) + K_p (x_{rd} - x_r) \quad (18)$$

$$\Rightarrow K_p x_{rd} - (K_s s + K_p) x_r$$

따라서,

$$Y(s) = \frac{\dot{x}_r}{F_h} = \frac{K_v s}{D_2} \quad (19)$$

여기서,

$$D_2 = M_h (M_r + B_r K_s) s^4 + \{K_s (M_h K_r + B_r B_h) + M_r B_h + M_h B_r\} s^3 + \{K_s (K_r B_h + B_r K_v) + K_p (M_h K_r + B_r B_h) + K_r M_h + K_v M_r + B_r B_h + M_h K_v\} s^2 + \{K_p (B_h K_r + B_r K_v) + K_s K_r K_v + K_v B_r + K_v B_h + B_h K_v\} s + K_p K_r K_v + K_v K_r$$

3.3 전자기력에 의해서 분리된 햅틱장비의 힘 피드백

전자기력을 이용한 햅틱장비의 매니플레이터 부분은 사용자의 손과 분리되게 설계될 수 있고 구동 부분이 아닌 상호작용 포트에서 전자기력에 의해 직접 감쇠효과를 구현할 수 있다. 이 시스템은 Fig. 8과 같이 모델링 할 수 있고 식 (20)의 어드미턴스는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 항상 안정적인 근계적을 갖는다.

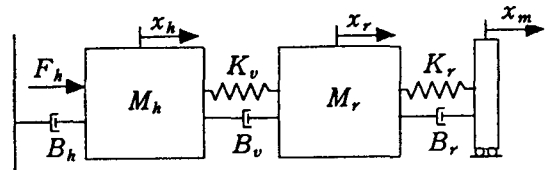


Fig. 8 Coupled system model with the electromagnetic force feedback

$$Y(s) = \frac{\dot{x}_r}{F_h} = \frac{(B_v s + K_v) s}{D_3} \quad (20)$$

여기서,

$$D_3 = M_h M_r s^4 + \{M_r(B_h + B_v) + M_h(B_r + B_v)\}s^3 + \{M_h(K_r + K_v) + K_v M_r + B_r B_v + B_r B_h + B_h B_v\}s^2 + \{K_v(B_h + B_r) + K_r B_v + B_h K_r\}s + K_r K_v$$

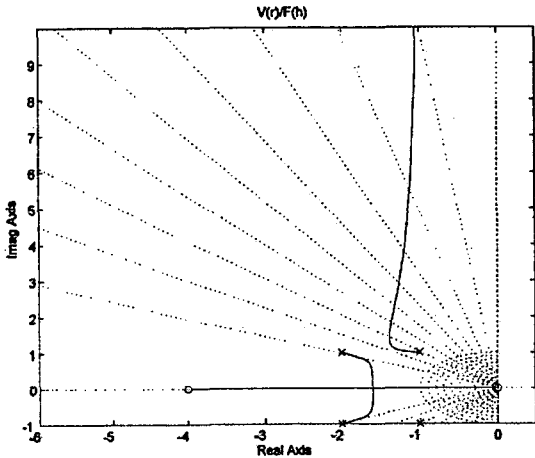


Fig. 9 Root locus plot shape for the figure 8

4. 분리된 형태 햅틱장비의 성능한계

본 논문에서 설명하고 있는 사용자와 분리된 형태의 햅틱장비는 로렌츠(Lorentz)의 원리를 이용한 전자기력에 의해 구현될 수 있다.⁽¹⁴⁾ 두 쌍의 자석이 햅틱장비에 의해 운반되고 사용자는 손끝에 코일을 포함한 끝무형태의 부착물을 착용한다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 햅틱장비인 로봇 기구물은 손가락과 분리될 수 있으며 필요한 순간에 전자기력에 의해 연결된다. 사용자는 힘 센서가 부착된 퓨마로봇의 종단의 핸들을 이용하여 전체장비를 이동시킬 수 있고, 이 핸들을 햅틱장비의 기저위치 추적에 위해 사용한다. 이를 통해 소형 햅틱장비를 넓은 작업공간에서 사용할 수 있게 해 준다.

두 개의 철제골격에 부착되어 있는 두 쌍의 자석은 전자기장을 중첩시켜 그 크기를 배가시킨다. 표면에서의 자기장의 약 70% 크기인 3765 Gauss⁽¹⁵⁾를 얻을 수 있다고 가정했을 때 25mm 와이어를 100회 감아 자기장에 노출시켜 최대 5A의 전류를 흐르게 하면

$$F = L \circ \hat{i} \times \hat{B} \tag{21}$$

$$= (100 * 0.025) * 5 \times (3765 * 10^{-4} \text{ weber}) * 2 = 9.4N$$

의 힘을 얻을 수 있다. 또한, 얻을 수 있는 힘의 대역은 제어루프의 속도와 코일의 시정수에 의해 정해지게 되고 이 코일의 시정수는 코일의 인덕턴스와 레지스턴스의 비에 의해 결정되는데, 이는 대략 킬로헤르쯔(kHz) 단위의 대역을 가지므로 이보다 대체로 느린 제어루프의 샘플링 주파수에 의해 발생시키고자 하는 힘의 대역의 최대값이 정해진다고 할 수 있다. 분리된 형태의 햅틱장비는 기구물의 움직임과 독립적으로 힘을 구현할 수 있기 때문에 이론적으로는 나이퀴스트(Nyquist) 주파수가 구현될 수 있는 힘의 최대 주파수라고 할 수 있다.

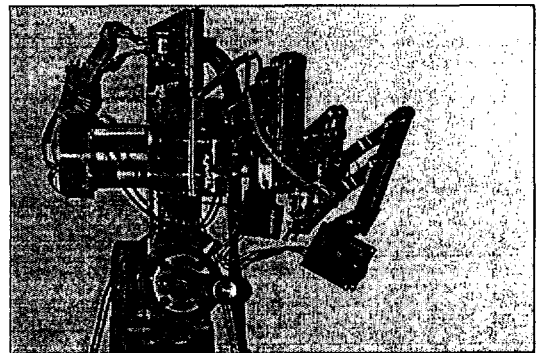


Fig. 10 Haptic Interface using the electromagnetic force generation

사용자의 손가락 움직임은 선형 광 센서에 의해 측정하게 되는데, 손가락 끝에 부착된 광원과 햅틱장비의 변위차이에 비례한 전압을 발생시키고, 이를 통해 햅틱장비를 구동시켜 에러를 보정 하면서 손가락을 추적하게 된다. 비례미분제어를 사용하기 위해 유한차분법에 의해 속도를 계산하는데 이는 높은 주파수의 노이즈를 발생시킴으로 1차원 로우패스필터를 이용하여 노이즈를 제거하게 된다. 이때 사용하는 컷오프(Cutoff) 주파수는 시스템의 성능뿐만 아니라 안정성 면에도 큰 역할을 하게 되는데 느린 주파수는 노이즈를 효과적으로 제거하지만 시스템의 안정성에 치명적인 지연효과를 발생시킨다. Fig. 11

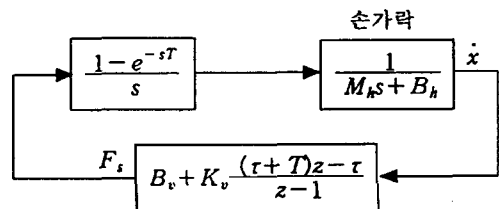


Fig. 11 Implementation of a virtual wall

은 이와 같은 효과를 고려한 가상의 벽을 영차 홀더를 거친 힘을 이용해서 구현한 것이다. 역방향의 유한차분법을 이용한 사상과 일차 로우패스 필터를 순차적으로 접속하여 가상의 벽을 구현하였다.

영차 홀더를 포함한 손가락의 전달함수는 식 (22)와 같고, 이를 이용한 전체 시스템의 특성방정식은 식 (23)과 같다.

$$G(z) = (1 - z^{-1})Z\left\{\frac{1}{s(M_h s + B_h)}\right\} = \frac{1}{B_h} \left[\frac{1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}}}{z - e^{-\frac{B_h T}{M_h}}} \right] \quad (22)$$

$$1 + GH = 1 + \frac{1}{B_h} \left[\frac{1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}}}{z - e^{-\frac{B_h T}{M_h}}} \right] * \left[\frac{\{B_v + K_v(\tau + T)\}z - (B_v + K_v\tau)}{z - 1} \right] = B_h z^2 + \left[\{B_v + K_v(\tau + T)\} \left(1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right) - B_h \left(1 + e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right) \right] z + B_h e^{-\frac{B_h T}{M_h}} - (B_v + K_v\tau) \left(1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right) = 0 \quad (23)$$

라우즈-허위츠(Routh-Hurwitz) 안정성검사를 위해 사상함수로 $r = \frac{z-1}{z+1}$ 가 사용되었다. 그러므로,

$$(B_h - m + n)r^2 + 2(B_h - n)r + (B_h + m + n) = 0 \quad (24)$$

이다. 여기서, $n = B_h e^{-\frac{B_h T}{M_h}} - (B_h + K_v\tau) \left(1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right)$

$$m = \{B_v + K_v(\tau + T)\} \left(1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right) - B_h \left(1 + e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right)$$

이다. 라우즈-허위츠 안정성검사를 적용하면,

$$i) B_h + m + n = K_v T \left(1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right) > 0$$

따라서, $K_v > 0$ (25)

$$ii) 2(B_h - n) = 2(B_h + B_v + K_v\tau) \left(1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right) > 0 \quad (26)$$

따라서, $(B_h + B_v + K_v\tau) > 0$

$$iii) B_h - m + n = 2B_h \left(1 + e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right) - \left(1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}} \right) \{2(B_h + K_v\tau) + K_v T\} > 0$$

$$\text{그러므로, } B_v + \frac{K_v T}{2} + K_v\tau < B_h \left(\frac{1 + e^{-\frac{B_h T}{M_h}}}{1 - e^{-\frac{B_h T}{M_h}}} \right) \quad (27)$$

이다. 마지막 결과는 항상 1보다 큰 $\coth\left(\frac{B_h T}{2M_h}\right)$ 를 제외하고 Colgate의 수동성 요구조건⁽¹⁰⁾과 유사하다. 다른 조건이 동일할 경우 빠른 샘플링 주기는 시스템의 성능한계를 증가시켜주는 효과를 갖는다. Fig. 12는 안정된 상호작용을 위해서는 탄성계수와 감쇠계수의 결합된 값의 한계가 있음을 보여준다. 자기장을 고정시킨 상태에서 가상의 벽을 탄성계수 K_v 와 감쇠계수 B_v 의 조합으로 구현한 후 코일과 연결된 손가락의 감쇠계수를 임의로 변화시키면서 상호작용 결과를 손가락 위치와 적용된 힘에 의해 표시하였다. 안정적인 상호작용중의 하나가 Fig. 12-(b)에서 보여진다. 손가락의 점성감쇠는 사용자와 사용자의 손의 자세 그리고 발생시키려는 힘에 따라 변할 수 있고 Fig. 12-(f)에서 다른 변수가 고정되었을 경우 손가락의 감쇠효과를 증가시켜 상호작용을 안정하게 만들 수 있음을 보여준다. 식 (27)에서 필터의 느린 시정수 또한 시스템의 안정적 성능한계를 감소시키는 역할을 하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 물리적으로 햅틱장비와 상호작용을 하는 모든 가상환경은 자신의 성능한계를 가짐을 가상의 벽과 Lyapunov함수를 이용하여 증명하였다. 또한, 전자기력을 이용한 햅틱장비는 장비의 대부분을 사용자에게 반향되는 힘을 발생시키려는 부위와 분리될 수 있게 하기 때문에, 상호작용 부위에 직접 감쇠효과를 구현하여 시스템을 항상 안정적인 상태로 구동할 수 있게 한다. 본 논문에서는 이를 상호작용점의 어드미턴스와 근계적법을 이용하여 증명하였다. 분리된 형태의 햅틱장비를 이용하여 가상의 벽을 구현할 경우, 그 성능한계가 연결된 형태의 햅틱장비의 최대값인 손가락의 감쇠효과 이상을 나타내는 것을 Routh-Hurwitz 안정성 검사를 통해 증명하였고

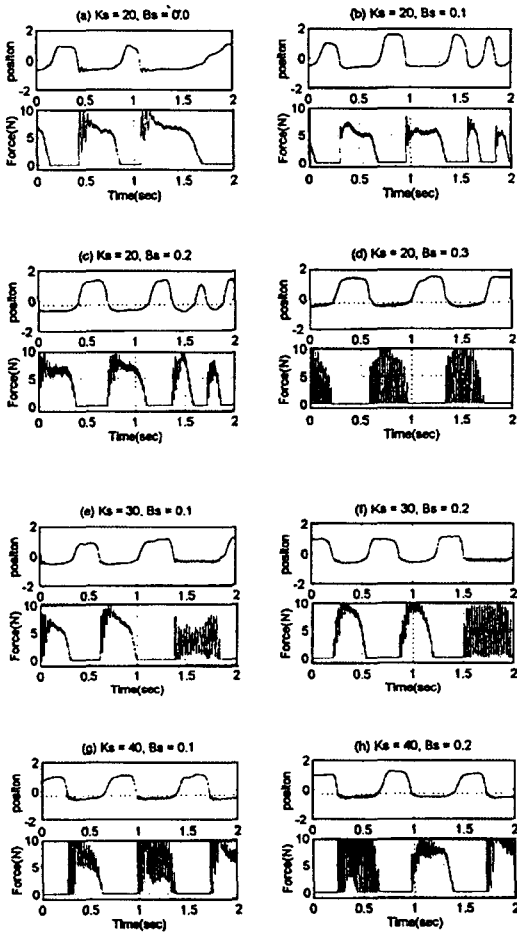


Fig. 12 Interactions with the virtual wall

실험결과도 가상의 힘을 발생시키기 위한 탄성계수와 감쇠계수의 복합치에 한계가 있음을 보여주었다.

참고 문헌

1. Adelstein, B. A., M. J. Rosen, "Design and Implementation of a Force Reflecting Manipulandum for Manual Control Research," ASME WAM, pp. 1-12, Anaheim, CA, 1992.
2. Buttle, P., B. Hannaford, "Pen-Based Force Display for Precision manipulation in Virtual Environments," VRAIS '95, pp. 217-224, 1995.
3. Millman, P. A., M. Stanley, and J. E. Colgate, "Design of a High Performance Haptic Interface to

- Virtual Environments," IEEE VRAIS '93, pp. 208-216, 1993.
4. An, C. H., J. M. Hollerbach, "Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators," IEEE ICRA '87, pp. 890-896, May 1987.
5. Hogan, N., J. E. Colgate, "Stability Problems in Contact Tasks," Robotic Review, MIT Press, 1989.
6. Kazerooni, H., "Human Induced Instability in Haptic Interfaces," Advances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interfaces, ASME DSC Vol. 49, pp. 15-27, 1993.
7. Newman, W. S., "Stability and Performance Limits of Interaction Controllers," Journal of Dynamic Systems, Measurement, Control, Vol. 114, pp. 563-570, December 1992.
8. Colgate, J. E., "The Control of the Dynamically Interacting System," Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, August 1988.
9. Colgate, J. E., "Strictly Positive Real Admittance for Coupled Stability," Journal of the Franklin Institute, 329(3), pp. 429-444, 1992.
10. Colgate, J. E., J. M. Brown, "Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display," IEEE ICRA '94, pp. 3205-3210, 1994.
11. Maciejowski, J. M., Multivariable Feedback Design, Addison-Wesley, New-York, 1989.
12. Eppinger, S. D., W. P. Seering, "On Dynamic Models of Force Control," IEEE ICRA '86, pp. 29-34, 1986.
13. Hajian, A. Z., R. D. Howe, "Identification of the Mechanical Impedance of Human Fingers," ASME DSC Vol. 55-1, pp. 319-327, 1994.
14. Luecke, G. L., Young-Ho Chai, J. A. Winkler, and J. C. Edwards, "An Exoskeleton Manipulator for Application of Electro-Magnetic Virtual Forces," ASME DSC Vol. 58, pp. 489-494, 1996.
15. Winkler, J. A., "Precision Control of a Force Reflecting Hand Exoskeleton," M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Iowa State University, August 1995.