〈論文〉 4-5-8

'99 전력전자학술대회 우수추천논문

3자유도 힘 반향 역감장치

姜 園 贊, 金 桐 玉, 申 碩 斗, 金 永 炯

3DOF Force-Reflecting Interface

Won-Chan Kang, Dong-Ok Kim, Suck Doo Shin, Young-Dong Kim

요 약

본 논문에서는 가상환경 내의 물체로부터 역감을 얻을 수 있는 3자유도 힘 반향 장치를 제안한다. 이 시스템은 디바이스와 가상환경의 모델과 힘 반향 렌더링 알고리즘 등으로 구성되었다. 평행링크 메커니즘과 와이어에 의한 토크전달 그리고 임피던스 제어가 가능한 제어기를 사용해 3자유도 힘 반향 역감장치(Force reflecting device)를 설계하였다. 위치 함수만으로 계산되는 힘 반향동작은 God-Object 알고리즘을 사용했다. 3차원 가상 물체와 시험 제작한 역감장치(Force-reflecting device)를 인터페이스 실험을 통해 3차원 가상물체와 접촉과 비접촉 그리고 푸쉬 버튼을 만지는 느낌을 검출하였다.

ABSTRACT

In this paper, we present the 3DOF force-reflecting interface which allows to acquire force of object within a virtual environment. This system is composed of device, virtual environment model, and force-reflecting rendering algorithm. We design a 3 DOF force reflecting device using the parallel linkage, torque shared by wire, and the controller of system applied by impedance control algorithm. The force reflecting behaviour implemented as a function position is equivalent to controlling the mechanical impedance felt by the user. Especially how force should be supplied to user, we know using a God-Object algorithm.

As we experiment a system implemented by the interface of 3D virtual object and 3DOF force-reflecting interface, we can feel a contact, non-contact of 3D virtual object surface and sensing of push button model.

Key Words : Haptic, Force reflecting device, Haptic rendering, Virtual reality

1. 서 론

인간에게 현실감을 제공하기 위한 수단으로 외부에서 받아들이는 수많은 정보들 중에 약 70%는 시각에 의해 흡수되기 때문에 지금까지 대부분의 가상현실의 연구는 실시간 3차원 입체영상 구현에 치중되어왔다. 그러나 최근 시각과 청각에 이어 촉각에 대한 관심이 높아가고 있다. 컴퓨터 메모리 상에 가상의 세계를 모델링하고 인간과 역감을 상호 인터페이스 하는 디바이스를 역감장치라 하는데 이들 디바이스 가운데는 단순히 위치정보만을 제공하는 Cyber Glove나 Data Glove, Motion Capture 장비 등이 있고, 역감까지 제시하는 장치로는 Thomas H. Massie 의 PHANToM과, Iwata의 Haptic Master등이 있다[1]. 그러나 기존 개발된 장치들은 가상공간의 제시능력과 분해능이 떨어지고 구조적인 문제로 토크 손실 및 백러쉬, 부피 및 무게 등의 단점을 지닌다[2]. 한편 국내의 역감장치의 연구는 준비 단계이며, 현재 외국에서 상품화된 장치들은 대부분 고가이다.

본 연구에서는 저가이며 인간에게 안정된 상호작용력을 제공하는 범용의 Man-Machine Haptic Interface 장치의 개발을 목적으로 위치 분해능이 높고, 가상환

경과 접촉시 충분한 역감제시가 가능한 3자유도 힘 반향 역감장치를 개발하였다. 개발된 역감 장치의 액츄에이터는 DC서보 모터를 사용하여 전류제어에 기반을 둔 임피던스제어를 하였고, 기구학적 구조는 패러럴 방식의 링크 메커니즘과 와이어 증폭방식을 채용 안정성 및 토크의 증폭을 꾀했다. 이는 종래에 개발된 장치의 문제점인 토크손실, 마찰 손실 등을 최소화하여 원하는 힘을 그대로 반영시킬 수 있도록 설계를 하였다. 본 논문에서는 자체 제작한 역감장치를 가상환경과 인터페이스하여 3차원 그래픽환경에서 여러 가지의 역감을 구현한 결과를 서술한다.

2. 역감 발생의 원리

인간 손-팔격은 손가락 끝에서 측정된 동력학적인 임피던스(impedance)에 비례하여 관절이 일정한 강성(stiffness)을 발생함으로써 탄성력을 가지고 움직이므로 관절의 강성을 변화시킴으로써 손가락 끝의 임피던스가 지속적으로 변화하여 복잡하고 어려운 작업을 행하게 된다[3-6].

여기서는 단순한 역감반을 나루기 위하여 실 환경가운데서 가장 간단한 벽을 모델화 한다. 벽은 그림 2와 같이 탄성요소와 점성요소가 병렬로 구성되어지며 벽과 수직인 한쪽 방향으로만 구속력이 강하게 나타난다. 사람의 손끝이 벽과 접촉한 위치를 x_w라 하면 접촉하기전의 자유공간 $(x<x_w)$과 접촉이 이루어져서 힘의 평형이 이루어진 구속공간 $(x\geq x_w)$으로 나누어 생각할 수 있다. 이때 임의의 위치 x에 대한 함수 $\xi(x)$를 식으로 정의한다면 손끝이 받는 탄성력은

$$\begin{aligned}\xi(x)&=0 \qquad (x<x_w)\\ \xi(x)&=1 \qquad (x\geq x_w)\end{aligned} \tag{1}$$

F_K와 점성력 F_B는

$$\begin{aligned}F_K&=K_w(x-x_w)\ \xi(x)\\ F_B&=B_w\dot{x}\ \xi(x)\end{aligned} \tag{2}$$

로 각각 표시되며 두 힘의 합성은

$$F=F_K+F_B=\xi(x)[K_w(x-x_w)+B_w\dot{x}] \tag{3}$$

이며, 식(3)은 사람이 벽과 접촉하는 느낌을 힘으로 표현한 것이다.

그러나 가상환경에서 가상 벽과 인간의 손이 직접 접촉할 수 없고 역감장치를 통해서 접촉감을 느껴야 하기 때문에 이를 모델링 하면 그림 2와 같다. 여기서 역감장치의 탄성계수 K와 점성계수 B는 힘의 평형 점에서

$$\begin{aligned}K&=\frac{x}{x_d-x}\cdot K_w\\ B&=\frac{\dot{x}}{\dot{X}}\cdot B_w \quad (단, X=x_d-x)\end{aligned} \tag{4}$$

와 같이 구할 수 있다.

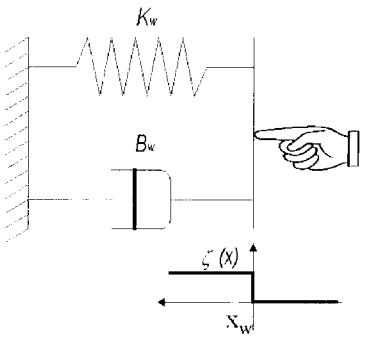


그림 1 벽의모델(K_w:강성, B_w:점성, x_w:접촉위치)
Fig. 1 Model of wall(K_w:stiffness, B_w: dam-ping, x_w: location of contacted)

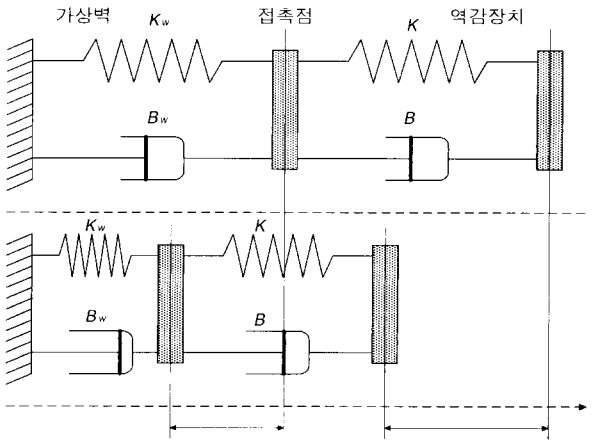


그림 2 역감장치와 접촉이 이루어질 때의 가상 벽
Fig. 2 Virtual wall when the Force-reflecting device is contacting

가상 벽의 변위 x와 점·탄성 계수 K_w, B_w값을 확인된 값으로 설정하면 매니퓰레이터의 위치정보 x_d값만으로도 역감장치로의 힘 반향을 쉽게 계산해 낼 수 있다. 즉, 매니퓰레이터의 위치 정보만으로도 역감장치의 K, B값을 산출하여 사람이 실세계에서 느낄 수 있는 벽의 감각을 가상환경에서 제시할 수 있다.

3. 역감장치의 설계

3.1 매니퓰레이터

역감장치는 컴퓨터 그래픽으로부터 만들어진 가상의 물체와 접촉이 일어났을 때, 실제 물체와의 접촉느낌을 제시해 주어야 하며 또한 역감장치를 사용하는 사용자의 움직임이 방해되어서는 않된다.

제작된 역감장치는 액츄에이터로는 백슬 DC서보 모터를 사용하였고, 링크는 역감장치에서 보편화된 패럴럴 구조로 안정성 및 토크증가를 기하였고, 와이어 증폭에 의한 구동방식으로 토크손실이 최소화 되도록 제작하였다. 와이어 증폭 방식은 정·역의 급속한 변환시 진동을 흡수하며 일정한 와이어 궤적을 따라 모터가 움직이므로 마찰손 및 백러쉬 해결에 가장 알맞은 구조였다[6-9]. 힘의 제어를 위해 자체 제작한 제어기를 사용하여 최대 8[N]의 힘을 제시할 수 있도록 설계하였다. 이 힘의 크기는 완전구속의 벽을 제시하기에 적은 양이지만 벽에 근접 느낌을 제시하는데 충분하다. 그림 3은 시험 제작한 역감장치의 사진을 보인다.

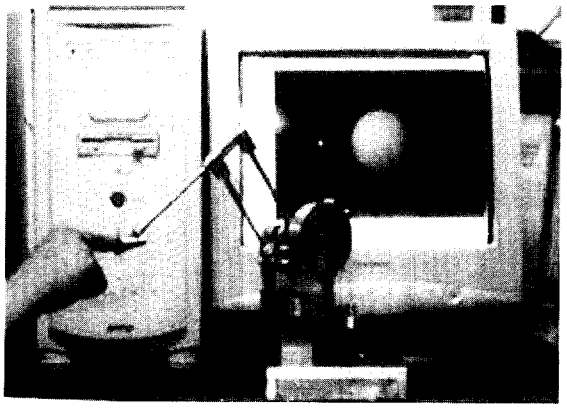


그림 3 시험 제작한 역감 장치
Fig. 3 Prototype of Force-reflecting device

3.2 제어기 및 드라이버 구성

그림 4는 역감장치 액츄에이터의 제어회로 구성도를 나타낸다. 관절의 위치 데이터는 500[P/R] 엔코더를 통해 검출되어 FPGA로 구성된 XC4010E에서 4체배 되므로 2000 [P/R]의 분해능을 갖는다. 인터럽트 주기는 1[kHz]를 설정하였다[10]. 소프트웨어와 하드웨어의 인터페이스 속도를 증가시키고 안정한 동작을 위해 VxD로 작성된 드라이버가 이를 처리하도록 하였고, 컴퓨터로 입력된 위치 데이터는 내부 랜더링 알고리즘에 의해 처리되어 D/A출력부로 전송된다. D/A출력부는 12비트 역감 데이터 값을 AD664에서 전압으로 변환, 각 모터에 계산된 힘이 분배되어 디바이스가 가상환경의 느낌을 제시하게 한다. 그래픽 랜더러를 거쳐 그래픽 처리부로 들어온 데이터는 OpenGL 라이브러리에 의해 화면에 현재 엔드 포인터와 가상물체를 그려주게 된다. 제어 프로그램에서 인터럽트는 소프트웨어로 제작한 MMtimer()함수를 이용 인터럽트 벡터를 생성한 후 역감 랜더러는 1[kHz], 그래픽 랜더러는 20[Hz]의 주기로 발생시킨다[11]. 이때 통신 타이밍이 서로 일치하지 않기 때문에 실제의 엔드 포인터의 위치와 그래픽이 상이한 결과를 초래할 수 있다 이를 해결하기 위해 힘 적분 알고리즘을 추가하여 해결하였다[11]. 그 원리는 운동방정식

$$m\frac{dV}{dt} = f \tag{5}$$

의 양변을 t에서 $t+\Delta t$까지 적분하여 Δt초 후의 물체의 속도를 구하면

$$V(t+\Delta t) = V(t) + \frac{1}{m}\int_t^{t+\Delta t} f\,dt \tag{6}$$

와 같다. 이는 물체의 운동속도가 힘의 적분항인 $\int_t^{\Delta t} f\,dt$ 에 의해서 결정되므로 동적 그래픽 랜더링 알고리즘에 적용 가상물체의 조작성을 향상시키는데 기여한다.

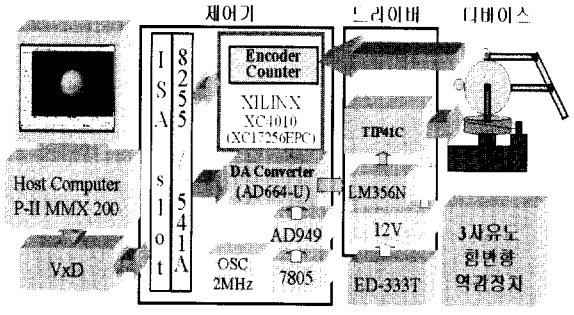


그림 4 역감장치의 제어시스템
Fig. 4 Control system of Force-reflecting device

인터럽트 벡터에 의해 VxD는 엔코더의 값을 메모리에 저장하고, 필요시에 지정된 번지의 메모리에서 엔코더 값을 얻을 수 있고, 주기적으로 모터로 출력되는 값을 지정된 번지에서 데이터를 얻어 D/A 컨버터를 통해 모터를 동작하게 한다.

드라이버 회로는 D/A컨버터에서 전송되는 아날로그 전압 값을 LF356N에서 전압-전류 변환시키고, TIP41C에 의해 모터에 흐르는 전류를 조절하며 민감한 힘의 제시가 가능하도록 하는 전류제어기법을 이용한 임피던스제어를 하였다.

4. 렌더링 알고리즘

4.1 가상환경의 수학적인 모델링

렌더링 알고리즘은 크게 역감 렌더링과 그래픽 렌더링으로 나눌 수 있다. 이 두 렌더러의 데이터 교환은 Feature model을 이용한다. 이는 가상환경에 제시된 물체에 K, B, 위치, Geometry Database등으로 구성된 모델을 상호 참조함으로써 가능하게 하였다. 그림 5는 이러한 렌더러의 입출력 관계를 나타낸다.

가상 점의 위치를 계산하기 위해서 디바이스의 각 자유도당 1개의 평면을 정의함으로써 간단하게 가상 점 운동의 경로(history)를 유지할 수 있다. 이 실험에서는 (x, y, z) 좌표값을 갖는 하나의 점으로 나타내었다.

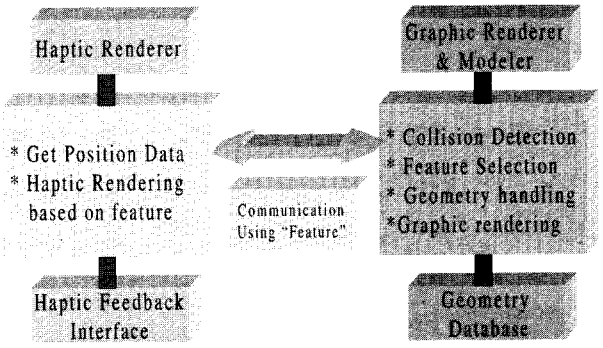


그림 5 렌더러의 입출력 다이어그램
Fig. 5 Input output diagram of renderer

가상 점의 위치가 결정되면 디스플레이 될 힘은 식 (3)의 힘의 방정식을 이용하여 계산한다. 이때 활성화된 구속평면이 발견되면 새로운 가상 점의 위치를 결정하기 위해 위치에너지와 운동에너지의 차를 나타내는 Lagrange-multiplier를 사용한다. 단위 강성을 갖는 가상 스프링에서의 에너지는 식 (6)과 같다.

$$Q=\frac{1}{2}(x-x_p)^2+\frac{1}{2}(y-y_p)^2+\frac{1}{2}(z-z_p)^2 \quad (6)$$

여기서 (x, y, z)는 가상 점의 좌표이고, (x_p, y_p, z_p)는 역감장치 엔드이펙터의 좌표를 의미한다. 구속은 식 (7)과 같은 평면을 추가함으로서 표현할 수 있다.

$$Ax + By + Cz - D = 0 \quad (7)$$

개발한 3자유도 역감장치는 3개의 구속평면을 갖는다. 구속이 없는 경우 평면의 개수는 0이 된다. 새로운 가상 점의 위치는 식 (7)의 L에 대하여 6개의 변수에 관한 편미분 값을 0으로 두어 L을 최소화함으로써 찾을 수 있다. 이와 같은 방법을 사용하면 쉽게 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} L = {} & \frac{1}{2}(x-x_p)^2+\frac{1}{2}(y-y_p)^2+\frac{1}{2}(z-z_p)^2 \\ & + l_1(A_1x + B_1y + C_1z - D_1) \\ & + l_2(A_2x + B_2y + C_2z - D_2) \\ & + l_3(A_3x + B_3y + C_3z - D_3) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)을 6개의 변수 (x, y, z, l_1, l_2, l_3) 에 대해 편미분한 결과를 행렬식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & A_1 & A_2 & A_3 \\ 0 & 1 & 0 & B_1 & B_2 & B_3 \\ 0 & 0 & 1 & C_1 & C_2 & C_3 \\ A_1 & B_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ A_3 & B_3 & C_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} \quad (9)$$

이 행렬 방정식은 사용하기 편한 특징을 가지고 있다. 식 (9)에서와 같이 좌우대칭 구조를 가지고 있는데, 좌측 상위 3×3 행렬은 단위행렬, 우측 상위의 3×3 행렬과 좌측 아래 3×3 행렬은 역행렬 이어서 교환이 가능하다. 구속이 없는 경우 가상 점은 역감장치의 작용점, 즉 엔드포인트 위치를 나타낸다.

4.2 역감 렌더링

역감 렌더러는 가상물체와 상호작용을 하는 역감장치를 제어하는 것이다. 내부처리 순서도는 그림 6과 같다. 우선 1[kHz]의 인터럽트가 발생시까지 대기하다가 인터럽트가 발생하면 엔코더로부터 값을 읽어들여 각축의 각도를 포워드 키네마틱스(Forward kinematics)에 의해 현재 포인터의 위치를 계산하고, Affine 행렬에 의해 그래픽좌표계로 변환하여 충돌 검출을 한다[10].

충돌이 발생하면 God Object Method에 의해 충돌 점에서 발생할 힘을 계산하여 제시할 힘을 출력부로 전송한다. 제시될 힘의 계산은 속도에 비례한 토크를 발생시키도록 자코비안 행렬을 유도하여 계산한다.

$$\tau = J^T \cdot F \tag{10}$$

여기서 F는 God Object 알고리즘에 의해 구해진 제시할 힘의 벡터이고, J^T는 속도에 기초한 매니퓰레이터의 자코비안 매트릭스이다. 이 자코비안 매트릭스를 구하기 위해서는 매니퓰레이터의 위치를 구하는 포워드 키네마틱스에서 시간에 대해 미분을 한다.

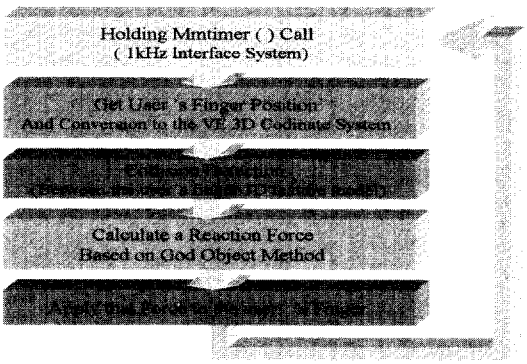


그림 6 역감 렌더러의 내부 알고리즘 흐름도
Fig. 6 Flowchart of internal Haptic renderer

4.3 그래픽 렌더링

그래픽 렌더러는 그림 7과 같은 순서로 진행되는데 20[Hz] 주기로 인터럽트 벡터가 생성될 때 가상환경에서 이뤄진 결과를 OpenGL 라이브러리에 의해 렌더링한 후, 모델링하여 그 결과를 화면에 디스플레이 한다.

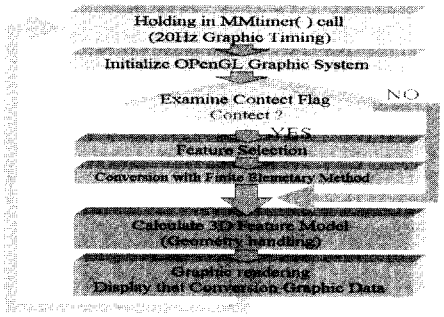
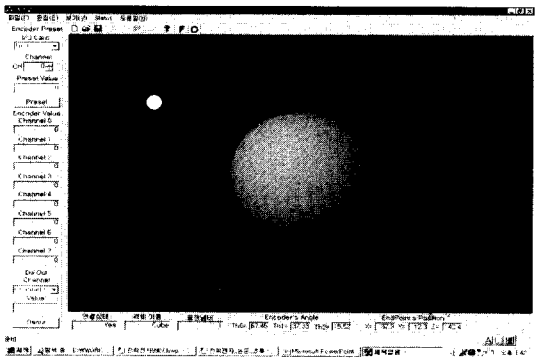


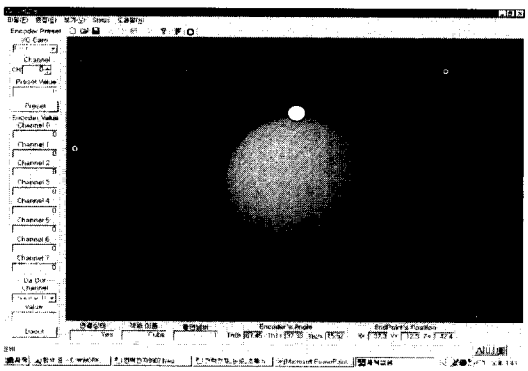
그림 7 그래픽 렌더러의 내부 알고리즘 흐름도
Fig. 7 Flowchart of internal graphic renderer

5. 실 험

제작된 매니퓰레이터를 이용하여 가상환경에서 사용자에게 어떤 감각을 제시할 수 있는지를 실험하기 위해 점성과 탄성 값을 조절하면서 이때의 느낌을 검출하였다. 그림 8 (a)는 가상환경과 접촉하지 않는 자유상태를 표시하고 있으며, (b)는 접촉하고 있는 상태를 표현하고 있다. 그림 9는 점성 값은 주지 않고, 탄성 값만 주어 가상 벽 효과를 검출하기 위해 파라미터 K=100, B=0의 값을 주었을 때 AD664의 출력을 측정한 것이다. 전압이 드라이버 회로에서 전류로 변환되므로 이 출력되는 전압을 측정하므로 제시되는 힘을 알 수 있다. 단위 스텝함수와 같은 파형을 볼 수 있으며, 피 시험자가 벽의 구속 지향을 감지할 수 있었다.



(a) 가상물체와 비접촉상태
(a) Non contact with virtual object



(b) 가상물체와 접촉상태
(b) Contact with virtual object

그림 8 3차원 가상물체 그래픽화면
(WIN NT V4.0, VC++ V6.0, Open GL사용)
Fig. 8 Graphic display of 3D virtual object
(use of WIN NT V4,0, VC++V6.0, OpenGL)

그림 10과 같이 K=50, B=50으로 값을 조정할 때 출력 상태는 램프함수 형태의 출력을 얻을 수 있었고 피 시험자가 진흙 벨에 손가락을 집어넣는 느낌을 얻을 수 있었다.

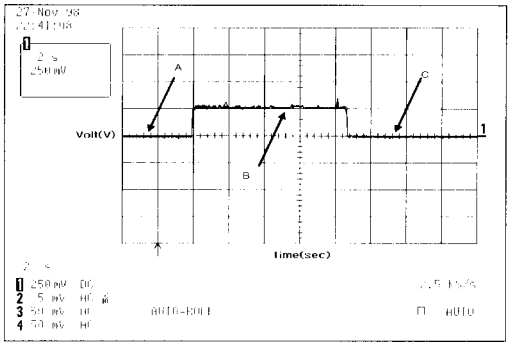


그림 9 K=100, B=0일때의 모터출력
(A, C : 비 접촉시, B:접촉시)
Fig. 9 Motor output when K=100, B=0
(A, C : non contact, B: contact)

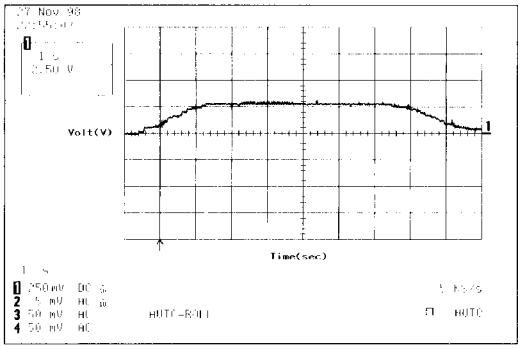


그림 10 K=50, B=50일때의 모터 출력
Fig. 10 motor output when k=50, b=50

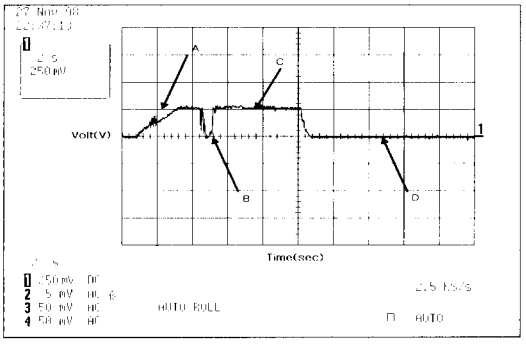


그림 11 버튼 느낌을 줄 때의 출력
Fig. 11 output when process a push button model

그림 11은 최대토크인 τ_{max}를 설정하고 그 최대 토크 값을 초과한 경우 출력을 제거하는 방법으로 버튼을 누른 것 같은 느낌을 실현하였다. 이때 A부분의 완만한 경사는 버튼 안의 내장된 스프링을 의미하고, B부분은 버튼이 눌렸을 때 딸깍거리는 느낌, C부분은 계속해서 버튼을 누를 때, 그리고 D부분은 버튼에서 손을 뗄 때를 의미한다.

6. 결 론

본 논문에서는 직접 제작한 역감장치와 제어기를 이용하여 실험을 수행한 결과 가상물체에 부여하는 점성과 탄성 값의 조절만으로 여러 가지 역감을 지니는 가상물체의 설계가 가능함을 입증하였다. 아울러 점성값과 탄성값의 배열을 적용하여 하나의 물체에 여러 역감제시도 가능함을 버튼 모델 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 역감 렌더러는 안정하고 정밀한 위치제시와 힘의 제시가 가능하며, 그래픽 렌더러는 20[Hz]의 갱신주기로도 실시간 구현이 가능함을 확인하였다.

본 역감장치의 응용분야는 가상환경에서 물체의 고도의 조작성을 요하는 수술 시뮬레이션, 원격제어용 로봇의 마스터로봇 조작, 각종 운전 시뮬레이션 및 게임 등에서 폭넓게 응용할 수 있다.

이 논문은 1998년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

참 고 문 헌

[1] Massie, T., Salisbury, K.,"*The PHANToM haptic interface : A device for probing virtual objects,*" Dynamic Systems and Control, Vol. 1, pp. 295-301, 1994.

[2] Salisbury, K., Brook, D., Massie, T., Zilles, C., "*Haptic rendering : Programming touch interaction with Virtual Object,*" Proc. of ACM 1995 Symposium on Interactive 3DGraphics Monterey, CA, pp. 123-130, April 1995.

[3] Craig Zille, "*Haptic Rendering with the Tool-handle Haptic Interface,*" Master's thesis. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, May 1995.

[4] H.Kazerooni, Tsing-Iuan Tsay, and Karin Hollerbach,

"A Controller Design Framework for Telerobotic System," IEEE Trans. on Control Systems Technology. Vol. 1, No. 1, pp. 50-62, 1993.

[5] Lynette jones, "Dextrous Hands : Human, Prosthetic, and Robotic," PRESENCE, MIT Press Vol 6, No. 1, pp. 29-56, Feb 1997.

[6] Neville Horgan, "The mechanics of multi-joint posture and movement control," Biomedical Cybernetics. Vol. 52, pp. 315-331, 1993.

[7] Thomas H. Massie, "Virtual Touch Through Point Interaction," The 6th Int. Conf. on Artificial Reality and Tele-existence. JAPAN, November, pp. 19-38, 1996.

[8] Thomas H. Massie, " Design of a Three Degree of Freedom Force-Reflecting Haptic Interface," SB thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 1993.

[9] R. E. Ellis, O. M. Ismaeil, and M. G. Lipsett, "Design and Evaluation of a High-Performance Haptic Interface," Robotica. Vol. 4, pp. 321-327, 1996.

[10] Hugh Brian Morgenbesser, "Force Shading for shape perception in Haptic virtual environment," Master's thesis, MIT, Electrical Engineering and Computer science, september 1995.

[11] Shoichi hasegawa and Makamoto sato, "Interprocess Communication for A Dynamic Virtual World with haptic Display Based on Force Integration," ICAT98' Tokyo, pp. 38-45, 1998.

저 자 소 개

강원찬(姜園贊)

1970년 12월 23일생. 1989년 조선대학교 공대 제어계측공학과 졸업(학사). 1998년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.

김동옥(金桐玉)

1971년 5월 1일생. 1990년 조선대학교 공대 제어계측공학과 졸업(학사). 1992년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1992년~현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정.

신석두(申碩斗)

1946년 6월 10일생. 1974년 조선대학교 공대 전기공학과 졸업(학사). 1984년 조선대학교 산업대학원 졸업(석사). 1997년~현재 조선이공대학교 전기과 교수.

김영동(金永炯)

1944년 11월 28일생. 1968년 조선대학교 공대 전기공학과 졸업(학사). 1984년 명지대학교 대학원 졸업(석사). 1993년 일본 애지 공업대학교 객원 연구원. 현재 조선대학교 공대 전기·제어계측 공학부 교수.