Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 13, No.1, pp. 111~118 February 1999 〔논문 : 13-1-15〕

초음파 모터를 이용한 힘 반영 촉각장치

A Force-Reflecting Haptic Interface using Ultrasonic Motors

신 덕* · 오금곤** · 김영동***
(Duk Shin · Geum-Kon Oh · Young-Dong Kim)

요 약

힘반영 촉각장치(Force-Reflecting haptic Interface)는 인간이 컴퓨터에 의해 생성한 가상의 세계에 손의 위치 정보를 제공하고 가상의 손이 가상 환경에 접촉했을 때 인간에게 촉각을 전달하는 장치이다. 본 논문에서는 컴플라이언스 제어가 비교적 용이한 초음파 모터 액츄에이터를 사용하여 직접구동 방식으로 촉각장치를 설계하였다. 렌더링 알고리즘을 이용하여 가상의 벽, 가상 버튼, 가상 구멍 등의 기본적인 역감실험을 한 결과 힘 반영에 의한 역감을 제시받을 수 있었다.

Abstract

Throughout this thesis, I describe the design, fabrication, and evaluation of the 3 DOF force-reflecting haptic interface using USMs(ultrasonic motors). This haptic interface allows a human "observer" to explore and interact with a virtual environment for the sense of touch. To effectively display the mechanical impedance of the human hand we need a haptic device with specific characteristics, such as low inertia, almost zero friction and very high stiffness. USMs have attracted considerable attention as the actuator satisfied these conditions. An observer may grasp the end effector of device and interact with surfaces and objects created within a virtual environment. The device provides force feedback, allowing users to "feel" objects within the environment. The device works very well, as users are able to detect the edge of the wall, the stiffness of the button and the puncture. The force-reflecting haptic interface could be suitable as a master for micro-surgery or as an interface to virtual reality training systems.

1. 서 론

최근 정보통신 및 컴퓨터의 발달로 인하여 가상현실(virtual reality) 기술이 발전하고 있다. 가상현실의 적용 범위는 매우 광범위해서 오락 게임으로부터 산업현장의 건축 및 비즈니스 입안까지 다양화되고 있다[1].

가상현실에서 인간에게 현실감을 부여하기 위해 필요한 감각요소는 시각, 청각, 촉각 등이 있다. 촉각은 다른 감각 양식과는 달리 신체의 일부(본 논문에서는 손끝에 한정한다)와 물체의 직접적인 상호작용력—손이 물체에 작용하는 힘과 이 힘에 의한 물체 고유의 점·탄성력—을 내포한다. 이 촉각을 위하여 손의 위치 정보를 가상의 세계에 제공하고, 가상환경과 접촉했을 때 인간에게 감각을 전달하는 장치를 힘 반영 촉각장치(force-reflecting haptic interface)

*정회원 : 조선대학교 제어계측공학과 대학원
**정회원 : 조선대학교 전기공학과 교수
***정회원 : 조선대학교 제어계측공학과 교수
접수일자 : 1998. 12. 22

라 하고 있다[1].

현재 상용화되어 있는 대부분의 손과 컴퓨터와의 인터페이스 장치들은 단지 손의 위치 정보를 컴퓨터에 제공해 주는 입력장치에 불과하다. 그리고 현재까지 연구된 능동적인 힘 반영 촉각장치는 T.H.Massie의 PHANToM, Iwata의 Haptic Master, 아이오와 주립대의 Exoskeletal System 등 극소수다[2]-[6]. 또한 이런 장치들도 소형 DC 서보 모터나 마그네틱 장치를 사용하기 때문에 토크의 증가를 위해서 케이블이나 기어를 이용하고 있어, 백러시나 구조적인 부피 및 무게의 증가 등의 단점을 안고 있다[7].

본 연구에서는 저속, 고토크 특성을 지닌 초음파 모터를 사용하여 직접구동방식(direct drive)으로 능동적 3 자유도를 지닌 데스크-탑형 힘 반영 촉각장치를 설계하였다. 시험 제작한 힘 반영 촉각장치는 컴퓨터 모니터 상에 존재하는 가상의 물체를 느낄 수 있었다. 조작자가 촉각장치의 엔드이펙터를 잡고 움직이면 엔코더에 의해 엔드이펙터의 위치를 측정하고 가상물체와 충돌했을 때 점·탄성을 능동적으로 발생시킬 수 있는 초음파 모터가 토크를 발생시켜 기계적인 메커니즘을 통하여 엔드이펙터에 외력을 가함으로써 사용자는 촉감에 가까운 역감을 느낄 수 있었다.

2. 촉각발생의 원리

물체에 대한 인간의 지각과정은 외부환경의 물체와 접촉하여 상호작용을 함으로써 그 물체에 대한 인식모델을 설정하고 기억하는 것을 말한다. 인간이 그림 1과 같이 모델화된 벽(강체)을 누른다고 가정한다. 이 때 사람 손의 임의의 위치를 x 라고 하고 $\zeta(x)$ 가 다음 식 (1)과 같이 정의된다면 인간이 받는 탄성력 F_K 와 점성력 F_D 는 각각 식 (2)와 식 (3)과 같다.[8]

$$\zeta(x)=\begin{cases}0 & x < X_{wall} \quad (\text{자유공간}) \\ 1 & x \geq X_{wall} \quad (\text{구속공간})\end{cases} \tag{1}$$

$$F_K = K_e(x - X_{wall})\zeta(x) \tag{2}$$

$$F_D = D_e\ \dot{x}\ \zeta(x) \tag{3}$$

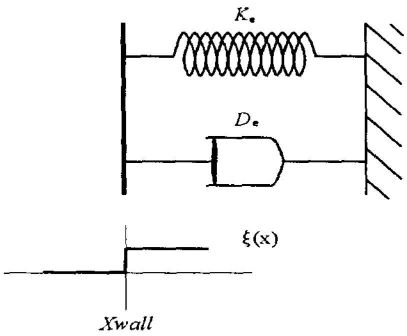


그림 1. 벽의 스프링-댐퍼 모델
Fig. 1. Spring-damper model

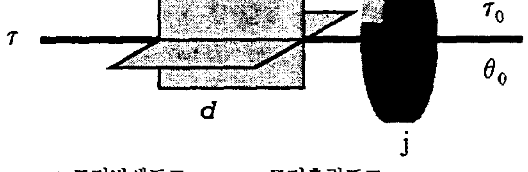
여기서, K_e 는 벽의 탄성 계수, D_e 는 점성 계수, X_{wall} 는 벽의 위치를 나타낸다. 벽을 눌렀을 때 인간이 받는 전체 힘은 식 (4)와 같다.

$$F = \zeta(x)\{K_e(x - X_{wall}) + D_e\dot{x}\} \tag{4}$$

이 힘은 벽과 손이 접촉한 순간의 힘이고, 점성과 탄성에 의존하고 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 40 kHz의 진행파에 의해 동작하는 기계적인 마찰 구동형 초음파모터 액츄에이터로 사용한다. 초음파모터는 위치센서인 엔코더(encoder)만을 가지고 위치정보에 따른 2상 입력 전원의 위상차를 조절함으로써 별다른 토크센서 없이 토크를 제어할 수 있다. 따라서 인간의 손에 유연히 대응할 수 있는 컴플라이언스 특성을 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다.[9, 10]

초음파 모터를 운동 역학적으로 모델링하면 그림 2와 같다.



τ : 모터발생토크 　 τ_o : 모터출력토크
d : 내부점성 　 θ_o : 출력축각도
j : 내부관성 　 θ_d : 목표각도

그림 2. 초음파 모터의 동역학 모델
Fig. 2. Dynamic model of USM

그림 2에서 초음파 모터의 출력 토크 τ0 를 수식으로 표현하면 식 (5)가 된다.

$$\tau_o = \tau - d\dot{\theta}_o - j\ddot{\theta}_o \qquad (5)$$

여기서 τ0 가 점탄성 특성을 가지려면 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$\tau_o = K(\theta_d - \theta_o) - D'\dot{\theta}_o \qquad (6)$$

K: 탄성계수　　D : 점성계수

식 (5)에서 내부 관성 능률은 매우 소량이므로 $j = 0$이라 하고 식 (5)와 식 (6)을 이용하면 내부 토크 τ가 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}\tau &= K(\theta_d - \theta_o) - (D' - d)\dot{\theta}_o \\ &= K(\theta_d - \theta_o) - D\dot{\theta}_o \qquad (7)\end{aligned}$$

식 (7)은 앞에서 언급한 식 (4)와 구속공간에서 유사함을 알 수 있다. 따라서 점탄성제어를 행하는 초음파모터 액츄에이터로 힘 반영 촉각장치(force display)를 실현했을 때 가상환경에서 인간이 느낄 수 있는 유연한 힘 F를 잘 표현할 수 있다

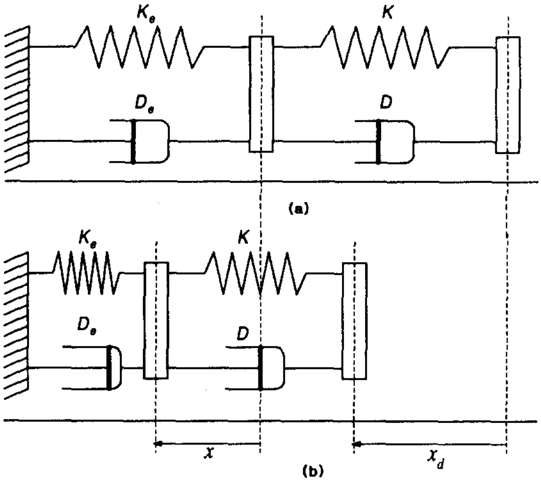


그림 3. 가상환경과 촉각장치의 접촉 모델
Fig. 3. Contact model between haptic device and virtual environment

이제 그림 3과 같이 탄성과 점성을 갖는 유연한 가상환경에 촉각장치가 접촉하는 모델을 설정한다. 그림(a)의 가상벽 탄성계수, 점성계수를 각각 K_e, D_e 라 하고, 액츄에이터의 탄성계수, 점성계수를 K, D라 하면 그림(b)와 같이 촉각장치에 x_d 만큼 변위를 인간의 손끝으로 주었을 때 가상벽이 x 만큼 움직였다고 가정해 보면 실제 가상벽에 대한 촉각장치의 변위 X_d는

$$X_d = x_d - x \qquad (8)$$

이다. 따라서 가상물체의 힘과 촉각장치가 제시하는 힘은 식 (9)가 된다.

$$\begin{aligned}F_e &= K_e x + D_e \dot{x} \qquad (9) \\ F &= K X_d + D \dot{X}_d\end{aligned}$$

여기서, F_e : 가상물체의 힘,
F : 촉각장치의 힘

이때 가상물체의 힘과 촉각장치의 힘은 수평을 이루기 때문에 식 (10)과 식 (11)이 유도되고

$$K_e x = K X_d \qquad (10)$$

$$D_e \dot{x} = D \dot{X}_d \qquad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에서 촉각장치의 탄성계수와 점성계수를 구하면 식 (12)와 식 (13)이 된다.

$$K = \frac{x}{x_d - x} K_e \qquad (12)$$

$$D = \frac{\dot{x}}{\dot{X}_d} D_e \qquad (13)$$

식(12)와 (13)의 점 · 탄성 계수 K, D 를 조절함으로써 인간에게 다양한 가상 환경물에 대한 촉각을 느낄 수 있게 하는 것이 바로 힘 반영 촉각장치의 원리이다.

본 연구에서는 초음파 모터의 위상차 제어를 이용하여 가상물체의 컴플라이언스 특성을 만들었다[11]. 초음파 모터는 엔코더의 각변위와 각속도에 따른 2상 전원의 위상차에 출력 토크가 비례하므로 탄성 및 점성계수를 실제 물체에 가깝게 설정하면 그 물체를 가상의 힘 공간에 표현할 수 있다.

3. 액츄에이터

본 연구에서 개발한 촉각장치는 세 개의 엔코더 장착 초음파모터와 엔드이펙터 사이에서 일어나는 변환 메커니즘을 이용한 데스크-탑형 디바이스이다. 엔드이펙터의 좌표는 엔코더의 출력 펄스를 통하여 계산되어 지고, 이 엔드이펙터의 위치 정보에 따라 x, y, z축 방향의 힘을 제어한다. 모터의 토크는 가볍고 단단한 링크에 대해 직접구동방식으로 전달된다. 이 링크의 끝은 수동적인 3 자유도를 가지는 엔드이펙터이다. 이 엔드이펙터는 인간이 쥘 수 있는 펜 모양을 하고 있어서 의사의 매스, 화가의 붓 또는 3차원 마우스 같은 인간의 도구가 된다. 표 1은 초음파 모터의 사양을 나타낸다. 그림 4는 초음파 모터를 이용한 힘 반영 촉각 장치의 개략도이다. 본 연구에서 실제 시험 제작한 촉각장치의 사진은 그림 5에 나타내었다.

표 1. 초음파 모터의 사양
Table 1. Rearing of USR-60

구동주파수	40 KHz
구동전압	100 VRMS
정격토오크	3.2 Kg · cm
정격출력	3 W
정격회전수	90 rpm
홀딩토오크	3.2 Kg · cm 이상
회전방향	CW, CCW
내구시간	1000 시간 이상
사용온도범위	-10℃ ~ +50℃
허용온도상승	표면온도 55℃이상
중량	240 g

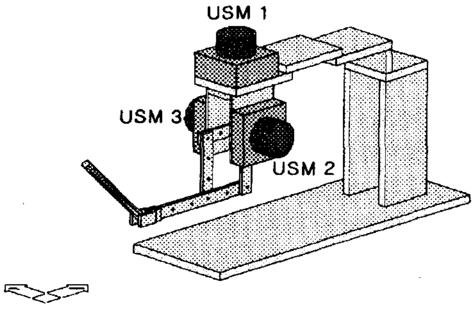


그림 4. 액츄에이터의 개략도
Fig. 4. Sketch of the actuator

힘 반영 촉각장치의 순기구학적 표현은 그림 6과 같고, 링크 파라미터는 표 2와 같다.

주어진 표 2의 링크 파라미터로 각 관절에 대한 변환 행렬을 Denavit-Hartenberg법을 적용하여 구하면 식 (11), (12), (13), (14)이다

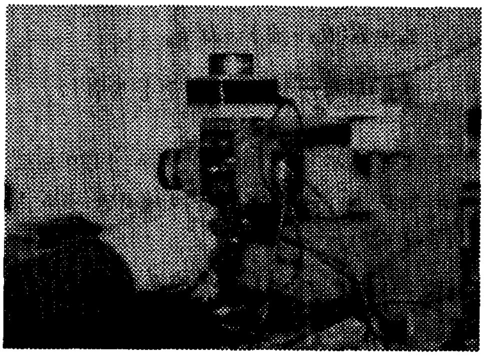


그림 5. 액츄에이터의 사진
Fig. 5. Photo of Actuator

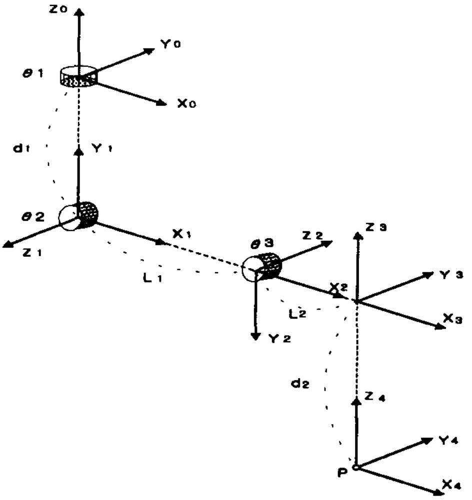


그림 6. 촉각장치의 순기구학적 표현
Fig. 6, Kinematic representation of the haptic device

표 2. 촉각장치의 링크 파라미터
Table 2. Link Parameter of Haptic Device

Joint \ Link parameter	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$\pi/2$	0	d1	θ_1
2	$-\pi$	L1	0	θ_2
3	$-\pi/2$	L2	0	θ_3
4	0	0	d2	0

$$A_1^0=\begin{bmatrix}\cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0\\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & d1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{11}$$

$$A_2^1=\begin{bmatrix}\cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & L_1\cos\theta_2\\ \sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & L_1\sin\theta_2\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{12}$$

$$A_3^2=\begin{bmatrix}\cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 & L_2\cos\theta_3\\ \sin\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 & L_2\sin\theta_3\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{13}$$

$$A_4^3=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & d_2\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{14}$$

기준 좌표계에서 엔드이펙터의 작용점의 위치까지 변환 행렬을 구하면 식 (15)와 같다.

$$T_4^0=A_1^0\cdot A_2^1\cdot A_3^2\cdot A_4^3$$

$$=\begin{bmatrix}C_1C_2C_3+C_1S_2S_3 & -S_1 & C_1C_2S_3-C_1S_2C_3 & C_1C_2(L_1+L_2C_3+d_2S_3)+C_1S_2(L_2S_3-d_2C_3)\\ S_1C_2C_3+S_1S_2S_3 & C_1 & S_1C_2S_3-S_1S_2C_3 & S_1C_2(L_1+L_2C_3+d_2S_3)+S_1S_2(L_2S_3-d_2C_3)\\ S_2C_3-C_2S_3 & 0 & S_2S_3+C_2C_3 & S_2(L_1+L_2C_3+d_2S_3)-C_2(L_2S_3-d_2C_3)+d_1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

단, $C_i=\cos\theta_i$, $S_i=\sin\theta_i$ (15)

따라서 기준 좌표계에서 엔드이펙터 작용점 P의 위치를 구하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix}P_x\\ P_y\\ P_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_1C_2(L_1+L_2C_3+d_2S_3)+C_1S_2(L_2S_3-d_2C_3)\\ S_1C_2(L_1+L_2C_3+d_2S_3)+S_1S_2(L_2S_3-d_2C_3)\\ S_2(L_1+L_2C_3+d_2S_3)-C_2(L_2S_3-d_2C_3)+d_1\end{bmatrix} \tag{16}$$

4. 촉각 시스템의 구성

전력변환회로 즉 전원 공급장치에서는 디지틀회로에서 만든 두개의 5Vpp의 펄스를 2단 트랜지스터 스위칭 증폭회로와 펄스변압기(Pulse trans former)를 통해서 100Vpp를 증폭하여 초음파 모터의 A상과 B상에 각각 공급한다. 엔코더는 1 회전 당 1000 펄스의 분해능을 가지며, 엔코터 신호는 엔코더 어댑터에서 4 체배한 후 사용한다. 엔드이펙터의 좌표는 이 엔코더 값을 가지고 계산하며 충돌과 변위의 임피던스를 구한 후 그림 7과 같은 햅틱 렌더러 알고리듬에 따라 모터의 구동 드라이버를 가동시킨다[12].

초음파 모터 액츄에이터의 점 · 탄성 제어는 그림 8에서 제시한 제어 블럭에 의해서 엔코더 각도의 변화에 따라서 2상 구동 전압의 위상차를 제어하는 것에 의해서 실현하였다.

그림 9는 촉각 시스템의 블록도이다. 인간이 촉각장치의 엔드이펙터를 잡고 움직일 때 힘의 작용점인 엔드 포인터의 위치는 액츄에이터의 엔코더 신호에 의해 추정된다. 이 엔드 포인터가 가상물체와 충돌했을 때 그림 8의 시스템에서 보는 바와 같이 가상물체의 지역적인 정보는 목표각도로 나타낸다.

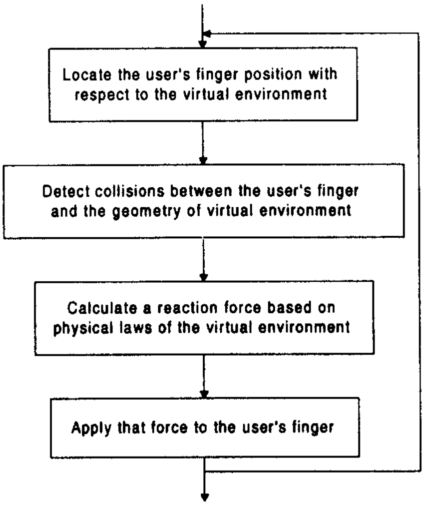


그림 7. 촉각 렌더러의 내부 알고리듬
Fig. 7. Inner algorithem of the haptic renderer

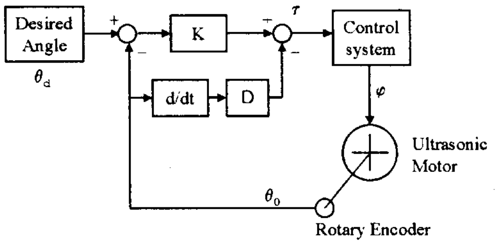


그림 8. 초음파 모터의 컴플라이언스 제어계
Fig. 8. Viscosity and Elasticity control system of actuator

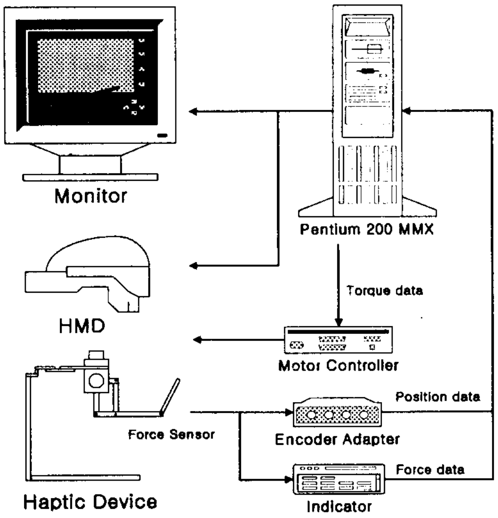


그림 9. 촉각 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 9. Block diagram of haptic system

이 때 내부 토크와 선형적인 관계를 가지는 위상차를 초음파 모터의 제어 신호로 입력하면 초음파 모터는 점 탄성 특성을 가지는 가상물체의 힘을 생성하게 된다. 엔코더의 변위를 피드백 신호로 사용하여 목표위치와 엔코더의 각도 변위의 편차에 비례한 탄성 토크와 속도에 비례한 점성 토크를 제어함으로써 가상물체의 점 탄성 특성을 만들어 낸다.

초음파 모터는 토크센서를 사용하지 않고 위치변화 만을 피드백 신호로 사용하기 때문에 기존의 힘 궤환 제어에 비해서 제어시스템을 간단히 구성할 수 있을 뿐 아니라 응답이 빠른 잇점이 있었다.

5. 실험 및 고찰

1. 벽(Wall)의 검출 실험

어떤 촉각장치도 완전한 강성을 낼 수는 없다. 왜냐하면 기계적인 제한으로 어떤 모터 컨트롤러도 무한한 이득을 가질 수는 없기 때문이다. 그러므로 모든 가상물체들은 항상 어느 정도의 유연성을 가지고 있다. 쇠공과 같은 강체도 가상현실 안에서는 약간은 유연해야만 한다. 인간이 실제 벽을 만질 때 그림 10과 같은 점 탄성을 갖는 힘이 반응력으로 발생한다.

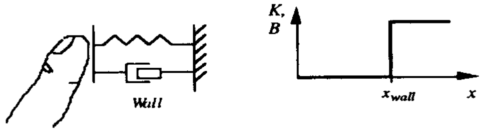


그림 10. 점 · 탄성을 가진 벽의 모델
Fig. 10. Model of damped and stiffness wall

그림 11은 촉각 장치가 제시한 벽에 대한 힘-변위 곡선이다. 촉각장치에 이미 내재한 가상 벽의 위치에 엔드이펙터가 충돌했을 때 촉각장치는 그래프와 같은 힘을 제시한다. 실제의 벽이라면 닿는 지점에서 더 이상 뚫고 들어 갈 수 없지만 촉각장치에서는 앞에서 언급한 것같이 완벽한 강성을 지닐 수 없으므로 가상의 벽 안에서는 최대의 힘을 제시한다.

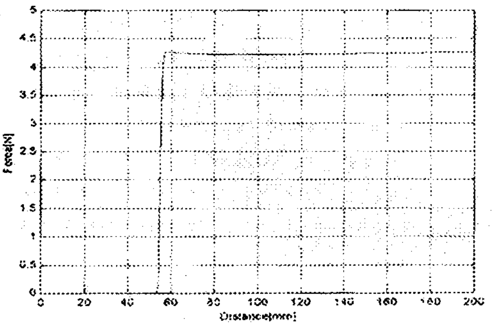


그림 11. 가상 벽의 힘-변위 곡선
Fig. 11. Force-distance curve of virtual wall

2. 버튼(Button) 실험과 송곳(Puncture) 실험

실제의 버튼은 목적에 따라 다양한 종류와 모양을 가지고 있다. 따라서 다양한 점 탄성을 갖는다. 그림 12는 인간이 실제 버튼을 누를 때 탄성 값과 발생하는 반응력을 나타낸다. 그림 13은 촉각장치에 의해 제공되는 가상 버튼의 변위에 따른 반응력을 측정한 것이다. 처음의 완만한 경사는 버튼 안의 내장된 스프링의 탄성을 표현한 것이고 마지막의 일정한 곡선은 버튼을 끝까지 누른 상태를 나타낸다. 힘-변위 그래프는 첫 번째 경사 끝에서 잠시 끊어진 후 다시 일어난다. 이것은 버튼을 누를 때의 '딸깍' 하는 느낌을 잘 표현해주고 있다. 이런 힘의 불연속성이 매우 짧아도 사용자는 쉽게 이를 감지한다.

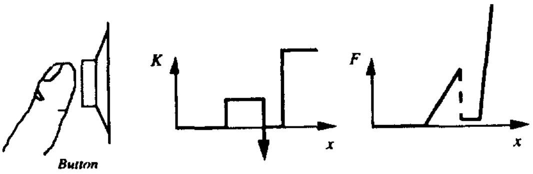


그림 12. 전형적인 가상 버튼 모델
Fig. 12. Typical model of virtual button

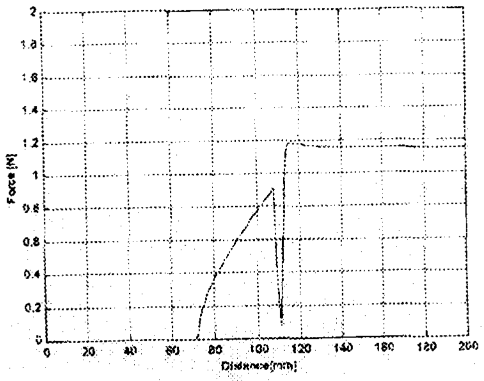


그림 13. 가상 버튼의 힘-변위 곡선
Fig. 13. Force-distance curve of virtual button

그림 14는 실제로 송곳으로 종이에 구멍을 뚫을 때의 탄성값과 반응력을 나타낸다. 그림 15는 촉각장치가 제시한 반응력의 변위에 따른 그래프다. 종이의 재질에 따라 탄성값은 일정하다 구멍이 뚫어지면 탄성은 없어진다. 그래프의 처음의 완만한 경사는 구멍을 뚫는 과정까지의 힘의 증가이고, 그래프의 급락은 다 뚫은 후 힘의 소멸을 나타내고 있다.

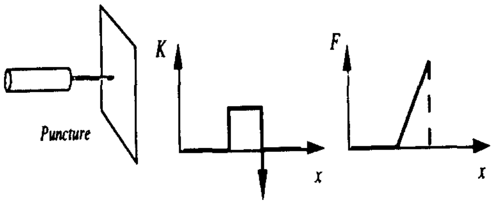


그림 14. 전형적인 가상 송곳의 모델
Fig. 14. Typical model of puncture

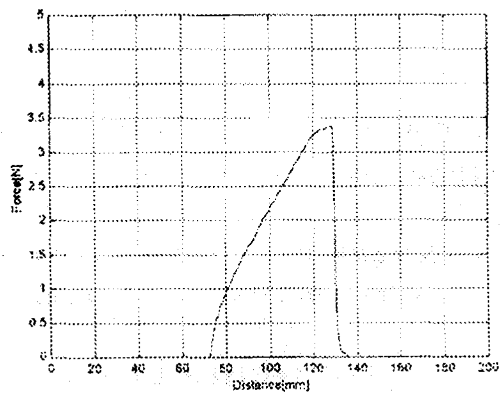


그림 15. 가상 송곳의 힘-변위 곡선
Fig. 15. Force-distance curve virtual puncture

3. 고　　찰

초음파 모터의 위상차 제어에 의한 점 · 탄성 알고리듬을 사용하여 새롭게 제시한 힘 반영 촉각장치 시스템은 다음과 같은 세 가지 특징이 있다.

첫째, 자유공간에서 자유롭다. 이 말은 곧 자유공간에서 사용자가 엔드이펙터를 잡고 움직일 때 디바이스에 의한 어떤 구속도 받지 않는다는 뜻이다. 또한 이 장치는 적은 백 드라이브 프릭션과 낮은 관성을 가진다. 정적인 백 드라이브 프릭션은 0.33 [Nms/rad] 이하이고 50 g 이하의 관성을 지닌다.

둘째, 최대 힘이 크다. 일반적인 전자식 서보 모터에 비해 초음파 모터는 토크가 크다. 또한 제어 루프와 구조에 강성을 지니게 되기 때문에 인터페이스를

통해 표현된 가상의 물체들은 각각 다른 유연한 특성을 지니게 된다. 실시간 촉각제어 알고리듬을 사용하여 이 촉각장치의 최대 강성은 약 60 [N/cm] 이다. 지금까지의 연구에 있어 강체는 최소 20 [N/cm] 이상이면 된다. 얻어진 강성은 디바이스의 고유 주파수에 의존하는 것이 아니고 액츄에이터의 센서 분해능에 따른다.

셋째, 백러시가 없다. 디바이스의 동력전달 부분은 직접구동방식을 이용한 가볍고 튼튼한 재질로 이루어져 백러시가 없다.

넷째, 작동 범위가 충분하다. 토크 증폭을 위한 기어나 풀리를 사용하지 않고 직접구동방식을 사용함으로 구조적인 부피 증가와 그로 인한 작업공간의 감소나 행동의 제약이 없다.

V. 결 론

본 논문에서는 저속이며 고 토크와 빠른 응답특성을 지닌 초음파 모터를 사용하여 직접구동방식으로 능동적 3자유도를 지닌 힘 반영 촉각장치를 기구학적인 해석과 함께 설계하였다. 이 촉각 장치는 세 개의 엔코더 장착 초음파 모터와 엔드이펙터 사이에서 일어나는 변환 메커니즘을 이용한 데스크-탑형 디바이스이다. 설계된 디바이스의 특징은 다음과 같은 특징을 지닌다.

① 자유공간에서 자유롭다.

② 최대 힘이 크다.

③ 백러쉬가 없다.

④ 작동 범위가 충분하다.

이러한 특징을 지닌 디바이스를 사용한 본 시스템은 인간이 엔드이펙터를 잡고 움직일 때 엔코더 값을 가지고 가상물체와의 충돌과 거리의 임피던스를 구한 후 렌더링 알고리듬에 따라 모터의 구동 드라이버에 토크 데이터를 제시한다. 이의 타당성 검토를 위해 가상의 벽과 가상의 버튼 그리고 가상으로 구멍을 뚫는 실험을 행하였다. 그 결과 이 촉각장치를 통하여 인간이 그의 손으로 엔드이펙터를 잡고 컴퓨터가 만들어낸 가상 환경 속의 물체들을 느낄 수 있었고 변형시킬 수 있었다. 앞으로 이 장치를 사용하여 원격제어용 마스터 로봇과 스케일을 달리한 슬레이브 로봇으로 응용될 수 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

[1] Gradecki, J. : The Virtual Reality, New York : John Wiley & Sons, 1994

[2] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "Force Reflecting Haptic Interface" U.S Patent pending. Field Oct 1, 1993.

[3] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "A Device for Probing Virtual Objects," Proc. of ASME Winter Annual Meeting, Chicago, 1994.

[4] H. Iwata, "Pen Based Haptic Virtual Environment," VRAIS '93. pp. 287-292, 1993.

[5] Sarcos Inc., Manufacturers of the Sarcos Exoskeleton. Salt Lake City, Utah.

[6] Minsky, M. : Computational Haptics : The Sandpaper System for Synthesizing Texture for a Force-Feedback Display. Ph. D. dissertation, MIT, 1995.

[7] Ebner, M. and Wallace, R. S. : A direct-drive hand : Design, Modeling and Control. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation. 1668-1673, 1995.

[8] J. E. Colgate and J. M. Brown, "Factors affecting the Z-Width of a Haptic Interface," Proc. of the IEEE on Robotics and Automation. 3205-3210, 1994.

[9] Sashida, T. and Kenjo, T. : An Introduction to Ultrasonic Motors. Oxford : Clarendon Press, 1993.

[10] Kato, A., Ito, K. a nd Ito, M. : Adjustable Complient Motion of Ultrasonic Motor. Journal of Robotics and Mechatronics. Vol. 5, No. 5, 1993.

[11] 김 영동, 오금곤 : "초음파 모터의 위상차 제어" 조명·전기설비학회지, 66-74, 1996,

[12] Zilles C. and Salisbury J. K. : Constraint Based God Object Method for Haptic Display, Proc. of the IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems. Pittsburgh, pennsylvania, 1995.

◇저자소개◇

신 덕(辛德)
1972년 9월 23일생. 1996년 조선대학교 제어계측공학과 졸. 1998년 조선대 대학원 졸(석사)

오 금 곤(吳金坤)
1946년 1월 17일생. 1968년 조선대학교 전기공학과 졸. 1984년 동신대 대학원 졸(석사). 현재 조선대학교 전기공학과 교수

김 영 동(金永烔)
1945년 11월 28일생. 1968년 조선대학교 전기공학과 졸. 1984년 명지대 대학원 졸(석사). 1993년 일본 애지공업대학 객원 연구원. 현재 조선대학교 제어계측공학과 교수