

초음파모터를 이용한 역감장치에 관한 연구

강원찬*, 김대현*, 김영동*

*조선대학교 공과대학 제어계측공학과

A Study on Force-Reflecting Interface using Ultrasonic Motors

Won-Chan Kang*, Dae-Hyun Kim*, Young-Dong Kim*

*Dept. of Control & Instrumentation Eng., Chosun University

ABSTRACT

This paper describes the evaluation of a force-reflecting interface with ultrasonic motors(USMs). The force-reflecting interface allows a human to feel object within virtual environment. 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. USMs combine features such as high driving torque at low rotational speed, high holding torque and fast response. therefore we studied two degree of freedom force-reflecting haptic system.

1. 서 론

지금까지 가상현실에서 인간에게 현실감을 제공하기 위한 수단으로는 시각과 청각이었다. 인간이 외부에서 받아들이는 수많은 정보들 중에 약 70%는 시각에 의해 흡수되기 때문에 지금까지의 가상현실이나 원격 조종에 관한 논문들은 실시간 3차원 입체영상 구현에 치중되어왔다.

역감장치(force-reflecting haptic interface)는 인간이 컴퓨터에 의해 생성된 가상의 세계에 손의 위치정보를 제공하고, 인간의 손이 가상 환경과 접촉했을 때 인간에게 접촉감각을 전달하는 장치이다. 현재까지 상용화된 장치로는 단순히 위치정보만을 제공하는 것으로 Virtual Technologies사의 CyberGlove와 VPL Research사의 DataGlove가 있으며, 촉감을 제시하는

장치로는 Sensible사의 PHANTOM과, Iwata의 Haptic Master등이 연구 개발되어졌다.[1] 그러나 이런 장치들은 소형 DC서보 모터나 마그네틱장치를 사용하기 때문에 속도감소와 토크 증가 위해 케이블이나 기어를 이용하고 있어서, 백러쉬나 구조적인 부피 및 무게의 증가, 작업공간의 축소 등의 단점이 있다. 더욱이 민감한 촉각을 제시하기 위한 액츄에이터의 정·역회전 교변이 빠르지 못하여 그 움직임에 있어서 자유로운 움직임을 갖지 못하고 있다. 본 연구에서는 이런 단점을 보완하고자 초음파모터를 이용하여 위치제어는 물론 토크제어를 단순한 알고리즘에 의해 구현하도록 하였다.

2. 촉각의 개념

2.1 인간의 촉각 기관

인간이 어떤 물체와 접촉했을 때 느껴지는 감각을 촉각(haptic)이라 한다. 인간의 촉각기관은 물체와의 접촉시 압력, 온도 진동등의 감각을 전달해주는 신경 말단(nerve endings)으로 구성된 촉감(tactile)기관과 외력에 대해 반응할 수 있는 근육, 힘줄, 관절등에 분포된 신장 수용기관을 포함하는 역감(kinesthetic)기관으로 나눌수 있다. 인간은 역감기관을 통해 가상물체의 존재여부를 감지할수 있고 촉감기관을 통해 가상 물체의 재질감, 마찰, 강성등의 정보를 획득할 수 있다[2].

인간의 촉각 기관은 위치 판별에 대해 시각시스템보다 민감하지 않다. 뇌는 팔과 손목의 관절 변위각으로부터 손의 위치를 계산해 내며, 특히 진동과 힘의 불연속성에 대해 매우 민감하다. 손가락 끝의 물리적 자극 수용기와 Pacinian Corpuscle 는 손의 움직임에 대한 최대 주파수 성분을 측정한다. 이 같은

촉감 기관은 1KHz까지 진동을 구별할 수 있으므로 민감한 촉각장치 시스템을 구성하기 위해서는 제어 서보 루프가 1KHz 이상이 되어야 한다[3]. 그러나 진동감각을 포함하고 있지 않은 역감기관을 통한 힘의 제시는 이렇게 높은 주파수를 사용하지 않아도 된다. 역감기관은 약20~30[Hz]의 대역폭만으로도외력에 반응하는 힘을 제시할 수 있다.[4] 즉, 단순히 가상 물체의 존재 여부만을 검출할때에는 촉감제시에 필요한 힘과같이 자주 업데이트가 될 필요가 없다는 것을 의미한다. 표 1은 인간이 지각할 수 없는 각 관절의 위치 변위각 범위를 나타내고 있다.

표 1. 감지능력의 차이점[5]

Finger	Wrist	Elbow	Shoulder
2.5	2.0	2.0	0.8

2.2 가상 물체와 촉각 발생

인간 근-골격은 점·탄성 특성을 가지는데 이를 그림 1과 같이 근사적으로 동력학적 모델로 표현 할 수 있다.

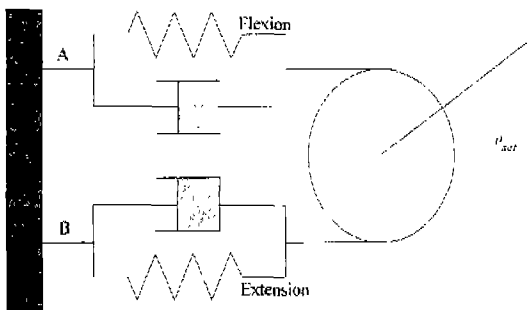


그림 1. 근-골격 시스템의 동력학적인 모델

그림 1에서와 같이 관절의 점·탄성 특성은 근육의 탄성특성과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이는 손가락 끝에서 측정된 동력학적인 임피던스(impedance)에 비례하게 관절이 일정한 강성(stiffness)을 발생함으로써 탄성력을 가지고 움직인다는 의미이다. 결국 관절의 강성을 변화시킴으로써 손가락 끝의 임피던스가 지속적으로 변화하여 어려운 작업을 행하게 된다.[6] 그림 1에서 탄성체의 평행상태 위치 θ_{set} 를 변화시켜 위치 제어로 힘 제어를 대신할 수 있다.

$$\tau = K_{joint} (\theta_{set} - \theta) - B_{joint} \dot{\theta} \quad (2-1)$$

여기서 θ 와 θ_{set} 은 각각 현재 위치와 원하는 목표 위치이다. 식(2-1)에서 출력 토크는 목표위치와 현재 위치의 차이에 대한 탄성계수의 곱에 비례하게 출력

된다. 이러한 위치변화에 대한 제어는 힘 제어보다 더 정확하게 할 수 있으므로 마찰과 토크리플로부터 발생하는 힘 오차를 줄일 수 있다. 따라서 점·탄성 특성을 이용하여 촉각장치의 각 관절에 임피던스 특성을 변화시켜 인간이 느끼는 촉각의 제시를 할 수 있다. 이와 비슷하게 가상환경(가상벽, 버튼, 가상물체 등)은 탄성(spring), 점성(damper) 요소가 병렬로 구성되어 있으며 그림 2와 같이 모델화 될 수 있다. 매니플레이터가 가상벽과 접촉한 순간에 발생하는 힘은 그림 3과 같이 점성과 탄성 요소에 의존한다. 이것은 결국 점·탄성의 제어로부터 가상물체의 환경 제시가 가능하다는 것을 뜻한다.

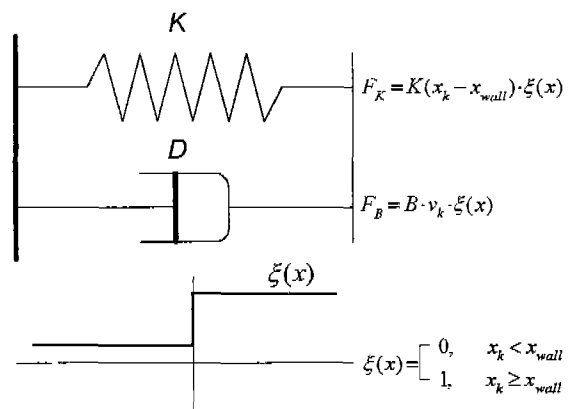


그림 2. 점성과 탄성으로 병렬 구성되어진 가상환경의 모델(K 는 가상 강성, D 는 가상 점성, x_{wall} 은 가상환경의 위치)

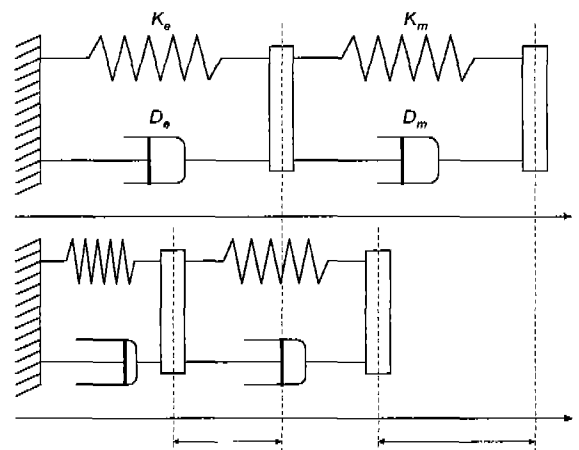


그림 3. 매니플레이터와 접촉이 이루어질 때의 가상환경

이때 매니플레이터의 탄성과 점성은 가상환경의 탄성과 점성으로 식(2-2)과 같이 나타낼 수 있다. 이것은 점·탄성 제어에 의하여 매니플레이터에 가상환경의

촉각을 전달 할 수 있다는 것을 의미한다.

$$K = \frac{x}{x_d - x} \cdot K_e \quad (2-2)$$

$$B = \frac{\dot{x}}{x_d} \cdot B_e$$

3. 역감장치의 설계

3.1 설계 기준사항

역감장치는 컴퓨터 그래픽으로부터 만들어진 가상의 물체와 접촉이 일어났을 때, 실제 물체와의 접촉 느낌을 제시해 주어야 하며 또한 역감장치를 사용하는 사용자의 움직임이 방해해서는 안된다. 이러한 것들을 고려할 때 역감장치 설계시 일반적으로 고려되어야 할 중요한 요소들은 다음과 같다.

- 제시할 수 있는 최대 힘 - 인간의 검지손가락(index finger)이 평균적으로 발생할 수 있는 힘은 50[N] 이지만 텔레로봇틱스에서는 일반적으로 40[N]정도를 좋은 설계의 범위로 하고 있다. (Thomas H. Massie는 인간이 딱딱한 벽으로 느낄 수 있는 힘은 약 11[N] 정도로 측정했다.)[7]

- 백드라이브 마찰 - 백드라이브 마찰력은 최대한 낮게 해야한다. 역감 장치가 사람에게 힘을 반영 시킬 때 이 구조적인 노이즈를 타지 않아야 실제와같은 느낌에 빠져들게 한다. 만일 이렇게 설계되지 않으면 사용자는 조금만 사용해도 쉽게 피로 해진다. (최대 발생힘과 백 드라이브 비율은 30:1이던 적당하다.)[8]

- 관성 - 관성은 적어야 한다, 역감장치가 천천히 움직일때는 문제가 되지 않지만, 급 가속 또는 급 감속시 시스템의 관성은 힘을 반영 시키므로 속도의 한계가 생기고, 응답이 늦어져 액츄에이터의 토그에 영향을 미친다. (디바이스의 무게는 디바이스 구조상의 관성과 액츄에이터의 관성 및 기어 등에 의한 전송비 N^2 에 비례하며 보통 100g이하의 무게는 크게 그 무게를 느끼지 못한다). [8]

- 백러쉬 - 인간은 손가락의 작은 위치변화에 민감하기 때문에 전송장치의 백러쉬는 0.01 [inch]이상의 위치 진동을 발생시켜서는 안된다. 또한 반발로부터 발생하는 비-선형항들은 모델링 하기 어렵기 때문에 실제적으로 힘 제어를 어렵게 만든다. 이러한 이유로 역감 장치는 반발이 없어야 한다.[9]

- 강성 - 여러 가지 강성 요소중 역감장치의 강성의 한계를 결정하는 것은 결국 서보 루프의 강성이다. 따라서 안정된 서보루프로 얻을 수 있는 최대 강성은 디바이스의 관성, 디바이스 접촉시의 임피던스, 전달장치 비, 서보율 (servo rate), 위치센서에 의해 결정된다.[9]

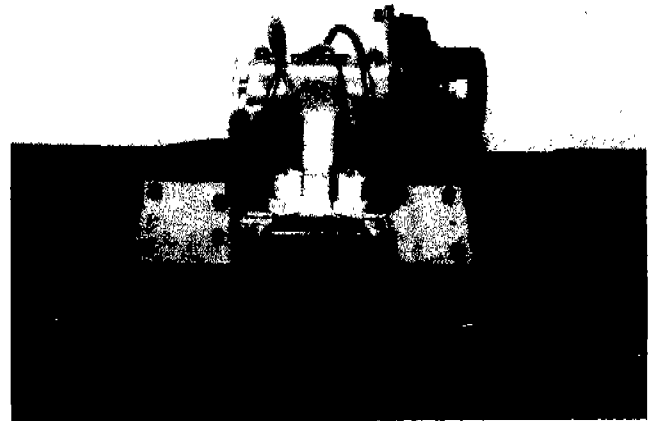


그림 4. 매니플레이터로 제작된 역감 장치

이상과 같은 사항들을 고려하여 원격조정의 마스터 매니플레이터로 제작된 역감 장치는 액츄에이터로서 진행과형 소형 초음파모터를 사용하여 직접구동방식으로 제작되었다. 그 무게는 15[g]이며 직접 구동 방식을 사용하고 있으므로 전송비에 의한 관성의 영향과 백러쉬가 존재하지 않았다. 제작된 액츄에이터 제어기를 사용하여 최대 3[N]의 힘을 제시할 수 있다. 이 힘의 크기는 딱딱한 벽을 제시하기에 너무나 적은 양이지만 손에 힘을 가하지 않은 상태에서 느낌을 감지할 수 있었다. 따라서 범용적인 촉각 제시용의 액츄에이터로서는 적합하지 않았지만 일반적인 전기모터와는 다르게 과부하로 인한 포화상태는 없었다. 그림 4는 제작된 역감 장치의 외형을 나타내며 표 2는 역감장치의 실제 파라미터를 나타낸다.

3.2 역감 렌더링 알고리즘

역감 렌더링은 가상물체와 상호작용을 하는 역감장치를 제어하는 것이다. 그림 5는 역감 렌더러 (renderer)의 입출력 관계를 나타낸다. 역감장치 말단부(end point)의 위치정보는 역감 렌더러의 입력이 되며, 이 입력과 가상물체의 위치 정보를 통해 역감 렌더러는 역감장치를 통해 계산된 힘을 제시한다. 역감 렌더러의 내부 제어 흐름은 그림 6과 같다.

표 2. 촉각 장치의 실제 매개변수

	Link 1	Link 2
Mass of link	15 [g]	14.2 [g]
Length	8.2 [cm]	8.0 [cm]
Type of motor	USR30-E3	
Mass of motor	240 [g]	
Torque rating	3.2 [Kgf · cm]	
RPM rating	90 [rpm]	
Optimal driving frequency	50 [KHz]	
Maximum exerted force	3 [N]	
Backdrive friction	0.33 [Nms/rad]	
Inertia	0.031 [gm ²]	
Backlash	0	
Device stiffness	High	

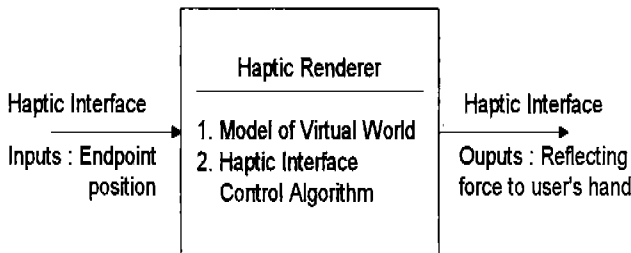


그림 5. 역감 렌더러의 입출력 개념도

역감 장치에서 제시될 힘의 계산은 일반적으로 거리변화에 비례하는 작용력을 발생시키는 Hooke's law을 사용한다.

$$F = K \cdot \Delta x \quad (3-1)$$

식(3-1)으로부터 알 수 있듯이 작용력은 가상물체 표면에서 표면 안으로의 투과 거리에 비례하게 되며 가상물체 표면에 대해 수직방향으로 제시된다. 이런 작용력은 벡터로서 그 방향과 크기를 가지고 있으며 작용력 벡터를 계산하는 알고리즘으로 벡터장(vector-field)[1]과 God-Object 알고리즘이 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 기존의 알고리즘인 God-Object 알고리즘을 사용하여 렌더링을 하였다.[10]

3.3 제어기 구성

그림 7은 역감장치 액츄에이터의 제어회로 구성도를 나타낸다. 관절의 위치 데이터는 체배기를 통해 4 체배되므로 2000 [P/R]의 분해능을 갖는다. 관절의 위치 데이터들은 인터럽트 주기에 따라 읽혀져서 24-Bit 카운터와 디지털 I/O 보드를 통하여 컴퓨터로

입력되어진다. 컴퓨터로 입력된 데이터는 내부 제어 프로그램에 의해 위치좌표로 변환되어져 네트워크를 통해 3차원 그래픽 처리부로 전송된다. 제어 프로그램에서 인터럽트는 인터럽트 벡터를 생성한 후 하드웨어의 타이머에 의해 800[Hz]의 주기로 발생된다. 따라서 제어 서보 루프는 800[Hz]를 갖게되며, 제어 프로그래밍 언어는 C++를, 실험에서는 매니플레이터가 점·탄성 제어에 의해 제시할 수 있는 가상환경의 느낌에 대해 고찰한다.

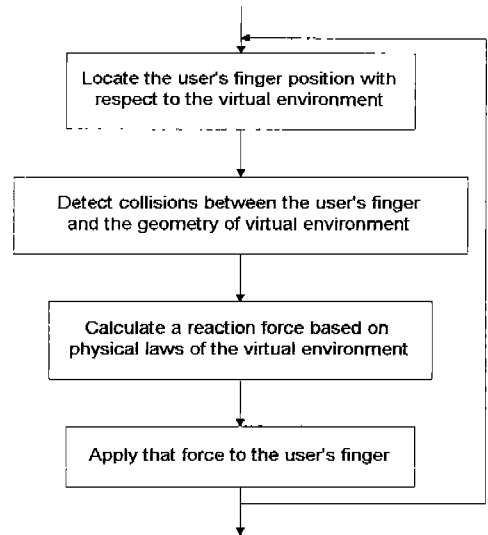


그림 6. 역감 렌더러의 내부 알고리즘 흐름도

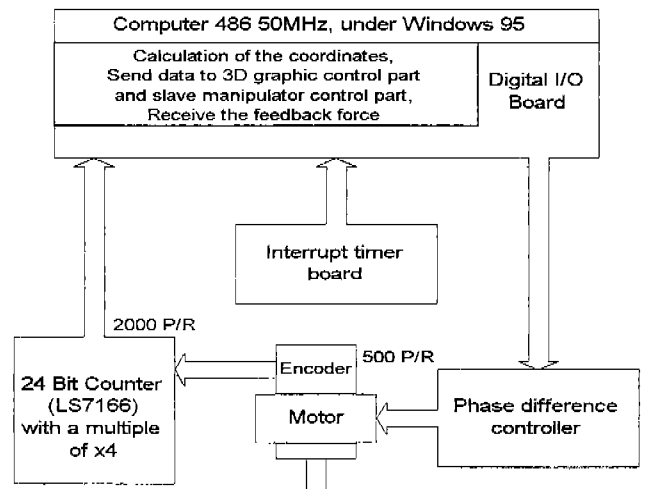


그림 7. 역감장치의 제어시스템

4. 실험 및 고찰

직접구동형으로 제작된 매니플레이터를 이용하여 가상환경에서 사용자에게 어떤 감각을 제시할 수 있는지를 실험하기 위해 액츄에이터의 위치 센서로부터 θ 값을 받아들였다. 그림 8과 같이 θ 값과 θ_1, θ_2 ,

θ_3 와 크기를 비교하여 각각의 영역에 대해 점성과 탄성을 다르게 발생하였다. θ 값이 $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ 인 경우에는 점성만을 발생시키고, $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3$ 사이에서는 점성과 탄성을 모두 발생시키고, $\theta \geq \theta_3$ 의 조건에서는 탄성만을 발생하는 제어를 하도록 하였다. 이런 점·탄성 제어를 이용하여 가상 환경을 만드는 경우, 어느 정도의 점성과 탄성 조건하에서 최적의 가상 환경(벽이나 물체)을 만들어낼 수 있는지를 위해 변화가 가능한 세 가지의 파라미터를 다음과 같이 하였다.

- θ_a : 점성 발생 위치
- θ_b : 탄성 발생 위치
- θ_D : 탄성의 목표 위치

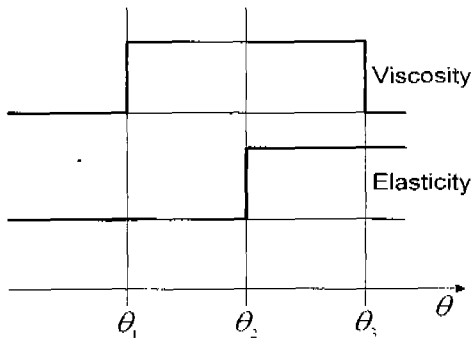


그림 8. 고정 위치에 따른 점·탄성 발생

또한 θ 의 초기 위치 0와 정위치 θ_a , θ_b , θ_c 를 그림 9와 같이 하였고, 이를 바탕으로 점·탄성 제어를 이용하여 환경 발생 위치를 복수로 나누어 각 조건에서 피험자의 체험 느낌을 조사해 논리적으로 고찰해 보았다.

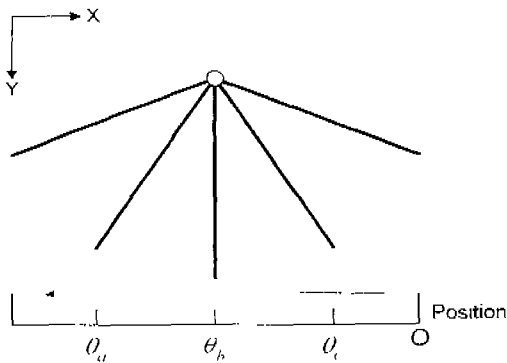


그림 9. 매니플레이터의 이동 경로

점·탄성을 이용하여 환경을 만드는 경우에 탄성을

$\theta_D = \theta_b$ 일 때와 $\theta_D = \theta_c$ 일 때 각각에 대하여 점성을 $\theta_a = \theta_b$ 와 $\theta_a = \theta_c$ 로 했을 경우에 대해서 벽과 같은 단단한 환경을 만들려고 생각하였다. 탄성 발생지점이 $\theta_D = \theta_b$ 일 때, 빠른 진입의 보조로써 점성을 이용하여 $\theta_D = \theta_c$ 일 때 발생하는 발진을 멈출 수 없을까 하는 생각에 점성과 탄성을 합성하여 실험하였다. 하지만 점성은 탄성에 의한 반발력이 발생한 후에 발생하였다.

그림 10의 그래프는 매니플레이터를 빠르게 움직였을 때와 서서히 움직였을 때의 매니플레이터의 위치 응답이다. T_{slow} 구간에서는 보다는 가상벽의 딱딱함을 느꼈지만 T_{fast} 구간에서는 액추에이터의 발생 토크보다 더 큰 힘으로 이동하면 약간의 진동이 발생하였다.

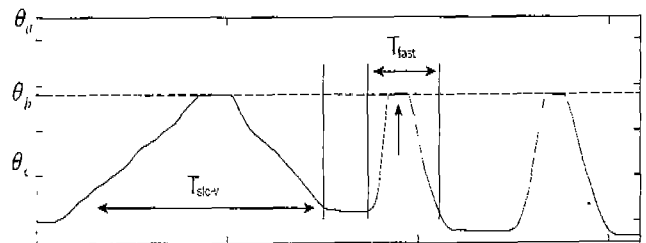


그림 10. 점성과 탄성을 이용하여 환경을 만드는 $\theta_D = \theta_b$ 와 $\theta_a = \theta_b$ 경우에 대한 매니플레이터의 위치/시간 응답(가상 벽을 제시)

그림 11의 $\theta_c \sim \theta_b$ 사이에서는 움직이는 것을 방해하는 마치 호물호물 거리는 느낌과 약간의 발진 현상을 느낄 수 있었다. 그러나 이 구간을 넘어서서 θ_a 까지 매니플레이터를 이동 후 자유 운동시키면 큰 탄성에 의한 반발력으로 매니플레이터가 튕겨지지만 평행 위치까지 이동하지 못하고 T_{slow} 구간에서 점성에 의해 위치 변화가 중지되어졌다.

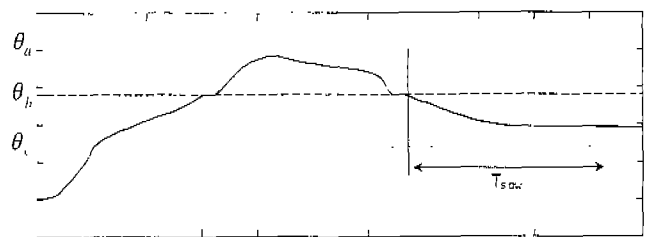


그림 11. 점성과 탄성을 이용하여 환경을 만드는 $\theta_D = \theta_b$ 와 $\theta_a = \theta_c$ 경우에 대한 매니플레이터의 위치/시간 응답

그림 12는 점성보다 탄성의 영향이 큰 경우이다. 탄성에 의한 반발력보다 더 큰 힘을 가해 점성 발생 구간을 지나 θ_a 까지 이동시킨 다음 매니플레이터를 자유운동 시키면 큰 탄성력에 의해 T_{slow} 구간에서 서서히 이동하여 θ_b 이후 T_{fast} 구간이후 큰 탄성력을 빠르게 이동하였다.

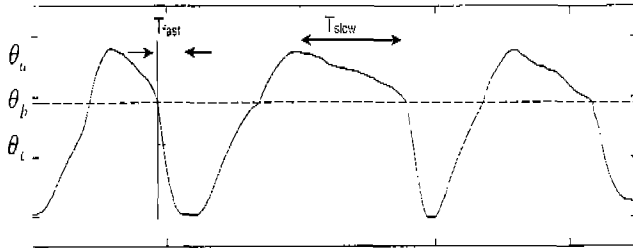


그림 12. 점성과 탄성을 이용하여 환경을 만드는 $\theta_D = \theta_c$, $\theta_a = \theta_b$ 경우에 대한 매니플레이터의 위치/시간 응답

이상의 시험으로부터 단단한 환경(가상 벽)은 점·탄성을 동시에 합성한 $\theta_D = \theta_c$, $\theta_a = \theta_b$ 의 조건 하에서 제시하는 것이 가장 좋은 것을 알 수 있었다. 또한 이 조건에 있어서 매우 단단한 환경을 발생시키기 위해서는 탄성과 점성의 계수를 크게 할 필요가 있음을 알 수 있다. 또한 점·탄성 제어에 의하여 버튼을 누르는 것과 같은 감각, 고무, 스프링과 같은 감각, 튀어나가는 듯한 감각, 무언가의 단단한 물건에 부딪친 것과 같은 감각, 물 속에서의 감각을 제시할 수 있었다. 이러한 감각특성을 이용하여 원격조정 실험에서 가상물체에 대한 역감 제시를 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 전기모터가 아닌 새로운 형태의 액추에이터인 초음파 모터를 사용하여 직접구동 방식의 대칭 2자유도의 역감장치를 시험 제작하였다. 이를 바탕으로 점성과 탄성의 발생위치 조합에 따라 감각제시 실험을 하였다. 이 실험을 통하여 탄성과 점성의 계수의 조정과 발생 위치로부터 여러 가지 감각을 제시할 수 있음을 알았다. 따라서 차후 연구되어질 재질감 표현에 있어서 민감한 역감을 제시할 수 있는 가능성을 내포하고 있다.

이 결과들로 초음파 모터가 역감 제시용 액추에이터로 사용될 수 있는 가능성을 확인하였고, 접촉작업시 작업대상체의 동적 특성을 고려하여 정밀한 제어가 가능함을 알 수 있었다. 특히 간단한 점·탄성제어에

서부터 다양한 감각의 제시가 가능함으로 매니플레이터의 자유도를 높이고 안정된 햅틱 알고리즘을 개발하면 표면의 재질표현과 다양한 응용을 할 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Thomas Massie and J.Kenneth Salisbury: "The PHANTOM haptic interface A device for probing virtual objects. In Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems." Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting. IL, November 1994.
- [2] Chang, S., Tan, H. Z., Eberman, B. E., and Marcus, "B.:Sensing, perception, and Feedback for Virtual Reality." In Proc. of Virtual Reality Systems Conference. Fall, 1993.
- [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] Mandayam A. Srinivasan, "Virtual haptic environments: Facts behind the Fiction." In Proceedings of the Eighth Yale Workshop on Adaptive and Learning Systems. June 1994.
- [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] Craig Zilles and J.Kenneth Salisbury "A constraint-based god-object method for haptic display." In Proceedings of the IROS conference on Robotics. IROS, 1995.