

가상물체 인식 실험을 위한 2차원 Haptic 인터페이스 장치의 구현

Realization of a two dimensional Haptic Interfacing Apparatus for Virtual Object Recognition Experiments

이 준 철* 장 태 정**

Lee, Joon-Cheol Jang, Tae-Jeong

Abstract

In this paper, a 2D X-Y table, two axes of which are symmetrical, and a force sensing device are constructed, which comprise a 2D haptic interfacing apparatus. Two DC motors are used for actuating the two axes of the table and two precision encoders for sensing the position of each axis. Four PZTs are used for sensing the direction and the magnitude of the 2D force applied to the force sensing device by the user. The performance of the 2D haptic interface device is tested by 2D virtual object recognition experiments.

키워드 : 2차원 X-Y 테이블, 힘 감지 장치, PZT, 힘 계환 제어, 가상 물체 인식

Keywords : 2D X-Y table, force sensing device, PZT, force feedback control, virtual object recognition

1. 서 론

가상현실 시스템이란 컴퓨터를 통해 구현된 가상 공간에서 사용자가 실제로는 존재하지 않는 여러 가지 물체, 건물, 풍경 등을 다양한 소리와 함께 보거나 들을 수 있고, 심지어는 가상의 물체를 손으로 만져볼 수 있는 등 사용자가 실제 현실공간 속에 있는 것과 같은 착각을 불러일으키는 시스템을 말한다. 이러한 기능을 가능하게 하기 위해서는 시각, 청각 및 촉각 인터페이스 장치 등 여러 가지 멀티미디어 하드웨어 및 소프트웨어들을 통합하여 제어하는 것이 필요하다. 지금까지의 가상현실 시스템은 주로 시각 및 청각 인터페이스 장치를 중심으로 발전하여 왔다. 그러나 최근 가상공간 내의 물체에 보다 생생한 현실감을 부여하는데 필수적인 촉각 인터페이스 기술

상현실 시스템과는 근본적으로 그 목적이 다르지만 기술적으로는 유사한 점이 많은 원격제어 시스템에 대한 연구가 활발해지는 등 촉각 인터페이스 기술을 개발하고 이를 즉시 실용화하는데 유리한 환경이 조성되고 있다.

촉각은 엄밀히 말하여 인간의 피부 감각으로서의 촉각(tactile)과 근육이나 힘줄 또는 관절을 통하여 대상 물체로부터의 반작용을 수용함으로써 그 물체의 존재나 질감, 강도 등을 느끼게 되는 것을 지칭하는 햅틱(haptic)으로 구분할 수 있다. 촉각기술 특히 Haptic 기술의 핵심은 '힘 되먹임(force feedback)'으로서 가상물체나 원격제어 매니플레이터에 가해진 힘을 감지하여 되먹임 제어함으로써 사용자에게 그 힘을 가상적으로 느끼게 해주는 것이다.

본 논문에서는 가상현실 시스템이나 원격조종(teleoperation) 시스템 구현에 있어서 중요한 기술 중의 하나인 Haptic 인터페이스에 대해 연구한다. 먼저 대형 X-Y 테이블을 제작하고 알맞은 제어기를 설계한다. 그리고 피에조(Piezo) 필름을 이용한 힘(force) 센서를 제작하고 그 특성을 알아본다. 마지막

* 강원대학교 제어계측공학과 공학석사

** 강원대학교 전기전자공학부 조교수, 공학박사

에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이고, 게다가 가

으로 제작한 시스템을 이용하여 2차원 가상 물체를 인식하는 실험을 행한다.

2. 기구부의 설계 및 제작

2.1. 시스템 개요

전체 시스템의 구성도를 그림 3에 나타내었다. 먼저 기구부에 장착된 힘 감지 센서와 위치 센서로부터 출력되는 각각의 힘 정보와 위치 정보를 센싱 회로를 통해 사용 가능한 전기적인 신호로 바꾼 후 PC에서 처리 가능하도록 아날로그 입출력 보드가 디지털 신호로 변환하여 PC에 전송하게 된다. PC는 제어 알고리즘을 통하여 디지털 제어신호를 생성한 후 아날로그 입출력 보드로 전송하게 되고 아날로그 입출력 보드는 다시 아날로그 제어신호로 변환한 후 모터 구동 회로에 전송함으로써 최종적으로 모터 구동 회로에 의해 시스템이 동작하게 된다.

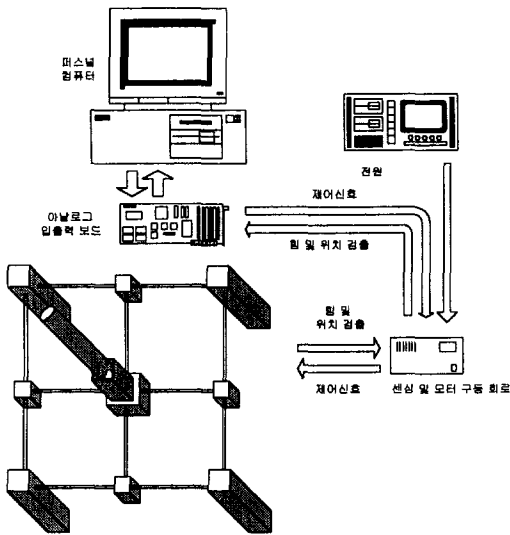


그림 3. 전체 시스템의 구성도

2.2. 2D X-Y 테이블

기존의 2차원 테이블은 대개 X-Y 플로터 형태로서 하나의 축 위에 그 축과 직교하는 다른 축을 얹고 구동하게 되어있다. 이러한 형태의 테이블의 단점은 두 축이 서로 독립적이지 못하고, 모델도 서로 다르며, 두 축을 구동시키는 모터의 사양도 서로 달라야 한다는 점 등이다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 두 축이 서로 거의 독립적이며 대칭적인 그림 2와 같은 형태의 테이블을 제작하게 되었다.

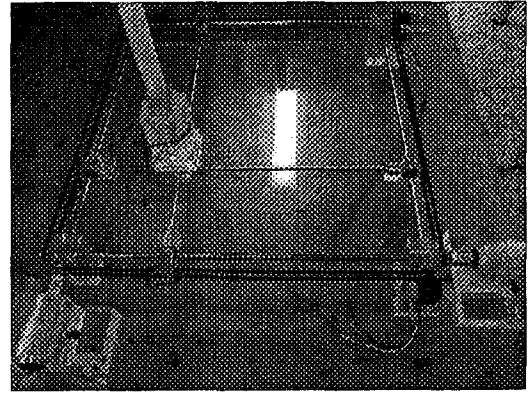


그림 4. 2D Haptic 인터페이스 장치

그림 2에서 보면 중앙의 두 축이 교차하는 부분은 리니어 베어링 두 개를 십자 형태로 교차하도록 고정시켜 두 축이 임의의 방향으로 움직일 수 있게 하였고 각 축은 벨트와 풀리를 이용하였다. 각 축의 길이가 길어지면 벨트가 직접 고정된 쪽과 반대쪽과의 편차가 생기므로 힘 감지 장치가 움직이는데 마찰력이 생기게 된다. 이러한 마찰력을 줄이고 더욱 원활한 움직임을 위해 외곽의 축들에 볼 베어링을 이용하여 회전 가능하게 함으로서 모터쪽에 직접 고정되지 않은 반대쪽 축에도 벨트와 풀리를 이용하여 똑같이 고정시켜 함께 움직일 수 있게 하였다. 또한 외곽 축과 십자 축이 T자로 교차하는 부분은 직선 운동과 회전 운동을 동시에 해야 하기 때문에 리니어 베어링 외부에 볼 베어링을 고정시켜 두 운동을 동시에 가능하도록 하여 마찰력을 줄였다. 따라서 X-Y 두 축은 각 베어링들의 마찰력을 제외하면 서로 독립적인 시스템이 된다. 이 X-Y 테이블은 DC 모터로 구동되게 되며 위치 센싱은 정밀 엔코더를 사용하였다.

2.3. 2D 힘 센서

힘 센서로는 로드 셀, 피에조 필름, 스트레인 게이지 등 여러 종류가 있으며, 본 논문에서는 28 마이크론의 두께와 12×30 mm의 활성 영역 그리고 1.4 nF의 커패시턴스를 갖는 피에조 필름을 사용하였다. 그림 3은 피에조 필름의 등가회로이다.

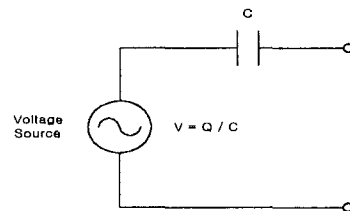


그림 5. 피에조 필름의 등가회로

각 기호의 정의는 다음과 같다.

V : open circuit voltage

C : piezo film capacitance

Q : electrical charge developed on piezo film

이러한 피에조 필름의 외부에 부하 저항을 연결함으로써 전압을 측정하여 인가된 힘을 감지하게 된다.

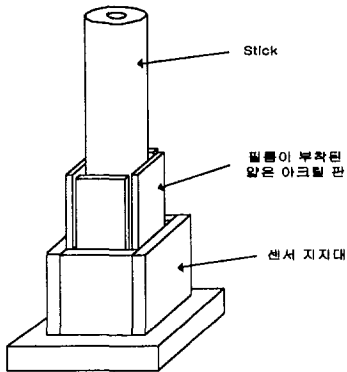


그림 6. 힘 감지 장치

그림 4는 피에조 필름을 이용하여 2차원 방향의 힘을 감지하기 위한 장치의 모습이다. 각 필름은 일단 휘었다가 원상태로 되돌아온다는 것을 보장할 수 없고 또한 시간이 걸리기 때문에 탄성이 있는 얇은 아크릴 판에 필름을 접착제로 부착하였으며 스틱은 직경이 큰 둥근 아크릴 봉을 사용하였다. 그리고 각 방향의 힘을 감지하기 위해 필름이 부착된 아크릴 판을 아크릴 봉에 접하도록 사각 틀을 구성하였다. 이렇게 구성된 힘 감지 장치는 X-Y 테이블의 십자 교차부분에 장착되게 된다.

3. 시스템의 모델링 및 제어기 설계

3.1. 시스템 모델링

(1) 2D X-Y 테이블의 모델링

먼저 테이블의 모델링을 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

가정 1) 테이블의 각 X 축과 Y 축은 물리적으로 동일하며 서로간에 미치는 힘의 영향면에서 서로 독립적이다.

가정 2) 풀리의 관성은 무시한다.

가정 3) 벨트의 질량 및 장력은 무시한다.

위의 가정 1)로부터 한 축의 모델링은 다른 축과 동일하게 된다. 먼저 하나의 축(X축)에 대해서 모델링한다.

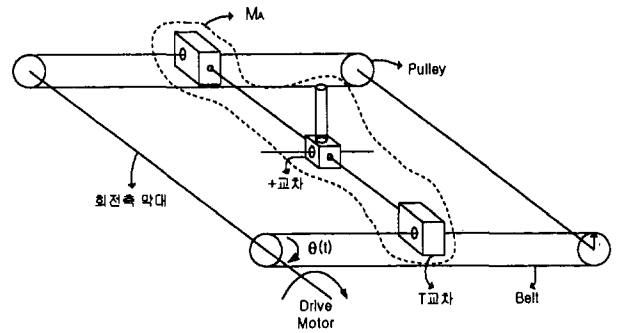


그림 7. 시스템의 한 축 구동부

각 축은 그림 5와 같이 단순히 벨트와 풀리의 Rotary-to-Linear motion-control 시스템이다. 따라서 모터가 보는 등가 관성(inertia)은 가정 2), 3)과 함께 다음과 같다.

$$J_s = \frac{1}{2} M_s r_s^2 \quad (1)$$

$$J_e = M_A r_p^2 \quad (2)$$

$$J_m = 2J_s + J_e \quad (3)$$

여기서, M_s 는 회전축 막대의 질량, r_s 는 회전축 막대의 반지름, M_A 는 모터에 의해 한 축 방향으로 움직이는 전체 질량, r_p 는 풀리의 반지름, J_m 은 전체 등가 관성, J_s 는 회전하는 축의 관성 그리고 J_e 는 풀리에 대한 모터의 등가 관성이다. 따라서 모터의 토크 방정식은 다음과 같다.

$$T_m(t) - T_L(t) = J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (4)$$

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (5)$$

$$e_b(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} = K_b \omega_m(t) \quad (6)$$

$$\frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} = \frac{1}{J_m} T_m(t) - \frac{1}{J_m} T_L(t) - \frac{B_m}{J_m} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t) \quad (8)$$

여기서, $T_L(t)$ 는 부하 토크, $i_a(t)$ 는 권선 전류, R_a 는 권선 저항, L_a 는 권선 인덕턴스, $e_a(t)$ 는 인가전압, $e_b(t)$ 는 back emf 전압, K_t 는 토크 상수, K_b 는 back-emf 상수, $\theta_m(t)$ 는 회전자의 변위, $\omega_m(t)$ 는 회전자의 각속도 그리고 B_m 은 점성 마찰계수이다. 두

축의 교차점의 X축의 위치 $X(t)$ 는 모터의 회전각 $\theta_m(t)$ 와 비례하므로 적당한 비례상수 k_x 를 써서

$$X(t) = k_x \theta_m(t) \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다.

(2) 2D Force 센서의 모델링

Force 센서의 모델링을 위해 다음과 같은 가정을 한다.

가정 1) 각각의 센서는 동일한 특성을 갖는다.

가정 2) 가해진 힘에 의해 휘어진 아크릴은 완벽히 원상태로 복구된다.

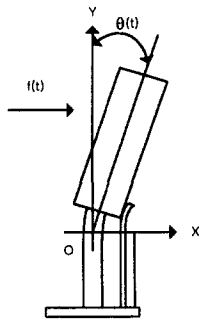


그림 6. 단방향 감지 센서와 스틱의 물리적 모델

그림 6은 한쪽 방향을 감지하는 센서와 스틱의 물리적인 모델을 나타낸다. 여기서 필름이 부착되어있는 얇은 아크릴 판의 탄성력을 무시하면, 다음의 방정식이 성립된다.

$$f(t) = K_s \theta(t) \quad (10)$$

여기서, $f(t)$ 는 사용자가 외부에서 가한 힘이며, K_s 는 스틱의 탄성 계수 그리고 $\theta(t)$ 는 스틱이 휘어진 각도이다. 필름 외부에 병렬로 부하저항 R을 연결함으로써 피에조 필름은 C, R 미분회로의 특성을 갖게 되며 그 전달함수 $T_p(s)$ 는 식(11)과 같다.

$$T_p(s) = \frac{RCs}{RCs + 1} \quad (11)$$

3.2. 제어기 설계

본 논문 시스템의 X, Y 각 축은 서로 독립이고, 같은 특성을 가지며 같은 시스템이므로 동일한 제어를 사용한다. 그림 7에 본 논문에서 사용한 제어기의 블록도를 보였다.

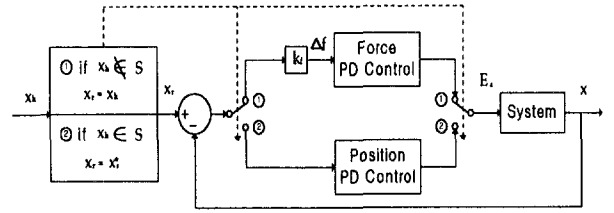


그림 9. 제어기 블록도

제어기는 힘과 위치 제어기로 나뉘며 X_h 의 조건에 따라 스위치가 연동하여 동작하게 된다. X_h 의 조건은 다음과 같다.

조건 ① if $X_h \notin S, X_r = X_h$

조건 ② if $X_h \in S, X_r = X_s^* \in S^*$,

$$\text{단 } |X_s^* - X_h| \leq |X_s - X_h| \quad \forall X_s \in S^*$$

여기서, X_h 는 핸들을 잡고있는 손의 위치 벡터이며, X_r 는 레퍼런스 위치 벡터, X 는 케환되는 힘 감지 장치의 실제 위치 벡터(엔코더의 펄스 수), X_s^* 는 X_h 와의 거리가 최소인 가상 물체 표면 위의 좌표값, S 는 가상 물체 내부의 모든 점, 그리고 S^* 는 가상 물체 표면의 모든 점이다.

위 블록도의 조건 ①에서 k_f 는 사용자가 핸들을 잡고 힘을 가했을 때 핸들과 힘 감지 장치의 아주 미소한 위치 차 ($X_h - X$)로부터 힘을 나타내기 위한 매우 큰 값의 이득값이다. 그리고 Δf 는 핸들에 실제로 인가된 힘 또는 반작용으로 사용자가 느끼는 힘을 나타낸다. 본 논문에서 모든 위치 값은 엔코더의 펄스 수로 나타내어지며 Δf 는 힘 센서로부터 측정된 값을 직접 사용하였다.

먼저 힘 PD 제어기의 식은 다음과 같다.

$$u_f(t) = k_{pf} * \Delta f(t) + k_{df} * \Delta \dot{f}(t) \quad (12)$$

여기서, $u_f(t)$ 는 힘 PD 제어기의 출력으로서 시스템의 입력으로 인가되며 k_{pf} 는 힘 비례이득, k_{df} 는 힘 미분이득, $\Delta f(t)$ 는 케환된 힘 오차, $\Delta \dot{f}(t)$ 는 케환된 힘 오차의 미분치이다. 그리고 위치 PD 제어기의 식은 다음과 같다.

$$u_p(t) = k_{pp} * \Delta x(t) + k_{dp} * \Delta \dot{x}(t) \quad (13)$$

여기서, $u_p(t)$ 는 위치 PD 제어기의 출력으로서 시

스텝의 입력으로 인가되며 k_{pp} 는 위치 비례이득, k_{dp} 는 위치 미분이득, $\Delta x(t)$ 는 궤환된 위치 오차 그리고 $\Delta \dot{x}(t)$ 는 궤환된 위치 오차의 미분치이다. 일반적으로 위치 비례이득 k_{pp} 는 매우 큰 값을 갖게 된다.

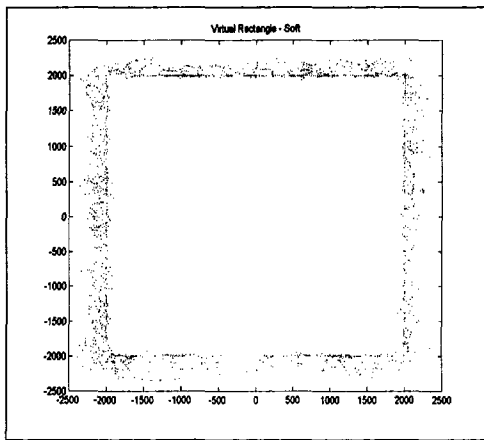
4. 가상 물체 인식 실험

4.1. 사각형의 가상물체

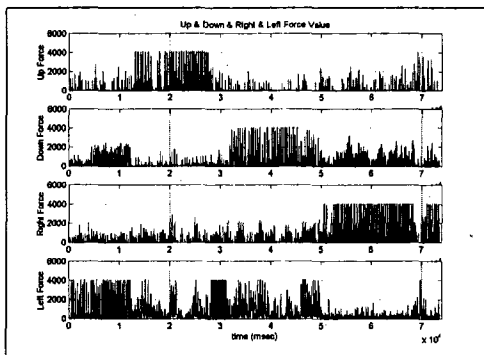
본 장에서는 2 차원 원형 가상 물체 인식 실험을 하게 된다. 사용자는 가상 물체 외부에서는 자유 운동을 하게 되며 가상 물체와의 접촉시 가상 물체 내부로의 운동은 저지되면서 무른 강도와 강한 강도를 갖는 가상 물체의 모양을 인식하게 된다.

(1) 무른 강도

그림 8의 (a)를 보면 인식된 가상 물체가 사각형임을 알 수 있으며 사각형 내부로 사용자의 운동 궤적이 나타남을 볼 수 있으므로 가상 물체가 무른 강도임을



(a) 인식된 가상 물체



(b) 각 방향의 측정된 힘

그림 8. 인식된 무른 강도 사각형의 가상 물체와 측정된 힘

알 수 있다. 그림 8의 (b)를 보면 4000이 넘는 수치의 각 방향의 Force를 볼 수 있는데 이는 사용자가 가상 물체에 접한 후 계속해서 그 방향으로 힘을 가하고 있음을 나타낸다.

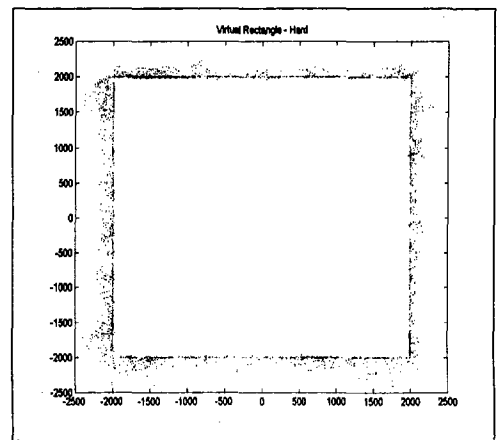
(2) 강한 강도

그림 9의 (a)에서 보면 사용자의 운동 궤적이 인식된 가상 물체의 내부에 나타나지 않음을 볼 수 있으므로 인식된 가상 물체가 강한 강도를 가지고 있음을 알 수 있다.

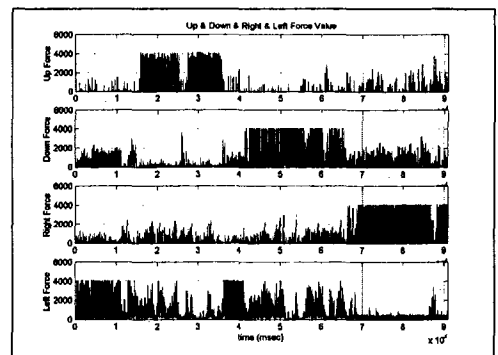
4.2. 원형의 가상물체

(1) 무른 강도

그림 10의 (a)에서 보면 사용자의 운동 궤적이 인식된 가상 물체의 내부에 나타나므로 인식된 가상 물체가 무른 강도임을 알 수 있으며 시간에 따른 힘의 변화가 동시에 측정됨을 알 수 있다. 즉, 두 가지 방향의 힘이 동시에 측정됨을 알 수 있다.

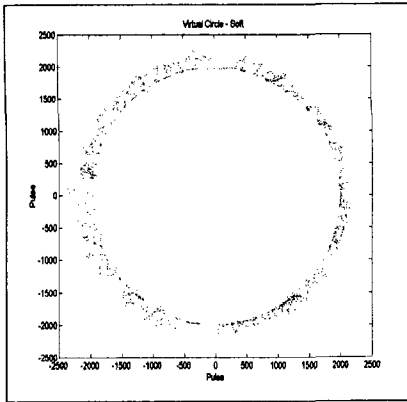


(a) 인식된 가상 물체

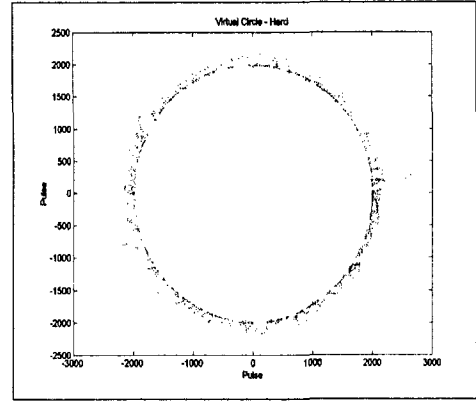


(b) 각 방향의 측정된 힘

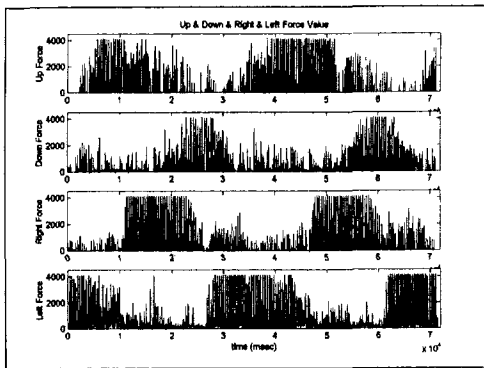
그림 9. 인식된 강한 강도 사각형의 가상 물체와 측정된 힘



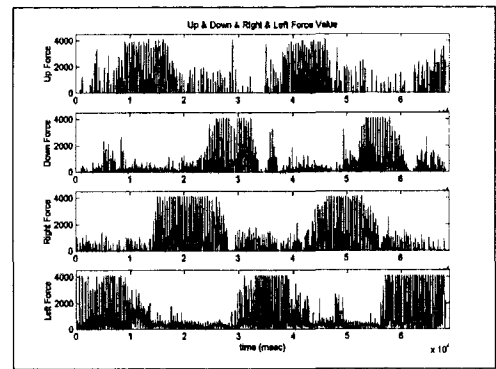
(a) 인식된 가상 물체



(a) 인식된 가상 물체



(b) 각 방향의 측정된 힘



(b) 각 방향의 측정된 힘

그림 10. 인식된 무른 강도 원형의 가상 물체와 측정된 힘

그림 11. 인식된 강한 강도 원형의 가상 물체와 측정된 힘

(2) 강한 강도

그림 11의 (a)에서 보면 사용자의 궤적이 인식된 가상 물체의 내부에 거의 나타나지 않으므로 인식된 가상 물체가 강한 강도임을 알 수 있다.

5. 토 의

본 논문에서는 2차원 Haptic 인터페이스 장치를 직접 구현하고 실험을 통하여 장치의 성능을 검증하였다. 2차원의 가상 물체 인식 실험 결과에서도 보듯이 이 장치를 이용하여 가상 물체의 인식 및 강도 조정이 가능함을 확인할 수 있었다. 아크릴을 이용하여 기구부를 직접 가공하였기 때문에 가공 정밀도는 많이 떨어졌지만 그림에도 불구하고 가상 물체 인식 실험은 매우 흥미로운 것이었으며 앞으로 보다 정밀한 Haptic 인터페이스 장치를 제작하는데 필요한 기초 기술을 축적할 수 있었다.

기구부 제작 및 힘 센서 선정에 있어서는 몇 가지 개선해야 할 점 또는 문제점들도 발견되었다. 먼저, 앞에서 지적하였듯이 제작한 Haptic 인터페이스 장치의 가공 정밀도 문제를 들 수 있다. Haptic 인터페이스 장치는 모터의 위치 및 힘 제어로 가상 물체를 표현하고 있으므로 기구부 제작 및 모터 제어시 생길 여러 가지 오차는 바로 모터가 구동하는 핸들의 진동으로 나타날 수 있다. 사람은 아주 미세한 진동도 쉽게 느낄 수 있기 때문에 이는 가상 물체의 현실감을 떨어뜨리는 주요한 요인이 된다. 본 장치에서도 상당히 큰 진동을 지속적으로 느낄 수 있었다. 따라서 기구부의 가공 정밀도를 높이는 것이 보다 현실감 있는 가상 현실 Haptic 인터페이스 장치를 구현하기 위해서는 우선적인 요구 조건이라 할 수 있다.

또한 실험을 통해 PZT의 특성이 힘 센서로서는 그다지 적절하지 않았다는 결론을 얻었다. 그 가장 큰 이유는 PZT가 용량성(capacitive) 센서라는 것이다. 즉, 지속적인 힘이 인가된 경우 출력값이 계속 일정값을 유지하는 FSR (force sensing resistor)과 같은

저항성(resistive) 센서와는 달리 PZT는 인가된 힘의 변화에 대해서는 즉각 반응은 나타내지만 인가된 힘이 계속 일정한 크기로 유지될 경우에는 그림 12에서 보듯이 서서히 출력값이 줄어든다. PZT는 위와 같은 특성을 가짐으로써 지속적인 힘보다는 비 지속적인 힘, 순간적인 충격 또는 불규칙적인 진동 등을 감지하기에 적합한 센서임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems, 7th ed.", *Prentice-Hall*, 1995.
- [2] Richard C. Dorf, and Robert H. Bishop, "Modern Control Systems, 8th ed.", *Addison-Wesley*, 1998.
- [3] Piezo Film Components Technical manual, *Atochem Sensor Inc.*, 1991.
- [4] Product Catalogs, *Piezo System Inc.*, 1994.

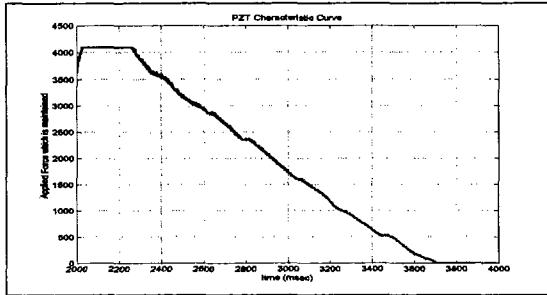


그림 12. 계단 입력에 대한 PZT 힘 센서의 응답 특성

제작한 힘 센서의 감도(sensitivity)가 너무 큰 것도 감지할 수 있는 힘의 범위가 좁아진다는 문제점이 있었다. 본 실험에서도 네 손가락으로 스틱을 잡고 실험할 정도의 힘만 감지, 측정 가능하였고 손바닥 전체로 스틱을 감아 잡고 움직일 정도의 힘은 불필요하였다. 힘 신호는 12 비트 A/D 변환기를 통해 측정되므로 측정되는 힘의 최고치는 4095이다. 상대적으로 빠른 속도의 자유 운동에서는 약 2000 정도의 수치가 측정되었고, 느린 속도의 자유 운동에는 약 300~500 정도의 수치가 측정되었다. 측정된 수치가 정확히 어느 정도의 힘인지는 환산이 어렵지만 PZT의 감도가 매우 크므로 아주 미세한 힘으로 생각되며 실험에 참여한 사용자들 또한 그렇게 느낀다고 하였다.

현재 더 나은 실험을 위하여 보다 정밀한 새로운 기구부와 저항성 센서를 이용한 새로운 힘 감지 장치를 구현 중에 있으며, 앞으로 여러 가지 다양한 형태의 가상 물체를 인식하는 실험과 더불어 가상 물체에 질감 및 표면 마찰을 구현하는 것에 대한 연구를 병행할 예정이다. 또한 3차원 Haptic 인터페이스 장치의 구조에 대한 설계 및 구현에 대해서도 연구할 계획이다.