

실의장력을 이용한 역감장치

강원찬, 김영동*, 신석두**

조선대학교 제어계측공학과*, 조선이공대학 전기과**

Force-Display System using Wire-Tension

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

Dept. of C&I Eng. Chosun Univ., Division of Electrical and S & T Eng. Chosun College**

Abstract - In this paper, we have developed a new Force-Display system using wire-tension method. The proposed system is based on the HIR Lab Haptic Rendering library, which calculates the real position and renders the reflecting force data to device rapidly. The system is composed of device based tendon-driven method, controller and Haptic rendering library. The developed system will be used on constructing the dynamical virtual environment. To show the efficiency of our system, we designed simulation program which can display the moving force (attaching, grabbing, rotating) on two virtual point. As the result of the experiment, our proposed system shows much higher resolution and stability than any others.

1. 서 론

실세계에는 어떤곳에 존재하는 물체를 보고, 손으로 만지고 움직이게 하는 조작을 간단하게 행할 수 있다. 하지만 컴퓨터에 의해 그래픽화된 가상물체, 다시 말해 현실에 존재하지 않는 물체를 만져보고, 아주 먼 장소의 경치를 보거나 하는 것은 특히 어려운 일이다. 이 문제를 해결하는 방법이 최근 주목을 받고 있고 있으며, 가상현실(Virtual Reality)기술로 세상에 알려진 인공현실감 연구가 그것이다. 요즘 급진적으로 발달하는 컴퓨터의 하드웨어적인 그래픽처리능력 향상으로 가상세계를 구축하고 있지만, 이것도 실제 환경과 유사한 물체를 만들어야하고, 가상환경을 구성하는 가상객체들의 폴리곤수의 증가에 따라 계산량이 증가해 PC급에서의 개발은 제한적인 범위 내에서 연구중이다. 가상환경을 인식할 수 있는 이런 시각적 요소가 인간의 감각중 70%를 차지하는 만큼 현재 가장 활발하게 연구되어졌고, HMD(Head Mounted Display)의 이용과 3차원 그래픽 기술의 발달에 따라 사실과 거의 흡사하게 영상표현이 가능해졌다. 하지만 시각요소만으로 가상세계를 구현하는 것은 효율적이지 못하다. 다른 감각요소인 촉각을 가상세계에 추가하면 인간의 인지능력이 확대되어 보다 사실감있는 가상세계를 구축할 수 있다고 선행연구에서 밝혀졌다. 따라서 촉각분야는 시각분야보다는 연구가 부진하나 여러 형태의 디바이스가 개발되었다. 대표적인 예로 신체 부착형 디바이스는 텔레로보틱스에서 많이 사용되고, 비부착형인 토마스 메쉬가 만든 팬텀(PHANTOM), 이와타가 만든 햅틱마스터(Haptic Master) 형태의 디바이스들이 제작되었다^[1]. 그러나 모두 한 디바이스로 한 개의 작용점 밖에 구축할 수 없다. 따라서 어떤 물체를 잡거나, 병진 운동을 시키거나 도구를 조작하는 데는 두 개의 디바이스를 이용해야함으로써 공간활용과 비용증가 등의 한계가 있었다. 그러므로 이런 단점을 극복하고자 동경공업대학에서 제안된 형태^[2] 즉, SPIDAR 형의 촉각장치를 조선대학교 HIR Lab의 햅틱 렌더링 알고리즘에 적용 PC에서 안정된 장치제어와 그래픽처리를 수행하도록 시

스템을 구축하였다.

본 연구에서는 이 시스템의 안정성을 단일 PC에서 실현하기 위해 가상물체를 생성하고 여기에 여러 가지 재질정보를 부여하여 데스크탑형 가상현실 장치를 구성하였다. 특히 제안된 형태의 시스템은 기존 장치들에 비해 동시에 가상점 2개를 얻어 가상물체를 잡거나 움직이고 회전 및 병진 작업을 구현하는데 목적이 있다. 따라서 이를 구현하도록 이론적인 시스템 해석과 응용시스템을 구축하여 다양한 응용이 가능하도록 실험을 하였다.

2. 시스템 해석

2.1 모터의 배치와 위치해석

본 연구에서는 실제 좌표계에서 손가락 끝의 정보를 입력하고, 가상공간에서 출력되는 힘을 제시하는 장치로서 실의 장력을 이용한 역감제시 시스템을 제작하였다. 이 장치는 입방체형의 상자를 만들고 그 각 끝점에 모터, 풀리, 엔코더 세트를 배치하고 각 풀리에서 실을 뽑아내 4개의 끝점으로부터 나온 실을 그림 1곳에 연결한다. 실에는 일정한 장력이 모터에 의해 걸려있고, 힘 제시가 없을 때는 실의 처짐을 방지하기 위해 적은 힘으로 잡아당기는 형태를 취하고 있다. 작업자는 이 그림을 잡고, 3차원 공간 내에서 자유롭게 이동시킬 수 있다. 각 실의 길이를 엔코더에 의해 회전각으로 획득하고, 4개 각각의 실 길이의 변화량으로 사용자 손가락의 위치를 계산한다. 손가락의 위치정보를 이용해 발생할 힘의 양을 햅틱 렌더링 알고리즘을 통해 계산하고, 모터에서 각각의 실에 장력을 발생시켜 발생하는 힘을 사용자에게 제공하는 시스템이다^[3]. 이 시스템의 특징은 다른 형태의 디바이스와 비교해볼 때 실을 이용하여 3차원 공간의 위치를 획득하고, 발생할 힘을 실에 연결된 모터에 의해 조정함으로써 인간에게 가상물체의 재질감을 느끼도록 한다. 실 자체의 질량은 아주 작기 때문에 사용자는 손가락이 가상물체에 접촉하지 않는 상태에서도 기존 장치의 문제점인 관성력을 극복하여 거부감을 최소화하여 손가락을 자유롭게 움직일 수 있다. 또한 시각적으로도 장치가 사용자의 시선을 막지 않는 구조로 되어 있어 높은 몰입감을 배가시키고, 2개의 포인트로 회전 및 병진력을 실현할 수 있다.

사용자의 손가락 끝점의 위치는 그림에 연결된 실의 길이를 측정하는 것으로 계산할 수 있다. 실은 모터축에 결합된 풀리에 의해 끌어당겨지므로 항상 직선적인 변화량을 보인다. 풀리 축에는 회전량을 검출하는 로터리 엔코더가 부착되어있어 모터의 회전량과 풀리 직경의 관계식으로 실 길이 변화량을 구할 수 있다. 다시 말해 각각의 실 길이 초기치에서의 변화량을 카운트하여 손가락의 위치를 계산할 수 있다. 실의 길이를 측정할 때 이용하는 엔코더는 1회전당 500펄스를 출력하므로 이를 4채배해서 1회전당 2000펄스의 카운트 값으로 위치 분해능을 높인 정보가 얻어진다. 또 풀리의 직경이 16[mm]이기 때문에 위치 분해능은 식 (1)과 같다.

$$\frac{360}{2000} [\text{deg}] = \frac{16\pi}{2000} [\text{mm}] = 2.51 \times 10^{-2} [\text{mm}] \quad (1)$$

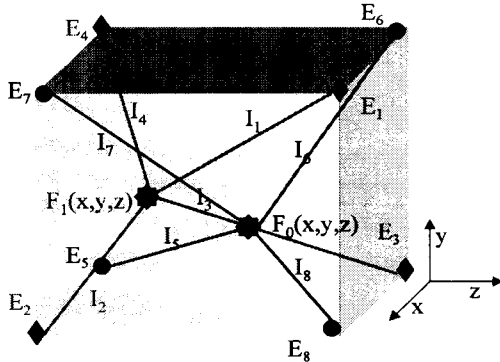


그림 1. 손의 위치를 검출할 때의 좌표
Fig.1 Coordinate when detect the finger's position

실 4개의 길이를 이용해 손의 위치 좌표 $F(x, y, z)$ 를 계산한다. 그림 1에서 4개의 지점 좌표를 $E_i(a_i, b_i, c_i)$, ($i=0\sim3$) 실의 길이를 $l_i(i=0\sim3)$ 라 한다면 $F_0(x, y, z)$ 의 좌표를 구하기 위한 연립 방정식은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} (x-a)^2 + (y-a)^2 + (z-a)^2 &= l_1^2 \\ (x+a)^2 + (y+a)^2 + (z-a)^2 &= l_2^2 \\ (x+a)^2 + (y-a)^2 + (z+a)^2 &= l_3^2 \\ (x-a)^2 + (y+a)^2 + (z+a)^2 &= l_4^2 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 가감법을 이용해 다음과 같이 한쪽 손의 좌표 x, y, z 에 대한 3개의 1차식 식(3)을 얻는다.

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{1}{8a} (-l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 - l_4^2) \\ y_0 &= \frac{-1}{8a} (l_1^2 - l_2^2 + l_3^2 - l_4^2) \\ z_0 &= \frac{-1}{8a} (l_1^2 + l_2^2 - l_3^2 - l_4^2) \end{aligned} \quad (3)$$

이와 같이 첫 번째 엔드 포인트 좌표를 구할 수 있으며, 두 번째 포인트를 구하기 위해 $F_1(x, y, z)$ 를 구하면

$$\begin{aligned} (x+a)^2 + (y+a)^2 + (z+a)^2 &= l_5^2 \\ (x+a)^2 + (y-a)^2 + (z-a)^2 &= l_6^2 \\ (x-a)^2 + (y-a)^2 + (z+a)^2 &= l_7^2 \\ (x-a)^2 + (y+a)^2 + (z-a)^2 &= l_8^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{8a} (l_5^2 + l_6^2 - l_7^2 - l_8^2) \\ y_1 &= \frac{1}{8a} (l_5^2 - l_6^2 - l_7^2 + l_8^2) \\ z_1 &= \frac{1}{8a} (l_5^2 - l_6^2 + l_7^2 - l_8^2) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4) (5)와 같이 두 번째 엔드 포인트 좌표를 구한다.

2.2 회전 및 병진에 대한 해석

자유도를 주기 위해 실의 끝에 그림을 부착하고 엔드 포인트의 위치와 자세를 실 8개의 길이로부터 계산할 때 다음과 같은 알고리즘을 이용한다. 실 길이의 측정은 아주 짧은 시간에 행해지고, 실 길이의 미소변화를 측정하면 그림의 위치와 자세의 미소변화를 구하는 것이 가능하다. 다시 말해 첫 번째 샘플링 시간 t 일 때 8개 실의 길이와, 미소 시간 후인 두 번째 샘플링 시간 $t + \Delta t$ 일 때의 8개 실 길이의 변화량으로 그림의 위치와 자세의

미소변화를 도출하게 된다. 이 방법은 미소변위(微小變位)전에 그림의 위치를 기준점으로 미소변위 회전행렬을 이용해 미소변위후의 위치로 이동시키는 방법이다. 그림은 실제 프레임의 8개 정점에 위치한 각각의 모터 풀리(pulley)에 연결된 실에 의해 고정되어 있고, 우리는 단지 실 길이의 변화량만을 얻어 위치를 측정할 수 있다. i 번째의 프레임의 정점에서 j 번째의 그림의 정점까지 실의 길이에 관계식에서

$$\begin{aligned} \|l_i\|^2 &= \|F_i - G_j\|^2 \\ &= \|F_i - R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)p_j - r\|^2 \\ &= \|F_i - p_j - r\|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

가 성립되고, 단, F_i 는 프레임의 실 번호, G_j 는 그림의 실번호, R 은 회전행렬, r 은 그림의 반지름, $i=1\sim8, j=a_i(i=1\sim8)$ 이고, a_1, a_2, \dots, a_8 은 1, 2, \dots , 8의 치환을 할 수 있게 된다. 그림의 위치와 자세가 변했을 때, 엔드 포인트인 그림의 위치가 변하고, 자세도 변화하므로 이를 식으로 표현하면 식(7)과 같이된다.

$$\|l_i + \Delta l_i\|^2 = \|F_i - R(\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z)p_j - (r - \Delta r)\|^2 \quad (7)$$

단, $\Delta r = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 이다.

$$R(\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z) = \begin{pmatrix} 1 & \Delta\theta_z & -\Delta\theta_y \\ -\Delta\theta_z & 1 & \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y & -\Delta\theta_x & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

단, $\Delta l_i = (\Delta l_{ix}, \Delta l_{iy}, \Delta l_{iz})^T$ 로 된다. 식 (7)의 좌변은

$$\begin{aligned} \|l_i + \Delta l_i\|^2 &= \|l_i\|^2 + 2l_i \cdot \Delta l_i + \|\Delta l_i\|^2 \\ &\approx \|l_i\|^2 + 2l_i \cdot \Delta l_i \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} R(\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z)p_j &= \begin{pmatrix} p_{jx} + \Delta\theta_z \cdot p_{jy} - \Delta\theta_y \cdot p_{jz} \\ -\Delta\theta_z \cdot p_{jx} + p_{jy} + \Delta\theta_x \cdot p_{jz} \\ \Delta\theta_y \cdot p_{jx} - \Delta\theta_x \cdot p_{jy} + p_{jz} \end{pmatrix} \\ &= p_j + p_j \times \Delta\theta \end{aligned} \quad (10)$$

단, $\Delta\theta = (\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z)^T$ 이고, 식 (7)의 우변은

$$\begin{aligned} \|F_i - R(\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z)p_j - (r - \Delta r)\|^2 &= \|F_i - (p_j + p_j \times \Delta\theta) - r + \Delta r\|^2 \\ &= \|F_i - p_j - r - p_j \times \Delta\theta + \Delta r\|^2 \\ &= \|l_i - p_j \times \Delta\theta + \Delta r\|^2 \\ &\approx \|l_i\|^2 + 2l_i \cdot \Delta r - 2l_i \cdot (p_j \times \Delta\theta) \\ &= \|l_i\|^2 + 2l_i \cdot \Delta r - 2(l_i \times p_j) \cdot \Delta\theta \end{aligned} \quad (11)$$

로 된다. 위에서

$$\|l_i\|^2 + 2l_i \cdot \Delta l_i = \|l_i\|^2 + 2l_i \cdot \Delta r - 2(l_i \times p_j) \cdot \Delta\theta \quad (12)$$

$$l_i \cdot \Delta r + (p_j \times l_i) \cdot \Delta\theta = l_i \cdot \Delta l_i \quad (13)$$

로 된다. 최소자승법에 의해 미소변위를 도출하면

$$\Delta x = (A^T A)^{-1} A^T \cdot \Delta l \quad (14)$$

단, $w_i = (l_i^T, (p_j \times l_i)^T)^T \in \mathbb{R}^6$, $A = (w_1, w_2, \dots, w_8)^T \in \mathbb{R}^{8 \times 6}$, $\Delta l = (L_1 \cdot \Delta l_1, L_2 \cdot \Delta l_2, \dots, L_8 \cdot \Delta l_8)^T \in \mathbb{R}^8$ 식 (14)로 그림의 위치와 자세의 미소변위를 구할 수 있다.

2.3 역감제시

그립에 대해 임의의 방향과 크기의 합력을 발생하는 방법과 4개 실에 장력을 분배하는 알고리즘은 다음과 같다.

- (1) 손끝의 위치를 F로 하고, F에서 각 실 방향의 단위 벡터를 a_i ($i=0\sim3$), 생성된 힘 벡터를 f 로 한다. (그림 2 참조)
- (2) F주변의 공간은 4개의 실중 위의 3개를 선택하고 F를 정점으로 하는 삼각뿔영역 4개로 나뉜다. f 와 각 a_i 와의 내적을 구하고, 부(負) 계수를 가진 단위벡터 방향을 제거하고, f 의 포함된 1개의 삼각뿔영역을 선택한다. (그림 2에서는 a_1, a_2, a_3 로 이루어진 삼각뿔 영역), f 는 이 삼각뿔을 이루는 3개 a_i 의 정계수의 1차 결합으로 표시한다.

$$f = k_1 a_1 + k_2 a_2 + k_3 a_3 \quad (15)$$

단, $(k_i > 0, i \in [0, 1, 2, 3], i=1\sim3)$

실수 k_i 를 구하려면 각 실에 할당된 거둬제공장력의 크기를 결정하면 된다. 단, 실의 장력만큼 발생하지 않을 때는 임의의 방향에 합력을 발생하는 역감정보 생성 가능영역은 4개의 지점으로 되는 4면체의 내부만이다. 그러므로 모터로 힘을 출력하기 위해서는 식 (15)을 이용해 출력하면 된다.

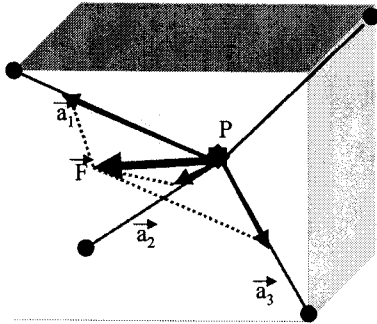


그림 2. 실 장력 합성에 의한 역감정보의 생성
Fig. 2. Force processing of composition in wire tension

모터의 토크와 전류의 크기는 비례관계가 있으므로 실험에서는 모터에 흐르는 전류를 제어하는 것으로 모터의 출력 다시 말해 실의 장력을 제어하는 것이 가능하다. 본 시스템은 OP애플을 이용한 정전류 회로를 사용하여 모터의 토크를 제어한다. 가상평면에서 제시할 힘(식 (15))이 결정되면 8개의 모터로 그 힘을 분배하여 사용자가 화면에서 보는 방향으로 힘을 느껴야 한다. 따라서 회전과 병진력까지 고려했을 때 그립에 대한 역감제시를 하는 역감 벡터(병진력, 회전력) $q (\in R^6)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$q = (f^T, m^T)^T \quad (16)$$

$e_i (i=1\sim8) (\in R^6)$ 을 각각의 실이 제시 가능한 단위 역감 벡터라 하고

$$e_i = (f_{ix}, f_{iy}, f_{iz}, m_{ix}, m_{iy}, m_{iz})^T = (u_i^T, (p_j \times u_i)^T)^T \quad (17)$$

로 된다. 여기서 행렬 B는 식 (18)과 같다.

$$q = B = (e_1, e_2, \dots, e_8) (\in R^{6 \times 8}) \quad (18)$$

모터에 출력할 토크는 식 (19)로 계산할 수 있다.

$$\tau = C^{-1} A (A^T A)^{-1} q \quad (19)$$

$$\text{단, } C^{-1} = \begin{pmatrix} \|l_1\| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \|l_2\| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|l_8\| \end{pmatrix}$$

3. 시스템구성 및 실험

3.1 시스템의 전체 구성

시스템의 모형은 그림 3과 같다. 본 시스템에서는 펜티엄 200MHz CPU를 탑재한 PC 1대를 이용하였다. 이 PC로 화상정보의 제시와 역감정보의 제시를 수행한다. 화상정보는 기존연구에서와 같이 PC로 3차원 컴퓨터 그래픽을 구축하고 컴퓨터 모니터에 표시한다^[4]. 위치측정과 역감정보의 제시는 자작한 디바이스를 이용한다. 위치정보는 디바이스에 부착된 모터에 로터리 엔코더의 출력값을 카운터 보드에서 카운트하여 그 값을 PC에 제공한다. 역감정보는 렌더링 알고리즘에 의해 계산된 출력값을 12비트 값으로 D/A 컨버터에 모내고 0~10[V] 내의 제어 값으로 변환한 후 정전류 회로를 이용하여 모터를 구동하는 방식을 취하고 있다.

이 경우 화상 및 역감 정보 갱신의 조합 상호처리를 이용하고 있어서 자연스러운 화상처리와 역감 제시에 필요한 갱신 주파수 1[kHz]를 만족하는 것이 불가능하다. 또한 분산처리를 이용하면 그 가격이나 크기 면에서 개인용으로 사용하는 시스템으로는 부적당하다. 본 연구에서는 그래픽 해상도를 조절하여 단일PC에서 그래픽과 텍스처 렌더링을 통합 처리하는 구조를 채용하였다.

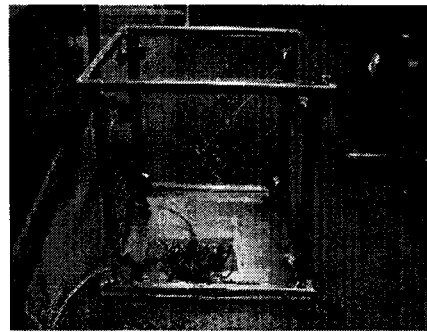


그림 3. 시스템의 모형
Fig. 3. Prototype of system.

3.2 하드웨어 구성

그림 4에 시스템의 하드웨어 구성을 보였다. 본 시스템은 펜티엄 200[MHz] CPU를 탑재한 PC 1대를 이용하였다. 카운터 보드는 ISA 방식의 CONTEC사의 CNT24-4(PC) 2개, D/A보드는 CONTEC사 DA12-8L(PC) 1개를 설치하였다.

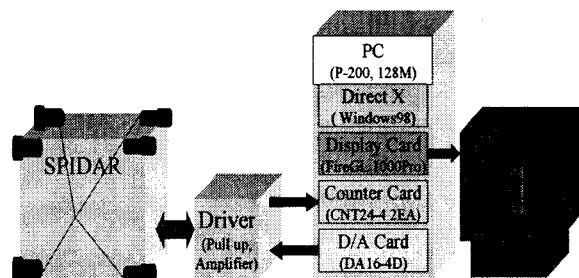


그림 4. 하드웨어 구성
Fig. 4. Composition of hardware

위치정보는 디바이스에 부착된 모터의 로터리 엔코더의 출력값을 카운터보드에서 카운트하고, PC에서 그 값을 읽어 들여 실의 길이 변화량을 측정한다. 8개의 로터리 엔코더의 출력값은 드라이버 회로에서 파형을 안정시켜 카운터보드에 전달하고, 또 로터리 엔코더와 모터를 구동하기 위한 전력이 공급된다. 모아진 출력 값은 모터번호 0~3, 모터번호 4~7의 2개로 분리되어 2장의 카운터 보드에 보내진다.

DA 보드는 12비트의 8채널의 입력 데이터를 전압출력으로 0~10[V]를 사용하였다. 출력은 변환을 시작했을 때부터 10[μs]에서 이미 정해진 값에 도달한다. 본 시스템에서는 출력 값을 전체의 채널로 출력후 동시에 드라이버가 전류를 제어하는 방법을 사용하였다. 모터는 MAXON사의 DC 모터 10[W]로 모터 지지대에 의해 프레임에 고정되어 있다. 모터에는 폴리가 연결되고 여기에 실이 감겨져 있다. 모터 지지대는 두랄미늄을 이용하였고 폴리에서 실이 외부로 이탈되지 않도록 하는 구조로 되어 있다. 폴리는 외경 16[mm]의 두랄미늄이다. 실은 시판하는 실 중에서 힘을 주었을 때 거의 늘어나지 않는 것을 선택했다. 또한 전체를 고정하는 프레임은 길이 50[cm]의 입방체형의 철재 프레임으로 구성하였다.

3.3 소프트웨어의 구성

소프트웨어 구축에 사용된 프로그램은 HIR 라이브러리를 사용하여 Direct X 기반의 3D 그래픽처리를 수행하는 그래픽 프로세스와 위치를 얻고 힘을 출력하는 역감처리 프로세스로 구성되어 있다^[4]. 이 두 개의 프로세스를 관리하는 관리 프로세스가 인터럽트 주기에 따라 각 프로세스를 호출하여 힘 처리를 수행하고 있다. 모든 알고리즘들이 라이브러리로 구축되어 있으므로 사용자는 단순히 프로그래밍 할 때 컨스트럭터 부분에 장치 선언만 하면 라이브러리에서 자동으로 장치를 인식하고 가상장치드라이버인 VxD를 호출하여 제어 할 수 있도록 구성하였다. 물론 그래픽 표현은 사용자 편의를 위해 처음 초기위치와 재질정보들만 정의하면 관리 프로세스가 프로그램 수행중에 기 정의된 가상환경 변수들에 의해서 최적의 환경을 구축하고, 사용자에게 의한 작업을 하도록 지원된다. 특히 기존에 비해 마찰력과 중력, 원심력, 질량 등을 정의할 수 있어 천천히 움직일 때와 빠르게 움직였을 때, 가상객체끼리의 충돌 등도 구현이 가능하다. 이는 라이브러리에 포함된 알고리즘에 의해 처리되는데 중요한 알고리즘을 살펴보면 힘 처리는 프락시 가상점을 통해 God-Object방법^[5]에 의해 힘을 처리하고, 그래픽 처리는 역적 알고리즘^[6]이 적용되었고, 최신의 충돌 검출 기법인 PQP방법^[7]이 추가되어 사용자가 충돌 검출 기법을 선택할 수 있도록 구축되어있다^[7].

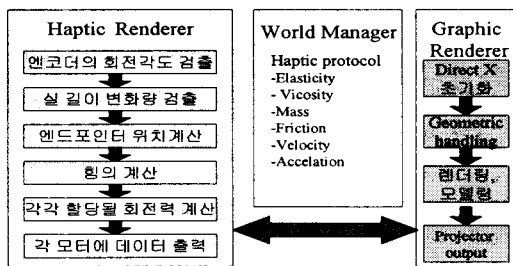


그림 5. 소프트웨어의 구성
Fig. 5. Composition of Software

그림 5에 소프트웨어의 구성을 보았다. 햅틱 렌더러는 엔드 포인트의 계산과 힘 출력을 담당하고, 그래픽 렌더러는 가상세계에 위치를 획득하여 그래픽으로 표시하는 기능을 지녔다. 월드매니저에서 두 렌더러를 관리하는데 역감처리와 그래픽 처리의 인터럽트 주기를 앞서의 연구에서처럼 1[kHz]의 역감처리와, 30[Hz]의 그래픽 처리

를 하도록 실현했다^[8]. 따라서 본 시스템은 이 인터럽트 주기의 조건에서 2,000개의 폴리곤으로 구성된 모델까지 처리할 수 있었다.

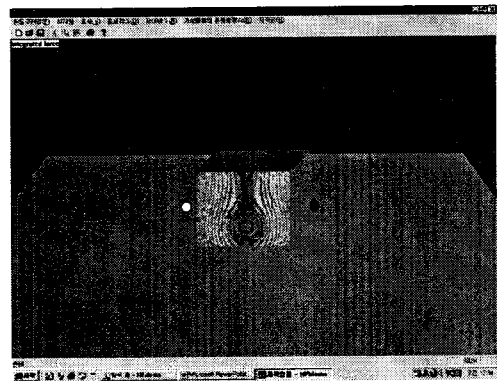


그림 6. 시뮬레이션 프로그램
Fig. 6. Program of simulation.

그림 6에 시스템을 구축하고 실험하는 프로그램을 보인다. 시뮬레이션 프로그램에서는 일반적인 역감장치 인터페이스 할 수도 있지만 장력을 이용한 역감 장치 시스템의 특징인 회전 및 병진운동 실험을 수행할 수 있도록 하였다. 화면에 보이는 작은 점은 디바이스의 끝점 즉, 사용자의 엄지와 검지손가락의 끝점을 의미한다. 두 손가락을 이용하여 물체를 잡고 움직이고, 회전시키고, 던지고 잡아당기는 등의 실험을 할 수 있으며 정확한 힘 처리를 할 수 있음을 알 수 있다.

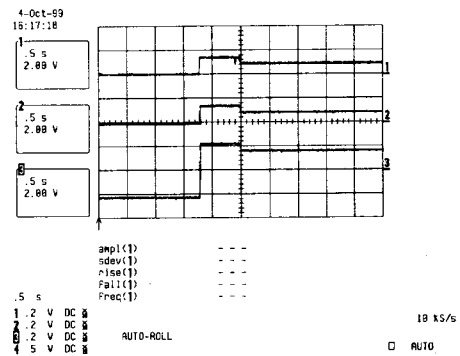


그림 7. 모터출력
Fig. 7. Output of motor

그림 7에는 완전 구속 가능한 가상물체를 설정하고, 출력을 잡은 결과이다. 각 파형에서처럼 완전구속 가능한 가상력이 제시되고 있음을 알 수 있다. 출력되는 최대 힘을 10[N]으로 프로그램내에서 제한하고 엔드이펙터 한쪽에 토크 측정장치인 Nano43(6-Axis Force/Torque Sensor)을 부착하여 측정된 데이터를 처리한 결과물 그림 8과 9에 보인다. 그림 8에서는 이상적일 벽일 경우는 계단형 파형이 생성되야하나 실험결과 전압의 출력 파형은 양호한 형태의 출력 특성을 보인다. 여기서 정상응답을 나타내는데 지연되는 2[msec]의 오차는 역적 알고리즘에서 급작스런 출력을 강제로 출력 파형을 조절하기 때문에 지연이 발생하나 인간의 감각은 이를 알아차리지 못한다. 따라서 사용자는 완전 구속 가능하지는 않지만 탄성이 큰 벽을 인식할 수 있다. 그림 9에서는 점성력 실험으로 이상적인 곡선 보다 늦게 반응하여 빨리 포화에 이르는 형태의 출력을 볼 수 있다. 이는 출력되는 최대 힘이 제한되므로 빨리 포화가 나타나기

때문이다. 그러나 이는 제시한 물체의 재질정보에 따라 이 포화량과 포화속도도 조절 가능하다.

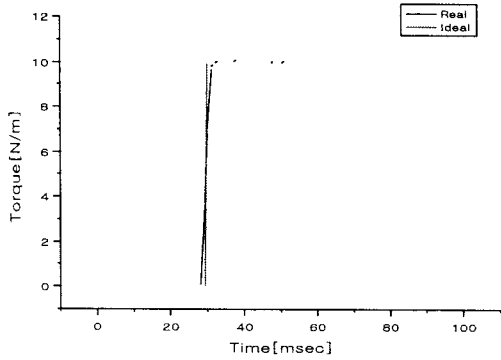


그림 8. 가상벽 검출 결과
Fig. 8 Result of virtual wall

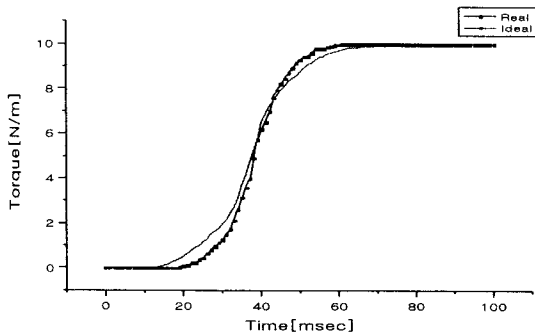


그림 9 점성이 큰 물체 검출결과
Fig. 9 Result of high viscosity object

인간에게 점성과 탄성 두개의 파라미터를 가변 시켜 가상물체를 만든다는 것은 어느 정도 한계가 있다. 보다 자연스런 감각을 제시하기 위해서는 마찰력이 추가되어야 하고, 마찰력 제어를 위해서 개발된 HIR Lab.의 햅틱 렌더링 알고리즘을 이용 가상 프락시점을 이용해 마찰력을 계산하는 방법으로 보다 자연스런 감각을 생성해 낼 수 있다. 그러나 이 가상물체의 표현을 위해서 몇 개의 파라미터 설정해서 조절해야 할지 연구가 수행되지 않았고, 제시한 힘 표현이 인간이 완전한 물체처럼 느낄 수 있도록 하는 데는 한계가 있다. 따라서 본 실험에서는 가상물체에 재질정보 점성, 탄성, 무게, 마찰력 등의 파라미터와 환경변수인 속도, 가속도, 중력, 회전력, 코리올리 힘 등의 파라미터를 사용하여 재질감 모델링을 수행하였다. 수행결과 힘 센서를 이용하여 측정된 결과는 파라미터 조절량에 따른 변화가 크게 나타나지 않았기 때문에, 사람이 직접 재질감을 느껴보고 제시된 물체에 대한 인지여부를 조사하는 방법으로 결과를 도출하였다.

실험 방법은 그림 6의 프로그램을 이용하여 화면 중앙에 보이는 가상객체에 선정된 파라미터들을 이용 가상물체에 재질정보를 부여하고, 피험자 100명에게 제시한 후 가상객체를 만진 다음 그 인지결과를 표 1에 보인다. 표 1에서 탄성력을 변화시켜 튕겨내는 스프링 느낌을 검출하는 실험에서는 가상물체의 인지도가 95% 정도를 보였으나, 공의 느낌을 내는 점성력 실험에서는 89%로 점성은 탄성력보다 적게 인지하는 결과를 보였다. 그러나 무게감 실험 즉, 가상물체에 무게를 주고 들어보게 하는 실험에서는 대다수의 사람이 무게를 느끼는 결과를 보였다. 그러므로 90% 이상이 간단한 가상객체의 는

낌을 전달받고 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

표 1. 실험결과

Table 1. Results of experiment

	검출	인지	약간인지	미인지
실험				
탄성력실험	85%	10%	10%	
점성력실험	74%	15%	11%	
무게감 실험	93%	7%	0%	

4. 결 론

일반적인 역감장치나 촉각장치에 있어서는 1개의 엔드포인트를 얻어 단순히 밀거나 만지는 등의 작업만을 수행할 수 있었다. 보다 진보된 장치의 경우는 도구를 부착하여 자르는 작업등을 구현하기는 하나 물건을 집어서 옮기거나 자유로운 회전 및 병진운동 등을 구현하기는 힘들다^[9]. 따라서 본 연구에서 개발된 실의 장력을 이용한 역감장치는 위에서 제시된 문제점을 해결하여 자유로운 회전 및 병진작업을 수행할 수 있어 가상도구의 조작성은 높이고 운동 범위도 매우 넓어 기존 장치들이 좁은 운동범위에서의 응용이 가능한 수술 시뮬레이터 등에 이용되는데 반하여 본 시스템은 모터의 부착 위치의 조절만으로 자유롭게 운동 범위도 확장시킬 수 있어 운동 시뮬레이터나 재활기구 등에 쉽게 응용할 수 있다.

앞으로의 연구에서는 PC급의 실시간 처리에서 계산속도의 한계로 인해 처리 가능한 가상객체의 폴리곤수가 2,000개 이내에서만 가능하던 한계를 탈피하여 1[kHz]의 인터럽트 주기에 수만개의 폴리곤으로 구성된 가상환경을 처리하도록 구축해야 한다. 이 개선을 위해서 고속제어기에 의한 입출력 속도의 개선과 빠른 충돌 검출 및 힘 처리 알고리즘이 최적화 되어야 하며, 고성능의 PC에서 프로세스의 분산처리 기법이 보완되어야 한다. 따라서 보다 자연스러운 가상 환경을 구축하고 인간에게 거부감을 주지 않는 완벽한 가상세계와의 인터페이스를 제공할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Thomas Massie and J. Kenneth Salisbury, "The PHANToM haptic interface A device for probing Interfaces for Virtual Environment and Tele operator Systems," Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, IL, 1994, November.
- [2] S. Kim, W. Somsak, M. Ishii, M. Sato, "Personal VR system for rehabilitation to hand movement." IACT 98, pp. 102-108, Tokyo, 1998.
- [3] 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.
- [4] 강원찬, 김동욱, 신석두, 김영동, "3자유도 힘반향 역감장치" 전력전자학회 논문지 Vol.4 No. 5, pp. 455-461, 1999.
- [5] Zilles C., Salisbury J. K., "A constraint based god-object method for haptic display," Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and System, 1995.
- [6] S. Hasegawa, M. Ishii, M. Sato, Y. Koike, "Haptic Interface protocol for complex dynamic virtual world", ICAT98, pp. 83-89, 1998.
- [7] Craig Zille, "Haptic Rendering with the Toolhandle Haptic Interface," Master's thesis. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Eng., 1995, May
- [8] Diego C. Ruspini, Krasimir K., Oussama K., "Haptic Interaction in Virtual Environments", Proc. of the IROS97, pp. 128-133, 1997.
- [9] Thomas H. Massie, "Virtual Touch Through Point Interaction," The 6th Int. Conf. on Artificial Reality and Tele-Existence. JAPAN, pp. 19-38, 1996, November.