

3차원 햅틱 인터페이스 장치 설계/제작 및 가상 순발력 재활훈련 장치 구현*

Design and fabrication of a 3D haptic interface device and realization of a virtual plyometric rehabilitation training system

백종원, Jongwon Back, 용호중, Hojoong Yong, 최대성, Dae-Seong Choi, 유동진, Dongjin Yu, 이현숙, Hyunsuk Lee, 장태정, Tae-Jeong Jang
강원대학교 대학원 전자통신공학과 휴먼인터페이스연구실

요약 가상현실은 컴퓨터를 이용하여 만들어진 가상의 환경에서 사용자가 오감을 통해 현실과 유사한 느낌을 경험할 수 있도록 해주는 기술이다. 햅틱 인터페이스는 사용자가 촉각으로 가상 환경과 상호 작용을 할 수 있도록 해주는 기술로서 사용자가 가상 물체를 실제로 만지는 듯한 착각을 불러 일으켜 보다 현실에 가까운 가상 경험을 할 수 있도록 도와준다. 본 논문에서는 다양한 용도로 사용할 수 있는 3차원 햅틱 인터페이스 장치를 설계 및 제작하고, 순발력 재활훈련의 목적으로 가상공간을 시각적으로 보여주는 입체영상 시스템과 연동하여 일부 제한적인 기능을 갖는 가상 테니스 연습 시스템을 구현하였다. 이때 가상 공과 가상 라켓의 간단한 충돌 모델과 햅틱 렌더링을 통하여 가상 공을 칠 때 사용자가 라켓으로 느끼는 충격과 반력을 제작한 3차원 햅틱 인터페이스 장치를 통하여 느낄 수 있도록 하였다. 구현된 시스템의 실험을 통하여 공과 라켓에서 충돌이 일어났을 때의 느낌을 사용자에게 전달할 수 있었으며, 완벽하지는 않지만 공과 라켓의 충돌 후 공의 나가는 방향과 속도가 실제와 유사함을 확인하였다.

핵심어: 햅틱, 가상현실, 입체영상, 재활훈련 장치

1. 서론

햅틱 인터페이스 장치는 컴퓨터로 만들어진 가상 환경에서 공간 상의 촉각 정보를 상호 전달하여 사용자에게 현실감을 줄 수 있는 장치이다. 촉각 정보는 운동감각 정보와 촉각 정보로 나눌 수 있다. 촉각 정보의 경우 피부를 통하여 표현되고 운동 감각 정보는 팔 또는 손의 움직임에 따라 힘 또는 무게감으로 표현된다. 운동감각 정보를 이용하면 사용자에게 힘 또는 움직임을 주어 운동 효과를 얻을 수 있다. 여기에 시각적 효과를 더하면 현실에서와 비슷한 운동도 표현이 가능하다 [1].

본 논문에서는 입체 영상으로 가상공간을 만들고 테니스 운동을 할 수 있는 3차원 햅틱 인터페이스 장치를 구현하였다. 햅틱 인터페이스 장치를 이용하면 운동에 필요한 촉각 정보(운동감각정보)를 팔과 손의 움직임에 따라 느낄 수 있다. 햅틱 인터페이스 장치 설계에 가장 중요한 것은 가상 공간과 장치 사이에 힘 전달이 사용자에게 현실감을 느끼게 하는 것이다. 따라서 3차원 햅틱 인터페이스 장치에 부하가 없을 때 사용자는 움직임에 대한 저항을 거의 느끼지 못하도록 설계 되어야 한다. 2차원 햅틱 인터페이스 장치[2]의 경우 수평의 힘만을 고려하므로 중력 영향은 무시되지만 3차원의

경우 중력을 고려해야 한다. 설계한 장치는 이전 연구에 사용한 2차원 햅틱 인터페이스 장치를 기반으로 설계하였다. 시스템은 가상의 코트에서 날라오는 공을 햅틱 장치에 부착된 라켓으로 치는 것으로 테니스 운동이 가능하도록 하였다.

2장에서는 설계 제작된 3차원 햅틱 인터페이스 장치를 설명하고, 3장에서는 장치 구동을 위한 구조해석 및 힘 표현에 대하여 기술하였다. 4장에서는 햅틱 인터페이스 장치를 사용하기 위한 가상 테니스 시스템에 대하여 설명하고 마지막으로 결론에서는 구현된 전체 시스템에 대하여 이야기 한다.

2. 3차원 햅틱 장치 설계 및 제작

2차원 햅틱 인터페이스 장치와 마찬가지로 각 축에 해당하는 부분은 원판과 모터로 스틸 와이어를 이용하여 힘을 전달한다. 그림 1과 그림 2는 각각 설계된 햅틱 장치와 실제 제작된 장치의 모습이다. 세 개의 모터는 와이어 드럼을 사용하여 각 축에 해당하는 원판과 스틸 와이어로 연결 된다. 먼저 수평 힘 전달을 위한 중심 원판은 지름이 300mm, 높이 35mm의 원판이다. 원판과 모터축의 와이어 드럼은 15:1의 비율을 갖는다. 중심 원판에는 축 역할을 하는 파이프를 체결하고 부드러운 움직임을 위하여 스러스트 베어링을 삽입하여 수직방향의 저항을 최소화 하였다. 팔 부분을 위한 원판은 지름 200mm, 높이 30mm로 되어 있고 모터 축의 와이어 드럼과의 비율은 14.28:1을 갖는다. 와이어는 원판 주위

* 본 연구는 산학협력중심대학육성사업 기술개발과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

에 감겨짐과 동시에 모터의 와이어 드럼에 감기게 된다. 이때 힘이 정밀하게 전달되어야 하므로 느슨하거나 너무 팽팽한 결합이 되어서는 안 된다.

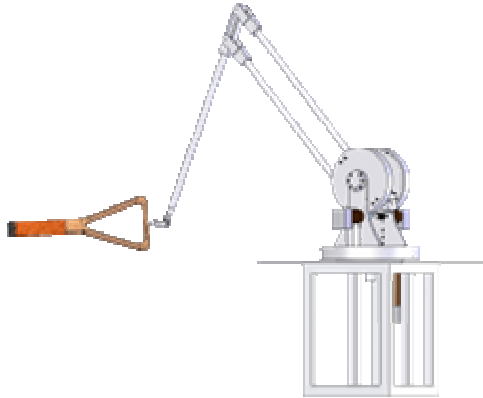


그림 1. 설계된 3차원 햅틱 장치 기구부

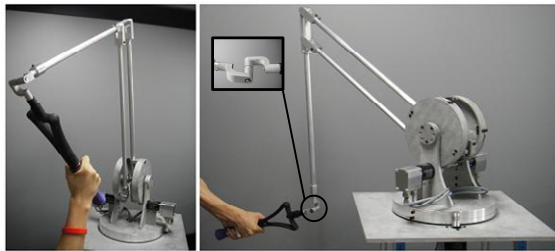


그림 2. 제작된 3차원 햅틱 장치 기구부

팔의 구조를 살펴보면 팔의 총 길이는 각 축과 축을 기준으로 700mm이고 팔은 지름 20mm의 알루미늄 파이프를 사용하였다. 각 연결 부위는 무게를 고려하여 지름 10mm의 마이크로 베어링을 사용하여 부드러운 움직임이 가능하게 하였다. 장치의 마지막 링크는 자유로운 움직임을 위하여 유니버설 조인트 방식으로 라켓의 손잡이 부분과 연결된다. 유니버설 조인트 부분은 별도의 엔코더를 장착하여 방향을 센싱하는 것이 바람직하나 이번 설계에는 반영하지 않았고 이점을 보완하기 위하여 6 자유도의 마그네틱 센서를 이용하였다.

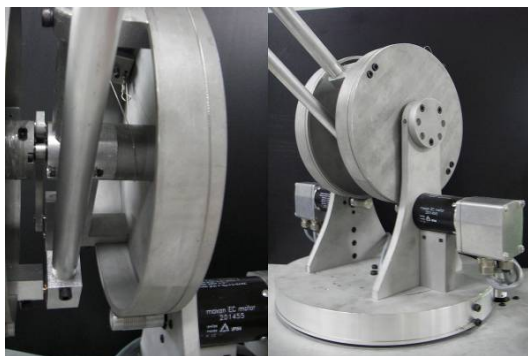


그림 3. 조립 후의 팔 원판과 중심 원판

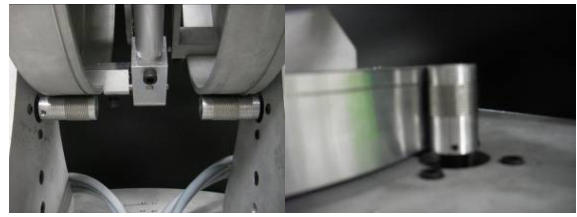


그림 4. 와이어 드럼과 원판 연결



그림 5. 팔 연결 부분

장치의 힘 표현을 위해 Maxon 사의 Brushless모터와 범용 컨트롤러(EPOS-24/5)를 사용하였다.

표 1 모터 성능표

모터종류	EC 45	EC 60
Assigned power rating	150W	400W
Normal voltage	24V	48V
No load speed	10500rpm	3100rpm
Stall torque	1670mNm	6300mNm
Max continuous current at 5000rpm	8.8A	9.3A
Rotor inertia	119gcm ²	831gcm ²
Torque constant	21.6mNm/A	147mNm/A

3. 시스템 구조

3.1 3차원 햅틱 장치 구조 해석

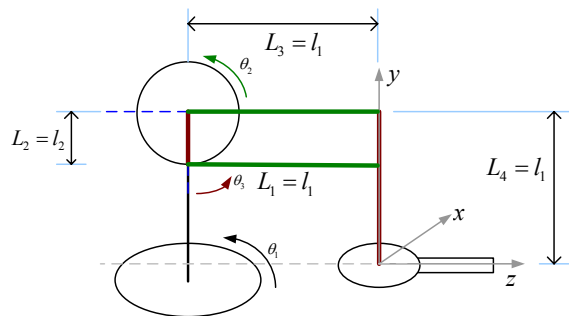


그림 6. 라켓의 원점 좌표 설정을 위한 모델링

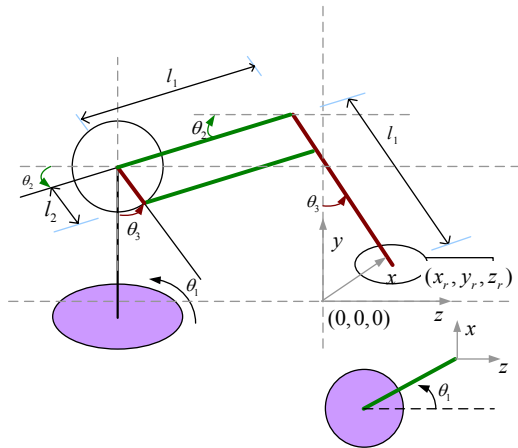


그림 7. 라켓의 좌표를 해석하기 위한 모델링

구현된 장치의 구조는 그림 6과 같다. 수평 회전을 하는 중심 원판 위에 반지름이 l_2 인 두 개의 원판이 수직 방향 회전을 위해 올라간다. 길이가 l_1 인 세 개의 링크와 l_2 인 한 개의 링크가 서로 평행하게 놓여진다. 그림 6과 같은 상태를 원점으로 정하고 그림 7과 같이 라켓을 움직였을 때 라켓의 좌표를 얻기 위한 모델링을 하였다. 라켓의 좌표는 원점 좌표와 회전원판의 중심거리를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_3) \sin \theta_1 \\ l_1 (1 + \sin \theta_2 - \cos \theta_3) \\ (l_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_3) \cos \theta_1 - l_1 \end{bmatrix}$$

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 모터에 부착된 인코더의 펄스 카운트를 이용하여 구한다. 회전원판을 90° 돌려서 얻은 인코더 값 증가량을 $\pi/2$ 로 나누어 펄스 카운트 하나에 해당하는 라디안 단위의 각을 알 수 있다.

3.2 가상공과 라켓의 충돌

3차원 운동을 표현하기 위한 공과 라켓의 충돌, 공과 벽의 충돌 등은 이전 연구를 바탕으로 구성하였다. 3차원에서 공의 각속도는 좌표축을 중심으로 표현된다. 이 값을 기준으로 2차원 평면에서 해석하여 나온 움직임을 합하여 최종적인 공의 움직임이 표현된다. 그림 8의 모델링에서 공은 계수가 K 인 탄성체로, 라켓은 질량을 무시한 강체로 가정하고, 공과 라켓의 충돌 계수는 B로 가정하였다. 또한 공과 라켓의 마찰은 반발력의 크기와 마찰계수에 의해 결정된다. 라켓은 사용자의 움직임은 자유로우나 충돌 시 평면에 대한 각도는 일정한 상태로 가정하였고, 공기의 저항은 고려되지 않았다. 그림 8과 같이 공과 충돌하는 라켓은 때에 따라 벽 또는 바닥이 될 수도 있다. 이 때 공과 충돌하는 각 물체의 특성에 맞는 마찰 계수와 충돌 계수에 의해 공의 운동이 표현된다.

3차원 공간에서 공의 움직임을 표현하기 위해 각 축을 중심으로 회전하는 각속도를 가지고 공의 운동을 세 평면으로 각각 모델링 했을 때, 사용할 수 있는 식은 다음과 같다.

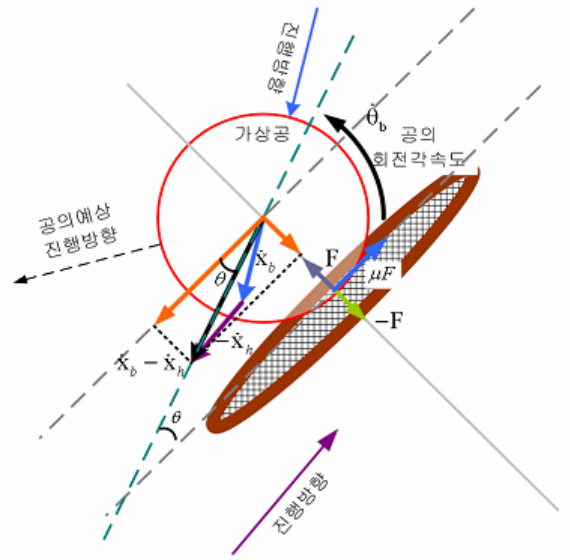


그림 8. 한 평면에서의 가상공과 라켓의 충돌 순간 모델링

$$\begin{aligned} I \ddot{\theta}_b(t) + B_r \dot{\theta}_b(t) &= \tau(t) \\ &= \frac{\left(\begin{bmatrix} x_b(t) - x_h(t) \end{bmatrix} \cos \theta - R \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{bx}(t) \end{bmatrix} \right)}{\left| \begin{bmatrix} x_b(t) - x_h(t) \end{bmatrix} \cos \theta - R \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{bx}(t) \end{bmatrix} \right|} \mu_{bh} R |F| + Mg(-V_y) \\ M \ddot{x}_b(t) + B_b \dot{x}_b(t) &= f(t) \\ &= \left(\frac{\left(\begin{bmatrix} x_b(t) - x_h(t) \end{bmatrix} \cos \theta - R \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{bx}(t) \end{bmatrix} \right)}{\left| \begin{bmatrix} x_b(t) - x_h(t) \end{bmatrix} \cos \theta - R \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{bx}(t) \end{bmatrix} \right|} Vt - V_n \right) \mu_{bh} |F| + Mg(-V_y) \end{aligned}$$

여기서, θ_b 가 어느 축을 중심으로 회전하는지에 따라 모델링 평면이 바뀌게 된다. 2D Rendering과의 차이는 마찰력의 크기가 항상 충돌에 의한 반발력에 비례하는 것이 아니라는 점이다. 지면과의 충돌일 경우에는 공의 무게에 대한 수직항력 $N = Mg$ 가 작용하게 되며, y축에 대한 운동을 해석할 때 지구가 끌어당기는 힘이 존재하므로 y축에 대해서는 항상 Mg 만큼의 힘이 작용하게 된다. V_y 는 y 축 성분만 존재하는 단위벡터를 나타낸다. 만약 각속도가 y축을 중심으로 한 회전이라면 y축에 대한 공의 좌표는 고려되지 않으므로 중력가속도에 의한 힘 역시 공의 좌표에 영향을 주지 못한다.

3.3 라켓이 받는 힘의 표현

충돌 검사 후, 공과 라켓의 충돌에서 발생한 반발력은 모터를 구동하여 세 원판을 회전시키는 회전력으로 표현할 수 있고, 이는 사용자에게 반발력을 느낄 수 있는 정보가 된다.

그림 9는 충돌이 일어났을 때 사용자가 힘을 느끼는 방향과 크기를 표현한 것이다. 앞에서 정리한 대로 라켓을 통해 가상 공에 인가되는 힘의 크기를 $K\Delta d$ 라고 표현하면 라켓에서 사용자에게 거꾸로 인가되어야 하는 반발력의 크기는 $-K\Delta d$ 라고 생각할 수 있다. 공과 라켓의 충돌이 일어나면 공은 충격력에 의해 속도가(속도 개념에

방향도 들어가므로) 바뀌어 운동을 하게 되고 라켓에는 그와 같은 힘이 전해져야 한다. 그러므로 충돌 계산 알고리즘을 통해 알고 있는 외력의 방향과 크기를 모터의 출력으로 사용자에게 전달하면 사용자는 그 순간 충돌에 의해 발생한 힘을 느낄 수 있을 것이다.

원판의 반시계 방향 회전을 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 의 증가방향으로 가정하고, 아래 회전 원판의 현재 위치벡터, 그리고 L_1 과 L_4 에 수직이고 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 가 증가하는 방향으로의 단위 벡터를 각각 V_1, V_2, V_3 로 가정하여 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$V_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ 0 \\ -\sin \theta_1 \end{bmatrix}, V_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 \\ \cos \theta_1 \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$V_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 \\ \cos \theta_1 \cos \theta_3 \end{bmatrix}$$

이렇게 표현된 단위 벡터를 이용하여 모터에서 발생시켜 사용자에게 인가해 주어야 하는 힘 F 를 단위 벡터 V_1, V_2, V_3 의 선형 결합으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

상수 a, b, c 를 구하기 위해서 위의 식을 변환하면, 상수 a, b, c 는 점 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$ 그리고 $F = [f_x, f_y, f_z]^T$ 로 표현 되므로 이로부터 각각의 모터에 인가해야 하는 힘 $V'_1 = aV_1$ 과 $V'_2 = aV_2, V'_3 = aV_3$ 를 계산할 수 있다.

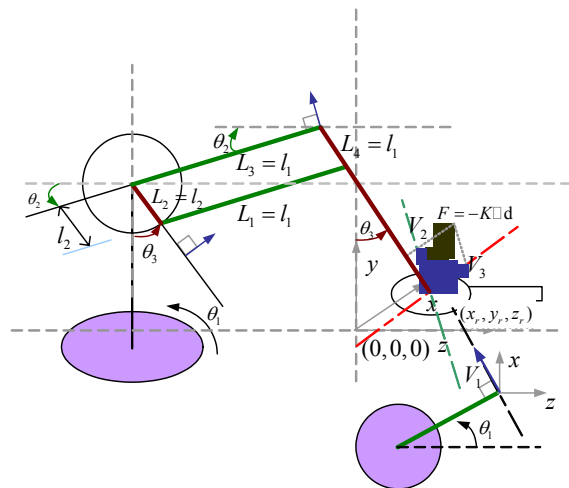


그림 9. 충돌시 사용자의 힘 표현

4. 3차원 햅틱 장치를 이용한 가상 테니스 시스템 구현

제작된 3차원 햅틱 장치를 이용하여 순발력 재활 훈련에 사용할 목적으로 가상 테니스 연습 시스템을 구현하였다. 햅틱 장치와 함께 사용될 입체 영상 장치는 순발력 운동을 목적으로 하므로 한 사람 정도 서서 가벼운 스윙 동작을 할 수 있을 정도의 공간이 필요하다. 또한 장비의 가격이 저렴해야 한다. 이 점을 고려

하여 본 연구에서 사용한 입체 영상 시스템은 두 대의 보급형 프로젝터에 편광 필터를 사용하여 입체 영상 장치를 구성하였다. 스크린은 240cm x 180cm 크기의 편광 스크린을 사용하였다.

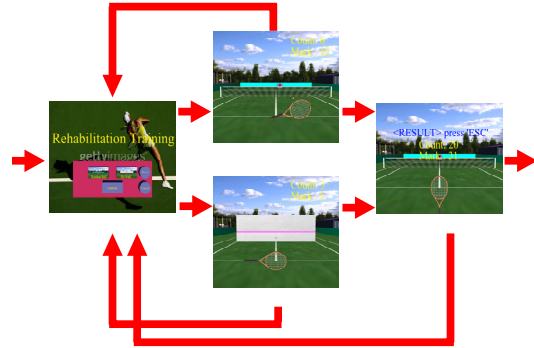


그림 10 훈련 시스템 구성

훈련 시나리오의 소재는 테니스를 이용한 운동이다. 실제 테니스 경기는 넓은 테니스장을 사용자가 공을 치기 위해 뛰어다녀야 하기 때문에 부상의 위험이 있다. 또한, 공의 속도 역시 사용자들에게는 몸의 반응 속도에 비해 굉장히 빠르게 느껴지기 때문에 실제로 테니스 라켓으로 공을 맞추는 것조차 쉬운 일이 아니다. 하지만 가상 환경과 3D 햅틱 장치를 이용하면 많은 운동량을 필요로 하지 않으면서 테니스를 즐기면서 재활 훈련을 하는 시스템을 구현할 수 있다. 또한 공의 무게나 속도를 임의로 조절하여 사용자에게 적절한 운동이 되도록 환경을 설정할 수 있다. 시스템의 전체적인 훈련 구성은 그림 10과 같다. 사용자는 첫 화면에서 두 가지의 훈련 모드 중 하나를 선택하게 되며, 사용자가 훈련을 하는 도중 언제든지 초기 메뉴로 돌아갈 수 있게 하였다. 하나는 테니스 네트 뒤에서 기계가 좌우로 움직이면서 임의의 위치에서 사용자에게 공을 던져주는 형식이다. 그러면 사용자는 바닥을 맞고 한 번 튕겨 나온 공을 반대편으로 넘기면 된다. 시작 버튼을 누른 후 3초 후에 게임이 시작되도록 하여 훈련 전에 사용자가 준비를 취할 수 있게 하였다. 그림 11는 랜덤 공 선택 시 진행 중인 훈련 화면을 보여주고 있다.

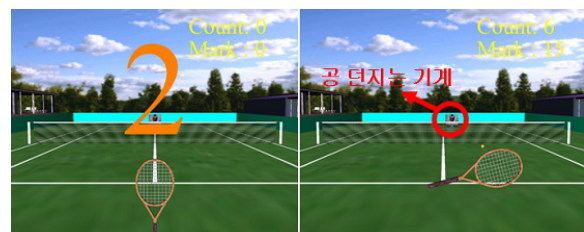


그림 11 랜덤 공 게임 화면

앞서 기술하였던 3D 입체 영상 시스템과 제작한 2D, 3D 햅틱 인터페이스 장치를 연동하여 시범적으로 가상 에어하키 시스템을 구현하고, 이를 바탕으로 재활

훈련을 위한 가상 테니스 시스템을 구현하였다. 사용자는 편광필터를 장착한 입체 안경을 쓰고 두 대의 빔 프로젝터에서 비추는 영상을 보면 실제 환경과 유사한 시스템의 배경이 입체 영상으로 화면에 나타나고 가상 공과 핸들, 또는 라켓을 볼 수 있다. 사용자가 햅틱 인터페이스 장치의 라켓을 움직이면 가상공간 상의 라켓도 사용자의 움직임에 일치되어 움직인다.

사용자가 라켓으로 가상 공을 쳐서 라켓과 가상 공이 충돌하면 앞서 서술한 힘의 표현식에 의해 계산된 힘을 기구부를 통해 사용자에게 전달한다. 가상의 공이 가상의 라켓과 충돌할 때의 힘은 다소 작게 느껴졌는데, 이는 가상 공의 무게를 바꿈으로써 얼마든지 조절이 가능하다. 공이 핸들과 충돌할 때 사용자가 느끼는 충돌 반발력의 방향과 그 때 사용자가 의도하는 또는 예상하는 방향으로 공이 튕겨 나가도록 하는 가상의 공이 충돌 후 나아가야 할 방향의 표현은 실제와 비슷하게 잘 구현된 것으로 느껴졌다.

테니스 시스템의 경우, 수식의 정확성을 입증하기 위해서 맨 처음 마찰 및 충돌 계수, 회전 등을 무시한 상태에서 시스템을 구현하고, 여기에 마찰계수와 충돌 계수를 고려했을 때의 시스템으로 확장 구현하였다. 이 과정에서 중력가속도 g 를 실제와 같이 $9.8m/s^2$ 으로 두고 공의 궤도를 계산하면, 굉장히 빠른 속도로 공이 운동을 하므로, 재활 시스템에 적합하지 않다고 판단하여 중력 가속도의 크기를 $2.5m/s^2$ 로 줄이고 초기속도 역시 작게 주어 공의 전체적인 운동을 느리게 하였다. 아직 회전을 고려한 운동 상태를 시스템에 적용하지 않은 상태에서 테스트를 하였으며, 각 계수는 임의로 조절하며 전체적인 공의 운동의 균형을 맞추었다. 수식에서의 모든 단위는 사용자가 고치기 쉽게 m/s , m/s^2 등으로 기본 단위로 적용하였으나, 실제 연산에서는 샘플링 단위 시간을 기준으로 하는 단위로 고쳐서 사용하였다.

가상 테니스 시스템을 실제로 시연해 본 결과 공의 무게 및 탄성계수, 중력 가속도 등을 임의로 설정함으로써 공을 칠 때의 무게감이나 공의 속도 등을 실제 공과는 달리 치기에 적당하게 임의로 설정할 수 있다는 장점이 있었다. 또한 실제와 달리 공을 줍기 위해 뛰어다니지 않아도 되고 이로 인한 시간 지연이 없어 반복적인 훈련이 가능하였다.

하지만 실제 테니스를 치는 것과 동일한 느낌을 가지는 것을 방해하는 몇몇 요소들이 있었다. 먼저, 스크린으로 가상 공간이 구현되기 때문에 그 범위가 스크린에 의한 가시부피를 벗어날 수 없고, 또한 라켓이 기구부에 달려있기 때문에 이동 범위가 제약된다. 그리고 공이 라켓에 맞는 순간 라켓의 중심이 뒤로 향하는 반발력을 받기 때문에 라켓 망의 어느 특정 부분에 맞았다는 느낌은 제공해 줄 수는 없었다. 이를 구현하기 위해서는 6 자유도의 햅틱 장치를 만들어야 하는데, 이렇게 되면 장치의 크기나 무게도 훨씬 늘어나고 복잡해지기 때문에 장치의 가격도 비싸지게 된다. 따라서 현재 제작한 정도의 시스템이 완벽하지는 않지만 재활 운동 장치로는 충분하고 보다 실용적인 시스템이라고 할 수 있다. 그림 12는 입체 영상과 3D 햅틱 장치를 이용한 테니스 시스템 시연 사진이다.

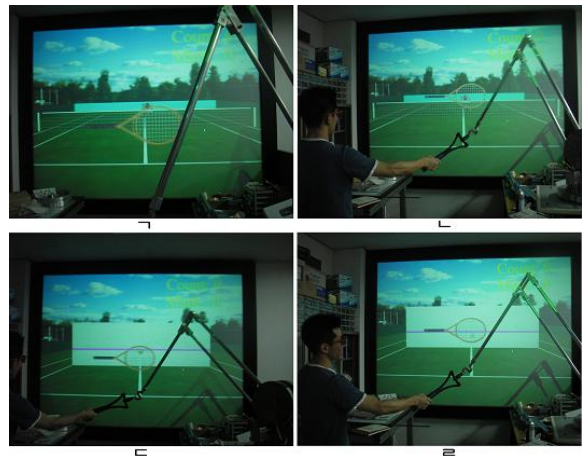


그림 12. 입체영상과 3차원 햅틱 장치를 이용한 테니스 시스템 시연

5. 결론

본 논문에서는 다양한 용도로 사용할 수 있는 3차원 햅틱 인터페이스 장치를 설계, 제작하고 이를 이용하여 순발력 재활 훈련에 사용하기 위한 목적으로 입체 영상 시스템과 연동하여 기본적인 기능이 가능한 가상 테니스 시스템을 구현하였다. 이때 가상 공과 가상 라켓의 충돌 모델링과 햅틱 렌더링을 통하여 가상 공을 칠 때 사용자가 라켓으로 느끼는 충격과 반력을 제작한 3차원 햅틱 인터페이스 장치를 통하여 느낄 수 있도록 하였다. 구현된 시스템의 시연을 통하여 공과 라켓의 충돌 시 공이 나가는 방향과 속도가 실제와 유사함을 확인하고, 공과 라켓에서 충돌이 일어났을 때의 느낌을 비슷하게 사용자에게 전달할 수 있었다.

아직 미흡한 점이 많고 현실적으로 완벽한 가상 테니스 시스템의 구현은 앞으로도 어렵겠지만 가상의 운동이기 때문에 가질 수 있는 몇 가지 장점들을 잘 살리면 실제 운동 선수들은 아니더라도 신체 기능이 현저히 저하되어 회복을 위한 훈련을 하는 환자들에게는 지루하지 않고 재미있게 훈련에 임할 수 있는 장치가 될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 경기욱, 박준석, “햅틱스 기술개발 동향 및 연구 전망”, 전자통신동향분석, Vol. 21, No.5, pp. 93-108, 2006.
- [2] 백중원, 강지민, 최대성, 용호중, 장태정, “2D 햅틱 인터페이스 장치 설계/제작 및 이를 이용한 가상 에어하키 시스템 구현,” HCI2006 논문집, 2006년 2월.
- [3] Ferdinand P.Beer, E.Russell Johnston JR, William E. Clausen, Vector Mechanics for Engineers DYNAMICS, 7th Edition in SI Units, McGraw-Hill, 2005.