

2D 햅틱 인터페이스 장치 설계/제작 및 이를 이용한 가상 에어하키 시스템 구현*

백종원¹, 강지민², 최대성³, 용호중⁴, 장태정⁵

강원대학교 대학원 통신멀티미디어공학과 휴먼인터페이스연구실^{1,2,3,4,5}
harukib@mail.kangwon.ac.kr¹, zminc@hanmail.net², turbulence79@korea.com³,
tt95k@hotmail.com⁴, jangtj@kangwon.ac.kr⁵

Design and fabrication of a 2D haptic interface apparatus and the realization of a virtual air-hockey system using it

Jongwon Back¹, Ji Min Kang², Dai Sung Choi³, Ho-joong Yong⁴, Tae-Jeong Jang⁵
Human Interface Lab., Dept. of Multimedia and Communication Eng.,
Kangwon National University^{1,2,3,4,5}

요약

햅틱 인터페이스 장치는 가상공간 상에서 얻어지는 시각적 효과와 더불어 힘(촉각)을 전달하여 사용자에게 현실감을 줄 수 있는 장치이다. 본 논문에서는 다양한 용도로 사용할 수 있는 2차원 햅틱 인터페이스 장치를 설계 및 제작하고, 입체영상 시스템과 연동하여 오락실에서 흔히 볼 수 있는 에어하키 시스템을 가상현실 기술로 구현하였다. 이때 적절한 모델링과 햅틱 렌더링을 통하여 가상 에어하키 공을 칠 때 사용자가 핸들을 잡은 손으로 느끼는 충격과 반력을 2차원 햅틱 인터페이스 장치를 통하여 느낄 수 있도록 하였다. 구현된 시스템의 시연을 통하여 공과 핸들의 충돌 시 공이 튕겨 나가는 방향과 속도가 실제와 유사하고 공과 핸들에서 충돌이 일어날 때 실제와 상당히 유사한 느낌을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Keyword : haptic interface, virtual reality, stereoscopic display

서론

가상현실이란 인간의 오감에 신호를 전달하여 실재하지 않는 가상의 공간이나 먼 거리에 있는 공간에 자신이 실재한다는 착각을 일으키고 그 공간 내 사물과의 상호작용을 가능하게 하는 기술이다. 따라서 가상현실 시스템에는 사용자에게 자연스럽게 편리한 상호작용을 허락하는 것이 현실감을 극대화하는데 매우 중요한 요소가 된다. 이는 사용자의 의도나 행위가 자유롭게 전달(입력)되고 사용자가 가상 세계에 실재하고 있는 듯한 착각을 불러 일으키게 할만한 적절한 감각이 생성(출력)되어야 함을 의미한다.

가상현실 시스템에서 감각 생성을 위해 고안된 인터페이스 장치로는 시각 및 청각 표시 장치가 대표적이며 현재까지 기술 발전도 많이 이루어져 왔다. 최근에는 사람에게 촉각에 의한 상호작용을 가능하게 하는 햅틱(haptic) 인터페이스 기술이 많이 연구되고 있는데, 본 논문에서는 2차원 햅틱 인터페이스 장치를 구현하고 이를 이용하여 햅틱 인터페이스에 대한 기초 연구를 수행하였다.

햅틱 인터페이스 장치는 가상공간상에서 촉각정보를 상호 전달하고 표현해주어 사용자에게 현실감을 줄 수 있는 장치이다. 인간의 촉각 정보는 크게 촉감정보와 운동감각 정보로 나뉘는데 보통 동시에 감지되며 인간이 어떤 물체를 손으로 쥐거나 만질 때 피부를 통해 느껴지는 질감이나 표면 모양 등의 정보가 촉감정보이고 팔이나 손의

* 본 논문은 산학협력중심대학육성사업 기술개발과제의 지원을 받아 연구를 수행하였습니다.

움직임에 따라 느껴지는 힘과 물건의 무게 등의 정보가 운동감각정보이다.

대부분의 햅틱 인터페이스 장치에서는 힘 또는 촉감 표현을 위해 크기와 성능이 다양한 모터를 사용한다. 모터는 원하는 크기의 방향으로 다양한 힘(토크) 출력을 낼 수 있고, 우수한 반응 속도와 정밀도를 얻을 수 있다. 현재 대부분의 햅틱 인터페이스 장치에서는 모터를 사용하여 힘을 표현하고 있다.

본 논문에서는 테니스 라켓으로 공을 치거나 오락실의 에어하키 시스템에서 핸들로 하키 공을 칠 때와 같이 일정 이상의 속도를 갖는 물체를 받아 치는 동작을 하는 순간에 사용자가 느끼는 반력을 햅틱 인터페이스 장치로 표현하고자 하는 것이 연구의 주 목표이며, 이러한 기능 구현에 모터는 상당히 적절한 구동기가 될 수 있다. 제작하는 시스템은 시각적인 표현을 위한 3 차원 입체영상부와 가상 공간상에 움직이는 물체(공)을 칠 때의 반력을 느낄 수 있게 해주는 햅틱 인터페이스 장치부로 나눌 수 있고, 이러한 시스템을 기반으로 가상 에어하키 시스템을 구현하였다.

2. 시스템 구성

2.1. 입체영상 디스플레이

입체영상 디스플레이는 편광 방식으로 2 대의 빔 프로젝터와 편광용 필터, 실버 스크린, 편광안경으로 구성되어 있다. 입체영상의 표현 방식[1]은 여러 가지가 있지만 2 미터 이상 크기의 화면으로 입체영상을 표현하기 위해 장소와 비용 등을 고려하여 편광 방식을 사용하였다.

2-2. 2D 햅틱 인터페이스 장치

본 논문에서 햅틱 인터페이스 장치 설계 시 가장 중요한 고려 사항은 가상공간 내에서 핸들이 공과 충돌할 때 사용자에게 현실감 있게 충격에 의한 힘이 전달되어야 하고 반대로 모터의 부하가 없는 경우 되도록이면 저항감이 적게 느껴지도록 설계가 이루어져야 한다는 것이다. 또한 사용자의 팔 동작이 자연스럽게 움직일 수 있는 운동범위를 가

져야 한다. 위의 사항들을 시스템 설계에 반영하였으며, 그림 1에 완성된 모습을 보였다.



그림 1. 완성된 2D 햅틱 인터페이스 장치 기구부.

모터축의 와이어 드럼과 원판은 스틸와이어로 연결되어 원판과 와이어 드럼의 반지를 비만큼 힘이 증폭된다. 원판은 다시 각 두 개의 링으로 연결되고 최종적으로 핸들과 만나게 된다. 이러한 구조로 장치는 900mm×600mm의 Workspace를 얻을 수 있다. 사용자가 느낄 수 있는 힘은 두 모터에 의한 힘의 합력으로 얻어진다.

구현된 장치의 힘 표현을 위해 Maxon 사의 EC 45 모터를 사용하였다. 이 모터는 brushless 방식으로 일반 모터보다 마찰이 적고 토크가 크다는 장점을 가지고 있다. 이 모터는 입력 전압이 24V이고 150W의 파워를 가지며 정지 상태의 최대 토크는 1.67Nm이다. 또한 5000rpm에서 최대 8A의 전류가 흐른다.

그리고 보다 효율적인 모터 제어를 위해 Maxon 사의 모터 범용 컨트롤러(EPOS-24/5)를 사용하였다. 모터 컨트롤러는 별도의 CAN 프로토콜 모듈을 PC에 설치하여 동시에 모듈 두 개를 제어할 수 있도록 하였다. CANopen 프로토콜은 1Mbps의 전송 속도를 가지며 컨트롤러들은 단지 2개의 선으로 연결되어 정보를 주고받는다. 각 모터 컨트롤러 모듈들은 고유의 ID를 할당 받고 PC는 해당 컨트롤러 ID로 제어 대상 모듈을 식별하여 각 컨트롤러에 맞는 명령을 내리고 정보를 얻게 된다. 사용된 컨트롤러 모듈은 위치제어 및 속도제어, 전류제어 등 여러 가지 방식의 제어를 적용할 수

있을 뿐만 아니라 편리한 GUI 를 통해 모터의 제어를 위한 각종 파라미터들을 쉽게 설정할 수 있다. 또한 사용자에게 모터제어를 위한 프로그래밍 라이브러리를 제공한다.

3. 기구부 구조 해석

구현된 장치의 구조는 반지름이 r 인 두개의 원판과 길이가 l 인 4 개의 링크로 이루어져 있다. 사용자가 핸들을 움직이면 원판을 회전시키는 모터에 부착된 인코더 값의 변화량으로 핸들의 좌표를 알 수 있다. 그림 1 에서와 같이 1 개의 원판에 장착된 2 개의 링크는 대칭성을 가지며, 원판과 링크의 질량은 무시할 수 있는 것으로 가정하고 계산에서 고려하지 않았다.

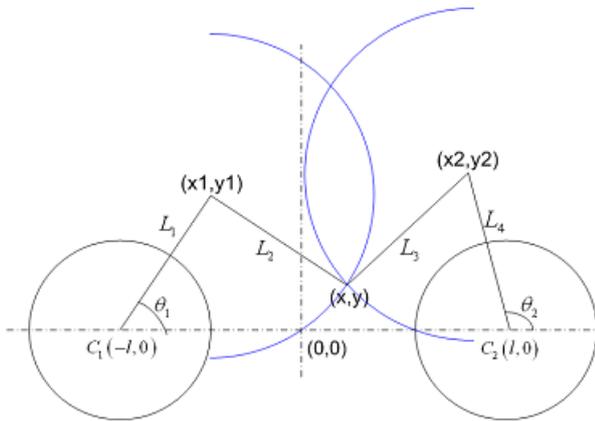


그림 2. 핸들의 좌표를 얻기 위한 모델링.

그림 2 는 핸들의 좌표를 얻기 위해 기구부를 모델링한 그림이다. 점선의 교차점은 기구부의 원점을 나타낸다. 이는 가상환경에서의 원점과 일치하도록 좌표를 정하였다. θ_1 과 θ_2 는 모터에 부착된 인코더의 펄스 카운트를 이용하여 구할 수 있는데, 링크 L_1 과 L_2 를 각각 90° 회전시켜 얻은 인코더 값 증가량으로 $\pi/2$ 를 나누면 펄스 카운트 하나에 해당하는 단위 각을 알 수 있다.

이렇게 얻어진 θ_1 과 θ_2 값을 링크의 위치 좌표를 얻는 방정식에 대입하면

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r+l \\ 0 \end{bmatrix}$$

로 표현 할 수 있다. $[x_2 \ y_2]^T$ 도 비슷한 방법으로 구할 수 있다.

위와 같이 얻어진 링크 1, 2 의 좌표를 가지고 각각 원점으로 하고 링크 2 를 반지름으로 하는 원을 그려 두 원의 교점이 핸들의 좌표(x,y)가 되는 것이다. 좌표를 얻기 위해 그림 2 와 같이 그릴 수 있다. 이것은 2 차 방정식으로 표현되며 두 개의 근을 갖는다. 하지만 점(x,y)는 workspace 내에 존재 해야 하므로 두 개의 y 에 대한 근은 비교를 통해 항상 작은 값을 취하여 점(x,y)를 표현하였다.

4. 가상 공과 핸들의 충돌

에어하키를 구현하기 위해서는 공과 핸들과의 충돌을 고려해야 한다. 이때 공은 탄성계수가 K 인 탄성체로, 그리고 핸들은 강체로 가정하였으며, 또한 기구부의 질량은 무시하는 것으로 가정하였다. 핸들은 사용자가 아무런 저항 없이 자유롭게 원하는 대로 움직일 수 있으며 공과 핸들이 충돌할 때에만 공의 탄성에 의한 반발력이 공과 핸들에 작용하는 것으로 가정하였다. 그림 3 에 가상 공과 핸들의 충돌 순간에 공과 핸들에 작용하는 힘의 크기와 방향을 표현하였다.

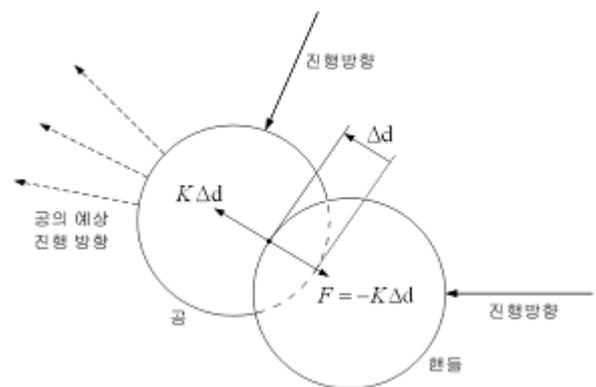


그림 3. 가상 공과 핸들의 충돌 순간 모델링.

공과 핸들의 충돌은 반드시 서로 마주보는 반대방향으로 진행하면서 이루어지는 것이 아니므로 단지 핸들이 공의 내부에 어느 방향으로 얼마나 침범했는냐는 것으로 순간순간의 탄성력에

의한 반발력의 크기와 방향이 결정되는 것으로 가정하였다.

일반적인 물체의 운동 방정식 형태로 공에 대한 운동방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M \ddot{x}_b(t) + B \dot{x}_b(t) = f(t) = K\Delta d(t)$$

여기서 $x_b(t) = [x_b(t) \ y_b(t)]^T$ 는 공의 위치 좌표,

M 은 공의 질량, B 는 마찰계수,

$f(t) = [f_x(t) \ f_y(t)]^T$ 는 공에 인가되는 외부 힘,

$\Delta d(t) = [\Delta d_x(t) \ \Delta d_y(t)]^T$ 핸들이 공에 침범한

깊이, 그리고 K 는 공의 탄성계수를 나타낸다. 에어하키에서 테이블 표면에 대한 공의 마찰은 매우 적으므로 B 는 충분히 작은 값으로 가정하였다. 매 샘플링 주기마다 공과 핸들의 위치 관계에서 외부로부터 가해지는 힘 $f(t)$ 를 계산하고, 이를 이용하여 위의 미분 방정식을 풀어 공의 다음 위치를 계산한다.

5 힘의 표현

지금까지는 공과 핸들의 좌표를 구해서 충돌 발생 여부를 검사하였다. 충돌검사 후 구한 반발력(공과 핸들의 상호 반발력)은 모터를 구동하여 원판을 회전시킴으로써 얻는 회전력으로 표현할 수 있고, 이는 사용자에게 촉감정보가 된다. 또한 이 힘은 충돌 후 공의 다음 위치 결정에 관계가 있고 공의 다음 위치는 3D 영상을 통해 사용자에게 보여진다.

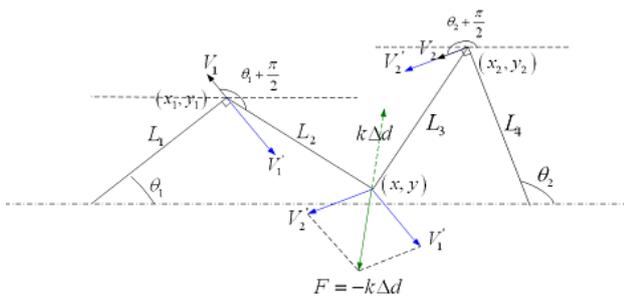


그림 4. 힘의 표현.

그림 4 는 충돌이 일어났을 때 사용자가 힘을 느끼는 방향과 크기를 표현한 것이다. 앞에서 정리한 대로 핸들을 통해 가상 공에 인가되는 힘의 크기가 $K\Delta d$ 라고 하면 핸들에서 사용자에게 거꾸로 인가되는 반발력은 $F = -K\Delta d$ 라고 하는 것이 타당하다. 다시 말해, 충돌이 발생하면 공에 외부로부터 힘이 가해져서 방향과 속도가 바뀐다. 이때 사용자는 핸들을 잡고 움직이는 순간이므로 그 때 사용자에게는 방향은 반대이지만 크기는 같은 힘이 전해져야 한다. 그러므로 충돌 계산 알고리즘을 통해 알고 있는 외력의 방향과 크기를 모터에서 힘을 출력하여 사용자에게 전달하면 사용자는 그 순간에 충돌 때 발생하는 촉감을 느낄 수 있는 것이다.

원판의 반시계 방향 회전을 θ_1, θ_2 의 증가 방향으로 가정하였으므로 L_1 과 L_2 에 수직이고 θ_1 과 θ_2 가 증가하는 방향으로의 단위 벡터를 V_1 과 V_2 로 가정하고 사용자에게 인가해 주어야 하는 힘 F 를 단위 벡터 V_1 과 V_2 의 선형 결합으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = aV_1 + bV_2 = a \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax_1 + ay_1 \\ bx_2 + by_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

이때 a 와 b 는 적절한 상수이다. a 와 b 를 구하기 위해서 위의 식을 다시 고쳐 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \frac{1}{x_1y_2 - x_2y_1} \begin{bmatrix} y_2f_x - x_2f_y \\ -y_1f_x + x_1f_y \end{bmatrix}$$

이와 같이 a 와 b 는 점 (x_1, y_1) , 점 (x_2, y_2) ,

그리고 $F = [f_x \ f_y]^T$ 로 표현이 되므로 이로부터 각각의 모터에서 만들어 주어야 하는 힘 $V_1' = aV_1$ 과 $V_2' = aV_2$ 를 계산할 수 있다.

모터 컨트롤러를 힘 제어(전류 제어) 모드로 놓고 이렇게 계산된 힘 V_1' 과 V_2' 를 각각의 모터 컨트롤러에 인가하면 가상 공과 핸들의 충돌 시 계산되는 반발력을 핸들을 통해 느낄 수 있다.

5. 2D 햅틱 인터페이스 장치를 이용한 에어 하키 시스템 구현

3D 입체 영상 시스템과 제작한 2D 햅틱 인터페이스 장치를 연동한 에어하키 시스템을 구현하였다. 사용자는 편광필터를 장착한 입체 안경을 쓰고 두 대의 빔 프로젝터에서 비추는 영상을 보면 에어하키 테이블이 입체 영상으로 화면에 나타나고 가상 공과 핸들을 볼 수 있다. 사용자가 햅틱 인터페이스 장치의 핸들을 움직이면 가상공간 상의 핸들도 사용자의 움직임에 일치되어 움직인다. 사용자가 핸들로 가상 공을 쳐서 핸들과 가상 공이 충돌하면 앞서 서술한 힘의 표현식에 의해 계산된 힘을 기구부를 통해 느낄 수 있다. 핸들의 움직임을 부드럽게 하기 위하여 베어링을 부착하였지만 원판과 로드의 질량 때문에 생긴 회전 관성력의 영향으로 핸들을 움직일 때 약간의 저항감이 느껴진다. 이는 실제의 에어하키에서 사용자가 핸들을 잡고 움직일 때 느낄 수 있는 저항감의 크기와 비슷한 정도여서 오히려 더 현실감 있게 느껴졌다. 가상의 공이 가상의 핸들과 충돌할 때의 힘은 다소 작게 느껴졌는데 이는 기구부의 무게 때문에 모터의 출력이 다소 줄어들기도 했고, 비록 공이 탄성체라고 가정하였더라도 실제 에어하키에서 느낄 수 있는 탄성력의 세기를 얻기에는 모터의 출력이 부족하기 때문이기도 하였다. 그러나 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 잘 구현된 것으로 느껴졌다. 힘의 세기 표현에서 공과 핸들이 충돌할 때 서로에게 힘을 작용하는 원리를 프로그램으로 구현하는 알고리즘, 기구부의 힘 전달 부분에서의 기구학적인 설계, 그리고 현재 사용된 모터보다 출력이 좀 더 큰 모터의 사용 등으로 부족한 부분

을 개선할 수 있을 것으로 생각된다. 그림 5에 입체 영상과 2D 햅틱 장치를 이용한 에어하키 시스템을 시연하는 모습을 보였다.

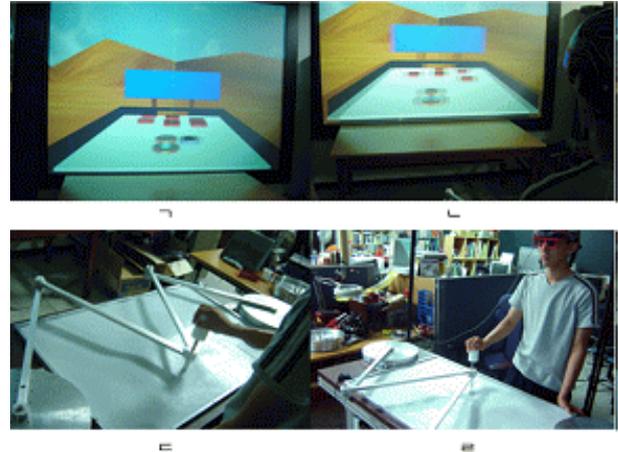


그림 5. 에어하키 시스템 시연.

(a. 일반영상 b. 입체영상 c. 시스템 셋팅 d. 시스템시연)

참 고 문 헌

- [1] NHK 방송기술연구소, “3 차원 영상의 기초”, 技多利, pp. 129-173, 2000. 3.
- [2] 권태범, 송재복, “모터와 브레이크의 동시 구 현에 기초한 다양한 햅틱 효과의 제시,” 제어 자동화시스템공학 논문지, 제 11 권, 제 7 호, pp. 602-608, 2003. 7.
- [3] http://www.txxat.com/index.php/canopen_overview.html
- [4] Maxonmotor Epos Application Note, "Canopen basic information".
- [5] Maxonmotor Epos Application Note, "Communication Guide"