

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

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

백종원*, 강지민**, 용호중**, 최대성**, 장태정***

(Jongwon Back, Ji Min Kang, Ho-Joong Yong, Dae Sung Choi, and Tae-Jeong Jang)

Abstract

Haptic interface apparatus is the device which can offer users virtual reality not only by visualization of virtual space but also by force or tactile feedback. In this paper, we designed and fabricated a 2D haptic interface device that can be used for various purposes, and implemented a virtual air-hockey system that users can easily find in game rooms. By suitable modeling and haptic rendering, users can feel the impact and the reaction force with his/her hand holding the handle through 2D haptic interface device when he/she hit an air-hockey puck with the handle. Through the trial demonstration, we observed the reasonable effect of direction and speed of a ball like doing in reality.

Key Words : haptic interface, virtual reality, stereo vision, virtual air-hockey system

1. 서론

3차원 가상공간에서 사용자가 보다 높은 현실감으로 몰입하기 위해서는 사용자의 오감을 만족해야 한다. 그러나 모든 것을 표현하기는 현실적으로 많은 비용과 공간상의 제약이 따른다. 햅틱 인터페이스 장치는 가상공간상에서 얻어지는 시각적 효과와 더불어 힘(촉각)을 전달하여 사용자에게 현실감을 줄 수 있는 장치이다. 햅틱 인터페이스 장치는 점자 표현과 같은 손가락의 촉감을 전달하는 장치 부터, 사용자의 동작을 표현할 수 있는 장치까지 용도별로 다양한 크기와 종류가 있다. 대부분의 햅틱 인터페이스 장치에서는 힘 또는 촉감 표현을 위해 크기와 성능이 다양한 모터를 사용한다.

모터는 원하는 크기의 힘과 방향으로 다양한 출력을 얻을 수 있고, 우수한 반응속도와 정밀도를 얻을 수 있다. 현재 대부분의 햅틱 인터페이스 장치에서는 모터를 사용하여 힘을 표현하고 있다. 그러나 모터는 컨트롤러의 오류로 인하여 원하는 힘의 표현에 에러를 만들기도 한다. 모터 제어에서 컨트롤러는 중요한 역할을 한다.

본 논문에서는 정확한 위치 보다 일정 이상의 속도를 갖는 물체를 받아내는 순간에 사용자에게 힘을 표현하는 것으로 모터의 사용으로 필요한 출력을 얻을 수 있다. 시스템은 시

각을 만족시키는 3차원 입체영상부와 화면상에 움직이는 물체의 힘을 느낄 수 있는 햅틱 인터페이스 장치부로 나눌 수 있고 이 시스템을 기반으로 가상 에어하키 시스템을 구현하였다.

2. 시스템 구성

2.1 3차원 입체영상 디스플레이

3차원 입체영상 디스플레이는 편광 방식으로 2대의 빔 프로젝터와 편광용 필터, 실버 스크린, 편광안경으로 구성되어 있다. 입체의 표현 방식은 여러 방식[1]이 있지만 2미터 이상의 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 중요하게 고려해야 할 사항은 사용자가 가상공간 내에서 힘을 핸들을 통하여 현실감 있게 전달받아야 하고 모터의 부하가 없는 경우 저항을 적게 느끼도록 설계가 이루어져야 한다는 것이다. 또한 운동범위를 고려하여 사용자의 팔 동작이 자연스럽게 움직일 수 있는 운동범위를 가져야 한다. 위의 사항들을 시스템 설계에 반영하였으며, 그림 1에 완성된 모습을 보였다.

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

저자 소개

- *강원대학교 대학원 통신멀티미디어공학과 박사과정
- **강원대학교 대학원 통신멀티미디어공학과 석사과정
- ***강원대학교 전기전자정보통신공학부 부교수

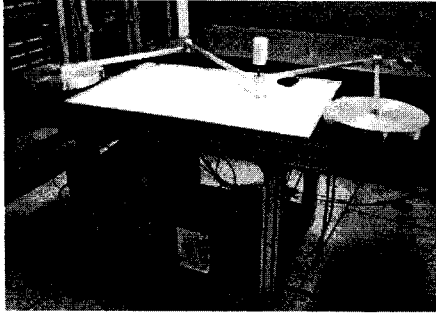


그림 1. 완성된 기구부.

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. 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. 사용된 컨트롤러 모듈은 위치제어 및 속도제어, 전류제어 등 여러 가지 방식의 제어를 적용할 수 있을 뿐만 아니라 GUI를 통해 모터의 제어를 위한 각종 파라미터들을 쉽게 설정할 수 있다. 또한 사용자에게 모터 제어를 위한 프로그래밍 라이브러리를 제공한다.

3. 기구부 구조해석

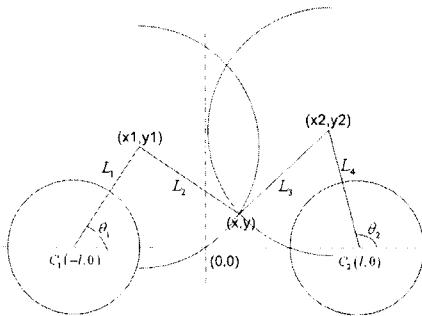


그림 2. 핸들의 좌표를 얻기 위한 모델링.

구현된 장치의 구조는 반지름이 r 인 두개의 원판과 길이가 r 인 4개의 링크로 이루어져 있다. 사용자가 핸들을 움직이면 원판을 회전시키는 모터에 부착된 인코더 값의 변화량으로 핸들의 좌표를 알 수 있다. 그림 1에서와 같이 1개의 원판에 장착된 2개의 링크는 대칭성을 가지며, 원판과 링크의 질량은 무시할 수 있는 것으로 가정하고 계산에서 고려하지 않았다. 그림 2는 핸들의 좌표를 얻기 위해 기구부의 모델링이다. 점선의 교차점은 기구부의 원점을 나타낸다. 이는 가상환경에서의 원점과 일치하도록 좌표를 정하였다. 그리고 θ_1 과 θ_2 는 모터에 부착된 인코더의 펄스 카운트를 이용

하여 구할 수 있는데, 링크 L_1 과 L_2 를 각각 90° 씩 회전시켜 얻은 인코더 값 증가량으로 $\pi/2$ 를 나누면 펄스 카운트 하나에 해당하는 단위 각을 알 수 있다.

4. 가상 공과 핸들의 충돌

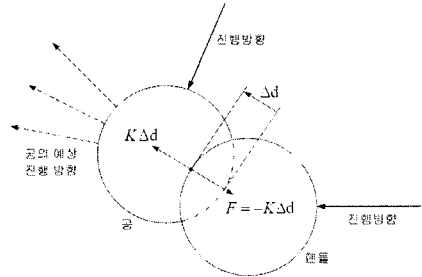


그림 3. 가상 공과 핸들의 충돌 순간 모델링.

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 3에 가상 공과 핸들의 충돌 순간에 공과 핸들에 작용하는 힘의 크기와 방향을 표현하였다.

일반적인 물체의 운동 방정식 형태로 공에 대한 운동방정식을

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

와 같이 쓸 수 있다. 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, $\Delta d(t) = [\Delta d_x(t) \ \Delta d_y(t)]^T$ 는 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 4는 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 타당하다. 다시 말해, 충돌이 발생하면 공에 외부로부터 힘

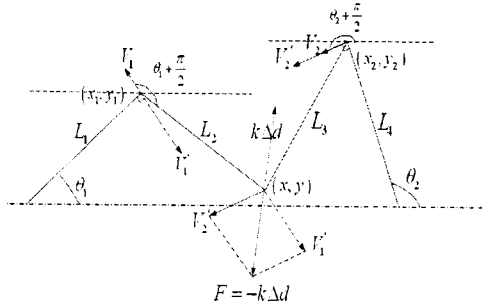


그림 4. 힘의 표현.

이 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_4 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.

$$F = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = aV_1 + bV_2 = a \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax_1 + by_1 \\ ax_2 + by_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

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 $V_2' = bV_2$ 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 햅틱장치를 이용한 에어하키 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 핸들을 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 부착하였지

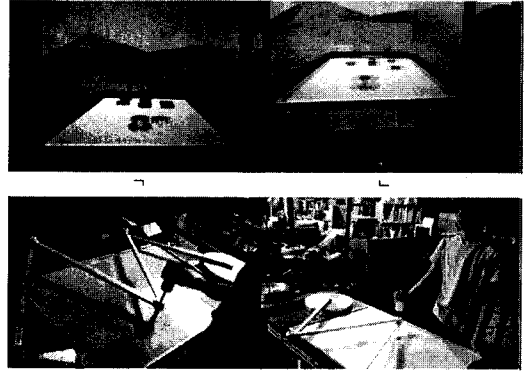


그림 5. 에어하키 시스템 시연.

(a. 일반 영상 b. 입체영상 c. 시스템 세팅 d. 시스템 시연)

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

참 고 문 헌

- [1] NHK방송기술연구소, "3차원 영상의 기초", 技多利, pp. 129-173, 2000. 3.
- [2] 권태범, 송재복, "모터와 브레이크의 동시구현에 기초한 다양한 햅틱효과의 제시", 제어자동화시스템공학 논문지, 7호, 제 11권, 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"