

2자유도 햅틱디바이스 설계 및 가상환경 모델링 기법에 관한 연구

성 하 경*, 범 진 환*, 이 성 호*

* 전자부품연구원 정밀기기연구센터, ° 아주대학교 기계공학과

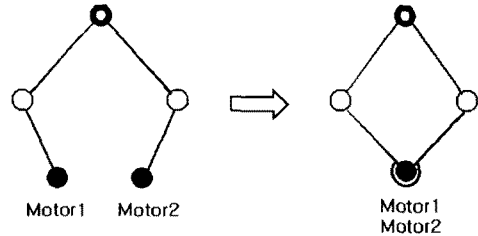
A study on the 2-DOF haptic device design and virtual environment modelling

Ha-Gyung Sung**, Jin-Hwan Bom°, Sung-Ho Lee

* Precision Machinery Research Center, Korea Electronics Technology Institute

° Department of Mechanical Engineering, Aju University

Abstract - In this paper, we investigated 2-DOF haptic device and the method of virtual environment modeling for virtual reality. We designed an modified five bar link system to improve the performance. The haptic control system is composed of calculating kinematics and statics, controlling actuator, and describing the virtual environment. Using this system, we realized the virtual spring model and the freely falling ball model.



[Fig.1] five bar link haptic device

1. 서 론

오늘날의 컴퓨터는 한층 더 복잡한 형태로 인간과 상호 작용하고 있으며, 시각정보뿐만 아니라 청각, 촉각, 후각 등 다양한 형태의 정보를 사용자에게 전달하고 있다.

최근 컴퓨터의 급속한 성능향상에 힘입어 컴퓨터 그래픽스, 스테레오음향, 촉각 등의 기술을 적용한 가상현실에 대한 관심이 고조되고 있다. 가상현실에서 시각적 정보에 촉각의 기능이 부가되면 한층 더 현실감이 증가된다. 이러한 촉각의 기능을 부여하는 햅틱디바이스는 게임 등의 엔터테인먼트 분야에도 적용되어 사용자가 보다 더 현실감을 느낄수 있는 기능을 제공하고 있다.

햅틱디바이스는 여러 가지 다양한 분야에 적용되는데, 극한 작업 또는 해저에서의 원격작업시 작업현장에서 슬레이브 로봇에 가해지는 환경요인들을 작업자가 촉각으로 느끼면서 조작한다면 현실감이 높아져서 보다 효율적인 조작이 가능할 것이다.[1]

그리고 원격 수술에서 미세수술의 경우에 시각정보에만 의존해서는 한계가 있기 때문에 보다 정밀한 수술을 위해서는 수술시 작용하는 힘을 원격지의 조작자에게 피드백하는 햅틱 장치가 필요하게 된다.[2,3]

이외에도 극미세 조작기, 미술분야 등 햅틱디바이스의 활용범위가 넓어지고 있다.

본 연구에서는 개선된 형태의 5절링크 구조의 2자유도 햅틱디바이스를 설계하여 가상환경의 힘을 사용자에게 전달하는 모델링 기법을 적용하였다.

2. 햅틱디바이스 설계

2.1 햅틱디바이스 설계

일반적으로 5절링크로 구성된 햅틱디바이스는 그림1과 같이 구동 조인트 부분이 수평방향으로 일정한 거리만큼 떨어져 있는 구조를 가진다. 이러한 구조의 문제점으로는 상대적으로 작업공간(workspace)이 작아지고 쉽게 특이점(singular point)에 빠지게 된다는 점을 들 수 있다. 이러한 단점들을 극복하기 위하여 본 연구에서는 두 개의 구동조인트 부분을 수평방향으로 같은 위치에 놓이도록 했다. 그래서 상대적으로 넓은 작업공간을 가지므로써 주어진 환경에서의 활용폭을 넓힐 수 있게 하였다.

2.2 기구학 해석

설계된 햅틱 디바이스에서 구동축의 각도 θ_1, θ_2 가 주어졌을 때의 끝단의 위치 $\mathbf{x} = (x, y)$ 를 계산하기 위한 정기구학 해석을 수행하였다.

수동관절의 위치를 각각 $\mathbf{x}_1 = (x_1, y_1), \mathbf{x}_2 = (x_2, y_2)$ 라 하면, θ_1, θ_2 와 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ 의 관계는 다음과 같다.

$$x_1 = l_1 \cos \theta_1, y_1 = l_1 \sin \theta_1 \tag{1}$$

$$x_2 = l_1 \cos \theta_2, y_2 = l_1 \sin \theta_2 \tag{2}$$

이로부터 두 수동관절사이의 거리 l_2 를 계산하면 다음과 같다.

$$l_2^2 = \|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2\|^2 = l_1^2(2 - 2\cos(\theta_1 - \theta_2)) - 2l_1(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \tag{3}$$

그림2에서 두 수동관절중심의 위치를 \mathbf{x}_c 라 하면 \mathbf{x} 와 \mathbf{x}_c 와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x} - \mathbf{x}_c = l_m(\cos \theta_c, \sin \theta_c) \tag{4}$$

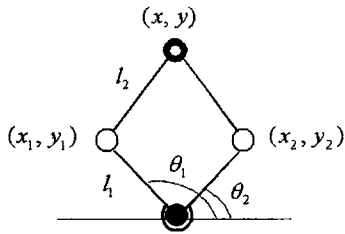
$$\theta_c = \text{atan}(x_2 - x_1, y_2 - y_1) + \frac{\pi}{2} \tag{5}$$

여기서 l_m 은 \mathbf{x} 와 \mathbf{x}_c 사이의 거리를 나타낸다. 이 식을 이용하여 구동축의 각도로부터 끝단의 위치 \mathbf{x} 를 구할 수 있다.

입력 속도와 끝단에서의 속도사이의 관계식을 구하기 위해 다음과 같은 끝단과 각 수동관절사이의 관계식을 이용한다.

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = l_2^2 \tag{6}$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = l_2^2 \tag{7}$$



[Fig.2] 5-bar link kinematics

이 식을 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$(x-x_1)(\dot{x}-\dot{x}_1) + (y-y_1)(\dot{y}-\dot{y}_1) = 0 \quad (8)$$

$$(x-x_2)(\dot{x}-\dot{x}_2) + (y-y_2)(\dot{y}-\dot{y}_2) = 0 \quad (9)$$

그리고 식(1),(2)를 시간에 대해 미분한 후 식(8),(9)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 정속도 기구학 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

그리고 가상일의 원리를 적용하여 구동축에 작용하는 모터의 입력토크와 끝단에 작용하는 힘의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau = J^T f \quad (13)$$

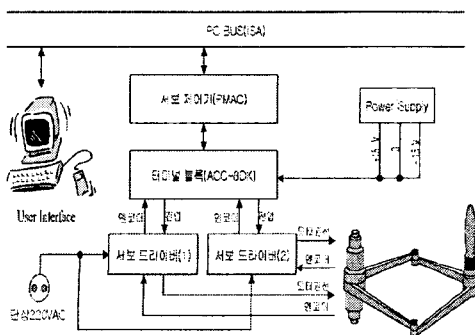
여기서 τ 는 모터의 입력토크, f 는 끝단에 작용하는 힘, J 는 자코비안(Jacobian)을 나타낸다.

이와 같이 계산된 관계식을 이용하여 햅틱디바이스를 구동하게 된다.

3. 시스템 구성

3.1 제어 시스템

본 연구에서는 자유공간(free space)에서의 자유로운 핸들의 이동성을 확보하기 위하여 미쯔비시사의 서보 모터(정격출력:750W)를 직접 구동하였으며, 상위제어기로서는 2축 모터운전이 가능한 서보제어기(Mini-PMAC, DeltaTau사)를 사용하였다. 제어시스템의 구성도는 그림 3과 같다.



[Fig.3] composition of control system

사용된 서보 모터는 3,000rpm의 정격속도, 2.4Nm의 정격토크를 가지며, 출력되는 엔코더는 1,000[펄스/회전]의 사양을 가진다. 이를 상위제어기에서는 4채배하여 ISA버스를 통하여 햅틱 구동 프로그램에 보낸다.

햅틱 구동 프로그램을 통하여 기구학 연산과 자코비안 및 토크 계산 등이 이루어진 후, 서보 모터에 보내어질 토크 값은 상위제어기를 통하여 아날로그 전압 값으로 서보 드라이버에 전송이 된다. 상위제어기는 이를 위하여 16비트 해상도를 가지는 DAC(Digital to Analog Converter)를 포함하고 있다.

서보 드라이버에 보내어지는 아날로그 전압의 범위는 +10V에서부터 -10V이며, 이는 서보 모터가 가질 수 있는 최대 토크의 범위를 허용한다.

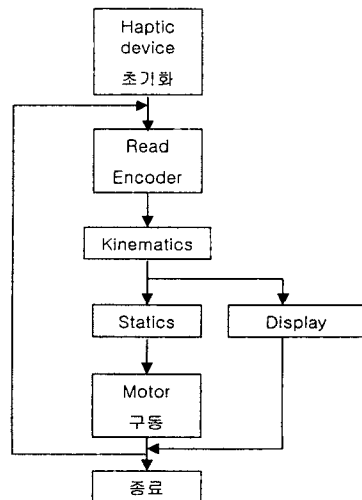


[Fig.4] haptic device system

3.2 제어 프로그램

햅틱 디바이스의 제어 프로그램은 크게 세부분으로 나누어져 있다. 첫 번째는 기구학 및 정역학계산을 위한 부분, 두 번째는 햅틱디바이스의 구동을 위한 부분, 그리고 세 번째는 화면상의 가상환경을 구현하는 부분이다.

시뮬레이션 프로그램의 제어 흐름도는 그림 5와 같이 햅틱디바이스를 초기화한 후 사용자의 조작에 따른 엔코더 신호의 변화를 체크하여 기구학해석과 정역학 해석을 수행하여 필요한 힘에 해당하는 크기로 모터를 구동시킨다. 이와 동시에 사용자의 조작에 의한 햅틱디바이스의 위치변화를 화면에 반영해 준다.



[Fig.5] control flow of haptic device

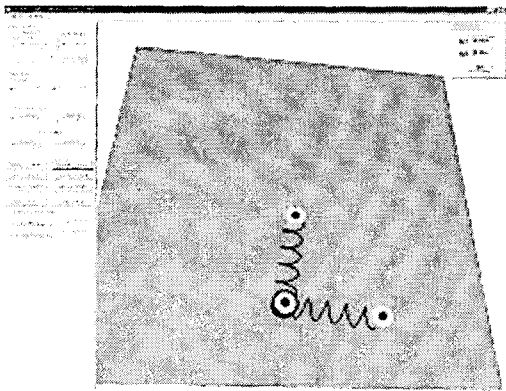
4. 가상환경 모델링

햅틱제어방법을 이용하여 가상의 공간에서 작용하는 힘을 사용자에게 전달할 수 있는 가상환경을 모델링하였다.

4.1 스프링 모델

가상의 환경에 존재하는 스프링을 사용자가 실제로 스프링을 조작하는 것처럼 느끼게 하는 가상환경을 모델링하였다. 그림 6과 같이 햅틱 디바이스의 끝단에 수평방향과 수직방향으로 각각 가상의 스프링이 연결되어 있어서 햅틱 디바이스를 조작하면 화면상의 스프링이 실제로 존재하는 것처럼 느껴지게 된다.

이 시스템의 구현을 위해서 우선 스프링이 늘어나지 않은 상태에서의 끝단의 위치를 초기위치로 준 후 끝단과 스프링 고정점과의 거리를 계속적으로 계산한다. 이것으로부터 끝단이 초기위치에서 이동한 거리와 스프링상수의 곱으로 스프링에 의한 힘을 계산한다. 식(13)으로부터 스프링의 힘에 해당하는 토크를 모터에서 발생시킨다. 이것으로부터 사용자는 스프링에 의한 가상의 힘을 햅틱디바이스로부터 느낄 수 있는 것이다. 가상환경에서는 끝단의 위치가 변할 때마다 햅틱디바이스의 위치를 갱신하여 현실감을 높여준다.



[Fig.6] spring model

4.2 자유 낙하 볼 모델

가상의 공간에서 자유 낙하하는 볼을 고무벨트를 이용하여 운동방향을 변화시키며 볼이 벨트에 닿을 때 작용하는 힘을 사용자가 느낄 수 있게 하는 모델을 구현하였다. 그림 7과 같이 볼이 가상의 환경에서 자유낙하하며, 아래쪽에 햅틱디바이스와 연결된 고무벨트가 있어서 햅틱디바이스의 조작에 의해 벨트가 아래위로 움직이며 자유낙하하는 공의 운동방향을 변화시킨다. 그리고 위쪽에는 벽이 있어서 공이 일정높이 이상 올라가면 벽에 부딪혀서 반사되어 나오게 된다.

먼저 공이 자유낙하하는 부분은 식(14)의 중력장내에서의 자유낙하방정식을 적용하였다.

$$m\ddot{x} = -mg \quad (14)$$

그리고 위 벽과의 충돌시에는 손실이 없는 완전탄성충돌로 가정하여 식(15)을 적용하였다.

$$v_o = -v_i \quad (15)$$

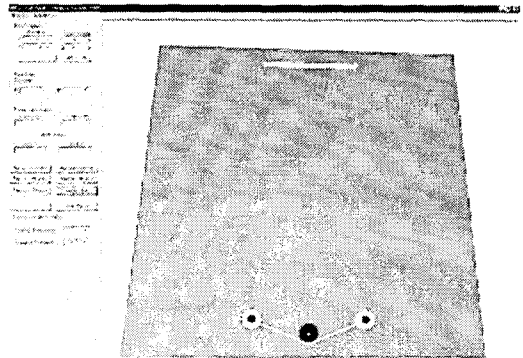
그리고 자유낙하하는 볼이 고무벨트에 닿았을 경우 벨트에 의한 힘이 볼에 작용하여 볼의 속도가 변하게 된

다. 이 경우에 고무벨트를 스프링으로 가정하여 식(16)을 적용하였다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -mg + f_e \\ f_e &= k(y_h - y) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 f_e 는 벨트에 의해 볼에 작용되는 힘을 나타낸 것이고, k 는 스프링상수, y 는 볼의 바닥면의 위치, y_h 는 벨트 지지축의 위치를 나타낸다.

이 식으로부터 자유낙하하는 볼이 벨트에 부딪혔을 때 볼에 의해 벨트지지축에 작용하는 힘을 계산한다. 그리고 식(13)을 이용하여 그 값에 해당하는 토크를 모터에서 발생시킨다. 그러면 사용자는 자유낙하하는 공에 의해 벨트에 작용하는 힘을 느낄 수 있게 된다.



[Fig.7] freely falling ball model

3. 결 론

본 연구에서는 2자유도 햅틱디바이스를 설계하여 가상환경에서 작용하는 힘을 사용자에게 전달할 수 있는 시스템을 구현하였다.

가상환경 모델링에서는 햅틱디바이스의 끝단과 가상물체 사이의 거리를 이용하여 스프링효과와 자유낙하하는 볼 모델을 구현하였다. 이를 응용하여 물체의 질감 등의 다양한 촉감을 느끼는 방법에 대한 연구가 필요하겠다.

그리고 본 연구에서 제작된 2자유도 햅틱디바이스를 응용하여 보다 높은 자유도를 갖는 햅틱디바이스를 구현할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Grigore C. Burdea, Force and Touch Feedback for Virtual Reality, John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [2] D.S.Kwon, K.Y.Woo, S.K.Song, W.S.Kim, H.S.Cho, "Microsurgical telerobot system", Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.945-950, 1998
- [3] 이수성, 이장명, "원격 수술을 위한 햅틱 인터페이스의 설계 및 실시간 제어", 제어·자동화·시스템공학학회지, 제8권, 제2호, pp.26-36, 2002