

USB를 이용한 2자유도 햅틱장치 제어에 관한 연구

이종배[✉], 성하경[✉], 김주한[✉], 임준홍[✉]
전자부품연구원[○], 한양대학교[●]

Control of 2 DOF Haptic Device using USB

J.B. Lee[✉], H.K. Sung[✉], J.H. Kim[✉], J.H. Lim[✉]
Korea Electronics Technology Institute(KETI)[○], Hanyang University[●]

Abstract - Force feedback control is investigated for improving the quality of the haptic feedback in virtual reality applications. We proposed method for control of the haptic device using universal serial bus(USB), and evaluated the characteristics with experimental set.

1. 서 론

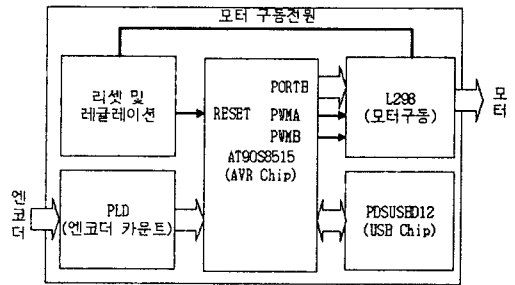
디지털 및 컴퓨터 기술이 급속히 발전하여 인간과 컴퓨터 시스템간의 상호작용이 다양하게 이루어지고 있는데 최근에는 촉감 인터페이스가 관심 기술로 대두되고 있다. 촉감 인터페이스기술은 Force feedback기술이라고도 하는데 시각이나 청각 정보와는 달리 힘 되먹임 장치(Force Feedback Device) 또는 햅틱장치(Haptic Device)를 통하여 물체의 무게나 단단함 등의 촉감을 전달하는 기술로서 최근 선진국을 중심으로 공학분야 뿐만 아니라, 의학, 미술 등의 여러 분야에서 많은 연구가 수행되고 있고 있다[1].

본 논문에서는 가상환경을 촉감으로 느낄수 있게 햅틱장치(Haptic Device)를 최근 컴퓨터 표준 통신방식인 USB(Universal Serial Bus)를 이용하여 PC로 제어하는 기법에 대하여 기술하였다. 2자유도 햅틱장치는 Voice Coil형 모터가 2개, 그리고 각 축의 위치 Feedback을 위한 엔코더가 2개이며 5Bar Link구조로 구성되어 있다. 이 2자유도 햅틱장치 제어를 위하여 2축 모터 구동 및 엔코더 신호의 인터페이스를 USB를 통하여 하였고 이를 PC에서 제어 알고리즘을 구현하여 기본적인 가상환경의 힘을 전달하는 기법에 대하여 연구하였다. 그리고 이에 대한 간단한 가상환경을 구현하여 실험으로 검증하였다.

2. USB 인터페이스

2.1 제어보드의 구성

본 연구에서는 USB전용 컨트롤러 칩과의 인터페이스, 모터 드라이브 IC 제어, 그리고 엔코더 카운트 연산 등을 하기 위하여 마이크로 컨트롤러를 사용하였는데 최근에 8Bit이면서 강력한 기능을 가지고 있는 AVR 계열의 AT90S8515를 사용하였다. 이 컨트롤러는 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 먼저 118개의 명령어 대부분이 한 클럭 사이클로 실행되는 고성능 저 전력의 RISC구조로 되어 있다. 그래서 8MHz클럭에서 8MIPS정도의 성능을 나타낸다[3]. 또한 데이터 및 비활성 메모리를 내장하고 있어서 아주 커다란 기능의 프로그램이 아니면 외부 메모리가 필요 없고 One Chip으로 프로그램을 할 수가 있다. 그리고 다양한 주변장치가 있는데, 본 연구에서 이 칩을 선택한 가장 큰 이유는 두 개의 8/9/10비트의 PWM기능이 내장되어 있다는 것이다. 두 개의 PWM이 내장되어 있으므로 2개의 Voce Coil모터를 이를 이용하여 직접 토크제어가 가능하다.

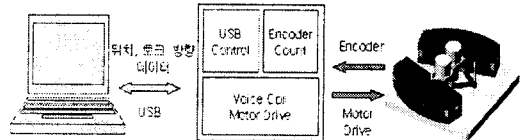


[그림 1] 제어보드의 구성

제어보드의 전체 구성은 그림 1과 같다. 여기서 모터의 구동전원은 12V로 되어있으므로 레귤레이터를 사용하여 보드전원(5V)을 생성시켰고 2.048ct/rev 사양을 가진 엔코더를 2개 사용하였는데 이를 카운팅 하기 위하여 PLD를 이용하였다. PLD내부는 15Bit카운터를 2개로 하여, 제작된 햅틱장치의 동작영역에 충분하도록 설계하였다. 컨트롤러 내부 두 개의 PWM과 제어명령을 위해 PORTB의 4Bit를 이용하여 2모터를 정/역회전 및 토크제어를 수행하였다.

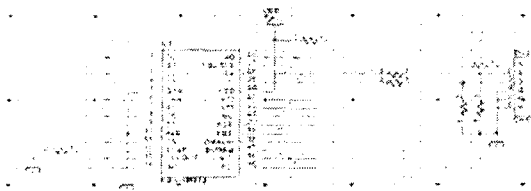
2.2 USB에 의한 PC와의 인터페이스

본 연구에서는 2자유도를 갖는 Haptic 장치를 제어하기 위하여 Voice Coil형 모터를 이용하여 구동하였다. Voice Coil형 모터를 구동하기 위해서는 일반 DC형 모터를 구동하는 기법과 동일하다. CW방향과 CCW방향 제어를 위해서는 전류의 방향을 바꿔주면 되고, 그 힘을 제어하기 위해서는 그대 흐르는 전류의 양을 제어하면 된다. 그리고 본 연구에서는 PC에서의 명령(회전 방향, 토크)을 받아 Haptic 장치가 제어되므로 PC와의 인터페이스가 필수적이다[2]. 이를 최근에 많이 사용되고 있는 USB(Universal Serial Bus)를 사용하였다. USB는 최근 컴퓨터 기반의 인터페이스의 표준으로 자리잡은 방식으로 PNP기능이 막강하고 또한 속도의 이점이 기존의 시리얼 방식보다는 큰 장점을 가지고 있다.



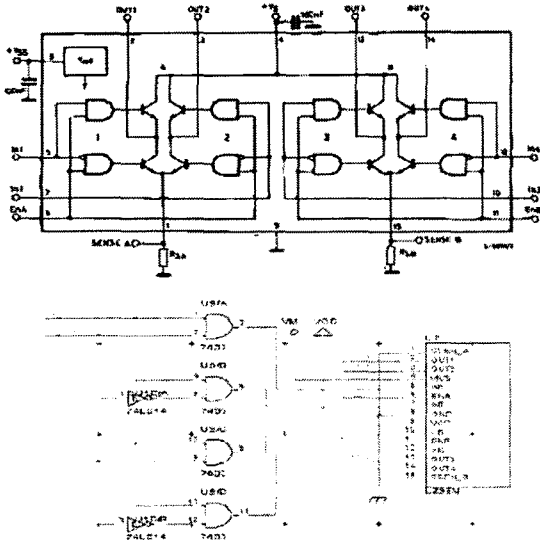
[그림 2] 제어시스템의 구성도

USB 통신은 일반적으로 Control, Interrupt, Isochronous, Bulk로 총 4가지 모드를 사용하는데, 본 연구에서는 속도는 비교적 느리지만 디바이스 드라이버를 쉽게 구현할 수 있고 또한 프로그램이 비교적 용이한 Bulk모드를 사용하였다. 이 모드를 사용하면 기본적인 Data Structure기반에 필요한 데이터를 실어서 크기를 계산하여 Field에 같이 보내면 Structure가 송수신 되는 방식으로 구현이 된다.



[그림 3] USB칩 인터페이스

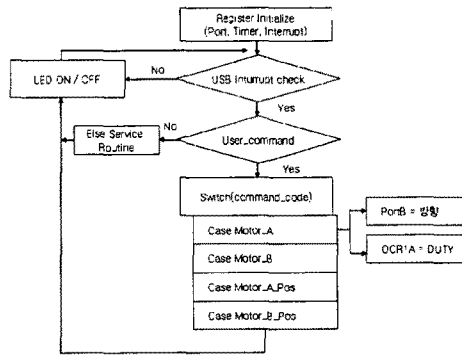
USB통신을 위해서 본 연구에서는 Philips사의 USB전용칩인 PDIUSB12를 사용하였는데 본 칩은 비교적 저가로써 USB Ver1.1를 지원하고 있으며, 일반 마이크로 컨트롤러와 8Bit로 인터페이스가 가능하고 Programmable한 외부 Clock Out기능을 가지고 있다.



[그림 4] Voice Coil형 모터의 구동

USB를 이용하여 전송받은 명령으로 실제로 모터를 구동하기 위하여 L298이라는 구동칩을 사용하였다. 그림 4는 4개의 H-Bridge로 구성되어있는 L298내부 구조와 이 칩을 이용한 외부회로를 도식한 것인데 모터 2개까지 PWM으로 제어가 가능하다. Haptic 장치는 무부하시의 느낌이 아주 중요한데, 이때의 부하가 느껴지면 특성이 아주 나쁘게 판단되어지므로 본 연구에서는 이를 위하여 L298의 각 Bridge의 Enable단자를 제어하여 무부하시에는 이를 Disable시켜 코일에 전원이 Open되는 효과를 나타낼 수 있게 하였다.

그림 5는 USB에서 받은 데이터를 이용하여 모터를 구동하는 알고리즘이다. 먼저 각 Register를 Initialize한 후 USB인터럽트를 계속 Check하다 인터럽트가 발생하면 Command의 종류를 살피고 종류가 User Command이면 실제 구동 일을 수행하게 된다. 모터의 방향 및 종류 그리고 PWM Duty등의 데이터를 필요한 각 Register에 입력시켜 제어하게 된다.

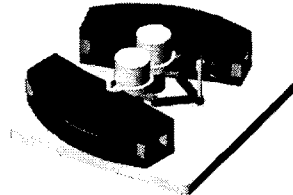


[그림 5] USB를 이용한 모터제어 프로그램 순서도 또한 User Command중에서 각 모터의 Position 데이터 요구명령이 나오면 PLD의 엔코더 카운터 값을 공통 Data Structure에 실어주면 PC로 전송된다.

3. Haptic장치

3.1 Haptic장치의 설계

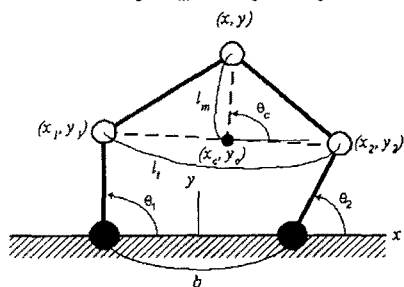
이 Haptic 장치는 사람이 제어할 수 있는 힘을 10N으로 설정 하였으며, 작동범위(work space)를 40×40mm정도로 잡았다. 그리고 링크구조는 2자유도이면서 견고한 5 bar 링크 구조로 하였고, 2개의 Voice Coil형 모터를 구동원으로 사용하였다. 이 장치를 고안하기 위해 주안점을 둔 것은 큰 힘의 반향 제시 가능, 힘 제어의 용이성, 무 백래쉬화, 링크연결 부분의 마찰력 최소화에 두었다.



[그림 6] Haptic장치 구조도

이 장치의 작동자가 핸들을 손으로 잡고 X, Y평면상으로 움직일 수 있도록 하였다. 본 장치에서 Voice Coil형 모터를 구동원으로 사용하여 모터의 제어를 용이하게 하였고, 직접 구동방식을 채용하였기 때문에 모터에서의 마찰력을 최소화하였다. 그리고 Al재질의 링크 및 plate를 사용해서 경량화시켰다. 경량화로 인하여 저 inertia(관성)을 이룰 수 있었다. 이와 같이 설계한 기구부의 정 기구학은 다음과 같이 해를 구할 수 있다. 여기서 끝단의 위치 x 와 x_c 와의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x - x_c = l_m (\cos \theta_c, \sin \theta_c)$$



[그림 7] 5 Bar Link구조

여기서 θ_c 는 다음과 같은 관계를 가지게 된다. 따라서 주어진 구동기의 각도 θ_1 과 θ_2 가 주어지면 끝단의 위치 x 를 구할 수 있게 된다. 정속도 기구학은 다음의 식으로부터 유도되어 진다.

$$\begin{aligned}(x-x_1)^2+(y-y_1) &= l_2^2 \\ (x-x_2)^2+(y-y_2) &= l_2^2\end{aligned}$$

위의 식을 미분하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있으며

$$\begin{aligned}(x-x_1)(\dot{x}-\dot{x}_1)+(y-y_1)(\dot{y}-\dot{y}_1) &= 0 \\ (x-x_2)(\dot{x}-\dot{x}_2)+(y-y_2)(\dot{y}-\dot{y}_2) &= 0\end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -(l_1 \sin \theta_1) \dot{\theta}_1, \quad \dot{y}_1 = (l_1 \cos \theta_1) \dot{\theta}_1 \\ \dot{x}_2 &= -(l_1 \sin \theta_2) \dot{\theta}_2, \quad \dot{y}_2 = (l_1 \cos \theta_2) \dot{\theta}_2\end{aligned}$$

이다. 따라서 이를 위의 속도식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 정속도 기구학 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = l_1 \begin{bmatrix} x-x_1 & y-y_1 \\ x-x_2 & y-y_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(x-x_1) \sin \theta_1 + (y-y_1) \cos \theta_1 & -(x-x_2) \sin \theta_2 + (y-y_2) \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = J \dot{\theta}$$

2자유도 Haptic 장치에 힘을 전달하기 위해 virtual work으로 구한 정역학식을 사용하였으며 그 식은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\tau = J^T f$$

이상과 같은 기구학 관계와 정역학 관계를 이용하여 2DOF Haptic 장치를 구동하게 된다.

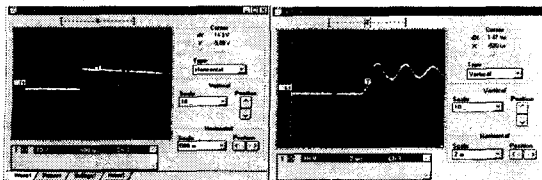
3.2 제어보드에 의한 Haptic 장치의 성능평가

성능평가는 제작된 시제품에 End Point를 고정시키고 여기에 Force Sensor를 이용한 성능평가용 지그를 제작하여 구현하였다. Y축 방향으로의 +/- 힘을 전압으로 출력시켜 Oscilloscope로 측정하는 방법으로 하였다.



[그림 8] 성능평가 시험장치

사용된 Force Sensor는 순간변위 방식이므로 Force가 발생하는 순간 변하는 전압의 차이를 읽어야 한다. 그래서 현재 환경에서의 기준을 정하는 Calibration 작업이 필요하다. 2kg의 추를 이용하여 Calibration하였는데, 출력전압이 약 20V이므로 힘 1N에 1V의 전압이 측정되는 것을 알 수 있다. 그리고 제어보드에서 프로그램을 하는 방식으로 최대 Force와 스텝응답 특성을 측정하였다.



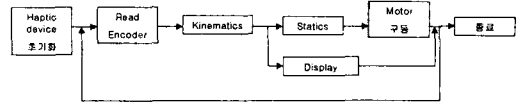
[그림 9] 최대 Force 및 응답특성

순간적으로 최대의 힘을 주었을때 측정된 화면인데 dY가 14.3V이므로 약 13N의 힘이 발생하는 것을 알 수 있고 스텝응답은 약 1.5msec임을 알 수 있다.

4. 가상환경 모델링 및 제어

4.1 시뮬레이션 프로그램의 구성

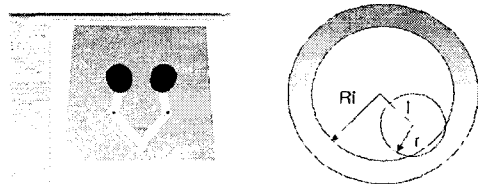
Haptic 장치의 시뮬레이션 프로그램은 크게 세 부분으로 나누어져 있다. 첫 번째는 기구학 및 정역학 계산을 위한 부분, 두 번째는 통신 등의 신호를 처리하기 위한 부분, 그리고 세 번째는 화면상의 가상환경을 구축하는 부분이다. 시뮬레이션 프로그램의 제어 흐름도는 그림 10과 같이 Haptic 장치를 초기화한 후 사용자의 조작에 따른 엔코더 신호의 변화를 체크하여 기구학해석과 정역학 해석을 수행하여 필요한 힘에 해당하는 크기로 모터를 구동시킨다. 이와 동시에 사용자의 조작에 의한 Haptic 장치 위치변화를 화면에 반영해 준다.



[그림 10] 가상환경 simulation 프로그램

4.2 시뮬레이션 구현

도너츠 모양의 원통내부에 Haptic 장치의 끝단이 위치해서 도너츠 모양의 원통이 탄성을 가진 벽으로 느껴지도록 모델링 한 것이다. 현재 끝단의 위치와 원의 중심과의 거리를 계산하여, 그 거리가 벽면의 반경과 끝단의 반경의 차이보다 큰 경우 끝단과 벽면과 충돌이 있다고 보아서 그 차이 만큼에 해당하는 힘을 발생시키도록 한다. 힘의 방향은 벽면의 중심과 끝단의 위치를 이용하여 계산한다.



[그림 11] 가상환경 - circle

5. 결론

본 연구에서는 제작된 2자유도 Haptic 장치를 USB를 이용하여 제어하는 방식과 이 장치의 성능평가 방법을 제안하였고 또한 이를 간단한 가상환경 모델링을 하여 시뮬레이션을 구현하였다. 본 연구에서는 USB를 Bulk모드로 사용하였는데, 이 모드는 디바이스 드라이버구축 및 프로그램 설계 등은 간단하게 구현할 수가 있으나 속도 면에서는 실시간을 보장하지 못하므로 향후에는 Isochronous나 Interrupt 모드 등으로 바꾸어 성능향상을 해야 할 것이다.

[참고 문헌]

- (1) Grigore C. Burdea, "Force and touch feedback for virtual reality", A Wiley-Interscience Publication
- (2) Ming Ouhyoung, "A low-cost force feedback joystick and its use in PC video games", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.41, No 3
- (3) 조영준, "쉬운예제의 Kit로 배우는 AVR", Ohm사, 2000