

초음파 모터의 위상차 제어를 이용한 3자유도 힘반영 촉각장치 설계

오 금 곤* · 조 진 섭** · 김 동 옥*** · 김 영 동*** · 김 재 민*

*동신대학교 전기전자공학부 **한국전력공사 ***조선대학교 제어계측공학과

Design of A Force-Reflecting 3DOF Interface using Phase-Difference Control of Ultrasonic Motors

Geum-Kon Oh* · Jin-Sub Cho** · Dong-Ok Kim*** · Young-Dong Kim*** · Jae-Min Kim*

*Dept. of Electrical & Electronic Eng., Dongsin University **Korea Electric Power Co.,

***Dept. of Con. & Ins. Eng. Chosun Univ

Abstract

This paper proposes an interfaces control system to drive a ultrasonic motors(USMs). To touch surfaces and objects created within a virtua environment, the 3 DOF force-reflecting interfaces provides force feedback to users, so to feel touching real things. To effectively display the mechanical impedance of the human hand we need a device with specific characteristics, such as low inertia almost zero friction and very high stiffness. As an actuator for direct drive method, the USMs have many good advantages satisfied these conditions over conventional servo motors.

To estimate capability of this interface, we did an experiment. The device works very well, as user are able to detect the edge of the wall and the stiffness of the button.

1. 서 론

오늘날 인간은 별개의 객체로서 기계를 조종하는 기능만을 지니지만 미래에는 단순 조종이 아닌, 인간과 기계가 한 조가 되어 각각의 능력에 맞는 업무를 수행하는 기능을 맡을 것이다. 앞으로 미래사회에서의 모든 컴퓨터 시스템은 휴머니즘의 인간과 기계의 상호 인터페이스화가 필수적이다.

그 중 산업현장에서 널리 쓰이고 있는 로봇시스템에서도 이와 마찬가지로 인간과 기계의 상호 인터페이스가 있는 정교한 자동화 시스템이 각광받게 될 것이다. 이처럼 로봇 시스템이 인간과 능동적인 상호교

감을 한다면 인간의 물리적인 힘을 증가시키고, 인간의 정밀함을 증강시키며, 인간이 갈 수 없는 환경을 원격조종하는 등 인간에게 더 많은 능력을 가져다 줄 것이다. 이를 효과적으로 이용하는 방법으로 최근 가상 환경을 이용하는 방안이 연구되어지고 있다. 컴퓨터 메모리에 가상세계 모델을 구축하고 특별한 인터페이스를 이용하여 이 가상세계 내의 정보의 입출력을 인간의 감각적인 조작으로 가능하게 하는 기술을 인공현실(artificial reality) 또는 가상현실(virtual reality, VR)이라 한다. 가상현실의 적용 범위는 매우 광범위해서 오락 게임으로부터 산업현장의 건축 및 비즈니스 입안까지 다양화되고 있다.

가상현실에서 인간에게 현실감을 부여하기 위해 필요한 감각요소는 시각, 청각, 촉각 등이 있다. 이 중 촉각을 부여하기 위해 손의 위치 정보를 가상의 세계에 제공하고, 가상환경과 접촉했을 때 인간에게 실제와 비슷한 감각을 전달하는 장치를 힘 반향 역감 장치(force-reflecting interface)라 한다[1].

기존의 대부분 장치들은 단순히 위치정보만을 제공하는 기능만을 했다. 또한 능동적 힘 반향을 하는 모델도 소형 DC 서보 모터나 마그네틱 장치를 사용하기 때문에 토크의 증가를 위해서 케이블이나 기어를 이용하고 있어 백러시나 구조적인 부피 및 무게의 증가, 작업공간의 축소 등의 단점을 안고 있다[2]-[7].

본 연구에서는 저속, 고폭 특성인 지닌 초음파 모터를 사용하여 직접구동방식(direct drive)으로 능동적 3 자유도를 지닌 데스크-탑형 힘 반향 역감 장치를 설계하였다. 시험 제작한 힘 반향 역감 장치는

컴퓨터 모니터 상에 존재하는 가상의 물체를 느낄 수 있었다. 조작자가 역감 장치의 엔드이펙터를 잡고 움직이면 엔코더에 의해 엔드이펙터의 위치를 측정하고 가상물체와 충돌했을 때 점·탄성을 능동적으로 발생시킬 수 있는 초음파 모터가 토크를 발생시켜 기계적인 메커니즘을 통하여 엔드이펙터에 외력을 가함으로써 사용자는 촉감에 가까운 역감을 느낄 수 있었다.

2.역감발생의 원리

물체에 대한 인간의 지각과정은 외부환경의 물체와 접촉하여 상호작용을 함으로써 그 물체에 대한 인식모델을 설정하고 기억하는 것을 말한다. 인간이 그림 1과 같이 모델화된 벽(강체)을 누른다고 가정한다. 이 때 사람 손의 임의의 위치를 x 라고 하고 $\zeta(x)$ 가 다음 식 (1)과 같이 정의된다면 인간이 받는 탄성력 F_K 와 점성력 F_D 는 각각 식 (2)와 식 (3)과 같다.[8]

$$\zeta(x) = \begin{cases} 0 & x < X_w \quad (\text{자유공간}) \\ 1 & x \geq X_w \quad (\text{구속공간}) \end{cases} \quad (1)$$

$$F_K = K_e(x - X_w)\zeta(x) \quad (2)$$

$$F_D = D_e \dot{x} \zeta(x) \quad (3)$$

여기서, K_e 는 벽의 탄성 계수, D_e 는 점성 계수, X_w 는 벽의 위치를 나타낸다. 벽을 눌렀을 때 인간이 받는 전체 힘은 식 (4)와 같다.

$$F = \zeta(x)\{K_e(x - X_w) + D_e \dot{x}\} \quad (4)$$

이 힘은 벽과 손이 접촉한 순간의 힘이고, 점성과 탄성에 의존하고 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 40 khz의 진행파에 의해 동작하는 기계적인 마찰 구동형 초음파모터를 액츄에이터로 사용한다. 초음파모터는 위치센서인 엔코더(encoder)만을 가지고 위치정보에 따른 2상 입력 전원의 위상차를 조절함으로써 별다른 토크센서 없이 토크를 제어할 수 있다. 따라서 인간의 손에 유연히 대응할 수 있는 컴플라이언스 특성을 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다.[9, 10]

초음파 모터의 출력 토크 τ_0 를 수식으로 표현하면 식 (5)가 된다.

$$\tau_o = \tau - d\dot{\theta}_o - j\ddot{\theta}_o \quad (5)$$

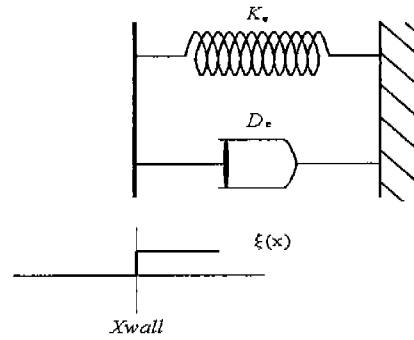


그림 1. 벽의 스프링-댐퍼 모델

Fig. 1 Spring-damper model

여기서 τ 는 모터발생토크, τ_o 는 모터출력토크, d 는 내부점성, θ_o 는 출력축 각도, j 는 내부 관성, θ_d 는 목표각도를 나타낸다.

여기서 τ_0 가 점탄성 특성을 가지려면 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$\tau_o = K(\theta_d - \theta_o) - D' \dot{\theta}_o \quad (6)$$

K : 탄성계수 D' : 점성계수

식 (5)에서 내부 관성 능률은 매우 소량이므로 $j = 0$ 이라 하고 식 (5)와 식 (6)을 이용하면 내부 토크 τ 가 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \tau &= K(\theta_d - \theta_o) - (D' - d)\dot{\theta}_o \\ &= K(\theta_d - \theta_o) - D\dot{\theta}_o \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 앞에서 언급한 식 (4)와 구속공간에서 유사함을 알 수 있다. 따라서 점탄성제어를 행하는 초음파모터 액츄에이터로 힘 반향 역감 장치(force display)를 실현했을 때 가상환경에서 인간이 느낄 수 있는 유연한 힘 F 를 잘 표현할 수 있다. 즉, 점·탄성 계수 K, D 를 조절함으로써 인간에게 다양한 가상 환경물에 대한 역감을 느낄 수 있게 하는 것이 바로 힘 반향 역감 장치의 원리이다.

본 연구에서는 초음파 모터의 위상차 제어를 이용하여 가상물체의 컴플라이언스 특성을 만들었다[11]. 초음파 모터는 엔코더의 각변위와 각속도에 따른 2상 전원의 위상차에 출력 토크가 비례하므로 탄성 및 점성계수를 실제 물체에 가깝게 설정하면 그 물체를 가상의 힘 공간에 표현할 수 있다.

3. 실험 및 고찰

A. 역감 장치 구성

본 연구에서 개발한 역감 장치는 세 개의 엔코더 장착 초음파모터와 엔드이펙터 사이에서 일어나는 변환 메커니즘을 이용한 데스크-탑형 디바이스이다. 엔드이펙터의 좌표는 엔코더의 출력 펄스를 통하여 계산되어 지고, 이 엔드이펙터의 위치 정보에 따라 x, y, z축 방향의 힘을 제어한다. 모터의 토크는 가볍고 단단한 링크에 대해 직접구동방식으로 전달된다. 이 링크의 끝은 수동적인 3 자유도를 가지는 엔드이펙터이다. 본 연구에서 실제 시험 제작한 역감 장치의 사진은 그림 2에 나타내었다.

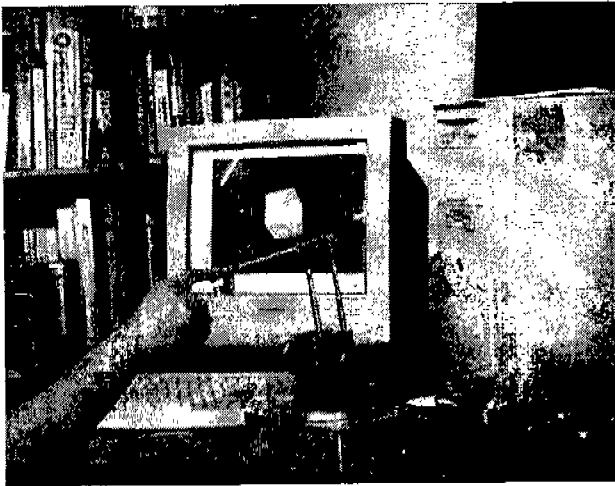


그림 2 힘 반향 역감 장치의 실제 모습
Fig. Photo of force-reflecting interface

전력변환회로 즉 전원 공급장치에서는 디지털회로에서 만든 두개의 5Vpp의 펄스를 2단 트랜지스터 스위칭 증폭회로와 펄스변압기(Pulse transformer)를 통해서 100Vpp를 증폭하여 초음파 모터의 A상과 B상에 각각 공급한다. 엔코더는 1 회전 당 1000 펄스의 분해능을 가지며, 엔코더 신호는 엔코더 어댑터에서 4 체배한 후 사용한다. 엔드이펙터의 좌표는 이 엔코더 값을 가지고 계산하며 충돌과 변위의 임피던스를 구한 후 햅틱 렌더러 알고리즘에 따라 모터의 구동 드라이버를 가동시킨다. [12]

초음파 모터 액추에이터의 점·탄성 제어는 그림 3에서 제시한 제어 블록에 의해서 엔코더 각도의 변화에 따라서 2상 구동 전압의 위상차를 제어하는 것에 의해서 실현하였다. 엔드 포인터가 가상물체와 충돌했을 때 그림 3의 시스템에서 보는 바와 같이 가상물체의 지역적인 정보는 목표각도로 나타낸다.

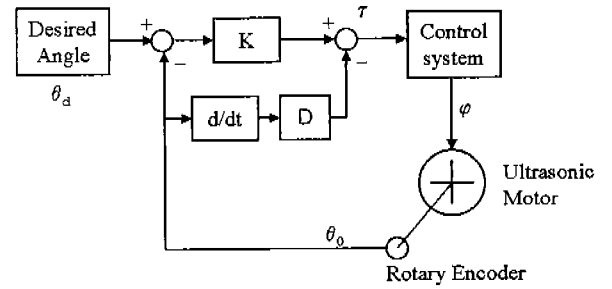


그림 3. 초음파 모터의 점·탄성 제어계
Fig. 3 Viscosity and Elasticity control system of actuator

이 때 내부 토크와 선형적인 관계를 가지는 위상차를 초음파 모터의 제어 신호로 입력하면 초음파 모터는 점 탄성 특성을 가지는 가상물체의 힘을 생성하게 된다. 엔코더의 변위를 피드백 신호로 사용하여 목표 위치와 엔코더의 각도 변위의 편차에 비례한 탄성 토크와 속도에 비례한 점성 토크를 제어함으로써 가상물체의 점 탄성 특성을 만들어 낸다.

초음파 모터는 토크센서를 사용하지 않고 위치변화만을 피드백 신호로 사용하기 때문에 기존의 힘 제한 제어에 비해서 제어시스템을 간단히 구성할 수 있을 뿐 아니라 응답이 빠른 잇점이 있었다.

B. 가상벽, 가상 버튼 실험

인간이 실제 벽을 만질 때 그림 1과 같은 점 탄성을 갖는 힘이 반응력으로 발생한다.

그림 4는 역감 장치가 제시한 벽에 대한 힘-변위 곡선이다. 역감 장치에 이미 내재한 가상 벽의 위치에 엔드이펙터가 충돌했을 때 역감 장치는 그래프와 같은 힘을 제시한다. 실제의 벽이라면 닿는 지점에서 더 이상 뚫고 들어 갈 수 없지만 역감 장치에서는 완벽한 강성을 지닐 수 없으므로 가상의 벽 안에서는 최대의 힘을 제시한다.

실제의 버튼은 목적에 따라 다양한 종류와 모양을 가지고 있다. 따라서 다양한 점 탄성을 갖는다. 그림 5는 인간이 실제 버튼을 누를 때 탄성 값과 발생하는 반응력을 나타낸다. 그림 6은 역감 장치에 의해 제공되는 가상 버튼의 변위에 따른 반응력을 측정하는 것이다. 처음의 완만한 경사는 버튼 안의 내장된 스프링의 탄성을 표현한 것이고 마지막의 일정한 곡선은 버튼을 끝까지 누른 상태를 나타낸다. 힘-변위 그래프는 첫 번째 경사 끝에서 잠시 끊어진 후 다시 일어난다. 이것은 버튼을 누를 때의 ‘딸깍’ 하는 느낌을 잘 표현해주고 있다.

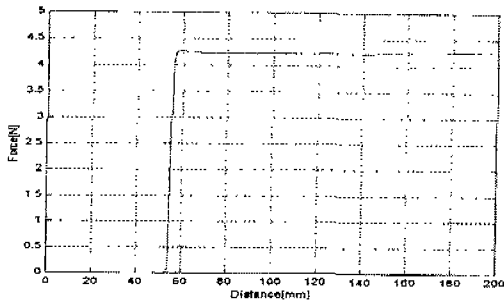


그림 4. 가상 벽의 힘-변위 곡선
Fig. 4 Force-distance curve of virtual wall

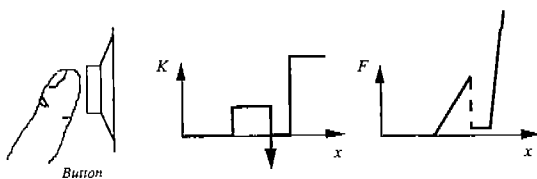


그림 5. 전형적인 가상 버튼 모델
Fig. 5 Typical model of virtual button

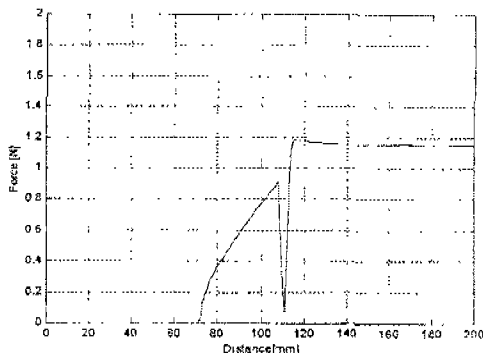


그림 6. 가상 버튼의 힘-변위 곡선
Fig. 6 Force-distance curve of virtual button

C. 고찰

초음파 모터의 위상차 제어에 의한 점·탄성 알고리즘을 사용하여 새롭게 제시한 힘 반향 역감 장치 시스템은 다음과 같은 세 가지 특징이 있다.

첫째, 자유공간에서 자유롭다. 즉, 자유공간에서 사용자가 엔드이펙터를 잡고 움직일 때 디바이스에 의한 어떤 구속도 받지 않는다는 뜻이다. 정적인 백드라이브 프릭션은 0.33 [Nms/rad] 이하이고 50 g 이하의 관성을 지닌다.

둘째, 최대 힘이 크다. 일반적인 전자식 서보 모터에 비해 초음파 모터는 토크가 크다. 또한 제어 루프와 구조에 강성을 지니게 되기 때문에 인터페이스를 통해 표현된 가상 물체들은 각각 다른 유연한 특성을 지니게 된다. 실시간 역감 제어 알고리즘을 사용하

여 이 역감 장치의 최대 강성은 약 60 [N/cm] 이다. 얻어진 강성은 디바이스의 고유 주파수에 의존하는 것이 아니고 액추에이터의 센서 분해능에 따른다.

셋째, 백러시가 없다. 디바이스의 동력전달 부분은 직접구동방식을 이용한다.

넷째, 작동 범위가 충분하다. 토크 증폭을 위한 기어나 풀리를 사용하지 않고 직접구동방식을 사용함으로써 구조적인 부피 증가와 작업공간 감소나 행동의 제약이 없다.

4. 결 론

본 논문에서는 초음파 모터를 사용하여 직접구동방식으로 능동적 3자유도를 지닌 힘 반향 역감 장치를 설계하였다. 이 역감 장치는 세 개의 엔코더 장착 초음파 모터와 엔드이펙터 사이에서 일어나는 변환 메커니즘을 이용한 데스크-탑형 디바이스이다.

이 역감 장치를 통하여 인간이 그의 손으로 엔드이펙터를 잡고 컴퓨터가 만들어낸 가상 환경 속의 물체들을 느낄 수 있었고 변형시킬 수 있었다. 앞으로 이 장치를 사용하여 원격제어용 마스터 로봇과 스케일을 달리한 슬래브 로봇으로 응용될 수 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Gradecki, J. : The Virtual Reality, New York : John Wiley & Sons, 1994
- [2] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "Force Reflecting Interface" U.S. Patent pending. Filed Oct 1, 1993.
- [3] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "A Device for Probing Virtual Objects," Proc. of ASME Winter Annual Meeting, Chicago, 1994.
- [4] H. Iwata, "Pen Based Virtual Environment," VRAIS '93. 287-292, 1993.
- [5] Sarcos Inc., Manufacturers of the Sarcos Exoskeleton. Salt Lake City, Utah.
- [6] Minsky, M. : Computational s: The Sandpaper System for Synthesizing Texture for a Force-Feedback Display. Ph. D. dissertation, MIT, 1995.
- [7] Ebner, M. and Wallace, R. S. : A direct-drive hand : Design, Modeling and Control. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation. 1668-1673, 1995.
- [8] J. E. Colgate and J. M. Brown, "Factors affecting the Z-Width of a Interface," Proc. of the IEEE on Robotics and Automation. 3205-3210, 1994.
- [9] Sashida, T. and Kenjo, T. : An Introduction to Ultrasonic Motors. Oxford : Clarendon Press, 1993.
- [10] Kato, A., Ito, K. and Ito, M. : Adjustable Compliant Motion of Ultrasonic Motor. Journal of Robotics and Mechatronics. Vol. 5, No. 5, 1993.
- [11] 김 영동, 오금곤 : "초음파 모터의 위상차 제어" 조명·전기설비학회지, 66-74, 1996,
- [12] Zilles C. and Salisbury J. K. : Constraint Based God Object Method for Display, Proc. of the IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems. Pittsburgh, Pennsylvania, 1995.