근감과 진동촉감 피드백을 제공하는 햅틱 인터페이스용 새로운 소형 액추에이터의 개발

Development of a New Miniature Actuator providing both Kinesthetic and Vibrotactile Feedback for Haptic Interface

표 동 범¹, 류 세 민², 한 병 길³, 권 동 수[†]

Dongbum Pyo¹, Semin Ryu², Byung-Kil Han³, Dong-Soo Kwon[†]

Abstract This paper presents a new miniature haptic display to convey ample haptic information to a user of a handheld interface. There are buttons on interfaces or general electronic devices, but existing buttons provide haptic feedback of only one passive pattern to a user. Because humans perceive tactile and kinesthetic information simultaneously when they handle objects the proposed actuator provides both sensations at once. It is able to generate various levels of kinesthetic sensations when pressing a button under diverse situations. Also, vibrotactile feedback can be delivered for exciting haptic effects with numerous patterns. Its performance was evaluated in accordance with the resistive force by changing the intensity of the input current. Experiments show that the proposed actuator has the ability to provide numerous haptic sensations for more realistic and complex haptic experiences.

Keywords: Haptics, Kinesthetic Feedback, Vibrotactile Feedback, Handheld Haptic Interface

1. 서 론

인간이 인지하는 촉각은 근감과 촉감의 두 가지 감각으로 나눌 수 있다. 인간은 팔의 위치와 움직임, 근육에서의 자극 변화를 통해 물체의 모양, 단단한 정도 등의 근감각 정보를 인지하고, 피부의 변형 즉, 반들반들한 피부 속 기계적 감각 수용기 자극을 통해 촉감을 인지하게 된다.^[1] 하지만, 인간이 일상생활에서 물체를 잡고 다룰 때 근감각 정

보와 촉감 정보를 동시에 인지하기 때문에, 좀 더 현실적이고 다양한 햅틱감각을 재현하기 위해서는 햅틱 디스플레이가 근감과 촉감의 두 가지 감각을 모두 제시하는 것이 바람직하다.^[2] 지금까지 두 가지 감각을 제공하는 햅틱 시스템이나 인터페이스를 개발하여 햅틱 효과의 유용성을 평가하는 연구가 지속적으로 이루어져 왔고 많은 연구자들이 촉감을 정교하게 전달할 수 있는 배열형태의 촉감장치를 힘 피드백 장치에 결합하는 시도를 해왔다. 예를 들어, Ekie 등은 PHANToM에 진동성의 촉감 핀 배열장치(vibrotactile pin array)를 결합하여 질감을 렌더링할 수 있는 TextureExplore라는 햅틱 디스플레이를 개발하였고, 촉감과 근감의 자극이 동시에 전달되었을 때 사용자가 질감을 더 정확하고 빠르게 인지한다는 것을 보여주었다.^[3] Sato 등은 전극을 매트릭스 형태로 배열한 촉감장치(electrotactile display)를 PHANToM Omni에 결합하여 사용자에게 촉감과 근감을 동시에 제공할 수 있는 햅틱 장치를 제시하였다.^[4] Fritschi 등은 다기능 모듈 개념의 근감-촉감각 장치

Received : May 31, 2013; Reviewed : Jun. 25, 2013; Accepted : Jul. 29, 2013

※ This work was supported by the IT R&D program of MKE/KEIT, [2009-S-035-01, Contact-free Multipoint Realistic Interaction Technology Development]

¹ Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (pyodb@robot.kaist.ac.kr)

² Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (ryusm@robot.kaist.ac.kr)

³ Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (hanbk@robot.kaist.ac.kr)

[†] Corresponding author: Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea (kwonds@kaist.ac.kr)

를 제안하였는데, 전단력을 전달하는 촉감장치와 VirTouch Mouse를 각각 자신들이 개발한 근감각 장치인 VisSHaRD에 결합해 넓은 영역에서 다양한 햅틱 피드백을 생성하여 사용자평가를 통해 사용자가 느끼는 실재감이 향상됨을 보여주었다.^[2] Kim 등은 공압을 이용한 촉감장치를 PHANToM에 결합하여 가상환경에서 오브젝트를 조작하는 간단한 실험을 수행하였고, 촉감 피드백이 더해졌을 때 주어진 일을 수행하는 데 걸리는 시간이 단축됨을 보였다.^[5] 이와 같이 최근의 햅틱기술은 컴퓨터 그래픽 기술의 발전과 더불어 가상환경에서의 효과적인 상호작용을 위한 렌더링 기법이나 장치개발에 초점이 맞춰지고 있다. 모바일 기기나 리모트 컨트롤러와 같이 손으로 쥐고 조작하는 인터페이스의 경우, 가격, 무게, 소비전력의 제한 조건하에서 햅틱 효과를 생성하기 위해 진동자극을 통한 피드백을 제공하고 있다.^[6] 그러나 이를 위해 개발된 진동모터들이 다양한 패턴을 통해 햅틱 효과를 생성하고 있지만, 근감각이 주요한 역할을 하는 상황에서 적절한 햅틱피드백을 제공하지 못하고 있다.^[7,8] 예를 들어, Nintendo Wii나 Sony PlayStation Move와 같은 리모트 컨트롤러의 경우 내장된 모터가 다양한 형태의 진동촉각 피드백을 생성하면서 사용자에게 실감나는 가상환경을 제공해 주지만, 버튼을 누를 때는 손끝에 직접적으로 어떠한 근감각 피드백도 제공하지 못한다.^[9,10] 따라서 본 논문은 촉감과 근감각 정보가 동시에 제공되었을 때의 효용성에 대한 기존의 연구에 근거하여 두 가지 감각을 모두 제공하는 소형의 액추에이터를 제안한다. 제안하는 1자유도의 액추에이터는 다자유도의 힘 피드백 장치와 비교하여 크기와 소비전력이 작아 휴대용 기기에 내장되기에 적합하고,^[6] 가상환경 내의 오브젝트나 아이콘의 속성에 따라 사용자의 손끝에 직접적으로 다양한 레벨의 근감각과 진동패턴을 통한 촉감을 전달할 수 있다. 따라서 제안하는 액추에이터는 기존의 휴대용 인터페이스에서 제시하는 단순한 진동 이상의 햅틱효과를 생성할 수 있는 가능성을 제시한다.

2. 새로운 소형 액추에이터의 설계

2.1 개념 설계

새롭게 제안하는 액추에이터는 전자기학을 기반으로 전자기 상호작용에 의해 작동하며 기존의 버튼과 달리 사용자에게 다양한 햅틱 효과를 제공할 수 있는 다기능 햅틱 버튼이다. 그림 1은 제안하는 액추에이터의 분리사시도와 단면도, 그리고 버튼을 누를 때 내부에서 움직이는 질량체

를 보여준다. 전기신호로부터 기지력을 생성하는 솔레노이드 코일이 하우징 안에 고정되어 있으며 코일 안을 질량체가 상하로 움직이며 반력을 생성하는 구조를 갖고 있다. 질량체는 영구자석과 자속이동경로(Cap, Support, Push Plate, Linear Guide)로 구성되어 있다. 자성체와 솔레노이드 코일만의 상호작용에 의한 전자기력의 변화는 다양한 레벨의 근감각을 생성하기에 너무 작기 때문에 영구자석의 자기력을 이용하였다. 기존의 진동모터가 vcm(voice coil motor)의 원리를 이용하여 진동을 생성하는데 반해 제안하는 액추에이터는 한 쪽 방향으로의 입력신호 레벨을 제어하여 다양한 반력을 생성한다. 전자기력과 자기력을 효율적으로 사용하기 위해서 자속이동경로의 역할을 하는 요소들(Cap, Support, Solenoid Core, Core Cover)은 자기저항을 최소화시킬 수 있는 자성체를 사용하였고, 영구자석과 솔레노이드 코일간의 전자기상호작용에 의한 힘의 크기를 최대로 활용할 수 있도록 설계되었다. 액추에이터의 크기는 지름 11mm, 높이 11mm로 휴대용 인터페이스에 내장되기에 충분히 작고, 눌리는 깊이는 1.5mm로 버튼을 눌렀을 때 다양한 햅틱 피드백을 사용자에게 전달하기 충분하다.

기존에 가상환경에서 버튼의 일반적인 거동의 프로파일 일을 모사하기 위해 두 개의 가상스프링으로 모델링한 연구가 있었다. 초기에 눌리는 부분은 강한 반력의 스프링으로 사용자에게 상대적으로 강한 힘을 요구하는 한편, 이후엔 약한 강성의 스프링에 의해 버튼이 급격하게 떨어지며 버튼의 거동을 모사하게 된다.^[5,11] 제안하는 액추에이터도 이와 같은 방법으로 버튼을 누를 때의 근감각 피드백을 생

Fig. 1. Overall structure of the proposed actuator

성하였다. 사용자는 초기에 스프링의 강한 강성에 의해 누르는 힘을 점점 증가시키게 되고, 한계점이 지나는 순간 버튼이 내려가며 급격한 반력의 감소를 느낄 수 있다.

2.2 시뮬레이션 결과

그림 2는 이전에 언급한 일반적인 버튼의 프로파일을 MAXWELL 3D 시뮬레이션 툴을 이용하여 생성하는 과정을 나타낸다. 그림. 2(a)는 질량체의 움직임에 따른 영구자석에 의한 자장과 자속밀도를 보여준다. 초기에 검정색 화살표에 나타난 것과 같이 자속이동경로를 따라 자기력선이 형성되는데, 버튼을 누르면서 질량체가 아래로 내려감에 따라 자기회로의 자기저항이 증가하며 자기장에 의한 자기력이 비선형적으로 감소하게 된다. 회로의 자기저항은 공

(a) Interaction between magnetic force and restoring force

(b) Magnetic force profile applied to the mass

Fig. 2. Simulation results : Physical button force response pattern generation process

극의 거리에 가장 크게 영향을 받기 때문에 자속이동경로는 버튼이 눌림에 따른 자기저항이 최소화될 수 있도록 경사면으로 설계되었다. 스프링의 반력은 버튼이 눌림에 따라 선형적으로 증가하게 되는데 이는 끝 단계에서의 자기력을 보상하기 위함이다. 그림. 2(b)는 코일에 전류를 인가하기 전, 버튼이 눌리는 깊이에 따라 질량체에 가해지는 힘 프로파일을 나타낸다. 그래프의 x축은 사용자가 버튼을 누

(a) Flux combination between the magnetic and electromagnetic field

(b) Applied resistive force to the mass

(c) Vibrotactile feedback possible region

Fig. 3. Change of the resistive force according to the intensity and direction of the input current

를 때 질량체가 눌리는 깊이를 의미하고, y축은 이 때 사용자가 느끼는 반력을 의미한다. 거리에 따른 영구자석과 자성체 간의 인력은 점선으로 나타내었고, 스프링의 복원력이 더해져 최종적으로 사용자가 느끼는 반력의 프로파일은 실선과 같다. 양의 부호는 질량체의 위쪽 방향으로, 음의 부호는 아래방향으로 작용하는 힘을 의미한다. 이전에 언급했듯이, 사용자는 초기의 강한 반력때문에 누르는 힘이 점점 증가하다가 약 2.7N 이상이 되는 순간 한계점을 지나 쉽게 눌리는 것을 느낄 수 있다. 그림. 3(a)는 같은 위치에서, 코일에 전류를 인가하였을 때 질량체에 가해지는 전체 힘을 개략적으로 보여준다. 영구자석에 의한 자기력과 스프링에 의한 복원력은 그림. 2(a)와 같으며 코일에 의해 발생하는 전자기력의 방향에 따라 전체 반력의 크기가 정해진다. 첫 번째 그림은 자기력과 전자기력이 더해져 강한 반력을, 두 번째 그림은 자기력만에 의한 반력을, 세 번째 그림은 전자기력이 자기력을 상쇄시켜 약한 반력을 생성하는 경우이다. 이와 같은 원리로, 코일에 인가하는 전류의 방향과 크기를 조절하면 그림. 3(b)와 같이 다양한 레벨의 버튼 클릭 감응을 제공할 수 있다. 또한 전류의 주파수를 변화시켜주면, 반력의 세기가 주파수에 따라 변하므로 사용자는 버튼을 누르는 동안 마치 진동 피드백을 받는 착각을 하게 된다. 하지만 일정한 크기 이상의 전류를 인가하면 즉, 전자기력의 크기가 자기력의 크기보다 커질 경우, 질량체는 일반 진동모터와 같이 상하로 진동하게 되는데, 그림. 3(c)의 그래프를 보면 0.2mm 이상의 스트로크에서 전류의 주파수 변화에 따라 질량체가 능동적으로 상하로 가속될 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 사용자 평가

근감각과 진동촉감을 모두 생성할 수 있는 본 논문의 액추에이터의 유용성을 평가하기 위해 간단한 사용자평가를 수행하였다. 평가의 목적은 사람이 얼마나 많은 근감각 레벨과 진동의 주파수를 인지할 수 있는지를 밝혀내는 것이다.

3.1 피실험자

피실험자는 총 6명(남자 6명, 23-27세, 평균 25.2세)으로 실험을 수행하며 촉감을 느끼기에 아무런 장애가 없는 인원으로서 구성하였고, 주변과 액추에이터의 소음이 차단된 환경에서 햅틱감응에 집중할 수 있도록 하기 위해 헤드폰을 착용하도록 하였다.

3.2 실험 장비

실험을 위한 장비는 그림. 4에서와 같이 개발한 액추에이터, 입력신호의 크기와 주파수를 조절하기 위한 마이크로프로세서(ATMega128)를 포함한 제어보드, 그리고 마이크로프로세서와의 통신을 위한 PC로 간단하게 구성되어 있다. 손가락이 닿는 액추에이터의 접촉면은 피실험자가 햅틱정보를 받아들이기에 충분하고, 눌리는 깊이는 1.5mm로 다양한 햅틱 피드백을 전달하기에 충분하다. 실험에 사용된 액추에이터에서의 최대 반력은 4.3N, 최소 반력은 0.9N이며, 진동축감은 0Hz부터 250Hz까지의 주파수변조를 이용하였다.

Fig. 4. Experimental setup for the usability test

3.3 실험 개요

3.3.1 실험 I : 어떤 자극이 더 단단한가?

실험1은 사용자가 얼마나 많은 단계의 근감을 구분해 낼 수 있는지를 밝히는 실험이다. 그림. 5에서와 같이 한 번에 두 가지 반력이 제시되고, 다섯 가지 단계의 반력이 무작위로 섞여 총 60번을 시행하게 된다. 피실험자들이 모두 오른손잡이이므로 왼손으로 마우스를 움직이고 클릭하며, 오른손으로 두 가지 타입, 'input A'와 'input B'의 반력을 느낀 후 어떤 타입이 더 강한지, 혹은 같은지에 대해 답을 한다. 피실험자가 선택을 하면 결과는 자동으로 저장되고 그 다음의 반력이 한 쌍으로 제공된다.

Fig. 5. GUI for recording user selections

3.3.2 실험 II : 어떤 자극이 더 높은 주파수의 진동인가?

실험2는 사용자가 얼마나 많은 종류의 진동의 주파수를 구분할 수 있는지에 대한 실험이다. 개발한 액추에이터에서 생성하는 진동은 임팩트 타입이기 때문에 0Hz에서 250Hz까지 거의 일정한 크기의 진동을 제공하게 된다. 실험방법은 실험I과 동일하며, 버튼이 0.2mm 정도 눌리면서부터 진동이 생성되므로 사용자에게 버튼을 천천히 누르면서 그 주파수를 인지하도록 요구하였다. 주파수 인지실험은 저주파 대역과 고주파 대역을 나누어서 실행하였다. 저주파에서의 실험은 1Hz에서 40Hz 중 테이블 2에 제시한 7가지의 주파수를 무작위로 섞어 총 112번을 시행하게 되고, 고주파에서의 실험은 테이블 3에 제시한 60Hz에서 250Hz 중 6가지의 주파수를 무작위로 섞어 총 84번을 시행하게 된다. 피실험자는 그림 5에서 보여지는 세 가지 선택지(A, SAME, B) 중 한가지를 선택하게 된다.

3.4 실험 결과

3.4.1 실험I : 어떤 자극이 더 간단한가?

실험I에서는 테이블 1과 같이 반력을 총 다섯 단계로 나누어서 사용자가 각각을 구분하여 어떤 것이 더 간단한지를 선택하는 실험을 하였다. 세로축과 가로축의 힘은 입력 전압이 각각 -5, -3, 0, 3, 5V일 때 생성되는 힘이다. 결과를 보면 사용자는 액추에이터에서 제시하는 다섯 단계의 반력을 거의 모두 구분해낼 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

3.4.2 실험 II : 어떤 자극이 더 높은 주파수의 진동인가?

첫 번째 실험은 40Hz 이하의 저주파 대역에서 개발한 액추에이터가 생성하는 임팩트 타입의 진동을 구분하는 것으로, 피실험자가 거의 대부분의 진동을 구분해낼 수 있다는 것을 알 수 있다. 두 번째 실험은 고주파 대역에서의 진동을 구분하는 것으로, 피실험자는 몇 개의 가까운 두 주파수 영역을 제외하고는 대부분의 다른 자극을 구분할 수 있

Table 1. Results from Experiment I : test for kinesthetic sensations

Force(N)	0.90	1.28	2.50	3.55	4.33
0.90	87.5%	87.5%	91.67%	100%	100%
1.28		91.67%	95.83%	91.67%	95.83%
2.50			91.67%	87.5%	95.83%
3.55				75%	91.67%
4.33					83.33%

Table 2. Results from Experiment II : test for vibrotactile sensations at a low frequency

Freq. (Hz)	1	3	5	10	20	30	40
1	100%	87.5%	91.67%	100%	100%	100%	100%
3		95.83%	45.83%	83.33%	100%	100%	100%
5			100%	83.33%	95.83%	100%	100%
10				100%	95.83%	100%	100%
20					95.83%	83.33%	91.67%
30						91.67%	41.67%
40							100%

Table 3. Results from Experiment : test for vibrotactile sensations at a high frequency

Freq. (Hz)	60	80	100	150	200	250
60	95.83%	41.67%	75%	91.67%	100%	100%
80		95.83%	37.5%	75%	83.33%	87.5%
100			95.83%	66.67%	79.17%	83.33%
150				100%	45.83%	54.17%
200					100%	4.17%
250						100%

었다. 저주파에서의 실험에 비해 정답률이 낮지만 개발한 액추에이터로 고주파 영역에서도 다양한 촉감 피드백을 제시할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 다양한 진동촉감과 근감을 동시에 생성하여 사용자의 손끝에 직접적으로 전달할 수 있는 새로운 소형의 햅틱 액추에이터를 제안하였다. 액추에이터의 크기는 지름과 높이가 11mm로 휴대용 인터페이스에 내장되기에 충분히 작고, 눌리는 깊이는 1.5mm로 사용자에게 다양한 햅틱 피드백을 제시하기에 충분하며, 액추에이터의 작동 메커니즘은 Maxwell FEM 상용 툴을 통해 검증하였다. 사용자 평가를 통해 개발한 액추에이터가 다양한 레벨의 근감각 피드백을 통해 기존의 버튼과는 차별화된 버튼 클릭 감응을 제시할 수 있음을 보여주었다. 또한 0Hz에서 250Hz의 광범위한 주파수 영역에서 임팩트 타입의 진동을 생성하여 인간의 기계적 감각 수용기를 다양하게 자극할 수 있음을 확인하였다. 따라서 근감각과 진동촉감의 다양한 조합으로, 인터페이스를 사용하는 사용자에게 좀 더 풍부하고 실재감 있는 햅틱정보를 느낄 수 있는 가능성을 보

여주었다. 또한 이러한 다기능 버튼타입의 액추에이터를 통해 사용자에게 게임환경 또는 가상의 3D 환경에서 시청각 이외의 효과적인 햅틱피드백을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] B.-H. Kim, B.-J. Yi, S.-R. Oh, and I.H. Suh, "Independent finger and independent joint-based compliance control of multifingered robot hands", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 19, no.2, pp.185-199, April, 2003.
- [2] P.J. McKerrow, *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley, 1992
- [3] Ikei, Y., and Shiratori, M. TextureExplorer: A tactile and force display for virtual textures. *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2002* (Orlando, Florida, March 24-25, 2002), HAPTICS 2002, Proceedings, The 10th Symposium on, pages 327-334. IEEE, March 2002.
- [4] Sato, K., Kajimoto, H., Kawakami N., and Tachi, S. Electrotactile display for integration with kinesthetic display. *Robot and Human interactive Communication, 2007* (Jeju, Korea, August 26-29), RO-MAN 2007, The 16th IEEE International Symposium on, pages 3-8. IEEE, August 2007.
- [5] Kim, Y., Oakley, I., and Ryu, J. Combining point force haptic and pneumatic tactile display. *Proceeding of EuroHaptics 2006* (Paris, France, July 3-6, 2006), pages 306-316.
- [6] MacLean, K. E., Shaver, M. J., Pai, D. K. Handheld Haptics: A USB media controller with force sensing. *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2002* (Orlando, Florida, March 24-25, 2002), HAPTICS 2002, Proceedings, The 10th Symposium on, pages 311-318. IEEE, March 2002.
- [7] Fukumoto, M., and Sugimura, T. Active Click: Tactile feedback for touch panels. *CHI '01 extended abstracts on Human factors in computing systems* (Seattle, Washington, March 31-April 5, 2001), pages 121-122. ACM, 2001.
- [8] Pyo, D., Yang, T. -H., Ryu, S., Han, B. K., Park, J. S., and Kwon, D., -S. Development of an impact-resonant actuator for mobile devices. *Proceeding of EuroHaptics 2012* (Tampere, Finland, June 12-15, 2012), Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication, Lecture Notes in Computer Science, Volume 7283, 2012, pages 133-138.
- [9] <http://www.nintendo.com/wii>
- [10] <http://us.playstation.com/ps3/playstation-move/>
- [11] Raymaekers, C., and Coninx, K. Menu interactions in a desktop haptic environment. *Proceeding of Eurohaptics 2001* (Birmingham, GB, July 1-4), pages 49-53.

표 동 범

2010 고려대학교 기계공학

(공학사)

2012 한국과학기술원 로봇공학

(공학석사)

2012~현재 한국과학기술원 기계공학 박사과정

관심분야 : Haptics, Robotics

류 세 민

2011 부산대학교 기계공학

(공학사)

2013 한국과학기술원 기계공학

(공학석사)

2013~현재 한국과학기술원 기계공학 박사과정

관심분야 : Haptic Actuator, Haptic Rendering

한 병 길

2008 한동대학교 기계공학
(공학사)
2010 한국과학기술원 기계공학
(공학석사)
2010~현재 한국과학기술원 기
계공학 박사과정

관심분야 : Haptic Rendering, HCI

권 동 수

1980 서울대학교 기계공학
(공학사)
1982 한국과학기술원 기계공학
(공학석사)
1991 미국 Georgia Institute of
Technology Robotics
(공학박사)

1991~1995 미국 Oak Ridge 국립연구소 선임 연구원
1995~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수
관심분야 : HRI, Haptics, Medical Robots