

손끝 움직임 인식과 질감 표현이 가능한 촉각정보 입출력장치

윤 세 찬* · 조 영 호*†

* 한국과학기술원 바이오및뇌공학과

Tactile Transceiver for Fingertip Motion Recognition and Texture Generation

Sechan Youn* and Young-Ho Cho*†

* Dept. of Bio & Brain Engineering, KAIST

(Received April 24, 2012 ; Revised March 21, 2013 ; Accepted March 29, 2013)

Key Words: Tactile Interface(촉각인터페이스), Tactile Display(촉각 디스플레이), Texture Generation(질감생성), Tactile Device(촉각소자)

초록: 본 논문은 정전기력을 이용한 마찰력 변조를 이용하여 손끝을 통한 촉각정보의 입출력을 동시 구현하는 소자를 제안하였다. 기존의 촉각소자들이 촉각정보의 입력 및 출력을 개별적으로 구현한 것에 비해 본 연구는 손끝의 수직/수평 방향 동작 인식과 질감 구현을 동시에 구현하였다는 점에서 차별성을 가진다. 실험분석을 통해 검증한 손끝 동작 인식기능은 수직방향의 클릭의 경우 0.146nF/40 μ m, 수평방향의 경우 0.09nF/750 μ m의 정전용량 변화를 통해 인식 가능하였으며, 질감 구현의 경우 정전기적 인력을 통해 마찰력을 32~152mN의 범위에서 제어할 수 있음을 확인하였다. 교류전압을 이용한 수평적 진동은 60V, 3Hz에서 최대 128.1mN의 마찰력 변조를 구현하였으며, 이는 기존 연구 대비 32% 향상을 보여준다. 본 연구는 손끝에서 정보의 입출력을 동시 구현하여 정보기기의 촉각인터페이스에 적용 가능하다.

Abstract: We present a tactile information transceiver using a friction-tunable slider-pad. While previous tactile information devices were focused on either input or output functions, the present device offers lateral position/vertical direction detection and texture expression. In characterizing the tactile input performance, we measured the capacitance change due to the displacement of the slider-pad. The measured difference for a z-axis click was 0.146 nF/40 μ m when the x-y axis navigation showed 0.09 nF/750 μ m difference. In characterizing the texture expression, we measured the lateral force due to a normal load. We applied a voltage between parallel electrodes to induce electrostatic attraction in DC and AC voltages. We measured the friction under identical fingertip action conditions, and obtained friction in the range of 32–152 mN and lateral vibration in the force range of 128.1 mN at 60 V, 2 Hz. The proposed device can be applied to integrated tactile interface devices for mobile appliances.

- 기호설명 -

- μ : 마찰계수
- ϵ : 유전율
- E : Young 계수
- A : 전극의 중첩면적
- k : 스프링 계수
- V : 구동전압
- g : 전극간 간격

1. 서론

최근 인간의 촉각을 기반으로 한 정보 입출력 장치의 개발 및 응용이 급속히 확대되고 있다. 그러나 이는 터치스크린과 터치패드와 같은 정보 입출력장치에 국한되어 있으며, 촉각을 통한 정보의 출력기능은 그 개발수준이 초기단계에 있다. 인간이 손끝에서 느끼는 질감은, 손끝의 피부가 받는 수평방향의 힘에 인한 피부의 변형, 그리고 피부의 수직방향 진동의 조합으로 만들어지는데⁽¹⁾ 각 촉각요소에 대한 수용 역시 피부에 존재하는 5

† Corresponding Author, nanosys@kaist.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

종의 촉각수용체에서 이루어진다(Fig. 1). 기존 연구는 압전구동기,^(2,3) 폴리머구동기,^(4,5) 전자기구동기⁽⁶⁾ 및 열공압 구동기^(7~11) 등을 이용하여 수직적인 진동 및 패턴을 출력하는 방식과, 손가락과 전극간의 정전기력을 통해 수평방향의 마찰력을 가하는 방식^(12,13)으로, 수직/수평방향의 자극을 동시에 구현하지 못하였으며, 촉각정보의 입력기능과의 집적이 숙제로 남아있다. 이에 본 논문에서는 마찰력 변조가 가능한 슬라이더 패드를 이용하여 손끝 움직임의 입력과 질감의 출력을 동시에 구현하는 신개념의 촉각정보 입출력장치를 제안하고자 한다

2. 동작원리

2.1 소자 구성 및 동작원리

촉각정보 입출력장치는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 슬라이더층(Slider Layer), 전극층(Electrode Layer)으로 구성되어 있다. 슬라이더층은 1.5×1.5cm² 크기에 3 자유도를 갖고 손가락이 접촉하는 슬라이더패드와 스프링에 연결된 구조로 마찰력 변조를 위한 전극과 위치감지 공통전극을 포함한다. 바닥층은 마찰력 변조 전극과 4개의 개별적인 위치감지 전극을 갖는데, 슬라이더 패드상의 공통전극과의 상대적 위치에 따라 변화하는 커패시턴스를 바탕으로 z축 및 x-y축의 움직임을 인식할 수 있게 설계되었다.

2.2 손끝 방향 인식 원리

본 연구의 촉각정보 입출력 장치는 손끝의 수직/수평방향 움직임을 커패시턴스 변화를 통해 인식

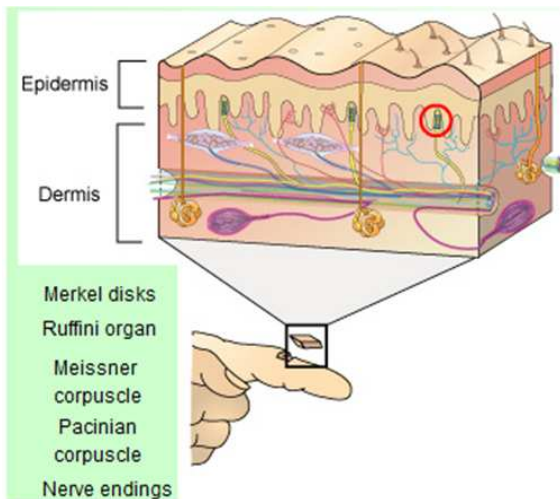


Fig. 1 Mechano-receptors in human skin

이 가능하다. 초기상태에는 슬라이더패드와 전극층이 40μm의 간격으로 분리되어 있어, 이들 사이의 공기층으로 인해 식별 가능한 커패시턴스가 측정되지 않으나 손끝으로 힘을 가해 선택(click) 동작 입력시(Fig. 3(a)) 두 전극이 밀착되면서 커패시턴스가 급격히 증가, 선택 동작의 인식이 가능하다. 또한, 그 상태에서 슬라이더패드를 수평적으로 이동시킬 경우(Fig. 3(b)) 공통전극 S와 각 전극(E1, E2, E3, E4)의 중첩면적이 각각 달라져(Fig. 4(a)), 커패시턴스의 상대적인 차이를 유발하게 된다. 이는 Fig. 4(b)에 도시된 바와 같이 전극별 커패시턴스 변화를 바탕으로 슬라이더패드의 이동방향을 유추하여 손끝의 움직임을 인식할 수 있는 원리를 가지고 있다.

2.3 질감 생성의 원리

피부가 인지하는 질감은, 피부표면의 측방향 힘(마찰력)과 진동의 조합으로 구성된다. 이에 본 연구에서는 슬라이더패드와 전극층 사이에 전압을 인가하여 정전기적 인력을 발생, 마찰력을 인위적으로 조절함으로써 피부가 느끼는 질감을 인공적으로 구현하였다. 외부의 전압이 인가되지 않은 상태에서 손끝으로 슬라이더패드를 누르며 x-y 방

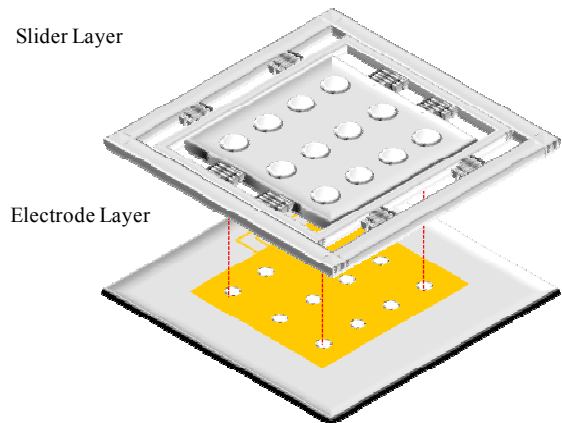


Fig. 2 Two layer structure of tactile transceiver: (upper) slider layer including slider-pad and electrode suspended by springs; (lower) electrode layer

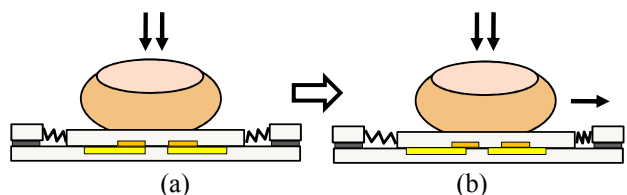


Fig. 3 Principle of direction and selection recognition: (a) fingertip motion for selection; (b) directional movement

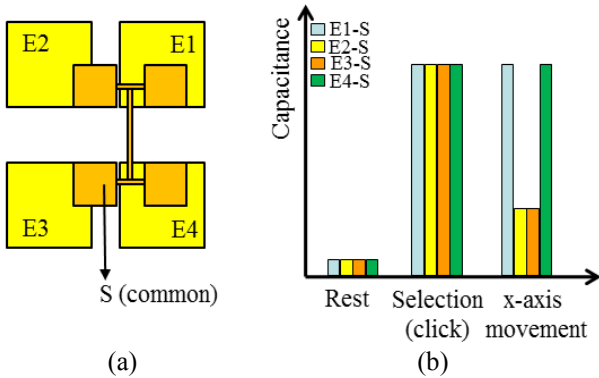


Fig. 4 Capacitance change due to slider-pad position: (a) electrode position; (b) capacitance change of each electrode

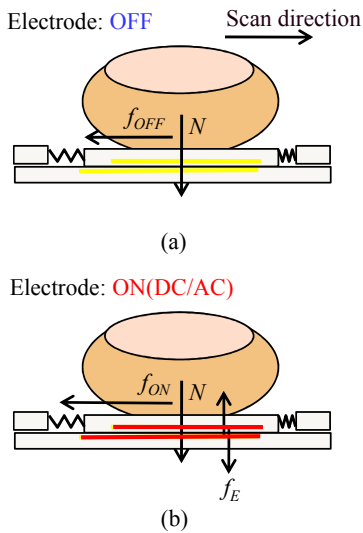


Fig. 5 Principle of artificial texture generation: (a) frictional force generated by fingertip pressure; (b) enlarged frictional force due to the electrostatic attraction force between electrodes

향으로 이동시킬 경우(Fig. 5) 손끝에 전달되는 수평력은 아래의 식 (1)과 같이 나타난다.

$$f_{OFF} = \mu N + 4k(\bar{x} + \bar{y}) \quad (1)$$

이때, 슬라이더층과 전극층 사이에 전압(V)을 인가할 경우 전극간에 정전기적 인력이 발생하여 마찰력은 인력과 수직항력의 합의 함수로 나타나게 되어 손끝에 가해지는 수평력은 다음과 같이 변화한다.

$$f_{ON} = \mu(N + \frac{\epsilon A V^2}{2g^2}) + 4k(\bar{x} + \bar{y}) \quad (2)$$

이를 바탕으로 사용자가 느끼는 마찰력을 인위적으로 제어 가능하며, 또한 전압(V)을 교류로 인가하여 마찰력을 동적으로 변조할 경우

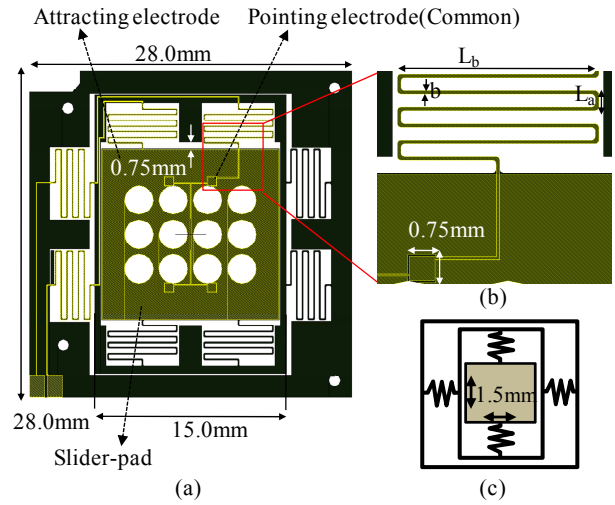


Fig. 6 Slider layer design: (a) overall structure including slider-pad and electrodes; (b) enlarged view of serpentine spring and electrode; (c) simplified model of 3-DOF slider-pad

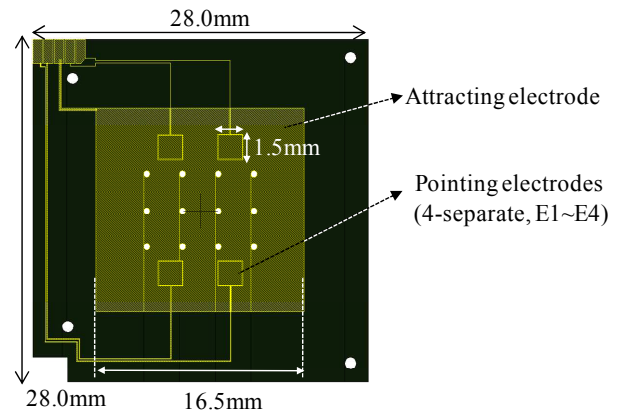


Fig. 7 Electrode layer design including attraction electrode and 4-separate pointing electrodes

(Fig. 5(b)) 손끝 피부에 수평적 진동을 유발하여 질감의 기본 구성요소인 수평적 힘과 진동의 동시구현이 가능하다.

3. 설계 및 제작

3.1 구성요소 설계

슬라이더층은 Fig. 6(a)와 같이 1.5×1.5cm² 크기의 슬라이더패드 8 개의 스프링에 연결되어 있는 구조를 가지고 있다. 스프링의 길이(L_b)는 1.2mm, 폭(L_a)은 0.6mm, 두께(b)는 80μm 로 설계 하였으며, 슬라이더패드는 Fig. 6(c)에 간략화된 형태와 같이 총 3 자유도의 움직임이 가능하다. 슬라이더층 아래에서 슬라이더층과 맞닿는 전극층(Fig. 7)은 정전기적 구동 전극과 위치감지 전극을 포함하고 있으며, 슬라이더층의 전극과 분리하기 위한 SiO₂ 절연층으로 덮여있다.

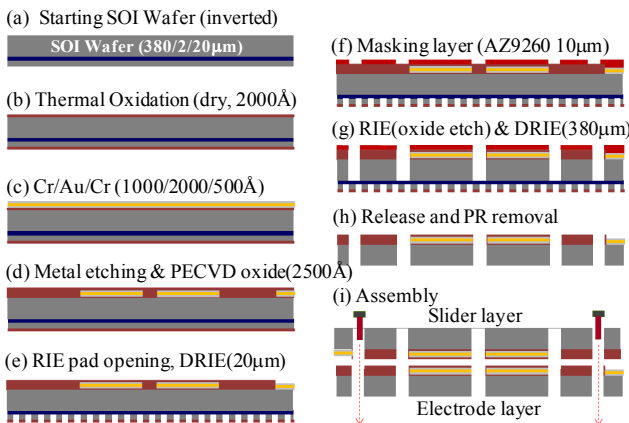


Fig. 8 Fabrication process of the present tactile transceiver

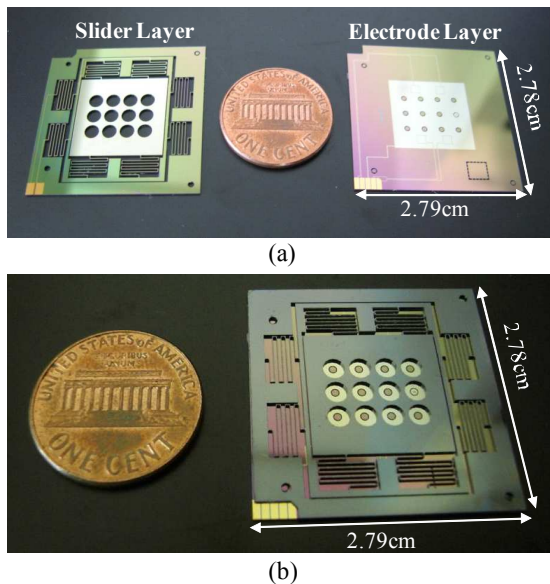


Fig. 9 Fabricated device: (a) Top view of slider layer and electrode layer including enlarged image of spring and electrode; (b) assembled device

3.2 제작공정

본 논문에서 제안하는 촉각정보 입출력장치의 슬라이더층과 전극층의 제작을 위해 Fig. 8과 같이 먼저, 400μm 두께의 SOI 웨이퍼의 후면에 250nm의 SiO₂를 증착한 후 전극 형성을 위한 Au/Cr을 각각 200/100nm 증착하였다. Photolithography를 통해 전극패턴을 형성한 후 다시 250nm의 SiO₂를 절연층으로 증착하였고, AZ9260 10μm의 마스크 레이어를 형성 후 DRIE공정을 통해 380μm의 실리콘층을 관통하였다. 최종적으로 전면의 20μm 실리콘층을 DRIE공정으로 제거한 후 조립하여 소자를 완성하였다. 공정후의 슬라이더패드와 바닥층은 Fig. 9(a)에 나타난 바와 같으며 이를 전극면끼

Table 1 Friction tuning characterization

Input		∠Friction
Voltage	Frequency	
10~60V	DC	32~152mN
40V	10~100Hz	0.8~16.0mN
60V	3~10Hz	36.9~128.1mN

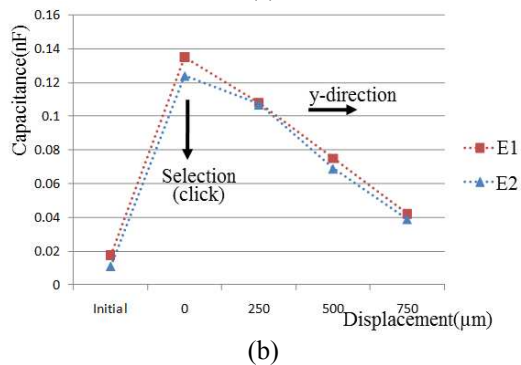
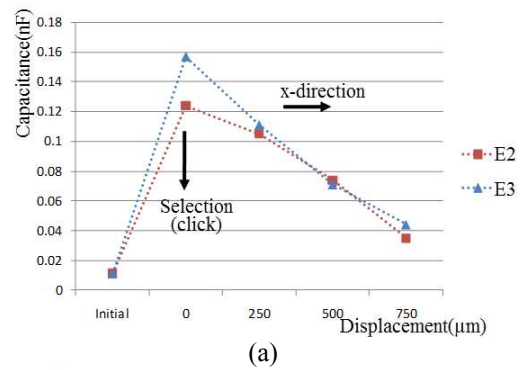


Fig. 10 Capacitance change at direction and selection input: (a) selection and x-direction motion; (b) selection and y-direction motion

리 맞게 조립하여 최종적으로 완성된 촉각정보 입출력장치 소자는 Fig. 9(b)와 같다.

4. 성능평가 및 분석

4.1 손끝 움직임 인식 성능

손가락의 움직임 인식을 위해 패드의 변위에 따라 슬라이드패드의 공통전극과 바닥층에 형성된 4개의 전극간의 커패시턴스 변화를 측정하였다.

Fig. 10의 (a), (b)는 각각 x, y 방향의 움직임에 대한 전극의 커패시턴스 변화를 나타낸다. 두 경우 모두 수직방향 입력에 대해 급격한 커패시턴스 증가를 보였는데 각 전극에 대한 이의 평균값은 0.146±0.02nF으로, 본 소자를 통해 손가락의 움직임 입력을 인식할 수 있음을 확인하였다. 수평방향의 움직임의 경우 초기상태를 기준으로 250μm

씩 위치를 변화시켰을 때의 커패시턴스 값을 Fig. 10의 (a), (b)에 각각 도시하였다. 수평방향 최대변위인 750 μm 이동 시 변화량은 $0.09\pm 0.02\text{nF}$ 로 나타났고, 각각의 움직임 단계에 따라 커패시턴스가 감소함을 확인하였다. x-y축 방향의 움직임이 동시에 입력될 경우, 중첩면적 변화의 조합을 통해 유추할 수 있다.

4.2 질감 출력 성능: 마찰력 변조

슬라이더패드와 바닥층간의 마찰력 및 이의 변조기능 평가를 위하여 슬라이더패드에 로드셀을 연결하고 소자를 부착한 stage의 조작을 통해 변위를 입력하였다. Table 1은 전압의 범위와 파형에 따른 마찰력의 변조 범위를 나타낸 것이다. 이와 같이 전압 인가를 통한 정전기적 인력을 이용, 손끝에서 느껴지는 마찰력을 조절할 수 있음을 확인하였다. 슬라이더패드에 전압을 가할 경우 전압에 비례하여 같은 하중에서 마찰력이 약 30% 증가함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 정전기력을 이용한 마찰력 변조가 가능함을 실험적으로 검증하였다.

4.3 질감 출력 성능: 수평적 진동구현

슬라이더층과 전극층간에 전압을 교류로 인가할 경우 마찰력에 변동(fluctuation)이 발생하여 수평적인 진동을 구현할 수 있다. 이는 사람이 느끼는 마찰력의 힘과 진동을 동시구현하는 것으로 실크의 부드러움이나 사포의 거침과 같은 표면 특성을 인공적으로 구현하는데 적용 가능하다. Fig. 11은 40V의 교류전압 인가시 주파수에 따른 마찰력의 변동(fluctuation)을 로드셀을 이용하여 측정한 것이다. 그림에 도시된 바와 같이 10Hz 미만의 저주파에서는 마찰력의 변화의 폭이 크게 나타나는 반면 주파수가 증가할수록 변화의 폭이 점점 감소하는 경향을 보였다. 실제 인간 피부에 적용되는 이러한 진동의 크기는 질감을 결정하는 중요한 요소이다.

Fig. 12는 60V 전압 하에 더 낮은 주파수 영역에서 마찰력의 변동(fluctuation)을 측정한 것이다. 변동(fluctuation)시의 p-p 값은 3Hz, 60V에서 최대 128.1mN으로 나타나 본 소자의 경우 저주파에서 더 진동의 편차가 더 명확하게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 60V 전압 하에서 나타나는 수평적 진동의 p-p값은 동일전압 하에서 얻은 기존연구⁽¹³⁾ 결과보다 약 32% 높은 수치를 보여주고 있다.

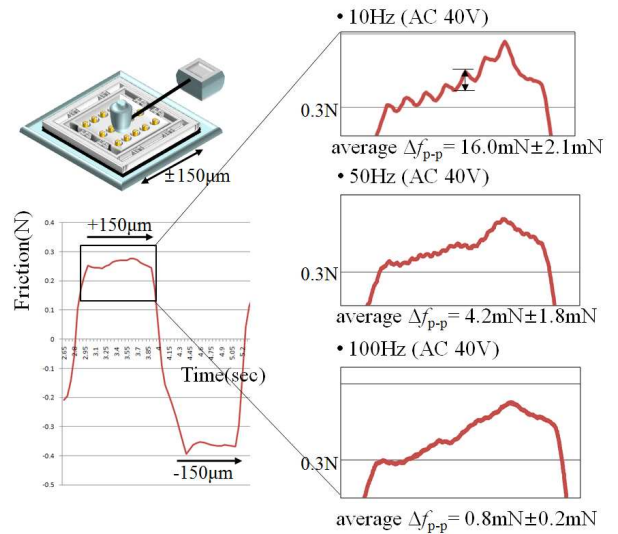


Fig. 11 Texture generation represented by lateral vibration caused by cyclic electrostatic actuation in the frequency range of 10~100Hz

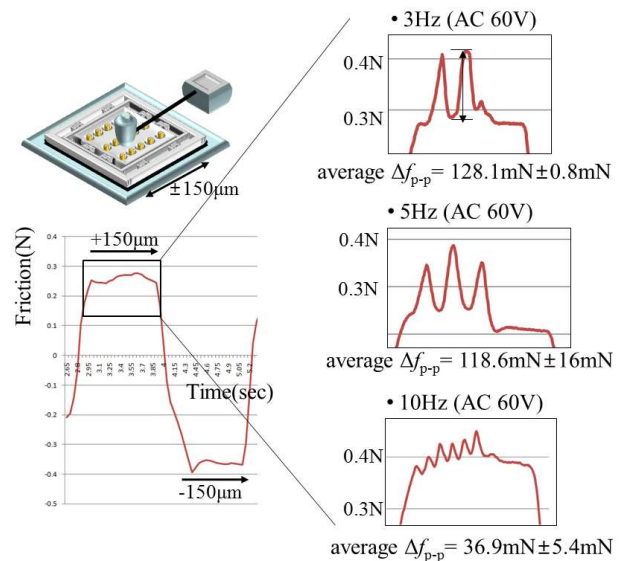


Fig. 12 Fluctuating friction under 60V in the frequency range of 3~10Hz

5. 결론

본 논문은 정전기력을 이용한 마찰력 변조를 이용하여 손끝을 통한 촉각정보의 입출력을 동시 구현하는 소자를 제안하였다. 기존의 촉각소자들이 입출력을 개별적으로 구현한 것에 비해 본 연구는 손끝의 수직/수평 방향 동작 인식과 질감 구현을 동시에 구현하였다는 점에서 차별성을 가진다. 실험분석을 통해 검증한 손끝 동작 인식기능은 수직 방향(클릭)의 경우 40 μm 간격에 대한 움직임을 통해 평균 $0.146\text{nF}\pm 0.02$ 의 커패시턴스 변화로 측정하였으며, 이 값은 수평방향으로의 총 750 μm 움

직입에 대해 $0.09 \pm 0.02 \text{ nF}$ 의 정전용량 변화를 유발하여 손끝의 방향 동작 인식이 가능함을 확인하였다. 질감 구현의 경우 정전기적 인력을 통해 마찰력을 32~152mN의 범위에서 제어할 수 있음을 확인하였다. 교류전압을 이용한 수평적 진동은 60V, 3Hz에서 최대 128.1mN의 마찰력 변조를 구현하여 질감구현 성능을 확인하였다. 본 연구는 손끝에서 정보의 입출력을 동시 구현하여 정보기기의 촉각인터페이스에 적용 가능하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 중견연구자지원사업(도약과제)인 “생체모사 인간감응시스템” (과제번호 20120005663)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Fagiani, R., Massi, F., Chatelet, E., Berthier, Y. and Akay, A., 2011, “Tactile Perception by Friction Induced Vibrations,” *Tribology International*, Vol.44, Issue 10, Sep. pp.1100~1110.
- (2) Yang, G., Yang, T.H., Kim, S., Kwon, D. and Kang, S., 2007, “Compact Tactile Display for Fingertips with Multiple Vibrotactile Actuator and Thermoelectric Module,” *Robotics*, pp. 10~14.
- (3) Wu, X., Kim, S.-H., Ji, C.-H. and Allen, M. G., 2011, “A Solid Hydraulically Amplified Piezoelectric Microvalve,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.21, p. 095003.
- (4) Koo, I.M., Jung, K., Koo, J.C., Nam, J.-D., Lee, Y.K., and Choi, H.R., 2008, “Development of Soft-Actuator-Based Wearable Tactile Display,” *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, Jun. pp. 549~558.
- (5) Klintberg, L., 2002, “A Large Stroke, High Force Paraffin Phase Transition Actuator,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 96, Feb. pp. 189~195.
- (6) Niwa, M., Yanagida, Y., Noma, H., Hosaka, K. and Kume, Y., “Vibrotactile Apparent Movement by DC Motors and Voice-coil Tactors,” *Science And Technology*.
- (7) Talbi, A., Ducloux, O., Tiercelin, N., Deblock, Y., Pernod, P. and Preobrazhensky, V., 2006, “Vibrotactile Using Micromachined Electromagnetic Actuators Array,” *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 34, Apr. pp. 637~642.
- (8) Kim, Y., Oakley, I. and Ryu, J., 2006, “Design and Psychophysical Evaluation of Pneumatic Tactile Display,” *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, Oct. pp. 1933~1938.
- (9) Lee, S.S., 2008, “Braille code display device with a PDMS Membrane and Thermopneumatic Actuator,” *2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Jan. pp. 527~530.
- (10) Lucyszyn, S., 2005, “A Micromachined Refreshable Braille Cell,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 14, Aug. pp. 673~682.
- (11) Shikida, M., Imamura, T., Ukai, S., Miyaji, T. and Sato, K., 2008, “Fabrication of a Bubble-Driven Arrayed Actuator for a Tactile Display,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, Jun. p. 065012.
- (12) Tang, H. and Beebe, D.J., 1998, “A microfabricated Electrostatic Haptic Display for Persons with Visual Impairments,” *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering : A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Vol. 6, Sep. pp. 241~248.
- (13) Yamamoto, A., Nagasawa, S., Yamamoto, H. and Higuchi, T., 2006, “Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile telepresentation systems,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12, pp. 168~177.