

휴대용 장치를 위한 필름형 촉감 액추에이터

A Film-type Vibrotactile Actuator for Hand-held Devices

김 상 연¹, 김 기 백², 김 재 환², 박 원 형¹, 경 기 옥[†]

Sang-Youn Kim¹, Ki-baek Kim², Jaehwan Kim², Won-Hyeong Park¹, Ki-uk Kyung[†]

Abstract Vibrotactile actuators for small consumer electronic products, such as mobile devices, have been widely used for conveying haptic sensation to users. One of the most important things in vibrotactile actuators is to be developed in the form of thin actuator which can be easily embedded into mobile devices and to provide vibrotactile signals with wide frequency band to users. Thus, this paper proposes a thin film type haptic actuator with an aim to convey vibrotactile information with high frequency bandwidth to users in mobile devices. To this end, a vibrotactile actuator which creates haptic sensation is designed and constructed based on cellulose acetate material. A cellulose acetate material charged with an electric potential can generate vibration under the AC voltage input. It is found that the motion of the actuator can have concave or convex shape by controlling a polarity of both charged membranes and the actuator performance can be modulated by increasing level of biased electric potential. The experiment clearly shows that the proposed actuator creates enough output force to stimulate human skin with a large frequency bandwidth and to simulate various vibrotactile sensations to users.

Keywords: Vibrotactile, Haptic Actuator, Transparent Actuator, Mobile Device

1. 서 론

최근 들어 정보 기술의 급속한 발전으로 인하여 다양한 휴대용 장치들이 개발되고 있으며 상업화 되고 있다. 대부분의 휴대용 장치들은 사용자들에게 명령을 받아들이기 위해 키 패드와 같은 기계적 입력장치들을 가지고 있으므로 사용자가 휴대용기기과 인터랙션을 수행할 때 휴대기기의 어플리케이션의 상황과 관계 없이 항상 일정한 촉감을 제공한다. 하지만 사용자가 휴대용 장치의 그래픽 콘텐츠와 상호작용할 때 실제 물체를 조작하는 것과 같은 다양한 터치 감각을 받아들이고자 하는 요구가 증가하고 있다. 이를 위하여 상황에 적합한 촉감을 생성하여 사용자에게 전달하

기 위한 햅틱 기술이 휴대용기기에 적용되기 시작하였다.

사용자에게 몰입감을 증가시키기 위해 최근 들어 휴대용 장치의 기계적인 키패드는 시각 디스플레이의 크기를 최대화할 수 있는 터치스크린으로 대체되었다. 그러나 터치스크린 기반 휴대용기기는 조작감의 부재라는 또 다른 문제를 야기 시켰으며 이와 같은 문제를 해결하기 위해 휴대용 장치에 쉽게 탑재되어 조작감을 생성하기 위한 다양한 햅틱 액추에이터들이 개발되고 있다^[1-5]. 휴대용 기기에서 햅틱 감각을 생성하기 위해 편심모터(ERM, Eccentric rotary motor)가 최초로 사용되었다. 그러나 편심모터는 다양한 햅틱 감각을 생성하여 사용자들에게 전달하기에는 치명적인 단점들을 가지고 있다. 가장 치명적인 단점은 편심모터의 반응속도는 너무 느려서 사용자에게 의해 감각이 감지되기 까지 시간 지연이 크다는 것이고, 또 하나의 단점은 햅틱 신호의 주파수와 크기가 서로 독립적으로 생성이 불가능하다는 것이다. 이와 같은 이유로 인하여 편심모터는 다양한 햅틱감각을 생성하는 것이 아니고 단순한 알람 신호들을 생성하는데 국한되었다.

이와 같은 편심모터의 단점을 극복하기 위해, 사실적인

Received : May 30, 2013; Reviewed : Jun. 25, 2013; Accepted : Aug. 5, 2013

※ This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (grant number : 2012-0004550) This work has been supported by the S/W Computing R&D program of MKE/KEIT(10035360-2010-01,TAXEL: Visio-haptic Display and Rendering Engine).

¹ Computer Science & Engineering, KoreaTech, ({sykim, ipo1001}@kut.ac.kr)

² Mechanical Engineering, Inha University (kimroll@naver.com, jaehwan@inha.ac.kr)

[†] Corresponding author., kyungku@etri.re.kr, jaehwan@inha.ac.kr

촉감을 실시간으로 만들어 내기 충분한 만큼의 빠른 반응 시간을 가지는 선형 공진모터 (LRA, Linear Resonance Actuator)가 개발되었다⁶⁾. 선형 공진모터는 편심모터에 비해 응답 시간을 25ms로 단축시켰으며 사용자의 기계적 수용기(mechanoreceptors)들을 자극하기에 충분히 큰 힘을 실시간으로 생성할 수 있다. 그러나 공진모터는 단지 공진 주파수근처에서만 햅틱 감각의 생성이 가능하므로 사용자의 여러 기계적 수용기들을 선택적으로 자극시키기에는 한계가 있다. 넓은 주파수에서 다양한 감각을 생성하기 위하여 교류 입력에 따라서 피에조 물질들의 물리적인 변화에 의해 진동신호를 생성하는 피에조 모터들이 연구되기 시작하였다⁷⁻⁹⁾. 피에조 모터는 입력전압의 크기에 따라 모양이 변화하며 매우 넓은 주파수로 구동될 수 있기 때문에 다양한 촉감을 생성할 수 있다. 하지만 피에조 액추에이터는 깨지기 쉬우며 생성할 수 있는 진동력이 약하기 때문에 공진점에서만 햅틱 감각을 생성하는 데 만족하고 있다. 또 다른 대표적인 햅틱모터로는 가벼운 무게와 큰 힘, 그리고 빠른 반응시간을 가지는 전기활성 고분자 (EAP, Electroactive Polymer) 기반의 액추에이터가 개발되었다^{10,11)}. 또한 PVDF(Polyvinylidene fluoride) 나 크리스털 공중합체 (Crystal Copolymer)와 같은 몇몇 고분자 재료 또한 촉각 액추에이터로 활용될 수 있도록 연구되었다^{12,13)}. Kolesar 등은 단일 실리콘 직접회로에서 40 μ m 두께의 PVDF 필름을 이용하여 햅틱 액추에이터를 제작하였다¹⁴⁾. 이와 같은 액추에이터들은 얇게 개발되어 휴대용 기기에 적용하기에 충분하지만 아직도 단점을 가지고 있다. 가장 큰 단점은 액추에이터가 투명하지 않기 때문에 시각디스플레이장치 뒷 부분에 장착되어 사용자에게 다소 어색한 감각을 생성한다는 것이다.

그러므로 본 연구에서는 휴대용 기기에 앞쪽에 배치되어 햅틱 감각을 생성할 수 있는 투명하고 유연한 햅틱 액추에이터를 개발한다. 투명/유연한 액추에이터를 개발하기 위하여 본 연구에서는 천연고분자물질인 피에조 효과를 갖는 셀룰로오스를 활용한다.

2. 필름형 햅틱 액추에이터

천연 고분자 셀룰로오스를 기반으로 한 전기활성종이 (EAPap)는 압전효과, 이온 영동효과, 전기 잔류효과, 정전기력 등으로 구성된 동작 메커니즘을 가진다. 압전 재료 중 하나인 셀룰로오스는 쌍극자 분자 사슬 구조를 가지고 있으며, 다공성 해면 구조를 가지고 있기 때문에 계면 분극을

통해 전하를 축적할 수 있다. 이러한 분극현상을 갖는 셀룰로오스의 특징으로 인해 기계적인 변형이 발생한다. 셀룰로오스 필름은 입력전압을 가하지 않았을 때 내부에 빈 공간이 있는 평평한 필름으로 존재하지만 (Fig 1), 전압을 인가하게 되면 분극현상이 발생하여 필름내에 밀거나 당기는 힘이 생성된다.

셀룰로오스 물질은 반 결정 전석으로 분류된다. 셀룰로오스 결정에서 압전효과를 만들 때 정전기 현상에 대한 충전/방전을 방해하는 잔여 분극이 있을 수 있으므로, 본 연구에서는 완전 비정질 형태인 셀룰로오스 아세테이트를 사용하여 필름형 촉각 제시장치를 제작하였다.

Fig 2는 셀룰로오스 아세테이트 필름의 제조과정을 보여준다. 먼저 아세트산 용액의 무게에 15%에 해당하는 셀룰로오스 아세테이트 가루를 녹여 셀룰로오스 아세테이트 용액을 만든다. 그 다음, 적절히 분해된 셀룰로오스 아세트산 용액을 500rpm의 속도로 스핀 코팅하여 실내설정조건 (room condition)에서 경화시키면 투명한 아세테이트 필름을 얻을 수 있다.

Fig 3은 제작한 셀룰로오스의 횡단면을 전자 현미경으로 촬영한 모습을 보여준다. 절단된 셀룰로오스의 단면에는 전하를 쉽게 충전할 수 있도록 만들어주는 공극 (air gap)들이 촘촘하게 존재하는 것을 확인할 수 있다. 내부에

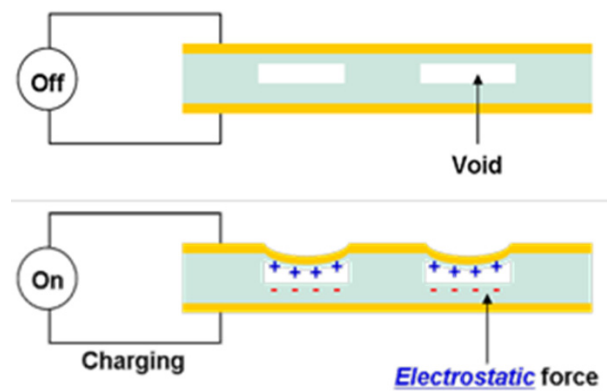


Fig. 1. Electret property of the cellulose

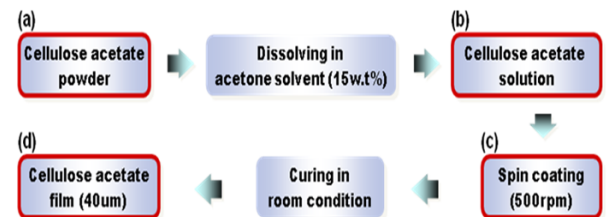


Fig. 2. Manufacturing process for fabricating cellulose acetate film

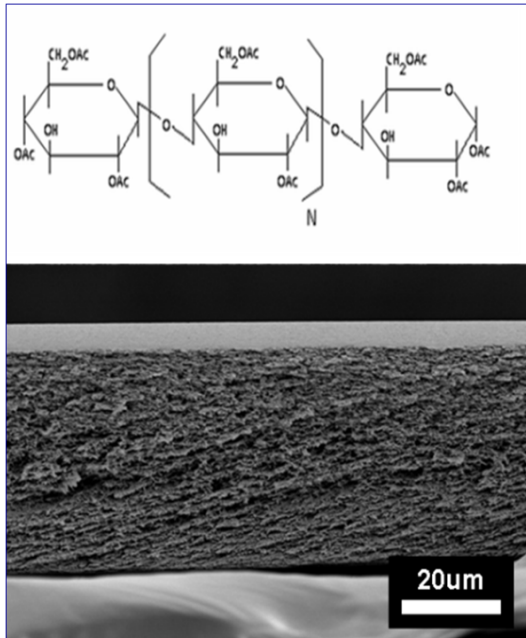
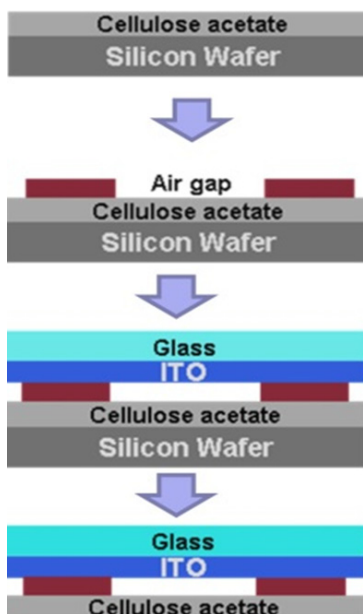
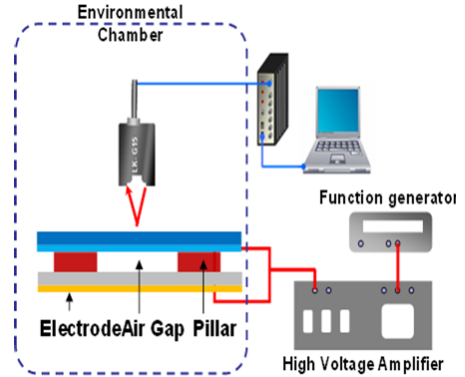


Fig. 3. Schematic and Film cross section Scanning Electron Microscope image of cellulose acetate

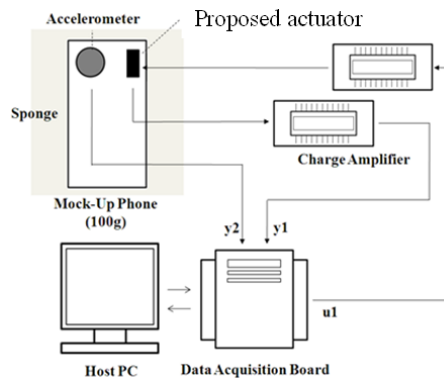
전하들이 많이 존재할 수록 액츄에이션 힘이 커지기 때문에, 본 연구에서는 전하들을 포함하고 있는 공극들을 최대화할 수 있는 새로운 구조를 가진 필름형 촉감 액츄에이터를 제안한다. Fig 4는 제안하는 필름형 촉감 액츄에이터를 제작하는 과정이다. 실리콘 웨이퍼 위에 제작한 셀룰로오스 아세



[Fig 4] Fabrication mechanism for the proposed actuator



(a)



(b)

Fig. 8. (a) Displacement evaluation system consisting of laser displacement, sensor, electric field applying systems and data acquisition systems, (b) Experimental setup to evaluate the vibration force of the proposed actuator

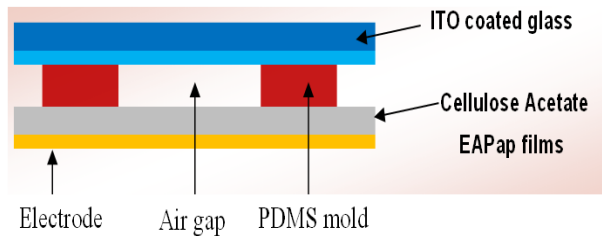
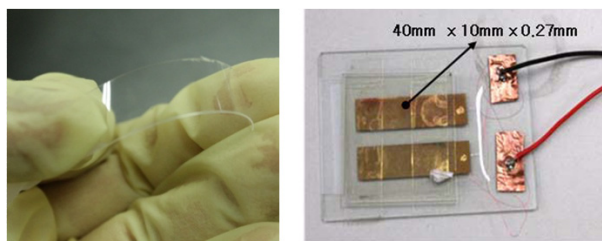


Fig. 5. Structure of film-type haptic actuator



(a)

(b)

Fig. 6. (a) Fabricated film-type haptic actuator whose actual size is 40×10×0.27mm, (b) the gold coated actuator for connecting power

테이트 필름을 얹고 그 위에 PDMS(Polydimethylsiloxane) 몰드를 얹어 에어 갭을 만든다. 그리고 나서 PDMS 몰드 위에 산화인듐주석(ITO) 유리를 올려 촉감 액추에이터를 제작한다.

Fig 5는 셀룰로오스 아세테이트 기반의 촉감 액추에이터의 구조를 보여준다. 개발된 액추에이터는 셀룰로오스 필름과, 동작을 위한 ITO가 코팅된 유리판, 그리고 공극을 생성하기 위한 PDMS 몰드의 세 개의 층으로 구성하였다. 셀룰로오스에 전력을 공급하기 위해 제작된 필름의 한쪽 면에 금 박막의 전극을 위치시켰으며 공극 형성을 위한 지지대로는 PDMS 몰드를 이용하였다. 그리고 폴리비닐 알콜(PVA)을 이용하여 ITO 글래스를 부착하였다. 제안하는 구조에서 양쪽 전극의 전압차가 0이 되었을 때, 셀룰로오스 아세테이트 필름과 ITO가 코팅된 유리판 사이에 생기는 정전기력은 0이 된다. 양 전극 사이에 전압 차가 커짐에 따라 셀룰로오스 필름과 ITO가 코팅된 유리판에서 생기는 정전기력이 증가하여 액추에이터의 움직임이 점점 커지게 된다. Fig 6(a)는 40×10×0.27mm³ 크기로 제작된 필름을 보여주며, Fig 6(b)는 전압을 인가하기 위하여 금박 코팅된 액추에이터의 최종 모습을 보여준다. 만일 제어 입력을 위해 투명한 전극을 이용하면 액추에이터의 투명도를 그대로 유지가 가능하다.

3. 실험 및 결과

모바일 장치를 위한 촉감 액추에이터에 있어서 투명도는 매우 중요한 요소 중 하나가 될 수 있다. 그러므로 본 실험에서는 UV-VIS 분광 광도계(spectrophotometer)를 이용하여 제안하는 촉감 액추에이터의 투명도를 측정하였다.

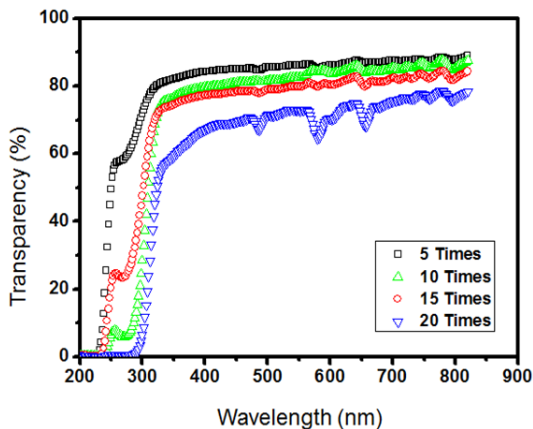


Fig. 7 The transparency of the proposed actuator according to the number of spin coating

Fig 7은 스핀 코팅 횟수에 따른 본 연구에서 제안하는 촉감 액추에이터의 투명도를 보여준다. 제안하는 촉감 액추에이터의 투명도는 액추에이터 두께의 증가에 따라 86%~72% 까지 변화 하였다. 만일 스핀코팅을 20회 하였다면 제안하는 액추에이터의 투명도는 급격하게 떨어진다. 그러므로 본 연구에서는 스핀 코팅의 횟수를 15회로 선택하였다.

본 연구에서는 제안하는 셀룰로오스 아세테이트를 기반으로 한 필름형 촉감 액추에이터의 효율성을 평가하기 위해서 액추에이터의 변위와 가속력을 측정하였다. 제안하는 액추에이터의 변위량을 측정하기 위해 Fig 8(a)와 같은 평가 시스템을 제작하였다. 제안하는 액추에이터의 변위는 레이저 변위센서(Keyence LK-G15)에 의해 측정되었으며, 펄스 분석기(B&K Pulse analyzer)와 PC를 이용해 데이터를 수집하였다. 그리고 고전압 발생기(High voltage amplifier, trek 20/20)와 함수 발생기(Function generator, Agilent 33220A)를 이용하여 구형파(Square wave) 형태의 AC 전압을 제안하는 액추에이터에 인가하였다. 또한 패키징 되지 않은 셀룰로오스 재료는 습도 등 주변환경에 민감하기 때문에 측정공간 내부의 상대습도는 25%로, 온도는 23°C 로 유지하였다. Fig 8(b)는 제안하는 장치의 가속력을 평가하기 위한 실험환경의 블록 다이어그램을 보여준다. 실험 환경은 아날로그-디지털 변환 채널이 존재하는 PC, PC 와 연결된 데이터 획득 보드 (NI USB-6259), 증폭기 (STT-200S-01), 가속도 센서(SCA1020), 파워 공급기 (Face International Co. TD-2) 로 구성하였다. 제안하는 액추에이터로부터 획득된 신호는 증폭기를 이용하여 의미 있는 전압 신호로 변환되었으며 변환된 전압 신호는 아날로그/디지털 변환 채널을 통해 자료 획득 보드로 전해진다.

제안하는 촉감 액추에이터는 전류가 아닌 전압에 의해 구동되기 때문에, 입력 전압에 따른 변위량을 확인하기 위해 전압의 크기를 바꿔보았다. 이 실험에서 주파수는 1kHz로 고정하였다. Fig 9(a)는 전압의 세기에 따른 변위량을 보여준다. 제안하는 촉감 제시장치의 변위량은 3.3um (1000V)에서 10.4um (1600V) 까지 증가하였으며, 전압이 1600V 이상 인가되더라도 변위량의 변화는 거의 없었다. 또한 촉감 제시장치에서 가속도는 모바일 장치에 있어 매우 중요한 요소 중 하나이기 때문에 인가하는 주파수에 따른 가속도의 변화를 실험을 통해 파악하였다. 입력 주파수는 1Hz부터 250Hz까지 다양하게 인가하였으며, 그 결과는 Fig 9(b)와 같다. 제안하는 촉감 제시장치는 30Hz에서 200Hz의 주파수를 입력할 때 약 0.6g ($g = 9.8m/s^2$) 정도

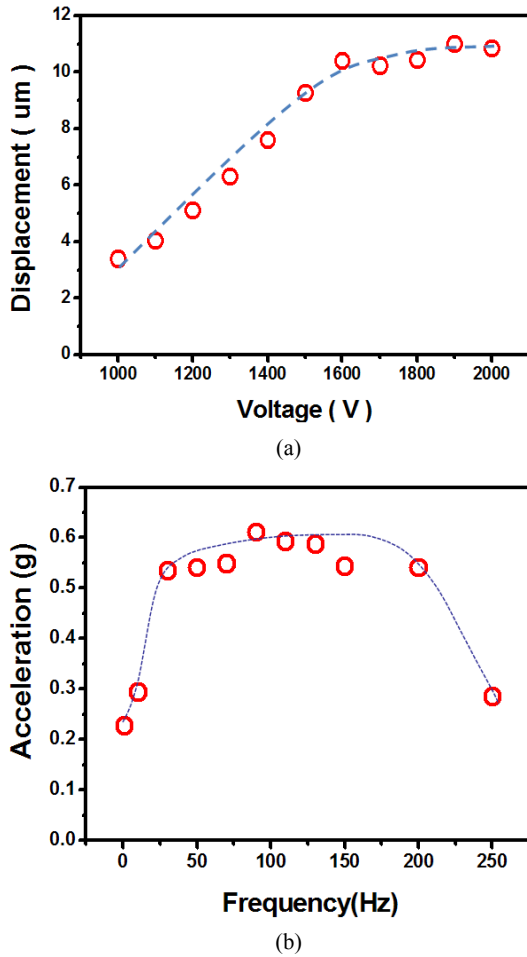


Fig. 9. (a) Displacement of the proposed actuator, (b) Acceleration of the proposed actuator

의 가속력을 생성하였다.

4. 결론

본 연구에서는 셀룰로오스 아세테이트를 이용한 새로운 필름형 촉감 액츄에이터를 제안하였다. 사용된 셀룰로오스의 정전효과는 반영구적 분극(分極)을 가진 유전체속성과 관련이 있다. 제안하는 촉감 제시장치의 반응시간은 약 15um 이며 최대 변위는 약 11.4um, 그리고 진동력은 약 0.6g($g=9.8m/s^2$)를 갖는다. 실험을 통해 얻은 0.6g의 가속력은 모바일 장치에서 알람 기능을 수행하기엔 부족하지만 사용자에게 휴대용 기기에서 다양한 촉감을 생성 및 제공하는 데에는 충분하다. 본 연구의 후속으로 최근 진동력 및 투명도를 향상시키는 연구를 수행 중이다.

References

- [1] D. Siewiorek, A. Smailagic, J. Furukawa, A. Krause, N. Moraveji, K. Reiger, J. Shaffer, F.L. Wong. SenSay: a Context-Aware Mobile Phone. Proceeding of 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC) 2003, New York, USA, pages 248-249., 2003.
- [2] S. Brewster, F. Chohan, L. Brown. Tactile Feedback for Mobile Interactions. Proceeding of International Conference for Human-Computer Interaction (CHI) 2007, San Jose, CA, pages. 159-162, 2007.
- [3] L. Brown, S. Brewster, H. Purchase, H. Multidimensional Tactons for Non-Visual Information presentation in Mobile Devices. Proceeding of 8th conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI) 2006, Helsinki, Finland, pages. 231- 238, 2006.
- [4] J. Luk, J. Pasquero, S. Little, K. MacLean, V. Levesque, V. Hayward. A role for Haptics in Mobile Interaction: Initial Design using a Handheld Tactile Display Prototype. Proceeding of Premier International Conference for Human-Computer Interaction (CHI) Montreal, Canada, pages. 171-180, 2006.
- [5] D.S. Kwon, T.H. Yang, Y.J. Cho. Mechatronics Technology in Mobile Devices, In IEEE Industrial Electronics Magazine, volume 4,no 2. pages 36-41, 2010.
- [6] S. D. Kweon, I. O. Park, Y. H. Son, J. Choi and H. Y. Oh. Linear vibration motor using resonance frequency, In US PATENT no. 7,358,633 B2, Assignee Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd., 2008.
- [7] M. O. Ernst, M. S. Banks, Humans Integrate Visual and Haptic Information in a Statistically Optimal Fashion, In Nature, Volume 415, pages 429-433, 2005.
- [8] R. J. Wood, E. Steltz, R. S. Fearing, Optimal Energy Density Piezoelectric Bending Actuators. In Sensors and Actuators A, Volume 119, pages 476-488, 2005

- [9] D. H. Kim, B. Kim, H. Kang. Development of a Piezoelectric Polymer Based-sensorized Microgripper for Microassembly and Micromanipulation, In Microsystem Technology volume 10, pages 275-280, 2004.
- [10] R. Sarban, J. Oubaek, and R. Jones. Closed-Loop Control of a Core Free Rolled EAP Actuator, Proceeding of SPIE 7287, 72870G 2009.
- [11] M.Y. Ozsecen, M.Sivak, and C. Mavroidis. Haptic Interfaces Using Dielectric Electroactive Polymer, Proceeding of SPIE 7647, 2010.
- [12] A. V. Bune, C. Zhu, S. Bucharme, L. M. Blinov, V. M. Fridkin, S. P.Palto, N. G. Petukhova, and S. G. Yudin. Piezoelectric and Pyroelectric Properties of Ferroelectric Langmuir-Blodgett Polymer Films, In Journal of Applied Physics Letter. Volume 85 pages 7869-7873, 1999.
- [13] A. Ambrosy, and K. Holdik, Piezoelectric PVDF Films as Ultrasonic Transducer, In Journal of Physics. E: Sci. Intrum. Volume 17 pages. 856-859, 1984.
- [14] E. S. Kolesar, and C. S. Dyson. Object Imaging with a Piezoelectric Robotic Tactile Sensor, In Journal of Microelectromech. System. Volume 4 pages 87-96, 1995.



김 상 연

1997 KAIST 자동화 및 설계공학 (공학석사)
 2005 KAIST 기계공학 (공학박사)
 2006 삼성종합기술원 책임 연구원

2006~현재 한국기술교육대학교 부교수
 관심분야 : Haptic Rendering, Haptic Actuator, Tactile Display, Virtual Reality



김 기 백

2011 인하대학교 기계공학과 (공학사)
 2013 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
 관심분야 : 지능재료, 지능 구조물



김 재 환

1987 KAIST 기계공학 (공학석사)
 1995 Penn. State Univ. Engineering Science & Mechanics (공학박사)
 1996 인하대학교 교수

2003~2012 EAPap Actuator 창의연구단 단장
 2012~ 현재 한국과학기술한림원 정회원
 관심분야 : 지능재료, 지능구조물, EAP, Actuator, Sensor



박 원 형

2011 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 (공학사)
 2013 한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2013~현재 한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야 : Haptic Rendering, Haptic Actuator, EAP, HCI



경 기 욱

1999 KAIST 기계공학과(공학사)
 2006 KAIST 기계공학과 (공학박사)
 2006 한국전자통신연구원 선임 연구원

2012~현재 한국전자통신연구원 투명소자 및 UX 창의연구센터장
 관심분야 : Haptics, 센서/액추에이터, HCI