

이동진동파의 개념 및 설계

The Concept and the Design of Vibrotactile Traveling Wave

□ 김상연 / 한국기술교육대학교 첨단기술연구소 인터랙션 연구실

1. 서론

가상현실(VR)이란 특정한 세계의 환경/상황을 컴퓨터를 이용하여 똑같이 모사(시뮬레이션)하여, 환경에 대한 정보를 인간에게 전달함으로써, 인간이 가상환경을 실제 세계의 환경/상황과 똑같이 느끼게 하는 기술을 의미한다. 이와 같은 가상현실 세계에서 사용자에게 몰입감을 전달하기 위해 가상의 물체와 인터랙션 할 때 실제 물체를 조작하는 것과 같은 느낌을 전달해 주는 햅틱 기술이 중요한 연구 주제로 부각되고 있다. 햅틱(haptic)이란 단어는 “촉감과 관련된(of or relating to the sensation of touch)”이란 뜻으로 그리스어인 haptesthai라는 말에서 유래가 되었다. 사용자에게 촉각정보를 전달해 주는 기술인 햅틱스는 1990년대 중반에 접어들어 컴퓨터 그래픽스, 가상현실 기술과 햅틱 기술이 접목되면서 본격적으로 연구가 수행되었으며 많

은 햅틱스 기술을 이용한 햅틱 시스템들이 개발되기 시작하였다.

사람의 햅틱감각은 크게 관절, 근육, 인대 등에 있는 수용기를 통해서 느껴지는 근 감각(역감, kinesthetic sense)과 피부 내에 있는 수용기를 통해서 받아들여지는 피부감각(재질 감, tactile sense)으로 나뉘어 진다. 근 감각은 물체의 딱딱하고 말랑말랑한 정도를 파악하는 수용기이며 피부감각은 물체 표면의 거칠기를 파악하는 수용기이다. 근 감각과 피부감각은 기기를 조작하거나 가상의 물체와 인터랙션을 할 때 시각정보와 함께 사용자에게 전달되어 사용자의 몰입감을 높여준다. 휴대용 기기의 경우에는 시각 디스플레이 유닛의 크기가 사용자에게 몰입감을 전달해 줄 만큼 크지 못하므로 햅틱 감각은 몰입감을 증가시키기 위한 중요한 요소가 된다.

사용자는 근감각과 피부감각을 함께 이용하여 물

체를 조작한다. 그러나 근감각을 생성하는 액추에이터의 경우 크기가 다소 커서 휴대용 기기에 적용하는 것은 쉽지 않다. 그러므로 휴대용 기기에서의 햅틱 인터랙션을 위하여 많은 연구자들은 근 감각 대신 진동자극을 통하여 피부감각을 생성할 수 있는 액추에이터 및 방법에 대한 연구를 진행해 왔다. 사람의 피부(털이 없는 피부 기준)에는 크게 통증을 받아들이는 통각 수용기(noci-receptor), 온열감을 위한 수용기(thermo-receptor), 그리고 물체 표면의 거칠기를 파악하게 해 주는 기계적 수용기(mechanoreceptor)라는 3가지 타입의 수용기가 존재한다[1,2,3]. 그리고 털이 없는 피부에 존재하는 기계적 수용기에는 머켈디스크(Merkel's disk), 마이스너 소체(Meissner corpuscle), 루피니 엔딩(Ruffini ending) 그리고 퍼치니언 소체(Pacinian corpuscle)가 존재한다. 머켈 디스크는 0~3Hz에서 동작하며 정적 자극이나 준 정적(quasi-static) 자극에 따른 피부의 변형에 반응하여 물체의 경계등을 사람에게 느끼게 하는 역할을 한다. 2~40Hz의 주파수에서 동작하는 마이스너 소체는 피부의 떨림과 같은 피부의 동적인 변형에 반응한다. 기계적 수용기 중에서 가장 민감한 퍼치니언 소체는 40~500Hz의 주파수에 반응하여 가속도나 진동자극을 받아들이는 역할을 한다. 그리고 루피니 엔딩은 100~500Hz의 주파수에 반응하고 피부의 미끄러짐 또는 밀림과 같은 느낌을 전달받는다.

이와 같은 피부감각 수용기들의 역할과 동작 주파수 등이 밝혀짐에 따라 휴대기기에서 다양한 햅틱 감각을 제공하는 소형 액추에이터[4,5,6,7,8,9,10]들이 개발되어 왔다. 초기의 휴대기기에서 햅틱 자극생성을 위해 사용되던 편심 모터(Eccentric motor)가 주로 사용되었다. 편심모터의 가장 큰 문제점은 응답시간이 현격히 늦기 때문에 사용자의

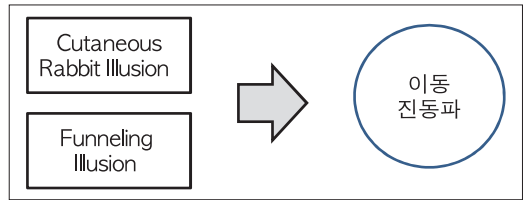
명령에 따른 햅틱 피드백을 실시간으로 생성하는 것이 쉽지 않다는 것이다. 또 다른 문제는 진동의 세기는 구동주파수의 제곱에 비례하므로($F \propto mrw^2$) 주파수를 결정하면 진동의 세기도 따라서 고정된다는 것이다. 이와 같은 두 가지의 이유로 편심 모터는 휴대용 기기에서 다양한 햅틱 피드백을 생성하는 데 문제가 있다. 이와 같은 단점 중 가장 큰 문제인 응답시간을 최소화 하기 위해 공진모터(Linear Resonant Actuator, LRA)[5]가 개발되고 상용화 되었다. 공진모터는 기계적 회진운동 없이 전자석의 극성을 바꿔 줌으로 자석 사이로 움직이므로 공진점 근처에서 사용자의 기계적 수용기를 자극시키는데 충분 할 뿐 아니라, 응답시간 또한 매우 빠르기 때문에 휴대용 기기에서 사용자에게 버튼감 등의 조작감을 전달해 주기에 충분하다. 그러나 휴대용 기기에서 햅틱 액추에이터는 저주파수에서 고주파까지(0~약 250Hz) 다양한 주파수를 생성해야 다양한 햅틱 감각을 생성할 수 있지만 공진모터의 경우 공진주파수 근처에서만 햅틱 감각이 생성되므로 여러 종류의 햅틱 감각을 생성하는 것이 어렵다. 그러므로 휴대용 기기에서 다양한 햅틱 감각의 생성을 위해 세라믹 기반의 소형 피에조 액추에이터, 솔레노이드, 폴리머를 기반으로 한 소형 액추에이터에 대한 연구가 진행되고 있다 [3,8,9,10].

소형 햅틱 액추에이터가 개발됨에 따라 휴대용기기 내에서 사실적인 촉감을 계산하고 생성하기 위한 햅틱 렌더링에 대한 연구가 진행되었다[11,12,13,14,15,16]. 이로 인해 사용자들은 휴대용 기기에서 다양한 버튼 감각을 전달 받을 뿐 아니라 다양한 가상의 물체와 인터랙션을 할 때 조작감까지 전달 받을 수 있게 되었다. 최근 들어 휴대용 기기는 단순한 정적인 물체로 이루어진 콘텐츠로부터 복잡한 동적인 물체로

이루어진 콘텐츠(메뉴의 이동 및 회전 등)까지 모두 표현하고 있으며 휴대용 기기 내에서 정적 또는 동적인 물체를 조작하는 사용자들은 물체의 정적 거동뿐 아니라 동적인 거동까지 촉각적으로 느끼기를 원한다. 이와 같은 사용자의 요구를 만족시키기 위해 이동진동파와 이를 이용한 햅틱 렌더링 기법이 연구되었다[16]. 본 논문에서는 이동진동파를 생성하기 위한 사람의 햅틱 환각(Haptic Illusion)에 대하여 소개하고 이를 기반으로 이동진동파 생성 방법에 대하여 소개한다.

II. 이동진동파를 위한 햅틱 환각 (Haptic Illusion).

이동진동파는 <그림 1>과 같이 Cutaneous rabbit Illusion(CRI)과 Funneling Illusion(FI)이라는 두 개의 촉감에 대한 환각들을 조합함으로써 구현

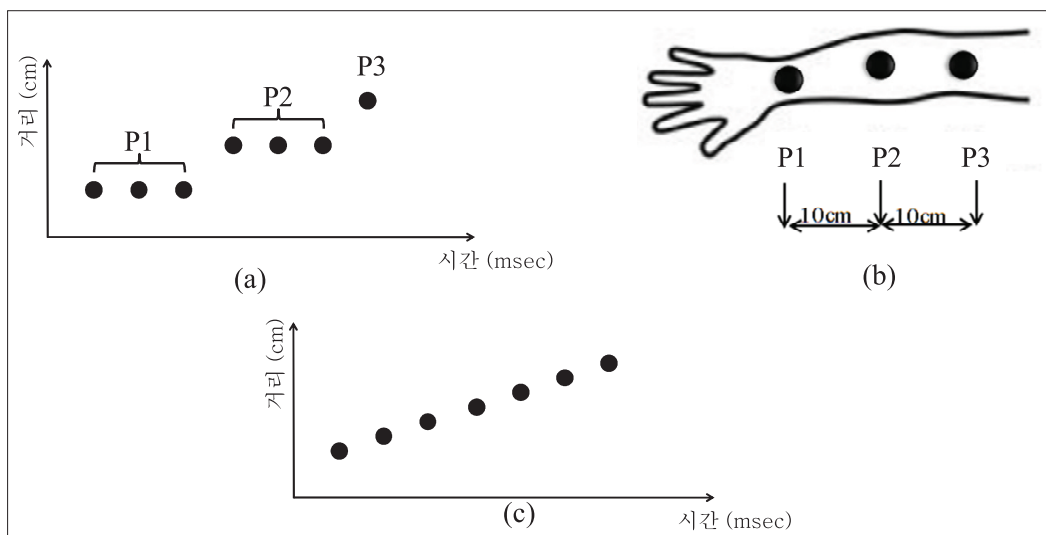


<그림 1> 이동진동파를 생성하기 위한 두 개의 환각

된다. 본 장에서는 CRI와 FI에 대하여 알아보고 어떻게 이동진동파에 적용되는지에 대한 개념을 소개한다.

1. Cutaneous Rabbit Illusion (CRI)

CRI는 피부의 두 개 이상의 지역을 시간차를 두고 두드리면 발생하는 촉감에 대한 환각으로 1972년 F. Geldard와 C. Sherrick에 의해 발견되었다. F. Geldard는 사람의 팔뚝 위에 세 개의 자극기를 위치 시키고(손목 근처, 팔꿈치 근처, 그리고



<그림 2> CRI 파악을 위한 실험

손목과 팔꿈치 사이) 손목 근처의 자극기로 팔뚝을 세 번 자극을 가하고 손목과 팔꿈치 사이의 자극기로 팔뚝을 세 번, 그리고 팔꿈치 근처에 있는 자극기로 자극을 한번 가하였다<그림 2>. 피실험자에게 연속적이지 않고 자극을 전달하였음에도 불구하고 피실험자는 <그림 2(c)>와 같이 작은 토끼가 팔 위를(손목에서 팔꿈치 방향으로) 뛰는 것과 같이 자극이 연속적으로 움직이는 느낌을 전달 받음을 알아내었다. F. Geldard는 CRI를 좀 더 부드럽게 생성하기 위하여 다음과 같은 항목들을 변수로 두어 실험을 수행하였다.

- a) 자극의 이동 방향
- b) Contactors 사이의 거리
- c) 자극들간의 시간 (interstimulus Interval, ISI, 즉 Pn 과 Pn+1 사이의 시간)
- d) 각 step 들에서의 자극의 수 (N)

피실험자는 방향에 관계없이 양방향에서(손목에서 팔꿈치 쪽으로 차례로 올라갈 때와 팔꿈치에서 손목 쪽으로 차례로 내려갈 때) CRI를 경험하였다(즉, 양방향 모두 CRI를 경험하였다). 자극기(contactor) 사이의 거리가 2cm~35cm 내에서

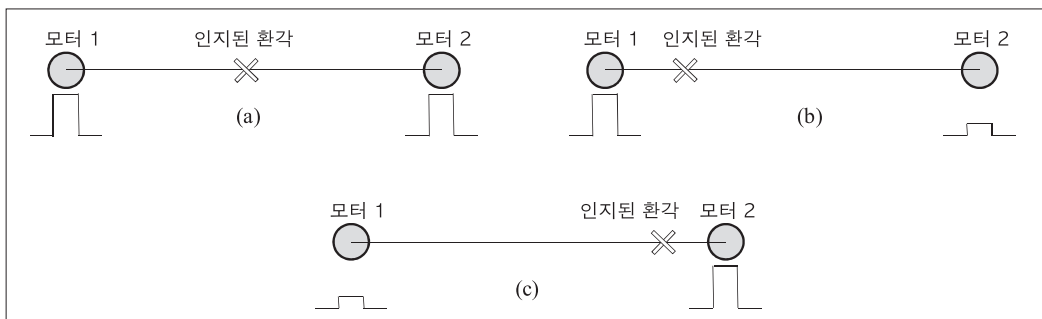
CRI를 경험하였으며 ISI는 큰 영향을 끼치지 않지만 자극들 간의 시간은 200msec를 넘지 않도록 해야 자연스러운 CRI가 경험된다는 사실을 알아내었다. 또한 각 step들에서의 자극의 수(N)는 크게 영향을 받지 않지만 다음 step에서의 자극까지 200msec를 넘지 않아야 하므로 N이 커지게 되면 자연스러운 CRI를 전달받기 힘들며 N값은 3이내면 가장 좋다는 사실을 파악하였다. 자연스러운 CRI를 경험하기 위한 결과를 <표 1>로 정리하였다.

<표 1> 자연스러운 CRI를 경험하기 위한 결과

이동진동파를 위한 변수들	결과
방향	양방향
자극 사이의 거리	2cm ~ 35cm
자극들 사이의 시간 (ISI)	200msec 이내
각 Step에서의 자극 수 (N)	3이하

2. Funneling Illusion (FI)

퍼널링 환각은 사람의 팔 위의 인접한 두 영역에 두 개의 자극을 동시에 주었을 때 사람은 팔 위의 두 자극점 사이에서 자극을 느낀다는 착각이다. 만



<그림 3> Funneling Illusion

일 두 자극의 크기가 같다면 두 자극 사이의 중간지점에서 환각이 발생하며 크기가 다르다면 큰 자극을 준 쪽 가까이에서 자극을 주는 것과 같은 착각을 느낀다. 예를 들어 <그림 3>과 같이 사람의 팔 위에 진동자를 두 개 설치하고 두 개의 진동자를 같은 크기로 구동한다면 사용자는 <그림 3(a)>와 같은 위치에서 환각을 인지하고 진동자 1을 진동자 2보다 센 힘으로 구동시키면 진동자 1과 가까운 곳에서 <그림 3(b)> 환각을 인지한다. 그리고 이와 반대의 경우로 진동자 2를 더 큰 힘으로 구동시키면 <그림 3(c)>와 같은 위치에서 환각을 인지한다.

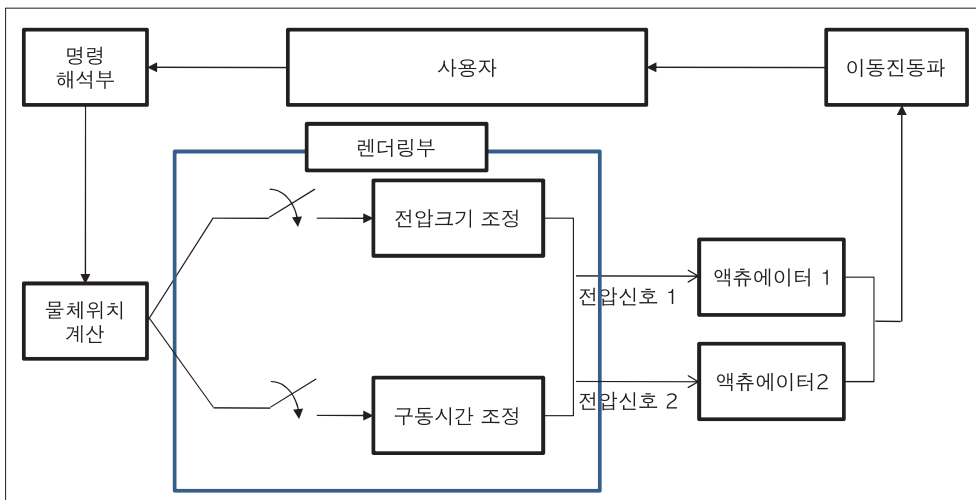
3. 이동진동파 생성

이동진동파의 개념은 CRI와 FI를 이용하여 사용자에게 움직이는 진동신호를 느끼게 하는 것이다. 즉, <그림 4>는 이동진동파를 생성하기 위한 렌더링 프레임워크이다. 제안한 렌더링 프레임 워크를 설명하기 위해 사용자가 휴대용 기기를 기울이는

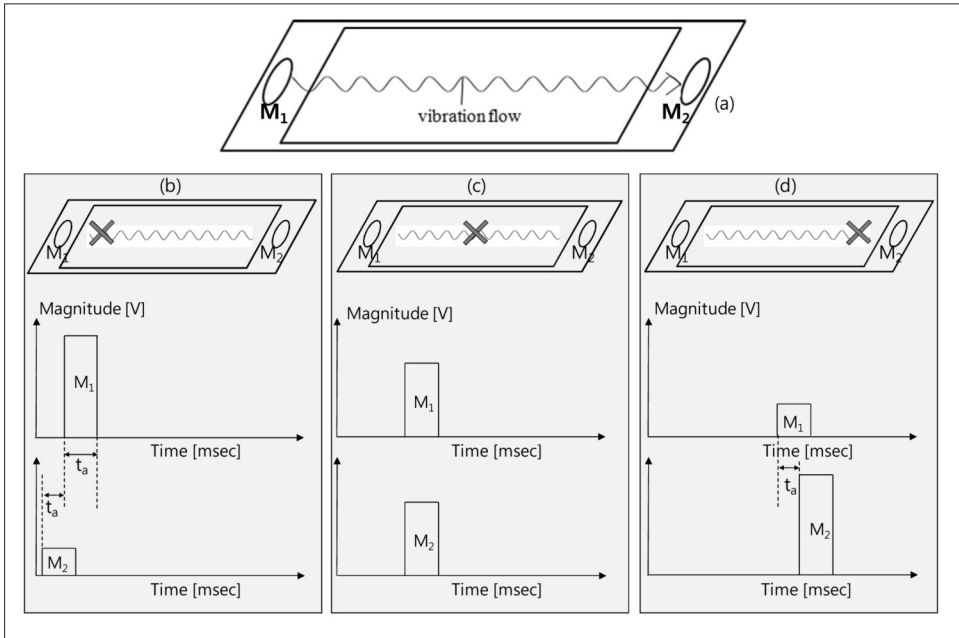
것에 따라서 공이 굴러가는 공굴리기 게임을 생각해 보자.

사용자가 휴대용기기를 기울이거나 버튼을 누름으로써 명령을 내리면 명령 해석부가 사용자의 명령을 해석하여 공을 움직이게 하고 현재 공의 위치를 계산한다. 렌더링 부에서는 공의 위치를 전달 받아서 구동시간 및 구동 전압을 조정하여 액츄에이터 인터페이스 부로 구동입력신호를 보내 각각의 진동 액츄에이터를 구동하여 CRI와 FI라는 환각을 통해 마치 공이 휴대용 기기 표면 위를 굴러가는 것과 같은 느낌을 생성한다.

예를 들어 <그림 5(a)>와 같이 두 개의 진동모터 (M_1 , M_2)를 이용하여, 휴대용기기의 왼쪽에서 오른쪽으로 흘러가는 이동진동파를 생성하는 경우를 생각해 보자. CRI와 FI라는 환각을 이용하여 1차원 이동진동파를 생성하기 위해 두 모터의 전압 입력 크기와 입력 지연시간을 조정한다. 이를 위하여 오른쪽 모터(M_2)를 먼저 구동한 후 왼쪽 모터(M_1)를 구동하면 <그림 5(b), 1단계> 파형의 합성이 디바이



<그림 4> 이동진동파 생성을 위한 렌더링 파이프라인



〈그림 5〉 이동진동파 생성 예

스의 왼쪽부근에서 발생하고 M_1 와 M_2 를 동시에 구동하면 〈그림 5(c), 2단계〉 파형의 합성이 디바이스의 중앙에서 발생한다. 마지막으로 왼쪽 모터 (M_1)를 먼저 구동한 후 오른쪽 모터 (M_2)를 구동하면 〈그림 5(d), 3단계〉 파형의 합성이 디바이스의 오른쪽에서 발생한다. 그러므로 시간에 따라 두 모터들의 구동 시간차이를 조정하면 CRI를 이용하여 이동진동파를 만들 수 있다. 좀더 확실한 이동진동파를 생성하기 위해 사람의 FI라는 환각을 이용한다. 즉, 1단계 〈그림 5(b)〉에서는 왼쪽모터(M_1)의 구동전압의 크기를 오른쪽 모터(M_2)의 구동전압의 크기보다

크게 하여 진동이 디바이스의 왼쪽에서 발생하는 것과 같은 환각을 불러일으키며 2단계 〈그림 5(c)〉에서는 두 모터의 구동전압의 크기를 같게 하고 3단계 〈그림 5(d)〉에서는 오른쪽 진동모터(M_2)의 구동전압의 크기를 왼쪽모터보다 크게 하여 진동이 오른쪽에서 발생하는 것과 같은 환각을 전달해 준다. 이와 같이 두 개의 진동모터의 구동 지연시간과 구동전압을 조정하여 CRI와 FI라는 환각을 생성하여 사용자에게 이동진동파를 느끼게 해 준다. 이동진동파를 생성하는 각 액츄에이터로의 제어 입력신호는 수식 (1)과 (2)로 표현 가능하다.

$$V_1(t) = \sum_{k=1} v_a [u(t - ((k-1)t_p + (k-1)t_n)) - u(t - (kt_p + (k-1)t_n))] \quad (1)$$

$$V_2(t) = \sum_{k=1} v_b [u(t - ((k-1)t_p + (k-1)t_n) + t_a) - u(t - (kt_p + (k-1)t_n) + t_a)] \quad (2)$$

수식 (1)과 (2)에서 u 는 단위 계단 입력(unit step function)을, v_a 와 v_b 는 각 모터를 구동하기 위한 전압의 크기를, t_a , t_b 은 입력전압의 펄스와 관계된 시간(그림 5), 그리고 t_n 은 n 번째 펄스입력이 끝난 시간부터 두 번째 펄스 입력이 시작할 때까지의 시간차이다. 이와 같이 각 진동모터의 구동지연시간과 구동 전압의 크기를 조정함으로써 사용자에게 CRI와 FI라는 환각을 불러일으킴으로 이동진동파를 생성할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 이동진동파 생성을 위한 휴먼

햅틱스(human haptics)에 대하여 간단히 설명하였으며 이를 기반으로 한 이동진동파 생성을 위한 렌더링 기법에 대하여 소개하였다. 이동진동파는 두 개 이상의 진동모터의 구동지연 시간 및 구동전압을 조정하여 생성되며 사람에게 진동의 흐름을 느끼게 해 준다. 휴대용 기기에서 진동의 흐름을 표현하는 이동진동파 기술은 그래픽 물체의 움직임을 촉각적으로 모사할 수 있으므로 휴대용 기기의 일반적 조작뿐 아니라 게임 및 엔터테인먼트 등 기타 사용자 인터랙션 분야로 서비스 영역이 더욱 확대될 것으로 기대된다. 또한 인지 채널 중 한가지를 잃어버린 장애인들을 위한 다양한 정보전달이 가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] R.S. Johansson, and A.B. Vallbo, "Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin," *Journal of Physiology*, Vol. 286, pp.283-300, 1979
- [2] L.Kruger, M.Friedman, E.Carterette. (1996). *Pain and Touch*, Elsevier, 394 pages
- [3] M. Morioka et al. (2008). "Absolute thresholds for the perception of fore and aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot", *Journal of sound and vibration*, 314(1-2), pp.357-370
- [4] H. Wakiwakaa, M. Ezawaa, H. Katoa, W. Yoshimuraa, H. Itob,N. Fukudab, K. Matsuhirob. (2002) "Development of high-performance millimeter-size vibrator for cellular phones", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 242-245(2), pp 242-245
- [5] S. D. Kweon, I. O. Park, Y. H. Son, J. Choi and H. Y. Oh. (2008). "Linear vibration motor using resonance frequency", US PATENT no.7,358,633 B2, Assignee Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd., 2008
- [6] Chien-Sheng Liu, et al. (2009). "Design and Characterization of Miniature Auto-Focusing Voice Coil Motor Actuator for Cell Phone Camera Applications", *IEEE Trans. On Magnetics*, 45(1), pp.155-159
- [7] S. H. Chung et al. (2009), "Apparatus for generating vibration and mobile device employing the same", KR PATENT no. 10-2010-0002069, LG Electronics Inc., 2009
- [8] T.H. Yang, D. Pyo, S.Y. Kim, Y.J. Cho, Y.M. Lee, J.S. Lee, E.H. Lee, D.S. Kwon, " A New Subminiature Impact Actuator for Mobile Devices", *World Haptics 2011*, pp. 95-100, 2011
- [9] 김상연, 양태현, 한재준, 방원철, " 스트로크가 향상된 액츄에이터", (출원번호 : 10-2009-0096681)
- [10] 김상연, 양태현, 진경복, " 저주파의 관성력 발생 모듈", 출원번호, 10-2009-0098917, 2009
- [11] B.L. Harrison, K.P.Fishkin, A. Gujar, C.Mochon, and R.Want, "Squeeze Me, Hold Me, Tilt Me! An Exploration of Manipulative User Interfaces," *Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'98)*, pp.17-24, 1998

- [12] T. Kaaresoja, and Jukka Linjama, "Perception of Short Tactile Pulses Generated by a Vibration Motor in a Mobile Phone," First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'05), pp.471-472, 2005
- [13] A. Chang, S. O'Modhrain, R. Jacob, E. Gunther, and H. Ishii, "ComTouch: Design of a Vibrotactile Communication Device," ACM Designing Interactive Systems Conference, pp.312-320, 2002
- [14] I. Oakley, S. O'Modhrain, "Tilt to Scroll: Evaluating a Motion Based Vibrotactile Mobile Interface," First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'05), pp.40-49, 2005
- [15] S.Y. Kim, K.Y. Kim, B.S. Soh, G.Yang, S.R. Kim, "Vibrotactile Rendering for Simulating Virtual Environment in a Mobile Game, IEEE transaction on consumer electronics, Vol 52, No 4, pp.1340-1347, 2006
- [16] S.Y. Kim, J.O. Kim, and K.Y. Kim, "Traveling Vibrotactile Wave - A New Vibrotactile Rendering Method for Mobile Devices", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 55 No. 3, August, pp.1032-1038, 2009
- [17] S.Y. Kim, J.C. Kim, "Traveling Vibrotactile Wave based on a Haptic Processor", IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp.835-836, 2001

필자소개



김상연

- 1997년 2월 : KAIST 석사
- 2002년 ~ 2003년 4월 : 가상현실연구센터 연구원
- 2005년 2월 : KAIST 박사
- 2005년 2월 ~ 2006년 2월 : 삼성 종합기술원 책임연구원
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 조교수
- 주관심분야 : Haptic Rendering, Haptic Actuator, Virtual Reality, HCI