

햅틱스 기술개발 동향 및 연구 전망

The State of the Art and R&D Perceptives on Haptics

디지털 홈 특집

경기욱 (K.U. Kyung) 스마트인터페이스연구팀 선임연구원
박준석 (J.S. Park) 스마트인터페이스연구팀 팀장

목 차

-
- I . 햅틱스란?
 - II . 햅틱 인터페이스 연구 동향
 - III . 신경과학 및 심리학적 연구
 - IV . 햅틱스 주요 이슈 및 전망
 - V . 결론

햅틱스(Haptics)란 사람에게 촉감을 전달하는 방법을 연구하는 것에 관한 학문이다. 컴퓨터와 정보통신 기술의 발달과 함께 촉각 인터페이스는 시각/청각을 넘어선 새로운 정보 전달의 수단으로 대두되고 있다. 햅틱스의 연구분야는 크게 촉감을 전달하기 위한 물리적 장치를 일컫는 햅틱 인터페이스, 사람이 느끼는 촉감의 메커니즘을 연구하는 신경과학 및 심리학, 촉감을 모델링하기 위한 햅틱 렌더링, 그리고 햅틱스 기술을 적용한 응용시스템의 개발로 나눌 수 있다. 본 고에서는 현재 햅틱스 관련 연구분야의 세계적인 기술 수준을 소개 및 분석하고, 보다 사실적인 촉감을 전달하기 위한 연구동향을 기술한다. 또한 향후 햅틱스 기술이 응용될 주요 연구 분야를 예측해 본다.

I. 햅틱스란?

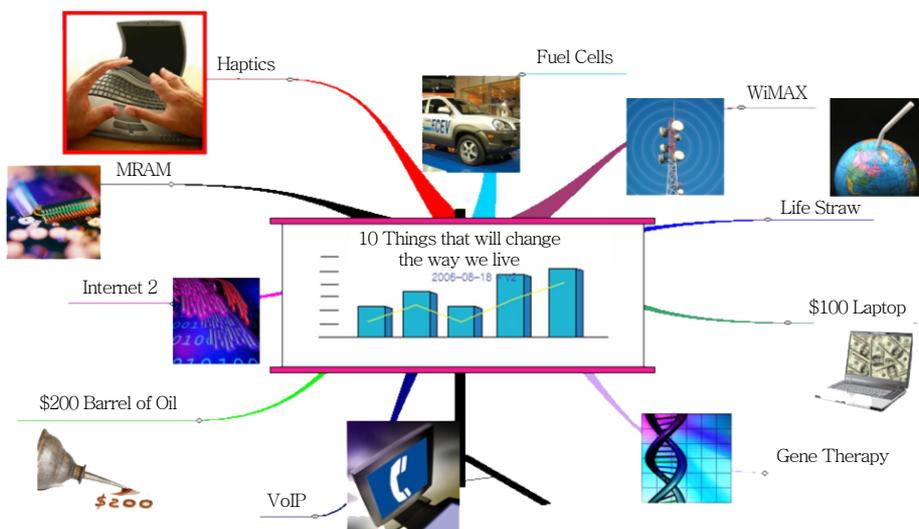
2006년 2월 16일 세계적인 경제 전문지 포브스(Forbes)는 다양한 전문가들의 분석을 통해 앞으로 인류의 미래의 삶을 바꿀 10가지(10 things that will change the way we live)를 선정하여 발표하였다(그림 1) 참조[1]. (그림 1)에 도시한 바와 같이 원유가 배럴 당 200달러에 달하는 고유가 시대에 살게 될 것이라는 예측 이외에는 모두 과학기술과 관련된 것이다. 여기서 주목할만한 점은 연료전지나 음성패킷망(VoIP), 유전자 치료 등 대부분의 과학기술 내용이 현재에 이미 주목을 받고 있으면서 많은 사람들이 대부분 공감할만한 내용이었다. 그러나 여기서 우리는 일반인들에게는 매우 생소한 기술 하나를 발견할 수 있는데 바로 ‘햅틱스(haptics)’이다. 현재의 과학기술 동향을 파악하고 미래를 예측해 보는 MIT의 Technology Review 또한 21세기에 대부분의 미디어와 인터페이스에 이 ‘햅틱스’ 기술이 적용될 것이라고 예측한 바 있다[2]. 과연 햅틱스란 무엇이며 어떤 분야에 적용될 수 있는 기술이기에 이토록 주목을 받는 것일까? 본 글에서는 햅틱스 기술이란 무엇인지 소개하고, 햅틱스 분야의 주요 연구 내용 및 방법을 분석해 본다. 또한 햅틱스

기술이 미래에 어떤 분야에 적용되어 우리의 삶에 영향을 미치게 될 지 예측해본다.

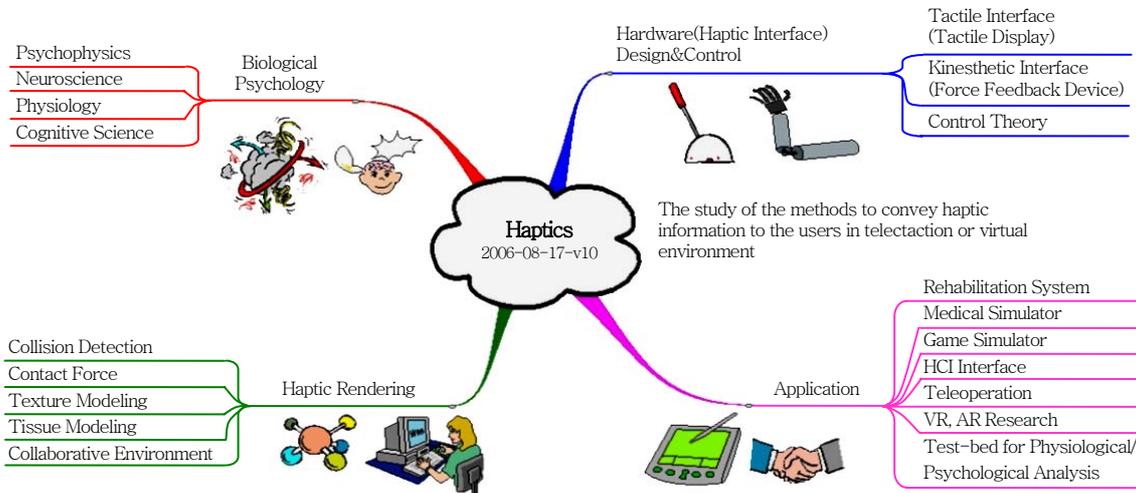
1. 햅틱스의 정의

본 절에서는 햅틱스 연구란 무엇인지 개괄적으로 소개하고자 한다. 햅틱(haptic)이라는 단어는 그리스어로 ‘만지다’라는 뜻의 ‘haptesthai’에서 유래한 영어 단어로 ‘촉각의, 만지는’이라는 형용사적 의미로 사용된다[3]. 사람의 촉각을 구체적으로 표현하는 단어로는 손가락과 팔 등의 근감각을 통해서 만지고 있는 환경을 느끼는 과정을 가리키는 ‘kinesthetic’과 피부의 직접적인 접촉을 통해 접촉 환경을 느끼는 과정을 가리키는 ‘tactile’이라는 단어가 있는데, ‘haptic’은 햅틱스 연구분야에서는 사전적 의미와는 별개로 위의 두 단어의 의미를 포함하여 촉각과 관련된 모든 감각을 합쳐서 부르는 일반적인 용어로 사용되고 있다.

햅틱스(haptics, 촉각학)는 학문의 한 분야로서, 가상환경(virtual environment) 혹은 조종기와 로봇 등을 이용하여 원격으로 물체를 만지는 환경(teletaction)에서 사용자에게 촉각 정보(haptic information)를 전달하는 방법과 관련된 연구의 총칭이다[4]. 예를 들면 마이너리티 리포트나 코드명 J



(그림 1) 인간의 미래의 삶을 바꿀 10가지



(그림 2) 햅틱스의 주요 연구 분야

와 같은 영화에서 표현된 것처럼 컴퓨터 그래픽 등의 가상 환경 속에서 사용자가 물체를 만지고 옮기고 하는 행동을 가능하게 하는 데 필요한 모든 하드웨어, 소프트웨어 및 심리학적 연구가 모두 햅틱스의 영역에 포함된다. 즉 햅틱스는 촉감을 재현하는 것을 목적으로 다양한 학문의 분야가 모여서 탄생한 새로운 학문이라 할 수 있겠다.

2. 햅틱스의 탄생

햅틱스 연구는 시청각을 중심으로 한 컴퓨터 인터페이스 혹은 가상 환경에 대한 사용자의 새로운 감각 정보에 대한 요구의 증대와 함께 1990년대 초반 Touch Lab과 AI Lab을 비롯한 MIT의 연구자들을 중심으로 본격적인 연구가 시작되었으며[5], 짧은 역사 속에서도 유럽, 캐나다, 일본, 한국 등으로 급격하게 관련 연구가 확산되어 갔다. 특히 2000년대에 들어 햅틱 커뮤니티(Haptic Community)와 국제 햅틱스 학회(International Society for Haptics)가 결성되어 연구자들끼리 활발하게 연구 정보를 교환하고 있다[6]-[8]. 또한 아직도 연구의 초기 단계임에도 불구하고 햅틱스 기술을 응용한 다양한 상품들이 개발되어 사용자에게 새로운 인터페이스를 제공하거나 기존의 인터페이스보다 훨씬 부가가치가 높은 환경을 제공하고 있으며, 또한 앞서 일부 문

헌에서 언급한 바와 같이 향후 기대치 또한 매우 높게 평가 받고 있다.

3. 햅틱스의 주요 연구분야

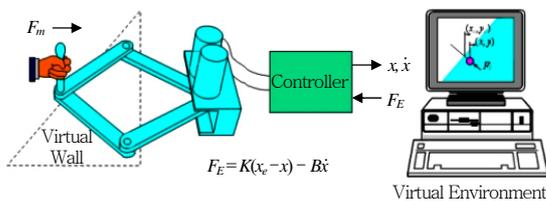
햅틱스의 연구분야는 크게 촉감을 전달하기 위한 물리적 환경을 일컫는 햅틱 인터페이스 개발 및 제어, 사람이 느끼는 촉감의 메커니즘을 연구하는 신경과학 및 심리학, 물리적 특성을 결정하고 하드웨어와 소프트웨어를 연동시켜 촉감을 모델링하는 일련의 과정을 일컫는 햅틱 렌더링, 그리고 햅틱스 기술을 적용한 응용시스템의 개발로 나눌 수 있다(그림 2) 참조. 본 고의 II장에서는 햅틱 인터페이스의 연구동향에 관하여, III장에서는 신경과학 및 심리학적 연구에 관하여, IV장에서는 햅틱 렌더링을 포함한 주요 이슈 및 응용 분야에 대해서 소개하며, V장에서는 햅틱스 연구의 향후 전망에 대해서 기술한다.

II. 햅틱 인터페이스 연구 동향

1. 햅틱 인터페이스의 정의

햅틱 인터페이스(haptic interface)는 넓은 의미로는 사용자에게 촉감을 전달하는 시스템 전체를 가

리키며, (그림 3)에 도시된 바와 같이, 사용자가 직접 접촉하게 함으로써 사용자에게 물리력 전달을 통해 촉감을 발생시키는 하드웨어 장치인 햅틱 디바이스(haptic device, 햅틱장치), 원격접촉(teletaction) 환경 혹은 컴퓨터 그래픽과 물리적 특성치 등으로 이루어진 가상환경, 햅틱 디바이스의 움직임을 가상 환경에 전달하고 가상환경과의 접촉력을 햅틱 디바이스로 전달하는 역할을 하는 제어기로 이루어진다. 햅틱 인터페이스의 궁극적인 목적은 모델링되어 있는 가상 환경 혹은 실제 환경의 물리적 특성을 사용자가 햅틱 디바이스를 통하여 똑같이 느끼게 하는 것이다. (그림 3)에서 보는 것처럼 햅틱 인터페이스는 햅틱 디바이스와 가상의 환경이 하나의 환경에 존재할 수 있도록, 햅틱 디바이스의 위치 변화를 표현하는 가상의 대리자가 가상환경 속에 존재한다. 가상의 대리자가 가상의 물체에 부딪쳐서 발생한 힘이 F_E 고, 사람이 햅틱 디바이스를 통해서 느끼는 힘이 F_m 이라면 두 값이 똑같이 되도록 제어하는 것이 이상적인 햅틱 인터페이스 시스템이다. 이상적인 햅틱 인터페이스의 구현을 위해서는 정확한 모델링 방법과 모델을 구현할 수 있는 하드웨어 및 제어 방법에 관한 연구가 뒷받침 되어야 한다. 햅틱 인터페이스는 좁은 의미로 하드웨어적인 부분만으로 제한되어 햅틱 디바이스와 동일한 의미로 사용되는 경우가 많다.

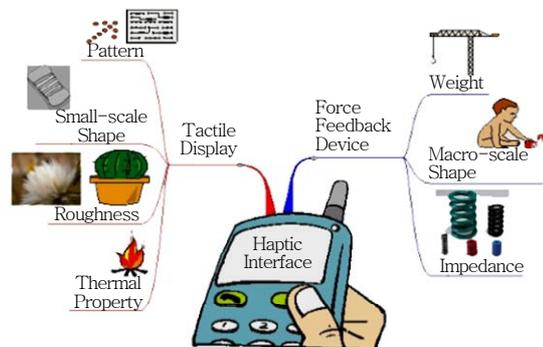


(그림 3) 햅틱 인터페이스의 개념

2. 햅틱 인터페이스의 개발 동향

햅틱 인터페이스는 하드웨어 개발 관점, 즉 햅틱 디바이스를 개발하는 관점에서 크게 두 분야로 나눌 수 있다. I장에서 설명한 바와 같이 사람은 촉각을

두 가지 주요 경로를 통하여 느끼며, 햅틱 인터페이스도 마찬가지로 두 가지 주요 분야로 나누어 개발되어 왔다(그림 4 참조). 첫번째는 근감각(kines-thesia)에 관련된 것으로, 우리가 물체의 질량이나 굳고 말랑말랑한 정도, 물체의 외형 등을 느낄 때 근육과 관절의 움직임을 통해 촉감을 느끼는 현상이다. 이 과정은 물리적으로는 '힘'과 연관되어 있으므로, 햅틱 디바이스는 힘을 생성하기에 유리한 로봇 모양과 같은 기구적 구조를 띠고 있으며 이와 같은 목적으로 만들어진 햅틱 디바이스를 '힘피드백장치(force feedback device)'라고 부른다. 두번째는 질감(tactility)에 관련된 것으로 접촉하고 있는 표면의 무늬 혹은 작은 모양들, 표면의 부드럽고 거친 정도, 냉온감 등을 느낄 때 피부를 표면에 직접 접촉하여 느끼는 현상이다. 이 과정은 여러 가지 복잡한 물리적 요소들로 이루어져 있어서 질감을 재현하고자 하는 햅틱 디바이스들의 모양도 매우 다양하며, 이와 같이 질감을 전달하는 목적으로 만들어진 장치를 '질감제시장치(tactile display)'라고 부른다. (그림 4)에 도시된 바와 같이 햅틱 디바이스는 목적에 따라 force feedback device와 tactile display의 두 분야로 나뉘어지며, 초창기 연구는 force feedback device에 집중되었으나 최근 들어서 tactile display에 대한 연구가 활성화되기 시작하고 있다[4]. (참고: force feedback device의 국문 명칭은 힘피드백장치, 힘귀환장치, 힘반향장치, 힘반사장치, 반력장치 등 통일된 용어가 없어 본 고에서는 force feedback device라는 원문 표현을 기준으로 사용한다.)



(그림 4) 햅틱 인터페이스 연구분야

가. 힘피드백장치(Force Feedback Device)

햅틱스 연구의 시작은 1993년 당시 MIT 인공지능연구실의 K. Salisbury의 지도를 받고 있던 Thomas Massie의 대학 졸업논문으로부터 시작되었다고 해도 과언이 아니다[9]. 축방향 3자유도 즉 x, y, z축의 방향으로 임의의 힘을 생성하여 재현할 수 있는 이 햅틱 디바이스는 PHANTOMTM이라고 불리며, 그들에 의해 창업된 SensAble(사)를 통해 사용화되어 현재까지 다양한 개량 제품과 함께 세계에서 가장 많이 팔리면서 가장 대표적인 햅틱 디바이스가 되었다(그림 5(좌) 참조)[10]. 이듬해인 1994년 일본의 츠크바 대학의 Iwata 교수 연구실에서는 링크가 직렬형(serial type)으로 연결되어 있는 PHANTOM과 달리, 링크가 병렬형(parallel type)으로 연결되어 있는 haptic master를 개발하였다(그림 5(우) 참조)[11]. 병렬형 연결구조는 직렬형 구조에 비하여 동작 범위는 좁지만 더 큰 출력을 낼 수 있는 등 기구적인 장점이 있으므로 이후 직렬형과 함께 널리 사용되는 햅틱 디바이스의 한 형태가 되어 왔다. 2002년 스위스 EPFL에서는 병렬형 구조인 delta haptic device를 개발하여 Force Dimension(사)를 통해 상품화 하였으며, 현재는 3자유도, 6자유도 등의 제품을 판매하고 있다(그림 6 참조)[12].

Force feedback device의 다른 형태로는 사람의 팔이나 손가락 등의 골격 모양으로 제작되어 사용자가 착용한 상태에서 관절에 직접적으로 힘을 가하는 방식인 외골격형(exoskeleton type) 장치가 있으며 이탈리아 PERCRO, Virtual Technologies 사 등에 의해서 개발되어 왔다(그림 7 참조)[7], [13]. 또 기존의 장치들이 로봇과 같은 링크구조를 가지고 만들어진 것과 달리 와이어를 직접 손가락 혼을 손으로 쥐는 부분에 연결하여 촉감을 재현하는 인터페이스도 개발되어 왔는데, 동경 공과대학의 SPIDAR가 그 중 가장 대표적이며(그림 7 참조) [14], 유사한 원리를 이용한 인터페이스의 개발이 시도되고 있다.

국내에선 KAIST, KIST, 한양대학교, GIST 등



(그림 5) PHANTOM과 Iwata의 Haptic Master



(그림 6) Delta와 Omega Haptic Device



(그림 7) PERCRO의 Exoskeleton Interface(좌), 동경 공대의 SPIDAR(우)

에서 force feedback device를 연구 개발하고 있다[6].

나. 질감제시장치(Tactile Display)

햅틱 인터페이스의 초창기 연구들은 대부분 force feedback 장치를 중심으로 개발되어 왔으며, 앞 문단에서 서술한 바와 같이 많은 장치들이 상용화에 이르렀을 정도로 수준 높은 연구가 수행되었다. 그러나 상대적으로 표면의 작은 무늬나 거칠기 등과 같은 질감(texture)을 표현하는 연구는 아직도 초보적인 수준에 머무르고 있다. 질감을 표현하기 위한 장치를 가리켜 질감제시장치라고 하는데 사람은 질감을 다양한 방법으로 지각하게 되므로, 질감제시장치의 피부 자극 방법 또한 다양하다. 질감의 경우 근

력의 경우와 같이 '힘'이라는 하나의 요소에 의해 정의될 수 없기 때문에, 질감제시 연구에는 III장에서 언급할 신경과학 및 심리학적 연구가 필수적으로 동반되어야 한다. 본 II장에서는 질감제시장치의 하드웨어 개발 동향만을 <표 1>과 같이 자극 방법에 따라 분류하고, 구체적인 자극 원리 및 활용 예, 그리고 각 형태의 장치들이 가지고 있는 해결문제 등을 서술하였다. 서술된 자극 방법 중 진동을 이용하는 vibrotactile display는 손쉬우면서도 자극의 전달이 빨라 간단한 신호만을 필요로 하는 곳에 많이 적용되고 있다. 그리고 핀배열(pin-array) 방식은 피부에 여러 개의 핀들이 모양을 이루어 수직방향으로 직접 자극하므로 표면의 무늬를 가장 직관적으로 전달할 수 있으므로 가장 많이 시도되는 형태이다.

앞서 서술한 바와 같이 햅틱 디바이스는 force feedback device와 tactile display로 분류되어 연구되어 왔는데, 최근 들어서는 tactile display의 크

기가 force feedback device 등에 부착될 수 있을 만큼 작게 개발되기 시작하면서 힘과 질감을 동시에 느낄 수 있는 방법들이 연구되고 있다[15]. 또한 앞서 언급한 Haptic Community의 웹사이트에서 haptics photo gallery를 방문하면 현재까지 개발된 다양한 햅틱 인터페이스들의 모습을 볼 수 있다[7].

3. 햅틱 인터페이스 특허 동향

한때 워크맨으로 대표되며 전세계 전자시장을 휩쓸었던 소니는 삼성전자를 비롯한 신흥 전자회사의 부흥으로 인해 1990년대 후반에 들어서서 쇠락의 위기를 맞았으나, 그 가운데서도 게임콘솔 플레이스테이션은 전세계 게임시장을 휩쓸며 소니의 명성을 지켜주었다. 플레이스테이션2에 장착된 진동패드 '듀얼쇼크'는 게임의 실감을 높이면서 사용자들을 열광케 하였다. 그러나 2005년 3월 소니는 미국의

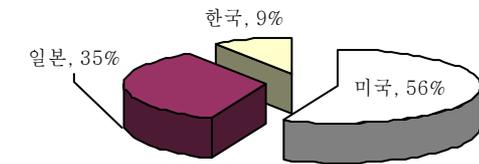
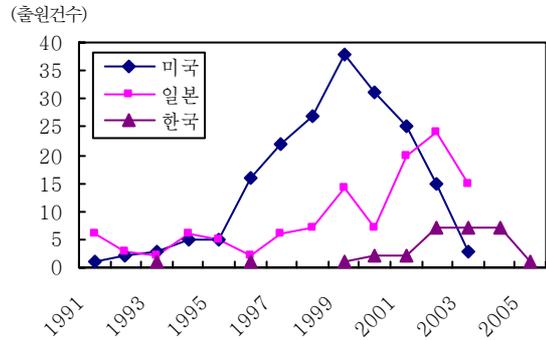
<표 1> 질감제시장치 분류 및 개발 동향

분류	자극 방법	개발 예	주요 해결 과제
Vibrotactile Type	진동기를 이용한 진동 자극	 Cyber Touch, Immersion[16]	진동패턴의 활용법
Pin-Array Type	접촉 피부면에 대해 수직 운동하는 핀 배열에 의한 자극	 Tactile Display Mouse, KAIST[17]	구동기(actuator) 개발 장치/제어부 소형화 설계 저전력 설계
Pneumatic Type	분사구/흡입구를 통한 공기의 분사력/흡입력 자극	 Suction Pressure Display, Univ. of Tokyo[18]	펌프/밸브 소형화
Shear Display	피부 표면을 스치는 자극	 Lateral Skin Deformation Display, McGill Univ.[19]	효용성 평가 반응속도 및 자극 크기 장치/제어부 소형화 설계
Electrocutaneous Display	Electrode(전극)의 접촉을 통한 자극	 Electric Stimulator University of Wisconsin-Madison	효용성 평가 안전 설계
Electrostatic Type	정전기력을 이용한 자극	 Electrostatic Display, Univ. of Tokyo[15]	효용성 평가 저전압 고정전기력 설계
Thermal Display	흡열/발열이 가능한 소자 (Ex. Peltier Cell)를 이용 냉온감 재현	 Thermal Display KAIST[6]	냉각장치 소형화 다른 자극과의 조합방법

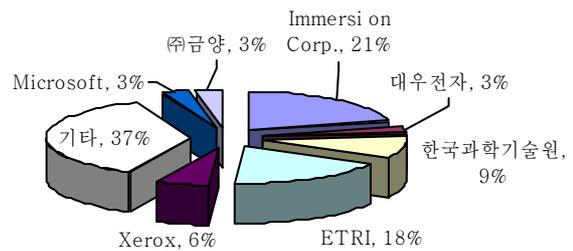
이머전(Immersion)(사)가 제조한 진동패드 특허 침해 소송에서 소니가 이머전에 9,070만 달러를 배상하라는 최종 판결을 받았으며, 항소에서도 패소하였다. 그리고 소니는 지금도 닌텐도, Agere Systems 등의 회사와 플레이스테이션 관련 소송에 휘말려 있다. 또 이머전(사)는 2003년에는 마이크로소프트를 제소하여 2,600만 달러에 합의를 받아낸 바 있다. 그리고 한국의 삼성전자 등의 기업도 이머전에 기술을 내고 관련 기술을 개발하고 있는 형편이다. 햅틱스 기술이 서서히 시장에 등장하기 시작하면서 초창기 특허권을 획득했던 회사들의 저력이 빛을 발하기 시작하고 있는 것이다. 본 장에서는 우리나라, 일본, 미국을 중심으로 특허 동향을 살펴보기로 한다.

(그림 8)은 햅틱스 관련 미국, 일본, 한국에서 출원된 특허 건수의 동향 및 각국의 비율을 보여준다 [20]. 그래프에서 알 수 있듯 미국에서는 1990년대 후반 햅틱스 관련 특허가 매우 활발하게 출원되었으며, 일본과 한국이 2~3년의 시간 차이를 두고 같은 형태를 따라가고 있는 사실을 알 수 있다. 최근 들어 특허 출원이 감소하고 있으나 이 현상은 과거 햅틱스 연구가 하드웨어 개발에 관련된 연구가 집중되면서 나타난 현상으로, 향후 햅틱스 기술이 다양한 시스템에 응용되기 시작하면서 새로운 특허가 많이 출원될 것으로 예상되고 있다. 특히 우리나라가 지금과 같은 종속적인 위치에서 벗어나기 위해서 다양한 응용분야 및 아직도 초보단계에 있는 tactile display 등에 관한 연구에 더 많은 노력을 기울여야 함을 알 수 있다.

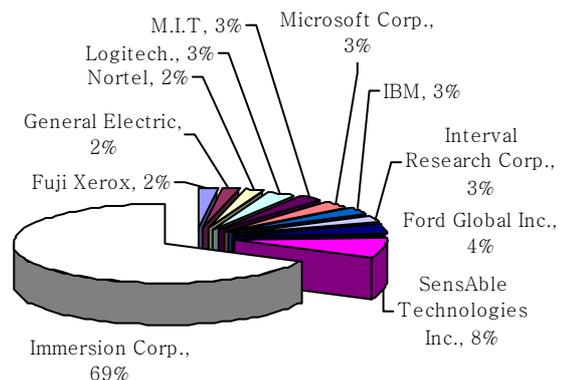
(그림 9)는 한국에서 출원된 햅틱스 관련 특허의 출원 주체별 분포를 보여준다[20]. 한국에서의 특허마저 미국의 이머전(사)가 가장 많은 비율을 차지하고 있음을 알 수 있으며, 이외에 ETRI와 KAIST 등의 연구기관이 중심을 차지하고 있다. 그리고 Microsoft나 Xerox(현 Fuji Xerox)같은 외국 기업이 한국의 기업들보다 더 많은 특허를 출원하고 있음을 알 수 있다. (그림 10)은 미국에서 출원된 특허를 분류한 것인데 이머전(사)가 무려 70%에 달하는 압도적인 위치를 차지하고 있음을 알 수 있다[20].



(그림 8) 한·미·일 특허출원 연도별 동향 및 비율



(그림 9) 한국 특허 연구 주체별 출원비율



(그림 10) 미국 특허 연구 주체별 출원비율

이머전의 특허는 피할 수가 없다는 속설이 있는 수준이다. 눈여겨 볼만한 점은 MS, Logitech, IBM, Ford, GE, Nortel, Xerox 등 다양한 분야의 기업들이 햅틱스 기술에 대한 기대를 가지고 특허를 점유

하고 있다는 점이다. 우리나라 기업들의 햅틱스에 대한 관심이 아직 아쉽다.

Ⅲ. 신경과학 및 심리학적 연구

1. Biological Psychology의 필요성

심리학은 인간의 의식과 작용(행동)을 탐구 대상으로 하는 학문으로 최근 들어 인문학의 범위를 넘어 인간이 관련되어 있는 생물학(biology), 인지과학(cognitive science), 인간공학(ergonomics), 물리학(physics) 등으로 연구 영역이 확산되고 있다. 특히 정보통신 기기의 발달과 함께 등장하는 다양한 인터페이스의 출현은 사용자 평가와 효용성의 측면에서 ‘사람’을 대상으로 하는 심리학적 접근의 중요성은 점차 증가하고 있는 추세라고 할 수 있다. 생물학적 심리학(biological psychology) 혹은 행동학적 신경과학(behavioral neuroscience)은 이러한 추세를 대변하는 새로운 영역으로 사람의 지각(perception) 및 인식(cognition)과 관련된 현상을 해석하기 위하여 생물학(신경과학), 인지과학, 물리학, 인간공학을 망라한 심리학적 연구 방법을 일컫는다. 사람의 촉감을 느끼는 과정은 물리적 자극이 피부 속의 감각 신경에 연결되어 있는 기계적 자극 수용

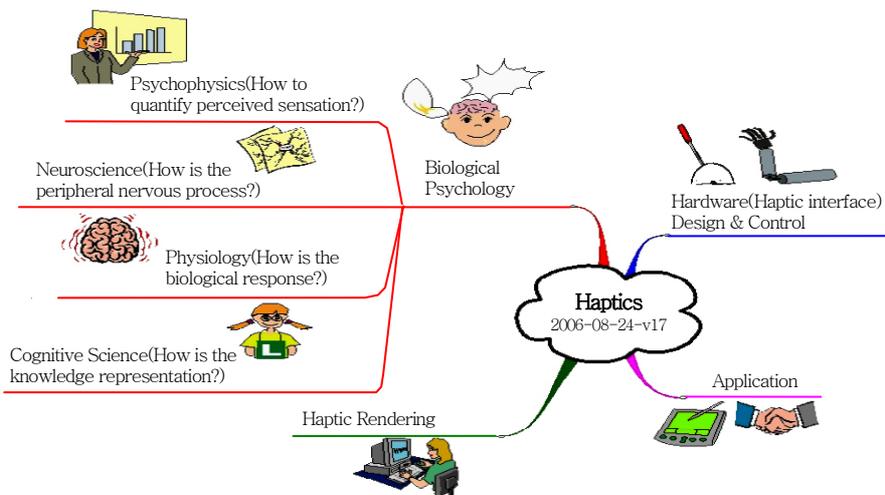
기(mechanoreceptor)를 자극하고, 전기적 신호로 변환되어 척수를 거쳐 뇌로 전달되어 지각 및 인식되는 복잡한 과정이므로, 사실적인 촉감을 재현하고자 하는 햅틱스 연구에서는 생물학적 심리학연구가 필수적이라 할 수 있다. 햅틱스 연구에서 생물학적 심리학 연구가 어떻게 적용되는지 살펴보자.

2. 신경과학 및 심리학적 연구 동향

햅틱스 연구에서 생물학적 심리학은 (그림 11)에 보여지는 것처럼 정신물리학, 신경과학, 생리학 및 인지과학의 방법이 현재 많은 연구자들에 의하여 시도되고 있다. 이러한 접근법은 비단 햅틱스 연구뿐 아니라 사람을 대상으로 하는 연구나 제품에서 연구자나 개발자가 반드시 학습해 두어야 할 부분이라고 할 수 있다.

가. 정신물리학

정신물리학(psychophysics)은 자연현상을 정량화하는 것을 목적으로 하는 ‘물리학’의 접근법을 심리학에 적용하는 것으로 정량화된 외부의 자극(변화)에 대해 사람이 심리적으로 느끼고 있는 감정 혹은 감각을 정량화하여 입력 자극과의 관계를 밝히는 탐구 방법을 일컫는다. 이러한 방법은 햅틱스에서



(그림 11) 햅틱스에서 생물학적 심리학의 필요성

거칠기, 온감 등과 같은 물리적 수치가 아닌 감성적인 값으로 표현되는 감각을 tactile display 등의 변인과 상관관계를 밝힐 경우에 흔히 사용되는 방법이다[17].

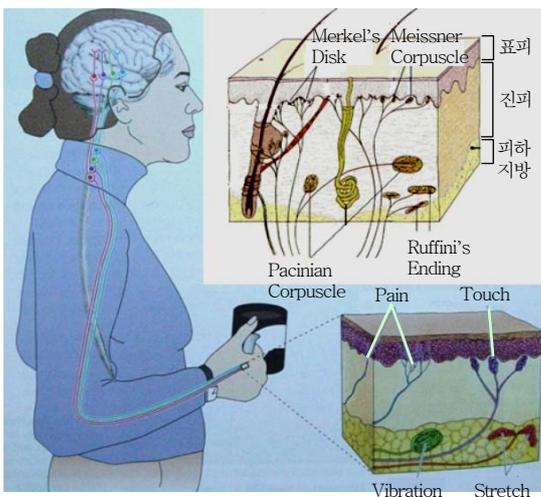
나. 신경과학 및 생리학

신경과학(뇌과학, neuroscience)은 인간이 갖는 물리적 및 정신적 모든 기능과 관련된 뇌의 메커니즘을 연구하는 학문이며, 생리학(physiology)은 생물학의 한 분야로 생물의 기능을 과학적으로 분석하는 연구분야이다. 햅틱스 영역에서 신경과학과 생리학은 (그림 12)에서 보는 것처럼 외부자극을 받아들여 전기적 신호로 변환하는 피부의 기계적 자극 수용기의 특성 및 전달되는 신호를 분석하는 방법으로 이루어졌다[21]. 사람의 피부에는 대표적으로 4종류의 기계적 수용기가 있다. (그림 12)에서 볼 수 있는 바와 같이 메르켈 디스크(Merkel's Disk)는 피부 가까이 분포하며, 크기가 작고 밀도가 높으며 손끝에 특히 많이 분포한다. 0.4~3Hz의 피부 자극에 반응하고 0.4~1Hz에 민감하며, 주로 표면의 미세한 압력분포에 반응하며 무늬나 모양을 지각하는 과정과 연관되어 있다. 마이스너 소체(Meissner Corpuscle) 역시 피부 가까이 분포하며 크기가 작고 밀

도가 매우 높다. 3~100Hz의 자극에 반응하고 25~40Hz에서 민감하며 주로 표면 위의 돌출된 부분이나 미세한 모양의 가장자리를 지날 때 반응하며 표면의 무늬를 지각하는 과정에 보조적으로 연관되어 있다. 파치니언 소체(Pacinian Corpuscle)는 양파와 같은 모양으로 크기가 크고 진피의 하단부에 낮은 밀도로 분포되어 있다. 35~500Hz 범위의 자극에 반응하고 250~300Hz에 민감하며, 진동을 지각하는 것과 연관되어 있는데 특히 역치(threshold)가 기계적 수용기 중에서 가장 낮아 사람이 250Hz 진동에서 가장 민감하게 한다. 루피니 말단(Ruffini's Ending)은 진피의 하단부에 낮은 밀도로 분포되어 있으며, 0.5~400Hz의 자극에 반응을 나타내긴 하지만 실제로는 표면을 문지른다든지 할 때 피부가 늘어나는 현상(skin stretch)이 발생할 경우 전기 신호를 발생시킨다. 그러므로 루피니 말단은 주로 지속적인 압력이 유지되는 상황, 즉 마찰이 큰 표면이나 작은 입자 등에 의한 피부의 당김을 지각하는 과정과 연관되어 있다[22]. 햅틱스 연구에서는 tactile display를 설계할 때 핀 등으로 이루어진 자극부(tactor)의 개수나 밀도, 변위, 반응 속도, 출력 등을 결정하는 기준으로 위와 같은 생리학적 특성을 사용하며, 사용자에게 전달하고자 하는 감각에 따라 자극의 주기나 자극의 형태 등을 결정하는 기준으로 삼는다.

통증과 냉온감의 경우는 피부변형에 의한 자극을 받아들이는 경우처럼 수용기가 소체로 존재하는 것이 아니라 신경말단에서 직접 자극을 받아들인다. 온도가 낮아질 경우는 CMR1을 통해, 온도가 높아질 경우에는 VR1을 통해, 온도가 매우 높을 경우는 반응이 빠른 VRL1을 통한 채널로 자극이 전달된다[21]. 특히 사람은 절대 온도 값에 반응을 하기 보다는 온도의 변화에 반응을 하는 특성을 나타내므로 냉온감을 구현하는 햅틱스 연구를 수행할 때에도 물질 온도의 절대값을 표현하기보다 물질의 비열과 열전도도 등의 특성을 고려하여 재질감을 표현한다[23].

최근 들어 생리학연구의 영역은 fMRI의 영역으로 확대되어, 사람이 촉감을 느끼는 동안 뇌에서의 반응 영역을 살펴면서 자극의 변화가 있을 때 반응



(그림 12) 촉감의 전달 과정

의 크기나 반응 영역의 변화를 살피면서 물리적 자극의 영향 및 효과를 분석 및 검증하는 연구 또한 진행 중이다.

다. 인지과학

인지과학(cognitive science)은 인간이 알고 느끼고 있는 ‘지식(knowledge)’이 어떻게 ‘표현(representation)’되는지를 탐구하는 학문으로, 실험 분석이나 수치적 해석을 기대하기 보다 인간의 ‘느낌’에 의존해야 하는 햅틱스 연구에서는 필수적으로 탐구되어야 할 분야이다. 특히 질감(texture)이나 촉감(tactility)에 관한 연구를 수행할 경우 인지과학의 방법을 동원한 모델링과 해석은 필수적이며, 인지과학은 햅틱스 연구가 기계공학/전자공학/전산학의 엔지니어가 아닌 인간의 본질에 관하여 연구하는 학자들이 햅틱스 분야에 발을 딛는 계기를 만들어 주고 있다.

이상 살펴본 바와 같이 햅틱스 연구에서 신경과학 및 심리학적 연구는 필수적이며 이미 외국의 많은 연구자들에 의해서 활발히 연구가 진행되어 새로운 장치나 시스템에 적용되고 있다. 우리나라의 경우 아직도 햅틱스 연구가 일부 힘피드백장치의 개발이나 응용분야에 집중되어 있으며, tactile display를 위한 자연과학적 접근의 연구는 시작조차 못하고 있는 형편이다. 햅틱스의 연구가 한걸음 크게 내딛기 위해 생물학, 심리학, 인지과학 분야 연구자들의 활발한 연구 참여를 희망해 본다.

IV. 햅틱스 주요 이슈 및 전망

1. 햅틱 렌더링

햅틱 렌더링(haptic rendering)은 1995년 K. Salisbury에 의해 처음 제안된 용어로서, 햅틱스 기술이 적용된 환경에서 사용자가 가상의 물체에 접촉하는 동안 가상 물체와의 상호작용을 위해 햅틱 디바이스로 전달되는 힘(force)을 계산하는 일련의 모든

과정을 일컫는다[24].

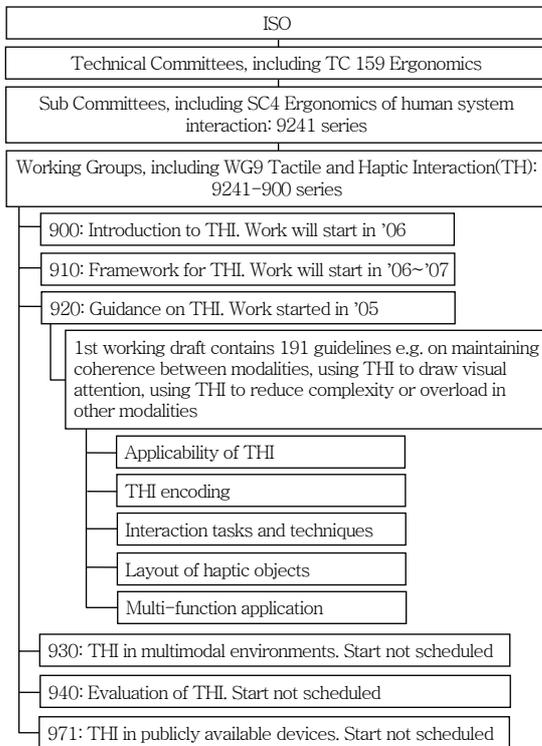
예를 들어 (그림 3)과 같은 햅틱 인터페이스를 이용해 가상의 인형을 상황을 가정해보자. 햅틱 디바이스는 가상환경 속에서 (그림 3)에서와 같이 작은 구로 혹은 사람의 손 혹은 손가락 등의 물체로 표현될 것이며 디바이스의 움직임에 따라 좌표계가 일치되어 가상환경 속의 사용자의 행동을 대신할 것이다. 이 대신하는 물체를 HIA라고 정의하자. 이 HIA는 가상의 벽에 가서 부딪히게 될 것이며, 이때 인형에 접촉하는 위치, 시간, 강도, 방향 등에 따라서 어느 방향으로 얼마만큼의 반력이 주어져야 하는지 매순간순간 결정해서 햅틱 디바이스로 전송 및 재현하게 해야 한다. 만약에 인형이 뒤로 밀리게 되면 그 또한 고려해야 하며, 세계 부딪히면 튕겨 나가거나 넘어지는 느낌도 재현할 수 있어야 한다. 또한 인형의 부드러운 부분과 딱딱한 부분은 당연히 구분되어야 할 뿐더러 볼록한 부분과 오목한 부분도 정교하게 표현되어야 할 것이다. 또한 이 표현 과정에서 장치의 안정성이 보장되는지 또한 고려되어야 할 것이다.

그러므로 햅틱 렌더링은 컴퓨터 그래픽, 물리학, 재료역학, 동역학, 모델링 알고리즘 등을 망라하여 컴퓨터 그래픽으로 렌더링을 하듯 촉감정보가 표현될 수 있도록 가상의 환경을 모델링하는 프로그래밍 과정 전반을 가리킨다. 햅틱 렌더링 자체가 햅틱스의 고유의 연구 영역인 동시에 새로운 햅틱 인터페이스 시스템을 개발할 때마다 알맞은 방법으로 적용되어야 하는 필수적인 작업 과정이라고 할 수 있다. 햅틱 렌더링의 주요 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 충돌 검출(collision detection)
- 접촉 저항력 계산(contact impedance)
- 형상 표현(shape representation)
- 마찰력(surface friction)
- 동역학 계산(dynamics)
- 표면 무늬 및 굴곡 표현(surface curvature)
- 질감표현(texture modeling)
- 물리적 제약상태(physical constraints)

2. 표준화

촉감과 햅틱의 상호작용 기술은 현재까지 햅틱 장치와 응용 기술의 개발을 진행해오는 동안 인간 공학적 측면과 상호 호환성에 대한 고려의 기준이 없이 개발됨으로써 이러한 장치와 응용을 이용하는 사용자에게 심각한 사용상의 어려움을 초래하고 있다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위해 캐나다, 영국, 네덜란드, 스웨덴, 독일, 일본, 호주 등 6개국의 전문가들을 중심으로 ISO(국제표준화기구) 산하의 TC159/SC4에 촉감과 햅틱 상호작용에 관한 워킹 그룹 9(이하 WG9이라 함)을 결성하여 2005년 10월부터 촉감과 햅틱의 상호작용 기술에 대한 표준화(standardization) 활동을 개시하고 있다[25],[26]. 본 절에서는 ISO를 중심으로 현재 진행중인 촉감과 햅틱 상호작용 기술 표준화에 대한 내용을 기술한다. (그림 13)은 TC159/SC4/WG9의 활동 내용을 보여준다[25].



(그림 13) ISO 햅틱스 표준화 진행도

가. TC159/SC4/WG9의 활동 계획

WG9에서는 촉감과 햅틱 상호작용에 대한 지침서인 ISO 9241-920 문서를 개발하는 것을 필두로 다수의 표준문서 작성 계획을 진행중이다.

1) ISO 9241-900

900 시리즈의 전반적인 개요를 다루는 촉감과 햅틱 상호작용에 관한 개요(introduction)에 대한 기술 보고서로서, 2006년 후반에 문서 작업을 시작할 예정이다. 이 문서에서 주로 다룰 내용은 900 시리즈의 다양한 부분과 촉감과 햅틱 상호작용에 관련된 지침을 포함하여 다른 표준들의 참고자료(reference)를 포함할 예정이다.

2) ISO 9241-910

ISO 9241-920에서의 작업을 개시하는 데 사용할 모델의 상세 설명과 900 시리즈에서 사용한 용어 정의를 제공하는 촉감과 햅틱 상호작용에 대한 프레임워크를 기술한다. 이 문서에서 사용할 모델은 GOTHI 모델을 기반으로 하며, 촉감과 햅틱 상호작용의 다양한 크기(치수)와 속성을 식별할 것이다. ISO 9241-910은 촉감과 햅틱 상호작용을 사용하는 인터페이스를 분석, 설계, 평가하는 데 이 모델을 어떻게 사용할 것인지에 대해 기술할 것이며, 이 부분에 대한 작업은 2006~2007년에 시작할 예정이다.

3) ISO 9241-930

몰입적이고 멀티모달 환경에 특정한 지침을 제공하는 멀티모달 환경에서의 햅틱과 촉감 상호작용을 다룰 것이며, 현재까지 이 부분에 대한 작업을 언제 개시할지는 정해져 있지 않다.

4) ISO 9241-940

촉감과 햅틱 상호작용을 평가하는 데 적합한 평가 방법에 대한 지침을 제공하기 위한 촉감과 햅틱 상호작용에 대한 평가 방식을 기술하는 문서이다.

이 부분은 ISO 9241-920에서 식별한 촉감과 햅틱 상호작용의 다차원적 성질(nature)의 전체적 효과를 평가하기 위한 메커니즘을 다룰 것이다. 이 부분에 대한 작업을 언제 개시할지는 정해져 있지 않다.

5) ISO 9241-971

공중 환경과 시스템에서 촉감과 햅틱 상호작용을 사용하는 접근성에 관계된 지침을 제공하기 위한 것으로 현재 대중화되어 가용한 장치에 대한 촉감과 햅틱 인터페이스를 기술하는 문서이다. 이 부분에 대한 작업을 언제 개시할지는 정해져 있지 않다.

나. TC159/SC4/WG9의 현재 상태

TC159/SC4/WG9에서는 촉감과 햅틱 장치와 응용에 대해 연구와 실제 사용으로부터 인간 공학 지식을 수집하고, 제시하기 위한 ISO 9241-920 문서를 준비중이며, 현재 두번째 워킹 draft(WD) 문서가 작성되어 검토중이다. 이 문서에서 다루는 내용은 다음과 같다.

1) 촉감과 햅틱 상호작용을 위한 응용성 고려

유효성에 대한 한계, 작업부하(workload) 고려(효율성), 사용자 수락의 고려사항(만족도), 회의 사용자와 환경의 필요성(접근성), 건강과 안전 고려사항, 그리고 보안과 프라이버시

2) 촉감과 햅틱 입력 및 출력, 이들의 결합

촉감/햅틱 요소에 대한 정보 제공, 네비게이션 정보 제공, 적절한 상호작용 유형 사용, 대안적인 입력 방식 제공, 피로를 피하거나 최소화, 객체 탐색을 지원할 추가 정보 제공, 모달리티 간에 결합성(coherence)을 유지, 공간 메모리를 향상시키기 위한 모달리티를 결합, 사용자가 모달리티를 변경할 수 있도록 허용, 사용자가 촉감(tactile) 파라미터를 개별화하도록 허용(enabling), 힘 피드백을 최우선하도록(overriding) 허용 등의 사항을 포함함

3) 정보에 대한 촉감과 햅틱 인코딩의 속성(attribute)

친근한 촉감/햅틱 패턴 사용, 촉감과 햅틱 인코딩을 자기 묘사적(self-descriptive)으로 만들기, 감각 대치 사용, 적절한 공간 분해능(resolution) 사용, 적절한 객체 크기 사용, 식별 가능한 위치 사용, 식별 가능한 모션 사용, 시간적 패턴에 의한 정보를 인코딩, 진동 진폭(amplitude)을 사용한 정보 인코딩, 사용자가 다른 시뮬레이트된 질감을 분리 가능하도록 함, 비활성된 진동자의 진동을 방지, 진동 주기에 의한 정보의 코딩, 그리고 공간 마스킹 방지 등의 사항을 포함함

4) 콘텐츠 특정의 인코딩

질감 데이터를 인코딩하고 사용, 점자의 사용을 비동기화, 촉감/햅틱 그래픽을 디스플레이, 객체의 벽 사이를 분리 유지, 공간 위치를 향상시키기 위한 역감 정보를 사용, 촉감 지도(tactile map)에서 랜드 마크(경계표) 사용, 촉감 맵을 위한 척도 제공, 크기 사용과 우연한 활성화를 방지하기 위한 제어의 간격화(spacing), 어려운 제어 활동 회피, 촉감/햅틱 제어의 사용 등의 사항을 포함함

5) 촉감/햅틱 객체의 레이아웃

분해능, 구분(separation), 그리고 일관성(consistency)

6) 상호작용

상호작용 태스크(네비게이션, 선택, 그리고 처리(manipulation) 등과 같은) 그리고 상호작용 기술(이동 객체, 객체 점유, 제스처링)

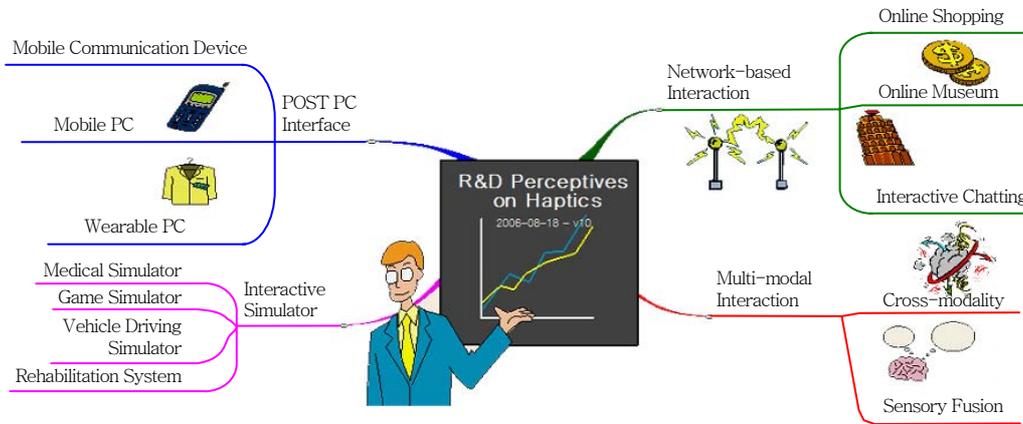
TC159/SC4/WG9은 현재 ISO 9241-920 문서를 2009년에 국제 표준(IS)으로서 확정하기 위해 예비 문서의 작성과 검토를 진행중이다. ISO 9241-920 문서는 ISO TC159/SC4/WG9의 촉감과 햅틱 상호작용에 대한 최초의 표준 문서가 될 것이며, 현재도 이 문서의 표준화를 위해 활동이 가능한 상황이다.

3. 햅틱스 기술의 전망

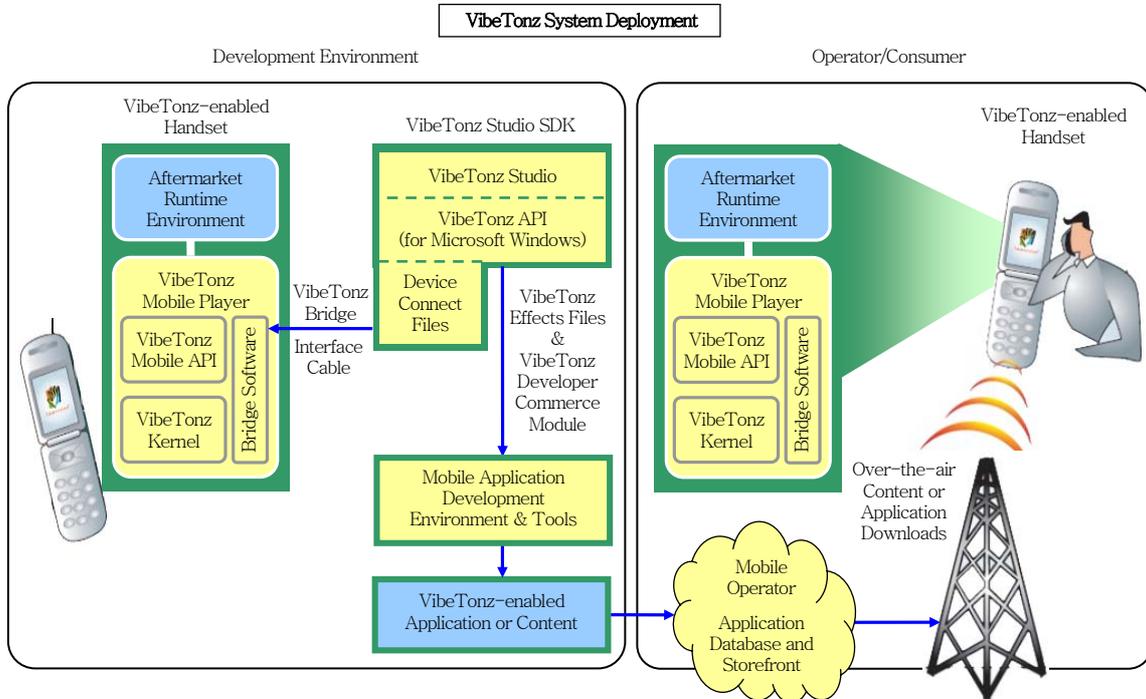
햅틱스 기술이 주목을 받는 이유는 현재의 모습보다 앞으로의 밝은 전망 때문일 것이다. 그러면 햅틱스는 어떤 분야에 적용될 것인지 살펴보자. (그림 14)에서는 앞으로 햅틱스 기술이 적용되어 쓰이게 될 것으로 예측되는 주요 분야를 정리해 보았다.

가. 차세대 컴퓨터용 HCI 인터페이스

현재 시장에서는 이미 노트북이 소형화되어 이동형컴퓨터(mobile PC)의 개념이 등장하고 있다. 또한 PDA와 휴대폰의 경계선은 허물어져가고 있으며 개인휴대기기의 기능은 컴퓨터에 못지않게 발전되어 가고 있다. 또한 전원과 배선기술, FPCB, 소형칩



(그림 14) 햅틱스의 응용분야 및 전망



(그림 15) VibeTonz의 개념

설계 기술 등은 입을 컴퓨터(wearable PC)의 시대가 도래할 것임을 예고하고 있다. 이러한 차세대 컴퓨터의 햅틱스 기술은 촉각 피드백을 통한 명령어 확인 및 제어, 각종 실감 게임, 네비게이션, 각종 메시지 및 의사 전달, 시각장애인용 모바일기기 등에 적용되어 갈 것이다. 이머전(사)은 이미 VibeTonz™이라는 제품을 개발하여 현재의 휴대전화상에서 촉감을 적용하는 응용프로그램(application)을 개발할 수 있는 환경을 제공하고 있으며[16], 이미 국내의 삼성전자, KTF, SKT 등 주요 이동통신관련 기업들의 새로운 제품에 탑재되고 있다. (그림 15)는 VibeTonz를 이용한 개발 개념도를 보여준다[16].

나. 네트워크 기반 상호작용

햅틱스 기술이 본격화되면 시각/청각만을 느끼던 전달 정보의 개념이 크게 변화될 것이다. 특히 촉감의 전달은 원거리 환경 혹은 가상 환경의 사실성을 크게 증대시킬 수 있으므로 네트워크 기반의 환경에서 영향력을 발휘하게 될 것이다. 눈으로만 보던 온라인 쇼핑물은 물건을 만져보고 살 수 있는 시대가 될 것이며, 실제 유물을 만져볼 수 있는 온라인 박물관도 체험할 수 있을 것이다. 또한 문자를 기반으로 하는 메신저 환경은 서로 약속을 하고 어깨를 두드리는 등 촉감을 통한 감정의 전달까지 가능한 상호작용형 메신저를 제공하게 될 것이다.

다. 체험형 시뮬레이터

햅틱스 기술의 탄생과 함께 연구자들이 가장 관심을 많이 가진 분야는 단연 체험형 시뮬레이터(interactive simulator)였다. 촉감을 느낄 수 있는 게임, 반력을 느낄 수 있는 자동차나 비행기 시뮬레이터, 가상의 환자를 수술하거나 촉진(palpation)해보는 의료용 시뮬레이터, 각종 물리적 특성을 임의로 변경할 수 있는 환자용 재활훈련기기 등에 햅틱스 기술을 적용하려는 연구가 지속되어 왔다. (그림 16)은 미국의 Georgia Tech에서 개발한 각막수술 시뮬레이터를[7], (그림 17)은 KAIST와 미국의 Ge-



(그림 16) Eye Surgery Simulator



(그림 17) Spine Biopsy Simulator

orgetown 대학에서 개발한 척추침생검 시뮬레이터를 보여준다[6].

라. 오감 상호작용(Multi-modal Interaction)

사람이 정보를 느끼는 과정은 어느 한 가지 감각만으로 결정되지 않는다. 예를 들어 어떤 물체의 거칠기를 느낀다고 할 경우 거칠기는 촉각에 관련된 정보이지만 사람은 만져지는 느낌뿐 아니라 소리나 눈으로 보이는 표면 성질을 모두 조합하여서 거칠기 정보를 받아 들이게 된다. 이처럼 각 감각 모달리티 간의 연관성은 촉각 정보를 더욱 풍성하게 하는 데 적용될 수 있을 것이다. 가상의 물체의 촉감을 구현하는 데 있어서 햅틱 디바이스만으로는 표현에 한계가 있기 마련이나, 시/청/후/미각 정보를 잘 덧씌움으로써 촉감을 더욱 풍부하게 만들 수가 있다. 이러한 접근을 위해서는 앞서 언급한 정신물리학적, 생리학적 연구가 필수적이다. 또한 햅틱스 기술은 기존의 감각 표현법을 이용하여 촉각 자체를 풍부하게 할 뿐 아니라, 다른 감각과 함께 가상 현실자체를 실감나게 만드는 하나의 요소로 이용될 것이다.

마. 직관력을 높이는 장치(Intuitive Interface)

지금까지 살펴본 햅틱스의 응용분야 이외에도 촉각은 시각, 청각에 비하여 반응이 빠르면서도 높은 집중력을 요구하지 않으므로 사용자의 높은 직관력을 활용하는 데도 적용될 수 있다. 가장 대표적인 것이 BMW사의 iDrive일 것이다. (그림 18)에서 보여주는 것처럼 BMW(사)는 5 series 이상의 모델부터 iDrive라는 햅틱 회전조절기(haptic knob)를 설치하였다[27]. 이 장치는 운전석 바로 옆에 설치되어 사용자가 에어컨, 오디오, 창문 등 자동차 내에 조절을 필요로 하는 대부분의 조작장치를 조그만 다이얼 하나만 조작함으로써 모두 해결할 수 있게 하는 장치인데, 조작대상이 바뀔 때, 동작 레벨이 바뀔 때 등 촉각적인 피드백을 통하여 어느 단계에 있는지를 직관적으로 알 수 있게 하였다. 이와 같이 햅틱스 기술은 ‘사실성’을 재현하는 목적 이외에도 사용자의 ‘직관력’을 활용할 수 있는 다양한 인터페이스에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.



(그림 18) BMW 5 Series의 iDrive

V. 결론

지금까지 햅틱스의 의미와 현재 연구 내용 및 향후 기대되는 응용 분야를 살펴보았다. 햅틱스 기술은 여러 미래 예측기관에서 공통적으로 언급하는 것

처럼 머지 않은 미래에 우리 생활 곳곳에 적용되게 될 것임은 분명해 보인다. 이러한 기대와 함께 햅틱스 기술은 짧은 역사에도 불구하고 여러 나라의 많은 연구자들에 의하여 활발하게 연구되어 왔다. 우리나라의 경우도 햅틱스 기술의 중요성을 인식하고 현재 ETRI를 중심으로 산학연 공동체를 형성하여 ‘촉각용 스마트 햅틱 인터페이스 장치’라는 주제의 정보통신 선도기반 연구개발사업이 진행되고 있는 등 각계의 노력은 고무적이라 할 수 있다. 햅틱스 기술은 단기간에 가시적인 성과물을 얻을 수 없는 연구 분야가 많으므로 우리나라가 다가올 햅틱스 시대에 선도적인 위치를 차지하기 위하여 정부, 연구/학계, 산업계에 다음과 같은 노력이 요구된다.

- 정부의 장기적 안목의 지속적 투자
- 정부의 지적재산권 등록 집중 지원
- 국내기업의 국내 연구/학계와의 공동 연구
- 다양한 국내 기업의 햅틱스 기술 적용 연구
- 연구/학계의 활발한 햅틱스 정보 보급
- 공학, 자연과학, 인문학계간의 공동 연구
- 햅틱스와 문화기술(CT)의 연계
- 다양한 응용 대상 및 제품 개발
- Tactile sensing 및 display 연구 및 투자
- 국내 연구진의 ISO 등 표준화안 도출 참여

● 용어해설 ●

원격접촉(Teletaction): 로봇의 원격제어를 연구하는 텔레로보틱스(Telerobotics)에서 기원한 말로, 원격지에 로봇이 있고 사용자가 조종기로 조종을 할 때, 원격지 로봇이 작업하는 동안 로봇에 장착된 센서에 의해 접촉력이 조종기로 전달되어 사용자가 원격지 물체를 직접 접촉하는 듯한 느낌을 갖는 과정을 일컫는다. Teletaction은 원격수술로봇이나 원자로 및 위험한 작업용 로봇 등에 적용되는 기술이다.

기계적 자극 수용기(mechanoreceptor): 감각신경의 끝 부분에 연결되어 있는 수용기(受容器)로써 압력이나 진동과 같은 기계적 자극이 들어오면 모양이 변하거나 진동하면서 pulse를 발생시켜 신경으로 자극 정보를 전달하는 일종의 미세 생체 구조물이다. ‘기계수용기’라고도 불린다.

약어 정리

CMR	Cool-Menthol Receptor
CT	Culture Technology
fMRI	functional Magnetic Resonance Imaging
FPCB	Flexible Printed Circuit Board
HCI	Human-Computer Interaction
HIA	Haptic Interaction Avatar
ISO	International Organization for Standardization
VoIP	Voice over Internet Protocol
VR	Vanilloid Receptor
VRL	Vanilloid Receptor Like-protein

참고 문헌

- [1] Forbes, 10 Things That Will Change The Way We Live, http://www.forbes.com/2006/02/16/cx_cd_0217_featslide_print.html
- [2] N. Montfort, from PlayStation to PC, *Technology Review*, MIT, Vol.105, 2002, pp.68-73.
- [3] Merriam-Webster Online, <http://www.m-w.com>
- [4] M.A. Srinivasan and C. Basdogan, "Haptics in Virtual Environments: Taxonomy, Research Status and Challenges," *Comp. Graphics*, Vol.21, pp.393-404.
- [5] Touch Lab at MIT, <http://touchlab.mit.edu>
- [6] 햅틱스 홈페이지, <http://robot.kaist.ac.kr/haptics>
- [7] The Haptic Community Web Site, <http://haptic.mech.northwestern.edu>
- [8] International Society for Haptics, <http://www.isfh.org>
- [9] T. Massie, "Design of a Three Degree of Freedom Force-Reflecting Haptic Interface," *BS Thesis*, MIT, 1993.
- [10] SensAble Technologies, <http://www.sensable.com>
- [11] VR Lab. at University of Tsukuba, http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/index_e.html
- [12] Force Dimension, <http://www.forcedimension.com>
- [13] PERCRO, Italy, <http://www.percro.org>
- [14] Sato-Koike Group at Tokyo Institute of Technology, http://sklab-www.pi.titech.ac.jp/frame_index_e.html
- [15] A. Yamamoto, S. Nagasawa, H. Yamamoto, and T. Higuchi, "Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile Telepresentation Systems," *Transaction on Visualization and Computer Graphics*. Vol.12, No.2, 2006, pp.168-177.
- [16] Immersion Corporation Mobility Overview, <http://www.immersion.com/mobility>
- [17] K.U. Kyung, S.C. Kim, and D.S. Kwon, "Texture Display Mouse KAT: Vibrotactile Pattern and Roughness Display," *IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2006.
- [18] Y. Makino and H. Shinoda, "Selective Stimulation to Superficial Mechanoreceptors by Temporal Control of Suction Pressure," *Proc.of World Haptics 2005*, 2005, pp.229-234.
- [19] Haptics laboratory at McGill University, <http://www.cim.mcgill.ca/~haptic>
- [20] "햅틱 인터페이스 특허 동향," 정보통신기술 정책 및 산업, 주간기술동향, Vol.1218, 2005, pp.51-56.
- [21] M. Rosenzweig, S. Breedlove, and N. Waston, *Biological Psychology*, 4th Ed., Sinauer Associates, Inc., 2005.
- [22] L. Kruger(Ed.), *Pain, and Touch*, 2nd Ed., Academic Press, 2006.
- [23] K.U. Kyung, D.S. Kwon, and G.H. Yang, "A Novel Interactive Mouse System for Holistic Haptic Display in a Human-Computer Interface," *Int'l Journal of Human-Computer Interaction*, Vol.20, No.3, 2006, pp.247-270.
- [24] K. Salisbury, D. Brock, T. Massie, N. Swarup, and C. Zilles, "Haptic Rendering: Programming Touch Interaction with Virtual Objects," *Proc. of 1995 ACM Symp. on Interaction 3D Graphics*, 1995, pp.123-130.
- [25] J. Van Erp, I. Andrew, and J. Carter, "ISO's Work on Tactile and Haptic Interaction Guidelines," *Euro-haptic 2006*, 2006.
- [26] International Organization for Standardization, <http://www.iso.org>
- [27] BMW World - iDrive Technology, <http://www.bmw-world.com/technology/idrive.htm>