



주름기반 능동촉각 구현을 위한 나노 햅틱 기술

전기우, 오일권*

(한국과학기술원)

1. 머리말

‘만지다. 잡다’라는 뜻이 그리스어 ‘haptēsthai’에서 유래된 햅틱(haptic)이라는 단어는 일반적으로 촉감을 의미한다. 이러한 햅틱은 본질적으로 촉각 또는 촉감과 관련되어 있으며, 다른 감각과 달리 물체가 물리적으로 피부와 접촉함으로써 느껴지는 감각이다. 촉감은 접촉 시에 감지되는 정보의 전달 경로에 따라 질감(tactile)과 역감(kinesthetic)으로 분류되며, 물체 표면의 거칠기 정도, 무늬, 또는 온도 등 물체의 표면 특징에 대한 다양한 정보는 피부를 통해 전달된다. 이때 피부를 통해 전달되는 감각을 햅틱 연구분야에서는 질감(tactile)으로 정의한다. 이와 달리 근육이나, 힘줄 등 근 감각을 자극함으로써 전달되는 느낌을 역감(kinesthetic)으로 정의한다.

햅틱 기술은 1990년대 중·후반부터 시작되어 왔으며, 햅틱기술의 대부분은 텔레오퍼레이션, 의학 시뮬레이터, 재활 시스템, 가상현실 등에서 사용되는 기술인 역감 관련 연구들이 주류를 이루었으나, 2000년대에 들어서면서 개인 스마트폰, 스마트 패드, 태블릿 PC 등 개인 휴대용 모바일 기기와 같은 제품의 등장으로 인해 햅틱 디바이스 시장이 급격하게 커지면서, 손안에서 느낄 수 있는 촉감에 대한 연구들이 새롭게 연구되는 추세이다. 하지만, 역감 제시장치는 이미 다수의

상용화 제품이 나와 있을 정도로 진전이 있었으나 상대적으로 질감 제시장치에 대한 연구는 많지 않다. 그 이유는 역감에 비해 질감은 인간이 질감이라고 인지하는 자극의 범위 및 형태가 다양하기 때문에 질감을 정의하기가 쉽지 않기 때문이다. 사용자에게 보다 사실적인 질감을 전달하기 위해서는 질감에 대한 정의가 우선되어야 한다. 최근 정신물리학적 또는 심리학적 연구를 통해 인간이 고유하게 인지할 수 있는 질감의 정의, 보다 정교하고 다양한 질감 표현을 위한 자극 발생 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

이 글에서는 사용자에게 다양한 질감을 제시하기 위한 주름 기반 능동촉감에 대한 기술을 설명하고, 주름 생성을 위하여 필요한 기술, 주름과 촉감과의 상관관계에 대하여 소개하고자 한다.

2. 매우 민감한 촉각 센서: 인간의 피부

인간은 오감(시각, 청각, 후각, 미각, 촉각)을 통하여 정보를 얻고 주변 환경과 상호 작용한다. 만약 인간이 이런 감각을 느끼게 해주는 감각기관이 없다면 아예 생존조차 어려울 것이다. 인간의 촉각을 느끼는 수용체는 압력, 온도 등의 물리량을 측정할 수 있는 고성능의 센서이며, 높은 공간 분해능을 갖고 넓은 면적에 분포되어 있으며, 동시에 유연성과 신축성을 갖는다.

* E-mail : ikoh@kaist.ac.kr / Tel : (042)350-1520

이러한 인간의 손끝의 피부는 10~40 kPa의 압력 수준에서 표면의 질감을 약 40 μm의 공간 분해능으로 느낄 수 있으며 온도(엄밀히 말하면 열전도도)도 동시에 감지하는 것이 가능하다. 사람 손끝의 면적이 약 1 cm×1 cm라고 하면 압력을 감지하는 센서의 개수는 62,500개로 각각의 센서가 압력을 실시간으로 측정하여 뇌로 전송하게 된다.

앞에서 언급한바와 같이 인간의 피부만큼 우수한 촉각 센서는 없을 것이다. 우리 몸의 가장 큰 기관인 피부는 온 몸을 덮고 있으며 접촉을 감지하여 다양한 정보를 뇌로 보낸다. 특히, 가장 민감한 손끝의 피부는 질감이나 경도까지 감지할

수 있다.

피부의 구조는 그림 2와 같다. 0.1 mm~0.3 mm 두께의 표피(epidermis) 아래에는 진피(dermis)가 있으며 진피 안에 각종 물리량을 감지할 수 있는 수용기(receptor)들이 존재하는데, 각 수용기 별로 잘 감지할 수 있는 감각들이 구분되어 있다. 이 중 대표적인 수용기 네 개를 예로 들면, 마이소너(meissner) 소체는 피부 움직임을 가장 민감하게 감지하며, 머켈(merkel) 수용기는 피부를 누르는 감각에 가장 잘 반응하고 진동에 대한 인식 기능을 일부 담당한다. 한편 파시닌(pacinian) 소체는 피부의 가장 깊은 곳에 위치하고, 운동감과 미세한 접촉, 진동을 인식한다. 루피니(ruffini) 소체도 깊은 곳에 위치하며 방추형 구조로 압력과 온도 변화를 감지한다.

이러한 촉각을 감지하는 수용체는 각 물리량을 측정하는 능동형 센서(수용기, 뉴런)들이 점탄성을 갖는 물질(진피)에 박혀있는 형태이다. 진피는 이러한 감각 수용체들을 외부의 충격으로부터 보호하고 고정시키는 역할을 하는 동시에 외부의 자극을 센서로 전달하는 역할도 한다. 따라서 피부의 감지 능력을 알아보기 위해서는 진피의 특성 또한 중요하다. 진피는 기본적으로 점탄

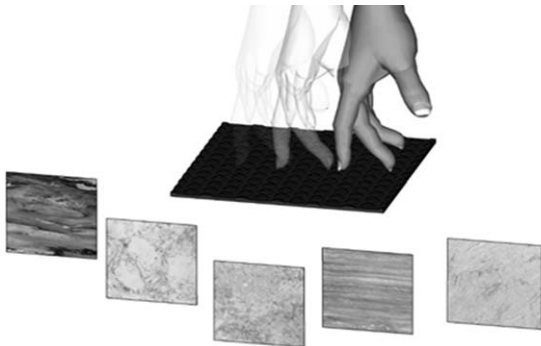
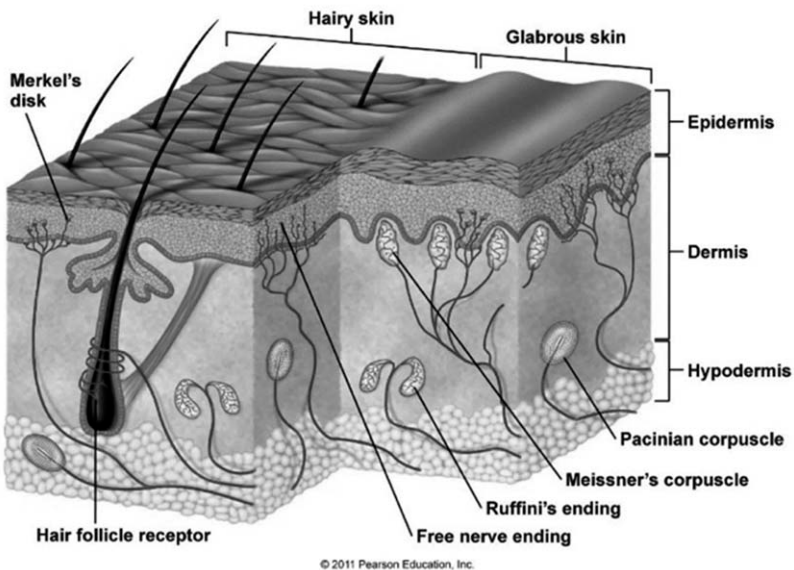


그림 1 다양한 표면 거칠기를 표현하는 햅틱 기술



© 2011 Pearson Education, Inc.

그림 2 다양한 촉각 수용체를 갖는 인체의 피부 단면도(출처:2011 Pearson Education, Inc.)

성 물질(외부의 응력뿐만 아니라 변화율에 따라서도 응답 특성이 달라지는 물질)이다. 따라서 점성이 있는 액체와 탄성 고체가 중첩된 모델을 도입하여 해석할 수 있다. 그림 3의 그래프에서 확인 할 수 있듯이, 피부에 자극이 가해지면 응력 σ 가 순간적으로 급격히 증가하지만 점성에 의한 응력이 이완되면서 탄성에 의한 응력만 남게 된다. 이때, 순간적인 응력과 평형상태의 응력은 인장률에 비례한다. 만약 피부가 까칠까칠한 표면을 문질렀을 때 수용기에 전해지는 자극과 매끈 매끈 표면을 문질렀을 때 자극의 차이를 분석하거나 또는 표면 패턴의 주기의 차이에 따른 영향을 분석하고자 하면 위와 같은 모델로 계산하여야 한다. 점탄성의 성질은 피부가 외부의 에너지를 흡수할 수 있도록 하면서 기계적으로 변형된 피부를 다시 원위치로 복귀하게 한다. 이렇듯 인

간의 피부는 외부의 자극을 감지하는 다양한 뉴런들, 선형적인 디지털 출력 특성, 뉴런들을 감싸고 있는 진피의 점탄성과 같은 특성이 조합하여 최적의 촉감을 감지한다.

3. 표면 거칠기는 나타내는 방법: 주름 패턴의 생성

손끝에서 느끼는 질감은 대상물체의 표면형상과 손가락 사이에 생성되는 압력(pressure), 움직임(lateral movement), 마찰력(frictional force), 기계적 진동(mechanical vibration) 등 복합적인 요소들의 결합에 의해 생성된다. 이러한 수용체들의 반응은 대상물체 표면의 미세한 형상의 크기 및 깊이에 따라 상대적으로 다르게 나타난다. 그림 4는 표면의 미세형상구조에 따라 생성되는 상대

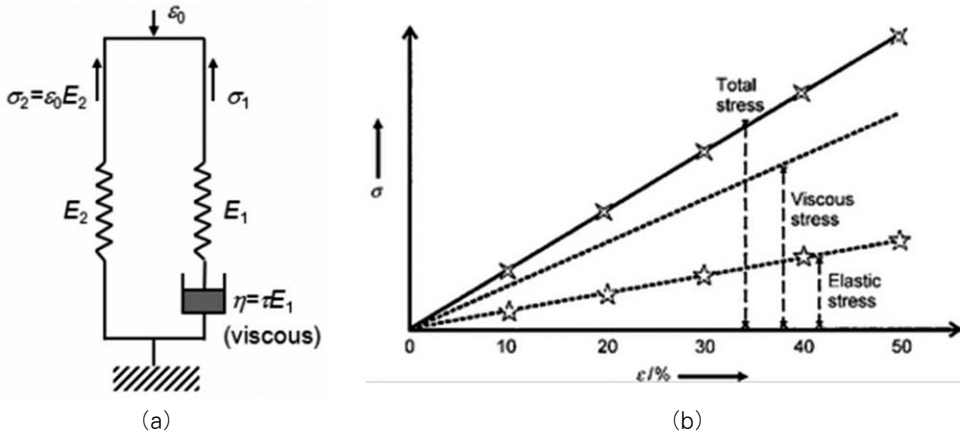


그림 3 피부 수용체의 등가 모델 (a)와 이의 역학적 반응 (b) (출처: Angwe. Int. Ed.)

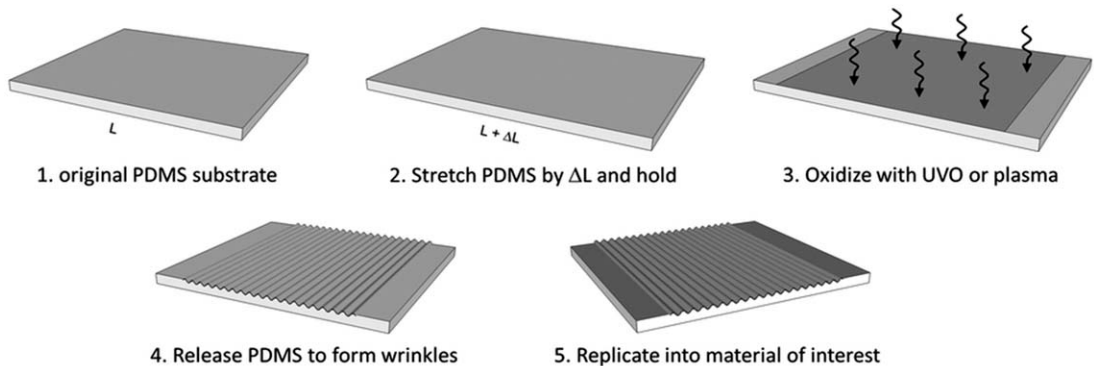


그림 4 나노 주름구조를 생성하는 방법 (출처: Scientific Reports)

적인 질감에 대한 실험을 진행하고자, 인위적으로 대상 표면을 변형시켜 주름 구조를 생성하는 방법이다. 이 글에서는 PDMS 폴리머를 기판으로 사용한 주름 생성 실험에 대해서 소개하고자 한다. 프레임을 이용하여 길이가 L 인 PDMS 기판을 $4L$ 만큼 늘여주고, 프레임에 고정시킨다. 인장이 가해진 PDMS 표면위에 PDMS 물질보다 높은 탄성계수를 갖는 물질을 올려놓으면 기계적 응력에 의하여 자연적으로 주름이 생성된다. 이후, PDMS 표면에 UV(ultraviolet ozone) 혹은 플라즈마(plasma oxidation) 과정을 진행한다. 그리고, PDMS 필름을 잡고 있던, 프레임을 제거하면 그림 4의 (4)와 같은 주름 구조가 생성되며, 이 몰드를 이용하여 스탬프 방식으로 여러 가지 물질 표면에 주름 구조를 제작할 수 있다. 주름의 크기는 UVO 혹은 플라즈마 처리 과정에서 노출되는 조사시간에 따라 다르며, 1분에서 120분 동안 노출한 결과 270 nm~90 μ m 범위를 갖는 주름 구조

가 생성되었다. 주름의 방향은 변형이 가해진 방향과 수직 방향으로 생성이 되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 5는 위의 방법을 이용하여 나노에서 마이크로 스케일을 갖는 주름 구조를 제작한 것을 AFM(atomic force microscopy)와 프로필로메트리(profilometry)를 이용하여 3차원 이미지로 나타낸 것이다. 이 실험에서는 270 nm~90 μ m 범위의 주름 간격을 갖는 서로 다른 총 16가지의 물결모양을 갖는 주름 패턴을 제작하였고, 이 중 4가지의 서로 다른 크기를 갖는 이미지를 그림 5의 (a)~(d)에 나타내었다.

4. 주름과 촉각과의 관계

인간은 눈을 감은 상태에서도 손가락만으로 물건을 만져도 표면의 요철은 물론 딱딱하거나 부드러움, 재질 차이 같은 것을 촉각으로 구별할 수

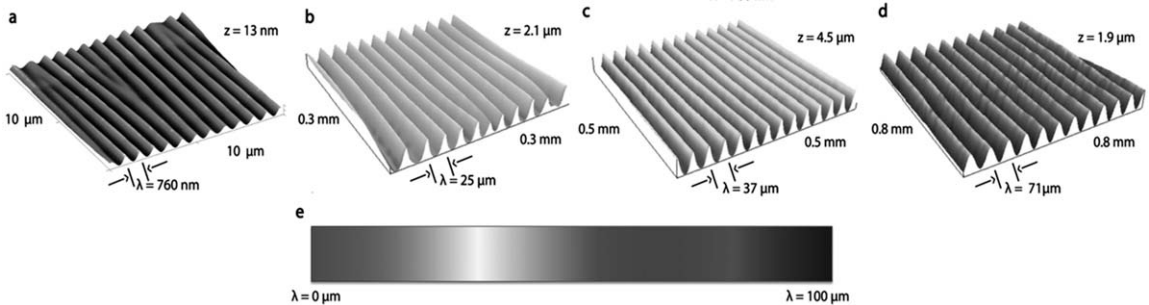


그림 5 나노-마이크로 스케일을 갖는 주름 구조(출처: Scientific Reports)

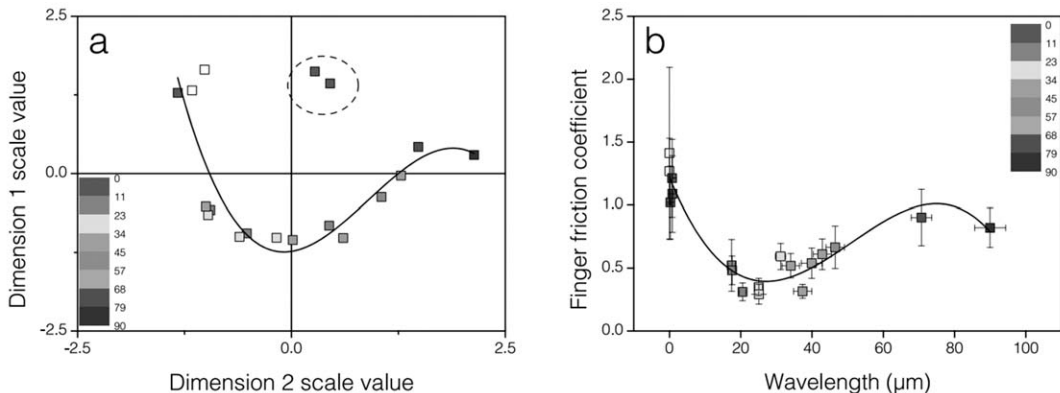


그림 6 INDSICAL로 표현된 지각 차원과 물리량과의 관계(출처: Scientific Reports)

있다. 스웨덴 스톡홀름에 위치한 스웨덴왕립공과대학의 연구결과에 따르면, 인간의 손가락은 나노단위에 이르는 요철까지 느낄 수 있는 것으로 보고되었다. 소개된 보고서에서 사용된 실험 방법은 서로 다른 크기의 주름 구조를 갖는 샘플을 다수의 실험 참가자에게 생성된 주름과 수직 방향으로 문지르게 하고, 참가자들이 느끼는 감각을 기록하였다. 그림 6의 (a)는 서로 다른 스케일의 크기를 갖는 샘플에 대한 지각 차원(perceptual dimension)을 표로 나타낸 것이다. 동일한 물질을 사용하여 제작된 샘플임에도 불구하고, 서로 구분지을 수 있는 다른 감각을 제공함을 시사한다.

그림 6의 (b)는 샘플 표면에 생성된 주름의 간격(wavelength)과 손가락의 마찰계수(friction coefficient)를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 두 그래프를 비교해보면 원형 점선으로 표시된 점들을 제외하고, 점들의 분포가 유사하게 보이지만, 앞서 언급한 지각 차원과 샘플 표면이 갖는 물리량과는 선형적인 관계가 없다는 것을 확인할 수 있다.

그림 6의 (a)와 (b)의 그래프에서 확인할 수 있듯이 각 곡선에 표시된 데이터 값은 서로 다르게 분포되어 있으며, 이는 지각의 차원(perceptual dimension)과 샘플에서 측정된 물리량(physical quantity) 사이의 관계가 비선형적인 관계인 것을 알 수 있다. 또한, 이 실험을 통해 지문을 갖는 인간의 손가락은 역학적으로 760 nm 폭을 갖는 샘플과 13 nm의 최소 높이를 갖는 것을 인지할 수 있다는 것을 알아내었다. 이러한 촉각 반응 정도

는 주름 구조 간격 변화를 제어하여 다양한 거칠기를 나타낼 수 있고, 이는 시각장애인을 위한 제품은 물론 스마트폰 등에 쓰이는 터치스크린 패널(TSP) 연구에 활용할 수 있다는 가능성을 제시하고 있다.

5. 맺음말

촉감과 관련한 기술은 세계적인 경제전망지 포브스에서 향후 인류의 미래 삶을 바꿀 10가지 기술 중 하나로 촉각 인터페이스 기술로 선정된 바 있다. 이는 사용자 인터페이스 기술의 진화 방향이 점차 인간의 오감을 자극하는 실감형 휴먼 인터페이스 기술로 가고 있다는 것을 의미한다.

이 글에서는 질감을 표현할 수 있는 햅틱 기술 중 나노 주름을 이용한 신개념 햅틱 기술에 대한 중요성과 기술적인 구현 가능성에 대하여 알아보았다. 터치스크린처럼 형태적으로 제한적인 디바이스에서 섬세한 질감 제시 효과를 구현하기 위해서는 소재나 액추에이터 기술 등 자극 방법에 대한 연구와 주름을 제어할 수 있는 기술이 필요하다. 이와 더불어, 고품질의 질감 제시 효과를 구현하기 위해서는, 촉각, 특히 질감 인지에 관한 생리학이나 정신물리학적 연구를 통해 질감의 정의 및 모델링이 선행되어야만 한다. 최종적으로, 스마트폰, 태블릿 PC 등 모바일 디바이스에서도 시각, 청각, 촉각 등 사용자 피드백이 융합된 형태로 사용자에게 전달될 때, 더욱 실감 있는 사용자 경험(user experience)을 제공할 것으로 기대된다. **KSNVE**