Tactile interface의 기술 동향

윤동원, 박중호, 윤소남 | 한국기계연구원

1. 서 론

촉각 인터페이스(tactile interface)란 외부 물체의 질감, 거칠기, 온도, 형상 등을 감지하거나, 감지된 데이터와 장치를 이용하여 사람이 느낄 수 있도록 하는 장치를 말한다. 이러한 기능을 수행하기 위해서는 우선 물리량을 측정하기 위한 센서가 필요하며, 다음으로 그러한 감각을 사람이 느낄 수 있도록 하는 장치가 필요하다.

인간이 느끼는 감각은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 근육 감각(kinesthetic sense)과 촉각(tactile sense)이 그것이다. 근육감각이란 힘이나 운동을 감각하는 것을 말하고, 촉각이란 촉감, 접촉 등의 감각을 뜻한다. 촉각 인터페이스에서는 주로 촉각에 대해서만 다룬다. 측정되고 감지된 촉각을 사람이 느낄 수 있는 장치가 필요하며, 촉각 자극(tactile stimulation) 장치 또는 촉각 디스플레이(tactile display) 장치라 한다. 이러한 기술은 맹인들을 위한 핀-프린터 기술이나 Braille식 점자기계의 원리를 이용한다. 전자기 액츄에이터에 의한 바늘을 이용한 방법, 피에조 재료를 이용한 액츄에이터를 이용한 방법, 형상기억합금을 이용한 방법, 공압을 이용한 방법, 열펌프를 이용한 방법 등 여러 방법들이 연구되어 왔다.

이러한 촉각 인터페이스 기술은 가상현실이나 원격 조정로봇을 위한 시스템에 사용되는 햅틱 장치의 주요 구성요소이다. 햅틱 장치는 크게 근육이나 관절에 물리적인 힘을 전달해 주는 역감 장치(force feedback device)와 피부에 있는 장치를 통해 온도, 압력, 질감, 진동, 아픔 등과 같은 피부자극을 전달하는 촉감장치(tactile feedback device)가 있으며 여기에 촉감 인터페이스 장치가 사용되어진다.

본 글에서는 먼저 촉각 인터페이스(tactile interface)의 기본 원리를 살펴보고, 다음으로 실제로 개발되고 연구되어진 촉각 인터페이스 장비들에 대해 소개한다.

2. 촉각 인터페이스의 개요

2.1 촉각감지 (Tactile sensing)

앞서 말한 바와 같이, 촉각 인터페이스 시스템에서의 촉각 감지는 주로 촉감과 접촉을 감지하는 것을 말하며, 촉감 감지라는 것은 미리 정해진 측정 범위 내의 수직 방향 힘의 공간적인 분포를 감지하고 측정하는 것이다. 접촉 감지라는 것은 어떤 한 점에서의 접촉의 감지와 측정을 의미한다. 이때 접촉은 접촉의 유무를 나타내는 이진수로

표현된다. 이러한 접촉센서를 배열하면 촉감센서가 된다.

촉각센서는 쥐어진 물체의 유무를 판단하는 것에서부터, 완전한 촉각의 이미지 구현까지 가능하다. 이러한 촉각센서는 여러 개의 센서로 구성되며, 각 센서는 한 가지 이상의 물리량을 측정할 수 있으며, 질감, 미끄러짐, 충격 등의 정보를 감지 할 수 있다.

촉각 센서가 가져야 할 일반적인 특성들을 살펴보면,

- 접촉 감지 센서는 이상적으로 일점 접촉(single-point contact)을 하여야 한다. 센서의 면적은 어떠해도 상관없지만, 일반적으로 1~2mm^{2}정도의 면적을 가진다.
- 센서의 민감도는 센서의 기본적인 물리적 특성에 의해 결정되는 변수의 수에 의해 정해진다. 센서와 물체간의 물리적 한계에 따라 정해지겠지만, 일반적으로 센서의 측정 민감도는 0.4~10N 정도이다.
- 최소한의 대역폭은 100Hz정도는 되어야 한다.
- 히스테리시스 특성이 작아야 하며, 센서의 특성은 안정적이고, 반복성이 있어야 한다.
- 접촉 센서가 산업적 용도로 사용되어질 때에는 주위 환경에 대해 강건해야 한다.
- 접촉배열은 통상 10~20개 정도의 센서가 사용되어 지고, 공간 분해능은 1~2mm 정도이다.

촉감감지의 기본이 되는 접촉 센서는 많은 기술들이 사용되어져서 다양한 종류가 존재한다. 이러한 많은 종류 중 어떤 것을 사용하게 될지는 잡는 대상물체의 재질에 따라 결정된다. 이러한 접촉감지 센서의 종류에는 기계적 센서, 전기저항식 센서, 캐패시터 센서, 자기 센서, 광학센서, 광섬유 센서, piezoelectric 센서, 실리콘 센서, 스마트 센서, multi-stimuli 센서 등이 있으며, 각 센서의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 기계적 센서

가장 간단한 구조의 센서이다. 기존의 마이크로 스위치를 이용한 개폐에 따른 on/off 신호를 발생한다. 스위치를 개폐하기 위한 힘은 액츄에이터의 특성과 외력, 주위의 구속조건에 따라 결정된다. 다른 방식으로는 포텐쇼미터나 변위센서를 사용하는 경우도 있다.

- 저항식 센서

외력과 저항의 관계가 알려진 탄성체를 사용하는 센서이다. 전도성 탄성중합체의 두 점에서의 저항을 측정하여 접촉 유무를 알아낸다. 탄성중합체의 재질로서는 caron doped rubber가 사용되어 진다. 그림 1과 같이, 탄성중합체에 외력이 가해지면, 변형되면서 내부에서 밀도 변화가 발생되게 되고, 이러한 밀도 변화로 인해 두 점 사이의 저항이 변하게 된다.

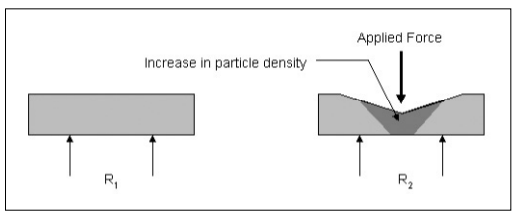


그림 1. 저항식 센서의 원리

– 캐패시터 센서

두 캐패시터 판 사이의 정전용량(capacitance)의 변화를 이용하여 접촉을 감지하는 센서이다. 두 평행판 사이의 정전용량은 유전율이 증가할수록, 두 평판의 면적이 증가할수록, 평판사이의 거리가 가까울수록 증가하게 된다. 캐패시터 센서는 두 평판사이의 정전용량의 변화를 측정하여 접촉을 감지하는 센서이므로, 이러한 센서를 설계시, 외부 힘이나 변위에 따른 정전용량의 변화가 커질 수 있도록 설계를 하여야 한다. 두 도체 평판 사이에는 탄성중합체인 유전체를 넣어서, 힘과 정전용량의 변화를 알아낸다.

정전용량의 변화를 최대화하기 위해서, 높은 유전율을 갖는 원통형 캐패시터로 설계를 하게된다. 그림 2에 그 일례를 보여주고 있으며, 유전체로는 유전율이 높은 polyvinylidene fluoride가 사용된다.

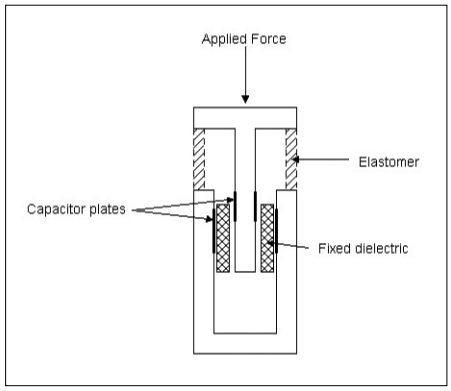


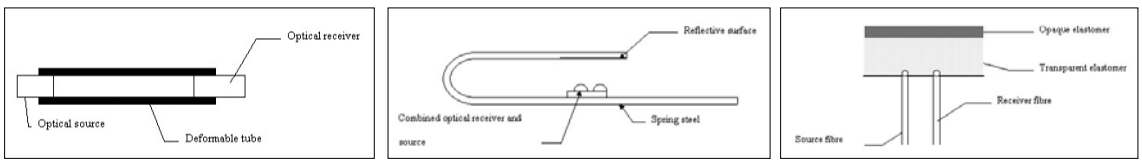
그림 2. 캐패시터 센서

– 자기센서

자기센서를 이용한 방법은 크게 두 가지가 있다. 첫째, 외력이나 외부 변위에 따라 자석이 움직일 때, 측정점에서의 자속밀도가 변화되는 것을 측정하는 방법이다. 이때 자속밀도의 변화는 Hall effect나 magnetoresistive를 이용하여 측정한다. 두 번째 방법은, transformer나 코일을 만들고, magnetorelastic 재료를 이용하여 코어를 만드는 방법이다. 이러한 장치에서는 magnetorelastic 코어가 변형을 할 때, 코일과의 magnetic coupling 현상과 코일의 인덕턴스 변화를 이용하는 센서이다.

– 광학센서

그림 3(a)은 여러 형태의 광학센서를 보여주고 있다. 그림 3(a)의 형태의 광학센서는 수광부와 발광부 사이의 광로의 잡음을 차단하기 위한 유연한 튜브로 연결되어 있으며, 이러한 튜브는 스프링이나 탄성중합체로 되어 있



(a) (b) (c)

그림 3. 여러 형태의 광학센서

다. 외부의 작용에 의해 튜브가 변형되면 광로를 막게 되고, 접촉 유무를 알 수 있게 된다. 그림 3 (b)는 반사식 접촉센서로써, U자형의 탄성 구조를 만들고, 탄성구조의 안쪽 면 중, 한쪽 면에 수광부와 발광부가 같은 면상에 설치되고, 그 반대편에 빛을 반사하는 반사판을 설치해서, 발광부에서 발생한 빛이 반대편 반사체에 반사된 후, 수광부로 돌아오게 되어있다. 이때, 수광부에 돌아오는 빛의 강도는 두 면사이의 거리의 함수로 나타낼 수 있다. 그림 3 (c)는 광섬유를 이용한 접촉 센서를 보여주고 있다. 발광과 수광을 담당하는 두개의 광섬유가 투명한 탄성중합체에 나란히 연결되고, 그 반대편은 빛을 반사하는 실리콘 층이 올려지게 된다. 이 때, 반사되어 오는 빛의 양은 외력이 증가함에 따라 증가하게 되므로, 접촉을 감지하고 외력을 측정할 수 있게 된다. 이 밖에 광섬유 자체를 센서로 이용하는 경우도 있는데, 이는 광섬유의 Microbending 현상을 이용하는 것이다. Microbending이란 광섬유가 구부러지거나, 마이크로 단위의 기계적 외란에 의해, 빛이 감쇠되는 현상이다. 따라서 외부의 자극에 의해 광섬유에서 발생하는 Microbending 현상을 이용하면 광섬유만을 이용하여 접촉감지가 가능하게 된다.

– piezoelectric 센서

재료의 piezoelectric 성질을 이용하여 접촉이나 촉각을 감지하는 센서이다. 수정이나 몇몇 세라믹 재료들이 이러한 성질을 가진다. 센서에서는 polyvinylidene fluoride가 널리 사용되어진다. 이 재료는 원래 물성은 piezoelectric 성질을 갖지 않지만, 전기장을 이용하여 가열하게 되면, piezoelectric 성질을 가지게 된다.

그 밖에, 반도체 공정을 이용한 반도체 센서, 센서 내에서 센싱과 신호처리, 진단 등이 가능한 스마트 센서 등도 촉감감지센서에 널리 사용되고 있다. 광학센서는 발광부와 수광부 사이의 광로에 물리적 간섭이 없는 형태(intrinsic)와 물리적 내부간섭이 있는 형태(extrinsic)로 나누어진다.

2.2 촉각 자극 (Tactile stimulus)

촉각 자극(tactile stiumulus)이란 앞서 설명한 바와 같이 기계적 장치를 통해 사람의 피부에 온도, 압력, 질감, 진동, 아픔 등과 같은 피부자극을 전달하는 것을 말한다. 이는 촉각표시(tactile display)라고 하기도 한다. 촉각 자극 장치는 크게 질감 장치(texture device)와 열감 장치(thermal device)로 나눌 수 있다.

– 질감 자극장치

사람이 피부를 통하여 질감을 인식하는 과정은 물체표면의 마이크로 형상, 피부에서의 압력분포, 촉감인지를 위해 손가락 등으로 표면을 문지르는 동안 인식되는 진동과 미끄러지는 느낌(slip), 마찰력 등의 요소를 복합적으로 받아들이면서 촉감을 인지하게 된다. 따라서, 질감 자극장치는 이러한 물리량들을 모두 구현할 수 있어야 한다.

– 열감 자극 장치

열감은 질감을 인식하는데 있어서 매우 큰 영향을 미치는 요소이다. 또 같은 질감을 가진 물질이라고 할지라도 사람이 만질 때 열전도도가 다르기 때문에 질감이 같더라도 다른 물질로 여기게 된다. 이 분야에 대한 연구는 그리 활발히 이루어지진 않지만, 실제와 유사한 물체의 감각을 느끼기 위해서는 꼭 연구되어야 할 분야이다.

3. 촉각 인터페이스의 기술개발 사례

이 장에서는 촉각센서, 촉각 자극장치 및 촉각 인터페이스에 대한 여러 연구 사례들을 살펴보면서, 어떤 방식들의 촉각 인터페이스 장비들이 개발되어 왔는지에 대해 알아본다.

그림 4는 산디나 국립연구소에서 개발된 Tactile interface를 보여주고 있다. 가상환경을 위해 개발된 이 시스템은 2×3배열을 이루는 전자기 액츄에이터로 구성되어 본체에 부착되어 있다. 각 액츄에이터는 사용자의 손가락에 고정되고, 8~100Hz 정도의 구동주파수를 가지고 동작을 한다. 최대 작동압력은 1.2N/m^{2}이다.

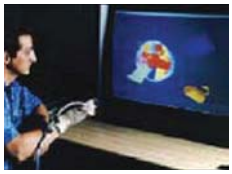


그림 4. 산디나 국립연구소의 tactile interface

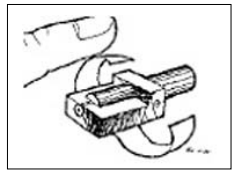


그림 5. 미끄럼 측정용 센서

그림 5는 EXOS의 연구원들이 미끄러짐과 비틀림을 측정하기 위해 개발한 센서의 개략도를 보여준다. 측정된 미끄럼량은 접착력과 피부에서의 측면 비틀림을 측정하는데 사용되어진다. 최대 속도는 25.4㎜/s이고, 최대 수직력은 17.8N이다.

그림 6은 동경대학교에서 개발된 정전기 액츄에이터를 이용한 촉각 인터페이스를 보여주고 있다. 이 시스템은 두 개의 얇은 플라스틱 필름으로 구성되어 있다. 하나는 베이스에 고정 되어있고, 하나는 리니어 가이드에 고정되게 된다. 리니어 가이드 측에 고정되어 있는 필름을 좌우로 움직이게 되면, 정적기력에 의해 슬라이더 필름과 스테

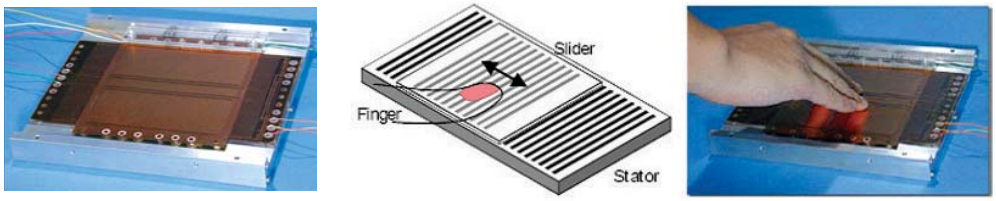
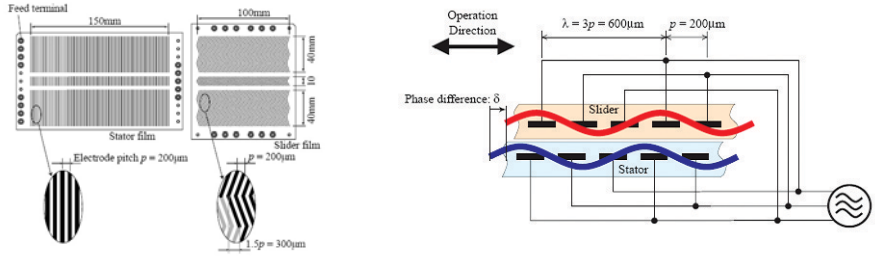


그림 6. 정전기 액츄에이터를 이용한 촉각 인터페이스



(a) (b)

그림 7. 추력이 발생하는 원리

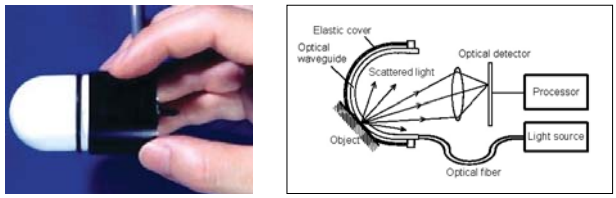
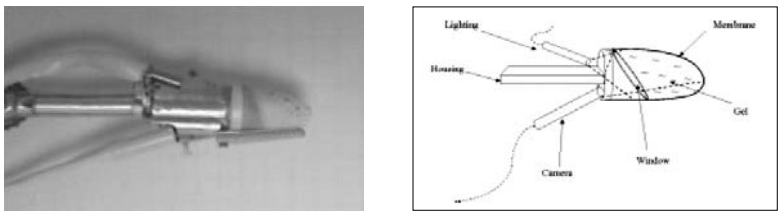


그림 8. 손가락 모양 접촉감지 센서



(a) (b)

그림 9. 입체적으로 변형가능한 Tactile sensor

이터 필름사이에 추력이 발생하게 되고, 이 힘을 이용하여 사용자에게 촉감을 전달하게 된다. 그림 7은 정전기력에 의해 추력이 발생하는 원리를 보여주고 있다. 그림 7 (a)는 슬라이딩 면의 필름과 스테이터 면의 필름을 보여주고 있다. 각 면에는 3부분의 전극이 빨래판 형상으로 만들어져 있고, 그림 7 (b)와 같이 슬라이딩 면과 스테이터 면의 전극에 3상의 전원을 인가하면, 슬라이딩 면과 스테이터 면사이의 상대적인 위치에 의해 정전기력이 발생하게 된다.

그림 8은 AIST에서 개발된 손가락 모양 촉각감지 센서(finger-shaped tactile sensor)이다. 이 센서는 광학을 응용한 센서로서, 광도파로는 반구형의 유리로 되어 있고, 탄성체로서 외부가 피복되어 있다. 광원에서 나온 빛은 대부분 광도파로 표면에서 반사되게 된다. 물체가 센서에 접촉하게 되면, 탄성체의 커버는 눌러지게 되고, 광도파로의 일부분과 접촉하게 된다. 이러한 접촉은 광도파로에서의 빛이 반사되는 조건을 변경시키고, 변형된 부위 주위의 광도파로 내에 갇혀 있던 빛은 산란하게 된다. 이 때, 광학 센서를 이용하여 산란된 빛을 감지하면, 기하학적인 관계를 이용하여 접촉이 발생한 위치를 알 수 있게 된다.

그림 9는 하바드대 Robotics Lab에서 개발된 촉각센서를 보여주고 있다. 이 센서 또한 빛을 이용한 센서이고, 그림 9(b)에 센서의 구조를 보여주고 있다. 센서의 외부는 철로 된 하우징으로 감싸져 있고, 그 외부 표면에 라텍스 막이 입혀져 있다. 그 내부는 투명한 젤로 채워져 있으며, 투명한 창이 하우징과 조립되어 있다. 투명한 액체가 채워져 있음으로 해서 접촉이 일어났을 때, 접촉 부위 주위에만 국부적인 변형이 일어나게 된다. 하우징 내부에는 일정간격으로 점이 찍혀져 있는데, 접촉으로 인해 하우징에 변형이 일어나게 되면, 점들의 위치가 변하게 된다. 이 때, 카메라를 이용하여 점들의 위치 변화를 감지하여, 이미지 프로세싱을 통해 접촉이 일어난 위치, 접촉으로 인한 변형량, 곡률 변화 등을 측정할 수 있게 된다. 그림 10에 하우징 내부의 점들의 모습과 변형 시 점들의 위치가 변화하는 양상을 보여주고 있다. 이 센서의 경우, 접촉위치 감지성능은 $4cm^2$의 면적내에서 0.1mm 이내의 오차를 보였고, 공간 분해능은 2mm 정도이다.

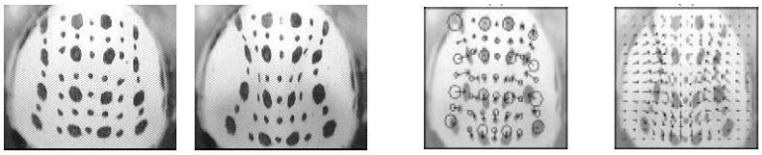


그림 10. 접촉을 감지하는 방법

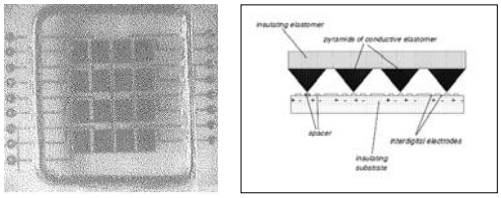
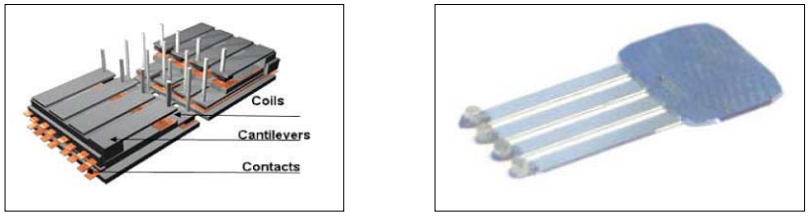


그림 11. IBMT사의 소형 접촉센서

그림 11은 독일의 IBMT사가 개발한 촉각센서이다. 그림과 같이, 두 층의 레이어로 구성되어 있으며, substrate 층은 얇은 전극의 쌍으로 구성되어 있고, 다른 레이어는 실리콘 고무로 된 절연층과 피라미드 형상의 도전성 구조로 이루어져 있다. 외부의 힘에 의해 두 레이어가 접촉하게 되어, 도전성 피라미드 구조가 쌍으로 된 전극을 누르게 되면, 압력이 증가함에 따라 전극사이의 저항이 감소하게 된다. 따라서, 외력에 따라 저항값이 달라지므로, 센서에 작용하는 정적, 동적 압력분포를 측정할 수 있다. 센서의 전체 크기는 2mm×3mm 이다.



(a) 4×4 배열의 전자기 액츄에이터 (b) 팁 끝에 영구자석이 부착된 외팔보 구조

그림 12. LEMAC의 전자기 액츄에이터를 이용한 촉각 장치

그림 12는 프랑스의 LEMAC에서 개발된 전자기 액츄에이터를 이용한 촉감 전달 장치이다. 액츄에이터는 polysilicon으로 만들어진 외팔보로 이루어져 있고, 그 끝에는 영구자석이 부착되어 있다. 그리고, 코일이 그 아래에 설치되어 있으며, 코일에서 발생하는 자기장에 의한 전자기력은 영구자석과 인력을 발생시켜서, 외팔보를 구동시킨다. 코일은 직경이 100um 인 구리선으로 만들어져 있고, 인가 전류가 200mA일 때, 1mN의 힘이 발생하게 된다.

그림 13은 Karlsruhe 연구소의 Fisher 's 팀이 개발한 촉각 액츄에이터 장치이다. 이것은 3×24개의 바늘 모양의 액츄에이터로 구성되어 있으며, 내시경에 사용되는 집게와 인터페이스되게 되어있다. 최대 작동 주파수는 600Hz이다.

그림 14는 Harvard대에서 개발된 상용 RC 모터를 이용한 촉각장치이다. 이 장치는 기존의 형상기억합금, 공압, 보이스 코일 형태보다 대역폭이 넓고, 큰 변위를 얻을 수 있으며, 상용 모터를 사용함으로써 제작비도 줄이면서, 구조도 단순한 장점이 있다. 6×6배열의 기계적 핀을 사용하였으며, 각각의 핀은 2mm 정도의 변위를 가지고, 4비트

그림 13. Karlsruhe에서 개발된 촉각장치

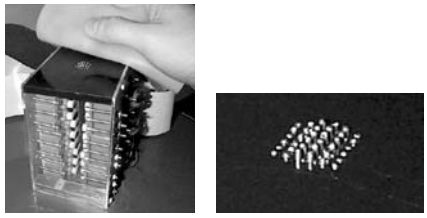


그림 14. Harvard대에서 개발된 촉각장치

의 분해능을 가진다.

4. 결 론

인간의 감각을 저장하고, 처리하며, 전달하기 위한 촉각 인터페이스는 IT, BT 산업 등의 발달과 더불어 수많은 연구가 진행되어왔다. 하지만, 아직 완전한 인간 감각의 정보화, 산업화의 길은 요원하며, 현재는 의료, 시뮬레이션, 가상현실 등에서 활발한 연구가 진행되고 있으며, 디지털 컨버젼스 시대가 다가오면서, 앞으로 인터넷통신, 와이브로, 휴대전화 등 휴대 정보기기와 융합되면서 더욱더 시장이 커지리라 예상된다.

따라서, 커져가는 시장 요구에 부흥하고, 보다 현실감 있는 감각을 전하기 위해서는 기존에 개발된 장치들에 대한 성능향상은 물론이거니와 더 나은 성능을 위한 새로운 촉각 센서와 촉각 장치의 개발이 필수적이다.

⚜ 참고 문헌

[1] Mohamed B., Moustapha H., Jean-Marc Alexandre1, and Abderrahmane Kheddar, "Tactile interfaces: a state-of-the-art survey", ISR 2004, 35th International Symposium on Robotics, 23-26 March, Paris France, 2004

[2] Dimitris H., Nicola F., Roger W. Brockett, "The performance of a deformable-membrane tactile sensor: basic results on geometrically-dened tasks", IEEE Int'l Conf. on Robotics and automation, 2000

[3] A. TALBI, O. Ducloux, N. Tiercelin , Y. Deblock, P. Pernod, V. Preobrazhensky. "Vibrotactile using micromachined electromagnetic actuators array", Journal of Physics: Conference Series 34 (2006) 637-642, 2006

[4] Christopher R, Winger, S. J. Lederman, Robert D. Howe, "A Tactile Shape Display Using RC Servomotors", Presented at the Tecth Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and teleoperator systems, March 24-25, Orlando

[5] T. Anderson, A. Breckenridge, G. Davidson, "FGB: A Graphical and Haptic User Interface For Creating Graphical, Haptic User Interfaces", Sandia National Laboratories, 1999.

[6] E.Y. Chen, B.A. Marcus, "Exos Slip Display Research and Development", DSC- Vol. 55-1, Dynamic Systems and Control:Volume 1, ASME, 1994.

[7] http://www.soton.ac.uk/~rmc1/robotics/artactile.htm
[8] http://mass.micro.uiuc.edu/research/current/advsensors/image_tactilesensor.html
[9] http://staff.aist.go.jp/maekawa.hitoshi/tactile/index_en.html

윤 동 원

· 한국기계연구원 정보장비연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 전자기 액츄에이터 제어 및 최적설계
· E-mail : dwyoun@kimm.re.kr

박 중 호

· 한국기계연구원 정보장비연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 스마트 액츄에이터,
마이크로 유체제어시스템
· E-mail : jhpark@kimm.re.kr

윤 소 남

· 한국기계연구원 정보장비연구센터 책임연구원
· 관심분야 : 스마트 액츄에이터, 디지털 프린팅 기술
· E-mail : ysn688@kimm.re.kr