

# 로봇의 촉각기구

김 종 호 · 한국표준과학연구원 기반표준부, 선임연구원  
권 현 준 · 한국표준과학연구원 기반표준부, 박사과정  
박 연 규 · 한국표준과학연구원 기반표준부, 책임연구원  
강 대 임 · 한국표준과학연구원, 선임본부장

\_e-mail : jhk@kriss.re.kr  
\_e-mail : hjkwon@kriss.re.kr  
\_e-mail : ykpark@kriss.re.kr  
\_e-mail : dikang@kriss.re.kr

이 글에서는 사람의 관절에 해당하는 큰 힘 영역이 아닌 피부처럼 접촉력, 온도 등 감각을 느낄 수 있는 촉각센서 기술과 이를 활용한 다양한 응용분야에 대해 소개하고자 한다.

**먼** 전에 앞으로 다가올 2030년 한 가정의 아침모습을 그려 보자.

오늘은 일주일이 시작되는 월요일이다. 김씨 부부는 침대에서 좀처럼 일어나지를 못하고 있다. 아침잠이 많은 것도 문제가 되겠지만 어제 아이들을 데리고 모처럼 산에 갔다 왔기 때문이다. 지금 일어나지 않으면 아침을 준비하지 못하여 아이들에게 먹이지 못하고 학교에 등교시키지 못할 뿐만 아니라 자기 자신도 출근을 하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 좀처럼 일어나지 못하던 김씨는 깜박 잊어 먹고 있었다. 부

엿에서 배터리 충전을 하고 있는 도움이 로봇이 있다는 것이 생각났다. 입가에 웃음을 띠며 로봇을 호출하였다. 오늘 아침식사는 아이들과 본인이 좋아하는 계란 프라이를 하도록 명령을 내렸다. 부엌으로 달려가 아침식사 준비를 하는 도움이 로봇을 보면서 30분은 더 잘 수 있겠구나 생각하고 눈을 감았다. 한편 부엌에서 로봇은 냉장고에서 계란을 꺼내려고 문을 열었다. 계란이 냉장고안 구석에 있기 때문에 다른 음식물들을 건드리지 않도록 조심하였다. 예전 같으면 팔 주변에 다른 물체와의 접촉을 알려주는 촉각센서가 없기 때문에 불가능한 일을

지금은 쉽게 하고 있는 것이다. 한편 냉장고 내부가 약간 어둡기 때문에 계란이 있는 정확한 곳을 시각센서로는 찾기가 어려웠다. 어쩔 수 없이 계란모양을 기억하고 있는 로봇은 인간처럼 다른 물건들을 만지면서 계란 형상을 찾았다. 다행스럽게 계란을 찾은 로봇은 계란을 깨뜨리지 않고 꺼내는 것이 필요하였다. 특히 계란은 잡는 접촉력이 약간 크면 바로 깨지고 작으면 꺼내는 동안 미끄러져서 깨지기 때문에 고난이도의 작업이 요구되었다. 최근 본 도우미 로봇은 물체와의 접촉시 누르거나 미끄러짐을 감지하는 최신 사양의 손가락용 촉각센

서 모듈을 가지고 있어서 계란을 떨어뜨리지 않고 꺼낼 수 있었다. 이 섬세한 작업능력 때문에 도움이 김씨와 아이들에게 아침식사를 제때 제공하였다. 아침식사를 하면서 김씨는 이 도우미 덕분에 오늘 하루를 조금 여유 있게 생활하는구나 생각하면서 고마움을 마음 속으로 전했다.

현재는 위의 얘기가 상상 속에서만 가능하지만 최근 로봇의 발달속도를 보면 2030년보다 더 빨리 현실화 될 수 있을 것으로 생각한다. 즉 로봇이 진화하고 있는 것이다. 예전에는 바퀴 달린 로봇이 나오더니 이제는 두발로 걷는다. 길 안내를 해주며 명령을 내리면 알아듣기까지 한다. 그리고 초보적이기는 하지만 약간의 인공지능도 가지고 있다. 그러나 위의 얘기가 현실화되기 위해서는 로봇에서 주변 환경을 인지하여 정보를 획득하고 지능적 판단, 행위 및 상호작용을 하는 로봇의 개발이 요구된다. 특히 외부와의 접촉 시 추론, 판단을 할 수 있는 인공지능과 인간의 오감 기능인 센서 감지기술은 절대적으로 필요하다. 이와 같은 기술이 융합되면 향후 인간과의 상호작용을 통하여 감성을 이해하며, 서비스 제공, 인간의 동작이나 작업의 지원 그리고 위험작업 수행, 인간으로서 불가능한 작업 수행 등을 할 수 있을 것으로 기대된다. 한편 로봇의 감지기술 연구는 인간의



그림 1 사람 손 모습

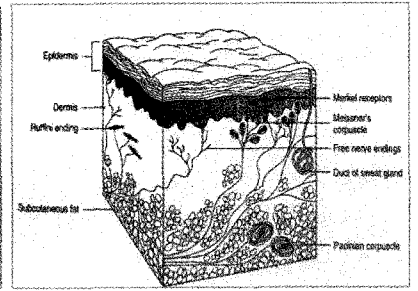


그림 2 사람피부의 단면 모습

감각인 시각, 청각, 촉각, 미각, 후각으로 구성되는 오감기능을 추구하고 있다. 현재 감지기술은 주로 시각, 청각 기능을 갖는 센서기술 개발에 집중적인 연구가 수행되었다. 반면 촉각의 기능을 갖는 센서 즉 촉각센서에 대한 연구는 시각, 청각에 비하여 미비한 상태이다.

### 사람 피부와 촉각센서의 비교

지금까지 로봇의 연구에서 촉각기능의 구현은 힘과 토크를 동시에 측정할 수 있는 용량이 비교적 큰 다축 로드셀(loadcell)에 의해 이루어졌다. 즉 로봇의 팔과 근절에서 상호작용하는 힘과 관련된 것으로 대상물을 잡고 있는 악력 감지기술에 집중되었다. 그러나 로봇이 외부환경과 상호작용을 하기 위해서는 인간의 손가락과 같은 성능을 가지는 촉각센서 더 나아가 사람의 피부와 같은 촉각센서가 요구된다. 참고로 인간은 손가락을 통하여 물체의 질감(texture), 경도 및 강성, 온

도 그리고 중량 등을 감지할 수 있다. 따라서 사람 피부의 내부는 지능로봇의 촉각센서 개발에 있어서 매우 중요한 자료이다.

평활피부의 단면구조로 대표적인 네 개의 수용기를 보여주고 있다. 각각의 수용기에 대한 설명은 다음과 같다. 먼저 마이소너(Meissner) 소체는 피부감각기의 40% 이상을 차지하여 피부 움직임의 가장 잘 감지한다. 그리고 머켈(Merkel) 수용기는 손의 피부 감각기관중 25%를 차지하며 피부를 누르는 감각에 가장 잘 반응하며, 진동에 대한 인식기능을 일부 담당한다. 한편 파시닌(Pacinian) 소체는 피부 감각중 가장 크며, 손의 피부 감각기관 중 13%를 차지한다. 이들은 피부의 가장 깊은 곳인 진피에 위치하고, 운동감과 미세한 접촉, 진동을 인식한다. 압력과 온도변화를 인지하는 루피니(Ruffini) 소체는 방추형 구조로 피부감각기 중 약 19%를 차지한다. 특히 측정 물리량 가운데 힘은 사람 피부의 기본적인 사양으로 촉각기능을 구현하는 데 있어서 매우

중요하다.

한편 몇몇 몇 로봇 연구자들은 사람 손가락 사양을 살펴보고 로봇 손가락에 적용될 수 있는 촉각센서 사양을 다음과 같이 정리하였다. 먼저 촉각센서는 수많은 단위센서들로 이루어졌는데 5x10에서 10x20의 어레이 크기를 가진다. 참고로 사람 손가락 끝부분의 경우 접촉에 민감한 점들은 대략 10x15 크기이다. 두 번째는 촉각센서를 이루는 단위센서 간의 간격을 나타내는 공간분해능(spatial resolution)으로 최소 1~2mm이다. 이것은 두 개의 다른 자극이 피부에 주어졌을 때 두 점을 구별할 수 있는 최소의 간격을 나타낸다. 따라서 사람 손가락 마디 크기가 대략 10mm x 10mm인 것을 고려하면 사람 손가락은 100개의 단위센서로 이루어진 피부인 셈이다. 그러면 한 점에 힘이 가해졌을 때 감지할 수 있는 힘 감지분해도는 얼마일까? 사람이 느낄 수 있는 최소 무게는 0.5~10g으로 알려져 있다. 일반적인 최신 핸드폰의 무게가 100g 즉 1N인 것을 고려하면 십분의 일 정도 되는 것이다. 한편 촉각센서가 로봇 손가락에 부착되었을 때 인공두뇌에서 촉각센서를 이루고 있는 단위센서들의 신호를 얻는데 걸리는 최단시간은 0.001~0.01초가 되어야 한다. 마지막으로 촉각센서는 사람의 피부처럼 튼튼하면서 반복 특성이 좋은 안정적인 센서기능

을 가져야 한다. 한편 사람 피부는 힘뿐만 아니라 열을 감지할 수 있다. 이것은 단순한 온도감지를 나타내는 것이 아니라 열의 흐름을 감지한다는 것을 의미한다. 예를 들어 오른손과 왼손을 각각 10°C인 차가운 물과 30°C인 뜨거운 물에 각각 담고 있다가 20°C인 물에 두 손을 담으면 오른손은 따뜻하게 왼손은 차갑게 느낀다는 것이다. 또한 사람은 열 흐름을 감지하여 물체를 구분할 수 있다. 즉 주변온도가 20°C인 방안에 금속과 천이 있을 경우 사람은 눈을 감고 두 물체를 만졌을 때 열전도도 차이를 느껴 구분할 수 있다. 따라서 이 기능을 촉각센서에 추가하면 사람의 손가락처럼 감지할 수 있는 센서를 개발할 수 있다.

## 로봇용 촉각센서 개발 현황

현재 산업용 로봇에서 사용되고 있는 힘 측정 로드셀은 가장 초보적인 단계의 촉각센서라고 볼 수 있다. 그러나 로봇의 손목, 팔꿈치 등 관절에 사용되고 있는 6자유도의 힘/토크 센서와 로봇의 그리퍼(gripper)용으로 압력 및 미끄러짐을 감지할 수 있는 다축 로드셀은 로봇 손에 적용하기가 쉽지 않다. 더구나 접촉상황을 인지하는 것이 필요한 향후 지능로봇 관점에서는 촉각센서로는 적합하지 않다. 최근에 몇몇

연구자들은 반도체 집적회로 제조기술의 하나인 미소기전집적시스템(MEMS) 제작기술을 이용하여 촉각센서 개발을 하고 있다. 스탠포드 대학에서는 CMOS 공정을 통해 신호처리부와 100 $\mu$ m x 100 $\mu$ m 크기의 3축 힘센서 감지부로 이루어진 촉각센서를 개발하였다. 그러나 이들 연구는 실리콘 기반 미소기전집적시스템 기술로 제작된 촉각센서로 유연성을 가지지 못하는 단점을 가지고 있다. 이런 문제를 해결하기 위해서 최근에는 유연성을 갖는 촉각센서를 개발하기 위하여 고분자를 이용하려는 시도가 이루어지고 있다.

표준과학연구원 힘 측정 및 평가 연구실에서는 사람의 피부처럼 힘과 열을 감지할 수 있는 '생체모방형 인공피부'를 개발하여 지능로봇에 적용하는 연구를 진행 중에 있다. 한편 지금까지 국내외적으로 제작하고 있는 촉각센서는 수직력만을 측정하는 센서가 주를 이루고 있으며 이것 또한 실제 로봇에 적용한 사례가 많지 않은 실정이다. 최근 대중에 선보이고 있는 일본 혼다의 아시모나 KAIST의 휴보 등 휴모노이드 로봇의 경우 사람과 악수를 할 경우 쥐는 시늉만 하는 것을 볼 수 있다. 이것은 접촉력을 감지할 수 없는 센서가 로봇손에 입혀지지 않았기 때문이다. 따라서 본 연구실에서는 로봇의 손가락, 손바닥 그리고 손등에 장착할

수 있는 촉각센서를 개발하고 있다. 먼저 깨지기 쉬운 계란을 잡거나 옷감의 질감을 감지하는 지능로봇의 경우 수직력과 수평력을 동시에 감지하는 기능은 매우 중요하다. 그러나

지금까지 제작된 촉각센서는 단지 접촉력에 대한 정보만을 획득할 수 있도록 제작되었기 때문에 외부환경에 대한 정보 수집면에서 제한적이었다. 또한 취성재료인 실리콘 웨이퍼를 사용하였기 때문에 곡면에 부착할 수 없는 단점을 가지고 있었다.

본 연구에서는 기존에 주로 사용되었던 실리콘 웨이퍼 대신 잘 구부러지고 값싼 재질인 폴리이미드 필름을 사용하여 촉각센서를 제작하였다. 촉각센서의 크기는 로봇 손가락에 적용하기 위하여 10mmx10mm 정도이며 16(4x4)개, 100(10x10)개의 어레이 크기를 가진다. 그리고 각 단위센서는 수직력과 수평력을 동시에 측정할 수 있는 3축 힘센서이다. 4x4 어레이 센서의 경우 2mm의 공간 분해능을 가지고 1kg의 물체를 집어올릴 수 있는 정도이다. 핸드폰의 무게가 100g인 것을 감안하면 핸드폰 10개를 들어올릴 수 있는 능력이

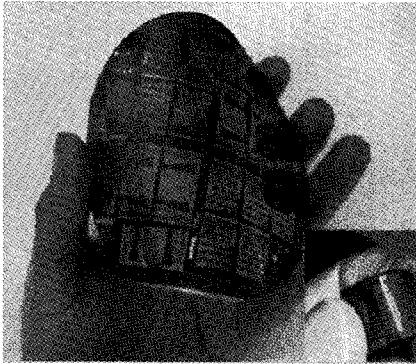


그림 3 필름 가공기술을 이용한 촉각센서

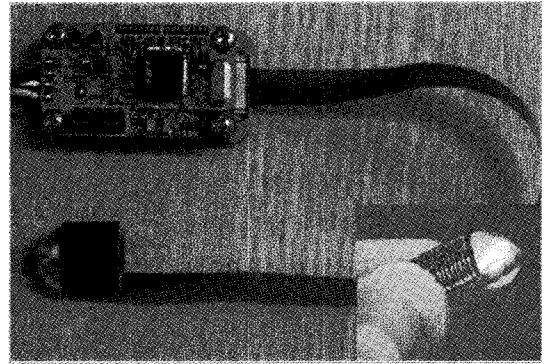


그림 4 로봇용 손가락에 부착한 촉각센서

다. 이 센서를 사용하여 로봇 손가락 마디에 적용할 수 있는 촉각센서 모듈을 개발하였다. 사람 손가락 형상과 비슷한 로봇 손가락 마디를 알루미늄으로 가공하고 필름형 센서를 패키징하였다. 향후 촉각센서와 신호처리용 보드가 탈부착이 가능하도록 커넥트를 사용하였다. 최종적으로 신호처리부에는 전원선과 통신선만 연결된다.

한편 필름형태의 촉각센서를 알루미늄 같은 딱딱한 물체에 패키징할 경우 접촉여부에 따른 신호는 문제가 없으나 사람피부처럼 부드러운 고분자 위에 패키징되면 외부와의 접촉이 발생할 경우 왜곡된 신호를 갖는 단점을 가지고 있다. 이것은 필름 형태의 촉각센서를 구부릴 경우 접촉과 상관없이 신호가 나오는 것을 통해 확인할 수 있다. 또한 원기둥 같은 형태에는 부착이 가능하나 구형 형태를 갖는 2축 곡률을 갖는 손가락 형상에는 어렵다. 지금까지 여러 연구자들에 의해 개발

된 다양한 촉각센서들이 이와 비슷한 특성을 보여 주고 있다. 즉 사람피부와 같은 부드러운 촉각센서를 만들기가 쉽지 않다는 것을 보여준다. 로봇 손이 사람 손을 대신하기 위해서는 다시 한번 사람 손의 역할을 살펴보는 것이 중요하다. 사람 손은 물건을 잡을 때 접촉여부, 미끄러짐을 감지할 수 있으며 차갑고 뜨거운 물체를 구분할 수 있다. 또한 피부의 부드러움을 가지고 있기 때문에 물건을 잡을 때 원활하게 작업을 수행할 수 있다. 무엇보다 중요한 것은 반복적인 접촉에도 피부가 손상되지 않고 제 기능을 할 수 있는 내구성이 뛰어난 일종의 센서인 셈이다. 내구성이 뛰어나고 접촉상황을 인지하는 데 신호왜곡이 발생하지 않는 사람 피부 같은 촉각센서 모듈 개발이 요구되고 있다. 또한 접촉에 의한 접촉력 신호에 비해 전기적인 외부 외란에 둔감한 특성이 중요하다. 그리고 더욱 더 중요한 것은 향후 로봇의 피부로 활용하기 위

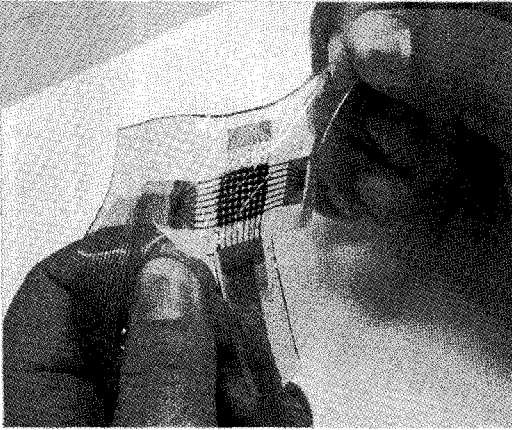


그림 5 2축 곡률을 갖는 촉각센서

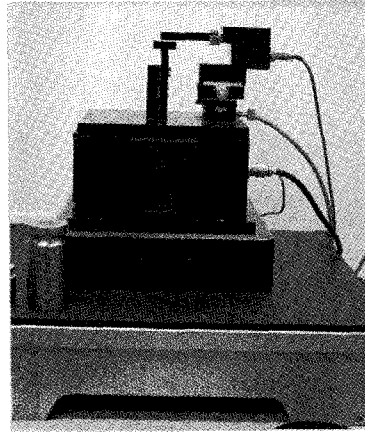


그림 6 내구성 평가용 피로시험기

해서는 제작비용이 싸야 가능하다. 따라서 최근 표준과학연구원에서는 위에서 언급한 조건을 만족시키기 위한 2축 곡률을 갖는 촉각센서모듈을 개발하고 있다. 본 촉각센서는 고분자 기반의 촉각센서로 구부러짐에 대한 신호와 곡이 적으며 전기적인 외부 외란에 대한 강건성을 가짐을 확인하였다. 한편 접촉에 따른 내구성 평가를 수행하기 위하여 피로 시험기를 자체 제작하였으며 향후 평가를 수행할 예정이다. 또한 온도 감지능이 추가된 대면적에 적용할 수 있는 촉각센서 모듈 개발을 계획하고 있다. 현재 "21세기 프론티어 지능로봇 사업"의 지원하에 본 센서를 활용하여 지능형 로봇의 손가락용 촉각센서 모듈과 휴모노이드용 발바닥 센서를 진행하고 있다. 프론티어 사업단과의 연계를 통하여 사업단 플랫폼에 통합하는 것을 목표로 하고 있다.

한편 접촉력 및 온도 등을 감

지하는 촉각센서는 현대인의 필수품인 핸드폰, PDA, 내비게이션 등에서 사용자의 감정을 효과적으로 전달할 수 있는 차세대 입력장치로도 가능하다. 기존 입력장치의 경우 위치 및 ON/OFF 형태의 정보 입력방법이 주류를 이루고 있다. 따라서 향후에는 힘을 이용한 물리적 파라미터가 추가됨으로써 다양한 입력장치 기법 및 방법이 나올 것으로 기대한다. 최근 표준과학연구원에서는 슬림화가 가능한 촉각센서를 활용하여 휴대폰, UMPC 등에 적용 가능한 '초슬림형 마우스'를 개발하였다. 개발한 촉각센서 기반 마우스는 기존 마우스의 기본 원리인 위치 이동 개념이 아니라, 촉각센서를 활용한 힘 분포를 이용하여 사용자의 손가락 움직임을 통하여 커서의 위치 및 방향 그리고 속도를 조절하는 것이다. 기존 마우스를 이용하여 모바일 게임을 하는 경우, 위치나 방향의

이동을 위해 커서를 끊임없이 눌러야 하지만 새로운 촉각 센서를 활용한 마우스를 적용할 경우 위치, 방향, 이동 속도를 자유롭게 조절할 수 있어 '손맛'을 느끼는 실감나는 게임이 가능해진다. 향후 사람의 감지 능력을 가지는 촉

각센서는 로봇에 장착하여 지능로봇의 기능을 한 단계 업그레이드 시킬 수 있을 뿐 아니라 혈관 내의 미세 수술, 암 진단 등의 각종 의료진단 및 시술에도 적용할 수 있을 것으로 기대한다. 그리고 한의학 관점에서 기존 맥진기에 부착된 힘센서를 대체하거나 최근 이슈화되고 있는 사상체질 진단기에도 응용될 것으로 기대하고 있으며 현재 관련연구를 진행하고 있다. 또한 가상현실 분야에서 촉감재현기술뿐만 아니라 촉감을 측정하는 기술로도 사용될 것이다. 이처럼 촉각센서는 지능로봇뿐만 아니라 다양한 응용분야를 가지고 있기 때문에 꾸준한 연구개발이 필요하다. 마지막으로 2030년대에는 이 같은 연구 성과에 힘입어 바이센티니얼맨처럼 인간의 촉감을 가지는 지능로봇이 우리 생활 걸로 다가오기를 기대해 본다.