

★ 2026년 1월 13일(화) 조간 (온라인 1.12.(월), 낮 12:00 이후) 보도해 주시기 바랍니다.

보도자료 청렴한 연구지원 신뢰받는 NRF	 한국연구재단 National Research Foundation of Korea
<대외홍보실> 김윤숙 팀장, 고흥숙 연구원 ☎ 042-869-6119	

<자료문의> 성균관대학교 신소재공학과 김선국 교수(031-290-7408)

반지 끼면 손끝으로 가상 물체의 힘 느낀다 - 18g 링으로 손가락에 최대 6.5N의 힘 피드백 전달 -

- 가상현실(VR) 속 물체의 단단함과 크기를 실제처럼 느낄 수 있다면?
국내 연구진이 반지처럼 착용하는 초경량 촉각 장치를 개발했다.
- 한국연구재단(이사장 홍원화)은 성균관대학교 김선국 교수 연구팀이 스위스 로잔공대(EPFL)와 공동으로 레이저 가공 기반의 3축 힘 센서를 개발, 이 기술을 반지 형태의 초경량 웨어러블 햅틱* 장치 ‘오리링(OriRing)’에 적용해 손가락 단위의 정밀한 촉각 피드백 구현에 성공했다고 밝혔다.
- * 햅틱(Haptic): 진동, 압력, 촉감을 통해 사용자에게 물리적 피드백을 전달하는 기술
- 웨어러블 햅틱 장치는 최근 피지컬AI*와 결합해 가상 세계의 감각을 현실로 전달하거나 신체 기능을 보조하는 용도로 활용도가 점점 높아지는 기술이다.
- 기존의 햅틱 장치는 진동이나 열과 같은 피부 자극 방식에 의존해 실제 물체의 힘과 질감을 사실적으로 전달하기는 어려웠다.
- 관절 수준에서 힘을 직접 전달하는 햅틱 장치의 경우, 구조적으로 무겁고 부피가 커 착용성이 떨어지는 문제를 안고 있다.
- 이에 따라 착용성이 좋으면서 현실감 있는 햅틱 피드백 구현을 위한 연구 필요성이 커지고 있다.

* 피지컬AI: 생성형 AI와 달리 물체를 가진 인공지능으로 센서를 통해 현실을 인지하고 물리적으로 행동한다.

- 연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 사용자의 손동작으로 발생하는 다축 힘을 정밀하게 감지하는 3축 힘 센서를 개발하고, 이를 초경량 웨어러블 햅틱 장치 오리링(OriRing)으로 구현해 냈다.
- 먼저 3축 힘 센서 개발은 레이저 가공으로 폴리머* 표면에 서로 다른 높이의 미세 피라미드 구조를 형성해, 힘의 방향과 크기에 따라 전기 신호가 명확히 구분되도록 했다.
- 2×2 픽셀 구조로 설계된 센서는 하나의 유닛만으로도 수직 방향 힘과 수평 방향 힘을 동시에 측정할 수 있어, 얇고 유연한 센서임에도 3축 힘 감지가 가능한 게 차별화된 핵심 기술이다.
- 해당 센서를 적용한 오리링은 구동부를 제외한 무게가 약 18g에 불과함에도 최대 6.5N의 힘 피드백**을 제공해 소형 웨어러블 장치로서는 매우 높은 힘 대비 무게 성능을 구현했다.
- 또한 연구팀은 실제 오리링을 착용한 사용자의 손가락 움직임에 따라 가상 물체의 크기와 강성이 촉각 피드백으로 즉각 전달되는 것을 확인하고, 손가락 동작만으로 가상 물체의 물리적 특성을 실시간으로 변화시키는 등 새로운 상호작용 방식도 제시했다.
- * 폴리머(Polymer, 고분자): 웨어러블 햅틱 장치에서 유연성, 신축성, 그리고 생체 적합성을 부여하는 핵심 소재
- ** 6.5N의 힘 피드백: 질량 약 663g인 물체를 들어 올리는 힘
- 김선국 교수는 “오리링은 액세서리 수준의 착용성을 유지하면서도 기존 장갑형 햅틱 기기보다 뛰어난 힘 대비 무게 성능을 달성했다”며, “가상현실과 게임은 물론 재활·의료, 원격 로봇 조작 등 다양한 분야로의 확장이 기대된다”고 밝혔다.
- 이번 연구는 과학기술정보통신부와 한국연구재단의 브레인링크사업, 나노미래소재원천기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으며, 연구 성과는 국제학술지 네이처 일렉트로닉스(Nature Electronics)에 지난해 12월 18일 온라인 게재되었다.

주요내용 설명

<작성 : 성균관대학교 김선국 교수>

논문명	An 18 g Haptic Feedback Ring with a Three-Axis Force-Sensing Skin
저널명	네이처 일렉트로닉스 (Nature Electronics)
키워드	Wearable haptics(웨어러블 햅틱), tactile interaction(촉각 상호작용), multi-axis force sensing skin(다축 힘 센싱 스킨), soft robotics(소프트 로보틱스), extended reality(확장현실)
DOI	https://doi.org/10.1038/s41928-025-01515-x
저자	강선주 박사(제1저자/성균관대학교, 노스웨스턴대학교), 무스타파 메테(Mustafa Mete) 박사 (제1저자/로잔공대), 스리니바스 간들라 (Srinivas Gandla) 박사, 딜라 튀르크멘(Dila Türkmen) 박사, 로hit 카둔감파람빌 존(Rohit Kadungamparambil John), 메르베 아세르 칼라파트(Merve Acer Kalafat) 교수, 김선국 교수(교신저자/성균관대학교), 제이미 백 교수 (교신저자/로잔공대)

1. 연구의 필요성

- 기존의 웨어러블 햅틱(haptic) 장치는 주로 진동, 온열, 피부 변형과 같은 피부 자극(skin-level stimulation)에 기반한 촉각 피드백에 초점을 두어 왔다. 이러한 방식은 실제 사물의 형태, 강도, 질감과 같은 물리적 특성을 사실적으로 재현하는 데 한계가 있다. 특히 관절 수준에서 힘과 토크를 직접 전달하는 운동감각(kinesthetic) 피드백 장치는 구조적으로 크고 무거워 착용성과 활용성이 크게 제한된다. 이에 따라 소형·경량이면서도 사실적인 힘 전달이 가능한 웨어러블 디바이스에 대한 연구의 필요성이 커지고 있다.
- 현실감 있는 햅틱 피드백 구현을 위해서는 사용자의 손동작에 의해 발생하는 다축 힘의 크기와 방향을 정밀하게 감지할 수 있는 센서 기술이 필수적이다. 그러나 기존 웨어러블 장치는 모터나 기계적 구조에 의존하거나, 힘을 직접 측정하지 않고 간접적으로 추정하는 방식이 대부분으로, 정확도와 신뢰성에 한계가 있다. 따라서 실시간 다축 힘을 직접 측정할 수 있는 유연하고 소형화된 고성능 힘 센서 개발이 요구된다.

- 특히 피에조 저항 방식* 힘 센서는 단순한 구조와 구동 원리로 인해 웨어러블 응용에 적합한 기술로 주목받고 있다.

* 피에조 저항 방식: 외부 힘이 가해질 때 재료의 저항값 변화에 기반해 힘을 감지하는 센서 방식

- 다만, 민감도, 응답 속도, 선형성을 동시에 확보하기 위해서는 미세구조 설계가 핵심 요소로 작용한다. 기존의 피라미드, 돔, 기둥형 마이크로 구조 기반 센서들은 복합소재 사용으로 인해 습도나 온도 변화에 취약하고 장기 안정성이 떨어지는 문제가 있다. 이에 따라 레이저 가공과 같은 정밀하고 재현성 높은 미세구조 형성 기술을 활용한 안정적인 센서 개발이 필요하다.

2. 연구내용

- 본 연구에서는 레이저 가공 공정을 활용해 폴리머 표면을 정밀하게 식각함으로써, 다중 높이(multi-height) 피라미드 어레이 구조를 갖는 새로운 3축 힘 센서를 구현하였다. 형성된 피라미드 구조 상부에는 스퀘어 어레이(square array) 형태의 센싱 전극과, 또 다른 전극 층인 서펜타인(serpentine) 패턴을 결합하여 높은 선형 감도와 신뢰성 있는 신호 분리를 달성하였다.
- 센서는 2×2 픽셀 구조를 기반으로 설계되어, 하나의 센서 유닛만으로도 법선 방향 힘(normal force)과 전단 방향 힘(shear force)을 동시에 측정할 수 있다. 이러한 구조를 통해 얇고 유연한 센서임에도 불구하고 3축 힘을 정밀하게 감지할 수 있으며, 반복 측정 시에도 안정적인 성능을 유지한다. 이는 기존의 복잡한 기계 구조나 모터 기반 햅틱 시스템과 차별화되는 핵심 기술이다.
- 해당 센서를 적용해 개발된 ‘오리링(OriRing)’은 손가락에 착용하는 반지 형태의 초경량 햅틱 디바이스로, 구동부를 제외한 무게가 약 18g에 불과하다. 오리링은 최대 6.5N의 힘 피드백을 전달할 수 있어, 소형 웨어러블 디바이스로서는 매우 높은 힘 대비 무게 성능을 달성하였다. 이를 통해 사용자는 가상 물체의 형태와 강성을 손끝 촉각으로 사실적으로

인지할 수 있다.

- 특히 오리링에 적용된 3축 힘 센서는 3D 마이크로 구조와 4픽셀 전극 어레이로 구성된 2층 구조를 기반으로 하여, 법선 힘과 전단 힘을 명확히 분리 감지한다. 그 결과 높은 감도, 우수한 선형성, 빠른 응답 속도를 동시에 확보하였으며, 사람과 기계 간의 복잡한 물리적 상호작용을 정밀하게 측정할 수 있다.
- 연구팀은 또한 오리링을 실제 가상현실(VR) 환경에 적용하여 양방향 촉각 인터페이스를 구현하였다. 사용자는 손가락 움직임을 통해 가상 물체를 조작하면서, 물체의 크기와 강성 정보를 촉각 피드백으로 직관적으로 인지할 수 있다. 나아가 스와이프 제스처를 활용해 가상 물체의 물리적 특성을 실시간으로 변화시키는 등 기존 햅틱 장치에서는 구현이 어려웠던 새로운 인터랙션 방식을 제시하였다.

3. 연구성과 및 기대효과

- 본 연구는 소형·경량 웨어러블 디바이스에서 정밀한 키네스틱 촉각 피드백을 구현할 수 있음을 실증적으로 보여준 성과로, 웨어러블 햅틱 기술의 새로운 가능성을 제시한다. 특히 손가락 단위의 정밀 힘 감지 및 피드백을 통해 기존 손목 또는 장갑형 장비 중심의 햅틱 기술을 한 단계 발전시켰다.
- 본 기술은 차세대 웨어러블 로봇, 가상·확장현실(XR) 인터페이스, 게임 및 메타버스, 재활·의료 보조기기, 원격 로봇 조작 및 휴먼-머신 인터페이스(HMI) 등 다양한 분야로의 응용이 기대된다. 또한 고성능 센서와 알고리즘 기반의 촉각 상호작용 기술은 향후 일상형 XR 기기의 핵심 요소 기술로 활용될 수 있다.
- 본 연구 결과는 2025년 12월 18일, 세계적 국제학술지 네이처 일렉트로닉스(Nature Electronics, Impact Factor = 40.9)에 온라인 게재되었으며, 웨어러블 촉각 인터페이스 분야에서 학문적·기술적 우수성을 국제적으로 인정받았다.

그림 설명



그림 1. 햅틱 오리링(OriRing)의 양방향 피드백 및 오리링(OriRing)과 3축 힘 센서(Three-axis force-sensing skin)의 구조도

햅틱 피드백 오리링(OriRing)은 가상 물체의 크기 및 강성을 구현하는 양방향 햅틱 피드백 디바이스이다.

오리링은 3축 힘 센서(Three-axis force-sensing skin)를 포함하는 접힐 수 있는 오리гами 구조로 디자인되어 있으며, 3축 힘 센서는 레이저 공정을 통해 다중높이(multi-height)의 3D 마이크로 구조와 전극 패턴을 형성하여 높은 선형감도를 구현하였다.

그림설명 및 그림제공 : 성균관대학교 김선국 교수

연구 이야기

<작성 : 성균관대학교 김선국 교수>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

로잔공과대학교 제이미 백(Jamie Paik) 교수 연구팀과 공동연구를 시작하면서 로봇공학 분야에서의 경량화 및 소형화의 필요성과 그 한계를 확인하게 되었고, 여전히 여러 축으로의 회전과 컨트롤을 위해 큰 장비와 많은 센서가 사용되고 있다는 것을 알게 되었다. 이러한 측면에서 다축 힘 측정이 가능한 얇으면서도 유연한 센서를 개발한다면 햅틱 로봇의 소형화 및 경량화를 가능하게 할 수 있을 것이라고 생각하여 연구를 시작하게 되었다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

레이저를 직접 재료의 표면에 인가함으로써 형성되는 음각 모양을 기반으로 식각 패턴을 디자인하여 3D 마이크로 구조를 제작한 후에, 금속을 마이크로 구조 표면과 센싱 레이어에 증착 후 레이저로 패터닝하여 3축 힘 센서를 제작하였다. 제작된 힘 센서는 오리가미 구조의 햅틱 링과 결합하여 힘 피드백이 가능하도록 구현하였다.

□ 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소는 무엇인지? 어떻게 극복(해결)하였는지?

본 연구에서는 3축 힘 센서의 감도가 너무 높으면, 이 센서를 햅틱 로봇에 실제로 적용하였을 때 힘의 크기와 방향을 구분하기가 어려워져 센서의 선형 감도를 높이는 것이 중요한 요소였다. 이를 해결하기 위해, 압력에 따른 3D 마이크로 구조의 모양을 고려하여 전극의 접촉 면적이 점진적으로 증가하도록 패턴을 최적화하여 선형 감도를 확보할 수 있었다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

이번 연구는 반지처럼 가벼운 18g 웨어러블 장치를 통해 가상공간 속 물체의 촉각을 실제처럼 손끝에 전달한 것이 특징이다. 기존 가상현실 촉각 기술이 진동으로 느낌만 흉내 냈다면, 이번 기술은 손가락에 실제 힘과 저항을 가해 물체의 단단함과 크기를 구분할 수 있게 했다. 또한 위아래로 누르는 힘뿐 아니라 좌우로 미는 방향까지 감지해 보다 자연스러운 손동작을 구현했다. 사용자의 손 움직임이 가상세계의 변화를 일으키고, 그 결과가 다시 촉각으로 되돌아오는 양방향 상호작용도 가능하다. 장갑형 장치에 비해 훨씬 작고 가벼워 일상적으로 착용할 수 있다는 점도 차별점이다. 이 기술은 게임과 가상현실을 넘어 의료·재활, 원격 로봇 조작 등 다양한 분야로 활용될 가능성이 크다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

본 연구에서 개발된 웨어러블 햅틱 링 기술은 소형·경량 구조에서 실제 힘과 저항을 전달할 수 있다는 점에서 다양한 분야로의 실용화 가능성을 지닌다. 우선, 가상현실(VR)·확장현실(XR) 환경에서 사용자가 가상 물체의 크기와 단단함을 손끝으로 느낄 수 있어, 게임·메타버스·교육 콘텐츠의 몰입도를 크게 향상시킬 수 있다. 기존 진동 중심의 촉각 피드백을 넘어, 힘 기반의 운동감각 피드백을 제공함으로써 보다 현실감 있는 상호작용이 가능하다. 또한 재활·의료 분야에서는 손가락 힘 조절 훈련, 미세 운동 능력 회복, 감각 재교육 등에 활용될 수 있으며, 환자의 손동작과 힘 변화를 정량적으로 측정·피드백하는 인터페이스로 확장될 수 있다. 나아가 원격 로봇 조작 및 텔레오페레이션 분야에서는 사용자가 로봇이 접촉하는 물체의 저항과 강성을 직접 느끼면서 보다 정밀하고 안전한 조작을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

실용화를 위해서는 몇 가지 기술적 과제가 남아 있다. 우선, 공압 구동부의 추가적인 소형화 및 일체화, 그리고 완전 무선화를 통해 사용자의 착용 편의성을 더욱 향상시킬 필요가 있다. 또한 장시간 착용 환경에서도 안정적인 성능을 유지할 수 있도록 내구성 및 신뢰성 검증이 요구된다. 마지막으로 다양한 사용자와 응용 환경에 대응하기 위한 표준화된 인터페이스와 소프트웨어 플랫폼 개발 역시 실용화를 위한 중요한 과제로 남아 있다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

이번 연구의 궁극적인 목표는 가상현실과 실제 세계를 자연스럽게 연결하는 데 있다. 단순한 촉각 전달을 넘어, 힘·변형·움직임·접촉 상태를 동시에 인식해 현실과 가상환경 간의 경계를 줄이고자 한다. 이를 위해 향후에는 촉각 센서뿐 아니라 온도, 진동, 생체 신호 등을 통합한 다중센서 플랫폼으로 확장할 계획이다. 또한 사용자의 의도를 보다 정확히 반영하기 위해 센서 데이터와 지능형 알고리즘을 결합한 실시간 해석 기술도 연구할 예정이다. 장치의 소형화와 무선화, 구동부 일체화를 통해 일상 착용이 가능한 수준으로 발전시키는 것도 중요한 과제다. 이러한 연구를 통해 가상현실이 단순한 체험을 넘어, 실제 세계와 상호작용하는 실감형 플랫폼으로 진화하는 것을 목표로 한다.

□ 기타 특별한 에피소드가 있었다면?

제작된 햅틱 디바이스의 성능을 확인하기 위해 연구팀은 VR 기반 게임 환경을 직접 구현하고, 피험자를 모집해 사용자 테스트를 진행하였다. 참여자들은 가상환경 속에서 여러 물체를 만져보며 어떤 물체가 가장 부드러운지 맞추는 게임을 즐겼고, 모두 흥미롭게 실험에 참여해 주어 연구진에게도 특별한 경험으로 기억에 남았다.