

우수성과	세계 최초 200 Gbps 급 6G 무선전송기술 시연 성공 및 6G 핵심 원천기술 확보
연구자	김혜진 (한국전자통신연구원 인공지능창의연구소 책임연구원)

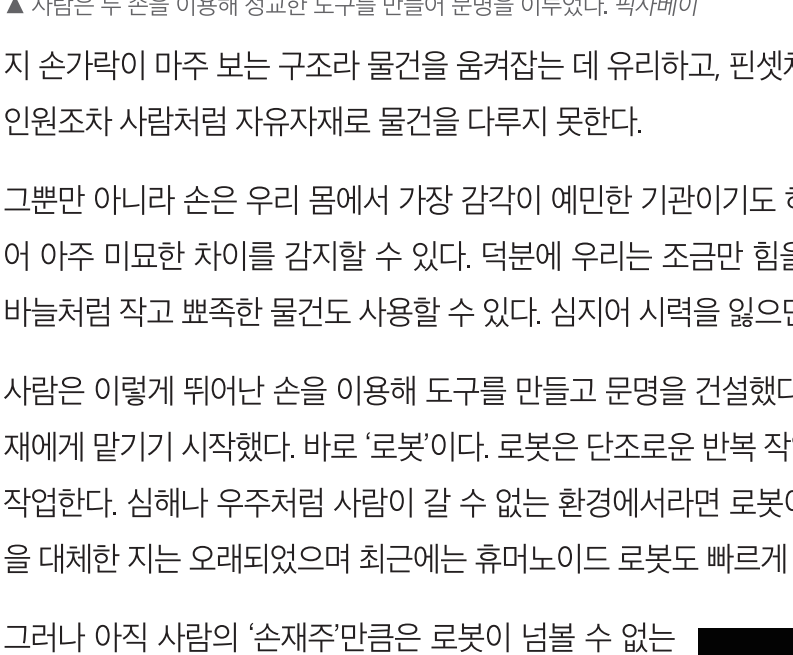
사람처럼 느끼는 ‘손’으로 휴머노이드를 완성한다

The hands are the instruments of man’s intelligence.

(손은 인간 지능의 도구다)

- 마리아 몬테소리(교육학자 겸 의사)

휴머노이드 로봇의 성장과 함께 주목받는 로봇 핸드



▲ 사람은 두 손을 이용해 정교한 도구를 만들어 문명을 이루었다. 픽사베이

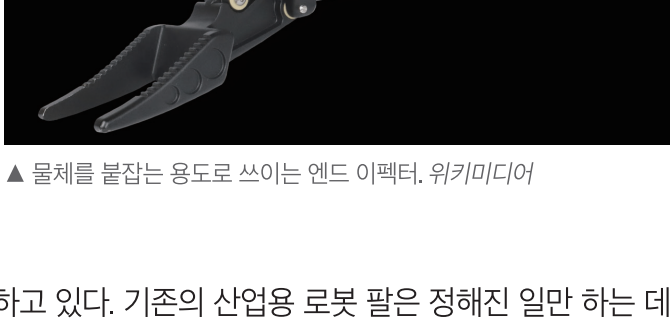
사람이 다른 동물과 다르게 지금처럼 문명을 이루고 살 수 있는 원동력은 뛰어난 지능과 창의력이다. 하지만 아무리 지능과 창의력이 뛰어나도 신체가 받쳐주지 못하면 머릿속 상상만으로 그칠 수밖에 없다.

사람에게는 뛰어난 두뇌 못지않은 뛰어난 손이 있기에 오늘날과 같은 문명을 이룰 수 있었다. 그만큼 손은 정교하게 설계된 우리 몸의 도구라고 할 수 있다. 실제로 사람 몸에 있는 뼈 200여 개 중에서 무려 54개가 양손에 있다. 또한 다른 동물과 달리 엄지손가락과 나머지 손가락이 마주 보는 구조라 물건을 움켜잡는 데 유리하고, 핀셋처럼 작은 물건도 잡을 수 있다. 사람과 가까운 유인원조차 사람처럼 자유자재로 물건을 다루지 못한다.

그뿐만 아니라 손은 우리 몸에서 가장 감각이 예민한 기관이기도 하다. 특히 손가락 끝에는 수많은 신경이 몰려 있어 아주 미묘한 차이를 감지할 수 있다. 덕분에 우리는 조금만 힘을 주면 망가지는 물건도 섬세하게 다룰 수 있고, 바늘처럼 작고 뾰족한 물건도 사용할 수 있다. 심지어 시력을 잃으면 손의 감각은 더욱 예민해지기도 한다.

사람은 이렇게 뛰어난 손을 이용해 도구를 만들고 문명을 건설했다. 그리고 이제 사람이 하던 수많은 일을 다른 존재에게 맡기기 시작했다. 바로 ‘로봇’이다. 로봇은 단조로운 반복 작업을 지치지 않고 할 수 있으며, 일정한 정밀도로 작업한다. 심지어 우주처럼 사람이 갈 수 없는 환경에서라면 로봇이 더 유용하다. 이미 산업 현장에서 로봇이 사람을 대체한 지는 오래되었으며 최근에는 휴머노이드 로봇도 빠르게 발전하고 있다.

그러나 아직 사람의 ‘손재주’만큼은 로봇이 넘볼 수 없는 능력이다. 오늘날 쓰이는 로봇의 팔에는 손 대신 집게나 흡착기, 또는 용접이나 조립 등 특정 작업에 필요한 장치가 달려 있다. 이처럼 사람의 손에 해당하는 장치를 ‘엔드 이펙터(End-effector)’라고 한다. 이런 엔드 이펙터는 보통 특정 작업에 적합한 형태라 사람의 손처럼 다양한 일을 하기는 어렵다. 그래서 다른 작업을 하기 위해서는 다른 엔드 이펙터로 갈아끼워야 한다.

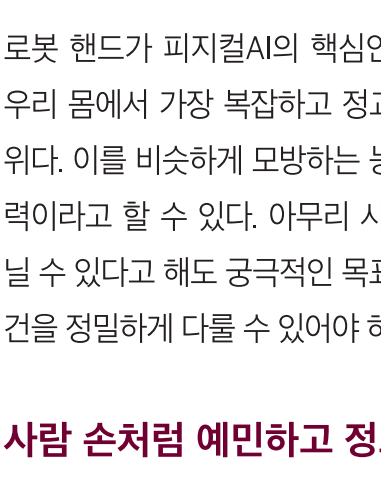


▲ 물체를 붙잡는 용도로 쓰이는 엔드 이펙터. 위키미디어

휴머노이드 로봇의 발전과 함께 엔드 이펙터 시장도 변화하고 있다. 기존의 산업용 로봇 팔은 정해진 일만 하는 데 그쳤지만, 산업용 휴머노이드 로봇은 사람이 일하는 것과 유사한 환경에서 조립, 운반 등 다양한 일을 해야 하기 때문이다. 그러기 위해서는 휴머노이드 로봇이 그에 걸맞은 손을 갖춰야 한다. 게다가 휴머노이드 로봇을 가정에서 활용하려면 더더욱 섬세한 손이 필요하다. 그래서 기존의 엔드 이펙터보다 복잡한 작업을 할 수 있는 ‘로봇 핸드’의 필요성이 증가하면서 이 분야가 고부가가치의 새로운 시장으로 주목받고 있다.

로봇 핸드와 차세대 인공지능 피지컬AI의 핵심인 이유

로봇 핸드의 핵심 부품은 액추에이터와 감속기, 센서, 그리고 이들을 통합하는 제어 장치다. 액추에이터는 에너지를 물리적인 움직임으로 바꾸어 주는 장치로, 근육과 같은 역할을 한다. 감속기는 모터의 빠른 회전 속도를 줄이는 대신 회전력을 증폭해 원하는 힘과 속도를 얻어내는 장치다. 손가락이나 관절의 정밀한 움직임에 필수적인 부품이다. 센서는 감각 기관 역할을 하며 외부의 다양한 자극을 인식해 제어 장치로 전달한다.



▲ 로봇 핸드는 점점 사람의 손과 비슷해지고 있다. 위키미디어

현재 개발되고 있는 로봇 핸드들은 점점 사람의 손 크기에 가까워지며 동작도 정교해지고 있다. 산업용 또는 휴머노이드용 등 용도에 따라 세부적인 기능은 서로 조금씩 다를 수 있지만, 로봇 핸드의 궁극적인 목표는 사람의 손처럼 자연스럽고 정밀하게 물건을 조작하는 것이다. 이와 같은 로봇 핸드들은 이미 대중화된 생형형AI의 뒤를 이어 새로운 화두로 떠오르고 있는 피지컬AI의 핵심 기술이기도 하다.

피지컬AI는 현실 세계를 인지하고, 의사 결정을 내린 뒤 로봇과 같은 물리적 장치를 조종해 행동으로 이어지게 하는 AI를 말한다. 지금까지의 인공지능이 뇌만 있는 존재라면, 피지컬AI는 몸까지 가진 것과 같다. 엔비디아의 CEO 젠슨 황은 CES2025 기조연설에서 “로봇과 같은 시스템이 현실 세계를 인지하고 이해하며 복잡한 행동을 할 수 있게 하는 인공지능”이 피지컬AI라고 정의하며, 피지컬AI가 차세대 산업혁명을 이끌 새로운 패러다임이 될 것이라고 주장했다.

피지컬AI는 현실 공간에서 생길 수 있는 다양한 상황에서 어떻게 움직여야 할지 학습해야 한다. 이때는 디지털 트윈을 이용할 수 있다. 디지털 트윈은 현실 공간을 똑같이 옮겨 놓은 가상 공간으로, 현실에서 일어날 수 있는 다양한 상황을 시뮬레이션해 결과를 예측하는 데 쓰인다. 현실과 똑같은 가상 공간에서 물리 법칙을 적용하면 피지컬AI를 학습시키는 데 쓰일 수 있다. 피지컬AI는 로봇이나 자율주행차 같은 물리적인 장치를 움직여야 하기 때문에 더욱 높은 신뢰성이 필요하다. 사소한 오판이라고 해도 커다란 사고나 인명 피해로 이어질 수 있기 때문이다.



▲ 휴머노이드 로봇이 사람의 생활 공간에서 위험한 도구를 다룰 수 있도록 피지컬AI의 발전이 필수다. AI 생성이미지

로봇 핸드와 피지컬AI의 핵심인 이유가 여기 있다. 손은 우리 몸에서 가장 복잡하고 정교한 동작을 할 수 있는 부위다. 이를 비슷하게 모방하는 능력은 곧 피지컬AI의 경쟁력이라고 할 수 있다. 아무리 사람처럼 자유롭게 걸어도 다닐 수 있다고 해도 궁극적인 목표를 수행하기 위해서는 물건을 정밀하게 다룰 수 있어야 하기 때문이다.

사람 손처럼 예민하고 정교하게

피지컬AI를 제대로 구현하려면 환경 인식부터 판단, 행동에 이르는 모든 영역이 종합적이고 긴밀하게 발전해야 한다. 이때 주변 환경을 인식하는 역할은 시각 센서, 촉각 센서, 위치나 자세를 파악할 수 있게 해주는 센서 등 다양한 센서가 담당한다. AI 소프트웨어는 센서에서 들어오는 정보를 분석하고, 그 결과에 따라 움직임을 계획하고 실행에 옮긴다.

따라서 피지컬AI를 구현하는 데 있어 센서를 이용한 정보 수집, 즉 센싱 기술은 첫 번째 단계다. 그중에서도 로봇 핸드의 경우 촉각 센서가 매우 중요하다. 우리가 물건을 잡을 때를 생각해 보자. 우리는 손의 감각으로 물건의 무게나 모양, 굳기, 표면 재질 등을 느끼며 얼마나 힘을 주고 어떻게 파지할지를 본능적으로 정한다. 눈으로 보지 않아도 느낄만으로도 가능한 일이다. 피부라는 감각 기관이 없는 로봇에게는 이게 상당히 어려운 일이다.

그런데 최근 국내 연구진이 인간의 피부 역할을 할 뛰어난 촉각 센서를 개발하는 데 성공해 주목을 받고 있다. 한국전자통신연구원(ETRI) 인공지능창의연구소 김혜진 책임연구원이 이끄는 연구팀이 주인공이다. 연구팀은 이 촉각 센서를 이용해 물체가 얼마나 단단한지에 따라 힘 조절이 가능한 지능형 로봇 핸드를 구현했다. 기존의 로봇 핸드들은 물체를 잡는 방향에 따라서 손가락의 압력 센서 신호가 왜곡되는 한계가 있었다. ETRI 연구팀이 개발한 촉각 센서는 360° 모든 방향에서 정밀하게 압력을 감지할 수 있다.

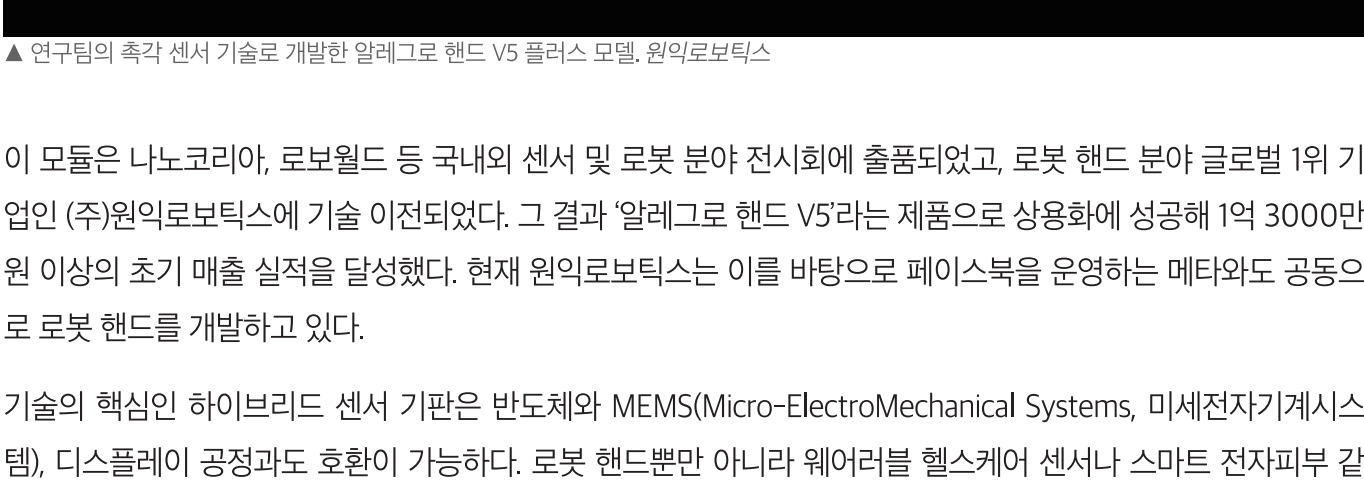


▲ 연구팀이 개발한 유연인장 하이브리드 센서 플랫폼. ETRI

이 성과는 ‘유연인장 하이브리드 센서 플랫폼’과 ‘고유연·고민감 압력센서 및 다방향 촉각인지 지능형 알고리즘’, 로봇 손가락 모듈 등의 기술이 모여 이룬 결과다. 유연인장 하이브리드 센서 플랫폼은 압력, 온도, 근접 등 다양한 센서가 집적된 소재로 유연하고 잘 늘어나는 성질이 있다. 연구팀이 개발한 이 플랫폼은 1만 회 이상 50% 늘렸다가 줄이기를 반복한 뒤에도 센서가 정상 동작했다.

연구팀은 이 기판에 집적 가능한 다중 센서 소재와 구조에 관한 핵심 기술도 확보했다. 다공성 엘라스토머(고무와 같은 탄성을 지닌 고분자 물질)를 활용한 고감도·고내구성 압력 센서와 밴딩 센서(굽힘 정도를 감지)를 개발함으로써 세계 최고 수준의 유연 멀티모달(여러 유형의 데이터를 통합하고 처리하는 방식) 촉각 센서를 만든 것이다. 이를 이용한 전자피부는 로봇뿐만 아니라 다양한 스마트기기에도 쓰일 수 있을 전망이다.

나아가 연구팀은 이를 기반으로 전방위 촉각 감지가 가능한 로봇 손가락 모듈도 세계 최초로 개발했다. 이 모듈에는 뮌헨라인(막) 형태의 고민감 압력 센서와 압력과 진동 신호를 처리하는 장치, 압력에 따라 색상이 변하는 LED 등이 통합되어 있어 사람이 눈으로 압력 정보를 파악하고 로봇 핸드와 상호작용할 수 있다.



▲ 연구팀의 촉각 센서 기술로 개발한 알레그로 핸드 V5 플러스 모델. 원익로보틱스

이 모듈은 나노코리아, 로보월드 등 국내외 센서 및 로봇 분야 전시회에 출품되었고, 로봇 핸드 분야 글로벌 1위 기업인 (주)원익로보틱스에 기술 이전되었다. 그 결과 ‘알레그로 핸드 V5’라는 제품으로 상용화에 성공해 1억 3000만 원 이상의 초기 매출 실적을 달성했다. 현재 원익로보틱스는 이를 바탕으로 페이스북을 운영하는 메타와도 공동으로 로봇 핸드를 개발하고 있다.

기술의 핵심인 하이브리드 센서 기판은 반도체와 MEMS(Micro-ElectroMechanical Systems, 미세전자기계시스템), 디스플레이 공정과도 호환이 가능하다. 로봇 핸드뿐만 아니라 웨어러블 헬스케어 센서나 스마트 전자피부 같은 의료 및 재활기기 등으로도 활용하는 뜻이다. 특히 사람과 직접 접촉하며 상호작용이 가능하므로 노약자 돌봄이나 재활 치료, 수술 로봇처럼 정밀하면서도 안전해야 하는 분야에서 활용 가능성이 높을 것으로 보인다.

이번 연구성과는 다양한 종류의 센서를 자유로운 형태로 통합해 제작할 수 있는 플랫폼을 제시했다는 점에서 의미가 크다. 기존 센서 연구의 한계를 넘어서는 패러다임을 제시했기 때문이다. 또한 개발한 센서 기술에 대한 성능 평가 방법을 국내외 국제 표준안으로 제안해 인증 기반도 마련했다. 앞으로 더욱 안전하고 지능적인 미래 로봇 시대를 열고 싶다는 연구팀의 다음 행보가 더욱 기대된다.

《》 미니 인터뷰

Q 이번 연구성과가 갖는 가장 큰 의미는 무엇인가요?

A 대면적의 유연·인장형 하이브리드 촉각 센서 플랫폼이라는 새로운 연구 패러다임을 제시함으로써 기존의 단일 센서 성능 중심의 연구를 넘어 플랫폼·시스템 통합 기반의 촉각 기술 연구로 확장하는 데 기여했다고 생각합니다.

특히 소재에서 공정, 센서, 신호 처리, 지능형 알고리즘에 이르는 전 과정을 포괄하는 연구 체계를 구축했으며, 로봇 산업계와 긴밀히 협력해 실제 적용 사례를 만들어 내는 데까지 성공했습니다. 학계와 산업계가 함께 성장할 수 있는 협력 모델을 제시했다는 점에서 의미가 크다고 할 수 있습니다.

▲ 연구를 이끈 김혜진 책임연구원. ETRI

Q 이 분야를 연구하시게 된 계기가 궁금합니다.

A “내가 개발하는 센서가 정말 사람들에게 어떤 가치를 줄 수 있을까?” “세상이 진정으로 필요로 하는 기술은 무엇일까?” 오랫동안 센서를 연구해 오면서 늘 이런 질문을 던졌습니

다. 그러다 사람 곁에서 일하고 돕는 로봇이라면 사람과 비슷한 감각을 바탕으로 안전하고 섬세하게 물체를 다룰 수 있어야 한다는 답을 떠올리고 이 연구를 시작하게 되었습니다. 로봇 기술은 빠르게 발전하고 있지만, 여전히 사람처럼 섬세하게 물체를 다루는 능력은 부족합니다. 가장 큰 이유가 ‘촉각’이 부족하다는 점입니다. 저는 이런 능력을 로봇에게 부여할 수 있다면, 산업계와 일상에서 생기는 많은 위험과 불편을 줄일 수 있다고 생각했습니다.

Q 수행하신 연구가 우리의 삶을 어떻게 바꿀 수 있을까요?

A 로봇의 안전성과 신뢰성이 커지고, 의료·재활 로봇이 더 정교한 촉각 피드백을 제공할 수 있게 됩니다. 돌봄이나 생활 서비스 로봇은 사람에게 더욱 친근하게 다가갈 수 있으며, 산업 현장에서는 작업 품질과 효율이 크게 높아질 겁니다. 궁극적으로 촉각 센서는 사람과 함께 일하는 로봇이 ‘사람을 이해하는 감각’을 갖추도록 돕는 핵심 기술입니다. 이는 기술이 인간을 대체하기보다 인간을 보호하고 돕는 동반자 역할을 하게 만드는 중요한 출발점이라고 생각합니다.

Q 지금은 어떤 연구를 하고 계신지요?

A 손가락 형태의 촉각 센서를 넘어 사람의 피부처럼 수백, 수천 개의 촉각 채널로 이루어진 초대면적 전자피부를 개발하고 있습니다. 이를 통해 로봇이 접촉한 대상을 고해상도로 인지하고 더욱 정밀하고 안전하게 움직일 수 있게 하려고 합니다. 더불어 대면적 집적·신속 신뢰성·고정밀 신호 처리 기술을 함께 고도화하고 있습니다. 이는 사람과 로봇이 실제 환경에서 함께 안정적으로 일할 수 있게 해주는 핵심 기반 기술이 될 것입니다.



▲ 유연한 전자피부는 피부의 굴곡에 맞게 부착할 수 있어 상시 모니터링에 유용하다. AI 생성이미지

한편, 이런 유연 촉각 센서 기술을 사람의 건강과 재활을 돕는 방향으로 확장하고 있습니다. 유연해서 인체에 부담 없이 부착할 수 있는 센서를 이용해 근육 사용량과 회복 상태를 모니터링하고 재활 관리에 활용할 수 있는 기술을 개발 중입니다. 또한 4대 활력 징후인 체온, 맥박, 호흡 수, 혈당 중에서 유일하게 무선·연속 측정이 어려운 혈당을 모니터링할 수 있는 스마트 패치형 센서 시스템도 개발하고 있습니다. 환자가 일상생활 속에서 더 편안하고 자연스럽게 혈당을 관리할 수 있는 기술을 구현하는 게 목표입니다.

Q 이번 연구를 진행하는 과정에서 가장 결정적인 순간을 꼽는다면?

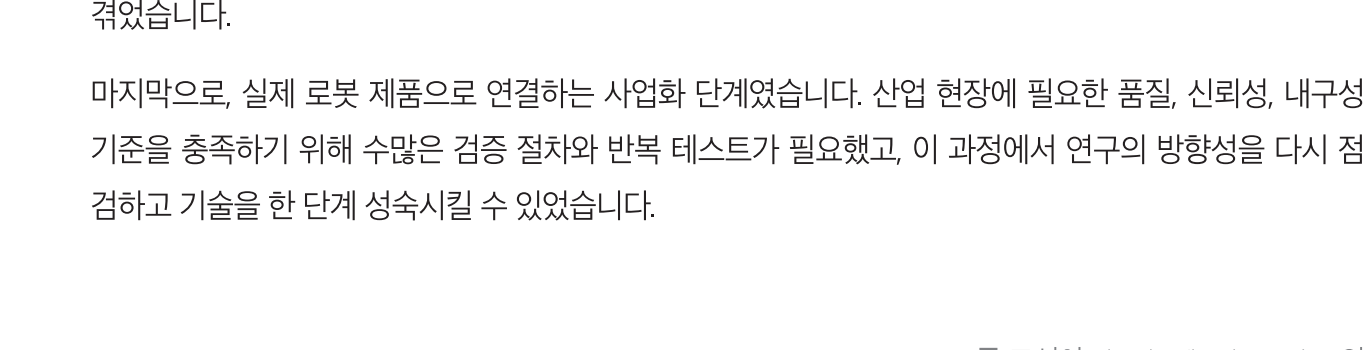
A 연구를 진행하면서 몇 차례의 중요한 전환점이 있었습니다. 첫 번째는 유연성과 기계적 신뢰성을 동시에 만족하는 플랫폼을 구현해야 했던 순간입니다. 촉각 센서는 사람의 손처럼 여러 환경에서 반복적으로 쓰이기 때문에 늘어나고 구부러지는 상황에서도 성능이 안정적으로 유지되어야 합니다. 그러나 기존 기술만으로는 유연성과 신뢰성을 동시에 확보하기 어려웠습니다. 기판과 배선 구조, 공정 조건을 다시 설계해야 했죠.

두 번째는 압력의 크기뿐만 아니라 방향, 분포, 패턴까지 해석할 수 있는 촉각으로 확장하는 단계였습니다. 로봇 핸드나 안전하게 물체를 다루려면 힘의 세기만이 아니라 힘의 방향도 정확히 알아야 합니다. 이를 위해 구조 설계와 신호 처리 알고리즘을 고도화하고, 지능형 분석 기법을 결합하는 과정에서 많은 시행착오를 겪었습니다.

마지막으로, 실제 로봇 제품으로 연결하는 사업화 단계였습니다. 산업 현장에 필요한 품질, 신뢰성, 내구성 기준을 충족하기 위해 수많은 검증 절차와 반복 테스트가 필요했고, 이 과정에서 연구의 방향성을 다시 점검하고 기술을 한 단계 성숙시킬 수 있었습니다.

글 고선아(질문및콘텐츠연구소 대표) 외
기획 한국과학기술기획평가원(김주희 외)

본 원고는 과학기술정보통신부가 선정한 2025 국가연구개발 우수성과 100선 최우수성과에 대한 이해를 돕고자 작성하였습니다.



▲ 함께 성과를 이루어 낸 연구팀의 모습. ETRI