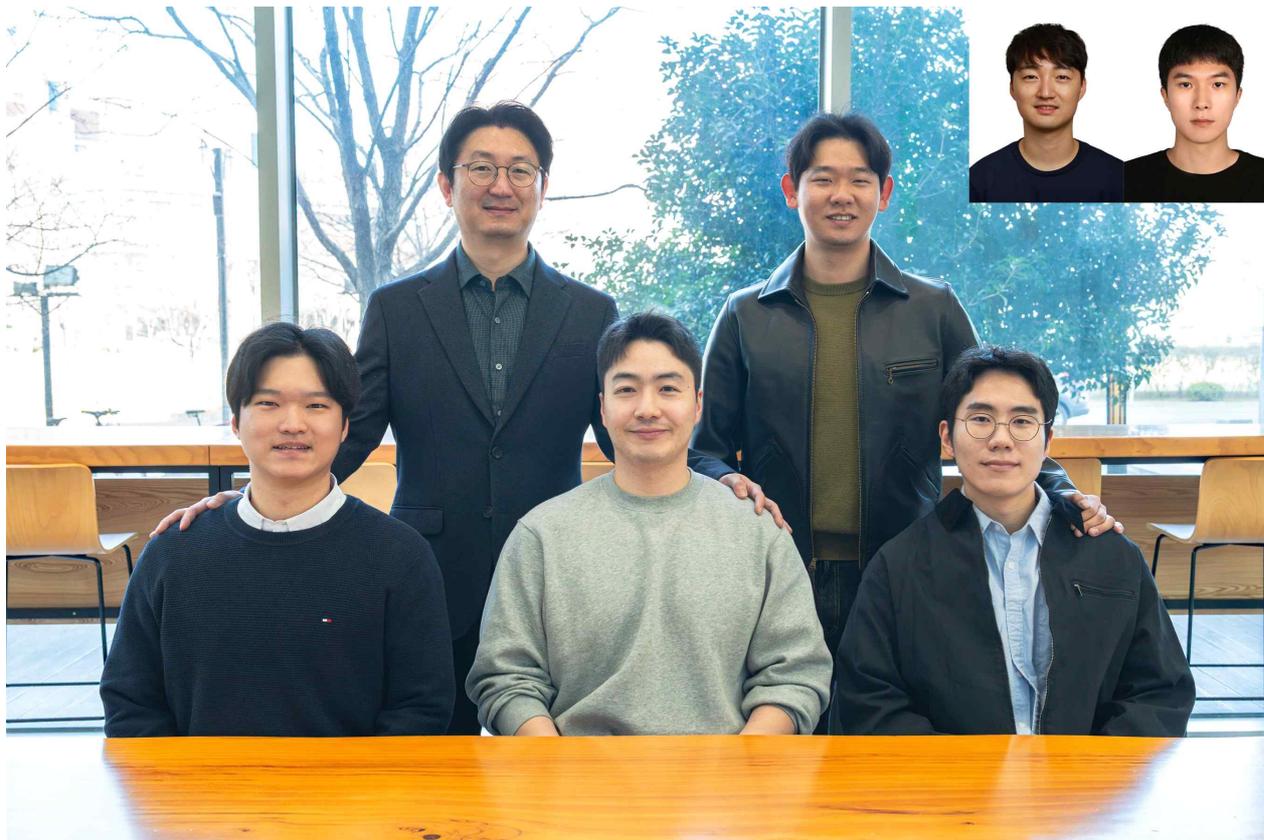


GIST, 사람 손끝의 '힘 감각'까지 배우는 정밀 작업 로봇 AI 기술 개발

- AI융합학과 이규빈 교수팀 손힘 측정 장치(ManipForce)와 센서별 주파수 차이 인식해 힘 감각까지 학습하는 AI 모델(FMT) 개발.. 국제 로봇 학술대회 'ICRA 2026' 발표 예정
- 기어 조립케이블 플러그 연결 등 정밀 조작 작업 성공률 83%.. 제조전자 산업 활용 기대



▲ (왼쪽부터) GIST AI융합학과 이성주 박사, 이규빈 교수, 이건협 박사과정생, 노상준 박사과정생, 김강민 석·박통합과정생, 백승혁 선임연구원(한국기계연구원), 이영진 석사과정생

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 AI융합학과 이규빈 교수(인공지능연구소장) 연구팀이 사람이 물체를 만질 때 느끼는 힘의 감각까지 학습해 정밀한 작업을 수행할 수 있는 인공지능(AI) 기술을 개발했다고 밝혔다.

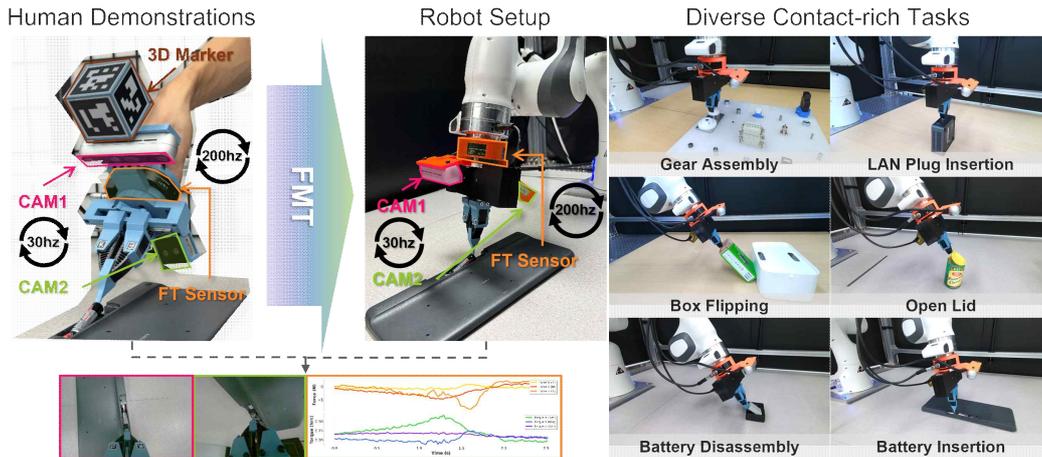
이 기술은 사람이 작업할 때 눈으로 보는 정보뿐 아니라 손끝에서 느끼는 힘과 접촉 감각까지 함께 학습하도록 한 것이 특징이다. 연구팀은 이를 위해 '손힘 측정 장치(ManipForce)'와 '주파수 인식 속도-감각 통합 AI 모델(Frequency-Aware Multimodal Transformer, FMT)'을 함께 개발했다.

제조·전자·자동차 산업에서는 로봇이 기어를 끼우거나 플러그를 연결하고, 배터리를 교체하는 등 사람의 손작업을 대신하는 정밀 조작 작업을 수행한다.

이러한 작업은 단순히 위치를 맞추는 것뿐 아니라 부품이 맞물리는 순간의 미세한 저항이나 힘의 변화를 감지하고 조절하는 능력이 필요하다.

그러나 기존 로봇 학습 방식은 대부분 카메라 영상(RGB)만으로 작업 데이터를 수집하는 모방 학습(Imitation Learning)* 방식을 사용해 왔다. 이 때문에 눈으로 보이는 정보만으로 판단해야 해 부품을 끼우거나 맞추는 순간 발생하는 미세한 저항과 순간적인 힘 변화를 파악하기 어렵다는 한계가 있었다.

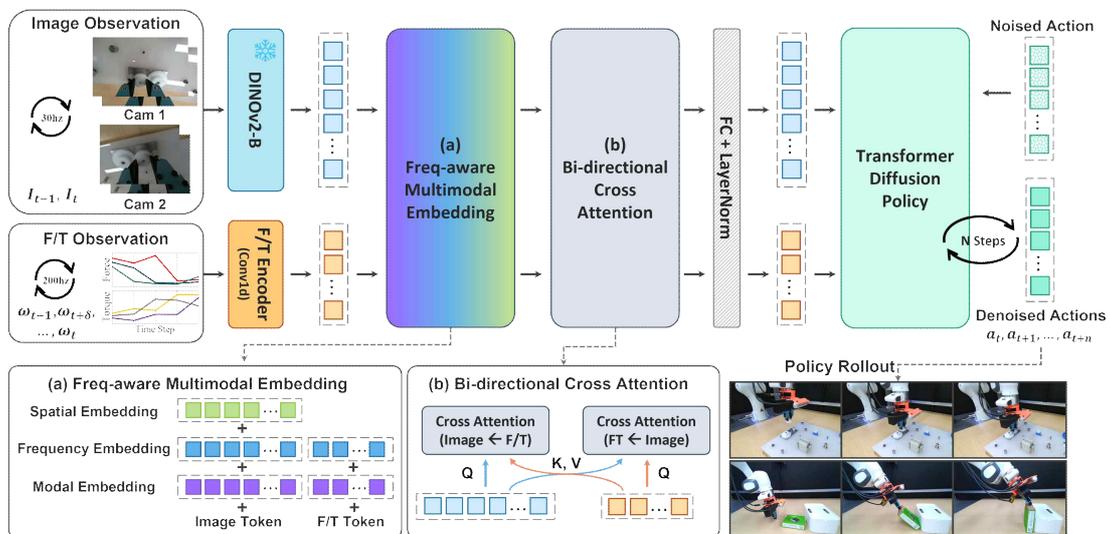
* 모방 학습(Imitation Learning): 사람이 직접 수행한 동작을 데이터로 기록해, 로봇이 이를 따라하도록 학습시키는 인공지능 기법이다. 로봇에게 일일이 규칙을 프로그래밍하는 대신, 사람의 행동을 보고 따라하도록 학습시킨다.



▲ 손힘 측정 장치(ManipForce) 시스템 구성도. 사람이 직접 물체를 다루는 동안 손의 움직임, 힘, 작업 영상을 동시에 기록하는 장치이다. 장치는 ▲ 두 대의 RGB 카메라 ▲ 손목에 착용한 힘·토크 센서(F/T) ▲ 3D 마커로 손 위치를 추적하는 모듈 ▲ 물체를 잡고 조작하는 로봇 손 장치로 구성되어 있다.

연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해 사람이 작업 과정에서 자연스럽게 느끼는 '힘의 감각'까지 로봇 학습에 활용하는 방법에 주목했다.

연구팀이 개발한 '손힘 측정 장치(ManipForce)'는 사람이 직접 손으로 작업하는 모습을 그대로 기록하면서 ▲ 두 대의 카메라로 촬영한 작업 영상 ▲ 손목에 달린 센서로 측정된 힘과 회전력(Force-Torque) ▲ 손의 움직임과 위치 정보 등을 동시에 수집한다.



▲ FMT(Frequency-Aware Multimodal Transformer) AI 모델 구조.

AI는 1초에 30번 촬영되는 RGB 카메라 영상과 200번 이상 기록되는 힘 데이터를 각각 이해한 뒤, 서로 참고하며 학습한다. 이렇게 학습된 AI는 로봇이 보고 느끼면서 힘을 조절해 정확하게 작업하도록 돕는다.

특히 영상은 초당 30회, 힘 정보는 초당 200회 이상 측정해 눈에 보이는 장면뿐 아니라 **손끝에서 발생하는 미세한 힘까지 정밀하게 기록할 수 있다.**

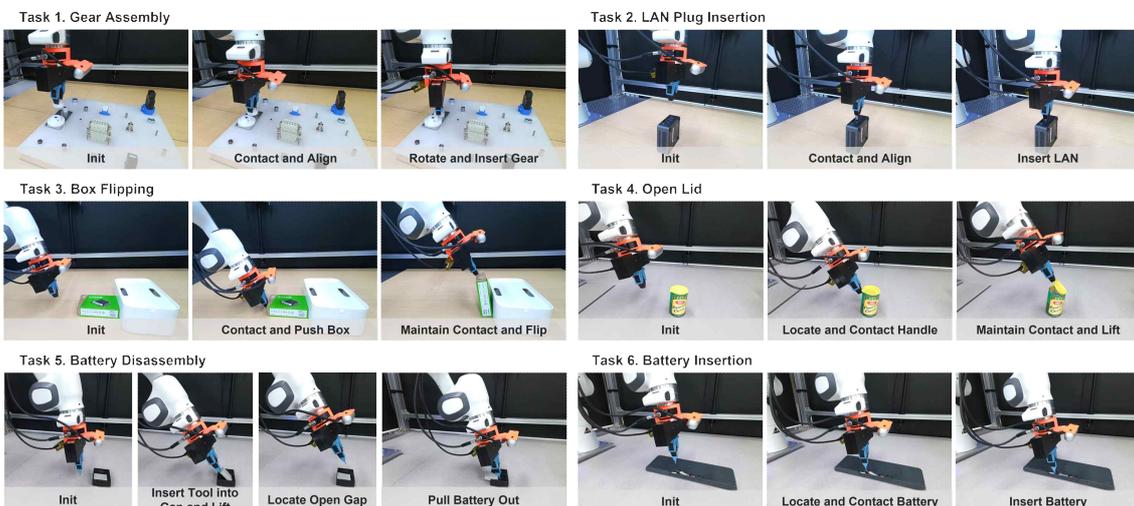
또한 물체와 손의 위치를 정확히 추적하는 '3D 마커'와 장치 자체 무게로 인한 힘을 제거하는 '장치 중력 보상 기능'을 적용해 **실제 접촉에서 발생한 힘만을 정밀하게 측정하도록 설계됐다.**

이 장치는 로봇을 원격으로 조작하는 방식이 아니라 **사람이 직접 손으로 물체를 조작하는 자연스러운 동작을 그대로 기록할 수 있다**는 점에서도 기존 데이터 수집 방식과 차별화된다.

연구팀은 영상과 힘 데이터의 기록 속도가 서로 다르다는 문제를 해결하기 위해 '주파수 인식 속도-감각 통합 AI 모델(Frequency-Aware Multimodal Transformer, FMT)'도 함께 개발했다.

영상은 초당 30회, 힘 데이터는 초당 200회 이상 측정되기 때문에 두 데이터의 시간 간격이 서로 다르다. FMT는 이러한 서로 다른 센서 주파수의 데이터를 각각 분석한 뒤 **비교·통합해 학습하는 AI 모델**이다.

이를 통해 로봇은 물체의 위치와 접촉 상황을 동시에 이해하고 접촉이 많은 정밀 조작 작업에서도 더 안정적인 동작을 수행할 수 있다.



▲ **실제 작업 성공률 비교도.** FMT를 적용한 로봇은 기어 조립, 배터리 삽입 등 6가지 접촉 작업에서 평균 83%의 성공률을 달성했다. 이는 영상 정보만 사용한 기존 방식(약 20%)보다 훨씬 높은 수치이다.

연구팀은 ▲기어 조립 ▲박스 뒤집기 ▲배터리 삽입 ▲인터넷 케이블 플러그 연결 ▲뚜껑 열기 ▲배터리 분리 등 6가지 작업을 실제 로봇 실험으로 검증했다.

각 작업을 20회씩 수행한 결과, 평균 성공률은 약 83%를 기록했다. 이는 RGB 카메라* 영상만 활용한 기존 방식(약 20% 수준)보다 크게 향상된 성능이다.

* RGB 카메라: 빨강(Red), 초록(Green), 파랑(Blue) 빛의 강도를 각각 기록해 사람의 눈처럼 색상을 인식하는 카메라이다. 촬영한 영상에서 사물의 색과 모양을 구분해 로봇이 무엇을 보고 있는지 이해하는 데 활용된다. 기존 로봇 학습 방식에서는 이런 영상 정보만으로 데이터를 수집했다.

이규빈 교수는 "이번 연구는 카메라 영상에만 의존하던 기존 로봇 학습 방식의 한계를 극복하고, 힘 감각 데이터를 효과적으로 활용할 수 있는 새로운 AI 학습 프레임워크를 제시한 것"이라며, "향후 제조 현장의 부품 조립이나 커넥터 체결뿐만 아니라 가정 환경에서의 배터리 교체나 전자기기 부품 조립 등 섬세한 힘 제어가 필요한 다양한 분야에서 로봇 활용을 한 단계 도약시킬 수 있을 것으로 기대한다"고 말했다.

GIST AI융합학과 이규빈 교수가 지도하고 AI융합학과 이건협 박사과정생 등이 수행한 이번 연구는 산업통상자원부·한국연구재단 로봇산업기술개발사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제 학술 서버 'arXiv'에 2025년 9월 23일 사전 공개됐으며, 로봇공학 분야의 권위 있는 학술대회 《IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA 2026)》에서 발표될 예정이다. ICRA 2026은 오는 6월 1일부터 5일까지 오스트리아 빈에서 개최된다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화실(hgmoon@gist.ac.kr)을 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 학회명: ICRA 2026(IEEE International Conference on Robotics and Automation)
- 논문명: ManipForce: Force-Guided Policy Learning with Frequency-Aware Representation for Contact-Rich Manipulation
- 저자 정보: 이건협(제1저자, GIST AI융합학과 박사과정), 이영진(GIST AI융합학과 석사과정), 김강민(GIST AI융합학과 석·박사통합과정), 이성주(GIST AI융합학과 박사), 노상준(GIST AI융합학과 박사과정), 백승혁(한국기계연구

원 선임연구원), 이규빈(교신저자, GIST AI융합학과 교수, 인공지능연구소
장)