전자통신동향분석, 41권 6호 2026, 54-65

피지컬 AI 구현을 위한 차세대 촉각 센서 및 인터페이스 기술 동향

Technology Trends in Next-Generation Tactile Sensors and Interfaces for Physical AI

진한빛 (H.B. Jin, hanbit.jin@etri.re.kr) 피지컬AI부품센서연구실 선임연구원/실장
홍찬화 (C.H. Hong, hch@etri.re.kr) 피지컬AI부품센서연구실 선임연구원/기술총괄
주훈표 (H.P. Ju, hunpyo@etri.re.kr) 피지컬AI부품센서연구실 선임연구원
최중락 (J.R. Choi, cjr1992@etri.re.kr) 피지컬AI부품센서연구실 선임연구원
이동영 (D.Y. Lee, east0@etri.re.kr) 피지컬AI부품센서연구실 선임연구원
김윤정 (Y.J. Kim, kim.yj@etri.re.kr) 피지컬AI부품센서연구실 선임연구원

ABSTRACT

Physical artificial intelligence (AI) is constrained less by vision than by contact. When a robot grasps an object, its own hand occludes the interface, and the force distribution, friction state, and slip onset remain inaccessible to the cameras. This article reviews next-generation tactile sensors and interfaces for physical AI. We compare transduction principles and vision-based sensors with flexible e-skin arrays, examine real-world reliability and manufacturability, survey emerging layers linking sensors to AI models, and analyze industrial adoption and national research and development programs. Tactile technology has shifted from a device-level problem to a system-level problem spanning reliability, interfaces, data, and standards. Accordingly, we propose directions for domestic research and ecosystem development.

KEYWORDS e-skin, Physical AI, sim-to-real transfer, tactile representation learning, tactile sensor, 다중모달 센싱, 미끄러짐 감지, 촉각 센서, 휴머노이드

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2026.J.410605
* 공동 제1저자 진한빛, 홍찬화, 주훈표, 최중락, 이동영, 김윤정
* This work was supported by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea, through the Korea Innovation Foundation (Innopolis) under Project No. RS-2025-02313244 (Development of Real-Time Inventory Management Sensor Module for Smart Electronic Shelve).

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2026 한국전자통신연구원

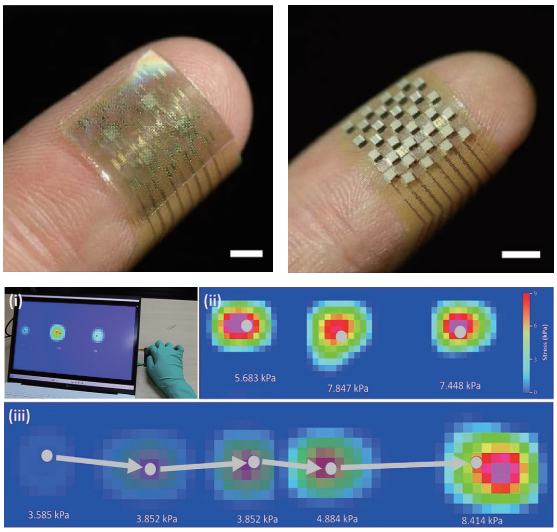
I. 서론: 피지컬 AI 패러다임과 체화된 감각의 필요성

인공지능의 무게중심이 언어 · 이미지 등 디지털 정보의 처리에서 물리세계와 직접 상호작용을 하는 피지컬 AI(Physical AI)로 이동하고 있다. NVIDIA는 CES 2026 기조연설에서 “기계가 실세계를 이해하고 추론하며 행동하기 시작하는, 피지컬 AI의 ChatGPT 모먼트”가 도래했다고 선언하였고[1], Goldman Sachs는 대표 플랫폼인 휴머노이드(Humanoid) 로봇 시장이 2035년 380억 달러 규모에 이를 것으로 전망하였다[2]. 기관별 편차는 크지만 인공지능이 물리적 신체를 얻는 방향으로 투자가 이동하고 있다는 신호라는 점에서는 일치한다.

그러나 현재의 로봇 지능은 압도적으로 시각 중심으로 구축되어 있으며, 이는 물체 조작(Manipulation)의 마지막 단계에서 구조적 한계를 드러낸다. 첫째는 가림(Occlusion)이다. 물체를 쥐는 순간 로봇의 손 자체가 접촉면을 가리므로, 정작 가장 정밀한 제어가 필요한 시점에 시각 정보가 소실된다. 둘째는 접촉 역학 정보의 부재이다. 접촉력의 크기와 분포, 마찰 상태, 미끄러짐(Slip)의 개시 여부처럼 파지 안정성을 결정하는 물리량은 원리적으로 카메라에 비치지 않는다. 인간의 손 무모피부에는 약 17,000개의 기계수용 단위가 분포하며, 손끝 감각을 국소 마취하면 시각이 온전해도 성냥에 불을 붙이는 일상적 조작조차 어려워진다[3]. 정밀 조작 지능은 시각의 연장이 아니라 접촉 부위에서 직접 획득되는 체화된 감각 위에서 성립하며, 그 중심에 촉각 센서가 있다(그림 1).

촉각이 병목으로 부상하는 보다 근본적인 이유는 데이터에 있다. 거대언어모델은 웹에 이미 축적된 텍스트로 탄생했지만, 접촉 데이터는 웹에 존재하지 않고 물리적 상호작용을 통해서만 새로 생성된다. 실로봇 원격조작 기반 수집은 고비용 · 저속이어서 규모 확보가 어렵고, 공개 촉각 데이터의 총량은 언어 · 이미지와 비교할 수 없이 작다(Ⅳ장 참고). Meta가 고해상도 손끝 센서를 데이터 수집 인프라로서 파운데이션 모델과 함께 공개한 데서 보듯[4], 촉각 센서 하드웨어는 단순한 부품이 아니라 학습 데이터가 생성되는 원천 인프라이며, 이 접촉 데이터 병목을 먼저 해소하는 쪽이 후속 모델 경쟁의 주도권을 갖는 구도가 형성되고 있다.

파운데이션 모델과 AI 반도체를 둘러싼 경쟁이 소수 빅테크 중심으로 치열한 반면, 물리세계와의 접점인 감각 하드웨어 계층은 상대적 공백으로 남아 있다. 촉각 센서와 그 인터페이스는 아직 국제 표준이 정해지지 않은 영역으로, 선점하는 쪽이 데이터와 규격의 정의권을 함께 확보하게 된다. 본고는 Ⅱ장에서 센서 기술을 원리별로 분류 · 비교하



출처 (상단) Reprinted from H. Jin et al., “Highly pixelated, untethered tactile interfaces for an ultra-flexible on-skin telehaptic system,” npj Flex. Electron., vol. 6, no. 82, 2022. CC BY 4.0.
(하단) Reprinted from H. Lim et al., “Scalable in-situ fabrication of multimodal electronic skin for intelligent robotics and interactive systems,” npj Flex. Electron., vol. 10, no. 34, 2026. CC BY-NC-ND 4.0.

그림 1 피지컬 AI 구현을 위한 고밀도 촉각 센서 및 인터페이스 예시

고, Ⅲ장에서 실환경 신뢰성과 양산성을, Ⅳ장에서 센서와 AI 모델을 연결하는 인터페이스 기술을, Ⅴ장에서 산업 적용 사례와 각국 R&D 동향을 살펴본 뒤, Ⅵ장에서 제언을 제시한다.

Ⅱ. 피지컬 AI용 차세대 촉각·물리 센서 기술

1. 촉각 센서의 동작 원리와 발전 방향

안정적인 조작을 위해서는 3축 접촉력, 미끄러짐의 발생 시점, 접촉 위치와 면적, 표면 질감에 이르는 다층적 접촉 정보가 실시간으로 요구된다. 로봇의 접촉 감각은 손목 · 관절부의 집중형 6축 힘/토크(F/T: Force/Torque) 센서와 표면에 분포하는 촉각 센서 어레이라는 두 갈래로 발전해 왔으나, 손끝 단위의 정밀 조작이 요구되면서 두 계보는 손가락이라는 좁은 공간에서 결합하는 방향으로 수렴하고 있다. 로봇 손의 소형 구동계는 감속비가 높아 역구동성이 낮으므로 관절 전류로 접촉력을 추정하기 어렵고, 말단에 센서를 직접 내장하는 것이 사실상 유일한 해법이다.

유연 촉각 센서의 전기식 변환 원리는 압저항, 정전용량, 압전, 마찰전기 방식으로 분류된다[5]. 압저항과 정전용량은 정적 하중 측정이 가능하여 파지력 제어의 기본 계층을 담당하며, 특히 정전용량 방식은 전극 패턴 설계로 수직력과 전단력을 분리 측정하는 다축화가 용이하여 로봇 손끝과 전자피부(e-skin) 어레이에 폭넓게 채택되고 있다. 반면 압전과 마찰전기는 하중 변화율에 반응하는 자가발전형 동적 센서로 진동 · 충격 검출에 강점을 보인다. 미끄러짐이 접촉면의 고주파 미세 진동으로 나타나고 인간의 속응형 기계수용기(FA: Fast Adapting)가 이를 포착해 파지력을 반사적으로 조절하므로[3], 정적 힘 분포와 동적 이벤트를 이종 원리로 나누어 감지하는 조합이 인간 피부의 지속형(SA: Slowly Adapting) · 속응형 수용기 구성과 유사한 설계 원형으로 자리 잡고 있다. 자기식은 자화된 탄성체의 변형을 자기장으로 검출하여 변형층과 회로가 분리되고 마모된 표피만 교체할 수 있다는 장점이 있다[6].

주목할 흐름은 리드아웃 회로의 고속화와 함께 정전용량 · 자기식 · 광학식 같은 정적 측정 원리가 동적 대역까지 포괄하기 시작했다는 점이다. 미끄러짐 관련 진동은 수십 Hz에서 1kHz 내외에 분포해 인간 진동 수용기의 민감 대역과 겹치는데[3], 정전용량 방식은 채널을 한정하면 kHz급 샘플링이 가능하고 광학식 · 자기식도 이 영역에 도달하고 있다. 따라서 다축화 · 어레이화 · 리드아웃 집적에 유리한 이들 방식이 주류를 형성할 것으로 전망되며, 광대역 정보가 필요한 재질 인식 등에는 압전 · 마찰전기 소자를 보조 계층으로 병치하는 구성이 모색되고 있다.

2. 비전 기반 촉각 센서와 유연 e-skin 어레이

로봇 손끝 촉각은 비전 기반 촉각 센서와 유연 e-skin 어레이의 두 축으로 재편되고 있다. 비전 기반 방식은 탄성체 접촉면의 변형을 내장 카메라로 촬영해 형상과 힘을 복원하는 것으로, GelSight의 마이크로미터급 형상 재구성 실증 이후 표준적 접근으로 발전하였다[7]. Meta가 2024년 공개한 Digit 360은 손끝 크기에 800만 개 택셀(Taxel) 상당의 전방위 변형 검출, 1mN급 힘 감지, 18종 이상의 센싱 기능을 통합하였으며, 손바닥 전면을 0.1mm급 해상도로 덮는 전면 촉각 로봇 손도 보고되고 있다[4].

그러나 비전 기반 방식은 광학 경로로 인한 두께, 시간 분해능 제약, 곡면 · 대면적 확장의 어려움이라는 구조적 한계가 있어, 손끝 이외의 넓은 영역은

표 1 비전 기반 촉각 센서와 유연 e-skin 어레이의 정량 비교

항목	비전 기반	e-skin 어레이
공간해상도	수십 μm급	수 mm급
시간분해능	수십~수백 Hz	수 kHz까지 가능
두께	수 mm~cm	서브 mm
커버리지	손끝 국소	전신 대면적
곡면 적합성	제한적	우수
다중모달	형상, 힘 중심	이종 센서 집적 용이
부담요소	영상 연산량	배선, 스캔 복잡도

박막형 유연 e-skin 어레이가 담당하는 역할 분담이 뚜렷해지고 있다(표 1). 어느 방식이든 최외곽 탄성체 표피는 감지 매질인 동시에 파지 인터페이스이므로, 표피의 마찰계수와 경도는 센싱 성능과 조작 성능을 함께 좌우하는 설계 변수가 된다.

3. 다중모달 통합

인간의 피부가 압력 · 진동 · 온도를 별개의 수용기로 감지해 통합하듯 피지컬 AI용 촉각 시스템도 다중모달 통합으로 나아가고 있다. 재질 인식에는 접촉 초기의 열전달 특성이, 미끄러짐 예측에는 고주파 진동이, 파지력 제어에는 정적 압력 분포가 각각 필요하므로 다중모달 통합은 조작 지능의 전제 조건이며, 이종 센서를 단일 유연 플랫폼에 통합하고 그 출력을 기계학습으로 융합하려는 시도가 활발하다[8].

이러한 흐름 속에서 ETRI도 UV 레이저 패터닝 기반의 클린룸-프리 인시츄(In-Situ) 공정으로 압력 · 굽힘 · 온도 · 근접 센서를 단일 유연 플랫폼에 일괄 집적하는 전자피부 기술을 개발하였으며, 이를 기반으로 2mm 피치의 고밀도 촉각 피부(피복률 90% 이상), 1,000채널급 정전용량-디지털 변환(CDC: Capacitance-to-Digital Converter) 리드아웃, 500채널급 통합 손가락 모듈 등 로봇 손 적용을 위한 요소 기술을 축적하고 있다. 향후 촉각 센서 기술은 단일 성능 지표의 경쟁을 넘어 소재-소자-리드아웃-학습을 관통하는 시스템 수준의 통합 완성도가 경쟁력을 좌우할 것으로 전망된다.

III. 실환경 신뢰성·양산성 확보 기술

Ⅱ장의 촉각 센서들은 실험실 조건에서 인상적인 감도와 해상도를 보이지만, 로봇이 실제로 놓이는 환경은 그 조건과 상당히 다르다. 온도가 변하고, 로봇 자신이 움직이며, 접촉은 수만 회 반복되고, 같은 설계로 만든 센서라도 개체마다 다른 값을 낸다. 피지컬 AI의 병목이 접촉이라면, 접촉 기술의 병목은 감지 성능 자체보다 그 성능이 실환경에서 얼마나 오래, 얼마나 재현 가능하게 유지되는가에 있다. 이 장이 다루는 고장 · 저하 경로는 대체로 원리를 가리지 않으므로 원리별이 아니라 고장 경로별로 서술하며, 각 절에서 인접 산업의 정량화된 요구 수준을 참조점으로 함께 제시한다.

1. 신호 안정성

첫 번째 원인은 감지층 엘라스토머의 점탄성이다. 힘을 가할 때와 뺄 때 출력이 다른 경로를 그리는 히스테리시스가 생기고, 반복 하중이 쌓이면 영점이 서서히 이동한다. 접촉 여부 판정에는 문제가 아니지만, 접촉력의 크기를 정량 추정해 조작 정책에 입력해야 하는 응용에서는 직접적인 오차원이 된다. 구조 설계로 이를 억제한 사례에서도 히스테리시스 오차는 측정범위 대비 약 6%가 남아, 이 값이 현재의 실용적 하한에 가깝다[9].

두 번째 원인은 온도다. 저항형에서는 감지 소재의 저항 온도계수(TCR: Temperature Coefficient of Resistance)가, 정전용량형에서는 전극 간격과 유전율

의 온도 변화가 드리프트를 만든다[10]. 대응은 소재 · 구조 · 회로의 세 층위에서 이루어지며, TCR이 작은 소재로 저항 변동을 억제하고 3차원 마이크로스트레인 게이지를 직교 배치해 수직력 · 전단력 · 온도를 디커플링 편차 8% 이하로 분리한 뒤 별도 온도 모듈로 잔여 드리프트를 보정한 사례가 보고되었다[9]. 문제는 검증 구간이다. 자동차 전장용 수동 부품은 AEC-Q200이 Grade 1을 −40~125℃로 규정하는 데 비해[11], 유연 촉각 센서가 보고하는 온도 특성은 대개 상온에서 체온에 이르는 좁은 구간에 머물러 산업 등급 체계에 미치지 못한다.

세 번째 원인인 로봇 자신의 운동은 성격이 다르다. 관절 가속과 진동에서 오는 관성 성분은 센서 질량에 실제로 작용하는 힘이라 어느 축으로 들어오든 접촉력과 구별되지 않으므로, 그 제거는 센서 단독으로 완결되지 않고 관절 토크나 관성 측정 장치의 운동 정보와 융합해야 한다.

2. 내구성과 모듈형 패키징

촉각 피부의 수명은 감지 소재가 아니라 서로 다른 층이 만나는 계면에서 결정되는 경우가 많다. 층간 박리, 표면 마모, 전극 균열이 대표적 고장 모드이며, 감도를 높이려 미세 구조와 공기층을 도입할수록 계면 결합 면적이 줄어 감도와 내구성은 설계 단계부터 상충한다. 감지층과 전극층이 같은 고분자 기지를 공유하도록 조성을 준균질하게 맞추고 미세 돌기가 맞물리는 구조를 도입해 390J · m^{-2}의 계면 인성을 확보한 사례는, 10kPa 압력 아래 사포 마찰 시험 10만 회 뒤에도 신호에 뚜렷한 변화가 없었다[12]. 한편, 고충격에 대해서는 인접 산업에 규정된 펄스 파형과 피크 가속도로 기계적 약점을 드러내는 환경시험 체계가 이미 확립되어 있으나, 촉각 센서 문헌은 대체로 자체 프로토콜을 써서 센서 간 비교의 근거가 되지 못한다.

전신을 덮는 규모에서는 목표 자체가 이동한다. 수천 개의 감지점이 로봇 수명 동안 모두 무고장이기를 기대하기 어려우므로, 최근 설계는 고장이 없는 피부가 아니라 고장 난 조각만 빠르게 교체할 수 있는 피부를 지향한다. 자성 계면으로 피부 모듈을 전기적 · 기계적으로 동시에 결합해 손상 부위만 교체하는 뉴로모픽 전자피부가 보고되었으며, 감지점의 펄스가 일정 시간 관측되지 않으면 손상으로 표시하는 자가 보고가 결합되어 유지보수가 이벤트 구동으로 바뀐다[13].

촉각 피부가 만족해야 할 요구 사양은 산업 안전 표준이 제공한다. 협동로봇의 접촉 안전을 규정해 온 ISO/TS 15066:2016은 2025년 발효된 ISO 10218-2:2025에 흡수되었다[14]. 이 표준의 출력 · 힘 제한(PFL: Power and Force Limiting) 방식은 접촉을 금지하는 대신 세기를 제한하는 것으로, 허용 압력과 힘의 한계를 통증 개시 기준으로 29개 신체 부위별로 규정한다. 촉각 피부가 안전 기능을 담당하려면 수백 kPa에서 수 MPa 구간을 유효하게 분해해야 한다는 뜻이며, 앞의 뉴로모픽 전자피부가 통증 세기를 펄스 폭으로 부호화해 세 단계 임계를 구현하고 출력이 일정 수준을 넘으면 피부 계층에서 곧바로 회피 동작을 유발한 것은[13] 이 요구를 상위 제어기를 거치지 않고 감지 계층에서 충족하려는 시도로 볼 수 있다.

3. 양산성과 시험법의 공백

실환경 배치에서 마지막으로 남는 문제는 개별 소자의 성능이 아니라 개체 간 재현성이다. 동일 설계라도 제조 공차와 정렬 차이가 개체마다 다른 출력을 만들며, 이는 채널별 캘리브레이션이라는 공정 비용과 한 센서에서 학습한 모델이 다른 개체로

전이되지 않는 데이터 비용으로 나타난다(후자의 대응은 Ⅳ장에서 다룬다). 양산 가능성은 공정 선택 단계에서 상당 부분 결정되는데, 스크린 인쇄 · 레이저 식각 · 몰딩 사이에는 해상도와 확장성의 상충이 있으며[10], 특히 인쇄 공정은 선폭을 500μm 아래로 낮추기 어려워 어레이 밀도와 신호 누화 양쪽에서 고해상도 압력 매핑을 가로막는다. 감도를 끌어올리는 공정일수록 양산에서 멀어지는 구조다.

산업계가 개체 편차를 다루는 방식은 개별 소자의 정밀 교정이 아니라 로트 단위 스트레스 시험으로 등급을 부여하는 것이다. AEC-Q200은 온도 사이클 · 습도 · 진동 · 충격 시험을 통과한 부품에만 자격을 주어 사용자가 개별 측정 없이도 편차의 상한을 신뢰할 수 있게 한다[11]. 촉각 피부에는 이에 해당하는 등급 체계가 없어 채널별 교정 공수가 양산 비용으로 남는다. 논의는 하나의 공백으로 수렴한다. 요구 수준은 이미 표준으로 존재하고 검증 방법론도 인접 분야에 성숙해 있으나, 그 둘을 촉각 피부라는 대상 위에서 잇는 시험법이 없다. 반복 접촉에 따른 감도 열화나 동일 설계 개체 간 재현성처럼 촉각 피부에 고유한 항목이 어디에서도 다뤄지지 않는 것이 그 결과이며, 이는 조달과 인증이 필요한 산업 적용 단계에서 실질적 장벽이 된다.

Ⅳ. 센서-AI연결: 리드아웃, 촉각 표현 학습과 Sim-to-Real

1. 대규모 촉각 어레이의 리드아웃과 근센서 신호처리

촉각 센서가 e-skin으로 확장되면서 수백에서 수천 채널 어레이의 신호를 실시간으로 읽어내는 리드아웃 기술이 핵심 병목으로 부상하고 있다. 종래에는 센서 어레이와 처리 장치 사이의 물리적 거리 탓에 대량의 원시 데이터를 버스로 전송해야 했고, 이는 전송 지연과 전력 소모를 수반하였다. 이를 극복하기 위해 센서 소자 자체나 그 인접부에서 신호를 처리하는 근센서 컴퓨팅 아키텍처가 연구되고 있으며, 유연 정전용량 센서 어레이가 곱셈-누적 연산을 소자 내에서 수행하는 인센서 촉각 컴퓨팅으로 감지와 연산을 동시에 수행할 수 있음이 제시되었다[15].

자동차 산업에서도 유사한 변화가 진행 중이다. 차량 전장(E/E: Electrical/Electronic) 아키텍처 분야에서는 도메인 기반 구조를 구역(Zonal) 기반으로 재편하여 와이어링 하네스 길이를 30% 이상 줄이고, 센서 · 액추에이터 신호를 하네스 경로에서 분산 처리하려는 움직임이 활발하다[16]. ETRI는 이와 같은 맥락에서 휴머노이드 전신의 센서 · 액추에이터 신호가 경유하는 하네스에 분산 신호처리와 물리 토큰화를 배치하는 '인하네스 컴퓨팅(In-Harness Computing)' 개념을 제안하고 있으며, 이로써 대규모 촉각 어레이의 데이터 전송 부담을 근본적으로 줄이는 방향을 전망하고 있다.

2. 촉각 표현 학습과 데이터 표준화

원시 촉각 신호를 로봇이 활용할 수 있는 고수준 표현으로 변환하는 촉각 표현 학습이 급속히 발전하고 있다. 특히 원시 신호를 트랜스포머가 처리할 수 있는 잠재 토큰으로 변환하는 촉각 토큰화가 핵심 과제로 부상하면서, 촉각 데이터가 시각 · 언어 토큰과 동일한 표현 공간에서 다뤄질 수 있게 되었다. 과업마다 전용 모델과 레이블이 필요하던 방식은 대규모 자기지도 학습의 도입으로 전환되고 있다. Meta의 Sparsh는 46만 장 이상의 촉각 이미지를 마스킹 자기부호화와 자기증류 등으로 사전학습한 자기지도 파운데이션 모델로, 이질적인 센서에서 범용 표현을 생성하며 함께 공개된 벤치마크 6개 과

업에서 종단 간 학습 대비 평균 95.1%의 성능 향상을 달성하였다[17]. 후속 모델 Sparsh-X는 시각 채널을 넘어 오디오 · 모션 · 압력 등 네 가지 촉각 양상을 통합한 다중모달 표현을 학습하여, 촉각 이미지만 사용한 모델 대비 정책 성공률을 63% 향상시켰다[18].

다만, 촉각 센서의 낮은 표준화 수준은 이러한 접근의 확장을 저해한다. 비전 기반 센서만 하더라도 해상도 · 조명 · 젤 특성이 달라 같은 접촉을 다르게 인지하므로 센서별 데이터 수집이 불가피하였고, 이를 극복하려는 통합 데이터셋과 벤치마크가 등장하고 있으나 이들 역시 대부분 특정 센서군을 전제로 한다. Ⅲ장에서 지적한 시험법의 공백은 데이터 · 모델 계층에서도 같은 형태로 나타나며, 하드웨어의 물리적 규격과 평가 프로토콜이 정리되지 않는 한 데이터셋 통합만으로는 교차 활용의 한계를 넘기 어렵다.

3. 촉각 시뮬레이션과 Sim-to-Real 전이

실제 촉각 데이터 수집은 물리적 접촉을 수반하므로 비용과 시간이 크고 센서 마모의 위험도 있다. 이에 시뮬레이션에서 생성한 촉각 데이터를 실환경으로 전이하는 Sim-to-Real 접근이 중요한 연구 축으로 자리 잡았다. TACTO는 비전 기반 촉각 센서의 고해상도 접촉 이미지를 수백 프레임/초로 렌더링하는 오픈소스 시뮬레이터로 촉각 Sim-to-Real 연구의 사실상 표준 도구가 되었으며[19], 최근에는 접촉 · 변형 · 조명 · 촬상의 전 과정을 미분 가능하게 구현해 격차 축소와 최적화를 동시에 지원하는 시뮬레이터도 등장하였다. 그럼에도 촉각 시뮬레이션은 접촉 역학과 젤 변형의 정밀한 모델링이 필요하여 시각 시뮬레이션에 비해 현실 격차가 크며, 생성 모델을 활용한 스타일 전이나 도메인 랜덤화를 결합한 하이브리드 접근이 유력한 방향으로 제시되고 있다.

이상의 리드아웃, 표현 학습, 데이터 표준화, 시뮬레이션은 각각 독립된 흐름이지만 센서 하드웨어의 이질성을 전제로 그 위에서 일반화를 확보하려 한다는 점에서 하나의 계층을 이룬다. Ⅲ장에서 지적한 개체 간 편차와 시험법의 공백이 이 계층에서도 반복된다는 사실은, 데이터와 모델의 규격이 하드웨어 규격보다 먼저 사실상의 표준으로 굳어질 가능성을 시사한다.

V. 산업 적용 사례 및 글로벌 R&D 동향

1. 휴머노이드 핸드의 촉각 센싱 전략

휴머노이드 경쟁의 승부처가 이동 · 보행에서 손끝의 물체 조작으로 옮겨가고 있다. 보행과 시각 인지가 상향 평준화되면서 실제 활용도를 가르는 요소는 조작 신뢰성이며, 그 핵심에 손끝의 접촉력 · 미끄러짐 피드백이 있다. 이 절에서는 주요 기업이 손끝 촉각을 어떻게 확보하고 있는지를 전략 관점에서 정리한다(원리별 성능 비교는 Ⅱ장 참고). 이하의 수치는 각 사의 공식 발표 · 시연 또는 특허 문헌에 근거한 것으로 동료심사를 거친 값이 아니다.

테슬라 옵티머스는 촉각 하드웨어를 자체 설계 · 수직계열화한다. 2023년 12월 공개된 2세대는 11자유도(DOF: Degrees of Freedom) 손에 전 손가락 촉각 센싱을 적용해 생달걀을 깨뜨리지 않고 옮기는 힘 조절을 시연했다[20]. 이후 공개된 손 특허들은 액추에이터를 전완부로 옮기고 케이블로 손가락을 원격 구동하는 힘줄 구동 구조를 향하는데, 손끝의 구동 부품을 덜어내는 이 방향은 손가락 내부에 센서를 배치할 여유와도 맞물린다. 피겨는 손끝 촉각과 손바닥 시각을 융합하는 전략을 명시한다. 2025년

10월 공개된 Figure 03은 시판 센서의 실환경 내구성이 부족하다고 판단해 자체 1세대 촉각 센서를 내재화했으며, 발표에 따르면 손끝 센서는 3g 수준의 힘까지 감지하고 손바닥 카메라로 주 카메라가 가려진 상황에서도 근접 시각 피드백을 확보해 미끄러짐 임박 상태를 사전에 구분한다[21].

보스턴 다이내믹스는 대비되는 실용주의 노선을 택한다. 2024년 공개된 전동식 아틀라스의 손은 손가락 2개와 대향 엄지로 구성된 3지 그리퍼로 7자유도의 자기완결형 모듈이며, 손끝에 고마찰 엘라스토머와 촉각 센서를, 손바닥에 카메라를 두어 최소 파지력으로 안정적 파지를 유지한다. 회사는 '충분히 좋은' 원칙을 내세워 정밀성보다 견고성 · 양산성을 우선하는 전략을 분명히 했다[22].

한편 촉각 센서 전문기업은 로봇 · 완성차 제조사가 조달할 수 있는 부품 · 지식재산 공급 축을 형성하고 있다. 젤사이트는 비전 기반 촉각 센서를 상용화한 대표 기업으로 2021년부터 메타 AI와 협력해 왔고 2024년 Digit 360을 공동 공개하였는데, 이는 고품질 접촉 데이터를 확보하려는 AI 기업과 센서 상용화 역량을 가진 부품 기업이 결합한 사례다. 센소브라이트는 비전 기반 촉각 센싱 기술을 다수 특허로 보유하고 로봇 그리퍼 등으로 라이선싱하는 지식재산 중심 전략을 취한다[23]. 국내에서는 에이딘로보틱스가 정전용량 방식의 초소형 6축 F/T 센서를 레인보우로보틱스 라인업에 공급해 왔고 RB-Y1의 양쪽 손목에도 탑재되어 있으며, 2026년 4월 국내 1호 대리점 계약으로 협력이 유통까지 확대되었다[24]. 결과적으로 시장은 촉각을 수직계열화하는 축과 전문기업의 센서 · 지식재산을 조달하는 축으로 이원화되고 있다(표 2). 다만, 국내는 아직 초기 단계로, 손목 단위의 힘 계측을 넘어 손끝 촉각의 양산 검증 · 표준화에서 격차 해소가 과제로 남아 있다.

표 2 주요 휴머노이드 기업의 손 촉각 센싱 전략 비교

기업 (로봇)	손 구조·자유도	촉각·힘 센싱 방식	전략 포인트
테슬라 (Optimus)	5지 인간형, 11 DOF (Gen 2)	전 손가락 촉각 센싱 (자체 설계)	촉각 수직계열화, 힘줄 구동 특허
피겨 (Figure 03)	5지 인간형, 미공개	손끝 촉각 센서 (3g급 발표) + 손바닥 카메라	촉각+시각 융합, 미끄러짐 사전 감지
보스턴 다이내믹스 (Atlas)	3지 그리퍼, 7 DOF	고마찰 엘라스토머 내장 촉각 + 손바닥 카메라	'충분히 좋은' 실용주의, 양산성
젤사이트 (Digit 360)	부품 (핑거팁)	비전 기반 (사양은 II장)	부품·데이터 공급, Meta와 협업
레인보우 +에이딘 (RB-Y1)	양팔 그리퍼	정전용량식 6축 F/T (손목 탑재)	국내 플랫폼-센서 협업 생태계

2. 촉각 센싱의 적용 도메인

2026년 3월 중국 공업정보화부(MIIT)가 휴머노이드 국가 표준체계를 공개한 자리에서는 "사람은 잘 수행하지만 기존 자동화가 어려워하는 작업의 약 80%가 촉각 감지와 밀접하게 관련되어 있다"라는 업계 진단이 제시되었다[25]. 산업 수요는 시각 정보만으로 제어 루프가 닫히지 않는 공정에서 세 갈래로 구체화되고 있다.

첫째는 삽입 공정이다. 커넥터 체결이나 축-구멍 결합에서 비전 기반 자세 추정은 부품이 그리퍼에 가려지는 순간 정보를 잃고, 접촉 이후의 상대 자세는 원리적으로 접촉면에서만 관측된다. 항공용 다중 핀 커넥터 조립 연구는 시각과 촉각 스트림을 대조 학습으로 결합해 6자유도 상대 위치를 식별함으로써, 힘 신호만으로는 편차 방향을 판별하기 어려운 조건에서 접촉 형상 정보가 유효함을 보였다[26]. 다만 요구 사양이 부품마다 달라 도입이 라인

단위로 분절되고, 채택은 감지 성능보다 사이클 타임과 센서 단가에 좌우된다.

둘째는 유연물체 핸들링이다. 변형 선형 물체(DLO: Deformable Linear Objects), 직물, 식품은 파지 중에도 형상이 변하고 파지력이 조금만 과해도 손상된다. 다섯 손가락에 신축성 광섬유 기반 촉각 · 곡률 센서를 내장한 소프트 그리퍼가 대상물의 형상 · 강성 · 숙도와 미끄러짐을 파지 과정에서 함께 판별하며 딸기를 손상 없이 수확한 사례가 보고되었다[27]. 물류 피킹이나 식품 포장에서 성과 지표가 "집었는가"에서 "손상 없이 집었는가"로 이동하고 있으며, 촉각 정보는 이를 파지 시점에 직접 측정해 검사 공정을 겸할 수 있다.

셋째는 인간-로봇 안전 협업으로, 앞의 둘과 성격이 다르다. Ⅲ장에서 살펴본 대로 협동 운전의 안전 요구사항은 ISO 10218-2 개정판으로 일원화되었고, PFL이 요구하는 신체 부위별 접촉력 · 압력 한계도 그 안에서 규정되므로, 접촉을 측정하거나 사전에 회피할 수단이 안전 요구사항 충족의 전제가 된다. 즉, 도입 근거가 개별 기업의 투자 판단이 아니라 표준 준수 여부에 놓인다. 이 도메인이 대량 채택 경로로 지목되는 근거는 세 가지다. 수요가 규격에서 발생하므로 개정 표준을 따르는 모든 협동 응용이 잠재 수요가 되고, 안전 펜스 제거와 작업 속도 회복의 이득이 도입 비용과 직접 비교 가능하며, 안전 스킨은 공정과 무관하게 로봇 외피라는 동일 부위에 적용되므로 단일 사양을 로봇 대수 기준으로 확산시킬 수 있다. 기술적 필요성이 가장 뚜렷한 곳은 삽입 공정이지만, 대량 채택에 가장 먼저 도달할 경로는 인간-로봇 안전 협업으로 평가된다.

3. 주요국 정부 R&D 프로그램

촉각 센서만을 단독 대상으로 하는 국가 프로그램은 많지 않고, 피지컬 AI와 휴머노이드를 겨냥한 국가 전략의 하위 구성요소로 편입되는 것이 공통적이다. 다만, 편입 방식은 갈린다. 미국은 국가 로봇 전략을 아직 보유하고 있지 않으며[28], 촉각은 국립표준기술연구소(NIST)의 파지 · 조작 성능 시험 영역에 포함되어 평가 · 표준 인프라를 통해 다루어진다. 반면 중국은 표준 선점에 무게를 두어, 2026년 3월 공개한 국가 표준체계에서 촉각 센서를 부품 계층의 병목 기술로 명시하였다[25]. 인터페이스 규약과 시험법을 먼저 확정해 부품 사양의 주도권을 쥐려는 접근이다. 유럽연합은 Horizon Europe을 통해 개별 소자보다 공통 플랫폼과 벤치마크에 재원을 배치하며, 일본은 문샷형 연구개발제도에서 전신 촉각 지능과 e-skin 통합 로봇 손을 독립 과제로 편성해 촉각을 명시적 연구 축으로 설정한 드문 사례에 해당한다.

국내에서는 제4차 지능형로봇 기본계획(2024~2028)이 수립되고, 2025년 4월 K-휴머노이드 연합이 출범한 데 이어, 2026년 6월 관계부처 합동으로 「제조AI 2030 전략」이 발표되어 2030년까지 민관 합산 20조 원을 투자하고 제조 특화 휴머노이드 상용화를 위한 핵심부품 개발과 실증을 확대한다는 계획이 제시되었다[29]. 다만, 이 전략에서 휴머노이드 관련 서술은 "핵심부품 개발"로 묶여 있을 뿐 접촉 계층의 개별 기술이 지목되지는 않는다. 국가 제조 데이터 관리체계와 제조 특화 AI 모델이 전략의 축으로 구체화된 것과 견주면, 접촉 계층 하드웨어의 위치가 덜 명시되어 있다는 점은 각국의 표준 · 과제 설계와 대비되는 지점이다.

Ⅵ. 결론 및 제언

본고는 피지컬 AI의 병목이 시각이 아니라 접촉에 있다는 문제의식에서 출발하여 차세대 촉각 센

서 및 인터페이스 기술의 동향을 살펴보았다. 촉각 센서는 원리별로 성능 지표의 장단이 뚜렷하여 단일 방식의 승자가 정해지지 않았고, 실험실 성능과 실환경 신뢰성 사이의 간극이 상용화의 실질적 관문으로 남아 있다. 리드아웃과 촉각 표현 학습, Sim-to-Real 전이는 센서와 AI 모델을 잇는 새로운 기술 계층으로 형성되고 있으며, 시장은 촉각을 자체 설계로 내재화하는 축과 전문기업의 센서 · 지식재산을 조달하는 축으로 이원화되고 있다. 주요국 정부는 촉각을 독립 기술 항목이라기보다 피지컬 AI 전략의 하위 구성요소로 다루되, 표준 · 평가 인프라와 산업 생태계 육성 가운데 어디에 무게를 두는지가 갈린다. 종합하면 촉각 기술은 소자 성능의 문제를 넘어 신뢰성 · 인터페이스 · 데이터 · 표준이 얽힌 시스템 계층의 문제로 이행하고 있으며, 기술의 문법이 아직 확정되지 않은 지금이 국내 연구개발이 진입할 수 있는 시기이다. 이에 다음 네 가지를 제언한다.

첫째, 소재-소자-제어-AI를 관통하는 공동설계(Co-Design) 체계가 필요하다. 촉각 성능은 센서 단품의 민감도만으로 결정되지 않으며, 센서 출력 범위와 리드아웃 반도체의 입력 범위, 곡면 위 배선 · 패키징의 기계적 제약, AI 모델이 요구하는 신호 표현까지 동시에 정합되어야 시스템 성능으로 귀결된다. 소재 · 소자 연구와 회로 · AI 연구가 분리된 현행 구조를 넘어서는 전환이 요구된다.

둘째, 인터페이스 규격과 신뢰성 시험법의 표준화에 공공 부문이 나서야 한다. 촉각 센서 어레이의 전기적 인터페이스와 내구성 평가 방법에는 아직 국제표준이 없으며, 시험법을 정의하는 쪽이 기술의 기준점이 된다는 점에서 이는 공공 연구기관의 역할이다. ETRI는 IEC에서 유연 · 인장 전자회로의 신뢰성 평가 표준화 활동을 수행해 왔으며, 그 연장선에서 촉각 센서 인터페이스와 조작 감각 데이터의 표준 제안으로 확장하는 것이 국내가 정의권을 확보할 현실적 경로이다.

셋째, 공개 촉각 데이터셋과 벤치마크의 구축이 필요하다. 접촉 데이터 병목은 개별 연구실 단위로 해소되지 않으며, 해외에서는 촉각 하드웨어와 데이터셋을 묶어 공개하는 선점 전략이 이미 시작되었다. 국내 생태계가 해외 데이터에 종속되지 않으려면 센서와 데이터 규격 · 벤치마크를 함께 설계하는 국가 차원의 투자가 뒤따라야 한다.

넷째, 공통 규격에 기반한 국내 센서 생태계 육성이 필요하다. 촉각 센서는 소재부터 리드아웃 반도체, 모듈 패키징, 로봇 시스템에 이르는 다층 공급망을 요구하지만, 국내에는 이들을 잇는 공통 규격과 모듈 경계가 부재하여 개별 기업이 전 계층을 감당해야 한다. 공공 부문이 개방형 레퍼런스 규격과 인증 테스트베드를 제공해 소재 · 부품 중소기업이 호환 가능한 모듈 단위로 참여하게 하는 것이, 완제품 로봇 경쟁과 구별되는 국내 생태계의 진입 전략이 될 수 있다.

피지컬 AI 경쟁에서 촉각은 아직 승부가 나지 않은 마지막 감각이다. 센서의 문법과 인터페이스의 표준이 정해지기 전인 향후 2~3년이 국내 연구개발이 부품 공급자를 넘어 기준 설정자로 자리 잡을 수 있는 시간이다.

용어해설

피지컬 AI(Physical AI) 물리 법칙에 대한 이해를 바탕으로 실세계에서 지각·추론·행동을 수행하는 인공지능. 언어·이미지 등 디지털 정보 처리 중심의 기존 AI와 대비되는 개념으로, 휴머노이드 로봇·자율주행 등이 대표 응용 사례

택셀(Taxel) 촉각(Tactile)과 화소(Pixel)의 합성어로, 촉각 센서 어레이에서 공간적으로 구분되는 최소 감지 단위. 카메라의 화소 수가 이미지 해상도를 결정하듯 택셀 수와 피치가 촉각 공간해상도를 결정함

출력·힘 제한(PFL: Power and Force Limiting) 협동 로봇 안전 방식의 하나로, 사람과 로봇의 접촉을 원천 차단하는 대신 접촉이 발생하더라도 신체 부위별로 허용된 힘과 압력 한계를 넘지 않도록 로봇의 출력을 제한하는 방식. 접촉 자체를 허용하므로 접촉력을 측정하거나 사전에 감지하는 센서가 요구됨

참고문헌

[1] B. Caulfield, "NVIDIA Rubin Platform, Open Models, Autonomous Driving: NVIDIA Presents Blueprint for the Future at CES," NVIDIA Blog, 2026. 1. 5. https://blogs.nvidia.com/blog/2026-ces-special-presentation/

[2] Goldman Sachs, "The Global Market for Humanoid Robots Could Reach $38 Billion by 2035," Goldman Sachs Insights, 2024. 2. 27. https://www.goldmansachs.com/insights/articles/the-global-market-for-robots-could-reach-38-billion-by-2035

[3] R.S. Johansson and J.R. Flanagan, "Coding and Use of Tactile Signals from the Fingertips in Object Manipulation Tasks," Nat. Rev. Neurosci., vol. 10, no. 5, 2009, pp. 345-359.

[4] Meta AI, "Advancing Embodied AI Through Progress in Touch Perception, Dexterity, and Human-Robot Interaction," Meta AI Blog, 2024. 10. 31. https://ai.meta.com/blog/fair-robotics-open-source/

[5] F. Liu et al., "Neuro-Inspired Electronic Skin for Robots," Sci. Robot., vol. 7, no. 67, 2022.

[6] Y. Yan et al., "Soft Magnetic Skin for Super-Resolution Tactile Sensing with Force Self-Decoupling," Sci. Robot., vol. 6, no. 51, 2021.

[7] W. Yuan et al., "GelSight: High-Resolution Robot Tactile Sensors for Estimating Geometry and Force," Sensors, vol. 17, no. 12, 2017.

[8] B. Shih et al., "Electronic Skins and Machine Learning for Intelligent Soft Robots," Sci. Robot., vol. 5, no. 41, 2020.

[9] C. Xu et al., "Three-Dimensional Micro Strain Gauges as Flexible, Modular Tactile Sensors for Versatile Integration with Micro- and Macroelectronics," Sci. Adv., vol. 10, no. 34, 2024.

[10] X. Zhang et al., "Design, Fabrication, and Application of Large-Area Flexible Pressure and Strain Sensor Arrays: A Review," Micromachines, vol. 16, no. 3, 2025.

[11] Automotive Electronics Council, "Stress Test Qualification for Passive Components," AEC-Q200 Rev. D, June 2010. http://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q200_Rev_D_Base_Document.pdf

[12] Y. Zhang et al., "Highly Stable Flexible Pressure Sensors with a Quasi-Homogeneous Composition and Interlinked Interfaces," Nat. Commun., vol. 13, 2022.

[13] Y. Gao et al., "A Neuromorphic Robotic Electronic Skin with Active Pain and Injury Perception," Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., vol. 122, no. 52, 2025.

[14] International Organization for Standardization, "Robotics - Safety Requirements - Part 2: Industrial Robot Applications and Robot Cells," ISO 10218-2:2025, 2nd ed., 2025.

[15] Y. Chen et al., "Capacitive In-Sensor Tactile Computing," Nat. Commun., vol. 16, 2025.

[16] C. Park et al., "Analysis of E2E Delay and Wiring Harness in In-Vehicle Network with Zonal Architecture," Sensors, vol. 24, no. 10, 2024.

[17] C. Higuera et al., "Sparsh: Self-Supervised Touch Representations for Vision-based Tactile Sensing," in Proc. 8th Conf. Robot Learn. (CoRL), (Munich, Germany), 2025, pp. 885-915.

[18] C. Higuera et al., "Tactile beyond Pixels: Multisensory Touch Representations for Robot Manipulation," arXiv preprint, 2025, doi: 10.48550/arXiv.2506.14754

[19] S. Wang et al., "TACTO: A Fast, Flexible, and Open-Source Simulator for High-Resolution Vision-based Tactile Sensors," IEEE Robot. Autom. Lett., vol. 7, no. 2, 2022, pp. 3930-3937.

[20] E. Demaitre, "Tesla Demonstrates Optimus Gen 2 Dexterity, Recalls 2M Vehicles," The Robot Report, 2023. 12. 13. https://www.therobotreport.com/tesla-demonstrates-optimus-gen-2-dexterity-recalls-2m-vehicles/

[21] Figure AI, "Introducing Figure 03," 2025. 10. 9. https://www.figure.ai/news/introducing-figure-03

[22] P.A., "Boston Dynamics Details Its 'good enough' Approach to Humanoid Hands," Humanoids Daily, 2025. 10. 8. https://www.humanoidsdaily.com/news/boston-dynamics-details-its-good-enough-approach-to-humanoid-hands

[23] Sensobright Industries, "Robotics," 공식 웹사이트. https://sensobright.com/index.php/robotics/ [Accessed Aug. 2026]

[24] 박경일, "에이딘로보틱스, 레인보우로보틱스 휴머노이드 'RB-Y1' 1호 대리점 계약," 로봇신문, 2026. 4. 16. https://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=45889

[25] Xinhua, "China's First National Standard System for Humanoid Robotics Poised to Spur Industry Development," Xinhua News, 2026. 3. 3. https://english.news.cn/20260303/0e51ac8f66c542c5bacf2af3f80b3a40/c.html

[26] J. Chen et al., "Haptic-Vision Fusion for Accurate Position Identification in Robotic Multiple Peg-in-Hole Assembly," Electronics, vol. 14, no. 11, 2025.

[27] A.K. Mishra et al., "Sensor Fusion of Touch and Vision in Soft Manipulators for Fruit Picking," Nat. Commun., vol. 17, 2026.

[28] U.S. House Committee on Science, Space, and Technology, "Hearing Charter: Robots Made in America - Advancing

U.S. Leadership in Manufacturing and Automation," Subcommittee on Research and Technology, 2026. 4. 21. https://www.congress.gov/119/meeting/house/119190/documents/HHRG-119-SY15-20260421-SD003.pdf

[29] 산업통상부 외, "(참고자료) 인공지능이 이끄는 제조업의 대전환, 2030년 청사진 나왔다," 관계부처 합동 보도참고자료, 2026. 6. 29. https://www.motir.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/171975/view