휴머노이드 로봇 기술 진화와 핵심 기술 동향[1)]

1 휴머노이드 로봇 개념 및 부상 배경

휴머노이드 로봇의 개념

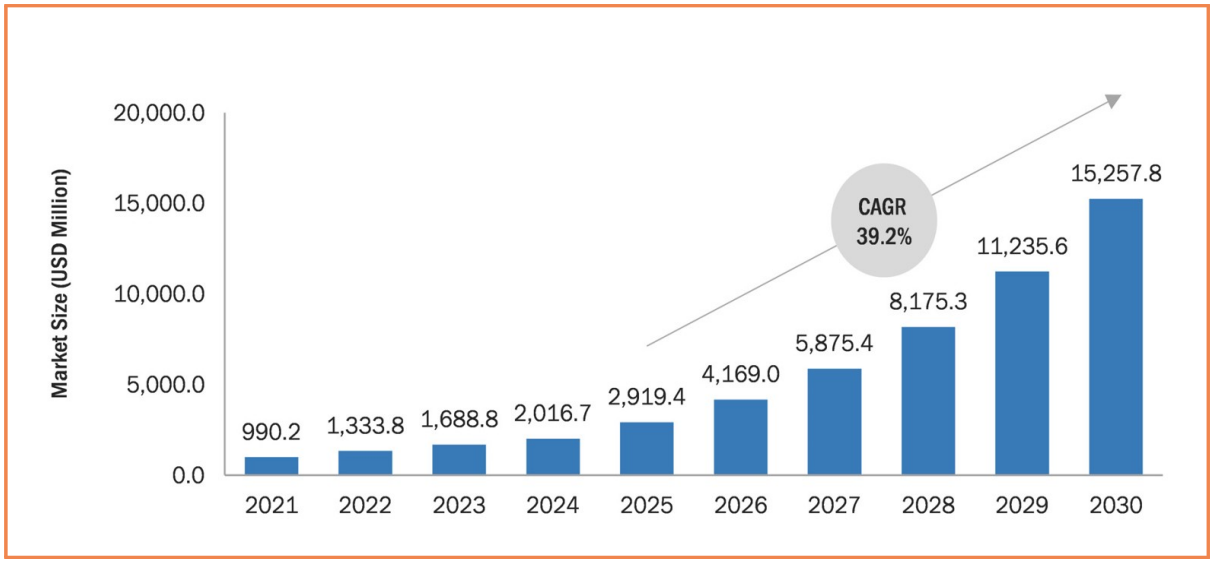
- 휴머노이드 로봇에 대한 정의는 기술 발전에 따라 다양한 방식으로 정의되어 왔으나, 현재는 '이족보행'과 상호작용 기반 자율작업이 가능한 '범용성'을 주 특징으로 인간의 신체적 형태와 동작을 모방한 로봇으로 정의
  - 인간과 유사한 신체 구조를 갖춰, 인간 환경에서 작업 수행이 가능한 범용 지능형 로봇을 의미
    ※ IEEE에서는 인간 환경에서 자율 이동과 물체 조작, 인간과의 상호작용이 가능한 물리적 지능 시스템으로 규정
    ※ LG 경영연구원은 휴머노이드 로봇을 인간의 신체적 특징을 닮은 외형을 지녔으면서 인간과 유사한 동작을 취할 수 있는 로봇으로 제시
    ※ ETRI 보고서에서는 휴머노이드 로봇의 정의를 인간의 신체적 형태와 동작을 모방한 로봇이면서, 이족보행과 범용성을 특성으로 제시
- 기존 산업용 로봇은 특정 작업에 최적화된 고정형 장비인 반면, 휴머노이드는 인간과 동일한 작업 환경에서 협업을 수행할 수 있도록 설계되어 공간 활용성과 적응성이 높을 것으로 기대
  - 인간 중심으로 설계된 기존 인프라를 그대로 활용할 수 있다는 점에서 범용 자동화 수단으로 주목받고 있으며, 가사·서비스 등 다양한 산업에서 활용 가능성이 높은 차세대 로봇 형태로 평가

피지컬 AI 시대 도래에 따른 휴머노이드 부상

- 기존 인공지능은 디지털 환경 중심의 데이터 처리에 집중되었으나, 최근에는 물리 세계를 인식하고 행동하는 피지컬 AI 개념이 핵심 기술 패러다임으로 부상
  - 피지컬 AI는 센서 기반 환경 인식과 판단, 행동 수행을 포함하는 기술로 디지털 AI를 실제 물리적 가치 창출 영역으로 확장하는 개념
  - 자율주행, 로봇, 드론 등 다양한 산업으로 확산을 통해 시장 확대가 예상되며, 특히, 휴머노이드는 인간 환경 적용이 가능한 대표적인 피지컬 AI 구현 형태로 새롭게 주목받으며 '25년 이후 가파른 성장세를 보일 것으로 전망

1) 정보통신기획평가원 반도체·SW전략팀 김채리 책임(crkim@iitp.kr)
본 고는 저자의 개인적인 견해이며 과학기술정보통신부와 KISTEP의 공식적인 의견이 아닙니다.

〈 글로벌 휴머노이드 로봇 시장 전망 〉



출처 : MarketsandMarkets(2025.4.) Humanoid Robot Market-Forecast to 2030

- 휴머노이드는 인간의 형태를 하고 있기 때문에 기존의 산업용 로봇 형태에 비해 제조 비용이 높고 정교한 제어가 어렵다는 기술적 어려움이 존재
  - 최근에는 인공지능 기술 고도화와 센서 및 구동 기술의 발전이 동시에 이뤄지면서 점차 연구 중심 단계에서 산업 적용 단계로 전환되는 추세
- **(인공지능 기술 발전)** 대규모 언어모델 발달로 자연어 이해와 추론 능력을 기반으로 인간의 명령을 해석하고 행동 계획으로 연결하는 핵심 기술로 작용
  - 멀티모달 AI는 영상, 음성, 텍스트 데이터를 통합 처리하여 복잡한 환경에서도 상황을 종합적으로 이해할 수 있는 기반을 제공
- **(하드웨어 및 센서 기술 발전)** 고해상도 카메라와 3차원 센서 기술의 발전으로 복잡한 환경에서도 객체 인식과 공간 이해가 가능한 수준으로 발전
  - 액추에이터 기술은 경량화와 고출력화를 통해 인간과 유사한 정밀 동작 구현이 가능한 수준으로 고도화되고 있음
- **(산업적 수요 확대)** 제조·물류 분야의 자동화 수요 증가와 고령화에 따른 노동력 부족, 위험 환경에서의 작업 대체 필요성이 증가하면서 다양한 작업을 수행할 수 있는 범용 로봇에 대한 수요가 빠르게 확대
- 지능과 하드웨어 기술이 동시에 발전하며, 휴머노이드 로봇의 기술력은 과거 보행과 균형 유지 등 물리적 성능 구현 중심에서 최근에는 인지와 판단 능력이 핵심 경쟁 요소로 전환되는 추세

2 휴머노이드 로봇 기술 발전 역사

가. 휴머노이드 로봇 기술 발전 단계

기술 발전 특징

- 휴머노이드 로봇 기술은 초기 개념 연구 단계에서 시작하여 기계 성능 중심 발전 단계를 거쳐 인공지능 융합 단계를 지나 최근에는 지능 중심 단계로 진화
  - 초기 단계에서는 인간형 구조 구현과 보행, 균형 유지와 같은 기초 기술 확보가 주요 연구 목표로 설정되었으며 실용성은 제한적인 수준이었음
  - 하지만, 점차 동적 균형과 고난도 동작 구현이 가능해지면서 로봇의 물리적 성능이 크게 향상되었으며 실세계 적용 가능성이 확대됨
  - 최근에는 인공지능 기술의 결합으로 환경 인식과 행동 판단이 가능해지고 지능 중심 로봇으로의 전환이 본격화되는 추세

초기 연구 단계(1970~1990년대)

- 초기 휴머노이드 로봇은 인간과 유사한 외형과 기본적인 동작 구현에 초점이 맞춰졌으며, 지능보다는 기계 구조와 구동 메커니즘 구현이 핵심 연구 대상
  - 센서와 제어 기술이 제한적이었기 때문에 사전에 정의된 동작만 수행하는 수준으로 주로 대학과 연구기관 중심으로 기술 개발 진행
- 대표 사례로 일본 와세대 대학교의 WABOT 프로젝트를 통해 개발된 WABOT-1은 '73년에 공개된 최초의 인간형 로봇으로, 간단한 보행과 손동작을 구현한 초기 사례
  - 이후 WABOT-2는 1984년에 개발되어 악보를 읽고 전자 오르간을 연주하는 기능을 수행하며 인간-로봇의 상호작용 가능성을 보여준 초기 사례로 평가됨

동작 안정화 단계(2000년대)

- 2000년대로 넘어오면서 휴머노이드 로봇 연구는 인간과 유사한 이족보행의 안정성을 확보하는 것이 핵심 과제로 등장하였으며, 균형 제어와 모션 계획 기술이 크게 발전
  - 여전히 지능보다는 정밀한 동작 수행 능력 중심으로 연구개발이 진행되었으며, 대부분의 작업은 사전에 프로그래밍된 시나리오에 따라 수행되는 구조 유지
- '00년 일본 Honda에서 공개한 ASIMO는 이 시기의 대표 모델로, 계단 오르기, 방향 전환, 간단한 물체 운반 등 다양한 동작을 안정적으로 수행하여 인간형 로봇 기술의 발전 가능성을 보여준 상징적 모델로 평가

- ’04년 KAIST의 연구팀에서도 2족 보행 휴머노이드 로봇인 HUBO(KHR-3)를 공개, 대한민국 최초의 이족보행이 가능한 휴머노이드 로봇 사례로 기록
  - KAIST는 이후 휴머노이드 로봇 관련 연구개발을 지속하여 ’15년 미국 국방부 산하 DARPA에서 주최한 로봇 챌린지 대회에 참가, 우승하며 국내 휴머노이드 로봇의 가능성을 보여준 사례로 평가

고성능 제어 단계(2010년대)

- 센서 기술과 컴퓨팅 성능이 크게 향상되면서 로봇의 균형 유지 능력과 동작 정밀도가 비약적으로 발전한 시기
  - 특히, 동적 균형 제어 기술이 발전하면서 점프, 달리기, 장애물 극복 등 고난도 동작 구현이 가능해지면서 휴머노이드 로봇의 물리적 성능이 크게 향상되는 특징을 보임
- 당시 Boston Dynamics가 개발한 Atlas는 ’13년에 처음 공개된 이후 지속적으로 발전하며 점프, 백플립, 파쿠르 등 고난도 동작을 수행하는 능력을 보여줌
  - Atlas는 외부 충격에도 균형을 유지하는 뛰어난 제어 기술을 통해 인간 수준에 근접한 동작 능력을 구현하였다는 점에서 기술적 전환점을 제시하며 기계 성능 발전의 대표 사례로 평가

지능 중심 단계(2020년대)

- 인공지능 기술이 로봇에 본격적으로 적용되면서 환경 인식과 행동 학습이 가능해졌으며, 휴머노이드의 자율성이 점진적으로 향상되는 단계
  - 최근에는 대규모 언어모델, 비전 AI, 강화 학습 등이 결합되면서 로봇이 인간의 명령을 이해하고 새로운 작업을 학습할 수 있는 기반이 마련되며 범용 로봇으로 진화하는 단계에 진입
- Tesla의 Optimus는 ’22년 공개된 휴머노이드 로봇으로, 제조 및 물류 현장에서 반복 작업을 수행하는 범용 노동 로봇을 목표로 개발되고 있음
  - ’25년 공개된 2.5세대 버전 Optimus는 테슬라 자동차에 탑재되는 FSD(Full Self-Driving) 기술을 적용하여 카메라로 주변을 인식하고, 판단하여 행동하도록 설계되었으며, 양산 전 파일럿 생산을 통해 테슬라 자동차 공장 내에서 업무를 수행하도록 배치
- Figure AI에서 ’23년 공개한 Figure 01 모델은 언어모델 기반의 자연어 이해와 작업 수행 능력을 결합하여 인간과의 협업 가능성을 강조
- 또한, 중국의 유니트리, 유비테크 등 여러 기업에서도 다양한 동작을 시연하는 휴머노이드 로봇을 공개하며 양산 및 상용화를 위한 계획을 발표

〈 휴머노이드 로봇 발전 연대표 〉

연도	국가	기관	모델명	특징 및 의미
1973	일본	와세다대	WABOT-1	• 시각·청각 인식과 기본 보행 기능을 구현한 최초의 휴머노이드 로봇
2000	일본	Honda	ASIMO	• 보행 기술 고도화를 통해 휴머노이드 로봇의 현실화 가능성을 제시, 휴머노이드 로봇의 대중적 인지도를 높인 대표 사례
2004	한국	KAIST	HUBO(KHR-3)	• 보행과 물체 조작 기능을 동시에 구현한 로봇, 한국의 대표적인 휴머노이드 개발 사례
2013	미국	Boston Dynamics	ATLAS	• 고난도 동작 구현 성공으로 재난·위험 환경 등에서 인간 작업 대체 가능성 확대
2014	일본	SoftBank	Pepper	• 인간과의 상호작용과 감정 인식 중심 설계로, 서비스 분야 활용 가능성을 확인
2019	미국	Agility	Digit	• 이족보행 기반 물류 환경 동작을 시연하여 실제 산업 환경 적용 가능성을 확인
2023	미국	Tesla	Optimus	• 공장 자동화를 목표로 Tesla 자동차의 자율주행 학습 인프라를 범용 작업용 휴머노이드로 확장하는 시도
2024	미국	Figure AI	Figure 01	• 인공지능 기반 제어 기술로 다양한 작업 수행을 목표로 개발 중인 지능형 휴머노이드 사례
2025	중국	유니트리	H2	• 중국 휴머노이드 로봇의 기술력을 확인할 수 있는 사례

출처 : 각 사 홈페이지 및 언론사 자료 종합

나. 기술 발전의 흐름 및 의미

지능 중심의 패러다임 전환

- 휴머노이드 로봇 기술은 초기의 기계 구조 중심에서 시작하여 동작 안정화와 고성능 제어를 거쳐 최근에는 지능 중심으로 발전하는 흐름
  - 단순히 두 발로 움직이는 기계에서 벗어나 스스로 판단하고 적응하는 시스템으로의 전환이 이루어지고 있음을 의미
- 로봇 관련 기술 경쟁의 본질이 하드웨어에서 지능으로 이동
  - 생성형 AI와 결합된 휴머노이드 로봇은 단순 자동화 기계를 넘어 인간과 협업이 가능한 지능형 시스템으로 발전하는 방향을 제시하고 있으며, 지능의 고도화가 휴머노이드 로봇 상용화의 가능성을 높이는 가장 중요한 요인으로 작용

3 핵심 기술 및 기업 동향

가. 휴머노이드 로봇 핵심 구성 기술

휴머노이드 로봇은 로봇공학 기술과 인공지능 기술 역량의 집합체

- 휴머노이드 로봇은 인공지능, 센서 및 인지 기술, 제어 기술, 에너지 및 배터리 기술이 통합된 복합 시스템으로 구성
  - 각 기술 요소가 유기적으로 결합되어야 실제 활용 가능한 성능을 확보할 수 있고, 인간과 동일한 환경에서 작업을 수행해야 한다는 특성상 다양한 환경 변수에 대응할 수 있는 종합적인 기술 통합 능력이 요구
- 동일한 하드웨어를 기반으로 하더라도 인공지능 모델의 성능과 학습 데이터의 양에 따라 로봇의 작업 수행 능력이 크게 달라지는 사례가 확인
  - 휴머노이드 기술 경쟁은 기계적 완성도보다 지능 수준과 데이터 확보 능력을 중심으로 재편되고 있으며, 휴머노이드의 두뇌에 해당하는 피지컬 AI 기술 경쟁력이 핵심 요소로 부상

※ 동일한 로봇 하드웨어에서 다양한 강화 학습 알고리즘을 적용한 결과, 작업 성공률이 달라지는 연구 결과 입증(HumanoidBench(2024))

※ 구글 딥마인드의 RT-1-X 모델은 여러 로봇에서 수집된 데이터를 활용하여 학습한 결과, 기존 방식 대비 약 50%의 성능 향상을 확인

나. 피지컬 AI 구현의 핵심 요소 및 기술 동향

피지컬 AI 핵심 가치사슬

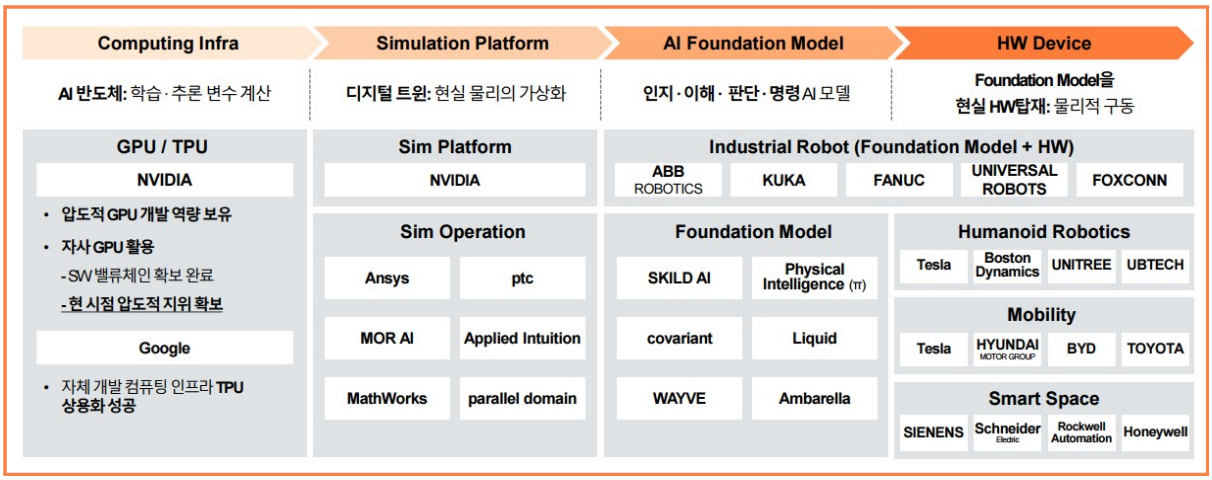
- 피지컬 AI는 물리 세계에서 인지, 판단, 행동을 수행하는 기술로서 컴퓨팅 인프라-시뮬레이션-파운데이션 모델-하드웨어까지 연계된 가치사슬 구조 구성
  - **(컴퓨팅 인프라)** 대규모 데이터 처리와 인공지능 모델 학습 및 추론을 위한 기반 환경으로서 피지컬 AI 시스템의 성능을 결정하는 핵심 요소
  - **(시뮬레이션)** 가상 환경에서 로봇의 행동을 학습하고 검증하는 시스템으로 실제 환경에서의 비용과 위험을 줄이고 대량의 학습을 축적하기 위한 기술

※ 시뮬레이션 환경에서 대규모 반복 실험을 통해 다양한 상황에 대한 학습 및 사전 검증이 가능하고, 모델을 실제 로봇에 적용하기 전에 테스트 및 최적화하는 단계에서도 활용

  - **(파운데이션 모델)** 로봇이 인간의 명령을 이해하고 상황을 판단하여 적절한 행동을 계획할 수 있도록 지원하는 기반 모델로, 범용 추론 능력을 제공하여 휴머노이드의 자율성을 결정하는 핵심 요소로 작용

- **(하드웨어)** 피지컬 AI의 실제 구현체로서 센서와 구동 장치를 통해 물리 세계와 직접 상호작용하는 역할을 수행

〈 피지컬 AI 가치사슬 및 핵심 기업 〉



출처 : PwC(2026.3), 피지컬 AI 생태계 및 새로운 성장 기회 전망

- 컴퓨팅 인프라의 지원과 시뮬레이션 플랫폼의 학습을 통해 AI 파운데이션 모델의 지능이 구현되고 이를 하드웨어에서 실행하는 유기적 구조
  - 핵심 요소의 결합을 통해 완성되므로 가치사슬 전반에서 주요 플레이어 간 협력이 확대되고 있으며 각 영역별 경쟁력 확보가 산업 경쟁력으로 연관됨
  - 이에 따라 NVIDIA 등 빅테크 기업은 하나의 영역에서만 사업을 전개하지 않고 플랫폼 형식으로 가치사슬 전반을 장악하기 위한 연구개발 진행

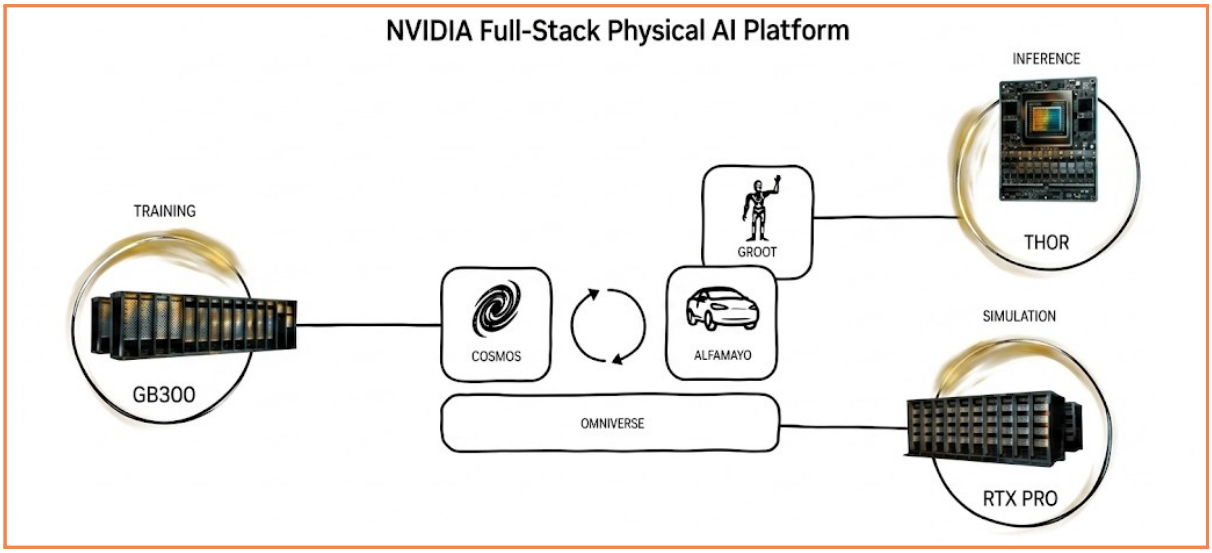
컴퓨팅 인프라 기술 및 주요 기업 동향

- 피지컬 AI 구현을 위해서는 대규모 데이터 처리와 학습을 수행할 수 있는 고성능 컴퓨팅 인프라가 필수이며, 모델의 학습 속도와 성능을 좌우하는 핵심 기반 요소로 작용
  - 특히, GPU 및 AI 전용 반도체를 활용한 병렬 연산 구조가 대량의 학습 처리에 중요함에 따라 현재 각 기업 및 국가별로 피지컬 AI 경쟁력 확보의 기반으로 컴퓨팅 인프라 마련을 전략적으로 추진

※ (미국) AI Action Plan을 통해 미국 내 데이터센터, 반도체, 전력망 구축 관련 전략 발표('25.7), (한국) 국가 AI 프로젝트를 통해 GPU 26만장 확보 계획 발표('25.12), (유럽) AI Gigafactory 전략을 통해 10만개 이상의 고성능 AI 칩 탑재한 데이터센터 구축 발표('25.2)

- **(NVIDIA)** 병렬 연산의 필수 요소인 GPU 및 AI 컴퓨팅 플랫폼을 보유하고 있으며, 데이터 처리와 시뮬레이션 연계를 통한 통합 개발 환경을 구축하는 등 컴퓨팅 인프라에서 시뮬레이션 및 AI 모델로 기술 영역을 확대하는 중

〈 엔비디아 풀스택 피지컬 AI 플랫폼 〉



출처 : CES 2026. 엔비디아 뉴스 콘퍼런스 전략 발표 중 발췌

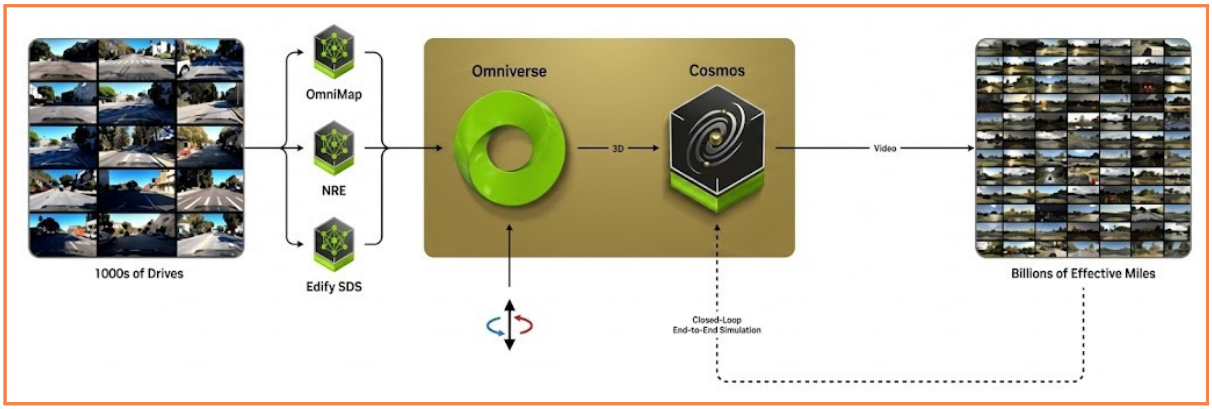
- (Tesla) 자율주행용 슈퍼컴퓨터 Dojo를 기반으로 로봇 학습을 위한 대규모 연산 인프라를 구축하고 있으며, 데이터 중심 학습 체계를 강화하고 있음
- (Google) 대규모 AI 학습을 위한 전용 AI 반도체인 TPU(Tensor Processing Unit)를 자체 개발하였으며, 이를 통해 자사의 로봇 파운데이션 모델을 학습하는 등 영역 확대 추진

  ※ TPU v4는 MLPerf 벤치마크에서 경쟁 시스템 대비 평균 1.42배 빠른 학습 속도 기록하는 등 대규모 모델 학습에서 우수한 성능 입증

시뮬레이션 플랫폼 기술 및 주요 기업 동향

- 가상 환경에서 로봇을 학습시키는 기술로, 실제 환경에서 로봇을 학습할 때 발생하는 비용과 위험을 줄이면서 대규모 데이터를 생성할 수 있는 핵심 수단으로 활용
- 가상 환경에서 다양한 상황에 대한 학습을 위해서는 현실 세계의 물리법칙을 정확히 반영하고 미래 상태를 예측할 수 있는 월드 모델이 필수
  - 월드 모델은 로봇이 환경의 구조와 물리적 특성을 이해하고 미래 상태를 예측할 수 있도록 하는 기술로, 행동 계획과 의사결정의 기반이 되는 핵심 요소
- (NVIDIA) 현실을 디지털로 복제하여 물리 기반 시뮬레이션이 가능하도록 플랫폼과 물리 엔진, 월드 모델, 데이터 표준을 마련하여 AI 학습 환경을 통합 제공
  - 디지털 트윈 플랫폼인 옴니버스에서 3D 세계를 구축, 물리 엔진인 PhysX를 통해 충돌·중력·마찰 등의 물리 현상을 계산, 코스모스(월드 모델)를 통해 물리법칙을 반영한 미래를 예측하여 시뮬레이션 학습이 가능하도록 구성

〈 엔비디아 시뮬레이션 플랫폼 구조도 〉



출처 : 엔비디아 홈페이지

- **(Meta)** 피지컬 AI 적용을 목표로 예측 기반 세계 이해 모델인 V-JEPA를 발표('25.6), 시간에 따른 변화와 물리적 상호작용을 학습하도록 설계
  - V-JEPA는 관측 데이터와 예측 대상 간의 관계를 학습하여 환경의 구조적 특성을 이해하는 방식으로 작동하여 불필요한 세부 정보 학습을 줄여 학습 효율성을 확보

    ※ JEPA(Joint Embedding Predictive Architecture)

로봇 파운데이션 모델(RFM, Robot Foundation Model) 기술 및 주요 기업 동향

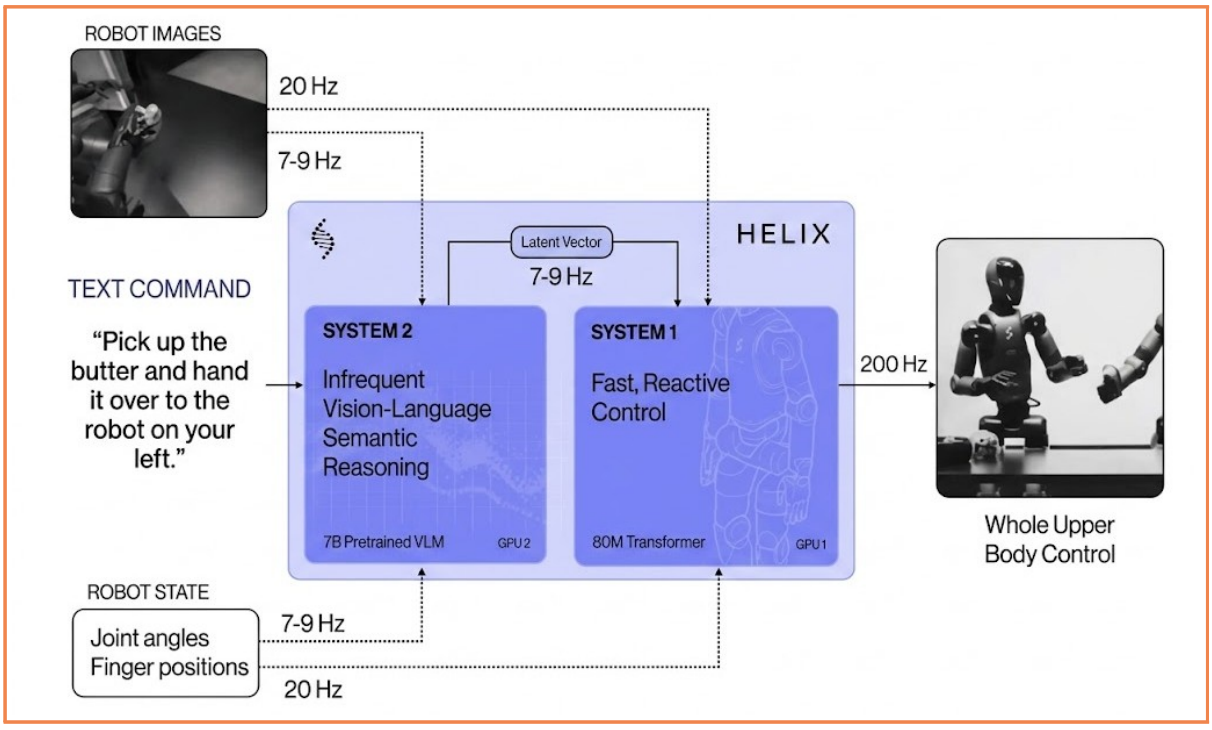
- 대규모 데이터로 학습되어 다양한 로봇 작업에 적용 가능한 범용 인공지능 모델로서 피지컬 AI의 핵심 지능 계층을 구성
  - 기존의 파운데이션 모델과 유사하게 자연어 명령 이해, 시각 정보 기반 환경 인식, 추론 및 판단을 통해 계획을 생성하지만, 출력값이 디지털 세계에서 이뤄지지 않고 실제 행동으로 이어지게 됨
- **(VLA)** 로봇 파운데이션 모델 구조는 시각, 언어, 행동을 통합한 VLA (Vision-Language-Action) 모델이 핵심 방향으로 제시되고 있음
  - VLA 모델은 이미지와 자연어 명령을 입력받아 로봇 행동을 출력하는 형태로, 보고, 이해하고, 행동하는 것을 하나의 모델로 처리하여 end-to-end 학습을 가능하게 하는 구조
  - DeepMind는 RT-2 모델 발표('23.7)를 통해 로봇의 행동을 토큰으로 처리하는 기술(Action Tokenization)로 입력값을 토큰화하고, LLM과 같은 기존 모델 구조에 행동을 통합 구현하는 방식을 제시
  - 웹 데이터와 로봇 데이터를 결합하여 일반화된 행동 수행 능력을 갖춰, 새로운 물체 및 상황에서도 작업 수행이 가능하도록 혁신

● **(이중지능 구조)** 로봇은 '빠른 제어'와 '복잡한 추론'을 동시에 처리해야 하기 때문에 단일 모델로는 한계가 있어, 인간의 인지 구조를 모방한 이중지능 아키텍처가 핵심 모델 구조로 부상

- 인간 인지 이론(Dual-process Theory)에 따르면, 인간의 사고는 빠르고 직관적인 사고 중심의 'system 1'과 느리고 논리적인 사고 중심의 'system 2'로 구분
- 피지컬 AI에서는 해당 개념을 로봇에도 동일하게 적용하여 반응형의 실시간 제어가 필요한 system 1에는 저수준 제어·고속 실행을, 계획·추론·의사결정이 필요한 일에는 system 2를 도입하는 구조를 도입하는 사례 증가
- Figure AI는 휴머노이드 모델인 Helix에서 이중지능 아키텍처를 적용하여 system 1에는 저지연 행동 제어를, system 2에는 대규모 VLM 기반 추론 구조를 채택했음을 발표하며 지능과 제어 분리구조를 실제 제품에 적용

※ system 1은 약 8천만 파라미터의 제어 모델, system 2는 70억 파라미터 규모

〈 Figure AI 헬릭스 이중지능 모델 구조도 〉



출처 : Figure AI, Helix: A Vision-Language-Action Model for Generalist Humanoid Control (2025.02)

- NVIDIA와 구글 DeepMind 등 피지컬 AI 선두 기업들도 대부분 이중지능 구조를 휴머노이드 로봇 모델에 도입하면서 범용 휴머노이드 구현을 위한 핵심 구조로 자리매김하는 중

- **(VLA+이중지능 결합 구조)** 최신 피지컬 AI 모델 구조는 VLA 모델에 System 2 사고를 추가하는 방향으로 발전
  - 모든 문제에 동일한 연산을 수행하지 않고 실시간성 및 유연성을 확보하여 상황에 따라 사고의 양을 조절하여 효율성을 극대화할 수 있어 핵심 기술로 부상
  - 4Hz의 저속 추론 중심 System 2과 90Hz 속도의 고속 제어 중심 System 1로 구성된 사례를 발표하는 등 모델 구조에 대한 연구가 활발하게 진행
    ※ Hume: Introducing System-2 Thinking in Visual-Language-Action Model(2025.07.)

하드웨어 디바이스 기술 및 주요 기업 동향

- 피지컬 AI가 실제 환경에서 구현되기 위해서는 센서, 액추에이터, 제어 장치 등 하드웨어의 성능이 뒷받침되어야 하며 디바이스는 AI의 행동 실행 능력을 결정하는 요소
  - 인간과 유사한 움직임을 구현하기 위해서는 고출력·고정밀 액추에이터와 센서 시스템이 필수이며, 이를 얼마나 효율적으로 제어하고 활용하는지가 핵심 경쟁 요소로 부상하며 AI와의 결합이 중요해지고 있음
- **(Boston Dynamics)** 고성능 액추에이터와 정밀 제어 기술을 통해 Atlas의 뛰어난 동작 성능을 구현
  - 특히, 56 DoF(Degrees of Freedom)의 자유도 구현으로 전신의 관절이 독립적으로 움직이는 축을 보유하고, 완전 전기식의 액추에이터로 구성하여 고토크 유지가 가능
- **(Unitree)** 상대적으로 저렴한 비용과 경량화 설계를 통해 빠른 제품화를 추진하고 있으며 상용화 관점에서 경쟁력을 확보
  - 자체 모터, 액추에이터 등을 내재화, 중국 내 공급망을 형성하여 가격 경쟁력을 확보하여 기존의 예상가 대비 1/10 수준으로 낮춘 모델 출시
    ※ 유니트리 H1(연구용 모델)은 9만 달러, 경쟁사인 피규어 AI, 보스턴 다이내믹스 등의 경우 상용화 전으로 파일럿 제품이 15만 달러 정도로 예상

피지컬 AI 핵심 가치사슬 통합 발전 요구 확대

- 컴퓨팅 인프라, 시뮬레이션 플랫폼, 로봇 파운데이션 모델, 하드웨어 디바이스는 개별 기술이 아니라 통합되어 하나의 지능 시스템을 구성하는 구조로 발전하는 양상
  - 데이터 수집부터 학습, 행동까지 이어지는 폐쇄형 루프 형성을 통해 로봇은 지속적으로 성능을 개선할 수 있는 구조로 발전하고 있음

4 한계 및 도전 과제

데이터 및 학습의 어려움

- **(데이터 확보 어려움)** 피지컬 AI는 실제 환경에서의 다양한 작업 데이터를 기반으로 학습이 이루어지나 현재는 학습에 필요한 양질의 데이터가 부족
  - 피지컬 AI 학습 데이터는 현실 세계의 물리법칙 작용값을 포함한 비디오·촉감 데이터(tactile) 등 다양한 데이터가 필요하나 해당 데이터의 수집을 위해서는 비용과 시간적 부담이 크게 작용
- **(지능 수준 미성숙)** 현재 휴머노이드 지능은 빠르게 발전하고 있으나 여전히 인간 수준의 상황 이해와 복합적 의사결정 능력에는 미치지 못하는 상태이며 비정형 환경 대응에 한계가 있음
  - 예외 상황이나 예측 불가능한 환경에서는 오류 발생 가능성이 높아 완전한 자율작업 수행을 위해서는 추가적인 학습을 통한 기술 발전이 필요
- **(시뮬레이션-현실 간 격차)** 시뮬레이션 기반 학습이 확대되고 있으나 가상 환경과 실제 환경 간 차이로 인해 학습된 모델이 실제 환경에서 동일한 성능을 발휘하지 못하는 문제(Sim2Real Gap) 존재

하드웨어 및 에너지 제약

- **(에너지 효율 문제)** 휴머노이드 로봇은 고성능 연산과 복잡한 물리적 동작을 동시에 수행해야 하므로 높은 에너지 소비를 극복할 효율적 설계가 필요
- **(비용 부담)** 고성능 센서, 액추에이터, AI 연산 장치가 필수적으로 요구됨에 따라 초기 도입 비용이 높아 상용화를 위해서는 비용 절감 방안 필요

안전성 및 제도적 과제

- **(작동 안정성 문제)** 휴머노이드 로봇이 인간과 동일한 공간에서 작업을 수행하기 위해서는 충돌, 오작동 등 다양한 안전 위험 요소에 대한 대책 필요
- **(법·제도 및 책임 문제)** 로봇의 행동에 따른 사고 발생 시 책임 소재와 법적 기준이 명확하게 정립되지 않아 제도적 불확실성 존재
- **(사회적 수용성 및 윤리 문제)** 인간과 유사한 형태의 로봇이 다양한 산업과 일상 영역에 확산되면서 일자리 대체, 윤리적 판단, 인간-로봇 관계 등에 대한 사회적 논의가 필요

5 시사점

휴머노이드 로봇 기술 경쟁은 지능의 영역으로 전환

- 휴머노이드 기술 경쟁은 과거의 하드웨어 성능 중심 경쟁에서 벗어나 인공지능 기반 지능 확보 경쟁으로 빠르게 전환되고 있음
  - 동일한 하드웨어를 기반으로 하더라도 AI 모델 성능과 데이터 확보 수준에 따라 로봇의 활용 가능성과 작업 수행 능력이 크게 달라지면서 두뇌에 해당하는 모델·데이터·시뮬레이션·컴퓨팅 인프라의 중요성이 부각
- 글로벌 주요 기업들은 로봇 하드웨어 자체보다 AI 모델, 데이터, 학습 체계를 중심으로 경쟁력 확보를 위한 연구개발 진행
  - 휴머노이드 로봇 산업의 핵심 경쟁 요소가 지능으로 이동했으며, 향후 경쟁력은 얼마나 다양한 작업을 이해하고 수행할 수 있는 범용 지능을 확보하느냐가 핵심으로 작용
- 휴머노이드 로봇이 AI 기반 플랫폼으로 발전하면서 NVIDIA, Google 등 빅테크 기업이 데이터, 모델, 서비스가 결합된 생태계로 경쟁 확장 중
  - 해당 플랫폼을 선점한 기업이 장기적인 시장 지배력을 확보할 가능성이 높아 기술 개발과 함께 생태계 구축 전략이 중요할 것으로 예상

전산업의 지능화를 이끌 핵심 기술에 대한 국가적 대응 필요

- 휴머노이드 로봇을 위한 피지컬 AI 기술은 제조, 물류, 국방, 서비스 등 다양한 산업에 적용 가능한 범용 기술로서 산업 전반의 지능화를 촉진하는 핵심 기반 기술로 작용할 것으로 예상
  - 특히, 피지컬 AI 기반 자동화는 기존 산업 구조를 변화시키며 생산성 향상과 산업 경쟁력 강화에 중요한 역할을 할 것으로 기대
- 글로벌 빅테크 기업 중심으로 기술 경쟁이 심화되는 상황에서 국가 차원의 AI 및 로봇 기술 경쟁력 확보가 중요 과제로 부상
  - 이에 따라, 컴퓨팅 인프라, 시뮬레이션 플랫폼, AI 파운데이션 모델 및 디바이스 등 핵심 요소 기술에 대한 장기적인 투자와 연구개발 지원이 필요
  - 휴머노이드 로봇 확산에 대응하기 위해 안전 기준, 책임 체계, 인증 제도 등 법·제도 마련이 필요하며 기술 발전 속도에 맞춘 유연한 규제 체계 요구