02 건설 Robot·AI 기술 동향과 건설시공 혁신 방안 – Physical AI 활용

김정렬(인하대학교)

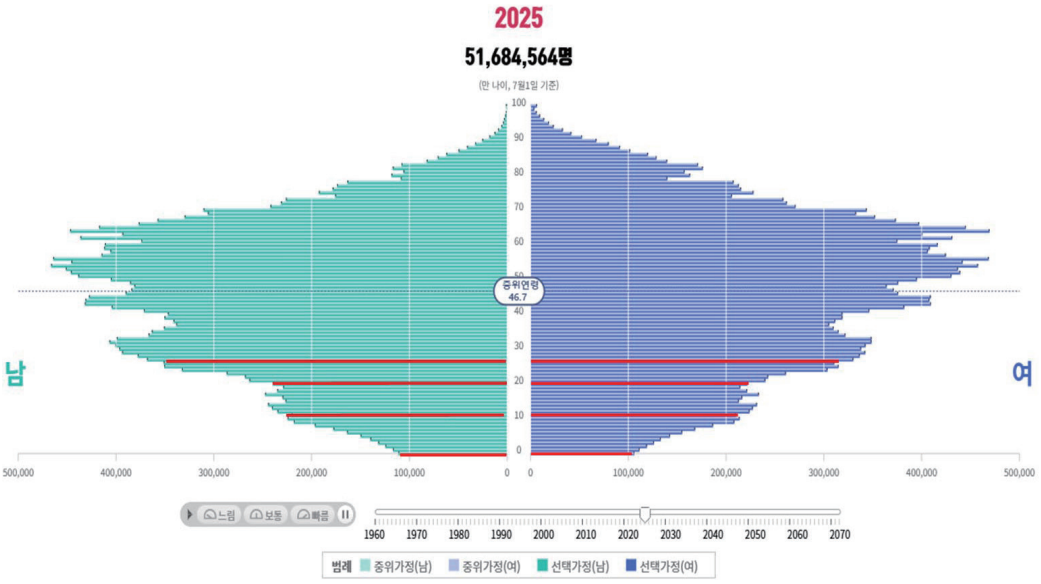
1 건설 인력의 수급과 자동화/로봇화의 필요성

대한민국 인구 구조의 변화

- 대한민국 건설산업은 노동집약적 구조를 기반으로 성장해 온 산업임. 그러나 최근 인구구조 변화, 생산가능 인구 감소, 기능 인력 고령화로 인해 기존 방식으로 건설 생산을 유지하기 어려운 상황이 도래함.

- 아래 그림은 2025년 7월 기준 대한민국의 인구 추계 피라미드[10]이며, 청년층의 사회진입 나이를 남녀 평균 25세로 가정할 때, 현재 약 66만 5,000명(남녀 합산)에서 5년 후인 2030년에는 46만 명으로 30.8% 감소할 것으로 예측되며, 이후 약 10년간 비슷한 수준을 유지하다 그다음 10년 후인 2050년에는 21만 7,000명으로 감소하여 현재의 약 1/3 수준이 될 것으로 예상됨.

- 물론, 기존 인구로 인하여 전체 생산가능인구의 감소는 보다 천천히 이루어질 것으로 예상되나, 사회 전반의 생산능력 저하가 반드시 발생할 것으로 예상됨.



전국 인구 추계 피라미드(2025년 07월 기준)

10) 통계지리정보서비스(SGIS), 전국 인구 추계 피라미드, 2025. 07
(https://sgis.mods.go.kr/jsp/pyramid/pyramid1.jsp, Accessed 2025. 12. 05)

건설 인력의 고령화, 숙련공 부족

- 이러한 배경에서, 건설 기능인력의 고령화 속도는 국가 전체 산업 중에서도 높은 수준임. 신규 인력 유입은 감소하는 반면 고령층 비중은 급증하고 있어, 장기적으로 건설산업에 심각한 영향을 미칠 것으로 예상됨.

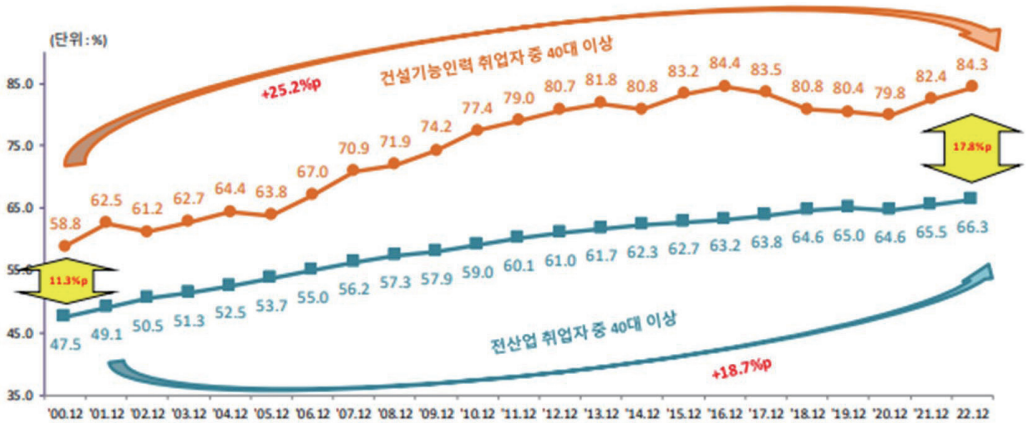
- 아래 그림은 시간에 따른 40대 이상 건설기능인력의 비율과 전 산업 취업자 중 40대 이상 인력의 비율[11]을 보여주고 있으며, 2022년 12월 기준으로 건설산업은 84.3%, 전 산업은 66.3%로 건설산업의 고령화가 심각하게 진행되고 있음을 보여줌.

- 이러한 구조적 변화는 단순한 인력 부족이 아니라 산업 구조의 지속 가능성 자체가 위협받고 있음을 의미함. 공기 지연, 생산성 및 품질 저하, 안전사고 증가, 숙련도 편차 확대 등 다양한 문제를 동반하고 있으며, 인력 중심 생산체계를 자동화·지능화 체계로 전환할 필요가 대두됨.

- 이러한 상황을 극복하기 위해서는, 다양한 종류의 스마트 건설기술의 적용이 필수적이며, 그중에서도 건설자동화 및 로봇 기술의 적극적인 도입이 필요함.

- 특히, 이들 기술의 도입 시 Physical AI 활용은 기존 자동화 기술의 한계를 넘어 비정형 작업·고난도 작업·위험 작업까지 수행할 수 있는 가능성을 제공함. Physical AI는 시각·언어·행동을 통합적으로 인지하고 수행하는 고도화된 기술로, 건설 자동화의 패러다임을 근본적으로 변화시킬 기술로 평가됨.

- 따라서 향후 건설산업은 인간 작업자, 기술자와 AI(특히 Physical AI) 기반의 자동화/로봇의 협력을 기반으로 하는 지능형 생산체계로 전환하는 것이 필수적임.



건설인력 고령화 현황

- 본 고에서는 국내외 건설로봇 개발 동향을 살펴보고, 로봇의 핵심 기술 중 하나인 제어기술과 관련하여, Physical AI 등 요소기술별 특징을 검토하고, 건설분야 로봇 활용방안, 개발 방향에 대하여 논하고자 함.

11) 건설근로자공제회 경영전략본부 조사연구센터. (2024). "건설기성 및 건설기능인력 동향 (2024년 9월 기준)". 건설근로자공제회 통계자료.

2
국내·외 건설 로봇 기술 동향

일본: 대형 종합건설사 중심의 체계적·장기적 자동화 전략

- 일본은 세계에서 가장 일찍 건설 자동화를 국가 전략으로 추진한 국가 중 하나로, 1970년대부터 대형 건설사의 장기적 R&D 투자가 지속되어 왔음. 노동력 감소와 고령화, 대형 공사의 안전 문제 등 구조적 문제를 극복하기 위해 로봇·자동화 기술을 건설 현장에 조직적으로 도입해 왔음.

– 1970~1990년대에 자동화 기반을 구축함. Komatsu, Obayashi, Shimizu 등의 종합건설사를 중심으로 현장공장화/모듈러, 원격조종 무인장비를 중심으로 기술이 개발되었고, 1980년대 이후에는 단일작업(미장, 내화피복분사, 벽체 패널 고정 등)을 대상으로 건설로봇을 공격적으로 개발해 왔음.

– 그러나, 2000년대에는 상대적으로 기술 개발 정체기였으며, 2010년 중반 이후 다시 i-Construction을 시작으로, 디지털 건설 및 건설자동화/로봇들의 개발이 진행되고 있음(휴머노이드 활용 포함).

미국: 대학 중심 원천기술 + 스타트업 중심 상용화

- 미국은 일본과 달리 대형 건설사가 개발을 주도하는 구조가 아니라 대학·연구소 기반의 혁신과 스타트업의 빠른 상용화가 특징적인 기술 생태계를 갖고 있음.

– NSF 중심의 건설 자동화 연구 지원: 1980~2000년대 동안 NSF는 건설 자동화, IT 융합, 모바일 로봇 기반 시공 기술 연구에 막대한 투자를 진행하였음. CMU, MIT, Stanford, USC, UT Austin 등이 로봇 기반 자재 취급 및 시공 계획 연구를 수행하였고, 이는 후일 미국 건설 로봇 스타트업의 기반 기술이 되었음.

– 스타트업 중심의 시장형 혁신 활성화: 미국은 단위 작업/공종을 자동화하는 데 초점을 맞춘 스타트업이 빠르게 성장하고 있으며, 이러한 로봇들은 하나의 공정을 극도로 효율화해 시장 진입 초기부터 실질적 생산성 개선을 보여주는 장점이 있음.
  · SAM100(벽돌 자동 시공 로봇): 시공 속도는 인간보다 빠르고 품질 변동성 감소
  · TyBOT(철근 자동 결속 로봇): 와이어 결속 자동화, 야간 작업 가능
  · Canvas(건식벽체 미장 로봇): 안전·품질·균일성 향상

– 자율주행·컴퓨터비전 기반 플랫폼 기술 개발: 미국은 휴머노이드, 자율주행, 컴퓨터비전, 인공지능 등의 기술이 앞서 있어, 이를 건설 로봇과 통합하는 연구가 활발하게 진행되고 있음.

중국: 국가 주도, 대규모 투자, 폭발적 성장

- 중국은 건설로봇이나 자동화 관련 연구는 거의 수행되지 않았으나, 국가정책 지원을 기반으로 2010년대 이후 건설 자동화와 로봇 개발을 공격적으로 추진해 왔음.

- 이후 2020년대 이후 용접, 도장, 패널 설치, 자재 운반 등 다종의 단일작업 로봇을 정부·기업이 대규모로 개발해 왔으며, 건축 로봇 관련 특허 출원이 2019년 기준 2,114건을 넘을 정도로 활발함.

- 중국의 전략은 '국가 정책 주도 + 대규모 산업 생태계 조성 + 제품 다양성 확보'로 요약할 수 있음. 중국 역시, 건설 인력난 심화와 안전사고 문제를 해결하기 위한 강력한 정책 드라이브가 시장 확장을 가속화하고 있음.

한국: 제조·중공업 기술 분야에서 건설 현장으로 확장

- 한국은 산업용 로봇 기술은 강했으나, 건설 로봇에 대한 연구는 비교적 늦게 출발하였음. 건설자동화에 대한 연구는 2000년대부터 연구 시작되었으며, 중간에 침체기가 있었으나, 토공 MG/MC, PHC 파일 두부정리, 흄관 매설, 외벽 청소, 외벽 도장 등의 자동화 장비 등 연구는 지속됨

- 2010년대 이후 대학을 중심으로 고층 건물 시공 자동화 연구가 본격화되었고, 최근에는 대형 건설사(삼성물산, 현대건설, 롯데건설 등)와 엔지니어링사가(현대엔지니어링, 삼성엔지니어링 등), 대학이 도장 로봇, 미장 로봇, 앵커링 로봇, 바닥 설치 로봇 등의 개발을 적극 추진 중임.

- KIRO, 한국기계연구원, 한국건설기계연구원 등 로봇/기계 분야의 연구소들과 건설로봇 전문 기업이 등장하여 건설로봇의 개발에 적극 참여하고 있음.

3
로봇제어 방식과 Physical AI

로봇 제어 방식의 종류

- 로봇을 제어하는 방식은 다음과 같이 크게 원격제어, 정형 작업 제어, 학습기반 제어로 나눌 수 있으며, 학습 기반 제어가 Physical AI의 핵심 요소임.

- 원격 제어(Remote Control) – XR, 햅틱 디바이스(Haptic Device) 등 활용
  - 작업자가 로봇을 실시간으로 직접 조작하는 제어 방식으로, XR(AR/VR/MR) 환경을 통해 로봇의 작업 상황을 시각적으로 인지하여 작업을 수행함.
  - 햅틱 디바이스(Haptic Device)를 이용해 힘·촉각 피드백을 전달받으며 정밀 작업 수행 가능하며, 로봇 자체의 판단 능력은 제한적임.
  - 작업 품질과 효율은 작업자 숙련도에 크게 의존하며, 위험 작업, 초기 실증 단계, 완전자율 이전 단계에서 효과적으로 활용됨.
  - 다음 그림은 원격조종 방식의 JR 서일본(JR West, West Japan Railway Company)의 철도용 전선 및 주변 인프라 유지보수 로봇임.[12] 트럭/차량 기반 유지보수 플랫폼에 로봇이 장착되고, 조종자는 원격 조작(예: VR 기기)을 통해 로봇을 제어하는 방식임.

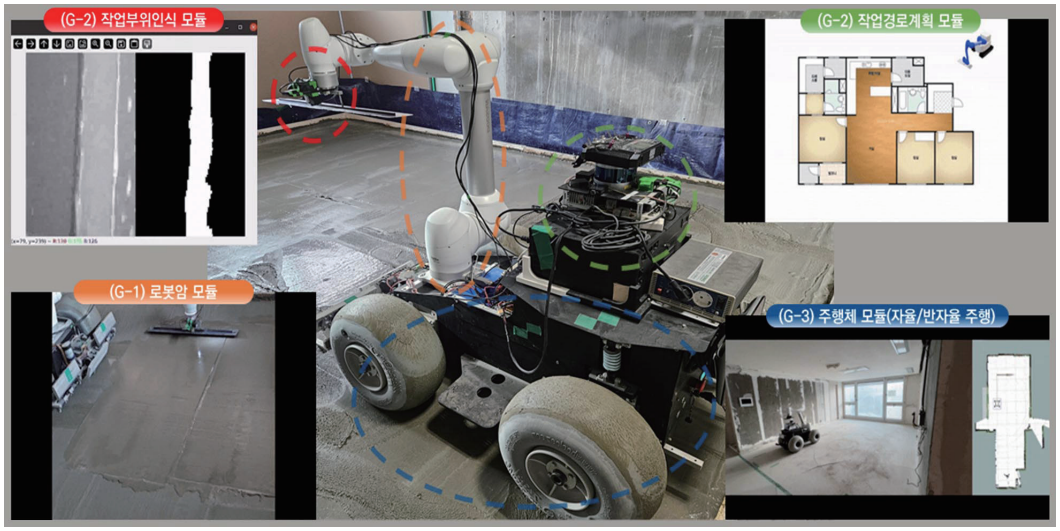
JR 서일본의 유지관리용 원격조종 양팔 로봇

- 정형 작업 제어(Structured Task Control) – Rule-based / Teaching-based)
  - 작업 절차와 조건을 사전에 명확히 정의하여 로봇이 반복 수행하는 방식으로, Rule-based 제어는 미리 설정된 규칙과 조건문에 따라 로봇이 동작하며, Teaching-based 제어는 사람이 직접 로봇의 동작을 가르치거나 경로를 지정함.

12) Railway Supply, Robotic Automation of Railway Infrastructure in Japan: A New Step into the Future!, 2024. 04. 07, (railway.supply/robotic-automation-of-railway-infrastructure-in-japan-a-new-step-into-the-future/, Accessed 2024. 12. 19)

- 작업 환경과 대상이 정형화·표준화되어 있을 때 높은 안정성과 재현성의 확보가 가능하나, 환경 변화나 예외 상황 대응에는 한계가 있으며, 유연성은 제한적임.
- 정형 작업 제어를 기반으로 실시간 센싱을 통해 변화하는 작업 조건에 따라 적응형(adaptive)으로 작업을 수행하도록 하여 유연성을 부여할 수 있음.
- 아래의 그림들은 삼성물산에서 개발한 Access Floor 설치 로봇[13]과 인하대학교 건축학부에서 개발 중인 실내바닥 마감미장(방바닥 통미장, 통칭 방통미장) 자동화 로봇[14]이며, 정형화된 작업을 수행하나, 작업대상 및 환경 센싱을 통해 지능적으로 적응성을 가지면서 작업이 가능함.

삼성물산의 Access Floor 설치 로봇



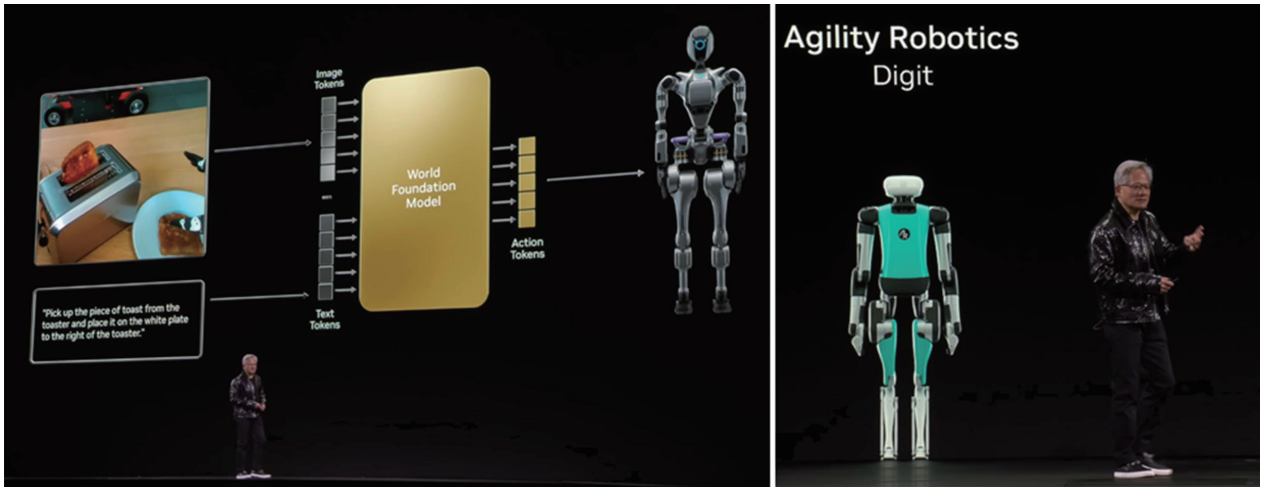
인하대학교의 실내바닥 마감미장 로봇

- **학습 기반 제어(Learning-based Control) – Physical AI의 핵심 요소**
- Physical AI*의 핵심 요소로서, 로봇이 데이터와 경험을 통해 스스로 작업 전략을 학습·개선하는 방식이며, 건설현장과 같은 비정형 환경, 불확실한 작업 조건, 복잡한 상호작용이 필요한 작업에 적합한, 기존정형 제어의 한계를 극복할 수 있는 차세대 로봇 제어 패러다임.

13) 박경일, 삼성물산, 고위험 작업 대신할 '플로어 로봇' 건설 현장에 적용, 로봇신문, 2021. 11. 18 (https://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=26962, Accessed 2025. 12. 19)

14) 박준범, 김정렬 외, 디지털 기반 건축감리 및 시공자동화 로봇 기술 개발– 기술4 : 건축 시공자동화 로봇, 건축, Vol. 68, No. 10, 대한건축학회, 2024. 09

*Physical AI: 센서(카메라, 라이다 등)로 물리적 세계를 인지하고, 스스로 판단하며, 로봇이나 자율주행차 같은 물리적 장치(Actuator)를 통해 현실 세계에서 행동하고 상호작용하는 인공지능 기술로, 가상 세계를 넘어 현실에서 움직이는 AI를 말함(NVIDIA 용어집, HPE용어해설 종합).



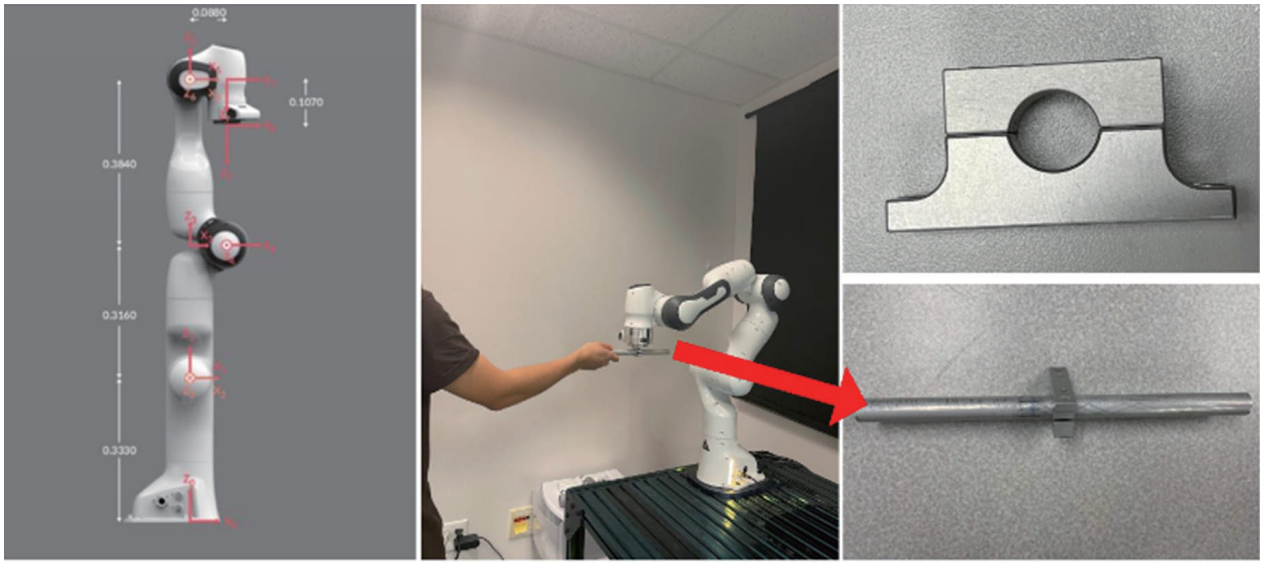
젠슨황이 CES 2025에서 Physical AI를 소개하는 모습(https://youtu.be/k82RwXqZHY8)

- 강화학습(Reinforcement Learning, RL) – 부분적 Physical AI
  - 로봇이 시행착오를 통해 보상 최대화를 목표로 행동 정책을 학습하며, 명확한 목표와 보상 함수가 정의된 작업에 효과적임.
  - 고차원 제어 문제, 연속 동작 최적화, 동적 환경 대응에 강점이 있으나, 학습 비용과 데이터 요구량이 크며, 시뮬레이션 기반 학습이 주로 활용됨.
  - 다음 그림은 UC Berkeley의 연구진이 개발한 HITL(Human-in-the-loop) Vision 기반 강화학습을 활용한 기민한 조작(Dexterous Manipulation)이 가능한 로봇의 사례이며, 블록게임, 가구조립 등이 가능함.[15)]
  - 학습 기반이기는 하나, 의미와 상황에 대한 이해 및 추론이 부족하여, 완전한 Physical AI로 보기는 어려움.

인간 참여형 시각 기반 강화 학습을 활용한 정교한 조작 예시

15) Luo, J., Xu, C., Wu, J., & Levine, S. (2025). Precise and Dexterous Robotic Manipulation via Human-in-the-Loop Reinforcement Learning(No. arXiv:2410.21845). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.21845

- 모방학습(Imitation Learning, IL) – 부분적 Physical AI
  - 인간 또는 전문가의 시연 데이터를 기반으로 로봇이 행동을 모사하여 학습을 수행하여, 초기 학습 속도가 빠르며, 실제 작업 데이터 활용에 유리함.
  - 사람의 작업 노하우와 암묵지를 로봇에 전이할 수 있으며, 시연 데이터 품질과 다양성에 따라 성능이 크게 좌우됨.
  - 모방학습을 통해 빠르게 로봇을 학습을 시킨 후, 강화학습을 통해 미세조정/최적화를 수행하는 방식이 효율적임.
  - 이러한 방식도, 의미와 상황에 대한 이해 및 추론이 부족하여, 완전한 Physical AI로 보기는 어려움.
  - 아래 그림은 Florida 대학의 연구진이 배관 삽입이나 용접 등 힘 제어가 중요한 건설 조립 과제에 모방학습을 적용한 사례임.[16)]



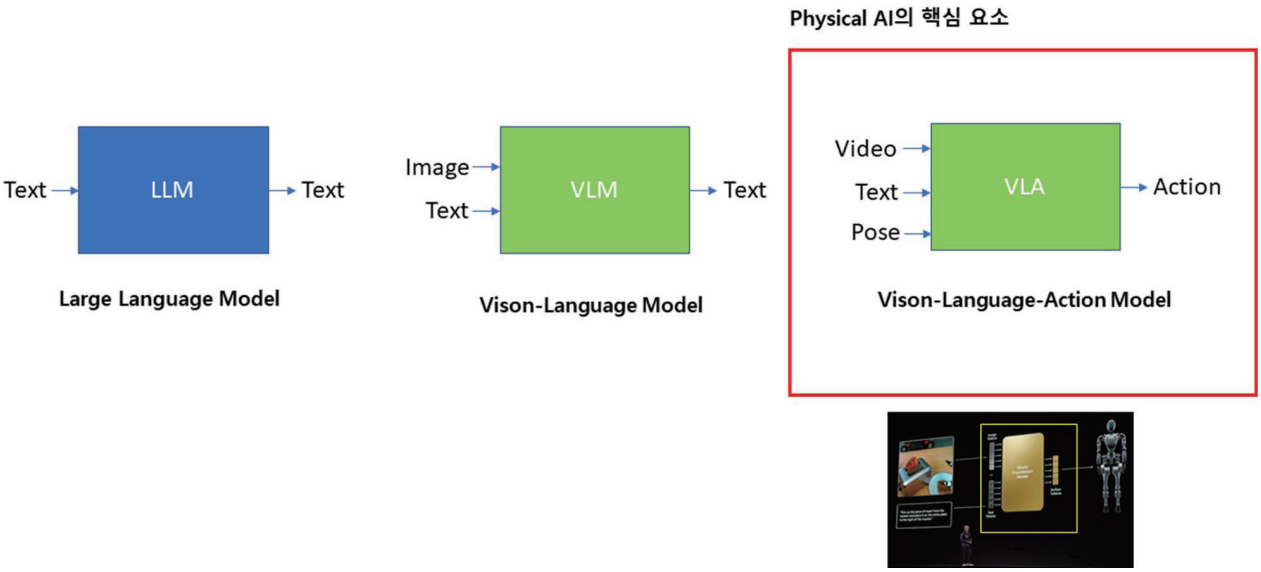
(a) Robot Arm Parameters (b) Human Operator Handling (C) Handle and Adapter

힘 기반 로봇 모방 학습: 건설 조립 작업을 위한 2단계 접근법

- VLA(Vision–Language–Action) 모델 – Physical AI
  - 시각 정보(Vision), 언어 정보(Language), 행동(Action)을 통합하는 로봇 제어 구조이며, 자연어 명령을 이해하고 시각 인식 결과를 바탕으로 작업 행동을 생성함.
  - LLM(Large Language Model)을 탑재하여, 의미와 상황에 대한 이해 및 추론이 가능하며, 다양한 작업에 대해 학습하지 않은 작업도 수행하는 Zero-shot 또는 Few-shot 수행 가능성을 제공하는 Physical AI 기반 로봇의 완전자율화와 범용성을 구현하기 위한 핵심 아키텍처임
  - VLA의 특성: LLM은 다음 그림과[17)]과 같이 텍스트를 입력을 받아 텍스트 형식으로 결과를 출력하고, VLM(Vision-Language Model)은 영상과 텍스트를 입력받아, 텍스트를 출력함. VLM은 영상, 텍스트, 로봇의 자세(Pose) 데이터를 입력받아, 로봇의 행동(Action)을 출력함(젠슨황의 CES 2025 기조연설 슬라이드의 배경이 VLA를 의미함).

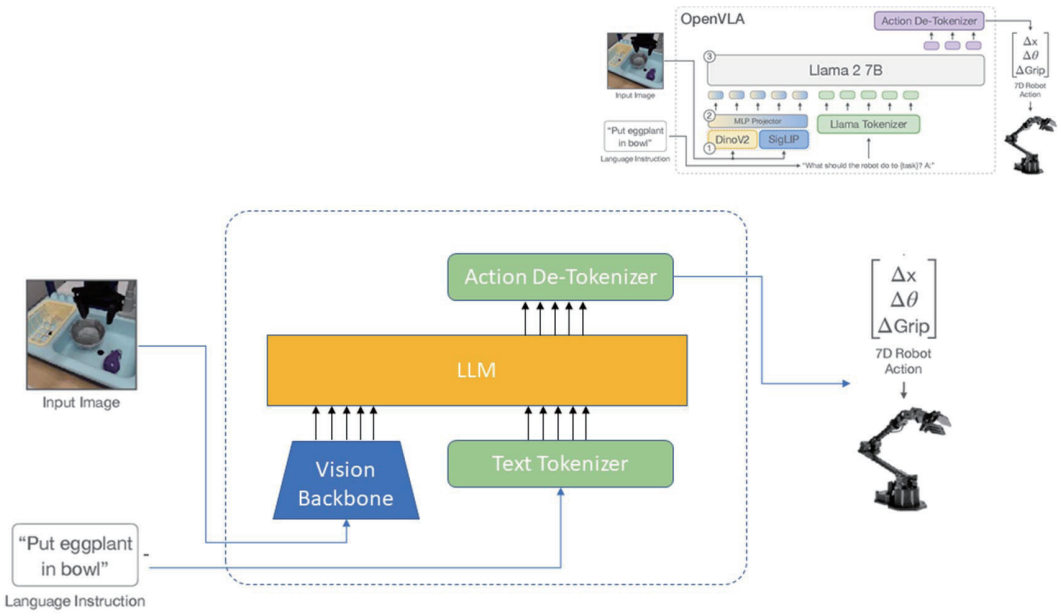
16) You, H., Ye, Y., Zhou, T., & Du, J. (2025). Force-Based Robotic Imitation Learning: A Two-Phase Approach for Construction Assembly Tasks(No. arXiv:2501.14942). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.14942

17) 박철, 로봇 행동 제어를 위한 모방 학습(ft.LeRobot), 모두의 연구소, 2025. 06 기반으로 재생성/추가



LLM, VLM, VLA의 차이 그림

- VLA는 단순화한 OpenVLA 아키텍처[18]인 아래 그림과 같이 내부에 LLM을 탑재하고 있어, 입력받은 영상, 텍스트(음성 명령) 등을 기반으로 상황에 대한 이해 및 추론을 수행하여 로봇의 행동(연속된 명령어+좌표)을 문장처럼 출력함.
- 따라서, VLA는 LLM이 특정 상황에 대하여 다양하나 유사한 의미의 문장을 생성해 내고, 심지어는 학습하지 않은 내용에 대해서도 어느 정도 답변이 가능하듯이 작동하여, 결국에는 Zero-shot 또는 Few-shot이 가능해짐.



단순화한 OpenVLA의 아키텍처

- 이러한 특성을 활용하여, VLA를 이용한 학습기반의 제어와 정밀 제어가 가능한 정형작업 기반의 제어를 적절하게 융합하는 것이 정형화하기 어려운 건설 현장에 적합한 로봇 활용의 방식이 될 것으로 판단됨.

18) Kim, M. J., Pertsch, K., Karamcheti, S., Xiao, T., Balakrishna, A., Nair, S., Rafailov, R., Foster, E., Lam, G., Sanketi, P., Vuong, Q., Kollar, T., Burchfiel, B., Tedrake, R., Sadigh, D., Levine, S., Liang, P., & Finn, C. (2024). OpenVLA: An Open-Source Vision-Language-Action Model(No. arXiv:2406.09246). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.09246

4
결론 및 제언

저자 정보
① 성명 : 김정렬
② 소속 : 인하대학교 건축학부
③ 주요이력(학력포함) : 한국건설자동화로보틱스학회 부회장
한국건설관리학회 학술교류위원회 위원장
대한건축학회 건설관리위원회 위원장
대한건축학회 건축연구소 센터장
인하대학교 건축학부 교수
한국건설기술연구원 수석연구원
The University of Texas at Austin 건축토목환경공학과 박사(건설관리)
인하대학교 토목공학과 학사, 석사
④ 간략한 소개말(인사말) : 인하대학교 김정렬 교수는 BIM, 건설자동화/로보틱스, 인공지능(AI), 센서 기반 모니터링 등 건설과 타 분야의 기술을 융/복합하여 건설 시공 및 프로젝트 관리의 효율화에 대한 연구를 수행하고 있다. 특히, 로봇 기반 시공 자동화, Scan-to-BIM, 건설 객체 인식·추적, XR 기반 시공정밀도 향상 등 미래형 건설 기술 개발에 주력하며, 산업·정부 연구와 교육을 연결하는 융합 연구를 활발히 수행하고 있다.

- 대한민국 건설산업의 인력구조의 변화(신규 유입 인력 감소, 고령화, 숙련공 부족 등)는 이미 되돌릴 수 없는 추세이며, 이는 산업 전반의 패러다임 변화를 요구하고 있음.

- 로봇산업은 이제 단순한 자동화를 넘어 AI가 물리세계에서 스스로 판단하고 행동하는 Physical AI단계에 진입하고 있음.

- NVIDIA, Tesla, Stanford 등이 선도하는 Physical AI 생태계는 건설 로봇 개발 방식에도 중대한 영향을 미칠 것임.

- VLA와 같은 기반의 인지-추론-행동 통합 기술은 로봇이 복잡한 건설현장에서 인간과 협동하거나, 때로는 자율적으로 공정을 수행할 수 있는 가능성을 열어주고 있으며, VLA를 이용한 학습기반 방식과 적응형 정형작업의 조합으로 비정형적인 건설 현장에 로봇을 도입할 수 있을 것임.

- 향후, 대한민국 건설산업이 로봇과 관련하여 경쟁력을 갖추기 위해서는 다음의 사항이 필요함.
  - 장기적/공격적 R&D 투자: 실패의 용인을 기반으로 창의적이고 도전적인 연구 장려(연구 수행 중 기술/환경 변화에 따른 연구 목표 및 내용 수정 허용 포함)
  - 로봇 실증/실용화를 위한 정책, 가이드 마련 및 규제 개선: 규제 Sandbox 적용을 넘어 국토교통부 내 규제, 관련 부처간 적극적 협의를 통한 규제 개선 및 건설산업에 특화된 로봇 정책 및 가이드 마련
  - 대학·기업·정부 간 협력 플랫폼 구축: 산학연관이 협력할 수 있는 연구, 실증 및 상용화 플랫폼 마련
  - 원천 기술/데이터 확보 전략: 건설로봇 원천기술 확보, Physical AI 등의 개발을 위한 데이터 수집 및 공유체계 마련

- 건설 로봇은 이제 가능성의 단계가 아니라 산업의 생존과 경쟁력을 좌우하는 미래 핵심기술임을 인지하고, 국내 건설산업의 한계점 극복 및 글로벌 경쟁력 확보를 위한 노력이 필요함.