

## 모든 산업이 주목하는 범용 Physical AI The Humanoid

### AI 로봇틱스 기술의 현황과 과제: Physical AI

로봇틱스 분야의 최대 화두는 단연코 Physical AI다. 일론 머스크는 몇 년 전 부터 Physical AI를 Real World AI 라고 소개 해왔고, 업계에서 Embodied AI라고도 인식되고 있다. 쉽게 풀이하면 실체가 있는 AI, 물리적인 환경과 상호작용하는 AI다. 빅테크가 Physical AI 에 대해서 관심을 갖는건 소프트웨어를 넘어 하드웨어의 영역까지 사업 분야를 확장시킬 수 있는 유의미한 기회가 보이기 때문이다.

Physical AI는 기계 업종의 고도화/지능화/소프트웨어화를 의미하며, 시장에서 발견되는 핵심 투자 기회 중 하나라고 판단된다. 따라서 로봇틱스의 다양한 분야 기술 트렌드에 대한 이해를 높이는 것에 충분한 가치가 있을 것으로 본다.



하나증권 리서치센터  
미래산업/미드스몰캡  
박찬솔 연구위원

## 휴머노이드 AI: 궁극의 Physical AI

Physical AI는 물리적인 지능을 가지고 있는 AI를 뜻한다. 물리적인 지능을 가지려면 물리적인 상호작용이 필수가 되고, 그것에 최적화되어 있는 것이 로봇이다. 그리고 로봇 중에서도 지능화하기 가장 용이한 것이 휴먼 폼팩터를 가지고 있는 휴머노이드이다. 결국 기계/로봇릭스도 사람이 걷는법, 뛰는법, 춤추는법, 생각하는 법을 가르쳐야만 똑똑해질 수 있기 때문이다. 운동능력에 관해서는 사람은 사람과 같은 형태를 가르치는 것이 가장 쉽다.

Physical AI를 이해하기 위해서는 Semantic AI와 구분할 필요가 있다. 아직 정의가 업계에서 완전히 정립되지 않은 개념이기 때문이다. Semantic AI란 LLM, VLM(Vision-Language Model) 등을 활용하며 '인지(Cognition)'와 '조정(Coordination)'의 영역을 다룬다. 이는 주로 소프트웨어와 데이터에 기반 한다. Physical AI(피지컬 AI)는 물리 법칙(Physics), 제어(Controls), 계획(Planning)과 같은 하위 기술 영역을 포괄하며, 이러한 기술들은 로봇이 불확실성과 변동성이 큰 물리적 환경과 안정적으로 상호작용하기 위해 필수적으로 요구된다. 특히 '물리적 추론(physical reasoning)'을 위해 힘, 촉각, 온도 등 다양한 센서를 통한 물리적 피드백을 받는 것이 중요하다. Physical AI를 구현하려면 VLA만으로는 로봇이 물리적 세계와 완벽히

상호작용할 수 없으며, '물리적 지능'이 필수적이다. 이는 인간의 '자동 반사(Reflex Mechanism)'에 비유할 수 있다. 모든 행동을 계획(Planning)에만 의존하면(수백 ms 소요) 물리적 환경의 급변성에 대응할 수 없으므로, 센서 피드백을 통해 10ms 단위로 반응하는 반사적 기능(Reflex layer)이 반드시 구현되어야 한다.

## 휴머노이드의 기술의 발전

휴머노이드는 2021~2022년 테슬라 CEO 일론 머스크가 기술 실현 가능성을 언급하면서 관심이 높아졌다. 휴머노이드가 가능해진 배경에는 배터리 기술력 발전, 전기차 판매량 확대(휴머노이드가 전기차와 부품 40% 수준 공유) 등 여러가지 이유가 있겠지만, 가장 핵심적인 이유는 멀티모달 모델의 출현/발전 때문으로 보고 있다. 가장 유명한 멀티모달 AI는 모델의 파라미터 수가 인간 두뇌의 시냅스 수(약 100조 개)에 근접할 때 인간 수준의 지능이 발현된다는 '규모의 법칙'을 주장하는 OpenAI의 ChatGPT이다.

이런 거대 멀티모달 모델이 추구하는 방향이 별도의 특수 프로그래밍 없이도, 인간의 시연(human demonstration) 비디오 학습만으로 습득한 물리적 상식을 로봇의 'end-to-end' 동작으로 즉시 전이(transfer)가 가능한 쪽으로 발전되고 있다는 것에 의미가 있다.

이런 관점에서 생각해보면 2021년 8월 Tesla에서 보여준 Optimus 마네킹 춤은 약 4년 뒤에 있을 teaser였던 것으로 보인다. 일론 머스크는 멀티 모달의 발전 방향성과 인간 운동 영상을 통해서 학습될 휴머노이드들에 대한 비전이 2021년에 이미 정립되어 있었다고 볼 수밖에 없다. 이제 춤뿐만 아니라 휴머노이드 밸류에이션에 중요한 정교한 작업 여부와 이에 해당하는 기술에 주목해야 한다. 결국 손을 활용해 범용성 확보하는 기술이다. 휴머노이드 경우에도 자율주행과 마찬가지로 센서 퓨전을 통해서 다양한 Real World Data 인풋이 필요하다. 하지만 이것만으로는 방대한 양의 데이터를 구축하기 매우 어렵다. 현재 휴머노이드의 단가와 물리적인 데이터를 모으는데 24시간이라는 현실적인 시간 제약이 있기 때문이다. 따라서 업계에서는 물리 환경 시뮬레이션에 그 중 Real World Data를 빠르게 모으는 방법에 가장 관심이 높다.

(좌)춤추는 Optimus 마네킹(2021년 8월), (우)춤추는 Optimus(2025년 5월)



## 휴머노이드가 꿈 속 이야기라도 좋다. 엔비디아 드림젠(SW)이 있으니까

결국 Nvidia 드림젠(DreamGen)에 주목할 필요가 있다. 핵심은 제로샷 일반화다. 제로샷이라고 하면 한번의 작업으로 한번도 해본적 없는 유사한 작업들을 할 수 있게 되는 것을 의미한다. 현재 엔비디아는 로봇 파운데이션 모델 Isaac Groot에 드림젠(DreamGen)을 적용해서 로봇 훈련을 가능케 하고 있다.

『드림젠, 합성 로봇 데이터를 생성하는 4가지 파이프라인 기술』

단계	파이프라인	세부기술
1단계	비디오 월드 모델 미세조정 (Finetune Video World Model)	- 사전 훈련된 대형 비디오 생성 모델을 대상 휴머노이드의 소규모 실제 원격조작 데이터에 영향을 주고 미세조정한다.
2단계	비디오 월드 모델 롤아웃 (Rollout Video World Model)	- 미세조정된 모델에 '초기 프레임(Initial Frame)'과 새로운 자연어 명령을 입력한다. - 모델은 이 명령을 바탕으로, 훈련 데이터에는 존재하지 않았던 새로운 행동을 수행하는 로봇의 합성 비디오(synthetic videos)를 생성한다.
3단계	유사 행동 라벨링 (Label Pseudo Actions)	- 2단계에서 생성된 비디오는 시각적 픽셀 정보일 뿐, 로봇을 제어하기 위한 실제 '행동(action)' 데이터(예: 관절 토크, 속도)가 없다. - 따라서 IDM/LAPA를 통해서 행동을 역추적하는 라벨링 기술을 사용한다(확정된 운동 영상값과 둘 사이의 물리적인 환경 변화를 운동값으로 추정/변환 시키는 모델)
4단계	시각-운동 정책 훈련 (Visuomotor Policy Training)	- 3단계에서 생성된 (합성 비디오, 유사 행동) 데이터 쌍을 '신경 궤적(Neural Trajectories)'이라 칭한다. - 이 대규모 합성 데이터셋을 사용하여 최종적으로 로봇의 시각-운동 정책(예: GROOT N1)을 훈련시킨다.

## 드림젠의 중요성과 함의

드림젠은 로봇 학습의 패러다임을 전환할 수 있는 강력한 일반화 성능을 가지고 있다. 말 그대로 Dream Generator다. 운동선수가 꿈에서 다양한 움직임에 대해서 이미지 트레이닝을 할 수 있도록 돕는 것과 같다. 그리고 그 꿈을 행동(Torque 값)으로 변환할 수 있는 tool을 제공하고 있다. 단 하나의 '집기' 작업 데이터로만 훈련된 GR1(휴머노이드 로봇)이, DREAMGEN을 통해 생성된 합성 데이터를 학습하여 훈련 데이터에 전혀 없던 22가지의 새로운 행동(예: 물 붓기, 망치질하기, 다림질하기, 노트북 열기)을 성공적으로 수행하는 성과를 보인다.

또한 환경 일반화 (Environment Generalization)가 가능하다. 단 하나의 실험실 환경에서 수집된 데이터로 미세조정된 모델이, 한 번도 본 적 없는 10개의 새로운 환경이 담긴 초기 프레임을 입력받았을 때도 성공적으로 작업을 수행하는 정책을 훈련해냈다. 또 데이터 증강(Data Augmentation)도 할 수 있다. 기존의 적은 양의 실제 데이터와 '신경 궤적'을 1:1 비율로 혼합 훈련(co-training)했을 때, 모든 로봇(GR1, Franka, SO-100)과 모든 정책 모델(DP,  $\pi$ , GROOT N1 등 여러 RFM)에서 일관되게 성공률이 향상되었다 (예: GR1 평균 37.0% → 46.4%).

## VLA(SW) 모델(Groot N1, Helix 등 Robot Foundation Model)

VLA (Vision Language Action) 모델은 Physical AI를 구현하는 핵심 SW 기술이다. Figure AI의 'HELIX' 모델이 VLA의 좋은 예시이다. VLA는 기존 VLM(LLM의 비디오 버전)에 'ACTION 트랜스포머'를 추가한 모델이다. HELIX는 'System 2' (7B VLM, 의미론적 추론)가 "버터를 집어 왼쪽 로봇에게 건네라"는 텍스트 명령을 이해하고, 'System 1' (80M 트랜스포머, 빠르고 반응적인 제어)를 함으로써 실제 로봇 동작으로 신속하게 번역하여 실행하는 2단계 구조를 갖는다. VLA는 휴머노이드가 카메라 등 센서로 물리적인 환경/상황을 판단하고 자연어 명령에 따라서 행동하는 일련의 과정을 가능케 하는 시스템이다.

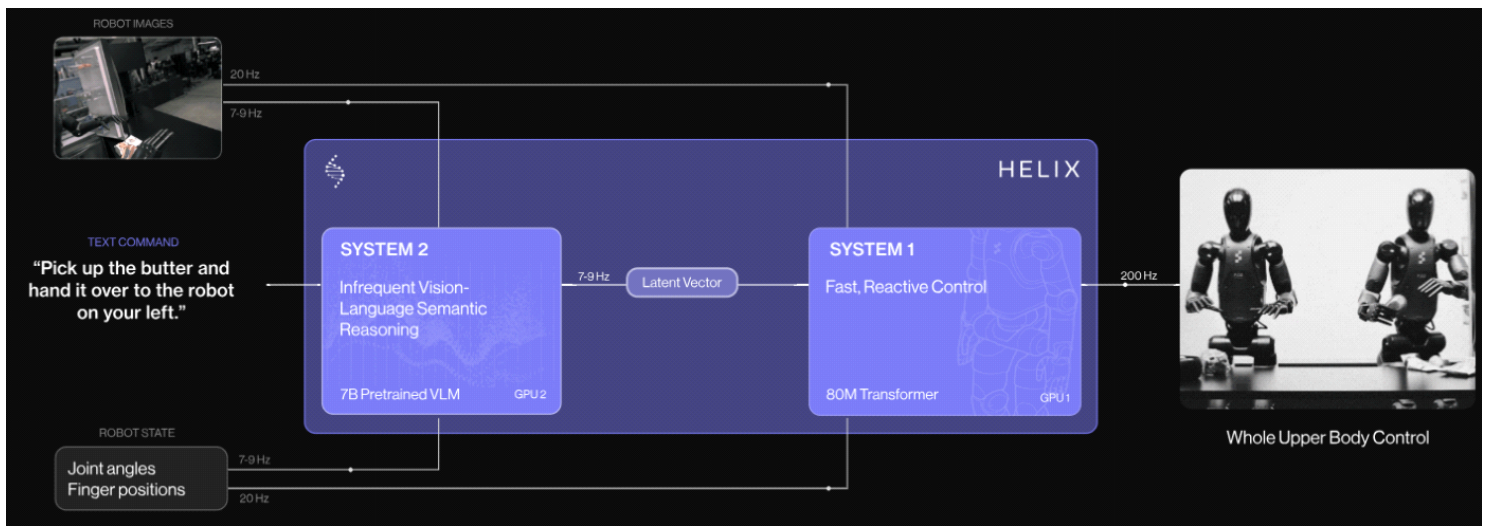


Figure AI의 Helix 모델

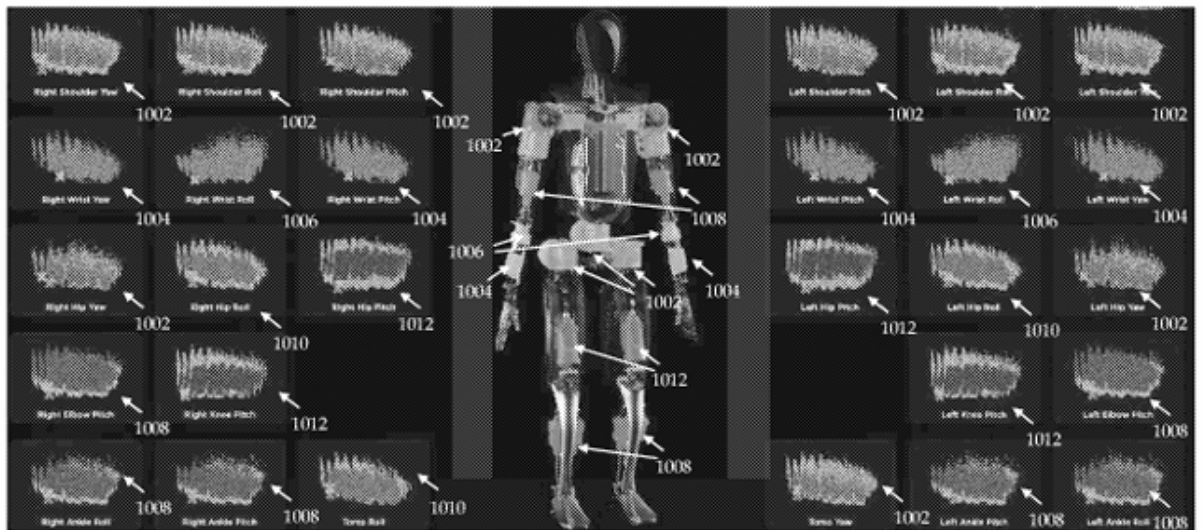
## 휴머노이드 HW 핵심 기술

휴머노이드 기술에 하드웨어도 핵심적인 부분을 차지한다. 휴머노이드 글로벌 리더 테슬라(Optimus)의 기술 접근 방식을 핵심 사례로 소개하겠다. 테슬라는 로봇의 모든 관절 움직임을 분석하여, 각기 다른 액추에이터를 설계하는 대신 '6가지 고유 디자인' (로터리 3종, 리니어 3종)으로 액추에이터 포트폴리오를 표준화했다. 이는 비용 대비 질량(Mass vs. Cost) 분석을 통해 최적화된 설계이며, 양산성을 극대화하는 핵심 전략으로 평가된다. 휴머노이드 기술의 가장 큰 난제(Bottle Neck)는 손을 만들 때 정교함(사이즈 등)과 힘(Torque 값 등) 사이에서 최적의 균형이 어딘지를 찾아내는 것이다.

손을 이야기하기에 앞서 휴머노이드의 관절과 손을 구성하는 액추에이터 기술에 대해서 다룰 필요가 있다. 손 기술 영향을 주는 기술이기 때문이다. 휴머노이드 로봇의 복잡한 움직임을 제어하기 위해, 액추에이터를 기능과 위치에 따라 6가지 유형으로 표준화하고 배치하는 시스템을 테슬라는 제안했다. 특히 각 관절/손이

수행 기능(모든 가동 범위)에 맞춰서 수학적 모델링을 했다는 점이 인상적이다. 최적화된 모델을 찾기 위해서 질량 vs. 토크 vs. 비용 분석을 진행했으며, 최적의 액추에이터 6종을 제시했다. 핵심 기술은 특정 관절의 토크 및 속도 요구사항을 분석하고, 이를 시스템 비용 및 액추에이터 질량과 연관시켜 최적화된 액추에이터 유형을 선택하는 설계 방법론(Methodology)에 있다.

예를 들어, 1형 액추에이터(1002)는 높은 토크가 요구되는 몸통, 어깨, 엉덩이에, 4형(1008)은 팔꿈치와 발목에, 6형(1012)은 무릎과 엉덩이에 배치된다. 이 시스템은 로터리 및 리니어 액추에이터를 모두 포함하며, 모터, 배터리, 프로세서 및 통신 백본과 연결되어 로봇의 통합 제어를 가능하게 하는 것까지 고려된 설계다.



Optimus 관절별 액추에이터 타입

## 언더액추에이티드 핸드(케이블 구동식 손가락)

휴머노이드 핸드는 아직 여러 업체들이 개발 단계에 있고, 한가지 방법만 있는 것이 아니다. 다만 테슬라가 가장 먼저 풀바디를 개발하기 시작했고, 업계의 표준이 될 가능성도 있는 만큼, 테슬라의 Optimus Hand에 대해서 다루려고 한다.

### 케이블 구동 기술

로봇 손의 효율적인 파지(grasping)를 위해서는 '언더액추에이티드(underactuated)' 손가락 기술이 매우 중요하다. 핵심 기술은 단일 액추에이터가 케이블(416)을 당겨 근위부(402)와 원위부(408) 두 개의 관절을 동시에 구동하는 구조에 있다. 주요 기술적 특징은 이 구조에서는 케이블(416)을 관절의 피벗(406, 414) 둘레로 감지 않고, 피벗과 분리된 경로로 배치하는 점이다. 케이블은 원위부(408) 내부의 채널(428)이나 포켓(518) 안에서 고정되지 않고 '플로팅(floating)' 상태로 존재한다.

액추에이터가 케이블을 당기면, 이 끝단(420)이 원위부 내부의 렛지(ledge) 구조물(430)과 맞물려 손가락을 굽히게 된다. 이러한 설계는 관절이 굽혀짐에 따라 케이블과 피벗 사이의 거리가 더 멀어지게 되며, 굽힘 각도가 커질수록 더 큰 토크를 전달할 수 있게 한다(볼트를 조일 때 짧은 렌치를 사용하면 같은 손힘으로 더 세게 볼트를 조일 수 있는 것과 같은 원리). 또한, 손가락에 기어박스가 아니라 핑거 자체의 구조를 통해서 토크를 조정할 수 있도록 손가락 각도와 케이블 경로를 세밀하게 디자인 하는 것이 필요하다.

### 플로팅 케이블 메커니즘 기술

케이블이 관절의 피벗(축)을 감싸지 않으면서, 플로팅하는 메커니즘도 손가락 기술 중 하나다. 케이블이 원위 지절간관절(먼쪽 손가락뼈 사이관절)에 제대로 부착될 수 있도록 케이블이 끝부분에 두꺼운 특수 처리가 필요하다. 피벗에 케이블이 속박되어 있지 않은 상태이기 때문에 직접 고정되는 형태는 아니지만 구조를 통한 고정력을 확보하기 위한 조치로 볼 수 있다.

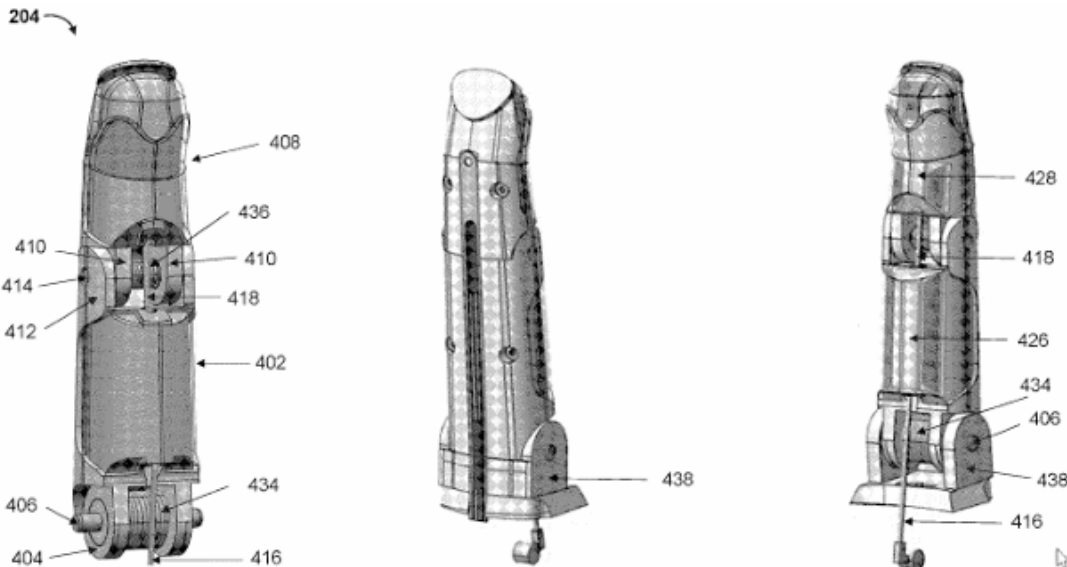
### 관절 위치 센싱

관절의 회전각을 실시간 파악하기 위해서 각 손가락 피벗 구조에 자석을 결합하고 이 자석과 근접한 위치에 홀 효과 센서를 부착한다. 손가락이 굽혀지면서 피벗이 자석을 회전시키고, 회전으로 인한 자기장으로 감지해서 관절의 위치나 회전각을 모니터링하는 기술이 정교한 동작 구현에 필수적이다.

### 토션 스프링 Maintenance

토션 스프링은 손가락의 안정적인 움직임과 위치를 유지시키게 돕는 스프링이다. 각 손가락은 첫 번째 피벗(406) 주위에 배치된 '제1 토션 스프링'(434)과 두 번째 피벗(414) 주위에 배치된 '제2 토션 스프링'(436)을 포함해야한다. 스프링은 기계적 강성을 부여하고, 물체를 파지할 때 안정성을 높이며, 구동시 백래시(backlash)를 방지하는 역할도 한다. 백래시는 손가락이 기어형태/케이블 형태이던 손가락 사이에는 힘이 가해지면서 미세한 느슨함이 생길 수 있다. 이런 유격 문제로 파지 상태에서 미세하게 손이 흔들리는 것을 뜻한다. 토션 스프링을 사용함으로써 항상 손가락 간격을 긴장감 있게 유지시켜준다는 점에서 꼭 필요한 기술이다.

Optimus 손가락 외부 구조



### 국내 기업별 핵심 기술 현황

대한민국은 매우 다양한 형태의 로봇틱스 업체들을 보유하고 있다. 산업/협동/AMR/소프트웨어/부품/의료/교육/유틸리티 분야에 속한 로봇틱스 기업들이다. 국내 로봇틱스 산업의 주요 기업들을 휴머노이드 플랫폼, 부품, 소프트웨어 등 잠재적 기여자로 분류하며, 각 상장사의 핵심 보유 기술을 다음과 같이 분석한다.

#### 국내 기업별 핵심 기술 및 사업 설명

기업명	핵심기술 및 제품	기술 및 사업 설명
로보티즈	로봇 전용 액추에이터 '다이나믹셀'	- 제어가·감속기·통신 기능 통합 올인원 모듈 - 자율주행 배송로봇 '개미'와 휴머노이드 'AI 워커'의 핵심적 기반 - 향후 중앙아시아 생산 거점을 통해 휴머노이드 및 자율주행 로봇의 '데이터 팩토리' 역할 기대
레인보우로보틱스	이족보행 로봇 'RB-Y1', HUBO 기반 기술	- KAIST의 HUBO 기술을 기반으로 한 이족보행 로봇 상용화 기술 - 핵심 부품의 높은 내재화율과 삼성전자의 투자로 글로벌 수준의 휴머노이드 기술 개발 주도
두산로보틱스	협동로봇 시리즈	- M, A, H, E, P 등 다양한 협동로봇 시리즈 보유 - 공항 수하물 처리, F&B 등 특정 산업에 최적화된 애플리케이션 솔루션에 강점
하이젠알앤엠	산업용 모터 및 액추에이터	- 서보모터, 협동로봇용 저전압 모터, 로봇용 액추에이터 등 고성능 모터 솔루션 보유 - 차세대 'QDD' 액추에이터와 'Axial Flux 모터' 개발 중
유일로보틱스	사출성형 자동화 시스템	- 국내 상장사 중 유일하게 직교로봇, 다관절로봇, 협동로봇 라인업을 모두 보유 - 최근 휴머노이드 분야 진출 선언
에스피지	정밀 감속기 하모닉 드라이브	- 로봇 정밀 제어용 감속기 국산화 기술 확보 - 레인보우로보틱스 휴머노이드용 전용 감속기 공급 중
클로봇	로봇 관리 소프트웨어 플랫폼	- 'CROMS'(이기종 로봇 통합관리), 'CHAMELEON'(범용 자율주행) 등 다양한 소프트웨어 보유 - 보스턴다이나믹스 '스팟' 등 다양한 하드웨어에 탑재되어 자율주행 및 관리 기능 제공
큐렉소	의료 수술로봇 큐비스-조인트	- 인공관절 수술로봇으로, 다양한 임플란트 제조사 제품과 호환 가능한 개방형 플랫폼 - 높은 정렬 정확도 확보
엔젤로보틱스	웨어러블 로봇	- 하지 재활용 '엔젤 메디', 일상 보조용 '엔젤 슈트', 산업용 근력 보조 '엔젤 기어' 등을 보유 - 균형·보행 제어 기술을 국방·피트니스 분야로 확장 중
씨메스	인공지능 기반 3D 비전 기술	- 비정형적 투명 물체 인식 및 집기 기술(픽 앤 플레이스)에 강점 - 물류센터 디팔레타이징 공정에 적용
뉴로메카	협동로봇 '인디' 시리즈	- 협동로봇 기반 자동화 솔루션 기업, 가격 경쟁력 확보에 주력. 이동형 양팔 협동로봇 개발 중
티코로보틱스	반도체, 디스플레이용 진공 로봇	- 진공 이송 모듈 기술 기반 - 2차전지 및 스마트팩토리용 자율주행 물류로봇으로 사업 확장 중
에브리봇	가정용 로봇청소기	- 물걸레 로봇청소기 기술 보유 - 자율주행 플랫폼 기업 '하이코어' 인수를 통해 공항 병원용 자율주행 활체어 신사업 진출
에스비비테크	정밀 하모닉 감속기	- 국내 최초 로봇용 하모닉 감속기 국산화 성공. 방위산업 분야 레퍼런스 확보
케이엔알시스템	유입식 정밀제어 로봇	- 원전 해체, 수중, 용광로 등 고위험 환경용 특수 로봇 제작 - 과거 보스턴다이나믹스 '아틀라스' 로봇에 부품 공급 이력 보유