

Robotics

응용로봇공학및설계

Chapter 1

개론 (Introduction)

1.1 개요 ~ 1.9 기타 로봇의 분류

Department of Control & Instrumentation Engineering
Pukyong National University, Busan, Korea

pnj@pknu.ac.kr

Orientation. 학기 강의 일정

주	날짜(목)	주제	비고
1	09/03	수업 소개 (오리엔테이션)	
2	09/10	개론 (Ch.1)	
3	09/17	위치와 방향 (Ch.2)	HW#1
4	09/24	휴강 (추석)	
5	10/01	기구학: DH 표기법 (Ch.3)	
6	10/08	순기구학 (Ch.3)	HW#2, Quiz#1
7	10/15	역기구학 (Ch.4)	
8	10/22	중간고사 (필기, Ch.1~4)	
9	10/29	자코비안, 힘과 토크 (Ch.5~6)	
10	11/05	Term Project 기법 서베이, 팀 구성	
11	11/12	로봇 동역학 (Ch.7) + 실습	HW#3
12	11/19	중간발표 (Quiz#2 대체)	
13	11/26	궤적 계획, PID 제어 (Ch.8~9) + 실습	HW#4
14	12/03	계산토크, 작업공간 제어 (Ch.9) + 실습	
15	12/10	휴강 (보강주)	
기말	12/17	기말발표 (Term Project)	

Textbook. 전체 차례 (Ch.1 ~ Ch.10)

Ch.1 개론 (Introduction)

Ch.2 위치와 방향

Ch.3 기구학 (DH 표기법)

Ch.4 역기구학

Ch.5 속도 기구학 (자코비안)

Ch.6 로봇 정역학

Ch.7 로봇 동역학

Ch.8 궤적 계획

Ch.9 로봇 제어

Ch.10 컴퓨터 비전 · AI 제어

Chapter 1. 개론: 절 구성

1.1 개요

1.2 로봇의 정의

1.3 로봇의 역사

1.4 로봇의 응용 분야

1.5 로봇의 분류

1.6 산업용 로봇의 구조

1.7 로봇의 구동장치

1.8 작업 영역과 형상 분류

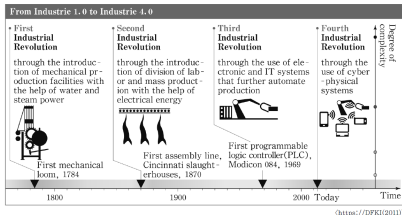
1.9 기타 로봇의 분류

심화 Physical AI: 데이터로 배우는 로봇 (1.9 뒤 7쪽)

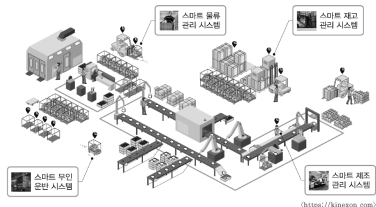
4차 산업혁명과 로봇

▶ 4차 산업혁명: 지능화와 자동화의 중심에 선 로봇

- ▶ 4차 산업혁명: 사이버-물리 시스템(CPS)·IoT·인공지능의 융합으로 생산과 서비스가 **지능화·자동화**된다.
- ▶ 로봇은 **스마트 팩토리**의 핵심 요소이며 제조·물류·검사를 유연하게 자동화한다.
- ▶ 한국은 제조업 **로봇 밀도** 세계 최고 수준(직원 1만명당 1,000대 이상, IFR)이다.
- ▶ 지능화의 다음 단계는 로봇이 사람이 짠 프로그램이 아니라 데이터로 배우는 것이다. 이 장 마지막 심화에서 다룬다.



[그림 1.1] 4차 산업혁명(Industry 4.0)

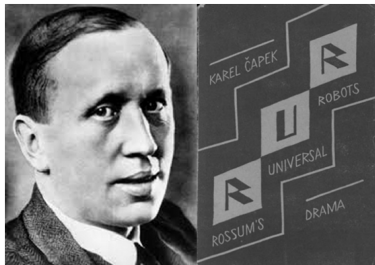


[그림 1.2] 스마트 팩토리 개념도

로봇(Robot)이라는 말의 기원

▶ 어원: 1920년 카렐 차펙의 희곡 R.U.R.에서 출발

- ▶ 체코 작가 카렐 차펙의 희곡 R.U.R.(1920)에서 "로봇"이 처음 등장했다.
- ▶ 어원은 체코어 **robota** 이며 "노동(고된 일)"을 뜻한다.
- ▶ 오늘날 로봇은 감지 → 판단 → 구동을 스스로 수행하는 기계로 정의된다.



[그림 1.3] 카렐 차펙과 소설 R.U.R.

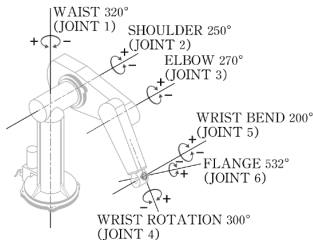
[ISO 8373]

2축 이상을 프로그래밍할 수 있고
자율성을 가지며, 환경 속에서 이동하며
정해진 작업을 수행하는 작동 메커니즘.

로봇의 역사 ①: 자동기계에서 산업용 로봇으로

▶ 자동기계(오토마타)에서 산업용 로봇으로

- ▶ 고대·근대: 헤론의 자동기계(BC 1C), 보캉송의 “자동 오리” 등 오토마타로 출발.
- ▶ 현대의 출발: 1946년 조지 데볼이 마그네틱 테이프 제어 방식을 제안·고안.
- ▶ 1961년 GM에 설치된 유니메이트(Unimate)가 세계 최초의 실용 산업용 로봇이다.
- ▶ 1958년 Shakey(이동 로봇), 1973년 KUKA 파물러스(최초의 6축 로봇)로 발전.

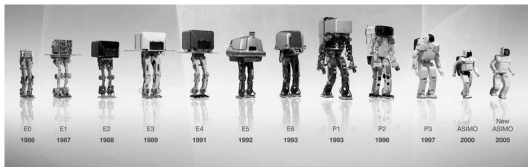


[그림 1.4] 유니메이션 사의 PUMA 500 로봇

로봇의 역사 ②: 휴머노이드와 보행 로봇

▶ 사람의 환경에서 걷고 움직이는 로봇으로

- ▶ 1986년 혼다가 직립보행 연구 시작 → 1997년 P2, 2001년 아시모(ASIMO).
- ▶ 보스턴 다이내믹스: 2005년 4족 보행 빅독(BigDog), 2017년 아틀라스(Atlas).
- ▶ 국내에서는 KAIST가 이족보행 휴머노이드 휴보(HUBO)를 개발했다.



[그림 1.5] 혼다 ASIMO의 변천



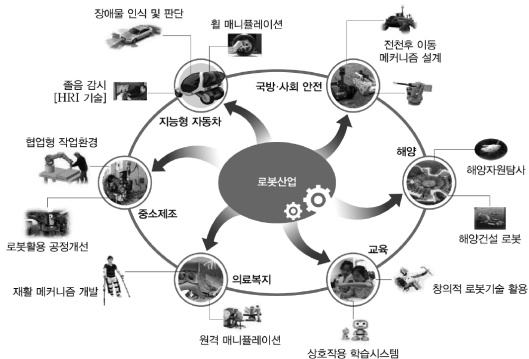
[그림 1.6] 빅독·아틀라스

[흐름] 고정된 공장의 팔에서 **사람의 공간에서 걷는 로봇**으로 옮겨 가면서 이동성과 균형 제어가 새로운 과제가 되었다.

로봇의 응용 분야

▶ 제조를 넘어 생활 전반으로: 로봇 산업의 확산

- ▶ 지능형 자동차·국방·의료복지·중소제조·해양·교육으로 적용 분야가 넓어진다.
- ▶ 제조 현장을 넘어 **협동·재활·서비스 로봇**으로 범위가 빠르게 확대된다.



[그림 1.7] 로봇의 응용 분야

로봇의 분류 ①: 산업용 · 의료용 로봇

▶ 용도에 따른 분류 ①: 제조 현장과 의료 현장

- ▶ 산업용 로봇: 조립·용접·도장·이송 등 제조 공정을 자동화한다.
- ▶ 의료용 로봇: 수술·재활·간호·이송 등 의료 서비스를 지원한다.



[그림 1.8] 자동차 생산 산업용 로봇



[그림 1.9] 다빈치(Da Vinci) 수술 로봇

[관점] 같은 매니플레이터라도 용도에 따라 요구되는
정밀도·안전성·위생 조건이 달라진다.

로봇의 분류 ②: 군사용 · 가사용 로봇

▶ 용도에 따른 분류 ②: 가혹 환경과 생활 공간

- ▶ **군사용**: 지뢰제거·정찰·감시 등 가혹 환경에서 **내구성·험지 이동**이 관건.
- ▶ **가사용**: 청소·조리·반려 등 가정 지원으로 **자율주행·환경인식·HRI**가 핵심.



[그림 1.10] 물품을 이송하는 Boston Dynamics LS3



[그림 1.11] 가사 일을 돕는 로봇

[공통 요구] 두 로봇 모두 **사람과 같은 공간**에서 움직이므로 안전성과 환경 인식이 설계의 출발점이다.

로봇의 분류 ③: 우주 · 인간형 · 생체모방형

▶ 특수 환경과 생체 모방: 형태로 본 확장

우주용



[그림 1.12] 화성 탐사 로봇
원격제어 · 특수 보호장치.
행성 탐사 · ISS 유지보수.

인간형(휴머노이드)



[그림 1.13] 휴머노이드 로봇
인간의 행동을 모사.
ASIMO · Atlas · HUBO 등.

생체모방형



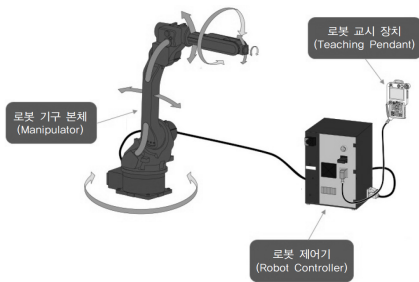
[그림 1.14] FESTO 개미 로봇
동물 · 곤충의 구조와 구동
메커니즘을 모방(Bio-inspired).

[다음] 로봇은 용도뿐 아니라 **형상 · 구동방식 · 이동성**으로도 분류된다(1.8, 1.9절).
여기까지가 로봇을 **밖에서** 본 것이다. 이제 시선을 안으로 옮겨, 산업용 로봇이
무엇으로 이루어져 있고 무엇이 그 팔을 움직이는지 본다(1.6, 1.7절).

산업용 로봇의 구성 요소

▶ 산업용 로봇의 3대 구성: 본체 · 제어기 · 교시 장치

- ▶ **기구 본체(Manipulator)**: 링크와 관절로 이루어진 팔(Arm).
- ▶ **제어기(Controller)**: 운동을 계산하고 각 관절에 지령을 내리는 두뇌. 이 두뇌가 실제로 무엇을 계산하는지는 이 장 마지막 심화에서 계층도로 펼쳐 본다.
- ▶ **교시 장치(Teaching Pendant)**: 작업자가 동작을 직접 입력·교시하는 조작기.

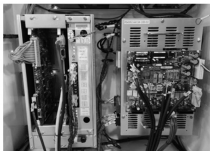


[그림 1.15] 산업용 로봇의 구성 요소

제어기(Controller)와 교시 장치(Teaching Pendant)

▶ 로봇의 두뇌와, 사람이 동작을 가르치는 입력 장치

- ▶ **제어기**: 각 관절 모터의 지령을 계산·출력하는 두뇌(서보 드라이브·제어 보드). 데이터로 배우는 로봇에서도 이 제어 단계는 그대로 남는다(장 마지막 심화).
- ▶ **교시 장치**: 로봇 자세를 직접 옮겨 동작을 **교시·저장·재생**하는 휴대형 조작기. 사람이 로봇을 직접 움직여 동작을 가르치는 이 방식이, 장 마지막 심화에서 볼 로봇 학습 데이터 수집(텔레오퍼레이션)의 원형이다.



[그림 1.17] 현대로보틱스 Hi5a 제어기의 외부·내부



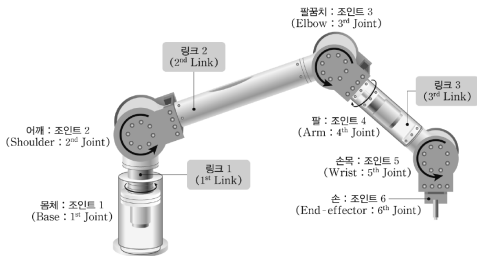
[그림 1.18] Hi5a의 티칭 펜던트와 화면 인터페이스

[현장 운용] 교시 장치로 동작을 가르치고, 제어기가 이를 반복 재생한다.

기구 본체: 링크(Link)와 관절(Joint)

▶ 링크와 관절, 그리고 자유도(DOF)

- ▶ 링크: 몸체 · 팔꿈치 · 손목을 잇는 강체 막대.
- ▶ 관절: 링크를 잇는 회전/직동 연결부이며 각 관절이 **자유도(DOF)** 1을 담당한다.
- ▶ 대표적 산업용 로봇은 **6축(6-DOF)**으로 임의의 위치·자세에 도달할 수 있다.



[그림 1.16] 산업용 로봇의 구조(링크·관절)

[다음 예고]

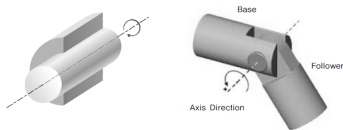
관절 파라미터의 체계적 표현은
Ch.3 DH 표기법에서 다룬다.

관절의 종류: 회전 관절과 직동 관절

▶ 운동 형태에 따른 두 가지 관절: 회전(R) · 직동(P)

- ▶ 두 링크를 잇는 관절은 **회전(revolute, R)**과 **직동(prismatic, P)**으로 나뉜다.
- ▶ 각 관절이 **자유도 1**을 담당하며, 그 조합이 로봇의 형상을 결정한다.
- ▶ 각 관절에는 회전각을 읽는 센서(**엔코더**)가 붙어 현재 자세를 되먹인다.

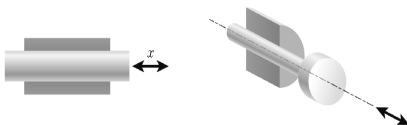
회전 관절 (R)



[그림 1.33] 로봇의 회전 관절

축을 중심으로 **회전** 운동. 관절 변수는 **각도 θ** .

직동 관절 (P)



[그림 1.34] 로봇의 직동 관절

축을 따라 **직선(병진)** 운동. 관절 변수는 **길이 d** .

[R 과 P 의 조합] 관절 종류의 조합이 로봇의 **형상과 작업 영역**을 결정한다 (1.8절).

구동장치(Actuator)의 종류: 전기 · 유압 · 공압

▶ 세 가지 구동 방식의 장단점 비교

구분	전기	유압	공압
구조	간단	복잡	복잡
가격	저가	고가	중가
출력	소출력	대출력	고출력
발열	약간 정도	큼	없음
부하 안전성	과부하에 민감	과부하에 강인	과부하에 매우 강인
응답성	보통~상	매우 좋음	나쁨
정확성	높음	보통	낮음
반복성	좋음	좋음	나쁨

[선택 기준] 정밀 위치 제어가 필요한 관절에는 **전기식(모터)**이 표준. 큰 힘이 필요하면 **유압**, 단순 개폐/파지에는 **공압**이 유리.

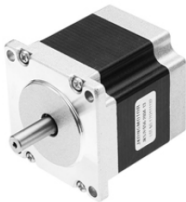
전기식 구동: 모터와 회전 원리

▶ 로봇 관절의 표준 구동원: 전기 모터

- ▶ 로봇 관절에는 DC/AC·스테핑 모터를 쓰고, 최근에는 BLDC가 널리 쓰인다.
- ▶ 회전 원리(로렌츠 힘): 자기장 B 속 도체에 전류 I 가 흐르면 $F = I \times B$.
- ▶ BLDC는 브러시·정류자를 없애고 전자적으로 정류해 마모·소음이 적다.



DC 모터



스텝 모터

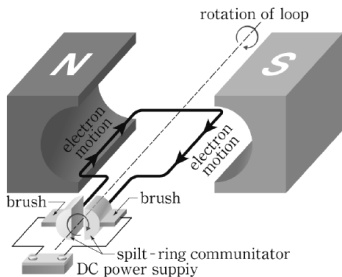


서보 모터

[그림 1.19] 로봇에 사용되는 모터

DC 모터의 회전 원리와 내부 구조

- ▶ 자석의 N극과 S극 사이 코일에 전류를 흘리면 **로렌츠 힘**으로 회전력이 생긴다.
- ▶ **정류자(commutator)**와 **브러시(brush)**가 반 바퀴마다 전류 방향을 뒤집어 주므로, 코일의 회전이 **한 방향으로** 지속된다.



[그림 1.20] DC 모터의 회전 원리 및 내부 구조(정류자·브러시·전기자)

기어박스(Gearbox)와 감속비(Gear Ratio)

▶ 기어박스: 회전수를 낮추고 토크를 키운다

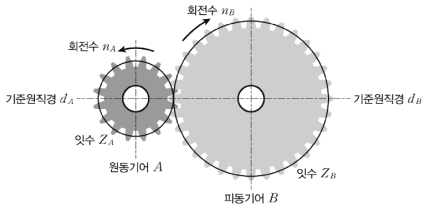
- ▶ 모터의 **높은 회전수**를 감속해 **큰 토크**로 바꾸어 관절을 구동한다.
- ▶ **감속비** N 은 잇수(또는 지름)의 비로 정해지고, 그만큼 출력 토크가 커진다.

$$N = \frac{n_A}{n_B} = \frac{Z_B}{Z_A} = \frac{d_B}{d_A}$$

$$\tau_{\text{out}} = N \tau_{\text{in}}$$



[그림 1.21] 서보 모터의 기어박스

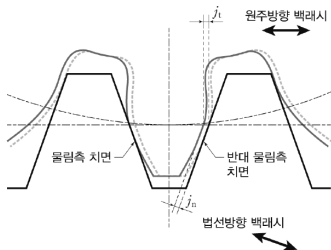


〈<https://khkgears.net/>, com〉

[그림 1.23] 기어의 회전비(Z : 잇수)

기어 백래시(Backlash)

- ▶ **백래시**: 톱니 사이의 틈이 위치 정밀도를 좌우한다
 - ▶ **백래시**: 맞물린 기어 톱니 사이의 **틈(유격)**을 말한다.
 - ▶ 틈이 크면 **소음·진동·마모**가 늘고 위치 정밀도가 떨어진다.
 - ▶ 정밀 위치 제어를 위해 로봇 관절에는 **저(低)백래시** 감속기가 필수다.



<https://khkgears.net/>

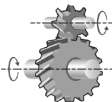
[설계 포인트]

로봇 관절에는 백래시가 거의 없는 **정밀 감속기(RV·하모닉)**가 필수.

[그림 1.22] 기어의 백래시(원주·법선 방향)

기어의 종류와 특징 ①: 평 · 헬리컬 · 베벨 기어

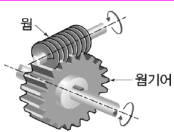
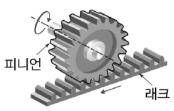
▶ 두 축이 평행하거나 직교할 때 쓰는 기어

종 류	모 양	축 관계 및 특징	용 도
평기어		• 두 축이 평행할 때 동력 전달	시계, 선반, 내연 기관 등
헬리컬 기어		• 두 축이 평행할 때 • 물림이 원활하여 소음이 적음	공작 기계, 내연기관 등
베벨 기어		• 두 축이 서로 직각으로 만날 때 • 회전 방향을 직각으로 바꿀 때	핸드 드릴, 자동차의 구동장치 등

[표 1.2] 기어의 종류와 특징 (1/2)

기어의 종류와 특징 ②: 웜 기어 · 래크와 피니언

▶ 두 축이 엇갈릴 때, 그리고 회전→직선 변환에 쓰는 기어

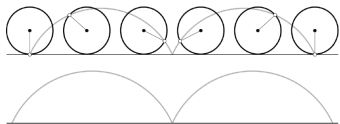
종 류	모 양	축 관계 및 특징	용 도
웜과 웜기어		• 두 축이 평행하지도, 교차하지도 않을 때 • 큰 감속도를 얻을 수 있음	감속 장치
래크와 피니언		• 두 축이 평행할 때 • 회전 운동을 직선운동을 회전 운동으로 바꿀 때	선반, 드릴링 머신, 사진기 등의 이송 기구

[표 1.2] 기어의 종류와 특징 (2/2)

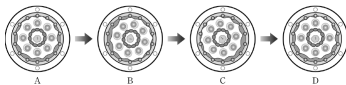
[기어 선택] 기어의 종류는 두 축의 상대 위치(평행·직교·엇갈림)와 필요한 감속비에 따라 결정된다.

정밀 감속기 ①: 싸이클로이드 감속기

▶ 편심판이 굴러가며 차동(差動)으로 감속하는 방식



[그림 1.24] 싸이클로이드 운동 곡선



[그림 1.25] 구동 원리(A→D)



[그림 1.26] 감속기·기어 구조

[싸이클로이드]

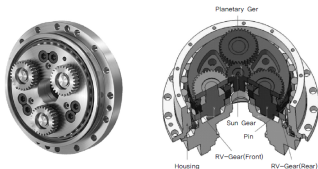
원이 굴러갈 때 원둘레 위 한 점이 그리는 자취.
이 치형(齒形)의 편심판이 굴러가며 감속한다.

[특징]

동시 맞물림 수가 많아 강성이 높고 과부하에
강함. RV 감속기의 기반이 되는 방식이다.

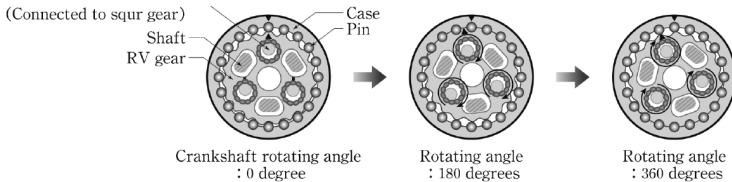
정밀 감속기 ②: RV 감속기

▶ 유성기어(플라노센트릭) + 싸이클로이드 치형의 고정밀 감속기



[특징] 강성이 높고 관성·백래시가 작아 가속 성능과 위치 정밀도가 우수하다. 산업용 로봇·공작기계의 대형·고부하 관절에 쓰인다.

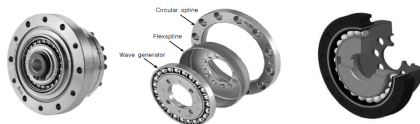
[그림 1.27] RV-N 감속기와 기어 구조



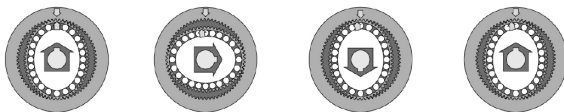
[그림 1.28] RV-N 감속기의 구동 원리($0^\circ/180^\circ/360^\circ$)

정밀 감속기 ③: 하모닉 드라이브(Harmonic Drive)

▶ 금속의 탄성을 이용하는 감속기: W/G · F/S · C/S 3요소



[그림 1.29] 하모닉 드라이브와 기어 구조

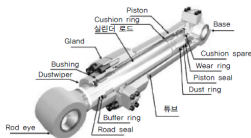


[그림 1.30] 하모닉 드라이브 구동 방식($0^\circ \rightarrow 360^\circ$)

[특징] 탄성체 F/S 변형으로 톱니수 차만큼 반대로 감속 → 소형·경량·고감속비·저백래시. 로봇 손목·소형 관절에 표준.

유압식 · 공압식 구동장치

▶ 유체의 압력으로 힘을 만드는 두 가지 구동 방식

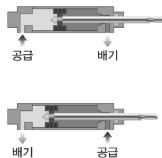
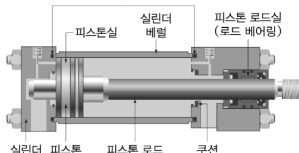


[그림 1.31] 유압 실린더의 구조

유압식(Hydraulic)

비압축성 유체로 **대출력·강한 힘**.

응답성은 우수하나 구조가 복잡하고
발열·누유 관리가 필요하다.



[그림 1.32] 공압 실린더의 구조

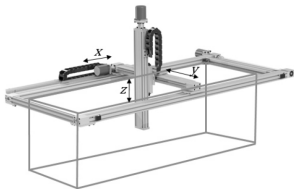
공압식(Pneumatic)

압축 공기를 사용해 **과부하에 매우 강인**하고 깨끗하나, 압축성 때문에
정밀 위치 제어는 어렵다.

로봇 형상에 의한 분류 ①: 직교좌표 · 원통좌표

▶ 관절 조합(P/R)이 작업 영역(work envelope)의 형태를 결정한다

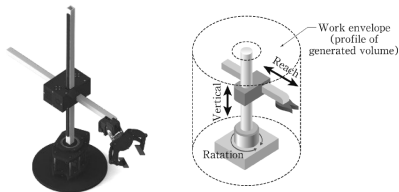
직교좌표형 (PPP)



[그림 1.35] 직교좌표 로봇과 작업 공간

직육면체 작업영역. 구조가 단순하고 정밀하나 설치 공간이 많이 필요하다.

원통좌표형 (RPP)



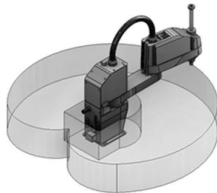
[그림 1.36] 원통좌표 로봇과 작업 공간

원통형 작업영역. 회전 1축 + 직동 2축의 조합으로 구조가 간단하다.

[작업 영역] 로봇 형상은 **작업 영역의 모양과 크기**, 강성, 정밀도를 결정한다. 용도에 맞는 형상 선택이 설계의 출발점이다.

로봇 형상에 의한 분류 ②: SCARA · 수직 다관절

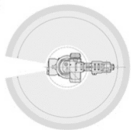
▶ 산업 현장에서 가장 많이 쓰이는 두 가지 형상



[그림 1.37] 스카라 로봇과 작업 공간

수평 다관절 (SCARA)

수평면 이동은 자유롭고 수직 방향 강성이 높다. 조립·픽애플레이스에 최적인 형상.



[그림 1.38] 수직 다관절 로봇과 작업 공간

수직 다관절 (6R)

사람 팔과 유사한 구조로 자유도와 작업범위가 최대. 산업용 로봇의 표준 형상이다.

기타 로봇의 분류: 협동 · 병렬 · 이동 로봇

▶ 구조와 이동성으로 본 확장: 협동 · 병렬 · 이동 로봇

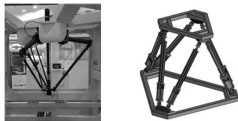
협동 로봇 (Cobot)



[그림 1.39] 협동 로봇

안전 펜스 없이 **사람과 같은 공간에서 함께 작업한다**. 힘 · 충돌 감지가 필수.

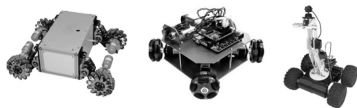
병렬 로봇



[그림 1.40] 병렬 로봇

여러 링크가 **병렬 연결**(델타 · 스튜어트). 고속 · 고강성.

이동 로봇



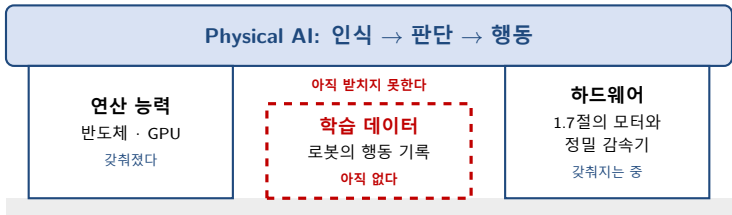
[그림 1.41] 이동 로봇

바퀴 · 다리 · 궤도로 **이동**하며,
자율주행과 SLAM이 핵심 기술이다.

[진입] 이 강좌는 직렬형 매니퓰레이터를 다룬다. 여기까지가 교재가 나눈 로봇이고, 최근에는 기준이 하나 더 생겼다. 프로그램으로 움직이는가, 데이터로 배워서 움직이는가.

Physical AI: 왜 지금 등장했는가

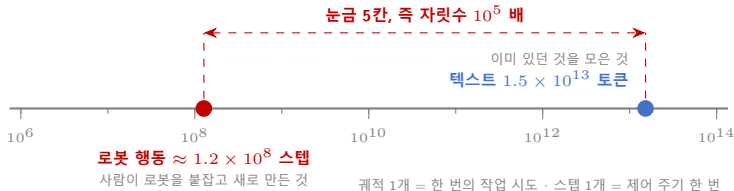
- ▶ 데이터로 배워서 움직이는 쪽: 연산 능력은 갖춰졌고 남은 병목은 학습 데이터이다
 - ▶ **Physical AI**: 물리 세계를 인식하고 판단해 실제로 행동하는 AI 이다.
 - ▶ 학계가 오래 써 온 **체화 AI**(Embodied AI)에 산업계가 붙인 이름에 가깝다.
 - ▶ 반도체와 GPU 연산이 커지면서 대규모 학습과 물리 시뮬레이션이 가능해졌다.
 - ▶ 구현은 대개 **VLA**(Vision-Language-Action) 모델이 맡는다.



[용어] Physical AI 는 새로운 기술 범주라기보다 체화 AI 와 로봇 학습과 파운데이션 모델을 묶어 부르는 이름이다. 그 안에서 실제로 로봇을 움직이는 모델이 **VLA** 이다. 여기부터 일곱 쪽은 교재에 없는 참고 자료이며 시험 범위가 아니다.

학습 데이터의 비대칭: 글은 넘치고 몸짓은 없다

- ▶ 텍스트는 이미 기록되어 있었고, 몸의 움직임은 기록된 적이 없다
 - ▶ 자전거가 넘어지려 할 때 몸이 어떻게 반응했는지 적어 둔 기록은 없다.
 - ▶ 젓가락질과 신발끈 묶기, 고양이가 뿔 때의 관절 꺾적도 마찬가지다.
 - ▶ Llama 3 는 이미 있던 텍스트 15조 토큰으로 학습했다 (Meta 발표).
 - ▶ Open X-Embodiment 는 21개 기관이 모은 실제 꺾적 100만 개 규모이다.

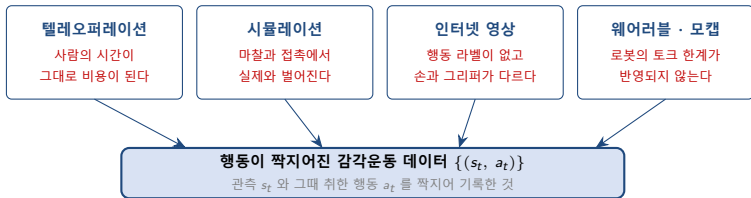


[핵심] 차이의 본질은 규모가 아니라 출처이다. 텍스트는 이미 있던 것을 모았고, 로봇의 행동 데이터는 사람이 로봇을 붙잡고 새로 만든 것이다. 자릿수 비교는 꺾적 100만 개에 꺾적당 100여 스텝을 곱하고, 행동 한 스텝을 토큰 하나로 놓은 개략 추정이다.

행동 데이터를 만드는 법: 네 갈래와 한계

▶ 없는 데이터는 사람이 만들거나 시뮬레이터가 만든다

- ▶ **텔레오퍼레이션**: 품질이 가장 높고 사람의 시간이 그대로 비용이 된다. 1.6절에서 본 교시 장치가 이 방식의 원형이다.
- ▶ **시뮬레이션**: 비용은 연산뿐이지만 마찰과 접촉에서 실제와 벌어진다.
- ▶ 텔레오퍼레이션의 예로 **DROID** 는 로봇 18대와 조작자 50명이 350시간을 모았다.
- ▶ **인터넷 영상**과 **모캡**은 값이 싸지만 행동 라벨과 토크 한계가 빠져 있다.

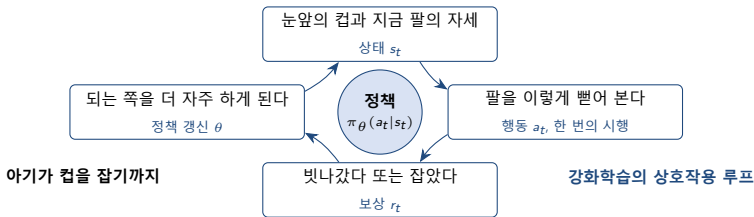


[정책] 정부도 데이터를 병목으로 본다. 2027년 정부안 기준으로 피지컬 AI 트레이닝센터에 400억 원이 편성되었고, K-휴머노이드 연합은 2029년 연 1,000대 양산을 목표로 공표했다.

아기가 컵을 잡기까지: 시행착오라는 학습법

▶ 아기는 관절 각도를 계산하지 않는다. 해 보고 고칠 뿐이다

- ▶ 아기는 잡고 싶은 것에 팔을 뻗지만 처음에는 팔이 뜻대로 가지 않는다.
- ▶ 빗나가면 조금 바꿔 다시 해 보고, 되는 방식이 남으면서 잘 잡게 된다.
- ▶ **시행**은 정책을 한 번 굴러 보는 것(롤아웃), **착오**는 낮은 보상이다.
- ▶ 관절 각도를 풀지 않아도 되므로, 모델을 세우기 어려운 접촉 작업에 쓰인다.

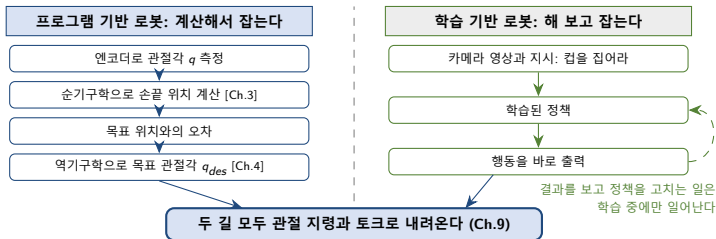


[정확히 말하면] 오늘날 조작 로봇의 주력은 사람의 시연을 흉내내는 **모방학습**이다. 성공한 시연만 모으면 실패에서 되돌아오는 법을 배우지 못하므로, 최근에는 시연에 사람의 개입 교정과 강화학습을 붙인다.

계산해서 잡기와 해 보고 잡기: 두 접근

▶ 프로그램 기반 로봇은 엔코더로 읽고 기구학을 풀어 관절각을 지령한다

- ▶ 엔코더로 관절각을 읽고 **순기구학**으로 손끝 위치를 구한다 (Ch.3).
- ▶ 목표와의 차이를 **역기구학**으로 풀어 관절 목표각을 만든다 (Ch.4).
- ▶ 사람은 팔꿈치를 몇 도 굽힐지 풀지 않고도 컵을 잡는다.
- ▶ 학습 방식은 영상과 지시를 받아 행동을 바로 낸다.



[오해 금지] 두 길은 대체 관계가 아니다. 계산을 없앤 것이 아니라 **무엇을 할지** 정하는 부분을 데이터가 맡은 것이며, 다음 쪽에서 구조로 확인한다.

생각하는 뇌와 움직이는 몸: 이 수업의 자리

- ▶ 대규모 언어모델은 생각하지만 팔다리가 없다. Physical 은 그 몸을 뜻한다
 - ▶ GPT 같은 언어모델에 몸이 붙으면 사람처럼 배워 실제로 움직인다.
 - ▶ 정책의 출력은 대개 손끝 목표 자세이고, 관절각으로 바꾸는 층이 필요하다.
 - ▶ 시뮬레이터도 동역학 방정식 위에서 돈다. 학습은 모델 위에 얹힌다.



[마무리] 학습은 무엇을 할지를 데이터에서 배우고, 기구학과 동역학은 그것을 관절로 어떻게 실현할지를 맡는다. 1.6절 제어기와 1.7절 감속기가 맨 아래 층을 만들고, 가운데 빨간 두 층이 이 수업의 범위이자 Term Project 의 대상이다.

직접 보기: 시뮬레이션에서 걷기를 배우는 로봇

▶ 앞의 여섯 쪽에서 본 학습이 실제 로봇에서 어떻게 도는지 영상으로 확인한다



넘어지며 배우기

DeepMind, 2017

보상은 앞으로 나아가라 하나뿐인데
팔을 휘저으며 시작해 장애물을
넘어 달리기까지 간다.

youtu.be/hx_bgoTF7bs



실물 로봇에 올리기

Unitree 휴머노이드, 2026

보행 제어와 보상 설계, 평가
방법까지 한국어로 짚는다.
Florigen Robotics.

youtu.be/yICPOg9coAM



수천 대를 한꺼번에

ETH Zurich · NVIDIA, 2021

GPU 한 대로 로봇 수천 대를 병렬
학습한다. 평지 4분, 험지 20분.
코드 공개.

legged_gym

[보는 법] 처음 수백 번의 실패가 곧 학습 데이터다. 아기가 몇 달에 걸쳐 하는 시행착오를 시뮬레이터는 로봇 수천 대로 동시에 압축한다. 다음 주 Ch.2 좌표변환이 앞쪽 계층도의 빨간 두 층으로 들어가는 첫 단계이다.

Thank you

*Dept. of Control and Instrumentation Engineering,
Pukyong National Univ., Busan, Korea.*

pnj@pknu.ac.kr