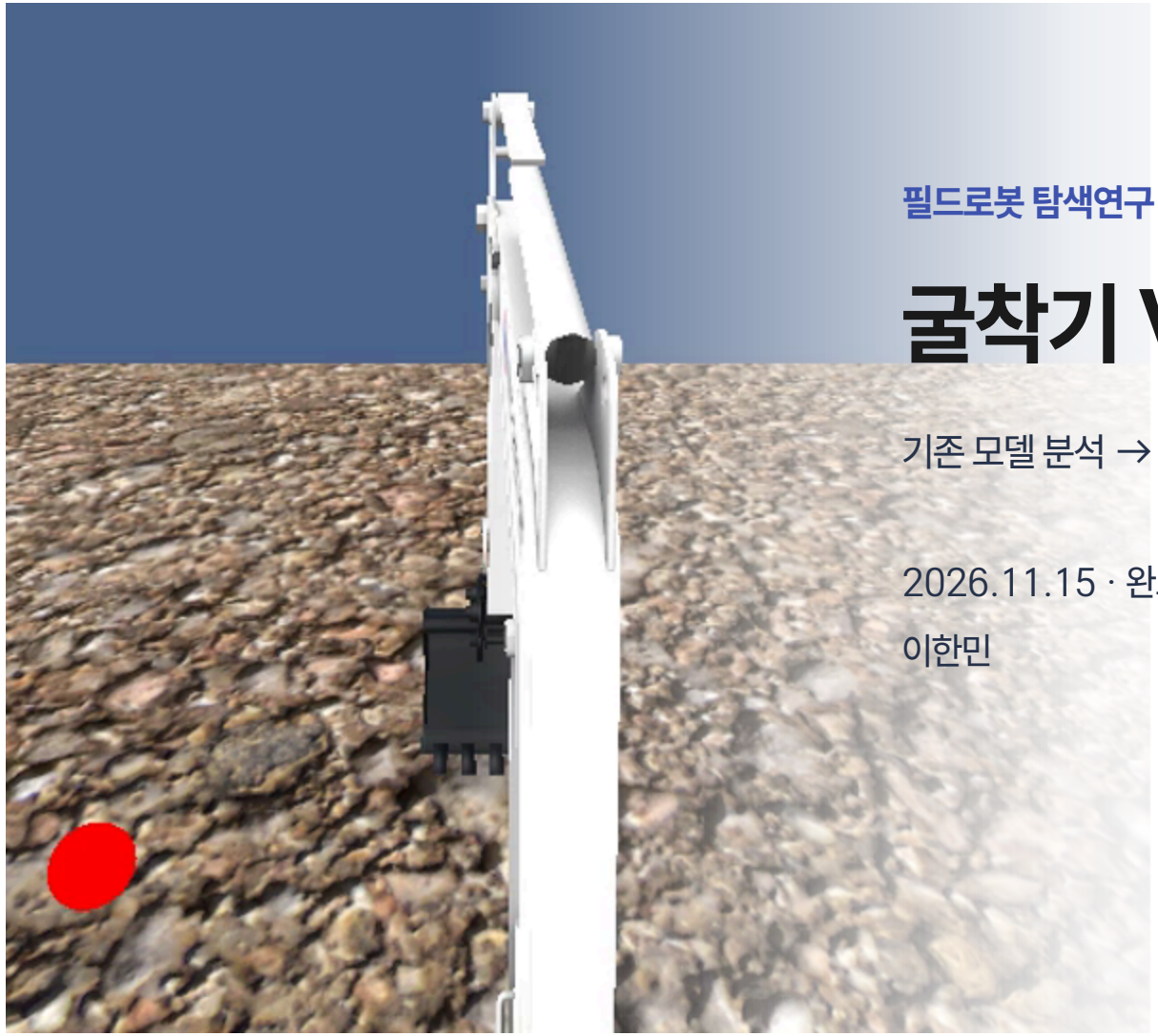


필드로봇 탐색연구 · 진행 보고

# 굴착기 VLA 적용

기존 모델 분석 → 파인튜닝 → 버킷 이동·굴착 결과

2026.11.15 · 완료된 결과까지

이한민

# 1. 전체 흐름

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

**학습 전 0/72 → 학습 후 시뮬레이터에서 버킷 이동·굴착 네 동작 수행**

## 01
### 모델 이해
GR00T N1.7 · π0.5 구조와 입출력

## 02
### 로봇팔 검증
MuJoCo 픽앤플레이스 두 모델 10/10

## 03
### 굴착기 무학습
버킷을 공까지 72회 모두 실패

## 04
### 버킷 이동 학습
검증 위치 6/6
새 위치 4/8 · 6/8

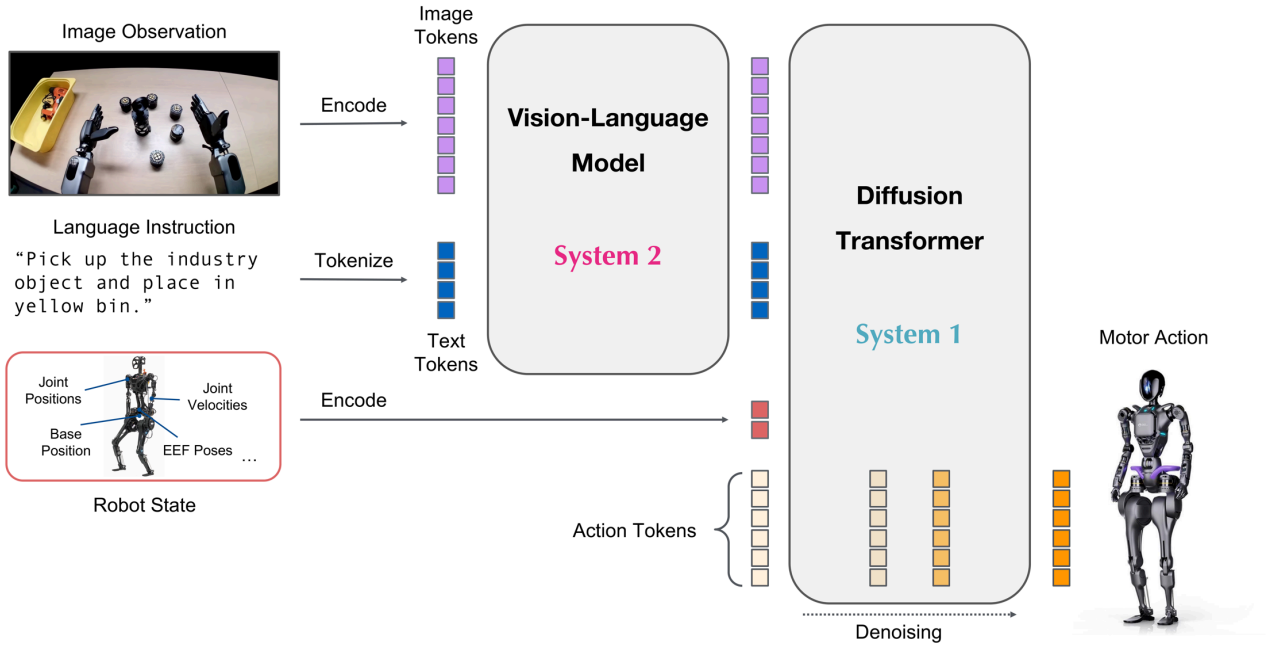
## 05
### 굴착 학습
동작별 3/4
끌기 8/8
연속 굴착 두 모델 2/2

## 06
### 팔 곳 고르기
지도 입력 · 세 번 학습
기준 통과 없음
3차 32번 중 4번 굴착

# 2. GR00T N1.7 — 모델 구성

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 보고 읽는 시각·언어 모델 + 동작을 그리는 확산 액션 헤드




### 시각·언어 모델 · 2B

Cosmos-Reason2 · 영상·지시문을 특징으로

### 확산 액션 헤드 (DiT)

잡음에서 행동 묶음을 4단계로 다듬음

### 로봇별 투영층

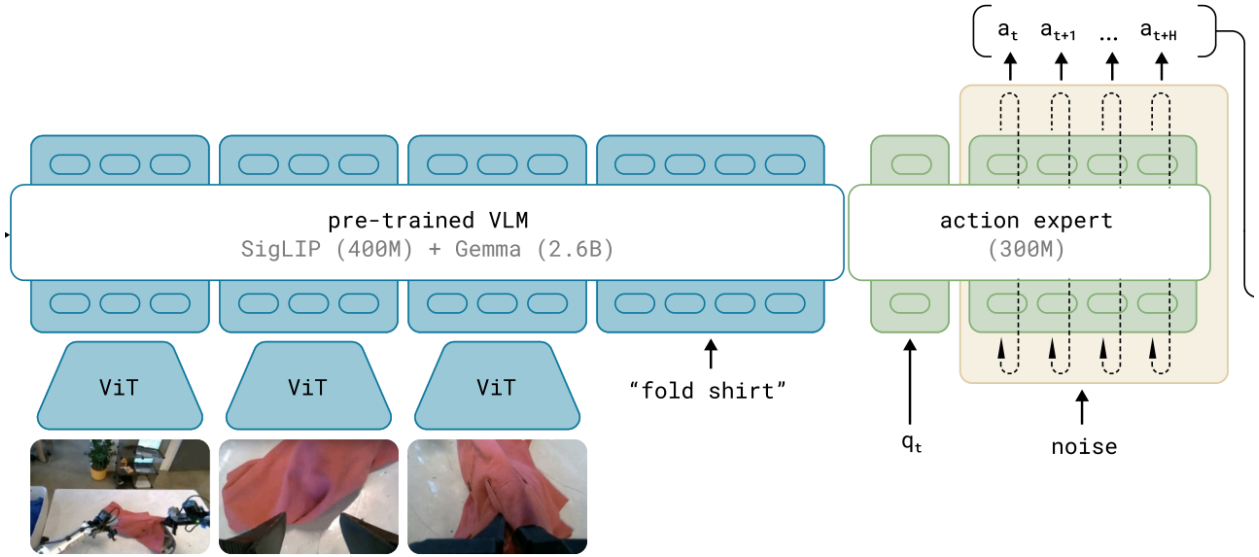
상태 인코더·행동 디코더 32슬롯 · 로봇마다 교체

그림: NVIDIA Isaac-GR00T 공식 저장소 (Apache-2.0) · github.com/NVIDIA/Isaac-GR00T media/model-architecture.png (N1 계열 공통 그림, N1.7 모델 카드에도 동일 게재)

# 3. π0.5 — 모델 구성

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 시각·언어 모델 3B가 영상·글을 읽고, 액션 전문가 0.3B가 잡음에서 행동 묶음을 만든다




π0 논문 그림 3의 모델 부분 · **π0.5도 같은 뼈대**, 차이는 상태 $q_t$를 숫자 토큰으로 바꿔 **시각·언어 모델 쪽**에 넣는 것(π0는 액션 전문가 쪽)과 이산 토큰 사전학습 → 플로우 매칭 후학습의 두 단계

### 시각·언어 모델 · 3B

SigLIP 영상 인코더 + Gemma 언어 모델 · 영상 3장 224 + 지시문 (+ π0.5: 상태 토큰)

### 액션 전문가 · 0.3B

잡음에서 시작해 플로우 매칭 10단계로 행동 묶음 $a_t \cdots a_{t+H}$

### 상태 $q_t$의 자리

π0: 선형층 → 액션 전문가 · π0.5: 256구간 숫자 → 텍스트 토큰 → 언어 모델

그림: Physical Intelligence, π0 논문(arXiv 2410.24164) Fig. 3 모델 부분 잘라냄 · π0.5 논문(arXiv 2504.16054) §IV-A·부록 A-E가 상태 토큰화 근거 · © Physical Intelligence

# 4. 두 모델의 입력과 출력

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 입력은 영상 + 지시문 (+ 상태) · 출력은 시간 × 7차원 행동 묶음

### 공통 입력



전체 카메라



손목 카메라

"put the black bowl on the plate"
지시문 1문장

**상태 8개 숫자**
말단 위치 3 · 자세 3 · 그리퍼 2

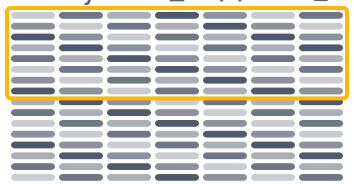
두 모델 모두 영상·지시문·상태를 받지만
상태가 들어가는 자리는 서로 다르다

### GR00T N1.7

영상·지시문 → 시각·언어 모델
**상태 → 상태 인코더 → 확산 액션 헤드**
영상 짧은 변 256 · 디노이징 4단계
3B

출력 · 행동 묶음 16스텝 × 7

Δx Δy Δz 롤 피치 요 손



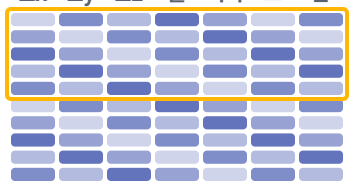
**앞 8스텝 실행**
나머지는 버리고
다시 예측

### π0.5

영상·지시문 → 언어 모델(PaliGemma)
**상태 → 256구간 숫자 토큰 → 언어 모델**
영상 224 · 플로우 매칭 10단계 · 3B + 0.3B
(공개 LIBERO 가중치만 상태 토큰을 끈 설정)

출력 · 행동 묶음 10스텝 × 7

Δx Δy Δz 롤 피치 요 손



**앞 5스텝 실행**
나머지는 버리고
다시 예측

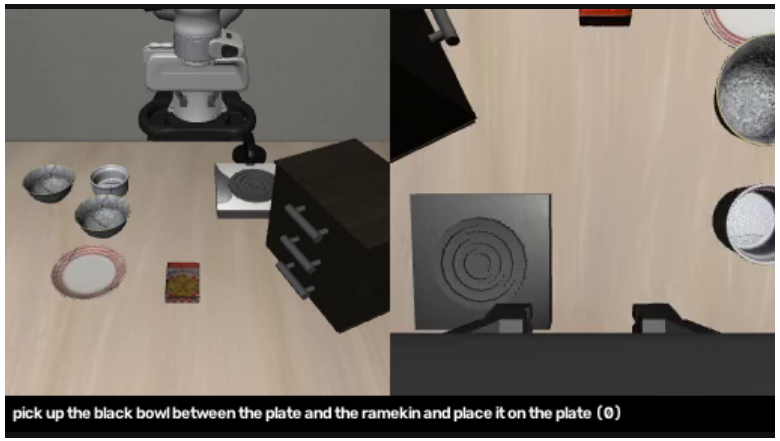
한 칸 = 한 시점의 로봇팔 말단 이동량 (위치 3 · 회전 3 · 그리퍼 1

# 5. 로봇팔 검증 — 픽앤플레이스



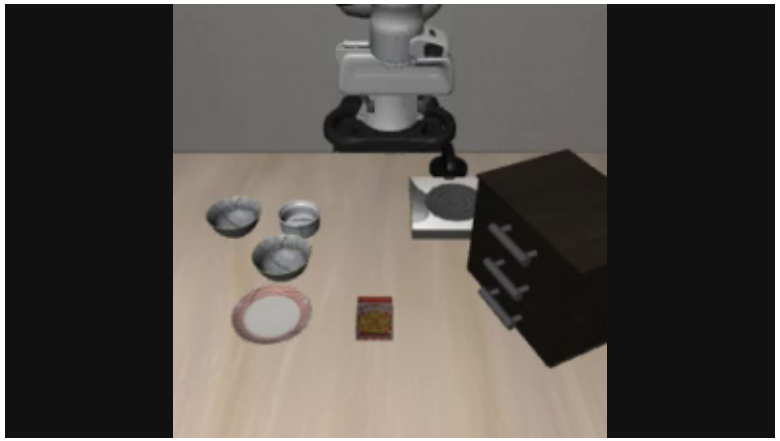
## 같은 과제 10회씩, 두 모델 모두 10/10 · 환경은 MuJoCo

### GR00T N1.7 10 / 10 성공




왼쪽 전체 카메라 · 오른쪽 손목 카메라 · 실시간 재생

### π0.5 10 / 10 성공



전체 카메라 · 실시간 재생

"검은 그릇을 집어 접시에 올려라" · 공식 LIBERO 가중치 · RTX 5080 · 추론 중앙값 **80~100 ms**

# 6. 굴착기에 그대로 연결하기

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 로봇팔 손끝 이동량을 버킷 끝 이동량으로 읽고 4관절로 푼다



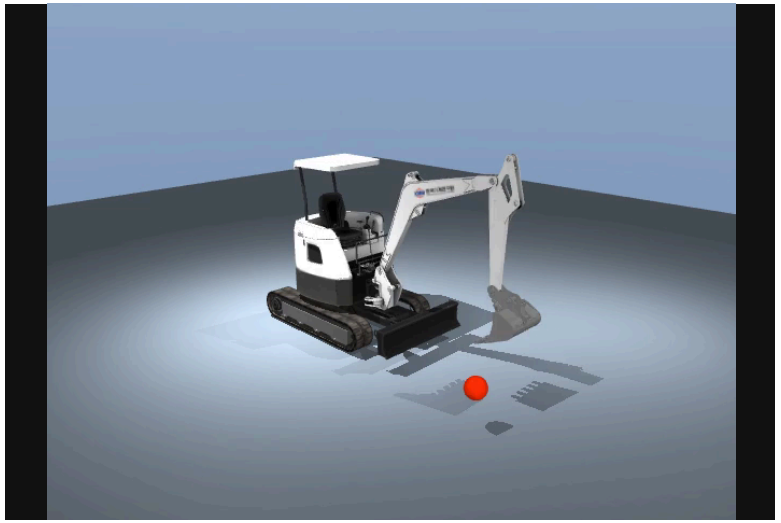

10 Hz 폐루프: 시뮬레이터의 새 영상이 다시 모델 입력으로

# 7. 연결 자체는 동작한다 — 목표를 아는 제어기

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

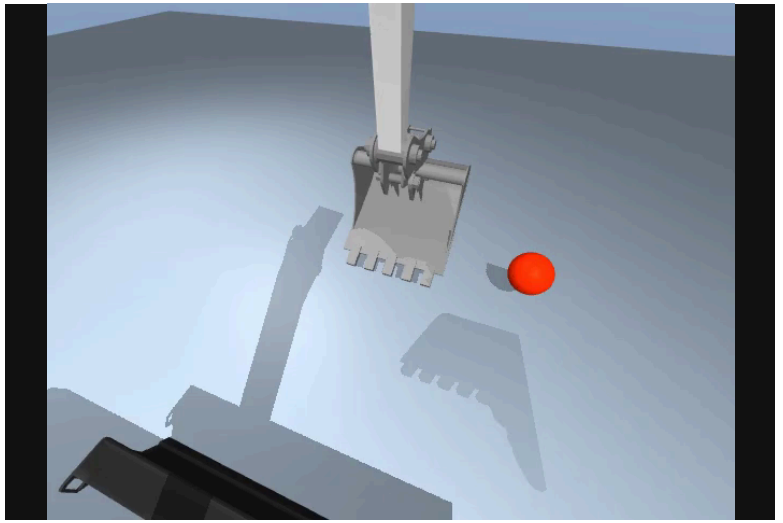
**공 위치를 아는 기구학 제어기는 0.95 → 0.01 m 도달 · 모델 없음**

## 전체 카메라



같은 역기구학·같은 서보로 버킷 끝이 공까지

## 붐 카메라



23스텝에 0.5 m 안 · 48스텝에 0.011 m · 모델 없음

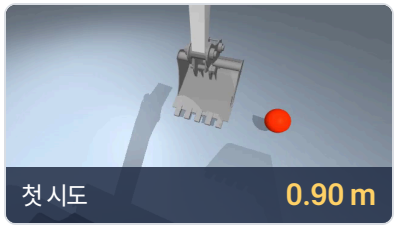
이 영상은 VLA 결과가 아니다 · **"모델이 방향만 맞게 내면 도달 가능"**을 보인 기준선

# 8. 학습 없이 여러 방법을 바꿔 봤지만

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 72회 시도(표적 보임 54 · 숨김 대조 18) · 0.5 m 안 도달 0회 · 최근접 0.58 m

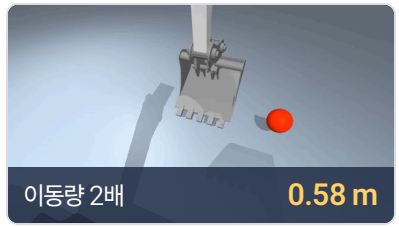
**π0.5**
58회









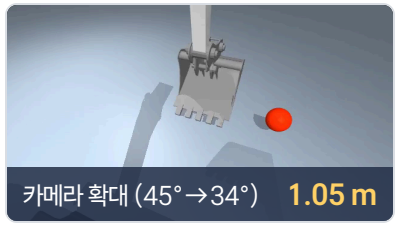



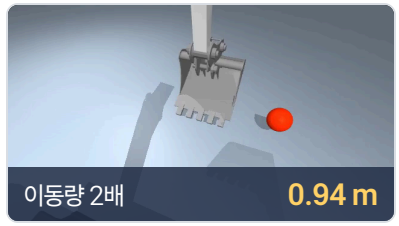

**GR00T**
14회









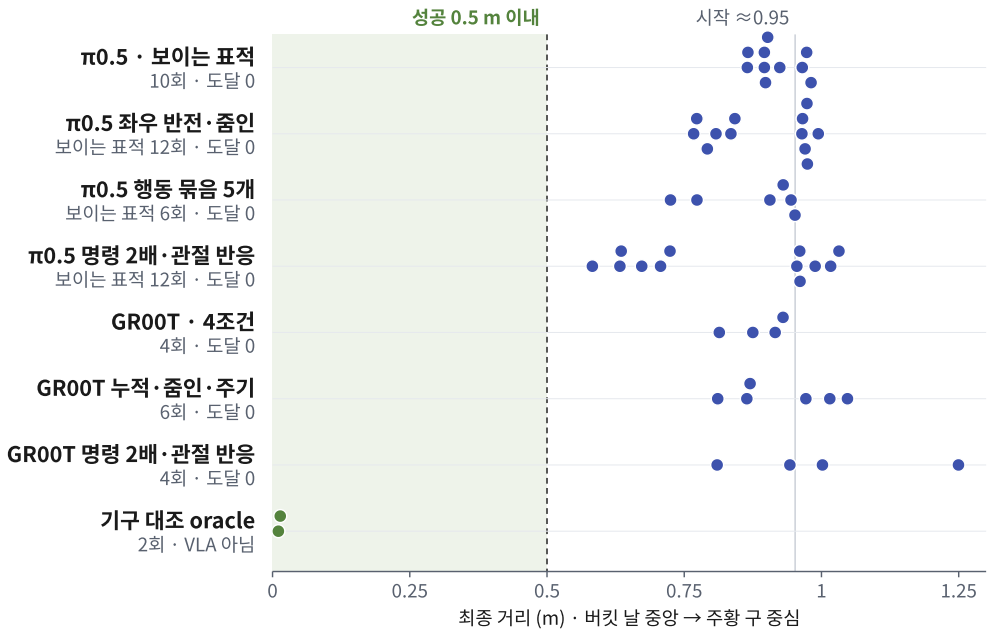




같은 표적(공 위치 1) · 붐 카메라 시점 · 숫자는 5초 뒤 버킷 끝~공 거리(시작 0.95 m) · **공통 시도** 카메라 확대 · 이동량 2배 · 서보 이득 ↑ · **π0.5만** 좌우 축 뒤집기 · 5스텝 연속 실행 · 숨긴 공 대조 · **GR00T만** 상태 종류 · 명령 누적 기준 · 명령 유지 0.2 s

# 9. 중간 결론



## 파인튜닝 없이 다른 장비에 그대로 쓰는 것은 불가능(이번 시험 범위의 결론) → 데이터와 학습으로




- **공의 좌우 위치를 따라가지 않음**
  어디에 두어도 비슷한 방향으로만 이동
- **이동량이 필요량보다 짧음**
  최대 0.33 m, 필요 0.45 m · 크기를 키워도 한쪽 표적만 개선
- **행동 의미가 학습 데이터로 정해짐**
  공식 문서에 글로 로봇을 바꿔 알려줄 길은 없음

# 10. 기존 사례 ① Actor Labs — 실제 굴착기에 π0.5

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 운전자 손을 카메라로 보고 라벨을 만들고, 조이스틱 4축을 행동으로 π0.5를 LoRA 학습







위: 실제 현장에서 두 번 떠서 붓는 자율 작업(2026-05) · 아래: 여러 현장·조명의 성공 모음, 운전석에 단 제어 상자

**데이터** 운전자가 **조이스틱을 조작하는 모습을 운전석 카메라로 촬영**하고, YOLO로 스틱 위치를 읽어 **행동 라벨(조이스틱 4축 값)**을 만듦 · 기계 개조 없는 카메라 키트(15분 설치) · 실내 200 궤적 → 현장 숙련자 2.5시간 · 자체 VR 원격조작 병행

**입·출력** 카메라 3대(120°, 720p) + 지시문 (+ 현재 조이스틱 값) → **다음 시점의 조이스틱 위치 4개** [좌x 좌y 우x 우y], 10 Hz · 관절 각도는 쓰지 않음(엔코더 없음) · 분위수 정규화

**모델·학습** **π0.5 + LoRA** 파인튜닝(openpi) · 플로우 매칭 행동 묶음 · 기체 Takeuchi TB20e 전동 미니 굴착기(렌탈) · 추론 Jetson Thor 또는 Starlink 원격, 명령은 CAN 버스

**결과** 실제 현장에서 참호 굴착·선회·덤프 자율 수행 영상(실시간) · 맑음·흐림·새벽·야간, 다른 현장에서도 동작했다고 주장 · 60대 이상 기계로 수집 확대

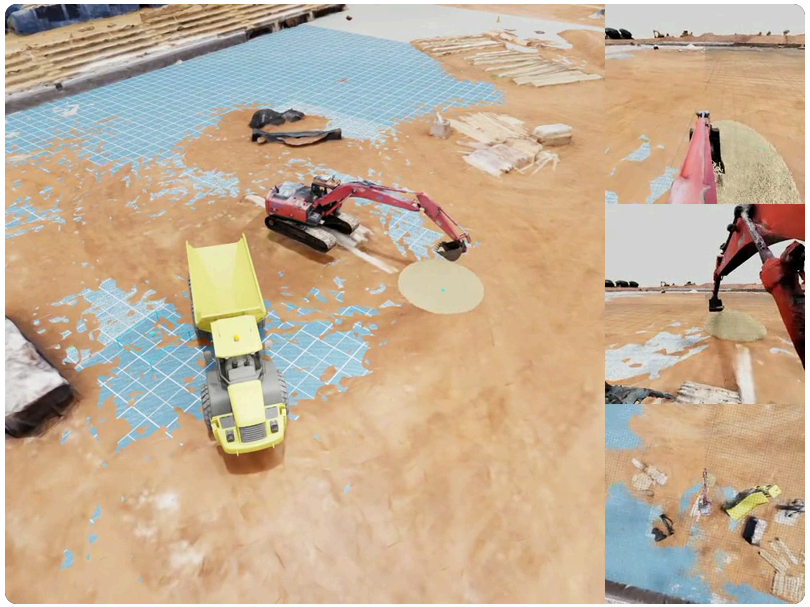
**한계** 성공률·사이클 시간·실패 사례 **수치 없음**(회사 블로그, 성공 장면 모음만) · 힘·부하 피드백 없이 영상만 · 2.5시간이 전체인지 마지막 적응분인지 불명

출처: labs.actor/research/vla-excavator (2026-03-07) · labs.actor/research/excavator-in-the-wild (2026-05-25) · 영상·그림 © Actor Labs

# 11. 기존 사례 ② 상하이교통대 — 시뮬레이터에서 SmolVLA

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 스크립트 교사 572회 시연으로 SmolVLA를 학습해 한 장면에서 83.5 % · 단, 감독기와 특권 정보 포함



공개 평가 영상 30초 · 왼쪽 전체 시점 + 오른쪽 정책 카메라 3대 · 감독기를 켠 상태의 한 사이클

**데이터** Isaac Sim 입자 흙(약 4.5만 개) · 고정 차체 4축 · 흙더미를 아는 **스크립트 교사**가 10단계 굴착→트럭 적재 시연 · 품질 게이트 통과 **572회 / 62,216 프레임**

**입·출력** 카메라 3대(256²) + 고정 지시문 + **상태 27개**(굴착 목표점·하역점·버킷 입자 수 포함) → 4축 관절 속도 **50스텝 묶음**, 앞 3스텝 실행

**모델·학습** **SmolVLA**(0.45B) · 시각 인코더 고정, 액션 전문가·상태 투영층·추가한 단계 분류 헤드 학습 · 567회로 학습 후 평가 장면 5회로 미세학습 · GPU 대여 약 1,540위안

**결과** 같은 장면 200회 중 **167회 성공(83.5 %)** · 성공 = 트럭에 입자 1개 이상 · 감독기 없이 다른 팀이 500 장면 재평가 시 58 %

**한계** 들기 이후는 **규칙 기반 감독기**가 관절을 대신 움직임 · 목표점이 상태로 주어짐 (어디 팔지 선택 안 함) · 평가 장면 = 학습 장면 · 학부 캡스톤, 라이선스 없음

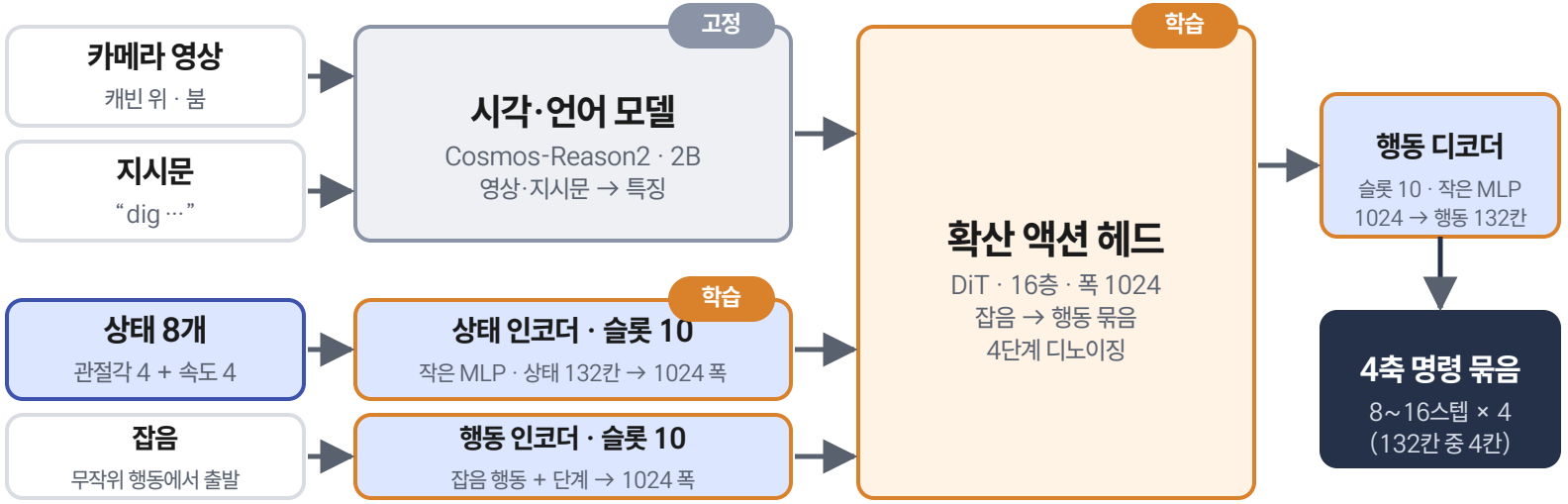
출처: lingxiao-yang.github.io/Excavator_VLA_project_overview · github.com/jxbb824/ExcavatorVLA (smolvla) · SJTU ME 450 Group 19, 2026 · 그림·영상 © 원저자(라이선스 미표기)

# 12. 파인튜닝 방법 — GR00T N1.7



## 시각·언어 모델은 고정, 로봇별 투영층과 확산 헤드를 학습

고정 학습 파란 칸 = 로봇마다 따로 두는 작은 신경망(슬롯) · 굴착기는 빈 슬롯 10번을 씀



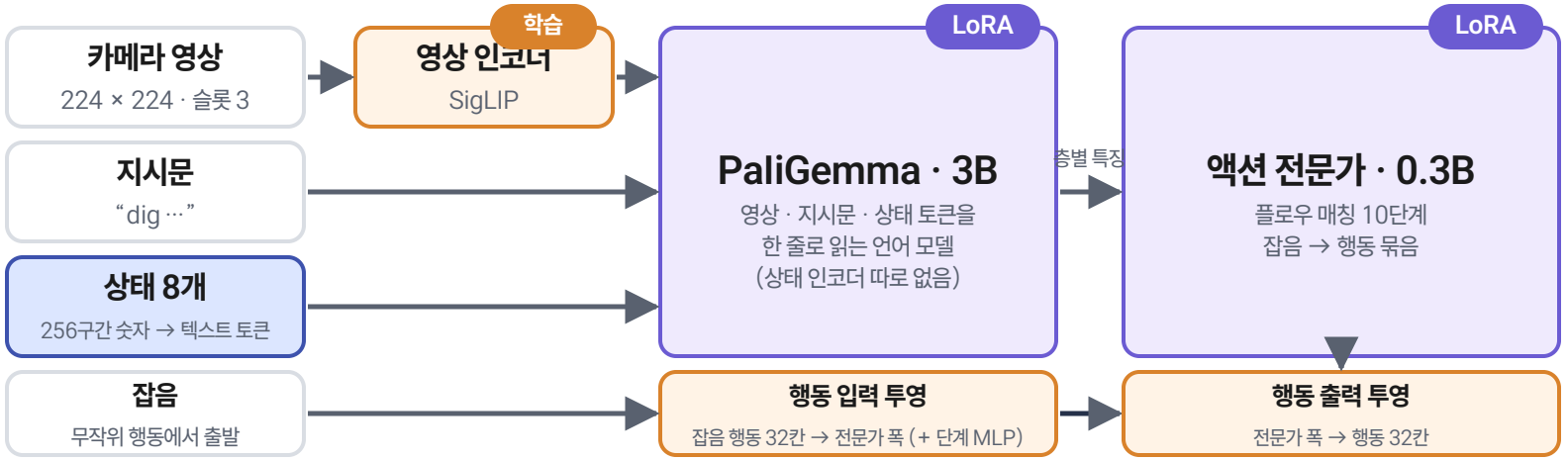

| | |
|---|---|
| **새 로봇 등록** | 슬롯 번호(10) + modality.json(키·칸 수·정규화 범위)을 적는 설정 · 로봇팔 슬롯은 8칸·7칸용이라 4축엔 새 슬롯 |
| **학습 대상** | 슬롯 10의 작은 MLP 3개 + 확산 헤드 + 영상·언어 정규화층(공식 기본값) · 시각·언어 모델 고정 · LoRA 없음 |
| **정규화** | 데이터 1~99 백분위 → [−1, 1] · 범위 밖은 잘림 → 명령 크기가 데이터 범위에 묶임 |

# 13. 파인튜닝 방법 — π0.5



## 두 큰 블록은 LoRA, 영상 인코더와 입출력 투영은 전체 학습

LoRA 학습 큰 두 블록은 LoRA(작은 덧셈 행렬만 학습) · 나머지 작은 층은 그대로 학습




→ 4축 명령 묶음 · 8~16스텝 (32칸 중 앞 4칸

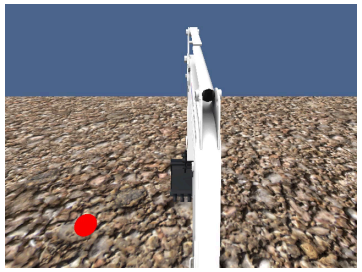
| | |
|---|---|
| 왜 GR00T와 다른가 | 각 모델의 공식 기본 설정을 따름 · GR00T: 시각·언어 고정 + 투영층·헤드 학습 · openpi: 전체 학습 기본, LoRA 변형 제공 |
| 상태 경로 | π0.5는 상태를 텍스트 토큰으로 넣어 상태 인코더가 없음 · 행동 입·출력 투영 = GR00T의 행동 인코더·디코더 역할 |
| LoRA · 영상 | 전체 학습 70 GB+ 대 LoRA 22.5 GB+ → 메모리 때문 · LoRA 설정은 언어 모델만 얼려서 영상 인코더는 학습됨(얼릴 수도 있음) |

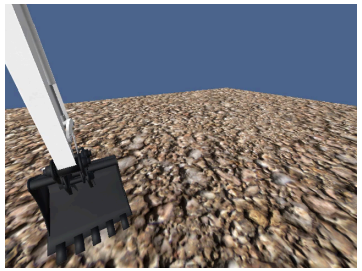
# 14. APEX에서 뽑는 데이터

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## ROS 2 토픽을 듣기만 하는 기록기로 받아 영상·상태·명령을 한 시각축에

### APEX · Unity + AGX 흙





굴착기 HR35 디지털 트윈
유압 끔 · 관절 속도 명령

### ROS 2 토픽 (읽기만)

- **카메라 RGB 2대**
  캐빈 위 · 붐 아래 · 640×480 · 5 Hz
- **관절각 · 관절 속도 4축**
  스윙·붐·암·버킷 · 약 100 Hz
- **명령 4축**
  [−1, 1] 정규화 레버값 · 10 Hz
- **차체 · 링크 자세**
  롤·피치·요 · 링크 각 · 실린더 힘
- **LiDAR 2대 → 높이 격자**
  0.1 m 칸 · 미관측은 빈칸 · 5 Hz
- **시계 · 좌표 변환(TF)**
  촬영 시각 기준 정렬

**구독 기록기**
원시 바이트 + 이벤트 로그
명령 없이 듣기만

↓

**변환**
PNG(무손실) + JSONL
촬영 시각으로 정렬

↓

**LeRobot v2.1**
두 모델 공용 데이터셋
+ modality.json

### 한 에피소드

| | |
|---|---|
| 5 Hz | 영상 기준 시각 |
| 10 Hz | 명령 전송 |
| \|u\| ≤ 0.2 | 느린 교사 속도 |
| q4 + v4 | 상태 |
| u4 | 행동(요청값) |
| 1문장 | 지시문 |

교사 제어기가 움직이는 동안 기록기는 듣기만 한다 → 요청 명령·적용 결과·영상을 같은 시각축에 놓는다

# 15. 시험할 데이터셋 — 세 단계

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

**쉬운 것부터 · 버킷 이동 → 굴착 → 전체 사이클 · 공격점 선택은 확장**

## 1 버킷 이동 — 완료

**1-A 학습 연결 점검**
기존 소량 자료로 한 번 갱신·과적합

↓

**1-B·C 좌표 + 영상 → 영상만**
좌표 없이 영상만으로 바로 진행

↓

**1-D 새 위치·새 목표 평가**
학습에 없던 위치 2곳 · 꼬깔콘

## 2 굴착 작업만 — 진행 중

**2-A 단계별 정책**
관입 · 끌기 · 닫기 · 올리기 따로 학습 ✓

↓

**2-B 전환은 알고리즘**
바깥 프로그램이 동작 전환 ✓

↓

**2-C 전환까지 정책**
모델이 다음 동작 판단 · 진행 중

## 3 전체 사이클 — 계획

**3-A 덤프 위치 → 공격점 이동**

↓

**3-B 굴착 → 덤프 위치 이동**

↓

**3-C 덤프 작업**
계획만 · 공격점은 외부에서 줌

**+ 확장 · 공격점까지 스스로 고르기**

세 단계는 공격점이 밖에서 주어진다고 가정 → 지형을 보고 어디를 팔지 정책이 고르려면 카메라 영상만으로는 부족, 지형 형상 입력이 필요

# 16. 공격점을 고르려면 지형이 보여야 한다



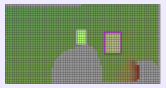
## 지형 높이 격자를 그림으로 VLM에 넣거나(길 A), CNN 토큰으로 상태에 붙이거나(길 B)




**APEX 관제 화면 — 라이다로 만든 지형 2D 격자**

칸 0.15 m · 색 = 높이 · 네모 = 팔 곳(초록)·버릴 곳(보라) · 차이 = 목표 − 현재

**길 A · 이미지로**



**격자 그림 그대로**

→ 시각·언어 모델(VLM)의 영상 슬롯 3번째

색↔높이 대응 고정 · 인코더 고정 → LoRA → 전체 학습

**길 B · 토큰으로**

**소형 CNN**

격자 → 특징

**지형 토큰 몇 개(벡터)**

**→ 상태에 붙여 액션 헤드 쪽으로**

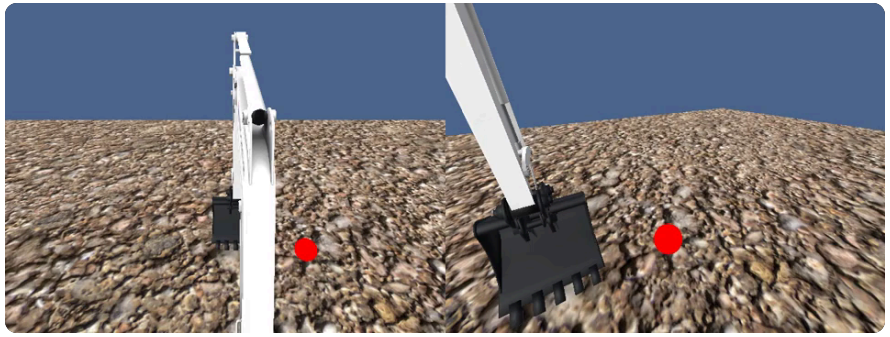
GR00T: 상태 인코더 · π0.5: 상태 토큰 · 코드 수정

| | |
|---|---|
| **뜻** | 지형 높이를 (A) 그림으로 만들어 영상처럼 보게 하거나, (B) 숫자 격자를 작은 신경망으로 압축해 상태로 넣는다 |
| **먼저 싸게 확인** | 인코더 고정 + 선형층 하나로 교사의 공격점 좌표를 맞히는지 본다(선형 프로브) · 못 맞히면 길 B |
| **보조 출력** | 행동과 함께 공격점 좌표도 내게 해 '고르기 오류'와 '가기 오류'를 분리 |
| **데이터** | 한 에피소드 안에서 여러 번 퍼서 달라진 지형에서 다음 공격점을 다시 고르는 장면 포함 · 영상과 같은 시각으로 기록 |

# 17. 첫 수집 데이터 — 교사 시연 20회

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

**공 위치를 아는 교사 제어기가 움직이고, 기록기는 영상·상태·명령을 같은 시각으로 저장**



교사 시연 예 · 왼쪽 캐빈 위 카메라, 오른쪽 붐 아래 카메라 · 2배속 · VLA 아님

## 20회 수집 → 19회 합격

**학습**
12 위치 × 1회

**검증**
2 위치 × 2회
← 1회 제외(프레임 속도)

**시험**
1 위치 × 4회

| | |
|---|---|
| **학습 자료** | 684행 · 8스텝 창 593개 |
| **지시문** | move the bucket edge to the red ball |
| **교사** | 목표를 아는 비례 제어 · \|u\| ≤ 0.2 · 5 Hz |
| **형식** | LeRobot v2.1 · 두 모델 로더 통과 |

# 18. Lambda에서 파인튜닝한 과정

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

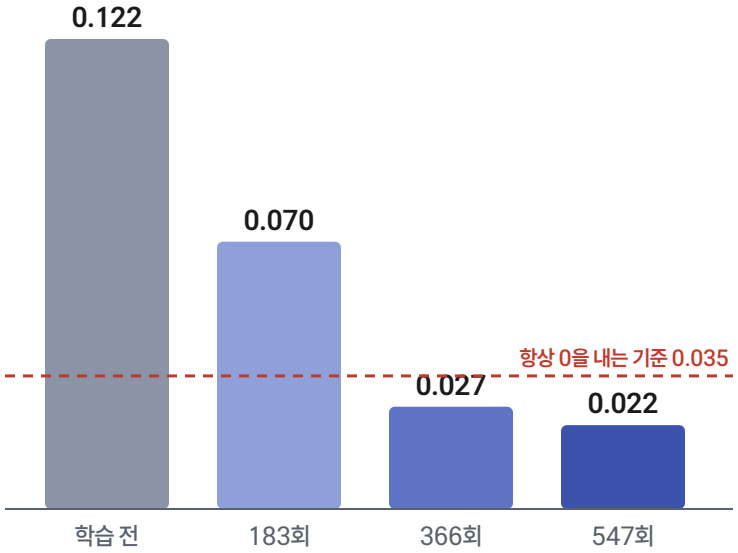
## 실패 원인을 하나씩 고쳐 GR00T 본 학습 완료 · 평가 오차 5.6배 감소

### Lambda H100 · GR00T 학습 세션 (11/08 ~ 11/09)

| | | |
|---|---|---|
| 엘리스 | A100<br>GPU 배정 안 됨 · 41분 대기 | 실패 |
| 1차 | H100 PCIe<br>환경 OK → 1회 갱신 실패(모델 로딩 오류) | 실패 |
| 2차 | H100 PCIe<br>1회 갱신 통과 · 64회 과적합: 손실 65 %↓, 방향 미달 | 부분 |
| 3차 | H100 SXM<br>1회 갱신 통과 · 본 학습 547회(20 epoch, 23분) | 통과 |
| π0.5 | H100 PCIe<br>같은 절차로 첫 학습 · 이후 두 모델 모두 반복 학습 | 완료 |

외부 GPU 사용 · 오류는 오프라인 캐시 경로·
배치 1 상태 dropout·bf16 검사 등 설정 문제였고 모두 수정

### 평가용 자료 예측 오차 (행동 MAE, 낮을수록 좋음)




**0.122 → 0.022 · 5.6배 감소 · 방향 일치 스윙 0.94 · 붐 0.67**

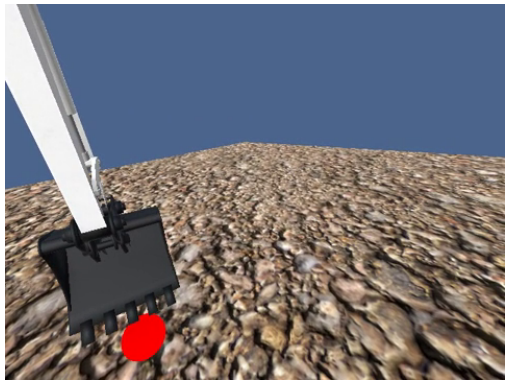
평가 자료 = 학습에서 뺀 한 위치(52창), 정식 검증 분할 아님

# 19. 학습 후 첫 결과 — 버킷이 공까지 간다

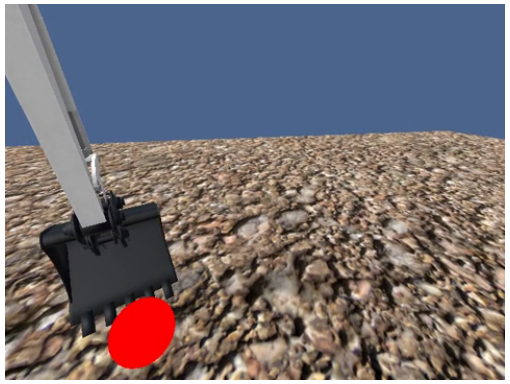


**11/09 파인튜닝한 GR00T 혼자 조종 · 학습에 안 쓴 위치에서 유효 3회 중 3회 도달**

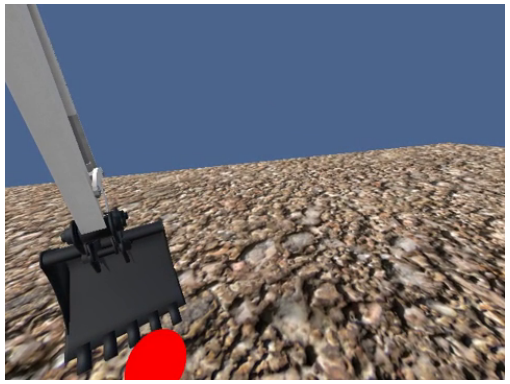
**위치 6 · 2번째** 0.31 m



**위치 7 · 3번째** 0.35 m



**위치 7 · 1번째** 0.22 m



붐 아래 카메라 · 2배속 · 숫자는 버킷 끝~공 최소 거리 · 성공 = 0.5 m 안 1초 유지 · **학습 전 72회 0회 → 학습 후 3/3** · 추론은 로컬 RTX 5080, 약 0.1초

# 20. 버킷 이동 — 검증 위치 결과

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

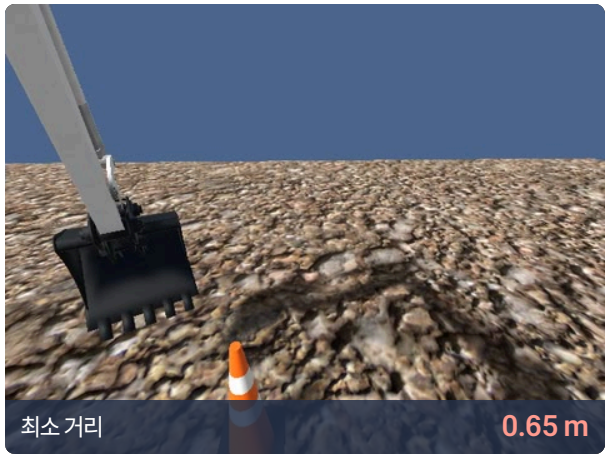
## 모델을 바꿔 가며 다시 학습해도 위치 7 · 3번째에서만 반복 실패

| | 위치 6 · 2 | 위치 7 · 1 | 위치 7 · 3 | 공 | 콘 |
|---|---|---|---|---|---|
| GR00T 1차 | 0.31 m | 0.22 m | 0.35 m | 3/3 | – |
| π0.5 2차 | 0.44 m | 0.24 m | 제외 | 2/2 | – |
| GR00T 2차 | 0.29 m | 0.76 m | 0.30 m | 2/3 | – |
| GR00T 3차 | 0.26 m | 0.38 m | 0.67 m | 2/3 | – |
| π0.5 3차 | 0.26 m | 0.18 m | 0.62 m | 2/3 | – |
| π0.5 공·콘 ① | 0.35 m | 0.24 m | 0.66 m | 2/3 | 2/3 |
| **π0.5 공·콘 ②** | 0.25 m | 0.26 m | 0.33 m | 3/3 | 3/3 |
| **GR00T 공·콘 ②** | 0.26 m | 0.28 m | 0.25 m | 3/3 | 3/3 |

성공(0.5 m 안 1초) 실패 판정 제외

숫자 = 버킷 끝과 표적의 최소 거리 · ② = 보충 시범 추가 후

### π0.5 공·콘 ① · 위치 7·3 · 콘 — 실패




꼬깔콘 표적 · 붐 카메라 · 2배속 · 모델 구간만
팔을 거의 접지 않고 멈춤(공도 0.66 m 실패)

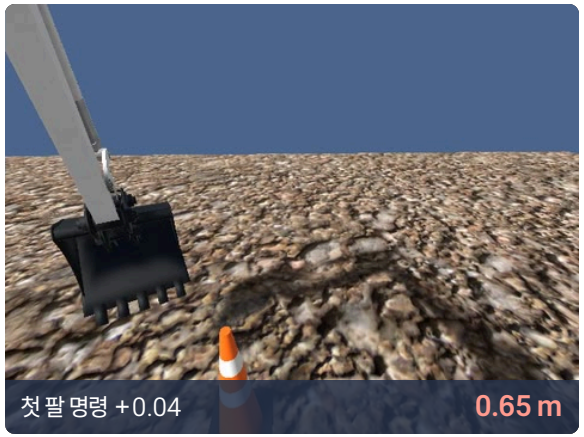
**공·콘 합본** = 빨간 공과 꼬깔콘 표적을 한 모델로 함께 학습

# 21. 버킷 이동 — 실패 원인과 보충 시범

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 원인은 출발 자세 빈칸 · 팔을 접는 시범 8개 보충 → 같은 위치 성공

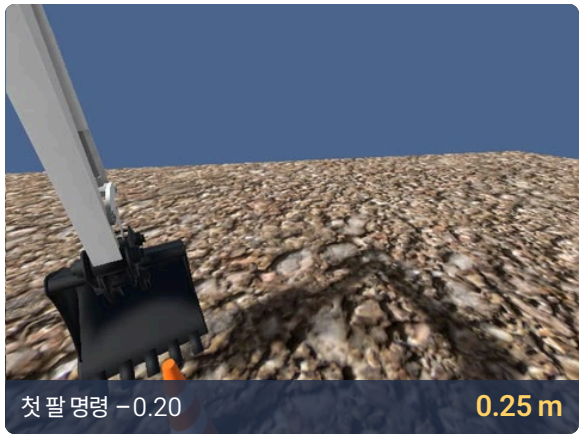
π0.5 공·콘 ① 실패




π0.5 공·콘 ② 성공




GR00T 공·콘 ② 성공




① 그 출발 자세의 학습 장면 **17개 중 팔 접기 0개** · 관절 상태만 바꿔 넣으면 첫 명령이 접기로 바뀜(카메라 사진만 바꾸면 그대로)

② 교사(규칙 제어기, VLA 아님) 보충 시범 **8개**(4위치 × 공·콘) 추가 → 검증 위치 공·콘 **두 모델 6/6**

위치 7·3 · 꼬깔콘 표적(공도 같은 결과) · 붐 카메라 · 2배속 · 모델 구간만 · 보충 장면은 실패를 본 뒤 그 근처에서 골랐다(처음 보는 위치 일반화 근거 아님)

# 22. 버킷 이동 — 최종 시험 위치

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 잠가 둔 시험 위치에서 GR00T 7/8 · π0.5 7/8 · 단, 출발이 표적 가까워 변별력 낮음

GR00T · 꼬깔콘 · 시험 위치 성공




π0.5 · 꼬깔콘 · 시험 위치 성공




GR00T · 꼬깔콘 · 위치 6 성공




시험 결과(공 4 + 콘 4): **GR00T 7/8**(콘 1건은 끝난 뒤 관절 기록 0.54 s 공백으로 규칙상 실패) · **π0.5 7/8**(공 1건 화면 지연으로 제외)

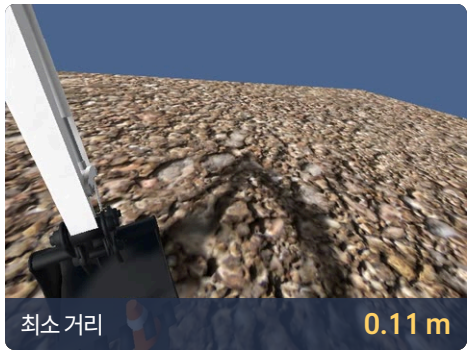
시험 위치는 출발할 때 이미 표적과 0.24–0.56 m(검증 위치는 0.84–1.23 m) → "표적 근처에서 벗어나지 않는 능력"에 가깝고 두 모델을 가르지 못한다 · 붐 카메라 · 2배속 · 모델 구간만

# 23. 버킷 이동 — 처음 보는 위치



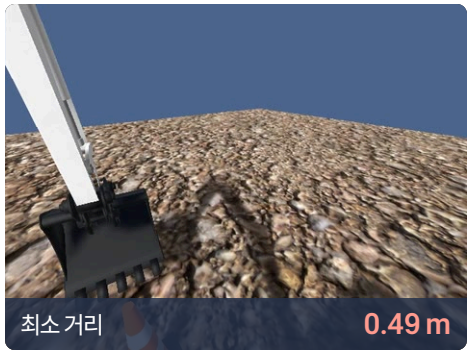
## 어느 자료에도 없던 위치 2곳 · GR00T 4/8 · π0.5 6/8 · 높은 곳은 움직임이 모자람

**π0.5 · 낮은 위치 · 콘** 성공




낮은 위치(위치 17)는 **8 run 모두 0.39 m 안**

**π0.5 · 높은 위치 · 콘** 실패




높은 위치(위치 16)는 **8 run 모두 0.42–0.53 m에서 멈춤**

꼬깔콘 표적 · 붐 카메라 · 2배속 · 모델 구간만 · 출발 거리 0.92–1.26 m

**읽는 법**

**4/8 · 6/8** GR00T · π0.5

- **방향**은 처음 보는 위치에서도 대체로 맞다
- **크기**가 모자람: 높은 위치에서 붐이 0.12–0.17 rad 낮고 팔이 0.25–0.32 rad 덜 접힘
- GR00T 실패 4건 중 2건은 끝난 뒤 기록 공백 → 거리만 보면 **6/8 대 6/8**, 우열 미확정

# 24. 굴착 — 네 동작으로 나눠 학습

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

**관입 → 끌기 → 닫기 → 올리기를 동작별 지시문으로 한 모델에 학습**

### 1 관입
버킷 날을 흙에 넣기

날 깊이 2 cm 이상

### 2 끌기
흙 속에서 앞으로 끌기

0.25 m 이동 · 80 % 이상 흙 속
끝에 흙 1 kg 이상

### 3 닫기
버킷을 말아 흙 담기

버킷 −130° 이하
흙 0.5 kg 이상 유지

### 4 올리기
흙을 담은 채 들기

흙 위 1.2 m · 흙 80 % 유지

**동작별 평가** — 교사(규칙 제어기)가 직전 동작까지 운전 → 그 동작만 모델이 운전
교사 구간은 VLA 아님 · 영상은 모델 구간만

**연속 굴착** — 모델이 네 동작을 혼자 이어서 운전 · 다음 동작으로 넘기는 신호만 바깥 프로그램
지시문을 동작마다 바꿔 줌

**학습 자료** — 교사 굴착 시연 · 흙 위치 3곳(학습 창 833) → 끌기 보강으로 새 위치 12곳 추가(학습 창 1,996)
공통 판정: 시뮬레이터 화면이 기준(초당 90장 이상 등)보다 느리면 '판정 제외' — 실패가 아니라 검증 불가

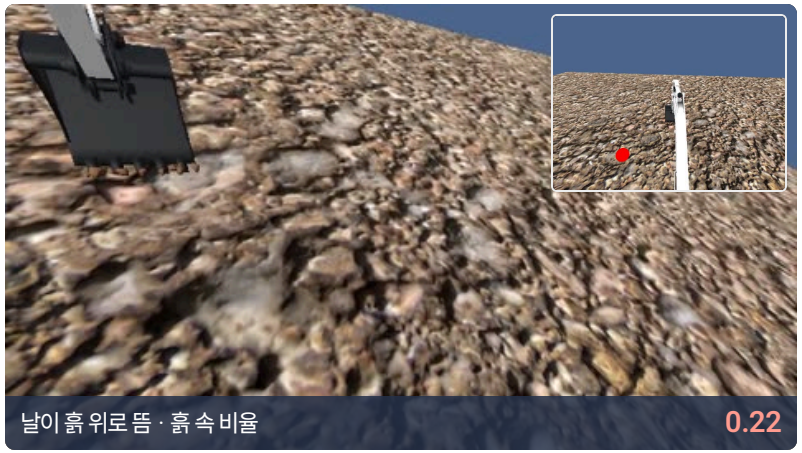
# 25. 굴착 — 첫 평가: 끌기에서 날이 뜬다



## 첫 평가 GR00T 2/4 · π0.5 1/4 · 끌기 4칸 모두 실패, 흙 실은 동작은 판정 불가

### π0.5 · 끌기 · 검증 위치

실패




붐 카메라 · 작은 화면 = 모델 입력 화면(운전석 · 버킷 이동용 표적 공이 함께 보임) · 0.5배속 · 모델 구간(2.4 s)만 · 앞 동작은 교사(VLA 아님)

**첫 평가 (11/10, v2 모델)**

| | GR00T | | π0.5 | |
|---|---|---|---|---|
| | 학습 위치 | 검증 위치 | 학습 위치 | 검증 위치 |
| 관입 | 제외 | 성공 | 성공 | 성공 |
| 끌기 | 실패 | 실패 | 실패 | 실패 |
| 닫기 | 제외 | 제외 | 제외 | 제외 |
| 올리기 | 제외 | 성공 | 제외 | 제외 |

- **문제 ①** 끌기 중간 날 깊이: 교사 +1.6~2.1 cm(흙 속) ↔ 모델 −2.5~−3.8 cm(흙 위)
- **문제 ②** 흙을 실은 닫기·올리기에서 화면이 느려져 판정 제외

# 26. 굴착 — 보완 세 가지

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

**자료 보강 · 시뮬레이터 동기 정지 · 명령 적용 일정 맞추기 — 재학습은 첫 번째뿐**

## 1

### 끌기 자료 보강

새 흙 위치 12곳에서 교사 시연 수집 · 끌기 학습 창 **55 → 187** · 끌기 3배 반복해 재학습

왜: 끌기 창이 다른 동작(215–294)보다 훨씬 적었다

오프라인 끌기 붐 오차 **1/3–1/4**로 감소
실제 끌기는 여전히 실패 → 3번으로

## 2

### 시뮬레이터 동기 정지

모델이 계산하는 0.12–0.2 s 동안 시뮬레이터 시간을 멈추고, 답이 오면 재개

왜: 같은 GPU에서 π0.5 계산 중 화면이 **5–8배** 느려짐 · 원격 추론은 왕복 0.94 s로 불가

멈춤 **218회 모두 정상** · 닫기·올리기도 판정 가능해짐

## 3

### 명령 적용 일정 맞추기

모델이 낸 8칸 묶음




**0번 = 적용 땐 이미 지난 몫 → 건너뜀**
**1번부터 실행**

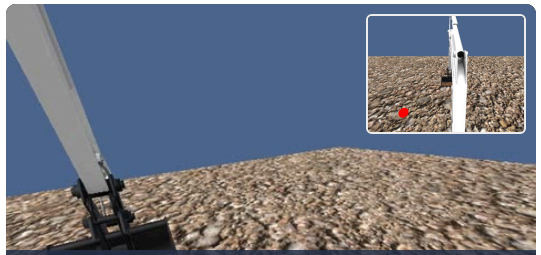
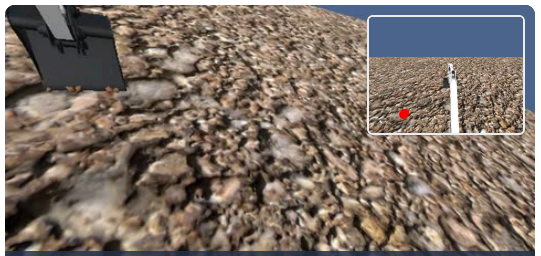
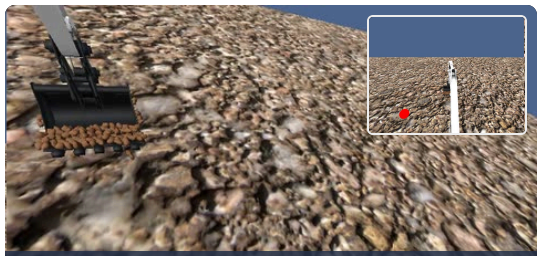
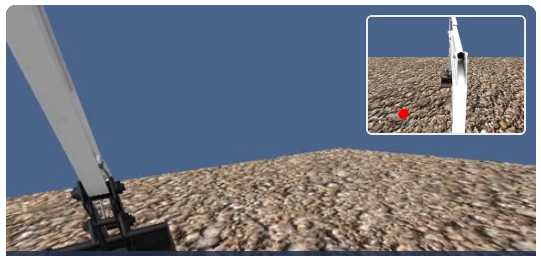
왜: 학습 자료의 명령은 관측 **0.07 s** 뒤 것인데 시험 프로그램은 요청 **0.2 s** 뒤부터 적용 → 0번 칸이 늦어 붐을 더 올림 · 계산 중엔 시뮬레이터를 멈추므로 계산 시간 탓 아님

재학습 없이 **끌기 8/8**

# 27. 굴착 — 동작별 재평가

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 보완 1·2 적용 후 두 모델 모두 관입 · 닫기 · 올리기 통과 (3/4)

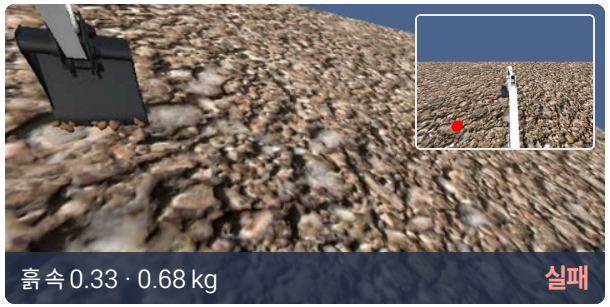
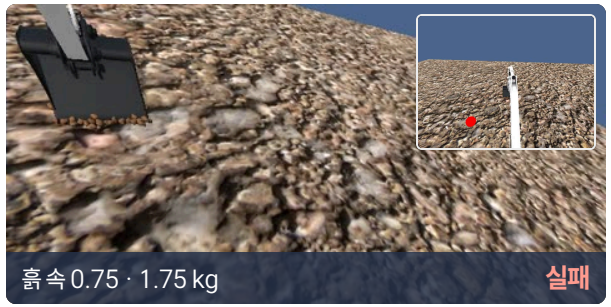
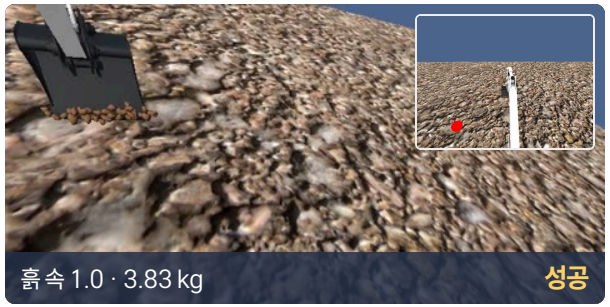
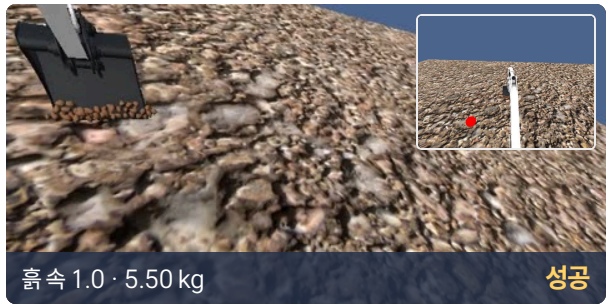
| | 관입 | 닫기 | 올리기 |
|---|---|---|---|
| **GR00T** 3/4 동작 |  검증 위치 · 깊이 6.1 cm 성공 |  검증 위치 · −132° · 13.0 kg 성공 |  학습 위치 · 끝 18.3 kg 성공 |
| **π0.5** 3/4 동작 |  학습 위치 · 성공 성공 |  학습 위치 · −133° · 14.4 kg 성공 |  학습 위치 · 끝 17.8 kg 성공 |

붐 카메라 · 작은 화면 = 모델 입력 화면(운전석 · 버킷 이동용 표적 공이 함께 보임) · 실제 속도 · **끌기는 아직 실패** → 다음 장

# 28. 굴착 — 끌기: 명령 적용 일정을 맞추자

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

**원인은 모델이 아니라 시험 프로그램의 명령 적용 일정 · 재학습 없이 끌기 8/8**

| | GR00T · 학습 위치 | π0.5 · 검증 위치 |
|---|---|---|
| 보정 전 11/11 |  흙 속 0.33 · 0.68 kg 실패 |  흙 속 0.75 · 1.75 kg 실패 |
| 보정 후 11/12 |  흙 속 1.0 · 3.83 kg 성공 |  흙 속 1.0 · 5.50 kg 성공 |

**둘째 칸부터 실행**

**8/8** 끌기 성공

- 학습 자료 명령 = 관측 **0.07 s** 뒤 · 시험 적용 = **0.2 s** 간격 일정 → 첫 칸이 늦음
- 두 모델 × 두 위치 × 실행 칸 수 2가지 · 흙 속 비율 **1.0**
- 재학습 없음 · 계산 중 시뮬레이터 정지라 **계산 시간 탓 아님**

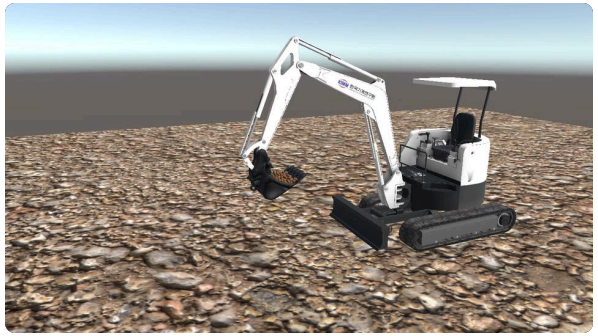
붐 카메라 · 작은 화면 = 모델 입력 화면(운전석 · 버킷 이동용 표적 공이 함께 보임) · 0.5배속 · 끌기 모델 구간만 · 앞 동작은 교사(VLA 아님) · 이 실행 방식은 끌기 실패를 본 뒤 골랐다

# 29. 굴착 — 연속 굴착

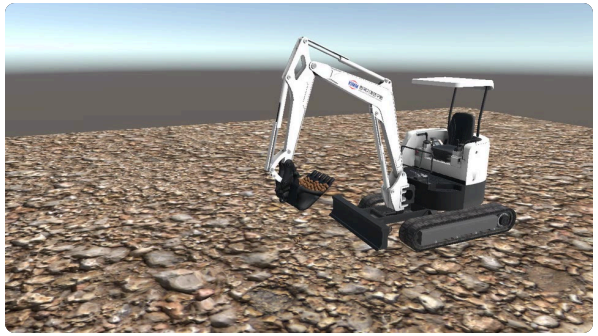
KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 두 모델 모두 교사 없이 관입 → 끌기 → 닫기 → 올리기를 두 위치 완주 (각 2/2)

### GR00T · 학습 위치 · 바깥에서 동작 전환 — 시연

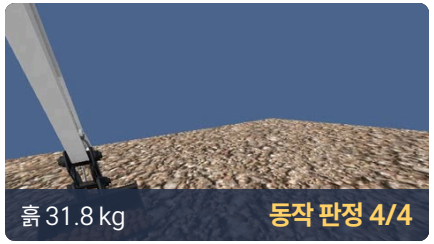


### GR00T · 검증 위치 · 스스로 동작 전환 — 시연

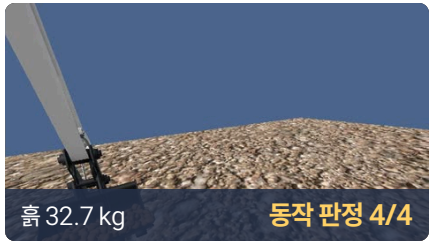


- 위 두 영상 = 밖에서 찍은 **시연 녹화 · 공식 결과 아님** · 2배속
- 스스로 전환은 같은 조건 3회 중 2회 완주
- 공식 판정 = 아래 네 run · 흙 30 kg ↑ 화면 느려짐 → **'전체 시연 성공'으로 세지 않음**

### GR00T · 학습 위치 — 4/4



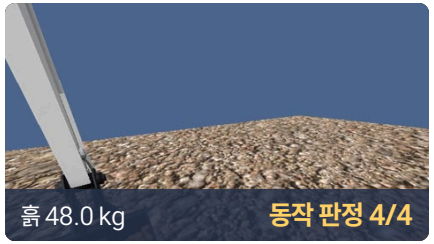

### GR00T · 검증 위치 — 4/4




### π0.5 · 학습 위치 — 4/4




### π0.5 · 검증 위치 — 4/4




아래 네 칸 = 공식 run의 붐 카메라 · 2배속 · 동작 넘김 신호만 바깥 프로그램 · π0.5는 시간 한도만 8 → 20 s

# 30. VLA 대 비VLA 기준선 — 같은 자료·같은 시험

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 언어를 읽지 않는 작은 모델 ACT도 대체로 비슷 · 처음 보는 위치·관입은 더 낮음 · 우열 일반화 안 함

| 시험 | GR00T | π0.5 | ACT (비VLA) |
|---|---|---|---|
| **버킷 · 검증 위치**<br>공·콘 3위치 | 6/6 | 6/6 | 6/6 |
| **버킷 · 시험 위치**<br>출발이 표적 근처 → 변별력 낮음 | 7/8 | 7/8 | 6/8 |
| **버킷 · 처음 보는 위치**<br>ACT는 낮은 위치 4번 중 3번 실패 | 4/8 | 6/8 | 3/8 |
| **굴착 · 동작별 통과**<br>ACT 관입 두 위치 실패 · 끌기는 둘째 칸 방식 | 4/4 | 4/4 | 3/4 |
| **연속 굴착 · 동작 판정**<br>학습 위치 · 검증 위치 | 4/4 · 4/4 | 4/4 · 4/4 | 4/4 · 4/4 |
| **연속 굴착 · 화면 기준까지 성공**<br>성공 동작 수 · 나머지는 판정 제외(검증 불가) | 2 · 1 | 1 · 2 | **4** · 3 |
| **연속 굴착 · 최대 흙**<br>흙이 적으면 시뮬레이터가 덜 느려짐 | 32 · 33 kg | 42 · 48 kg | **20 · 13 kg** |
| **모델 응답 시간(중앙)**<br>같은 GPU | 103–109 ms | 119–122 ms | **14 ms** |

### 읽을 때 주의

- **ACT** = 카메라 2대·관절 상태만 보고 명령 묶음을 내는 작은 모방학습 모델 · **VLA 아님**
- 모델·위치·방식당 **run 1개** → 우열을 일반화하지 않음
- ACT 연속 굴착 '네 동작 성공'은 흙이 VLA의 절반 이하라 시뮬레이터가 덜 느려진 것 · VLA의 '판정 제외'는 **실패가 아니라 검증 불가**
- ACT는 응답이 7–9배 빨라 시뮬레이터 멈춤도 짧음

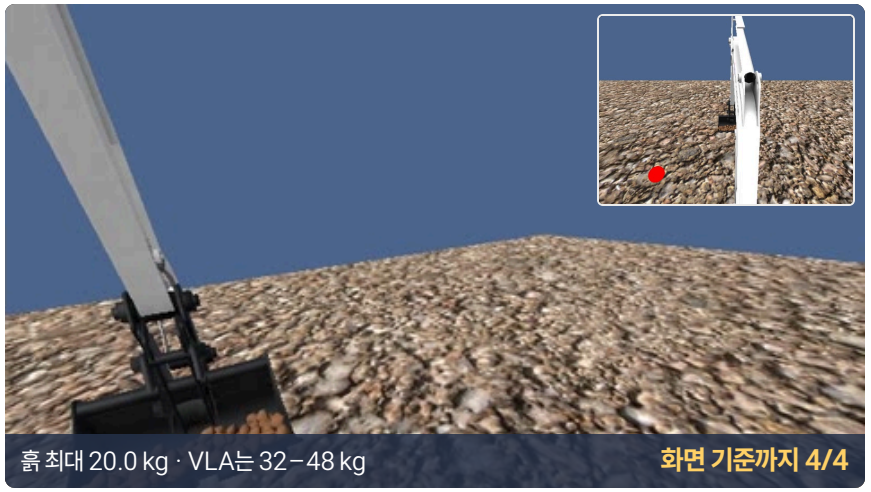
# 31. 비VLA 기준선 — 영상으로 보기

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## ACT 연속 굴착 네 동작 성공(흙 20 kg) · 처음 보는 낮은 위치에서는 표적 앞에서 멈춤

### ACT · 연속 굴착 · 학습 위치

네 동작 성공




붐 카메라 · 작은 화면 = 모델 입력 화면(운전석 · 버킷 이동용 표적 공이 함께 보임) · 2배속 · 모델 구간만 · 흙이 적어 시뮬레이터가 덜 느려진 결과 → 모델 우열 근거 아님

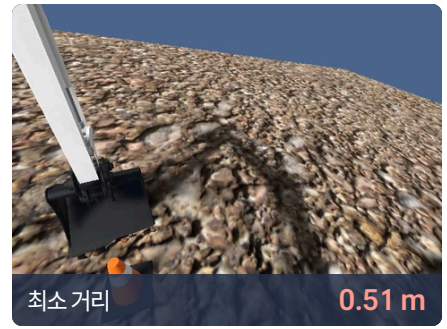
### π0.5 · 낮은 위치 · 콘

성공




### ACT · 같은 위치 · 콘

실패




처음 보는 위치 결과 **GR00T 4/8 · π0.5 6/8 · ACT 3/8** · 오른쪽 두 영상은 같은 위치·같은 출발(붐 카메라 · 2배속) · 모델·위치당 run 1개 · ACT도 VLA가 아님 · 응답 ACT 14 ms 대 VLA 103–122 ms

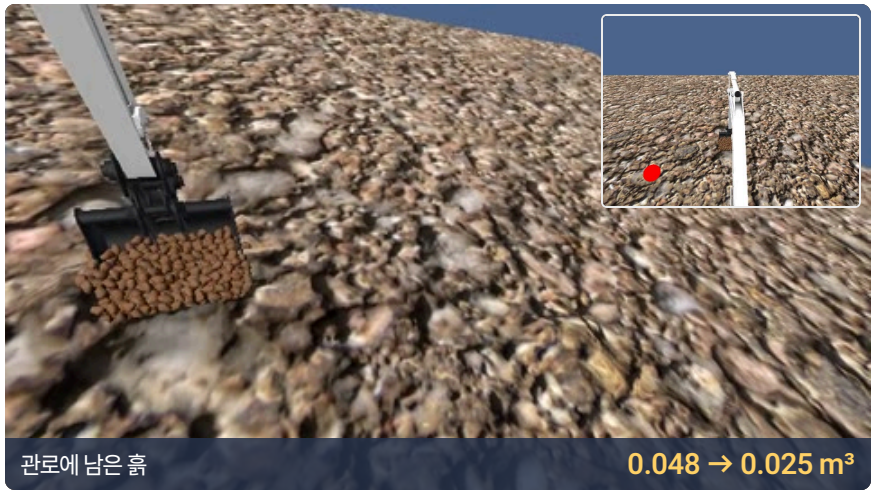
# 32. 관로 — 지도 보고 팔 곳 고르기 · 1단계

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 굴착 준비 자세까지 접근 9번 모두 성공 · GR00T는 한 번에 교사보다 많이 파냄

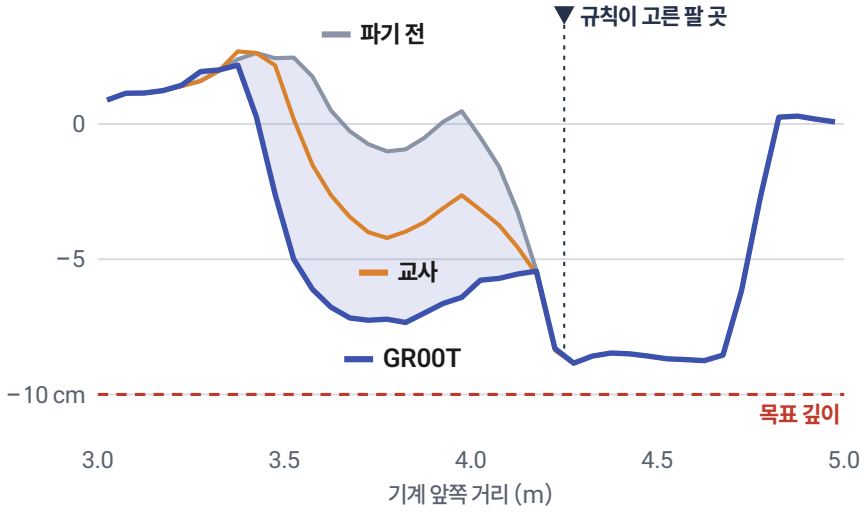
### GR00T · 검증 지형 · 굴착 한 사이클

끝까지 수행




붐 카메라 · 작은 화면 = 모델 입력 화면(운전석 · 버킷 이동용 표적 공이 함께 보임) · 입력에는 지도 그림 한 장이 더 들어감 · 2배속 · 모델 구간만 · 뒤의 선회·덤프는 교사(VLA 아님)

### 관로 단면 — 파기 전과 한 번 판 뒤




한 번 판 뒤 남은 흙 0.048 → 교사 0.039 → **GR00T 0.025 m³** · 목표보다 깊이 판 곳 없음 · 교사 = 규칙 제어기(VLA 아님)

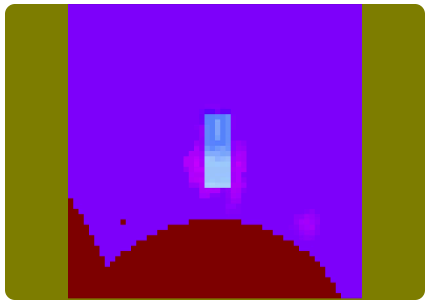
관로 = 기계 앞 3.3–4.7 m · 깊이 10 cm · 팔 곳(공격점)은 규칙(Jud 2017)이 계산 · 완결 측정 1번 · 교사는 일부러 얕게 팜 → 우열 근거 아님 · π0.5는 흙에 들어가다 멈춤

# 33. 관로 — 안 된 것과 교훈

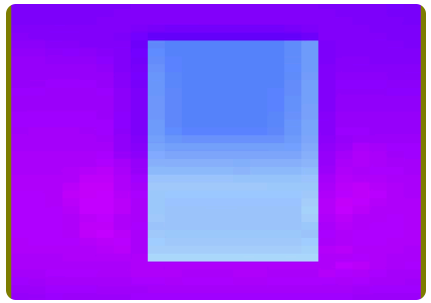
KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 지도 보고 팔 곳 고르기는 두 번 학습 모두 확인 못 함 · 들어간 곳은 늘 4.0–4.2 m

### 모델 입력 지도 · 1판 (넓게)

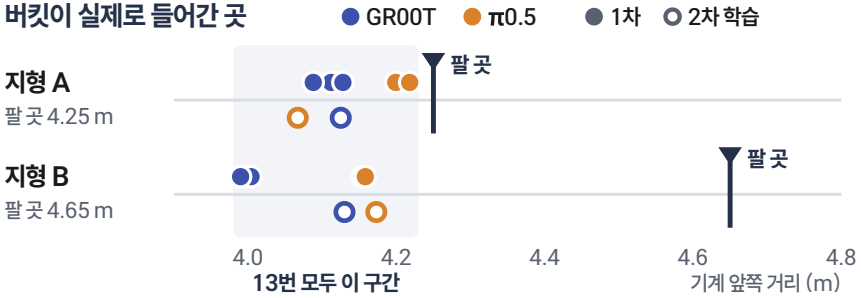


### 모델 입력 지도 · 2판 (관로 확대)



같은 지형 B · 가운데 띠 = 관로 · 밝을수록 덜 판 곳 · 팔 곳 표식은 넣지 않음(모델이 스스로 고르는지 시험)

### 버킷이 실제로 들어간 곳




**① 장면만 봐도 답이 정해졌다**

1차 자료는 지형 모습과 팔 곳이 한 쌍씩 묶임(값 5개) → GR00T는 본 지도만 외우고, π0.5는 지도 대신 카메라로 정함

**② 지도를 키워도 연결이 안 생겼다**

2차: 관로 확대 지도 + 같은 장면에 팔 곳만 다른 시연 추가(값 9개) → 지도만 바꿔 넣으면 진입 위치 이동 **최대 4 cm**

**③ 추가 시연의 결함**

새 시연 16번 중 12번은 교사 버킷이 흙에 닿지 않음 → 2차 모델은 4번 모두 **흙에 들어가지 않음**

**다음 과제**

팔 곳을 규칙이 계산해 **숫자·표식으로 알려 주기** · 흙을 실제로 파는 시연으로 다시 수집 · 조건마다 반복 수 늘리기

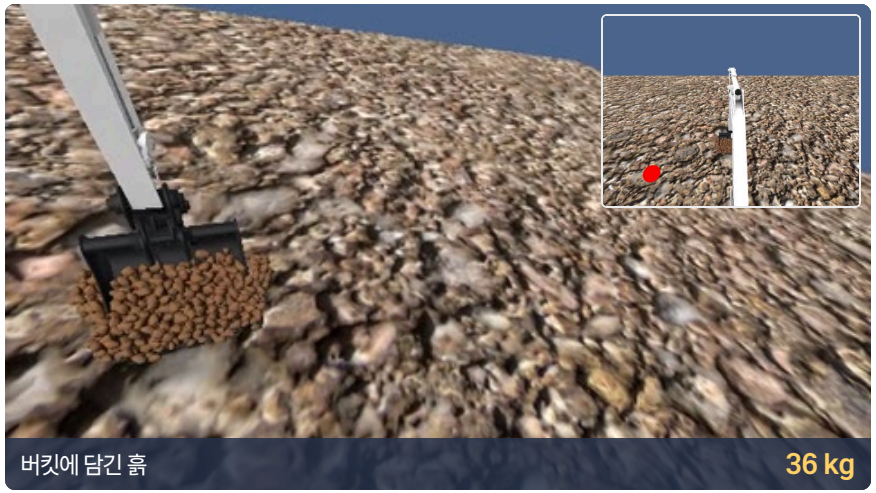
# 34. 관로 3차 — 교사를 고쳐 다시 학습

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 정해 둔 기준을 채운 모델은 없음 · 32번 중 4번은 실제로 흙을 파냄

### GR00T · 통과한 실행

성공




붐 카메라 · 작은 화면 = 운전석 · 2배속 · 모델 구간만(접근 → 올리기)

### 모델 8개 × 4번 = 32번

● 통과 ○ 흙 속 진입까지 ○ 진입 못 함

**시범 전체로 학습**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| GR00T · 표식 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| π0.5 · 표식 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| GR00T · 표식 없음 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| π0.5 · 표식 없음 | ○ | ○ | ○ | ○ |

0 / 16 통과

**시범 절반으로 학습**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| GR00T · 표식 | ● | ● | ○ | ○ |
| π0.5 · 표식 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| GR00T · 표식 없음 | ● | ○ | ○ | ○ |
| π0.5 · 표식 없음 | ● | ○ | ○ | ○ |

4 / 16 통과

통과 4번 = 흙 **14–36 kg** · 관로 완성이 아니라 한 번 파기 · 지도 표식의 이점은 안 보임

바꾼 것: 교사가 매번 흙을 파도록 수정 → 시범 60번 다시 수집 → 모델 8개(두 모델 × 표식 유무 × 시범 전체·절반) · 전체·절반 차이의 이유는 가르지 못함(학습 한 번씩)

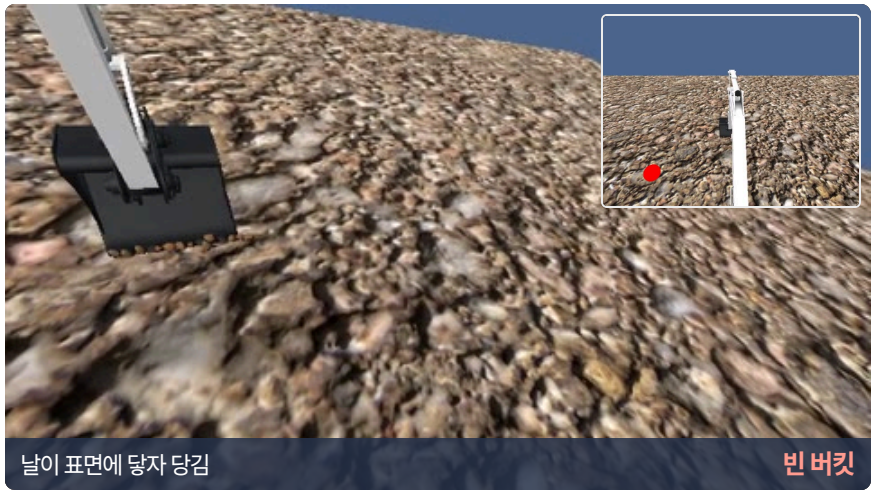
# 35. 관로 3차 — 왜 흙에 못 들어갔나

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 진입 실패 22번 중 21번: 충분히 들어가기 전에 당기기 시작

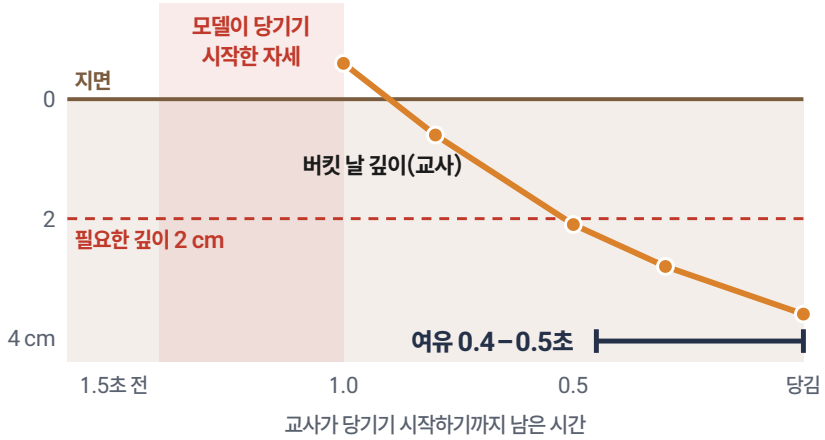
### GR00T · 실패한 실행

실패




같은 지형 · 팔 곳까지는 맞게 감 · 2배속 · 모델 구간만

### 교사 시범 — 당기기 직전 1초




교사는 깊이 2 cm에 닿고 **0.4–0.5초** 만에 당김 · 조금만 일러도 깊이 부족 · 교사 = 규칙 제어기(VLA 아님)

주된 실패 경로는 확인 · 원인 확정은 아님 · 다음: 교사가 **깊이 넣고 머문 뒤** 당기도록 고친 4차 재수집 진행 중

# 36. 원래 계획 대비 진행

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 확정 순서 0~6단계는 시뮬레이터 안에서 모두 한 바퀴 · 확장 과제는 진행 중

| 단계 | 원래 계획 | 11/15까지 결과 | 상태 |
|---|---|---|---|
| **0 모델 입출력 확인** | 공식 코드의 입력·출력 확인 | 구조·입출력 정리 → 굴착기 4관절 행동으로 연결 | 완료 |
| **1 LIBERO 로봇팔 추론** | 공식 가중치 실제 추론 | 두 모델 **10/10** | 완료 |
| **2 버킷 이동(학습 전)** | 가중치 그대로 굴착기에 적용 | 72회 중 0.5 m 도달 **0회** → 학습 필요 | 완료 |
| **3 수집 환경 정비** | APEX · Isaac 재검토 | APEX 기록기·명령 경로·시뮬레이터 동기 정지 완성 · **Isaac 미착수** | 일부 |
| **4 데이터 수집** | 교사 시연 → 학습 자료 | 버킷 공·콘 학습 run **32** · 굴착 흙 위치 **15곳**(학습 창 1,996) | 완료 |
| **5 외부 GPU 파인튜닝** | GR00T · π0.5 | 버킷 이동·굴착 모두 **두 모델** 학습 | 완료 |
| **6 굴착기 폐루프 재평가** | 학습 후 실제 운전 | 버킷 검증 6/6 · 시험 7/8 · 새 위치 4/8·6/8 · 굴착 동작별 3/4 · 끌기 8/8 · 연속 두 모델 2/2 | 완료 |
| **+ 굴착 스스로 전환** | 모델이 다음 동작까지 판단 | 검증 위치 두 모델 네 동작 완주 · 학습 위치는 관입에서 멈춤 | 일부 |
| **+ 지도 보고 팔 곳 고르기** | 카메라에 지형 높이 지도 추가 | 관로 세 번 학습: 접근 성공 · **기준 통과 없음** · 3차 32번 중 4번 굴착 · 4차 진행 중 | 일부 |
| **+ Isaac 시뮬레이터** | 다른 시뮬레이터로 재현 | — | 미착수 |

# 37. 계획서의 연구내용은 이 실험으로 채워진다

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

## 시뮬레이터 결과로 연구내용 ①~③을 채우는 중 · 실차 2단계는 대리 실험으로 범위 명시

| 계획서 연구내용 | 계획서가 요구하는 것 | 이 실험에서 나오는 것 | 보고서에 쓰는 법 |
|---|---|---|---|
| **① VLA 모델 서베이** 거의 확보 | π0.5·GR00T 2종의 입출력·데이터 요구량·제로샷/퓨샷 일반화 · 야외 필드 적합성 평가 기준 | 구조·입출력 분석 · 로봇팔 실측 지연·VRAM · 굴착기 제로샷 72회 · 기존 사례 2건 · 학습 후 두 모델 같은 기준 비교 | 7축 평가표에 실측값 기입 → 2종 비교표 v2 → **기술보고서**로 등록 |
| **② 데이터셋 설계·시범 구축** 시뮬 확보 | A-O Pair 정의·동기화 표준 · Co-training 전략 · 굴착 시범 데이터셋 1종(시뮬+실환경) | APEX 추출 신호·기록기 · 버킷 이동 공·콘 학습 run 32 · 굴착 네 동작 자료(흙 위치 15곳) | 정의서 + 데이터 카드 + 품질 게이트 결과 · 실환경분은 기존 실차 로그로 보강하고 범위 명시 |
| **③ 모델 적용 실험** 시뮬 1단계 확보 | 1단계 시뮬 사전 검증 → 2단계 실차 테스트베드 · 제로샷 성공률 · 퓨샷 향상률 · 추론 FPS · 위치 오차 | 제로샷 0/72 → **버킷 검증 6/6 · 시험 7/8 · 새 위치 4/8·6/8 · 굴착 동작별 3/4 · 끌기 8/8 · 연속 두 모델 2/2** · 추론 약 0.1초 | 지표표를 시뮬 수치로 채움 · 실차는 APEX 고충실도 대리 실험 + 섀도 모드로 쓰고 **미수행 명시** · 주행 과제는 범위 밖 |
| **④ 중장기 로드맵** 기완료 | 실험 결과에 근거한 2027 전략사업 로드맵·기획서 | 데이터 효율·전이 갭·성공률 수치 | 기존 로드맵의 성능 목표 근거에 11월 수치 연결 |
| **⑤ 정량 성과** 준비 | 논문 1건 투고 · 기술보고서 1건 · 소프트웨어 등록 1건 | 제로샷 실패 분석 + 파인튜닝 결과 · ①의 비교 보고서 · 변환·품질검사·평가 도구 | 논문: 실패 분석+학습 효과 · 기술보고서: ① · SW 등록: APEX→LeRobot 도구 |

계획서: (붙임1) 연구개발계획서 제3장 1·2·3절(연차목표 ①~④, 표 3-3·3-4·3-8) · 수행 방법 대응: 261022 재계획 총괄표

# 38. 진행 중 · 다음 단계

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

**스스로 동작 전환은 검증 위치 완주, 반복은 불안정 · 지도 보고 팔 곳 고르기는 세 번 학습, 기준 통과 없음**

## A

### 굴착 스스로 전환

지시문 하나로 관입 → 끌기 → 닫기 → 올리기
검증 위치: 두 모델 완주
학습 위치: 관입에서 멈춤
반복: GR00T 3회 중 2회 · π0.5 3회 중 1회

일부 완료

## B

### 지도 보고 팔 곳 고르기

지형 높이 지도를 넣은 관로 과제 · 세 번 학습
1·2차: 지도로 위치 고르기 미확인
3차: 32번 중 4번 굴착 · 기준 통과 없음
다음: 교사가 깊이 넣고 머문 뒤 당기는 4차

4차 진행 중

## C

### Isaac 재검토

다른 시뮬레이터에서 같은 과제 재현

미착수