SKKU 마스코트 로봇 V0 설계 설명서

design.md

PhoneBot 하체(13관절)를 그대로 쓰고, 그 위에 마스코트 "율전이"용 상체 뼈대를 새로 설계한 1차 설계본이다. 겉모습(원단 머리 덮개와 얼굴, 의상)은 원단으로 따로 만든다. 이 문서는 그 안에 들어가는 뼈대, 원단을 거는 자리, 전장 배치를 다룬다.

수치의 출처는 `cad/` 코드, `out/report/checks_<c>.json`, `out/report/bom_<c>.json`(c = pi5 또는 jetson), `docs/research/`의 조사 파일, `electrical/electrical_design.md`다. "가정"은 재지 않은 값, "미확인"은 자료가 없는 값, "계산"은 이 문서에서 위 값으로 계산한 값이다.

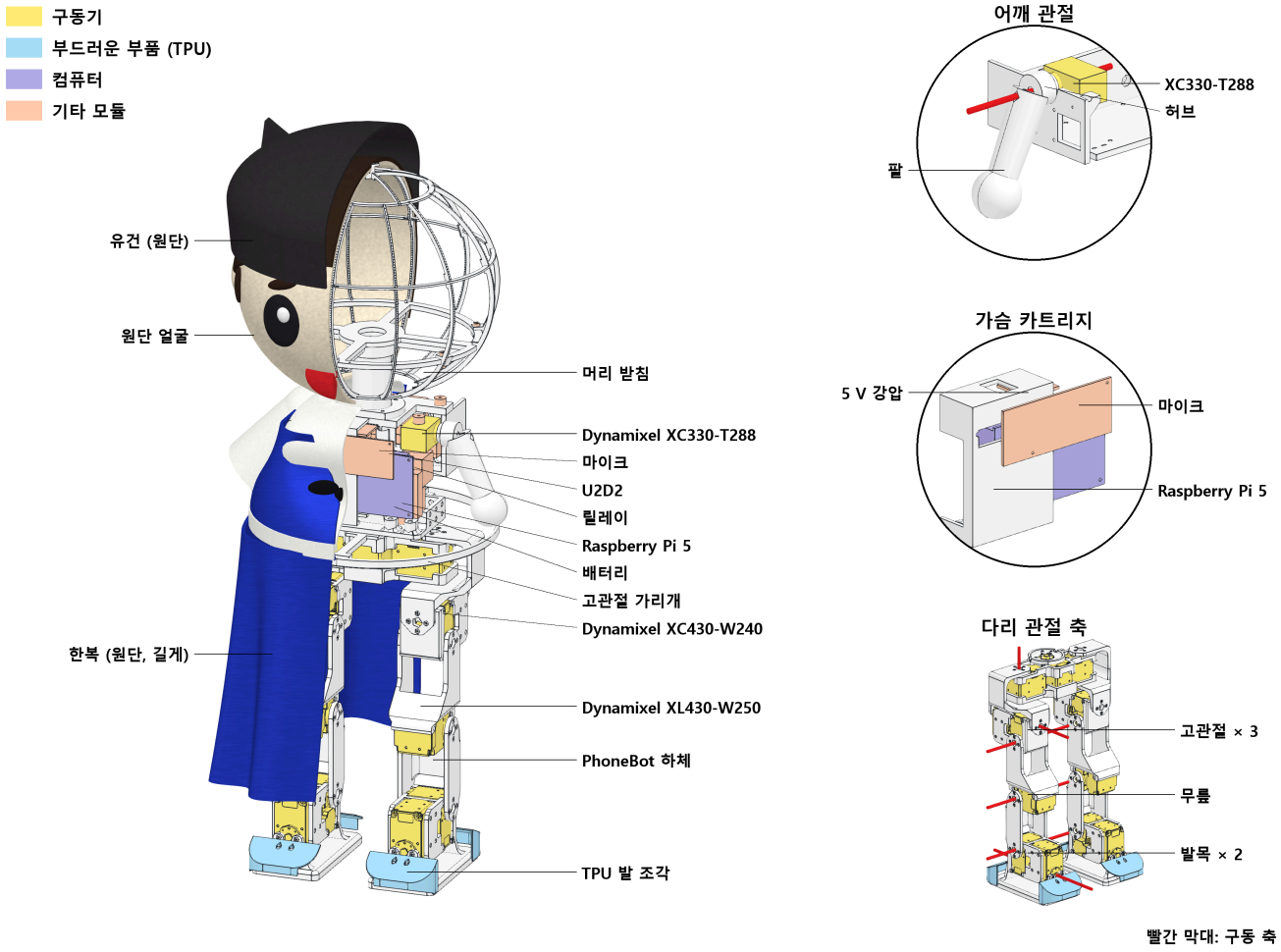
0. 이 설계의 상태

항목	상태
PhoneBot 하체 치수	공개 STEP 파일에서 실측했다. 관절축은 부분적으로 독립된 방법(원통면의 동축 그룹, 링크 구멍 대조)으로 한 번 더 재서 같은 값을 확인했다. 서보 배치 행렬은 앞의 계산과 같은 방식이라 독립 확인이 아니다(`docs/research/step_axes.md`)
새 부품 형상	CAD가 있다. `cad.checks`를 Pi 5, Jetson 두 구성으로 돌려 부품 겹침 0건, 검사 실패 0건이다. 이 겹침 검사는 원본 부품끼리의 쌍과 머리 폼 조각과 기준 형상 `head_shell`의 쌍을 재지 않는다. 머리 폼 `head_form_crown_arc_a`는 `head_shell`과 7.68 mm³ 겹쳐 후속 과제로 남아 있다(13절 12번)
자동 검사	`pytest`(`tests/`, `test_build_pdf.py` 제외) 543개 모두 통과한다. 가리개 앞 받침은 소유자가 받아들인 3.0 mm 예외를 쓰고, 그 예외를 확인하는 테스트도 통과한다(13절 2번). 실행 순서에 따라 실패하던 가리개 턱 테스트는 고쳐 전체 실행에서 통과한다(13절 8번). 커버리지 97%(`cad`, `concept`, `figure`, `costume`, 6,880문 중 205문 미실행). `test_build_pdf.py`는 따로 돈다(15절)
하체 서보	고관절 좌우축 2개는 DYNAMIXEL XC430-W240-T(소유자 승인), 나머지 하체 11개는 XL430-W250-T다. 질량표, 점검 보고서, 부품표, 넷리스트가 이 구성을 따른다(`cad/actuators.py`)
회로 부품	퓨즈 홀더 F1, F3, F6(Jetson은 F1, F3), 분배 단자 J0, J1, J2, 표시등, 배선 트레이, Jetson의 15 V 승압 보드가 CAD에 자리와 질량을 갖고 들어갔다. F2, F4, F5는 하네스 안의 리드형 PPTC이고 질량 3 g으로 들어갔다
머리	출력하는 머리 폼(PETG 늑골 등롱, 18조각)이 CAD에 있다. 그 위의 원단 머리 덮개는 따로 만들고 질량은 허용치 85 g으로 넣었다
고관절 가리개	`cad/hip_guard.py`에 있다. 두 구성 모두 CAD, 질량표(출력 4조각 16.5 g + 나사 1.5 g), 시뮬레이션 골반 링크, BOM(출력 4조각, 나사 줄 3개)에 들어갔다. 뒤 잠금 나사의 파일럿 구멍은 우리가 출력하는 PelvisTop에 들어 있다
의상	`costume/`에 발목 길이 한복용 패턴 초안(조각 63개, `out/costume/`)이 있다. 소유자는 겉모습 목표를 공식 인형 모습으로 정했다. 그 재설계는 후속 과제다(10.4절)
걷는지 여부	시뮬레이션 학습과 실물 보행 시험에서 정한다(14절)
출력과 조립	다음 단계다. 출력 방향과 조립 순서는 설계 의도다
Jetson 카트리지	잠금 나사를 X ±53.0으로 옮겨 보드 대용품을 비켜 간다. 15 V 승압 보드 자리는 임시 리브와 타이이고, 통 앞면과의 0.3 mm에는 폴리이미드 테이프를 붙인다. 캐리어 보드는 구멍에 바로 세우는 출력 스탠드오프로 고정하고, 구멍 위치를 실물로 재서 스탠드오프를 넣은 뒤 출력한다

가장 큰 위험은 무게다. 원본 PhoneBot은 1,800 g이고 이 설계는 의상 가정값을 포함해 2,440.2 g이다. 고관절 좌우축의 정적 부담 지표는 XL430 기준 시뮬레이션 토크 한도의 1.35배이고, 검토가 정한 보행 목표(1.15배)까지 363.6 g을 덜어야 한다. 고관절 좌우축 2개는 XC430으로 바꿔 그 관절의 부담이 XC430 스톨 토크의 0.74배다.

이 지표는 고관절 좌우축의 지렛대(엉덩이 간격의 절반, 52.5 mm)로 잰 값이다. 무릎, 고관절 앞뒤축, 발목은 XL430 그대로 같은 무게를 받지만 지렛대가 관절마다 달라서, 관절별 부담은 따로 계산한다(7절, 13절 1번).

1. 한눈에 보기

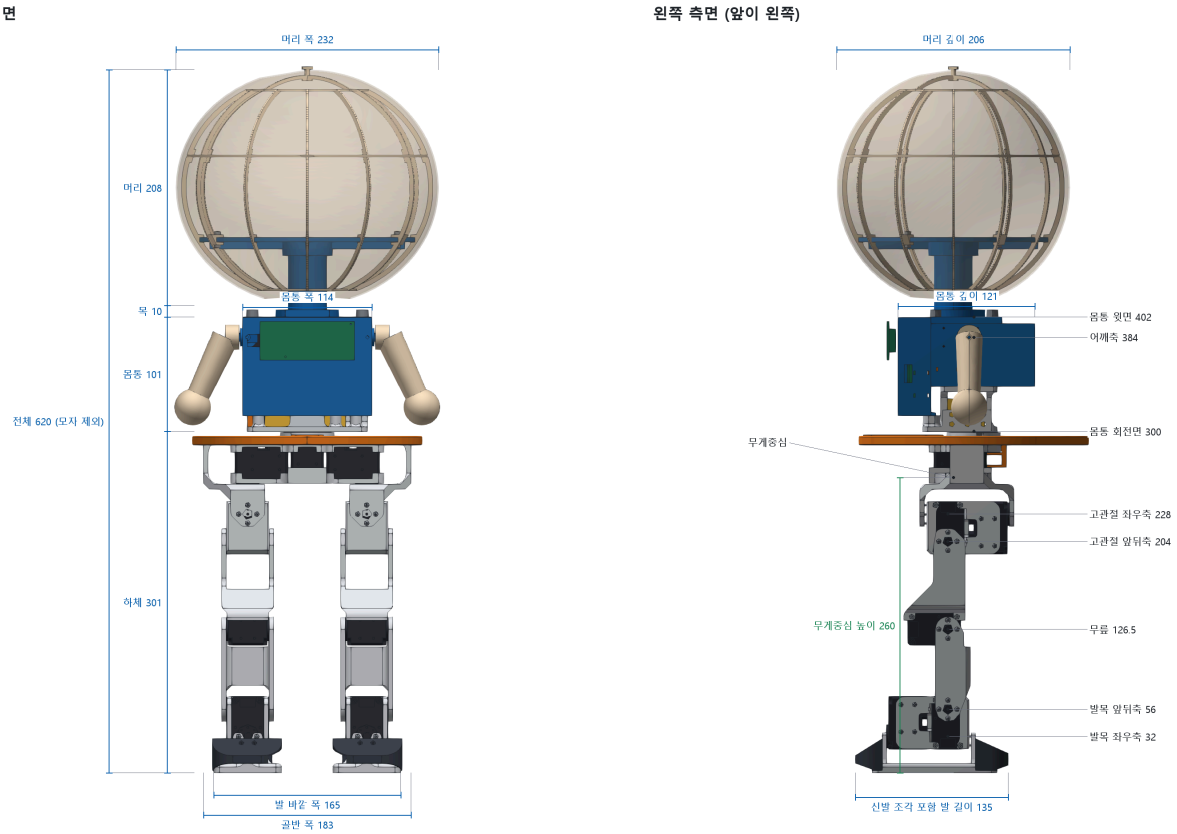


설계 상세도: 왼쪽 절반은 원단 겉모습, 오른쪽 절반은 실제 CAD 뼈대

상세도는 실제 CAD 모델을 그린 것이다. 왼쪽 절반의 원단(얼굴, 유건, 긴 한복)은 따로 만드는 겉모습을 보여 주려고 그려 넣은 것이고 제작 부품이 아니다. 이 그림의 원단은 이전 목표인 발목 길이 한복을 따른다. 새 목표(10.4절)에 맞춘 그림은 의상 재설계와 함께 만든다.

보고 싶은 것	파일
설계 상세도(부품 종류별 색, 어깨, 가슴 카트리지, 다리 축 확대)	06_detail_figure_pi5.png
치수 도면(정면, 측면)	01_dimension_sheet_pi5.png
앞에서 본 전체 모습	02_overview_front_pi5.png
뒤에서 본 전체 모습	03_overview_back_pi5.png
머리 외곽을 뺀 뼈대	04_skeleton_no_shell_pi5.png
돌려 보는 3D	`out/viewer/viewer_pi5.html` (더블클릭, 인터넷 필요)
배선도	wiring_diagram.png
전원과 배선 설계 전문	electrical_design.md

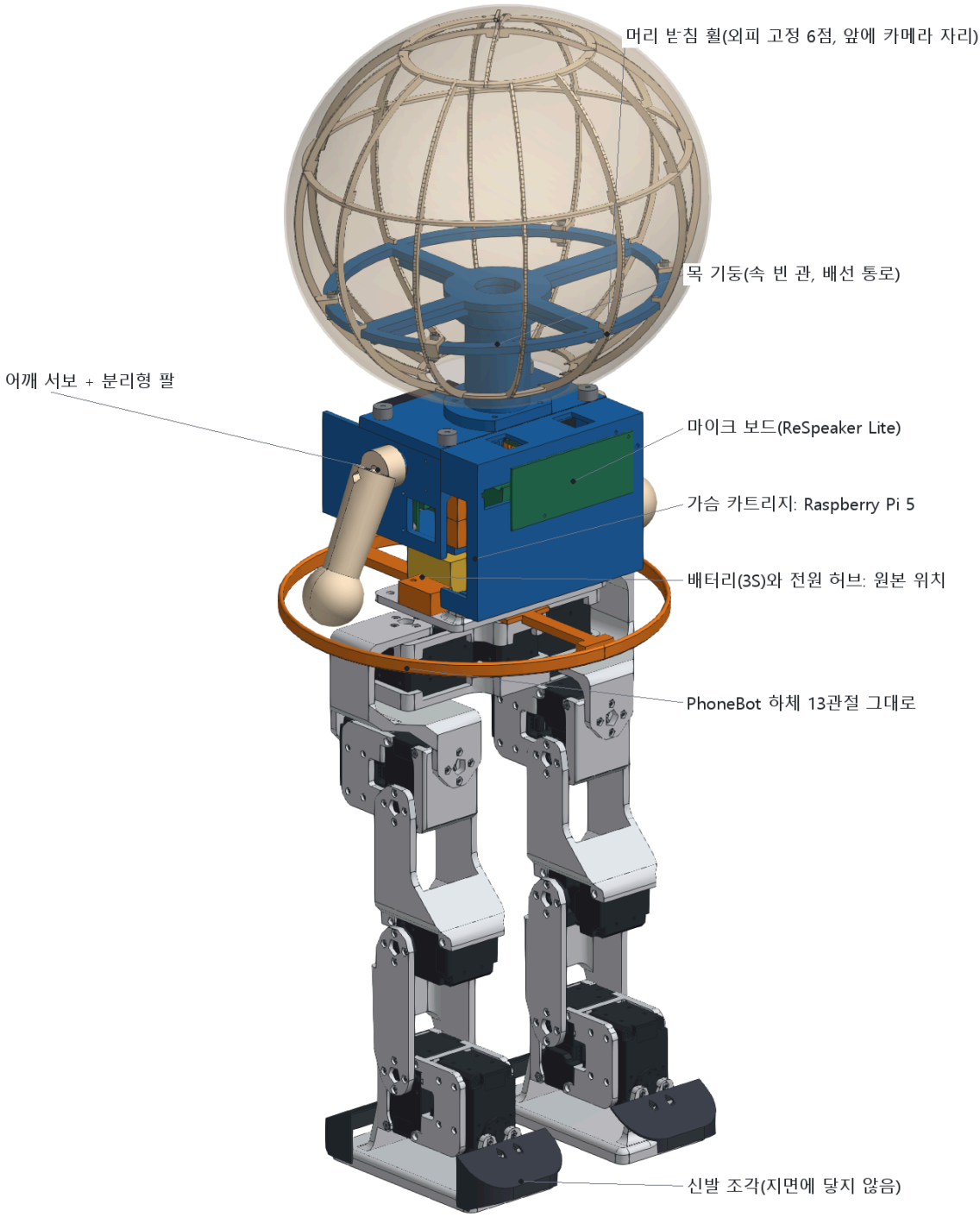
Jetson 구성의 그림은 파일 이름의 `pi5`를 `jetson`으로 바꾸면 된다. 홍보용 시안은 poster_pi5.png에 있다. `out/concept/`의 그림은 홍보용 일러스트이고 설계 근거가 아니다.



치수 도면

SKKU 마스코트 로봇 V0 뼈대 — Raspberry Pi 5 카트리지

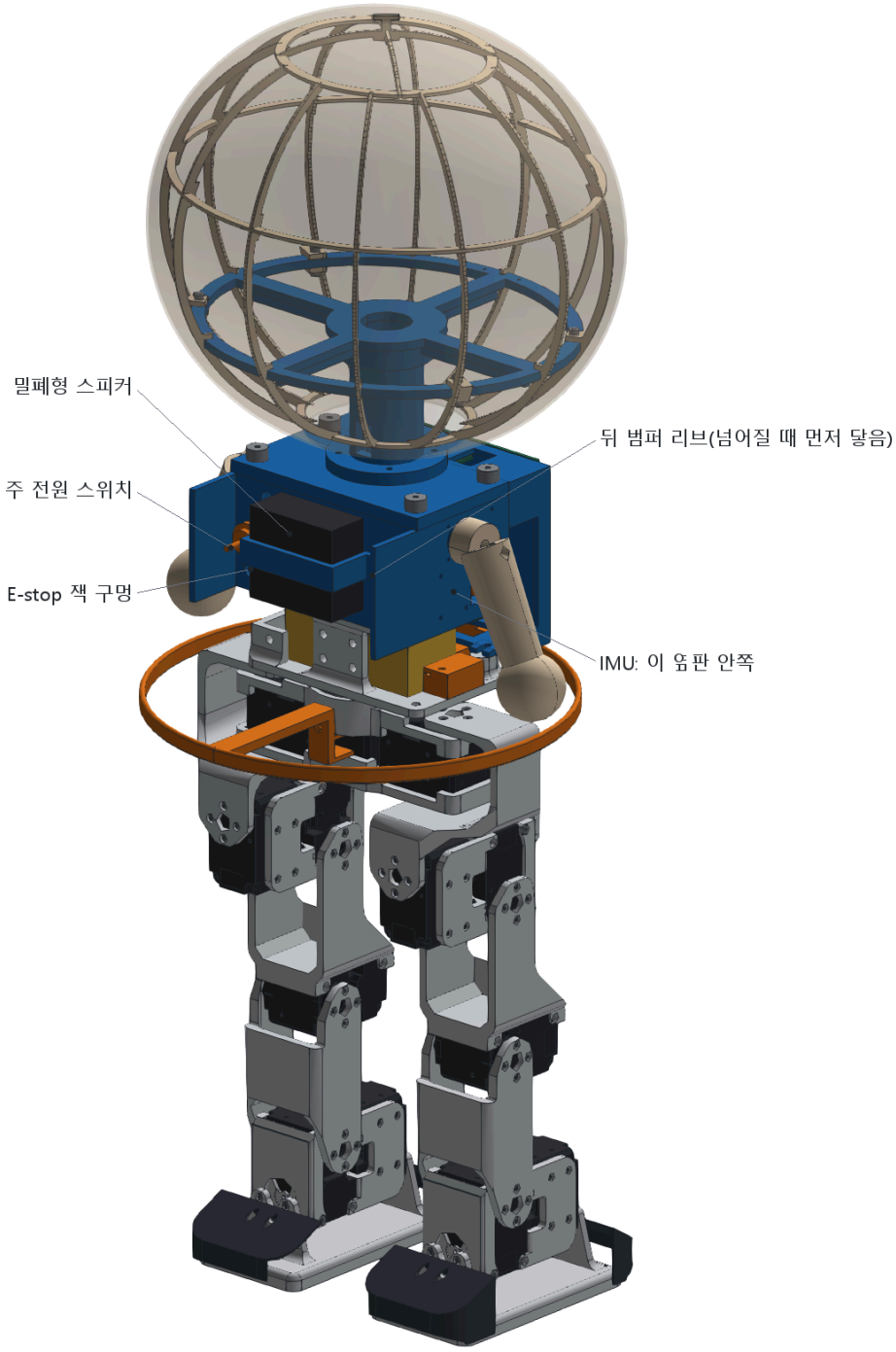
총 2.44 kg (의상과 모자 가정 포함), 단위 mm, 모자 제외



앞에서 본 모습

SKKU 마스코트 로봇 V0 뼈대 — Raspberry Pi 5 카트리지 (뒤)

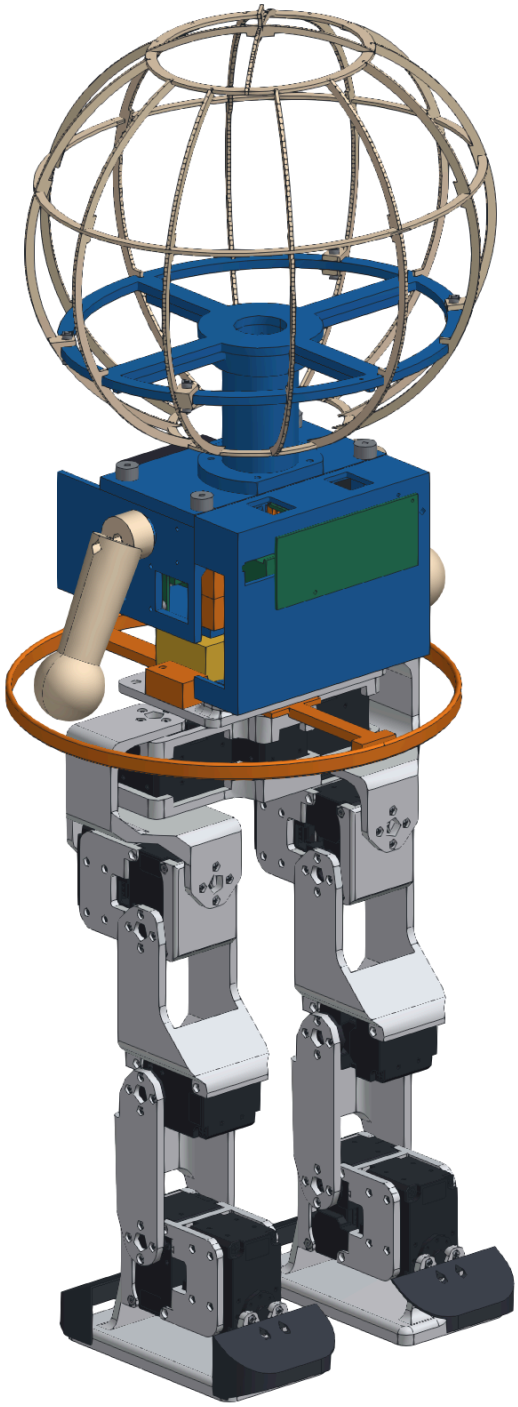
총 2.44 kg (의상과 모자 가정 포함), 단위 mm, 모자 제외



뒤에서 본 모습

머리 외피를 뺀 뼈대

총 2.44 kg (의상과 모자 가정 포함), 단위 mm, 모자 제외



머리 외곽을 뺀 뼈대

핵심 수치(Raspberry Pi 5 카트리지 기준):

항목	값
전체 높이(유건 제외)	620 mm

항목	값
원단을 씌운 머리 외곽	폭 232 × 깊이 206 × 높이 208 mm
머리 폼(외곽 − 5 mm 피부 여유)	폭 222 × 깊이 196 × 높이 198 mm(계산)
몸통 통 바깥 폭	114 mm
전체 질량(의상, 유건, 머리 덮개, 배선 가정값 포함)	2,440.2 g (Jetson 2,524.9 g)
무게중심 높이	260.1 mm (원본 214.9 mm, 가정 기반 추정)
관절 수	하체 13(원본 배치, XL430 11개 + XC430 2개) + 어깨 2 = 15
새로 출력하는 부품	38개(뼈대, 팔, 발 16개 + 고관절 가리개 4개 + 머리 폼 18조각), 340.7 g (Jetson 344.0 g). 여기에 잠금 파일럿을 넣은 PhoneBot PelvisTop 1개를 출력한다

2. 좌표계와 높이 분배

원점은 몸통 회전축 바로 아래 지면이다. +Z가 위, 로봇의 앞은 −Y, 로봇의 왼쪽이 +X다. 단위는 mm다.

유건은 높이 계산에서 뺐다(질량은 Z 650의 점질량 35 g으로 넣었다). 발바닥에서 원단을 씌운 머리 꼭대기까지 620 mm를 이렇게 나눴다.

구간	Z 범위	길이	내용
하체	0 ~ 301	301	PhoneBot 원본. 발목 좌우축 32, 발목 앞뒤축 56, 무릎 126.5, 고관절 앞뒤축 204, 고관절 좌우축 228
몸통	301 ~ 402	101	원본 배터리 받침(TorsoBase) + 새 몸통 통 + 뚜껑. 어깨축은 384
목	402 ~ 412	10	밖에서 보이는 목 길이의 명목값. 목 기둥 자체는 402 ~ 468로 머리 속까지 들어간다
머리	412 ~ 620	208	412는 원단 머리 외곽(타원체)의 명목 아래 끝이다. CAD의 `head_shell`은 지름 76 mm 목 구멍이 뚫려 있어 가장 낮은 점이 Z 417.7이고, 머리 덮개의 단은 턱 고리 아래에서 조인다. 머리 받침 휠 468, 머리 중심 516. 머리 폼의 턱 고리 425, 띠 고리 543, 정수리 고리 601

머리 높이 208 mm는 전체의 약 1/3이다. 머리 중심은 회전축보다 18 mm 앞(Y −18)에 뒀다. 무게중심을 앞으로 당기기 위해서다(7절).

3. 그대로 쓰는 것과 새로 만든 것

PhoneBot에서 그대로 쓰는 것

- 하체 전부: 발, 다리 링크, 고관절 브래킷, 골반, 서보 13개, 몸통 회전축 스러스트 베어링. 서보는 DYNAMIXEL XL430-W250-T 11개와, 고관절 좌우축 자리의 XC430-W240-T 2개다. XC430은 XL430과 외형, 혼, 나사 구성이 같다. 케이스 나사 구멍 깊이 한계가 3.0 mm라서 고관절 좌우축 케이스는 원본 M2.5 × 5 대신 M2.5 × 4 나사 8개씩(모두 16개)으로 잡는다. 머리가 출력물에 바로 앉고 나사가 케이스에 2.45 mm 들어간다(M2.5 × 5는 3.45 mm)
- 배터리 받침(TorsoBase)과 3셀 배터리 자리
- U2D2 Power Hub Board와 U2D2. 위치는 원본 그대로이고, U2D2만 허브 위에서 180° 돌려 USB가 앞(가슴 카트리지 쪽)을 보게 했다. 그래서 U2D2에는 깊이 12 mm 이하의 ㄱ자 USB 플러그를 쓴다

발은 손대지 않았다. 발바닥 판(60 × 110 mm, 두께 8 mm)과 바닥면은 원본과 같다.

원본에서 빼는 것: 휴대폰과 휴대폰 거치대, 전장 프레임(ElectronicsFrame).

새로 만든 것

- 뼈대: 몸통 통, 뚜껑, 가슴 카트리지(Pi 5용 또는 Jetson용), 스피커 클립, 배터리 스톱, 배선 트레이, 목 기둥, 머리 받침 휠
- 팔: 어깨 허브 2, 팔 2
- 발: 신발 조각 4(앞코 2, 뒤꿈치 2)
- 머리 폼: 늑골 12, 띠 고리 반쪽 2, 정수리 고리, 턱 고리, 정수리 아치 2
- 고관절 가리개: 고리 반쪽 2, 앞 받침, 뒤 받침(골반에 고정, 4.8절)
- 의상 고정: 뚜껑 나사 4개 위의 스냅 스터드(구매품)

4. 부위별 설계

4.1 몸통 통과 뚜껑

- 몸통 통(`torso_tub`)은 바닥판 4 mm + 양 옆판 4 mm + 뒤판 4 mm로 된 ㄷ자 통이다. 앞과 위가 열려 있다. 바깥 폭 114 mm, 앞뒤 Y −38 ~ 25, 높이 Z 340.85 ~ 396.
- 바닥판은 TorsoBase 윗면의 M3 인서트 4개에 얹힌다. 이 4개는 원본에서 Power Hub Board를 고정하던 자리다. 암수 육각 스탠드오프(몸통 6 mm) 4개가 바닥판을 누르고, 그 위에 Power Hub Board가 원본 높이로 앉는다.
- 네 귀퉁이에 높이 16 mm 블록이 있고 밑면은 45° 모따기다. 위쪽에 뚜껑용 M3 인서트(깊이 8 mm) 4개, 앞쪽 두 블록의 앞면에 가슴 카트리지 잠금용 M3 인서트 2개(X ±53.0, Z 384, 구멍 깊이 7 mm. M3 × 12 나사 끝 너머로 1 mm가 남는다)가 있다.
- 양 옆판에는 어깨 서보 혼이 나오는 지름 17 mm 창과 서보 케이스 M2 구멍 4개가 있다. 창과 나사 구멍 사이에 벽이 1.4 mm 남는다. 오른쪽(−X) 옆판에는 IMU용 M2.5 구멍 4개와 통풍창(Y −34 ~ −12, Z 348.85 ~ 368)이 있고, 왼쪽(+X) 옆판에는 릴레이용 타이 슬롯 2개가 있다.
- 뒤판 바깥 양 끝의 범퍼 리브는 Y 54까지 나와 스피커(Y 48.3까지)보다 먼저 닿는다. 리브는 바닥판에서부터 올라오므로 바닥판을 아래로 출력할 때 걸치는 곳이 없다. 다리를 편 채 뒤로 넘어질 때 머리가 리브보다 먼저 땅에 닿을 수 있다는 지적이 있고, 아직 확인하지 않았다(13절 7번).
- 뒤판 구멍: 주 전원 토글(X 45, Z 366, 지름 12.5 mm. 안쪽을 파서 그 자리만 패널 두께 3 mm), E-stop 잭(X 45, Z 351, 지름 8 mm), 모터 레일 표시등(X 30, Z 358, 지름 8 mm), 스피커 리드 그로밋(X 35, Z 388, 지름 8 mm), 스피커 클립용 M3 인서트 2개.
- 바닥판: TorsoBase 나사 구멍 4개, 다리 케이블 슬롯 2개(+X 쪽 X 34 ~ 46, Y −10 ~ 2 / −X 쪽 X −46 ~ −34, Y 10 ~ 20), 앞쪽 퓨즈 묶음용 타이 슬롯 2개(X −42.75, −34.75, Y −29.6), 배터리 리드 슬롯 1개(X −53 ~ −47.3, Y −38.5 ~ −29.8, 앞 가장자리와 −X 옆판 안쪽 면까지 열림). 배터리 리드 슬롯은 F1 리드 끝 바로 옆이라 XT60에서 올라오는 W01(HHM의 12 AWG 리드, 지름 4.5 mm 이하)과 W17(16 AWG)이 나란히 곧게 들어오고, 둘레에 0.2 mm 이상 남는다. 받은 HHM 리드의 지름을 재서 확인한다.
- 뚜껑(`top_deck`)은 6 mm 판이다. 머리 무게를 받으므로 4 mm보다 굽힘에 약 3배 강하게 했다. 통 귀퉁이 블록에 M3 나사 4개로 고정하고, 이 나사는 스냅 스터드를 함께 잡는 M3 × 12 접시머리가 된다. 가운데(X 0, Y −18)에 배선이 지나가는 지름 24 mm 구멍이 있고, 아래에는 목 기둥 인서트용 보스 4개(지름 9, 높이 4 mm)가 있다. 인서트 구멍은 보스 밑에서 1 mm 바닥을 남기고 Z 393에서 뚜껑 윗면 Z 402까지 뚫려 있어 쓸 수 있는 깊이는 9 mm다. 앞 가장자리에는 5 V 강압 모듈과 1.1 mm를 두는 얕은 홈이 있다.

4.2 배터리 스톱과 배선 트레이

- **배터리 스톱**(`battery_stop`, PLA 4.3 g)은 TorsoBase 배터리 트레이의 열린 −X 끝을 막는다. X 방향 길이 14.9 mm. 트레이 바닥의 빈 4.8 mm 구멍 3개 중 앞 구멍에 핀을 꽂고, 가운데 구멍에 TorsoBase가 쓰는

것과 같은 M3 열압입 인서트(바깥 5.6 × 길이 3.8 mm)를 박아 M3 × 16 나사 1개로 누른다. 나사 끝은 트레이 밑면보다 0.15 mm 위에서 끝나므로 더 긴 나사를 쓰지 않는다. 스톱을 Y 방향으로 뚫은 타이 슬롯으로 XT60 피그테일과 밸런스 알람을 묶는다.

- 스톱은 팩이 +X 쪽으로 가는 것을 막지 않는다. 트레이 +X 끝의 11.5 mm를 폼 블록으로 채운다(폼 블록은 CAD 밖의 부품, 13절 2번).
- **배선 트레이**(`wiring_tray`, PLA 5.9 g)는 Power Hub Board 위에 얹는 떼어 낼 수 있는 받침이다. 분배 단자 J0(WAGO 2개)를 −X 쪽 요람에, J1과 J2를 +X 쪽 주머니에 싣는다. 왼쪽 에이프런이 앞쪽 F1, F3 묶음의 등을 받친다. 퓨즈는 바닥판의 앞쪽 묶음에 묶는다. 오른쪽 에이프런은 스탠드오프 받침의 앞 리브로 그대로 둔다. 두 받침의 강성이 대칭이 되고 판이 출력 중 안정하게 서기 때문이다(소유자 결정).
- 트레이는 허브 앞쪽 모서리 구멍 2개에 세운 M3 × 16 암수 스탠드오프 위에 M3 나사 2개로 고정한다. 뒤 끝의 발은 U2D2 윗면 위 0.05 mm에 있고 닫힌 뚜껑 아래의 기둥이 누른다. 어깨 서보 아래에 걸치는 곳이 없어서 곧게 위로 들어가고 나온다.
- 선은 단자에서 옆으로 나와 두 에이프런 사이 가운데(X −7.8 ~ 8)로만 올라간다. 뚜껑까지는 서보 위에서 약 2 mm다.

4.3 가슴 카트리지

컴퓨터 보드는 몸통 통 앞에 붙는 상자(`chest_box_pi5` 또는 `chest_box_jetson`)에 넣는다. 보드를 바꿀 때 이 상자만 바꾼다. 강압 모듈과 보드 옆에서 형태를 유지하도록 PETG로 출력한다.

- 상자는 뒤가 열린 쟁반 모양이다. 앞벽 안쪽에 보드가 6 mm 스탠드오프로 서고, 앞벽 바깥에 마이크 보드(ReSpeaker Lite)가 8 mm 간격재 위에 M2 나사 2개로 붙는다. 앞벽에는 마이크 보드의 케이블과 스피커 단자 플러그가 지나가는 구멍이 있다.
- 아래쪽 발 3개는 포크 모양이다. TorsoBase 앞쪽 받침의 M3 나사 3개를 게이지로 3 mm 띄워(+0.1 / −0.0 mm. 더 낮으면 카트리지가 끝까지 들어가지 않는다) 나사 고정제를 바른다. 카트리지를 앞에서 밀면 발 윗면의 받침이 마지막 몇 mm에서 나사머리 높이까지 올라와 유격 없이 눌린다.
- 위쪽은 잠금 나사 2개(M3 × 12 육각 구멍 볼트, X ±53.0, Z 384)로 잠근다. 나사는 카트리지 러그 안에 미리 넣어 두고, 러그 뒷면 홈(지름 5 mm, 깊이 1 mm)의 O링이 나사를 붙잡아 빠지지 않게 한다. 나사는 보드를 넣기 전에 끼운다. 카트리지를 끝까지 민 뒤 앞벽의 지름 3.5 mm 통로로 2.5 mm 육각 렌치를 넣어 통 앞 귀퉁이 블록의 인서트에 조인다. 이 축은 Jetson 캐리어 보드(폭 100 mm) 바깥이라 두 구성이 같은 잠금을 쓴다.
- Pi 5용은 안쪽 깊이 26.5 mm다. 보드는 +X 쪽으로 10 mm 치우쳐 있어서 −X 벽의 포트 창(뒤 끝까지 트임)으로 USB, 이더넷 플러그를 꽂을 공간이 남는다. +X 벽에는 SD 카드 창이 있다. Pi 5의 고정 구멍은 58 × 49 mm이고 SD 카드 쪽 끝에서 3.5 mm 지점부터 시작한다. 보드는 M2.5 나사 4개를 스탠드오프의 2.1 mm 구멍에 바로 조인다.
- 5 V 강압 모듈(Pololu D36V50F5)은 Pi 5용 상자의 천장 아래 리브 2개(X ±9.5 ~ 11.5)에 기판 가장자리를 대고, 천장 슬롯 2개(X −30 ~ −16, 16 ~ 30)를 지나는 케이블 타이로 당겨 단다. 천장과 3 mm, 앞벽과 1 mm 띄운다. 리브는 임시이고, 모듈의 구멍 위치를 실물로 확인하면 보스로 바꾼다.
- 5 V 퓨즈 F6 홀더는 Pi 5용 상자의 +X 벽 안쪽에 세로로 서고, 벽의 슬롯 2쌍을 지나는 타이 2개로 묶는다.
- 바닥에는 X ±30 mm의 통풍구가 있고 통에서 오는 선의 출구를 겸한다.
- Jetson용은 안쪽 깊이 40 mm다. 캐리어 보드는 앞벽에서 캐리어 구멍에 바로 세우는 출력 스탠드오프 4개로 고정한다(소유자 결정, 깊이 40 mm에 맞음). 구멍 위치는 NVIDIA 참조 설계 파일에 있으므로 실물을 재서 스탠드오프를 넣는다(13절 12번). 천장 슬롯은 위를 보는 커넥터 줄을 위해 X ±3 ~ 48 두 개로 나눴다. −X 벽의 포트 창은 두 구성 모두 −X 잠금 러그 아래인 Z 379에서 멈춘다.
- Jetson용의 +X 벽 안쪽에 15 V 승압 보드(Pololu U3V70F15, 3.5 g)가 벽에서 1.5 mm 떨어져 눕는다(X 48.5 ~ 53.1, Y −53.5 ~ −38.3, Z 334.0 ~ 374.6). 지금은 벽의 1.5 mm 리브 2개가 보드 양 끝을 받치고, 벽의 슬롯

2개(Z 332.0 ~ 333.5, 375.1 ~ 376.6)를 지나는 케이블 타이 1개가 보드를 잡는다. 제조사 도면에서 구멍 위치를 읽으면 M2 나사 2개와 보스로 바꾼다. 보드와 통 앞면 사이는 0.3 mm이고, 자리를 그대로 두고 통 앞면에 폴리이미드 필름 테이프(약 0.065 mm, 45 × 20 mm, 0.1 g)를 붙여 보드 뒤 가장자리를 절연한다(소유자 결정).

4.4 목, 머리 받침 휠, 머리 폼

- 목 기둥(`neck_post`)은 바깥지름 34 mm, 안지름 24 mm 관이다. 아래 플랜지(지름 56 mm, 두께 6 mm)는 뚜껑 앞 가장자리에서 평평하게 잘린 D자 모양이라 가슴 카트리지 위로 넘어가지 않는다. 지름 44 mm 원 위의 M3 나사 4개로 뚜껑 아래 보스의 인서트에 고정한다. 플랜지 바로 위에 케이블 구멍(10 × 16 mm), 위 끝 근처에 휠 고정용 반지름 방향 M3 인서트 3개가 있다.
- 머리 받침 휠(`head_wheel`)은 살 4개가 달린 납작한 바퀴다(PLA 42.5 g). 슬리브(바깥지름 44, 길이 12)가 목 기둥 위에 끼워지고 반지름 방향 M3 나사 3개(Z 462)로 고정된다. 몸통을 열지 않고 머리 전체를 뺄 수 있다.
- 휠 테두리는 폭 7 mm의 타원이고 바깥 반지름이 95.08 × 83.71 mm다. 머리 폼의 휠 높이 단면에서 늑골 웹 2 mm를 뺀 크기다. 테두리에 M3 구멍 6개(30°, 90°, 150°, 210°, 270°, 330°)가 있고, 앞쪽에 카메라 브래킷용 M2 구멍 2개(간격 21 mm, Phase 2용)를 남겼다.
- **머리 폼**(`cad/head_form.py`)은 원단 머리 덮개의 형태를 잡는 PETG 늑골 등롱이다. 표면은 원단 머리 외곽에서 피부 여유 5 mm(폼 안감 3 mm + 원단 최대 2 mm)를 뺀 타원체다.
  - 자오선 늑골 12개(두께 1.6 mm, 깊이 4 mm)가 턱 고리에서 휠 테두리를 지나 정수리 고리까지 간다. 8개는 입술 두 개로 테두리에 끼우고, 4개(30°, 150°, 210°, 330°)는 나일론 M3 × 12 나사와 너트로 테두리에 볼트 고정한다.
  - 띠 고리(Z 543, 반쪽 2개를 겹쳐 붙임), 정수리 고리(Z 601), 턱 고리(Z 425)가 늑골을 잡고, 정수리 아치 2개가 정수리 위에서 반턱으로 교차한다. 아치 a에는 머리 덮개의 단춧구멍과 유건 고리를 거는 토글이 있다.
  - 조각은 모두 판으로 눕혀 서포트 없이 출력한다(0.2 mm 층, 속 채움 100%). 출력 질량 35.1 g, 나일론 체결류와 순간접착제 포함 36.3 g이다.
  - 등롱은 휠 둘레에 조립하므로 휠 위로 넘기거나 목 구멍을 통과시킬 일이 없다.
  - 받아들인 편차: 늑골 사이 면의 최대 깊이 약 4.2 mm(목표 4.0 mm, 테스트 허용 4.23 mm), 테두리에서 늑골 웹 최소 1.57 mm(목표 2.0 mm), 볼트 늑골의 나사머리 자리 홈.
- 머리 예산: 이전의 "머리 외피 150 g" 줄을 "머리 폼 36.3 g + 머리 덮개 허용치 85 g = 121.3 g"으로 바꿨다. 150 g 예산 안이다. 덮개 허용치 85 g은 추정 82 g에 여유를 둔 값이다. 비관 경우에는 머리 덮개를 150 g으로 본다.
- CAD의 `head_shell`은 원단을 씌운 머리 외곽을 나타내는 기준 형상이고 질량이 없다. 간섭 검사와 팔 흔들기 검사에 쓴다.

4.5 어깨와 팔

- 어깨 서보는 DYNAMIXEL XC330-T288-T다. 하체 서보와 같은 배터리 전압 버스에 물린다. 몸통 통 옆판 안쪽에 케이스를 M2 나사 4개로 고정하고, 혼이 옆판의 창으로 나온다.
- 혼에는 지름 16 mm, 두께 3 mm 원판(`shoulder_hub`)을 M2 나사 4개로 붙인다. 원판의 7.6 mm 사각 키에 팔을 끼우고, 키 가운데의 2.5 mm 구멍에 M3 자가 탭 나사 1개로 잡는다(인서트 없음, 벽 2.55 mm). 팔이 세게 부딪히면 값싼 팔이 먼저 부러지도록 한 구조다.
- 팔은 지름 22 mm, 길이 12 mm 그루터기에서 시작해 길이 68 mm(뿌리 지름 24, 끝 지름 19), 끝에 지름 32 mm 손이 달린 한 덩어리이고 바깥으로 25° 벌어져 있다. 발포 PLA(LW-PLA)로 속을 비워 출력하면 개당 6.0 g이다(속 채움 25% 가정).

- 팔은 앞뒤로 흔드는 한 축만 있다. 보행 정책과 무관하게 따로 움직인다. 서보 각도 제한은 앞으로 135°, 뒤로 150°다(8절).
- 소매를 팔 그루터기에 거는 자리(지름 36 mm 플랜지와 걸림 리브)는 넣지 않았다. 플랜지가 오른팔 쪽 IMU 위 나사 두 개의 드라이버 통로를 막았기 때문이다. 소매를 거는 방법은 의상 재설계와 함께 정한다(13절 3번).

4.6 신발 조각

발바닥 판은 그대로 두고, 앞뒤에 땅에 닿지 않는 TPU 조각만 붙였다.

- 앞코(`shoe_toe`)는 발판 앞 끝에서 15 mm, 뒤꿈치(`shoe_heel`)는 뒤 끝에서 10 mm 더 나온다. 조각을 포함한 발 길이는 135 mm다.
- 조각의 밑면은 발판 가장자리에서 3 mm 올라간 높이에서 시작해 바깥으로 갈수록 20°로 들린다. 발판 옆을 감싸는 부분도 바닥에서 2 mm 떠 있다. 평지에서 조각이 바닥에 닿으려면 발이 20° 넘게 기울어야 한다.
- 안쪽(두 발 사이)에는 벽이 없다. 두 발 사이 간격 45 mm가 줄지 않는다.
- 조각마다 탭 2개를 발 앞벽, 뒷벽의 빈 M2 구멍 2개에 나사로 고정한다. 덮개에 지름 4.5 mm 드라이버 구멍이 있다. 새 구멍을 뚫지 않는다.
- 질량은 앞코 2.5 g, 뒤꿈치 3.3 g, 한 발 5.8 g이다.

4.7 전장 부품 자리

위치는 CAD 대용품 기준이다. 자세한 좌표는 전원과 배선 설계 6.1절에 있다.

부품	자리	고정 방법
배터리(Zeee 3S 2200 mAh)	원본 TorsoBase 트레이	−X 끝을 배터리 스톱이 막는다. +X 끝 11.5 mm는 폼 블록(CAD에 없음)
U2D2 Power Hub Board + U2D2	몸통 통 바닥판 위, 원본 높이	M3 스탠드오프 4개
Raspberry Pi 5	가슴 카트리지 앞벽 안쪽	6 mm 스탠드오프 4개, M2.5 나사
5 V 강압 모듈	Pi 5 카트리지 천장 아래	리브 2개 + 케이블 타이
마이크 보드(ReSpeaker Lite)	카트리지 앞벽 바깥	8 mm 간격재 + M2 나사 2개
스피커(밀폐형)	뒤판 바깥 가운데	스피커 클립 + M3 2개, 뒤에 1 mm 폼
주 전원 토글(NKK S1A)	뒤판 X 45, Z 366	M12 너트. 그 자리만 벽을 3 mm로 얇게 했다
E-stop 잭	뒤판 X 45, Z 351	지름 8 mm 구멍. 품번 미정
모터 레일 표시등(APEM Q8)	뒤판 X 30, Z 358	M8 패널 너트
IMU(BNO085)	오른쪽(−X) 옆판 안쪽, 중심 Y 0, Z 359	M2.5 암수 나사 스페이서 4개(3 mm). 옆판 바깥에서 M2.5 × 6 나사 4개, 오른팔을 들고 조인다
비상정지 릴레이(CB1a)	통 안 +X 앞쪽 바닥	왼쪽 옆판 슬롯 2개로 케이블 타이
퓨즈 F1(주, 20 A, HHM 홀더)	통 앞 열린 면 −X, 2단 묶음 아래칸(X −47.3 ~ −7.7, Z 344.95 ~ 359.95)	바닥판 슬롯 2개를 지나 앞 가장자리를 감는 묶음 타이 2개, 등은 트레이 왼쪽 에이프런. 퓨즈는 +X로 빠진다(30 mm 이상). 리드는 −X 끝에서 배터리 리드 슬롯 쪽으로 나간다
퓨즈 F3(모터)	같은 묶음 위칸(Z 360.0 ~ 375.0)	F1과 같은 타이 2개. 퓨즈는 +X로 빠진다(30 mm 이상)

부품	자리	고정 방법
PPTC F2, F4, F5	하네스 안, F3 위에 눕힘(X −43.9 ~ −7.7, Z 375.5 ~ 390.0 안. 몸체는 X −8 이하, Z 395.7 이하)	같은 묶음 타이 2개 아래. 몸체는 느슨한 슬리브, 수축 튜브는 납땜부에만
퓨즈 F6(5 V, Pi 5만)	카트리지 +X 벽 안쪽	벽 슬롯 2쌍으로 타이 2개
15 V 승압 보드 (Jetson만)	카트리지 +X 벽 안쪽(X 48.5 ~ 53.1, Y −53.5 ~ −38.3, Z 334.0 ~ 374.6)	벽 리브 2개 + 벽 슬롯 2개를 지나는 타이 1개(임시). 다음 단계는 M2 나사 2개와 보스. 통 앞면 쪽은 폴리이미드 테이프
분배 단자 J0, J1, J2	배선 트레이	J0 요람(−X), J1과 J2 주머니(+X)

스위치, E-stop 잭, 표시등은 범퍼 리브와 스피커 사이에 있다. 팔이 휘두르는 경로 밖이다.

4.8 고관절 가리개

고관절 가리개(`cad/hip_guard.py`)는 골반에 고정한 가벼운 고리다. 몸통과 함께 도는 옷이 고관절 yaw 브래킷 위에 눕지 않고 고정된 매끈한 테두리 위로 미끄러지게 한다. 다리 링크에는 아무것도 달지 않는다.

조각	재질, 질량	고정	출력
고리 반쪽 2개(`hip_guard_ring_left`, `_right`)	LW-PLA, 개당 3.6 g	양 끝 탭을 앞뒤 받침 패드 아래로 밀어 넣고, 아래에서 M2.5 × 6 접시머리 탭 나사로 패드에 조인다(반쪽당 2개)	바닥면을 베드에, 대각선으로 눕혀 173 × 173 mm. 서포트 없음
앞 받침(`hip_guard_front_mount`)	PLA, 3.7 g	PelvisTop 앞 코에 얹는다. 몸통 yaw 서보의 앞 나사 2개(M2.5 × 12 접시머리)를 빼고 받침의 턱을 지나 M2.5 × 14 접시머리로 다시 조인다	뒤집어서. 턱, 살, 패드 윗면이 Z 297.75로 같다
뒤 받침(`hip_guard_rear_mount`)	PLA, 5.6 g	몸통 yaw 서보 뒤 빈 곳에 뒤에서 밀어 넣는다. PelvisBottom 뒤 탭 위, PelvisTop 보스 아래에 앉는다. 뒤 잠금 나사 1개(M2.5 × 10 접시머리 탭 나사)가 받침의 세움판을 지나 PelvisTop 보스의 2.1 mm 파일럿 구멍(깊이 6 mm, 출력하는 PelvisTop에 들어 있음)에 들어간다	옆면(x = −6 면)을 베드에. 한 단면을 밀어낸 형상이다
추가 나사 5개	1.5 g(가정)	고리 탭 나사 4개 + 뒤 잠금 나사 1개. 앞 나사 2개는 원래 나사를 바꾼 것이다	

- 고리는 반지름 99.0 ~ 101.4 mm, Z 289 ~ 297이다. 안쪽 면은 고관절 yaw가 어느 각이어도 브래킷이 쓸고 지나가는 원보다 4.4 mm 바깥이다. 출력 4조각과 나사를 합쳐 18.0 g(표의 반올림 값을 더한 것, 시뮬레이션 링크의 반올림 전 합은 18.1 g)이고 예산 19.0 g 안이다.
- 뒤 잠금 나사가 없으면 뒤 받침이 뒤로 3.85 mm 미끄러져 탭에서 빠질 수 있다. 그래서 PelvisTop 보스 뒤에 파일럿 구멍(지름 2.1 mm, 깊이 6 mm)을 둔다. 자리는 잠금 축 위, X 0, Z 286이고 보스 뒷면 Y 24에서 Y 18까지다(나사 끝 Y 19보다 1 mm 깊다). 이 구멍은 우리가 출력하는 PelvisTop의 형상에 들어 있다(`out/printables/step`, `stl`의 `phonebot_pelvis_top`, 소유자 결정). PhoneBot 파일로 이미 출력한 PelvisTop에는 같은 자리에 2.1 mm, 깊이 6 mm로 뚫는다.
- 몸통 회전 간격(`checks_<c>.json`의 `guard_yaw_clearance`): 고리 반쪽과 팔 9.39 mm(요구 5.0 mm), 앞 받침과 TorsoBase 3.10 mm(예외 기준 3.0 mm), 뒤 받침과 TorsoBase 5.10 mm(요구 5.0 mm). 배터리 스톱과 앞 받침은 4.1 mm다. 앞 받침은 소유자가 받아들인 3.0 mm 예외를 쓴다. 이 예외는 `cad/checks.py`에서 5 mm 규칙(`MIN_YAW_GAP_MM`) 바로 옆에 이유와 함께 `GUARD_FRONT_MOUNT_YAW_GAP_WAIVER_MM`, `YAW_GAP_WAIVERS`로 적혀 있다. 나머지 조각과 부품은 모두 5 mm 규칙을 지킨다.
- 가리개가 지키는 범위: 모든 몸통 회전각에서 브래킷의 옆면. 옷의 허리 안쪽 면이 고리에서 1 mm(`CLOTH_MIN_GAP`, 반지름 102.4 mm) 이상 바깥에 있을 때 성립한다. 브래킷 윗면(Z 296.3), 고관절

좌우축과 앞뒤축, 브래킷 아래 팔(Z 190 ~ 255)은 덮지 않는다.

- 정강이가 수평보다 올라가는 다리 자세는 관절 범위 안에서 고리 앞에 닿는다. 시뮬레이션은 그 자세를 막거나 가리개를 골반 링크의 충돌 형상으로 넣는다(11절).
- 다리 케이블과 보조 주입선이 가리개 안쪽을 지나는 경로는 실물 배선 때 정한다(13절 4번).
- 새 의상 목표에서는 흰 바지를 이 고리에 건다(10.4절). 고리가 바지 무게를 받을 때의 강도와 질량은 의상 재설계와 함께 확인한다.

5. 조립 순서

5.1 처음 조립

1. 하체를 PhoneBot 조립 순서 그대로 조립한다. PelvisTop은 잠금 파일럿이 들어간 `phonebot_pelvis_top`으로 출력한다. 고관절 좌우축 자리에는 XC430-W240-T를 달고, 그 케이스는 M2.5 × 4 탭 나사로 잡는다(서보당 8개, 모두 16개, 와셔 없이). 나사는 케이스에 2.45 mm 물린다(최소 2.0 mm). 첫 다리에서 나사 하나를 조인 뒤 손으로 당겨 보아 단단히 물렸는지 확인한다. 휴대폰 거치대와 전장 프레임은 달지 않는다.
2. 신발 조각 4개를 발 앞벽과 뒷벽의 빈 구멍에 M2 나사로 고정한다(조각당 2개).
3. 고관절 가리개를 단다(아래 순서, `cad/hip_guard.py`의 `HIP_GUARD_ASSEMBLY`). 상체를 올리기 전이면 가와 아를 건너뛴다.
   - 가. 상체를 몸통 yaw 혼에서 들어낸다. 몸통 yaw 서보의 앞 나사 2개는 어느 회전각에서도 TorsoBase, 배터리, 바닥판 아래에 있다.
   - 나. 그 두 나사가 서보 케이스에 들어가는 M2.5 접시머리 기계 나사인지, 바꿔 넣을 M2.5 × 14가 나사산 전체에 물리는지 로봇에서 확인한다. 새 나사 끝은 1.2 mm 덜 들어간다.
   - 다. 뒤 받침을 몸통 yaw 서보 뒤 빈 곳에 뒤에서 밀어 넣는다.
   - 라. 뒤 받침을 잠근다. 출력한 PelvisTop의 보스 뒤에는 2.1 mm 파일럿(깊이 6 mm, X 0, Z 286)이 있다. PhoneBot 파일로 출력한 PelvisTop이면 세움판의 2.7 mm 구멍으로 센터 펀치를 찍고 같은 치수로 뚫는다(세움판 구멍은 드릴 안내가 아니다. 2.1 mm 드릴이 0.3 mm 논다). M2.5 × 10 접시머리 탭 나사를 뒤에서 넣는다. 머리가 면과 같아지면 멈춘다. 이때 패드가 보스 쪽으로 0.2 mm 당겨진다.
   - 마. 앞 나사 2개를 빼고 앞 받침을 PelvisTop 코에 얹은 뒤, 턱을 지나 M2.5 × 14 접시머리로 다시 조인다.
   - 바. 고리 반쪽을 고리 높이에서 옆으로 넣는다. 탭이 받침 패드 아래로 미끄러져 들어간다.
   - 사. M2.5 × 6 접시머리 탭 나사 4개를 아래에서 패드에 넣는다.
   - 아. 상체를 다시 올린다.
4. 인서트를 박는다(5.3절 표). 배터리 스톱용 인서트는 통을 올리기 전에 TorsoBase 트레이의 가운데 빈 구멍에 박는다.
5. TorsoBase 앞쪽 받침의 M3 나사 3개를 게이지로 3 mm 띄우고 나사 고정제를 바른다. 카트리지를 단 뒤에는 손이 닿지 않는다.
6. 책상 위에서 몸통 통에 어깨 서보 2개, IMU(스페이서는 미리 기판에 너트로 고정), 릴레이, 토글 스위치, E-stop 잭, 표시등을 단다.
7. 몸통 통을 TorsoBase 위에 올리고 6 mm 스탠드오프 4개로 누른 뒤 Power Hub Board와 U2D2를 올린다. 허브 뒤쪽 모서리 2곳은 보통 나사, 앞쪽 2곳은 M3 × 16 트레이 스탠드오프로 조인다.
8. 다리 케이블을 바닥판 슬롯으로 올려 허브에 꽂는다.
9. 배터리를 넣고 +X 끝에 폼 블록을 채운 뒤 배터리 스톱을 단다(핀을 앞 구멍에, M3 × 16 나사를 인서트에). XT60 피그테일과 밸런스 알람을 스톱의 슬롯에 묶는다.

10. 배선 트레이를 책상에서 배선한다(J0, J1, J2를 싣는다). 트레이를 곧게 내려 M3 나사 2개로 고정한다. F1(아래)과 F3(위)를 바닥판 앞쪽 −X에 2단으로 세우고, PPTC F2, F4, F5를 F3 위에 눕힌 뒤, 바닥판 슬롯을 지나는 묶음 타이 2개로 함께 묶는다. W01과 W17은 배터리 리드 슬롯으로 곧게 올리고 선마다 따로 슬리브를 씌운다.
11. 스피커를 클립과 M3 나사 2개로 뒤판에 고정하고 리드를 그로밋 구멍으로 넣는다.
12. 가슴 카트리지를 준비한다. 먼저 잠금 나사 2개를 러그에 끼우고 O링으로 붙잡는다. 그다음 Pi 5, 강압 모듈, F6, 마이크 보드를 달고 Pi 헤더에 2×20 암 소켓 헤더를 꽂는다(Jetson은 출력 스탠드오프 위의 캐리어 보드, 승압 보드와 그 타이, 마이크 보드). Jetson은 카트리지를 달기 전에 통 앞면의 승압 보드 자리(45 × 20 mm)에 폴리이미드 필름 테이프를 붙인다. 앞에서 밀어 넣고 앞벽 통로로 2.5 mm 육각 렌치를 넣어 잠근다.
13. 목 기둥을 뚜껑에 M3 나사 4개로 고정하고, 뚜껑을 통에 덮어 M3 × 12 접시머리 나사 4개와 스냅 스터드 4개로 고정한다. 머리로 가는 선은 목 기둥 속으로 올린다.
14. 책상에서 머리 폼을 휠에 조립한다(10절 10.2의 순서). 휠 슬리브를 목 기둥에 끼우고 반지름 방향 M3 나사 3개를 길이 100 mm 육각 드라이버로 늑골 사이로 넣어 조인다.
15. 어깨 허브를 혼에 붙이고 팔을 끼워 자가 탭 나사로 잡는다.
16. 머리 덮개, 유건, 의상을 입힌다(10절).

스탠드오프 주의: 6 mm 스탠드오프의 수나사는 바닥판 4 mm를 지나 TorsoBase 인서트에 물려야 한다. 수나사 길이 6 mm짜리는 2 mm밖에 물리지 않는다. 수나사 8 ~ 12 mm 제품을 쓰거나 M3 무두볼트와 암암 스탠드오프를 쓴다. TorsoBase 윗면(Z 340.85)에서 배터리 윗면(Z 329.9)까지 약 11 mm이므로 나사가 윗면에서 10 mm 넘게 들어가면 안 된다.

5.2 정비 순서

- **배터리 교체**: 오른팔을 든다. 한복 −X 옆 트임을 연다. 2.5 mm L렌치로 스톱 나사를 풀고, 스톱을 3 mm 들어 옆으로 뺀 뒤 팩을 −X로 뺀다.
- **가슴 카트리지**: 한복 앞섶을 연다. 2.5 mm 육각 렌치로 잠금 나사 2개를 풀고 카트리지를 앞으로 민다. 나사는 O링에 잡혀 러그에 남는다. 통과 카트리지를 잇는 선(W09, W19 등)은 50 mm 이상 여유를 넣었고, J1과 J0에서 풀어야 완전히 떨어진다.
- **배선 트레이**: 머리와 뚜껑을 떼고, 트레이 나사 2개를 푼 뒤 곧게 들어낸다. 가슴 카트리지와 퓨즈 홀더는 그대로 둔다.
- **F1, F3 점검**: 카트리지를 떼고 앞에서 퓨즈를 +X로 뽑는다(30 mm 이상 빠진다).
- **F2, F4, F5**: 자동 복귀형 PPTC라 교체할 퓨즈가 없다. 다리 체인 양 끝 전압 비교와 정기 도통 점검으로 상태를 본다(전원과 배선 설계 6.5절).
- **고관절 가리개**: 고리 반쪽은 탭 나사 4개를 풀면 빠진다. 앞 받침은 상체를 들어낸 뒤 앞 나사 2개를 풀어 뺀다.
- **머리**: 머리 덮개 뒤 트임을 열고 아래쪽을 앞으로 젖힌 뒤 슬리브 나사 3개를 풀어 덮개, 유건째 들어낸다.

5.3 인서트와 나사 (Pi 5 구성, 코드와 부품 메모에서 셈)

종류	수량	자리
M3 열압입 인서트(구멍 4.0 mm)	15	통 귀퉁이 블록 위 4, 앞 블록 앞면 2, 뒤판 스피커 클립 2, 뚜껑 아래 보스 4, 목 기둥 반지름 방향 3
M3 열압입 인서트(TorsoBase형, 5.6 × 3.8 mm)	1	배터리 트레이 가운데 빈 구멍(배터리 스톱)
Jetson 캐리어 출력 스탠드오프	4	캐리어 구멍을 잰 뒤 카트리지 앞벽에 넣는다. 나사는 그때 구멍 지름으로 정한다

종류	수량	자리
M3 나사	16	뚜껑 4(M3 × 12 접시), 목 플랜지 4, 휠 슬리브 3, 스피커 클립 2, 트레이 2, 배터리 스톱 1(M3 × 16)
M3 × 12 육각 구멍 볼트와 O링(2.5 × 1 mm, 가정)	2 + 2	카트리지 잠금. 러그에 붙잡혀 있다
M3 자가 탭 나사	2	팔 고정
원본 M3 나사 재사용	5	TorsoBase 앞쪽 받침 3(3 mm 띄움), 허브 뒤쪽 모서리 2
M3 암수 스탠드오프	6	몸통 6 mm × 4(허브 아래), 몸통 16 mm × 2(트레이)
M2 나사	26	어깨 서보 케이스 8, 혼-허브 8(M2 × 6 탭), 마이크 보드 2, 신발 조각 8
M2.5 나사	8	IMU 4(M2.5 × 6), Pi 5 4
M2.5 접시머리 나사(고관절 가리개)	4 + 1 + 2	고리 탭 M2.5 × 6 탭 나사 4, 뒤 잠금 M2.5 × 10 탭 나사 1, 앞 받침 M2.5 × 14 기계 나사 2(원래 M2.5 × 12를 바꿈)
M2.5 × 4 탭 나사	16	고관절 좌우축 XC430 케이스, 서보당 8. 원래 M2.5 × 5를 바꾼다
M2.5 암수 나사 스페이서(3 mm)와 너트	4 + 4	IMU
나일론 M3 × 12 냄비머리 나사와 너트	4 + 4	머리 폼 볼트 늑골
스냅 스터드	4	뚜껑 나사 위
패널 너트	3	토글 M12, 표시등 M8, E-stop 잭(품번은 잭과 함께 정함)

정해진 나사 길이는 배터리 스톱 M3 × 16, 뚜껑과 잠금 M3 × 12, IMU M2.5 × 6, 혼 M2 × 6, 나일론 M3 × 12, 가리개의 M2.5 × 6, × 10, × 14, 고관절 좌우축 케이스 M2.5 × 4다. 나머지 길이는 구매 전에 부품 두께로 정한다.

6. 출력

PLA와 PETG 부품의 질량은 실제 밀도의 80%(속 채움을 반영한 유효 밀도, 원본 PhoneBot 출력 부품에서 역산)로 계산했다. 머리 폼, TPU 조각, 가리개 고리는 속 채움 100%, 팔은 발포 PLA 밀도 0.60 g/cm³에 속 채움 25%(가정)로 계산했다. 출력용 파일은 `out/printables/stl`과 `out/printables/step`에 있다.

부품	수량	재질	질량(개당)	출력 방향과 서포트
torso_tub	1	PLA	84.9 g	바닥판을 아래로. 귀퉁이 블록 밑은 45° 모따기, 범퍼 리브는 바닥에서 시작해 서포트 없음
top_deck	1	PLA	40.4 g	코드에 방향이 적혀 있지 않다(미확인). 윗면을 아래로 두면 보스가 위로 자란다
chest_box_pi5	1	PETG	45.0 g	앞벽을 아래로. 리브와 발 받침은 이 방향에 맞춰 세로 벽과 45° 경사로 설계했다. 서포트 필요 여부는 미확인
chest_box_jetson	1	PETG	48.3 g	위와 같음. 캐리어 구멍을 실측해 출력 스탠드오프를 넣은 뒤 출력한다
speaker_clip	1	PLA	4.2 g	코드에 방향 없음(미확인)
battery_stop	1	PLA	4.3 g	윗면을 아래로(핀이 위). 타이 슬롯 천장 3.5 mm만 브리지
wiring_tray	1	PLA	5.9 g	모델 그대로 J0 요람을 바닥에. 판(3.05 mm 위), 뒤 발, 뒷벽은 서포트 필요

부품	수량	재질	질량(개당)	출력 방향과 서포트
hip_guard_ring_left / right	2	LW-PLA	3.6 g	바닥면(탭 쪽)을 베드에, 대각선으로 눕혀 173 × 173 mm. 서포트 없음
hip_guard_front_mount	1	PLA	3.7 g	뒤집어서. 턱, 살, 패드 윗면이 Z 297.75로 같다
hip_guard_rear_mount	1	PLA	5.6 g	옆면(x = −6 면)을 베드에. 한 단면을 밀어낸 형상이다
phonebot_pelvis_top	1	PLA	20.6 g(PhoneBot 질량 모델 안)	PhoneBot PelvisTop에 뒤 잠금 파일럿(2.1 mm, 깊이 6 mm)을 넣은 형상. 방향은 PhoneBot 출력 방법을 따른다
neck_post	1	PLA	36.6 g	플랜지를 아래로. 걸치는 곳 없음
head_wheel	1	PLA	42.5 g	윗면을 아래로(리브와 슬리브가 위로 자람). 220 mm 베드에 들어간다
shoulder_hub	2	PLA	0.9 g	코드에 방향 없음(미확인)
arm	2	LW-PLA	6.0 g	코드에 방향 없음(미확인)
shoe_toe	2	TPU	2.5 g	코드에 방향 없음(미확인)
shoe_heel	2	TPU	3.3 g	코드에 방향 없음(미확인)
head_form_rib_000 ~ 330	12	PETG	1.8 ~ 2.3 g	눕혀서, 0.2 mm 층, 속 채움 100%, 서포트 없음
head_form_hoop_minus_x / plus_x	2	PETG	2.5 g	같음
head_form_crown_ring	1	PETG	3.0 g	같음
head_form_chin_ring	1	PETG	1.9 g	같음
head_form_crown_arc_a / b	2	PETG	0.7 / 0.6 g	같음

출력 시험은 다음 단계다. 질량은 모두 계산값이고 출력 뒤 계량한다.

7. 질량, 무게중심, 관절 부담

7.1 질량 내역

묶음	Pi 5	Jetson	비고
하체(회전축 아래)	1,316.5 g	1,316.5 g	원본 1,271.3 g + 신발 조각 11.6 g + 고관절 가리개 18.0 g + XC430 질량 차 15.6 g. 고관절 좌우축 케이스의 M2.5 × 4 나사는 원본 체결류(M2.5 × 5로 그려짐) 안에 있다. 원본 값은 서보(57.2 g × 13, 제조사 값)와 서보 케이블 32.5 g을 뺀 나머지가 논문 총질량 1.8 kg에 맞춘 질량 모델 값이다(잰 값 아님, `cad/assembly.py`, `cad/actuators.py`)
원본 몸통 부품	220.5 g	220.5 g	TorsoBase 57.5, 허브 17.0은 질량 모델 값(가정). 배터리 137.0은 판매처 표기(±10 g, `finder3.md` #1), U2D2 9.0은 제조사 표기(`finder1.md` #32)
새 출력 부품(뼈대, 팔)	277.6 g	280.9 g	통 84.9, 뚜껑 40.4, 카트리지 45.0(Jetson 48.3), 휠 42.5, 목 36.6, 팔과 허브 13.8, 배선 트레이 5.9, 배터리 스톱 4.3, 클립 4.2
머리 폼과 체결류	36.2 g	36.2 g	보고서 행의 합. 반올림 전 35.1 + 1.2 = 36.3 g
회로 부품	80.3 g	62.3 g	퓨즈 홀더 F1 HHM 22.3 g + HHL 18 g × 2(F3, F6. Jetson은 F3만), WAGO 4 g × 4, 트레이 스탠드오프 3, 표시등 3

묶음	Pi 5	Jetson	비고
그 밖의 구매 부품	226.3 g	327.8 g	컴퓨터 70(Jetson 175), 어깨 서보 46, 스피커 35, 릴레이 33, 마이크 12, 스위치 12, 강압 7(Pi 5만), 승압 3.5(Jetson만), 스탠드오프 4, 스냅 3.6, IMU 2.5, IMU 스페이서 1.2
가정 질량	282.8 g	280.7 g	한복 윗부분 48.5, 한복 치마 43.3, 머리 덮개 85, 배선 40, 체결류와 인서트 25, 유건 35, PPTC 3, Pi 헤더 소켓 3(Pi 5만), 승압 보드 절연 테이프 0.1(Jetson만), 캐리어 스탠드오프 0.8(Jetson만). **모두 가정값**
합계	**2,440.2 g**	**2,524.9 g**	회전축 위 1,123.7 g(Jetson 1,208.4 g)

- 퓨즈 홀더 18 g은 리드를 포함한 반올림 카탈로그 값이다. 본체 부피로 잡으면 약 10 g이다. F1의 HHM은 이 값에 12 AWG 리드 두 가닥의 구리 증가분 4.3 g을 더한 22.3 g(계산)이다. 하나씩 달아 확인한다. PPTC 3 g은 하나에 1 g(느슨한 슬리브 포함)으로 잡은 값이다.
- XC430은 개당 65.0 g이라 XL430(57.2 g)보다 7.8 g 무겁다. 서보 묶음 형상은 13개를 같은 케이스로 그려 이 차이를 담지 못하므로, 7.8 g을 좌우 고관절 좌우축 케이스 중심(±52.5, 12.6, 216)의 점질량으로 넣었다. 회전하지 않는 하체에 속한다. 케이스 나사 M2.5 × 4 16개는 부품표에 따로 한 줄씩 있고, 질량은 그것이 바꾸는 M2.5 × 5가 들어 있는 원본 체결류에 남겨 두었다.
- 질량은 있고 형상이 없는 가정 항목(가리개 나사, PPTC, 체결류와 인서트, 배선, Pi 헤더 소켓, 절연 테이프)은 `bom_<c>.json`에 "purchased, no solid" 줄로, 의상과 머리 덮개, 유건은 "sewn, no solid" 줄로 들어 있다. 이 줄의 합이 질량표의 가정 항목 합과 같다.
- 한복 질량은 `concept/costume.py`의 천 면적에서 추정했다. 윗부분(조끼 몸판과 안감, 저고리, 소매, 띠, 고름, 스냅) 48.5 g은 Z 354.3, 치마 43.3 g은 Z 170.9의 점질량이다. 추정 범위는 윗부분 26.1 ~ 79.3 g, 치마 16.9 ~ 106.3 g이다. 이 추정은 발목 길이 한복 기준이다. 새 의상 목표(10.4절)의 질량과 무게중심은 재설계 때 다시 추정한다.

7.2 균형과 관절 부담

지표	원본 PhoneBot(질량 외는 가정 기반 추정)	Pi 5	Pi 5 비관	Jetson	Jetson 비관
전체 질량	1,800 g	2,440.2 g	2,659.0 g	2,524.9 g	2,743.7 g
무게중심 높이	214.9 mm	260.1 mm	267.4 mm	263.6 mm	270.4 mm
무게중심 앞뒤 위치(Y)	−21.6 mm	−17.7 mm	−17.0 mm	−19.6 mm	−18.7 mm
고관절 좌우축 부담 지표	0.927 N m	1.257 N m	1.369 N m	1.300 N m	1.413 N m
XL430 시뮬레이션 토크 한도(0.93 N m) 대비	1.00배	1.35배	1.47배	1.40배	1.52배
XL430 스톨 토크(11.1 V, 1.4 N m) 대비	0.66	0.90	0.98	0.93	1.01
XC430 스톨 토크(11.1 V, 1.7 N m) 대비	—	0.74	0.81	0.76	0.83
XC430 가정 시뮬레이션 한도(1.129 N m) 대비	—	1.11배	1.21배	1.15배	1.25배
목표(XL430 한도의 1.15배)까지 덜어야 할 질량	—	363.6 g	582.4 g	448.3 g	667.1 g
뒤로 넘어지는 각	11.1°	8.3°	8.0°	8.6°	8.2°
앞으로 넘어지는 각	17.6°	15.5°	15.2°	14.9°	14.7°
옆으로 넘어지는 각(두 발)	21.0°	17.5°	17.0°	17.3°	16.9°

지표	원본 PhoneBot(질량 외는 가정 기반 추정)	Pi 5	Pi 5 비관	Jetson	Jetson 비관
몸통 +90° 회전 시 뒤 / 앞 / 옆	—	6.7° / 17.0° / 16.2°	6.4° / 16.7° / 15.8°	6.6° / 16.8° / 15.6°	6.3° / 16.5° / 15.2°
몸통 −90° 회전 시 뒤 / 앞 / 옆	—	7.0° / 16.7° / 16.2°	6.6° / 16.4° / 15.8°	6.8° / 16.6° / 15.6°	6.5° / 16.4° / 15.2°
회전축 위 질량중심의 축에서의 거리	—	14.7 mm	13.7 mm	18.9 mm	17.3 mm
회전축 위 상체가 베어링 롤러 원(반지름 20.1 mm)을 벗어나는 수평 가속도	—	0.67 m/s²	0.85 m/s²	0.16 m/s²	0.38 m/s²

"비관"은 머리 덮개 150 g, 한복 상한(윗부분 79.3 g + 치마 106.3 g = 185.6 g), 배선 100 g으로 본 값이다(`cad/checks.py`의 `PESSIMISTIC`). 한복만 바꾼 경우는 `robe_mass_range`에 있다. 한복 하한 43.0 g이면 Pi 5 2,391.4 g, 1.32배(Jetson 2,476.1 g, 1.37배), 상한 185.6 g이면 2,534.0 g, 1.40배(Jetson 2,618.7 g, 1.45배)다. 원본 값은 `docs/research/step_mass.md`에서 왔다. 그 파일에서 확정값은 총질량 1,800 g과 XL430 57.2 g × 13뿐이고, 원본의 무게중심 높이와 앞뒤 위치, 넘어지는 각은 휴대폰 195 g과 출력 부품 유효 밀도를 가정해 계산한 **추정값**이다(휴대폰 160 ~ 220 g에서 무게중심 높이 210.6 ~ 218.0 mm). 스톨 토크 1.4 N m는 XL430의 11.1 V 값이고, 12.0 V에서는 1.5 N m다(`finder1.md` #6). XC430-W240-T는 11.1 V 1.7 N m, 12.0 V 1.9 N m다.

읽는 법

- 고관절 좌우축 부담 지표는 전체 질량 × 중력 × 고관절 간격의 절반(52.5 mm)이다. 한 발로 설 때 고관절 좌우축 하나가 받는 정적 토크를 거칠게 본 것이다. 원본이 0.927 N m로 논문이 시뮬레이션에서 쓴 가속 토크 한도 0.93 N m와 같다. 원본도 여유가 없는 설계이고, 이 설계는 거기서 35% 더 무겁다.
- XL430 기준 행(1.35배, 0.90)은 XL430을 그대로 쓰는 11개 관절의 부담으로 읽는다. 다리의 다른 관절도 같은 몸무게를 받는다.
- 고관절 좌우축 자체는 XC430이라 부담이 XC430 스톨의 0.74(Jetson 0.76)다. XC430의 시뮬레이션 한도 1.129 N m는 XL430 한도 0.93 N m에 스톨 비 1.7 / 1.4를 곱한 가정값이고, 이 기준으로 1.11배(Jetson 1.15배)다. 원본이 걷던 1.00배에 가깝다. XC430 토크-속도 곡선을 벤치에서 잰 뒤 이 한도를 확정한다. 그때까지 시뮬레이션은 모든 관절에 0.93 N m를 쓴다(`checks_<c>.json`의 `notes`, `sim_actuators`).
- 실제 보행에서는 몸을 지지발 쪽으로 기울여 이 토크를 줄이므로 지표가 곧 필요 토크는 아니다. 그래도 원본 대비 배율은 그대로 의미가 있다.
- 검토에서 정한 보행 목표는 XL430 시뮬레이션 한도의 1.15배이고, 전체 질량으로 약 2.08 kg이다. Pi 5 구성은 363.6 g, Jetson 구성은 448.3 g 무겁다. 테스트는 지금 값에 약 3 g을 더한 값을 상한으로 막아 두었다(`tests/test_design.py`: 2,443.0 g, 1.35배 / Jetson 2,527.0 g, 1.40배).
- 넘어지는 각은 발을 모으고 선 자세에서 무게중심이 발판 가장자리 위에 올 때까지 기울일 수 있는 각이다. 몸통을 ±90° 돌리면 머리가 옆으로 가면서 뒤쪽 여유가 6.6 ~ 7.0°로 줄어든다. 테스트가 정면 자세에 요구하는 8.0°보다 작다.
- 무게중심은 발목 앞뒤축보다 5.1 mm 뒤에 있다(Jetson 3.2 mm). 원본은 1.2 mm 뒤였다.
- 회전축 위 질량중심은 스러스트 베어링 롤러 원 안에 있어 정지 상태에서는 베어링이 받는다. 보행 중 상체에 0.67 m/s²(Jetson 0.16 m/s²)보다 큰 수평 가속도가 걸리면 합력이 롤러 원을 벗어난다. 보행 가속도는 시뮬레이션에서 기록한다(11절).

무게를 줄일 수 있는 곳

후보	줄어드는 양	상태
퓨즈 F2, F4, F5를 리드형 PPTC로	홀더 3개 54 g − PPTC 3 g = 51 g	적용했다. 위 질량에 들어 있다

후보	줄어드는 양	상태
홀더 실물이 약 10 g이면	홀더 3개에서 약 24 g(Jetson 2개에서 약 16 g)	계산. 실물 계량으로 정한다
CB1a 릴레이(33 g)를 CP1a 두 개(약 8 g)로	약 25 g	전원과 배선 설계 15.5절의 제안
의상, 머리 덮개, 스피커	만들 때 계량해 정한다	가정값

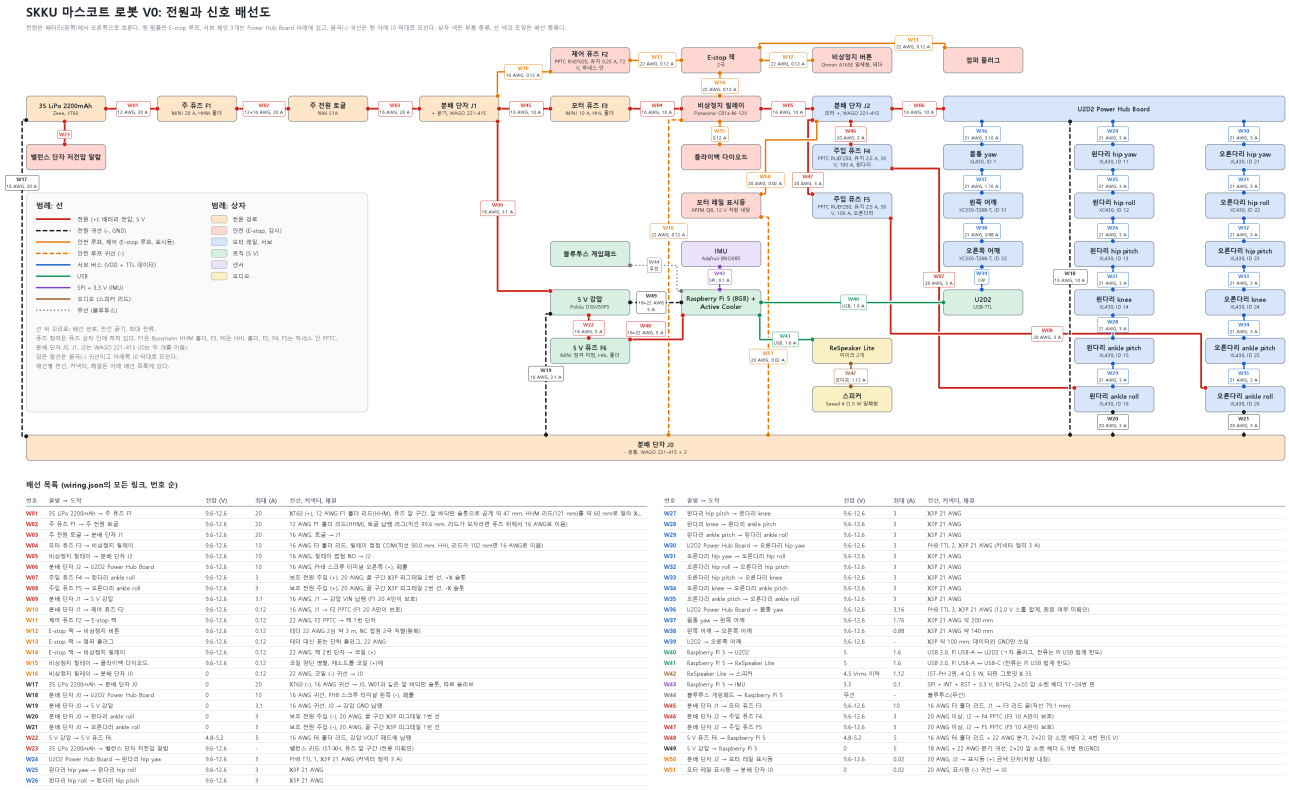
이 표의 남은 항목을 모두 합쳐도 목표까지 363.6 g에 크게 못 미친다(계산). 2.4 kg 안팎으로 걷는 정책이 나오는지를 시뮬레이션으로 먼저 정한다.

8. 움직임 범위와 간섭

- **부품 겹침**: 조립 자세에서 출력 부품과 구매 부품을 다른 모든 부품(원본 부품 포함)과 맞대어 본 결과 1 mm³ 넘는 겹침이 없다. 검사하지 못한 쌍도 없다(Pi 5, Jetson 둘 다). 원본 부품끼리는 검사하지 않는다. 기준 형상 `head_shell`은 `head_wheel`, `neck_post`, `top_deck`하고만 검사하므로 머리 폼 조각과 `head_shell` 사이도 검사하지 않는다(`cad/checks.py`의 `interferences`, `SHELL_NEIGHBOURS`).
- **몸통 회전**: 몸통은 좌우 90°까지 돈다. 함께 도는 새 부품 중 가장 낮은 점(왼팔 끝, Z 306.4)이 그 아래 고정부의 가장 높은 점(Z 299.9)보다 6.5 mm 위에 있다(요구 5 mm). 배터리 스톱은 TorsoBase 트레이 안에 있어 높이 검사에서는 트레이가 가린다.
- **몸통 회전과 고관절 가리개**: `cad.checks`가 가리개 조각마다 도는 부품과의 최소 간격을 잰다(`guard_yaw_clearance`). 고리 반쪽과 팔 9.39 mm(요구 5.0 mm), 앞 받침과 TorsoBase 3.10 mm(예외 기준 3.0 mm), 뒤 받침과 TorsoBase 5.10 mm(요구 5.0 mm)다. 앞 받침은 Z 297.75까지 올라와 배터리 스톱(밑면 Z 301.85)이 도는 고리 안에서 4.1 mm 떨어진다. 소유자가 앞 받침의 3.0 mm 예외를 받아들였고(`cad/checks.py`의 `YAW_GAP_WAIVERS`), 테스트(`tests/test_owner_decisions.py`)는 배터리 스톱 아래에서 5 mm보다 가까운 고정 부품이 이 앞 받침 하나(4.1 mm)뿐이고 그 간격이 예외 기준 안이라는 것을 확인한다.
- **옷과 다리**: 몸통과 함께 도는 옷자락이 다리 둘레를 쓸고 지나가는 힘은 형상 검사가 아니라 시뮬레이션 교란으로 다룬다(11절).
- **팔 흔들기**: 5° 간격으로 돌려 본 결과, 원단을 씌운 머리 외곽에 앞으로는 160°부터, 뒤로는 170°부터 닿는다. 앞으로 150°에서는 손과 머리 외곽 사이가 2.2 mm뿐이라 앞 한계를 135°(간격 11.4 mm)로, 뒤 한계를 150°로 정했다. 서보 각도 제한을 이 값으로 설정한다. 머리 덮개 옆면 Z 420 ~ 470에 덧댐을 넣지 않는다.
- **배터리 교체**: 오른팔이 내려와 있으면 손이 길을 막으므로 팔을 든 뒤 교체한다. 배터리 스톱을 들어 옆으로 빼는 경로는 테스트로 확인했다.
- **나사 드라이버 통로**: IMU 나사 4개는 오른팔을 들면 옆판 바깥에서 닿는다. 휠 슬리브 나사 3개는 늑골 사이로 닿는다. 카트리지 잠금 나사의 2.5 mm 육각 렌치 통로는 Pi 5와 Jetson 두 구성 모두 비어 있다. Jetson 구성에서 잠금 나사머리 자리는 캐리어 가장자리에 닿을 듯 붙어 있어(나사머리까지 0.25 mm, 렌치 통로까지 1.25 mm) 잠금 나사를 보드보다 먼저 넣는다.

9. 전원과 배선 요약

자세한 내용은 electrical_design.md에 있고, 연결은 wiring.json(부품 41개, 선 51개)과 아래 배선도에 있다.



배선도

전원 경로

- 3셀 리튬폴리머 배터리(Zeee 3S 2200 mAh, 사용 범위 9.6 ~ 12.6 V) 하나가 로봇 전체를 먹인다. 서보는 배터리 전압을 그대로 쓴다.
- 배터리 XT60 바로 뒤에 주 퓨즈 F1(MINI 블레이드 20 A, Eaton Bussmann HHM 홀더)이 있고, 그 뒤 뒤판의 주 전원 토글(NKK S1A)을 지나 분배 단자 J1에 닿는다. 음극은 XT60에서 분배 단자 J0로 가서 각 부하로 나간다. 퓨즈, 스위치, 릴레이 접점은 모두 양극 선에만 있다.
- **모터 분기**: J1 → 모터 퓨즈 F3(10 A) → 비상정지 릴레이(Panasonic CB1a)의 NO 접점 → J2 → (가) Power Hub Board 스크루 터미널, (나) F4 → 왼다리 끝 서보 보조 주입선, (다) F5 → 오른다리 끝 서보 보조 주입선. F4, F5는 하네스 안의 PPTC RUEF250(유지 2.5 A, 차단 5.0 A, 30 V)이다. F4, F5는 분기 배선과 보드를 지키고(고장 전류를 5 A 차단 영역으로 묶는다), 체인 커넥터 정격 3 A는 분기 부하(주입 끝당 보행 추정 1.24 ~ 1.54 A)로 지킨다(소유자 결정, 전원과 배선 설계 4.3절). 실측 주입 전류에서 잘못 차단되면 RUEF300(차단 6 A)으로 바꾼다. J2에는 모터 레일 통전 표시등이 달린다.
- **로직 분기**: J1 → 5 V 강압 모듈(D36V50F5) → 5 V 퓨즈 F6(MINI 블레이드, 정격은 실측 전류로 정함) → Raspberry Pi 5 40핀 헤더의 5 V 핀. Pi가 IMU에 3.3 V를 준다. Jetson 구성은 같은 16 AWG 분기(W09J, W19J)가 15 V 승압 보드(Pololu U3V70F15)를 먹이고, 승압 출력이 Jetson DC 잭으로 간다. 퓨즈는 F1 하나다. Jetson의 전력 모드는 nvpmodel로 25 W 이하에 묶는다.
- **제어 분기**: J1 → 제어 퓨즈 F2(PPTC RXEF025, 유지 0.25 A, 차단 0.5 A, 72 V) → E-stop 잭 → 테더의 버튼(Omron A165E) NC 접점 2극 직렬, 또는 점퍼 플러그 → 잭 → 릴레이 코일 (+), 코일 (−) → J0. 차단 전류 0.5 A가 버튼 접점 정격 1 A보다 작다.
- 다리 체인은 양 끝에서 급전한다. 지지 다리 체인의 보행 추정 전류가 2.47 ~ 3.09 A로 체인 커넥터 정격 3 A의 82 ~ 103%이기 때문이다.

E-stop이 끊는 것과 끊지 않는 것

- 버튼을 누르거나 테더가 빠지면 코일이 꺼지고 릴레이가 떨어져 서보 15개의 전원만 끊긴다. 로봇은 주저앉으므로 스탠드나 안전줄이 있을 때만 쓴다.
- Pi 5, 마이크, IMU, 스피커는 켜진 채 남는다. 이때 Pi는 서보 전압을 읽을 수 없어 배터리 감시가 밸런스 알람 하나만 남는다.
- 버튼을 풀면 모터 전원이 바로 돌아온다. 소프트웨어는 사람이 확인하기 전에는 토크를 다시 켜지 않는다. 매 기동 때 버튼이 실제로 듣는지 확인한 뒤에만 토크를 켠다.
- 주 전원 토글은 모든 것을 끈다. 끄기 전에 Pi를 먼저 종료한다.

전류, 사용 시간, 저전압 기준(모두 추정)

항목	값
보행 배터리 전류	6.25 ~ 7.71 A (F1의 31 ~ 39%)
보행 모터 레일 전류	4.61 ~ 6.07 A (F3의 46 ~ 61%)
서보 15개 스톨 최악	20.73 A(11.1 V), 22.04 A(12.0 V). F3가 끊어진다
대기(토크 OFF)	1.31 A
계속 보행 시간	14 ~ 17분 (사용 가능 용량 80% 가정)
보행 30% + 대기 70%	33 ~ 38분
저전압 경고	10.5 V(셀당 3.5 V): 보행 중지, 앉기, 음성 안내
강제 정지	9.9 V(셀당 3.3 V): 토크 내리기, 안내, Pi 종료. 토글은 사람이 내린다
사용 금지 하한	9.6 V(셀당 3.2 V)

hip roll 부하율은 `checks_pi5.json`의 XL430 기준 0.90을 썼다. 고관절 좌우축은 XC430이라 실제 부하율은 0.74이고(12.0 V 스톨 전류 1.4 A로 추정한 전류 약 1.04 A, 표의 계산은 1.17 ~ 1.19 A), 위 표는 그만큼 보수적인 값이다. Jetson 구성(부하율 0.93)의 보행 배터리 전류는 15 W 모드 6.88 ~ 8.33 A, 25 W 모드 7.94 ~ 9.39 A, 계속 보행 시간은 약 12.7 ~ 15.4분, 11.2 ~ 13.3분이다.

알려진 한계

- 배터리 과방전을 막는 하드웨어 자동 차단이 없다. 감시는 서보 전압 읽기와 밸런스 알람 경고음뿐이다.
- E-stop 테더가 2심 단일 채널이다. 두 가닥이 서로 닿으면 버튼이 무효가 되고 아무 표시도 없다.
- 완충 12.6 V가 XL430 11개와 XC330 2개의 사양 최대 12.0 V를 넘는다. 고관절 좌우축의 XC430 2개는 14.8 V까지 사양 안이다.
- 모터 차단이 릴레이 접점 하나에 달려 있다. 접점이 용착되면 버튼이 무효다. 표시등과 기동 인터록으로 알아챈다.
- Power Hub Board 한계 10 A를 서보 스톨 합계가 넘는다. 퓨즈가 끊어지는 시간은 미확인이라 순간 과전류는 소프트웨어 제한과 서보 자체 보호에 맡긴다.
- F1은 HHM 홀더와 20 A 퓨즈라 연속 한계가 16 A다(소유자 결정). F1의 연속 부하는 모터 레일이 F3 홀더의 연속 한계 8 A에 머무를 때 가장 크고(Pi 5 구성 11.2 A, Jetson 구성 13.4 A), 16 A의 70%, 84%로 설계 기준 85% 이하다. F3가 10 A까지 오르는 짧은 최대(13.2 A, 15.4 A)에서 Jetson 구성은 0.6 A가 남는다 (`checks_<c>.json`의 `f1_budget`). 그래서 F1만이 보호하는 로직 분기와 F2 입력선은 16 AWG로 했다.

부품 자리: F1(아래)과 F3(위)는 통 앞 열린 면 −X의 2단 묶음에 서고, PPTC F2, F4, F5가 그 위에 눕는다. F6는 Pi 5 카트리지 +X 벽에, 승압 보드는 Jetson 카트리지 +X 벽에 있다. J0는 트레이의 −X 요람, J1과 J2는 +X 주머니에 있다. 릴레이는 통 안 +X 앞쪽 바닥, 토글과 잭과 표시등은 뒤판, 강압 모듈은 카트리지 천장 아래에 있다(4.7절 표).

10. 겉모습과 고정 방법

10.1 원칙

- 겉모습은 원단이다. 원단 머리 덮개와 얼굴, 유건, 의상을 따로 만들어 뼈대에 건다. 뼈대가 주는 것은 머리 폼, 스냅 스터드 4개, 고관절 가리개 고리, 그리고 열어 둬야 할 자리의 좌표다.
- 움직이는 다리 링크에는 아무것도 달지 않는다. 바지나 신발 덮개를 다리 링크에 감으면 시뮬레이션과 실물의 차이가 생기기 때문이다. 새 목표의 바지도 다리에 감지 않고 가리개 고리에 걸어 늘어뜨린다 (10.4절).
- 골반에 고정한 **고관절 가리개**(4.8절)가 옷이 고관절 yaw 브래킷에 끼지 않게 한다. `cad/hip_guard.py`에 있고 CAD, 질량표, BOM, 시뮬레이션 골반 링크에 들어갔다.
- 옷이 다리에 스치는 힘은 시뮬레이션에서 무작위 교란으로 다룬다(디즈니 Olaf 논문 방식, `docs/research/paper_olaf_facts.md`). 이전 검토의 "Z 306 아래에 천을 두지 않는다"는 규칙은 폐기했다.
- 겉모습 목표는 공식 봉제 인형 모습으로 바뀌었다(10.4절). 10.3절과 `costume/`는 그 전 목표인 발목 길이 한복의 초안이다.

10.2 머리

- 머리 폼 조립(한 번, 책상에서): ① 늑골 12개를 휠 테두리에 반지름 방향으로 밀어 끼우고, 30°, 150°, 210°, 330°에 나일론 나사를 아래에서, 너트를 위에서 끼운다. ② 턱 고리를 늑골 끝에 밀어 올리고 홈마다 순간접착제. ③ 띠 고리 반쪽 둘을 붙여 고리로 만들고 위에서 늑골 홈에 눌러 끼운 뒤 접착. ④ 정수리 고리를 늑골 끝에 얹어 접착하고 정수리 아치 2개를 끼운다. ⑤ 휠 슬리브를 목 기둥에 끼우고 나사 3개를 조인다.
- 머리 덮개: 원단과 3 mm 폼 안감으로 된 맞춤 주머니다. 뒤쪽이 단에서 Z 약 545까지 트여 있다. 앞에서 씌우고, 정수리의 14 mm 단춧구멍을 토글(0, −18, 620.5)에 건 뒤, 뒤를 내리고 트임을 원단끼리 닫는다. 단의 조임끈을 턱 고리 아래에서 지름 약 60 ~ 65 mm로 조인다(목 관 주위는 열어 둔다).
- 유건: 띠가 띠 고리 선(Z 543 ~ 545)에 앉고, 안쪽 고무 고리를 같은 토글에 건다.

10.3 의상 제작자에게 넘길 것(발목 길이 한복 초안)

이 절은 이전 목표인 발목 길이 한복의 제작 메모다. 머리 덮개 규칙은 새 목표에서도 쓴다. 옷 부분은 10.4절의 재설계에서 새 의상으로 바꾼다.

머리 폼 설계 때 만든 의상 제작자용 메모를 옮기고, 옷 길이 규칙만 소유자의 결정으로 바꿨다. 그 메모의 원본 파일(`head_spec.json`)은 저장소에 없고 이 절이 저장소 안의 유일한 사본이다.

`costume/` 패키지는 이 한복을 CAD 치수에서 측정해 만든 패턴 초안이다. `python -m costume.sheet`가 실물 크기 SVG 조각 63개, 타일 인쇄본, 전체 그림, `measurements.json`, 제작 순서(`construction.md`), 조립 그림을 `out/costume/`에 쓴다. 허리는 고리에서 1 mm 이상 떨어진 거의 둥근 단면(몸판과 띠는 215 mm 둥근 사각형, 치마는 초타원)이고, 치마 윗단은 고리에서 반지름 방향으로 1.40 mm 떨어진다.

머리 덮개

- 완성 두께 5 mm(폼 안감 3 mm, 밀도 약 30 kg/m³ 연질 PU + 원단 최대 2 mm). 씌운 머리는 232 × 206 × 208 mm. 완성 질량 한도 85 g(추정 82 g). 바느질 전에 원단을 단다.
- 폼 안감은 접착한 조각으로 만들어 스스로 돔 모양을 유지하게 한다. 늑골 12개(적도에서 간격 약 50 ~ 57 mm)는 위치만 잡아 준다. 눈과 입 조각 뒤에도 폼을 댄다.
- 옆면 Z 420 ~ 470에는 덧댐을 넣지 않는다. 들어 올린 손이 앞 한계에서 머리 외곽과 11 mm 거리로 지나간다.

- 정수리 가운데 14 mm 단춧구멍, 뒤쪽 트임(단에서 Z 약 545까지, 원단끼리 닫음), 단의 조임끈(턱 고리 바깥 87 × 77 mm, 둘레 259 mm 아래에서 지름 약 60 ~ 65 mm로 조임). 정수리를 망사로 하면 유건 아래로 열이 빠진다.
- 나중에 카메라를 넣을 자리: 눈 하나에 지름 약 26 mm 검은 망사 눈동자, 폼 위 (±41, −109, 514). 지금은 그 자리에 딱딱한 것을 꿰매지 않는다.
- 유건: 띠 아래 끝을 띠 고리 선 Z 543 ~ 545에, 안쪽 고무 고리를 정수리 토글에. 정수리 자리는 Z 603에서 108 × 95 mm로 평평하고, 아치 2개가 Z 615까지 돔을 만든다. 질량 추정 35 g(범위 22 ~ 55 g).

한복

- 앞이 트인 몸판 하나, 따로 만든 소매 둘, 몸판에 꿰맨 띠.
- 길이: 도는 몸통에서 발 바로 위까지(단 약 Z 78, 들어 올린 발보다 위). 다리 링크에는 아무것도 달지 않는다. 고관절 가리개 고리 위로 흘러내리게 한다. 고리는 치마 무게를 받지 않는다.
- 질량: 천 면적에서 추정한 값은 윗부분 48.5 g, 치마 43.3 g, 합 91.8 g(범위 43.0 ~ 185.6 g)이다(7.1절).
- 스냅 소켓은 안쪽 어깨 테이프에, 스터드 좌표 (±48.5, −33.5)와 (±48.5, 16.5)에 단다. 좌우 97 mm, 앞뒤 50 mm 간격이고 스터드 높이는 약 6 mm다. 스터드 위로 손가락 공간이 앞쪽 14.8 mm, 뒤쪽 20.2 mm 남는다.
- 띠 선은 Z 316 ~ 336.
- 팔 아래 옆판: Z 340 ~ 372에서는 |X| 63 안쪽, Z 308 ~ 340에서는 |X| 78 안쪽에 둔다(팔이 그 높이에서 X 66.5와 81.7에 있다).
- 위 두 규칙(띠 선, 팔 아래 옆판)은 단이 Z 308인 짧은 옷 기준 메모를 그대로 옮긴 것이다. 긴 한복에서 Z 308 아래의 옆판 폭과 팔 흔들기 영역 규칙은 아직 정하지 않았고, 팔 위치 66.5 / 81.7 mm는 지금 CAD로 다시 재지 않았다(미확인).
- 소매: 사양은 소매의 고무단을 팔 그루터기(지름 22 mm)의 플랜지와 리브 사이에 걸게 했으나 그 자리를 CAD에서 뺐다(4.5절). 소매 고정 방법은 다시 정해야 한다.
- 깃은 목 플랜지(지름 56, Z 408까지) 둘레에서 10 mm보다 높지 않게. 그 위는 지름 34 mm 목 관이다.
- 원단이 아니라 망사로 할 곳: 턱 아래 어깨 부분 X ±32, Y −62 ~ −40(Pi 5 카트리지의 천장 슬롯 X −30 ~ −16, 16 ~ 30, Y −60.5 ~ −42 위), 오른쪽 옆 통풍창 위 Y −34 ~ −12, Z 349 ~ 368. Jetson 카트리지는 안쪽 깊이가 40 mm이고 천장 슬롯이 X ±3 ~ 48, Y −74 ~ −42(계산)라 이 범위를 벗어난다. Jetson용 망사 범위는 따로 정해야 한다.
- 마이크: 가슴 앞 X ±42, Z 364 ~ 398은 안감 없는 얇은 한 겹을 팽팽하게. 15 mm 안에 스냅이나 테이프를 두지 않는다.
- 등판: X 28 ~ 54, Z 343 ~ 376에 테두리를 감친 구멍(토글 45/366, E-stop 잭 45/351, 표시등 30/358). 스피커 위 X ±25, Z 350 ~ 395는 안감 없는 한 겹. 옷이 길어서 걸을 때 구멍이 밀리지 않게 둘레를 고정한다.
- 오른쪽(−X) 옆: 배터리용 트임을 단에서 Z 345까지.
- 자석을 어디에도 쓰지 않는다. 방향 센서가 (−48.6, 0, 359)에 있다. 벨크로도 필요 없다.

입히기(서보 끔, 머리는 단 채로)

1. 소매를 손(지름 32 mm) 위로 끼운다. 고정 방법은 미정이다.
2. 뒤에서 뒤쪽 스냅 두 개를 누르고 진동을 손과 소매 위로 넘긴다.
3. 앞섶을 돌려 앞쪽 스냅 두 개를 누르고, 깃을 목 플랜지 둘레에서 닫고 앞섶을 여민다.
4. 띠를 맨다. 벗기는 역순이고 공구가 필요 없다.

옷을 벗기지 않고 하는 정비: 가슴 카트리지는 앞섶을 열어서, 배터리는 오른팔을 들고 −X 옆 트임을 열어서, 토글, 잭, 표시등은 등판 구멍으로, SD 카드는 카트리지 +X 벽으로 한다.

열: 머리 폼 사양의 공기 흐름은 짧은 옷 기준이었다. 열린 단에서 들어온 공기가 카트리지 바닥 통풍구(990 mm², Z 314.85)와 −X 통풍창으로 들어가고, 카트리지 천장 슬롯(518 mm², Z 401.5)으로 나와 턱 아래 20 mm 틈과 등롱(턱 쪽 열린 면적 약 1,900 mm²)을 거쳐 망사 정수리로 빠진다. 긴 한복에서는 공기가 들어오는 단이 Z 약 78로 내려가고 다리 서보 12개도 옷 안에 들어간다. 이 흐름이 여전히 성립하는지는 확인하지 않았다(13절 9번).

10.4 새 겉모습 목표와 의상 재설계

소유자가 겉모습 목표를 공식 봉제 인형의 모습으로 정했다. 실제 로봇은 이 모습을 실제 비율로 따른다. 의상 재설계는 후속 과제다.

- 몸: 무릎 길이의 파란 조끼.
- 다리: 흰 바지. 고관절 가리개 고리에 걸어 늘어뜨리고 다리 링크에는 감지 않는다.
- 발: 검은 신발 덮개.
- 머리: 공식 인형의 얼굴을 따른다. 머리 폼과 머리 덮개 규칙(10.2절, 10.3절의 머리 덮개 항목)은 그대로 쓴다.

재설계에서 할 일과 그것을 정하는 것:

1. 조끼, 바지, 신발 덮개의 패턴을 CAD 치수에서 다시 만든다. `costume/`의 측정 도구(`costume.body`, `costume.flatten`)를 그대로 쓰고, 옷 정의(`costume.garments`)를 새 목표로 바꾼다.
2. 바지를 거는 고리의 하중과 고정을 정한다. 지금 고리는 옷 무게를 받지 않는 전제로 설계했다(4.8절).
3. 신발 덮개가 지면에 닿지 않고 신발 조각 규칙(4.6절)을 지키는지 확인한다. 덮개는 발 링크에 붙는 질량이 되므로 시뮬레이션의 발 링크 질량에 넣는다.
4. 새 의상의 질량과 무게중심을 천 면적에서 추정해 `cad/checks.py`의 `robe_upper`, `robe_skirt` 행을 바꾼다. 무릎 길이 조끼는 지금 치마(Z 170.9의 43.3 g)보다 위에 질량을 둔다.
5. 열린 단의 높이가 바뀌므로 옷 안 공기 흐름(13절 9번)과 망사 자리를 다시 정한다.
6. 설계 상세도(06)와 홍보 그림의 원단을 새 목표로 다시 그린다.

11. 시뮬레이션에 반영할 것

PhoneBot 논문의 학습 설정을 쓰더라도 아래는 바꿔야 한다. 링크 물성은 `out/report/checks_<c>.json`의 `sim_links`에 있다. 관성 텐서는 각 링크의 무게중심 기준이고 설계 좌표축 방향이다.

링크	질량	무게중심 (m)	비고
회전축 위 몸통(팔 제외), Pi 5	1.1099 kg	(0.0015, −0.0148, 0.3806)	회로 부품, 머리 폼, 가정 질량(한복 윗부분과 치마, 머리 덮개, 유건, 배선, 체결류, PPTC)을 **포함한다**
회전축 위 몸통(팔 제외), Jetson	1.1937 kg	(0.0010, −0.0190, 0.3795)	같음
팔(허브 포함), 좌우 각각	0.0069 kg	(±0.0858, −0.0040, 0.3508)	
신발 조각, 한 발	0.0058 kg	(0.0595, −0.0299, 0.0193)	왼발 기준(오른발은 X 부호 반대). 발 링크에 더한다
고관절 가리개(`pelvis_hip_guard`)	0.0181 kg	(0.0, 0.0027, 0.292)	회전하지 않는 골반 링크에 더한다
XC430 질량 차, 좌우 각각	0.0078 kg	(±0.0525, 0.0126, 0.216)	고관절 좌우축 케이스를 싣는 링크에 더한다(`sim_actuators`)

- ☐ 몸통 링크의 질량과 관성을 위 값으로 바꾼다(원본은 휴대폰 포함 값).
- ☐ 관절 구동기를 나눈다. 고관절 좌우축 2개는 XC430-W240-T, 나머지 하체 11개는 XL430-W250-T다 (`sim_actuators.joints`). XC430의 토크-속도 곡선을 벤치에서 잴 때까지는 모든 관절의 토크 한도를 0.93 N m로 둔다. 잰 뒤에 XC430 관절의 한도를 따로 준다(가정값 1.129 N m는 참고용).
- ☐ 충돌 형상을 추가한다: 원단을 씌운 머리 외곽(타원체 232 × 206 × 208 mm), 가슴 카트리지, 팔, 신발 조각, 골반 링크의 고관절 가리개. 정강이가 수평보다 올라가는 다리 자세는 가리개 앞에 닿으므로, 그 자세를 막거나 가리개 충돌 형상으로 다룬다(`cad/hip_guard.py`의 `guard_contacts()`).
- ☐ 팔 관절 2개를 넣되 정책의 행동에는 넣지 않는다. 학습 중에는 팔을 앞 135°, 뒤 150° 안에서 무작위로 움직여 교란으로 쓴다.
- ☐ IMU 위치를 옮긴다. 원본은 회전축 위 휴대폰이고, 이 설계는 오른쪽 옆판 안쪽(X −48.6, Y 0, Z 359)이다. 기판 축과 몸체 축의 대응(`params.IMU_BOARD_TO_BODY`: 앞 = −기판 Y, 왼쪽 = +기판 Z, 위 = −기판 X)은 기판 인쇄와 대조하지 않았다. 실물에서 기울여 가며 부호를 확인한다. 자석(스피커, 서보) 옆이라 지자기를 쓰지 않는 Game Rotation Vector를 쓴다.
- ☐ 질량을 무작위로 바꾼다: 머리 덮개 85 ~ 150 g(덮개 점질량 위치 (0, −18, 519.5), `params.HEAD_COVER_CENTER_Z`), 한복 43 ~ 186 g(윗부분 26.1 ~ 79.3 g, 치마 16.9 ~ 106.3 g), 배선 40 ~ 100 g, 무게중심 위치. 새 의상(10.4절)의 추정이 나오면 범위를 바꾼다.
- ☐ 의상이 다리에 스치는 힘을 무작위 교란으로 넣는다(Olaf 논문은 이 힘을 모델링하지 않고 도메인 랜덤화 외란으로 처리했다. 범위 수치는 논문에 없다). 몸통 회전 때 옷자락이 다리를 쓰는 힘도 같은 방식으로 넣는다.
- ☐ 발 사이 거리 벌점의 문턱(논문 0.05 m)을 다시 본다. 신발 조각 때문에 발 외곽이 커졌다.
- ☐ 발 모서리 여유 보상은 발판 모서리 기준으로 그대로 둔다. 조각은 지면에 닿지 않게 설계했지만, 충돌 형상에는 넣어 정책이 조각을 끌지 않게 한다.
- ☐ 몸통 회전 관절의 휨과, 상체가 베어링 롤러 원을 벗어나는 수평 가속도(Pi 5 0.67 m/s², Jetson 0.16 m/s²)를 넘는지 기록한다.
- ☐ 몸통을 ±90° 돌린 자세의 뒤쪽 넘어지는 각(6.6 ~ 7.0°)을 보상이나 명령 범위에 반영한다.
- ☐ 전압에 따른 토크 변화를 넣는다(배터리 9.6 ~ 12.6 V). XC430과 XL430은 곡선이 다르다.
- ☐ 서보 온도 모델을 넣는다. Olaf 논문은 의상으로 덮인 목 구동기 과열을 토크 제곱 1차 열 모델과 제약 보상으로 다뤘다.

12. 구매 부품

CAD에 모델이나 질량으로 들어간 부품이다. 전선, 커넥터, 블레이드 퓨즈 자체, E-stop 버튼은 전원과 배선 설계 2절의 부품표에 있다. 가격은 XC430(미국 판매처 개당 137.89 USD, XL430 27.50 USD)과 F1 홀더 HHM(디바이스마트 25,069원, 부가세 포함, 2026-11-16 품절 표시)을 조사했다.

부품	수량	질량(개당)	CAD 치수의 근거
DYNAMIXEL XL430-W250-T (하체, 재사용)	11	57.2 g	PhoneBot STEP, 제조사 자료
DYNAMIXEL XC430-W240-T (고관절 좌우축, 새로 구매)	2	65.0 g	제조사 자료. 외형, 혼, 동봉 나사가 XL430과 같다. 도면의 구멍 좌표는 실물로 대조한다
M2.5 × 4 탭 나사(XC430 케이스)	16	원본 체결류에 포함	원래 M2.5 × 5 대신, 서보당 8. 진입 2.45 mm(한계 3.0 mm)
DYNAMIXEL XC330-T288-T (어깨)	2	23 g	제조사 자료

부품	수량	질량(개당)	CAD 치수의 근거
Zeee 3S 2200 mAh (재사용)	1	137 g	PhoneBot STEP
Raspberry Pi 5 + Active Cooler	1	70 g(가정)	제조사 도면
Jetson Orin Nano Super 개발 키트 (Phase 2)	1	175 g	캐리어 구멍에 바로 세우는 출력 스탠드오프로 고정. 구멍 위치는 실물로 잰다
Pololu D36V50F5 (5 V 강압, Pi 5만)	1	7 g	제조사 자료. 구멍 위치는 조사됨, 실물 대조 전
Pololu U3V70F15 (15 V 승압, Jetson만) + VIN 33 µF 25 V 이상 전해 콘덴서	1 + 1	3.5 g(콘덴서 질량은 계량으로 정함)	제조사 자료 40.6 × 15.2 × 4.6 mm. 구멍 위치는 제조사 도면에서 읽을 일
Adafruit BNO085 (#4754)	1	2.5 g	제조사 자료
Seeed ReSpeaker Lite (마이크)	1	12 g(가정)	제조사 STEP
Seeed 밀폐형 스피커 4 Ω 5 W	1	35 g(가정)	제조사 자료
NKK S1A 토글 스위치	1	12 g(가정)	구멍 지름 확인, CAD 몸체 크기는 가정. 조사한 실물 몸체 30 × 18 mm는 테스트가 따로 비워 둔다
Panasonic CB1a-M-12V 릴레이	1	약 33 g(`finder3.md` #41)	몸체 크기는 유통사 표기뿐
Eaton Bussmann HHM 인라인 MINI 퓨즈 홀더 (F1, 20 A 퓨즈)	1	22.3 g(계산: 카탈로그 18 g + 12 AWG 리드 구리 4.3 g)	HHL과 같은 도면 39.6 × 15.0 × 10.4 mm, 12 AWG 리드 121 mm, 연속 24 A 또는 퓨즈의 80%
Eaton Bussmann HHL 인라인 MINI 퓨즈 홀더 (F3, F6)	2 (Jetson 1)	18 g(카탈로그, 약 10 g일 수 있음)	도면 판독 39.6 × 15.0 × 10.4 mm, 리드가 나오는 끝은 가정
2.54 mm 2×20 암 소켓 헤더(Pi 헤더 플러그, Pi 5만)	1	3 g(가정)	51 × 5 mm 핀 영역 크기, 전선 12가닥을 꼬리에 납땜
폴리이미드 필름 테이프(Jetson만)	45 × 20 mm	0.1 g	약 0.065 mm. 승압 보드 뒤 가장자리 맞은편 통 앞면
Littelfuse RXEF025 (F2), RUEF250 (F4, F5) 리드형 PPTC	1 + 2	1 g(가정, 슬리브 포함)	형상 없음, 점질량. 자료는 단종 표시된 TE 자료집 판의 값이다
WAGO 221-415 레버 커넥터	4	4 g	제조사 자료
APEM Q8F1CXXR12E 패널 표시등	1	3 g(가정)	도면 판독
E-stop 잭(2극)	1	—	구멍 지름 8 mm만 정함. 품번 미정
M3 암수 스탠드오프(몸통 6 mm)	4	4 g(합, 가정)	5.1절의 수나사 길이 주의
M3 암수 스탠드오프(몸통 16 mm)	2	3 g(합, 가정)	트레이용
M2.5 암수 나사 스페이서(3 mm)	4	1.2 g(합, 가정)	조사로 확인된 3 mm 품은 암암형뿐이다
스냅 스터드(지름 10.5, 높이 6 mm)	4	0.9 g(가정)	품번 미정
나일론 M3 × 12 나사 + 너트, 순간접착제	4	1.2 g(합, 가정)	
고관절 가리개 나사(M2.5 × 6 접시 탭 4, M2.5 × 10 접시 탭 1)	5	1.5 g(합, 가정)	앞 받침의 M2.5 × 14 접시 2개는 원래 나사를 바꾼 것
카트리지 잠금 M3 × 12 육각 구멍 볼트 + O링(2.5 × 1 mm)	2 + 2	체결류 25 g에 포함	O링 치수는 가정
M3 인서트, 나사류	5.3절	25 g(합, 가정)	

"가정"이라고 쓴 값은 실물을 받으면 재서 `cad/vitamins.py`, `cad/assembly.py`, `cad/actuators.py`, `cad/head_form.py`, `cad/checks.py`를 고친다. 릴레이와 토글 스위치는 몸체 크기를 가정했으므로 구매 전에 도면으로 자리를 다시 확인한다.

13. 후속 과제

무거운 것부터 적었다. 항목마다 할 일과 그것을 정하는 것을 함께 적었다.

1. **고관절 좌우축과 다리 관절의 부담.** 지표가 XL430 시뮬레이션 토크 한도의 1.35배(Jetson 1.40배)다. 목표 1.15배까지 Pi 5 구성은 363.6 g, Jetson 구성은 448.3 g을 덜어야 하고, 가정 질량이 빗나가면 582.4 g, 667.1 g이다. XL430 스톨 1.4 N m 대비 0.90(비관 0.98, Jetson 비관 1.01)이다. 고관절 좌우축은 XC430으로 바꿔 XC430 스톨 대비 0.74, 가정 한도 대비 1.11배(비관 1.21배)다. 1.35배와 0.90은 고관절 좌우축 지표를 XL430 수치와 견준 값이고, 이전 예외 기준과 이어 보려고 남겼다. 나머지 11개 XL430 관절은 지렛대가 저마다 달라(몸통 yaw는 중력 모멘트가 없다) 관절별 지표를 따로 계산해 목표와 견준다. 7.2절의 남은 감량 후보를 모두 합쳐도 목표에 못 미친다. 이 질량으로 걷는지는 시뮬레이션 학습이 정한다.
2. **소유자 결정(2026-11-16)과 남은 자리 확인.** 지난 수정까지 strict xfail로 남았던 다섯 가지(리드 직선 구간, F1 고정, Pi 헤더 플러그 공간, Jetson 잠금 나사, F2와 F3의 마주 봄)는 모두 풀려 테스트가 통과한다. 소유자가 맡긴 결정은 아래처럼 적용했고, 그 결정을 확인하는 테스트(`tests/test_owner_decisions.py`)가 모두 통과한다(전원과 배선 설계 15.1절과 같은 목록).
   - F1 홀더: Eaton Bussmann HHM(12 AWG 리드, 연속 24 A)과 20 A 퓨즈. F1의 연속 부하 최대(Pi 5 11.2 A, Jetson 13.4 A)는 연속 한계 16 A의 70%, 84%로 설계 기준 85% 이하다. F3가 10 A까지 오르는 짧은 최대(13.2 A, 15.4 A)에서 Jetson 구성은 0.6 A가 남고, 닫힌 몸통 안의 퓨즈 온도는 발열 시험에서 잰다. 본체는 HHL과 같은 도면이라 자리와 묶음 타이는 그대로이고, 배터리 리드 슬롯을 앞 가장자리와 옆판까지 넓혀 12 AWG W01이 W17 옆으로 지나간다. F1만이 보호하는 W09, W19, W09J, W19J, W10은 16 AWG다.
   - 가리개 앞 받침의 3.0 mm 예외를 받아들였다. TorsoBase 3.10 mm, 배터리 스톱 4.1 mm다. 예외는 `cad/checks.py`의 5 mm 규칙 바로 옆에 이유와 함께 있고(`GUARD_FRONT_MOUNT_YAW_GAP_WAIVER_MM`, `YAW_GAP_WAIVERS`), 다른 간격은 모두 5 mm 규칙을 지킨다(`tests/test_owner_decisions.py`).
   - Pi 헤더 플러그: 51 × 5 mm 핀 영역 크기의 맨 2.54 mm 2×20 암 소켓 헤더. 핀 끝 뒤 18 mm가 비어 있다(통 앞 +X 코너 블록 모따기 0.711 mm³만 걸치고, 허용 1 mm³ 안). 방향은 소켓 돌기와 카트리지 안내 홈으로 정한다.
   - F4, F5는 RUEF250 그대로다. 분기 배선과 보드를 지키고, EH 커넥터 정격 3 A는 분기 부하로 지킨다(전원과 배선 설계 4.3절).
   - Jetson 승압 보드와 통 앞면 0.3 mm: 자리를 그대로 두고 통 앞면에 폴리이미드 필름 테이프를 붙인다(부품표 줄, 질량 0.1 g, 5.1절 12번).
   - 가리개 뒤 잠금 파일럿은 우리가 출력하는 PelvisTop의 형상에 넣었다(4.8절, `phonebot_pelvis_top`).
   - 트레이 오른쪽 에이프런은 그대로 둔다. 두 받침의 강성이 대칭이 되고 판이 출력 중 안정하게 선다.
   - 고관절 좌우축 케이스 나사는 M2.5 × 4(와셔 없음, 진입 2.45 mm)다.
   - 질량은 있고 형상이 없는 가정 항목은 모두 BOM 줄로 들어갔다(7.1절).
   - 상세도의 컴퓨터 보드 이름은 구성을 따른다(Pi 5 그림은 Raspberry Pi 5, Jetson 그림은 Jetson Orin Nano).
   - Jetson 캐리어는 캐리어 구멍에 바로 세우는 출력 스탠드오프 4개로 고정하고, 중간 판은 쓰지 않는다. 스탠드오프는 키트의 구멍을 실측한 뒤 앞벽에 넣는다. 그때까지 질량 모델은 스탠드오프 4개를 0.8 g의 가정 항목(`jetson_carrier_standoffs`)으로 센다.

    - 그 밖의 자리 확인: 배터리 팩이 +X로 11.5 mm 움직일 수 있어 폼 블록으로 채운다. 여러 간격(릴레이와 옆판 0.5 mm, 릴레이와 바닥판 0.1 mm, J0와 서보 0.5 mm, J1과 J2와 서보 약 0.3 mm, 트레이 발과 U2D2 0.05 mm)이 대용품 치수에 기대고 있어 실물 치수로 다시 잰다. F1, F3 리드 끝에서 옆판까지 5.7 mm는 실물 HHM(12 AWG), HHL(16 AWG) 리드 굵기와 굽힘 반지름으로 확인한다. HHM 실물 치수도 잰다(Eaton SKU 페이지 값이 도면과 다르다). 배선 트레이는 서포트를 써서 출력한다.
3. **소매 고정 자리.** 팔 그루터기의 소매 자리(지름 36 mm 플랜지 + 걸림 리브)는 오른팔 쪽 IMU 위 나사 두 개의 드라이버 통로를 막아 뺐다. 소매를 거는 방법은 의상 재설계(10.4절)에서 IMU 나사 통로를 비우는 조건으로 정한다.
4. **고관절 가리개의 남은 확인.** 다리 케이블과 보조 주입선이 가리개 안쪽을 지나는 경로는 실물 배선에서 정한다. 정강이가 수평보다 올라가는 자세는 시뮬레이션에서 막거나 충돌 형상으로 다룬다. 고리는 브래킷 윗면(Z 296.3)과 고관절 좌우축, 앞뒤축을 덮지 않는다. 새 의상에서 바지를 고리에 걸면 고리의 하중과 고정을 다시 정한다.
5. **몸통 회전축의 전복 여유.** 상체 합력이 베어링 롤러 원을 벗어나는 수평 가속도가 Pi 5 0.67 m/s², Jetson 0.16 m/s²다. 시뮬레이션의 보행 가속도와 비교해 정한다.
6. **몸통을 돌렸을 때 뒤쪽 넘어지는 각.** 정면 자세 8.3°(Jetson 8.6°)가 몸통 +90°에서 6.7°, −90°에서 7.0°(Jetson 6.6°, 6.8°, 비관 6.3°)로 줄어든다. 테스트가 정면 자세에 요구하는 8.0°보다 작다. 시뮬레이션의 명령 범위와 보상에 넣고 실물 시험에서 확인한다.
7. **뒤로 넘어질 때 머리가 먼저 닿을 수 있다.** 다리를 편 채 뒤로 넘어지면 머리가 뒤판 범퍼 리브보다 먼저 땅에 닿을 수 있다는 지적이 머리 폼 검토에서 나왔다. 리브가 토글, 잭, 표시등, 스피커를 지킨다는 전제가 여기에 달려 있다. CAD에서 넘어지는 자세를 그려 정한다.
8. **12.0 V 정격, XC430 확인, 자동 검사.**
    - XL430 11개와 XC330 2개는 입력 6.5 ~ 12.0 V인데 3셀 완충은 12.6 V다. XC430 2개는 14.8 V까지 사양 안이다(전원과 배선 설계 5.3절).
    - XC430의 혼과 케이스 나사 구멍 좌표는 제조사 도면 파일로 대조한다. 지금 근거는 같은 외형, 같은 혼, 같은 동봉 나사, 같은 프레임 목록이다. XC430 옆 구멍이 XL430처럼 자가 탭 플라스틱인지도 함께 본다.
    - XC430 토크-속도 곡선(9.6 ~ 12.6 V)을 벤치에서 재서 시뮬레이션 한도를 정한다.
    - `tests/test_hip_guard.py::test_front_jaw_lies_on_the_pelvis_nose_top`은 `tests/test_costume_fit.py` 뒤에 돌 때 295.2462 대 295.25로 실패했다. 의상 치수를 재는 `cad.hip_guard.surface_samples`가 세션이 함께 쓰는 부품 형상에 삼각망을 남겼고, 그 뒤의 경계 상자가 삼각망을 따랐기 때문이다. 이제 삼각망은 형상의 복사본에 만들고, `test_surface_samples_leave_no_mesh_on_the_shape_they_sample`이 원래 형상에 삼각망이 남지 않음을 확인한다. 전체 실행에서도 통과한다.
    - 케이스 나사는 M2.5 × 4로 바꿔 XC430 케이스에 2.45 mm 들어간다(한계 3.0 mm, 여유 0.55 mm). 41.7 mm와 38.25 mm는 STEP의 M2.5 × 5에서 한 번 읽은 값이고 테스트는 그 산수를 확인한다. 실물 조립 때 나사 끝 깊이를 잰다.
9. **옷 안의 열.** 보행 중 배터리 전력 약 69 ~ 86 W가 거의 다 옷 안에서 열이 된다(전원과 배선 설계 12.5절). XL430 온도 한계 72 °C, XC430 80 °C, 스피커 동작 상한 +30 °C, Jetson 키트 0 ~ 35 °C. 새 의상의 단 높이에 따라 공기 흐름이 바뀌므로 옷을 입힌 채 실측해 정한다.
10. **가정 질량.** 머리 덮개 85 g, 한복 48.5 g + 43.3 g(새 의상에서 다시 추정), 유건 35 g, 배선 40 g, 체결류 25 g, 퓨즈 홀더 HHL 18 g × 2와 HHM 22.3 g, PPTC 1 g × 3, Pi 헤더 소켓 3 g, 절연 테이프 0.1 g, Pi 5 70 g, 스피커 35 g, 마이크 12 g, 스위치 12 g, 스냅 0.9 g × 4, 가리개 나사 0.3 g × 5가 가정이다. 만들 때마다 계량해 바꾼다.
11. **의상 재설계.** 10.4절의 여섯 가지 일. 한복 초안에서 넘어온 확인 항목도 있다: 치마에서 띠 모서리로 넘어가는 약 10 mm 계단, Jetson 마이크 보드가 홍보 그림의 조끼 밖으로 8,700 mm³ 나오는 것.

12. **시뮬레이션, 출력, 조립.** 걷는지, 출력이 되는지, 조립이 되는지는 시뮬레이션 학습과 실물 시험으로 정한다(14절). 함께 정할 것:
    - Jetson 캐리어 보드의 구멍 패턴과 외형을 실측한다. 캐리어는 그 구멍에 바로 세우는 출력 스탠드오프 4개로 고정한다(소유자 결정, 지금 깊이 40 mm에 맞음). 잰 구멍 자리를 `cad/vitamins.py`의 `jetson` 구멍으로 넣으면 카트리지 앞벽에 스탠드오프와 파일럿이 생긴다.
    - 승압 보드의 M2 보스 위치를 제조사 도면에서 읽고, VIN 콘덴서의 자리와 질량을 정한다.
    - IMU 축 대응을 기판 인쇄와 실물 기울이기로 확인한다.
    - 그 밖에 검토에서 나온 기존 항목: 머리 폼 `head_form_crown_arc_a`가 기준 형상 `head_shell`과 7.68 mm³ 겹친다. 서보 버스 W36의 최대 3.16 A가 X3P 커넥터 정격 3 A를 넘는다(전원과 배선 설계 4.3절).

14. 위험 요소와 실물 시험 계획

위험	왜 문제인가	확인 방법
무게	XL430 관절의 지표가 원본의 1.35배	시뮬레이션에서 2.4 ~ 2.7 kg 범위로 학습해 보고, 걷지 못하면 감량 방안을 정한다
XC430 시뮬레이션 한도	고관절 좌우축 한도가 가정값(1.129 N m)이다	벤치에서 XC430 토크-속도 곡선을 재고 시뮬레이션 한도를 바꾼다
몸통 회전축	상체 전체가 서보 혼 나사 4개(M2)와 롤러 반지름 20.1 mm 스러스트 베어링에 얹혀 있다	상체를 올리고 머리를 손으로 밀어 유격과 휨을 본다. 크면 베어링 지지를 넓힌다
머리 떨림	목 기둥과 휠 위에 머리 폼과 덮개가 얹힌다	머리를 톡 쳐서 영상으로 떨림 주기를 잰다. 낮으면 목 기둥을 굵게 한다
뒤로 넘어짐	뒤쪽 여유각이 8.3°, 몸통을 돌리면 6.7°	기본 자세에서 상체를 조금 앞으로 숙인 자세를 기준으로 삼는다. 넘어질 때 머리와 리브 중 어디가 먼저 닿는지 CAD로 확인한다
열	의상이 Pi, 강압 모듈, 서보 15개를 덮는다	의상을 입힌 채 10분 동작 후 Pi와 서보 온도를 읽는다
어깨 서보 과부하	팔이 의상에 걸리면 서보가 스톨한다	Current Limit을 800 mA 이하로, 각도 제한 앞 135° 뒤 150°, 가속 제한을 설정한다
가리개 앞 받침의 회전 간격	3.0 mm 예외(소유자 승인)로 TorsoBase 3.10 mm, 배터리 스톱 4.1 mm	실물에서 몸통을 ±90° 돌려 간격을 재고, 3.0 mm 아래면 앞 받침 턱을 다시 정한다
가정 질량	덮개, 의상, 배선, 홀더, PPTC가 가정값	만들 때마다 계량해 `cad/checks.py`, `cad/vitamins.py`, `cad/actuators.py`를 고치고 다시 계산한다
Jetson 카트리지	캐리어 구멍을 재서 출력 스탠드오프를 넣어야 하고, Pi 5 구성보다 84.7 g 무겁다	V0 보행은 Pi 5 구성으로 한다. Phase 2에서 실측 후 진행한다
IMU 축 대응	옆판에 세워 달아 축이 원본과 다르다	로봇을 앞, 옆으로 기울여 부호를 확인한다
고관절 가리개	다리 케이블 경로, 정강이를 든 자세의 접촉, 바지를 걸 때의 하중	실물 배선 때 경로를 정하고, 시뮬레이션에서 자세를 막거나 충돌 형상을 넣고, 의상 재설계 때 하중을 정한다
의상 재설계	새 겉모습 목표(10.4절)의 패턴, 질량, 열이 정해지지 않았다	`costume/` 도구로 조끼, 바지, 신발 덮개를 다시 만들고 `cad.checks`를 다시 돌린다

권장 순서: ① 부품 계량과 XC430 벤치 측정 → ② 자리 확인(13절 2번) → ③ MJCF 수정 후 시뮬레이션 학습 → ④ 하체만으로 원본 재현 보행 → ⑤ 상체를 올리고 머리 없이 보행 → ⑥ 머리 폼과 덮개 → ⑦ 고관절 가리개 → ⑧ 새 의상(조끼, 바지, 신발 덮개).

15. 다시 만들기

치수는 `cad/params.py` 한 곳에서 바꾼다. 바꾼 뒤 저장소 최상위 폴더에서 아래를 순서대로 실행한다. `pi5` 자리에 `jetson`을 넣으면 Jetson 구성이 만들어진다.

```
python -m cad.base                      # PhoneBot STEP을 읽어 cache/를 만든다. 처음 한 번만
python -m cad.checks pi5                # 질량, 무게중심, 간섭, 팔 흔들기 → out/report/checks_pi5.json
python -m cad.views pi5                 # 01 ~ 04 그림 → out/renders/
python -m figure.sheet pi5              # 06 설계 상세도 → out/renders/
python -m cad.export pi5                # STEP, 출력용 STEP, STL, 3D 보기, BOM
python electrical/draw_wiring.py        # wiring.json → electrical/wiring_diagram.png
python -m concept.compose pi5           # 홍보용 그림 → out/concept/ (설계 근거 아님)
python -m concept.poster pi5            # 홍보용 포스터, figure.sheet가 만든 그림을 쓴다
python -m costume.sheet                 # 한복 초안 패턴 → out/costume/
python -m pytest tests --ignore=tests/test_build_pdf.py   # 설계 규칙 검사
python -m pytest --noconftest tests/test_build_pdf.py     # 문서 PDF 도구 검사
python docs/build_pdf.py                # docs/design.md → docs/design.pdf
```

- 그림 명령은 Windows의 맑은 고딕(`C:/Windows/Fonts/malgun.ttf`, `malgunbd.ttf`)을 직접 연다. `cad.views`, `figure.sheet`, `electrical/draw_wiring.py`는 이 글꼴이 없으면 `FileNotFoundError`로 멈춘다. `concept.compose`는 나눔고딕, Noto Sans CJK, Apple SD Gothic Neo를 차례로 찾고, `concept.poster`는 사용자 폴더의 Pretendard가 없으면 맑은 고딕을 쓴다.
- `concept.poster`는 같은 구성의 `figure.sheet`가 만든 `out/renders/_raw/detail_<c>/main.png`를 읽는다. 그래서 `figure.sheet`를 먼저 돌려야 한다.

`cad.checks`는 겹침이 있거나, 검사에 실패한 쌍이 있거나, 몸통 회전 간격이 5 mm 미만이거나, 가리개 조각의 회전 간격이 요구(고리와 뒤 받침 5.0 mm, 앞 받침 3.0 mm)보다 작거나, 팔이 허용 범위 안에서 무엇에 닿으면 실패 코드로 끝난다. `pytest`는 겹침 없음, 질량과 지표 상한, 구멍 위치, 신발 밑면 규칙, 회로 부품 자리, 머리 폼 형상, 가리개와 다리의 간격, XC430 질량과 케이스 나사 계산, 소유자 결정 12가지, 의상 패턴 등을 검사한다.

자주 바꿀 만한 값:

바꾸고 싶은 것	변수
전체 높이, 머리 크기	`TOTAL_HEIGHT`, `HEAD_HEIGHT`, `HEAD_WIDTH`, `HEAD_DEPTH`
머리 앞뒤 위치	`HEAD_CENTER_Y`
머리 폼	`HEAD_SKIN_ALLOWANCE`, `HEAD_FORM_*`
어깨 높이, 팔 길이, 팔 각도 제한	`SHOULDER_AXIS_Z`, `ARM_LENGTH`, `ARM_SPLAY_DEG`, `ARM_SWING_LIMIT_DEG`, `ARM_SWING_LIMIT_FORWARD_DEG`
신발 조각 크기	`SHOE_TOE_OVERHANG`, `SHOE_HEEL_OVERHANG`, `SHOE_RISE_ANGLE_DEG`
회로 부품 자리	`CIRCUIT_SEATS`, `PI5_ONLY_SEATS`, `JETSON_ONLY_SEATS`, `PPTC_ENVELOPE`, `LED_CENTER`
가슴 카트리지 잠금	`CHEST_LOCK_X`, `LOCK_KEY_BORE`, `cad/frame.py`의 `CHEST_INSERT_DEPTH`, `ORING_COUNTERBORE`
고관절 가리개	`HIP_GUARD_*`(고리 크기, 받침 형상, 나사, `HIP_GUARD_MASS_BUDGET`), `CLOTH_MIN_GAP`
하체 서보 구성	`cad/actuators.py`(XL430 57.2 g × 11, XC430 65.0 g × 2, 케이블 32.5 g, 케이스 나사 `CASE_SCREW_*`, `HIP_ROLL_CASE_SCREW_LENGTH`)
몸통 회전 간격과 예외	`cad/checks.py`의 `MIN_YAW_GAP_MM`, `GUARD_FRONT_MOUNT_YAW_GAP_WAIVER_MM`, `YAW_GAP_WAIVERS`
퓨즈 홀더	`cad/vitamins.py`의 `SPEC["fuse"]`(HHL), `SPEC["fuse_hhm"]`(HHM), `HOLDER_MAX_CONTINUOUS_A`, `cad/params.py`의 `F1_FUSE_A`

바꾸고 싶은 것	변수
뒤판 구멍	`SWITCH_CENTER`, `ESTOP_JACK_CENTER`, `SPEAKER_LEAD_HOLE`
가정 질량	`cad/checks.py`의 `EXTRAS`, `BUILD_EXTRAS`(Pi 헤더 소켓, 절연 테이프), `ROBE_LOW`, `ROBE_HIGH`, `PESSIMISTIC`, `CAP_MASS_G`, `PPTC_SET_G`, `cad/params.py`의 `HEAD_COVER_MASS_LIMIT`, `SNAP_STUD`, `HIP_GUARD_SCREW_MASS`, `cad/vitamins.py`의 `SPEC`, `cad/assembly.py`의 `STANDOFF_SET_MASS`, `IMU_SPACER_SET_MASS`, `TRAY_STANDOFF_SET_MASS`와 원본 부품 질량(`TORSO_BASE_MASS`, `PHB_MASS`, `U2D2_MASS`, `BEARING_MASS`, `BASE_PRINT_DENSITY`), `cad/head_form.py`의 `FASTENER_SET_MASS`

16. 라이선스

PhoneBot 원본 형상(`vendor/phonebot`, `cache/`, 그리고 그것이 들어간 `out/`의 조립 파일과 그림)은 CC BY-NC 4.0이다. 출처를 밝혀야 하고 상업적으로 쓸 수 없다. 모터 후원이나 협찬을 받는 형태가 이 조건에 맞는지는 저작권자(UCLA RoMeLa)에게 확인해야 한다. 홍보용 포스터의 큰 그림은 소유자가 준 생성 이미지다(`concept/poster.py`).