RP1 白皮书

RP1 人形机器人平台的系统设计与工程实现

RoboParty | 2026 年 10 月



RP1 在影棚拍摄中的动态画面。

摘要

RP1.3 是面向运动控制与操作研究的模块化人形机器人平台。其工程特点包括便于维护的关节模组式本体、非共点髋部与并联踝、采用统一关节指令接口的分段 CAN-FD 通信，以及从模型准备到动作学习和部署的一体化流程。第 6 章所述条件下的模组级记录包括上肢空载累计运行 120 h，以及单臂在 5.5 kg 负载下动态运行 10 min。这些记录不构成整机使用寿命或持续负载额定值的依据。PartyOS 仍在开发中。文中列出模型、接口与工程资料来源，供后续研究参考；各项结果仅适用于其对应配置。

关键词：人形机器人；模块化驱动；动作重定向；Sim2Real；遥操作；耐久测试。

引言

本白皮书介绍 RP1 平台较为稳定的第三次迭代 RP1.3，面向对人形机器人感兴趣的读者，包括研究人员与开发者。具体配置和历史图示保留各自的版本标识。

评价采用与任务相关的量，包括关节力矩、活动范围和运行时长，并注明相应负载及测试条件。通用性、效率和可靠性在获得对应测量结果支持前，仍作为设计目标。

机械与电气文档、软件接口、模型和测试记录共同连接平台设计与评价。Mini Cheetah 和 ToddlerBot 为这一工程流程提供了参考 [4, 5]。

全文依次介绍机械设计（第 1 章）、电气架构（第 2 章）、嵌入式软件（第 3 章）、控制与部署（第 4 章）、PartyOS 集成（第 5 章）及测试（第 6 章）。文中分别说明设计值、计算结果、仿真结果、RP1 实测结果、上游项目结果和规划功能。

目录

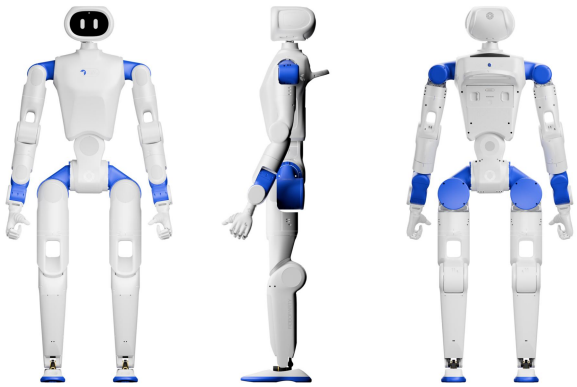
引言 . . . 1
1 机械结构 . . . 3
1.1 整机概况与设计原则 . . . 3
1.2 平台定位 . . . 3
1.3 人体对应构型与运动映射 . . . 4
1.4 关节模组选型 . . . 6
1.5 轴系布局与任务空间 . . . 10
1.6 制造、装配与维护 . . . 17
1.7 从机械装配到 URDF . . . 21
2 电气系统 . . . 23
2.1 系统架构 . . . 24
2.2 板卡分工与硬件实现 . . . 24
2.3 总线分段与通信层次 . . . 26
2.4 热插拔、保护与异常响应 . . . 26
3 嵌入式软件 . . . 27
3.1 架构与通信 . . . 28
3.2 硬件抽象与系统支持 . . . 29
3.3 日志与压力测试 . . . 30
3.4 交互与远程控制 . . . 31
4 算法 . . . 31
4.1 hhtools 动作重定向 . . . 32
4.2 训练框架 . . . 34
4.3 部署框架 . . . 36
4.4 全身智能 . . . 38
5 PartyOS . . . 39
6 整机测试 . . . 40
6.1 系统配置与验证范围 . . . 41
6.2 上下肢互补耐久测试 . . . 41
6.3 单臂动态负载验证 . . . 42
6.4 测试软件与证据管理 . . . 45
7 局限性与未来工作 . . . 45
8 结论 . . . 46
附录 A 测试方法与计划工况 . . . 46
附录 B 配置检查 . . . 46
附录 C RP Hand . . . 46
C.1 配置与规格 . . . 46
C.2 尺寸与电气接口 . . . 47
C.3 软件与开发接口 . . . 47
附录 D 参考文献 . . . 48
附录 E 人形机器人平台索引 . . . 50
附录 F 图表索引 . . . 52
附录 G 工程证据索引 . . . 55

1 机械结构

1.1 整机概况与设计原则

RP1.3（内部型号为 ROBOTO 01）将执行器、计算单元、电源和传感器集成于可配置的研究本体中。公开的比例、关节布局和接口支持模组更换。CNC 加工件与标准件适合小批量生产；各部分可独立拆卸，便于接近易损件。

机械平台为软件与控制方案的调整提供稳定的物理基础。易于接近的接口与可独立更换的模组，使不同研究方向能够在算法迭代过程中复用同一本体。



24 和 28 自由度本体均配置两条 6 自由度腿和 2 自由度腰部（横滚、偏航），单臂分别为 5 和 7 自由度。28 自由度本体加装 2 自由度头部后，共有 30 个主动自由度；再加装两只 6 轴手后，总计 42 个主动自由度。手指的被动运动不计入其中。头部与手部模组单独计数；RP Hand 规格见附录 C。

图 1.1. 白蓝配色 RP1 的三视图。来源：RoboParty [21]。

表 1.1. RP1 本体配置。

项目	24 自由度本体	28 自由度本体	说明
单腿主动自由度	6	6	髋部 3；膝部 1；踝部 2
腰部主动自由度	2	2	横滚和偏航
单臂主动自由度	5	7	增加腕部姿态自由度
URDF 质量总和（kg）	39.1093	40.7264	URDF 中的数值基于实物称重，包含结构、执行器模组、电气元件和线缆

1.2 平台定位

RP1 是面向研究、开发和教学的 135 cm 人形机器人，在图 1.2 所列平台中属于中小型。

操作。上肢以较少的踮脚或弯腰动作，覆盖桌面及常见工作台面。

运动。较小的本体质量和腿部惯量有利于快速迈步。在可比条件下，较低的质心可减小平衡所需力矩，跌倒能量也低于身高超过 1.6 m 的平台。

交互。较小的质量与末端惯量可降低碰撞能量。所需隔离距离与防护措施仍取决于任务、速度、末端工具及风险评估；不能仅凭尺寸判定协作安全性。

成本。在几何相似缩放条件下，关节力矩需求近似随本体尺寸的四次方增长。1.35 m 本体可降低对电机和减速器的要求。单人搬运、较短维护周期以及在普通实验室和教学空间中使用，均为设计目标。

力矩近似按尺寸四次方变化，源于几何相似关系：质量随特征长度的三次方变化，重力力臂随长度线性变化，二者乘积使静态力矩呈四次方关系。对于线加速度可比的运动，转动惯量随长度的五次方变化，角加速度与长度成反比，所得力矩仍满足相同的缩放关系。这是在上述假设下的尺度估算，不能直接作为材料、比例或运动轨迹不同的机器人选型规律。

设计兼顾可达范围、运动、交互和制造成本，不逐一复刻人体的全部解剖关节。

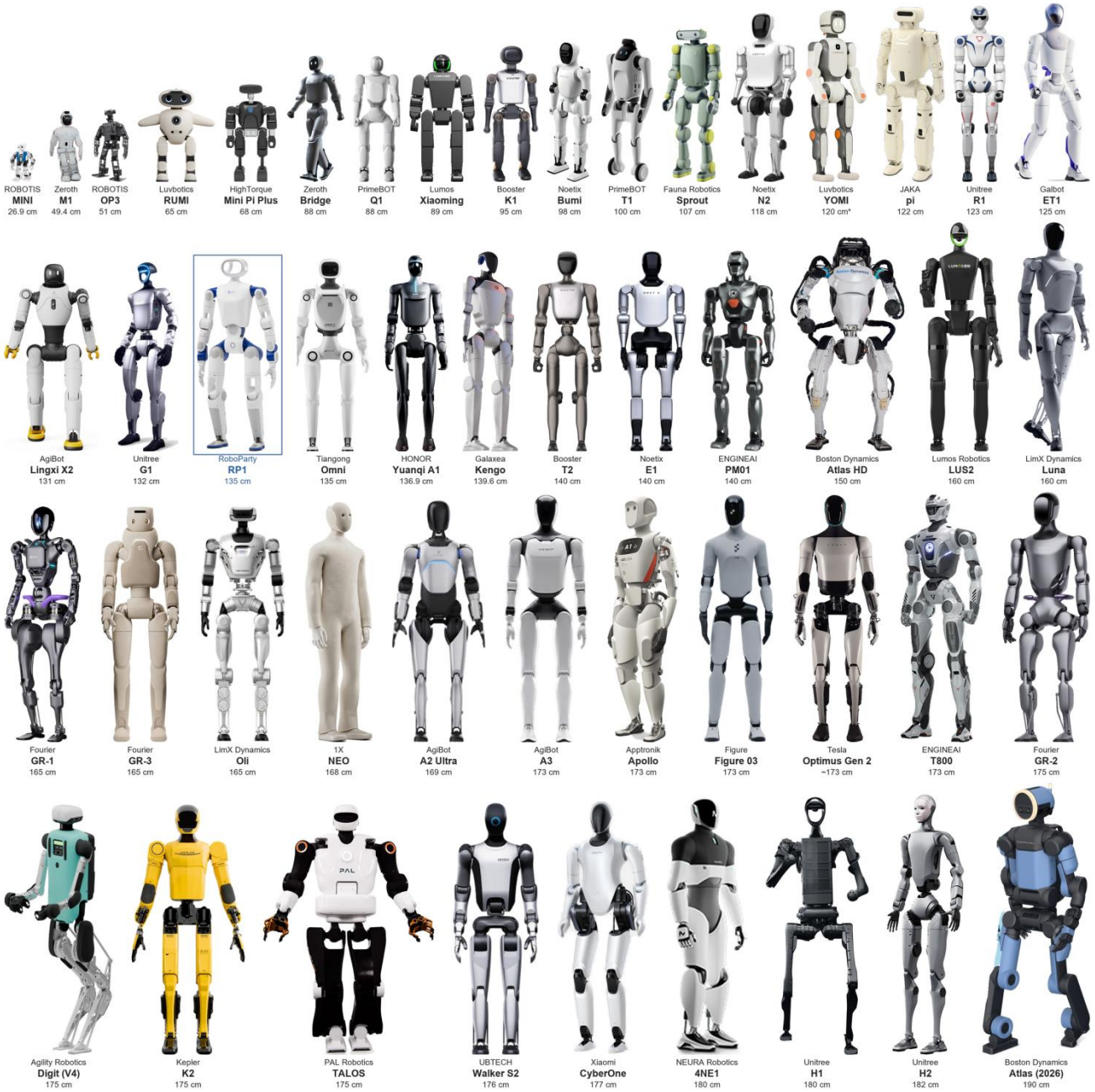


图 1.2. 按标称身高排列的人形机器人，范围为 26.9 – 190 cm；RP1 以蓝色标出。版本与来源见附录 E。各平台身高并非依据统一测量规程获得。

1.3 人体对应构型与运动映射

1.3.1 任务空间对应

RP1 以人体工作空间与任务作为构型参考。肢体工作空间覆盖常用操作区域，无须为每个人体解剖自由度设置一个机器人轴。

这种任务空间对应关系，使同一本体能够承担不同任务并复用人体动作数据。

正运动学将关节角度映射为末端位姿，关节限位与碰撞约束共同限定可达范围。雅可比矩阵将关节速度映射为末端速度，并用于识别方向约束与奇异位形。

1.3.2 从人体动作到机器人轨迹

两阶段映射

解剖映射依据肢段比例、关键点与末端位姿，将人体髋、膝、踝、肩、肘、腕与机器人关节建立对应关系。

随后进行约束修正，使轨迹适应机器人的关节限位、地面接触和自碰撞约束。

动作捕捉、仿真与生成轨迹共用人体解剖映射，再进行针对平台的修正。硬件变化不要求重建人体侧的数据流程。

以 SMPL-X 作为人体参考

SMPL-X（SMPL eXpressive）[6] 以统一的参数化网格表示身体、手部和面部。形状、姿态与表情参数提供关键点、肢段朝向和根节点位姿，用于将人体动作数据映射至 RP1。

来源规格列出了 54 个 SMPL-X 关节，而 RP1 本体具有 24 或 28 个主动自由度。人体模型参数数量与机器人自由度数量并非等价概念。

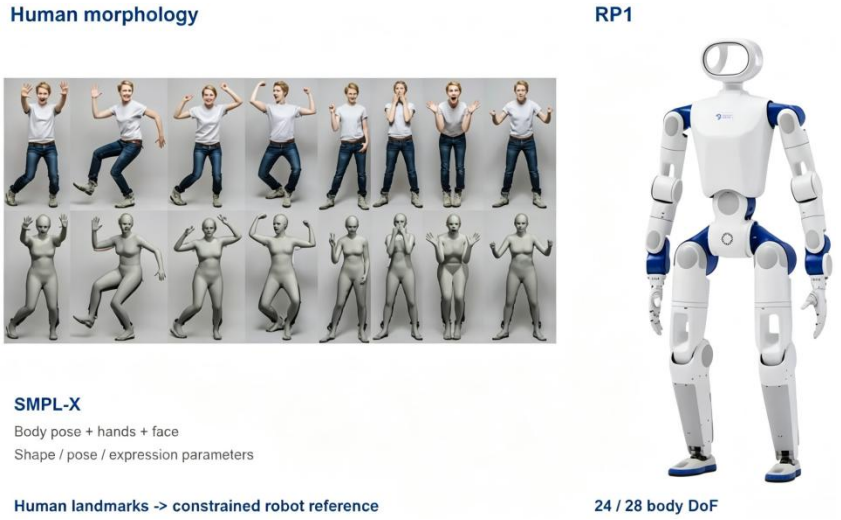


图 1.3. 人体姿态、SMPL-X 网格与 RP1 构型。来源：SMPL-X [6] 和 RoboParty [21]。

执行器分组与人体关节

图 1.4 示意了 30 个 RP1 执行器模组组成的 14 个功能组与部分 SMPL-X 关键点及人体解剖区域之间的对应关系。附表列出各区域的模组数量和分组数量。

图示 30 自由度配置由 28 自由度本体与 2 自由度头部组成。将每侧腕部由三个模组减为一个，即得到 24 自由度本体配置。

人体的三个脊柱分段共用一组由两个模组构成的躯干功能组。图中省略手指关节，手指属于独立手部模组。

1.3.3 基础自由度与扩展模组

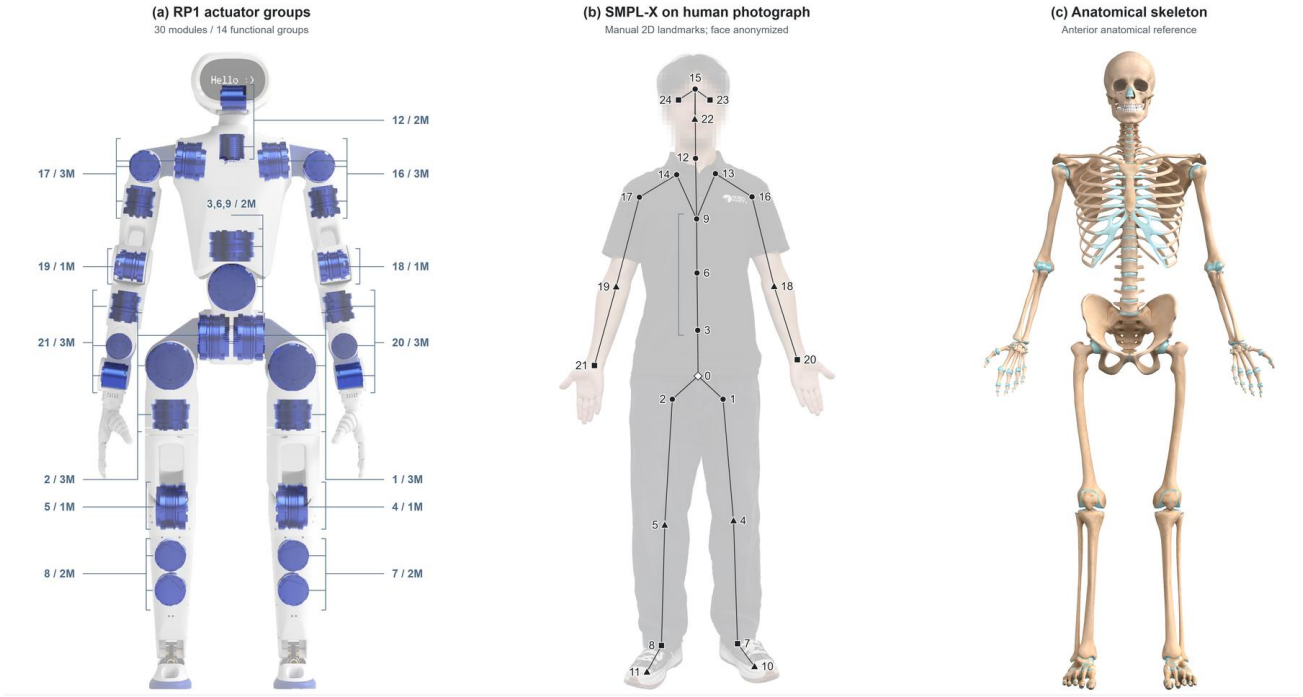
行走与操作需要不同的自由度分配。RP1 将共同基础、可选上肢配置和独立头手模组分开，在保留任务所需运动能力的同时，避免配置不必要的硬件。

配置分配

共同基础：两条 6 自由度腿与 2 自由度腰部，共 14 个自由度。

上肢：24 自由度本体的单臂为 5 自由度；28 自由度本体的单臂为 7 自由度，增加操作冗余。

扩展：加装 2 自由度头部及两只 6 轴手后，28 自由度配置增至 42 个主动自由度。



ACTUATOR-GROUP CORRESPONDENCE

Region	SMPL-X joint IDs (L / R)	Modules / group	Groups	Total modules
Neck	12 neck	2	1	2
Shoulder	16 / 17 shoulder	3	2	6
Elbow	18 / 19 elbow	1	2	2
Wrist	20 / 21 wrist	3	2	6
Torso	3, 6, 9 spine1-3	2 (shared)	1	2
Hip	1 / 2 hip	3	2	6
Knee	4 / 5 knee	1	2	2
Ankle	7 / 8 ankle	2	2	4
Total			**14**	**30**

Heights normalized; manually estimated joints and simplified functional DOF. No calibrated kinematic fit.

READING THE CORRESPONDENCE

17 / 3M SMPL-X joint ID / modules in one group

Local branches collect the modules of each group

M = actuator module; paired IDs follow anatomical L / R.

● 3 DOF ■ 2 DOF ▲ 1 DOF ◇ Root: 3R + 3T

Wrist: 3 robot modules; 2 DOF in the human schematic.

Torso: one shared 2-module group for spine1-3.

Ankle: two shank-mounted modules per ankle.

No separate module group assigned in this diagram:

0 pelvis; 10/11 foot; 13/14 collar; 15 head;

22 jaw; 23/24 eye_smplhf. Fingers are excluded.

图 1.4. RP1 执行器分组与 SMPL-X 人体关节的对应关系。来源：SMPL-X [6] 和 RoboParty [21]。解剖插图来源：Anatomia，https://anatomia.com.mx/anatomia/lineaOsteo/MicroSitio/Esqueleto/index.html。

1.4 关节模组选型

四种规格的一体化旋转式 ROMOMO 模组满足各关节对力矩、转速和安装空间的不同要求。抱箍安装与中空走线通道兼顾装配、维护、散热和布线。

1.4.1 执行器构型

传动方式

RP1 全身采用旋转关节。曾考虑的另一种方案是通过丝杠和连杆实现直线驱动。

旋转模组可直接输出角位移，具有紧凑的法兰安装形式和较高带宽，并可实现连续旋转；带载保持时需要耗电并产生热量。直线执行器将电机旋转转化为推力，再转化为关节力矩。原始对比资料指出，所比较丝杠类型的推力为同等级滚珠丝杠的 3–6 倍。自锁和预紧可改善保持能力与背隙，但效果取决于机构设计。资料给出的 35–70 mm 行程限制了运动范围，力矩满足 tau = F r sin(theta)。高减速比、自锁以及连杆动力学均可能降低响应速度和被动柔顺性。

旋转关节适合大行程与快速响应；直线执行器可适用于行程有限、负载较高且保持时间较长的场景。RP1 基于可复现性、成本和维护便利性选择旋转模组。以下各表保留原始设计记录中的定性对比，不属于受控同条件基准测试。

旋转模组通过减速器将电机转速直接转化为关节力矩。丝杠执行器先将旋转转化为轴向力，再借助连杆力臂产生关节力矩。行星滚柱丝杠通过多处螺纹滚柱接触分配载荷，不同于滚珠丝杠的局部接触。行程与连杆几何限制可实现的运动，并使力与力矩之间的关系随构型变化。这些因素须与冲击载荷、保持工况、反向驱动能力和远端惯量共同评估；并非所有滚柱丝杠设计都具备自锁特性。

表 1.2. 传动特性。来源：RP1 原始设计对比资料 [21]；为定性比较，且与具体配置有关。

特性	旋转关节模组	来源资料中比较的直线执行器
输出	角度 / 力矩	位移 / 推力，再经连杆转换
运动范围	可实现连续 360° 旋转	资料所列行程为 35 – 70 mm；角度范围取决于连杆
静态保持	需通电保持；无制动器时耗电并产生热量	自锁能力取决于丝杠设计
抗冲击	行星传动可承受过载；谐波柔轮可能较脆弱	资料称所比较丝杠类型抗冲击能力较强；原文部分内容被裁切
背隙	谐波：标称零背隙；行星：原始对比中为 10 – 15 arcmin	预紧可减小背隙；其余来源规格被裁切
动态带宽	高；低惯量响应	较低，受高减速比与附加连杆影响
控制	直接输出角位移	非线性力矩：tau = F r sin(theta)
成本	原始对比中为低	本项原始对比中为低；下文另一项集成对比中为高

表 1.3. 执行器集成方案对比。来源：RP1 原始设计对比资料 [21]；为定性比较，且与具体配置有关。

特性	旋转关节	直线执行器
驱动形式	电机与行星减速器一体化	电机与丝杠结合，并进行运动转换
复杂度	较简单	较复杂
成本	较低	较高
质量	较轻	较重
传动效率	较高	存在额外的丝杠传动损耗
维护	所提供的裁切截图中不可见	所提供的裁切截图中不可见

减速器选型

RP1 采用行星减速器，主要考虑刚度、抗过载能力、适中的成本，以及资料所报高于 0.97 的单级效率。约 20 的减速比兼顾响应与振荡控制。在所比较的方案中，RV 减速器更重、成本更高；谐波减速器柔顺性更大，且需考虑柔轮疲劳。

RV 减速器将摆线减速级与附加齿轮级组合，具有较高的力矩承载能力和精度，但在原始对比中质量与外形尺寸更大。谐波减速器利用柔轮与刚轮的齿数差实现大减速比，可达到 100 以上。选型时需权衡柔轮柔顺性、轻载高速损耗与精度、紧凑性及力矩密度。RP1 基于本平台对刚度、效率和成本的要求选择行星减速方案；该对比并不意味着某类减速器适合所有人形机器人关节。

表 1.4. 减速器对比。来源：RP1 原始设计对比资料 [21]；为定性比较，且与具体配置有关。

特性	行星	谐波	RV
啮合形式	多点接触	柔轮弹性变形	摆线齿轮传动
抗冲击 / 抗过载	高	低	高
刚度	高	低	高
效率	单级 > 0.97	低	中等
成本	中等	较高	较高
同等尺寸下的质量	相对较低	低	高
使用寿命	原始对比中较长	受柔轮变形影响	原始对比中较长

所选 NGW 构型采用共用行星轮进行内外啮合。典型单级减速比为 3–10，两级可达 40 或更高。另一种 NW 构型的轴向尺寸可更短，但加工更复杂、径向包络更大，限制了其在叠层装配中的复用。

表 1.5. 行星传动构型。来源：RP1 原始设计对比资料 [21]；为定性比较，且与具体配置有关。

特性	NGW	NW
构型	共用行星轮的内外啮合	双排行星轮的内外啮合
复杂度	简单	加工更困难
轴向尺寸	紧凑	更紧凑
径向尺寸	较小	较大
效率	高	略低
叠层装配复用性	良好	有限

转子方案

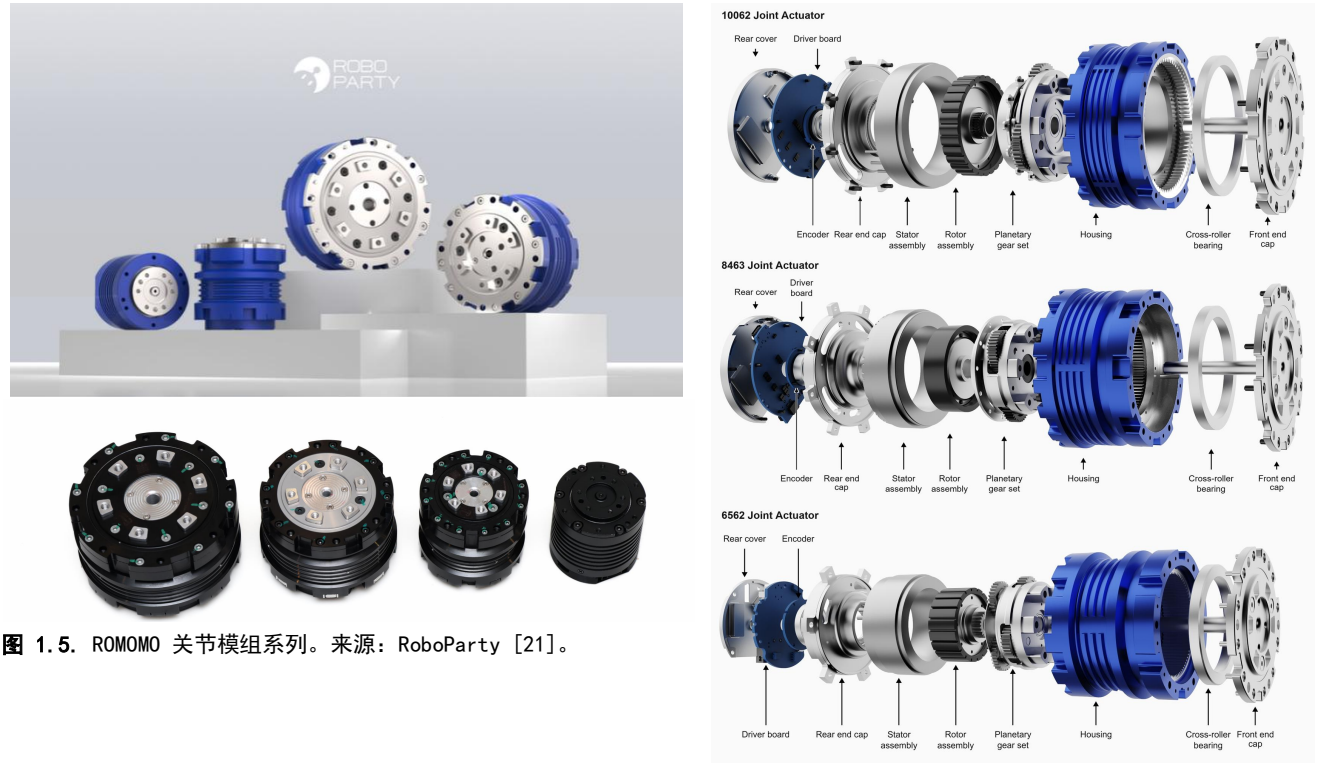


图 1.5. ROMOMO 关节模组系列。来源：RoboParty [21]。

各模组将内转子电机与 NGW 行星减速器集成。较低的转子惯量有利于快速响应，靠近壳体的定子绕组有利于向外导热。相比之下，所比较的外转子方案惯量较大、响应较慢。

表 1.6. RP1.3 所用 ROMOMO 模块化执行器系列的标称规格

Parameter	5552	6562	8463	10062
Gear ratio	36:1	19.5:1	20:1	22:1
Rated torque / N·m	9	10	20	44
Peak torque / N·m	30	35	80	160
Rated speed / rpm	130	60	60	80
Max no-load speed / rpm	160	200	155	156
Outer dia. × height / mm	55 × 52	65 × 62	84 × 63	100 × 62
Hollow bore dia. / mm	4.5	4.5	4.5	7.5
Mass / kg	0.38	0.53	0.78	1.196

1.4.2 参数定义与选型

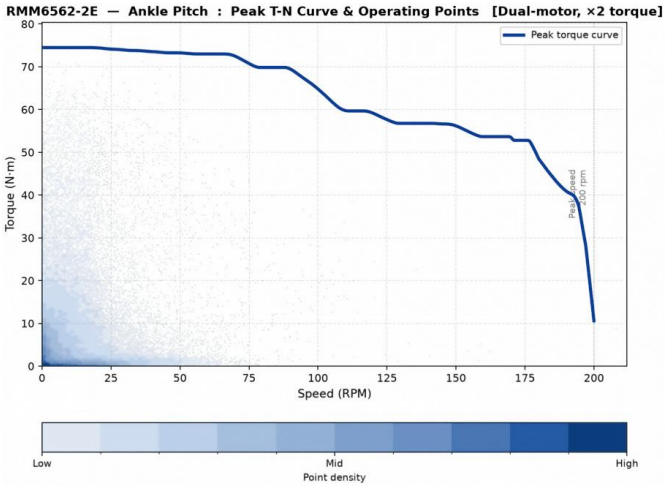


图 1.6. RMM6562-2E 在五种典型运动工况下的工作点。来源：RoboParty [21]。

执行器选型考虑力矩、转速和转子惯量。

近端关节主要按支撑力矩选型，远端关节还需优先考虑尺寸与摆动惯量。选型包络由两类方法共同确定。

仿真以近似物理模型为起点，将几何和质量参数导入仿真环境。在典型动作与负载下采样关节力矩和转速，再与相应模组的力矩—转速曲线比较（图 1.6 – 1.8）。所得工作点分布用于指导所需运动包络内的模组选型。

1.3 – 1.4 m 级平台的行业参考范围，包括原始设计对比中的 G1 和 PM01，为初步选型提供了约 120 – 140 N m 的髋 / 膝峰值力矩以及通常低于 200 rpm 的输出转速范围。这些范围属于前期设计参考，并非 RP1 的实测值。最终模组选型还需结合仿真关节工作点确定。

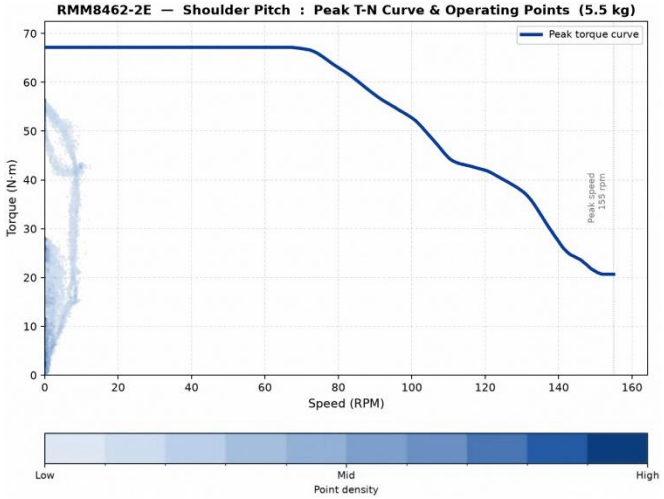


图 1.7. RMM8462-2E 在末端负载 5.5 kg 的侧平举与抬肘组合动作下的工作点。来源：RoboParty [21]。

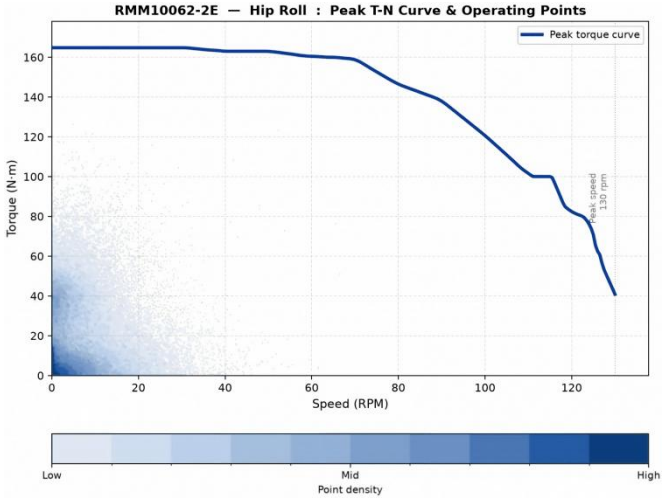
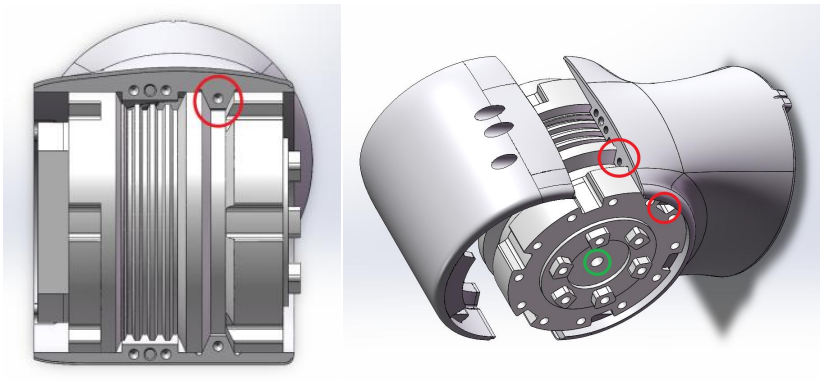


图 1.8. RMM10062-2E 在五种典型运动工况下的工作点。来源：RoboParty [21]。

1.4.3 结构集成



抱箍安装与定位槽限制轴向和径向运动，在紧凑空间内实现定心，并允许在不拆卸相邻法兰的情况下移除模组。

电机中空通道用于内部走线，减少线缆摆动、缠绕、磨损和关节干涉。

制造人员提出了五分钟更换目标；现有资料未提供实测操作流程或验收记录。

图 1.9. 抱箍接口与分体抱箍拆卸。来源：RoboParty [21]。

1.5 轴系布局与任务空间

可达性取决于手部朝向、肘部位置和整条肢体的避让空间。迈步与下蹲同样需要可行的腿部路径和接近地面的轨迹。

关节轴系布局定义机构，任务空间规定所需的手部或足端位姿，工作空间则描述可达位姿 [1]。行程和碰撞检查须覆盖完整轨迹。

RP1 结合 5 轴或 7 轴手臂、独立的腰髋关节以及并联踝。外壳避让空间适应运动需求，抱箍和工具接口提供局部维护入口。

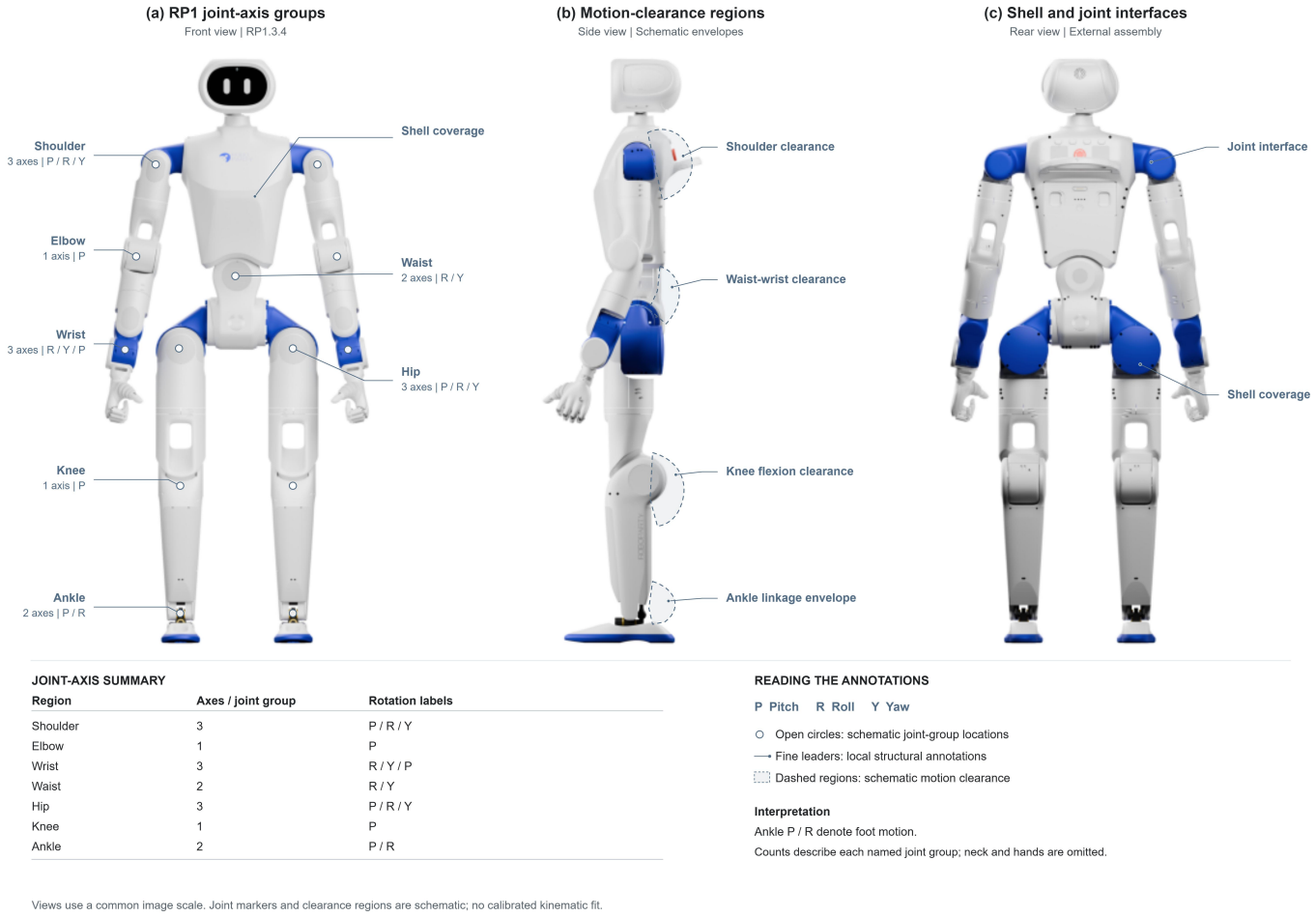


图 1.10. RP1.3.4 关节轴分组、外壳布局与运动避让区域。P：俯仰；R：横滚；Y：偏航。轴线位置与避让区域均为示意。来源：RoboParty [21]。

表 1.7. RP1 关节限位与人体参考活动范围。机器人零位和符号约定不同于人体解剖约定；人体数据来源以下列本表专用编号 [ROM-1] 和 [ROM-2] 标识。

RP1 与人体关节活动范围						
部位	**RP1 关节**	**RP1 正向限位（°）**	**RP1 负向限位（°）**	**RP1 总行程（°）**	**人体正常活动范围（°）[ROM-1, ROM-2]**	**人体总范围（°）**
头部 / 颈部	Pitch（俯仰）	+45	−30	75	后伸 0–45；前屈 0–45	90
	Yaw（偏航）	+30	−30	60	旋转：向左 0–60；向右 0–60	120
腰部	Yaw（偏航）	待定义	待定义	待定义	旋转：向左 0–35；向右 0–35	70
	Roll（横滚）	待定义	待定义	待定义	侧屈：向左 0–45；向右 0–45	90
上肢	J1 肩俯仰	+135	−195	330	前屈 0–180；后伸 0–60	240
	J2 肩横滚	+171	−27	198	外展 0–180； 内收回到中立位 0*	180*
	J3 肩偏航	+165	−165	330	内旋 0–70； 外旋 0–90	160
	J4 肘关节	+71	−91	162	屈曲 0–150；伸直到 0	150
	J5 腕横滚	+147	−147	294	旋前 0–80；旋后 0–80	160

RP1 与人体关节活动范围						
部位	RP1 关节	RP1 正向限位（°）	RP1 负向限位（°）	RP1 总行程（°）	人体正常活动范围（°）[ROM-1, ROM-2]	人体总范围（°）
	J6 腕偏航	+85	−85	170	桡偏 0–20； 尺偏 0–30	50
	J7 腕俯仰	+70	−70	140	屈曲 0–80；背伸 0–70	150
下肢	hip_pitch	+164	−164	328	前屈 0–120；后伸 0–30	150
	hip_roll	+149	−42.5	191.5	外展 0–45；内收 0–30	75
	hip_yaw	+158.5	−158.5	317	内旋 0–45； 外旋 0–45	90
	knee	+4	−162.5	166.5	屈曲 0–150；伸直到 0	150
	ankle_pitch	+35	−45	80	背屈 0–20；跖屈 0–50	70
	ankle_roll	+15	−15	30	内翻 0–35；外翻 0–15	50
数据依据：RP1 数值为所提供的关节限位；TBD 表示待定义。人体数值为 AAOS 临床参考值 [ROM-1, ROM-2]，并非人群区间或个体最大值；本表未区分年龄、性别及主动 / 被动测量方式。						
对比说明：机器人符号与零位不同于人体解剖中立位。总范围取同一运动轴的两端点之差。J1 – J7 沿用现有 RP1 模型顺序；J5 在功能上对应前臂旋转。						
解剖范围：肩部上举包含肩带运动；腰部数值涵盖胸腰段；内翻 / 外翻涵盖踝足复合体。肘、膝伸直记为 0°，不计个体过伸。						
* J2 总范围仅覆盖从外展回到中立位的运动。所引 AAOS 表格在此约定下未给出额外的跨体内收范围；0 表示中立位，不表示没有内收能力。						
[ROM-1] Skinner SB, McVey C. Pocket Notes for the Physical Therapist Assistant. 2nd ed. Jones & Bartlett Learning; 2013:11,13. 表 1.4 和表 1.6（AAOS 数值）。出版方来源						
[ROM-2] Norkin & White's Measurement of Joint Motion: A Guide to Goniometry. 6th ed. 附录 A，表 A.1（AAOS 列）。出版方来源						

1.5.1 上肢

根据手部位置与朝向选择配置

即使手部位置相同，侧向抓取与掌心向下接近目标，也可能需要不同的腕肘构型。因此，手臂选型取决于目标位姿。

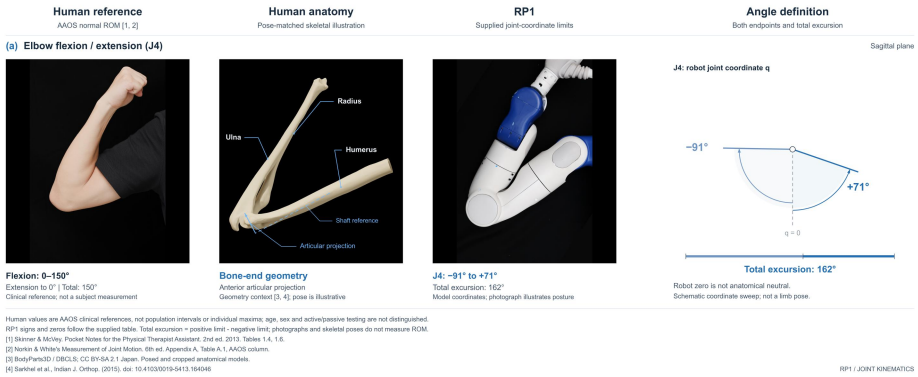
7 轴手臂具有三个肩轴、一个肘轴和三个腕轴。5 轴手臂的腕部调节较少，可实现的末端朝向取决于目标位置及肩、肘、躯干的协同运动。

肩轴确定上臂方向，屈肘调整可达距离与前臂路径，腕轴调整末端朝向。这些作用在任务中相互耦合：目标手部位姿可能需要整条手臂协调运动，而 7 轴配置的冗余轴可提供其他肘腕构型。

检查完整手臂路径

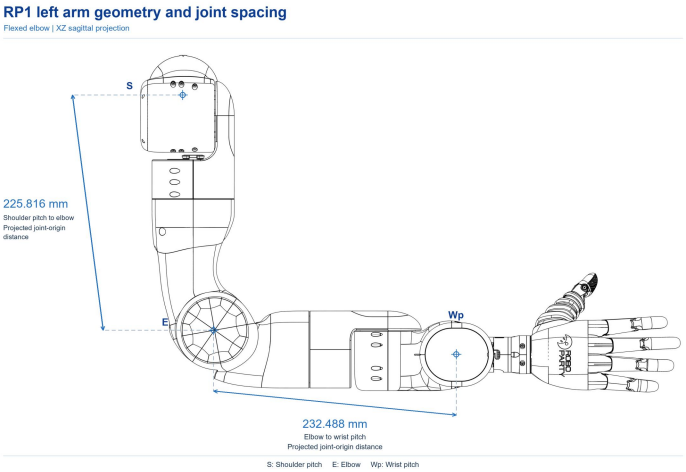
检查内容包括伸手过程中的掌心朝向与肘部位置、屈曲时前臂与躯干之间的间隙，以及静止时手部与髋部之间的间隙。双手协作检查还需计入所持物体。

伸手、抓取和撤回全过程均须满足避让要求，而不只是最终位姿。



RP1 肘关节屈曲范围为 162°，以伸直位置为零。本图及后续对比中的人体范围均来自文献，不是对照片中人物的测量值；图内引文编号仅在各图内适用。

图 1.11. 人体与 RP1 的肘关节屈曲。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。



所提供的左臂图中，肩俯仰至肘的关节原点投影距离为 225.816 mm，肘至腕俯仰为 232.488 mm。图 1.12 展示屈肘姿态下的 XZ 矢状面投影；这些数值仅描述图示几何，不能替代具体配置的三维 URDF 变换。

图 1.12. 左臂几何与关节原点投影间距。S：肩俯仰；E：肘；Wp：腕俯仰。尺寸依据所提供的 CAD 图及图示姿态。来源：RoboParty [21]。

1.5.2 腰髋

使人体动作适配机器人关节

RP1 具有腰部横滚和偏航，但没有独立的腰部俯仰。重定向时须结合轴线位置与肢段比例，将人体前弯动作分配到髋、膝及全身姿态中 [2]。

图 1.13 对比了单轴、双轴和三轴腰部配置。RP1 的横滚与偏航支持躯干横滚和朝向调整，前弯则需要下肢协同。G1 EDU 示例表示可选的三轴配置。仅凭轴数不能确定活动范围、力矩能力或任务表现。

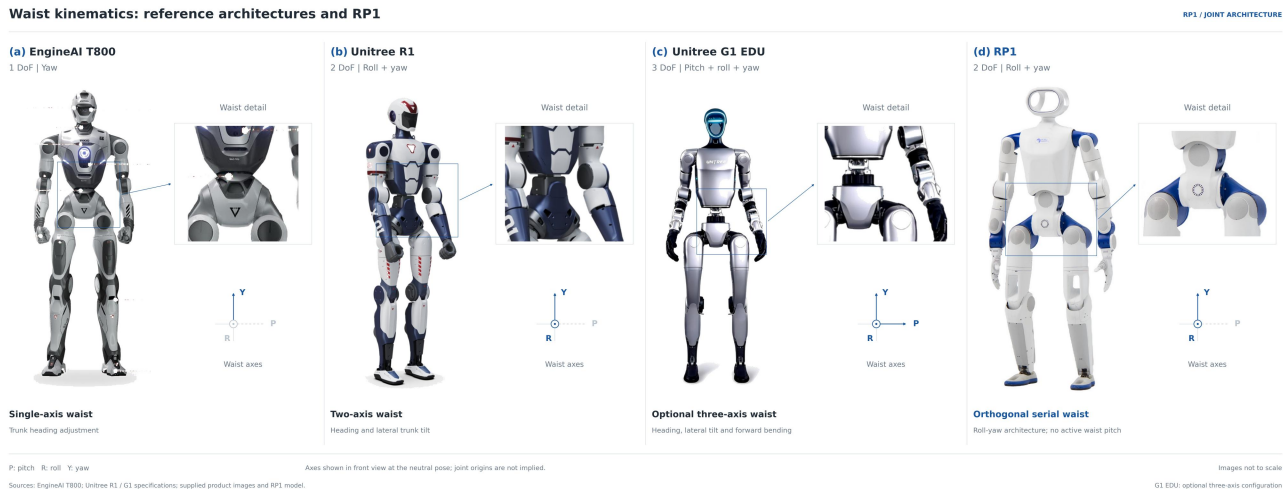


图 1.13. 腰部架构：EngineAI T800、Unitree R1、Unitree G1 EDU 和 RP1。P：俯仰；R：横滚；Y：偏航。型号变体以图中标注为准，各图不按统一比例绘制。来源：所提供的对比图；厂商来源见附录 E；RP1 [7, 21]。

髋部串联驱动

人体髋关节通过球窝结构实现屈伸、外展和轴向旋转。RP1 采用三个原点分离的串联关节，因此形成不同的运动路径。

FAR 顺序与 RP1 布局

FAR 表示从骨盆到大腿依次为屈伸—外展—旋转，即俯仰—横滚—偏航。此处 R 表示轴向旋转（偏航），而非横滚。该顺序描述机构连接关系，不表示运行时各轴独立运动。

FAR 与 ARF 带动的下游结构不同。对比时固定骨盆及其他关节角度，只运动其中一个关节。

表 1.8. 髋部串联顺序。

对比项	FAR：屈伸—外展—旋转	ARF：外展—旋转—屈伸
骨盆至大腿顺序	俯仰 → 横滚 → 偏航	横滚 → 偏航 → 俯仰
仅俯仰运动	带动下游横滚、偏航结构及腿部。	作为最后一个髋关节，带动下游腿部；横滚与偏航位于上游。
仅横滚运动	带动下游偏航结构及腿部。	带动下游偏航、俯仰结构及腿部。

选型取决于模组质量、尺寸、轴间距、避让空间和目标动作。不能仅凭轴序推断步长、能耗与稳定性。

已核对的 RP1 URDF 采用俯仰—横滚—偏航（FAR）顺序。关节原点分离，零位时横滚轴位于俯仰轴下方。是否共点、轴线倾角与间距均须依据实际模型确认。

下移横滚模组可释放髋部上方及自然下垂手臂旁的空间。大腿路径随之改变，因此须检查前向迈步、侧向迈步、内收和深蹲时的避让关系。

图 1.14 对比了人体与机器人髋部架构。下移 RP1 横滚轴会改变大腿避让空间和扫掠体积。图示 61 mm 偏置仅适用于所提供的 CAD 配置，其他版本须另行核实。这些几何差异是碰撞与运动检查的依据，不用于性能排名。

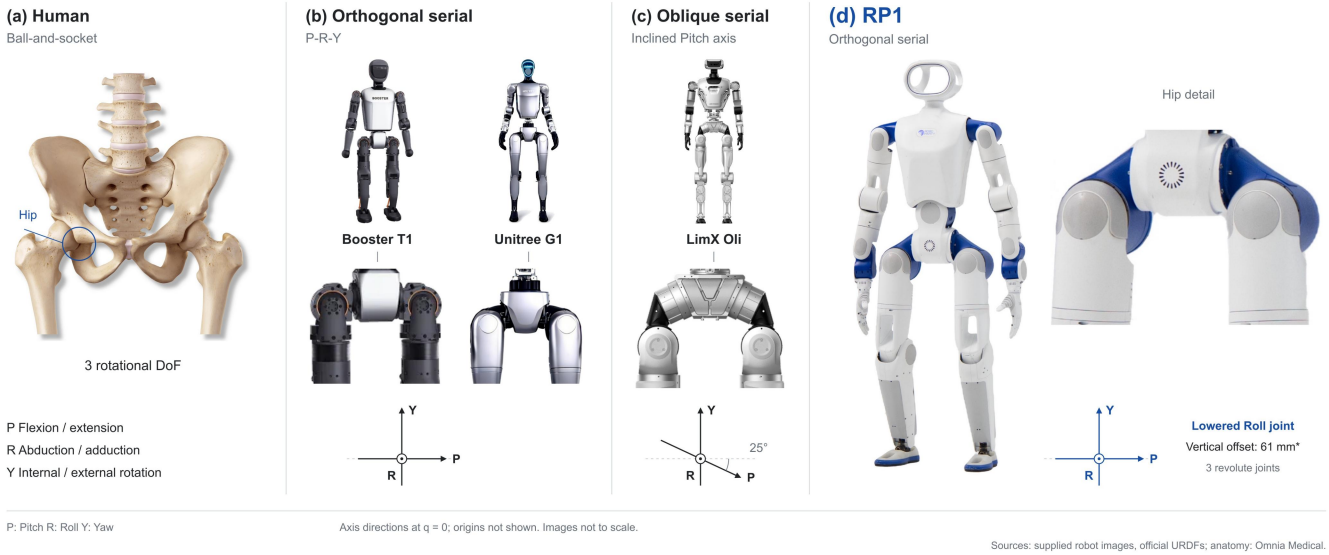


图 1.14. 髋部参考架构与 RP1 关节布局。轴线示意表示中立姿态下的方向，不表示各轴原点重合。来源：所提供的对比图及图内标注的机器人来源；解剖图来源为 Omnia Medical；RP1 [7, 21]。

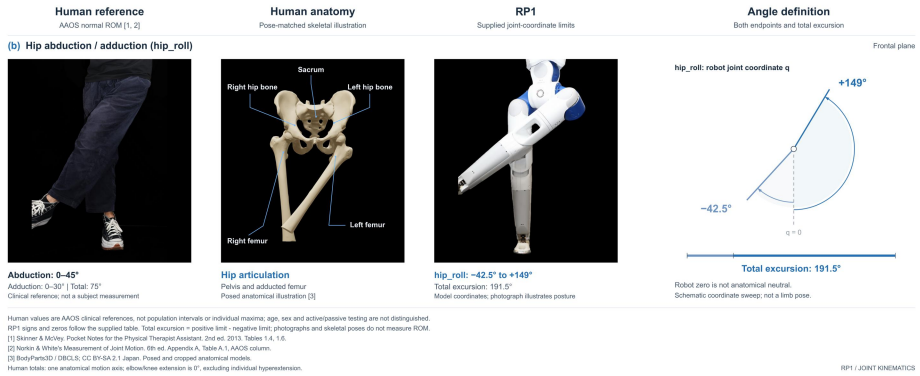


图 1.15. 人体与 RP1 的髋关节内收。人体参考：[43]；RP1 限位与照片：[21]。

RP1 髋关节内收范围为相对骨盆固定中立位的 42.5° 。人体参考：[43]。

1.5.3 下肢

髋膝踝协同运动

每条腿具有三个髋轴、一个膝轴和两个踝轴。髋、膝、踝协同控制大腿朝向、腿部伸展、足端高度与落脚位置。

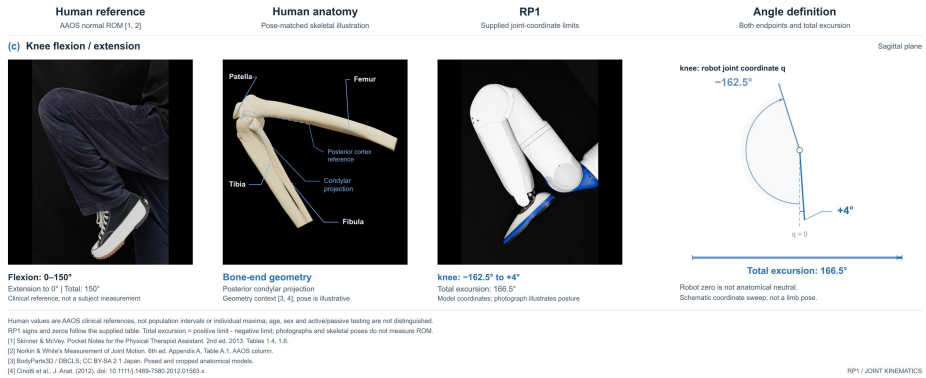
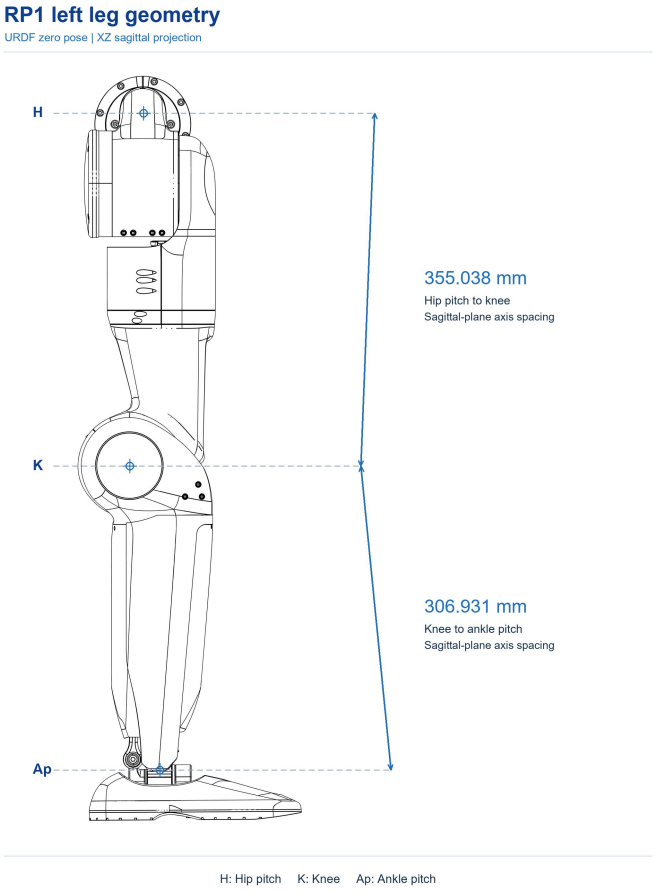


图 1.16. 人体与 RP1 的膝关节屈曲。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。

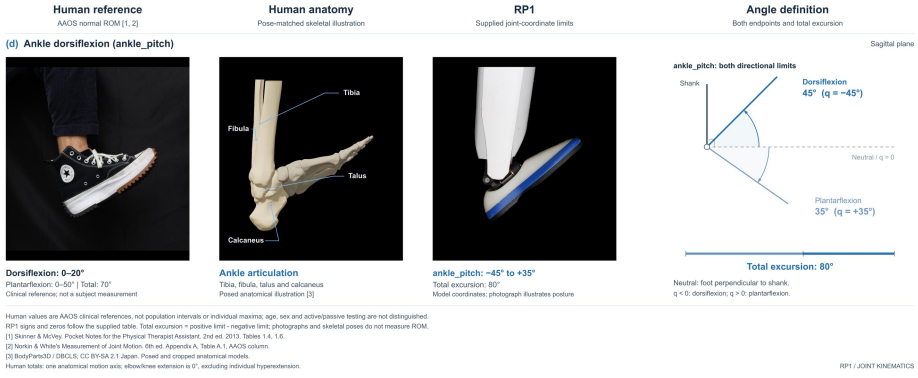
RP1 膝关节屈曲范围为 166.5° ，以完全伸直位置为零。人体参考：[42]。



在所提供的 URDF 零位下，左腿矢状面投影中髋俯仰至膝的距离为 355.038 mm，膝至功能性踝俯仰轴的距离为 306.931 mm（图 1.17）。踝部参考轴表示并联机构的等效足端俯仰运动。这些尺寸仅适用于图示配置和投影。

图 1.17. URDF 零位下的左腿几何与矢状面轴间距。H：髋俯仰；K：膝；Ap：功能性踝俯仰参考轴。来源：RoboParty [21]。

RP1.3.4 的并联踝通过两个电机连接足部。两个电机共同参与俯仰和横滚，均不单独控制某一个等效轴。检查内容包括俯仰与横滚组合运动、连杆扫掠体积、剩余活动余量，以及小腿与足部之间的间隙。



RP1 踝背屈范围为 +45°，以足部垂直于小腿的位置为零。人体参考：[42]。

图 1.18. 人体与 RP1 的踝背屈。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。



RP1 踝跖屈范围为相对同一中立位的 −35° 。人体参考：[42]。

图 1.19. 人体与 RP1 的踝跖屈。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。

运动避让与维护入口

避让检查涵盖迈步时的足尖、下蹲时的膝后部和踝部连杆，以及侧向运动时的腿部和髋壳。局部紧固件须保持可接近。

检查抱箍抽出路径是否受到盖板或相邻零件阻挡。

1.5.4 足底

支撑区域与摆动避让

较大的足板可扩大几何支撑区域，但也会增加碰撞和擦地风险。RP1 采用 AL7075 足板，尺寸结合踝部位置和落脚路径确定。

通过俯视与侧视检查整个摆动过程中的足缘间距以及足尖、足跟高度。踝部位置会改变这些轨迹。

实际接触面积取决于表面形状、足部姿态和地面条件，不一定等于足板投影面积。

图 1.20 在侧视图中分离出足部与踝俯仰组件，在正视图中单独分析足部。地面反力分量作用于 C 点，等效截面反力与力矩作用于踝部参考位置。图示踝俯仰参考高度为 63.92 mm，踝横滚参考高度为 45.00 mm。水平力臂取决于接触位置和工况，因此该图用于定义载荷几何关系，不给出通用的踝部载荷值。

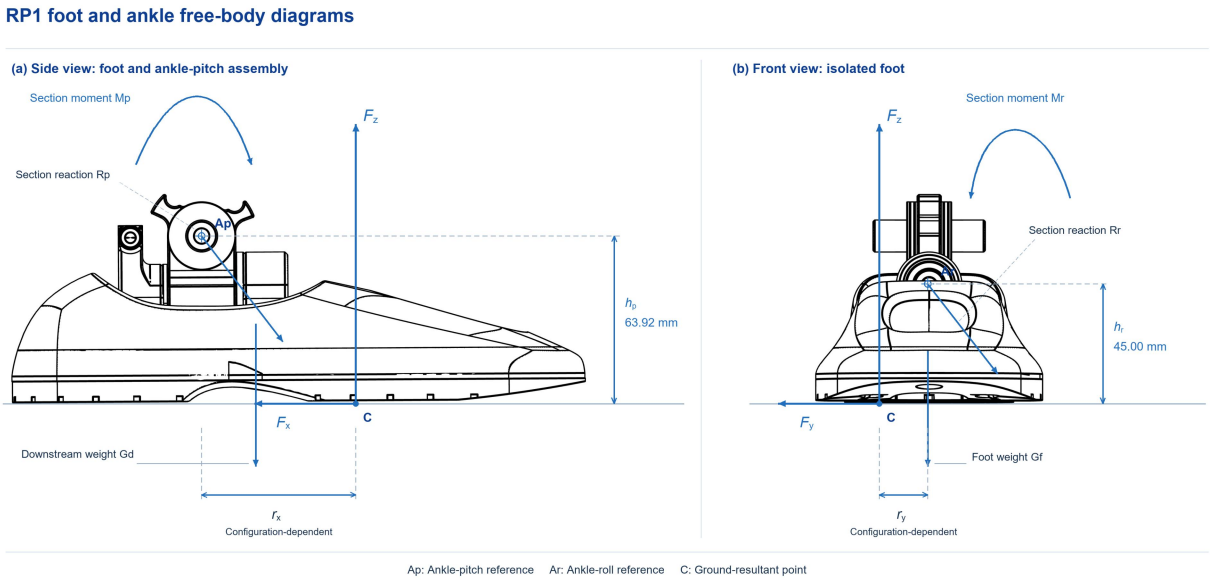


图 1.20. 足部与踝部受力图。（a）足部与踝俯仰组件侧视图。（b）独立足部正视图。重力项遵循各自的隔离体边界，力臂取决于工况。来源：RoboParty [21]。

1.6 制造、装配与维护

关节密集、布线集中且零件类型多，使装配和维护对尺寸误差与接口不一致较为敏感。可接近性不足会增加调试时间和故障定位工作量。

RP1 将面向制造的设计（DFM）、面向装配的设计（DFA）和面向维护的设计（DFS）结合，通过材料分级、执行器系列、标准化接口和预先规划的拆卸路径实现。

DFM 关注成本与加工，DFA 关注装配与连接，DFS 关注接近、拆卸和诊断。这些设计共同服务于通用性、效率与可靠性目标。

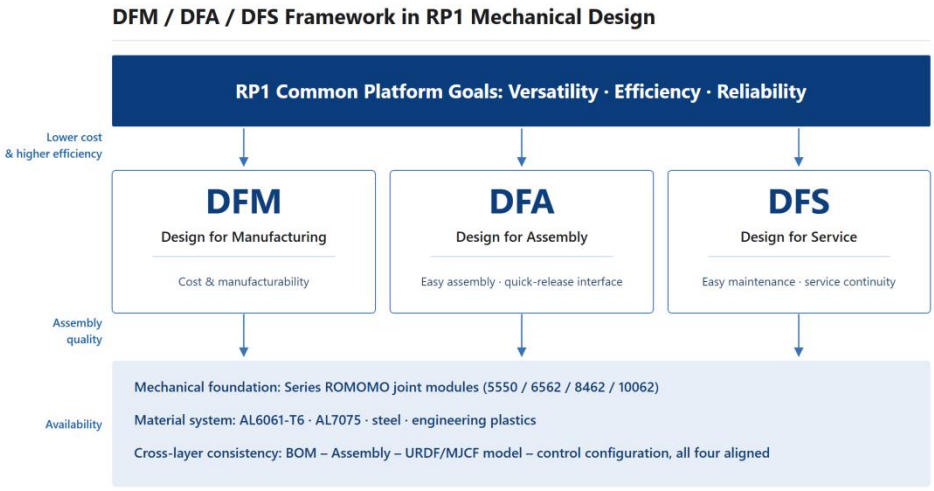


图 1.21. DFM、DFA 与 DFS 框架。来源：RoboParty [21]。

1.6.1 面向制造的设计

DFM 在装配前明确材料、加工基准、关键公差和标准件。降低成本与加工复杂度须满足结构和寿命要求。

表 1.9. 材料选择。

材料	建议用途	工程控制要点	RP1 应用
AL6061-T6	主体结构与常规支架	检查薄壁变形、热处理状态和关键孔公差，兼顾加工、成本与强度。	躯干与肢体框架
AL7075	受高载荷、强度或质量约束的零件	依据载荷、疲劳和环境选型，核查供货状态、表面处理、连接方式与加工成本。	足板
钢	支撑件、限位件、销轴和承受磨损载荷的接口	检查接触应力、磨损、腐蚀，以及与铝材接触时的电偶腐蚀相容性。	关节限位件与万向节零件
工程聚合物	盖板、线束支撑、绝缘与隔离件	依据温度、绝缘、阻燃、蠕变、磨损和紧固要求选型。	外壳与电气防护件

各类零件均设定默认材料。材料升级须有计算、仿真或测试依据，并考虑加工、表面处理、紧固及供应条件。

ROMOMO 的 5757、6562、8462 和 10062 四种规格覆盖 25 – 140 N m 的峰值力矩。全部采用 48 V 供电和 CAN-FD，按关节位置与负载选型。所提供电机 T-n 测试曲线中的 75、67 和 165 N m 工作点作如下解释：75 N m 为双电机 6562 踝部并联机构叠加后的等效峰值力矩；67 N m 和 165 N m 分别为 8462 与 10062 的单电机 / 等效工作点数值。



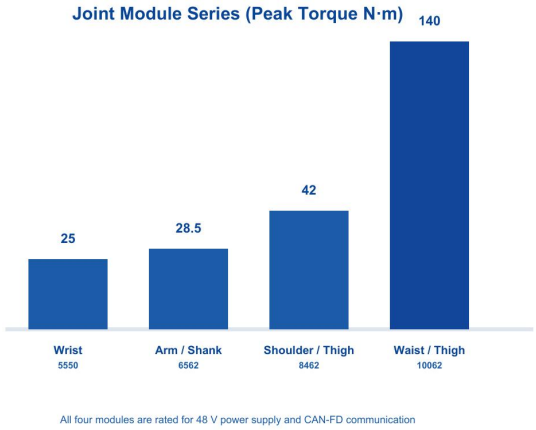


图 1.22. 材料分级与关节模组系列。来源：RoboParty [21]。

材料分级与模组系列可减少过度选型和重复设计。成本收益须结合当前加工、材料、零件数量与采购数据评估。

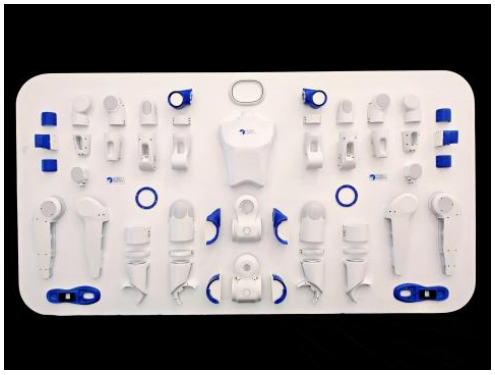


图 1.23. RP1 本体零件。来源：RoboParty [21]。



图 1.24. RP1 核心结构零件。来源：RoboParty [21]。



图 1.25. 核心零件细节。来源：RoboParty [21]。

1.6.2 面向装配的设计

机械装配

肩部和大腿横滚接口由承载主体与紧固连接的分体抱箍组成。明确支撑、抱箍和紧固件接口，可使安装与拆卸路径清晰可查。

线束集成

中空内部通道与分区肢体线束减少外露布线。预先确定路径、连接器和固定点，可降低干涉并明确维护边界。

线束规划有利于装配一致性、线缆保护和故障定位。

减少不必要的零件与连接、明确模组安装接口并统一线束接口，可降低对临时调整和操作经验的依赖。因此，装配规划将结构模块化与走线视为相互关联的设计工作。

DFA 评价指标包括零件和工序数量、装配时间、连接错误与返工情况；本文未报告 RP1 在这些指标上的量化结果。

1.6.3 面向维护的设计

维护边界按末端工具、头部和肢体接口划分，以限制拆卸范围。

腕部支持可更换工具（图 1.26）。更换工具时，还需更新质量属性与控制参数。



图 1.26. RP1 腕部接口与三种可更换末端工具。来源：RoboParty [21]。



图 1.27. RP1 头部感知模组拆卸。来源：RoboParty [21]。

可拆卸头部及感知模组支持不同配置（图 1.27 – 1.28）。定制头部须满足机械、电气、通信和控制兼容性。

释放紧固件并断开接口后，可通过肩部和腿部横滚抱箍拆卸肢体（图 1.29）。



图 1.28. 感知、数据采集与运动控制头部配置。来源：RoboParty [21]。

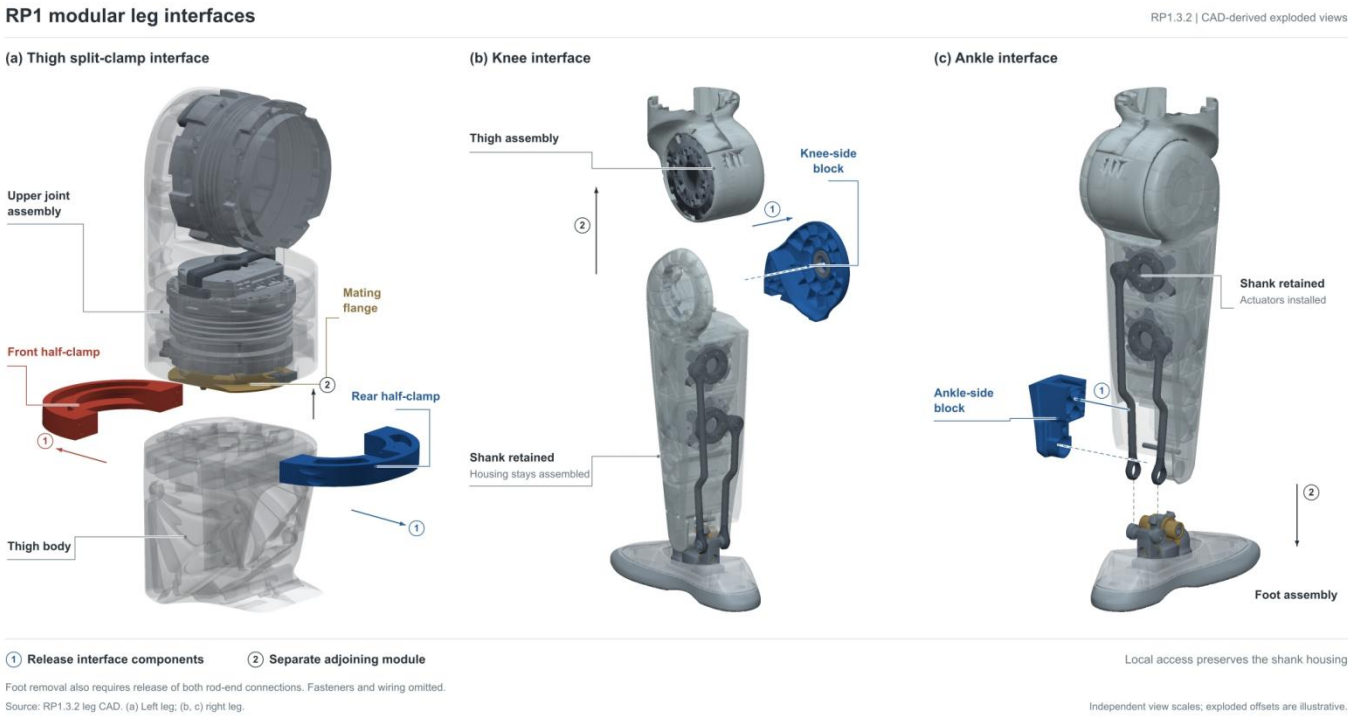
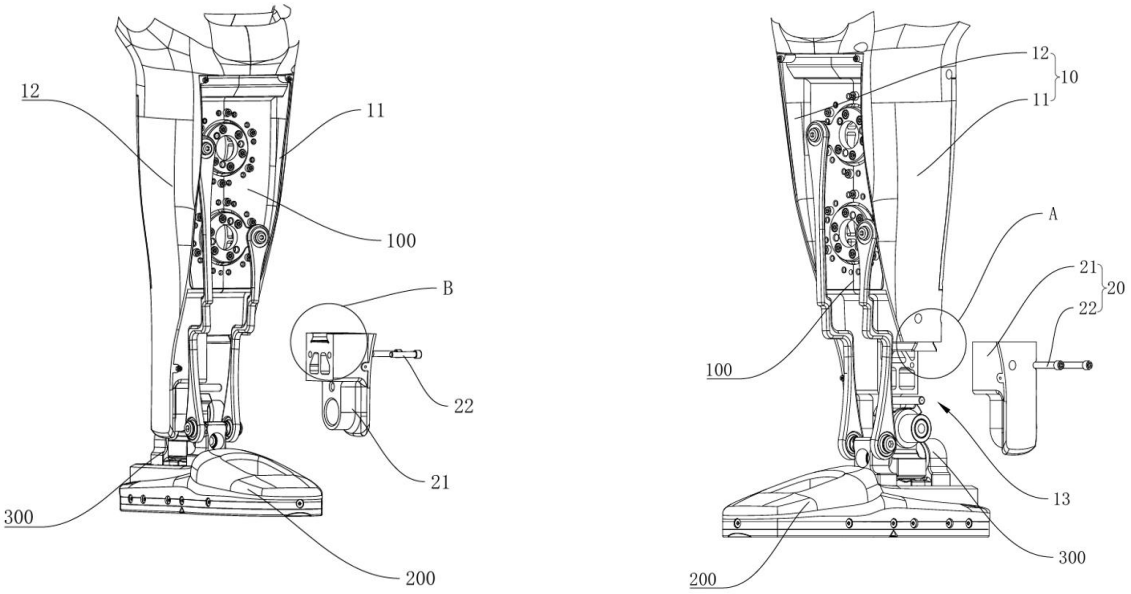


图 1.29. RP1 腿部模组的部分快拆接口。来源：RoboParty [21]。



机械技术交底书《一种人形机器人小腿与脚踝的可分离固定方法》中的专利附图。

1.7 从机械装配到 URDF

1.7.1 模型概述

RP1_description 包含用于运动学、动力学、仿真和控制的 URDF、MJCF 及网格模型 [7]。URDF 记录连杆、关节、坐标系、几何、质量与惯量。

连杆、关节轴、符号、限位和零位均遵循实际机构。通过统一基准，保持 CAD、URDF 与硬件定义一致。

1.7.2 运动学结构与关节配置

连杆用于归并刚性连接的零件，关节定义相对位置、运动方向和范围。

腰髋基础向躯干、头部、双臂和双腿分支。固定接口采用固定关节，运动接口采用实际轴线与限位。不同配置尽量复用名称和层级，仅修改受影响的模组。

可用的仿真模型既需物理一致，也需控制几何细节规模。CAD 描述零件、加工特征与装配，URDF 则面向软件组织刚体运动、关节约束和惯性属性。因此，导出前须明确建模取舍。

1.7.3 从 SolidWorks 到 URDF

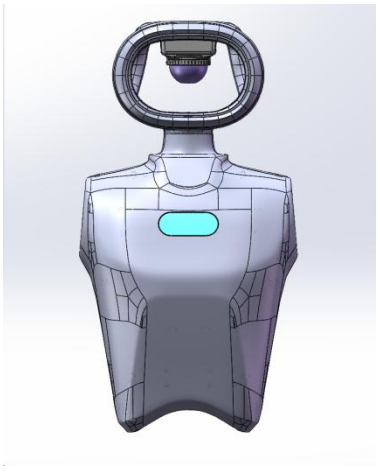


图 1.30. 头躯干连杆。来源：RoboParty [21]。

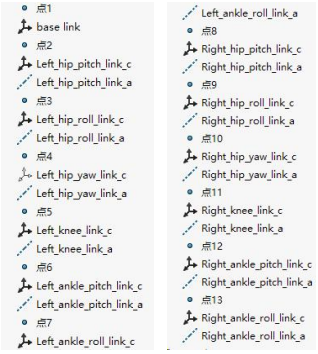


图 1.31. 连杆层级。来源：RoboParty [21]。

导出前，按刚体运动关系归并 SolidWorks 零件。外壳、电池与紧固件若保持相对固定，可归入同一连杆。图 1.30 给出了头躯干示例。

参考坐标系定义位姿，基准轴定义旋转。左右侧参考须遵循实际安装方向，确保镜像后关节符号仍然正确。

父子树定义各关节的类型、轴线和限位（图 1.31）。固定零件保留固定连接。

SolidWorks URDF Exporter [8, 19] 将连杆分组、坐标系、轴线和质量属性转换为 URDF，并导出可视网格与碰撞网格。

导出流程为：整理 SolidWorks 装配体；定义刚性连杆、关节坐标系与轴线；运行 SolidWorks URDF Exporter；生成 URDF 及配套网格；随后在可视化、仿真和控制工具中检查模型。未经整理的完整 CAD 装配体不会自动成为有效的机器人模型 [8, 19]。

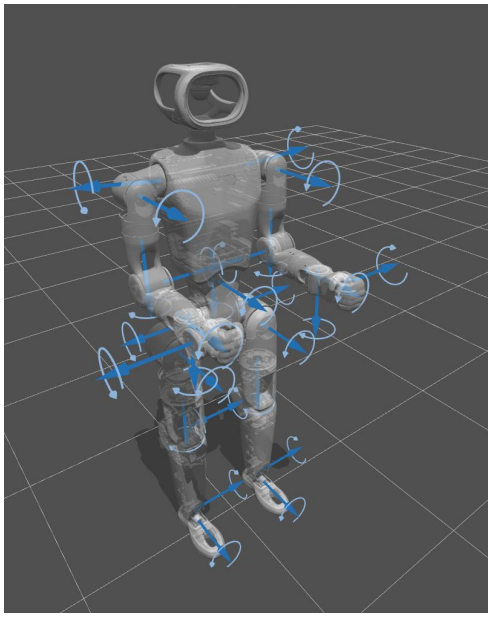


图 1.32. 主要关节轴线与旋转方向。红色箭头表示轴向，绿色箭头表示对应旋转方向。该图用于对照机械装配检查关节约定。来源：RoboParty [21]。

对于法兰固定、壳体旋转的关节，关节正方向须描述壳体相对法兰的运动。按原始流程，应据此选择局部关节 Z 轴，而不是直接沿用电机输出轴约定。左右关节须分别对照实际安装、零位和预期正向运动检查。图 1.32 展示了这些轴向与旋转方向。

1.7.4 模型保真与 CAD 准备

采用稳定的参考几何定义关节中心、轴线和接口，避免局部 CAD 修改使坐标系失效。归并刚性零件时，须保留所有相对运动接口。

RP1 的 URDF 质量值基于实物称重。模型应同时记录称重配置、所含零件、测量方法与不确定度，并统一计入线缆、连接器及其他安装部件。连杆质量、质心和惯量须描述同一配置；仅测得质量不能确定质心或惯性张量。

可视网格可保留细节。碰撞网格则应保留接触边界，省略会增加仿真开销的内部零件、紧固件、孔洞及细小特征。

1.7.5 碰撞网格简化

碰撞网格用于接触与自碰撞计算。详细 CAD 导出后，单个连杆可能含数万乃至数十万个三角面，增加模型加载时间、内存占用和碰撞计算开销。部分仿真后端还限制网格规模。原始流程采用两种互补的简化阶段。

CAD 导出前简化

导出前，在不影响外部接触的情况下，抑制电机与减速器内部结构、内部槽孔、螺纹、小倒角、紧固件以及完全包覆于外壳内的零件。不参与碰撞的内部部件可用包络体或简单几何体表示。图 1.33 的胸壳示例去除了细小表面特征，同时保留主要结构包络。

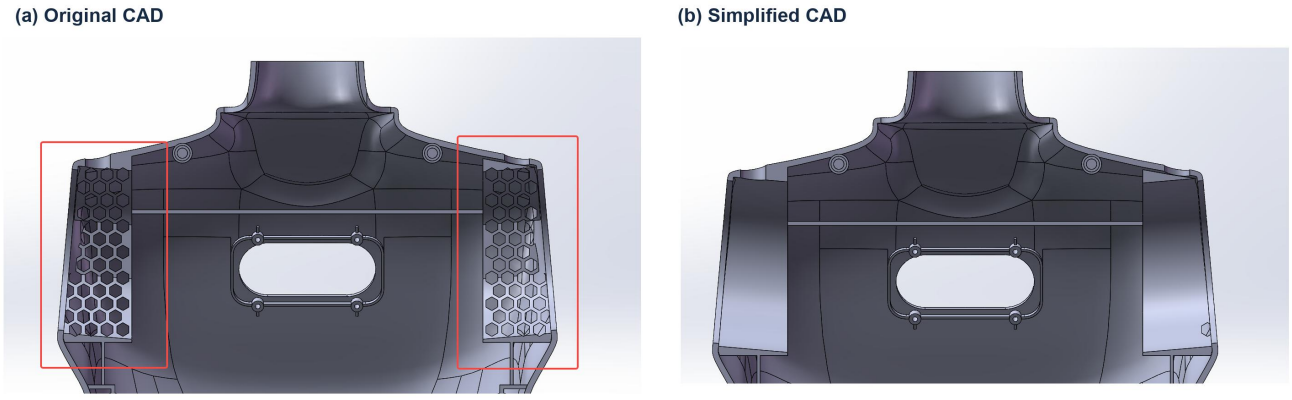


图 1.33. CAD 简化前后的胸壳几何。（a）原始模型，重点细节区域已标出。（b）用于导出的简化模型。来源：RoboParty [21]。

CAD 层面的简化可有选择地保留重要轮廓与接触区域，但需要额外的模型准备；机械设计变化后，还须同步维护简化装配体。

网格导出后减面

对于已有 URDF，可在不修改原始 CAD 的情况下简化 STL 或 OBJ 网格。简化目标可按三角面数量比例、目标面数或几何误差指定。边折叠方法和二次误差度量（QEM）在近似保留原始表面的同时减少顶点与面；几何规则的部件可采用凸包或简单几何体。

无法编辑 CAD 时，网格处理较为方便，但统一减面比例不能区分关键接触区域与次要细节。足缘、关节避让区域和相邻连杆边界需要局部保护。应依据几何复杂度及碰撞相关性，分别为各连杆设置目标面数或误差限。

过度减面可能导致表面塌陷、边缘变形、孔洞、开放或非流形几何，以及法向不一致。图 1.34 展示了激进减面后头躯干区域可见的表面损坏。将网格用于碰撞计算前，须检查这些缺陷及保留下来的接触包络。简化应去除不必要细节，同时保留主要尺寸和运动关系。

1.7.6 CAD 与 URDF 同步维护

CAD 与 URDF 须对应同一机械配置。连杆尺寸变化后，须重新检查关节原点、坐标系与碰撞边界；材料、壁厚或内部部件变化后，须更新连杆质量、质心和惯量。安装方向变化时，还须检查关节符号、零位与限位。

即使安装接口不变，更换头部、手部或计算模组也可能改变质量与包络。须同步更新可视网格、碰撞网格、惯性属性、受影响连杆与关节、设备配置及控制接口。模组增加或减少自由度时，还须相应修改运动学树与控制映射。

1.7.7 模块化配置

两种本体配置均保留两条 6 自由度腿和 2 自由度腰部。单臂为 5 或 7 自由度，手部自由度单独计数。

增减模组时，须同步更新连杆、关节、网格与动力学参数，保持模型和硬件一致。

不同配置中，硬件未变化的部分尽量复用连杆名称、关节名称与父子关系。由此生成的 URDF 和网格既保留与 CAD、实机的结构对应，也支持模型可视化、运动学计算和碰撞检查 [7]。

2 电气系统

RP1 在执行器、计算和传感器模组之间分配电源与通信。保护和备用通路定义了换电及异常情况下的系统行为。

2.1 系统架构

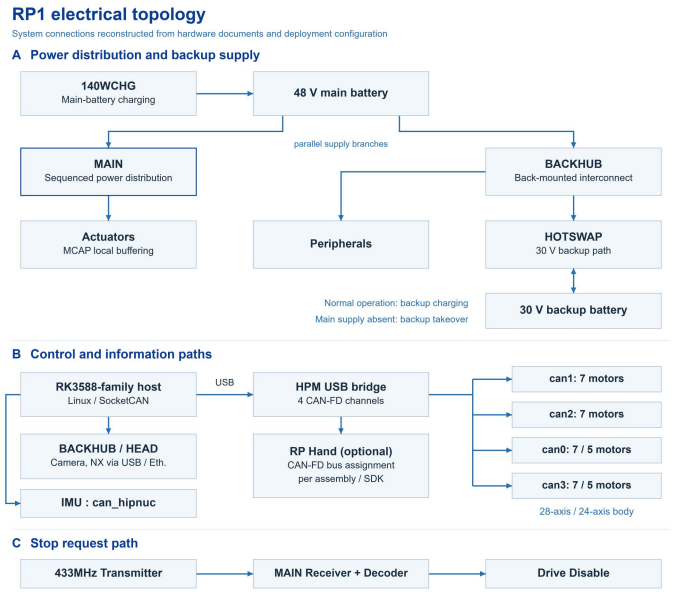


图 2.1. RP1 电气拓扑：供电、通信与停机通路。来源：RoboParty [21]。

供电通路连接电池、保护、配电、计算单元和执行器；信号通路连接主机、桥接器、传感器和驱动器。

将供电与信号通路分开，可限制公共接地和电源瞬态引起的耦合，并便于分别检查电流、热、阻抗和时序。但两类通路仍须在相同任务负载下共同评估。

电池向并联的 MAIN 与 BACKHUB 分支供电。MAIN 分配执行器和外设电源，BACKHUB 连接背部模组及 HOTSWAP 备用电源。执行器由四路 USB 转 CAN-FD 分段通信服务。USB/FPC 与以太网连接控制器和背板；相机、手部及扩展计算单元随配置变化。图 2.1 分别展示供电、通信和停机通路。

2.2 板卡分工与硬件实现

供电和通信由可独立制造、更换的板卡分担（表 2.1）。

分板设计便于大电流与信号布线、制造、验证、更换，以及 24/28 轴配置调整。

表 2.1. 主要板卡功能。

模组	系统作用
MAIN / BACKHUB	应用计算、配电与背部扩展
HOTSWAP	备用供电与切换
MCAP	执行器局部储能
FAN	风扇供电与控制
IMU / HEAD	姿态感知与头部外设
HANDPlusPro / FPC	手部连接及控制器与背板互连
433TX / 指示器	操作输入与状态指示
MINGMEI-BC / 140WCHG	电池连接与充电

图 2.2 – 2.3 展示 MAIN、BACKHUB、HOTSWAP、HANDPlusPro 和 MCAP 的布局。底视图采用镜像显示，颜色表示制造层。

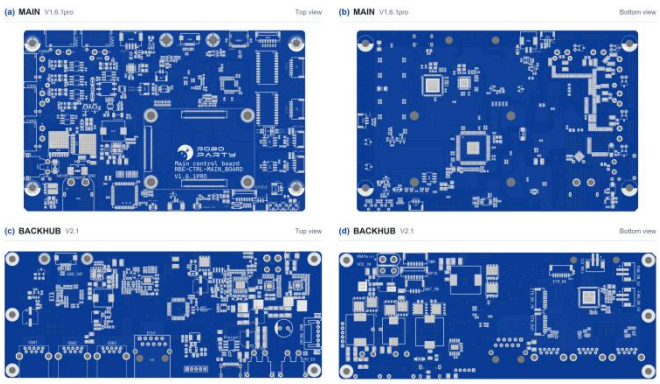


图 2.2. MAIN 与 BACKHUB 的顶层和底层 Gerber 渲染图，各图不按统一比例绘制。来源：RoboParty [21]。

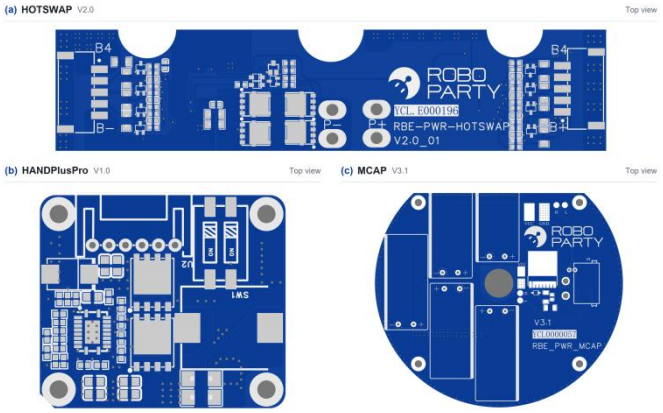


图 2.3. HOTSWAP、HANDPlusPro 和 MCAP 的顶层 Gerber 渲染图。来源：RoboParty [21]。

2.2.1 PCB 功率层与信号层

MAIN 和 BACKHUB 采用六层板，HOTSWAP 和 HANDPlusPro 采用四层板，MCAP 采用双层板。功率层负责载流和散热，信号层满足阻抗目标。对于标称 50 Ω 的单端走线，设计计算采用 FR4 相对介电常数 epsilon_r 约 4.2、介质厚度 0.2 mm、线宽 0.3 mm 和铜厚 0.035 mm，结果约为 54 Ω。与 50 Ω 目标约 8% 的差异体现了微带线近似的偏差；最终是否符合要求仍须经仿真与阻抗测试确认。

设计阶段估算载流能力与信号质量。按 IPC-2221 [18]、允许温升 10 ° C 计算，20 mil 外层走线载流量约为 1.46 A；55 mil 走线在外层约为 3.05 A，在内层约为 1.52 A。这些估算用于识别需要加宽走线或增加铜面积的电源网络。对 FR4 上标称 50 Ω 的单端走线，微带线近似计算结果约为 54 Ω。高速接口通过调整叠层、线宽和间距满足要求，再进行仿真与阻抗测试。目标阻抗为 CAN-FD 差分 120 Ω、USB 差分 90 Ω、以太网差分 100 Ω，以及关键单端信号 50 Ω。这些是用于控制反射和串扰的设计目标，不能替代测量。

表 2.2. 目标阻抗。

接口	目标阻抗	应用
CAN-FD 差分对	差分 120 Ω	执行器分段总线，含终端匹配
USB 2.0/3.0 差分对	差分 90 Ω	主机与桥接器连接及扩展
千兆以太网差分对	差分 100 Ω	ETH1/ETH2, 1000BASE-T
关键单端信号	50 Ω	时钟与调试信号

2.2.2 计算与感知

MAIN 上的 RK3588 系列主机配置 8 GB RAM 和 32 GB eMMC，提供基础运行环境。主机对齐 24/28 轴反馈、IMU 与相机数据，运行执行器中间层，发送分段指令，并支持网络调试与日志记录。

主机承担运动控制，扩展计算单元处理计算需求较高的视觉与点云任务。升级须满足安装、供电和风道约束。

本体 IMU 与相机 IMU 具有独立外参和时间源。高频姿态与角速度用于平衡控制，按配置选装的相机用于环境感知和操作任务。带宽、功耗与数据时效须连同执行器通信一并预算。

2.2.3 多工况储能

跑步、翻转与带载操作的功率需求不同。按时间采样整机电流，形成其功率分布，再根据峰值功率、持续时间和能量缺口确定局部储能与保护需求。每条腿配置 5,000 μF 的 MCAP 电容，两腿合计 10,000 μF。在 48 V 时，储能约为 11.5 J；若允许母线电压降至 40 V，可用能量约为 3.5 J，相当于补偿 500 W 瞬态功率缺口约 7 ms。本节 MCAP 保持时长、浪涌电流和软启动参数均为计算值；现有资料未提供实测波形或测试条件。

局部电容可缓冲执行器的短时功率峰值，减轻上游瞬态扰动。实际母线电压余量须在所述负载与电压条件下测量。

浪涌电流是另一项约束。对于初始未充电的电容和 50 mΩ 回路电阻，48 V 下的简化计算得到 960 A。因此采用软启动电路，通过 MOSFET 栅极 RC 网络控制电压上升。约 198 kΩ 的等效电阻与 100 nF 电容给出接近 20 ms 的时间常数，使电压在数十毫秒内逐步上升，并限制浪涌电流。

2.3 总线分段与通信层次

四路 CAN-FD 分段总线连接执行器。CAN-FD 定义链路传输 [16]，厂商协议定义指令与反馈，SocketCAN 提供 Linux 访问接口。中间层将这些层次映射为统一的关节语义。

28 轴配置在 can1、can2、can0 和 can3 上各连接七个电机；24 轴配置采用 7/7/5/5 的电机分配。

以 1 kHz、每个电机 8 字节指令与 8 字节反馈为例，七个电机的数据量约为 0.9 Mbit/s，28 个约为 3.6 Mbit/s。这是有效载荷速率，不是完整链路占用率。仲裁阶段为 1 Mbit/s，数据阶段为 5 Mbit/s，还需计入成帧开销和各阶段时序。分段可减少单段流量并缩小故障影响范围，但全身运动仍需协调故障处理。实际余量取决于调度与抓包记录。

表 2.3 列出接口标称速率、数据用途与约束。标称带宽不等于实测利用率。

表 2.3. 接口与标称速率。

接口	协议	标称速率	数据 / 用途
CAN-FD, can0–can3	ISO 11898-1 CAN-FD	当前配置：仲裁 1 Mbit/s，数据 5 Mbit/s（CAN-FD 最高 8 Mbit/s）	24/28 轴执行器指令与反馈
USB 主机与桥接器 / 外设	USB 2.0 / 3.0	480 Mbit/s / 5 Gbit/s	桥接上行、相机与调试
ETH1/ETH2	1000BASE-T	1 Gbit/s	远程调试、计算扩展与数据传输
Type-C 充电 / 调试	USB 2.0 / PD	数据速率按协议；充电器额定功率 140 W	充电与 SoC 调试
控制器与背板 FPC/USB	并行信号 / USB	取决于接口	板间互连与背部扩展
433 MHz 停机通路	433 MHz RF	kbit/s 量级	停机请求与远程确认
Wi-Fi	802.11ax, AP6275S	标称 1,200 Mbit/s，2T2R	无线调试与数据传输
Bluetooth	BT 5.3	约 2 Mbit/s，LE	外设连接

图 2.4 标出外部电源、Type-C 充电接口、两个以太网接口与三个 USB 接口。

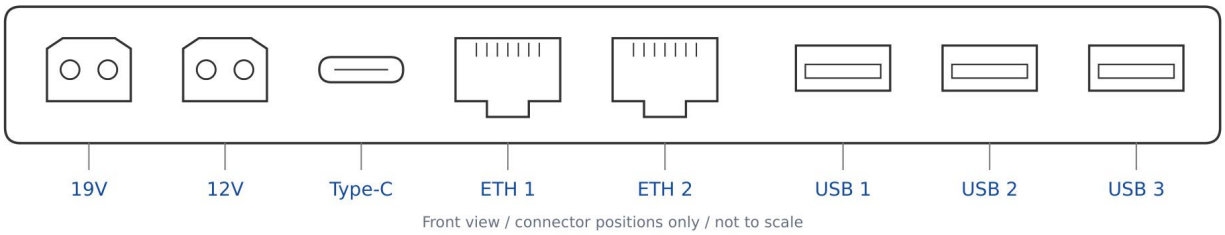


图 2.4. RP1 外部接口正视线稿。来源：RoboParty [21]。

2.4 热插拔、保护与异常响应

2.4.1 热插拔逻辑

主电池为 13S2P 三元锂电池组，标称电压 46.8 V，充电上限 54.6 V，放电截止电压 39 V，典型容量 10 Ah（最低 9.8 Ah），额定能量约 500 Wh。在 25 ° C 下，持续放电电流为 30 A，峰值放电为 80 A 且不超过 1 s；过流阈值分别为 50 A/3 s、80 A/1 s 和 140 A/250 ms。30 V 备用电池为 8S1P 软包电池组，预期长期电压为 30.4 V，容量约 450 mAh（约 15 Wh）。HOTSWAP 与 BACKHUB 在换电期间维持关键电路运行，并提供备用供电通路。

重新接入主电池时，目标是不重新执行软启动，也不使负载感知到供电中断。该行为须在适用负载下验证。

机器人站立时，可释放背部电池、取出、插入并重新锁定（图 2.5）；背部提手可提供支撑。

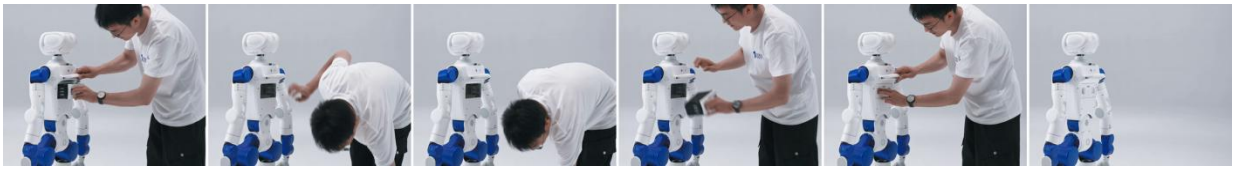


图 2.5. RP1 主电池拆卸与更换。来源：RoboParty [21]。

正常运行时，主电池向 MAIN 和 BACKHUB 供电，HOTSWAP 监测母线电压。主电池取出后，当母线电压低于阈值并持续 t_debounce，30 V 备用电池通过 BACKHUB 接入，临时维持整机供电。新电池插入并确认后，系统切回主电池，并为备用电池充电。理想二极管结构防止反向馈电；实测观察显示，插入大电池时几乎没有反向电流。

120 s 是设计目标与预算值，现有测试记录报告超过 120 s。按关键站立负载估计为 100 W 计算，维持 120 s 需要 12,000 J 的可用备用能量，未计转换损耗时约相当于 30 V 下的 0.111 Ah。设计余量、实际负载与可用备用容量通过整机测量确定。

2.4.2 停机输入与状态反馈

停机功能有三条通路：由 MCU 处理的有线和 433 MHz 通路，以及远程控制界面的软件停机确认。三条通路最终均触发 Drive Disable，切断电机驱动使能；触发、传输与恢复行为分别评价。

软件、433 MHz 和有线通路分别覆盖正常操作、远程操作及主机 / 通信故障场景。冗余有效性须经故障测试确认。应分别记录请求接收、驱动使能变化与机械停止，以识别延迟或丢失。

图 2.6 展示本体按钮、遥控器与软件界面。示例面板显示停机 / 复位状态，以及设备反馈的电机温度。



图 2.6. RP1 停机输入与软件界面示例。来源：RoboParty [21]。

2.4.3 停止距离与制动预算

停止距离由响应延迟期间的移动距离与制动距离组成。以初速度 1.0 m/s、响应时间 0.1 s、减速度 2.0 m/s² 为例，停止距离为 0.35 m；响应时间为 0.3 s 时为 0.55 m。响应预算分别计入信号传输、433 MHz 模组处理和使能撤除、驱动 / 制动响应及机械间隙。无线通路包含射频传输与模组处理，作为较长通路估算；有线响应预期更短。

实际停止过程取决于摩擦、支撑状态和可用力矩。上述示例计算不是实测停机性能，也不能作为已验证隔离距离的依据。

3 嵌入式软件

嵌入式软件通过协议分层、设备抽象和运行记录，将分布式设备映射为统一的运动接口。

3.1 架构与通信

3.1.1 执行架构

策略通过四层连接硬件：应用生成关节目标，驱动编码协议，Linux 通过 SocketCAN 访问总线，USB 桥接器转发 CAN-FD 数据。反馈经映射后返回，作为策略观测。

打包配置采用 250 Hz 控制频率和 50 Hz 策略更新频率。实时调度与 CPU 隔离用于降低干扰。这些配置频率不同于下文示例性的 500 Hz 通信预算，也不同于第 2.3 节中的 1 kHz 有效载荷计算；带宽和延迟需单独评估。

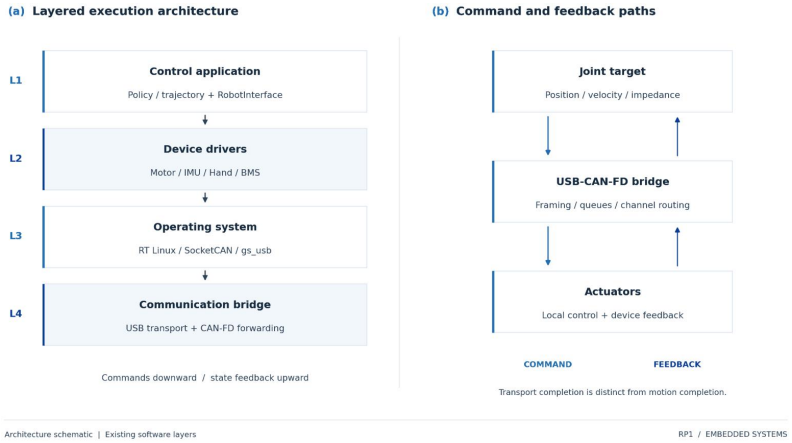


图 3.1. 嵌入式执行架构。（a）控制、驱动、操作系统与桥接层。（b）关节指令与执行器反馈通路。来源：RoboParty [21]。

3.1.2 通信预算

通信预算分别计算控制周期、CAN 总线和 USB 传输。以单总线七个电机、500 Hz 控制为例，周期为 2 ms。每周期的批量指令占用一个 64 字节帧，每个电机返回一个 12 字节反馈帧。由此每秒产生 500 个指令帧和 3,500 个反馈帧，应用层有效载荷速率为

$$B_{CAN} = (64 + 7 \times 12) \times 500 = 74{,}000\,B/s = 74\,kB/s$$

该速率仅计应用数据。CAN-FD 将仲裁与数据阶段分开，此处分别配置为 1 和 5 Mbit/s。在 5 Mbit/s 下，64 字节指令的有效载荷位传输耗时 102.4 μs，12 字节反馈帧耗时 19.2 μs。因此，每周期有效载荷占用时间为

$$T_{payload} = 102.4 + 7 \times 19.2 = 236.8\,\mu s$$

$$U_{payload} = 236.8 / 2{,}000 = 11.84\%$$

11.84% 仅是有效载荷占用的下界。完整占用还须按各自速率计入仲裁、控制、校验、位填充、帧间隔、其他设备与重传。验收须依据实际帧格式和抓包记录。

USB 预算按封装后的传输帧计算。当前实现为每个 CAN-FD 帧分配 12 字节头部与 64 字节数据区，因此 12 字节反馈也占用 76 字节。每周期包含一个指令、七个反馈和一个指令回显，得到

$$B_{USB} = (1 + 7 + 1) \times 76 \times 500 = 342{,}000\,B/s = 342\,kB/s$$

USB 有效载荷速率为 2.736 Mbit/s，约占标称 480 Mbit/s USB High-Speed [17] 的 0.57%，尚未计入事务开销。USB 流量应跨总线汇总，CAN 占用率则按每条总线评估。回显用于释放发送上下文，不代表动作已经完成。

除带宽外，控制周期还约束调度、排队、转发和设备响应。对于串行处理阶段，时间预算为

$$T_{sch\,ed} + T_{queue} + T_{USB} + T_{bridge} + T_{CAN} + T_{device} + T_{sw} \le T$$

预算项应对应实际指令—反馈通路。缓冲中的指令也会变旧：500 Hz 下的 100 条指令代表 200 ms 历史。应测量周期分布、积压和反馈数据时龄，而不将队列容量视为时序余量。

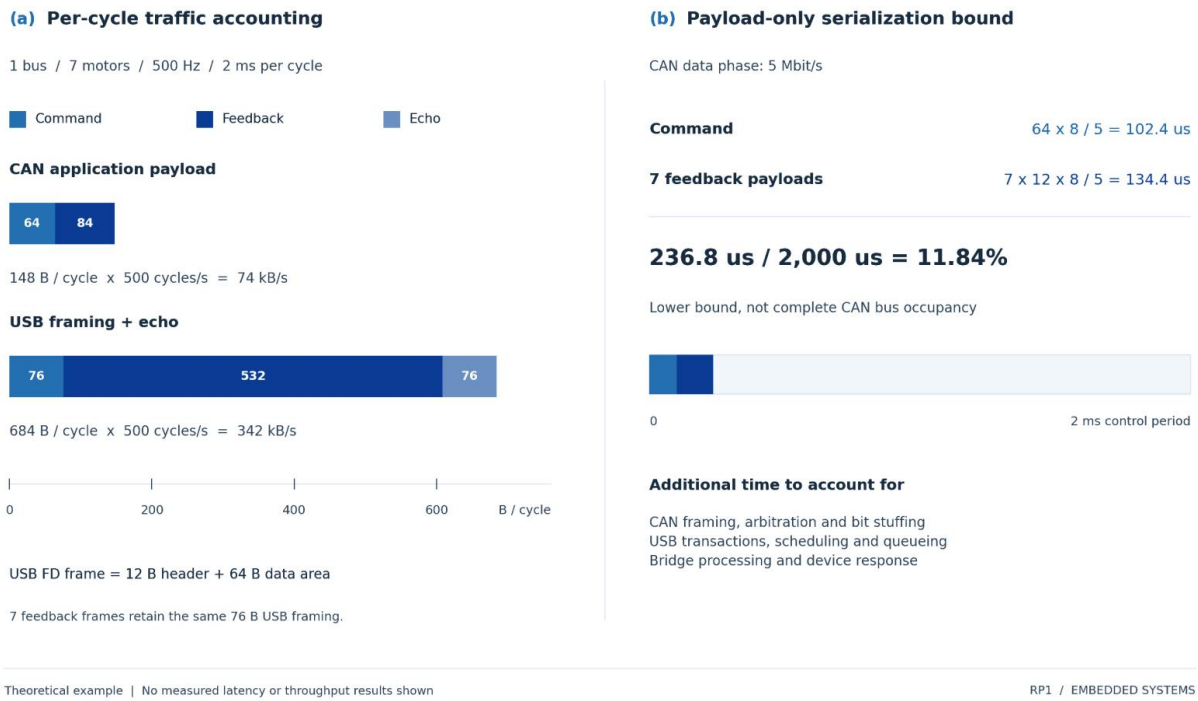


图 3.2. CAN/USB 理论流量与有效载荷时序。11.84% 未计入成帧和其他延迟；图中未占用区域不代表已验证余量。来源：RoboParty [21]。

3.2 硬件抽象与系统支持

3.2.1 硬件抽象层

通过统一接口与工厂选择电机、IMU、BMS 和手部设备。传输、设备协议与机器人映射相互分离。

表 3.1. 硬件抽象。

层级	实现	提供能力
设备	MotorDriver, IMUDriver, BmsDriver, HandDriver	电机指令 / 反馈、惯性测量、电池状态及手部控制
通信	CAN / CAN-FD 传输抽象	帧发送、接收回调与后端选择
机构	Decouple 及各机构专用实现	并联机构位置、速度和力矩的正逆映射
机器人	RobotInterface	关节顺序、方向、零位偏置、IMU 外参与机构组合

IMU 工厂支持 HIPNUC 和 MCT7123，BMS 工厂支持多种协议。并联机构采用统一接口和机构专用求解器。设备变化影响后端与配置，本体变化还影响关节集合、模型和策略。

3.2.2 机器人板级支持包

基于 Armbian 的 BSP 配置实时内核、CPU 隔离、中断亲和性和调度权限，同时组织驱动、设备树与启动服务。

BSP 补丁包括 gs_usb 在可恢复错误后的接收请求重新提交，以及对外提供错误计数。驱动和内核修改随系统镜像统一构建。

支持的板卡系列包括 RoboPi2、RDK X5、Orange Pi、Radxa 和 NanoPi。配置、SoC 规则与补丁描述板卡差异，服务与软件包共用交付基础。

3.2.3 开放构建与 OTA 交付

GitHub Actions 执行版本检查与 Debian 软件包构建。构建产物经 Releases 发布和仓库入库后，由 APT 分发；robopi-config 提供操作入口。驱动、工具和应用可分别更新。

公开的源码、构建脚本、日志与产物支持版本对比和重新构建。系统镜像、固件、软件包与机器人配置版本一并记录。

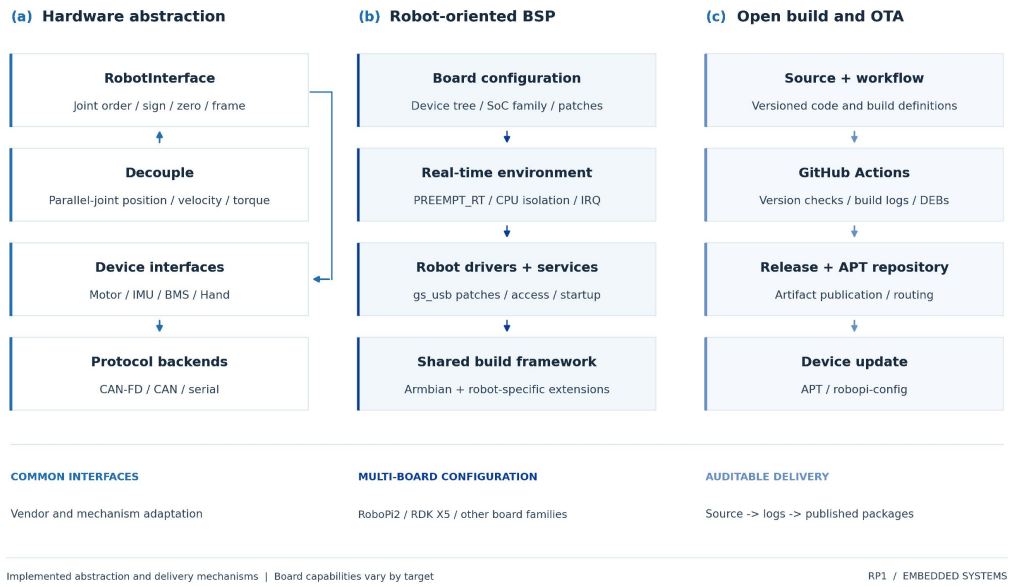


图 3.3. 硬件接口与并联关节变换、机器人 BSP 配置，以及 GitHub Actions 与 APT 交付流程。来源：RoboParty [21]。

3.3 日志与压力测试

3.3.1 多维日志与故障定位

robopi-analyze 采集八类记录：供电与 BMS、CAN 接口状态、内核日志、桥接固件日志、USB 原始流量、CAN 帧、推理输出，以及温度 / 热状态。通过轮转与快照保留运行窗口。离线工具生成时间线，分析 CAN 周期、USB 完成事件、回显配对和错误区间。

CAN 状态用于定位总线错误，USB 抓包用于定位停顿，固件日志记录队列与丢帧，供电与温度日志用于解释重启和性能变化。各类记录按时间关联。

会话导出将原始数据、元数据和分析结果打包，并提供文件及归档的 SHA-256 校验值，用于离线复现与文件完整性校验；这些校验值本身不能证明测量准确性。

CAN 记录保留原始格式与 ASC 格式。ASC 工具按通道和报文 ID 汇总周期、抖动与间隔；兼容 DBC 的工具解码信号，将时序与指令及错误关联。

3.3.2 现有检查与测试范围

robopi-config 提供总线流量、电机指令、USB 重新枚举和外设的通信压力与硬件检查入口。测试对象和判据如下。

表 3.2. 测试与检查。

测试项	方法	记录与检查内容
CAN 通信压力	在配对台架上持续发送 CAN/CAN-FD；默认 4 h	发送成功 / 失败、接收计数、接口错误、bus-off 与恢复；负载上升时的反馈间隔与积压
电机通信压力	重复批量发送 MIT 指令；默认 4 h	提交、反馈、错误与接口状态；验证持续通信，不是机械耐久性
电机链路与带载运行	在固定台架和指定负载下顺序或持续批量发送指令	实际帧率、通信与带载行为；单独记录负载、姿态和时长
USB 恢复	重复复位集线器；默认 100 次；观察重新枚举	设备数量、枚举与内核错误；通过设备通信验证服务恢复
BMS 通信	服务重启后检查软件包、配置、端口和状态	启动、读取成功与超时；不发送电池控制或参数写入指令

测试项	方法	记录与检查内容
外设	头部查询、扩展指示器及 GPIO/SIG 检查	响应、输出与接线；功能检查不能替代压力测试
驱动与虚拟总线	通过模拟传输与 vcan 检查过滤、回调、关闭及错误	接收所有权、资源释放、错误处理与并发；不验证物理带宽

默认时长和循环次数是脚本设置，不是已完成测试结果。现有 CAN 接收计数不能证明报文完整性。电机脚本含零位标定步骤，错误汇总和退出清理仍需完善，尚不能作为常规验收流程。统一测试需增加序号 / 内容检查，将标定分离，并定义设备最终状态。

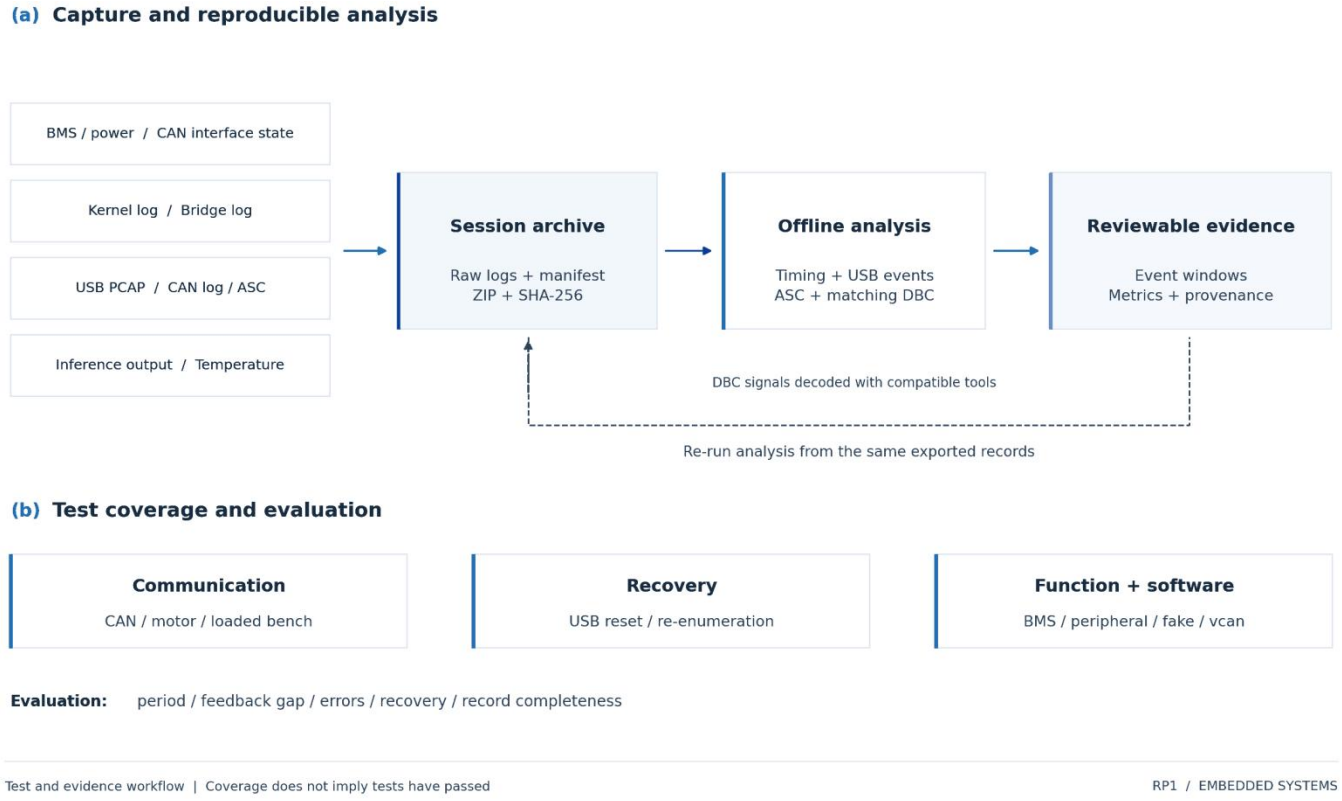


图 3.4. 会话归档、校验值和离线分析，以及通信、恢复和功能检查。虚线路径表示重新分析。覆盖范围不代表已通过验收。来源：RoboParty [21]。

3.3.3 并发负载与评价指标

系统压力测试组合推理、相机、日志与存储负载，对比空闲和并发负载下的控制周期、反馈数据时龄、CPU 占用与温度。调度测试测量线程唤醒延迟，端到端测试跟踪指令提交、总线传输和反馈，两者属于不同评价。

故障场景包括反馈缺失、USB 断连与重新枚举、总线错误以及服务重启。分别记录检测、停机和通信恢复时间，同时记录设备映射与重新使能条件。仅恢复通信，不表示已具备恢复运动的条件。

记录设备、接线、负载、频率、软件版本、实际周期数、第 99 百分位延迟、最长停顿、截止期违约及错误 / 丢帧计数。记录不完整则不通过。仅具备日志工具，不能证明已通过并发负载或故障验收。

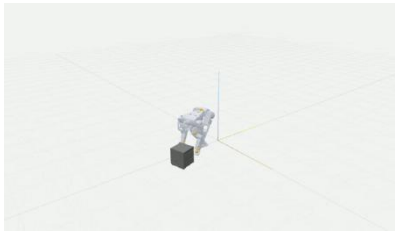
3.4 交互与远程控制

遥控器、机器人服务与配置工具用于提交指令、查询状态和执行维护。请求接收与执行结果分别报告，并附设备状态和错误信息。

4 算法

第 4.1 节介绍 human-humanoid-tools 工作流程 [9]，第 4.2 – 4.4 节介绍训练、部署和全身集成。默认参数取决于具体实现；RP1 调参示例来自该实现对应的开发实验记录。

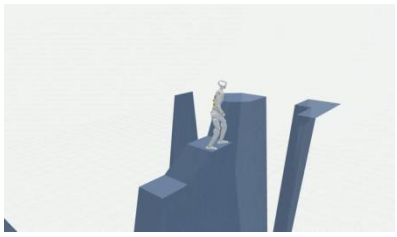
4.1 hhtools 动作重定向



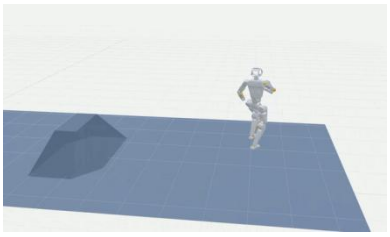
（a）物体交互：搬运



（b）平地动作：舞蹈



（c）地形交互：台阶



（d）地形交互：障碍

图 4.1. hhtools 重定向示例：搬运、舞蹈、台阶与障碍。来源：hhtools [9, 38]。

重定向使人体动作适应 RP1 的本体比例、腰部横滚 / 偏航、非共点髋部和并联踝。基础 24 轴配置不含灵巧手。这些差异决定了可用于学习的动作参考。

新机器人需要配置映射与权重，新数据集需要进行坐标系和零姿态转换。交互任务往往需要单独工具，并依赖人工评估质量。

hhtools [9] 将机器人准备、源姿态标定、重定向和检查整合到同一流程。配置与求解时间取决于机器人、动作片段、后端和硬件。

4.1.1 范围

hhtools 集成了基于 NVIDIA SOMA-Retargeter 和 Amazon holosoma 的求解器 [22, 23]。与 GMR [2] 类似，其采用约束逆运动学与轨迹优化。该工具的贡献是为不同机器人和数据集提供统一的数据生成流程。

流程依次导入动作与目标机器人、对齐参考姿态、选择求解器、预览结果并导出轨迹。交互序列保留相应物体和地形几何。本节描述 commit 6e6588c 对应实现；项目页面与安装指南提供相关入口 [9]。

表 4.1. 重定向流程对比。

能力	常见重定向流程	hhtools
新机器人接入	手动配置映射与权重	通过 URDF 和网格生成初始配置
零位对齐	硬编码源姿态假设	每组机器人 / 动作来源进行一次交互标定
场景	平地逆运动学或交互网格	按动作类型选择两种集成求解器
输入	一到两种格式或数据集	十余种来源、视频转动作及机器人间迁移
质量评估	用户自行编写检查程序	合理性评分、行为标签与子集推荐
交互接口	以脚本为主	CLI、WebUI、桌面端与 Agent 接口

4.1.2 机器人 URDF 接入

用户通过 WebUI 导入机器人 URDF 和网格模型。导入流程生成预设配置；生成的映射关系和关节限位仍需对照实际 RP1 配置进行核查。

URDF 修复。检查并修正网格路径、多余的 world 或 base_footprint 根节点以及无效的惯性参数。

关节映射。首先通过关键词和编辑距离，将 17 个标准人体关节与机器人连杆关联，包括骨盆、脊柱、胸部、颈部、头部，以及双侧肩、肘、腕、髋、膝和踝关节；随后利用父子拓扑关系，修正命名不一致导致的匹配错误。

有效性检查。核查必需的骨盆、髋、膝、踝和腕部映射、左右侧分配及驱动关节顺序。处理数据集前，应运行预设配置校验程序并进行短片段预览；仅凭名称匹配无法确认解剖对应关系是否正确。

几何估计。根据网格模型计算机器人身高及各关节的尺度基准。

完成导入和确认后，生成可编辑的 robot.yaml，其中包含关节顺序、连杆映射、跟踪权重和足部定义。修改在下次运行时生效。RP1 使用 RP1_description [7]；24 轴和 28 轴版本需分别配置预设。相关流程见 URDF 导入演示及预设生成实现 [9, 38]。

4.1.3 交互式标定与自动对齐

SMPL 采用 T-pose，而 RP1 的关节零位对应双臂下垂的站立姿态。用户在 WebUI 中将机器人姿态与参考骨架对齐并保存标定，以消除两者的姿态偏差。

一次性标定。系统支持八类参考约定：SMPL、SMPL-X、GVHMR、SOMA BVH、LAFAN BVH、mocap BVH、Xsens 和 GLB。标定文件关联机器人标识、参考名称和标定关节角。GLB 使用所加载片段的参考骨架；更换机器人或参考定义后，应重新核查标定。

自动对齐。根据标定姿态的正运动学结果，以闭式形式计算各连杆的尺度、旋转和平移偏移。运行时从已保存的姿态推导这些参数；实现中所述的亚毫秒计算时间仅指该推导过程，不涵盖完整的导入、标定或动作重定向流程。

归一化。在保留个体肢段比例的同时，将人体身高归一化为 1.65 m。

各参考类型分别使用 retarget_calibration_<reference>.yaml，并可按需叠加用户配置。复用标定前，应预览肢体方向、左右对称性、躯干姿态和足部状态。相关内容见首次标定演示及标定实现 [9, 38]。

4.1.4 运动与交互求解器

平地运动和物体、地形交互采用不同的求解器。

模仿运动。基于 Newton 和 NVIDIA Warp [24, 25]，对仅含骨架的动作片段进行逆运动学求解。在支持的 NVIDIA GPU 上，通过 CUDA Graph 回放减少迭代开销；无法使用 GPU 时可采用 CPU 路径。位置和姿态目标用于跟踪已映射的身体连杆，关节限位和软关节滤波用于约束肩、髋等欠约束转轴。地面接触稳定化应根据动作类型配置，尤其是翻滚和空翻动作。

交互运动。Interaction-Mesh 后端通过身体目标、场景锚点及可选的拉普拉斯形状正则项处理物体和地形交互。MuJoCo 提供正运动学、雅可比矩阵和碰撞距离；序列二次规划（SQP）求解局部二次规划子问题，OSQP 施加线性化碰撞与接触约束。所核查配置的穿透容差为 2 mm，MPC 预测时域为一帧，两者均可调整。本版本默认拉普拉斯权重为零。这些数值设置不构成硬件运动间隙的保证。

后端选择取决于输入是否仅包含运动、物体交互或地形交互。快速重定向演示展示操作流程；方法概述和交互配置说明具体实现及可选的稳定化设置 [9, 38]。

4.1.5 动作数据与输入来源

适配器将输入统一为公制单位、Z 轴向上和 +X 轴向前，并在数据交换时明确四元数分量顺序。用户须依照上游许可获取数据及所需的人体模型权重。表 4.2 列出来源页面，相关论文收录于附录 D。

表 4.2. 动作数据与输入来源。

类别	数据集 / 来源	流程用途
光学动作捕捉	AMASS [26], LAFAN1 [27], 100STYLE [28], SOMA/SEED [29]	全身运动、步态与风格化动作
整理后的动作数据	Motion-X [30], PHUMA [31]	动态动作、武术动作与经物理筛选的动作
单目视频	GVHMR [32]	从视频提取参考动作
人与物体交互	OMOMO [33], OmniContact [34]	搬运、推动与接触任务
人与地形交互	holosoma [23, 35], PARC MS [36]	跑酷、攀爬与越障
机器人轨迹	MotionDecode [37]	G1 到 RP1 的动作迁移

文件输入支持 BVH、GLB 和统一 NPZ 格式。GVHMR [32] 通过独立安装的 CUDA 环境及模型权重，从视频提取动作。机器人间迁移先通过正运动学重建源机器人的连杆运动，再利用源机器人与目标机器人的配对标定拟合目标姿态。对于不含时间元数据的 MotionDecode G1 文件，文档规定的源采样率为 120 Hz，使用时必须显式指定。相关内容见动作输入预览和机器人间迁移说明 [9, 38]。

分析面板根据悬空、穿透、滑移、抖动和自碰撞惩罚，给出满分为 100 的物理合理性评分。复杂度标签与聚类结果用于推荐多样化训练子集。由于腾空阶段可能属于有效的动态动作，系统仅标记相关序列，不自动删除。

接纳训练子集前，应检查接触一致性和关节连续性。质量评分用于辅助筛选，不能证明动力学可行性。相关内容见数据集分析演示 [38]。

4.1.6 用户与 Agent 接口

WebUI、桌面软件包、CLI 以及 JSON CLI/MCP 适配器共享同一求解器核心。WebUI 支持单片段和队列导出；CLI 脚本支持可续跑、相互隔离的批处理。当前 Agent 接口约定覆盖人体到机器人重定向、不含场景的机器人间迁移、配对标定及有序批处理。视频转动作、数据集分析、含场景的机器人间迁移及部署尚不在 Agent 接口范围内。相关内容见 Agent 接口文档和批量重定向演示 [9, 38]。

导出约定。机器人 CSV 包含时间列；root_x、root_y、root_z；root_qx、root_qy、root_qz、root_qw；以及具名的 dof_* 列。文件头元数据标明机器人、采样率和自由度数。场景数据包还保留物体轨迹及地形资源。CSV 使用 xyzw 四元数顺序，PKL 数据包则声明为 wxyz；读取端须遵循各格式的数据约定。这些约定由 CSV 规范及数据包导出器定义 [9]。

RP1 集成。导出的关节名称、顺序、单位、采样率和根坐标系约定须与 BeyondMimic、MimicLite 或 UFO 的训练加载器一致 [11, 12, 13]。表 4.2 说明支持的输入和项目来源，不表示其中每个数据集均已用于策略训练。24 轴和 28 轴版本须分别使用对应 URDF 进行标定和导出。每条接纳的序列均应保存源片段标识、机器人资源、标定结果、求解器设置、软件提交版本和审核结果，以便复现。

数据集发布前，应使用相同机器人模型回放导出结果。几何参考动作仍需在第 4.2 节训练和第 4.3 节部署过程中，评估滑移、接触力、执行器限值及跟踪稳定性。

4.2 训练框架

Isaac Lab 3.0 [10] 提供任务配置、并行训练、回放和导出功能。任务目标、机器人资源和物理后端分别配置。

4.2.1 任务与后端

注册任务关联环境与算法设置。Manager-based 环境由观测、动作、奖励、事件和课程模块组成；Direct 环境在单一类中实现状态更新和批量计算。两者使用相同的训练接口。

PhysX 和 Newton/MJWarp 预设独立于环境类型。完成适配的资源可通过配置切换后端，无需修改任务目标或算法设置。

训练可采用无界面模式，检查与回放使用可视化界面。不依赖 Kit 的 Newton 任务支持 Kit-less 运行。

4.2.2 实验与并行执行

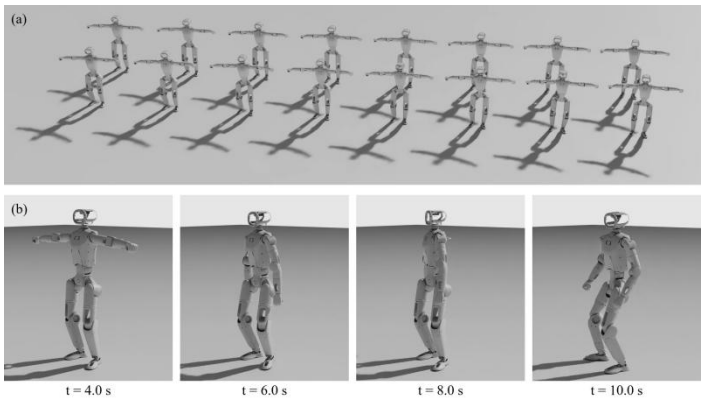
注册配置同时用于训练、回放和导出。通过调整环境数量和设备设置，可将同一任务从小规模检查扩展至 GPU 训练，无需重写任务逻辑。

每次运行均保存解析后的环境、算法设置及检查点，用于恢复运行和复核。

RP1 速度跟踪任务的策略网络与价值网络采用不同观测。策略网络接收三帧本体状态、速度指令和上一时刻动作，训练时对部分本体感知输入加入噪声。价值网络额外接收接触和动力学信息，在复杂地形中还接收地形扫描信息。历史观测描述近期状态，仿真特权信息仅用于训练阶段的价值估计。将两类输入记为 H_t^{π} 和 H_t^{V}，确定性策略与价值估计为

$$a_t = f_\theta(N_\pi(H_t^{\pi})), \qquad V_t = V_\phi(N_V(H_t^{V})), \qquad N(x) = \frac{x-\mu}{\sigma+\varepsilon}. \tag{1}$$

ONNX 导出包含策略和观测归一化，不包含价值网络或特权输入。部署时必须复现训练所用的观测定义。



GPU 仿真从数千个环境中采样。多 GPU 训练同步优势统计量、平均 KL 散度和梯度，分别用于归一化、学习率调整及参数更新。并行训练与单环境回放使用相同的观测、动作和机器人定义（图 4.2）。

图 4.2. RP1 参考动作跟踪。（a）16 个并行环境。（b）单环境策略回放。来源：RoboParty [21]。

已发布的 Isaac Lab 3.0-EA 人形机器人基准在 8,192 个环境下报告：Newton/MJWarp 的平均训练吞吐量，在 Direct 任务中约为 PhysX 的 2.24 倍，在 Manager-based 任务中约为 2.08 倍（图 4.3a）[10]。这些是上游测试结果，并非 RP1 的实测数据。

在 4,096 个 Newton 环境下，相较于 Torch，Warp 将 Direct 和 Manager-based 任务的单步耗时分别降低 22.63% 和 29.16%（图 4.3b）[10]。与训练吞吐量基准不同，该项测试仅测量环境步进，不包含策略更新。

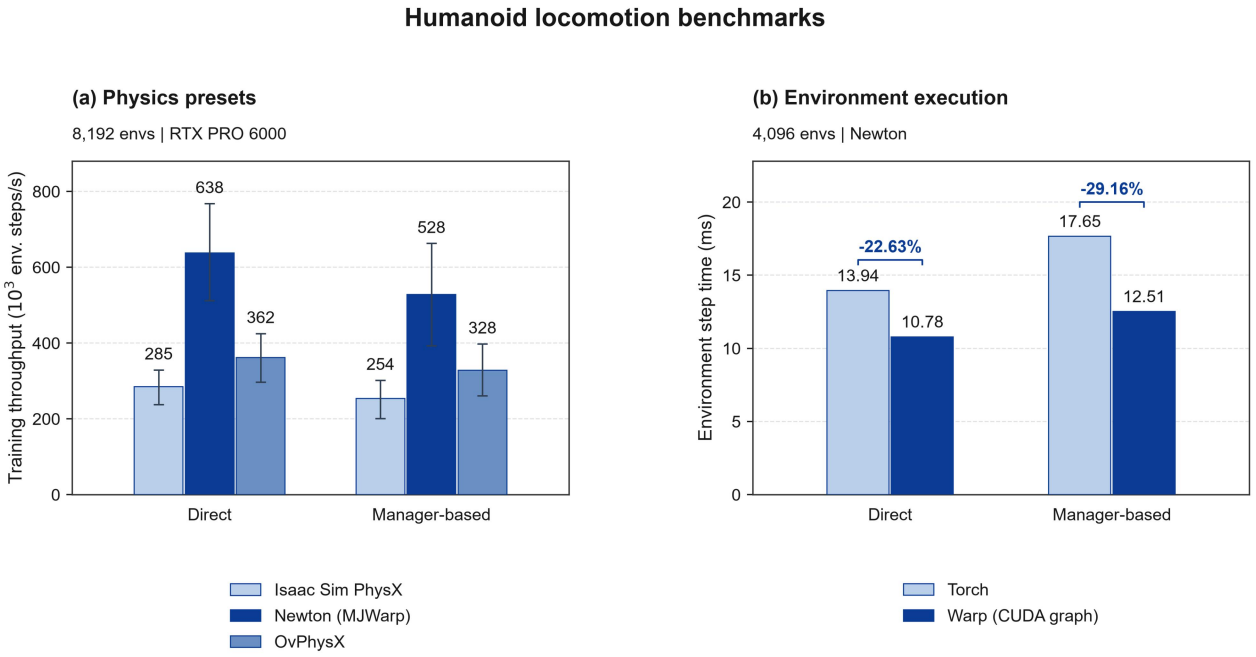
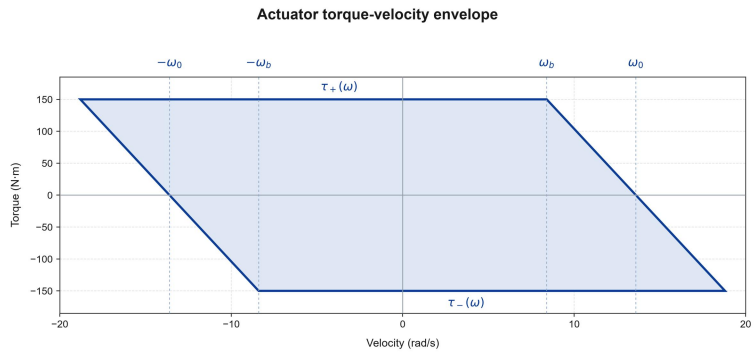


图 4.3. 已发布的上游人形机器人基准，非 RP1 硬件实测数据 [10]。（a）不同物理预设的训练吞吐量。（b）Torch 与 Warp 的环境单步耗时。

4.2.3 动力学与参数辨识

除刚体和接触动力学外，训练还需考虑执行器输出限制。RP1 使用随转速变化的四象限转矩包络约束 PD 输出，表示峰值转矩、高速降额和制动限值（图 4.4）。设峰值转矩为 τ_p，空载转速为 ω_0，峰值转矩下的最大转速为 ω_k。定义 $\tau_s = \tau_p/(1-\omega_k/\omega_0)$ 和 $\omega_c = \omega_0(1+\tau_p/\tau_s)$，并将当前转速限幅为 $\widetilde{\omega} = \mathrm{clip}(\omega, -\omega_c, \omega_c)$。转矩上下限为

$$\tau_+(\omega) = \min\{\tau_s(1-\widetilde{\omega}/\omega_0), \tau_p\}, \qquad \tau_-(\omega) = \max\{\tau_s(-1-\widetilde{\omega}/\omega_0), -\tau_p\}. \tag{2}$$



动力学模型还包括指令延迟。各任务共享执行器参数；复杂地形任务对接触和机器人动力学参数进行随机化，并根据行进距离与速度指令调整地形难度。

图 4.4. RP1 腰部、髋部和膝部执行器的转矩—转速包络。来源：RoboParty [21]。

PACE 通过并行仿真辨识执行器参数。系统在固定基座、禁用接触的条件下回放指令，每个环境评估一组候选参数。CMA-ES 根据完整轨迹上的关节位置误差更新参数分布。对于 n 个关节，ζ 包含各关节的附加惯量、黏性摩擦、摩擦系数和编码器偏置，以及一个共享的离散延迟，共计 $4n+1$ 个参数。目标函数为

$$\zeta^* = \arg\min_{\zeta\in\mathcal{B}} \frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T-1}\sum_{j=1}^{n}\left(q_{t,j}^{\mathrm{sim}}(\zeta) - b_j - q_{t,j}^{\mathrm{enc}}\right)^2. \tag{3}$$

其中，b_j 表示真实角度相对于编码器读数的偏置，$\mathcal{B}$ 表示搜索域。辨识模型在 PD 计算和转矩限幅后施加延迟，以拟合响应时序。部署过程中记录的指令与反馈可直接作为 PACE 的拟合数据。

4.3 部署框架

配置将策略和 Python SDK 接入统一的关节状态与指令接口。机器人接口负责通信与坐标变换。

4.3.1 配置驱动的策略适配

本体配置定义设备、映射、机构和闭链索引；控制配置定义增益、标称姿态和控制周期；策略配置定义模型、观测和动作转换。这些配置可分别编辑，但必须与所选机器人模型及策略保持一致。

对于 24 自由度 RP1，速度跟踪使用速度指令和历史观测，参考跟踪则额外使用参考关节位置与速度（表 4.3）。尽管输入和历史组织方式不同，两者均输出 24 维动作，并由同一推理程序转换为关节目标。

表 4.3. 两类 RP1 策略的配置示例。

策略任务	观测	模型接口
速度跟踪	每帧 81 个数值；3 帧 obs-major 历史	243 维输入；24 维输出
参考跟踪	单帧，包含 48 个参考关节数值	126 维输入；24 维输出

观测配置指定字段顺序、缩放、限幅、历史长度和帧偏移。新增观测类型需实现相应模块。动作配置定义关节顺序、缩放和标称姿态。

每个输入分量均需明确物理含义、排列顺序和采样时刻。设 $x_t^{(j)}$ 表示观测向量 j，$h_0 > \cdots > h_{K-1} = 0$ 按由旧到新的偏移顺序排列。当各字段采用相同偏移时，两种常用布局为

$$o_t^{\mathrm{obs}} = \mathrm{concat}_{j=1}^{M}\mathrm{concat}_{k=0}^{K-1} x_{t-h_k}^{(j)}, \qquad o_t^{\mathrm{frame}} = \mathrm{concat}_{k=0}^{K-1}\mathrm{concat}_{j=1}^{M} x_{t-h_k}^{(j)}. \tag{4}$$

obs-major 按字段组织各自的历史值，frame-major 按时刻组织完整观测（图 4.5）。部署时的排列顺序必须与训练一致。

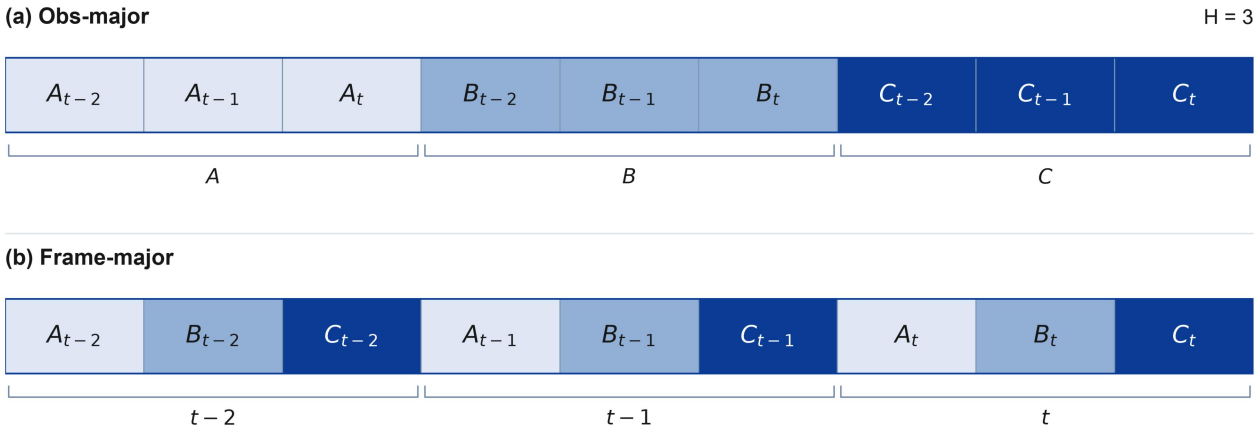


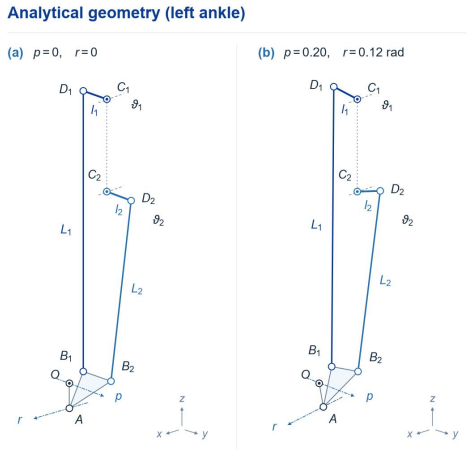
图 4.5. 三帧历史观测的两种排列方式：（a）obs-major；（b）frame-major。来源：RoboParty [21]。

4.3.2 Python SDK 与机器人集成

通过 Python 绑定开放 C++ 状态和指令接口。SDK 设置参考目标、增益和实验参数；机器人接口处理电机映射、传感器及踝部坐标变换。位置、速度、增益和前馈转矩采用统一的关节顺序。

已有设备通过参数与映射配置接入，新增类型需扩展模块。关节接口用于控制，电机和 IMU 接口用于设备测试。响应记录器保存目标、反馈、时间戳、采样率、扫频范围和幅值，用于 PACE 参数辨识。测试与部署共享关节定义及坐标变换。

4.3.3 并联踝运动学



踝部等效运动由俯仰和横滚表示。机器人接口在等效关节坐标与电机坐标之间转换位置、速度和转矩，策略与 SDK 则在等效关节空间中运行。图 4.6 所示的两条支链由固定电机中心 C_i、曲柄端点 D_i 和足部连接点 B_i 构成。俯仰原点 O 与横滚中心 A 之间存在固定偏移。

图 4.6. 左踝解析几何模型。（a）零位姿态。（b）俯仰与横滚组合姿态。来源：RoboParty [21]。

设 $q=[p,r]^T$ 为等效关节坐标，$\vartheta=[\vartheta_1,\vartheta_2]^T$ 为电机坐标。零位横滚中心为 a，b_i^0 和 c_i 分别表示零位足部连接点与固定电机中心。曲柄和连杆长度分别为 l_i 和 L_i。考虑电机零位偏置 ϑ_{0i} 和 $\alpha_i=\vartheta_i+\vartheta_{0i}$，闭环几何关系为

$$b_i(q)=R_y(p)[a+R_x(r)(b_i^0-a)],\qquad d_i(\vartheta_i)=c_i+(0,l_i\cos\alpha_i,-l_i\sin\alpha_i)^T. \tag{5}$$

$$F_i(q,\vartheta_i)=\frac{1}{2}(\|b_i(q)-d_i(\vartheta_i)\|^2-L_i^2)=0,\qquad i=1,2. \tag{6}$$

式（5）显式保留两关节轴之间的偏移。式（6）通过两条定长约束关联关节坐标与电机坐标。令 $\delta_i=c_i-b_i(q)$。展开约束得到 $A_i\cos\alpha_i+B_i\sin\alpha_i+C_i^*=0$，其中 $A_i=2l_i\delta_{iy}$、$B_i=-2l_i\delta_{iz}$ 和 $C_i^*=\|\delta_i\|^2+l_i^2-L_i^2$。定义 $\rho_i=(A_i^2+B_i^2)^{1/2}$ 和 $\phi_i=atan2(B_i,A_i)$，电机角度的解析候选解为

$$\vartheta_i=\phi_i\pm\arccos\left(-\frac{C_i^*}{\rho_i}\right)-\vartheta_{0i},\qquad \rho_i>0,\quad |C_i^*|\le\rho_i. \tag{7}$$

对每条支链，求解器选择电机角度绝对值较小的候选解，定义逆映射 $\vartheta(q)$。令 $v_i = b_i - d_i$ 和 $u_i = d_i - c_i$，电机转轴方向为 $s = (-1,0,0)^T$。对式（6）求导得 $G_q\dot{q} = G_m\dot{\vartheta}$，其中 $(G_q)_{i,:} = v_i^T \partial b_i / \partial q$ 和 $G_m = \mathrm{diag}\{v_i^T(s \times u_i)\}$。当两个矩阵均非奇异时，局部速度映射为

$$J_{m\to q} = G_q^{-1}G_m, \qquad J_{q\to m} = G_m^{-1}G_q, \qquad \dot{q} = J_{m\to q}\dot{\vartheta}. \tag{8}$$

由虚功关系 $\tau_q^T\dot{q} = \tau_m^T\dot{\vartheta}$，可得对偶的广义力变换：

$$\tau_m = J_{m\to q}^T\tau_q, \qquad \tau_q = J_{q\to m}^T\tau_m. \tag{9}$$

状态读取时，通过数值正运动学恢复等效关节角，并利用解析雅可比矩阵转换速度。正运动学以上一次成功求解结果为初值，根据电机角度残差迭代修正：

$$q^{(n+1)} = q^{(n)} + \eta J_{m\to q}(q^{(n)})[\vartheta_{\mathrm{meas}} - \vartheta(q^{(n)})], \qquad \eta = 0.5. \tag{10}$$

每次迭代计算解析逆解，构建电机角度残差，再利用雅可比矩阵修正关节角。左右踝采用相同的求解形式，分别配置连接点几何参数及电机零位偏置。

控制器首先在关节空间计算 PD 转矩，再利用当前实测构型的雅可比矩阵映射至电机空间：

$$\tau_q^* = K_p(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + \tau_{\mathrm{ff}}, \qquad \tau_m^* = J_{m\to q}^T\tau_q^*. \tag{11}$$

所得 τ_m^* 包含两个电机的目标转矩。上层策略定义关节空间目标，机器人接口完成电机空间转换。反馈与指令使用同一机构模型和坐标定义。

4.4 全身智能

RP1 结合 VR 或惯性遥操作、全身控制（WBC）、RP Hand 映射及同步记录，开展全身智能（WBI）演示。

4.4.1 全身控制与操作

WBC 通过 VR 或 Noitom Pnlink-FB-G 惯性动作捕捉跟踪人体参考动作。相较于五点 VR 跟踪，惯性动作捕捉提供更完整的全身参考信息。

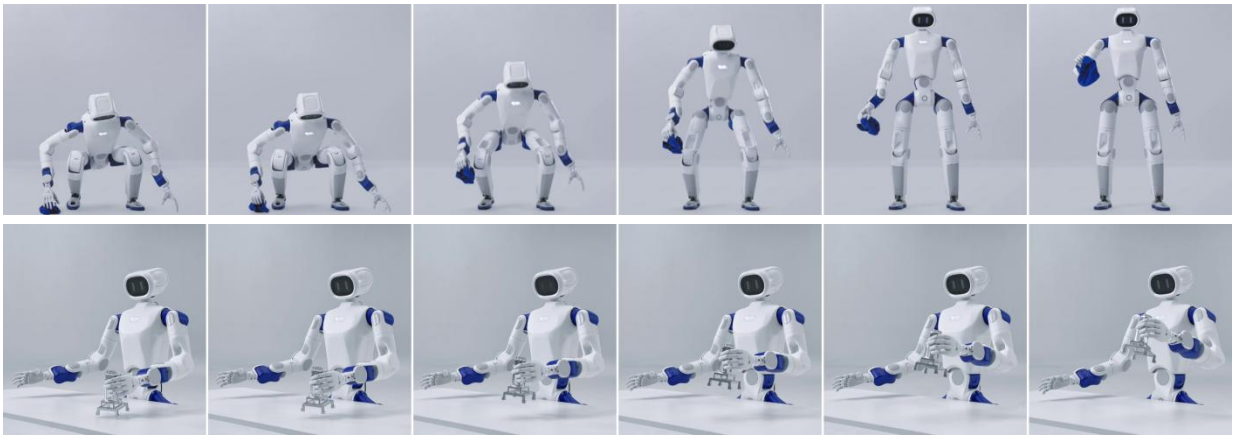


图 4.7. 全身姿态跟踪与操作演示。来源：RoboParty [21]。

视觉识别将 VR 手部姿态映射为 RP Hand 目标。手部指令与本体状态同步记录和回放。

图 4.8 展示手部抓握下的 5 kg 提桶弯举，载荷不含夹具。该动作通过 VR 或惯性遥操作产生，延迟取决于用户网络条件，不采用单一固定值。手部接口与工具见附录 C。



图 4.8. 上肢负载操作。来源：RoboParty [21]。

4.4.2 数据采集与转换

遥操作记录双目第一视角视频、关节状态、IMU 数据、全身参考动作和手部指令，用于数据转换及 WBI 开发（表 4.4）。

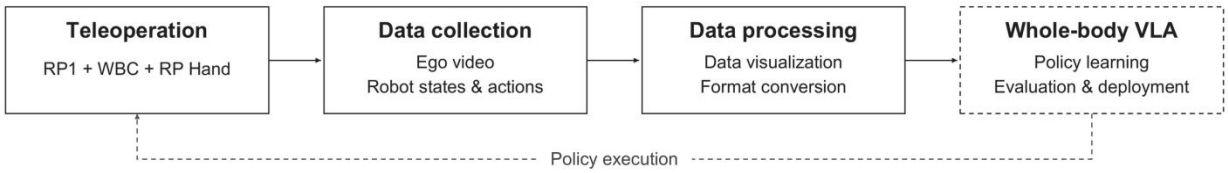


图 4.9. WBI 开发流程。来源：RoboParty [21]。

独立 HTML 查看器同步显示双目视频、信号曲线和数值，支持时间轴导航、逐帧步进、播放速度调整、信号选择与缩放（图 4.10）。

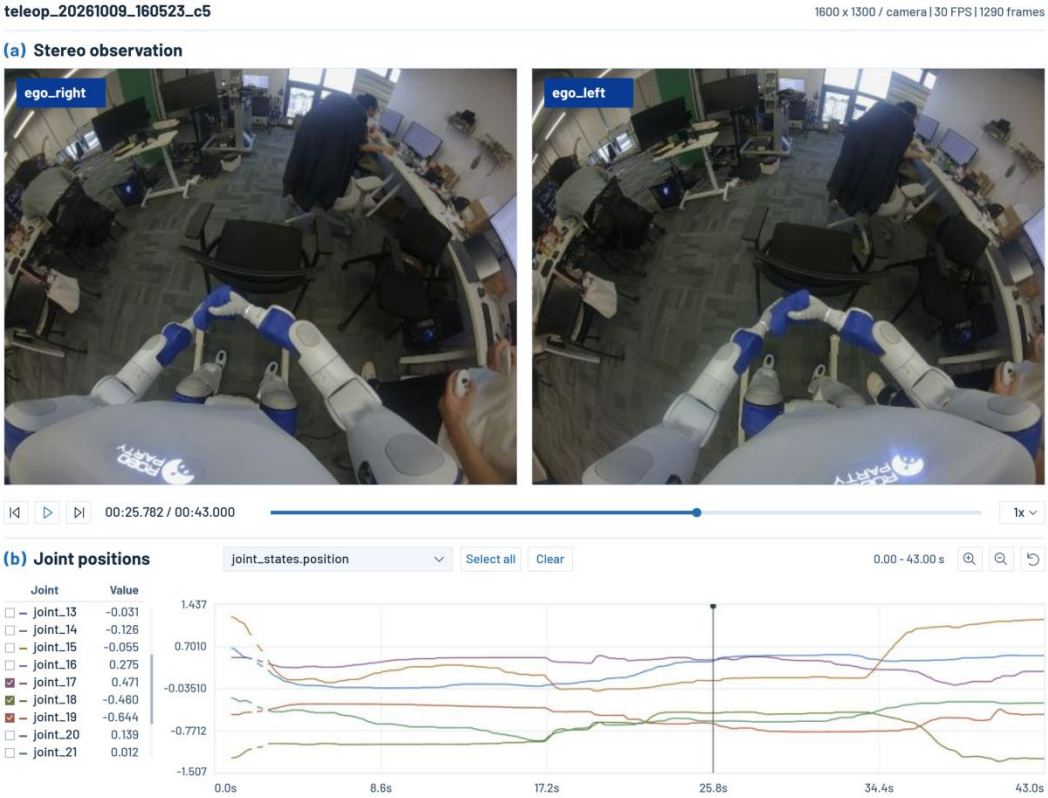


图 4.10. 视频与关节状态同步回放。来源：RoboParty [21]。

表 4.4. 示例记录中的数据。

数据	记录内容	维度
第一视角视频	任务场景与手部操作	左、右各 1600 × 1300 像素
关节状态	位置、速度、转矩	每类物理量各 28 个数值
运动参考	关节目标与全身跟踪	28 个关节目标；35 个全身数值
惯性数据	本体姿态 / 角速度 / 线加速度；第一视角端角速度 / 线加速度	本体姿态：4 维；各角速度和加速度数据流：3 维
手部数据	左、右手状态与动作	每只手 6 个数值

数据转换使坐标、时间和关节语义与下游数据格式及策略接口保持一致。

5 PartyOS

PartyOS 正在开发中，完整方法与评估计划另行成文。

PartyOS 集成动作重定向、BFM 运动控制、部署和自动化评估。后续扩展包括场景与物体交互、基于 VLA 的操作以及智能体化人形机器人。

三个算法层共享下述基础设施。

System0：根据参考动作、目标姿态、奖励或遥操作实现通用全身控制。

System1：规划中的非坍缩意图表征，与动作语义对齐，支持可组合的运动基元。

System2：通过大模型编排运动控制与 VLA，形成可复用技能。

基础设施：动作重定向、场景生成、自动化数据采集、评估及研究工作台。

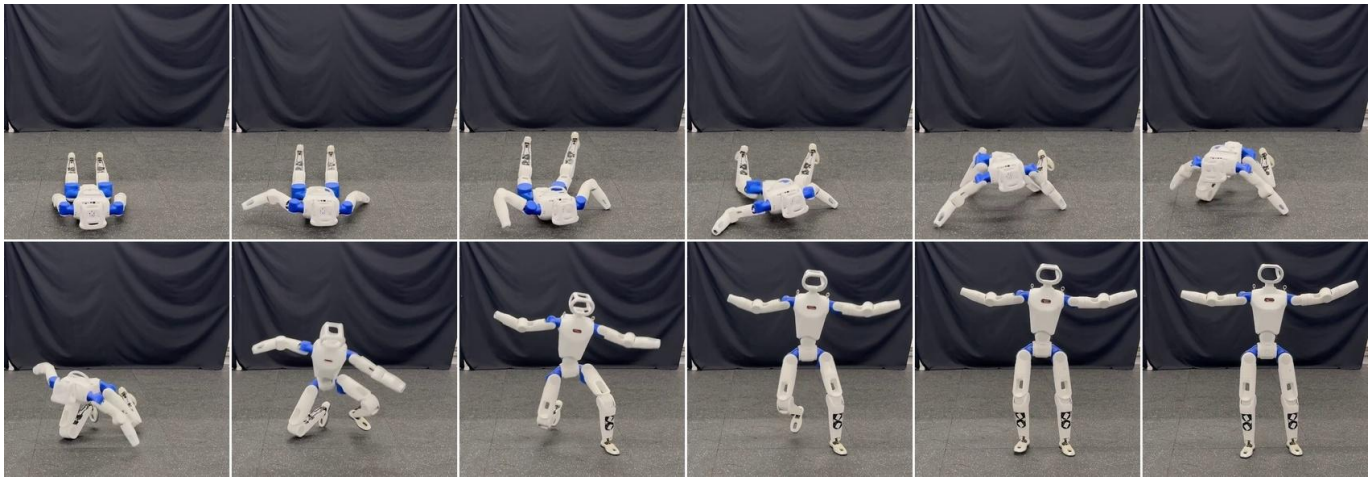
System0 和基础设施已部分开源。System1 与 System2 仍处于研究阶段。

已发布组件

hhtools [9] 将人体动作重定向至支持的人形机器人，所引流程报告耗时约 30 s。该工具包含 RP1，并支持 G1 动作数据迁移。

MimicLite [12] 提供高效通用动作跟踪，报告的训练配置为八张 RTX 4090 GPU，耗时约 3 h。

UFO [13] 是用于扰动恢复与跌倒起身的无监督 BFM 框架。公开代码支持包括 RP1 在内的六款人形机器人。



gpt-6-astra-real2sim-workflow [39] 根据单张照片生成可编辑、可交互的仿真场景。

LabWeft [40] 记录实验沿革与证据，支持 Agent 辅助的算法迭代。

阶段性结果

运动控制。原稿报告，MimicLite v1.1 在第三方 G1 跟踪排行榜的 15 项策略中排名第一 [41]，训练成本约为 SONIC 的 1/420。测试时间及比较条件见公开的 MimicLite 技术报告。原稿还报告，UFO 将无监督 BFM 训练时间从 45 h 缩短至 6 h，并支持强扰动下的遥操作或自主恢复。这些结论针对特定时间和基准条件，复现时需使用对应的评估快照与配置 [12, 13, 21]。

交互。原稿报告，基于 UFO 的交互 BFM 以单一策略实现箱体搬运、推动和踢动；跌倒后搬箱成功率为 89.3%，所引规划方法为 1.3%。底层评估记录属于内部资料，尚未提供公开论文 [14, 21]。

实—仿—实。所报告流程约需 2 min 生成高保真多房间场景，所参考的开源替代方案约需 3 h。自动化专家数据采集已在 RPW 和 G1 上演示，评估平台支持 RP1 与 RP1-WBC。这些数值对应源项目所报告的配置 [21, 39–41]。

后续计划在 RP1 上复现感知与交互 BFM，并贯通场景与任务生成、采集、微调和评估流程。

6 整机测试

RP1 持续运行验证涵盖执行器、结构连接及线束，因此测试设计同时考虑运动特征、加载方式和故障检查。模块化台架与分层测试软件为周期运动、持续负载和振动下的连接完整性评估提供互补工况，并将实物记录关联至执行配置。本节介绍测试系统及代表性验证结果 [21]。

6.1 系统配置与验证范围

表 6.1. 测试条件与代表性实物记录。来源：RoboParty [21]。

验证项目	测试条件	记录结果
上肢周期摆动	空载；轨迹取自 3 m/s 仿真跑步姿态；每次 8 h	累计运行 120 h，未记录到故障
下肢重复蹲起	60 kg 负载，约为上半身质量的三倍	连续稳定运行 8 h；累计测试超过 100 h
单臂连续负载	2.5、3.5 和 5.5 kg；各载荷对应任务轨迹，以参考速度的 1.5 倍执行	2.5 kg：125.7 min；3.5 kg：120.0 min；5.5 kg：10 min 短时动态负载

验证覆盖单臂、上半身、单腿和下半身模块。这四类模块记录的运行时间分别约为 205、251、230 和 217 h，合计约 900 h。该合计不代表整机连续运行记录，且不计入并行运行、暂停、冷却、维护和样机更换时间。记录包括空载循环、负载运动和冲击测试。本报告给出代表性工程验证，不开展跨样机或跨版本的统计比较；试验标识、版本清单及完整原始记录作为追溯资料保留。表 6.1 列出测试条件明确的代表性实物记录。

频繁换装与检查要求台架将通用承载结构和产品专用夹具分离。快拆与定位接口适配不同部件（图 6.1）。下肢导向框架及防坠结构约束负载运动，拖链用于整理线缆。供电架构区分执行器电源与控制电源：四路支路独立开关、保护和测量，共享电压设定及总电流限值。24 V 控制电源接在主接触器 KM0 上游，在执行器断电后仍保持 PLC 供电与状态采集。

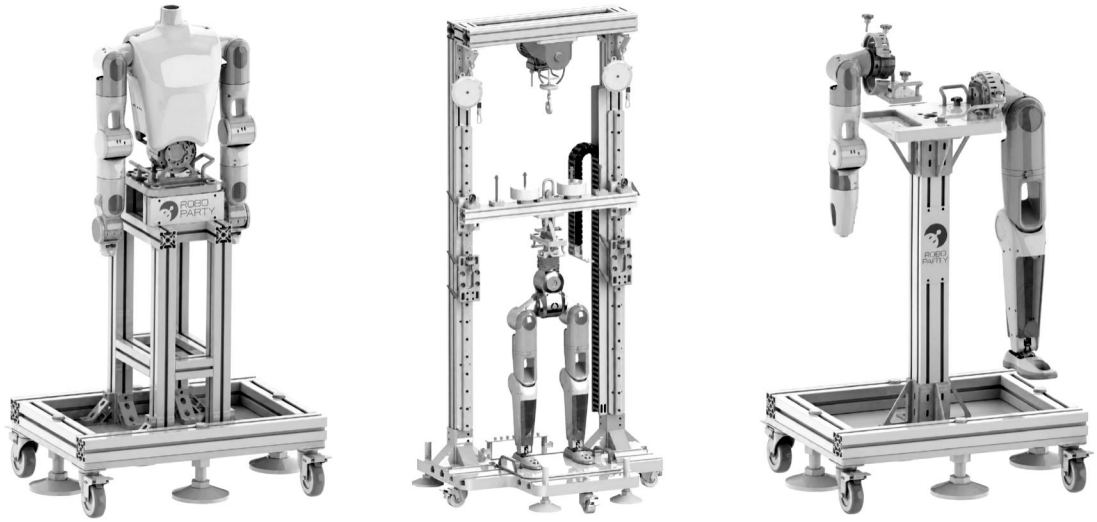


图 6.1. 模块化测试台架与快拆夹具。从左至右为上半身台架、负载下半身台架，以及带抱箍夹具的单臂台架。图为设计渲染图。来源：RoboParty [21]。

每次试验均将样机配置、载荷、轨迹和软件版本与执行记录及计划检查关联。电池更换、冷却和检查时间单独记录，累计时长仅计有效执行时间。

6.2 上下肢互补耐久测试

上肢耐久测试用于检查重复运动下的机构与线束。周期摆臂轨迹取自 3 m/s 仿真跑步姿态，关节协同运动与反复换向形成连续循环。空载运行保留检查结构干涉、走线间隙及循环磨损所需的运动范围和线缆弯曲特征；负载运行进一步评估执行器承载能力和温升。

下肢承载与机械连接承受不同应力条件，分别通过蹲起和踏步评估（图 6.2）。带载重复屈伸用于评估关节支撑、执行器温升和持续运行。交替踏步产生反复振动，扰动结构连接与紧固件；后续检查包括松动、紧固失效及局部损伤。这些互补工况分别为执行器性能和连接完整性提供证据。

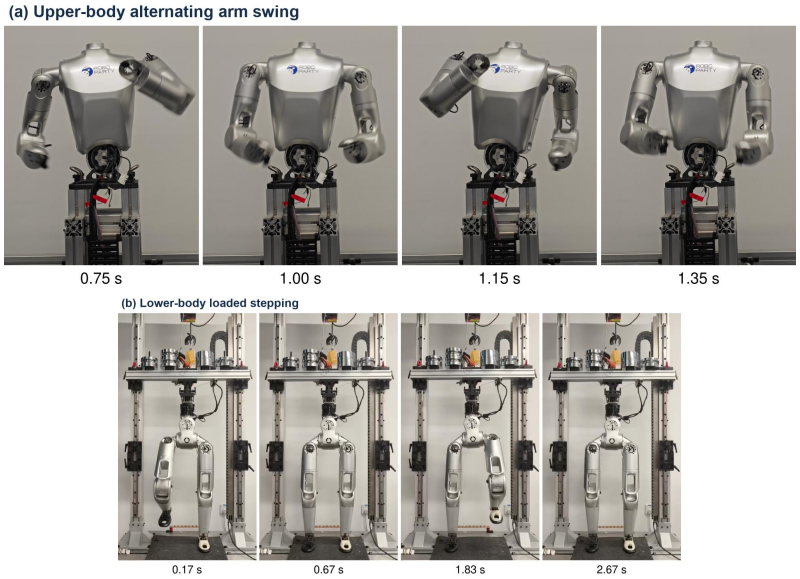


图 6.2. 实物耐久测试动作。（a）上半身交替摆臂。（b）负载下半身踏步。每个面板包含四帧，时间戳相对于各自源视频，两者不使用共同的视频时钟。来源：RoboParty [21]。

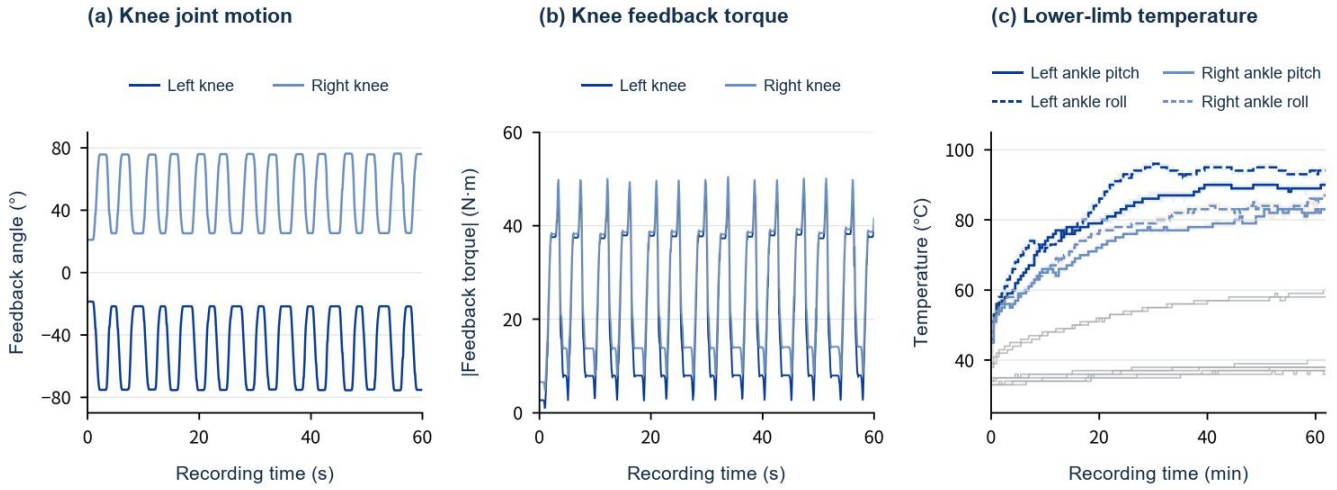


图 6.3. 双腿共同承担 50 kg 外部负载时蹲起过程中的关节运动、转矩与温度。（a、b）前 60 s 的双侧膝关节反馈角度和反馈转矩绝对值，角度遵循各关节坐标约定。（c）完整 61.94 min 记录中下肢全部 12 轴的温度，以 30 s 窗口中位数汇总，并保留最后一个窗口。四个踝关节使用彩色曲线，浅色带表示窗口内取值范围，其余八轴为灰色曲线。记录包含运动与保持阶段。该 50 kg、61.94 min 记录与表 6.1 的 60 kg 耐久汇总相互独立；后者报告连续运行 8 h、累计测试超过 100 h。来源：RoboParty [21]。

6.3 单臂动态负载验证

单臂负载轨迹围绕代表性任务动作设计，并按载荷选择任务覆盖范围。2.5 kg 工况覆盖八类任务：工位转运、阵列取放、高中低位货架搬运、机床上下料、约 90° 姿态调整、多面检测、水平转运和仪器插拔。3.5 kg 与 5.5 kg 工况各覆盖四类任务：工位转运、阵列取放、中低位货架搬运和机床上下料（图 6.4）。

轨迹包含不同高度与方向的转运、姿态变化及插入和拔出动作。肩、肘、腕连续协同并反复换向，形成动态负载。仿真检查关节范围、速度、加速度和动作衔接，台架测量记录温度、反馈转矩及关节运动。通过关联任务类别、载荷与运行响应，评估所覆盖任务动作下的持续负载性能。

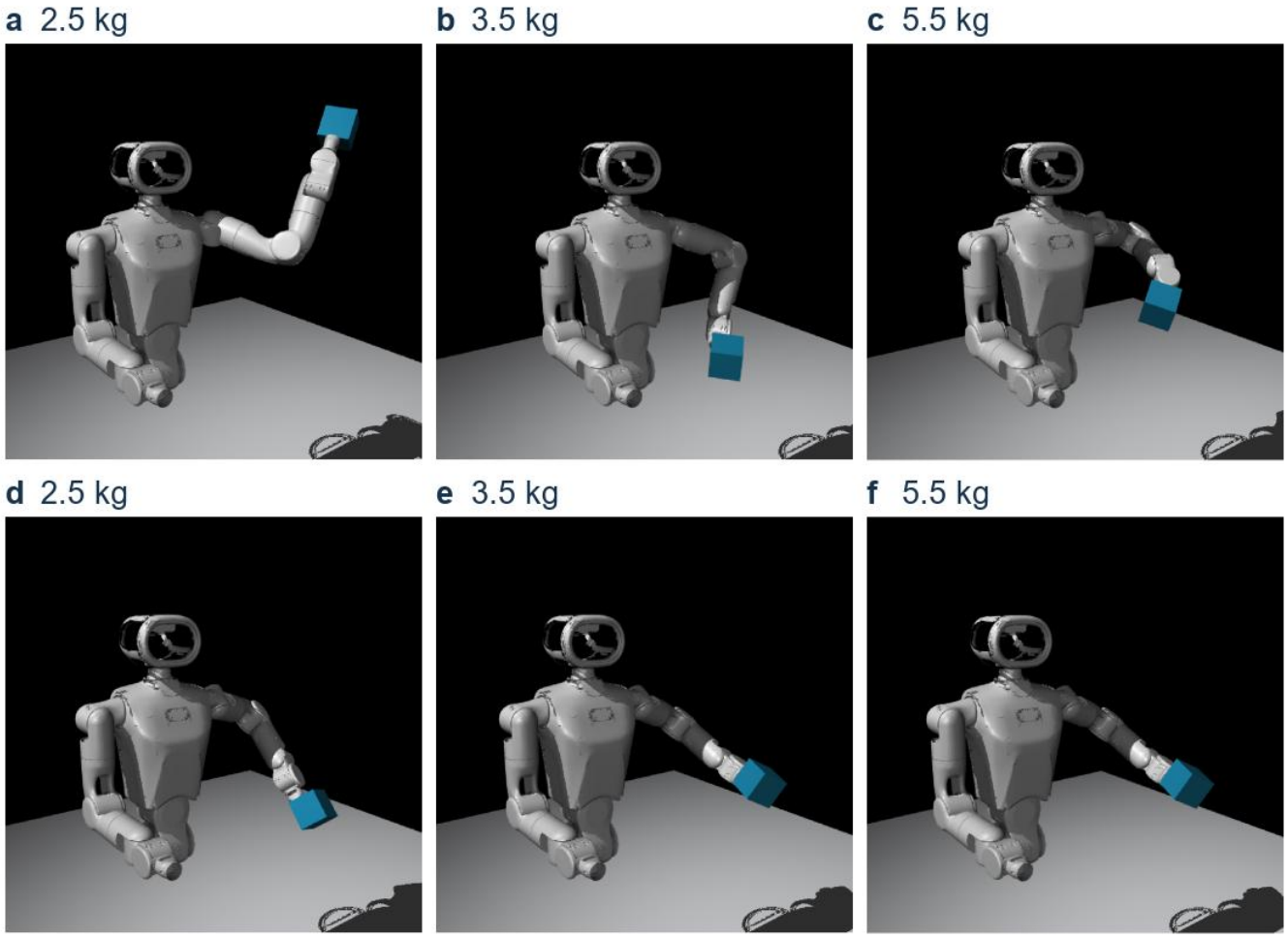


图 6.4. 单臂连续负载运动的仿真设计。每列展示同一载荷下的两个姿态：（a、d）2.5 kg；（b、e）3.5 kg；（c、f）5.5 kg。左臂具有七个自由度，上半身与右臂固定。载荷质心距第 7 关节输出轴 11 cm。来源：RoboParty [21]。

6.3.1 实物负载运动

台架将载荷固定于臂端，并执行与该载荷对应的任务轨迹。图 6.5 展示三种载荷下的代表性实物姿态，反映肩、肘、腕协同运动过程中载荷位置与姿态的变化。

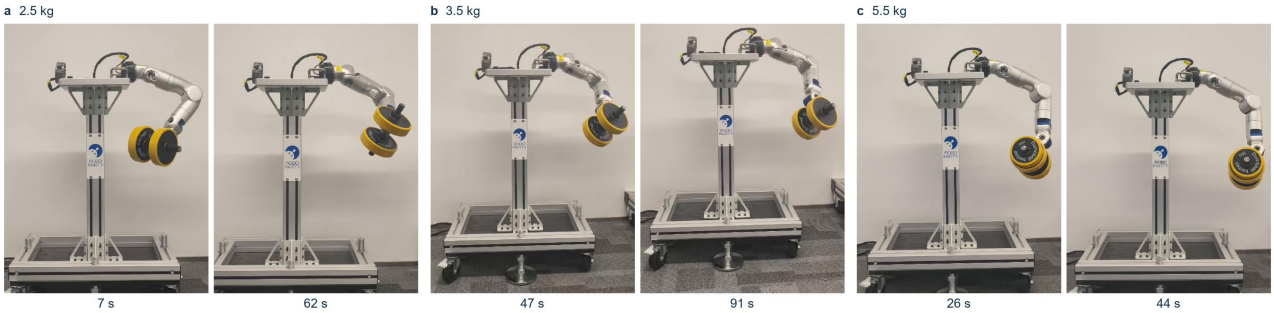


图 6.5. 三种载荷下的单臂实物运动。从左至右，三组相邻帧对（a–c）依次对应 2.5、3.5 和 5.5 kg。各组帧取自相应测试视频，并按时间先后由左至右排列。时间戳相对于各自视频。来源：RoboParty [21]。

负载轨迹以参考速度的 1.5 倍运行，角度幅值不变，理想速度与加速度分别按 1.5 倍和 2.25 倍缩放。2.5 kg 和 3.5 kg 工况的连续记录分别为 125.7 min 和 120.0 min。5.5 kg 测试为 10 min 短时验证，不代表额定连续负载。所分析的七个关节均未报告故障码；失败记录计入内部统计，本节不展开。

6.3.2 关节响应与记录性能

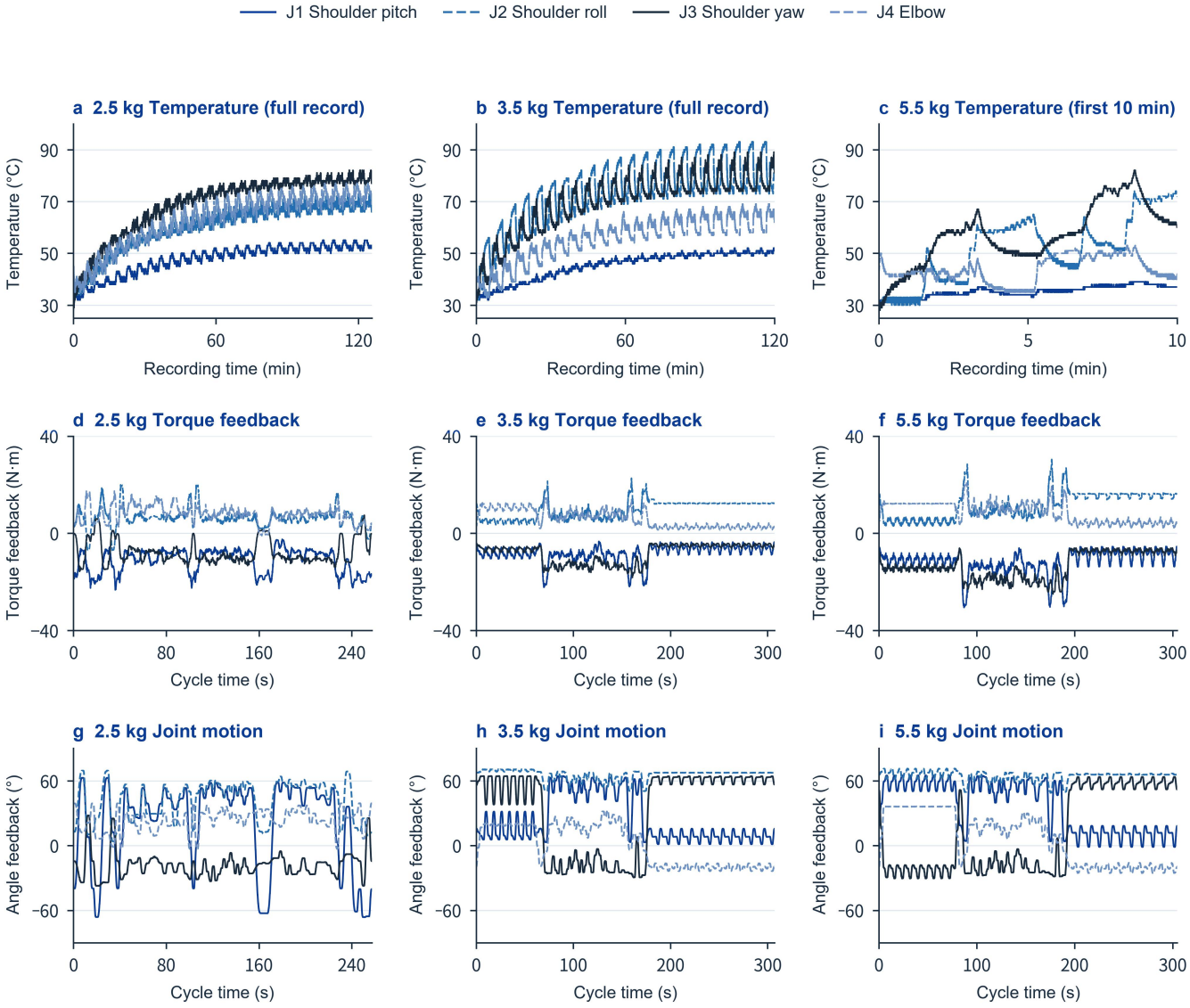


图 6.6. 单臂连续负载下的主要关节响应。各列对应 2.5、3.5 和 5.5 kg，每种载荷各选一次试验。三个肩关节和肘关节记为 J1–J4。（a–c）设备反馈温度：2.5 kg 和 3.5 kg 为完整记录，5.5 kg 为前 10 min。（d–f）首个完整工作循环的反馈转矩，以及（g–i）同一循环的关节角度，时间从循环开始计。曲线保留所示区间内全部采样点；转矩为执行器通道的驱动器反馈转矩。来源：RoboParty [21]。

在所测试任务轨迹下，单臂完成了 2.5 kg 和 3.5 kg 的持续动态运行。5.5 kg 任务载荷下的 10 min 动态记录证明短时运行情况，不构成连续工作载荷额定值。

6.4 测试软件与证据管理

现有记录未包含温升限值、报警、松动、磨损或线束检查的独立完整报告；部分温升较小，在可辨识的图示通道中予以保留。连续测试要求设备执行保持独立，同时归档与查询需适应网络中断和大规模时序数据。因此，软件将运动控制、本地采集和集中证据管理分离（图 6.7）。桌面客户端通过本地网关访问设备服务；网关与共享服务协调 PLC 和 CAN 资源的访问，上传、文件处理和曲线查询则独立调度。

原始证据的保存不依赖网络可用性。每个工位首先在本地保留原始 CSV 文件及执行配置。操作人员核实测试条件并显式提交记录后，通过专用 reliability_v1 接口归档证据。SQLite 持久化保存核实快照和上传状态。可续传的分块上传与回执核对支持中断恢复，使远程归档可从已有本地记录继续。

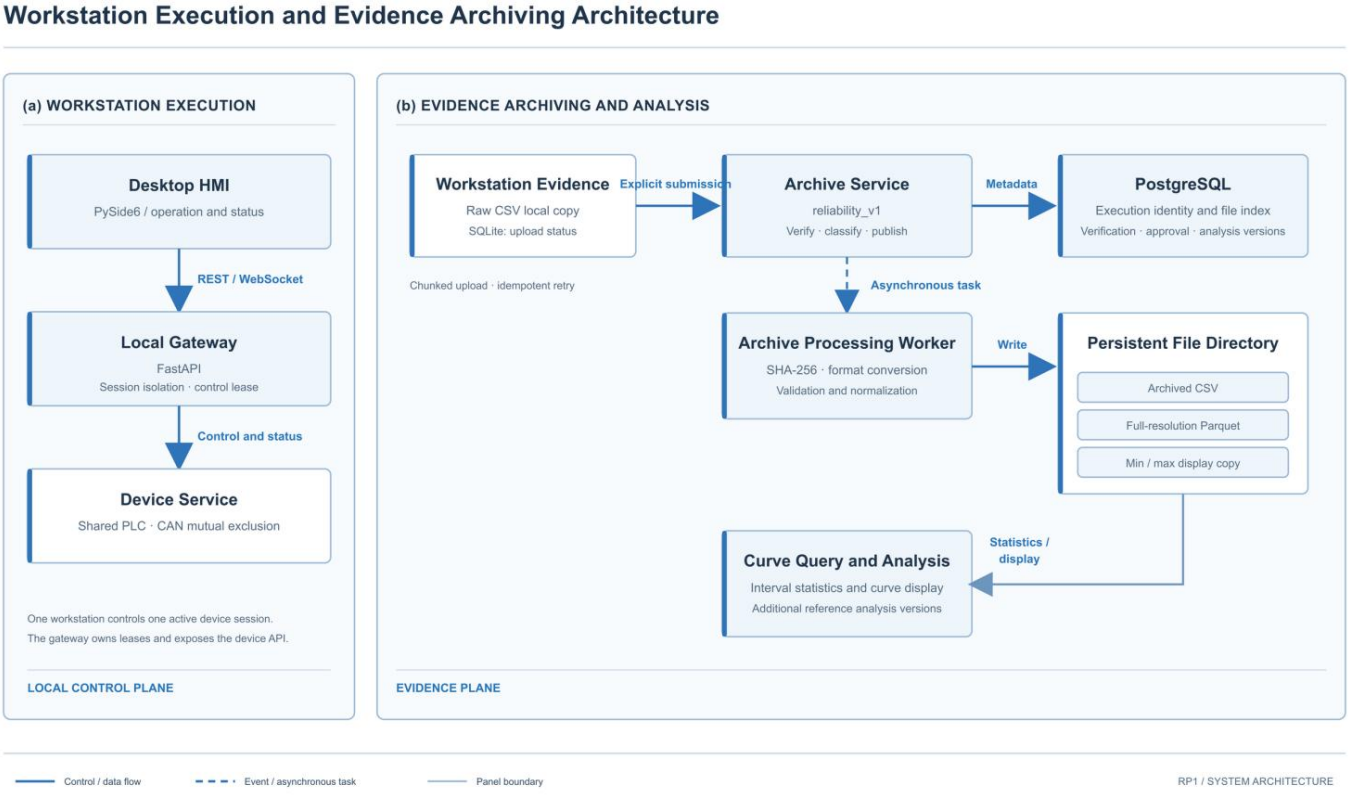


图 6.7. 测试软件与证据数据架构。工位负责设备执行和本地证据，平台负责文件归档、版本关联、审核与查询。实线箭头表示控制或数据流，虚线箭头表示异步任务。来源：RoboParty [21]。

测试条件核实与分析可在试验后更新，但测量事实必须保持可追溯。因此，数据层将原始文件与解释版本分离。PostgreSQL 保存执行标识、文件索引、证据哈希及核实、审批和分析版本。原始 CSV 和派生查询文件存放于独立的持久目录。原始测量数据保持只读，修正与重新分析均追加版本。审核冻结相应快照，审批后同时发布执行、结果与审核记录。

对于长时记录，显示效率与统计精度分别处理。后台生成用于视口浏览的 Min/Max 显示副本，区间统计、样本查询和导出则读取全分辨率数据。正式统计仅纳入已审批的测试结果。待审批、被驳回以及正式条件不完整的“其他”测试仍保留原始证据。曲线检查、结果审核和正式发布因此各自具有明确的数据依据。

7 局限性与未来工作

本报告的证据包括 CAD 与 URDF 数值、软件配置频率、计算结果、仿真记录和实物测试。完整的故障注入与验收矩阵不在报告范围内，其缺失不改变已测负载曲线的解释。标称通信预算不能证明端到端延迟，单凭台架运行时长也不能证明现场可靠性或平均无故障时间（MTBF）。各项结果均受所述硬件、负载、控制器和环境条件约束。

后续工作应保留受版本控制的试验记录，并扩展组合关节运动、热耐久、供电切换及停止响应的可重复检查。感知与交互策略还需开展面向 RP1 的评估。这些均为计划扩展，不属于新增已完成测试。

8 结论

RP1 将模块化机械、配电、设备抽象和运动学习流程集成为人形机器人研究平台。24 自由度与 28 自由度本体配置共享下半身架构，并支持不同的手臂和感知模块。本文所述流程将本体配置与模型准备、运动学习、部署及特定工况下的模块测试关联。可重复使用要求交付配置与模型一致，并为每项结果保留设置和证据。现有记录不构成对无限制负载能力或现场可靠性的证明。

附录

附录 A 测试方法与计划工况

本方案概要汇总第 6 节内容，并列明后续评估应保留的条件。它不是完整、可复现的测试规程，也不引入新的结果。

耐久测试：固定模块、夹具、载荷、轨迹、控制器和时长。记录温度、反馈转矩、跟踪误差、故障及测试后检查结果；冷却和电池更换时间与有效运行时间分开记录。

供电与停止：明确供电配置、初始状态、触发条件和恢复顺序。使用同步时间戳采集电气与运动响应，并在测试前确定验收限值。

任务评估：区分实物试验与仿真运行。保留初始条件、载荷、策略版本、成功判据和独立试验次数。单次运行内的重复循环不视为独立实验。

附录 B 配置检查

本体自由度、手臂选型、末端执行器和感知模块须与 CAD/BOM 及 URDF 或 MJCF 版本一致。核查关节名称、顺序、方向、零位、限位和并联踝变换。

记录固件、主机镜像、总线分配、控制频率、策略检查点和保护设置。日志必须标明实际配置；按适用测试规程检查停止与恢复路径。

附录 C RP Hand

C.1 配置与规格

RP Hand 具有 11 个机械自由度，其中六个主动、五个耦合。拇指具有主动外展和屈曲，其余各指具有主动屈曲。自研无刷空心杯模组、连杆机构、微型编码器和多轴驱动器集成于手内。RP Hand 安装于 RP1 腕部，规格见表 C.1 [20]。



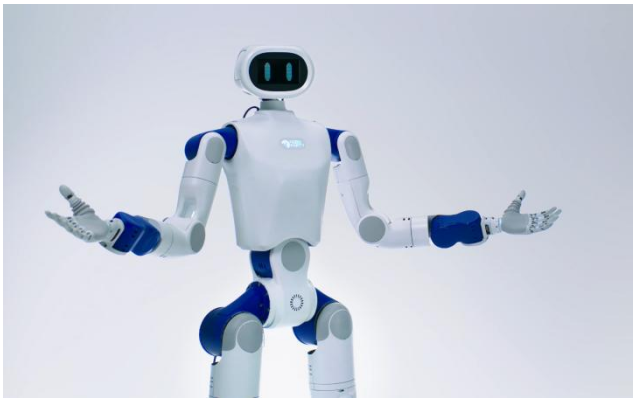


图 C.1. RP Hand 与 RP1 的集成。来源：RP Hand [20]。

表 C.1. RP Hand 结构与电气规格。

参数	规格
尺寸	147.54 x 73.53 x 26.35 mm
质量	379 ± 10 g
机械自由度与主动轴	11 个机械自由度；6 个主动轴和 5 个被动 / 耦合自由度
传动方式	蜗轮蜗杆
拇指活动范围	外展：0 – 87.5° ；屈曲：0 – 65°
其余手指屈曲范围	0 – 72°
角度分辨率	1°
输入电源	12 V（−10%）至 48 V（+10%）
静态 / 最大电流	<= 0.1 A / <= 2.5 A
最短张合时间	<= 0.7 s

C.2 尺寸与电气接口

RP Hand 通过 CAN-FD 连接，线缆沿机器人内部布置。六针腕部连接器的 1、2 脚为 VDC，5、6 脚为 GND，3、4 脚分别为 CANH 和 CANL。图 C.2 给出尺寸及引脚定义。

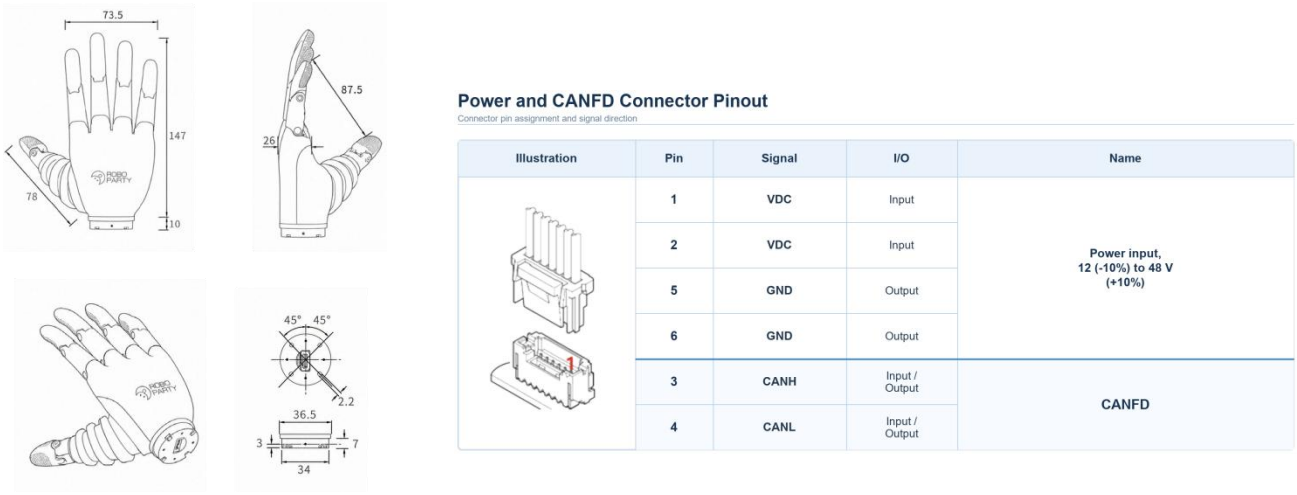


图 C.2. RP Hand 尺寸与连接器引脚定义。来源：RP Hand [20]。

C.3 软件与开发接口

上位机调试软件、视觉手势演示及 C++/Python SDK 支持调试与集成。

上位机软件显示关节状态、配置参数，并通过数值或滑块控制各轴。三维模型跟随关节位置变化，示教队列可记录、导入、导出和回放。

视觉手势演示提供 Windows 和 Linux x86-64 应用程序。

roboparty_dexhand 提供六轴位置 / 角度、速度和电流限值的 C++/Python 指令，以及位置、电流、状态和报警反馈。在 Linux x86-64 和 ARM64 上支持 CAN-FD，并随 RoboParty 镜像交付。ROS 2 节点支持双手控制。

左、右手 CAD、URDF 和 MJCF 用于装配检查与模型集成（表 C.2）。

表 C.2. RP Hand 软件与模型。

软件 / 模型	功能	平台 / 格式
上位机调试工具	通信、关节控制、参数与状态	Windows
视觉手势演示	基于视觉的手势识别	Windows / Linux
SDK	六轴控制与反馈	Linux x86-64 / ARM64; C++ / Python
三维结构	左、右手几何与安装	STL
URDF / MJCF	机器人模型加载	URDF / MJCF

原稿正文将传动描述为连杆传动，规格表则列为蜗轮蜗杆传动。两项描述均予保留，待依据实际交付的 RP Hand 版本确认。

附录 D 参考文献

编号参考文献列明出版物、标准、软件和工程记录。除条目另有注明外，经核查在线来源的默认访问日期为 2026 年 10 月 17 日。未公开或无法获取的来源已注明；来源标注本身不构成对所报告性能的独立验证。

[1] K. M. Lynch and F. C. Park, Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017. modernrobotics.northwestern.edu/nu-gm-book-resource/.

[2] J. P. Araujo, Y. Ze, P. Xu, J. Wu, C. K. Liu, "Retargeting Matters: General Motion Retargeting for Humanoid Motion Tracking," arXiv:2510.02252, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2510.02252. arxiv.org/abs/2510.02252.

[3] RoboParty, "RP1 hardware: mechanical source files, drawings, and configuration bills of materials," 工程仓库，2026 年。所提供稿件未锁定版本。github.com/Roboparty/rp1_hardware.

[4] B. Katz, J. Di Carlo, and S. Kim, "Mini Cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA), 2019, pp. 6295-6301. doi: 10.1109/ICRA.2019.8793865. doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793865.

[5] H. Shi, W. Wang, S. Song, C. K. Liu, "ToddlerBot: Open-Source ML-Compatible Humanoid Platform for Loco-Manipulation," arXiv:2502.00893, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2502.00893. arxiv.org/abs/2502.00893.

[6] G. Pavlakos, V. Choutas, N. Ghorbani, T. Bolkart, A. A. A. Osman, D. Tzionas, and M. J. Black, "Expressive body capture: 3D hands, face, and body from a single image," in Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019, pp. 10975-10985. smpl-x.is.tue.mpg.de/.

[7] RoboParty, "RP1_description: URDF, MJCF, and mesh models," 软件仓库，2026 年。原稿未锁定提交版本。github.com/Roboparty/RP1_description.

[8] Y. Zhao, "Detailed workflow for exporting URDF from SolidWorks," ver. 1.0，RoboParty 内部工作流程文档，2026 年。未公开，需内部访问权限。

[9] RoboParty, "human-humanoid-tools (hhtools)," 软件及项目文档，2026 年。核查的实现版本为提交 6e6588c（2026 年 10 月 16 日），访问日期为 2026 年 10 月 19 日。代码仓库与 README | 项目页面 | Agent 接口。参数和性能与版本相关。

[10] Isaac Lab contributors, "Isaac Lab 3.0.0-EA documentation: environment and humanoid benchmarks; Warp environment performance," 在线技术文档，2026 年。上游基准证据，非 RP1 硬件基准。isaac-sim.github.io/IsaacLab/v3.0.0-EA/source/setup/environments.html#benchmarks | isaac-sim.github.io/IsaacLab/v3.0.0-EA/source/concepts/warp_environments.html#performance-comparison.

[11] Q. Liao, T. E. Truong, X. Huang, Y. Gao, G. Tevet, K. Sreenath, C. K. Liu, "BeyondMimic: From Motion Tracking to Versatile Humanoid Control via Guided Diffusion," arXiv:2508.08241, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2508.08241. arxiv.org/abs/2508.08241.

[12] RoboParty, "MimicLite," 动作跟踪软件仓库，2026 年。原报告引用 v1.1；基准设置与成本计算基准需查阅对应发布记录。github.com/Roboparty/MimicLite.

[13] RoboParty, "UFO," 无监督本体基础模型软件仓库，2026 年。所报告 RP1 结果对应项目配置，未提供提交版本及完整试验记录。github.com/Roboparty/UFO.

[14] RoboParty, "P-BFM and I-BFM perception and interaction development materials," 未公开项目记录，2026 年。标题由工作稿提供，作者、版本及公开出版物标识尚不可得。

[15] RoboParty, "INTACT intent and task-organization materials," 未公开项目记录，2026 年。标题由工作稿提供，作者、版本及公开出版物标识尚不可得。

[16] International Organization for Standardization, ISO 11898-1:2015, Road Vehicles - Controller Area Network (CAN) - Part 1: Data Link Layer and Physical Signalling, 2015。此为工程资料引用的版本，不表示其为最新版本。www.iso.org/standard/63648.html.

[17] USB Implementers Forum, Universal Serial Bus Specification, Revision 2.0, 2000; and Universal Serial Bus 3.0 Specification, Revision 1.0, 2008。协议标称速率与应用层实测吞吐量须加以区分。www.usb.org/document-library/usb-20-specification | www.usb.org/document-library/usb-30-specification.

[18] IPC, IPC-2221, Generic Standard on Printed Board Design。工程稿件未说明载流能力计算所依据的版本，仍需确认。www.ipc.org/ipc-design-standards.

[19] ROS contributors, “URDF XML documentation” and “SolidWorks to URDF exporter,” 软件文档。wiki.ros.org/urdf/XML | github.com/ros/solidworks_urdf_exporter.

[20] RoboParty, “RP Hand product specifications, mechanical models, URDF/MJCF, and SDK materials,” 内部产品文档，2026 年。附录 C 中的尺寸和额定值为供应商规格，未提供外部测试证书或文档版本。

[21] RoboParty 工程团队，“RP1 electrical, embedded, algorithm, and reliability evidence package,” 未公开工程记录，2026 年。包括 RP1.3.2/RP1.3.4 CAD、BOM、PCB/Gerber 数据、仿真配置、2026 年 10 月 12 日单臂测试记录，以及截至 2026 年 10 月 17 日的 reliability_v1 工作区状态。需内部访问权限，证据类别索引见附录 G。

[22] NVIDIA, “SOMA-Retargeter,” 软件仓库。github.com/NVIDIA/SOMA-Retargeter.

[23] Amazon FAR, “holosoma,” 人形机器人学习与重定向软件仓库。github.com/amazon-far/holosoma.

[24] Newton contributors, “Newton,” 物理仿真软件仓库。github.com/newton-physics/newton.

[25] NVIDIA, “Warp,” GPU 仿真与计算框架。github.com/NVIDIA/warp.

[26] N. Mahmood, N. Ghorbani, N. F. Troje, G. Pons-Moll, M. J. Black, "AMASS: Archive of Motion Capture as Surface Shapes," arXiv:1904.03278, 2019. doi: 10.48550/arXiv.1904.03278. arxiv.org/abs/1904.03278 | amass.is.tue.mpg.de/.

[27] F. G. Harvey, M. Yurick, D. Nowrouzezahrai, C. Pal, "Robust Motion In-betweening," arXiv:2102.04942, 2021. doi: 10.48550/arXiv.2102.04942. arxiv.org/abs/2102.04942 | doi.org/10.1145/3386569.3392480 | github.com/ubisoft/ubisoft-laforge-animation-dataset.

[28] I. Mason, S. Starke, and T. Komura, “Real-time style modelling of human locomotion via feature-wise transformations and local motion phases,” ACM Transactions on Graphics, vol. 41, no. 3, 2022. doi: 10.1145/3522618. 关联资源：100STYLE。doi.org/10.1145/3522618 | www.ianxmason.com/100style/.

[29] J. Saito, J. Li, M. de Ruyter, et al., "SOMA: Unifying Parametric Human Body Models," arXiv:2603.16858, 2026. doi: 10.48550/arXiv.2603.16858. arxiv.org/abs/2603.16858 | huggingface.co/datasets/bones-studio/seed.

[30] J. Lin, A. Zeng, S. Lu, Y. Cai, R. Zhang, H. Wang, L. Zhang, "Motion-X: A Large-scale 3D Expressive Whole-body Human Motion Dataset," arXiv:2307.00818, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2307.00818. arxiv.org/abs/2307.00818 | github.com/IDEA-Research/Motion-X.

[31] K. Lee, S. Kim, Y. Lee, et al., "PHUMA: Physically Reliable Humanoid Locomotion Dataset," arXiv:2510.26236, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2510.26236. arxiv.org/abs/2510.26236 | github.com/DAVIAN-Robotics/PHUMA.

[32] Z. Shen, H. Pi, Y. Xia, et al., "World-Grounded Human Motion Recovery via Gravity-View Coordinates," arXiv:2409.06662, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2409.06662. arxiv.org/abs/2409.06662 | doi.org/10.1145/3680528.3687565 | github.com/zju3dv/GVHMR.

[33] J. Li, J. Wu, C. K. Liu, "Object Motion Guided Human Motion Synthesis," arXiv:2309.16237, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2309.16237. arxiv.org/abs/2309.16237 | huggingface.co/datasets/YaojieShen/hhtools_omomo.

[34] R. Yu, X. Lin, J. Ma, et al., "OmniContact: Chaining Meta-Skills via Contact Flow for Generalizable Humanoid Loco-Manipulation," arXiv:2606.26201, 2026. doi: 10.48550/arXiv.2606.26201. arxiv.org/abs/2606.26201 | huggingface.co/datasets/lightcone02/OmniContact-Dataset.

[35] L. Yang, X. Huang, Z. Wu, et al., "OmniRetarget: Interaction-Preserving Data Generation for Humanoid Whole-Body Loco-Manipulation and Scene Interaction," arXiv:2509.26633, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2509.26633. arxiv.org/abs/2509.26633.

[36] M. Xu, Y. Shi, K. Yin, X. B. Peng, "PARC: Physics-based Augmentation with Reinforcement Learning for Character Controllers," arXiv:2505.04002, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2505.04002. arxiv.org/abs/2505.04002 | doi.org/10.1145/3721238.3730616 | huggingface.co/datasets/YaojieShen/hhtools_parc_ms.

[37] MotionDecode contributors, “MotionDecode,” 动作数据项目及数据集。原稿未注明版本和发布日期。chingmudata.github.io/MotionDecode/ | huggingface.co/datasets/CMRobot/MotionDecode.

[38] RoboParty, “hhtools demonstration assets,” 项目视频及动画示例，2026 年。图中帧取自原始项目素材。演示图库 | URDF 导入 | 标定 | 批量导出。访问日期：2026 年 10 月 19 日。

[39] RoboParty, “gpt-6-astra-real2sim-workflow,” 软件仓库，2026 年。第 5 节性能表述依据项目报告，稿件未包含准确的运行设置。github.com/Roboparty/gpt-6-astra-real2sim-workflow.

[40] RoboParty, “LabWeft,” 研究工作台软件仓库，2026 年。github.com/Roboparty/LabWeft.

[41] Sim2Real Benchmark, “Humanoid motion-tracking leaderboard,” 在线基准。排名随时间变化，稿件未保留不可变的排行榜快照。egalahad.github.io/sim2real/leaderboard/.

[42] J. M. Soucie et al., "Range of motion measurements: Reference values and a database for comparison studies," Haemophilia, vol. 17, no. 3, pp. 500–507, 2011. doi: 10.1111/j.1365-2516.2010.02399.x. doi.org/10.1111/j.1365-2516.2010.02399.x | archive.cdc.gov/www_cdc_gov/ncbddd/jointrom/index_1715172647.html.

[43] A. Roaas and G. B. J. Andersson, "Normal range of motion of the hip, knee and ankle joints in male subjects, 30–40 years of age," Acta Orthopaedica Scandinavica, vol. 53, no. 2, pp. 205–208, 1982. doi: 10.3109/17453678208992202. doi.org/10.3109/17453678208992202.

附录 E 人形机器人平台索引

本索引的 49 个条目对应图 1.2。身高为图中标称数值，非标准化测量结果。来源说明列明型号版本及待确认条目，星号沿用原图。

* YOMI：120 cm 为作者提供的暂定图示值。其他因代际不同而存在公开参数差异的条目，在来源列中注明。来源链接由图稿制作记录恢复，不表示各平台采用统一测量条件。

编号	平台	身高	规格与图片来源
E01	ROBOTIS MINI	26.9 cm	经销商托管的制造商产品手册，人形套件配置。规格：www.consulta.cz | 图片：emanual.robotis.com
E02	Zeroth M1	49.4 cm	规格为 494 mm，产品图片来自设计媒体。规格：www.zeroth0.com | 图片：www.yankodesign.com
E03	ROBOTIS OP3	51 cm	规格为 510 mm，图片来自经销商。规格：en.robotis.com | 图片：api.robomercato.com
E04	Luvbotics RUMI	65 cm	制造商尺寸图标注为 65 cm。规格：www.luvbotics.com | 图片：luvbotics.com
E05	HighTorque Mini Pi Plus	68 cm	产品页面标注 680 mm，商店资料亦有 65 cm 的表述，须区分版本。规格：www.hightorque.cn | 图片：store.hightorque.cn
E06	Zeroth Bridge	88 cm	规格为 88 cm，图片来自公开产品报道。规格：zeroth-openbridge.com | 图片：n.sinaimg.cn
E07	PrimeBOT Q1	88 cm	规格为 88 cm，采用低分辨率官方图片。规格：www.primebot.com | 图片：t-vcsh-www-tos-01.tos-cn-shanghai.volces.com
E08	Lumos Xiaoming	89 cm	89 cm 来自新闻报道，图片来自官方品牌资料。规格：www.dutenews.com | 图片：www.lumosbot.tech
E09	Booster K1	95 cm	产品页面标注约 95 cm。规格：www.booster.tech | 图片：www.booster.tech
E10	Noetix Bumi	98 cm	规格为 98 cm，图片来自经销商。规格：www.noetixrobotics.com | 图片：sonnyrobotics.com
E11	PrimeBOT T1	100 cm	规格为 100 cm，站立帧取自制造商动作序列。规格：www.primebot.com | 图片：www.primebot.com
E12	Fauna Robotics Sprout	107 cm	制造商论文标注约 107 cm，图片来自经销商。规格：arxiv.org | 图片：valumech.com
E13	Noetix N2	118 cm	保留 118 cm，部分资料取整为 120 cm。图片来自经销商。规格：www.noetixrobotics.com | 图片：sonnyrobotics.com

编号	平台	身高	规格与图片来源
E14	Luvbotics YOMI	120 cm*	120 cm 为作者提供的暂定排版数值，并非经核实的制造商身高参数。规格：luvbotics.com | 图片：cdn.luvbotics.com
E15	JAKA pi	122 cm	规格为 1220 mm。规格：www.jaka.com | 图片：www.jaka.com
E16	Unitree R1	123 cm	所保留产品页面标注 1230 mm，不同配置有所差异。规格：www.unitree.com | 图片：gmo-humanoid.shop
E17	Galbot ET1	125 cm	规格为 1250 mm。规格：www.galbot.com | 图片：oss-cn-beijing.galbot.com
E18	AgiBot Lingxi X2	131 cm	规格为 1310 mm。规格：www.agibot.com.cn | 图片：agibot.com
E19	Unitree G1	132 cm	所保留当前页面标注 1320 mm，与早期资料存在差异。规格：www.unitree.com | 图片：unitree.ru
E20	Tiangong Omni	135 cm	规格为 135 cm。规格：www.x-humanoid.com | 图片：www.x-humanoid.com
E21	RoboParty RP1	135 cm	作者提供的平台身高与渲染图 [21]。
E22	HONOR Yuanqi A1	136.9 cm	新闻媒体援引制造商数据报告为 136.9 cm，图片来自官方品牌资料。规格：www.bjnews.com.cn | 图片：www-file.honor.com
E23	Galaxea Kengo	139.6 cm	规格为 1396 mm，图片取自产品发布资料。规格：galaxea-dynamics.com | 图片：file.aibangbots.com
E24	Booster T2	140 cm	产品页面标注约 140 cm。规格：www.booster.tech | 图片：www.booster.tech
E25	Noetix E1	140 cm	所保留当前文档为 1400 mm，早期资料为 1360 mm。须匹配图片与版本。规格：web.noetixrobotics.com | 图片：sonnyrobotics.com
E26	ENGINEAI PM01	140 cm	所保留当前文档约为 1400 mm，早期为 1388 mm。规格：engineai.com.cn | 图片：cn-engineai-1304599088.cos.ap-guangzhou.myqcloud.com
E27	Boston Dynamics Atlas HD	150 cm	旧款液压 Atlas HD，2024 年退役。身高及署名 Boston Dynamics 的照片来自 IEEE ROBOTS guide，与 190 cm 的 2026 年量产 Atlas 不同。规格：robotsguide.com | 图片：cdn.sanity.io
E28	Lumos Robotics LUS2	160 cm	当前 LUS2 官方产品页面渲染图，带有 LUS II 2+ 标记；官方页面身高为 160 cm。规格：www.lumosbot.tech | 图片：www.lumosbot.tech
E29	LimX Dynamics Luna	160 cm	官方规格为 160 cm。全身产品原始渲染图来自 Luna 官方页面，仅去除背景。规格：www.limxdynamics.com | 图片：limx-video-oss.limxdynamics.com
E30	Fourier GR-1	165 cm	GR-1 官方尺寸为 1650 × 524 × 325 mm，产品渲染图来自经销商。规格：support-old.fftai.com | 图片：sonnyrobotics.com
E31	Fourier GR-3	165 cm	图稿制作清单保留了对应型号的来源。规格：support.fftai.com | 图片：sonnyrobotics.com
E32	LimX Dynamics Oli	165 cm	图稿制作清单保留了对应型号的来源。规格：www.limxdynamics.com | 图片：aifitlab.com
E33	1X NEO	168 cm	官方身高为 5 ft 6 in，即 167.64 cm，取整为 168 cm。规格：www.1x.tech | 图片：newatlas.com
E34	AgiBot A2 Ultra	169 cm	图稿制作清单保留了对应型号的来源。规格：agibot.com | 图片：agibot.com

编号	平台	身高	规格与图片来源
E35	AgiBot A3	173 cm	图稿制作清单保留了对应型号的来源。规格：agibot.com | 图片：agibot.com
E36	Apptronik Apollo	173 cm	初代 Apollo，非 Apollo 2。身高为 5 ft 8 in，即 172.72 cm，取整标注。规格：apptronik.com | 图片：assets.website-files.com
E37	Figure Figure 03	173 cm	当前 Figure 官方页面为 5 ft 8 in，即 172.72 cm，取整为 173 cm。照片为 Figure 03 发布图。规格：www.figure.ai | 图片：ixbt.online
E38	Tesla Optimus Gen 2	~173 cm	公开资料中的近似身高，来源为 IEEE ROBOTS guide，照片署名为制造商。规格：robotsguide.com | 图片：cdn.sanity.io
E39	ENGINEAI T800	173 cm	图稿制作清单保留了对应型号的来源。规格：www.engineai.com.cn | 图片：cn-engineai-1304599088.cos.ap-guangzhou.myqcloud.com
E40	Fourier GR-2	175 cm	GR-2 官方身高为 1.75 m，产品渲染图来自 RBTX 商城。规格：support-old.fftai.com | 图片：images.cdn.europe-west1.gcp.commercetools.com
E41	Agility Robotics Digit (V4)	175 cm	2023 年商用 Digit，带头部和双手，非 2026 年 V5。部署合作伙伴 GXO 报告为 5 ft 9 in（175.26 cm），取整为 175 cm。产品抠图来自经销商。规格：gxo.com | 图片：api.robgen.com
E42	Kepler K2	175 cm	双足 K2，当前官方规格为 175 cm。规格：www.gotokepler.com | 图片：images.cdn.europe-west1.gcp.commercetools.com
E43	PAL Robotics TALOS	175 cm	图稿制作清单保留了对应型号的来源。规格：pal-robotics.com | 图片：pal-robotics.com
E44	UBTECH Walker S2	176 cm	图稿制作清单保留了对应型号的来源。规格：docs.ubtrobot.com | 图片：images.cdn.europe-west1.gcp.commercetools.com
E45	Xiaomi CyberOne	177 cm	2022 年 CyberOne，小米发布资料中的身高为 177 cm。采用 iF Design 项目 615888 中小米提交的原始参赛渲染图。规格：new.c.mi.com | 图片：ifdalivestorage.blob.core.windows.net
E46	NEURA Robotics 4NE1	180 cm	图稿制作清单保留了对应型号的来源。规格：neura-robotics.com | 图片：neura-robotics.com
E47	Unitree H1	180 cm	初代 H1，官方身高约为 180 cm，非 H1-2（178 cm）。规格：www.unitree.com | 图片：robostore.com
E48	Unitree H2	182 cm	官方技术表为 1820 mm。采用人脸造型的 H2，非 H2 PLUS。规格：www.unitree.com | 图片：www.unitree.com
E49	Boston Dynamics Atlas (2026)	190 cm	2026 年量产设计与规格，非 2024 年电驱原型。规格：bostondynamics.com | 图片：bostondynamics.com

软件另支持以下平台，但未提供可比身高。

机构	型号	身高	位置 / 来源
RoboParty	RP0	未注明	hhtools 集成列表 [9]
RoboParty	ROBOTO_ORIGIN	未注明	hhtools 集成列表 [9]
Asimov	Asimov 1	未注明	hhtools 集成列表 [9]
Berkeley	Humanoid Lite	未注明	hhtools 集成列表 [9]

附录 F 图表索引

图表按章节编号，并注明来源。内部工程记录与外部基准、产品及解剖参考资料分别标明。

编号	标题与来源
图 1.1	白蓝配色 RP1 三视图。来源：RoboParty [21]。
图 1.2	按标称身高排列的人形机器人，范围为 26.9 – 190 cm；RP1 以蓝色标注。版本及来源见附录 E，各身高数据不采用统一测量规程。
图 1.3	人体姿态、SMPL-X 网格与 RP1 形态。来源：SMPL-X [6] 与 RoboParty [21]。
图 1.4	RP1 执行器分组与 SMPL-X 人体关节的对应关系。来源：SMPL-X [6] 与 RoboParty [21]。解剖图来源：Anatomia，https://anatomia.com.mx/anatomia/lineaOsteo/MicroSitio/Esqueleto/index.html。
图 1.5	ROMOMO 关节模组系列。来源：RoboParty [21]。
图 1.6	五种代表性运动工况下 RMM6562-2E 的工作点。来源：RoboParty [21]。
图 1.7	末端负载 5.5 kg、侧平举与抬肘组合运动下 RMM8462-2E 的工作点。来源：RoboParty [21]。
图 1.8	五种代表性运动工况下 RMM10062-2E 的工作点。来源：RoboParty [21]。
图 1.9	抱箍接口与分体抱箍拆卸。来源：RoboParty [21]。
图 1.10	RP1.3.4 关节轴分组、外壳布局与运动间隙区域。P：俯仰；R：横滚；Y：偏航。轴线位置与间隙区域为示意。来源：RoboParty [21]。
图 1.11	人体与 RP1 肘关节屈曲。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.12	左臂几何与关节原点的投影间距。S：肩俯仰；E：肘；Wp：腕俯仰。尺寸依据所提供 CAD 图纸及图示姿态。来源：RoboParty [21]。
图 1.13	腰部架构：EngineAI T800、Unitree R1、Unitree G1 EDU 与 RP1。P：俯仰；R：横滚；Y：偏航。型号版本按图中标注，图片未按统一比例绘制。来源：所提供的对比图稿；制造商来源见附录 E；RP1 [7, 21]。
图 1.14	髋部参考架构与 RP1 关节布局。轴线示意表示中立姿态方向，不表示轴线原点重合。来源：所提供的对比图稿及已标注机器人来源；解剖图署名 Omnia Medical；RP1 [7, 21]。
图 1.15	人体与 RP1 髋关节内收。人体参考：[43]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.16	人体与 RP1 膝关节屈曲。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.17	URDF 零位姿态下的左腿几何与矢状面轴间距。H：髋俯仰；K：膝；Ap：功能性踝俯仰参考。来源：RoboParty [21]。
图 1.18	人体与 RP1 踝关节背屈。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.19	人体与 RP1 踝关节跖屈。人体参考：[42]；RP1 限位与照片：[21]。
图 1.20	足踝受力图。（a）足部与踝俯仰组件侧视图。（b）单独足部的前视图。重力项依据相应隔离体边界确定，力臂取决于工况。来源：RoboParty [21]。
图 1.21	DFM、DFA 与 DFS 框架。来源：RoboParty [21]。
图 1.22	材料分级与关节模组系列。来源：RoboParty [21]。
图 1.23	RP1 本体部件。来源：RoboParty [21]。
图 1.24	RP1 核心结构部件。来源：RoboParty [21]。
图 1.25	核心部件细节。来源：RoboParty [21]。
图 1.26	RP1 腕部接口与三种可替换末端执行器。来源：RoboParty [21]。
图 1.27	RP1 头部感知模组拆卸。来源：RoboParty [21]。
图 1.28	感知、数据采集和运动控制头部配置。来源：RoboParty [21]。
图 1.29	RP1 腿部模组的部分快拆接口。来源：RoboParty [21]。
图 1.30	头部—躯干连杆。来源：RoboParty [21]。
图 1.31	连杆层级。来源：RoboParty [21]。

编号	标题与来源
图 1.32	主要关节轴与旋转方向。红色箭头表示轴向，绿色箭头表示相应旋转方向。该图用于对照机械装配检查关节约定。来源：RoboParty [21]。
图 1.33	CAD 简化前后的胸壳几何。（a）原始模型，突出显示细节区域。（b）用于导出的简化模型。来源：RoboParty [21]。
图 1.34	过度网格减面造成的表面损伤示例。突出显示的头部—躯干区域说明，减面后需要进行外观检查与接触边界核查。来源：RoboParty [21]。
图 2.1	RP1 电气拓扑：供电、通信与停止路径。来源：RoboParty [21]。
图 2.2	MAIN 与 BACKHUB 的顶层、底层 Gerber 渲染图，未采用统一比例。来源：RoboParty [21]。
图 2.3	HOTSWAP、HANDPlusPro 与 MCAP 的顶层 Gerber 渲染图。来源：RoboParty [21]。
图 2.4	RP1 外部接口前视线稿。来源：RoboParty [21]。
图 2.5	RP1 主电池拆卸与更换。来源：RoboParty [21]。
图 2.6	RP1 停止输入与软件界面示例。来源：RoboParty [21]。
图 3.1	嵌入式执行架构。（a）控制、驱动、操作系统与桥接层。（b）关节指令与执行器反馈路径。来源：RoboParty [21]。
图 3.2	理论 CAN/USB 通信量与有效载荷时序。11.84% 不含组帧及其他延迟，未占用区域不代表经过验证的裕量。来源：RoboParty [21]。
图 3.3	硬件接口与并联关节变换、机器人 BSP 配置，以及 GitHub Actions 和 APT 交付流程。来源：RoboParty [21]。
图 3.4	会话归档、校验和与离线分析，以及通信、恢复与功能检查。虚线路径表示重新分析；覆盖范围不表示已通过验收。来源：RoboParty [21]。
图 4.1	hhtools 动作重定向：搬运、舞蹈、台阶与障碍。来源：hhtools [9, 38]。
图 4.2	RP1 参考动作跟踪。（a）16 个并行环境。（b）单环境策略回放。来源：RoboParty [21]。
图 4.3	已发布的人形机器人基准 [10]。（a）不同物理预设的训练吞吐量。（b）Torch 与 Warp 的环境单步耗时。来源：Isaac Lab 公开基准 [10]。
图 4.4	RP1 腰部、髋部和膝部执行器的转矩—转速包络。来源：RoboParty [21]。
图 4.5	三帧历史观测的两种排列方式：（a）obs-major；（b）frame-major。来源：RoboParty [21]。
图 4.6	左踝解析几何模型。（a）零位姿态。（b）俯仰与横滚组合姿态。来源：RoboParty [21]。
图 4.7	全身姿态跟踪与操作演示。来源：RoboParty [21]。
图 4.8	上肢负载操作。来源：RoboParty [21]。
图 4.9	WBI 开发流程。来源：RoboParty [21]。
图 4.10	视频与关节状态同步回放。来源：RoboParty [21]。
图 6.1	模块化测试台架与快拆夹具，图为设计渲染图。来源：RoboParty [21]。
图 6.2	实物耐久测试动作：上半身摆臂与负载下半身踏步。来源：RoboParty [21]。
图 6.3	50 kg 外部负载蹲起过程中的关节运动、转矩与 12 轴温度。来源：RoboParty [21]。
图 6.4	2.5、3.5 和 5.5 kg 下的单臂连续负载运动仿真设计。来源：RoboParty [21]。
图 6.5	2.5、3.5 和 5.5 kg 下的单臂实物运动。来源：RoboParty [21]。
图 6.6	单臂连续负载下的主要关节响应。来源：RoboParty [21]。
图 6.7	测试软件与证据数据架构。来源：RoboParty [21]。
图 C.1	RP Hand 与 RP1 的集成。来源：RP Hand 资料 [20]。

编号	标题与来源
图 C.2	RP Hand 尺寸与连接器引脚定义。来源：RP Hand 资料 [20]。
表 1.1	RP1 本体配置。
表 1.2	传动特性。来源：RP1 原始设计对比 [21]，为定性比较，结果与配置相关。
表 1.3	执行器集成对比。来源：RP1 原始设计对比 [21]，为定性比较，结果与配置相关。
表 1.4	减速器对比。来源：RP1 原始设计对比 [21]，为定性比较，结果与配置相关。
表 1.5	行星传动布局。来源：RP1 原始设计对比 [21]，为定性比较，结果与配置相关。
表 1.6	RP1 关节限位与人体参考范围。机器人零位和符号与解剖学约定不同，人体参考来源见表下说明。
表 1.7	髋关节串联顺序。
表 1.8	材料选型。
表 2.1	板卡职责。来源：RoboParty 工程记录 [21]。
表 2.2	目标阻抗。来源：PCB 设计参考 [18] 与工程目标 [21]。
表 2.3	接口与标称速率。来源：协议规范 [16, 17] 与接口配置 [21]。
表 3.1	硬件抽象。来源：RoboParty 工程记录 [21]。
表 3.2	测试与检查。来源：RoboParty 工程记录 [21]。
表 4.1	动作重定向流程对比。来源：重定向方法与软件 [2, 9, 22, 23]。
表 4.2	数据集输入。来源：数据集与项目记录 [9, 26–37]。
表 4.3	策略配置。来源：机器人模型 [7] 与策略配置 [21]。
表 4.4	记录数据。来源：RoboParty 工程记录 [21]。
表 6.1	测试条件与代表性实物记录。来源：RoboParty [21]。
表 C.1	RP Hand 规格。来源：RP Hand 产品规格 [20]。
表 C.2	RP Hand 软件与模型。来源：RP Hand SDK 和模型记录 [20]。

附录 G 工程证据索引

编号	工程记录	内容	报告位置	来源
G1	CAD / STEP	整机、腿部、左臂与关节零件	第 1.4–1.7 节	RoboParty 内部工程文件，版本以图注为准
G2	BOM 与图纸	零件、材料、规格与配置	第 1.6 节	RoboParty 内部记录 [3, 21]
G3	RP1_description	URDF、MJCF、网格与配置	第 1.7 节及第 4 章	公开仓库 [7]，原稿未锁定提交版本
G4	hhtools	动作重定向、标定、适配器与质量分析	第 4.1 节	公开仓库 [9]，本文所述实现对应提交 6e6588c。实验运行版本需另行记录。
G5	Isaac Lab / Newton / PhysX	训练、动力学与回放	第 4.2 节	公开工具 [10, 24, 25] 与项目配置
G6	BeyondMimic / MimicLite / UFO	训练、推理与部署	第 4.2–4.3 节及第 5 章	研究与代码仓库 [11–13]
G7	原理图 / PCB / Gerber	供电、CAN-FD、USB、板卡与接口	第 2 章	RoboParty 内部制造记录 [21]
G8	测试视频与日志	运动、温度、转矩与故障记录	第 6 章	内部实物与仿真记录 [21]，载荷及日期见正文

编号	工程记录	内容	报告位置	来源
G9	reliability_v1 源码	执行、归档、审核与查询	第 6.4 节	截至 2026 年 10 月 17 日的工作区状态 [21]
G10	人形机器人对比	49 款型号及标称身高	第 1.2 节；附录 E	所保留的规格与图片来源清单
G11	RP Hand 资料	结构、接口、模型与 SDK	附录 C	RoboParty 产品与工程资料 [20]