**双足机器人开发方案**

2025.5.18

**一、硬件设计方案**

**1. 主控系统：树莓派5（16GB RAM）**

* 功能定位 ：运行ROS 2 Humble + MoveIt! + MPC控制器，负责全局路径规划与动态步态生成
* 性能优势 ：
  + Cortex-A76 CPU（4核64位）支持多任务并行处理
  + 通过CAN总线与STM32H743VIT6协处理器通信，确保低延迟

**2. 协处理器：STM32H743VIT6**

* 功能定位 ：实时控制6个伺服电机（髋关节×4 + 膝关节×2），采集编码器（AMT102-V）与电流传感器（ACS712）数据
* 关键连接 ：
  + PWM信号输出 ：TIM1\_CH1~CH6（PA8/PA9/PB0/PB1/PE9/PE11）驱动L6234电机驱动板
  + 编码器接口 ：QEI接口（PB6/PB7）解码AMT102-V脉冲

**3. 动力系统**

* 电机 ：TQ-RM150无框力矩电机（髋关节×4 + 膝关节×2）
* 减速器 ：行星减速器（1:100速比，效率≥90%）
* 电源 ：48V锂电池组（20,000mAh）

**二、机械结构设计**

**1. 人体比例与关节自由度**

* 整体身高 ：1.6米（腿部长度83cm，占总高的52%，符合人体比例）
* 关节配置 ：
  + 髋关节 ：3自由度（前后摆动、左右摆动、旋转）
  + 膝关节 ：1自由度（屈伸）
  + 踝关节 ：2自由度（翻转、倾斜）
  + 总计 ：每腿6自由度，共12自由度（左右腿合计）。

**2. 材料与结构优化**

* 大腿 ：碳纤维管材（轻量化+高强度）
* 小腿与足底 ：铝合金支架（兼顾刚性与加工便利性）
* 冲击吸收 ：膝关节与足底添加弹簧缓冲结构，参考鸵鸟腿部“反屈膝”设计

**三、PyBullet仿真验证方案**

**1. PyBullet优势**

* 开源与轻量 ：
  + 支持Python接口，无需高端GPU即可运行。
  + 提供URDF/MJCF模型导入接口，复用CAD设计。
* 强化学习集成 ：
  + 与Stable Baselines3兼容，支持PPO/SAC算法训练复杂步态。
* Sim2Real迁移 ：
  + 通过域随机化（Domain Randomization）缩小仿真与现实差距。

**2. 仿真流程**

1. URDF模型导入
2. Sim环境构建
3. 随机化训练场景
4. RL训练策略
5. Sim2Real迁移
6. 真实机器人验证

**关键参数**

* 输入状态 ：
  + 关节角度（AMT102-V编码器数据）
  + 关节角速度（编码器微分计算）
  + 地面反作用力（ACS712电流传感器间接估算）
* 输出动作 ：
  + 目标关节力矩（发送至STM32H743VIT6协处理器）

**验证技巧**

* 并行仿真 ：
  + 利用PyBullet的GPU并行性，在普通PC上快速训练Ant机器人步态
* 课程学习 ：
  + 从平坦地面逐步过渡到复杂地形，降低训练难度。

**四、硬件选型与成本估算**

| **组件** | **型号/规格** | **数量** | **单价（人民币）** | **总价（人民币）** | **备注** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 主控 | 树莓派5（16GB RAM） | 1 | ¥870 | ¥870 | 官方成品 |
| 协处理器 | STM32H743VIT6（含PCB设计） | 2 | ¥115 | ¥230 | 自制PCB |
| 伺服电机 | TQ-RM150无框力矩电机 | 6 | ¥800 | ¥4,800 | 髋关节×4 + 膝关节×2 |
| 减速器 | 精密行星减速器（1:100速比） | 6 | ¥500 | ¥3,000 | 高效率≥90% |
| 电机驱动板 | L6234 + MOSFET（自制PCB） | 6 | ¥50 | ¥300 | 支持PWM控制 |
| 电源系统 | 48V 20,000mAh锂电池组 | 1 | ¥1,500 | ¥1,500 | 支持高压供电 |
| DC-DC模块 | LM2596（48V→5V/10A） | 1 | ¥80 | ¥80 | 为主控供电 |
| 编码器 | AMT102-V磁编码器 | 6 | ¥120 | ¥720 | 关节角度反馈 |
| 结构件 | 铝合金支架+碳纤维管材 | 1套 | - | ¥1,000 | 含螺丝、轴承、联轴器等 |
| 散热系统 | 小型风扇+散热片 | 6 | ¥30 | ¥180 | 电机与驱动板散热 |
| 线材与接插件 | JST-XH系列 | 若干 | - | ¥150 | 模块化连接 |
| 总计 |  |  |  | ¥11,830 | 按照最高价格计算，实际可能小于此价格 |

**五、软件架构与算法设计**

**1. 控制算法**

**（1）逆运动学（IK）**

* 算法选择 ：
  + 使用MoveIt!的KDL库生成跳跃轨迹，结合Jacobian伪逆法实时调整关节角度
* 代码示例 ：

import numpy as np

def inverse\_kinematics(x, y):

l1 = 0.4 # 大腿长度

l2 = 0.35 # 小腿长度

theta2 = np.arccos((x\*\*2 + y\*\*2 - l1\*\*2 - l2\*\*2) / (2 \* l1 \* l2))

theta1 = np.arctan2(y, x) - np.arctan2(l2 \* np.sin(theta2), l1 + l2 \* np.cos(theta2))

return np.degrees(theta1), np.degrees(theta2)

**（2）混合控制架构**

* 高层策略 ：PyBullet训练跳跃轨迹（如起跳角度、落地缓冲力矩）
* 底层执行 ：MPC控制器负责实时力矩分配，确保安全性

**六、开发计划（2025年6月～2026年5月）**

**阶段1：需求分析与方案设计（2025年6月）**

* 目标 ：明确机器人功能需求、性能指标及技术路线
* 详细任务 ：
  + 确定机器人总高度（1.6米）、腿部长度（83cm）、自由度分配（每腿6DOF
  + 使用SolidWorks或Fusion 360完成腿部CAD模型设计
  + 选型动力系统（TQ-RM150无框电机、行星减速器、L6234驱动板）
* 输出物 ：需求文档、CAD模型、硬件清单、软件架构图

**阶段2：PyBullet仿真验证（2025年7月～2025年10月）**

* 目标 ：完成跳跃与奔跑策略仿真，验证算法可行性
* 详细任务 ：
  + 模型导入 ：将URDF模型导入PyBullet，配置物理参数（如地面摩擦力、关节阻尼）
  + 策略训练 ：
    - 使用Stable Baselines3框架训练PPO/SAC算法，输入为关节角度与力矩反馈
    - 通过课程学习逐步增加环境复杂度（平坦地面→斜坡→障碍物）
  + Sim2Real迁移 ：
    - 在仿真中加入噪声与延迟，模拟真实传感器误差
* 输出物 ：训练模型、仿真测试报告、迁移策略文档

**阶段3：硬件开发（2025年11月～2025年12月）**

* 目标 ：完成电路板设计、机械结构加工及动力系统搭建
* 详细任务 ：
  + STM32协处理器板设计 ：电源管理、PWM信号输出、编码器接口、CAN通信模块
  + 机械结构加工 ：碳纤维大腿、铝合金支架、弹簧缓冲结构
  + 动力系统组装 ：TQ-RM150无框电机与L6234驱动板连接
* 输出物 ：PCB图纸（KiCad格式）、CAD模型、零件组装指南、硬件测试报告。

**阶段4：算法部署与验证（2026年1月～2026年4月）**

* 目标 ：将PyBullet训练的策略部署至真实机器人，实现跳跃与奔跑
* 详细任务 ：
  + 神经网络部署 ：
    - 将训练好的策略转换为轻量化模型（如MobileNet风格的小网络），在树莓派5的CPU上运行
  + 混合控制 ：
    - 神经网络生成目标轨迹，MPC控制器负责底层执行
  + 动态平衡控制 ：
    - 结合编码器与电流反馈，实时调整力矩输出
* 输出物 ：部署代码、整机测试报告、用户手册

**阶段5：系统联调与优化（2026年5月）**

* 目标 ：完成整机调试，解决机械、电气与控制系统的协同问题。
* 详细任务 ：
  + 机械强度测试 ：应变片检测大腿与小腿应力分布，优化碳纤维与铝合金支架连接方式
  + 电源管理优化 ：延长高压电池续航（关闭非必要传感器）
  + 控制算法迭代 ：神经网络与MPC控制器联合优化
* 输出物 ：整机测试报告、用户手册

**七、风险控制与备选方案**

| **风险类型** | **应对措施** |
| --- | --- |
| Sim2Real差异 | 通过域随机化（随机化地面摩擦力、关节阻尼）缩小仿真与真实环境差距 |
| 训练资源不足 | 优先使用PyBullet训练简单步态，后期升级至MuJoCo |
| 实时性不足 | 采用轻量化网络（如MobileNet）降低推理延迟 |