 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8120

Design of a Biped Robot System Based on Model Predictive Control

Huizheng Li Zhuqin Han* Zekai Chen Xingpeng Wu Xiangjie He Zhehao Lai

Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong, 512005, China

Abstract

To advance the field of humanoid robots toward higher-level autonomy and intelligence, this project addresses the demand for high-precision and high-stability motion control in complex dynamic environments, and designs a biped robot system based on Nonlinear Model Predictive Control The system uses an 11-degree-of-freedom (DoF) humanoid robot as the platform, integrates a high-precision Inertial Measurement Unit and joint encoders, and achieves accurate estimation of the robot's attitude through the Extended Kalman Filter. Results show that the system performs excellently in terms of control precision, robustness, and engineering practicality, providing an effective technical solution for solving key issues such as balance control and gait planning of biped robots.

Keywords

Biped robot; Hierarchical control; State estimation

基于模型预测控制的双足机器人系统设计

李辉政 韩竺秦* 陈泽凯 吴星鹏 何祥洁 赖哲浩

韶关学院，中国 · 广东 韶关 512005

摘 要

为推动仿人机器人领域向更高阶的自主化与智能化发展，本项目立足于复杂动态环境下的高精度、高稳定性运动控制需求，设计了一套基于非线性模型预测控制的双足机器人系统。该系统以一个11自由度的仿人机器人为载体，系统集成了高精度IMU与关节编码器，通过扩展卡尔曼滤波实现机器人姿态的精确估计。结果表明，该系统在控制精度、鲁棒性与工程实用性方面均表现出色，为解决双足机器人平衡控制与步态规划等关键问题提供了有效的技术方案。

关键词

双足机器人；分层控制；状态估计

1 引言

随着人工智能、控制算法、传感技术与机械结构设计的深度融合，双足仿人机器人凭借在复杂非结构化环境中不可替代的移动优势，正成为特种作业、家庭服务、康复医疗等领域的核心研发方向，应用前景持续拓宽。

双足机器人可直接替代人类进入灾难救援、高危特种作业等危险恶劣场景[1]，规避爆炸、坍塌、有毒环境等带来的人员安全风险，从根本上保障生命安全。

【基金项目】韶关学院2025年度省级大学生创新创业训练计划项目（项目编号：S202510576029）。

【作者简介】李辉政（2005–），男，中国广东湛江人，在读本科，从事人形机器人研究。

【通讯作者】韩竺秦（1982–），男，中国甘肃会宁人，讲师，从事机器人路径规划研究。

2 机器人自动控制系统整体设计

2.1 整体系统框架设计

智能双足机器人整体系统框架采用硬件为基、软件为核的分层架构设计，硬件部分作为系统运行的物理载体，聚焦高动态响应、精准感知与稳定供电，核心组件选型与设计均贴合双足机器人行走控制需求，控制核心模块采用 x86 工控机上位机、STM32 下位机主控板的双层控制架构。

驱动执行模块搭载 DM 系列智能无刷伺服电机，可精准输出关节力矩，支撑双足机器人在平整地形与复合地形下的步态执行，状态感知模块集成六轴 IMU 惯性测量单元，实时采集机器人躯干姿态、角速度与加速度数据，为后续状态估计与平衡控制提供原始感知信息。

2.2 整体系统硬件结构设计

智能双足机器人的整体硬件采用 11 自由度的仿生机械结构，双腿各 5 个自由度，腰部 1 个自由度。为实现轻量化与高刚性的平衡，机体采用 P3D 打印与铝合金 CNC 加工的混合结构。

为了精确控制机器人的运动，上位机通过 USB 与下位机通信，下位机再通过三路独立的 CAN FD 总线分别控制左腿、右腿及腰部的电机。IMU 模块直接与下位机连接，提供实时的姿态数据。整个系统 6S 锂电池集中供电，确保了各模块间的协同工作。这种分布式、模块化的硬件设计，既保证了系统的计算能力与实时性，也便于后续的维护与升级。

3 系统硬件设计

3.1 主控及核心模块

主控模块平台主要包括：上位机计算平台、下位机控制平台。上位机计算平台作为智能双足机器人的决策与算法核心，需承载复杂控制算法运算、多传感器数据融合及 ROS 生态协同任务，其选型与配置严格匹配双足机器人高能效、高实时性行走需求。下位机控制平台作为执行与感知反馈核心，需实现电机高精度驱动、传感器实时数据采集及上位机指令解析，选用 STM32 开发板，其硬件设计与芯片特性深度匹配双足机器人腿部驱动与多关节协同需求。

3.2 关节驱动与感知模块

3.2.1 关节驱动模块

关节驱动模块选用 DM4340 与 DM6006 智能无刷伺服电机。可直接连接 CAN 总线系统，实现左右腿 10 个关节电机的力矩指令下发与状态反馈。支持 MIT 模式等多种高级控制模式，其高扭矩密度和快速响应特性是实现双足机器人动态行走的关键。作为髋关节与膝关节主驱动电机，承担机器人身体承重、步态启动的核心动力需求，低速大扭矩特性确保单足支撑时不塌陷，EtherCAT 协议的低延迟则保障双腿步态同步；帮助机器人适应路面起伏、修正重心偏移；兼容 CANopen 协议，可与机器人主控系统对接，主驱动电机提供强动力支撑，辅助驱动电机优化动作灵活性，共同构建稳定、高效的双足运动动力体系。

3.2.2 感知模块

感知模块采用六轴 IMU，内置 BMI088 三轴加速度计、三轴陀螺仪自带 EKF 四元数姿态解算 IMU。原始数据通过下位机传输至上位机，与关节编码器数据一起输入到 EKF 状态估计算法中，为 NMPC 控制器提供精确的实时位姿反馈。该 IMU 集成于机器人髋部、小腿等关键躯干或肢体部位，通过 RS485 或 CAN 总线实时传输数据，助力控制系统快速调整关节扭矩与步态规划。在完成动态动作时，它能提供可靠的姿态反馈，配合足底力传感器等设备，帮助双足机器人维持平衡、修正运动轨迹 [2]。

4 软件系统设计

4.1 上位机系统

上位机控制系统整体框图如图 1 所示，基于 ROS 框架，主要由 NMPC 核心控制节点、状态估计节点、硬件接口节点等组成。利用 OCS2 框架来实现 NMPC 算法，将机器人建模为多刚体系统，以最小化质心轨迹跟踪误差和关节力矩能耗为目标，在线求解最优控制序列。状态估计节点运行 EKF 算法，融合 IMU 与编码器数据。硬件接口节点则遵循 ros_control 规范，负责将上层计算出的目标状态通过 USB 指令发送给下位机。

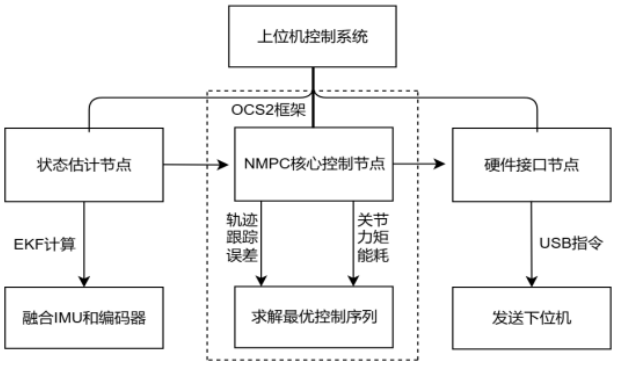


图 1 控制系统框图

4.2 下位机系统

下位机基于 STM32 微控制器与 FreeRTOS 实时操作系统，构建了一个高确定性的多线程执行环境。它通过 USB 虚拟串口高效接收上位机 ros_control 框架下发的目标关节指令数据帧，解析后将其封装成 CAN FD 报文，并利用 STM32 内置的双路高速 CAN FD 控制器下发至各伺服电机。在控制层，通过为左右腿电机创建独立的管理逻辑，并利用 FreeRTOS 的任务调度确保控制回路的硬实时性，系统得以实现对上层规划轨迹的高精度跟踪，保证了单关节控制精度优于 0.1° ，为机器人整体的稳定与协调运动提供了坚实的底层支持。

4.3 非线性模型预测控制

本系统控制策略的核心是非线性模型预测控制，这是一种先进的优化控制方法，尤其适用于像双足机器人这样具有高维、非线性、多重约束的复杂动态系统。NMPC 的核心优势在于其前瞻性，通过预测未来，主动规划出一连串最优的控制动作。

NMPC 算法的基础是一个精确的预测模型，该模型必须能够准确描述施加控制输入，系统未来状态的演变。建立了包含 11 个自由度的全身动力学模型。该模型将机器人视为一个多刚体系统，精确地描述了各连杆的质量、惯性张量以及关节间的运动学和动力学耦合关系。其数学表达形式如下：

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})=S^{T}\tau+J_{c}(q)^{T}F_{c}$$

其中，M(q)：依赖于关节角度 q 的质量矩阵。$q,\dot{q},\ddot{q}$：分别是关节角度、角速度和角加速度的向量。$C(q,\dot{q})$：包含了科里奥利力、离心力和重力项的向量。S^{T}：从驱动器力矩到广义力的映射矩阵。τ：关节驱动器力矩向量。$J_{c}(q)^{T}$：接触点雅可比矩阵的转置。F_{c}：足底与环境之间的接触力向量。带有非线性动力学和多重约束的优化问题，无法求得解

析解，必须通过数值方法进行迭代求解。采用高效序列二次规划求解 ,SQP 通过在每个迭代步中用一个简单的二次规划问题来逼近原始的非线性问题，从而能够快速地收敛到局部最优解。得益于现代 x86 上位机的强大计算能力和高效的 SQP 算法，整个复杂的优化问题能够在几毫秒内求解完毕，满足了机器人控制的实时性要求。

5 系统性能测试

5.1 实验环境设置

为了全面评估系统的性能，我们搭建了虚实结合的实验环境。仿真环境基于 Gazebo 物理引擎，通过 URDF 文件精确构建了机器人的数字孪生模型。物理实验环境则包括机器人实物样机以及用于施加外部干扰的装置。

5.2 实验过程

将设计完成的智能双足机器人放置在实验场地中，进行仿真与实物测试。首先在 Gazebo 中验证 NMPC 算法在直立平衡、直线行走、转向等场景下的性能，通过 Rviz 实时观测 ZMP 稳定裕度与预测轨迹偏差。仿真通过后，将相同的控制算法部署至实物平台。随后，进行静态平衡测试；连续自由行走测试，并记录姿态角波动、行走速度、步态稳定性等关键数据。

测试一为静态平衡测试，核心目标是定量评估机器人在维持静态平衡姿态时，抵抗外部瞬时物理冲击的鲁棒性。实验将直接验证系统的姿态恢复能力，并检验其最大姿态角波动是否满足小于等于 ±1.5° 的核心设计指标。

在机器人躯干质心附近的高度，沿其侧向施加一个短暂但剧烈的冲击力。从施加冲击前的稳定状态开始，到冲击后机器人完全恢复至新的稳定平衡状态，记录下的姿态角时间序列数据进行分析。Pitch 与 Roll 波形显示如图 2 所示。在受到 5N 侧向推力时，机器人姿态角波动始终保持在 ±1.5° 以内，展现了良好的平衡保持能力。

连续自由行走测试，在评估机器人在连续行走这一更具挑战性的动态任务中，全身控制系统维持身体姿态的稳定性。分别在 0.1 m/s 和 0.2 m/s 两种目标速度下进行。在机器人进入稳定步态并连续行走至少 5 步之后，计算出在该时间段内，俯仰角和横滚角的峰峰值，即最大值与最小值之差。该峰峰值代表了行走过程中姿态的总波动范围。每种速度下的行走实验均独立重复，以获取具有统计意义的结果。连续自由行走测试结果如 Pitch 与 Roll 波形显示如图 3 所示。在 0.1 m/s 的慢走速度下，俯仰角的平均峰峰值波动仅为 1.51° ，横滚角为 2.02° 。

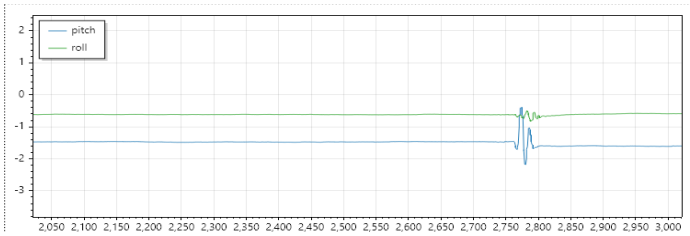


图 2 静态平衡 Pitch 与 Roll 波形显示

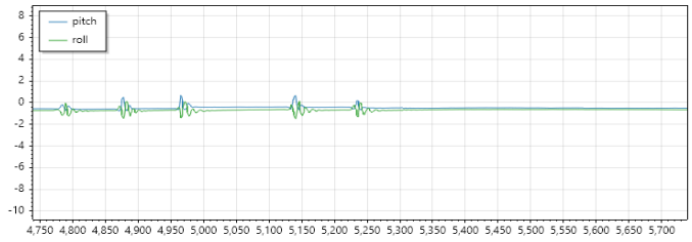


图 3 连续自由行走 Pitch 与 Roll 波形显示

6 结语

为解决双足机器人高精度稳定控制的难题，本文设计了一种基于非线性模型预测控制的智能行走系统。通过构建分层控制架构，实现了上层复杂优化算法与下层高实时性电机驱动的有机结合。通过在仿真平台和物理样机上的大量实验验证，证明了该系统在静态平衡与动态行走方面均具有优异的性能表现。取得的研究成果能够为双足机器人在复杂环境下的实际应用提供更加精准、可靠的控制方案。

参考文献

[1] 宋天睿. 面向多种地形环境的双足机器人稳定步态规划与运动控制方法研究[D]. 江苏:东南大学,2023.

[2] 曲太旭. 基于IMU的双足机器人动态平衡控制[D]. 辽宁:大连交通大学,2009. 杨彩虹,陈英,师婷. 一种双足机器人稳定结构设计与优化[J].工业控制计算,2022,35(12):94-95.

[3] 朱志斌,王岩,陈兴林. NMPC实时步态规划双足机器人步态轨迹周期稳定性分析[J]. 吉林大学学报（工学版）,2009(S1).

[4] 朱志斌. 基于滚动优化的双足机器人动态步态规划研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2009.