

多模态六足机器人智能控制与结构设计

郭善华 郑竹青 唐之胥 左苏文 孙羿胤 徐康帅
北京邮电大学世纪学院 自动化系, 中国·北京 102101

摘要: 针对六足机器人在复杂场景和非结构化地形方面的适应性和机动性, 本研究旨在设计一种新型的多模态六足机器人。首先, 利用 SolidWorks 软件设计六足机器人的整体机械结构; 其次, 建立六足机器人的 D-H 坐标系, 对其各腿部结构进行了运动学分析, 探究了机器人单腿的正、逆运动学, 并对几种典型步态进行了深入分析; 最后, 为增强机器人感知能力, 利用多源传感器(深度相机、声音传感器)构建的多层次感知通路, 建立机器人对环境的丰富理解, 从而实现自动步态切换、避障、手势识别和语音控制等功能。在此基础上, 利用仿真技术对六足机器人的虚拟机械系统进行了几种步态的验证。研究表明: 该六足机器人结构设计方案有效。

关键词: 多模态六足机器人; 非结构化地形; 结构设计; 步态规划; 多层次感知通路

Title Intelligent Control and Structural Design of Multi-modal Hexapod Robot

Shanhua Guo Zhuqing Zheng Zhixu Tang Suwen Zuo Yiyin Sun Kangshuai Xu

School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications Century College, Beijing, 102101, China

Abstract: This research focuses on the design of a novel multi-modal hexapod robot to enhance its adaptability and mobility in complex environments and unstructured terrains. First, the overall mechanical structure of the hexapod robot was developed using SolidWorks software. Secondly, a D-H coordinate system was established for the robot, followed by a kinematic analysis of its leg structures. The forward and inverse kinematics of a single leg were examined in detail, along with an in-depth analysis of several typical gaits. Finally, to improve the robot's perception capabilities, a multi-layered sensing system was constructed utilizing multi-source sensors, including depth cameras and sound sensors, enabling the robot to develop a comprehensive understanding of its environment. This facilitates automatic gait switching, obstacle avoidance, gesture recognition, and voice control. Additionally, simulation technology was employed to validate various gaits of the virtual mechanical system of the hexapod spider robot. The results demonstrate that the proposed structural design for the bionic hexapod rescue robot is effective in addressing the intended challenges.

Keywords: multi-modal hexapod robot; unstructured terrains; structural design; gait planning; multi-layer perception system

0 前言

六足机器人具有较强的地形适应性和运动稳定性, 在行星探测和灾害响应等领域得到了广泛的研究。与轮式和履带式机器人相比, 足式机器人能够通过离散优化选取最优支撑点, 适应多样化的地形环境, 并通过多自由度腿部调节保持平稳姿态, 避免翻倒。此外, 足式机器人的机体与地面分离, 可在复杂地形中灵活调整位姿, 从而提升其适应性^[1]。

国外研究中, 波士顿动力公司研发的四足机器人 BigDog^[2]、加州大学与加拿大约克大学等合作开发的 H-Rex^[3], 以及德国马格德堡大学的多足仿蚂蚁机器人 ANTON^[4] 均展示了足式机器人在复杂地形中的优秀表现。中国则有宇树科技的 AI 机器狗 GO-1、仿生机器人 HEXA^[5], 以及湖北第二师范学院开发的八足机器人^[6]。这些研究聚焦于提升多足机器人在复杂地形下的运动性能, 高速、重载及腿部结构设计成为研究重点。

本研究设计了一种多模态六足机器人, 旨在优化结构设计、运动控制算法和感知系统, 以提升其在复杂环境中的

自主导航和任务执行能力。通过仿生设计优化和实验验证, 该研究致力于为灾难救援提供更加高效可靠的机器人解决方案, 并推动足式机器人在灾难响应领域的实际应用发展。

1 六足机器人结构设计

多模态六足机器人整体结构如图 1 所示。六足机器人由一个主体, 六条腿和一个机械臂构成。腿部有 3×6 个 DOF, 机械臂有 $4+1$ 个 DOF。多模态六足机器人的整体结构如图 1 所示。六足机器人由一个主体和六个模块分支组成, 六个腿部在水平面上均匀分布在主体中心周围。所提出的多模态六足机器人的主要参数如表 1 所示。

为了应对非结构化环境中的复杂地形, 六足机器人的行走机构设计性能及功能要求必须满足轻量化、灵活性、稳定性、负载能力和时效性等多方面考量。具体要求如下:

①六足机器人的行走机构涉及较多足部, 其整体行走和运动特性受到机器人自身重量的制约, 因此轻量化设计至关重要。

②考虑到机器人在运动过程中需要适应各种地形，以及在直线行进和转向之间灵活切换，单腿至少需要具备 3 个自由度，整体机器人则需要 6 个自由度，故选择合适的步态和运动模式很重要。

③考虑到运动过程中的时效性，机器人在保持平稳运行的前提下，须具备一定的移动速度。

④机器人在复杂环境下需要顺利到达指定位置，要求腿部机构的工作空间应该满足实际的工作环境需求，机器人的体型应该适中。

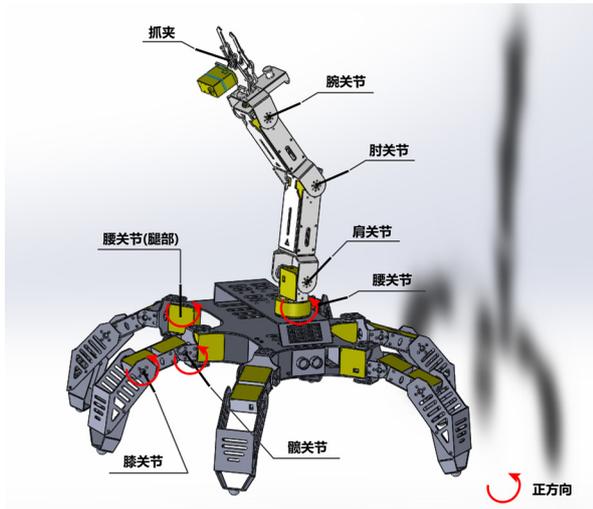


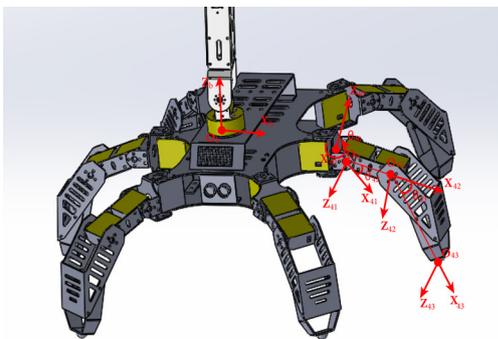
图 1 多模态六足机器人的总体结构

表 1 机器人整体参数

序号	名称	材料	长度/mm	质量/kg
1	身躯	金属和玻璃纤维混合	255	3.10
2	腿部连杆 (3DOF×6)	金属和玻璃纤维混合	260	0.21
3	机械臂	金属和玻璃纤维混合	412	0.22

2 运动学分析

腿部状态示意图如图 2 所示。



位置重合。(L1、L3、R2 为支撑组, L2、R1、R3 为摆动组) 达到时间 T 时, 换作 L2、R1、R3 为支撑组, L1、L3、R2 为摆动组, 这两组不断交替, 完成前行动作。

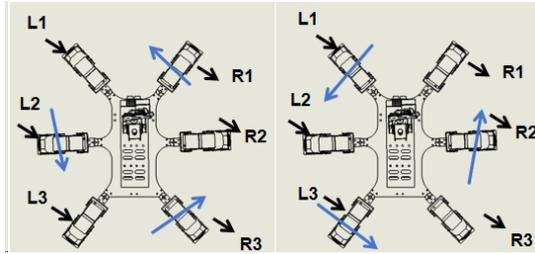


图 3 三角步态原理图

3 感知系统设计

3.1 多层次感知通路的构建

如图 4 所示, 感知通路主要分为两个阶段: 低层控制和上位机控制。首先, 通过传感器网络获取环境中的感知信号, 从而确定自身姿态和周围环境的严重程度。在上位机控制中, 策略网络接收由人类选择的任务类型和本体感觉信号, 然后生成与任务相对应的机器人轨迹和步态。在低层控制中, 六足机器人每个关节的运动轨迹被分解为特定时间间隔内的角度和运动方向。最后, 通过角度反馈装置的反馈, 实现位置 PID 控制下的精确关节旋转^[9]。

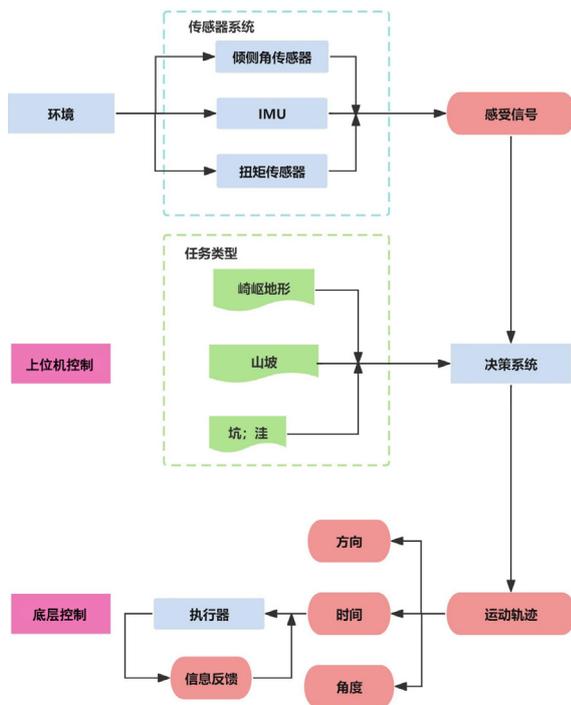


图 4 多层次控制框架

3.2 手势识别控制

手势识别技术利用计算机视觉方法对手部动作进行检测与解析, 展现出广泛的应用潜力。本研究将该技术应用于六足机器人的控制系统中。通过包括图像采集、数据预处理、

手部分割与定位、特征提取、模式识别、控制命令生成及动作执行在内的流程, 六足机器人能够理解操作者的手势, 实现更加自然的交互方式, 从而提升其自主导航和任务执行能力。

手势识别系统通过摄像头捕获实时视频流, 并运用一系列图像处理与模式识别算法对特定手势进行检测和分类。该过程涵盖手部图像的分割、特征提取以及基于机器学习模型的手势分类。在这一过程中, MediaPipe 框架发挥了重要作用, 通过手掌检测和关键点定位技术, 能够获取手部 21 个三维关节的坐标信息 (如图 5 所示)。这些数据为后续的手势识别与解析提供了坚实的基础。



图 5 MediaPipe 检测手指点位图

3.3 语音控制

在六足机器人应用中, 通过开启语音识别模块的功能 (即 ASR) 对用户的指令进行收集、解析。然后通过 TTS 技术, 六足机器人会对用户的指令做出反馈, 例如简单指令如“前进”或“后退”, 以及更复杂的任务指令 (如图 6 所示)。通过集成语音识别和自然语言处理技术, 六足机器人能够与操作者进行自然交互, 从而显著提升其自主导航和任务执行的能力。



图 6 语音控制

语音提取特征 MFCC (梅尔频率倒谱系数), 通过短时傅里叶变换 (STFT) 和 Mel 滤波器来获得。

$$c(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \log(S_k) \cos\left[\frac{\pi n(k+0.5)}{K}\right] \quad (4)$$

从而实现这一功能的关键在于高精度的语音识别算法和灵活的命令解析机制, 这些技术共同促进了机器人在动态环境中的智能响应。

3.4 人脸检测

六足机器人通过机械臂上携带的视觉相机, 通过预处理、定位和后处理进行人脸检测, 如对图像进行缩放等处理

后定位人脸，再用矩形框标识。控制动作上，识别到人脸时通过相关函数执行指定动作组，未识别到时控制机械臂左右转动（如图 7 所示）。



图 7 人脸检测

其应用场景包括与特定个体互动及安全验证，优势在于基于 CNN 的技术准确性高、鲁棒性强，能提高机器人智能化水平和交互能力。

3.5 图形识别

六足机器人通过 OpenCV 处理摄像头的实时图像，对其进行二值化、腐蚀、膨胀等操作，获得只包含目标颜色的

轮廓，并将其标识出来（如图 8 所示）。

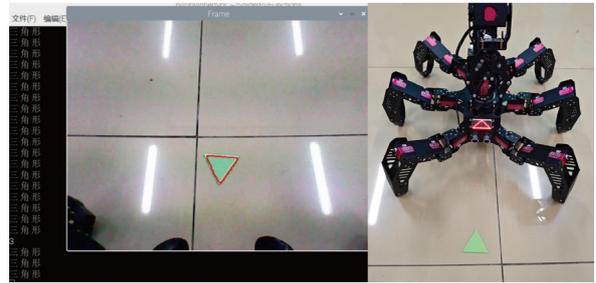


图 8 图形识别

利用该技术六足机器人可以使用图形识别来识别路径上的障碍物、目标物品或其他重要标记，从而更好地规划其行动路线。

4 仿真和实验验证

通过 Adams 软件对六足机器人的三角步态进行分析，及虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析，观察机器人在行走中是否稳定协调，对机器人的躯体质心位移、速度、加速度仿真，如图 9、图 10、图 11 所示。

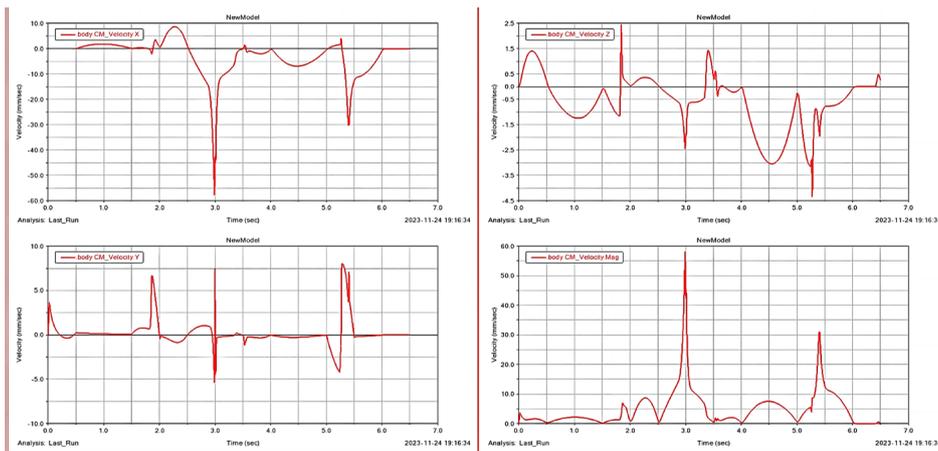


图 9 位移 s- 时间 t 关系

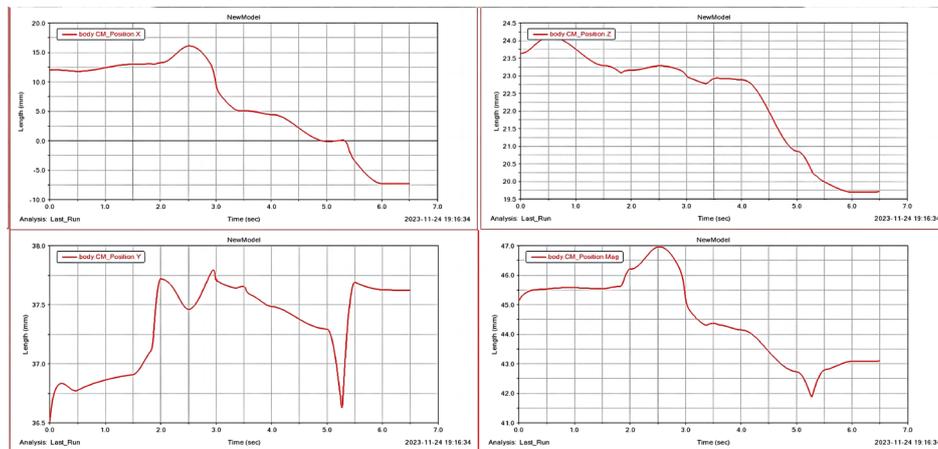


图 10 速度 v- 时间 t 关系

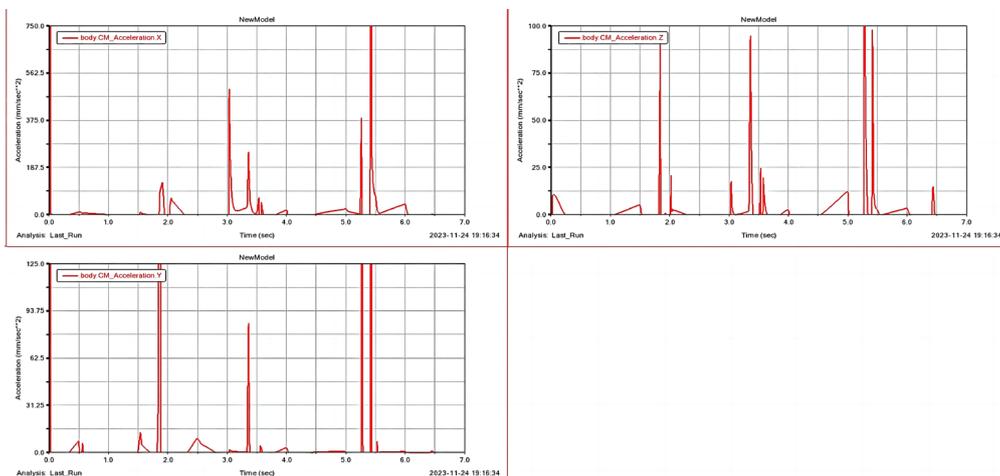


图 11 加速度 a 时间 t 关系

经过对图表的分析，我们观测到速度时间与加速度时间曲线上呈现出显著的尖峰现象。这一现象有力地表明，六足机器人在执行任务进程中，当遭遇障碍物时，能迅速且精准地进行避障行为的能力，以确保任务的高效达成。此外，当机器人面临路径调整的需求，如发现更优路径或遭遇突发状况时，它能及时调整自身的速度或加速度，以最快的速度到达目的地，并依据新的路径规划迅速前行。这一特性充分彰显了六足机器人在复杂环境下卓越的适应能力和高效的执行力^[10]。

5 结语

基于在复杂场景和非结构化地形中对良好适应性与机动性的需求，设计了一种六足机器人。通过对昆虫结构的研究，对六足机器人的腿部结构、步态分析以及控制系统进行了研究。

①在结构设计方面，机器人考虑了轻量化、灵活性、稳定性、负载能力和时效性等因素，设计了具有对称结构的六足机器人，以确保机器人在复杂场景和非结构化地形中的稳定性和高效性。②在运动学分析方面，采用 D-H 坐标系对六足机器人的腿部进行正逆运动学分析，为后续的步态规划和控制系统设计提供基础。③在步态分析方面，引入合适的步态原理，并通过详细的步态表和相关图表展示不同步态下各个舵机的旋转情况。④在感知系统设计方面，精心挑选合适的驱动组件和控制模块，构建起完备的控制框架。通过该框架实现自动步态切换、避障、手势识别以及语音控制等功能，进而确保机器人能够对复杂环境进行准确感知和理解。⑤通过 ADAMS 软件对机器人进行仿真分析，验证设计方案的有效性，展示机器人在复杂场景和非结构化地形中的稳定性和适应性。

参考文献：

[1] Zhang Chunyan, Ding Bing, He Zhiqiang, et al. Kinematic analysis and optimization of a rotating multi legged bionic robot[J]. Journal

of Engineering Design,2022,29(3):327-338.

[2] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. Big dog, the rough-terrain quadruped robot[Z]. Ifac Proceedings Volumes,2008.

[3] Moore EZ, Campbell D, Grimminger F, et al. Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod RHex[M]. NewYork: IEEE,2002.

[4] Konyev M, Palls F, Zavgorodniy Y, et al. Walking Robot “ANTON”:Design, Simulation, Experiments[M]. Advances In Mobile Robotics,2015.

[5] Xin G, Deng H, Zhong G, et al. Hierarchical Kinematic Modelling and Optimal Design of a Novel Hexapod Robot with Integrated Limb Mechanism[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems,2015(12):12.

[6] Sun Yun, Wu Shiqiang. Innovative design of an omnidirectional eight legged robot[J]. Journal of Hubei Second Normal University,2023,40(8):31-36.

[7] Bai Ying, Jiang Qingbin, Mo Liping, et al. Structural design and simulation analysis of a hexapod spider like robot[J]. Mechanical and Electrical Engineering,2019,36(7):732-735+743.

[8] Sun Yun, Wu Shiqiang. Innovative design of an omnidirectional eight legged robot[J]. Journal of Hubei Second Normal University, 2023,40(8):31-36.

[9] Wang L, Li R, Huangfu Z, et al. A Soft Actor-Critic Approach for a Blind Walking Hexapod Robot with Obstacle Avoidance[J]. Actuators,2023,12(10).

[10] Song Xianzhang, Shao Qianjun, Liang Dongtai, et al. Design and kinematic analysis of the walking mechanism of an eight legged robot[J]. Mechanical and Electrical Engineering,2015.

作者简介：郭善华（2003-），男，中国河南郑州人，在读本科生，从事机器人机构运动学分析、机器人技术在工业领域的应用研究。