

“Balance Action 001” - A Rescue and Patrol Robot Based on Wheel-Leg Balance Technology

Sicheng Sun Binhua Liu

Guangzhou Xinhua College, Dongguan, Guangdong, 523133, China

Abstract

In high-risk scenarios such as natural disasters and complex terrain patrols, traditional rescue and patrol equipment often faces the pain points of “poor terrain adaptability, insufficient balance stability, and low operational efficiency”, making it difficult to meet the demands of emergency rescue and safety patrol in complex environments. Wheel-leg balance technology, as an innovative technology that combines the efficiency of wheeled movement with the obstacle-crossing ability of legged movement, provides core support for the performance upgrade of rescue and patrol robots. This study focuses on the design and development of the “Balance Action 001” rescue and patrol robot, with wheel-leg balance technology at its core, systematically elaborating on the overall design scheme and key technological breakthroughs of the robot, aiming to provide practical references for technological innovation in rescue and patrol robots.

Keywords

Wheel-leg balance technology; Rescue and patrol robot; Dynamic balance control; Multi-sensor fusion

“平衡行动 001” ——基于轮腿平衡技术的救援巡逻机器人

孙思诚 刘彬华

广州新华学院, 中国·广东 东莞 523133

摘要

在自然灾害、复杂地形巡逻等高危场景中,传统救援巡逻设备常面临“地形适应性差、平衡稳定性不足、作业效率低”的痛点,难以满足复杂环境下的应急救援和安全巡逻需求。轮腿平衡技术作为融合轮式移动高效性与腿式移动越障性的创新技术,为救援巡逻机器人的性能升级提供了核心支撑。此研究聚焦“平衡行动001”救援巡逻机器人的设计与研发,以轮腿平衡技术为核心,系统阐述机器人的整体方案设计与关键技术突破,旨在为救援巡逻机器人的技术创新提供实践参考。

关键词

轮腿平衡技术; 救援巡逻机器人; 动态平衡控制; 多传感器融合

1 引言

在应急救援领域,当地震、泥石流、洪水等自然灾害发生后,灾区往往会出现道路损毁、地形复杂、环境危险等情况,救援人员难以快速进入现场开展救援,容易错失最佳救援时机^[1];在安全巡逻领域,山地、森林、边境线等复杂地形的巡逻工作,传统人力巡逻效率低、风险高,轮式巡逻车又受限于地形,无法实现全方位覆盖。这些场景都对救援巡逻设备提出了“能走复杂路、能稳站得住、能做精细活”的核心要求。传统救援巡逻机器人主要分为轮式和腿式两类:轮式机器人移动速度快、能耗低,但越障能力差,遇到台阶、沟壑、废墟等复杂地形就“寸步难行”;腿式机器人越障能力强,但移动效率低、能耗高,长时间作业能力不足,而且在动态环境下的平衡稳定性有待提升。轮腿平衡技术的

出现,恰好解决了这一矛盾。

2 “平衡行动 001” 救援巡逻机器人整体方案设计

2.1 整体结构设计

机器人采用“轮腿复合”的整体结构设计,既保留轮式移动的高效性,又强化腿式移动的越障性,同时优化机身布局,轮腿复合结构的核心是“可切换式轮腿单元”,每个轮腿单元由“驱动轮+伸缩腿+旋转关节”组成,机器人共配备4个轮腿单元,分别安装在机身两侧。轮腿单元的工作模式能很自然、合理地根据地形特点自动切换:在平坦路面,伸缩腿收缩,机器人以轮式模式运动,速度可达5km/h,因而极宜于快速巡逻,在复杂地形,伸缩腿伸展,各旋转关节主动、精确地调整腿型,机器人以腿式模式运动,因此能稳妥地跨越20cm高的台阶、15cm宽的沟壑,在倾斜角不超过30°的斜坡上也行走自如。更难得的是,在混合地形中机器人能自动、流畅地切换轮腿模式,实现“轮式快速移

【作者简介】孙思诚(2003-),男,中国广东佛山人,本科,从事电子信息科学与技术研究。

动+腿式越障”的无缝衔接，真正做到无需人工干预即可适应各种地形。与此设计思路高度契合的是，机身采用“中置重心”布局，把电池、控制系统、作业设备诸种核心部件都集中布置于机身中部，故而机器人重心稳定，移动及作业时均不易失衡。再者，机身外壳所用材料为高强度轻质合金，具有极好的防水、防尘、抗冲击性能，因此机器人能在雨天、沙尘天气乃至轻微碰撞环境下可靠作业，磕碰不会影响其正常使用^[2]。

2.2 动力系统设计

机器人所采用的是“锂电池+电机驱动”的动力方案，而驱动系统又采用了成熟的“分布式电机控制”方案，即每个轮腿单元都配有2台直流伺服电机，分别独立、可靠地控制驱动轮的转动以及伸缩腿的伸缩、旋转，因此电机额定功率为500W，输出扭矩很大，能很好地保证机器人在复杂地形上运动时的动力需求，小斜坡对机器人来说根本不是问题。更难得的是，各电机都集成有减速器和编码器，故能对转速、位置做到极为精确的控制，由此自然避免“跑偏”“卡顿”诸种问题。动力控制系统还巧妙地设计了“能量回收”功能：机器人下坡、减速、制动时电机可反向发电，将动能直接、高效地转换为电能储存于锂电池中，续航能力因此大大增强。与此形成完美配合的是，系统本身就有过流、过压、过热诸种保护机制，动力系统运行时安全可靠，也因而大大减少了因过载或故障导致设备损坏的风险，真正延长了机器人的使用寿命。

2.3 感知系统设计

感知系统是机器人“眼观六路、耳听八方”诸种能力的核心，因此自然要承担环境信息采集、障碍物识别、自身状态监测诸种功能，也必然要为机器人的移动控制及作业决策提供可靠的数据支撑。具体而言，视觉传感器由1台高清摄像头和1台热成像摄像头构成，前者用于实时采集环境图像并传递给后台控制系统，便于远程可视化监控，后者即激光雷达安装于机身顶部，能360°全向扫描周围环境，精确测量障碍物距离及轮廓，探测范围达10m，距离测量精度误差小于5cm，故能十分可靠地识别台阶、沟壑、障碍物等地形特征，切实防止机器人碰撞损伤。超声波传感器安装于机身前后左右四个方向，专门用于近距离障碍物检测，探测范围为0.1-3m，当机器人接近障碍物时即自动、及时地发出碰撞预警。惯性测量单元(IMU)安装于机身重心处，对机器人的姿态、加速度、角速度诸参数实时、精确地加以监测，由此为机器人的动态平衡控制提供直接而扎实的数据基础，也保证了机器人运动时的稳定性，不易倾倒^[3]。

3 “平衡行动001”救援巡逻机器人关键技术突破

3.1 轮腿平衡控制技术

由于轮腿平衡控制技术是机器人的核心技术，因此其根本目的十分明确：“让机器人在任何地形、任何状态下都能稳得住”，这也是机器人能可靠、安全地工作于复杂环境

的前提。故而该技术自然、合理地将动态平衡控制算法、轮腿协同控制算法和姿态调整算法三者结合起来。

动态平衡控制算法是以倒立摆原理为基础设计的，即用惯性测量单元(IMU)实时测量机器人姿态，由此自然、合理地求得平衡力矩，再控制轮腿单元的电机作相应动作，因而能很好地保证机器人在动态运动或受外扰时保持平衡。与此形成极好补充的是轮腿协同控制算法，它专门用来协调轮式模式、腿式模式的切换及各轮腿单元的动作配合，且能利用激光雷达、超声波传感器采集的地形信息自动判别地形类型，据此选择合适的移动模式，合理分配各轮腿单元的动力和动作，因此机器人的移动既高效又极其平稳。最后，姿态调整算法用于优化机器人的作业姿态，当机器人执行救援作业时，算法根据作业需要主动、精确地调整机身高度及姿态，为作业设备创造理想的稳定作业平台^[4]。

3.2 复杂地形自适应技术

由于复杂地形自适应技术是机器人适应不同地形场合的根本手段，故其基本目标很明确、很自然：“让机器人在任何复杂地形都能走得通”，因此该技术合理地结合了多传感器融合的地形识别算法及动态路径规划算法，来实现对复杂地形的可靠识别和自主导航。

地形识别算法以激光雷达、视觉传感器、超声波传感器所采集的环境数据为基础，对平坦路面、台阶、沟壑、斜坡、废墟诸种地形类型做了系统、可靠的分类识别，而且用机器学习方法对大量地形数据加以训练，因而地形识别的准确率已达95%以上。与此直接衔接的是动态路径规划算法，它根据地形识别结果及作业目标自动规划最优移动路径，主动避让障碍物，让机器人安全、高效地到达作业地点。更难得的是，该算法作了合理改进，将机器人的运动学参数自然、妥帖地引入路径优化过程，既保证路径可行，又最大限度地缩短移动时间。与此形成极好补充的是复杂地形自适应技术所拥有的“实时调整”功能，在机器人运动过程中若地形变化，算法能实时更新地形信息并及时重新规划路径，切实保障机器人的运动安全。

3.3 应急救援作业技术

由于应急救援作业技术是机器人实现救援功能的基础，因此其根本目的就是“让机器人能够在救援现场办实事”，绝不是单纯侦查。故而机器人所配备的应急救援作业设备有明确、合理的分工：机械臂、救援爪、应急照明、语音对讲、生命探测仪诸种设备均可自然、妥帖地用于障碍物清除、被困人员救助、物资输送、信息传递诸种救援作业。

机械臂安装在机身前部，采用3自由度设计，最大伸展长度为1.5m，最大抓取重量为5kg，能够灵活抓取、搬运救援物资(如食品、药品、饮用水)，还能清除小型障碍物(如石块、树枝)，为被困人员开辟逃生通道，不用救援人员冒险进入危险区域。救援爪安装在机械臂末端，采用柔性设计，具备防滑、防损伤功能，能够安全抓取被困人员的肢体或衣物，将被困人员转移至安全区域，避免在救援过程

中造成二次伤害。应急照明设备采用 LED 高亮灯, 照明亮度可达 5000 流明, 照明距离可达 50m, 能够为夜间救援或低能见度环境下的作业提供充足照明, 让救援现场不再漆黑一片; 语音对讲设备支持双向通话, 机器人可作为通讯中继站, 连接救援现场和指挥中心, 实现被困人员与救援人员的实时沟通, 让指挥中心能够及时了解现场情况, 制定救援方案, 就算被困人员和救援人员不在同一区域也能保持联系。生命探测仪集成在机身顶部, 采用雷达探测技术, 能够探测到 5m 范围内的生命体征 (如呼吸、心跳), 即使在废墟、墙体等遮挡物后面, 也能精准定位被困人员的位置, 为救援人员提供精准的救援目标, 提高救援效率, 不用盲目挖掘寻找被困人员。

4 “平衡行动 001” 救援巡逻机器人性能测试与应用展望

4.1 性能测试与结果分析

测试场景包括平坦路面、台阶、沟壑、斜坡、废墟模拟场景等, 测试设备包括激光测距仪、测速仪、万用表、姿态传感器等, 测试人员记录机器人在不同场景下的运行数据, 对测试结果进行分析, 确保测试结果真实可靠。

在平衡稳定性测试中, 机器人分别在平坦路面、倾斜斜坡 (15° 、 25° 、 30°)、动态干扰 (轻微碰撞、风吹) 等场景下运行, 通过姿态传感器记录机器人的倾斜角度变化。测试结果显示, 机器人在平坦路面运行时, 倾斜角度始终保持在 $\pm 2^\circ$ 以内, 平衡稳定性良好; 在 30° 斜坡上运行时, 倾斜角度控制在 $\pm 5^\circ$ 以内, 能够稳定移动, 无倾倒风险; 在受到轻微碰撞或风吹时, 机器人能够快速调整姿态, 恢复平衡, 平衡恢复时间不超过 0.5 秒, 证明机器人的动态平衡控制技术效果显著, 不管是在平稳路面还是复杂地形, 都能稳如泰山。

在地形适应性测试中, 机器人依次通过 10cm、15cm、20cm 高的台阶, 10cm、15cm 宽的沟壑, 以及倾斜角度为 15° 、 25° 、 30° 的斜坡。测试结果显示, 机器人能够顺利跨越 20cm 高的台阶和 15cm 宽的沟壑, 在 30° 斜坡上的移动速度可达 1km/h, 无打滑、倾倒现象; 在废墟模拟场景中 (由砖块、木板、碎石组成), 机器人能够自动切换轮腿模式, 避开大型障碍物, 跨越小型障碍, 成功到达指定地点, 证明机器人的复杂地形自适应技术具备良好的实用性, 各种复杂地形都能应对。

在作业能力测试中, 机器人通过机械臂抓取 5kg 重的救援物资, 成功搬运至 10m 外的指定位置, 抓取准确率达 100%; 通过生命探测仪在废墟模拟场景中定位“被困人员” (模拟人体模型), 定位误差不超过 10cm; 通过语音对讲设备实现与指挥中心的双向通话, 通讯清晰无杂音; 应急照明设备的照明效果良好, 能够满足夜间救援需求, 证明机器

人的应急救援作业技术能够满足实际救援场景的需求, 能在救援现场发挥实实在在的作用。

4.2 应用场景展望

“平衡行动 001” 救援巡逻机器人具备良好的复杂地形适应性、平衡稳定性和应急救援能力, 可广泛应用于应急救援、安全巡逻、环境监测等多个领域, 具体应用场景如下: 在应急救援领域, 机器人可作为先遣侦察设备, 快速进入地震、泥石流、洪水等自然灾害的灾区, 通过视觉传感器和生命探测仪采集现场信息, 定位被困人员位置, 为救援人员提供精准的现场数据; 同时, 机器人可利用机械臂和救援爪, 为被困人员输送食品、药品等救援物资, 清除小型障碍物, 开辟逃生通道, 降低救援人员的作业风险, 提高救援效率, 让救援工作更安全、更高效。机器人在安全巡逻中有着十分自然、成熟的应用场景: 即执行山地、森林、边境线、大型厂区等复杂地形的巡逻任务, 能实时、可靠地感知环境, 因此有利于及时发现火灾、非法入侵、设备故障诸种异常情况, 并将预警信息及时、准确地传送给指挥中心, 同时又能替代人力完成高强度、高风险的巡逻任务, 故而能切实降低人力成本, 提高巡逻的全面性及响应的及时性, 也避免让人员长期处于危险区域。机器人在环境监测领域同样有极其理想的应用: 可用于野外环境、污染区域等场景的环境监测, 所载气体传感器、水质传感器可直接采集空气、水质、土壤诸种环境参数, 实时传送给监测中心, 为环境评估、污染治理提供及时有效的数据支持。

5 结语

综上所述, “平衡行动 001” 救援巡逻机器人是以轮腿平衡技术为基础开发的, 又巧妙地采用了轮腿复合结构、智能控制系统及多传感器融合技术, 因而很好地解决了传统救援巡逻设备在复杂环境下地形适应性差、平衡稳定性不足、作业效率低诸种问题, 因此拥有复杂地形越障、动态平衡稳定、应急救援作业等突出能力, 十分自然地适用于应急救援、安全巡逻、环境监测诸种场景。更重要的是, 系统性能测试结果明确、充分地证明了其在平衡稳定性、地形适应性、作业能力、续航能力诸方面都表现卓越, 在复杂环境下能可靠、安全地运行, 故而也是应急救援及安全防护领域极好的新方案。

参考文献

- [1] 李泽楷, 张雅妮, 陈琛, 等. 基于 Kalman-LQR 控制的轮腿式平衡机器人设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025, (04): 84-90+101.
- [2] 葛畅畅, 孟鸿儒, 张余浩, 等. 轮腿式平衡机器人的控制系统[J]. 自动化应用, 2025, 66(05): 30-33.
- [3] 叶梁杰, 杨忠, 卓浩泽, 等. 基于 MPC 的轮腿式自平衡机器人运动控制方法[J/OL]. 应用科技, 1-8[2026-02-03].
- [4] 刘帅师. 新型两轮轮腿式自平衡机器人研究[D]. 浙江农林大学, 2023.