

doi: 10.7690/bgzd.2025.02.022

智能四足仿生机器人城镇作战运用

邱彦佳¹, 董安林¹, 胡文雷¹, 孙永安², 高建成³(1. 陆军边海防学院工程基础系, 西安 710000; 2. 中国人民解放军 78029 部队, 四川 西昌 615000;
3. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司系统总体部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高城镇作战任务的执行效率和安全性, 对智能四足仿生机器人在城镇作战中的运用进行研究。在分析智能四足仿生机器人发展现状和城镇作战运用需求的基础上, 重点从战场侦察监视、进攻伴随掩护、定点打击清除、作战协同突防、遂行战斗保障等方面研究其典型的城镇运用样式, 并指出亟待解决的问题。结果表明: 该研究对智能四足仿生机器人装备发展和在城镇环境下的作战运用具有一定的指导意义。

关键词: 智能; 四足仿生机器人; 城镇环境; 作战运用

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Application of Intelligent Quadruped Bionic Robot in Urban Combat

Di Yanjia¹, Dong Anlin¹, Hu Wenlei¹, Sun Yongan², Gao Jiancheng³

(1. Engineering Fundamentals Department, PLA Army Border and Coastal Defense Academy, Xi'an 710000, China; 2. No. 78029 Unit of PLA, Xichang 615000, China; 3. System Overall Department, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and safety of urban combat missions, the application of intelligent quadruped biomimetic robots in urban combat was studied. On the basis of analysing the development status of intelligent quadruped biomimetic robots and the needs of urban combat application, this paper focuses on the typical urban application styles of intelligent quadruped biomimetic robots from the aspects of battlefield reconnaissance and surveillance, offensive accompanying cover, fixed-point strike clearance, combat coordinated penetration, and combat support, and points out the problems that need to be solved urgently. The results show that this study has certain guiding significance for the development of intelligent quadruped biomimetic robot equipment and its combat application in urban environment.

Keywords: intelligence; quadruped biomimetic robot; urban environment; operational application

0 引言

智能四足仿生机器人, 又称机器狗、机器狼等, 是一种模仿四足哺乳动物的步态和运动机制的智能无人装备^[1], 采用四足行走结构, 结合先进的传感器、控制算法和人工智能技术, 具备在复杂地形上稳定行走、自主导航和智能决策的能力。与传统轮式和履带式机器人相比, 智能四足仿生机器人能够更灵活地跨越矮墙、攀爬楼梯、出入狭窄空间, 适应泥泞、冰雪、瓦砾等恶劣地面条件, 机动灵活, 具有卓越的环境适应能力, 可以携带各种载荷, 执行多样化的任务, 军事应用前景巨大^[2]。城镇作战具有战场环境复杂、指挥协同困难、军民目标混杂、火力发挥受限、伤亡风险高等突出特点^[3-4], 亟需一种环境适应能力强、通用性好的智能无人装备辅助执行城镇作战任务, 智能四足仿生机器人恰好契合这一需求。

1 智能四足仿生机器人发展现状

如图 1 所示, 智能四足仿生机器人由机械运动机构、控制、动力、传感器和通信系统等组成。机械运动机构设计是其实现高效运动和适应复杂地形的关键, 通常由髋关节横摆驱动模块、髋关节纵摆驱动模块、膝关节驱动模块、大腿杆、小腿杆等组成。关节驱动模块采用无刷电机或液压马达驱动, 具有较强的负载能力; 每条腿足有 3 个自由度, 整机 12 个自由度, 具有很高的控制灵活性。

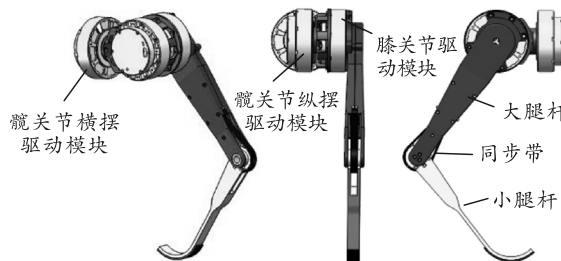


图 1 四足仿生机器人腿部结构^[1]

收稿日期: 2024-07-22; 修回日期: 2024-08-23

第一作者: 邱彦佳(1989—), 男, 河北人, 硕士。

四足仿生机器人使用独立立足点来优化支撑和牵引力，其灵活性受到可达地形中最佳立足点的限制，而车轮需要连续的支撑路径，其到达能力受到最差地形的限制，因此，在崎岖地形中四足仿生机器人比轮式或履带式机器人具有更好的通过性^[5]，这是四足仿生机器人的突出优势。地面移动机器人不同运动方式优缺点比较如表 1 所示。

表 1 地面移动机器人不同运动方式优缺点比较^[6]

类别	优点	缺点
轮式机器人	速度快、效率高 易平衡、稳定性好 易控制、技术成熟 结构简单、成本低	对路况要求高 环境适应能力差
履带式机器人	稳定性好 野外作业能力强	体积、重量较大 对路况有一定要求
足式机器人	对路况要求低 自由度多、运动灵活 适应复杂地形能力强	结构复杂、不易平衡 控制和设计难度较大

近年来，全球范围内智能四足仿生机器人的研发取得了显著进展。美国波士顿动力(Boston dynamics)公司研发的“大狗”(BigDog)，首次展示出四足机器人的超强平衡性和地形适应能力，到广泛关注和模仿。“Spot”机器人是在“大狗”的基础上进一步优化研发的产品^[7]，其设计更紧凑、

重量更轻、运行噪声更低，能够配合搭载机械臂完成开关门、递水等精细操作。瑞士 ANYbotics 公司开发的 ANYmal X 是一款面向工业应用的四足机器人^[8]，具有防尘防爆功能，能够在化工厂等潜在爆炸性环境中安全使用，装备有变焦相机、热像仪、激光雷达、稳定云台、有害气体传感器等载荷。

我国在该领域的研发也处在世界前列，如中国兵器工业集团北方车辆研究所研制的山地四足仿生无人平台性能优越，可承载 50 kg，克服 30°的斜坡^[9]，主要用于承担物资背负、山地运输任务。中国兵器装备集团有限公司自主研发的“机器狼”作战分队，在 2024 年第 15 届中国航展上首次亮相，通过挂载不同模块，“机器狼”作战分队包括 1 台侦察探测“狼”、1 台综合保障“狼”、2 台精确打击“狼”，通过分工合作，整个作战分队能够协同完成侦察、保障和打击任务^[10]。杭州宇树(Unitree)科技有限公司，Unitree Go2 还搭载有 AI 大模型和 4G 通信链路，能够实现智能语音交互和远程控制^[11]。杭州云深处公司开发的“绝影”系列四足机器人，在国内率先实现了工业环境下全自主巡检^[12]。几种产品的主要性能参数如表 2 所示。

表 2 几种四足仿生机器人主要性能参数

名称	站立尺寸/mm	整机重量/kg	动力形式	最大载重/kg	续航时间/h	最大速度/(m/s)	续航里程/km	最大爬坡/(°)	垂直越障/cm	环境传感器
Spot	1 100×500×191	32.7	电动液压	14	1.5	1.6	—	30	—	深度相机
ANYmal X	891×651×872	60.1	全电驱动	—	1-2	1.0	2.5	—	—	激光雷达×1 深度相机×6 光学相机×2
Unitree B2	1 098×450×645	60.0	全电驱动	120(站立) 40(持续行走)	4-6	6.0	15-20	>45	40	激光雷达×1 深度相机×2 光学相机×2
Unitree Go2	700×310×400	15.0	全电驱动	10	2-4	5.0	—	40	16	激光雷达×1 光学相机×1
“绝影”X20	950×470×700	53.0	全电驱动	20(持续作业)	2-4	4.0	15.0	≥30	20	激光雷达 深度相机
“绝影”Lite3	610×370×445	13.7	全电驱动	5(持续行走)	1.5-2.0	—	2.7	40	—	激光雷达 深度相机

从表 2 可以看出：四足仿生机器人体积小、重量轻，具有较强的负载能力，爬坡角度可达 30°~45°，垂直越障高度 16~40 cm，表明其能够适应各类楼梯、瓦砾等复杂地形，携带各类载荷，完成城镇作战任务。

2 智能四足仿生机器人城镇作战能力分析

城镇是现代军事行动中最复杂的战场环境^[13]，是我军必须攻克的重要作战课题。与沙漠、丛林、

山地等野战环境相比，城镇地区高楼林立、建筑密集，地下管廊相互交织、错综复杂，军事目标、民事目标相互掩映，高价值目标、政治敏感目标星罗棋布，构成了空间多维立体、人员混杂难辨、火力打击受限、通信保障困难的极端战场环境。城镇进攻作战中，我在明、敌在暗，通常需要逐街区、逐建筑清剿残敌，但火炮等重武器的使用受到严格限制，大型装甲车辆的火力和机动性难以发挥，顶部

装甲等防御弱点极易暴露,使得进攻方往往承受数倍于防御方的人员和物资损失。在城镇防御、维稳作战中,作为防守方又会面临兵力分散、难以全面兼顾等问题。

智能四足仿生机器人具有机动性好、环境适应性强、负载能力大、能够远程控制、搭载有多种传感器、具备初步的人工智能等特点,可以有效克服传统手段的局限性,在城镇作战环境中大显身手。

1) 利用强大的地形适应能力,能够自由跨越废墟、上下楼梯、出入狭小空间,实现城镇环境全域到达。2) 利用携带的可见光摄像机、热像仪、激光雷达等感知设备,能够全方位探查未知区域情况,为后续行动提供侦察情报。3) 利用配备的远程通信与数据传输功能,能够使士兵在安全位置远程遥控机器人执行任务,减小士兵伤亡风险。4) 利用较强的负载能力,能够搭载各类载荷,完成多样化的任务,如搭载小型武器装备,能够完成火力侦察和火力突击;搭载补给物资,能够完成伴随补给;搭载核生化探测设备,则能够完成危险区域的核生化探测。5) 利用内置的先进人工智能算法,形成同构或异构编队集群,群内各个体之间能够优势互补,实现群体智能、饱和攻击。

3 智能四足机器人城镇作战运用探究

四足仿生机器人作为智能地面无人系统,可搭载多种载荷,依托其自主行动、自主决策能力,可在遥控、自主模式下执行城镇作战多样化任务。

3.1 战场侦察监视

作战筹划阶段,四足仿生机器人在城市 2 km 外长时间潜伏隐蔽侦察,通过遥控方式依托综合光电及雷达传感器侦察查明敌外围据点、碉堡、阵地等重要目标信息,监控公路、铁路上车辆及武装人员变化情况,为指挥员提供及时、准确、详尽的战场情报。

进攻战斗前,可采用四足仿生机器人前出的方式进行自主侦察,按照预先规划路径行进,通过环境感知系统实时采集周围环境信息,其控制系统通过对信息融合处理做出行为决策,控制四足仿生机器人动作。利用综合光电载荷探测及时发现可疑目标,并可以利用激光雷达实时感知道路环境,构建点云图,为作战人员探测指引道路。在废墟等人员较难抵达的点位侦察时,可利用四足仿生机器人攀爬越障、跳跃越障等优势代替人员到点侦察。

交战中,设置四足仿生机器人为跟随模式,充分发挥四足仿生机器人多传感器优势,利用高清摄像机自主捕捉周围环境威胁,前端处理识别目标信息并报警,有效提高目标发现识别效率。

3.2 进攻伴随掩护

进攻作战前,通过合理规划四足仿生机器人集群行进路径,对指定区域或地面作战力量的战场环境进行监视,辅助夺取该区域的控制权,为有人力量提供安全防护。主要掩护方法包括区域掩护和行进协同掩护。区域掩护是四足仿生机器人对指定区域进行侦察巡逻,一旦发现空中或地面有敌方活动情况,即刻反馈给地面部队,按指令进行下一步跟踪监视或火力打击等行动。行进协同掩护是四足仿生机器人跟随地面作战力量前沿,与地面作战力量同步行动,提供实时情报监视,并发挥无人平台火力优势,自主打击、评估。

3.3 定点打击清除

城市作战中使用四足仿生机器人执行火力打击任务时,除了为地面火炮或激光制导武器进行目标引导外,更多的是运用四足仿生机器人对地面重要目标尤其是时敏目标实施精确打击,从而为地面作战力量提供近距离的火力支援。

3.3.1 自察自打

四足仿生机器人位城镇自主巡逻,发现敌装甲车、据点、炮兵阵地后一键锁定目标,根据目标所处位置合理规划攻击位置,依指挥所命令执行打击任务。

3.3.2 引导打击

四足仿生机器人获取任务地域内情报信息后,及时向上级报告任务区域内各目标性质、位置及状态,并实时向指挥所回传侦察图像视频,辅助指挥员进行决策,根据需要向协同部队通报目标情报信息,引导火力打击。

3.3.3 空地协同打击

四足仿生机器人通过武协终端与无人机建链,向无人机移交光电平台遥控链路,使用激光照射器指示目标,协同无人机完成打击任务。

3.4 作战协同突防

3.4.1 诱饵战术

城市周围通常有敌特种侦察兵力部署,在执行地面进攻作战行动前,将四足仿生机器人编队作为

诱饵，一个方向或多个方向突入敌防区，消耗敌方弹药、牵制地面防守力量，助攻其他方向力量突防。

3.4.2 电磁屏蔽

依据作战任务编组形成侦察干扰或突防攻击“四组仿生机器人作战群”，可配备电子干扰装置致盲敌方雷达，亦可携带电磁脉冲弹对敌指挥所、通信中心等重要部位的电子设备和计算机进行摧毁，瘫痪其指挥通信及侦察能力。

3.5 遂行战斗保障

3.5.1 战场指挥通信

根据战场变化，四足仿生机器人携带短波、超短波、微波无线电通信转发器，采双机交互模式，长时间位城镇建立中继通信站，提供战场通信支撑，为部队传递信息，辅助指挥所实时精确指挥。

3.5.2 信息实时共享

四足仿生机器人指挥员，通过持续侦察实时通报敌情动态变化情况，并根据部队需求侦察重要目标，辅助地面部队执行作战任务。

3.5.3 战场运输保障

在城镇作战火力密集的情况下，物资保障困难。四足仿生机器人具有爬坡能力，环境适应能力强，可作为机器骡子在城镇废墟中攀爬，遂行运输保障任务，可快速运输弹药、补给，甚至可以使用特制托架、挂架进行伤员后送。

3.5.4 辅助猎雷排爆

城镇作战中地雷威胁随处可见，排爆人员面临巨大风险。四足仿生机器人可携带多种探测设备和抓取装备完成搜排爆任务，代替人员消除安全风险。对于大型弹药，在引爆时可利用四足仿生机器人携带炸药至弹药处遥控引爆，对于小型爆炸物也可利用四足仿生机器人携带激光引爆设备远距离直接引爆。四足仿生机器人也能充当自杀式武器，可携带炸药隐蔽行进至目标位置放置炸药远程引爆，也可以将四足仿生机器人机身做成战斗部，自杀式攻击装甲、人员等目标。

4 需要解决的问题

4.1 能源与续航能力问题

由表 2 可知，当前全电驱动的智能四足仿生机器人产品续航时间通常为 2~4 h，在连续高强度的战场运用下实际工作时间可能仅 1~2 h，连续作战

能力不足，电池组体积、重量较大难以大量携带，在紧张的战场环境下充电也相当困难。若以内燃机为动力源，如 LS3，虽然续航时间最长可达 24 h，油料补充方便，但噪声大、体积大、重量大，其作战的隐蔽性和灵活性大打折扣。为使智能四足仿生机器人作战效能得以充分发挥，必须研发更高能量密度的电池组、小型静音内燃机或混合动力系统，开发更高效节能的机械运动机构和控制算法，同时强化油电后勤保障能力。

4.2 通信与信息安全问题

智能四足仿生机器人的通信手段目前多为民用信道 4G LTE+WIFI，通信距离近、安全性差、战时信号稳定性无法保证。通过网络的信息传输手段极易遭受黑客攻击和电子干扰，导致机器人失控或信息泄露，危及任务安全；因此，必须解决通信组网问题，建立大容量、低时延、远距离、稳定可靠的保密数据传输网络。同时，统一有人装备和无人系统测控与信息传输体制，使所有无人化平台融入统一的指挥信息系统，以此奠定智能四足仿生机器人城镇作战运用的信息通信基础。

4.3 自主协同与智能决策问题

根据装备发展现状，当前智能四足仿生机器人的操作仍以遥控为主，由操作手观察态势、判断情况、发送直接操纵命令，任务完成效率较低，协同较困难。智能四足仿生机器人虽具备一定的自主环境感知、路径规划、任务决策能力，但因硬件、成本、技术等条件限制，该自主能力仍十分有限和不可靠。特别是在高度动态变化的城镇作战环境中，现有智能四足仿生机器人的自主协同和智能决策能力尚无法满足作战需要，需大幅提高其智能化水平，使“人在环内”的直接操作模式逐步升级为“人在环外”的任务引导操作模式，降低人员的操作负担，实现“一控多”“动中控”等能力。同时，需开发完善智能通用的指挥信息系统，协助各类无人装备完成自主协同和智能决策。

5 结束语

智能四足仿生机器人因其仿生的腿足式行走结构，在先进的传感器和控制算法的配合下，具有优秀的全地形通过能力，能够适应城镇作战中复杂的地形环境。在战场侦察监视、进攻伴随掩护、定点打击清除、作战协同突防、遂行战斗保障等典型应用场景中，智能四足仿生机器人的应用能够有效提

高城镇作战任务的执行效率和安全性。当前，智能四足仿生机器人的应用仍面临通信保障、自主决策能力和系统集成等问题。未来的研究应着重于提升其智能化水平和协同作战能力，以实现更高效的智能化集群作战能力。

参考文献：

[1] 熊泉. 小型四足仿生机器人研制及控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

[2] 张小凤, 伍志毅, 徐向荣, 等. 复杂地形空地两栖智能勘探救援四足仿生机器人研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(15): 31-34, 37.

[3] 侯典宁, 董志成. 城市巷战无人化装备运用分析[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(8): 27-30.

[4] 樊延平, 宋畅, 薛中兴. 陆军城市巷战作战运用构想创新研究[J]. 国防科技, 2019, 40(5): 122-126.

[5] 许威, 闫瞳, 许鹏, 等. 特种机器人行业的新锐——四足仿生机器人[J]. 2021(4): 48-57.

[6] 陈德明. 四足仿生机器人运动控制系统的设计与实

现[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

[7] Boston Dynamics. Boston Dynamics 官方网站[EB/OL]. [2024-10-23]. <https://bostondynamics.com/>.

[8] Anybotics A G. AnyBotics 公司主页 [EB/OL]. [2024-10-23]. <https://www.anybotics.com/>.

[9] 中国北方车辆研究所. 山地四足仿生无人平台[OL]. 2018-05-02. http://noveri.norincogroup.com.cn/art/2018/5/2/art_3729_104645.html

[10] 国产“机器狼”首次公开亮相[EB/OL]. (2024-11-10)[2024-11-19]. <https://v.cctv.com/2024/11/10/VIDEcBuzr0XFyYckj6JgMecw241110.shtml?spm=C90324.Pfd0SYeqktv.Eri5TUDwaTXO.6>.

[11] Unitree. Unitree 公司主页 [EB/OL]. [2024-10-24]. <https://www.unitree.com/cn/>.

[12] 云深处科技. 杭州云深处科技公司主页 [EB/OL]. [2024-10-24]. <https://www.deepprobotics.cn/robot/index/index.html>.

[13] 史军彦, 侯典宁. 微小型无人机与地面无人系统城市反恐行动协同研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(9): 36-40.

(上接第 107 页)

表 1 正弦信号跟踪误差

信号幅值	控制策略	最大位置误差/cm	收敛时间/s
0.15	原系统	0.61	1.59
	滑模控制	0.50	1.10
	文中控制方法	0.33	0.24

从表中结果可知：相较于原系统，滑模控制与本文中方法在收敛时间与位移误差上都有明显改善。

4 结论

笔者对滑模控制趋近律进行了改进，削弱抖振影响，引入干扰观测器对外界干扰进行估计，通过设计自适应律对未观测到的干扰进行补偿。实验结果表明：该控制方法在机械臂系统中表现出良好的轨迹跟踪性能，在提高机械臂的轨迹跟踪精度的同时减小了收敛时间。

参考文献：

[1] 李敏. 变论域模糊补偿的机械臂积分终端滑模控制[J]. 现代制造工程, 2023(7): 37-44, 105.

[2] 李虎. 多关节机械臂轨迹规划与轨迹跟踪控制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.

[3] 张俊辉, 刘斌, 蒋峥, 等. 基于改进趋近律的滑模控制在机械臂中的应用[J]. 高技术通讯, 2018, 28(6): 534-546.

[4] 鲁彩丽, 高宏力, 宋兴国, 等. 基于模糊滑模的机械臂鲁棒轨迹跟踪控制[J]. 机械设计与制造, 2019(11): 235-237, 241.

[5] 徐宝珍, 宋公飞, 王超, 等. 机械臂自适应非奇异快速终端滑模控制[J]. 光电与控制, 2021, 28(5): 46-50.

[6] 潘润超, 李志刚. 基于指数收敛观测器的协调臂自适应滑模控制[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 53-57, 67.

[7] 李艳, 孙蕊, 夏宇, 等. 采用改进快速变幂次趋近律的滑模控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(12): 118-126.

[8] 刘鹤松, 颜文旭, 倪宏宇, 等. 基于新型自适应律的巡检机械臂滑模控制[J]. 控制工程, 2023, 30(3): 434-442.

[9] 刘洋洋, 院老虎, 腾英元, 等. 基于RBF神经网络补偿的自适应滑模机械手控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(6): 119-122, 127.

[10] 吴斌, 童仲志, 巩晋, 等. 基于扰动观测器的炮控系统自适应鲁棒控制[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 5-8, 29.

[11] 周振, 王冬青, 许崇立. 3DoF 模块化机械臂轨迹跟踪策略[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(7): 35-38, 47.