

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.002

桥梁表面检测爬壁机器人研究综述与展望

赵丹阳¹, 窦建平², 倪张皓², 殷鹏程¹, 瞿国钊¹, 夏小康²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 523711; 2. 东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 针对桥梁表面检测传统人工作业存在效率低、风险高、主观性强及干扰交通等固有缺陷的问题, 系统梳理桥梁表面检测爬壁机器人的研究进展, 分析近十年相关文献数据, 阐述机器人壁面吸附与移动两大核心技术, 深入对比磁吸附、负压吸附等主流技术, 归纳其在桥梁表面检测中的典型应用场景, 剖析当前技术瓶颈; 并展望未来发展方向。为该领域后续研究与技术开发提供系统参考。

关键词: 爬壁机器人; 桥梁检测; 无损检测; 吸附机构; 移动机构

中图分类号: U446; TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0010-05

Review and Prospect of Wall-Climbing Robots for Bridge Surface Inspection

ZHAO Danyang¹, DOU Jianping², NI Zhanghao², YIN Pengcheng¹, QU Guozhao¹, XIA Xiaokang²

(1. China Railway SIYUAN Survey and design group Co., Ltd., Wuhan 523711, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: As pivotal hubs of modern transportation networks, bridges' structural health directly bears on public safety and economic development. Traditional manual inspection is inherently flawed with low efficiency, high risk, strong subjectivity and traffic disruption, and wall-climbing robot technology offers an effective solution. This paper systematically reviews the research progress of wall-climbing robots for bridge detection; it analyzes relevant literature data of the past decade, elaborates on the two core technologies of robotic wall adsorption and movement, conducts an in-depth comparison of mainstream technologies like magnetic and negative-pressure adsorption, and summarizes their typical application scenarios in bridge inspection; further, it examines current technical bottlenecks and prospects future development directions. This review aims to provide systematic references for subsequent research and technological development in this field.

Keywords: climbing robot; bridge inspection non-destructive testing; adsorption mechanism; locomotion mechanism

0 引言

当前桥梁表面检测以人工作业为主, 并需借助专用设备接近检测部位, 其存在劳动强度大、效率低、成本高及高空安全风险大等问题, 难以满足客观定量化管理需求。

机器人技术为桥梁检测的自动化、智能化提供了契机, 其可搭载多种检测模块, 自主完成大面积快速扫描与高精度数据采集, 大幅提升检测安全性、效率与数据可靠性, 有效地弥补传统检测短板, 是桥梁检测技术升级的核心支撑。

爬壁机器人技术领域已有综述性研究, 但多聚焦于通用型爬壁机器人的整体技术框架与跨场

景应用共性特征^[1-2], 尚未针对桥梁检测这一高负载、高风险、强环境干扰的特定场景, 开展爬壁机器人专项技术与应用进展的系统性梳理。鉴于此, 本文以桥梁检测爬壁机器人为研究核心, 系统综述该领域的国内外研究现状与进展, 重点围绕机器人吸附机制、移动机构等核心技术体系, 典型工程应用实践, 现存关键技术挑战及未来发展趋势展开深入剖析与总结。

1 国内外论文数据分析

本文选择 Scopus 数据对爬壁机器人国内外相关文献进行搜索与分析。搜索方式在 Search within 中选择 Article title, Abstract, Keywords, 检

基金项目: 武汉市重点研发计划项目(2024010702030126)

第一作者简介: 赵丹阳(1994—), 女, 河南周口人, 工程师, 硕士研究生, 研究方向为特殊结构桥梁运维管理、桥梁检测机器人, 006849@crfsdi.com。

通信作者简介: 窦建平(1980—), 男, 湖南郴州人, 副教授, 博士, 研究方向为智能移动作业机器人, 主持完成国家自然科学基金项目2项, 主持完成重点实验室开放基金项目2项, 参与完成多项国家重点基金项目。发表 SCI/EI 检索论文50余篇。获2011年度国防科学技术进步奖二等奖1项。授权发明专利10件, 软著6件, jp.dou@seu.edu.cn。

索内容为 climbing robot。第一篇爬壁机器人的论文出现于 1984 年, FUJIE 等^[3]首次提出了爬壁机器人的概念。从 2000 年起,关于爬壁机器人的文献迅速增加,到 2012 年,相关论文年度发表量已突破 200 篇,达到 225 篇。综述选取 2016 年—2025 年近十年间发表收录的论文进行统计与分析,以阐述近年来爬壁机器人的国内外研究现状,剖析当前该领域的研究重点与发展方向。

1.1 文年度发表量分布统计与分析

2016 年—2025 年这十年间,发表的有关爬壁机器人的论文累计 3232 篇(该数据来源于 Scopus 数据库,时间截至 2025 年 12 月 9 日)。

图 1 表明爬壁机器人文献总体呈现增长趋势。从 2020 年起,爬壁机器人的研究进入快速增长阶段。2021 年发表 318 篇,增速达到 19.5%;2022 年发表 396 篇,较上一年增长 78 篇,增速达到 24.5%;2023 年发表 394 篇,2024 年发表 483 篇;2025 年到目前(2025 年 12 月 9 日)为止发表了 400 篇。

预计在未来的数年时间内,爬壁机器人依旧是该研究领域的热点。

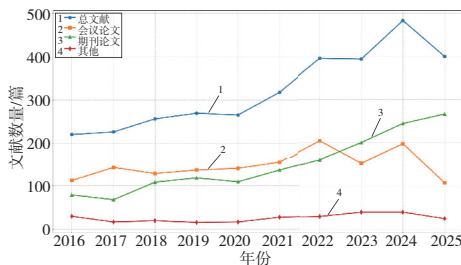


图 1 2016 年—2025 年爬壁机器人文献分类统计折线图

期刊论文呈现一种持续增长的趋势。2023 年起,期刊数量开始超过会议论文的数量。期刊论文从 2016 年的 68 篇增长到 2025 年的 267 篇,涨幅高达 293%。2025 年关于爬壁机器人的文献中,期刊文献的占比达到 66.8%,达到新高。

各种类文献占比如图 2 所示。期刊文献占比的骤增,说明了近几年国内外学者对于爬壁机器人的研究越来越深入,成果也越来越显著。

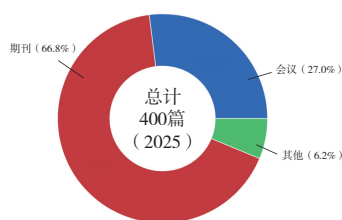


图 2 2025 年爬壁机器人发表文献分类统计图

1.2 发表论文出版物统计与分析

本文从出版物的角度来分析爬壁机器人相关文献,排名前 10 的刊物如表 1 所示。

表 1 2016 年—2025 年爬壁机器人相关论文数排名前 10 刊物

出版物名称	数量/篇
IEEE Robotics and Automation Letters	84
IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems	80
Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation	80
Journal of Physics Conference series	75
Lecture Notes in Networks and Systems	54
Lecture Notes in Computer Science Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics	49
Industrial Robot	41
Applied Sciences Switzerland	40
IEEE ASME Transactions on Mechatronics	38
Proceedings of SPIE the International society for Optical Engineering	37

2016 年—2025 年爬壁机器人领域论文主要集中于技术类刊物。IEEE 旗下《IEEE Robotics and Automation Letters》等期刊与会议录(如 ICIRS、ICRA)发文量居前,合计超 240 篇,凸显该领域研究 IEEE 体系为核心传播载体,且工程技术与智能控制方向为研究重点;同时,《Applied Sciences Switzerland》等综合类期刊亦有一定发文量,反映研究兼具专业性与跨学科特征。

1.3 发表论文学科领域统计与分析

爬壁机器人领域学科分布呈明显集聚特征,如图 3 所示。工程学占比 33.2%,以机械结构设计、载体轻量化技术为核心;计算机科学占比 27.4%,聚焦路径规划与自主避障算法,二者合计 60.6%,构成技术突破与应用落地的核心驱动力。

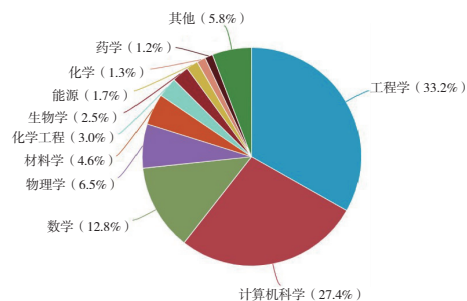


图 3 爬壁机器人领域学科分布统计图

2 爬壁机器人吸附方式

针对桥梁结构中主流的钢结构与混凝土两类基材,国内外研究者围绕其表面特性与力学需求,开发出多类适配性吸附技术方案。

本节针对爬壁机器人的吸附方式展开讨论。在现有的研究以及应用中,磁吸附和负压吸附是两种最为常用的吸附方式。此外,静电吸附、仿生吸附等一些吸附方式也有应用^[4]。

2.1 磁吸附

磁吸附技术主要适配于钢箱梁、钢桁架桥等铁磁质桥梁结构^[5],其核心优势体现在3个方面:a)吸附力输出强度高;b)作业过程能耗损耗低;c)复杂工况下运行可靠性强^[6],在钢结构桥梁作业场景中应用优势显著。

1) 永磁吸附

永磁吸附技术以钕铁硼等永磁体为核心产生吸附力,无需外部能源供给,具备高安全性与可靠性。韩力春等^[7]针对新型刚柔耦合爬壁机器人,如图4所示,通过优化磁路设计,在保障吸附力的同时实现轻量化,常见结构包括磁轮、磁足交替式,但该技术对非铁磁表面适配性差且移动时磁阻力较大。

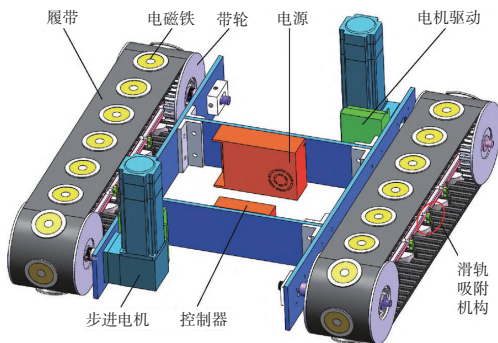


图4 一种磁吸附履带式爬壁机器人

2) 电磁吸附

电磁吸附技术通过调控通电线圈电流生成磁场,可主动控制吸附力^[8],利于机器人吸附脱离与减小运动阻力。HONG等^[9]设计出了一种采用新型电永磁技术的机器人,充磁后吸附力便不受断电影响,如图5所示,具有较高的安全性。

3) 混合吸附

混合吸附技术整合两类吸附方式优势,以永磁体提供基础吸附力,依托电磁铁实现吸附力动态调节,旨在平衡系统能耗、作业安全性与吸附可控性。董家候等^[10]设计的爬壁机器人即采用该

方案,可适配焊缝打磨场景下的复杂受力工况,保障作业稳定性。

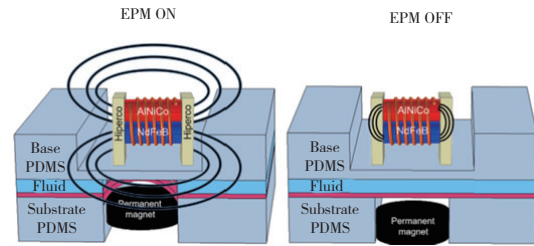


图5 电永磁原理图

2.2 负压吸附

负压吸附通过真空泵或文丘里效应等在密封腔室内产生负压。对壁面材质没有磁性要求,适用于混凝土桥墩、桥塔等表面^[11]。

丁威等^[12]采用一个位于车体底部中心的大吸盘来进行涡轮抽气吸附,并通过在吸盘的边缘构筑多层柔性密封带和使用大流量型涡轮抽气单元来保持吸盘内部的负压,使得机器人可以吸附在表面上。

GE等^[13]提出了一种被动吸盘吸附的方式,通过电机控制底盘的伸缩量,结合导轨联合控制,如图6所示,能够实现吸附方式的周期性切换。

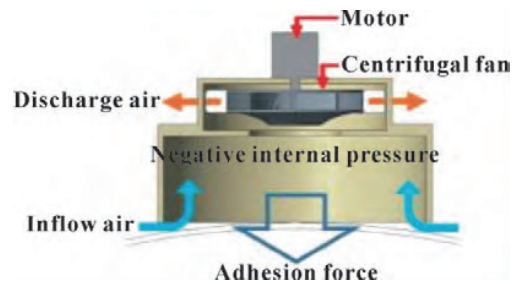


图6 吸盘负压原理示意图

2.3 其他吸附方式

此外,还有模仿壁虎脚掌的微纳米粘附、模仿昆虫的针刺吸附等仿生吸附方式^[14],以及螺旋桨推力吸附等。这些技术大多仍处于实验室研究阶段,在桥梁检测这种高可靠性要求的场景中应用尚不成熟。

2.4 爬壁机器人吸附方式分析与对比

吸附系统是爬壁机器人实现壁面作业的核心组件,其性能直接决定机器人的作业稳定性、环境适应性及能耗效率。不同吸附方式基于不同的物理原理设计,在结构特性、适用场景及性能表现上存在显著差异。表2整理了爬壁机器人的多种典型吸附方式。

表 2 典型吸附方式分析与对比

文献	吸附方式	特点	优势	不足
韩力春 2024	电磁铁吸附	电磁铁提供吸附力,履带式设计,磁铁镶嵌在履带上	1)可以通过调整电磁铁的磁力来适应不同的应用场景 2)使用方便,通电可吸附,断电后方便取下	1)电磁铁能耗高,发热量大 2)电磁铁需要定期维护更换,成本较高
沈旭东 2024 ^[15]	永磁体吸附	永磁体提供吸附力,双履带式设计,磁铁嵌合在履带上	1)永磁体磁性保持,不会出现突然消磁导致无法吸附的情况 2)双履带式的设计使得机器人在通过壁面的连接处时具有优势	磁力大小无法调节,在实际使用中可能出现一些不方便的情况
董家候 2023	永磁体磁性吸附	永磁体提供吸附力,轮式设计,额外使用永磁盒来装载永磁体	1)永磁体磁性保持,不会出现突然消磁导致无法吸附的情况 2)磁铁不在轮上,维护更加便捷	1)磁力大小固定,无法调节 2)磁铁额外使用永磁铁盒,加重了机器人自重
HONG 2022	新型电永磁吸附	采用新型电永磁技术,充磁后吸附力不受断电影响	1)断电后吸附力保持稳定,桥梁高空检测安全性高 2)无需持续供电维持吸附,相较传统电永磁能耗更低	1)充磁、退磁需专用控制模块,系统结构复杂度增加; 2)磁力调节依赖充磁参数预设,实时调整灵活性不足
丁威 2024	涡轮抽气吸附	单个密封腔,吸盘的边缘构筑多层柔性密封带	1)适用性广 2)结构简单,维护方便	1)对吸附表面平整度要求高,难以适应复杂表面情况 2)容错性低,一旦气室漏气整车停摆
黄海新 2023 ^[16]	基于后向闭式叶轮排气负压吸附	后向闭式叶轮,采用密封圈,动力轮安装于负压腔上表面,使用万向轮控制方向	1)吸附表面材料适应性好 2)结构简单,自重轻,对负压吸附所需力要求相对小	1)对表面平整度要求高 2)容错性低 3)噪声大,能耗大
樊明 2022 ^[17]	反推力吸附	采用双旋翼螺旋桨反推力,兼具前驱动力与壁面吸附力	1)吸附力与驱动力集成,无需额外配置吸附机构 2)旋翼倾角可调节,单度变化的运动效果优于成倍变化	1)机器人结构复杂性降低了螺旋桨气动效率 2)依赖螺旋桨工作,可能受壁面环境影响吸附稳定性
薛朝军 2021 ^[18]	采用共轴双旋翼推力吸附	共轴双旋翼推力吸附	1)对被吸附表面要求低,在环境较差的表面上仍然具有良好的吸附表现	1)能耗高,噪声大 2)需要对叶片进行设计,设计要求高
GE 2020	被动吸盘吸附	电机控制底盘伸缩量,结合导轨联合控制,实现吸附方式周期性切换	1)吸附状态可周期性切换,适配桥梁壁面不同区域检测需求 2)采用被动吸附+主动控制模式,结构响应灵活	1)依赖电机与导轨协同控制,系统控制逻辑复杂度较高 2)吸盘吸附易受壁面平整度影响,桥梁表面杂质可能降低吸附稳定性
高国庆 2018 ^[19]	仿生吸附	采用独特吸附及摇杆控制,仿尺蠖步态运动	1)仿尺蠖步态适配崎岖壁面,复杂表面通过性强 2)摇杆控制精度高,运动姿态可控性好	1)步态运动周期较长,检测作业效率相对较低 2)独特吸附结构的通用性较弱,适配不同桥梁壁面需针对性调整

3 爬壁机器人底盘设计

3.1 移动方式

1) 轮式移动

轮式移动效率高、速度快、控制简单,是平坦壁面上的理想选择。文献[7]设计的刚柔耦合结构,在一定程度上通过结构的柔性变形提升了轮

式机构对不平整壁面的适应性。

2) 履带式移动

履带式移动接地面积大,压强小,对壁面的适应性优于轮式,具有一定的越障能力。文献[15]中深入研究了双履带机器人在不同曲率过渡壁面上的运动稳定性,这对于在桥梁复杂几何结构上行驶至关重要。ZHU等^[20]开发了履带式爬壁机

机器人。朱志宏等^[21]针对微小型壁面检测平台进行了研究。凌正刚等^[22]对圭目爬壁机器人进行的机械分析也展示了履带式结构的工程应用。

卢红煜等^[23]设计的翻越式清洁机器人,采用履带式行走机构,结合翻转设计可以在玻璃面上实现翻面作业。

3) 足式移动

足移动模仿昆虫或动物的行走方式,具有极高的灵活性和越障能力,能够适应极其复杂的非结构化环境。目前在桥梁检测中的应用案例较少,是未来极具潜力的研究方向。

4) 仿生移动

文献[19]研发的仿尺蠖爬壁机器人采用独特的吸附及摇杆控制,实现了高仿真的步态运动,在崎岖壁面上表现出潜力。陈星燃^[24]研究的隧道检测机器人也涉及特殊的移动机构以适应管片接缝等障碍。

3.2 刚柔耦合与被动自适应设计

传统的刚性结构难以适应复杂曲面。文献[7]提出的“新型刚柔耦合爬壁机器人虚拟样机建模与仿真分析”代表了重要发展方向这一理念与JIANG等^[25-26]的被动自适应设计不谋而合,均是通过巧妙的机构学设计应对桥梁钢结构的曲率变化。

4 爬壁机器人关键挑战

4.1 复杂曲面与障碍物的适应性

桥梁表面并非理想平面,存在焊缝、螺栓、加劲肋、拐角以及复杂的曲面过渡。文献[15]的研究虽关注了过渡壁面,但如何让机器人稳定、平滑地通过这些几何特征,并在此过程中保持可靠吸附和不发生倾覆,仍是亟待解决的难题。

4.2 可靠吸附与高效移动的矛盾

对于负压吸附,密封性与移动灵活性之间存在固有矛盾:良好的密封需要紧贴壁面,但这会增大摩擦,影响越障。如何通过创新机构设计来平衡这一矛盾,是提升机器人综合性能的关键。

5 结语

未来的检测机器人将不再是单一功能平台,而是集成了光学、声学、热学等多种传感器的移动检测中心,机器人采集的实时数据将与桥梁的数字孪生模型动态交互。机器人不仅为数字孪生模型提供真实数据更新,还能从中获取最优检测路

径指令,实现物理世界与虚拟模型的闭环互动。单一机器人可能无法高效完成超大桥梁的检测任务。多个低成本、功能简化的机器人可通过网络通信协同工作,分工合作,快速覆盖大面积区域。当某个机器人发现疑似重大损伤时,可召唤搭载精密检测设备的机器人进行复核,极大提升检测效率与鲁棒性。

参考文献:

- [1] 李安,陶波,丁汉. 磁吸附爬壁机器人研究进展及其应用探索[J]. 机器人,2025,47(1):123-144.
- [2] 杨慧轩,刘荣,何建东,等. 爬壁机器人吸附方法研究综述[J]. 机床与液压,2023,51(21):206-216.
- [3] FUJIE M, IWAMOTO T, KAMEJIMA K, et al. Mobile robot with transformable crawler and intelligent guidance [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1984, 1(3/4):375-382.
- [4] TAO B, GONG Z Y, DING H. Climbing robots for manufacturing [J]. National Science Review, 2023, 10(5):nwad042.
- [5] 邱仕诚,伍剑波,赵恒忠,等. 一种基于磁力吸附的储罐爬壁机器人本体设计[J]. 中国机械工程,2022,33(3):270-278.
- [6] 聂佩晗,张雅婷,陈勇. 爬壁机器人发展与关键技术综述[J]. 机床与液压,2022,50(4):155-161.
- [7] 韩力春,王黎明,薛毓铨,等. 新型刚柔耦合爬壁机器人虚拟样机建模与仿真分析[J]. 机械设计,2024,41(3):42-51.
- [8] GHOLIZADEH A, ABBASLOU S, XIE P F, et al. Electronically actuated microfluidic valves with zero static - power consumption using electropermanent magnets[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 296:316-323.
- [9] HONG S, UM Y, PARK J, et al. Agile and versatile climbing on ferromagnetic surfaces with a quadrupedal robot[J]. Science Robotics, 2022, 7(73):eadd1017.
- [10] 董家候,郑甲红,何凯,等. 一种基于磁力吸附的焊缝打磨爬壁机器人设计[J]. 机床与液压,2023,51(3):35-43.
- [11] JOSE J, DEVARAJ D, MATHANAGOPAL R M, et al. Investigations on the effect of wall thickness on magnetic adhesion for wall climbing robots [J]. International Journal of Robotics and Automation, 2021, 36(3):169-177.
- [12] 丁威,夏哲,舒江鹏,等. 基于负压吸附爬壁机器人和Transformer的混凝土桥塔裂缝识别检测[J]. 中国公路学报,2024,37(2):53-64.

(下转第19页)

- [9] 郑彬,罗山,蒋银成. 基于 RGB 图像处理的轮胎胎面缺陷检测方法研究[J]. 制造业自动化,2023,45(6): 35-38,49.
- [10] 杨荣,王明伟,刘思铭. 基于图像处理算法的目标识别、定位与跟踪系统设计与实现[J]. 物联网技术, 2020,10(9):75-79.
- [11] 刘佳,唐鋈磊,林冰,等. 基于 HSV(色相-饱和度-明度)与形状特征的涂层锈点图像识别[J]. 中国表面工程,2023,36(4):217-228.
- [12] 沈涛,郭超,刘永兴. 工业机器人视觉定位及图像处理分析[J]. 现代制造技术与装备,2022,58(6): 185-187.
- [13] 郑成勇. 一种 RGB 颜色空间中的车牌定位新方法[J]. 中国图象图形学报,2010,15(11): 1623-1628.
- [14] GAHRAMANOVA A. Locating centers of mass with image processing [J]. Undergraduate Journal of Mathematical Modeling:One + Two,2019,10(1):1-26.
- [15] 尉金强,杜文正,孙晓艳,等. 基于目标 HSV(色调-饱和度-亮度)空间图像自适应分割的直线检测算法[J]. 火箭军工程大学学报,2024(5):59-68.
- [16] 江燕,江艾梓. 图像处理在机械手视觉定位控制中的应用[J]. 电气传动,2019,49(2):40-44.
- [17] 董翼宁,曹景胜,孙飞宇,等. 基于 OpenCV 图像处理的车道线识别研究[J]. 仪器仪表与分析监测, 2023(3):29-32.
- [18] 曹灿灿,龚声蓉,周立凡,等. 基于 HSV 颜色空间特征的视频烟雾检测[J]. 计算机技术与发展,2022, 32(5):171-175.
- [19] 刘飞飞,窦祥飞,薛亚鑫,等. 基于机器视觉的铜箔表面缺陷检测方法研究[J]. 机电工程技术,2023, 52(3):206-209,214.
- [20] ZHONG H X, WANG R B. A visual-degradation-inspired model with HSV color-encoding for contour detection[J]. Journal of Neuroscience Methods,2022, 369:109423.
- [21] 林福宗. 多媒体技术基础[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2009.
- [22] REHMAN N A, HAROON F. Adaptive Gaussian and double thresholding for contour detection and character recognition of two-dimensional area using computer vision[C]//INTERACT 2023. MDPI,2023:23.
- [23] FENG Z R, WANG L X, ZHAO G Y. Design of assistance system based on OpenCV for color-blindness[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 321/322/323/324: 1098-1101.

收稿日期:2024-01-12

(上接第 14 页)

- [13] GE D X, TANG Y C, MA S G, et al. A pressing attachment approach for a wall-climbing robot utilizing passive suction cups[J]. Robotics,2020,9(2):26.
- [14] SAHAY R, LOW H Y, BAJI A, et al. A state-of-the-art review and analysis on the design of dry adhesion materials for applications such as climbing micro-robots[J]. RSC Advances,2015,5(63):50821-50832.
- [15] 沈旭东,钟艳,程楠,等. 吸附式双履带爬壁机器人过渡壁面爬行运动分析[J]. 现代制造技术与装备, 2024,60(10):84-89.
- [16] 黄海新,王峥,程寿山,等. 负压吸附桥梁检测爬壁机器人的本体结构优化设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(12):21-33.
- [17] 樊明,梁鹏,高学山,等. 反推力吸附的爬壁机器人设计及实验研究[J]. 北京理工大学学报,2022, 42(11):1150-1158.
- [18] 薛朝军. 共轴双旋翼推力吸附桥梁检测爬壁机器人优化设计与试验[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [19] 高国庆,王涛,王斌锐. 仿尺蠖爬壁机器人自适应吸附及摇杆控制[J]. 智能系统学报,2018,13(2): 208-213.
- [20] ZHU J, SUN D, TSO S K. Development of a tracked climbing robot[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems,2002,35(4):427-443.
- [21] 朱志宏,李济泽,彭晋民,等. 微小型壁面检测爬壁机器人移动平台研究[J]. 机械工程学报,2011, 47(3):49-54.
- [22] 凌正刚,胥健,贺骥,等. 圭目爬壁机器人的机械分析[J]. 工程技术,2022(2):105-108.
- [23] 卢红煜,秦明旺,王浩坤,等. 自动翻越式玻璃幕墙清洁机器人设计[J]. 机械制造与自动化,2021, 50(6):181-185.
- [24] 陈星燃. 隧道表面检测爬壁机器人及相关技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2018.
- [25] JIANG Z, MA Z, JU Z J, et al. Design and analysis of a wall-climbing robot for passive adaptive movement on variable-curvature metal facades[J]. Journal of Field Robotics,2023,40(1):94-109.
- [26] JIANG Z, ZHAO Z, CHEN B, et al. Design and analysis of a passive adaptive wall-climbing robot based on five-bar mechanisms [J]. Ocean Engineering, 2024, 298:117140.

收稿日期:2026-01-04