

仿生主动式曲面真空吸附桥梁爬壁 裂缝检测机器人设计

刘清屹, 田海浪, 王 博

(重庆市勘测院有限公司, 重庆市 401120)

摘要: 针对桥梁检测中人工效率低、机器人环境适应性差的问题, 提出一种具有仿生主动式曲面真空吸附机构的爬壁机器人。通过融合改进YOLO算法模型, 实现了裂缝长度(± 1 mm)、宽度(± 0.2 mm)的高精度检测。机器人采用模块化设计, 集成三自由度机械臂与真空吸附系统, 负载能力达9 kg, 可在复杂曲面桥墩稳定作业。实验表明: 该机器人在曲面桥墩的吸附成功率为95%, 裂缝检出率超过90%, 显著提升了桥梁检测的智能化水平与安全性。

关键词: 桥墩裂缝检测; 爬壁机器人; 仿生吸附; YOLO算法

中图分类号: TP24

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0014-05

Design of Wall-climbing Bridge Crack Detection Robot with Bionic Active Curved Surface Vacuum Adsorption Mechanism

LIU Qingyi, TIAN Hailang, WANG Bo

(Chongqing Surveying Institute Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: To address the low manual efficiency and poor environmental adaptability of robots in bridge inspection, a wall-climbing robot equipped with a bionic active curved-surface vacuum-adsorption mechanism is proposed. By integrating a modified YOLO algorithm model, the high-precision detection of crack length (± 1 mm) and width (± 0.2 mm) is realized. The robot adopts a modular design, integrating a three-degree-of-freedom mechanical arm and a vacuum adsorption system. With a load capacity of up to 9 kg, it can operate stably on complex curved surface bridge piers. The experimental results show that the adsorption success rate of this robot on curved bridge piers is 95%, and the crack detection rate exceeds 90%, which significantly enhance the intelligent level and safety of bridge inspection.

Keywords: bridge pier crack detection; wall-climbing robot; bionic adsorption; YOLO algorithm

0 引言

目前, 桥梁的检测方式耗费大量时间和精力, 且过程中存在显著的安全隐患。在桥梁检测领域, 桥墩高度可达数十米, 水下桩基处于未知的深水区域, 检测空间受限, 许多区域人员无法到达, 检测过程极易造成人员伤害, 这些因素都增加了检测工作的风险。

由于桥梁普遍具有较大的空间跨度和复杂的场景, 传感器只能放置在特定位置, 导致其他未安装传感器的位置不能被有效检测。因此, 面向桥梁的智能全面检测装备是未来桥梁项目工程安全运行的重点发展方向^[1]。这种智能检测装备不仅可以提高检

测效率和精度, 还能显著降低人员安全风险, 具有重要的实际意义。

基于上述人工勘测的不足之处, 国内外的高校、企业纷纷将目光聚集于机器人智能勘测领域。韩国世宗大学教授^[2]针对混凝土结构表面的勘测, 设计研发了一款用于桥墩勘测的环形爬壁机器人, 该环形爬壁机器人由高清摄像头、升降和控制装置组成, 具备高效、高精度的桥墩病害检测与尺寸测量能力, 但其结构需针对不同桥墩尺寸进行调整, 导致安装拆卸不便和人力成本增加。

南京林业大学陈勇团队^[3]研发了一种采用永磁轮驱动的巡检爬壁机器人, 结合RBPF的Gmapping和Cartographer两种SLAM算法, 具备快速勘测大型钢结构、高精度定位和远程控制的优点, 但其仅适用于钢结构环境, 无法在混凝土结构上使用, 且负载能力有

收稿日期: 2025-04-25

作者简介: 刘清屹(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事自动化监测工作。

限,无法满足搭载更多勘测设备的需求。

吕桂芝等^[4]针对港珠澳大桥的混凝土塔、墩难以自动化检测的问题,设计了一种配备六自由度(DOF)协作机器人和检测装置的负压爬壁机器人。此种机器人可与包括弹力波检测单元、超声探伤仪和高清摄像头等各种检测设备兼容。通过机器人在墙面上的防倾覆和防滑条件分析,设计四叶轮抽气模块给负压室提供充足负压压力,并通过四轮实现机器人的移动。

为了克服这些技术瓶颈,本研究提出了一种具有仿生主动式曲面真空吸附机构的桥梁爬壁裂缝检测机器人,旨在提升桥梁检测的智能化水平。本文详细介绍了机器人的结构设计、运动模型及表观病害检测算法。实验结果表明,该机器人具有高操作性和高精度的病害识别能力,能在复杂环境中高效稳定地进行桥梁检测和维护,显著提高了桥梁检测的效率和准确性。

1 机器人结构设计

本文旨在研发一种适用于山地城市复杂桥梁环境的爬壁裂缝检测机器人,采用仿生主动式曲面真空吸附机构,以解决传统检测方法效率低下、检测精度不足等问题,提升桥梁裂缝检测的效率和精准性。

1.1 总体结构设计

本项目研发了一款用于桥梁、高架、隧道等高空环境勘测与作业的爬壁机器人,其外形借鉴六足亚纲昆虫结构,由地面工作站和机器人主体组成,通过线缆和气动管路相连。机器人主体包括吸附、移动、检测以及高空作业机构 4 大模块:吸附系统通过地面真空泵产生负压,将机器人牢固吸附于作业表面;移动系统采用仿昆虫节肢的舵机驱动机构,实现灵活攀爬;检测系统配备摄像头及相关传感器,通过无线或有线方式传输数据至地面站;高空作业机构为安装在机器人主体上的三自由度机械臂,实现高空裂缝检测及埋点作业。同时,开发配套软件系统,实现机器人运动控制、墙面状态监测及运行状态实时可视化管理。高空病害勘测及作业机器人结构见图 1,硬件电路构成见图 2。

1.2 攀爬结构设计

为提升爬壁机器人的负重能力与运动效率,并解决驱动力与吸附承载力的匹配问题,本文研究提出一种模块化、平台化的爬行驱动方案。通过对机身结构进行系统性解耦与重构,将机器人划分为上



图 1 高空病害勘测及作业机器人结构图

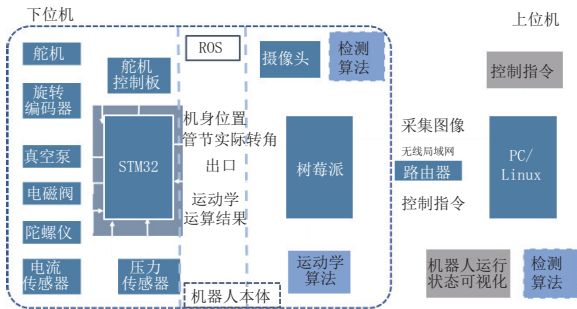


图 2 高空病害勘测及作业机器人硬件电路构成

机架、转向机构、下机架及直行机构 4 大功能模块,并针对各模块开展轻量化设计与性能优化。

(1)上下机架轻量化

在保持原上下机架结构不变的情况下,采用工业铝型材进行替换。该材料在各种工业与建筑业中广泛应用,具有轻质耐用、导热与导电性能好,耐腐蚀性高等优点。

(2)转向机构精密化

位于机身中部,由舵机、薄壁深沟球轴承与外加固定结构组成。利用薄壁深沟球轴承承载轴向与纵向载荷。转动角度由舵机控制,可以自由调节。

(3)直行机构高效化

位于机身底部,采用SFS静音滚珠丝杆套组。该套组包括联轴器、BK固定座、丝杆、SFS螺母、铁螺母座以及BF支撑座。利用电机驱动滚珠丝杠前后运动,其运动速度可由转速调控。

1.3 吸附结构设计

为解决桥墩外表面病害检测过程中爬壁机器人作业稳定性差的问题,本文提出了一种复杂表面下具备可控真空吸附特性的柔性仿生变胞构件设计方法。通过分析结构整体电流、气流与负压之间的协同作用机理,揭示了机器人在重力、摩擦力和吸附力共同作用下的动态特性,开发了一种结构自适应能力强的仿生主动式曲面真空吸附机构。

针对实际应用场景中存在的一般平面和桥墩曲面两种不同类型表面,研究了各自的真空吸附特性差异,并据此开发出有针对性的吸附结构方案。在

一般平面场景下,通过三维建模设计真空吸附吸盘结构,并使用Fluent软件分析吸盘内部流场,计算出吸盘内外压差;同时,建立铝钉-混凝土接触模型,利用ANSYS软件分析混凝土的破坏机理与铝钉之间的接触关系。结合吸盘流场分析与接触关系研究,明确了机器人动态运行过程中多种力共同作用的特性,最终开发出优化后的真空吸盘结构(见图3)。



图3 智能爬壁机器人吸盘结构

工程实践发现,原设计采用的橡胶材质密封圈由于较硬,难以很好地贴合粗糙墙面,密封效果差,从而影响机器人吸附的稳定性。针对这一问题,本研究将吸盘密封圈材质由橡胶改为柔性海绵,有效提高了密封贴合性能,加快了吸附速度和提升了机器人整体运行效率(见图4)。同时,配合改进的关节驱动装置,对整机结构进行了相应优化设计,显著增强了机器人的负载能力与实际应用性能。



图4 重新设计的吸附结构

1.4 作业机构设计

机器人主体采用模块化设计,配备了一套三自由度关节式机械臂,该机械臂主要由旋转底座、大臂、小臂和末端执行器(包含上料爪和贴片压实滚)构成(见图5)。其中,旋转底座具备360°的旋转自由度,实现机械臂在各方向上的抓取动作;大臂的俯仰运动范围为 $-15^{\circ} \sim 85^{\circ}$,小臂的俯仰运动范围为 $-20^{\circ} \sim 95^{\circ}$,小臂端部配有夹持机构,以实现精准抓取与操作。机械臂采用步进电机结合减速器进行驱动,每个自由度的运动相互独立、互不干扰,并以3个限位开关明确各自由度的零点位置。

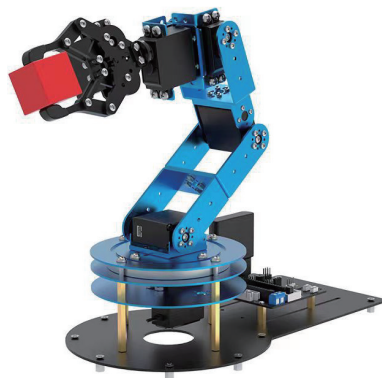


图5 机械臂结构示意图

在结构传动设计上,本研究借鉴了码垛机器人采用的平行四边形拓扑结构,通过三脚架分别连接大臂与大臂副杆、小臂与小臂副杆,组成串联的平行四边形机构。该设计能确保末端执行器在运动过程中始终与墙面保持水平,并实现大臂和小臂的独立运动。此外,平行四边形结构具备良好的拓展性,可适应传动过程中轴距的变化,具有结构简单、强度高、定位精度高、重量轻、重心靠近机身且耐磨损等优点,非常适合需要频繁重复运动的高空作业场景。

2 检测算法设计

针对桥梁表观病害在特征类型、尺度大小和空间分布上呈现出的多样性,直接使用传统YOLO算法进行检测存在识别精度不足的问题。为提升桥梁病害的检测识别效果,本文提出了一种改进的YOLO算法,能够更加精准地完成多种桥梁表观病害的检测与识别任务。

2.1 引入DenseNet优化特征提取网络

采用DenseNet^[5](稠密连接网络)替换了YOLO原有的部分特征提取模块。DenseNet通过网络层间的密集跳跃连接,将前层输出直接连接至所有后续层,显著提高了特征信息的复用率和传播效率,减少了模型参数量,有效提升了特征提取能力,降低了模型过拟合风险(见图6)。

2.2 在多尺度检测模块中嵌入空间金字塔池化模块

为更好地融合局部和全局特征信息,引入空间金字塔池化模块(SPP)^[6](见图7)。SPP通过不同尺度的区域划分和最大池化操作,将多尺度特征图整合为统一的特征向量。该方法提高了模型对不同尺寸目标的灵活性与适应性,保留了细粒度局部特征的同时增强了全局语义特征的提取能力。

2.3 引入CIoU边框回收损失函数

为进一步优化YOLO算法的边框定位精度,本文

	类型	通道数	尺寸	输出
1 × 残差模块	卷积层	32	3 × 3	416 × 416
	卷积层	64	3 × 3 / 2	208 × 208
	卷积层	32	1 × 1	
	卷积层	64	3 × 3	
	残差			208 × 208
2 × 残差模块	卷积层	128	3 × 3 / 2	104 × 104
	卷积层	64	1 × 1	
	卷积层	128	3 × 3	
	残差			104 × 104
	卷积层	256	3 × 3 / 2	52 × 52
8 × 残差模块	卷积层	128	1 × 1	
	卷积层	256	3 × 3	
	残差			52 × 52
	卷积层	512	3 × 3 / 2	26 × 26
	卷积层	256	1 × 1	
8 × 残差模块	卷积层	512	3 × 3	
	残差			26 × 26
	卷积层	1024	3 × 3 / 2	13 × 13
	卷积层	512	1 × 1	
	卷积层	1024	3 × 3	
4 × 残差模块	残差			13 × 13

(a)改进前

	类型	通道数	大小	输出
1 × 残差模块	卷积层	32	3 × 3	416 × 416
	卷积层	64	3 × 3 / 2	208 × 208
	卷积层	32	1 × 1	
	卷积层	64	3 × 3	
	残差			208 × 208
2 × 残差模块	卷积层	128	3 × 3 / 2	104 × 104
	卷积层	64	1 × 1	
	卷积层	128	3 × 3	
	残差			104 × 104
	卷积层	256	3 × 3 / 2	52 × 52
8 × 密集模块	密集层	64	1 × 1	
	密集层	32	3 × 3	
	卷积层	256	1 × 1	
	平均池化		2 × 2 / 2	26 × 26
	密集层	128	1 × 1	
8 × 密集模块	密集层	64	3 × 3	
	卷积层	512	1 × 1	
	平均池化		2 × 2 / 2	13 × 13
	密集层	256	1 × 1	
	密集层	128	3 × 3	
4 × 密集模块	密集层			

(b)改进后

图 6 特征提取网络改进前后对比图

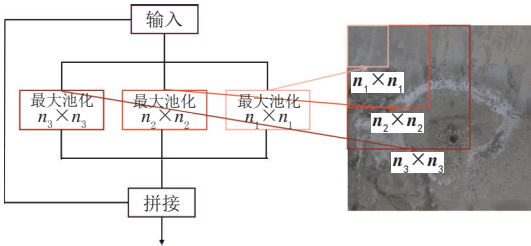


图 7 空间金字塔池化对特征去冗余融合

引入了更加全面的 CIOU^[7]损失函数。CIOU 算法在 DIOU^[8]基础上(见图 8),综合考虑了预测框与标注框的重叠面积、中心点距离以及长宽比三个因素。通过包含长宽比一致性作为惩罚项,显著提高了边框回归的精确度,加速了模型的收敛速度,并提升了检测效果。

因此,其计算公式如下:

$$L_{\text{DIOU}} = 1 - \text{IoU} + \frac{\rho^2(b, b_{\text{gt}})}{C^2} \quad (1)$$

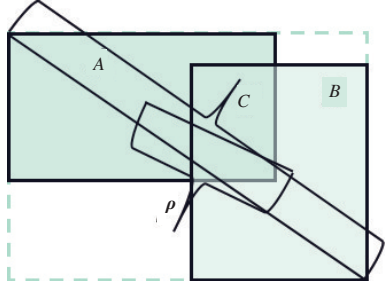


图 8 DIOU 计算示意图

式中: b 为预测框的中心坐标值; b_{gt} 为标注框的中心坐标值; ρ 为两点的欧式距离; C 为同时涵盖两框的最小外接矩形框的对角线距离。

CIOU 在 DIOU 的基础上,增强了标注框和预测框的长宽比,进一步地提升边框回归的精度,其计算见式(2):

$$L_{\text{CIOU}} = 1 - \text{IoU} + \frac{\rho^2(b, b_{\text{gt}})}{C^2} + \alpha v \quad (2)$$

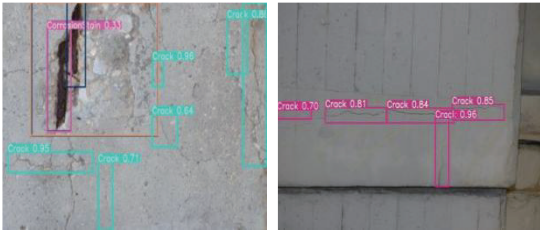
式中: $\alpha = \frac{v}{(1 - \text{IoU}) + v}$,为权重参数; $v = \frac{4}{\pi^2} \left(\arctan \frac{w_{\text{gt}}}{h_{\text{gt}}} - \arctan \frac{w}{h} \right)^2$,用来衡量预测框和标注框长宽比一致性。

2.4 利用 K-means 聚类算法优化 YOLO 先验框数据

针对桥梁病害数据集的实际特点,使用 K-means 聚类^[9]算法对标注框进行迭代聚类,生成更符合实际病害尺度分布的 YOLO 算法先验框数据。通过优化先验框尺寸与比例,提高了模型对桥梁病害目标的拟合速度和识别精度(见图 9)。



(a)原YOLOv3



(b)改进后YOLOv3

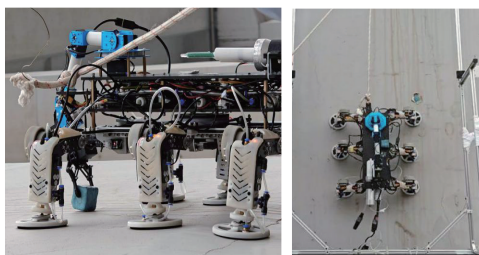
图 9 原 YOLO 与改进 YOLO 对管道表观露筋和剥落病害检测效果对比图

通过上述 4 个方面的改进,优化后的 YOLO 算法在桥梁表观病害检测识别中表现出了明显的性能优势,尤其在露筋、剥落等典型病害识别任务中,实现

了更高的精度与更好的泛化能力。

3 工程应用

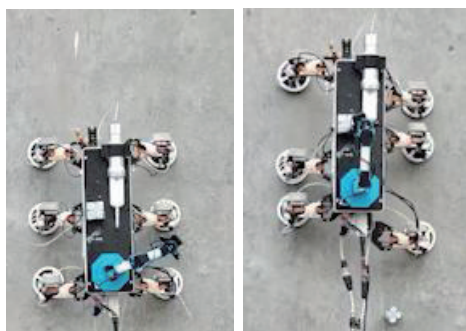
本文项目已成功制作生产样品,为爬壁机器人设计了地面工作站和机器人本体两个组成部分,并通过线缆与气动管路实现二者之间的连接。原理样机制作完成后,在大连地铁4号线项目中进行了测试(见图10)。效果良好,获得了业主方一致好评。



(a) 爬壁机器人 (b) 爬壁机器人测试
图10 爬壁机器人及测试图片

大连市地铁4号线一期西起营城子,东至梭鱼湾,沿旅顺北路、规划路、松江路等道路布线,正线长23 km。虽全为地下线,但影响周边建构筑物。施工前期便使用机器人特种设备进行巡检及高空埋点。

在工程应用过程中,对机器人平台联合定制埋点作业设备,实现工程化应用,控制机器人到作业点的移动及到作业点之后的作业任务,并直到全部作业完成为止。图11所示为系统应用在高耸建构筑物及桥梁结构等环境下的高空埋点。



(a) 场景一 (b) 场景二
图11 高空埋点作业应用场景

4 结 语

本文项目针对混凝土建筑物表面不平整导致爬壁机器人作业稳定性差的难题,研究提出了一种复

杂表界面下具有可控真空吸附特性的柔性仿生变胞构件设计方法,开发了一款具有结构自适应能力的仿生主动式曲面真空吸附爬壁机器人。通过现场实验验证,所研发机器人在实际桥梁复杂环境中表现出良好的适应性和可靠性,具体体现为以下优势:

(1)机器人负载能力高达9 kg,可稳定完成高空埋点及相关作业任务。

(2)裂缝识别长度测量精度达到1 mm,宽度测量精度达到0.2 mm,裂缝检出率超过90%,显著提升了桥梁病害检测效率和准确性。

(3)机器人具备优异的环境适应性,仿生主动式曲面吸附机构能快速自适应不同粗糙程度和形状复杂的桥梁表面,显著提高了机器人在各种工况下的稳定性。

(4)模块化和平台化设计使机器人维护方便、扩展性强,便于快速拆装和功能升级,显著降低了工程应用过程中的维护成本和设备停机时间。

参考文献:

- [1] 刘咏,雷晓卡.高速公路桥梁和隧道的质量控制与检测探究[J].质量与市场,2024(4):12-14.
- [2] GRIECO J C, PRIETO M, ARMADA M, *et al.* A six-legged climbing robot for high payloads[C]//Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications. New York: IEEE, 1998(1):446-450.
- [3] 洪晓玮.具有壁面过渡功能的大型钢结构巡检爬壁机器人研制[D].南京:南京林业大学,2021.
- [4] LYU G, WANG P, LI F D S. A heavy-load wall-climbing robot for bridge concrete structures inspection[J]. Industrial Robot, 2024, 51(3): 465-478.
- [5] HUANG G, LIU Z, VAN Der Maaten L, *et al.* Densely connected convolutional networks[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. New York: IEEE, 2017: 4700-4708.
- [6] HE K, ZHANG X, REN S, *et al.* Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. New York: IEEE, 2015, 37(9): 1904-1916.
- [7] SHI C, LEI M, YOU W, *et al.* Enhanced floating debris detection algorithm based on CDW-YOLOv8[J]. IOP Publishing, 2024(5): 136-145.
- [8] ZHENG Z H, WANG P, LIU W, *et al.* Distance-IoU Loss: Faster and Better Learning for Bounding Box Regression[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. New York: AAAI, 2020, 34(7): 12993-13000.