

本文引用格式: 罗健,华攸水,张浩,等.金属壁面焊缝表面缺陷检测爬行机器人系统[J].自动化与信息工程,2023,44(2):22-26.

LUO Jian, HUA Youshui, ZHANG Hao, et al. Crawling robot system for detecting surface defects of metal wall welds[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(2):22-26.

金属壁面焊缝表面缺陷检测爬行机器人系统*

罗健¹ 华攸水¹ 张浩² 曹立超² 蒋晓明²

(1.广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

2.广东省科学院智能制造研究所, 广东 广州 510070)

摘要: 针对目前金属壁面焊缝表面缺陷检测主要由人工完成, 检测结果依赖检测人员的工作经验, 且高空壁面作业较危险的情况, 设计一款轮式磁吸附爬行机器人系统。该系统的轮式磁吸附爬行机器人可在金属壁面运动, 利用 YOLOv5 目标检测框架训练神经网络分类模型, 并将焊缝表面缺陷分类模型搭载于人机交互端软件, 实现金属壁面焊缝表面缺陷的实时检测。

关键词: 金属壁面; 焊缝表面缺陷; 缺陷检测; 轮式磁吸附爬行机器人; YOLOv5

中图分类号: TP242.2; TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-2605(2023)02-0005-05

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2023.02.005

Crawling Robot System for Detecting Surface Defects of Metal Wall Welds

LUO Jian¹ HUA Youshui¹ ZHANG Hao² CAO Lichao² JIANG Xiaoming²

(1.Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2.Institute of Intelligent Manufacturing, Guangdong Academy of Science, Guangzhou 510070, China)

Abstract: A wheeled magnetic adsorption crawling robot system is designed to address the current situation where the detection of surface defects in metal wall welds is mainly done manually, and the detection results rely on the work experience of the testing personnel. In addition, high-altitude wall operations are more dangerous. The wheeled magnetic adsorption crawling robot can move on the metal wall, and uses the YOLOv5 object detection framework to train a neural network detection model. The detection model is installed in the human-computer interaction software to achieve real-time detection of surface defects in metal wall welds.

Keywords: metal wall surface; weld surface defect; defect detection; wheeled magnetic adsorption crawling robot; YOLOv5

0 引言

目前, 金属壁面焊缝表面缺陷检测主要采用人工方式, 不仅依赖于检测人员的工作经验, 还具有危险性^[1]; 且一些特定场景, 如高空、狭小空间等, 因检测人员无法到达, 导致检测困难。随着机器人技术的不断发展, 将机器人应用于金属壁面焊缝表面检测, 使高空、狭小空间或危险场合的缺陷检测成为可能^[2-3]。

本文设计一款轮式磁吸附爬行机器人系统, 用以

实现金属壁面焊缝表面的缺陷检测, 可提高检测效率、降低作业风险。

1 系统设计

1.1 系统整体框架

金属壁面焊缝表面缺陷检测爬行机器人系统主要由工业无线摄像头、人机交互端、直驱无刷电机、驱动器系统、LoRa 模块、工控机系统等组成, 如图 1 所示。

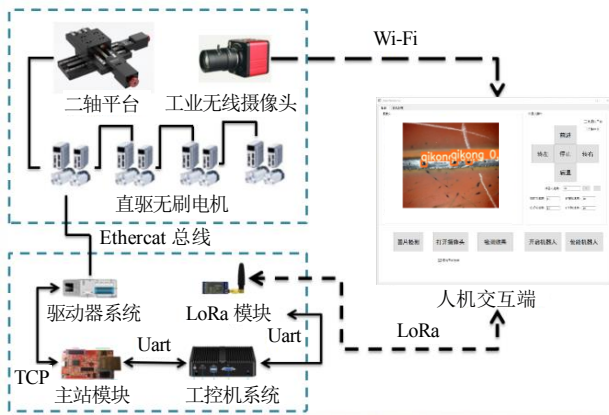


图1 金属壁面焊缝表面缺陷检测爬行机器人系统图

工业无线摄像头通过 Wi-Fi 无线通信^[4-5]将金属壁面焊缝图像传输至人机交互端。

人机交互端搭载的人机交互软件对机器人进行运动控制，同时部署神经网络分类模型对焊缝图像进行缺陷检测，并在操作界面显示检测结果。

工控机系统采用 miniPC 工控机，部署轮式磁吸附爬行机器人运动控制程序和驱动器相关程序，控制轮式磁吸附爬行机器人进行检测作业。工控机系统与驱动器系统通过以太网通信，可降低环境干扰的影响。

驱动器系统通过 Ethercat 总线对直驱无刷电机进行驱动，控制轮式磁吸附爬行机器人运动。

LoRa 无线通信具有抗干扰能力强、通信距离远等特点^[6-7]。利用 LoRa 模块可实现工控机系统与人机交互端的无线通信。其中，工控机系统利用串口与 LoRa 模块通信；LoRa 模块利用 LoRa 无线数传与人机交互端通信^[8-9]。

金属壁面焊缝表面缺陷检测爬行机器人系统由人机交互端发送指令信息；该指令信息通过 LoRa 无线网络传输至工控机系统；工控机系统根据指令信息执行相应的运动控制程序，并通过以太网控制驱动器系统和直驱无刷电机，实现运动控制。

轮式磁吸附爬行机器人本体主要由机器人平台和二轴平台组成，如图2所示。

机器人平台为轮式移动平台，搭载磁吸附轮，通过磁吸附方式实现其在金属壁面的运动。二轴平

台搭载工业无线摄像头，可调整摄像头的位置，以便采集焊缝图像。机器人平台与二轴平台均利用直驱无刷电机提供驱动力。

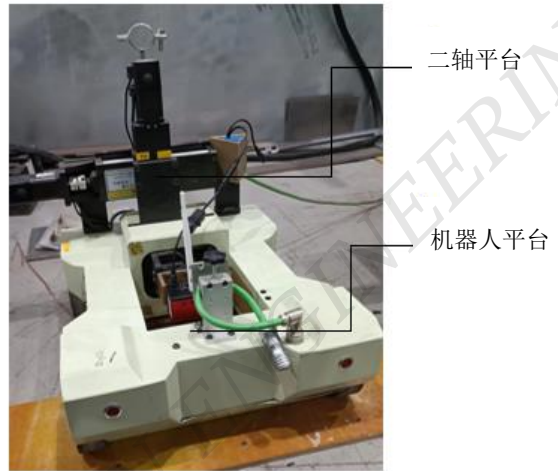


图2 轮式磁吸附爬行机器人本体

1.2 人机交互软件

人机交互软件采用 Python 语言编写，实现人机交互、轮式磁吸附爬行机器人运动控制、无线通信、焊缝表面缺陷检测等功能，功能框图如图3所示。

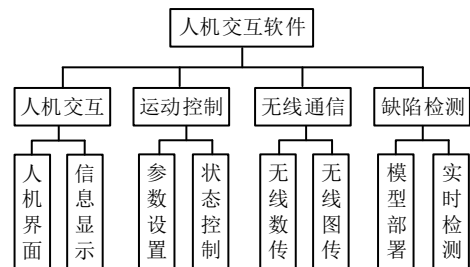


图3 人机交互软件功能框图

轮式磁吸附爬行机器人由人机交互软件控制金属壁面焊缝表面的缺陷检测工作。首先，利用实时流传输（real time streaming protocol, RTSP）协议，对工业无线摄像头采集的图像信息进行解码，获取金属壁面的焊缝图像；然后，对金属壁面的焊缝图像进行预处理，使其符合检测格式；接着，利用基于 YOLOv5 目标检测框架训练神经网络分类模型，对焊缝图像进行焊缝表面缺陷检测；最后，在焊缝图像中标注焊缝缺陷并进行分类，同时，在人机交互端实时显示。人机交互软件主要工作流程如图4所示。

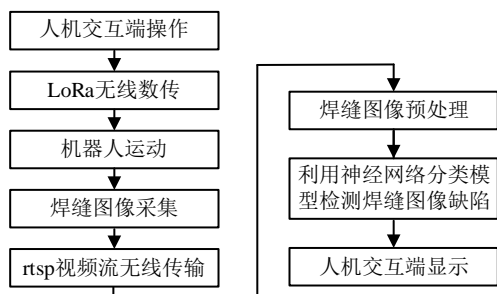


图4 人机交互软件主要工作流程

2 基于YOLOv5的焊缝表面缺陷检测

2.1 数据集处理

常见的金属壁面焊缝表面缺陷主要有咬边、气孔、焊瘤、弧坑^[10-11]4类,如图5所示。这些缺陷容易造成焊缝应力集中、开裂等现象^[12-13]。

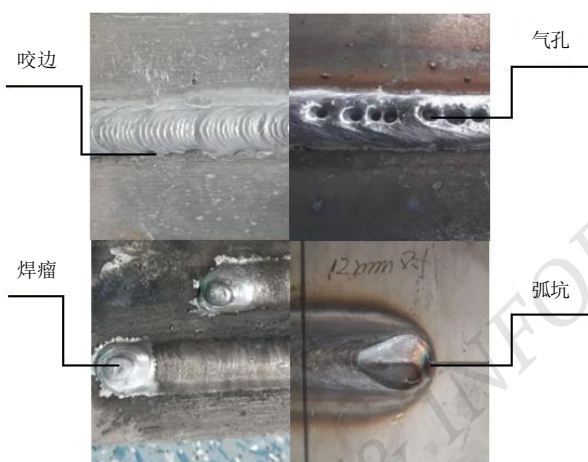


图5 常见的焊缝表面缺陷

在金属壁面焊缝表面缺陷检测之前,需要对焊缝表面缺陷进行检测分类。在收集的焊缝图像中标注焊缝表面缺陷类型,作为样本数据集。样本数据集包含600幅焊缝图像,其中上述4类焊缝表面缺陷样本数量约为2200个。

由于样本数量较少,难以训练出高精度的分类模型,因此需要对样本数据集进行数据增强。本文通过调整图像结构和颜色空间、引入噪声^[14-15]等方式进行数据增强,以改善分类模型性能,避免过拟合^[16]。经过数据增强后,共获得2600幅图像,4类焊缝表面缺陷数量如表1所示。

表1 数据增强后样本集中4类焊缝表面缺陷的数量

| 缺陷种类 | 数量/个 |
|------|-------|
| 咬边 | 2 236 |
| 气孔 | 1 511 |
| 焊瘤 | 2 648 |
| 弧坑 | 1 601 |

2.2 模型训练及测试

在数据增强后的焊缝表面缺陷数据集中随机抽取2000幅图像作为训练集,500幅图像作为验证集,余下的100幅图像作为测试集。利用YOLOv5目标检测框架训练神经网络分类模型^[17]。设置学习率为0.001; Batch_size为4;训练次数为200次。模型训练过程的损失函数值变化如图6所示,模型的损失函数值约为0.03。

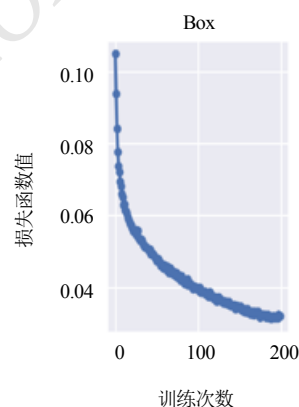


图6 模型训练过程损失函数值变化

利用训练后的焊缝表面缺陷分类模型对焊缝图像进行缺陷检测,效果如图7所示。



图7 焊缝表面缺陷检测效果图

利用焊缝表面缺陷分类模型在测试集进行测试,各类焊缝表面缺陷检测分类结果如表2所示。

表 2 各类焊缝表面缺陷检测分类结果

| 缺陷种类 | 数量/个 | 准确度/% | 召回率/% |
|------|-------|-------|-------|
| 全部 | 1 011 | 93.5 | 89.2 |
| 咬边 | 340 | 95.6 | 90.0 |
| 气孔 | 335 | 93.4 | 85.1 |
| 焊瘤 | 195 | 93.2 | 86.7 |
| 弧坑 | 141 | 91.8 | 95.0 |

由表 2 可知，该焊缝表面缺陷分类模型对焊缝表面缺陷检测准确度较高，具有较好的检测效果。

3 实验

以 Q235 钢铁壁面为平台搭建焊缝表面缺陷检测爬行机器人系统测试场景，将有咬边、气孔、焊瘤、弧坑等缺陷的焊缝试板置于该壁面上，通过操作轮式磁吸附爬行机器人来对焊缝表面缺陷进行实时检测，如图 8 所示。



图 8 轮式磁吸附爬行机器人在 Q235 钢铁壁面运动

将基于 YOLOv5 目标检测框架训练的焊缝表面缺陷分类模型搭载于人机交互端软件，操作轮式磁吸附爬行机器人运动，验证该机器人能否在 Q235 钢铁壁面上运动，以及人机交互端软件对焊缝表面缺陷的实时检测效果。

操作轮式磁吸附爬行机器人在 Q235 钢铁壁面上从下端向上运动，检测焊缝表面缺陷，运动速度为 10 cm/min，检测长约 30 cm 的焊缝所需时间约为 3 min。

在轮式磁吸附爬行机器人上搭载 WX500 型工业无线摄像头，人机交互端软件实时检测焊缝表面缺陷界面如图 9 所示，焊缝表面的咬边、气孔、焊瘤、弧坑等缺陷均被发现，检测数据及检测精度如表 2 所示。



(a) 咬边



(b) 气孔



(c) 焊瘤



(d) 弧坑

图9 人机交互端软件实时检测焊缝表面缺陷界面

由实验可知, 轮式磁吸附爬行机器人能够吸附于金属壁面, 并在壁面稳定运动; 且人机交互端软件能对焊缝表面缺陷进行实时分类检测。

4 结论

本文针对金属壁面焊缝表面缺陷检测, 设计一款轮式磁吸附爬行机器人, 能在金属壁面稳定爬行。利用 YOLOv5 目标检测框架训练神经网络分类模型, 并将分类模型搭载于人机交互端软件, 实现金属壁面焊缝表面缺陷的实时分类检测。同时利用 Wi-Fi、LoRa 等无线物联网技术, 实现远程操作、焊缝图像信息采集, 使轮式磁吸附爬行机器人作业距离增加, 适用于更多、更复杂的检测作业场景。今后, 可对基于 YOLOv5 目标检测框架训练的神经网络分类模型进行优化, 以获得更高的分类准确度。

参考文献

[1] HOWLADER, O F, SATTAR T P. Development of magnetic adhesion based climbing robot for non-destructive testing[C]// 2015 7th Computer Science and Electronic Engineering Con-

ference (CEEC), 2015.

- [2] 赵健. 船舶焊接技术的缺陷类型及其处理对策[J]. 无线互联科技, 2021, 18(3): 103-104.
- [3] 陈江兰. 大中型原油储罐的底板弧焊机器人 CO₂ 自动焊接工艺开发与应用[J]. 机电工程技术, 2022, 51(12): 265-268.
- [4] 葛亚明, 李军. 船舱内无线电波的传输特性分析与仿真[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(9): 92-95.
- [5] 孙英峰, 罗霄, 高艺瑞, 等. 无线电波透视技术在资源整合矿井采空区探测中的应用[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 547-553.
- [6] 褚慧慧. 基于视觉的焊缝质量检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [7] 项新建, 王乐乐, 曾航明. 基于机器视觉的推力轴承垫圈缺陷检测系统研究[J]. 中国测试, 2021, 47(2): 133-139.
- [8] 滕臻, 崔国华, 高鹏, 等. 基于机器视觉及深度学习的静脉药物调配机器人药瓶识别[J]. 机床与液压, 2022, 50(5): 33-37.
- [9] 田延飞, 周欣蔚, 温小飞, 等. 基于 LoRa 的水面无人艇位姿数据远程采集及监测[J]. 现代电子技术, 2022, 45(22): 23-27.
- [10] 刘江洪. 焊缝外观缺陷对焊缝质量的影响分析及应对措施[J]. 人民长江, 2020, 51(S2): 230-233.
- [11] 张天宇, 夏仁波, 赵吉宾, 等. 基于结构光的焊缝表面质量检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(1): 81-84.
- [12] 黄逢. 球罐外部焊缝检测机器人系统的设计[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [13] 徐德衍, 丁亚萍, 孟鹤, 等. 轨道车辆焊缝缺陷远场涡流检测系统设计及试验研究[J]. 中国测试, 2021, 47(1): 96-104.
- [14] 郑佳美. 基于深度学习的焊缝缺陷检测方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [15] 王靖然, 王桂棠, 杨波, 等. 深度学习在焊缝缺陷检测的应用研究综述[J]. 机电工程技术, 2021, 50(3): 65-68.
- [16] ZHU Haixing, GE Weimin, LIU Zhenzhong. Deep learning-based classification of weld surface defects[J]. Applied Sciences, 2019, 9(16): 3312.
- [17] 蒋超, 张豪, 章恩泽, 等. 基于改进 YOLOv5s 的行人车辆目标检测算法[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2022, 25(6): 45-49.

作者简介:

罗健, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器人与自动化。E-mail: 798073059@qq.com

华攸水, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器人与自动化。E-mail: h_youshui@qq.com

张浩, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 机器人与自动化。E-mail: h_zhang@giim.ac.cn

曹立超, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 机器人与自动化。E-mail: lc_cao@giim.ac.cn

蒋晓明, 男, 1973 年生, 博士研究生, 研究员, 主要研究方向: 电力电子、数控技术与自动化。E-mail: xm_jiang@giim.ac.cn