

文章编号: 1671-7449(2026)03-0344-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(3): 344-351.

基于YOLOv5算法的烟囱拆除机器人 预留孔圆心定位模型

杨晨¹, 吴亮¹, 刘婵¹, 安飞琴¹, 李安国¹, 师世博², 赵俊生^{2*}, 王淋²

(1. 山西建设投资集团有限公司, 山西 太原 030032; 2. 中北大学机械工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 利用烟囱壁上的预留孔来实现烟囱拆除机器人的升降锁固, 可显著提升烟囱拆除机器人的工作效率。基于深度学习目标检测技术, 提出一种烟囱壁预留孔识别与定位方法。首先, 基于YOLOv5深度学习网络模型检测预留孔在图像中的大致区域, 得到预留孔的粗定位信息, 并用高斯滤波法滤除该区域中的孤立点和噪声点; 然后, 基于预留孔的粗定位信息, 利用Canny算子提取预留孔的边缘信息; 最后, 基于最小二乘的椭圆拟合方法获取预留孔的圆心坐标, 实现对预留孔的精确定位, 有效减少了目标边缘模糊、相似物干扰、圆形畸变等情况对预留孔定位精度的影响。研究表明, YOLOv5s模型的 $mAP@0.5\%$ 达到了99.5%, 模型的每帧推理时间为6.5 ms, 在仿真环境下圆心定位误差小于0.8 pixel, 可有效提高烟囱拆除机器人升降运行的可靠性与效率。

关键词: 目标检测; YOLOv5算法; 圆心定位; 圆孔识别; 机器视觉

中图分类号: TP751

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026022

引用格式: 杨晨, 吴亮, 刘婵, 等. 基于YOLOv5算法的烟囱拆除机器人预留孔圆心定位模型[J]. 测试技术学报, 2026, 40(3): 344-351.

YANG Chen, WU Liang, LIU Chan, et al. Chimney demolition robot drilling position detection model based on YOLOv5[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(3): 344-351.

Chimney Demolition Robot Drilling Position Detection Model Based on YOLOv5

YANG Chen¹, WU Liang¹, LIU Chan¹, AN Feiqin¹, LI Anguo¹, SHI Shibo²,
ZHAO Junsheng^{2*}, WANG Lin²

(1. Shanxi Construction Investment Group Co., Ltd., Taiyuan 030032, China;

2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The utilization of reserved holes on the chimney wall for the lifting and locking of the chimney demolition robot can significantly enhance the working efficiency of the robot. A method is proposed for identifying and locating reserved holes on the chimney wall based on deep learning object detection technology. Firstly, the YOLOv5 deep learning network model is used to detect the approximate area of the reserved holes in the image, obtaining the coarse positioning information of the reserved holes. Then, the Gaussian filtering method is applied to remove isolated points and noise in this area. Subsequently, based

【收稿日期】2025-04-25

【基金项目】山西省基础研究计划资助项目(202203021212158, 20210302123039)

【作者简介】杨晨(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事机电液系统设计与检测研究。E-mail: 644035184@qq.com。

*【通信作者】赵俊生(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事机电装备智能检测与控制研究。E-mail: zjs@nuc.edu.cn。

on the coarse positioning information of the reserved holes, the Canny operator is used to extract the edge information of the reserved holes. Finally, the least squares-based elliptical fitting method is employed to obtain the center coordinates of the reserved holes, achieving precise positioning of the reserved holes and effectively reducing the impact of factors such as blurred target edges, similar object interference, and circular distortion on the positioning accuracy of the reserved holes. The research results show that the $mAP@0.5\%$ of the YOLOv5s model reaches 99.5%, with a detection speed of 6.5 ms. In the simulation environment, the center positioning error is less than 0.8 pixels, which can effectively improve the reliability and efficiency of the lifting operation of the chimney demolition robot.

Key words: object detection; YOLOv5 algorithm; center alignment; circular hole recognition; machine vision

0 引言

伴随城市化进程加剧与工业区改造需求,大批高耸建筑亟待拆除,而烟囱就是典型代表。目前,烟囱类建筑物的拆除多以爆破拆除为主,智能化程度较低,且会造成严重的环境污染,因此,设计一款用来拆除烟囱类高耸构筑物的机器是解决这一问题的最优方案。本文设计的烟囱拆除机器人需要利用烟囱上的预留孔完成升降与固定功能,因此,如何实现烟囱壁上预留孔的精准定位成为本研究的核心问题与关键所在。

烟囱壁上预留孔定位的首要目标在于寻找其中心位置,等同于利用圆心检测算法定位圆心。受环境条件及成像系统配置的制约,圆形目标在成像过程中可能会出现过度曝光或呈现出椭圆形的状态。因此,在图像分析阶段,精确获取圆形目标的中心位置成为了解决上述问题并实现预留孔精准识别与定位的关键所在。目前,圆心定位的主要方法包括 Hough 变换法^[1]、灰度重心法^[2]、最小二乘曲线拟合法^[3]、模板匹配法^[4]和高斯拟合法^[5]等。在无干扰变形的条件下,上述方法能够实现目标的精确定位。然而,对于特定应用情境,例如摄像机视角不正、烟囱结构为曲面等,会导致识别时预留孔形状畸变成椭圆,利用现有技术进行钻孔操作时,往往会使周围材料产生损伤,进而导致识别时产生残缺圆等。在这些情况下,传统的圆心定位方法并不适用。

Hough 变换法在处理一些形状简单且图像噪声较少的情况下,能较为准确地识别出目标形状,但在对椭圆及类圆检测中,存在因参数增多而导致检测不稳、时间和空间耗费巨大和受阈值影响大的缺点^[6]。灰度重心法在实现上较为简单,适用于图像灰度分布均匀的场景,而在面对

分布不均的灰度分布时,该方法容易产生较大误差^[7]。最小二乘拟合法计算效率高,应用广泛,采取该方法进行椭圆拟合时误差较小^[8],但对异常值敏感、假设条件严格等固有局限。与此相反,传统加权型质心法在进行图像分割时,往往依赖于滤波和阈值分割技术来精确界定前景与背景区域^[9],这一过程在复杂场景下可能较为繁琐且对参数敏感,而且,该方法易受环境光照条件波动的影响,从而引发分割失败^[10]。此外,还可能因连续噪声或视场内其他物体的存在而出现误判,导致非目标物体被误分割,从而产生定位误差。这些误差将显著威胁后续定位及计算的精确度与可信度^[11]。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于 YOLOv5s 算法的圆心定位方法,该算法充分利用了 YOLOv5s 模型的结构特性,即使在环境条件恶劣、目标存在干扰或变形的复杂场景下,也能完成烟囱壁上预留孔位置的精确识别和自动定位,有效延长钻具的使用寿命并提高钻孔工作效率。

1 机械结构设计

1.1 总体结构设计

本文所研制的烟囱拆除机器人模型结构如图 1 所示,机械结构部分主要由壳体、环抱机构、升降机构三部分组成。壳体包括内壳和背壳,内壳上安装有升降机构用于整体升降,背壳上安装有环抱机构用于将机构固定在烟囱壁上。环抱机构由上下两组横向和纵向推杆组成,通过角度调整使机构适应烟囱的锥度,由电动推杆驱动实现结构的张开和缩小。升降机构由两个电动推杆组成,与打孔机构连接,通过推杆的伸缩带动打孔机构上升和下降,从而实现整体机构的垂直调节。

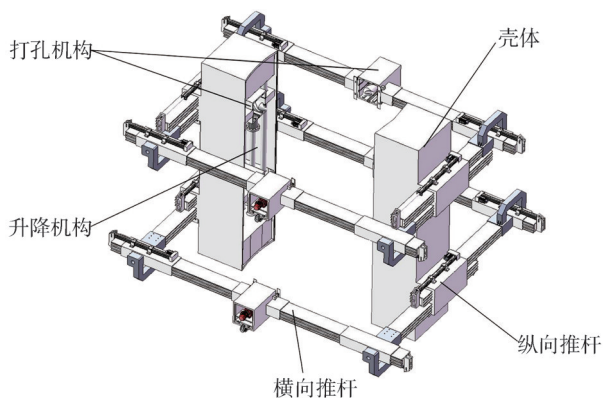


图1 烟囱拆除机器人总体结构示意图

Fig. 1 Overall structure diagram of chimney demolition robot

1.2 工作流程

烟囱拆除机器人的操作运作主要由爬升阶段和下降阶段构成。以爬升阶段为例，实现一次爬升的具体工作流程如图2所示。爬升准备：装置依靠壳体打孔装置进行支撑固定在壁面上。爬升动作：电动推杆推动使壳体及抱臂整体上移，装置依靠抱臂打孔装置进行支撑固定在壁面上。爬升完成：电动推杆推动使壳体打孔装置复位，完成装置爬升及升降机构复位，等待下一次爬升工作。

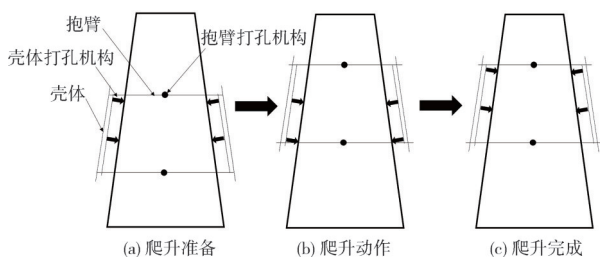


图2 烟囱拆除机器人工作流程图

Fig. 2 Operation process flowchart of chimney demolition robot

1.3 同孔复用功能实现

由本文所设计烟囱拆除机器人的工作流程可知，在烟囱拆除机器人升降过程中需要进行钻孔作业，然而，钻孔会对钻头造成较大磨损。如果能利用图像识别技术精确探测烟囱壁上现有孔洞的位置，则可实现上下钻头共用同一个孔洞，避免重复钻孔，从而降低钻头磨损。如图3所示，当烟囱拆除机器人从状态1转变至状态2时，下部钻头可利用状态1下部钻头所钻孔洞进行固定，实现同一孔洞的复用，无需重新钻孔。这种基于传感技术的优化设计能有效延长钻头使用寿命，提高工作效率，进一步提升烟囱拆除机器人的性能和适用性。

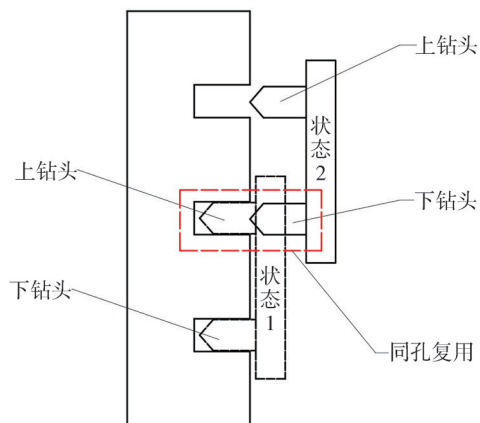


图3 同孔复用功能示意图

Fig. 3 Schematic diagram of same-hole multiplexing function

为实现对已有孔洞的复用，需精准测量孔洞的位置和尺寸。因此，在打孔机构侧面安装摄像头和毫米波雷达测距模块。如图4所示，毫米波雷达可精确测量机构与烟囱壁之间的距离，为孔洞位置探测提供参考数据；摄像头则用于拍摄烟囱壁表面图像，通过图像处理算法可精确识别并定位现有孔洞，获取其尺寸信息。该方案充分利用先进的传感技术，实现对孔洞位置和尺寸的精准测量，为下部钻头精确对准复用现有孔洞提供可靠依据，从而大幅降低不必要的重复钻孔工作，减少钻头磨损，提高作业效率。这种基于传感融合的优化设计可进一步增强该装置的智能化水平和适用性。

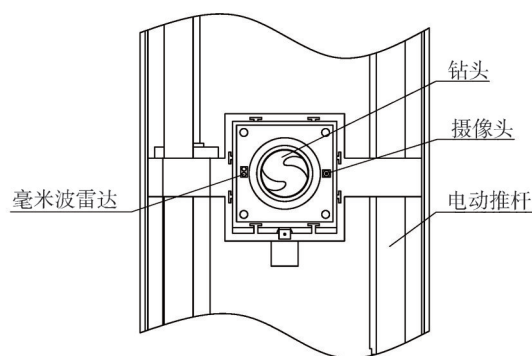


图4 相机及毫米波雷达布局

Fig. 4 Layout of cameras and millimeter-wave radars

2 基于YOLOv5模型的对中图像识别算法

预留孔中心定位算法主要分为两大组成部分：圆孔粗定位和中心精确定位^[12]。基于YOLOv5网络模型实现预留孔粗定位后，对检测区域进行图像灰度化处理，采用高斯模糊算法进

行噪声抑制,然后,通过 Canny 边缘检测算子提取预留孔轮廓特征,最后,利用基于最小二乘的椭圆拟合方法精确定位出预留孔的圆心坐标。该算法的流程如图 5 所示。

YOLOv5 模型是 Ultralytics 公司研发的一种基于单阶段检测框架的目标检测算法,可实现计算效率与检测精度之间的有效平衡^[13]。YOLOv5 模型根据大小可分为 s、m、i、x 4 种。针对本文检测目标类别单一的特点,选用计算量较小且性能稳定的 YOLOv5s 模型作为基础架构。YOLOv5s 模型由 4 个主要部分组成:输入端、主干网络、颈部网络和输出端。

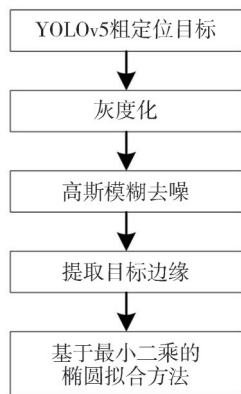
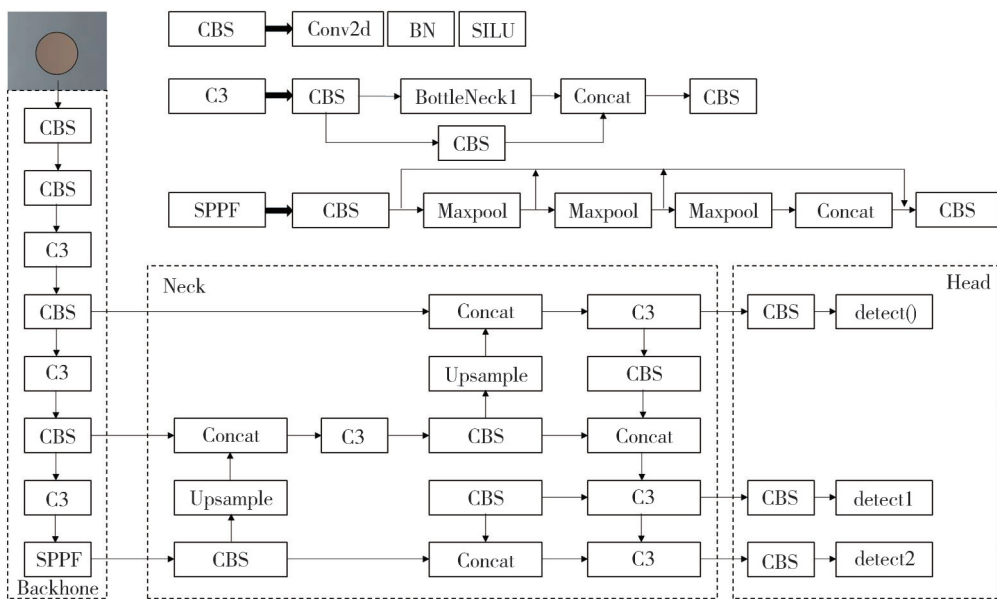


图 5 算法流程图

Fig. 5 Algorithm flow chart

图 6 展示了 YOLOv5s 模型的网络架构。



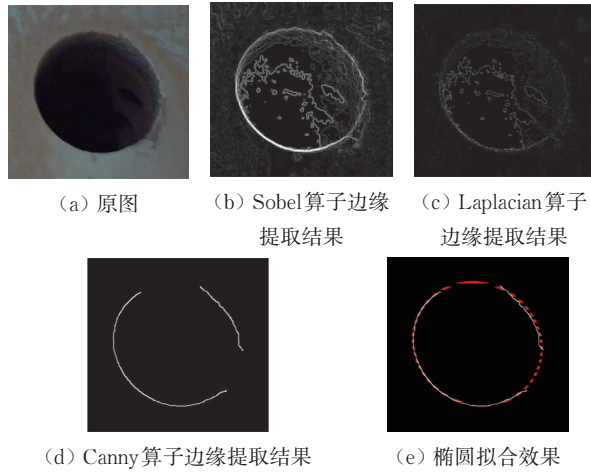


图7 边缘检测结果

Fig. 7 Edge detection results

2.3 中心提取方法

在不同烟囱背景与孔洞特性的影响下,可能导致预留孔出现过曝、过暗现象,甚至呈现为椭圆形。鉴于预留孔在透视投影下的视觉表现通常为椭圆形而非完美的圆形,本文引入基于最小二乘的椭圆拟合方法来确定预留孔的中心位置。该方法的数学公式为

$$\min \|ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f\|^2 = 0, \quad (1)$$

式中: a, b, c, d, e, f 为常数; x, y 为检测到的目标边缘点的坐标。

当检测到多个目标边缘点 (x_i, y_i) 时,解方程系数矩阵的值,可以得到拟合椭圆的椭圆方程及椭圆的中心坐标 (x_0, y_0) 为

$$\begin{cases} x_0 = (2cd - be) / (b^2 - 4ac), \\ y_0 = (2ae - bd) / (b^2 - 4ac). \end{cases} \quad (2)$$

3 实验结果与分析

3.1 数据集构建

由于现有的公开数据集与现实应用偏差较大,本研究自主构建了用于训练 YOLOv5 模型的预留孔数据集,以便更好地适配模型需求,照片存储格式为 JPEG,共收集不同位置、材质、预留孔缺陷等 300 张图像。本文采用 LabelImg 标注工具对图像中的预留孔进行人工标注。以圆孔作为标签对象,命名为 hole。为了避免样本训练过拟合,采用锐化、模糊、增加噪声等数据扩充方式将样本个数扩充为原来的 8 倍,同时,添加现实生活中墙面预留孔图像增加数据真实性,共得到 1 340 张图像。按照 7:2:1 的

比例将样本划分为训练集、验证集和测试集,数据集部分示例图片如图 8 所示。

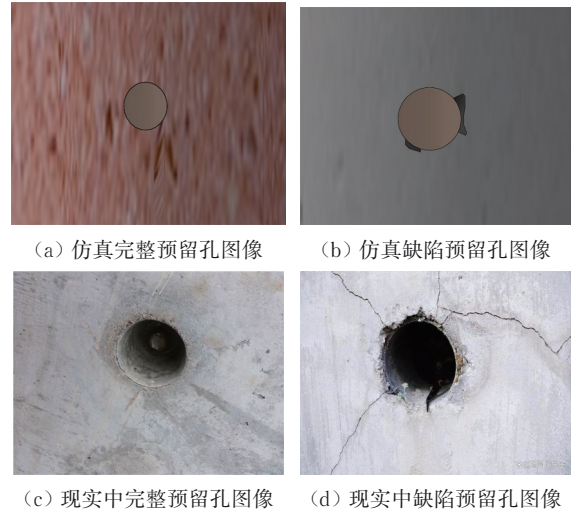


图8 部分数据集示例图

Fig. 8 Sample graph of some datasets

3.2 评价指标

本文采用平均精度、参数量、计算量和每帧推理时间(t)作为评价指标。真正例(TP)表示真正识别出的预留孔数量;假正例(FP)表示被误判为预留孔的背景或阴影数量;假负例(FN)表示未识别出的预留孔数量。如果预测框与预留孔标注框的交并比(IoU)超过 0.5,该识别框记为 TP ;否则,记为 FP 。如果检测到的真实预留孔与对应的预测框不匹配,则记为 FN 。精度(P)和召回率(R)的计算公式如式(3)和式(4)所示。

$$P = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (3)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (4)$$

精度和召回率之间不存在相互作用,因此,为了更好地评估检测准确性,引入了平均精度均值(mAP)来表示检测精度,其中, m 代表平均值, AP 代表精度,即召回率曲线下的面积,取值范围为 $(0, 1)$ 。 AP 值越大,网络准确性越高。 $p(r)$ 为精度-召回率曲线上召回率为 r 时对应的精度值。 AP 和 mAP 的计算公式如式(5)~(6)所示。

$$AP = \int_0^1 p(r) dr, \quad (5)$$

$$mAP = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m AP_{i0} \quad (6)$$

3.3 开发环境与参数配置

本文模型训练所采用的具体参数配置如表 1 所示。训练网络时,批处理量(batch size)设置为 16,输入图像经归一化处理统一缩放至 640 pixel×900 pixel 分辨率,在 GPU 上进行训练,训练周期为 100 个 epoch,在训练过程中,参数优化采用随机梯度下降算法。超参数设置与 YOLOv5s 官方预设值保持一致。

表 1 模型训练配置及其参数

Tab. 1 Model training configuration and parameters

配置	参数
开发环境	Anaconda+Pycharm
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-12700 2.10 GHz
GPU	Nvidia GeForce RTX 3060 Ti(8G)
操作系统	Windows10
运行环境	CUDA11.1+torch1.9.0
开发环境	Python3.8

3.4 预留孔圆心粗定位算法对比实验

为了验证所用算法的优越性,将本文 YOLOv5s 算法与 Faster R-CNN 算法、RetinaNet 算法和 YOLOv8s 算法进行了对比分析,在相同的数据集和训练条件下对比了 4 种算法的检测精度、模型复杂度和实时性,对比结果如表 2 所示。

表 2 不同算法对比结果

Tab. 2 Comparison results of different algorithms

模型	mAP@0.5%	参数量/M	计算量/GFLOPs	t/ms
Faster R-CNN	61.3	—	—	7.8
RetinaNet	99.8	—	—	13.0
YOLOv8s	99.1	11.4	29.2	15.1
YOLOv5s	99.5	7.0	16.3	6.3

由表 2 可知,与 Faster R-CNN 和 YOLOv8s 模型相比,YOLOv5s 模型在 mAP@0.5% 上分别提升了 62.32% 和 0.40%,虽然 YOLOv5s 模型在检测精度上不是最高的,但是该模型的单帧推理耗时是最短的,仅为 6.3 ms,比 Faster R-CNN、RetinaNet、YOLOv8s 模型分别降低了 19.23%、51.54%、58.28%。同时,YOLOv5s 比 YOLOv8s 在参数量和计算量分别降低了 38.6% 和 44.18%,充分表明 YOLOv5s 模型在降低内存占用与计算资源需求的同时,维持了较高的检测率和准确率,能很好地完成检测任务。

3.5 预留孔圆心精确定位结果对比实验

为验证本文所用 YOLOv5s 算法进行预留孔

粗定位并结合 Canny 算子提取预留孔边缘特征,最后基于最小二乘的椭圆拟合方法准确获取预留孔圆心方法的有效性,将本文所用方法与传统的灰度重心法、Hough 变换法和形心法的检测结果进行对比。

为了更加准确地对比 4 种方法的圆心检测结果,使用模拟生成的具有标准中心坐标的预留孔图像作为检测对象。使用 python3.8 绘制生成标准圆、标准椭圆和残缺椭圆,残缺椭圆包括预留孔边缘发生剥落的椭圆和部分遮挡的椭圆,以此来模拟钻孔时产生的不同类型缺陷的预留孔形状,绘制结果如图 9 所示。

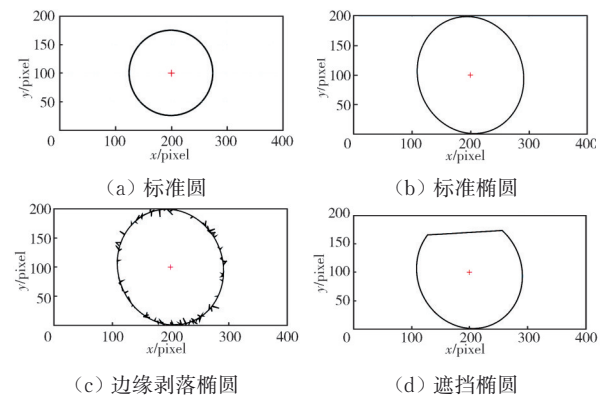


图 9 仿真模拟图像

Fig. 9 Simulation and modeling images

生成的标准圆及其他椭圆样本的中心坐标真值为 (200, 100) pixel,标准圆的直径为 150 pixel,椭圆的长、短轴长分别为 200 pixel 和 150 pixel,旋转角度为 110°。用理论中心坐标和检测所得中心坐标的偏差 ΔS 来判断算法的检测效果,偏差 ΔS 的计算公式为

$$\Delta S = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (7)$$

中心坐标偏差 ΔS 越小,检测精度越高。对比结果如表 3 所示。

表 3 圆心检测精度对比

Tab. 3 Comparison of circle center detection accuracy

类型	$\Delta S/\text{pixel}$			
	灰度重心法	Hough 变换法	形心法	本文方法
标准圆	1.254	0.679	0.490	0.036
标准椭圆	1.540	1.520	1.100	0.030
边缘剥落椭圆	4.266	6.297	5.502	0.580
遮挡椭圆	5.661	25.234	17.019	0.784

由表 3 可知,无论是针对标准圆还是其他椭圆的检测情况,本文所用方法的检测偏差均明显小于其他 3 种传统检测方法。针对标准椭圆类

型,本文算法的平均中心偏差仅为0.03 pixel,灰度重心法、Hough变换法、形心法的检测偏差分别是本文方法的51.3倍、50.7倍和36.7倍。针对遮挡椭圆类型,本文算法的平均中心偏差也能控制在0.8 pixel以内,灰度重心法、Hough变换法、形心法的检测偏差分别是本文方法的7.2倍、32.2倍和21.7倍。分析可知,不管在面对预留孔变形还是预留孔出现残缺的情况,本文所用的圆心定位算法在精度上都远高于传统的圆心定位算法。

面对残缺椭圆的检测时,4种算法的平均中心偏差虽然都有一定程度的增加,但相对于传统圆心检测算法,本文算法的增长幅度较小,仍能维持较低的平均中心偏差,尤其在面对遮挡椭圆的检测时,传统圆心检测算法的中心偏差急剧升高,Hough变换法和形心法的平均中心偏差分别比面对标准椭圆检测时增长了15.4倍和14.4倍,但是本文方法的平均中心偏差仅为0.784 pixel,仍能准确拟合椭圆中心。以上分析充分表明本文圆心定位算法在精度和鲁棒性上都显著优于3种传统圆心检测方法。

4 结 论

当面对烟囱壁面预留孔圆心检测问题时,现有的圆心定位算法对环境变化没有抗干扰能力,应用范围有限。针对该问题,本文引入了融合YOLOv5模型的圆心定位技术。通过实验表明,该定位方法可以准确定位预留孔圆心位置,模型的平均精度均值 $mAP@0.5\%$ 达到了99.5%,每帧推理时间为6.5 ms,在预留孔出现变形和残缺的情况下,本文算法的平均中心偏差也能控制在0.8 pixel以内,提高了预留孔圆心检测精度,算法整体性能优异,其性能符合烟囱拆除机器人在实际现场环境下的测试要求。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 陆东方,李捍东.基于OpenCV的圆心定位算法研究[J].微处理机,2023,44(1):22-25.
LU Dongfang, LI Handong. Research on the algorithm of the center locationing of a circle based on OpenCV[J]. Microprocessors, 2023, 44(1): 22-25.

(in Chinese)

- [2] 候珂毅,白博方,苗龙,等.离子推力器栅极组件热变形测量方法[J].科学技术与工程,2024,24(18):7487-7501.
HOU Keyi, BAI Bofang, MIAO Long, et al. Thermal deformation measurement method of ion thruster grid assembly[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(18): 7487-7501. (in Chinese)
- [3] 严婷婷,李锋,王琦.高斯加权的二维灰度重心法提取光条中心[J].计算机工程与设计,2020,41(12):3570-3574.
YAN Tingting, LI Feng, WANG Qi. Gaussian weighted two-dimensional gray center of gravity method for extracting strip center[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(12): 3570-3574. (in Chinese)
- [4] 郑晋,颜嘉杰,王庆霞,等.基于特征识别的晶圆精确找正方法[J].东华大学学报(自然科学版),2025,51(2):198-205.
ZHENG Jin, YAN Jiajie, WANG Qingxia, et al. Accurate wafer alignment method based on feature recognition[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2025, 51(2): 198-205. (in Chinese)
- [5] PAN S, WANG S, XU J, et al. Sub-pixel position estimation algorithm based on Gaussian fitting and sampling theorem interpolation for wafer alignment[J]. Applied Optics, 2021, 60(31): 9607-9618.
- [6] 周兰凤,李玲,方华,等.基于Hough变换的月表陨坑检测算法改进及应用研究[J].计算机应用与软件,2023,40(5):266-271.
ZHOU Lanfeng, LI Ling, FANG Hua, et al. Improvement and application of lunar crater detection algorithm based on Hough transform[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(5): 266-271. (in Chinese)
- [7] 刘天赐,刘桂华,胡莉,等.基于法线引导的激光中心线提取方法[J].应用光学,2023,44(1):211-218.
LIU Tianci, LIU Guihua, HU Li, et al. Laser center-line extraction method based on normal guidance[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 211-218. (in Chinese)
- [8] SHEN Y, ZHANG X, CHENG W, et al. Quasi-eccentricity error modeling and compensation in vision metrology[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(4): 045006.
- [9] XU W, LI Q, FENG H J, et al. A novel star image thresholding method for effective segmentation and cen-

- troid statistics [J]. *Optik*, 2013, 124 (20): 4673-4677.
- [10] 汪崑, 蒋峥, 刘斌. 具有局部自适应阈值的SIFT快速图像匹配算法[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(2): 228-236.
- WANG Yin, JIANG Zheng, LIU Bin. SIFT fast image matching algorithm with local adaptive threshold [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(2): 228-236. (in Chinese)
- [11] ARAGUES R, GONZÁLEZ A, LÓPEZ-NICOLÁS G, et al. Distributed relative localization using the multidimensional weighted centroid [J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2020, 7 (3): 1272-1282.
- [12] 唐瑞尹, 彭岸辉, 李巍, 等. 基于YOLOv5和图像处理的按摩机器人穴位贴定位方法[J]. *机械设计与制造*, 2025(1): 281-285.
- TANG Ruiyin, PENG Anhui, LI Wei, et al. Positioning method of massage robot acupoint stickers based on YOLOv5 and computer image processing [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2025 (1): 281-285. (in Chinese)
- [13] 池小波, 张伟杰, 贾新春, 等. 基于改进YOLOv5s的轻量级绝缘子缺失检测[J]. *测试技术学报*, 2024, 38 (1): 19-26.
- CHI Xiaobo, ZHANG Weijie, JIA Xinchun, et al. Lightweight method for detecting insulator missing based on improved YOLOv5s[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2024, 38(1): 19-26. (in Chinese)
- [14] LI S, ZHANG J, LIU B, et al. An algorithm to extract the boundary and center of EUV solar image based on sobel operator and FLICM [J]. *Photonics*, 2022, 9(12): 889.
- [15] ZHANG C, LI T, LI J. Detection of impurity rate of machine-picked cotton based on improved canny operator[J]. *Electronics*, 2022, 11(7): 974.
- [16] NOGUEIRA M L, GREIS N P, SHAH R, et al. Machine learning classification of surface fracture in ultra-precision diamond turning using CSI intensity map images [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 64: 657-667.