

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.027

基于双向轮廓与分层优化匹配的异型零件识别算法研究

安晓东, 钟佳, 李阳, 刘柳, 魏留杰

(郑州航空工业管理学院 机械工程学院, 河南 郑州 450046)

摘要:针对工业视觉检测中异型微小零件因几何特征弱化、图像畸变显著导致的位姿识别难题,提出一种基于双向轮廓表征与多级匹配优化的通用识别算法。对零件图像进行二值化分割并联通区域检测,得到关键几何特征,通过内、外接圆半径特征区分零件正反面;提出多层优化匹配策略,构建由粗到精的优化搜索路径,在保证匹配精度的同时降低算法的复杂度,有效克服投影畸变对位姿估计的影响。实验表明:在 0.5~5 mm 特征尺度范围内,对复杂光照(80~800 Lux)等干扰保持稳定,平均识别精度达 99.87%~100%,位姿估计误差不大于 0.05 mm/0.5°。为微小异型零件的智能检测提供可扩展的理论框架与技术实现路径。

关键词:非标异型零件;几何特征;机器视觉;特征识别;模板匹配

中图分类号:TP391.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0139-05

Research on the Recognition Algorithm for Special-Shaped Parts Based on Bidirectional Contour and Hierarchical Optimization Matching

An Xiaodong, Zhong Jia, Li Yang, Liu Liu, Wei Liujie

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

Abstract:To address the pose recognition challenges of special-shaped micro parts caused by weakened geometric features and significant image distortion in industrial vision inspection, this study proposes a general recognition algorithm based on bidirectional contour characterization and multi-level matching optimization. Initially, The part image is segmented through binarization, and connected region detection is performed to obtain key geometric features. The front and back sides of the part are distinguished by the inner and outer circle radius features. Subsequently, a multi-layer optimization matching strategy is proposed, constructing a coarse-to-fine optimization search path, which reduces algorithm complexity while ensuring matching accuracy and effectively overcoming the influence of projection distortion on pose estimation. Experimental results demonstrate that within the feature scale range of 0.5–5 mm, the algorithm remains stable under disturbances such as complex illumination (80–800 Lux), achieving an average recognition accuracy of 99.87%–100% and a pose estimation error of ≤ 0.05 mm/0.5°. This provides an extensible theoretical framework and technical implementation path for the intelligent inspection of micro special-shaped parts.

Keywords:non standard special-shaped parts; geometric features; machine vision; feature recognition; template matching

0 引言

随着电子行业和人工智能等技术的快速发展,3C 产品中异型微小零件的应用日益广泛,其准确识别、分拣和装配等问题成为制约工业自动化水平提升的技术瓶颈^[1]。3C 产品异型微小零件通常具有尺寸小、结构精密、正反面投影相似度高、易堆叠等特点,导致传统特征提取方法效果不理想^[2]。因此,提高异型零件的识别精度和效率成为工业自动化领域的重要研究方向之一^[3]。

当前异型微小零件特征识别研究主要围绕两类方案展开:基于深度学习卷积神经网络(CNN)的方案^[4-5]和基于单目、双目或 3D 相机的传统特征提取方案。深度学习方法在实验室环境中成果显著,例如 Conrad 等^[6]实现微小增材制造零件分类准确率 90.37%;袁斌等^[7]采用 YOLOV4 算法实现平面零件抓取成功率 91%;周宏威等^[8]引入全局注意力模块并替换 SiLU 损失函数提升了小目标检测精度;杨兰等^[9]融合 CNN 与 Vision Transformer 结合注意力机制使插针断线识别准确

基金项目:河南省自然科学基金项目(252300420067);河南省科技攻关项目(242102210048;222102210273);郑州航空工业管理学院校级项目(2024YJSJG28)

第一作者简介:安晓东(1977—),男,河南平顶山人,副教授,硕士生导师,研究方向为人工智能、机器视觉和嵌入式控制技术,x.d.an@zua.edu.cn。

率达到 91.9%。另一方面,基于工业相机的传统方法,如薛顺聪等^[10]的焊缝识别、Bonino 等^[11]的 CAD 模型语义增强识别、以及边缘检测和 Hough 变换^[12-13]等,虽可直接部署,但算法多样、适应性差,难以应对复杂非标异型小尺寸零件工况^[14]。两类方法均存在不足:深度学习方法依赖大量训练数据,普适性差、硬件要求高,工业部署困难;传统方法在图像畸变或特征区分度低时效果不佳,计算效率难以满足实时性要求。

针对上述问题,本研究提出一种基于双向轮廓表征的特征识别算法,结合金字塔搜索策略,旨在实现高精度、高效率的零件识别。本研究提出的方法具有开发周期短、硬件要求低、适应性强等优势,为非标异型小尺寸零件的自动化识别提供了一种高效、可靠的解决方案。

1 试验对象和试验系统

1.1 异型零件表面特征分析

本文针对异型微小零件的识别困难问题展开研究,手机摄像头马达铁壳在现代化生产行业应用较为广泛,且具有典型的异型微小零件特性。其正反面如图 1 所示。该零件采用 0.1 mm 厚钛合金板材经冲压、切割工艺制成,具有微型化、异型结构和三维立体特征。整体外观呈上表面正方形(边长 10 mm)与下表面不规则轮廓的复合结构,上表面中心区域为含多个非均匀分布凹槽的圆形结构,整体高度 0.3 mm;下表面四个边缘均设有尺寸及深度不等的凹槽,其中一侧边沿还延伸出 1.5 mm 的定向尖状凸起。因此本研究选取该零件为研究对象。

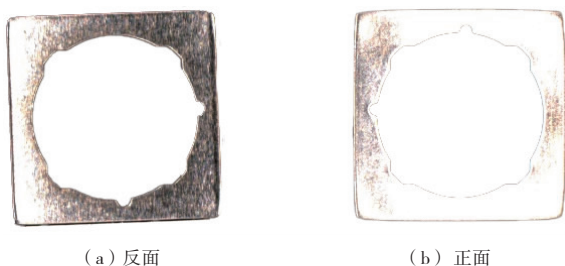


图 1 零件实物图

由于钛合金表面在 400~700 nm 可见光波段具有 85% 以上的高反射率,导致零件正反面光学特征对比度显著降低。设计跨光谱光源对比实验。通过量化评估不同光源组合在特征表征能力上的差异。分析可知,白色光源与底部白

色背光相结合的光照条件下细节特征优于其他方式。

1.2 试验平台和试验环境

为了验证设计算法的识别速率和准确性,以及工程应用效果,本文搭建试验平台如图 2 所示,使用海康 MV-CS200-10GM 采集黑白图像,分辨率为 5 288×3 968 px,通过 GigE Vision 协议实现图像传输。

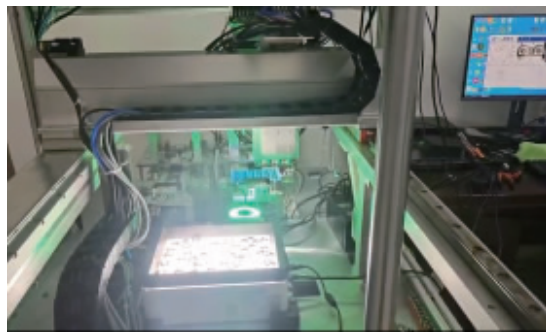


图 2 实验平台

2 基于双向轮廓表征与多级匹配的优化算法设计

本文的异型微小零件检测算法如图 3 所示,在获得零件的原始图像后需要先进行预处理,包括阈值分割、连通区域、获得 ROI 等步骤^[15],降低图像的数据量同时尽可能保留图像的特征。在预处理之后进行边缘检测获得零件区域的边界信息,再通过拟合零件的最佳外接圆和最大内接圆,设置相应的阈值,从而筛选零件的正反面,并获得仅有反面的零件区域。对模板图像进行预处理,通过腐蚀膨胀操作获得内轮廓模板,再通过几何哈希定位法逐个获取零件的角度及位置信息,将其输出给分拣装置,从而实现零件的定位以及识别。

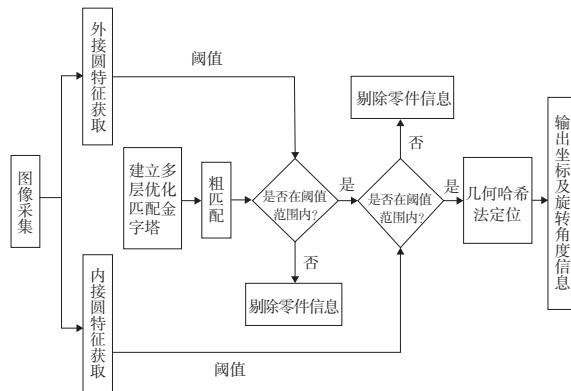


图 3 检测框架

由于该零件前景区域黑色的灰度值、背景区域白色的灰度值与整幅图像的平均灰度差值明显,所以适合采用最大类间方差法分割方法,获取零件最大阈值 $T^{[16]}$ 。本文通过 Halcon 中的腐蚀膨胀操作以及筛选形状算子,使用连通区域面积筛选获得关键特征区域。

2.1 双向轮廓表征方法及数学模型

轮廓边缘检测的精度对筛选结果有着较大的影响。精确的边缘检测减少了在不必要区域的运算量,能够在很大程度上提升计算的速度^[17]。本框架结合高斯平滑处理与 Canny 检测方法^[18]来提取零件的特征。特征提取后的效果如图 4 所示。

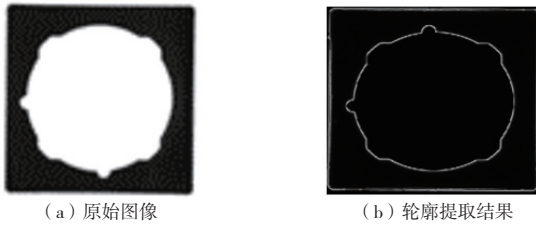


图 4 特征提取效果图

针对零件轮廓点集的几何特征,对最佳外接圆拟合提出基于 Welzl 算法^[19]的自适应优化策略,通过计算相邻边响应的夹角余弦值过滤冗余凹点,采用 Halton 序列对凸包顶点进行空间重采样^[20]。

对于内接圆的拟合针对零件凹槽区域的检测难点,提出加权距离变换模型^[21],设计非对称高斯核进行预处理,通过 Laplacian 算子^[22]计算局部曲率 $\kappa(x, y)$,修正距离变换值。

2.2 多级匹配优化方法及数学模型

为提高匹配效率,采用金字塔搜索策略^[23],逐层递进,旋转模板的同时进行模板匹配。多尺度金字塔搜索策略的优化分为 3 个阶段:第 1 阶段在 10 mm 尺度下,基于外接圆半径快速定位零件主体区域,耗时不大于 10 ms;第 2 阶段在 2 mm 尺度下,在内接圆半径约束下进行凹槽分布模式匹配以剔除异常值;第 3 阶段则通过几何哈希法对定向针状突起进行精确定位,实现精确匹配。

粗匹配层($L=3$):分辨率降采样至原图的 1/8,基于外接圆半径特征筛选候选区域,设置匹配阈值 $T1=0.65$ 旋转角度步长 $\Delta\theta=15^\circ$,搜索范围 $\theta \in$

$[0^\circ, 360^\circ)$ 计算复杂度降至 $O\left(\frac{N^2}{64} + \frac{K}{24}\right)$, K 为候选区数量,粗匹配层排除超过 90% 无效区域,再进行精匹配^[24]。在精匹配层($L=2$),分辨率恢复至 1/2,引入内接圆约束条件

$$\left| \frac{r_{in}^{template} - r_{in}^{candidate}}{r_{in}^{template}} \right| \leq 0.1 \quad (1)$$

角度搜索步长细化至 $\Delta\theta=1^\circ$ 。全分辨率下执行集合哈希匹配^[25]

$$H(g_i) = \left[\frac{\|g_i - g_j\|}{\|g_i\|}, \angle(g_i, g_j) \right], \quad g_i \in G_{feature} \quad (2)$$

将生成的模板设定为摆放位置,对采集的零件图进行预处理后与模板进行匹配,即可得到要抓取零件的位置与角度信息。

3 实验与结果分析

为了验证本算法框架的有效性,分别在不同光照条件下采集了包含正反面零件图片 1 000 张,并在配备 Intel(R) Core i9-10900F, GPU 型号 Nvidia GeForce RTX3080 10G 的标准 PC 上,使用 Window11 系统下的 VS2022 开发平台进行实验,并结合 OpenCV 图像开源库进行各模块的实现。本测试设计多个测试参数,通过检测准确率、检测速度、平台抓取良率对比其他方法,验证算法的性能。

3.1 双向轮廓方法提取表面特征能力分析

为验证基于双向轮廓的零件正反面识别准确性,随机抽取部分零件,获取零件的内接圆、外接圆特征。其散点分布如图 5、图 6 所示。内接圆、外接圆的像素差值较大,具有较为明显阈值,通过内接圆以及外接圆轮廓特征能够较为准确地对零件的正反面进行区分。

图 7(a)原图中标签 1 为反面单独区域零件,标签 2 为正面单独零件区域,其他区域为拍摄不完全及堆叠零件区域。对采集到的图像进行正反面识别,筛选正面单独零件、堆叠零件和不完整零件后的部分效果如图 7(b)所示,测试图分辨率为 5 288×3 968 px。

经实验该方法正反面识别准确率可高达 100%,满足工业要求。且本方法处理时间仅为 20 ms 左右,满足该阶段划分时间要求。

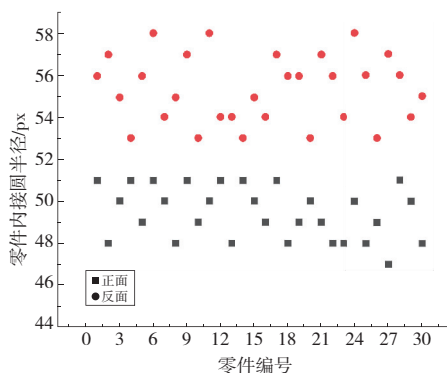


图5 内接圆特征值

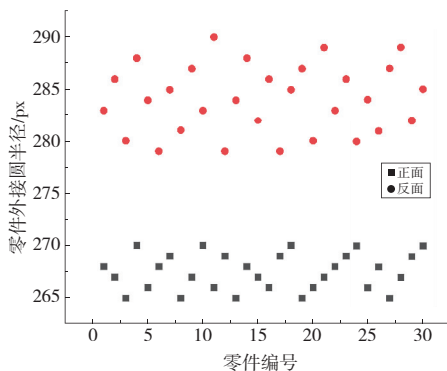


图6 外接圆特征值

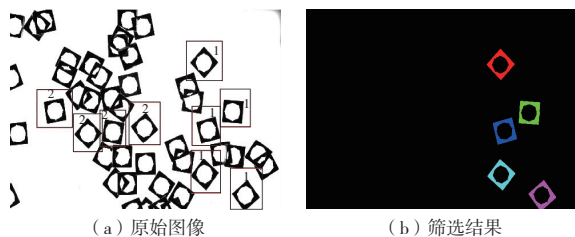


图7 筛选结果

3.2 优化算法对特征识别效果影响

本文通过良率判断本文设计算法的匹配准确率以及定位误差,对零件摆放的位置存在约束,且约束条件小于 0.05 mm,角度约束小于 0.5°。良率为摆放成功的个数占识别总数的百分比。为验证算法在复杂光照条件下的稳定性,在晨间(约 300 Lux)、午间(约 750 Lux)及夜间(约 80 Lux)3 个典型时段分别进行连续 1 h 的不间断稳定性测试。由图 8 分析可知,在不同的日期相同的 7 个时间段内,良率范围为 99.87%~100%,可知本识别算法对复杂光照(80~800 Lux)等干扰仍然可以保持极高的识别准确率。

针对本文设计算法对图像的识别速度等评价指标,试验过程中在 7 个时间段内分别随机抽取

1 次,在同样的系统、环境、工作时间下与使用 Yolo v8m 对零件进行识别定位的方法进行对比。对比结果如表 1 所示,单帧处理时间、识别准确率相较于 Yolo v8m 均有较大提升,模型减小 82.95%。

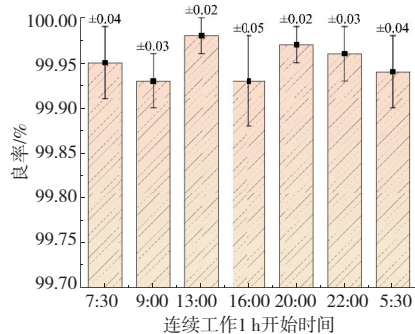


图8 不同时间工作良率

表1 对比试验

方向维度	Yolo v8m	本文方法
训练数据集	18 000	0
单帧处理时间/ms	127	85.30
模型大小/M	25.8	4.40
识别准确率/%	96.3	99.95

4 结语

本文针对异型零件正反面特征识别和其工业自动化应用等问题,提出了一种基于轮廓半径的特征识别和角度匹配算法,解决了高反光表面正反面识别难题,突破传统模板匹配搜索的时效瓶颈,实现对非标异型小尺寸零件的正反面的识别、位置和角度等信息的提取。基于双向轮廓的零件正反面识别准确率较其他特征有较大提升,分层优化匹配的识别准确率高于 99.95%,响应时间平均 85.30 ms,远优于其他方法。

参考文献:

- [1] 林慧斌,王洪畅,习慈羊. 基于深度卷积测量网络的滚动轴承压缩域故障特征提取方法[J]. 振动工程学报,2024,37(3):485-496.
- [2] 刘伟崑,邱佳鹤,胡光大,等. 基于改进 YOLOv5 的退役轴类零件表面损伤检测方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2024,45(7):1002-1010.
- [3] 徐进,柳宁,李德平,等. 一种基于抓取簇和碰撞体素的工业零件抓取姿态检测算法[J]. 机器人,2022,44(2):153-166.
- [4] 李键,李华,胡翔坤,等. 基于深度学习的表面缺陷检

- 测技术研究进展[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(3):774-790.
- [5] 陈钱,陈康康,董兴建,等. 一种面向机械设备故障诊断的可解释卷积神经网络[J]. 机械工程学报, 2024, 60(12):65-76.
- [6] Conrad J, Rodriguez S, Omidvarkarjan D, et al. Recognition of additive manufacturing parts based on neural networks and synthetic training data:a generalized end-to-end workflow [J]. Applied Sciences, 2023, 13(22):12316.
- [7] 袁斌,王辉,李荣焕,等. 视觉机器人的零件识别与抓取方法研究[J]. 机械设计与制造, 2024(2):309-313,318.
- [8] 周宏威,王文博,王伟光,等. 基于改进 YOLOv7 算法的驾驶分心行为检测模型[J/OL]. 自动化技术与应用, 1-10. (2024-12-30) [2025-04-19]. <https://link.cnki.net/urlid/23.1474.TP.20241230.0914.028>.
- [9] 杨兰,陈湘萍,向伟明,等. 绞线插针绕制的断丝故障检测[J/OL]. 自动化技术与应用, 1-5 (2024-12-27) [2025-04-19]. <https://link.cnki.net/urlid/23.1474.TP.20241227.1613.126>.
- [10] 薛顺聪,杨炯,马星雨. 复杂焊接零件焊缝特征识别与特征参数提取方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(6):149-154.
- [11] Bonino B, Giannini F, Monti M, et al. Shape and context-based recognition of standard mechanical parts in CAD models [J]. Computer - Aided Design, 2023, 155:103438.
- [12] 王晴. 基于机器视觉的工业堆叠零件目标识别研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2024.
- [13] 孙炼杰,樊臻. 基于模板匹配的光纤收发 PCB 板目标检测[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(1):128-131,190.
- [14] 马春燕,陈晶,姚鼎,等. 嵌入式智能计算机计算能力评测方法[J]. 计算机学报, 2023, 46(11):2279-2301.
- [15] 张厅瑞,梁蔓安,李伯乐. 基于形态学处理和计量测量的端盖图像识别研究[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(2):181-185.
- [16] 陈涛,肖方挺,吴梓华. 基于模板匹配的汽车堵件漏装检测系统设计与应用[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(24):138-141.
- [17] 闫河,李晓玲,谢敏,等. 基于高斯金字塔与新粒子群的印刷电路板装配模板匹配算法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(6):1854-1859.
- [18] 李德龙,龚时华,王子悦,等. 基于视觉伺服的 LED 芯片形状匹配算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(12):146-151.
- [19] 牟金星. 基于单目视觉的工业机器人分拣技术研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2022.
- [20] 郑魁敬,刘学超,王萌萌. 基于机器视觉的手机电池表面缺陷检测[J]. 制造技术与机床, 2020(4):105-112.
- [21] 韦逍遥,刘文渊,王龄裕,等. 基于光度立体视觉的钢轨焊缝打磨表面缺陷检测[J]. 机械工程学报, 2024, 60(24):11-24.
- [22] 陈宪帅,吴自然,闫俊涛,等. 基于多特征融合的零件分类与姿态识别[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(7):71-76.
- [23] 梁石,王超,韩东,等. 基于模板匹配的光伏电站快速自动化三维建模方法[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(2):206-214.
- [24] 熊金华,于慧,李斐,等. 基于改进 Canny 算法的滑块边缘检测研究[J]. 信息技术与信息化, 2025(2):174-178.
- [25] 张永梅,徐敏,李小冬. 基于注意力机制和软匹配的多标签遥感图像检索方法[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(6):181-185,199.

收稿日期:2025-05-20