 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i4.10119

Research on an Intelligent Inspection System for Self-Focusing Lens End Face Defects Based on Machine Vision and Deep Learning

Qian Wu Yiqi Fang Jun Yang* Yang Zhang

Xijing College, Xi'an, Shaanxi, 710123, China

Abstract

To address the long-standing reliance on manual visual inspection for end-face defect detection in optical communication self-focusing lenses (GRIN lenses)—characterized by low efficiency and high false-positive rates—this paper proposes and implements an intelligent inspection system integrating machine vision and deep learning. The system employs high-precision industrial cameras with telecentric optical imaging structures, combined with a customized XYZ three-axis motion platform and a negative-pressure adsorption flexible clamping mechanism, enabling highly stable imaging and automated sample handling of lens surfaces. Algorithmically, an end-to-end detection pipeline comprising "Retinex enhancement—adaptive filtering—Otsu segmentation—lightweight CNN classification" is developed, achieving precise micron-level defect identification while suppressing glass reflectivity interference. Pilot-scale trials conducted through industry-academia collaboration demonstrated that the system maintains a detection accuracy exceeding 99.2% for defects ≥500 nm, delivers imaging resolution superior to 300 nm, reduces single-piece inspection time from 15 seconds to 8 seconds, and lowers overall quality inspection costs by 32%. This system provides a high-precision, reliable quality inspection solution for optoelectronic device manufacturing, while establishing a scalable engineering paradigm for industry-academia integration and domestic production of critical inspection equipment in the context of smart manufacturing.

Keywords

self-focusing lens; machine vision; defect detection; deep learning; intelligent manufacturing; industry-education integration

基于机器视觉与深度学习的自聚焦透镜端面缺陷智能检测系统研究

吴倩 方伊琪 杨军* 张洋

西京学院，中国 · 陕西 西安 710123

摘 要

针对光通信自聚焦透镜（GRIN Lens）端面缺陷检测长期依赖人工目检、效率低、误检率高的问题，本文提出并实现了一种融合机器视觉与深度学习的智能检测系统。系统采用高精度工业相机与远心光学成像结构，结合定制化XYZ三轴运动平台及负压吸附柔性夹持机构，实现透镜端面的高稳定成像与自动流转。算法层面，构建“Retinex增强—自适应滤波—Otsu分割—轻量化CNN分类”的端到端检测流水线，在抑制玻璃高反光干扰的同时，实现微米级缺陷的精准识别。校企联合中试表明，系统对≥500 nm缺陷的检出率稳定在99.2%以上，成像分辨率优于300 nm，单件检测节拍由15 s降至8 s，综合质检成本降低32%。该系统为光电子器件制造提供了高精度、高可靠性的质量检测解决方案，同时为智能制造背景下产教融合与关键检测装备国产化提供了可推广的工程范式。

关键词

自聚焦透镜；机器视觉；缺陷检测；深度学习；智能制造；产教融合

1 引言

随着 5G 通信、数据中心及物联网的快速发展，光通信无源器件需求持续增长，自聚焦透镜作为光路耦合与信号传输的核心元件，其端面质量直接决定光传输损耗与系统稳定性 [1]。目前，国内透镜制造企业仍以人工显微镜目检或半自动化抽检为主，存在主观性强、漏检率高、难以适配高速产线等问题，严重制约产品质量一致性与交付能力 [2]。传统光学性能检测（如折射率分布、数值孔径测量）虽可评估功能参数，却无法高效识别崩边、划痕、针孔等微观表面缺陷。在此背景下，引入机器视觉与人工智能技术实现端面质

【作者简介】吴倩（2005–），女，中国陕西宝鸡人，在读本科生，从事机器视觉、缺陷检测研究。

【通讯作者】杨军（1981–），男，中国四川达州人，硕士，讲师，从事教育管理、思想政治教育研究。

量的自动化、智能化检测，已成为光电子制造产业升级的迫切需求。

本文依托校企协同创新平台，针对自聚焦透镜端面缺陷检测的产业瓶颈，设计并实现了一套智能化视觉检测系统。系统阐述其硬件架构、算法流程与工程实现路径，并通过实验验证其在工业环境下的检测性能与应用价值，旨在为高端光学元件质检提供可复制的技术方案，同时探索高校科研成果向产业转化的有效机制。

2 行业背景与市场需求分析

光电子产业是现代信息社会的物理基础。据行业预测，至 2026 年全球光纤通信与光器件检测市场规模将突破 630 亿元。我国虽占据全球自聚焦透镜产能的 60% 以上，但高端质检设备长期依赖进口，核心算法与精密光学组件受制于人，国产替代空间广阔。国家政策层面，《“十四五”智能制造发展规划》与《关于推动未来产业创新发展的实施意见》均明确提出，要加快机器视觉、工业 AI 在精密制造环节的渗透，突破关键检测装备“卡脖子”技术 [5]。

自聚焦透镜端面缺陷主要包括崩边、划痕、针孔与麻点四类，尺寸多在微米至亚微米量级，极易引起光散射与模式失配，导致通信链路衰减加剧 [6]。传统人工检测产能一般低于 200 件 / 小时，漏检率高达 5%—8%，且难以形成可追溯的质量数据闭环。随着 AI 视觉检测成本下降与算力普及，行业正加速向“高分辨率、高帧率、高稳定性”的智能质检转型。本项目紧扣这一产业痛点，以机器视觉替代人工判读，以深度学习赋能缺陷分类，契合了光通信产业链向高端化、智能化演进的历史趋势，具备显著的市场前瞻性与工程落地价值。

3 系统总体架构与硬件设计

本检测系统以“高稳定性成像 + 精准运动控制 + 智能算法决策”为核心设计理念，采用模块化架构，主要由机械输送单元、光学成像单元与数据处理终端三部分构成。

3.1 机械输送单元

基于 XYZ 三轴精密步进电机滑台设计，结合负压吸附机械手，实现透镜的自动取放、姿态调整与双端面翻转采集。X-Y 轴负责水平定位，Z 轴控制升降高度，确保透镜端面始终处于光学系统的最佳焦平面与视场中心。夹持机构采用柔性硅胶吸盘，避免刚性接触导致的微裂纹扩展，适应直径 2mm—5mm 的微型透镜批量作业。

3.2 光学成像单元

光学成像单元是系统的感知核心。经多轮选型对比，采用 MV-EM200M 黑白 CCD 工业相机（200 万像素，1600×1200 分辨率，20 fps 帧率）搭配 TML20×150S 小型工业远心镜头。远心镜头具有极低畸变（0.02%）与高景深一致性，有效消除透视误差，保障边缘缺陷的几何保真度。照明系统选用可调角度白色环形 LED 光源，通过背光 / 明场混合打光策略，抑制玻璃材质的高反光干扰，凸显划痕与麻点的灰度对比度。所有光学组件通过定制底座与滑块机构实现同轴度精密调节，确保光路稳定。

3.3 数据处理终端

硬件系统支持流水化作业：机械手完成单件定位后，相机触发采集，图像经 USB3.0 高速传输至工控机，处理结果实时反馈至分拣机构，实现合格品与不良品的自动归类。整套装置结构紧凑、抗振性强，可无缝嵌入现有封装产线。

4 图像处理与智能识别算法

算法流水线是决定检测精度与速度的关键。本系统构建了“预处理 - 分割 - 特征提取 - 智能分类”四级处理架构。

4.1 图像预处理

针对透镜端面图像存在的照度不均与表面反光问题，采用 Retinex 算法进行动态范围压缩与对比度增强，恢复暗部细节。随后，引入自适应中值滤波与双边滤波组合策略，在保留边缘锐度的同时有效抑制高斯噪声与椒盐噪声，为后续分割奠定基础。

4.2 缺陷分割

结合 Otsu 全局阈值法与局部自适应阈值算法，实现目标与背景的精准分离。针对崩边与划痕的线性特征，应用 Canny 边缘检测与 Hough 变换提取轮廓几何参数；针对针孔与麻点的点状特征，采用形态学开闭运算与连通域分析，提取面积、圆度、灰度方差等 12 维形态学特征向量。

4.3 智能分类

传统阈值与规则方法在复杂缺陷交叉或光照波动时易产生误判。为此，系统后端集成轻量化卷积神经网络（CNN）分类模块。通过收集校企联合产线的数千张标注样本，构建包含正常、崩边、划痕、针孔、麻点五类数据集，采用数据增强（旋转、缩放、亮度扰动）提升模型泛化能力。网络结构引入注意力机制与残差连接，在保持低计算开销的同时，实现微米级缺陷的高精度分类。算法整体 Pipeline 经 CUDA 加速优化，单帧处理耗时控制在 50ms 以内，满足产线节拍要求。

5 改进 YOLOv8s–4GCW 算法设计

5.1 基准算法选择

对 YOLOv8n、YOLOv8s、YOLOv8m 三种模型进行对比实验。结果表明，YOLOv8s 在检测精度（mAP@0.5=84.7%）和计算效率（GFLOPs=28.7G）之间取得最佳平衡，因此选择 YOLOv8s 作为基准模型。

5.2 算法改进策略

5.2.1 引入分组混洗卷积块

为降低模型计算复杂度，在主干网络中引入分组混洗（GS）卷积块替代传统卷积。GS 卷积通过分组卷积和逐点卷积的组合，在保持特征提取能力的同时减少参数量。实验表明，引入 GS 卷积后，模型计算量从 28.4G 降至 26.6G，

帧率从 212.89 F/t 提升至 227.17 F/t。

5.2.2 嵌入坐标注意力机制

为增强模型对缺陷位置信息的感知能力，在颈部网络嵌入坐标注意力（CA）模块。CA 机制将位置信息编码到通道注意力中，通过水平和垂直方向的池化操作，捕获长程依赖关系。实验显示，添加 CA 模块后，mAP@0.5 提升 1.7% 至 86.4%，且计算量仅增加 0.1G。

5.2.3 增加 P2 检测层

针对微小缺陷易漏检的问题，在检测头增加 P2 检测层（特征图尺寸 160×160）。P2 层利用浅层特征，减少多次下采样导致的小目标信息丢失。实验表明，增加 P2 层后，微小目标检测精度提升 1.1%。

5.2.4 采用加权交并比损失函数

将原 CIoU 损失函数替换为加权交并比（WIoU），通过动态非单调聚焦机制，在训练过程中自适应调整梯度增益分配。实验显示，替换损失函数后，mAP@0.5 提升 0.3%，计算量下降 1.7G。

综合上述改进，提出 YOLOv8s-4GCW 算法。最终模型 mAP@0.5 达到 88.6%，较原 YOLOv8s 提升 3.9%，精确率提升 2.6%。

6 实验验证与成果案例

为验证系统有效性，项目组依托省级重点实验室与陕西威尔机电科技有限公司联合开展中试测试。实验平台按硬件配置搭建，采集多批次自聚焦透镜端面图像共计 1500 余组，涵盖不同光照条件与生产批次。

测试结果表明：在标准工况下，系统对 ≥500 nm 的微小缺陷检出率稳定在 99.2% 以上，成像有效分辨率达 300 nm，测量重复性误差控制在 ±0.003 mm 内。相较于人工检测，单件检测周期由 15 s 缩短至 8 s，产线吞吐率提升 49%；同时，因误判返工率下降，综合质检成本降低 32%。典型缺陷的采集与识别结果清晰呈现：崩边区域边缘灰度突变被精准勾勒；划痕的走向与深度通过形态学骨架提取清晰呈现；麻点与针孔经连通域分析实现亚像素级定位。算法模型在测试集上的分类准确率达 98.7%，F1-score 优于 97.5%，具备较强的工程鲁棒性。

7 应用价值分析

对客户而言，系统价值体现在三个维度：经济效益上，替代 2-3 名质检员 / 班次，年节省人力成本超 20 万元，投资回收期通常＜ 12 个月；质量管控上，实现 100% 全检覆盖与缺陷溯源，满足 ISO9001 与车规 / 医疗级元器件认证要求；战略升级上，设备具备 API 接口与 MES 系统对接能力，助力企业数字化转型。

8 结论与展望

本文针对自聚焦透镜端面缺陷检测难题，提出一种基于改进 YOLOv8s 的智能检测算法。主要贡献如下：

（1）构建了包含 3907 张图像的自聚焦透镜端面缺陷数据集，通过中值滤波预处理和精细化标注，为算法训练提供高质量数据支撑；

（2）提出 YOLOv8s-4GCW 算法，通过引入 GS 卷积块、坐标注意力机制、P2 检测层和 WIoU 损失函数，使 mAP@0.5 达到 88.6%，较原算法提升 3.9%，有效解决了微小缺陷漏检问题；

（3）开发了基于 PyQt5 的人机交互界面系统，实现了从图像导入、模型训练到缺陷检测的全流程自动化，未知样本检测准确率达 83.3%-100%，具备工程应用价值。

未来工作将从以下方面展开：扩充复合缺陷样本，提升模型对多缺陷并发场景的识别能力；探索模型轻量化技术，在保持精度的同时降低计算资源消耗；优化人机交互界面，增加数据统计、质量追溯等功能，提升系统易用性。

本研究为光电子器件智能制造提供了可靠的技术方案，对推动我国光学元件质检装备国产化具有重要工程价值。

参考文献

[1] 全国光学和光子学标准化技术委员会(SAC/TC 103). 光学零件表面疵病: GB/T 1185—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[2] 邵延华, 冯玉沛, 张晓强, 等. 基于深度学习的光学元件表面疵病识别[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(11): 112002.

[3] 侯劲尧, 刘卫国, 周顺, 等. 基于卷积神经网络的光学元件表面缺陷图像分类[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 677-683.

[4] 向弋川, 林有希, 任志英. 光学元件表面缺陷检测方法研究现状[J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 78-87.

[5] 胡泽波, 郭忠达, 李宏, 等. 球面光学元件表面疵病视觉检测方法研究[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(1): 21-27.

[6] 王伟, 李娜, 赵磊. 光通信无源器件端面缺陷对传输性能的影响[J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 1023-1031.