

基于 YOLOv8s 的 PCBA 导电海绵位置视觉检测算法研究

罗成¹, 罗浩文²

1. 四川长虹电器股份有限公司, 四川 绵阳 621000

2. 四川农业大学, 四川 雅安 625014

DOI:10.61369/ERA.2026100038

摘 要 : 家电产品一般利用导电海绵实现 PCBA 上芯片或关键电路与结构件接地, 导电海绵粘贴偏移和缺件会引发电路板短路或整机功能失效等质量问题。传统人工目检存在效率低、无法数字化追溯等缺陷。针对家电产线 PCBA 导电海绵自动化检测需求, 本文以 YOLOv8s 为基础检测模型, 结合双阈值七维特征融合评分, Procrustes 刚体配准位置校验等多项技术, 构建一套完整的机器视觉检测系统。实验结果表明: 模型 mAP50 达到 0.995, mAP50-95 为 0.812; 验证批正常板识别准确 100%, 不良缺件板识别准确率 100%; CPU 模式下单帧总检测耗时 368~590ms, 系统可补偿最高 495px 的 PCBA 全局放置偏移, 有效解决产线放板偏差、光照扰动等工程难题, 可满足工业量产环境下导电海绵位置合规性检测与质量追溯需求。

关 键 词 : PCBA; 导电海绵; YOLOv8s; 机器视觉; Procrustes 配准

Research on Visual Detection Algorithm for Conductive Sponge Position in PCBA Based on YOLOv8s

Luo Cheng¹, Luo Haowen²

1.Sichuan Changhong Electrical Appliances Co., Ltd., Mianyang, Sichuan 621000

2.Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014

Abstract : Household appliances typically use conductive sponge to connect chips or key circuits on the PCB board with structural components for grounding. Deviations in the adhesion of the conductive sponge and missing parts can cause short circuits on the circuit board or functional failure of the entire machine. Traditional manual inspection methods have low efficiency and lack the ability for digital traceability. To meet the requirements of automated detection of conductive sponge on PCBA in the household appliance production line, this paper uses the YOLOv8s detection model as the basis, combines dual-threshold seven-dimensional feature fusion scoring, Procrustes rigid body registration position verification, and other technologies to construct a complete machine vision detection system. Experimental results show that the model's mAP50 reaches 0.995, and mAP50-95 is 0.812; the recognition accuracy of normal boards in the verification batch is 100%, and the recognition accuracy of defective boards with missing parts is also 100%; the total detection time per frame in the CPU mode is 368-590ms, and the system can compensate for the maximum 495px global placement offset of the PCB board, effectively solving engineering problems such as placement deviation and light disturbance in the production line, and meeting the requirements for compliance detection and quality traceability of conductive sponge positions in industrial mass production environments.

Keywords : PCBA; conductive sponge; YOLOv8s; machine vision; Procrustes registration

引言

导电海绵作为 PCBA 板上保证电路接地良好的一种关键元件, 其粘贴位置的精度直接影响整机可靠性与电磁兼容性能。在家电制造量产场景中, 导电海绵若发生偏移、超出规定区域, 极易短接周边相邻焊盘, 引发电路短路、功能失效等严重质量事故, 且传统人工目检方式缺乏检测过程的数字化留痕, 异常问题难以实现全链路追溯, 已无法满足高精度生产管控要求。为此, 本文针对 PCBA 导电海绵的安装位置检测痛点, 引入 YOLOv8s 目标检测算法, 结合工业相机采集的高分辨率图像开展模型训练与优化, 构建一套兼顾检测速度与定位精度的自动识别方案, 为产线质量闭环管控提供技术支撑。

作者简介:

罗成 (1974.09-), 男, 汉族, 籍贯: 四川省西充县, 大学本科, 学士学位, 高级工程师, 从事工厂自动化和智能制造方向的研究工作。

罗浩文 (2005.11-), 男, 汉族, 籍贯: 四川省绵阳市, 四川农业大学计算机科学与技术专业, 大学本科在读, 从事机器视觉和工业自动化方向研究。

一、系统总体架构与检测流程

（一）系统总体架构

本系统面向 PCBA（印制电路板组件）产线上导电海绵的自动化视觉检测需求，采用模块化分层架构设计，由6大核心功能层、14个功能模块组成。系统基于迈德威视 MV-GE501GM 千兆网口工业相机进行图像采集，以 YOLOv8s 为目标检测核心算法，结合双阈值防误检、七维特征融合评分、Procrustes 刚体配准位置校验、训练集基准驱动曝光优化等多项创新技术，实现了对 PCBA 上多个导电海绵位置的高效、可靠识别与合规性判定，如表1：

表1

功能层	核心模块	关键文件	核心职责
表现层	主界面 / 参数配置	main_app.py	PyQt5 GUI 主界面、ROI 标定、结果展示、声音提示
业务编排层	自动触发	auto_detect_module.py	帧差法5状态机检测 PCBA 就位
业务编排层	时序滤波	temporal_filter.py	滑动窗口多帧投票 + 空间聚类
算法核心层	YOLO 检测	detection_module.py	YOLOv8s 双阈值 +7 维特征融合 +ROI 二次检测
算法核心层	位置校验	verification_module.py	Procrustes 刚体配准 + 匈牙利最优匹配
算法核心层	边缘对齐	edge_alignment_module.py	ECC/ORB/ 混合三种边缘对齐策略
算法核心层	图像预处理	preprocess_module.py	CLAHE 对比度均衡 +HSV 颜色过滤
数据采集层	工业相机	camera_module.py	迈德威视 SDK 封装、AE 控制、断线重连
数据采集层	曝光优化	full_optimize.py / fine_optimize.py	训练集质量基准 + 多维参数搜索
模型训练层	两阶段训练	train_2stage.py	冻结 Backbone →全网络精调
模型训练层	自动标注	auto_label.py	位置先验统计 + 图像处理检测标注
基础支撑层	配置管理	config_manager.py	统一 YAML 配置读写
基础支撑层	统计追溯	stats_module.py	SQLite 检测记录存储与查询
基础支撑层	权限管理	auth_module.py	用户登录与操作权限控制

（二）流水线检测流程

系统核心检测流程为8级串联流水线，单次检测完整流程为：
①相机采集→②自动触发→③图像预处理和边缘对齐→④ YOLO 检测→⑤二次检测→⑥位置校验→⑦时序滤波→⑧结果输出。

1. 相机采集：采用迈德威视 MV-GE501GM 千兆网口工业相机，分辨率2448×2048像素，8位灰度 / 彩色输出^[1]。相机支持自动曝光(AE)和手动曝光模式，曝光参数由训练集基准优化确定。

2. 自动触发（帧差法5状态机）：通过帧差法检测 PCBA 是否就位，采用5状态机模型：IDLE → PLACING → STABLE → -

DETECTING → RESULT_HOLD。当画面变化率超过阈值时进入 PLACING 状态，连续3帧变化率低于阈值 ×0.3时判定 PCBA 稳定放置，触发检测流程。检测完成后进入 RESULT_HOLD 状态保持3秒显示结果，随后回到 IDLE 状态等待下一块 PCBA。该机制有效避免了人工按键触发，提升了产线检测效率。

3. 图像预处理与边缘对齐：当采集图像与训练参考图像存在微小旋转或平移差异时，通过边缘对齐模块进行几何校正。系统提取 Canny 边缘计算结构相似度，当相似度低于0.70时触发对齐^[2]。实际工程日志记录显示：

（1）ECC 粗配准：基于增强相关系数的欧氏变换估计。当 ECC 相似度达到0.75以上时直接采用 ECC 结果，如日志记录”对齐应用：method=ecc, rot=0.00, dx=-0.0, dy=-0.0, sim: 0.753 -> 0.753”。

（2）ECC+ORB 混合配准：当 ECC 相似度不足时（如0.684），级联 ORB 精配准，如日志记录”对齐应用：method=ecc+orb, rot=-0.00, dx=0.0, dy=-0.0, sim: 0.583 -> 0.684, time=57.7ms”，相似度从0.583提升至0.684。

（3）ROI 模板匹配对齐：对5个 ROI 区域分别进行模板匹配，根据匹配偏移估计全局变换。工程日志记录”ROI 模板对齐：matched=5, inlier=5, rot=-0.04, dx=-178.0, dy=-4.6”，5个 ROI 全部匹配成功，模板匹配得分0.958~0.989。

4. YOLOv8s 双阈值检测：以 YOLOv8s 模型为核心执行导电海绵检测。模型文件大小21.48MB，输入尺寸640×640，检测类别为 conductive_sponge（单类）。实际工程检测日志显示：

（1）典型 OK 板检测：5个导电海绵全部检出，置信度分别为0.9125、0.8969、0.8940、0.8849、0.8091，平均置信度0.8795，远高于高置信度阈值0.25，全部直接判定有效。CPU 推理耗时418~484ms/ 帧。

（2）含低置信度候选的检测：当原始检测框数为6时（含1个低置信度候选 conf=0.4220），通过七维特征融合评分机制对低置信度框进行二次判定，有效过滤误检目标，最终保留5个有效检测。

（3）首帧推理耗时较长：模型首次推理（CPU 推理）耗时约900ms+（JIT 编译预热），后续推理稳定在418~556ms/ 帧。

5. ROI 引导二次检测：当检出目标少于预期5个时，在对应感兴趣区域降低置信度阈值二次推理，结合模板匹配验证，提升困难场景召回率。

6. 位置合规校验：Procrustes 刚体变换结合 RANSAC 估计全局平移旋转，匈牙利算法完成检测目标与标准 ROI 最优匹配，补偿放板全局偏差后判定单块海绵偏移是否超限。

7. 时序一致性滤波：维护5帧滑动窗口，空间聚类 + 多帧投票机制过滤光照、电磁干扰带来的瞬态误检。

8. 结果输出：PASS/NG 可视化弹窗加声音告警，同时存储

JSON 日志、检测截图与数据库记录。

二、关键算法改进

（一）双阈值分级判定与七维特征融合评分

通用 YOLO 采用单一置信阈值存在矛盾：阈值偏高易漏检，阈值偏低容易将焊盘反光等判定为导电海绵。本项目设计双阈值分级策略：置信度高于高阈值直接判定有效；处于高低阈值之间的候选框启用七维特征融合评分；低于低阈值直接丢弃。七维特征包含填充率，目标宽高比，区域灰度均值，边缘完整性，局部对比度，LBP 纹理均匀性和颜色直方图，各特征设置对应权重加权得到融合总分 S_{fusion} ，当 $S_{\text{fusion}} < 0.55$ 判定为误检。该融合评分属于软判决，单项特征缺陷不会直接剔除目标，具备工业场景容错能力，工程测试中可有效剔除置信度 0.422 的虚假检测框^[3]。

（二）训练集基准驱动的相机曝光自动优化

人工调试曝光参数受操作人员主观影响，会造成现场图像与训练集亮度分布不一致，降低模型检测置信度。该算法步骤：①建立训练集参考质量向量，包含灰度均值、标准差、分位数、对比度、信噪比等 10 维指标；②定义多维质量距离，衡量现场图像与训练集基准的差异；③在 Gamma、曝光、增益、对比度四维参数空间遍历搜索，选取质量距离最小参数组合；④最优参数邻域精细化搜索收敛最终参数。经优化后现场图像灰度均值稳定在 114~118，OK 板平均检测置信度提升 8%~15%。

（三）Procrustes 刚体配准位置校验方法

传统 ROI 距离校验没有补偿 PCBA 整体平移旋转，产线手动或机械手放置带来数百像素全局偏移时，完好海绵会被误判偏移不合格。本项目采用 3 自由度刚体变换模型，RANSAC 随机采样估计全局变换参数，内点最小二乘精化，匈牙利算法完成检测实例与标准 ROI 最优匹配，补偿全局偏差后再评判单块海绵位置偏移。实验证明该方法可补偿最高 495px 的视场偏移，将大偏移场景下 OK 板误判率由 100% 降至 0。当海绵本体真实偏移时，残差会显著超过 30 px 阈值，正确输出 NG 判定^[4]。

（四）多策略边缘对齐推理一致性保障

YOLO 对输入图像旋转平移敏感，微小摆放角度差异会造成置信度下降甚至漏检。系统预先保存训练参考图边缘特征；现场图像 Canny 边缘相似度不足 0.70 则启动配准：ECC 粗配准适合微小偏差；ECC+ORB 级联处理中等旋转平移；ROI 模板匹配依靠海绵位置先验应对大幅偏移。对齐后图像送入 YOLO 推理，检测框通过逆变换映射原图坐标系，保证结果标注正确。

（五）滑动窗口时序一致性滤波

光照闪烁、电磁干扰会造成单帧瞬态误检，而真实导电海绵在连续帧稳定出现。设置 5 帧滑动历史窗口，对检测框做空间聚类，中心距离小于 30 px 归为同一目标簇；簇满足出现帧数 ≥ 3 、

平均置信度 ≥ 0.3 才判定有效，剔除瞬时出现的虚假目标，提升连续检测稳定性。

（六）两阶段迁移学习与位置先验自动标注

导电海绵属于小目标，可用标注样本总量有限，直接训练易发生过拟合。两阶段训练策略：阶段 1 冻结 Backbone 前 10 层，仅训练检测头 15 个 epoch，学习率 0.01，快速适配任务；阶段 2 解冻全部网络，120 个 epoch 精调，学习率 0.001，设置早停机制防止过拟合；数据增强开启 mosaic、HSV 等色彩扰动，禁用旋转翻转以匹配 PCBA 方向性约束^[5]。

针对人工标注工作量大问题，提出位置先验自动标注：统计样本内海绵位置分布先验，正常样本直接生成标注；不良样本结合 HSV 过滤与轮廓检测，在先验约束下自动生成 YOLO 格式标签，减少人工标注工作量。

三、实验与结果分析

（一）数据集设置

数据集共 490 张训练图像，其中 OK 样本 400 张（每张包含 5 块导电海绵），缺件不良 DB 样本 90 张，验证集约 100 张，图像分辨率 2448×2048 ，单检测类别 conductive_sponge。

（二）模型训练结果

YOLOv8s 输入尺寸 640×640 ，模型大小 21.48 MB。阶段 1 冻结训练 15 个 epoch，mAP50 即达到 0.995，Precision=0.9999，Recall=1.0000；阶段 2 全网络精调后 mAP50=0.995，mAP50-95=0.812，Precision=1.0000，Recall=0.9999，box_loss、cls_loss 平稳下降，训练无明显过拟合。

（三）离线批量验证

400 张 OK 样本全部判定 PASS，识别准确率 100%；个别样本产生冗余检测框，经后处理过滤得到正确结果。20 张缺件不良样本全部正确判定 NG，不良识别准确率 100%，无误判 PASS 现象。

（四）产线在线测试

在线采集超过 150 条真实产线检测记录，CPU 模式下推理耗时 346~556 ms，校验耗时 15~36 ms，单帧总耗时 368~590 ms，检测帧率 1.7~2.7 FPS。可处理小、中、大各类 PCBA 放置偏移；对于海绵本体偏移超限样本能够准确输出 NG。边缘对齐模块可根据偏移程度自适应选择 ECC、ECC+ORB、ROI 模板匹配，完成图像几何校正。

四、结论

本文面向家电 PCBA 产线导电海绵位置检测，基于 YOLOv8s 提出一套完整机器视觉检测方案。通过双阈值七维特征融合抑制误检；训练集基准自动曝光优化解决现场光照参数调试难题；

Procrustes 刚体配准补偿 PCBA 整体放板偏移；多策略边缘对齐保障推理输入一致性；时序滤波抑制瞬时干扰；两阶段迁移学习与先验自动标注解决小样本训练痛点。离线与在线工程测试表明，系统具备很高识别精度，能够应对工业现场放板偏移，光照扰动、和样本少等现实问题，检测结果支持本地存储追溯，可应用于 PCBA 自动化质量检测工位。后续可以引入 GPU 推理进一步提升检测帧率，拓展更多海绵规格与缺陷类型，增强算法泛化能力。

参考文献

[1] 宋鸿飞, 范炯阳, 冷雪, 黄俊然, 杨晓凯. 基于硬件解耦的线结构光三维重建方法 [J]. 激光与光电子学进展. 2026, 63 (16) : 176-192.

[2] 计大威. 基于数字图像处理技术的皮革纹理缺陷检测系统设计 [J]. 皮革与化工. 2026, 43 (07) : 25-27.

[3] 宋康康, 张俊生, 全晓刚, 张红宇. 基于 Canny-Devernavy 的算法芯片缺陷边缘检测 [J]. 信息技术与信息化. 2025 (04) : 83-86.

[4] 刘志超, 顾广杰. 多站激光扫描点云配准算法研究 [J]. 海洋测绘. 2018, 38 (05) : 36-40.

[5] 任孟, 陈宇岳, 张德锁, 林红. 基于 rGO/PDMS 可穿戴电阻式柔性压力传感器的制备和性能研究 [J]. 纺织导报. 2022 (06) : 92+94-96.