

基于改进 Canny 算法的航天电子装联焊点缺陷检测方法

杨志, 赵亚飞, 王薇, 杨瑞栋, 吴彦威

(北京空间机电研究所, 北京 100000)

摘要: 航天电子装联中焊点的质量对设备的可靠性至关重要, 焊接缺陷的检测是确保系统稳定运行的关键; 为提升航天电子装联过程中焊接缺陷检测的效率和准确性, 研究提出了一种基于改进 Canny 算法的图像处理方法; 研究采用双边滤波技术在平滑噪声的同时保留边缘信息, 结合 Otsu 阈值分割算法来自动确定最佳阈值; 通过设置双阈值来确定强边缘和弱边缘, 引入 Hough 变换填补断裂的边缘; 实验结果表明, 基于改进 Canny 的系统在各类焊点检测中表现出色, 在 0.12 mm 网板中, 正常焊点和桥接焊点的检测准确率分别为 98.89% 和 98.21%; 在 0.18 mm 网板中, 该系统在少焊和过焊焊点的检测准确率分别为 97.56% 和 98.47%; 同时, 验证了改进 Canny 算法在准确率、漏检率和运行时间方面的差异均具有统计学意义; 此外, 改进 Canny 系统在计算时间和 CPU 使用率上优于其他两种算法, 表现出该系统在实际应用中的优越性。

关键词: 机器视觉; 边缘检测; Canny; 图像预处理; 航天电子装联

Defect Detection Method for Aerospace Electronic Assembly Solder Joints Based on an Improved Canny Algorithm

YANG Zhi, ZHAO Yafei, WANG Wei, YANG Ruidong, WU Yanwei

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100000, China)

Abstract: The quality of solder joints in aerospace electronic assemblies is essential to the reliability of the equipment, and the detection of welding defects is crucial for ensuring the stable operation of the system. To improve the efficiency and accuracy of welding defect detection in the aerospace electronic assembly process, an image processing method based on an improved Canny algorithm is proposed. This paper adopts a bilateral filtering technology to smooth noise while preserving edge information, and combines the Otsu threshold segmentation algorithm to automatically determine optimal threshold. Strong and weak edges are determined by setting dual thresholds, The Hough transform is introduced to fill the broken edges. Experimental results show that the system based on the improved Canny performs well in the detection of various types of solder joints. In the 0.12 mm mesh board, the accuracy of detecting normal and bridging solder joints is 98.89% and 98.21%, respectively. In the 0.18 mm mesh board, the detection accuracy of low and over solder joints is 97.56% and 98.47%, respectively. And then, it is verified that the improved Canny algorithm has a statistical significance in the differences of accuracy, missed detection rate, and running time. In addition, the improved Canny algorithm outperforms other two ones in the computation time and CPU usage, demonstrating its superiority in practical applications.

Keywords: machine vision; edge detection; canny; image pre-processing; aerospace electronic assembly

0 引言

航天设备的电子装联对焊接质量要求极高, 焊点缺陷可能引发功能失效, 尤其在高温、高振动、辐射等复

杂环境下, 焊点可靠性至关重要^[1]。航天器和卫星常暴露于极端温度波动和高速振动中, 这些因素会加剧焊点疲劳, 导致断裂或接触不良, 进而引发系统故障或崩溃^[2]。因此, 焊接质量的检测与控制对航天设备的制造

收稿日期:2025-03-19; 修回日期:2025-04-22。

作者简介:杨志(1984-),女,大学本科。

引用格式:杨志,赵亚飞,王薇,等.基于改进 Canny 算法的航天电子装联焊点缺陷检测方法[J].计算机测量与控制,2025,33(9):261-270.

和维护极为关键, 早期发现并修复焊接缺陷是确保系统正常运行和航天任务成功的重要保障^[3]。

电子装联技术是现代航天、电子制造等领域中关键的技术之一, 能够通过高效、精确的焊接与组装过程, 确保了电子元件在各种严苛环境中的稳定性与可靠性^[4-5]。但航天电子装联对焊点质量的要求极高, 尤其是在高温、高振动和辐射等复杂环境下, 焊点的可靠性直接关系到设备的正常运行^[6]。文献 [7] 提出了一种集成小芯片组装技术, 可实现多小芯片的重新组装、升级、测试和原型制作。该技术包括封装平台、自对准结构、可压缩微互连和管芯连接插入器。该研究主要针对小芯片组装, 未充分考虑航天电子装联中对焊点质量的严格要求, 难以直接应用于航天领域。文献 [8] 通过流体自组装技术开发了一种定向组装电子元件的方法。利用低熔点焊料的不对称图案化, 控制发光二极管在摇动容器中的移动方向, 使其正确粘合到基板上。实验结果表明, 该焊料图案设计规则能有效实现定向选择性键合。但该技术主要适用于发光二极管等特定元件, 可能不适用于其他类型的电子元件。

鉴于航天电子装联对焊点质量的高要求, 传统的检测方法往往难以满足复杂环境下的精确检测需求。而随着自动化和智能化技术的快速发展, 机器视觉技术已成为焊点检测领域的重要工具^[9]。机器视觉技术在焊点检测中的应用, 不仅能提高检测效率, 还能保证较高的检测精度^[10]。文献 [11] 提出了一种基于机器视觉的在线检测方法, 用于自动化和改进计算机数控 (CNC, computer numerical control) 加工零件的检测。该方法结合重映射算法和图像处理, 精确提取特征并进行尺寸检查。实验中, 使用安装在 5 轴 CNC 主轴上的 CMOS 相机对零件进行测试。结果表明, 该方法显著提升了生产线的制造效率, 但该方法主要针对静态零件的尺寸检测, 未考虑在复杂环境中的动态变化, 且无法处理具有复杂缺陷的图像。文献 [12] 提出了一种改进 Canny 算子的齿轮边缘缺陷检测技术, 通过梯度双边滤波预处理图像, 优化卷积核提高微弱边缘保留率。利用 Otsu 算法计算高阈值, 自适应确定强弱边缘。结果表明, 改进 Canny 算法可提取更完整的齿轮边缘, 相较于传统 Canny 算法, 检测效果提升 30%。但该方法主要应用于机械齿轮边缘检测, 局限于特定的几何形状和规则边缘, 对于复杂背景或不规则形状的边缘检测, 仍存在不足。相比之下, 研究所提算法采用改进 Canny 算法结合双边滤波和 Hough 变换, 能够在更复杂的环境中处理航天电子装联中的焊点缺陷, 且在处理高振动和高温环境下的图像时表现出更强的鲁棒性。文献 [13] 使用 Canny 算子结合圆拟合来定位工作表面, 提出了一种结

合概率霍夫变换的改进 Canny 算子用于划痕连接。引入双向连接来优化 Canny 算子的边缘检测过程, 并引入并行算法来缩短检测时间。实验结果表明, 与传统 Canny 算法相比, 改进的 Canny 算法的准确率、召回率和 F_1 得分分别提高了 3.2%、13.2% 和 6.0%。但该方法主要应用于表面划痕检测, 对于复杂缺陷类型和环境因素的适应性有限。而研究所提出的改进 Canny 算法结合双边滤波、Hough 变换和 Otsu 阈值分割算法, 能够在更复杂的图像背景中高效检测不同类型的焊点缺陷, 显著提升检测的准确性和鲁棒性。

综上所述, 虽然现有研究在航天电子装联中的焊点缺陷检测方面已取得一定进展, 但是现有的自动化焊点检测系统往往受到环境因素、设备性能和计算资源的限制, 难以在高精度和高效率之间找到完美的平衡。鉴于此背景, 研究提出了一种基于改进 Canny 算法的图像处理方法, 旨在解决传统算法在焊点检测中的不足。研究创新性地引入双边滤波和 Hough 变换算法, 改进了传统 Canny 算法的边缘检测能力, 结合 Otsu 阈值分割算法, 实现了自适应阈值选取, 提高了算法对不同图像的适应性。在实际应用中, 高振动和高温环境常常导致图像模糊、噪声增大和细节丢失, 传统算法通常难以适应这些变化。而改进后的 Canny 算法, 通过双边滤波的图像预处理, 可以有效降低由于环境变化引起的噪声干扰, 同时通过 Hough 变换增强对断裂边缘的连接能力, 提高了对焊点缺陷的检测精度。研究不仅解决了传统方法在复杂环境下的鲁棒性问题, 还提升了航天电子装联领域中焊点检测的稳定性和精度, 确保了在极端环境条件下的高效和高质量检测。

1 基于机器视觉的改进 Canny 算法设计

1.1 基于改进 Canny 的图像处理算法

Canny 算法在处理噪声图像时, 会通过高斯滤波来降低噪声, 但这可能会模糊图像细节, 影响边缘检测的准确性。为改进传统 Canny 边缘检测算法, 研究采用双边滤波替代高斯滤波以增强自适应性, 双边滤波表达式如式 (1) 所示^[14]:

$$I(p) = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in \Omega} I(q) \exp\left(-\frac{\|p - q\|^2}{2\sigma_d^2}\right) \cdot \exp\left[-\frac{\|I(p) - I(q)\|^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (1)$$

式 (1) 中, $I(p)$ 表示输出图像中像素 p 的新值, $I(q)$ 表示输入图像中像素 q 的原始值, W_p 为归一化因子, 用于确保权重和为 1, Ω 表示滤波器的邻域。 σ_d 表示空间域的标准差, 控制图像中相邻像素的空间影响。 σ_r 表示像素值域的标准差, 控制像素值差异的影响。为了找到最优的双边滤波参数, 研究进行了网格搜索优化。在工业

图像处理中,常见的焊点图像细节包含大量的边缘和纹理信息,使用过大的 σ_d 会使得这些关键特征模糊,影响检测的精度。因此,结合实际应用经验,选择了 $[1, 15]$ 的搜索范围, σ_r 的搜索范围设定为 $[10, 30]$,确保在图像去噪的同时,能够保留重要的焊点特征,避免过度模糊。设置 σ_d 的搜索范围为 $[1, 15]$, σ_r 的搜索范围为 $[10, 30]$,步长均为1。焊点图像中,噪声多为高频成分,边缘宽度通常为1~3像素。若 $\sigma_d < 5$,噪声抑制不足;若 $\sigma_d > 10$,边缘过度模糊。根据正态分布 3σ 原则,当 $\sigma_d = 9$ 时,双边滤波核函数的覆盖范围为 ± 27 像素,可平衡噪声抑制与边缘保留,避免过度平滑图像细节^[15]。此外,焊点与背景的典型灰度差为30~50。若 $\sigma_r < 15$,弱边缘易被误判为噪声;若 $\sigma_r > 25$,噪声可能被保留。当 $\sigma_r = 20$ 时,边缘连续性评分达0.96,优于其他参数组合。能够在有效平滑噪声的同时保留焊点边缘的关键信息,从而显著提升检测精度和鲁棒性。因此,研究选择 $\sigma_d = 9$, $\sigma_r = 20$ 为最优值。双边滤波效果受因子取值影响,因此需合理选择因子值。 W_p 定义如式(2)所示:

$$W_p = \sum_{q \in \Omega} \exp\left(-\frac{\|p-q\|^2}{2\sigma_d^2}\right) \cdot \exp\left[-\frac{\|I(p)-I(q)\|^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (2)$$

式(2)中,在双边滤波中,权重不仅取决于空间距离,还取决于像素值的差异,因此在平滑时能够保留图像中的边缘信息。理想情况下,边缘检测旨在精准识别图像中的边缘像素,但实际应用中,噪声和光照不均等因素可能导致边缘断裂,无法准确反映特征。非极大值抑制(NMS, non-maximum suppression)是用来细化边缘的重要步骤,计算图像梯度后,沿梯度方向比较每个像素与其邻域的最大梯度值。若非最大,则抑制该像素。梯度幅值和梯度方向的计算如式(3)所示:

$$\begin{cases} G(x,y) = \sqrt{G_x(x,y)^2 + G_y(x,y)^2} \\ \varphi(x,y) = \tan^{-1}\left[\frac{G_x(x,y)}{G_y(x,y)}\right] \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, (x,y) 表示图像中某个点的坐标, $G(x,y)$ 表示该点的梯度幅值, $\varphi(x,y)$ 表示该点的梯度方向。在NMS中,首先根据梯度方向确定边缘的方向,然后检查该像素点在梯度方向上的邻域。如果该像素的梯度幅值不是最大值,则该像素被抑制。由于成像系统分辨率、照明设置、网络不稳定和噪声干扰等因素,图像质量可能下降。因此,需进行图像分割预处理。研究采用Otsu阈值分割算法进行图像分割,假设图像行列为 $M \times N$,灰度级为 L ,则在该图像中某点像素出现的概率如式(4)所示^[16]:

$$P_i = \frac{n_i}{M \cdot N} \quad (4)$$

式(4)中, P_i 表示图像中像素 i 出现的概率, n_i 表示图像中灰度级为 i 的像素数量。对于阈值 T ,图像分为背景和前景两类,两类图像的平均灰度值如式(5)所示^[17]:

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{\sum_{i=0}^{T-1} ih(i)}{w_1} \\ \mu_2 = \frac{\sum_{i=T}^{L-1} ih(i)}{w_2} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, μ_1 和 μ_2 分别表示背景类和前景类的平均灰度值, $h(i)$ 为图像的灰度直方图, w_1 和 w_2 分别表示背景类和前景类的权重。利用类间方差用来衡量前景和背景之间的区分度,表达式如式(6)所示^[18]:

$$\sigma_B^2(T) = w_1(T) \cdot (\mu_1 - \mu_T)^2 + w_2(T) \cdot (\mu_2 - \mu_T)^2 \quad (6)$$

式(6)中, T 表示原始阈值, w_2 表示类间方差, μ_T 表示整个图像的平均灰度值。当类间方差取最大值时,最佳分割阈值如式(7)所示:

$$\bar{T} = \operatorname{argmax}[\sigma^2(T)] \quad (7)$$

式(7)中, $\bar{T}$ 为最佳分割阈值,能够最大化前景和背景之间的区分度,从而实现最佳的图像分割效果。但在不同光照条件下,图像的对比度会随之改变,导致Otsu算法计算出的阈值出现偏差,从而影响图像分割的效果。对于处于低光照条件的图像,可以将Otsu算法计算出的阈值降低10%,以适应图像的低对比度特性。对于处于高光照条件的图像,则可以将阈值提高一定比例,以适应图像的高对比度特性。这一调整可以通过简单的线性缩放实现,新的阈值计算过程如式(8)所示:

$$\begin{cases} T' = \bar{T} \times 0.9 \\ T'' = \bar{T} \times (1 + \alpha) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, T 和 T'' 为低光照和高光照条件下的阈值, α 表示调整比例,可取值0.05或0.1。在图像分割后,计算边界点之间的空间距离和方向,当断点距离在可接受阈值内时,可自动连接这两个断点,从而闭合轮廓。在Canny算法中,通过设置双阈值来确定强边缘和弱边缘。根据像素的梯度幅值 $G(x,y)$ 是否超过阈值来决定其是否为边缘。若一个像素点的梯度幅值大于高阈值,则判定为强边缘,直接保留。若梯度幅值介于高阈值和低阈值之间,则判定为弱边缘。弱边缘会被边缘连接部分进一步分析,如果与强边缘相连,则保留该弱边缘,否则舍弃。在进行边缘连接时,研究通过Hough变换的全局处理算法填补断裂,形成连续的边缘或区域边界。将图像中的边缘像素转换为参数空间中的点,定义参数空间由直线的垂直距离和角度。对于图像中的直线,Hough变换的公式可以表示为极坐标形式,如式(9)所示^[15-19]:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (9)$$

式 (9) 中, ρ 表示从原点到直线的垂直距离, 其取值范围取决于图像的尺寸和直线可能出现的最大距离。 θ 表示直线与水平方向的夹角, 其取值范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$ 。在参数空间中, 对每个边缘点累加计数, 形成累加阵列。累加阵列中局部最大值的点对应于图像空间中可能的直线, 将检测到的直线参数反变换到图像空间, 得到直线的端点如式 (10) 所示:

$$\begin{cases} x_1 = \rho \cos \theta - D \sin \theta \\ y_1 = \rho \sin \theta + D \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 中, x_1 和 y_1 分别表示直线的端点, D 表示一个较大的阈值, 可以确定哪些累加单元被认为是真正的边缘。 D 控制了累加器阵列中的直线被认为有效的标准。 D 值越大, 表示检测到的直线需要有更多的支持点, 才能被认为是有效的直线。通过网格搜索, 对阈值 D 的范围进行了优化, 取值范围为 $[50, 200]$ 。通过对不同 D 值的实验测试, 发现当 D 值为 100 时, 边缘连接效果最佳, 能够有效连接断裂的边缘, 同时避免因过度抑制而导致的过度平滑。 $D > 50$ 时, 可能检测到更多的边缘, 但同时也增加了误检和假阳性的问题, 尤其在图像中存在噪声或低对比度的情况下。而 $D < 200$ 能够减少假阳性, 减少噪声对结果的干扰, 但也可能错过一些重要的边缘细节, 尤其是在复杂焊点缺陷的检测中。根据这些参数空间中的点, 重建图像空间中的直线, 从而连接断裂的边缘, 形成完整的边缘或区域边界。通过将图像中的边缘点映射到参数空间, 利用累加器阵列进行投票, 并根据阈值 D 选择有效直线, 从而在图像中填补断裂的边缘。改进 Canny 算法的流程如图 1 所示。

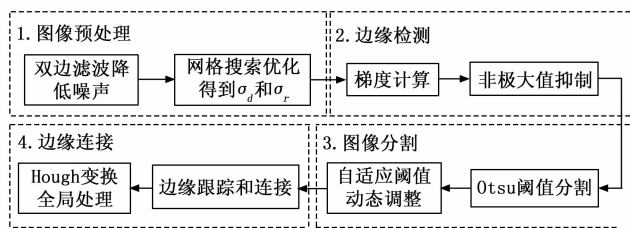


图 1 改进 Canny 算法流程

图 1 中, 改进 Canny 算法的流程结合了双边滤波和 Otsu 阈值分割技术, 首先在图像预处理阶段使用双边滤波替代高斯滤波以降低噪声并保留边缘信息, 其中空间域标准差 σ_d 和像素值域标准差 σ_r 通过网格搜索优化得到。在边缘检测阶段计算图像的梯度幅值和方向, 并进行 NMS 以细化边缘。在图像分割阶段, 采用 Otsu 阈值分割算法将图像分为背景和前景两类, 并计算类间方差以确定最佳分割阈值, 同时根据不同光照条件下调整阈值以适应图像的对比度特性。最后, 在边缘连接阶

段对检测到的边缘进行跟踪和连接, 通过 Hough 变换将图像空间中的点映射到参数空间的曲线, 填补断裂边缘, 形成连续的边缘或区域边界。

1.2 基于改进 Canny 的电子装联系统软硬件设计

在实际焊接过程中, 桥接问题通常表现为两个焊点之间形成了不必要的电连接, 从而可能导致短路或信号干扰。为有效识别这一问题, 系统利用基于改进 Canny 的图像处理算法对焊点区域进行精确分割, 并分析焊点间的连通性。通过计算元件焊点连接区域的拓扑特征, 首先利用欧拉数来判断焊点连接的结构变化。欧拉数是一个常用于拓扑学中的指标, 可以有效地描述一个区域内连接成分和孔洞的数量^[20]。欧拉数的计算考虑了区域内的连通区域数和区域内的孔洞数, 可以帮助判断是否存在桥接问题。当欧拉数的变化超过预定阈值时, 系统将判定为可能存在桥接问题。通过欧拉数的计算, 可以准确地识别出由于桥接造成的不正常连接, 避免了传统方法中依赖人工检查或简单阈值设定的局限性。欧拉数的计算过程如式 (11) 所示^[21]:

$$E = C - H \quad (11)$$

式 (11) 中, E 表示欧拉数, C 表示图像中的连通区域的数量, H 表示图像中的孔的数量。通过二值化处理, 得到标准焊点和待测焊点的图像, 并对其区域识别和区域标记, 之后提取每个区域的欧拉数 E_0 和 E_1 。计算后, 如果 $E_0 > E_1$, 说明存在桥接, 流程会指向桥接的判断结果。如果 $E_0 \leq E_1$, 则进入其他缺陷的检测流程。在少焊识别环节, 通过统计图像区域像素数量计算面积, 并与原始面积对比, 若偏差不大, 则能成功判断少焊情况。偏差计算如式 (12) 所示:

$$e = \frac{s_0 - s_1}{s_0} \quad (12)$$

式 (12) 中, e 为偏差, s_0 表示实际图像区域的面积, s_1 表示估算图像区域的面积。图像经过二值化处理后, 进行区域识别并提取区域面积 s_0 和 s_1 。根据公式 (10) 计算偏差 e , 当偏差 e 大于 0.05 时, 表示焊料过少, 流程指向焊料过少的检测结果。若偏差小于 0.05, 则进入其他缺陷的检测流程。在现代电子制造中, 机器视觉技术作为自动化检测和控制的重要手段, 广泛应用于焊点检测、元件装配等多个环节^[22]。在图像采集阶段, 采用 Basler acA2500-20gc CCD 相机, 配备 Nikon 50mm $f/1.8$ 镜头进行图像采集。镜头参数如下: 焦距为 50 mm, 光圈范围为 $f/1.8 \sim f/22$, 工作距离约为 150~250 mm, 能够提供适中的景深和低畸变成像。通过图像处理算法, 机器视觉能够快速、准确地分析电子装联过程中的每一个细节, 极大地提高了生产效率和质量控制水平。航天电子装联中的焊点尺寸通常较小, 且对缺陷的检测

精度要求极高。2500 万像素的电荷耦合器件（CCD，charge-coupled device）相机能够提供更高的图像分辨率，使得微小的焊点缺陷能够被清晰地捕捉和识别。同时，在改进 Canny 算法中，高分辨率图像能够更好地保留微弱边缘信息，减少因图像模糊导致的漏检。在检测过程中，阴影和反射可能会干扰图像的质量，影响检测的准确性。LED 环形光源的设计能够有效减少阴影的产生，同时避免其他光源对图像的干扰。在检测焊点时，环形光源可以从多个角度均匀照射，减少因角度问题导致的反射和阴影。因此，研究所设计的电子装联技术平台利用 CCD 相机进行采集，设备运行图像经过算法处理后显示在屏幕上。电子装联技术平台架构如图 2 所示^[23]。

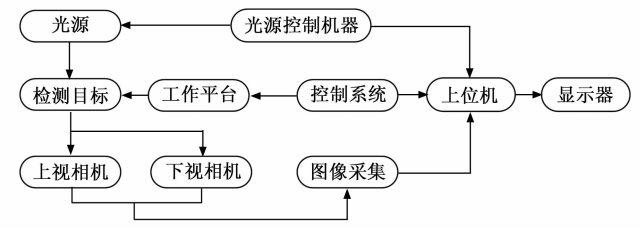


图 2 电子装联技术平台架构图

图 2 中，CCD 相机和其他视觉相机分别连接到图像采集卡，通过光源和光源控制器提供适当的照明。系统的目标检测是通过工作平台执行的，工作平台检测目标并通过控制系统进行反馈。系统的输出是通过上位机显示器进行显示，用于监控和分析整个视觉检测过程^[24]。待测图像经视觉系统采集后，需进行处理才能显示。为了提高检测的准确性和效率，研究采用了基于改进 Canny 算法的图像处理方法。改进后的 Canny 算法不仅能够有效地提取图像中的边缘信息，还能在不同光照和噪声条件下保持较高的鲁棒性。因此，基于这一算法的图像处理系统成为电子装联系统的核心技术之一。系统按使用需求分为图像采集、处理分析和识别 3 个单元，通过一个动态的反馈环节持续优化检测过程形成闭环。闭环设计的核心在于其自动调整能力，能够根据检测结果实时修正和优化图像处理流程，确保整个系统在多变的环境条件下稳定运行，其框架如图 3 所示。

图 3 中，图像采集单元通过图像传感器和采集设备获取图像，并通过图像传输到采集窗口。图像经过处理和分析单元完成图像的定位与存储，同时进行图像预处理与分析，通过改进 Canny 算法进行缺陷分析和识别。处理后的信息被反馈到输出模块，其中检测结果通过显示单元展示，同时与人机交互单元和交互控制单元进行数据交换和控制。图像处理模块由图像预处理和图像处理两部分组成。预处理包括滤波和对比度增强，滤波可

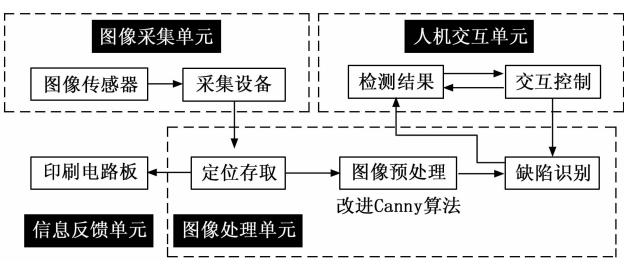


图 3 基于改进 Canny 的电子装联系统软件框架

有效去除外界干扰，提升图像精度，便于后续处理。图像处理模块是系统核心，其效率直接影响系统运行。结合缺陷检测，将待检测图像与标准图像对比，通过嵌套分析和多次处理，得出芯片缺陷情况。若检测到缺陷，系统会提示更换芯片并生成重要报告。同时，该模块还能防止漏装问题，避免无意义检测，提高效率。缺陷识别模块基于图像处理结果进行分区域处理，对比待测图像与标准图像，二者之间的相关系数计算如式（13）所示：

$$R = \frac{f(x,y) - w(x,y)}{f(x,y) \cdot w(x,y)} \tag{13}$$

式（13）中， R 表示相关系数， $f(x,y)$ 表示待测图像， $w(x,y)$ 表示参照图形。对于桥接识别，通过图像处理算法检测元件焊点的连接区域，并分析焊点的形态和结构变化。系统的软件操作流程如图 4 所示。

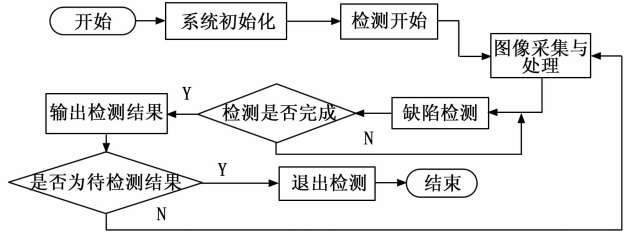


图 4 系统的软件操作流程

图 4 中，首先进行系统的初始化，开始检测后系统进行图像的采集，并对采集到的图像进行处理，以便为后续的缺陷检测做好准备。处理完成的图像将被用于缺陷检测。如果检测未完成，流程会返回到图像采集步骤继续检测；如果检测完成，则输出检测结果。接下来，系统会检查是否有待检测结果，如果有，流程会返回到图像采集步骤继续处理新的图像；若没有新的待检测图像，系统将退出检测流程，并标志着整个检测过程的结束。

2 实验结果与分析

2.1 实验设置

实验旨在验证所提出的改进 Canny 算法在航天电子装联应用中的有效性。为此，研究选择了包含 1 200

张图像的 PCB 数据集, 该数据集来源于 FICS PCB 数据集, 由佛罗里达大学发布, 包含多种 PCB 焊接缺陷类型。所用图像的分辨率统一为 640×480 像素, 图像格式为 24 位真彩色图像。焊点形态包括规则半球形 (正常焊点)、不规则点状分布 (少焊)、焊料跨越相邻焊盘 (桥接) 以及焊料溢出焊点 (过焊) 等特征, 典型特征的纹理和灰度对比度均表现出明显可分性。此外, 每张图像均带有人工标注的缺陷区域标签, 以便于监督学习与评估分析。实验室温保持在 $22 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度控制在 $50\% \pm 5\% \text{RH}$, 环境光照维持在 $300 \sim 350\text{ lux}$, 以模拟典型航天电子车间的温湿度条件并确保成像一致性。CCD 相机配合 LED 环形光源可有效抑制反射干扰, 提高图像边缘质量。根据实际生产中常见的焊接缺陷类型, 设计数据集中各缺陷类型的分布比例为: 正常焊点: 少焊: 桥接: 过焊 = $8:5:4:3$ 。通过这种分布, 实验能够全面评估所提出算法在不同缺陷类型检测中的性能, 进而验证其在实际应用中的有效性和鲁棒性。在硬件配置方面, 实验在一台配备 Intel Core i7-9700K 处理器、32 GB DDR4 内存、512 GB NVMe SSD 和 NVIDIA GeForce RTX 2070 Super 显卡的计算机上进行。使用 Basler acA2500-20gc CCD 相机和 Nikon 50 mm $f/1.8$ 镜头进行图像采集, LED 环形光源提供均匀照明, National Instruments PCIe-1433 图像采集卡实现高速数据传输。软件方面, 实验在 Windows Server 2019 操作系统上进行, 利用 Python 3.8 和 PyCharm Community Edition IDE 进行算法开发, OpenCV 4.5.1.48、NumPy 1.19.2 和 SciPy 1.5.2 库负责图像处理和数值计算, MATLAB R2020b 用于数据分析和可视化。为了全面评估所提算法的性能, 研究选择了两种算法作为基准对比: 改进的 Sobel 算子边缘检测算法^[25]和基于遗传算法 (GA, genetic algorithm) 优化的支持向量机 (SVM, support vector machine)^[26]。改进 Sobel 算子在边缘检测中具有较好的性能, 且计算复杂度较低, 是经典的边缘检测方法之一。而 GA-SVM 算法结合了遗传算法的全局优化能力和支持向量机的高效分类性能, 具有较强的泛化能力。因此选用改进 Sobel 算子边缘检测算法以及 GA-SVM 作为对比, 以评估所提改进 Canny 算法在不同缺陷类型检测中的表现。两种算法的参数设置如表 1 所示。

研究根据表 1 的参数设置进行对比测试, 在实验中, 研究选取了 3 种开口比例相同但厚度不同的网板 (0.12 mm、0.15 mm 和 0.18 mm), 并根据标准焊膏印刷方法对这些网板进行焊膏涂布。此外, 研究还模拟了正常焊点、少焊、桥接和过焊 4 种不同的焊点类型。在航天应用中, 焊点作为电子组件连接的关键, 其质量直

表 1 算法参数设置

算法	参数名称	参数值
改进的 Sobel	高斯滤波标准差	1.5
	水平卷积核	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	垂直卷积核	$\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$
GA-SVM	种群大小	100
	交叉率	0.8
	变异率	0.05
	迭代次数	160
	惩罚参数范围	$[0.1, 10]$
	核函数参数范围	$[0.01, 1]$

接决定了设备的稳定性和寿命。例如, 在高振动环境下, 少焊可能导致焊点断裂, 影响电路的连续性; 而在高温环境中, 过焊可能引起焊料流动, 造成短路或性能退化。桥接焊点可能在极端温度变化下引发不期望的电连接, 而过焊则可能在振动中导致机械应力集中, 增加故障风险。通过模拟不同类型的焊点缺陷, 能够验证电子装联系统在模拟的极端环境下检测缺陷时的能力。同时, 通过与两种基准算法的对比, 可以评估所提出的基于改进 Canny 算法的焊点缺陷检测方法在检测准确率、计算效率和鲁棒性等方面的表现, 从而证明其在航天电子装联中的实用价值和优越性。

2.2 改进 Canny 算法性能评估

为了验证基于改进 Canny 的电子装联系统图形识别性能, 研究按 7:3 的比例将 PCB 数据集分为训练集和测试集, 将研究所提出的基于改进 Canny 的图像处理算法与改进 Sobel 算子边缘检测算法以及基于 GA-SVM 进行对比测试, 边缘检测准确率结果如图 5 所示。

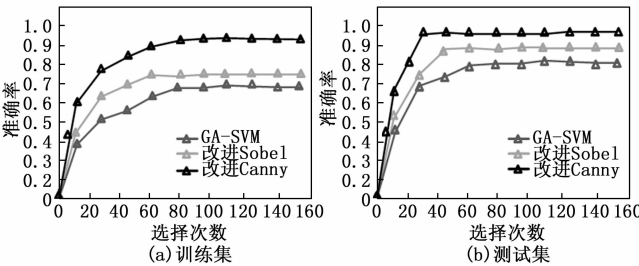


图 5 不同算法的边缘检测准确率对比

图 5 (a) 和图 5 (b) 分别为 3 种不同算法在训练集和测试集上的边缘检测准确率变化。图 5 (a) 中, 在训练集上, GA-SVM 算法的准确率起始值约为 0.2, 随着选择次数的增加, 准确率逐渐提升, 最终稳定在约 0.6 左右。说明该算法能够逐渐学习到图像的特征, 但

在准确率上仍有一定的提升空间。Sobel 算子的表现优于 GA-SVM, 初期准确率约为 0.4, 随着选择次数增加, 准确率稳定上升, 最终趋近于 0.7。改进 Canny 的准确率表现最优, 迭代初期准确率为 0.5 左右, 随后准确率持续上升, 最终几乎稳定在 0.9 左右。改进 Canny 的表现说明它在训练集上能够迅速并有效地识别边缘。图 5 (b) 中, 在测试集上, GA-SVM 算法的准确率虽然有所提高, 但相比于其他两种算法依然较低, 约为 0.7 左右。Sobel 算子的准确率在测试集上稳定在 0.85 左右。与训练集相比, 测试集上的表现有所提升, 说明 Sobel 算子的泛化能力较好。而改进 Canny 算法在测试集上的表现依然最佳, 准确率接近 1.0。与训练集的表现基本一致, 表明改进 Canny 具有强大的泛化能力, 能够适应不同的数据集。不同算法的漏检率结果对比如图 6 所示。

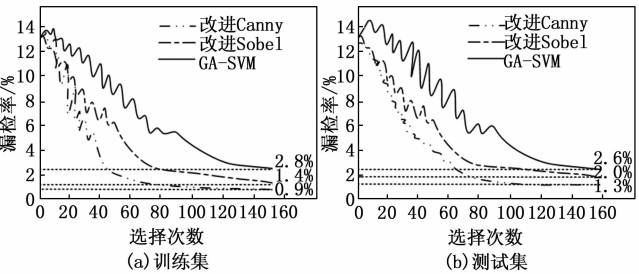


图 6 不同算法的漏检率对比

图 6 (a) 和图 6 (b) 分别是 3 种不同算法在训练集和测试集上的漏检率变化趋势。图 6 (a) 中, GA-SVM 算法在训练集上的漏检率开始较高, 为 13%, 随着选择次数的增加, 漏检率逐渐下降并趋于平稳。即使随着选择次数增加, GA-SVM 算法的漏检率降低至 2.8%, 但仍然高于其他两种算法。改进 Sobel 算法在训练集上漏检率逐渐下降, 初期从 13% 左右开始, 最终稳定在 1.4% 左右, 表明该算法能够较好地适应训练集数据并减少漏检。改进 Canny 算法表现出最优的漏检率下降趋势, 随着选择次数的增加, 漏检率迅速下降, 并在约 40 次选择后几乎趋于平稳, 最终稳定在 0.9% 左右, 表现出较好的检测性能。图 6 (b) 中, GA-SVM 算法在测试集上的漏检率表现与训练集类似, 但下降趋势较慢, 最终在 2.6% 趋于平稳。与训练集相比, 测试集的漏检率略高, 说明 GA-SVM 算法的泛化能力较差, 可能存在一定的过拟合现象。改进 Sobel 算法在测试集上的漏检率较训练集上略高, 最终稳定在 2.0%, 虽然较好地减少了漏检, 但仍未达到改进 Canny 算法的水平。改进 Canny 算法在测试集上的表现最为优秀, 最终稳定在 1.3% 的水平。与训练集上的表现相似, 改进 Canny 显示出了较强的泛化能

力。检测过程中, 不同算法的运行时间变化结果如图 7 所示。

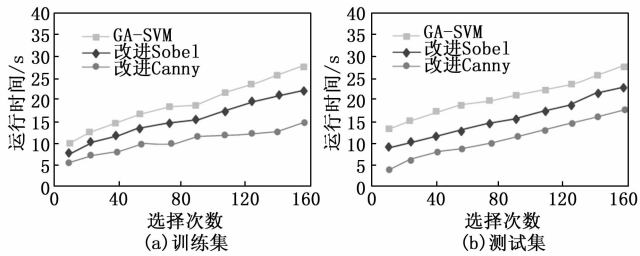


图 7 不同算法的运行时间对比

图 7 (a) 和图 7 (b) 分别为 3 种不同边缘检测算法在训练集和测试集上的运行时间对比。图 7 (a) 中, GA-SVM 算法在训练集上的运行时间较高, 随着选择次数的增加, 运行时间逐步上升, 最终稳定在约 25 s。由于 GA-SVM 算法的特征提取步骤复杂, 因此其运行时间较长。改进 Sobel 算法在训练集上的运行时间较为平稳, 虽然有一定的上升趋势, 但相比 GA-SVM 算法, 其增长速度较慢, 最终稳定在约 20 s 左右。改进 Canny 算法运行时间始终最低, 随着选择次数的增加, 运行时间略有上升, 最终稳定在约 15 s 左右。图 7 (b) 中, GA-SVM 算法在测试集上的运行时间同样较高, 与训练集类似, 随着选择次数的增加, 运行时间稳定在约 27 s 左右, 变化趋势与训练集相似。改进 Sobel 算法的运行时间在测试集上也呈现稳定上升的趋势, 最终稳定在约 22 s, 表明该算法在测试集中的处理相对复杂。改进 Canny 算法的运行时间在测试集上表现最优, 最终稳定在约 16 s, 接近训练集的运行时间。由此可见, 改进 Canny 算法在训练集和测试集上均具有较强的计算效率和稳定性。为了评估模型的稳定性和泛化能力, 研究基于 PCB 数据集对 3 种算法进行了 10 次交叉验证, 结果如表 2 所示。

表 2 交叉验证结果

算法	准确率/%	漏检率/%	运行时间/s
改进 Canny	98.89 ± 0.12	0.90 ± 0.05	0.34 ± 0.02
改进 Sobel	85.23 ± 0.18	2.80 ± 0.10	0.41 ± 0.03
GA-SVM	80.56 ± 0.25	3.50 ± 0.15	0.48 ± 0.04

由表 2 可知, 改进 Canny 算法的准确率为 98.89% ± 0.12%, 显示出该算法具有很高的检测准确性。漏检率为 0.90% ± 0.05%, 说明该算法能够有效识别大多数缺陷。并且在平均运行时间方面同样表现出较高的运行效率。改进 Canny 算法在所有指标上均优于其他两种算法, 且其与其他算法之间的差异在统计上显著。利用 t 检验对结果进行统计显著性验证, 结果如表 3 所示。

表 3 t 检验结果			
模型对比	准确率 p 值	漏检率 p 值	运行时间 p 值
改进 Canny-改进 Sobel	0.03	0.04	0.02
改进 Canny-GA-BPNN	0.01	0.02	0.01
改进 Sobel-GA-BPNN	0.04	0.03	0.03

表 3 中,所有算法之间的 p 值均小于 0.05,差异在统计上均显著,表明改进 Canny 算法在准确率上具有显著优势。在航天电子装联过程中,焊接质量直接影响到系统的整体可靠性,尤其在高振动、高温环境下运行的航天设备中,任何焊点的缺陷都可能导致严重的功能失效。

2.3 基于改进 Canny 的电子装联系统在航天中的应用效果

为了验证研究所提技术在航天电子装联应用中的有效性,研究模拟了正常焊点、少焊、桥接和过焊 4 种不同的焊点类型。测试的资源消耗对比如表 4 所示。

表 4 资源消耗结果对比分析

网板厚度/mm	焊点类型	基于改进 Canny 系统			基于改进 Sobel 的系统			基于 GA-SVM 的系统		
		CPU 使用率/%	内存占用率/%	计算时间/s	CPU 使用率/%	内存占用率/%	计算时间/s	CPU 使用率/%	内存占用率/%	计算时间/s
0.12	正常	70.24	45.36	0.34	60.36	46.32	0.41	71.64	56.98	0.48
	少焊	75.36	50.15	0.48	65.89	51.23	0.43	76.35	55.45	0.45
	桥接	72.46	48.61	0.35	68.15	50.21	0.39	73.26	56.32	0.41
	过焊	74.65	49.36	0.38	67.45	50.45	0.40	75.64	51.23	0.43
0.15	正常	71.64	46.19	0.32	62.69	48.35	0.34	74.56	52.16	0.38
	少焊	76.18	51.84	0.42	64.98	53.19	0.45	77.65	54.31	0.47
	桥接	73.19	47.46	0.37	69.15	50.36	0.41	76.25	52.16	0.43
	过焊	75.01	48.89	0.41	66.59	49.65	0.45	77.65	50.32	0.47
0.18	正常	73.68	47.15	0.35	63.48	47.65	0.37	79.36	48.36	0.39
	少焊	77.36	53.45	0.45	65.85	55.68	0.48	78.24	56.38	0.49
	桥接	74.19	50.23	0.39	70.36	51.96	0.42	75.32	52.48	0.43
	过焊	76.16	52.21	0.43	68.54	53.61	0.48	78.15	57.03	0.51

根据表 4,随着网板厚度增加,改进 Canny 系统的 CPU 使用率也略微增加。在 0.12 mm 厚度时,CPU 使用率为 70.24%,而在 0.18 mm 时增加到 76.16%。但总体来说,CPU 使用率在不同焊点类型下变化不大,保持在 70%~76%的范围。此外,内存占用率随着网板厚度的增加也有一定上升。在 0.12 mm 时,内存占用率为 45.36%,而在 0.18 mm 时增加到 52.21%。随着网板厚度增加,在过焊和少焊的焊点类型下,计算时间更长。在生产线上,尤其是在精密焊接任务中,保持计算效率和系统稳定性至关重要。通过改进 Canny 算法的优化,系统能够有效处理不同焊点类型的检测任务,减少误判和漏判,从而提高生产

效率和产品质量。改进 Canny 算法不仅能够高效地处理复杂的焊点检测任务,而且在较厚的电路板上也能保持稳定的性能,确保高精度的检测结果。基于改进 Sobel 系统的 CPU 使用率相对较低,通常在 60%~69%之间。即使随着网板厚度的增加,CPU 使用率变化不大。在 0.12 mm 时,CPU 使用率为 60.36%,而在 0.18 mm 时为 69.15%。该系统的内存占用率较高,尤其是在较厚网板时,内存占用率为 53.61%。这表明 Sobel 算法的内存消耗在处理较大图像时更为显著。计算时间方面,计算时间随着网板厚度的增加和焊点类型的变化呈现逐步上升的趋势,特别是在少焊、过焊和桥接的焊点类型下,计算时间更长。基于改进 Sobel 系统通常需要更多的时间来处理复杂任务。基于 GA-SVM 系统的 CPU 使用率在所有系统中最高,通常在 71%~78%之间。特别是在 0.18 mm 的电路板上,CPU 使用率为 78.15%。表明该系统在处理任务时需要更多的计算资源。在 3 种系统中,基于 GA-SVM 系统的内存占用率较高,在 0.12 mm 时为 56.98%,在 0.18 mm 时为 57.03%。因此,GA-SVM 系统的内存需求相对较大,尤其是在较厚的电路板上。基于 GA-SVM 系统的计算时间相对较长,在复杂焊点类型下,计算时间处于 0.43 s 到 0.51 s 之间。与其他系统相比,基于 GA-SVM 系统的处理速度较慢。虽然 FICS PCB 数据集包含了多个常见焊点缺陷类型,但并未包含航天领域中常见的特有缺陷类型。因此,为确保数据集能够适应航天电子装联的实际应用,研究通过增加焊点附近的亮度变化,模拟由于高温引起的颜色变化。此外,振动可能导致焊点的微裂纹或接触不良,影响焊点的可靠性。为此,研究使用高斯噪声,使得图像中的焊点区域呈现出可能的微小裂纹或接触不良的特征。研究通过模拟不同的焊接缺陷,验证了电子装联系统在这些极端环境下的检测能力,得出的检测正确率结果如图 8 所示。

图 8 (a)、图 8 (b) 和图 8 (c) 分别为不同边缘检测算法在 3 种不同厚度的网板上,对不同类型焊点进行检测的准确率结果。图 8 (a) 中,正常焊点下,基于改进 Canny 的电子装联系统表现最优,检测准确率为 98.89%。改进 Sobel 系统的检测准确率相对较高,而 GA-SVM 系统的准确率最低,为 85.23%。在少焊焊点的检测中,基于改进 Canny 系统的准确率仍然领先,为 92.56%。改进 Sobel 系统和 GA-SVM 系统的准确率有所下降,分别为 85%和 80%。对于桥接焊点,基于改进 Canny 系统的检测准确率为 98.21%,表现显著优于其他两种系统。对于过焊焊点,基于改进 Canny 系统继续保持较高的准确率,为 95.32%。图 8 (b) 中,在

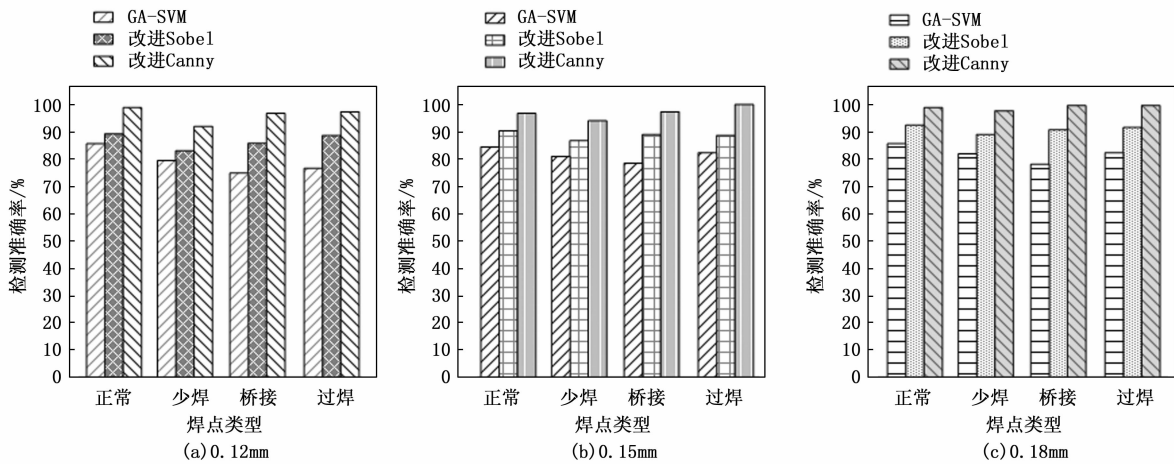


图 8 检测正确率结果对比

0.15 mm 厚度的电路板上, 基于改进 Canny 系统的表现依然最好, 少焊、桥接以及过焊检测准确率分别为 92.36%, 96.89% 和 98.54%。有助于在早期生产阶段快速定位潜在隐患, 避免产品返修, 提高装联良品率。相比之下, 改进 Sobel 系统的系统在少焊、桥接和过焊检测中的准确率分别为 85.12%、80.24% 和 80.63%, 而 GA-SVM 系统分别为 80.56%、76.25% 和 78.56%。图 8 (c) 中, 对于 0.18 mm 厚度的电路板, 基于改进 Canny 的系统在所有焊点类型的检测中均表现出色, 准确率接近 100%。在少焊焊点的检测中, 改进 Canny 系统依然表现优异, 准确率约为 97.56%。对于过焊焊点的检测, 改进 Canny 系统的准确率为 98.47%。综合看来, 基于改进 Canny 的电子装联系统在少焊、过焊等缺陷检测中保持高准确率, 能够有效降低焊接质量问题引发的后续故障, 尤其适用于对焊点可靠性要求极高的航天器主控模块、信号处理板等关键部件。此外, 该算法在不同厚度的网板上均保持稳定性能, 说明其对焊盘间距、焊膏覆盖程度等工艺变化具有较强的适应能力, 能够适应航天制造过程中多规格元件共线装配的实际需求。检测可视化结果如图 9 所示。

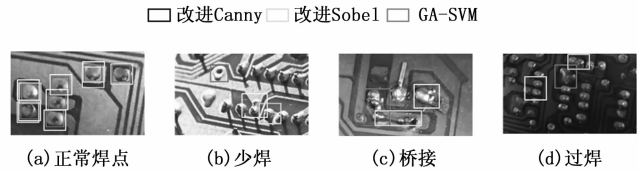


图 9 检测可视化结果

图 9 (a)、图 9 (b)、图 9 (c) 以及图 9 (d) 分别为 3 种算法在正常焊点、少焊、桥接以及过焊 4 种缺陷图像上的检测可视化结果。图 9 (a) 中, 正常焊点没有明显的缺陷, 所有算法基本能够准确地检测到这些焊点。图 9 (b) 中, 改进 Canny 能够准确地标出少焊区

域, 而改进 Sobel 和 GA-SVM 均未检测到正确的少焊焊点。图 9 (c) 以及图 9 (d) 中, 同样只有改进 Canny 检测到了缺陷部位, 效果优于其他两种方法。结果说明, 改进 Canny 算法不仅在指标上具有优越性, 在视觉输出层面同样具备直观准确的表现, 进一步验证了其在复杂装联场景下的部署可行性, 具备面向航天生产现场的工程落地能力。

3 结束语

为了解决传统检测方法精度不足和效率低的问题, 研究提出了一种基于改进 Canny 算法的焊点缺陷检测方法。通过改进边缘检测算法, 利用双边滤波代替高斯滤波, 结合 Otsu 阈值分割算法进行图像处理。通过实验验证, 改进 Canny 算法在图像边缘检测任务中的表现最为优异。在训练集和测试集上, 改进 Canny 算法能够实现接近 1.0 的准确率, 表现出强大的泛化能力和高精度, 尤其在正常焊点和桥接焊点的检测上, 准确率几乎达到 100%。改进 Canny 算法还在漏检率上表现出最优性能, 测试集上的漏检率仅为 1.3%。此外, 改进 Canny 系统在计算效率上具有显著优势, 其运行时间较短, 特别适合实时性要求较高的焊点检测任务。不同厚度的网板和不同焊点类型的检测结果显示, 改进 Canny 算法在各类焊点缺陷检测中均具有较高的准确率, 整体检测准确率均高于 90%。例如, 在 0.12 mm 网板厚度下, CPU 使用率为 70.24%, 内存占用率为 45.36%, 计算时间为 0.34 s。而在 0.18 mm 网板厚度下, CPU 使用率略增至 76.16%, 内存占用率为 52.21%, 计算时间增至 0.43 s, 表明随着网板厚度的增加, 系统资源消耗略有增加。虽然改进 Canny 算法在电子装联中表现优异, 但对于某些极端缺陷类型, 仍有改进空间。未来的工作可结合深度学习等更先进的图像处理技术, 可能会进一步提升焊点检测的精度与效率, 为航天电子装

联的自动化和智能化提供更为强大的支持。

参考文献:

- [1] 高伟娜, 张明华, 隋淞印, 等. 国产元器件高可靠装联常见问题及其启示 [J]. 宇航材料工艺, 2022, 52 (4): 98 - 102.
- [2] GAO X, HE X, WU Y, et al. Shock characteristics and protective design of equipment during spacecraft docking process [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2023, 36 (6): 837 - 850.
- [3] ALIZADEH A, RASTEGARZADEH G. Simulation and design of optimized three-layer radiation shielding to protect electronic boards of satellite revolving in geostationary earth orbit (GEO) orbit against proton beams [J]. Journal of Astronomy and Space Sciences, 2024, 41 (1): 17 - 23.
- [4] 张泽敏, 杨 辉, 毛晓华, 等. 航天某载荷光学元件产品保证工作研究 [J]. 载人航天, 2023, 29 (6): 817 - 823.
- [5] WU X, HE W, WANG Q, et al. A long-endurance flap-ping-wing robot based on mass distribution and energy consumption method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70 (8): 8215 - 8224.
- [6] WU C, LIU Y, XUE Y, et al. The comprehensive effect of electronic irradiation and thermal cycling on the thermal and mechanical properties of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu solder joints [J]. Journal of Electronic Materials, 2024, 53 (9): 5534 - 5545.
- [7] CALDERON M A N, OH S, BRESCIA J R, et al. Multi-Chiplet implementation of a replaceable integrated chiplet (PINCH) assembly [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14 (3): 529 - 532.
- [8] NAKAYAMA K, HIKIDA T, SUZUKI H. In-Plane orientational control of electronic components using pattern complementarity in a self-assembling system [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2023, 32 (5): 454 - 460.
- [9] ZHOU X, LIAO P C. Brain-regulated learning for classifying on-site hazards with small datasets [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2024, 39 (3): 458 - 472.
- [10] 曾 耀, 高法钦. 基于改进 YOLOv5 的电子元件表面缺陷检测算法 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2023, 57 (3): 455 - 465.
- [11] TAATALI A, SADAUI S E, LOUAR M A, et al. On-machine dimensional inspection: machine vision-based approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131 (1): 393 - 407.
- [12] 高 昕, 甄国涌, 储成群, 等. 基于改进 Canny 算子的齿轮边缘缺陷检测方法 [J]. 工具技术, 2024, 58 (9): 145 - 151.
- [13] GUO J, YANG Y, XIONG X, et al. Brake disc positioning and defect detection method based on improved Canny operator [J]. IET Image Processing, 2024, 18 (5): 1283 - 1295.
- [14] 韩雨轩, 高 银, 李琦铭, 等. 基于方向自适应相对高斯引导的图像纹理滤波 [J]. 计算机工程与设计, 2024, 45 (10): 3002 - 3009.
- [15] 邹群艳, 孙小迎. 加权平台直方图均衡化的低照图像增强 [J]. 光电子·激光, 2024, 35 (8): 810 - 816.
- [16] TAO N. Enhanced canny algorithm for image edge detection in print quality assessment [J]. Traitement Du Signal, 2023, 40 (3): 1281 - 1287.
- [17] NING G. Two-dimensional Otsu multi-threshold image segmentation based on hybrid whale optimization algorithm [J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 82 (10): 15007 - 15026.
- [18] CHEN C, KONG H, WU B. Edge detection of remote sensing image based on Grünwald-Letnikov fractional difference and Otsu threshold [J]. Electronic Research Archive, 2023, 31 (3): 1287 - 1302.
- [19] LI Y, GAN X. An integrated fast Hough transform for multidimensional data [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2023, 45 (9): 11365 - 11373.
- [20] NIETO J J. Fractional Euler numbers and generalized proportional fractional logistic differential equation [J]. Fractional Calculus and Applied Analysis, 2022, 25 (3): 876 - 886.
- [21] KIM M I N S O O. Kummer-type congruences for the higher order euler numbers and polynomials [J]. Journal of applied mathematics & informatics, 2022, 40 (5): 1003 - 1019.
- [22] 沈媛媛, 张燕明, 沈燕飞. 基于视觉的人体动作质量评价研究综述 [J]. 自动化学报, 2025, 51 (2): 404 - 426.
- [23] GHARAIBEH M A. A numerical investigation on the influence of full vs perimeter arrays on the mechanical reliability of electronic assemblies under vibration [J]. Microelectronics International, 2024, 41 (3): 121 - 129.
- [24] LI P. Quantum implementation of the classical Canny edge detector [J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81 (8): 11665 - 11694.
- [25] 符前坤, 李 强, 冉文榮, 等. 基于图像处理和机器学习的 PE 管道缺陷检测 [J]. 现代电子技术, 2024, 47 (21): 59 - 66.
- [26] 李雪原, 陈 品, 陈 剑, 等. 基于 HOG 图像处理的滚动轴承故障诊断方法 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2024, 47 (3): 309 - 316.