



# 基于机器视觉的 PCB 板表面缺陷检测方法研究进展

董静毅, 吕文涛, 包晓敏, 骆淑云, 王成群, 徐伟强

(浙江理工大学信息学院, 杭州 310018)

**摘要:** 基于机器视觉的缺陷检测方法可有效提高生产效率和降低质检成本, 在现代化工业生产中得到了广泛应用。对基于机器视觉的 PCB 板表面缺陷检测方法涉及的图像采集系统、图像预处理技术进行综述; 对基于图像分割、特征提取、机器学习和混合技术的检测算法进行分析, 总结了各种算法的主要思想、适用范围以及局限性; 同时对未来的发展方向进行了展望, 为该领域的研究人员提供参考。机器视觉作为现代工业生产中一项不可或缺的关键技术, 在 PCB 板缺陷检测领域仍有较大的发展空间, 尤其是进一步智能化, 仍有待深入研究。

**关键词:** 机器视觉; PCB 板; 缺陷检测; 表面缺陷; 图像预处理; 机器学习

**中图分类号:** TP391.41; TN911.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2021) 05-0379-11

## Research progress of the PCB surface defect detection method based on machine vision

DONG Jingyi, LÜ Wentao, BAO Xiaomin, LUO Shuyun, WANG Chengqun, XU Weiqiang

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Defect detection methods based on machine vision can effectively improve production efficiency and reduce the costs of quality inspection, so they have been widely applied in modern industrial production. This article introduces the image acquisition system and image preprocessing technology involved in the PCB surface defect detection method based on machine vision, analyzes detection algorithms based on image segmentation, feature extraction, machine learning and hybrid technology, summarizes the main ideas, application scopes and limitations of all kinds of algorithms, prospects the future direction, which can offer a reference for researchers in this field. Machine vision, as an essential key technology in modern industrial production, still has much room for development in the field of PCB defect detection. In particular, further intelligence needs to be studied in depth.

**Key words:** machine vision; PCB; defect detection; surface defect; image preprocessing; machine learning

## 0 引言

印刷电路板(Printed circuit board, PCB)作为电子产品不可或缺的组成部分,其市场需求量与日俱增,也给相应的生产制造企业带来了新的挑战。现代电子设备的质量不仅取决于电子元件的质量和性能,

而且很大程度上取决于 PCB 的质量<sup>[1]</sup>。而 PCB 的表面缺陷在很大程度上反映了 PCB 的质量<sup>[2]</sup>,因此对 PCB 板的进行表面缺陷检测非常重要,典型的 PCB 板如图 1 所示,分成裸露和组装两大类。传统的人工目视检测(Manual visual inspection, MVI)方法,受工人情绪波动、视觉疲劳等因素的影响很大,检测效率

收稿日期:2020-11-20 网络出版日期:2021-02-04

基金项目:国家自然科学基金项目(U1709219, 61601410);浙江省重点研发计划项目(2018C02027, 2018C01093);浙江理工大学青年创新专项基金项目(2019Q040)

作者简介:董静毅(1996—),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事机器学习、图像处理方面的研究。

通信作者:吕文涛, E-mail: alvinlwt@zstu.edu.cn

低,速度慢,人力成本高,且检测信息不易集成。线上仪器检测(In-circuit test, ICT)方法,存在测试点设置难度大、测试夹工具制造成本高、调试时间长等不足,较难满足现代工业生产、质检需求。机器视觉技术是一种非接触式的自动化检测技术,是实现精密调控和智慧工厂的有效手段,并具有安全可靠、可在多种环境下长时间作业等优点<sup>[3]</sup>。相较于人工目视检测和线上仪器检测方法,基于机器视觉的检测方法不仅能够有效克服人工目视检测和线上仪器检测的弊端,同时还提升了生产效率以及质检效率,为企业带来更大的利润空间。因此,基于机器视觉的 PCB 板缺陷检测技术,得到较为广泛研究。

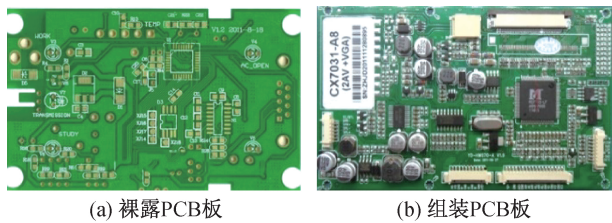


图 1 典型的 PCB 板图像

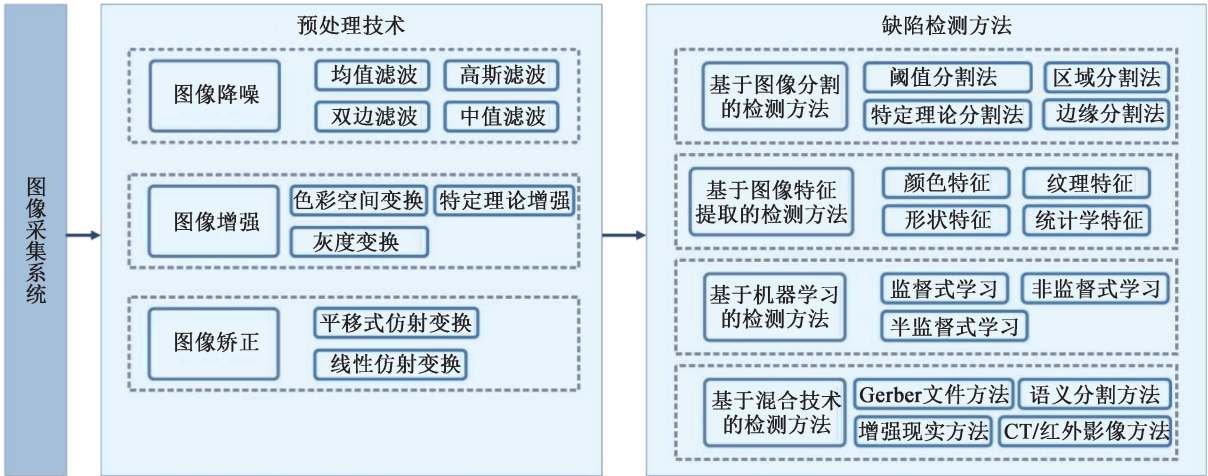


图 2 整体研究框架

1 图像采集系统

图像采集系统作为视觉检测系统的重要部分,通常由光源、工业相机、计算机等组成,另外包括一些辅助设备<sup>[1,3]</sup>,例如光源固定支架、传送装置等,基本结构示意图如图 3 所示。在视觉检测方法中,图像采集系统的照明方案设计、成像方式、相机选型等均对成像结果有着重要的影响,一定程度上决定了预处理方案和检测算法的设计。

1.1 照明系统

光源作为决定成像质量的重要因素,其光照强度、照明方式等都直接影响获取图像的清晰度,以及

早期的机器视觉技术,可以满足较低工业需求,但仍然存在以下问题:a)对于缺陷种类繁多、形态多样的 PCB 板,检测精度较低;b)检测结果受光源条件和光学成像设备影响较大;c)检测的实时性、准确性以及鲁棒性与实际应用需求还存在差距<sup>[1,4]</sup>。

早期的机器视觉检测方法无法有效解决上述问题,因此众多学者使用改进阈值分割、改进特征提取、机器学习等方法来解决这些问题。同时,在机器视觉检测中由于图像采集系统导致的图像光线分布不均、目标范围不清晰,会降低检测精度,因此需要调整和改进图像预处理方式,以提高整体检测效率。论文的整体研究框架如图 2 所示,首先对机器视觉技术中的图像采集系统进行简要介绍,然后通过对近几年基于机器视觉的 PCB 板表面缺陷检测的主要研究成果的梳理,系统分析、对比相关的预处理技术和检测算法,最后总结了目前 PCB 板表面缺陷检测方法存在的不足,并展望了该领域的发展方向,为该领域研究人员提供参考。

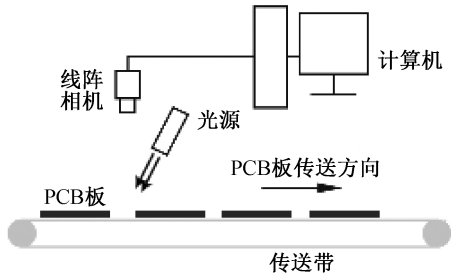


图 3 图像采集装置基本结构示意图

后续图像预处理方案和缺陷检测算法的设计。为了获取更高质量的 PCB 图像,选择合适的光源、设计合理的照明方案是必要且重要的。

a)光源设置。在机器视觉检测系统中,不同的

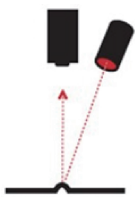
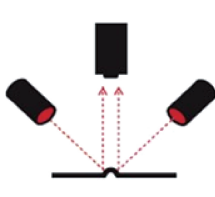
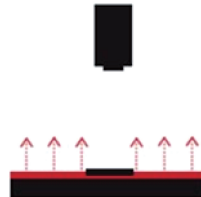
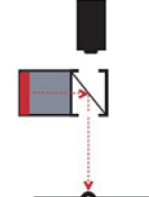

光源有不同的特性和优缺点，在选取是应考虑应用场景、光源的照明强度、光照均匀性以及光源热效应和使用寿命等，常见的光源性能参数如表 1<sup>[4]</sup>所示。

表 1 几种常见光源性能参数

光源类别	显色指数 Ra	光源寿命/h	表面亮度	受电压变化影响程度	受环境温度变化影响程度	频闪效应	特点
白炽灯	95~99	1000	大	大	小	不明显	成本低
光纤光源	95~99	5000~7000	大	大	小	不明显	发热多,持续光
LED 光源	70~90	6~10 万	较大	大	较小	明显	响应快,发热少,形状多样
普通荧光灯	70~80	1 万	小	较大	大	明显	成本低
高频无极灯	75~85	4~8 万	较大	较大	较小	不明显	发热多,持续光

b)照明方案。高性能的视觉检测系统,除选择合适的​​光源外,根据光源设计合理的照明方案也同样重要。设计合理的照明方案目的在于增加图像对比度、抑制外部干扰,使得图像中的目标区域与图像背景易于分离,提高检测效率。常见的照明方案主要有明场法、暗场法、背光法、同轴法以及漫射法。各种照明方案的光源设置和特点<sup>[4-5]</sup>汇总如表 2 所示。

表 2 常见照明方案光路图及其照明特点汇总

照明方法	明场法	暗场法	背光法	同轴法	漫射法
光路图					
照明特点	光线直接照射待测目标,得到高对比度图像。	突显待测物表面突起或表面纹理变化。	光源在待测目标的背面,得到强对比度图像,但损失表征信息。	减少环境阴影的影响,常用于高反光目标物检测。	减少小面积阴影及镜面反射。

1.2 成像模块

成像模块作为图像采集系统的重要部分,其主要由镜头、相机、数据采集卡构成,用于采集检测图像。其中,工业相机是最重要的部分,相机的选择直接影响成像效率与成像质量。工业相机又分为面阵相机和线阵相机,但由于面阵相机易出现图像部分交叠,因此在工业生产中常采用线阵相机构建图像采集系统。其中,相机的像素分辨率是工业相机选择的重要依据,通常是根据待测目标物的最小缺陷特征进行选择。

2 预处理技术

图像信息的完整性直接影响 PCB 板缺陷检测的精度和准确度。为了弥补图像采集系统中,因光源条件、光学成像设备、传输条件等客观因素所造成的不利影响,同时增强图像信息,提高图像可分析性和可理解性,进一步提高后续检测算法的性能,因此在前期都需要对原始图像进行预处理。其主要目的在于消除图像中的无关信息、恢复和增强有关信息以及最大限度地简化数据以提高识别和检测效率。

图像预处理技术一般包括图像去噪、图像增强、图像矫正等。

2.1 图像降噪

图像降噪的目的,主要是消除因不可避免的因素所造成的图像噪声,从而提高对图像分析和理解的能力,增加检测的效率和精度。图像降噪的算法种类繁多,常用的 PCB 图像降噪算法有均值滤波、高斯滤波、中值滤波以及双边滤波等技术。

a)均值滤波。该方法是典型的线性滤波算法,其核心思想是在空域中利用卷积模板将图像灰度值平均化,以达到平滑图像的作用。Lu 等<sup>[6]</sup>采用该种方式对 PCB 板图像进行降噪处理,有效去除了待测 PCB 板图像噪声。

b)高斯滤波。该方法是将图像与服从正态分布的卷积核进行卷积运算,从而去除噪声得到平滑图像<sup>[7-10]</sup>。Huang 等<sup>[8]</sup>对高斯滤波器进行改进,采用三级加权矩阵高斯滤波器进行图像的预处理,可以有效滤除图像的高斯噪声,但图像细节有所损失。Chaudhary 等<sup>[9]</sup>采用高斯低通滤波器对图像进行处理,从而达到良好的降噪效果,同时保留完整的边缘

信息。

c)双边滤波。该方法是结合图像的空间邻近度和像素相似性,对图像进行降噪处理。Ma<sup>[11]</sup>采用该方法进行对 PCB 板进行降噪处理,有效去除了图像噪声,并较好保留了边缘信息,从而提高了整体检测效率。

d)中值滤波。该方法是用像素点邻域灰度值的中值,来代替该像素点的灰度值,以使其周围的像素值接近真实值,从而去除孤立的噪点<sup>[9,12-13]</sup>。

除了上述常用的图像降噪技术外,还有部分降噪技术也被应用在 PCB 板检测的预处理中,例如有同态滤波<sup>[12]</sup>、形态学滤波<sup>[14]</sup>、小波去噪<sup>[15]</sup>以及姜伟等<sup>[16]</sup>提出的基于 L1-L2 范数的正则项的降噪模型。

2.2 图像增强

图像增强的目的在于提高图像信息的可读取性,增强兴趣区域(Region of interest, ROI)和非兴趣区域的可分离性,增强缺陷判别效果。通常采用色彩空间变换、灰度变换增强以及特定理论增强等方式进行图像增强处理。

2.2.1 色彩空间变换增强

色彩空间是使用数值来描述颜色的抽象数学模型。RGB 图像是最常见的数字图像应用类型。但由于 RGB 色彩空间是根据人的视力所能感知的颜色范围定义的,所以不能很好的分离出特定领域所关注的色相、饱和度以及亮度等信息。因此,一般会采用转换色彩空间的方式对图像进行处理,以此突出有效信息。

a)HSV 空间。HSV 色彩空间是根据颜色的直观特性创建的六角锥体式的色彩模型,通用色调(H)、饱和度(S)、亮度(V)对色彩进行表示。Huang 等<sup>[8]</sup>、Li 等<sup>[17]</sup>使用 HSV 色彩空间对 PCB 板图像进行增强,较好地屏蔽了光源对图像的影响。

b)YUV 空间。YUV 色彩空间通常用于优化彩色视频信号的传输,其亮度(Y)信息和色度(UV)信息分离,以此用于图像增强。Baygin 等<sup>[10]</sup>使用该方法对 PCB 板图像进行增强处理,将 PCB 板的亮度信息和色度信息有效分离,从而屏蔽光源噪声。

c)Lab 空间。Lab 色彩空间具有较大的色域,在 Lab 模式下对亮度做任何锐化、平滑等操作对色相不会造成影响。而且 Lab 位图还具有更高的精度,因此可以获取更精确的数据进行图像的分析与理解。文献[11,17-18]均使用了该方法对 PCB 板图像进行增强处理,便于后期亮度锐化突出缺陷区域。

2.2.2 灰度变换增强

灰度变换为图像的点运算,通过改变单个像素的灰度值,对图像进行增强。灰度变换增强的方式较多,其中直方图增强技术是最常见的增强方法。此类方法是通过改变图像的灰度分布范围,对原始图像进行增强。其中包括直方图均衡化、直方图规则化、自适应均衡化等。Ma 等<sup>[11]</sup>采用灰度直方图技术进行 PCB 板图像的增强,从而突出边缘信息, Kim 等<sup>[19]</sup>则采用局部直方图拉伸的方法进行图像增强,使得局部图像对比度增加,便于缺陷检测。而 Zhu 等<sup>[15]</sup>则是采用直方图均衡化的方式,通过增加像素灰度值的动态方位,增强 PCB 板图像的整体对比度。

2.2.3 特定理论增强

由于在复杂光源环境下,上述图像增强方式的性能受到抑制。基于此,部分学者通过采用特殊的理论算法对 PCB 板图像,进行增强处理。其中, Li 等<sup>[20]</sup>采用了多尺度 Retinex(Multiple scale retinex, MSR)方法对 PCB 板图像进行增强。该方法的主要理论依据是物体的颜色是由物体对光线中各种频率波的反射能力所决定的。因此,通过监测动态范围压缩的平衡、边缘增强以及色彩恒常等指标,该方法可以对 PCB 板图像的增强效果进行有效评估。

2.3 图像矫正

由于机械控制、光学成像及其他硬件设备对原始图像会造成影响,除引入噪声以外,还会造成成像畸变等。因此,畸变矫正技术,在 PCB 板图像的预处理中,得到广泛的应用。Huang 等<sup>[8]</sup>使用平移式仿射变换补偿进行水平矫正,从而消除由图像采集系统导致的图像畸变,进一步提高检测效率。文献[21-22]采用线性仿射变换进行图像的校正,更加灵活地对图像进行校正。

综上,图像预处理技术在 PCB 板图像缺陷检测中起着重要的作用,不仅在一定程度上提高图像的可分析性和可理解性,也提高了检测效率。表 3 列出了各种图像预处理方法的优缺点。

3 缺陷检测方法

目前,基于机器视觉的 PCB 板缺陷检测方法,主要可分为参考法<sup>[7,9-12]</sup>、非参考法<sup>[19-20]</sup>以及混合法<sup>[8]</sup>三大类,其中:参考法是通过对比测试图像与参考图像的特征进行缺陷检测,常用在基于图像分割的检测方法;非参考法是根据预先制定的规则进行缺陷检测,常用在基于机器学习的检测方法;混合法



表 3 图像预处理方法的优缺点

方法	相关算法	优点	缺点	相关文献
图像降噪	均值滤波	抑制噪声效果良好,适用多数场景	只减弱噪声,信息损失	[6]
	高斯滤波	有效抑制高斯噪声,通用性好、性能高	像素移位,破坏细节	[7-10]
	中值滤波	有效抑制椒盐噪声,特征信息保留良好	不能处理高斯噪声	[9,12-13]
	双边滤波	抑制噪声效果良好,保留边缘特征信息	性能较差	[11]
	小波去噪	低熵性、灵活度高,降噪性能好	计算量较大,运算时间长	[15]
	L1-L2 正则项滤波	性能高,降噪效果好	计算量大,运算时间长	[16]
图像增强	转换色彩空间	便于分离亮度、色调、饱和度,屏蔽光源影响	—	[8,10-11,17-18]
	灰度变换增强	改善图像质量,能抑制噪声	—	[11,15,19]
	MSR 算法	保持图像高保真度,图像动态范围压缩	—	[20]
图像矫正	仿射变换	一定程度上校正变形图像	算法适用范围小	[8,21-22]

是将参考法和非参考法相结合,通过综合两者特点进行缺陷检测,常用在基于图像特征提取的检测方法。本节将通过上述三大类缺陷检测方法,对 PCB 板的缺陷检测方法进行归类总结。

3.1 基于图像分割的检测方法

图像分割是根据图像的灰度、颜色、纹理、形态将其分割为若干个不交叠的区域,并从中提取 ROI。PCB 板图像分割的方法主要包括:阈值分割法、边缘分割法、区域分割法、特定理论分割法<sup>[17]</sup>。本节将对上述分割方法进行详细介绍。

3.1.1 基于阈值分割方法的 PCB 板缺陷检测

阈值分割是基于灰度值的图像分割技术,主要通过图像灰度级的划分,将目标及背景进行分离。常用的算法有自适应阈值分割法、全局阈值分割法、多阈值分割法等。此类方法实现简单、计算量小、鲁棒性好,在 PCB 板缺陷检测的精度和准确度上,获取较好结果。自适应阈值分割方法,是通过不同区域的亮度分布,来进行图像分割的方法。Ardhy 等<sup>[23]</sup>使用自适应高斯阈值分割算法进行 PCB 板缺陷检测,该方法计算量小,计算速度快,但却受光源影响较大。因此,Luo 等<sup>[24]</sup>通过自适应启发式阈值分割结合亥姆霍兹(Helmholtz)原理进行缺陷检测,在一定程度上解决了检测结果受光影变化影响的问题,但对于光影变化较大的图像和色彩差异较小的图像,检测效果受到抑制。为了解决此类方法受光源影响较大的问题,Raihan 等<sup>[7]</sup>提出通过多阈值分割的方式进行缺陷检测,来屏蔽光源对检测的影响,但其检测精度受图像分辨率影响。因此,Zhang 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于自适应迭代阈值选择算法的有效边缘缺陷信息检测方法。Chaudhary 等<sup>[9]</sup>则采用直方图阈值化分割与数学形态学运算相结合的方法进行检测。而针对组装 PCB 板,Li 等<sup>[25]</sup>则是先利用二次匹配误差算法和阈值分割检

测可能的缺陷点,再结合掩模操作和统计直方图等信息,最后确定缺陷区域。该方法不仅增强元件的极性识别能力,还提高了对错误的材料和缺失的元件进行识别的能力。上述方法克服了光源较小变化带来的问题,但在强光环境下,算法检测精度下降。基于此,Nahar 等<sup>[26]</sup>提出了全局阈值分割的检测方式,提高了强光环境下的 PCB 板缺陷检测性能。

3.1.2 基于边缘分割方法的缺陷检测

边缘分割法是通过搜索不同区域之间的边界信息,以实现目标的检测。该方法受光源和目标颜色差异的影响较小,对边界特性强的目标检测,效果尤为突出。Kumar 等<sup>[27]</sup>在 PCB 板的铜件检测部分,采用了边缘分割法进行缺陷检测。Baygin 等<sup>[10]</sup>则采用 Canny 算子与 Hough 变换相结合的方式,进行缺陷图像的分割,有效地提高了 PCB 板的覆铜圆孔检测效率,Luo 等<sup>[28]</sup>提出使用基于三级阈值轮廓提取的快速圆检测方法,以此检测柔性 PCB 板表面的圆孔缺陷<sup>[29]</sup>。

3.1.3 基于区域分割方法的缺陷检测

区域分割方法是直接对区域进行分割的技术。主要包括区域生长算法和区域分裂合并算法。该类算法是通过相邻像素所具有的强度、灰度级以及纹理特征等属性的相似度,进行缺陷判断,降低了对检测图像分辨率要求。Ma 等<sup>[11]</sup>在区域生长算法的基础上,提出改进方案来获得真实缺陷区域范围,进而提高缺陷检测的精度和准确率。

3.1.4 基于特定理论分割的缺陷检测

为了弥补传统图像分割算法的缺陷,部分学者通过结合视频处理、机器学习等相关理论技术,提出相关复合模型对 PCB 板缺陷进行有效检测。Cai 等<sup>[30]</sup>提出的基于 ViBe 算法的焊点检测方法该方法将缺陷焊点视为移动物体,通过改进 ViBe 算法分离前景与背景,进而检测出缺陷点。Melnyk 等<sup>[31]</sup>

则采用泛洪(Flood-Fill)算法对图像进行缺陷检测。Li等<sup>[17]</sup>将空间模糊 C-Means 的方法运用到图像分割中,通过改进的空间模糊 C-Means 算法进行焊盘缺陷检测。

### 3.2 基于图像特征提取的检测方法

#### 3.2.1 基于颜色特征方法的缺陷检测

颜色特征是描述 PCB 板图像区域所对应物体表面信息的特征。由于颜色特征对图像的方向、大小等变化不敏感,因此常作为特征点,用于图像的分析与理解。Xue等<sup>[32]</sup>通过颜色特征对 PCB 板缺陷点进行定位、检测。Kumar等<sup>[27]</sup>在 PCB 板的非铜件检测部分,如电阻、瓷片电容等,使用 3D 非均匀颜色直方图进行缺陷检测,取得了较好的检测结果。但因为颜色易受光源变化的影响,使得该类方法的适用范围较小。

#### 3.2.2 基于纹理特征方法的缺陷检测

纹理特征是一种全局特征,用于描述图像中物体的表面性质。此类特征具有旋转不变性,且对噪声鲁棒,因此常用于 PCB 板的缺陷检测。该类特征的提取算法主要包括:局部二值图(Local binary picture, LBP)方法、局部傅里叶变换法、局部灰度统计法。其中, LBP 是一种局部纹理特征描述符,用于描述图像中每个像素与周围像素之间的特征关系。Lu等<sup>[6]</sup>对 LBP 进行改进,提出一种块均匀 LBP 的方法进行缺陷检测,其检测效果明显优于传统 LBP 算法。由于光照、物体光反射等情况的影响,图像反映的纹理特征与真实物体的纹理特征会存在一定的差距,因此, Tsai等<sup>[33]</sup>提出了一种傅立叶图像重建方案,进行 PCB 板缺陷检测。Du等<sup>[34]</sup>将一维傅里叶图像用于柔性 PCB 板缺陷检测。受此启发, Zhang等<sup>[21]</sup>提出基于灰度直方图特征与几何特征相结合的方案,用于复杂的组装 PCB 板的缺陷检测,效果较为鲁棒。

#### 3.2.3 基于形状特征方法的缺陷检测

形状特征,不仅可以快速定位图像中 ROI 区域,并且检测效率较高。此类方法能够快速提取图像中具鲁棒性的特征,并通过特征匹配关系建立两个图像之间的配准映射,从而识别出缺陷区域。常用的形状特征有:尺度不变特征变换(Scale invariant feature transformation, SIFT)角点、HOG 特征、Haar 特征等。Szymanski等<sup>[35]</sup>采用 SIFT 特征进行缺陷检测。但由于 SIFT 算法实时性不高, Dai等<sup>[36]</sup>利用 SIFT 特征与粒子全优化算法相结合,提出一种改进的 SIFT-PSO 图像算法,有效的增

加关键点的数量进而提高 PCB 板缺陷检测精度。Zhang等<sup>[37]</sup>提出了一种两步级联放大的缺陷检测方案,通过两步级联的方式来改善 SIFT 实时性差的缺陷。Hua等<sup>[38]</sup>则采用特征跟踪角检测器和 SURF 描述符进行图像特征的提取,解决了 Harris 拐角检测中拐角信息丢失、位置偏移等问题,进而提高 PCB 板缺陷检测效率和检测精度。基于形状特征的检测方法也同样适用于柔性 PCB 板。如苑玮琦等<sup>[39]</sup>利用几何特征在柔性 PCB 板进行走线凸起缺陷检测,有效地屏蔽噪声干扰,对柔性 PCB 板凸起的走线进行有效检测。

#### 3.2.4 基于统计学特征方法的缺陷检测

统计学特征是通过数理统计的研究方法,对图像中的像素分布规律进行描述。主要包括互相关、图像矩、信息熵等。Zhang等<sup>[40]</sup>采用基于区域的归一化互相关(RB-NCC)算法进行 IC 芯片焊点的缺陷检测,但该方法对图像或目标的旋转、反转、尺度变化等比较敏感。因此 Annaby等<sup>[41]</sup>采用改进的归一化互相关算法(INCC)对转化后的一维数据进行计算,以此检测 IC 芯片的缺陷位置。针对裸露 PCB 板的缺陷检测,李云峰等<sup>[42]</sup>则提出通过分析缺陷区域边界像素的梯度信息熵,进行 PCB 板的缺陷检测,但复杂的板面裂缝会影响信息熵的值。Gaidhane等<sup>[13]</sup>提出有效的相似度测量方法,用于 PCB 表面缺陷检测。其优点是无须计算图像特征即可进行场景图像与 PCB 表面参考图像之间的相似度测量,使用对称矩阵的秩作为缺陷检测的相似性度量。

### 3.3 基于机器学习的检测方法

#### 3.3.1 基于监督式学习方法的缺陷检测

监督式学习方法,是通过训练资料的学习结果,以此建立数学模型。由于检测准确率高,鲁棒性好以及泛化能力强等优点,该方法在 PCB 板缺陷检测中,取得较好的结果。

作为最常见的机器学习算法之一,人工神经网络由于分类准确度高、分布能力强并且有较强的鲁棒性和容错性,因此被大量的应用在 PCB 板缺陷检测领域。Li等<sup>[20]</sup>利用 MSR 算法对黑白工业相机获得的图像进行处理,再通过 BP 神经网络分类器构建缺陷检测模型。同样作为前馈网络的卷积神经网络在文献[19, 43-44]的 PCB 板缺陷检测中均得到应用。但由于卷积神经网络和 BP 神经网络均没有记忆功能,其网络结构的全连接模式导致整体计算效率低下,并且对特征理解力不高。

相较于传统的机器学习方法,基于深度学习的检测算法能更有效地利用数据信息,并且学习能力更强,算法更鲁棒<sup>[45]</sup>。Zhang 等<sup>[46]</sup>以 VGG-16 为基础模型进行深度学习,建立 PCB 板缺陷检测模型。Ghosh 等<sup>[47]</sup>提出一种迁移学习的方法,从训练的 Inception-V3 网络的中间层,提取 PCB 图像的中级表示,来训练自适应网络,从而进行缺陷检测。由于学习过程需要大量的训练数据,导致训练时间过长,因此 Jang 等<sup>[48]</sup>使用缺陷概率图像(DPI)和深度卷积神经网络 CNN 的缺陷检测技术(VGG16-DPI),提高检测效率,实现轻量化数据集。Xia 等<sup>[49]</sup>也提出了一种 SSIM-NET 的新型 PCB 缺陷检测器,其主要思想是根据结构相似性指数(Structural similarity index measuring,SSIM)代替形态算子查找可疑区域,并通过轻量级 MobileNet-V3 进行缺陷检测。Silva 等<sup>[50]</sup>应用 Deep PCB 数据集,评估了在 VGG-16 模型和 ResNet50 模型下通过转移学习策略的检测情况,虽然检测准确率相对较高,但对于微小 PCB 板缺陷的检测,存在漏检。因此 Ding 等<sup>[51]</sup>提出一种微小的缺陷检测网络(TDD-Net),以提高 PCB 缺陷检测的性能。Hu 等<sup>[52]</sup>提出了一种基于 Faster R-CNN 的特征金字塔网络(ResNet50),以更好地检测微小缺陷。Wu 等<sup>[53]</sup>提出基于最新的遮罩区域 Mask 卷积神经网络的 R-CNN 学习方法,对 PCB 板焊点进行检测,取得较高的检测精度。Tsai 等<sup>[54]</sup>基于 CNN 的模型并结合支持向量回归(SVR)进行 PCB 检测。Li 等<sup>[55]</sup>采用 YOLOv2 进行缺陷检测,其优点是具有更快的检测速度。

### 3.3.2 基于无监督式学习方法的缺陷检测

无监督式学习方法是一种无须对训练样本进行标记,直接通过计算机进行学习分类的方式,通常只需要无缺陷样本进行网络训练,也被称为 one-class learning<sup>[56]</sup>。主要优点是,该方法能够有效的解决缺乏先验知识、目标物难以人工标注或者人工标注成本过高等问题。Cai 等<sup>[57]</sup>提出一种基于稳健的主成分分析(RPCA)的焊点检测方法。Tsai 等<sup>[58]</sup>则提出一种适用期望最大化(EM)技术,进行快速图像配准,以此完成 PCB 板缺陷的自动检测。其主要思想是通过将权重分配给各个边缘点,将相关的边缘点赋予大权重,不相关的边缘点赋予小权重,最后通过计算各个图像中加权边缘的几何变换参数,以此找到两幅图像的共同边缘点,可以很好地处理变形或者缺失图像。Volkau 等<sup>[59]</sup>提出了一种转移学习的变体,即通过在 VGG-16 上使用的无监督学

习,同时在 ImageNet 权系数上预先训练的复合构建检测模型。

### 3.3.3 基于半监督式学习方法的缺陷检测

半监督式学习方法,是介于监督式学习和非监督式学习之间的一种方法。该类方法省去了监督式学习方法的大量数据标记,同时减少了无监督学习方法的不可控性,拥有了监督式学习的检测精度和无监督式学习的灵活度。Hsu 等<sup>[60]</sup>提出一种可用于辅助不同半导体制造领域中的缺陷检查方法。创新的提出了 OHL-Net 机器学习技术的概念,而 OHL-Net 的主要思想,是使用少量的学习参数以有效的计算成本,以节能的方式完成缺陷分类工作。而检测结果的准确性同其他 CNN 相比,具有相当好的竞争力。

### 3.4 基于混合技术的缺陷检测方法

相比单一技术的 PCB 板缺陷检测方法,融合多种方式、多种技术的检测手段,可以获取更好的检测效果。乔闹生<sup>[61]</sup>使用改进的间距最大距离的阈值分割方法对图像进行分割,再计算 HOG 特征,最终确定裸露 PCB 板缺陷边缘,其准确度远高于单一 HOG 特征检测方式。Huang 等<sup>[8]</sup>采用的 Gerber 文件和 Hough 变换相结合的方法,对焊点缺陷进行检测。检测结果精度高,且检测速度大幅提升。Li 等<sup>[62]</sup>将语义分割技术运用到 PCB 板缺陷检测中,提出一种基于假设检验策略的柔性印刷电路板(Flexible printed circuit board,FPC)的缺陷检测,其主要思想通过语义判断算法,定义语义合理性概率计算模型 LRS,以此进行缺陷检测。

随着增强现实(Augmented Reality,AR)技术的发展,部分研究人员已经将该项技术融合到基于机器视觉的 PCB 板缺陷检测中。Runji 等<sup>[63]</sup>提出了一种基于增强现实的组装的 PCB(Printed circuit board assembly,PCBA)检查系统,部分研究学者将机器视觉检测系统中的 CCD 相机,置换为 X 光摄像机、红外热成像仪等成像设备,通过特殊图像进行 PCB 板的缺陷检测。文献<sup>[64-66]</sup>采用通过 X 光摄像机拍摄的 CT 影像对 PCB 板进行缺陷检测。陆向宁等<sup>[67]</sup>提出利用红外热成像技术,实现 PCB 板焊球缺陷的有效检测。El Belghiti Alaoui 等<sup>[68]</sup>使用红外热信号检测组装 PCB 板上的故障电容器。

综上,不同的算法针对不同的 PCB 板缺陷进行检测,其检测性能、检测精度以及检测方式的鲁棒性各有不同,表 4 中详细列出了这些算法的优缺点、适用范围以及相关研究文献。

表 4 缺陷检测算法优缺点汇总

方法	常见算法类型	优点	缺点	相关文献
基于图像分割的检测方法	自适应阈值分割	计算简单,检测速度快	准确性差,受光源影响大	[23-24]
	多阈值分割	适用复杂环境,有抗噪能力	精度不高,计算量大,检测速度慢	[7,9,12,25]
	全局阈值分割	适用较亮元件检测	计算量大,检测速度慢	[26]
	边缘分割	屏蔽光源影像,受目标颜色影响小	边缘性差的图像不适用	[10,27-29]
	区域生长方法	检测方法简单	耗时长	[11]
	ViBe 算法	检测精度高,鲁棒性好	—	[30]
	泛洪算法	计算简单,检测精度高	—	[31]
基于特征提取的检测方法	颜色特征	受图像形态影响小,快速检测有色目标	受光线影响大	[17,26]
	纹理特征	不受图像旋转影响,有效检测存在遮挡的目标物	受图像的分辨率影响较大	[6,21,33-34]
	形状特征	计算量小,鲁棒性好	受光源影响大,对噪声敏感	[35-39]
	统计学特征	抗噪性好,检测精度高	受图像分辨率影响较大	[13,40-42]
基于机器学习的检测方法	监督式学习	检测精度高,泛化能力好	对数据集的要求较高,训练时间长	[19-20,43-55]
	非监督式学习	无须图像标记	实时检测的准确度难以保证,难以适应	[56-59]
	半监督式学习	灵活度高	较多 PCB 板缺陷类型	[60]
	Gerber 文件方法	缺陷定位精准,计算速度较快	受图像形变影响较大	[8]
基于混合技术的检测方法	语义分割方法	精确度较高,鲁棒性好	计算量较大	[62]
	增强现实方法	便携性好	造价成本过高	[63]
	CT 影像方法	获取内部信息多	缺陷分割难度较大造价成本过高	[65-66]
	红外影像方法	检测深度信息	不易表面缺陷检测	[67-68]

4 结论与展望

本文介绍了图像采集系统,综述了 PCB 缺陷检测方法所涉及的图像降噪、图像增强、图像矫正等预处理技术,总结了 PCB 缺陷检测的一些主流方法,简要综述了基于图像分割的方法、基于特征提取的方法、基于机器学习的方法以及混合方法的 PCB 缺陷检测方法,并对这些方法的原理做了概括,分析了其优缺点与适用范围,得出以下结论:

- a)基于图像分割的检测方法,虽然计算简单,节约硬件设备成本,但受光源分布不均影响大,且运算效率较低,检测精度不高。
- b)基于图像特征提取的检测方法,在检测效率和检测精度上,略优于基于图像分割的检测方法,但仍未有效解决光源分布不均对其检测效率的影响。
- c)基于机器学习的检测方法,检测精度高,适用范围广,基本解决光源分布不均对检测结果的影响问题,尤其是其深度学习方法能够有效的提取图像深层特征,极大的降低了光源系统对检测结果的干扰,但此类方法计算量大,设备成本相较于基于图像分割的方法和基于特征提取的方法较高。
- d)基于混合技术的检测方法,可以有效解决图像采集系统导致的检测精度低等问题,同时为基于机器视觉的 PCB 板表面缺陷检测方法提供了新思路,但就目前研究成果来看,此类方法设备成本过

- 高,不适用于批量生产的相关检测任务。
- 根据本文对基于机器视觉的 PCB 板表面缺陷检测算法的整理、分类、归纳和分析,在此基础上,PCB 板表面缺陷检测方法需在以下几方面加快发展:
- a)现有多数工业采集系统,因为机械组件原因,部分 PCB 图像易受到光源不均影响,使得图像的光量信息分布不均。在已有的算法中,较少考虑光源分布不均对检测算法的影响。因此,基于机器学习的光强分布拟合技术,对于去除图像的点扩散效应有较大意义,是未来研究的方向之一。
  - b)Gerber 文件作为 PCB 板加工过程中机器识别的标准文件,准确地记录了 PCB 板的相关信息。将 Gerber 文件信息运用到机器视觉系统中,可以提高 PCB 板中兴趣区域的定位、查找,提高检测算法的准确度和效率。因此,结合 Gerber 文件的机器视觉检测系统,将是未来 PCB 板检测的重要发展方向之一。
  - c)基于立体视觉的三维几何信息重构技术,可以对 PCB 板进行更加鲁棒、高精度检测。因此,该技术在未来的 PCB 板缺陷检测算法研究中会得到更好发展。
  - d)由于热成像技术、高光谱技术以及 CT 图像技术,可以有效获取 PCB 板中内部缺陷信息,克服传统 CCD 相机仅获取目标表面信息的局限。因此,



与该类技术相结合的 PCB 板缺陷检测算法研究, 将会成为一大热点方向。

## 参考文献:

- [1] Tian X J, Zhao L, Dong H J. Application of image processing in the detection of printed circuit board[C]// 2014 IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications, Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2014: 157-159.
- [2] 姜楠, 张亮, 熊明月, 等. 电子封装无铅软钎焊技术研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(23): 3862-3875.
- [3] 汤勃, 孔建益, 伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(12): 1640-1663.
- [4] 尚会超, 杨锐, 段梦珍, 等. 机器视觉照明系统的关键技术分析[J]. 中原工学院学报, 2016, 27(3): 16-21.
- [5] 陈瑞, 岑松原, 金尚忠. 基于同步多曲面法的发光二极管机器视觉照明设计[J]. 光子学报, 2013, 42(8): 956-961.
- [6] Lu Z S, He Q Q, Xiang X G, et al. Defect detection of PCB based on Bayes feature fusion[J]. The Journal of Engineering, 2018(16): 1741-1745.
- [7] Raihan F, Ce W. PCB defect detection using Opencv with image subtraction method[C]// 2017 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech). Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2017: 204-209.
- [8] Huang C Y, Hong J H, Huang E. Developing a machine vision inspection system for electronics failure analysis [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(9): 1912-1925.
- [9] Chaudhary V, Dave I R, Upla K P. Automatic visual inspection of printed circuit board for defect detection and classification[C]// 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). Chennai, India: IEEE, 2017: 732-737.
- [10] Baygin M, Karakose M, Sarimaden A, et al. Machine vision based defect detection approach using image processing [C]// 2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP). Malatya, Turkey: IEEE, 2017: 1-5.
- [11] Ma J J. Defect detection and recognition of bare PCB based on computer vision[C]// 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, China: IEEE, 2017: 11023-11028.
- [12] Zhang F, Qiao N S, Li J F. A PCB photoelectric image edge information detection method[J]. Optik, 2017, 144: 642-646.
- [13] Gaidhane V H, Hote Y V, Singh V. An efficient similarity measure approach for PCB surface defect detection[J]. Pattern Analysis and Applications, 2018, 21(1): 277-289.
- [14] Wang S Y, Zhao Y, Wen L Y. PCB welding spot detection with image processing method based on automatic threshold image segmentation algorithm and mathematical morphology[J]. Circuit World, 2016, 42(3): 97-103.
- [15] Zhu J H, Wu A, Liu X P. Printed circuit board defect visual detection based on wavelet denoising[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 392: 062055.
- [16] 姜伟, 钟彩, 张观山. 基于 L1-L2 范数的正则项去噪模型的 PCB 图像去噪算法研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(2): 168-174.
- [17] Li M X, Wan Y J. Research on the solder joint image segmentation based on the improved spatial fuzzy C means algorithm [C]// 2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD). Changsha, China: IEEE, 2016: 1940-1944.
- [18] 张静, 叶玉堂, 谢煜, 等. 印刷电路板外观检测中光电图像的色差矫正方法[J]. 计量学报, 2015, 36(3): 238-241.
- [19] Kim Y G, Lim D U, Ryu J H, et al. SMD defect classification by convolution neural network and PCB image transform [C]// 2018 IEEE 3rd International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS). Kathmandu, Nepal: IEEE, 2018: 180-183.
- [20] Li X, Zeng Z H, Chen M, et al. A new method of resistor's color rings detection based on machine vision [C]// Chinese Automation Congress, Jinan, 2017: 241-245.
- [21] Zhang Z Q, Wang X D, Liu S, et al. An automatic recognition method for PCB visual defects[C]// 2018 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC). Xi'an, China: IEEE, 2018: 138-142.
- [22] Zhang L L, Jin Y Q, Yang X S, et al. Convolutional neural network-based multi-label classification of PCB defects[J]. The Journal of Engineering, 2018(16): 1612-1616.
- [23] Ardhy F, Hariadi F I. Development of SBC based machine-vision system for PCB board assembly automatic optical inspection[C]// 2016 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD). Bandung, Indonesia: IEEE, 2016: 386-393.
- [24] Luo J X, Chen X C, Hu Y M. A fast circle detection method based on threshold segmentation and validity check for FPC images[C]// 2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan, China: IEEE, 2017: 3214-3217.

- [25] Li R, Xue B, Zhao K, et al. PCB defect recognition and elimination based on secondary error and statistical histogram [C]// 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Limassol, Cyprus: IEEE, 2020: 1981-1984.
- [26] Nahar J A, Phadke A C. Computer aided system for inspection of assembled PCB[C]//2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS). Madurai, India: IEEE, 2019: 372-376.
- [27] Kumar S, Iwahori Y, Bhuyan M K. PCB defect classification using logical combination of segmented copper and non-copper part [C]//Proceedings of International Conference on Computer Vision and Image Processing. Advances in Intelligent Systems and Computing. Singapore: Springer, 2017, 459: 523-532.
- [28] Luo J X, Zou H, Chen X C, et al. A fast circle detection method based on a Tri-Class thresholding for high detail FPC images[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(4): 1327-1335.
- [29] 苑玮琦,李德健,李绍丽. 基于骨架的柔性变形 FPC 断路检测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4):996-1004.
- [30] Cai N, Lin J F, Ye Q, et al. A new IC solder joint inspection method for an automatic optical inspection system based on an improved visual background extraction algorithm [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016, 6(1): 161-172.
- [31] Melnyk R A, Kalychak Y I. Detection of defects in printed circuit boards by flood-fill algorithm and distributed cumulative histogram [C]// 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). Lviv, Ukraine: IEEE, 2018: 155-159.
- [32] Xue B, Sun C, Chu H H, et al. Method of electronic component location, grasping and inserting based on machine vision [C]// 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Limassol, Cyprus: IEEE, 2020: 1968-1971.
- [33] Tsai D M, Huang C K. Defect detection in electronic surfaces using template-based fourier image reconstruction[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(1): 163-172.
- [34] Du J, Chen F, Hu Y M. Automatic defect inspection of patterned FPC board based on 1-D Fourier reconstruction [C]// 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, China: IEEE, 2017: 10109-10112.
- [35] Szymanski C, Stemmer M R. Automated PCB inspection in small series production based on SIFT algorithm [C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Buzios, 2015: 594-599.
- [36] Dai L H, Guan Q, Liu H. Robust image registration of printed circuit boards using improved SIFT-PSO algorithm[J]. The Journal of Engineering, 2018(16): 1793-1797.
- [37] Zhang Z W, Wang H, Zhou S M, et al. A cascaded zoom-in method for defect detection of solder joints [C]// 2018 14th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP). Beijing, China: IEEE, 2018: 1081-1086.
- [38] Hua G L, Huang W P, Liu H. Accurate image registration method for PCB defects detection[J]. The Journal of Engineering, 2018(16): 1662-1667.
- [39] 苑玮琦,李德健,李绍丽. FPC 走线凸起缺陷检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 170-180.
- [40] Zhang B Y, Yang H, Yin Z P. A region-based normalized cross correlation algorithm for the vision-based positioning of elongated IC chips [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2015, 28(3): 345-352.
- [41] Annaby M H, Fouda Y M, Rushdi M A. Improved normalized cross-correlation for defect detection in printed-circuit boards [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2019, 32(2): 199-211.
- [42] 李云峰,李晟阳. 基于梯度方向信息熵的印刷电路板缺陷检测[J]. 中国机械工程, 2017, 28(6):695-701.
- [43] Wei P, Liu C, Liu M Y, et al. CNN-based reference comparison method for classifying bare PCB defects [J]. The Journal of Engineering, 2018(16): 1528-1533.
- [44] Cheong L K, Suandi S A, Rahman S. Defects and components recognition in printed circuit boards using convolutional neural network[M]//10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications. Singapore: Springer, 2019, 547: 75-81.
- [45] 卢荣胜,吴昂,张腾达,等.自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 23-58.
- [46] Zhang C, Shi W, Li X F, et al. Improved bare PCB defect detection approach based on deep feature learning[J]. The Journal of Engineering, 2018(16): 1415-1420.
- [47] Ghosh B, Bhuyan M K, Sasmal P, et al. Defect classification of printed circuit boards based on transfer learning[C]//2018 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON). Kolkata, India: IEEE, 2018: 245-248.
- [48] Jang C, Yun S Y, Hwang H, et al. A defect inspection

- method for machine vision using defect probability image with deep convolutional neural network[C]// Computer Vision ACCV 2018. Cham: Springer, 2019, 11361: 142-154.
- [49] Xia B X, Cao J B, Wang C. SSIM-NET: real-time PCB defect detection based on SSIM and MobileNet-V3 [C]// 2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM). Shanghai, China: IEEE, 2019: 756-759.
- [50] Silva L H D S, Azevedo G O D A, Fernandes B J T, et al. Automatic optical inspection for defective PCB detection using transfer learning [C]// 2019 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI). Guayaquil, Ecuador: IEEE, 2019: 1-6.
- [51] Ding R W, Dai L H, Li G P, et al. TDD-net: a tiny defect detection network for printed circuit boards[J]. CAAI Transactions on Intelligence Technology, 2019, 4(2): 110-116.
- [52] Hu B, Wang J H. Detection of PCB surface defects with improved Faster-RCNN and feature pyramid network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 108335-108345.
- [53] Wu H, Gao W B, Xu X R. Solder joint recognition using mask R-CNN method[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(3): 525-530.
- [54] Tsai D M, Chou Y H. Fast and precise positioning in PCBs using deep neural network regression[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7): 4692-4701.
- [55] Li Y T, Kuo P, Guo J N. Automatic industry PCB board DIP process defect detection with deep ensemble method [C]// 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Delft, Netherlands: IEEE, 2020: 453-459.
- [56] 陶显,侯伟,徐德.基于深度学习的表面缺陷检测方法综述[J/OL].自动化学报:1-19. (2020-08-19)[2020-11-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2109.TP.20200402.1101.002.html>.
- [57] Cai N, Zhou Y, Ye Q, et al. IC solder joint inspection via robust principle component analysis [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2017, 7(2): 300-309.
- [58] Tsai D M, Hsieh Y C. Machine vision-based positioning and inspection using expectation-maximization technique [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(11): 2858-2868.
- [59] Volkau I, Mujeeb A, Dai W T, et al. Detection defect in printed circuit boards using unsupervised feature extraction upon transfer learning [C]// 2019 International Conference on Cyberworlds (CW). Kyoto, Japan: IEEE, 2019: 101-108.
- [60] Hsu Y C, Kuo P Y, Huang W S. A novel feature-spanning machine learning technology for defect inspection [C]// 2019 14th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2019: 54-57.
- [61] 乔闹生.印制电路板缺陷图像边缘检测[J].光子学报, 2016, 45(4): 123-129.
- [62] Li D J, Li S L, Yuan W Q. Flexible printed circuit fracture detection based on hypothesis testing strategy [J]. IEEE Access, 2020, 8: 24457-24470.
- [63] Runji J M, Lin C Y. Automatic optical inspection aided augmented reality-based PCBA inspection: A development [C]// 2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT). Amman, Jordan: IEEE, 2019: 667-671.
- [64] Lau C S, Ye N, Takiar H. Realistic solder joint geometry integration with finite element analysis for reliability evaluation of printed circuit board assembly [C]// 2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2019: 1387-1395.
- [65] Ang T J, Foo C S. X-ray inspection methodology on QFN and BGA [C]// 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ). Kyoto, Japan: IEEE, 2019: 99-102.
- [66] Tsenev V. Methodology for analysis of defects in electronic assembly using Xray [C]// 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics - ET. Sozopol, Bulgaria: IEEE, 2018: 1-4.
- [67] 陆向宁,何贞志,胡宁宁,等.主动红外热成像焊球缺陷检测方法研究[J].机械工程学报, 2016, 52(10): 17-24.
- [68] El Belghiti Alaoui N, Tounsi P, Boyer A, et al. Detecting PCB assembly defects using infrared thermal signatures [C]// 2019 MIXDES-26th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Rzeszów, Poland: IEEE, 2019: 345-349.

(责任编辑:康 锋)