

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205253

基于自适应方向模板搜索的 FPC 走线薄浆检测^{*}

李德健 李绍丽 苑玮琦 曲津助
(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:本文薄浆是柔性印刷电路板(FPC)导电涂层的一种缺陷,为避免其对电路性能产生不良影响而造成经济损失,将薄浆位置检测出来进行修补或直接剔除板材均是合理的处理方式。然而由于薄浆缺陷尺寸不定、光照不均致使图像灰度分布不均匀、走线区域与背景纵横交错等问题,使得走线上薄浆的检测具有一定难度。针对该问题,在对薄浆纹理及 FPC 走线形态特征进行详细分析的基础上,提出了一种基于自适应方向模板(ADT)和灰度差分法的检测方案。首先,使用定义的 ADT 模板按照骨架跟踪流程对预处理所得图像的走线区域进行遍历,分别搜索相对于该 ADT 模板尺寸而定义的大、小尺度薄浆纹理的端部和全部候选像素,从而将预处理图像分割成若干小区域;然后,根据各小区域的能量倾向值与预设阈值的数值关系对其中的边缘噪声区域加以排除;最后,采用灰度差分法对上述两个步骤处理所得结果中的非缺陷区域进行再次筛查,从中提取出大尺度薄浆纹理的中间区域,至此实现全部薄浆纹理的检测。在自建图库 SUT-F2 上进行了测试,结果显示本文方法对薄浆缺陷检测的等误率仅为 3.92%,相对于其他典型纹理特征提取和薄浆检测方法其等误率至少降低了 5.28%,表明了本文方法的高效性,具有实际应用价值。

关键词: 自适应方向模板;灰度差分;FPC 走线;薄浆
中图分类号: TP391.41;TH165 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

FPC trace paste attenuation detection based on adaptive directional template

Li Dejian Li Shaoli Yuan Weiqi Qu Jinzhu
(College of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The paste attenuation mentioned in this paper is a conductive coating flaw on flexible printed circuit board. For avoiding harmful effect caused by paste attenuation on FPC trace, which would cause economical losses, it is a reasonable way to locate the position of paste attenuation for the later repair or get rid of the unqualified board directly. However, the size of paste attenuation flaw is uncertain. And the non-uniform illumination results in the non-uniform of image grayscale. Also trace region crisscrosses with the background. The above reasons increase the difficulty of trace paste attenuation detection. Aiming at this problem, a detection scheme is proposed which made up of adaptive directional template and gray difference, based on the detailed analysis of paste attenuation texture and trace morphological feature. First of all, the trace region after preprocessing is traversed with ADT template according to skeleton tracking process, then the large paste attenuation regions, diminutive paste attenuation regions and the whole candidate pixels relative to the ADT template size, thus, the preprocessed image is segmented into several diminutive regions. Secondly, the noise regions which are not flaws are eliminated utilizing the numerical relationship of diminutive regions energy tendency value and default threshold. At last, the non-deficit regions gained after the above two steps processing are screened again via method of gray difference, then the middle region of large paste attenuation texture is extracted, thus, the whole paste attenuation texture detection is completed. Results show that the paste attenuation flaw detection EER of suggested method is 3.93 percent on the testing of self-built image storage SUT-F2, which decreases at least 5.28 percent compared to the other typical methods of textural features extraction and paste attenuation flaw detection. The above facts prove the high efficiency and actual value of suggested method.

Keywords: adaptive directional template; gray difference; FPC trace; paste attenuation

0 引言

柔性印刷电路板(flexible printed circuit board, FPC)是一种特殊的印制电路板(printed circuit board, PCB),具有可自由弯曲、轻薄的优点,被广泛应用于各类电子产品中。其中,以聚酯薄膜为基材、银浆为导电材料的 FPC(即“聚酯薄膜涂银板”)由于其价格低廉、尺寸精度高、吸潮率低等优点被大量应用于无线终端天线、屏蔽层等领域^[1-2]。而由于生产工艺中网栅孔堵塞(导致漏浆量少或没有)或外物的刮划所导致的银浆涂层变薄(企业内称之为薄浆),尤其是发生在走线区域的薄浆,会使 FPC 电路产生虚断,从而影响电路稳定性,或使得电流强度增大从而发热严重甚至烧断线路,造成经济损失,因此检测出薄浆位置并对其进行修补或直接剔除板材均是有效和常用的处理方式。薄浆属于 PCB(包括 FPC)缺陷检测标准体系中“镀层厚度检测”的范畴,是 PCB 质量检测的重要内容,其形成原因如上所述,即为硬质物体的刮划和生产工艺不当导致的欠印(特别地,当刮划或欠印致使镀层厚度为 0 时,即形成了断路、凹陷和孔洞等 PCB 典型缺陷)。目前,PCB 缺陷的检测方法主要包括如下的 4 类:1)人工目测法,其检测效率低、精度差,无法满足现代自动化生产线的要求;2)电气检测法,是一种功能性检测方法,无法实现非通透镀层厚度缺陷的检测;3)自动 X 射线检测法(automatic X-ray inspection, AXI)^[3],该技术不很成熟,存在速度慢、成本高等问题;4)自动光学检测法(automatic optic inspection, AOI),由于其非接触、结构简单、可重复性高和成像方便等优点被广泛应用^[4-5]。

经过文献检索,目前基于 AOI 的 PCB(包括 FPC)走线区域的研究主要集中在上文所述的典型缺陷上^[6-9],而从目前掌握的资料来看,还没有针对单纯的涂层变薄缺陷检测的研究。然而,经过检索文献发现,目前很多学者针对非走线区域(如焊盘、焊脚、金面)划痕缺陷的检测进行了大量的研究^[10-14],但其研究对象均为铜箔面,且大部分文献在检测手段上利用了铜箔呈金黄色这一色彩特征,对于本文呈黑灰色的银浆镀层而言其借鉴意义不大。而着重利用图像灰度信息对划痕进行检测的研究很少,主要包括:王庆香等^[13]提出的基于 Gabor 滤波器组结合 Mean Shift 聚类的方法,该方法将整个金面作为检测目标,通过目标区域宽度 W_{ROI} 确定滤波器组频率,从而提取图像多维特征,实现尺度小于 W_{ROI} 的任意缺陷的无监督检测,并取得较好效果;然而,由于本文研究对象(即 FPC 走线)紧密度低、与背景纵横交错,则无法将其整体作为提取 Gabor 特征的基本单位,而若将其局部区域作为特征提取目标区域,则根据 Gabor 滤波器原理无法实现正交于线宽方向上尺寸大于线宽值的缺陷的检测,

因此该方法并不适合本文情况;Ye 等^[14]将焊盘作为目标检测区域,统计其内部的灰度和纹理梯度直方图,通过直方图分布形态检测缺陷;但该方法仍不适用本文情况,主要表现在如下两点:1)本文研究对象受不均匀光照影响,其灰度直方图无法有效反映缺陷真实信息;2)该方法定义的纹理梯度特征描述的为 8 邻域内像素灰度关系,适用于边界明显的划痕检测,然而部分欠印薄浆其边缘过渡平缓,遂无法通过该特征有效表示。

综上所述,目前还没有有效解决非均匀光照条件下聚酯薄膜银浆板走线上薄浆纹理检测问题的方法。而针对该问题,本文在对其详细分析的基础之上,提出一种基于自适应方向模板(adaptive directional template, ADT)和灰度差分的检测方案。该方案通过建立的 ADT 模板提取走线局部灰度分布信息,并按照骨架跟踪流程遍历整个目标区域,继而结合灰度差分方法实现走线上全部薄浆纹理的提取。

1 特征分析

1.1 薄浆纹理特征分析

本文研究对象薄浆是分布在 FPC 走线上的暗色纹理区域,其可能出现在走线的任意位置,且形状、尺寸均不固定,最小长、宽均为 1 pixel,最大长、宽分别可达走线的长度和宽度,图 1 展示了薄浆纹理大致的 3 种形态,其中黑色区域为背景,白色区域为走线,灰色区域为薄浆。边缘特征方面,除了存在图 1(b)箭头所标注的明显的、较为陡峭的边缘外还存在边界相对模糊的情况,如图 1(c)箭头所指。薄浆纹理灰度分布范围较大,具体地,其灰度值随银浆涂层厚度的增加而变大,且受非均匀光照影响,相同厚度的薄浆区域在走线不同位置呈现出不同的灰度值,导致部分薄浆区域灰度值大于正常的走线区域,使两者灰度范围交叠,难以通过灰度阈值直接分割。

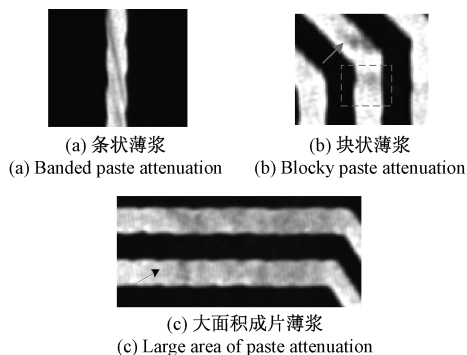
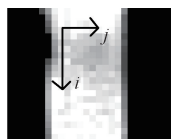


图 1 薄浆纹理图例

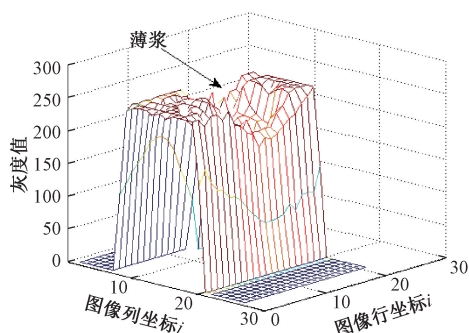
Fig. 1 Texture legend of paste attenuation

图 2(a) 为图 1(b) 虚线矩形框内区域经 OTSU 算

法^[15]处理效果(OTSU 算法处理目的仅为去除背景),其中 i, j 分别为图像的行、列坐标,图 2(b) 为图 2(a) 三维灰度分布情况,可见薄浆纹理与周围邻域走线相比具备一定的灰度差异;而与其类似的是部分走线的边缘区域,其亦具有相对较低的灰度值,而由于生产工艺原因,不同的走线段其边缘较暗区域的宽度 W_{edge} 亦不相同,如图 3(a) 为某一具有较大 W_{edge} 值的走线段,图 3(b) 为其通过 OTSU 算法处理的效果,其中 i, j 分别标记了其行、列方向,图 3(c) 为图 3(b) 三维灰度分布图,与具有较小 W_{edge} 值(即正常走线边缘状态)的图 2 相比,可见其边缘处仍存在较宽范围的暗区域;但与薄浆纹理不同的是该低灰度区域分布位置较为固定,即总是位于走线的边缘处,则可根据该特点加以排除。



(a) 图1 (b)灰色虚线矩形框内区域经OTSU算法处理效果
(a) Effect of region inside gray dotted rectangle block after OTSU processing



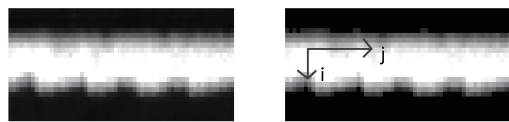
(b) 图2(a)三维灰度分布图
(b) 3-D gray distribution of image 2(a)

图2 薄浆纹理三维灰度分布

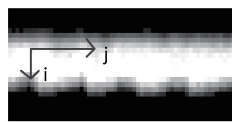
Fig. 2 3-D gray distribution of paste attenuation texture

1.2 FPC 走线形态特征分析

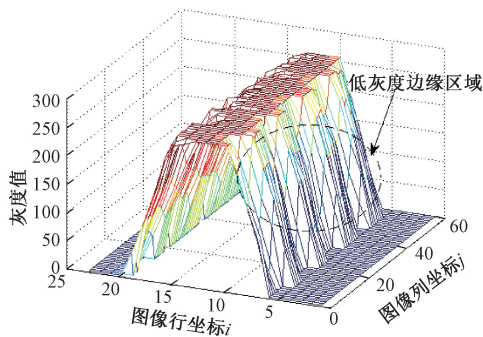
一幅 FPC 图像由背景和线路两部分构成,而线路又由走线、焊盘和异形结构(包括接线端、LED 灯座、跳线和弧线 4 种)组成,如图 4 所示,为本文自建图库 SUT-F2 中某一样本的局部截图(由于 FPC 图像幅面较大,遂此处仅截取其中的一部分用于展示),其中暗黑色区域为背景,亮白色区域为线路,灰色虚线矩形框标记的为异形结构和焊盘。由图可见,走线与背景互相交错,从“区域”角度而言,其紧密度低^[16]、为非凸集;整个走线区域由多个相互独立的子区域构成,而并非一个连通的整体;每一个独立的子区域由长度为 l_{son} 、且具有一定宽度 w_{son} 的直线段(亦可理解为矩形)以如下的两种方式组合连接而成(其中,不同子区域 l_{son} 和 w_{son} 的取值不同),分别为:



(a) 具有较大 W_{edge} 值的走线段
(a) Trace section with major value of Wedge



(b) 图3(a)经OTSU算法处理效果
(b) Effect of image 3(a) after OTSU processing



(c) 图3(b)三维灰度分布
(c) 3-D gray distribution of image 3(b)

图3 走线边缘区域灰度分布效果

Fig. 3 Gray distribution performance of trace edge region

1) 两线段以一定角度首尾连接,即形成折线;2) 3 条线段首端连接,即形成 T 字型。上述两种连接方式分别如图 4 中带数字的白色箭头所标注。

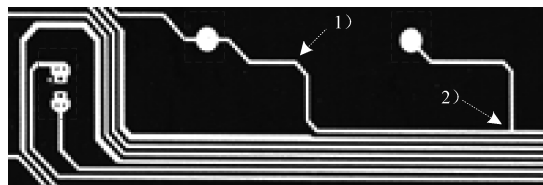


图4 FPC 图像的构成

Fig. 4 Component of FPC image

综合 1.1 节观察分析,通过首先提取局部灰度差异性较大的区域,然后去除其中由于走线边缘过渡平缓所带来的噪声从而识别薄浆是一种可行手段,而为了能够有效避免整体光照不均的影响,其中“局部”所对应的具体尺寸大小 R_{ul} 还应根据具体光照分布情况确定。然而由于薄浆缺陷尺寸不定,对于尺度大于所确定 R_{ul} 值的薄浆难以一次性全部提取出来,针对该情况,还需增加后续的对遗漏区域筛查的处理,而由于遗漏区域原属于薄浆纹理的一部分,则其与相邻薄浆区域的灰度差异性应很小,则可根据该特点进行筛查检测。而由 1.2 节分析可知,走线与背景错综纵横,走线区域形态结构复杂,因此如何适应其多变的形态而结合上述思路实现其遍历检测是重要的待解决问题;而综合 1.2 节观察分析,可利用走线区域由方向和大小不同的矩形组合而成这一特点,定义一方向和尺度可变的矩形模板按照一定的规则对其进

行遍历检测。

2 FPC 走线薄浆检测算法

综合第 1 节分析,本文制定了如下的算法方案,首先对 FPC 图像进行预处理,定位感兴趣区域(即走线区域)(region of interest, ROI);然后定义了一个自适应方向模板(adaptive directional template, ADT)按照骨架跟踪的流程对走线区域进行遍历检测,提取走线上具有较大局部灰度差异性的区域 Ω_{can} , 也即薄浆纹理候选区域;接着,剔除其中的噪声区域 Ω_{can} ;最后,对大尺度薄浆纹理的遗漏区域进行检测,从而实现全部薄浆纹理的提取。

2.1 FPC 图像预处理

本文的检测对象为走线上的薄浆纹理,因此走线作为本文研究的感兴趣区域,需将其首先定位出来,以便于后续检测算法的设计和处理。由 1.2 节可知,一幅 FPC 图像除走线外还包括背景及线路上的焊盘和异形结构,因此需对其逐项去除,具体步骤为:

步骤 1) 分割背景区域

利用文献[17]的方法对 FPC 原始图像 I_{ori} 进行镜像中值滤波,以去除噪声并尽量避免边缘过渡效应;然后,使用文献[15]的 OTSU 算法将线路区域分割出来,并利用文献[18]并查集方法标记出各个连通区域,从而得到二值图像 I_{bin} , 其中 0 表示背景, 255 表示线路区域;接着根据条件 $R_{Area} < A_{rea}$ (R_{Area} 表示各子连通域的面积, A_{rea} 为面积阈值,其大小由实验统计获得)去除其中的噪声区域(即将其标记为灰度值 0), 得到的图像称为 I_{bin2} ;

步骤 2) 焊盘和异形结构区域去除

为了得到线路区域中的走线部分 R_{line} , 将图像 I_{bin2} 进行式(1)的处理, 得到的新图像称为 I_{line} , 则 I_{line} 中灰度值为 255 的区域即为本文的 ROI 区域。

$$I_{bin2}(x, y) = \begin{cases} 0, & (x, y) \in R_{pad} \\ 0, & (x, y) \in R_{abn} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x, y) 为图像坐标, $I_{bin2}(x, y)$ 为点 (x, y) 处的灰度值; R_{pad} 、 R_{abn} 分别表示图像 I_{bin2} 上的焊盘及异形结构区域, 则区域 R_{pad} 、 R_{abn} 的获取方法分别为:

1) 根据电路板设计中焊盘直径 r_{pad} 满足 $r_{pad} > W_{line}$ 的规则, 通过式(2)的方法对其进行提取, 其中 W_{line} 表示线宽。

$$R_{pad} = I_{bin2} \otimes C_{W_{line}} \quad (2)$$

其中, $\otimes$ 表示形态学开运算, $C_{W_{line}}$ 表示直径为 W_{line} 的圆形结构元素。

2) 首先根据文献[19]的方法为图像 I_{bin2} 上的所有异形结构区域建立模板, 然后采用文献[20]的方法进行模板匹配, 从而对待测图像中的 R_{abn} 进行定位。

步骤 3) 走线区域的具体获取。

将步骤 2) 所得图像 I_{line} 中像素值为 0 和 255 的两部分区域映射到原始图像 I_{ori} 上, 并进行式(3)处理, 则得到目标图像 I_{tar} , 至此预处理结束, 后续的检测算法均基于图像 I_{tar} 。

$$I_{tar}(x, y) = \begin{cases} I_{line}(x, y), & I_{line}(x, y) = 0 \\ I_{ori}(x, y), & I_{line}(x, y) = 255 \end{cases} \quad (3)$$

通过上述预处理方法对图 4 进行操作获得的效果如图 5 所示, 其中亮白色区域为走线(即本文 ROI), 暗黑色区域为背景。



图 5 图 4 FPC 图像预处理效果

Fig. 5 FPC image preprocessing performance of Fig. 4

2.2 基于变向矩形模板提取薄浆纹理候选区域

骨架跟踪^[21]是延伸于边界跟踪^[22]的一种较为成熟的算法, 由于每一个骨架的元素可以附有它到边界距离的信息, 则可以此为依据对区域进行重建; 而根据该原理, 并综合第 2 节特征分析, 本文设计了一种自适应方向模板(ADT)与骨架跟踪相结合的检测方案, 本文以骨架元素为中心, 同时将其距离信息融合在所建立的 ADT 模型之中(即模型心的设计特点), 则按照骨架跟踪的流程, 在对其重建的过程中即实现了整个区域的遍历; 其中 ADT 可变方向的特点使得模板可适应走线多变的走向; 其心的特点主要为与骨架跟踪这一遍历方式相配合, 使得模板每按照骨架跟踪步骤移动计算一次便可实现走线相应横剖面上全部像素位置的检测, 而不会产生遗漏。

1) ADT 的定义

建立的模板以矩形为基本结构, 如图 6 所示, $P_i(i, j)$ 为待测预处理图像上的某一像素位置, i, j 分别表示图像的行和列; 以点 $P_i(i, j)$ 为原点建立平面直角坐标系 xOy , 然后在 xOy 下建立一个以其原点为几何中心、长为 L 、宽为 W 、长轴方向 r 为与 x 正半轴夹角为 α 的矩形 R_{ect} , 其中 r 称为模板的方向参数。将 R_{ect} 分为 A、B、C 三个部分, 其中 A 为模板的中心区域, 其长 $L_a = 1$, 宽为 W , 可得

其坐标范围为 $(i+b, j+a)$, 其中 $b = \cos\beta \times \frac{w_0}{2}$, $a = \sin\beta \times$

$\frac{b}{\cos\beta}$, 且 w_0 的取值范围为 $-W \sim W$, 该坐标范围内任意位置均作为模板的运算核心, A 区域的几何中心(也即 $P_i(i, j)$ 点)作为整个模板的移动中心; B、C 为模板的周

边区域,其长度分别为 L_b 、 L_c ,且 $L_b = L_c$, $L_b + L_c + L_a = L$,宽度均为 W ,区域B的坐标范围为 $(i - \sin\beta \times l_0 + b, j - \cos\beta \times l_0 + a)$,区域C的坐标范围为 $(i + \sin\beta \times l_0 + b, j + \cos\beta \times l_0 + a)$,其中 l_0 的取值范围为 $1 \sim L/2$ 。

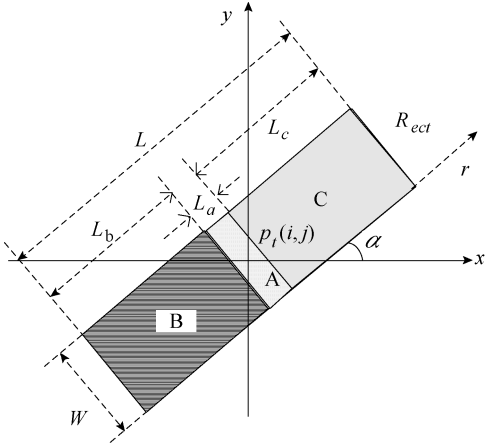


图6 ADT基本形态

Fig. 6 Base form of ADT

对于A区域内任意运算核心位置 (m, n) ,定义其灰度特征量 G_{ray} 如式(4)所示。

$$G_{ray}(m, n) = \max_{(x, y) \in \Omega \cap \Gamma} [g(x, y) - g(m, n)] \quad (4)$$

式中: $G_{ray}(m, n)$ 表示点 (m, n) 处的灰度特征值; $g(*)$ 表示点 $(*)$ 处的灰度值; (x, y) 为坐标位置,且 $(x, y) \in \Omega$, Ω 表示整个ADT模板区域; Γ 表示模板区域内参与特征值计算的部分,其具体位置根据实际需求确定。

2) ADT的使用

图7所示为ADT模型检测某一水平走线区域示意图。首先获得走线 n 个独立子区域的骨架线,具体方法为使用8栅格Golay字符集^[23]中复合结构元素 $L = \{L_{(1)}, L_{(2)}, \dots, L_{(8)}\}$ 对二值图像 I_{line} 进行迭代细化操作,细化方式如式(5)所示,迭代终止条件为 $I_{line}^k = I_{line}^{k+1}$, I_{line}^i 表示第 i 次迭代操作结果。

$$I_{line} \odot \{L_{(i)}\} = (((I_{line} \odot L_{(1)}) \odot L_{(2)}) \dots \odot L_{(8)}) \quad (5)$$

其中, $\odot$ 表示形态学细化操作。

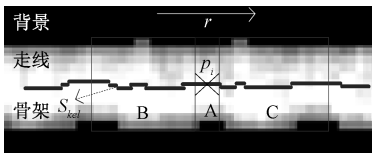


图7 ADT应用示意图

Fig. 7 Sketch map of ADT applying

然后将所得各骨架线上长度小于 l_u 的分支去除(具体的,“分支”指一端为结点,另一端为端点的曲线段,结点及端点的定义如式(7)所示),从而得到“纯净”骨架

线,称为 S_{kel} ,其中 l_u 的大小通过观察统计获得。

接着根据骨架跟踪流程,依次的对每条骨架线 S_{kel} 上的每个点进行如下操作:对于 S_{kel} 上任意点 p_i ,首先获取其方向系数 ρ (ρ 的具体获得方法如下详述),则 ρ 的正交方向 ζ 近似为走线过该骨架点的横剖面方向,则 p_i 与沿着 ζ 方向所触碰的走线区域边缘点的距离值 w_ξ 等于走线宽度的 $1/2$;接着,以 p_i 为几何中心、 $2 \times w_\xi$ 为宽度、 L 为长度(L 受光照分布影响,其具体数值需通过实验获得)、 ρ 为方向参数建立矩形,即形成该参数下的ADT模板,则其运算核心随之确定,也即过 p_i 点的走线横剖面区域。如图7所示,当 p_i 点位于灰色“×”号所标记位置时,其相应参数下所建立的ADT如灰色矩形框所示,则可根据式(4)获得各核心位置的灰度特征量 G_{ray} ,然后根据式(6)对其进行处理。

$$A_{uri}(x, y) = \begin{cases} 1, & G_{ray}(x, y) > T_G \\ 0, & G_{ray}(x, y) \leq T_G \end{cases} \quad (6)$$

式中: A_{uri} 为定义的一种用于表征某像素位置或区域是否为缺陷的特征量,本文称之为缺陷属性量,其取值范围为1和0,且1、0分别表示“是缺陷”和“不是缺陷”; (x, y) 表示ADT模板核心位置像素坐标,则 $A_{uri}(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的缺陷属性值; T_G 为灰度阈值,大小根据实验获得。在进行特征量 G_{ray} 的运算时,其参数 Γ 的取值范围为ADT模板覆盖下的全部走线区域,即如图7中灰色矩形框内的非0像素区域。

上述操作过程中,方向系数 ρ 的获得方法如下:

首先,根据式(7)规则将构成无分支骨架曲线 S_{kel} 的点划分为3个点集合:即端点集 P_{end} 、分支点集 P_{fork} 和线路点集 P_{line} ,则对于 S_{kel} 上任意一点 p_i ,若 $p_i \in P_{end}$,则以 p_i 为种子点根据骨架跟踪原理沿着其8邻域内仅有的一个相邻点跟踪 S_{kel} ,直到跟踪至端点或分支点截至;若 $p_i \in P_{end}$,则同样以 p_i 为种子点沿着其8邻域内的两个相邻点形成两路跟踪,每路跟踪的终止条件同上;若 $p_i \in P_{fork}$,则首先在其8邻域的3个相邻点中任选两点,然后按照 P_{line} 点的方式进行跟踪处理。

$$p_i \in \begin{cases} p_{end}, c_{col} + c_{row} = 2 \\ p_{fork}, c_{col} + c_{row} = 6 \\ p_{line}, c_{col} + c_{row} = 4 \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_{col} 、 C_{row} 分别表示点 (i, j) 的8邻域范围内列、行方向上相邻像素间前景(灰度值255)和背景(灰度值0)间的切换次数,其计算如式(8)、(9)所示。

$$C_{col} = \sum_{u=j-1}^{j+1} [abs(g(i-1, u) - g(i, u)) + abs(g(i, u) - g(i+1, u))] \quad (8)$$

$$C_{row} = \sum_{v=i-1}^{i+1} [abs(g(v, j-1) - g(v, j)) + abs(g(v, j) - g(v, j+1))] \quad (9)$$

式中:变量 u, v 均分别为变量 j, i 的关联变量,其取值大小取决于相应的 j, i 值及公式中所定义的关联关系,以式(8)为例, u 的取值范围为 $j-1 \sim j+1$ 。

对 p_i 进行上述跟踪处理所得的轨迹 t_{rack} (包括 p_i 点) 为一条无分支的曲线,使用 Ramer 算法^[24]对 t_{rack} 进行递归细分,在设定的最大距离约束条件 d_{max} 下(d_{max} 通过观察统计确定),以图 8 曲线为例, t_{rack} (黑色实线) 被分为 n 段子弧 arc_j , 虚线线段为其对应的弦,称为 cho_j , 其中 $j=1, 2, 3, \dots, n$; 若点 p_i 落于弧 arc_j 上,则相应的弦线段 cho_j 的方向即为点 p_i 处的方向系数 ρ , 特殊的当 p_i 位于两个弦线段 arc_j 和 arc_{j+1} 的交点时, ρ 值可在两者中任选。

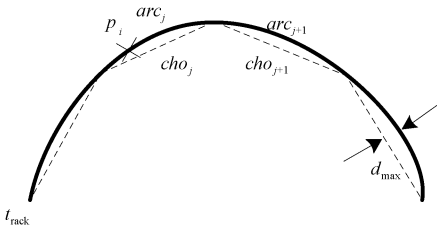


图 8 方向系数的获取

Fig. 8 Acquiring of direction coefficient

3) ADT 算法性能理论分析

经上述 2.2 节 1)、2) 算法处理后,走线区域内各像素位置均被属性量 A_{uri} 所标记,将走线区域内各像素位置按照 A_{uri} 值相等且 8 邻域相邻的原则聚类为若干小区域,则各小区域的 A_{uri} 属性与其内部各像素点的 A_{uri} 值相等,而其中 A_{uri} 为 1 的区域即为检测到的薄浆纹理候选区域。若将薄浆纹理按其沿走线走向上的延伸长度 L_s 及正交于走线走向方向上的延展长度 W_s 进行如下简单分类,即 $L_s < L$ 称为小尺度薄浆, ($L_s \geq L$) AND ($W_s \geq W$) 称为大尺度薄浆,则本文方法所检测到的候选区域中包括边缘噪声区域、小尺度薄浆纹理的全部区域及大尺度薄浆纹理的端部区域(指沿着走线走向方向上的两端区域)3 个部分。

其中,对薄浆纹理的检测出现上述结果的具体原因为:本文所建立的 ADT 模板与薄浆纹理存在 4 种基本位置关系,如图 9 所示(以方向参数 $\rho = 0$ (即水平)的情况为例),灰色矩形框为 ADT 模板, A、B、C 分别标注了模板的 3 个区域,灰色阴影部分表示薄浆纹理,则对于图 9(a)、(b)、(c) 小尺度纹理的情况,根据式(4)及(6),经过模板移动遍历后能够全部提取出来;而对于图 9(d) 的大尺度薄浆,根据遍历原理可知只能提取出其左右两侧长为 L_b 的部分,其中间长为 $L_s - (2 \times L_b)$ 的区域均无法有效检测,即被漏检,遂被标记为非缺陷。一种特殊的情况为,当图 9(d) 所示的大尺度薄浆位于走线某子区域的起

始位置(即走线区域骨架的端点位置)时,则只能提取出其远离端点一侧长 L_b 的部分,而靠近端点一侧未被检测出的区域长为 $L_s - L_b$,为便于统一描述,仍将该部分区域称为该薄浆纹理的“中间”部分。

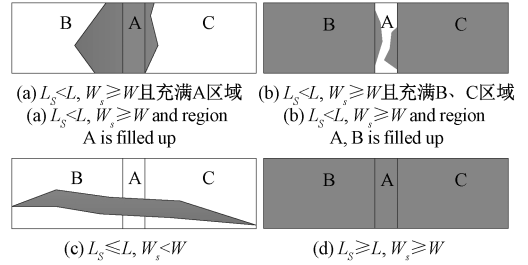


图 9 薄浆纹理与 ADT 位置关系示意图

Fig. 9 Position relation sketch map of paste attenuation texture and ADT

针对大尺度薄浆的此检测情况,需对其进行后续的处理,具体方法如 2.4 节所述。

2.3 基于定义的能量倾向值排除走线边缘噪声区域

由 2.2 节检测结果可知,正如上述第 2 节所分析,由于生产工艺原因, FPC 走线的边缘区域较其中心区域暗,则通过 3.1、3.2 节方法处理后也会被提取出来(即 $A_{uri} = 1$),如图 10 所示(为根据 3.3 节实验所得参数下的检测效果),其中灰度值为 0 的黑色区域为背景,较亮的白色区域为走线,灰色区域为薄浆纹理或走线边缘过渡带,暗黑色线条为算法的自动标记,标记规则为将 A_{uri} 值为 1 且其 8 邻域范围内存在 A_{uri} 为 0 的像素位置(即所检测到的候选缺陷区域的边缘)赋值为灰度值 20。由图 10 可见,本文算法在该段走线上共检测出 3 个候选缺陷区域,其中 1 号箭头所指的为真正的薄浆纹理,而 2、3 号箭头所指区域为走线边缘,而并非为真正的缺陷,遂需要将其排除。通过观察分析,与同样处于边缘的真实薄浆纹理相比,误检的边缘区域内更多的像素点倾向于“贴合”在边缘处,也即更靠近背景,因此根据该特征定义了区域能量倾向量 E_{tend} ,如式(10)所示,并根据该 E_{tend} 值对非薄浆纹理区域进行排除,具体方法如式(11)所示。

$$E_{tend} = \frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in \varphi} \min_{(p,q) \in \tau} \sqrt{(i-p)^2 + (j-q)^2} \quad (10)$$

式中: φ 表示待测纹理区域, τ 表示 FPC 图像中灰度值为 0 的背景区域; (i, j) 、 (p, q) 分别表示区域 φ 、 τ 内的像素坐标; N 表示区域 φ 内像素点个数。

$$J_{udeg}(\varphi) = \begin{cases} True, E_{tend} < T_E \\ False, E_{tend} \geq T_E \end{cases} \quad (11)$$

其中, $J_{udeg}(\varphi)$ 表示区域 φ 的判断结果; $True$ 表示该区域为真正的缺陷区域, $False$ 表示该区域为边缘噪声; T_E 为能量倾向阈值,大小通过实验获得。

通过式(11)的判断后,将判断结果为 *False* 的区域中像素点缺陷属性量 A_{uri} 修改为 0,即如式(12)所示。然后同样根据 A_{uri} 值相等且 8 邻域相邻的原则对走线区域重新聚类,得到若干新的小区域。

$$A_{uri}(x,y) = \begin{cases} 1, J_{udeg}(\varphi) = True \\ 0, J_{udeg}(\varphi) = False \end{cases} \quad (12)$$

式中: (x, y) 表示区域 φ 内的像素坐标,即 $(x, y) \in \varphi$ 。

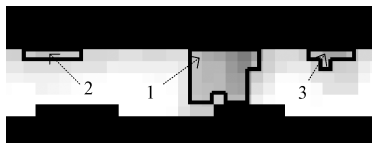


图 10 ADT 检测边缘噪声效果

Fig. 10 Performance of ADT detecting edge noise

2.4 基于灰度差分法筛查大尺度薄浆纹理中间区域

根据 2.2 节检测原理及算法性能分析可知,仅通过 ADT 算法无法实现大尺度薄浆纹理全部区域的提取,即对于图 9(d) 薄浆纹理的中间区域存在漏检,而由于漏检区域 R_{miss} 与其两侧缺陷区域本属于同一薄浆纹理,因此两者的灰度差异应很小或者没有差异,而根据 2 节特征分析可知,薄浆纹理与其周边非缺陷邻域却具有明显的灰度差异,因此根据该特征提出了一种基于区域间灰度差分的方法,对 2.2 节算法标记为非缺陷的所有子区域进行再次筛查。

区域灰度差分法:

设待检测区域 R_{miss} 的像素集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$, M 为区域 R_{miss} 的面积, $f(x_i)$ 为像素 x_i 的灰度值,则区域 R_{miss} 的灰度差计算公式 D_{if} 为:

$$D_{if} = \begin{cases} abs\left\{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i) - \frac{1}{\eta} \left[\sum_{j=1}^{\eta} \left(\frac{1}{\Psi(j)} \sum_{i=1}^{\Psi(j)} f(y_i) \right) \right]\right\}, & \eta > 0 \\ \infty, & \eta = 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中, η 表示区域 R_{miss} 的相邻区域中缺陷属性值 A_{uri} 为 1 的区域 R_{neib} 的个数;其中 y_i 表示区域 R_{neib} 像素集合 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_K\}$ 中的第 i 个像素点, $f(y_i)$ 为像素 y_i 的灰度值; $\Psi(j)$ 表示第 j 个 R_{neib} 区域的面积值, j 为自然数,且 $i \leq j \leq \eta$ 。

设灰度差分阈值为 T_d ,根据式(14)的方法对待测区域 R_{miss} 的缺陷属性进行标记,则 A_{uri} 值被标记为 1 的区域即为搜索到的大尺度薄浆中间区域。

$$A_{uri}(x,y) = \begin{cases} 1, D_{if} < T_d \\ 0, D_{if} \geq T_d \end{cases} \quad (14)$$

其中, (x, y) 为预处理图像中的像素坐标, $A_{uri}(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的缺陷属性值。

2.5 算法标记识别方法

通过上述 4 个小节的处理,将走线区域的所有像素点均进行了缺陷属性量的标记,根据其标记结果对预处理所得图像 I_{tar} 进行式(15)操作,得到二值图像 I_{two} ,则其中灰度值为 255 的区域即为最终检测的薄浆纹理区域。

$$I_{two}(x,y) = \begin{cases} 0, A_{uri}(x,y) = 0 \parallel I_{tar}(x,y) = 0 \\ 255, A_{uri}(x,y) = 1 \end{cases} \quad (15)$$

其中, (x, y) 为图像 I_{tar} 上的像素坐标; $I_{tar}(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的灰度值。

3 实验结果与分析

3.1 实验数据库的建立

本文自行建立了一个基于大小为 450 mm×680 mm 的笔记本电脑键盘 FPC 的图像数据库用于算法验证,图像库命名为 SUT-F2,其中图像大小为 7 500×8 192,图像采集环境为真实生产现场,将 DALSA 公司 P4-CM-08K070 网口线阵相机和 OPT-LST562-W 线型高亮白光光源安装在 FPC 生产线上方的移动平台上,并将光照中心覆盖相机成像范围,然后在丝杠带动的过程中通过光栅尺触发相机、采集图像。其中,相机工作距离为 270 mm,丝杠移动距离为 680 mm。本文共对人工挑选出的含有薄浆缺陷的 109 张 FPC 进行了成像,即构建的图库 SUT-F2 大小为 109,其中人工标定出薄浆位置 1 062 处。图 11 为系统实物图,图 12 为通过图 11 系统采集的图像,即图库中的图例。



图 11 图像采集装置

Fig. 11 Image acquisition device

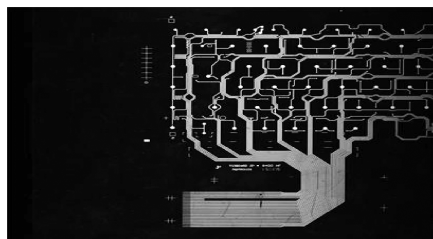


图 12 图库中的图例

Fig. 12 Legend in the image storage

3.2 评价指标、数据集和算法测试环境

由于薄浆纹理有深有浅,且部分纹理边缘存在缓慢的过渡,因此如何判断某一具有一定深浅程度的像素位置是否为缺陷是对算法效果定量评价的基础。由于本文研究的目的是解决工业生产现场的实际问题,遂按照企业实际检测指标进行效果评价。因此,邀请生产车间的技术人员对图库中 109 幅图像的缺陷区域进行人工标记,而具体的,由于在实际生产线上,检测到的薄浆区域需通过机械手再次涂画,进行补印,补印的基本宽度单位为线路走线宽度,从而其实际生产中的人工标记规则为:在沿着走线走向的方向上标记出缺陷两端(而无论该缺陷是否充满线宽)。在图库中 109 幅图像上所标记出的 1 062 处薄浆缺陷中,大尺度缺陷 57 处,分布在 41 幅图像上;小尺度缺陷 1 005 处,分布在 109 幅图像上。将 109 幅图像随机抽选 20 幅作为训练数据集,用于算法参数的确定;其余 89 幅作为测试数据集,用于算法效果的评价。

为适应企业检测要求,本文制定了算法的标记和检测规则如下:将判定为缺陷的像素位置使用灰度值 255 进行标记,非缺陷位置使用灰度值 0 进行标记;设人工标记的缺陷长度(本文“缺陷长度”指其沿着走线走向方向上的延展长度,下文亦同,不再赘述)为 L_{man} ,本文算法最终检测出的缺陷长度为 L_{alg} ,则漏检长度为 $L_{loss} = L_{man} - (L_{alg} \cap L_{man})$,误检长度为 $L_{error} = L_{alg} - (L_{alg} \cap L_{man})$,进而定义评价指标漏检率(false recognition, FRR)、误检率(false detection rate, FDR)分别如式(16)、(17)所示。

$$FRR = \frac{L_{loss}}{N_{man}} \times 100\% \quad (16)$$

$$FDR = \frac{L_{error}}{N_{line} - N_{man}} \times 100\% \quad (17)$$

其中, N_{line} 表示整个走线的长度(即走线区域骨架像素点数); N_{man} 表示图像中人工标记出的缺陷区域的总长度。

等误率(equal error rate, EER)通常用来评价一个系统的综合识别性能,可通过如下方式获得:将 FDR 和 FRR 分别作为横、纵坐标绘制在同一坐标系内,得到两者的关系曲线,称为接受者操作特征(receiver operating characteristics curve, ROC)曲线,而曲线上 FDR 和 FRR 相等的值即为系统 EER, EER 值越小,系统性能越好^[25]。

为了衡量 3.3 节边缘区域的排除效果以及 3.4 节大尺度薄浆纹理中间区域的提取效果,分别定义了评价指标排除率(elimination rate, ENR),和提取率(extraction rate, ETR),如式(18)、(19)所示。

$$ENR = \frac{NCEN}{NTN} \times 100\% \quad (18)$$

$$ETR = \frac{NCEG}{NER} \times 100\% \quad (19)$$

NCEN(number of correct elimination noise-region)表示正确排除的边缘噪声区域个数;NTN(number of total noise-region)表示边缘噪声区域的总个数。NCEG(number of correct extract grouts)表示正确提取的大尺度薄浆中间区域个数,NER(number of experimental regions)表示进行大尺度薄浆纹理中间区域鉴别实验的区域总个数。

测试本文算法实验的软件平台为 Visual Studio C++ 2019,所使用的计算机处理器型号为 Intel i7-10700k, 8 核,主频为 3.80 GHz,内存为 8 G,操作系统为 Windows 1 064 位专业版 Service Pack 1。

3.3 ADT 模型相关参数的确定

1) ADT 模板长度参数 L 、宽度参数 w_ξ 的确定

图像采集过程中,高亮线型光源与目标 FPC 水平方向平行(即图像的行方向),通过线阵相机采集光带中心的图像,但受机械装置的精密程度影响,光源光心不能与线阵相机成像位置绝对重合,且光源技术的局限性使其两端区域较中间暗,从而导致采集的图像同一行亮度不同。为了得到在该光照条件下 FPC 图像灰度分布的情况,在图库中挑选出无薄浆缺陷的样本,并通过 3.1 节预处理方法得到其 I_{tar} 图像,然后分别根据式(20)、(21)获得 I_{tar} 在水平和竖直方向的灰度分布曲线,也即走线区域的灰度分布情况,如图 13 所示。

$$f(j) = \frac{1}{H_i} \sum_{j=0}^{H_i-1} g(i, j) \quad (20)$$

$$f(i) = \frac{1}{W_i} \sum_{i=0}^{W_i-1} g(i, j) \quad (21)$$

式中: i, j 分别表示图像的行、列坐标, W_i, H_i 分别表示图像的宽、高, $g(i, j)$ 表示点 (i, j) 处的灰度值。

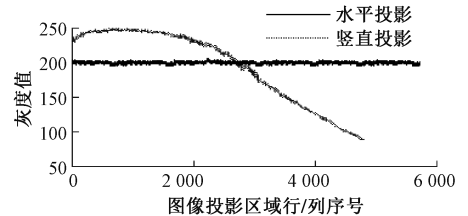


图 13 FPC 线路区域水平、竖直灰度投影

Fig. 13 Horizontal and vertical gray projection of FPC trace

由图 13 可见,竖直投影曲线呈现出左侧高于右侧的状态,而水平投影曲线几乎呈水平直线,这表明光照的不均匀主要表现在图像的行上;同时可以看到,两条曲线并非绝对平滑,存在一定程度的波动 e (经统计, $e=9$)。则可获得在某一固定的列间隔 Δl 内,竖直投影曲线上相应

灰度值的变化量 Δg , 当 Δl 从 1 开始以步长为 1 逐步增加的过程中, Δg 首先保持不变 (即 $\Delta g < e$), 继而逐渐增大, 则引发 Δg 开始增加的 Δl 值即为最大的光照分布均匀长度值, 即图像上长度为 Δl 的范围内光照不均引起的灰度变化为 0, 因此将 ADT 模型长度 L 设置为该值会使得其检测候选像素时能够有效规避光照不均影响。

通过统计, Δl 的大小为 21, 因此设定 $L = 21$, 具体的 $L_a = 1, L_b = L_c = 10$ 。

为了使 ADT 模型能够遍历走线的全部像素而不漏检, 其宽度参数 W_ξ 需设置为 FPC 走线最大可能宽度 $W_{\max}$, 经统计, $W_{\max}$ 的最大取值为 16, 因此设定 $W_\xi = 16$ 。

2) 阈值 T_c 的确定

阈值 T_c 从 0~256 时本文算法对训练数据集上小尺度缺陷的检测效果, 即不同阈值下 ADT 模板的搜索性能 (FDR, FRR 分布情况) 如图 14(a) 所示 (在计算 FDR 时, 边缘噪声区域不在其统计范围内)。将其绘制在同一坐标系下得到如图 14(b) 的 ROC 曲线, 通过 ROC 曲线与直线 $x=y$ 的交点得到 EER 的值为 0.035, 而由图 14(a) 可见, 当 $EER = 0.035$ 时, 其所对应的 $T_c = 54$, 也即 FDR 和 FRR 曲线的交点位置, 因此最终确定阈值 T_c 为 54。

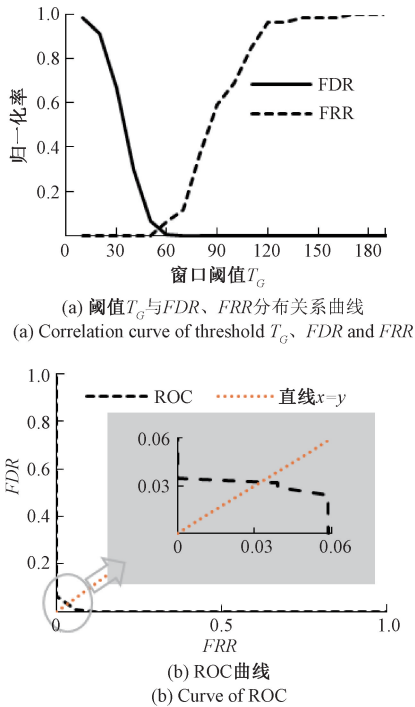


图 14 阈值 T_c 的确定

Fig. 14 Determination of threshold T_c

3.4 能量倾向阈值 T_e 的确定

在 3.3 节实验所确定的参数和阈值下, 2.2 节算法共在训练数据集上分割出 2 613 处候选缺陷区域, 其中 183 处薄浆区域、4 220 处边缘噪声区域。则可得到 T_e

从 $1 \sim W_\xi / 2$ ($W_\xi = 16$) 时 3.3 节算法对噪声边缘区域的去除能力, 如图 15 所示。可见, 当 $T_e = 3$ 时 ENR 获得最大值 97.16%, 即算法去除噪声能力最强, 因此最终确定 T_e 的取值为 3。

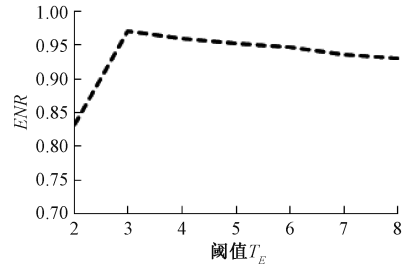


图 15 阈值 T_e 与噪声排除率 ENR 关系曲线

Fig. 15 Correlation curve of threshold T_e and noise elimination factor ENR

3.5 灰度差分阈值 T_d 的确定

在上述实验确定的参数及阈值下利用 2.1~2.3 节算法在训练数据集中, 共标记出 515 处非缺陷区域, 其中 46 处为大尺度薄浆中间区域, 469 处为正常的走线区域, 使用 2.4 节算法对该 515 处区域进行处理, 则得到阈值 T_d 与 ETR 的关系如图 16 曲线所示。可见, 当 $T_d = 30$ 时, 获得最大的 ETR 值, 为 0.947 7, 因此确定 T_d 最终的取值为 30。

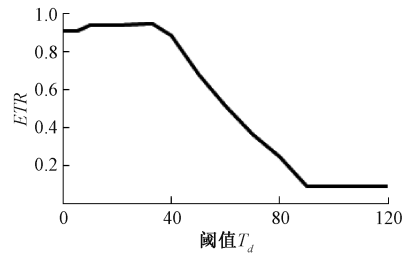


图 16 T_d 与 ETR 关系分布曲线

Fig. 16 Correlation curve of T_d and ETR

3.6 实验效果与对比分析

在测试数据集上进行了算法评价, 并与其他典型纹理特征提取及薄浆检测方法进行了对比分析, 结果如表 1 所示。实验过程中, 本文预处理算法面积阈值 A_{rea} 的取值为 1 400; 3.3 节 2) 中骨架分支长度参数 l_u 取值为 10; Ramer 算法阈值 $d_{\max}$ 取值为 11。另外, 对比方法的阈值确定均采用与本文相同的方式, 即通过测试不同阈值参数下算法在数据集上的 EER , 以选取 EER 最佳时的参数值作为相应阈值。

由表 1 可以看到, 本文方法 EER 低达 3.92%, 相对于其他方法 EER 值最小降低了 5.28%, 展现出显著的优势, 证明了本文方法的有效性和优越性, 对于 FPC 薄浆

缺陷的检测具有实际应用价值。相对于本文方法,其他方法在光照干扰、薄浆缺陷纹理尺度多变、走线区域结构复杂等疑难问题上的考虑不够全面,导致其检测效果不佳;而本文方法的优势在于着重解决了上述疑难问题,同时基于所定义的 ADT 检测方法其检测精度为像素级别,相对于“灰度熵”等精度为区域级别的统计量方法更加精确,从而获得了良好的效果。

表 1 本文方法与其他方法对比

Table 1 Comparison of this paper and other methods

方法	EER/%
直接阈值分割	30.02
灰度+纹理梯度直方图 ^[11]	26.33
Gabor ^[14]	15.96
灰度熵 ^[12]	9.2
本文方法	3.92

对检测失败的案例进行分析。当边缘噪声区域与薄浆纹理相邻时,则通过 ADT 模板遍历检测后两者融合为同一区域,如图 17 中黑色实线所包围的浅灰色区域所示(其中黑色实线为算法标记结果,其标记规则同图 10),使得该区域能量倾向 E_{tend} 大于设定的阈值,从而无法通过 3.3 节算法有效排除。存在如图 18(a) 所示的短小走线区域(其左右两端为圆盘),当其所对应的网栅孔恰好全部堵塞时使得整条走线均形成薄浆,图 18(b) 为预处理后效果,该情况下其整体灰度值较低但相对均匀,与本文方法的基本检测依据(局部灰度具有较大差异)相悖,从而无法有效检测。另外,由于人工标记的主观性和不稳定性,其标记位置与缺陷真实位置存在一定偏差,则按照 4.2 节定义的评价指标,这亦是造成本文算法误检和漏检的原因之一。



图 17 误检案例分析
Fig. 17 Analysis of mistakenly identified cases

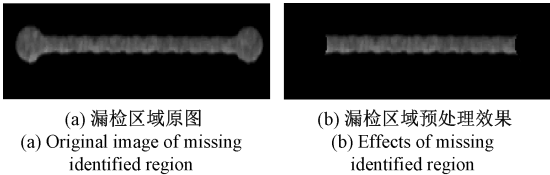


图 18 漏检案例分析
Fig. 18 Analysis of missing identified cases

4 结 论

FPC 镀层厚度检测是其质量检测体系中的重要内容,但当前针对 FPC 走线区域薄浆缺陷检测的研究仍处于空缺状态。针对该问题,本文首先对薄浆纹理以及整个走线区域进行了详细的特征分析,并总结出其所存在的问题和难点,在此基础上提出了基于 ADT 模板搜索、能量倾向判断和灰度差分法相结合的解决方案。本文详细阐述了算法原理与流程,给出了算法的评价指标以及典型参数设置的方法,并在自建的图像数据库 SUT-F2 上进行了测试,结果表明,本文方法 EER 达 3.92%,表明了本文算法的有效性;与其他经典方法相比,EER 至少降低了 5.28%,显示出本文算法的优势,具有实际应用价值。

参考文献

[1] 袁义生,兰梦罗,刘文钦. 电力电子电路 PCB 中回路间的磁场干扰研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021, 35(8): 175-183.

YUAN Y SH, LAN M L, LIU W Q. Research on inter-loop magnetic field interference in power electronic circuit PCB [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (8): 175-183.

[2] 张成铭,徐晓英,舒晓榕,等. 静电放电对 PCB 轨线耦合的实验及仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(5):103-111.

ZHANG CH M, XU X Y, SHU X R, et al. Experimental and simulation study on the coupling with the PCB trace by electrostatic discharge [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 (5): 103-111.

[3] HYUNG T K, SEUNG T K, YOUNG J C. Quick and efficient light control for conventional automatic optical inspection (AOI) systems[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(2): 247-254.

[4] SAJAL R F, KAMRUZZAMAN M, JEWEL F A. A machine vision based automatic system for real time recognition and sorting of Bangladeshi bank notes[C]. International Conference on Computer and Information Technology, 2008:533-535.

[5] CHUNG T T, HUANG Y C, MA C H, et al. Notice of retraction optimum design of a high precision AOI machine structure [C]. International Conference on Mechanical and Electronics Engineering. IEEE, 2010: V1-164-V1-168.

[6] WANG L, ZHAO Y, ZHOU Y, et al. Calculation of flexible printed circuit boards (FPC) global and local

- defect detection based on computer vision [J]. Circuit World, 2016, 42(2):49-54.
- [7] SANGUINO T J M, SMOLCIC-RODRIGUEZ M. Computer-aided system for defect inspection in the PCB manufacturing process [C]. IEEE, International Conference on Intelligent Engineering Systems. IEEE, 2012:151-156.
- [8] WANG W B, LIU D Y, YAO Y Q. Defects detection of printed circuit board based on the machine vision method[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 494-495: 785-788.
- [9] ZULKOFFILI Z, BAKAR E A. Template based defect detection of flexible printed circuit[J]. Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), 2015, 78(1):153-158.
- [10] JIANG B C, WANG C C, CHEN P L. Logistic regression tree applied to classify PCB golden finger defects [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(7):496-502.
- [11] 黄杰贤, 李迪, 叶峰, 等. 挠性印制电路板焊盘表面缺陷的检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11):2443-2453.
- HUANG J X, LI D, YE F, et al. Detection of surface defection of solder on flexible printed circuit [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(11):2443-2453.
- [12] CHIH-HSIEN S. Development of an appearance defect inspection system for flexible printed circuit board[C]. 16th International Conference on Mechanics Technology, 2012: 130-134.
- [13] 王庆香, 李迪, 张舞杰, 等. 软性电路板金面缺陷的无监督检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 981-987.
- WANG Q X, LI D, ZHANG W J, et al. Unsupervised defect detection for gold surface of flexible printed board [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 981-987.
- [14] YE F, LI D, HUANG J, et al. Flaw detection on FPC solder surface [J]. Circuit World, 2012, 38(3): 142-152.
- [15] 汪恩良, 徐雷, 韩红卫, 等. 基于 OTSU 算法提取寒区河流流冰密度研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(6):1429-1439.
- WANG EN L, XU L, HAN H W, et al. Study on extracting river drift ice density in cold region based on Otsu algorithm [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(6):1429-1439.
- [16] DE W J, QANGEMANS J. Perceptual saliency of points along the contour of everyday objects: A large-scale study [J]. Attention, Perception, & Psychophysics, 2008, 70(1): 50-64.
- [17] HUANG T, YANG G, TANG G. A fast two-dimensional median filtering algorithm [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1979, 27(1):13-18.
- [18] AIZAWA K, TANAKA S, MOTOMURA K, et al. Algorithms for connected component labeling based on quadrees [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2009, 19(2):158-166.
- [19] 张静, 叶玉堂, 谢煜, 等. 采用 Gerber 文档的印刷电路板表观检测[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2679-2687.
- ZHANG J, YE Y T, XIE Y, et al. Appearance detection for printed circuit board by Gerber file[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10):2679-2687.
- [20] 吴晓军, 邹广华. 基于边缘几何特征的高性能模板匹配算法[J]. 仪器仪表学报. 2013, 34(7):1462-1469.
- WU X J, ZOU G H. High performance template matching algorithm based on edge geometric features[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 1462-1469.
- [21] 刘凯, 黄峰, 罗坚. 台风螺旋云带骨架跟踪方法的研究[J]. 计算机工程, 2001, 27(10):152-154.
- LIU K, HUANG F, LUO J. The study on automatic tracking method of typhoon spiral cloud bands [J]. Computer Engineering, 2001, 27(10):152-154.
- [22] 王珏, 卢艳平, 张泽宏, 等. 一种有记忆的变窗“爬虫”图像边界跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S2):483-485.
- WANG Y, LU Y P, ZHANG Z H, et al. A reptile method with memory and alterable window for image boundary tracing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S2):483-485.
- [23] SONKA M, HLAVAC V, CENG R. Image Processing, Analysis, and Machine Vision [M]. USA: International Thomson Publishing, 2002.
- [24] RAMER U. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves[J]. Computer Graphics & Image Processing, 1972, 1(3):244-256.
- [25] BADRINATH G S, GUPTA P. Stockwell transform based palm-print recognition [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(7):4267-4281.

作者简介



李德健, 2013 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2015 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 2018 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学讲师, 主要研究方向为机器视觉检测及数字图像处理。
E-mail: lidejian@ sut. edu. cn

Li Dejian received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2013, M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2015 and Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 2018, respectively. Now he is a lecturer in Shenyang University of Technology. His main research interests include machine vision inspection and digital image processing.



李绍丽 (通信作者), 2013 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2015 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 2018 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学讲师, 主要研究方向为机器视觉检测、数字图像处理及模式识别。

E-mail: lishaoli@ sut. edu. cn

Li Shaoli (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2013, M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2015 and Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 2018, respectively. Now she is a lecturer in Shenyang University of Technology. Her main research interests include machine vision inspection, digital image processing and pattern recognition.



苑玮琦, 1982 年于湖南大学获得学士学位, 1988 年于东北大学获得硕士学位, 1997 年于东北大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为机器视觉检测与图像识别。

E-mail: yuan60@ 126. com

Yuan Weiqi received his B. Sc. degree from Hunan University in 1982, M. Sc. degree from Northeastern University in 1988 and Ph. D. degree from Northeastern University in 1997, respectively. Now he is a professor in Shenyang University of Technology. His main research interests include machine vision inspection and image recognition.



曲津助, 2020 年于沈阳理工大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉检测。

E-mail: qwxeee@ sina. com

Qu Jinzhu received his B. Sc. degree from Shenyang Ligong University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate in Shenyang University of Technology. His main research interests include machine vision inspection and digital image processing.