

# 连接器表面裂纹检测方法研究

郁文玺, 徐贵力\*

南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016

**摘要** 针对连接器表面裂纹人工检测操作繁琐、效率低的问题,提出一种基于机器视觉的连接器表面裂纹智能检测方法。首先,利用基于随机采样一致性的直线拟合方法对待检测区域下边界进行拟合,以定位待检区域和边界。其中,基于单一尺度的形态学运算方法无法有效提取到裂纹区域,根据裂纹特点,提出一种基于多尺度形态学运算的裂纹提取方法,对比实验结果表明,该方法具有良好效果,实现了对裂纹区域的粗提取。再根据裂纹结构特征,提出一种自适应阈值分割方法完成对裂纹区域的分割。最后,通过 Blob 分析统计目标连通域的位置信息及目标区域的灰度响应强度,完成对真伪裂纹的判别。所提方法最终实现对连接器表面裂纹的实时在线检测,检测准确率可达 97.1%。

**关键词** 图像处理; 裂纹检测; 灰度形态学; 阈值分割; Blob 分析

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415015

## Connector Surface Crack Detection Method

Yu Wenxi, Xu Guili\*

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016, Jiangsu, China

**Abstract** To simplify the tedious and inefficient manual inspection for connector surface cracks, an intelligent inspection method for connector surface cracks based on machine vision is proposed. To find the region to be examined and the border, the lower boundary of the area to be inspected is first fitted using a fitting approach based on random sampling consistency. Among them, the morphological operation method based on single scale can not effectively extract the crack region. Based on the crack characteristics, this study proposes a crack extraction technique based on multiscale morphological operation, and the comparative experiment demonstrates that this method has a good result and accomplishes the coarse extraction for the fracture region. Then, according to the crack structure characteristics, an adaptive threshold segmentation method is proposed to complete the segmentation for the crack region. Finally, Blob analysis is used to statistically distinguish between genuine and false cracks based on the geographical information of the target connectivity domain and the gray-scale response intensity of the target area. Results show that the proposed method achieves real-time online detection for connector surface fractures with a detection accuracy of 97.1%.

**Key words** image processing; crack detection; grayscale morphology; threshold segmentation; Blob analysis

## 1 引言

连接器是一种用于连接柔性电路板与普通印刷电路板的连接器件,随着新技术、新材料的不断涌现,连接器产品开始呈尺寸微小化和薄型化、线槽和主体高精度化趋势发展<sup>[1]</sup>。为满足表面贴装制程的要求,整个连接器产品的塑胶端面都必须具有良好的平整度和共面度,如果塑胶端面存在裂纹,则连接器与排线连接不良,从而影响产品的使用,因此对连接器表面进行裂

纹检测有着重要的意义。

目前大多数工厂仍然采用传统的人工检测方法<sup>[2]</sup>,该方法效率低下、劳动强度较高且缺乏一定的客观性。机器视觉具有非接触、精度高、响应速度快、适应非光学恶劣环境等许多优势,相比于人工检测具有更快的速度、更高的稳定性和可重复性,同时还可以提高企业的生产效率和降低劳动成本。随着科技的发展,该技术在各个行业生产中得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。

在基于机器视觉的缺陷检测方法中, Mokhtari

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-05-13; 录用日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(62073161)

通信作者: \*guilixu@nuaa.edu.cn

等<sup>[4]</sup>提出了一种基于裂缝多种特征的统计方法,并采用滤波特征子集选择方法对裂缝特征的显著性进行了综合统计分析,实现了对地面裂缝更加鲁棒的识别。赵芳等<sup>[5]</sup>提出一种新的 Canny 边缘检测方法,该方法不仅提高了对路面裂缝检测的准确性,还可以保障对视频数据的实时处理。王耀东等<sup>[6]</sup>提出了一种全局与局部相结合的预处理算法,并利用基于连通区域的多级滤波算法,实现了对地铁隧道表面裂缝的智能检测。吴玉龙等<sup>[7]</sup>提出了一种基于膨胀圆的裂缝检测算法,通过不同尺度的圆,该算法实现对裂缝几何模型的建立与复原。王军等<sup>[8]</sup>提出一种基于 Hessian 矩阵的路面裂缝检测算法,通过基于 Hessian 矩阵的多尺度滤波运算,该算法实现对大部分复杂路面环境的裂缝检测。李强等<sup>[9]</sup>提出了一种基于主成分分析的陶瓷瓦表面裂缝检测算法,该算法可以高效地检测出具有复杂背景干扰的陶瓷瓦裂纹。周飘等<sup>[10]</sup>提出基于多尺度 Hessian 矩阵滤波的陶瓷瓦表面裂缝检测算法,通过多尺度 Hessian 矩阵的特征值,该算法构建陶瓷瓦裂纹相似性函数,实现对陶瓷瓦裂纹特征的增强,最终实现复

杂背景干扰下对陶瓷表面裂纹的高效提取。徐德刚等<sup>[11]</sup>针对匣钵底面裂纹图像背景复杂等问题,提出了一种基于扇形邻域差异直方图的匣钵裂纹检测方法,该方法最终的检测准确率和召回率都可达 90%。刘培等<sup>[12]</sup>提出一种基于半监督学习的裂纹检测方法,该方法将多尺度模块引入到裂纹检测网络模型中,仅通过 6.25% 的像素级标注数据进行全监督训练,就取得了与全监督方法相当的识别精度和召回率。尽管如此,在有划痕、丝状灰尘等复杂背景下,从厘米级连接器产品中精确且高效地检测出真正裂纹缺陷仍是一项具有挑战性的任务。

## 2 裂纹检测方法

图 1 为根据连接器的裂纹特点,集合图像处理原理,设计的裂纹检测方法流程。首先在原始图像中定位到实际待检测区域,然后通过多尺度形态学运算对裂纹进行提取,再通过自适应阈值分割方法,最后依据裂纹实际特征建立相应指标阈值对真伪裂纹进行判别。

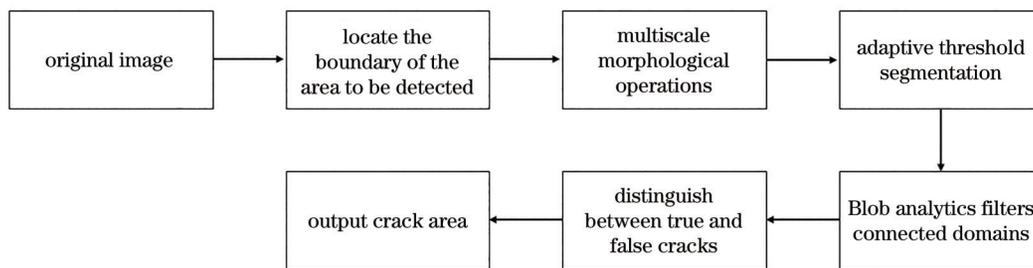


图 1 设计的方法流程

Fig. 1 Flow chart of the designed method

### 2.1 待检测区域边界定位

由于原始图像非待检区域会对后续裂纹检测产生不必要干扰,并且裂纹分布位置与待检测区域边界位置相关联,这一特征可作为真伪裂纹判别的重要依据,所以在裂纹检测前,首先需要对待检测区域的边界进行精确定位,主要步骤如下。

1) 获取原始图像,如图 2 所示,以该图像下半区域为待处理图像。

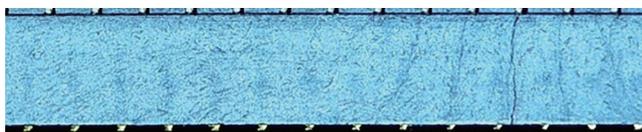


图 2 原始图像

Fig. 2 Original image

2) 将待处理图像转换为灰度图像,并进行二值化,如图 3 所示。

3) 提取该二值图像白色边界的点所在的一系列坐标  $(x_i, y_i)$ ,进行直线拟合。由于坐标信息中含有较



图 3 图像二值化处理效果。(a)待处理图像;  
(b)二值化处理结果

Fig. 3 Result of image binarization processing. (a) Image to be processed; (b) result of binarization processing

多噪点,因为随机采样一致性(RANSAC)<sup>[13]</sup>具有抗噪拟合优点,所以采用 RANSAC 对这些点进行直线拟合,具体拟合过程如下。

a) 从提取到的  $N$  个二维像素坐标中随机抽取 2 个坐标进行直线拟合,确定当前直线参数  $k_i$  和  $b_i$ 。

b) 由于提取到的坐标中含有噪点,并不是严格线性,坐标在线性范围内存在一定波动,故设置距离拟合线容差范围为  $0 \sim 3$ 。找出距离拟合曲线容差范围内的点,并统计点的个数  $n_i$ 。

c) 选取合适的迭代次数,重新选取 2 个坐标,重复

步骤 a)~b), 直到结束迭代。

d) 每一次拟合后, 容差范围内都有对应的数据点数  $n_i$ , 找出数据点个数最多的情况 [ $n = \max(n_i)$ ] 所对应的  $k_i$  和  $b_i$ , 得到最终的拟合结果,

$$y_d = kx_d + b. \quad (1)$$

4) 将该拟合线按实际待检测区域宽度  $d$  向上平移, 即得到待检测区域上边缘拟合线,

$$y_u = kx_u + b - d. \quad (2)$$

最终得到精确的待检测区域边界及待检区域掩模图像, 如图 4 所示。

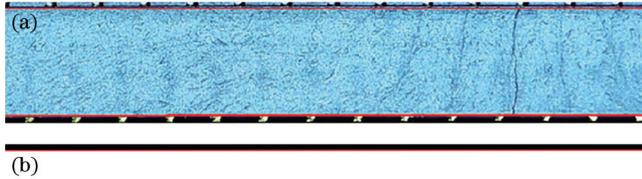


图 4 边界检测效果图。(a)待检测区域图像;(b)待检测区域掩模图像

Fig. 4 Boundary detection result. (a) Image of the area to be detected; (b) masked image of the area to be detected

## 2.2 基于多尺度形态学滤波的裂纹提取方法

裂纹在连接器表面呈现为较亮背景下的线条状暗区域, 如图 2 所示。而形态学滤波中的黑帽运算方法可以突出比原图轮廓周围区域更暗的区域, 所以基于这一特性, 采用黑帽运算对连接器表面裂纹进行初步提取。黑帽运算由形态学最基本的操作腐蚀和膨胀组成。设待检测区域图像为  $F(x, y)$ , 滤波所采用的结构元素为  $S(x, y)$ , 则灰度级腐蚀运算公式为

$$(F \ominus S)(x, y) = \min \{ F(x + s, y + t) - S(s, t) \mid (x + s, y + t) \in D_F, (s, t) \in D_S \}. \quad (3)$$

灰度级膨胀运算公式为

$$(F \oplus S)(x, y) = \max \{ F(x - s, y - t) - S(s, t) \mid (x - s, y - t) \in D_F, (s, t) \in D_S \}, \quad (4)$$

式中:  $D_S$  为结构元素  $S(x, y)$  所对应的像素坐标区域;  $D_F$  为待检测图像  $F(x, y)$  所对应的像素坐标区域。灰度级闭运算是先膨胀后腐蚀的步骤, 可表示为

$$(F \cdot S)(x, y) = [(F \oplus S) \ominus S](x, y). \quad (5)$$

黑帽是闭运算结果与原图像之差, 可表示为

$$H(x, y) = (F \cdot S)(x, y) - F(x, y). \quad (6)$$

但是验证实验发现, 单一的线性结构元素并不能提取完整的裂纹特征。根据待检裂纹实际结构特征, 构造了角度分布范围为  $45^\circ \sim 135^\circ$  的 12 种结构元素  $S_i(x, y) (i = 1, 2, \dots, 12)$ , 如图 5 所示。其中, 图 5(g)

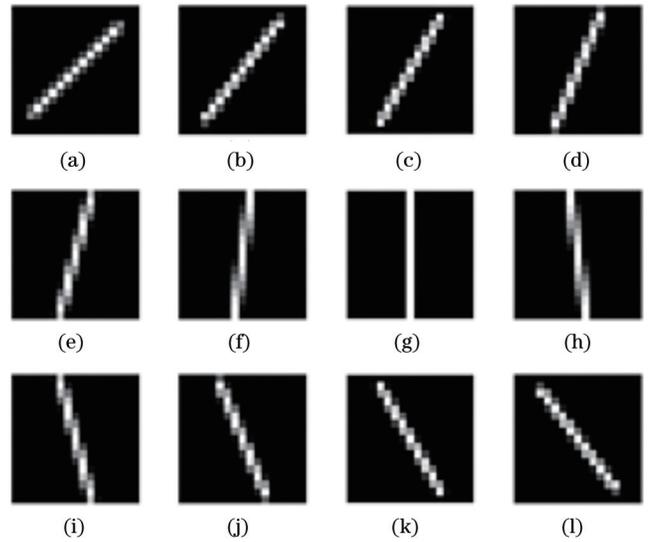


图 5 构造的 12 种结构元素

Fig. 5 12 structural elements constructed in this paper

为核尺寸大小为  $15 \times 15$  像素、宽高比为 3:15 的竖直线性结构, 线性区域内像素值为 1, 其余部分像素值为 0; 图 5(f)~(a) 为图 5(g) 按顺时针方向每隔  $7.5^\circ$  依次旋转后得到的新结构元素, 图 5(h)~(l) 为图 5(g) 按逆时针方向每隔  $7.5^\circ$  依次旋转后得到的新结构元素, 对旋转后所对应线性区域非整数坐标部分的像素值采用双线性插值法进行填充。然后通过多尺度形态学黑帽运算,

$$P(x, y) = \max [(F \cdot S_i)(x, y)] - F(x, y), \quad (7)$$

实现对裂纹区域的提取, 处理结果如图 6 所示。由图 6 可见, 所提基于多尺度形态学运算的裂纹提取方法相较于单一线性结构黑帽运算具有更好的提取效果。

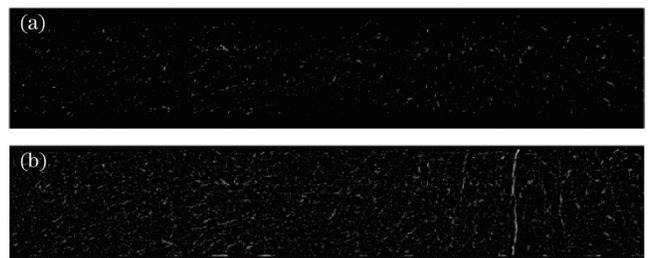


图 6 所提方法与黑帽运算的提取效果对比。(a) 黑帽运算; (b) 所提方法

Fig. 6 Comparison of extraction effect between the proposed method and black hat operation. (a) Black hat operation; (b) proposed method

## 2.3 基于自适应阈值分割的裂纹分割方法

常用阈值分割方法是由日本学者大津<sup>[14]</sup>提出的最大类间方差法, 该算法属于全局阈值法。当图像中的目标和背景的灰度区别不明显或图像灰度呈现多峰时, 应用此算法分割会使图像的信息丢失, 出现比较严重的分割错误, 并且全局使用大津法计算阈值时计算

量较大。针对上述问题,首先对裂纹分布特征进行分析,确定出裂纹分布所在的局部区域,然后在区域内计算局部阈值,通过该局部阈值完成对全局图像的阈值分割,实现对黑帽运算粗检测结果的二次精检测。所提方法的处理过程如下。

1) 裂纹实际结构为竖裂纹特征,对提取的裂纹粗检测概率图按列方向进行投影,将二维裂纹概率图  $P(x_j, y_i)$  转换为一维裂纹概率图  $Z(x_j)$ :

$$Z(x_j) = \sum_{i=1}^m P(x_j, y_i), \quad (8)$$

式中:  $m$  表示概率图  $P(x_j, y_i)$  的行数。

2) 根据裂纹宽度范围和裂纹可倾斜范围,设定间隔  $h=15$ ,对一维数据进行高斯滤波,结果如图 7 所示。

3) 找出滤波结果中最大值所对应的像素列  $x$ 。在二维裂纹概率图中以该像素列为中心,左右延展 20 像素定义矩形区域,设该区域为  $f(x, y)$ 。

4) 在区域  $f(x, y)$  内使用最大类间方差法求取该局部区域的分割阈值  $T$ ,然后根据公式

$$P(x_i, y_i) = \begin{cases} P(x_i, y_i) = 1, & P(x_i, y_i) > T \\ P(x_i, y_i) = 0, & P(x_i, y_i) \leq T \end{cases}, \quad (9)$$

完成对式(7)所得概率图  $P(x, y)$  的全局自适应阈值分割,分割效果如图 8 所示。

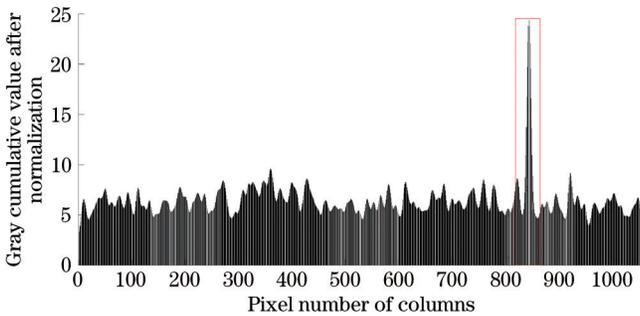


图 7 列向投影结果

Fig. 7 Columnwise projection result

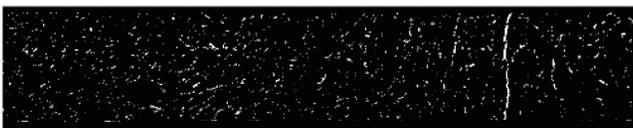


图 8 图像分割结果

Fig. 8 Image segmentation result

## 2.4 基于 Blob 分析的裂纹特征提取

从图 8 可以发现,图像分割结果中,不仅保留裂纹区域,还存在较多背景干扰。由于 Blob 分析是对图像中相同灰度值的前景像素进行检测的一种方法<sup>[15]</sup>,可以根据分析结果准确区分背景像素,所以采用 Blob 分析对背景干扰进行滤除。通过统计区域面积、位置特征、方向特征、形状特征信息,实现对背景干扰的准确滤除。

### 2.4.1 区域面积

针对区域内的许多离散的小区域,采用区域面积阈值来滤除。对于二值图像,像素值为 1 代表目标区域的点,  $f(x, y)$  表示图像中像素点  $(x, y)$  处的像素值,  $R$  为所有像素点的集合,  $R_d$  为目标区域中像素点的集合,区域面积计算公式为

$$A = \sum_{(x,y) \in R_d} f(x, y). \quad (10)$$

### 2.4.2 位置特征

通过目标区域上下端点至图像上下边界的欧氏距离来描述区域的位置。如图 9 所示,假设目标区域为  $R(x, y)$ , 区域上端点为  $(x_u, y_u)$ , 区域下端点为  $(x_d, y_d)$ , 则根据式(1)和式(2),可得区域至上边界距离  $L_u$  及区域至下边界距离  $L_d$ :

$$L_u = |y_u - (kx_u + b - d)|, \quad (11)$$

$$L_d = |y_d - (kx_d + b - d)|. \quad (12)$$

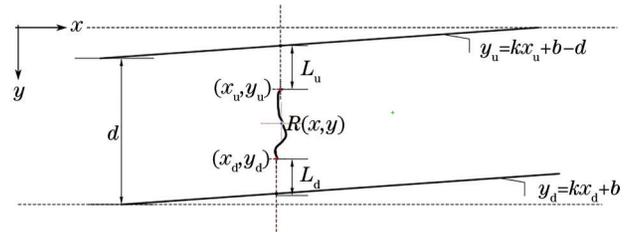


图 9 位置特征示意图

Fig. 9 Schematic of location features

### 2.4.3 方向特征

为统计目标区域的方向,采用物体主轴方向来描述目标方向,它是与目标区域最小惯量轴同方向的最小二阶中心距<sup>[16]</sup>。对于二元有界函数  $f(x, y)$ ,几何矩定义为

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y), \quad (p, q = 0, 1, 2, \dots). \quad (13)$$

目标区域重心坐标为

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}. \quad (14)$$

中心距可定义为

$$M_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y). \quad (15)$$

则主轴方向  $\theta$  可表示为

$$\tan \theta = \frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}}, \quad (16)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}}. \quad (17)$$

如图 10 所示,对于主轴方向为与  $x$  轴正向的最小夹角,如果角度位于  $y$  轴正方向,则  $\theta > 0$ , 位于  $y$  轴负方向,则  $\theta < 0$ 。

### 2.4.4 形状特征

针对裂纹的线性结构特征,采用图 11 所示的目标区域等效椭圆<sup>[17]</sup>长轴长度  $l$  对裂纹的线性长度特征进

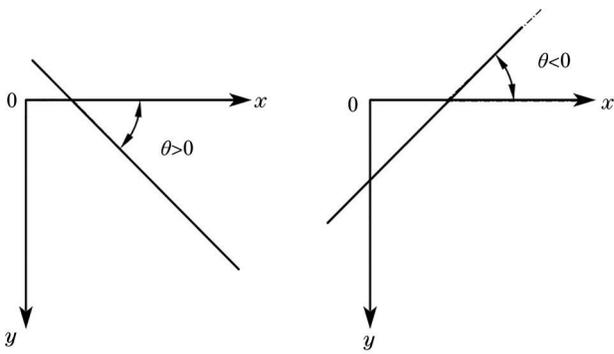


图 10 主轴方向示意图

Fig. 10 Schematic of spindle direction

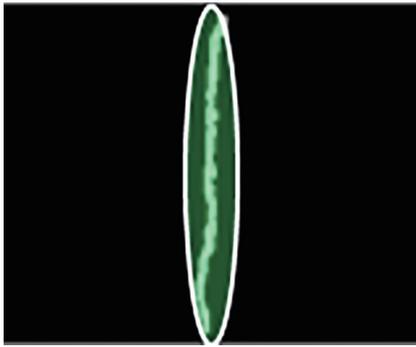


图 11 裂纹区域等效椭圆示意图

Fig. 11 Schematic of the equivalent ellipse of the cracked area

行拟合,表达式为

$$l = 2 \sqrt{2 \left( M_{20} + M_{02} + \sqrt{(M_{20} + M_{02})^2 + 4M_{11}^2} \right)}. \quad (18)$$

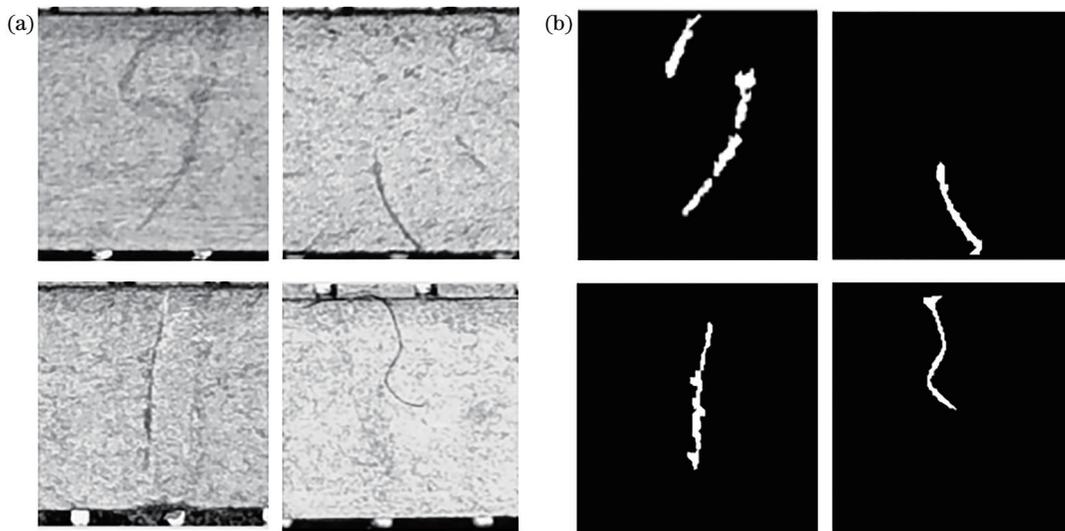


图 13 部分伪裂纹及检测结果。(a)伪裂纹原图;(b)检测结果

Fig. 13 Some pseudo cracks and detection results. (a) Pseudo-crack original images; (b) test results

1) 设置连通域上端点至待检测区域上边界欧氏距离  $L_u$  的阈值为  $T_u$ , 连通域下端点至待检测区域下边界欧氏距离  $L_d$  阈值为  $T_d$ ;

2) 定位裂纹在原图所对应的位置,并求出该位置

通过 Blob 分析可知,经过阈值分割后的图像中存在较多的背景干扰,这些干扰是区域面积小于 20 像素的离散区域,这些区域之间通常不存在相互关联,可以直接被滤除;并且通过分析实际裂纹的结构特征可知,待检裂纹属于纵向裂纹,虽然其分布不会显示为绝对直线,但对应目标区域的主轴方向与水平方向的夹角始终处于  $(-60^\circ, 60^\circ)$ ,且裂纹区域的拟合长轴长度  $l$  通常大于 15 像素。依据上述分析结果,可通过设置面积阈值、主方向范围阈值以及拟合长度阈值,将真实裂纹从背景中分割出来。图 8 所对应的分割结果如图 12 所示。



图 12 Blob 分析检测效果

Fig. 12 Detection result of Blob analysis

### 2.5 真伪裂纹判别

除真实存在的裂纹外,在实际检测场景中,待检测连接器表面还存在较多因注胶分布不均匀形成的胶痕以及连接器运转过程中相互刮蹭产生的划痕,这些痕迹实际上并不会影响连接器产品的正常使用。但是由于这些伪裂纹与实际裂纹有很强的相似性,所以在裂纹提取过程中,这些伪裂纹很大程度上会被误检为裂纹而被剔出产品线。

针对背景中存在的伪裂纹(如图 13 所示),在 Blob 分析基础上,通过实验方法确定了几种指标阈值用于降低误判。

内所有像素点的灰度平均值  $m_{gray}$  作为该裂纹区域的响应强度值,并设置响应强度阈值为  $M$ ;

3) 设置裂纹区域拟合路径长度  $l$  的阈值为  $L$ 。

通过反复实验,最终确定各项阈值分别为  $T_u=10$ ,

$T_d=10, M=0.35, L=25$ , 当待判定裂纹各项指标满足

$$\begin{cases} l > L \\ L_u < T_u \\ m_{\text{gray}} < M \end{cases} \text{ OR } \begin{cases} l > L \\ L_d < T_d \\ m_{\text{gray}} < M \end{cases}, \quad (19)$$

即可判定该检测区域内存在裂纹。

### 3 裂纹检测实验

#### 3.1 软硬件搭建

采用 AOSVI-M50 工业相机作为图像采集设备, 该相机最高分辨率为  $2592 \times 1944$  像素, 镜头使用工业显微镜镜头, 目镜倍率为  $0.5 \times$ , 物镜倍率为  $0.7 \times \sim 4.5 \times$  连续可调。光源采用环形 LED 光源。共采集 2086 幅图像用于检验所提方法。实验中所有算法都通过 MATLAB2017b 实现并运行在 IntelCore i7 处理器上。通过现场测试对检测系统性能进行验证, 裂纹检测系统如图 14 所示。

#### 3.2 方法验证

为验证所提方法的有效性, 在相同数据集上对文献[5]中的方法、文献[10]中的方法和所提方法进行对比。文献[5]中的方法是一种基于改进 Canny 算子的裂纹检测方法。文献[10]中的方法是一种基于

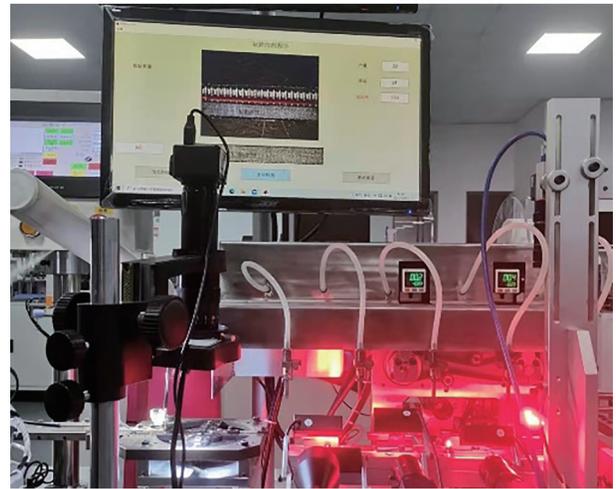


图 14 裂纹检测系统实物图

Fig. 14 Physical picture of crack detection system

Hessian 矩阵多尺度滤波的裂纹检测方法。不同方法的对比检测效果如图 15 所示。

裂纹检测系统性能通过以下指标进行评定: 准确率, 系统给出准确结果的比率; 误判, 系统将合格的产品误判为有裂纹的产品; 漏判, 系统将有裂纹的产品漏

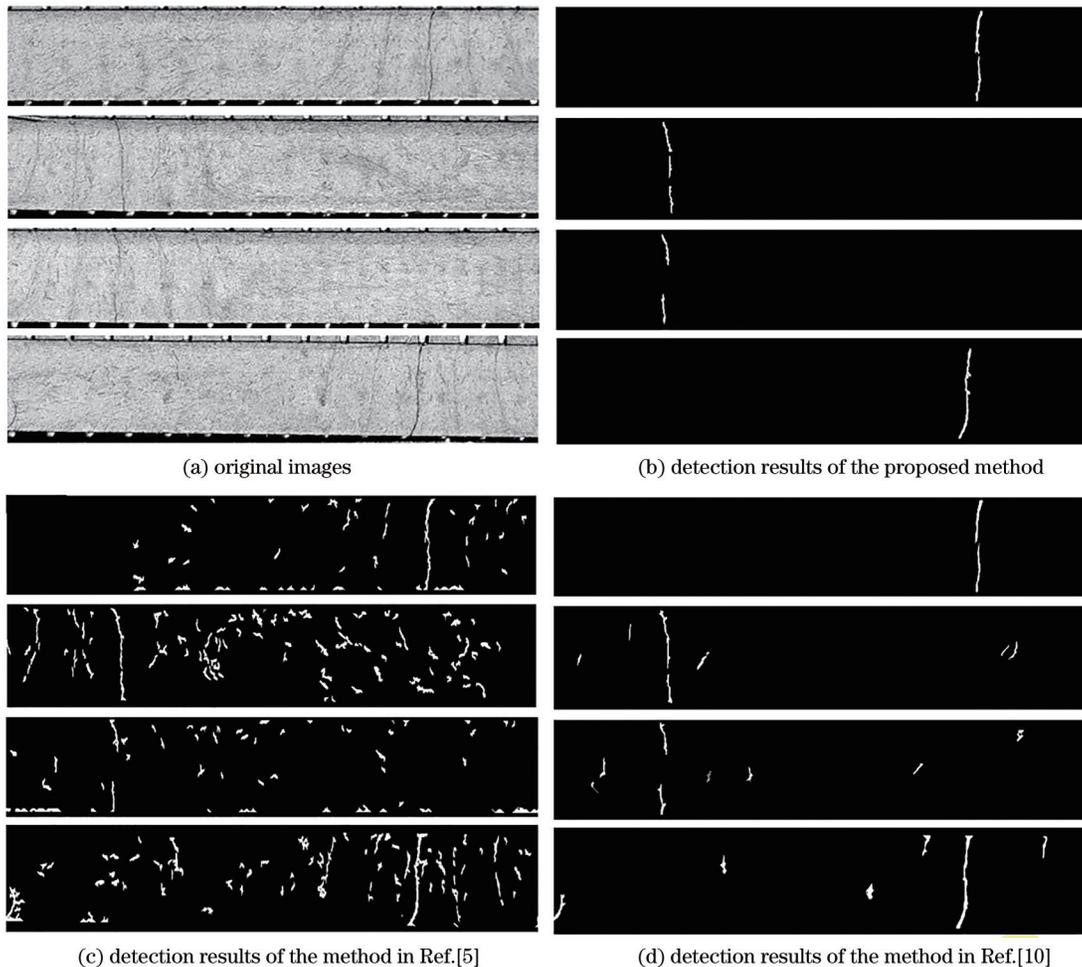


图 15 不同方法的检测效果对比

Fig. 15 Detection result comparison of different methods

判为合格产品。数据样本整体检测结果如表 1 所示。

从最终实验结果观测:文献[5]基于改进 Canny 算子的裂纹检测方法并没有将裂纹从背景图像中单独分割出来,这是由于改进后的 Canny 算子在背景比较复杂的情况下依旧难以区分真实裂纹与背景中胶痕的信息,所以在提取裂纹的过程中,同时会引入与裂纹相似背景的干扰;文献[10]中的方法采用多个尺度高斯滤波器求解 Hessian 矩阵,重构裂纹相似性函数,该方法虽然提高了裂纹提取的准确性,但降低了算法效率,同

时也引入了部分与裂纹相似背景的干扰。对比各个方法的检测效果,所提方法在检测连接器表面裂纹时,检测效果优于对比方法。同时从表 1 可以看出,对大量样本进行检测时,所提方法与文献[5]中的方法、文献[10]中的方法都能将绝大多数裂纹检测出来,但由于所提方法对裂纹有更严格的判别指标,故所提方法对合格产品的误检率明显低于文献[5]与文献[10]中的方法。因此相较于这两种方法,在对连接器表面裂纹进行检测时,所提方法可以达更高的检测准确率。

表 1 检测结果

Table 1 Detection results

Method	Total number of samples	Correctly identified number of samples	Number of false detections	Number of missed tests	False detection rate / %	Accuracy / %
Method in Ref. [5]	2086	1848	236	2	11.4	88.6
Method in Ref. [10]	2086	1977	107	2	5.2	94.8
Proposed method	2086	2025	58	3	2.9	97.1

## 4 结 论

为解决连接器表面裂纹检测问题,提出了一种基于机器视觉的连接器表面裂纹智能检测方法。通过对待检测区域下边界的拟合,精确定位待检区域;然后,利用提出的多尺度形态学运算方法实现对裂纹区域的粗提取,并根据裂纹结构特征,自适应分割出裂纹区域;最后,基于经验策略通过 Blob 分析对真伪裂纹进行判别。通过实验,对所提方法与文献[5]和文献[10]中的方法进行比较,结果表明,所提方法可以有效检测连接器表面裂纹,同时具有较低的误检率,总体检测准确率可达 97.1%。

## 参 考 文 献

- [1] Chen C H, Wang C C, Lin C Y, et al. Realization of defect automatic inspection system for flexible printed circuit (FPC)[M]//Hinduja S, Fan K C. Proceedings of the 35th international MATADOR conference. London: Springer, 2007: 225-228.
- [2] 褚娜. FPC 连接器高精度缺陷检测技术研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2013.  
Chu N. Research on technology for high precision defect inspection of FPC connectors[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2013.
- [3] 薛峰, 陈川. 机器视觉技术发展及其工业应用[J]. 无线互联科技, 2016(13): 137, 144.  
Xue F, Chen C. Development of machine vision technology and its industrial applications[J]. Wireless Internet Technology, 2016(13): 137, 144.
- [4] Mokhtari S, Wu L L, Yun H B. Statistical selection and interpretation of imagery features for computer vision-based pavement crack-detection systems[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(5): 04017054.
- [5] 赵芳, 周旺辉, 陈岳涛, 等. 改进的 Canny 算子在裂缝

检测中的应用[J]. 电子测量技术, 2018, 41(20): 107-111.

Zhao F, Zhou W H, Chen Y T, et al. Application of improved Canny operator in crack detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(20): 107-111.

- [6] 王耀东, 余祖俊, 白彪, 等. 基于图像处理的地铁隧道裂缝识别算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1489-1496.

Wang Y D, Yu Z J, Bai B, et al. Research on image processing based subway tunnel crack identification algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1489-1496.

- [7] 吴玉龙, 岳大森, 丁勇, 等. 基于图像处理的膨胀圆裂缝检测算法[J]. 无损检测, 2020, 42(3): 9-13.

Wu Y L, Yue D S, Ding Y, et al. Crack detection algorithm of expansion circle based on image processing [J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(3): 9-13.

- [8] 王军, 孙慧婷, 姜志, 等. 基于 Hessian 矩阵多尺度滤波的路面裂缝图像检测方法[J]. 计算机应用, 2016, 36(S1): 174-176, 183.

Wang J, Sun H T, Jiang Z, et al. Pavement crack detection based on Hessian matrix multi-scale filtering[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(S1): 174-176, 183.

- [9] 李强, 曾曙光, 郑胜, 等. 基于机器视觉的陶瓷瓦表面裂纹检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 081004.

Li Q, Zeng S G, Zheng S, et al. Machine vision based detection method for surface crack of ceramic tile[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 081004.

- [10] 周飘, 李强, 曾曙光, 等. 基于多尺度 Hessian 矩阵滤波的陶瓷瓦表面裂纹检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101022.

Zhou P, Li Q, Zeng S G, et al. Surface crack detection method for ceramic tile based on hessian matrix multi-scale filtering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101022.

- [11] 徐德刚, 李翔鑫, 阳春华, 等. 基于扇形邻域差异直方图的匣钵裂纹检测[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815018. Xu D G, Li X X, Yang C H, et al. Crack extraction from sagger bottom based on sector neighborhood difference histogram[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815018.
- [12] 刘培, 黄雅平. 基于图像语义分割的半监督裂纹检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0615004. Liu P, Huang Y P. Semi-supervised crack-detection method based on image-semantic segmentation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0615004.
- [13] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [14] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [15] 马瑶, 张海宁. Blob分析与亚像素定位算法在LED检测机的机器视觉系统中的应用[J]. 科技广场, 2009(5): 106-108. Ma Y, Zhang H N. The Blob analysis and sub-pixel location algorithm in machine vision system of LED testing machine[J]. Science Mosaic, 2009(5): 106-108.
- [16] 宗苏. 浅谈如何判定二值图像中物体的方向[J]. 计算机光盘软件与应用, 2012, 15(21): 29, 102. Zong S. How to determine the direction of objects in binary images[J]. Computer CD Software and Applications, 2012, 15(21): 29, 102.
- [17] 孙即祥. 图像分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 127-131. Sun J X. Image analysis[M]. Beijing: Science Press, 2005: 127-131.