

表面弱边缘瑕疵检测算法及应用

蒋洁琦¹, 杨庚¹, 刘沛东², 钱晨³

(1. 南京邮电大学 计算机学院、软件学院, 江苏 南京 210046;

2. 江苏亨通光电有限公司, 江苏 苏州 215200;

3. 南京邮电大学 光电学院, 江苏 南京 210046)

摘要:工业环境中,产品表面质量是产品质量的重要组成部分,也是商品商业价值的重要保障。产品表面瑕疵由于受到光源、光照方式等因素的影响,容易形成灰度变化相对缓慢的过渡边缘即弱边缘。在工业生产中,弱边缘瑕疵由于其灰度缓慢变化,所以相对强边缘瑕疵较难被检测出。针对这一问题,提出了一种有效检测弱边缘瑕疵的方法。该方法利用Scharr算子能突出弱边缘的优势,结合形态学开闭滤波,从而达到强化弱边缘的效果。根据形成的弱边缘增强图像,利用最大熵阈值对图像进行分割得到瑕疵。对光缆生产流水线上采集的图像利用该方法进行测试分析。实验结果表明,使用改进的弱边缘瑕疵检测算法能更好地检测出弱边缘,从而更加有效地识别表面瑕疵,提高了产品质量。

关键词:图像处理;弱边缘;表面瑕疵检测;Scharr算子;边缘检测

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)05-0142-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.05.030

Surface Weak Edge Flaw Detection Algorithm and Its Application

JIANG Jie-qi¹, YANG Geng¹, LIU Pei-dong², QIAN Chen³

(1. School of Computer Science and Software, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210046, China;

2. Jiangsu Hengtong Au Optronics Co, Suzhou 215200, China;

3. School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: In the industrial environment, the surface quality of products has become an important part of product quality as well as an important guarantee for the commercial value of commodities. Influenced by factors such as light source, light mode and so on, product surface defects can be prone to form weak edge that the changes in their gray scale are relatively slow. In industrial production, compared with strong edge blemishes, weak edge blemishes are more difficult to be detected due to their gradual change in gray level. Therefore, we propose a method to detect the weak edge defects effectively. In order to strengthen the weak edge, the advantage that Scharr operator can highlight the weak edge is utilized, combining with the morphological opening and closing filtering, and then the maximum entropy threshold is used to segment the image to get the flaw. So far, the images collected on the production line of optical fiber cable are tested and analyzed. Experiment shows that the improved weak edge detection algorithm can better detect weak edge flaws, which identifies surface defects more effectively and accordingly improves product quality.

Key words: image processing; weak edge; surface defect detection; Scharr operator; edge detection

0 引言

在产品的生产加工过程中,由于受到表面材料、生产工艺以及生产者水平等因素的影响,产品表面总会

出现一些缺陷,常见的缺陷主要包括:小孔、鼓包、气泡、刮痕等。这些缺陷不仅会影响产品表面的美观,还

会造成其机械性能的下降,因此对于产品表面缺陷的检测显得尤为重要。

近年来,国内从事表面检测技术开发的公司不断增加,如北京大恒图像、北京和利时、北京凌云光视、上海法视特、深圳赛克数码、苏州南光电子,以及国内许

收稿日期:2018-05-20

修回日期:2018-10-09

网络出版时间:2018-12-21

基金项目:国家自然科学基金(61572263);江苏省自然科学基金政策引导类计划-前瞻性联合研究项目(2016ZS04)

作者简介:蒋洁琦(1994-),女,硕士研究生,研究方向为图像处理;杨庚,博士,教授,研究方向为网络与信息安全、分布式与并行计算、大数据隐私保护。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20181221.1524.022.html>

多高校科研院等都在致力于表面检测技术的研发,但是还未能形成一个全面成熟的解决方案。

目前比较常用的解决方案是基于图像处理的瑕疵检测技术,该方案主要局限于图像去噪^[1]、边缘检测^[2-4]、图像分割^[5-6]等步骤。当产品表面受到光源、光照方式、图像采集方式等因素的影响,使得图像缺陷边缘的灰度有较宽的过渡区,不是理想的阶跃型边缘,形成了相对缓慢的过渡边缘即弱边缘^[7-8]时,这些方法存在对弱边缘信息不敏感从而难以完整提取瑕疵的缺点。

针对弱边缘难以提取的问题,文中提出了表面弱边缘瑕疵检测算法,即通过引入 Scharr 算子,在原图像中融合 Scharr 边缘图像,这不仅保留了原有图像的强边缘,而且利用 Scharr 增强弱边缘瑕疵的优势,同时在此基础上结合形态学进行优化表面效果,从而有效准确地提取出强弱边缘瑕疵,以获得理想的分割结果。

1 相关工作

传统人工检测具有速度慢,效率低下,人眼的空间分辨率有限,无法识别相当微小的瑕疵,人易受其主观意识影响,检测的标准不统一等缺点,这些缺点使得其在实际应用中具有很大的局限性。因此,人工检测已经不能满足企业对检测速度、精度和可靠性的要求。针对传统人工检测技术存在的问题,研究出有效准确的检测产品表面缺陷的技术,是当前工业生产中的一个主要课题。

长飞光纤光缆有限公司^[9]于2013年提出了一种线缆表面缺陷在线检测装置及方法,主要检测光缆表面划痕部分。无锡港湾网络科技有限公司^[10]于同年也提出了一种基于机器视觉的线缆在线检测方法,这种方法主要检测线缆在生产过程中字符的错印、漏印、喷印模糊等。目前,对于产品表面瑕疵检测的相关技术还不成熟。

产品表面瑕疵检测主要分为基于机器学习和基于图像处理两大类方法。基于机器学习的表面瑕疵检测算法把瑕疵检测看成是一个像素聚类的过程,比较典型的有混合高斯模型分析法和随机场模型分析法。文献^[11]采用基于混合高斯模型分析的方法,虽然得到

了较好的检测效率,但是计算量大;随机场模型在纹理模型中是比较重要的一类模型,具体包括 AR 模型、ARMA 模型、MA 模型和随机马尔可夫模型,文献^[12]正是运用随机场模型的分析方法,通过参数表示一幅图像的信息,但是对于其模型的选取具有一定难度。基于图像处理的表面瑕疵检测算法主要通过图像预处理、图像分割等过程来实现瑕疵检测。在图像处理的发展过程中,研究人员对不同的对象采用与其合适的表面瑕疵检测算法,取得了良好效果。例如,文献^[13]利用阈值和边缘检测图像分割方法,有效实现了钢板表面瑕疵的分割。文献^[14]将 SVM 应用于钢丝杆表面检测,通过采用双阈值二值化、形态学处理、边缘检测等方法提取瑕疵特征,并利用支持向量机实现分类,对因氧化而导致的钢丝杆表面裂纹和脱磷可以进行有效的识别。文献^[15]设计出一种铜线表面缺陷高速检测系统,通过使用 CCD 相机获取线缆图像,经过图像预处理、图像分割、图像二值化等过程,实现铜线表面缺陷的检测与识别。

在工业生产中,产品表面弱边缘瑕疵由于其灰度缓慢变化,所以弱边缘信息难以提取。在基于图像处理的瑕疵检测过程中,传统的瑕疵检测技术主要运用一般图像处理流程来解决强边缘瑕疵,这些方法存在对弱边缘信息不敏感从而难以完整提取瑕疵的缺点。与相关研究工作相比,文中更加注重表面弱边缘瑕疵的检测,在一般的瑕疵检测流程基础上提出了弱边缘瑕疵检测算法。

2 弱边缘瑕疵检测算法设计

一般图像处理过程中瑕疵检测的流程为图像预处理、图像分割两部分,根据对瑕疵图片的了解,产品表面瑕疵由于受到外界因素的影响,图像缺陷边缘的灰度可能会形成相对缓慢的过渡边缘即弱边缘,弱边缘在传统边缘检测中不易被分割出来。因此,文中在一般检测方法的图像预处理之后添加 Scharr 算子来突出弱边缘,同时在此基础上结合形态学开、闭操作来滤除噪声,较好地分割开各个缺陷区域并且使表面纹理趋于平滑,为阈值分割打下基础。最后,再进行图像分割得出检测结果。算法流程如图1所示。

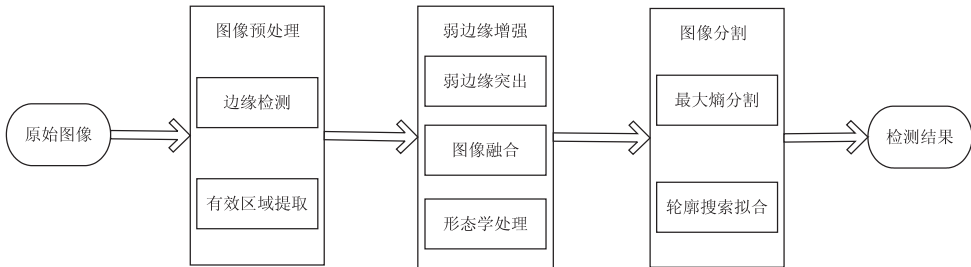


图1 弱边缘检测算法流程

2.1 图像预处理

2.1.1 边缘检测

Canny 算子^[3]是 John Canny 于 1996 年提出的,同时也给出了 3 个准则来评价边缘检测性能的优劣:

(1)信噪比准则,即判定非边缘点为边缘点的概率以及判定边缘点为非边缘点的概率都要很低;

(2)定位精度准则,即检测出来的边缘点应该尽可能都在实际边缘中心;

(3)单边缘响应准则,即单一边缘产生多个响应的概率尽可能要低,并且应该最大程度抑制响应虚假边缘。

Canny 算子边缘检测正是在满足这 3 个准则的最优解的基础上实现的,所以对于图像中物体边缘敏感性相对较高,同时对光缆表面背景噪声也具有很好的抑制和消除的作用。

2.1.2 有效区域提取

有效区域提取是将研究对象从采集的图像中提取出来,使得感兴趣的目标与背景分割,从而减少图像背景对后续瑕疵检测造成干扰。文中实验对象为光缆,即要将光缆从背景中提取出来。通过 Canny 算子边缘检测已经能够得到光缆的轮廓,并且由于光缆图像轮廓类似平行四边形,因此通过对图像像素点第一列和最后一列分别进行自上而下和自下而上的遍历,找出像素点灰度值突变的点并记录它们的位置,得到平行四边形四个点,然后通过把平行四边形上下两条边以外的像素点灰度值置为 0,即让其显示黑色,很快能分割出光缆区域,为后面瑕疵检测奠定基础。

2.2 弱边缘增强

2.2.1 弱边缘突出

在 2.1 节得到的去除背景后的图像中添加 Scharr 算子来突出弱边缘。

具体步骤是:

(1)水平方向模板对图像求取梯度:分别将图像预处理后得到的图像 A 与卷积核 G_x 进行卷积,公式表述如下:

$$G_x = \begin{bmatrix} -3 & 0 & +3 \\ -10 & 0 & +10 \\ -3 & 0 & +3 \end{bmatrix} * A \quad (1)$$

(2)垂直方向模板对图像求取梯度:分别将图像预处理后得到的图像 A 与卷积核 G_y 进行卷积,公式表述如下:

$$G_y = \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \end{bmatrix} * A \quad (2)$$

(3)图像的每一个像素的横向及纵向灰度值通过以下公式结合,来计算该点灰度的大小 G :

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

2.2.2 图像融合

将 2.2.1 得到的图像与原图像采用 OpenCV 内置函数 `addWeighted` 进行融合。

2.2.3 形态学处理

基本的数学形态学操作包括腐蚀、膨胀、开操作、闭操作等,定义如下:

(1)形态学膨胀操作:膨胀是求局部最大值的操作。核 B 与图像卷积,核 B 可以是任意的形状或大小,它拥有一个单独定义出来的参考点,核 B 扫描图像的每一个像素,计算核 B 覆盖区域的像素点的最大值,并把这个最大值赋给参考点(核 B 的中心点)指定的像素,使图像变明亮。

$$\text{dilate}(x, y) = \max_{(x', y') \in \text{kemel}} \text{src}(x + x', y + y') \quad (4)$$

(2)形态学腐蚀操作:腐蚀是求局部最小值的操作,核 B 扫描图像的每一个像素,即计算核 B 覆盖的图像区域的像素点的最小值,并把这个最小值赋值给参考点(核 B 的中心点)指定的像素,使图像变灰暗。

$$\text{erode}(x, y) = \lim_{(x', y') \in \text{kemel}} \text{src}(x + x', y + y') \quad (5)$$

(3)形态学开操作:将图像进行先腐蚀再膨胀的操作,即:

$$\text{open}(\text{src}, \text{element}) = \text{dilate}(\text{erode}(\text{src}, \text{element})) \quad (6)$$

(4)形态学闭操作:将图像进行先膨胀再腐蚀的操作,即:

$$\text{close}(\text{src}, \text{element}) = \text{erode}(\text{dilate}(\text{src}, \text{element})) \quad (7)$$

开操作具有消除细小物体,在纤细处分离物体和平滑较大物体边界的功能,闭操作具有填充物体内部细小空洞,连接邻近物体和平滑边界的功能。利用开操作和闭操作的这些功能,先对 2.2.2 融合后的图像进行开操作消除表面零散分布的噪声点,再进行闭操作使得表面纹理趋于平滑,为图像分割做准备。

2.3 图像分割

2.3.1 最大熵阈值

为了从图像中提取瑕疵部分,需要对其进行分割。文中采用最大熵阈值^[16]来计算阈值实现分割,阈值计算方法如下:

设阈值 t 将图像划分为目标 O 和背景 B 两类,它们的概率分布分别为:

$$O \text{ 区: } p_i / P_i, i = 0, 1, \dots, t;$$

$$B \text{ 区: } p_i / (1 - P_i), i = t + 1, t + 2, \dots, L - 1.$$

其中, p_i 为概率密度函数,即灰度图像中每一个灰度 i 发生的概率; P_i 为目标前景的累积概率, $P_i =$

$$\sum_{i=0}^t p_i, 1 - P_i \text{ 则为背景的累积概率。}$$

则目标 O 和背景 B 的熵函数分别为:

$$H_o(t) = - \sum_{i=0}^t (p_i/P_t) \ln(p_i/P_t) = \ln P_t + H_t/P_t \quad (8)$$

$$H_B(t) = - \sum_{i=t+1}^{L-1} (p_i/(1 - P_t)) \ln(p_i/(1 - P_t)) = \ln(1 - P_t) + (H - H_t)/(1 - P_t) \quad (9)$$

其中, $H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \ln p_i$, $H_t = - \sum_{i=0}^t p_i \ln p_i$ 。

图像的总熵为:

$$H(t) = H_o(t) + H_B(t) = \ln P_t(1 - P_t) + H_t/P + (H - H_t)/(1 - P_t) \quad (10)$$

(1)从灰度级 0 开始,选取初始阈值 $T_0 = 0$,计算原始图像的信息熵 H_0 并初始化 $H_{\max} = H_0$, $T_{\max} = T_0$;

(2)考察灰度级 1, 阈值 $T_1 = 1$ 将图像分割为 G_1 和 G_2 两个区域,计算 G_1 和 G_2 的信息熵 H_d 和 H_b ,比较 $H_d + H_b$ 与 H_{\max} 的大小,如果 $H_d + H_b > H_{\max}$, 则 $T_{\max} = T_1$, $H_{\max} = H_d + H_b$, 否则 T_{\max} , H_{\max} 保持不变;

(3)重复第 2 步,继续考察灰度级 2 ~ 255,直到找到最大熵阈值。

在计算出阈值之后,对 2.2.3 得到的图像进行分割,将图像中所有像素点的灰度值与阈值进行比较,若像素点灰度值的大小大于阈值,则将其灰度值置为 255,否则将该像素点灰度值置为 0,从而得到二值图像。

2.3.2 轮廓搜索拟合

对于阈值分割得到的二值图像,使用缺陷轮廓搜

索算法来获取提取出的每个瑕疵边界像素点的坐标,从而组成轮廓序列,再根据边界条件进行筛选;最后筛选得到的轮廓序列采用轮廓拟合算法勾勒瑕疵大致的几何形状,并在原图上标注出来。

(1)缺陷轮廓搜索。

文中采用 OpenCV 内置函数 findContours 对阈值分割后得到的二值图像进行外轮廓搜索。

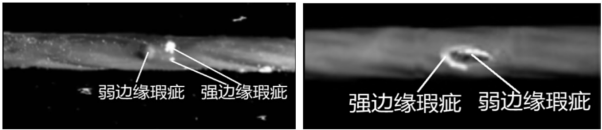
(2)缺陷轮廓拟合。

在提取得到图像轮廓序列后,存在一些图像轮廓边缘呈现锯齿状,此时需要对缺陷轮廓进行平滑拟合从而使得轮廓图像锯齿边缘趋于圆滑。文中采用 OpenCV 内置函数 approxPolyDP 对轮廓进行拟合。

3 实验结果与分析

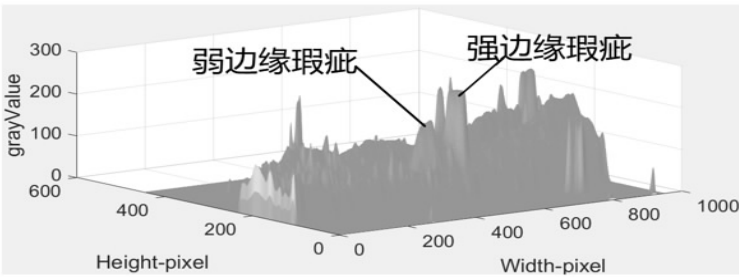
3.1 实验数据说明

实验采用的图像为工业生产流水线上采集的光缆图像,由江苏亨通光电有限公司提供,其中两幅图像如图 2 所示,图像的投影信息和灰度值 3 维图显示在图 3 中。由图 3 可看出,图像弱边缘瑕疵灰度变化相对缓慢,容易被误以为是正常光缆缆面,不易被检测出。

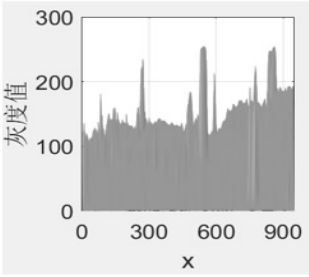


(a)原始图像 I (b)原始图像 II

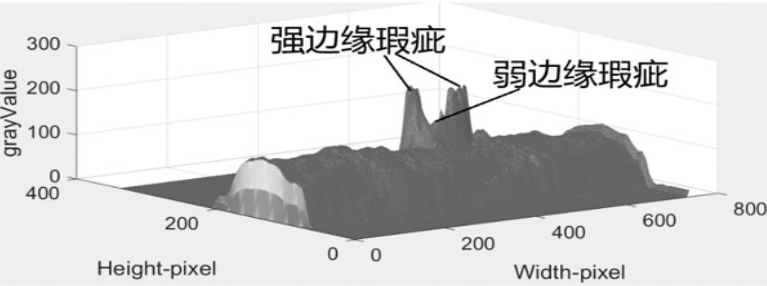
图 2 原始图像



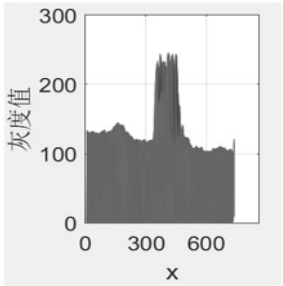
(a) 图像 I 灰度的 3 维图像



(b) 图像 I 的纵向投影



(c) 图像 II 灰度的 3 维图像



(d) 图像 II 的纵向投影

图 3 原始图像的灰度分布信息

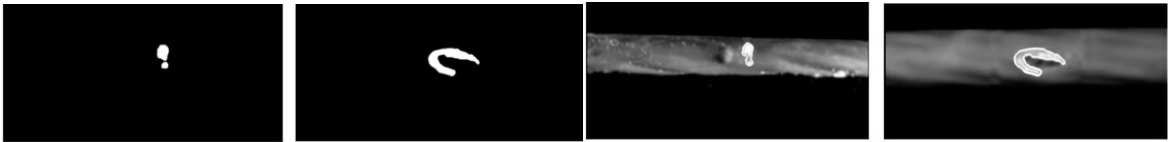
3.2 传统方法检测

传统的基于图像处理的瑕疵检测技术^[17]主要局限于边缘检测、图像分割等步骤,当产品表面受到光

源、光照方式、图像采集方式等因素的影响,使得图像缺陷边缘的灰度有较宽的过渡区,不是理想的阶跃型边缘,形成了相对缓慢的过渡边缘即弱边缘时,这些

方法存在对弱边缘信息不敏感等缺点。图 4 显示了光缆原图 I 和光缆原图 II 经过传统瑕疵检测方法检测的结果(边缘检测均采用 Canny 算子检测,图像分割均

采用最大熵阈值分割方法),可以看出传统的瑕疵检测技术对于弱边缘信息并不敏感,所以很难完全提取出完整瑕疵。



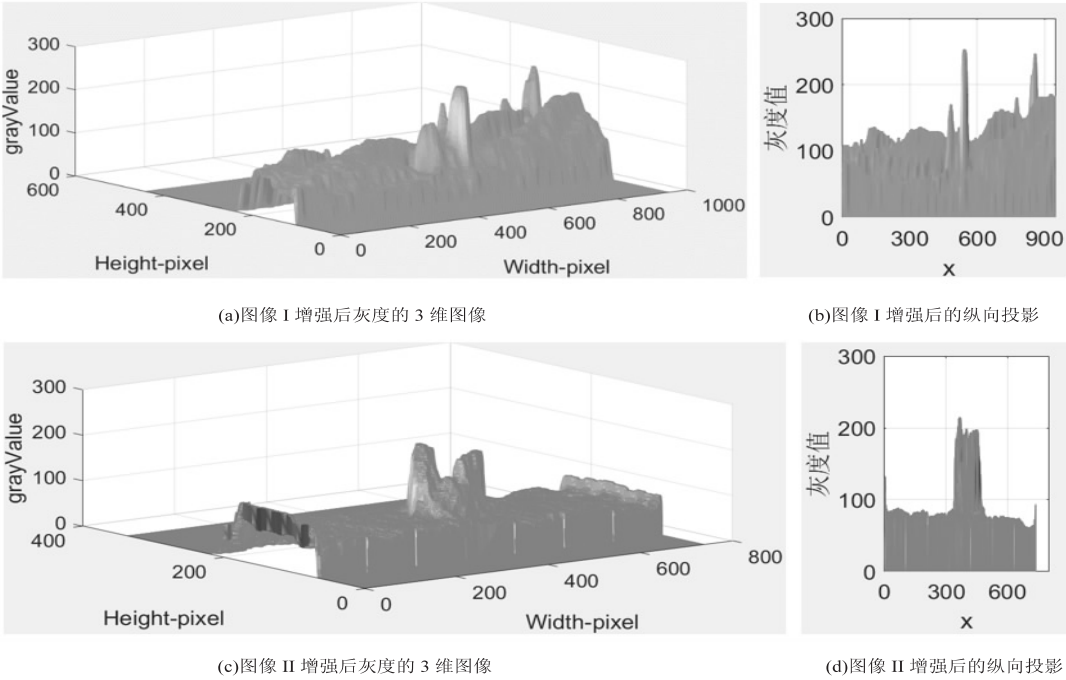
(a)传统方法阈值分割图 I (b)传统方法阈值分割图 II (c)传统方法瑕疵检测图 I (d)传统方法瑕疵检测图 II

图 4 传统方法检测结果

3.3 文中算法检测结果及分析

按照图 1 所示流程,对原始图像进行检测,检测的结果显示在图 5 中。图 5(a)、5(c)是经过弱边缘增强处理后的图像灰度 3 维图像,对应的投影图分别为图 5(b)、5(d),对比图 3 中原始缆面灰度 3 维图像和投影图,可以看出,经过弱边缘增强后的图像,光缆表面的噪声、纹理得到了很大的削弱,强、弱边缘瑕疵与周

围缆面灰度差变大,强、弱边缘瑕疵信息相对于正常缆面信息显得更加明显。对于那些灰度值较小的像素点(属于正常缆面的像素点)进行了阈值去除,得到图 5(e)、图 5(f)(文中图 5(e)阈值大小为 137,图 5(f)阈值大小为 78),最终瑕疵检测结果分别为图 5(g)、图 5(h)。可以看出,光缆强、弱边缘瑕疵的信息都被较好地提取出来了。



(a)图像 I 增强后灰度的 3 维图像 (b)图像 I 增强后的纵向投影 (c)图像 II 增强后灰度的 3 维图像 (d)图像 II 增强后的纵向投影 (e)文中算法阈值分割图 I (f)文中算法阈值分割图 II (g)文中算法瑕疵检测图 I (h)文中算法瑕疵检测图 II

图 5 文中算法检测结果

4 结束语

在产品表面瑕疵检测过程中,图像处理中常用的方法是先进行图像预处理来对图像进行去噪、提取有效区域等,然后对得到的图像进行分割得到二值化图像,最后得出检测结果。该算法易于实现,对于一般图像可以取得良好的分割效果,因此得到了广泛的应用。但在实际工业生产中,由于会受到光照、材料本身等外

界因素的影响,产品表面容易出现灰度变化缓慢的弱边缘瑕疵,传统的瑕疵检测方法对它敏感度不高而容易把它当成正常表面纹理,因而不易被检测出来。通过在预处理之后添加 Scharr 算子来突出弱边缘,同时结合形态学处理操作平滑表面来改进算法。实验结果表明,与一般瑕疵检测方法相比,该算法对弱边缘的敏感度更高,能完整检测出表面瑕疵。但是如何提高检测效率并使检测轮廓与实际瑕疵轮廓更加贴合,使其

达到最优化还需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 刘万军,赵庆国,曲海成. 变差函数和形态学滤波的图像去雾算法[J]. 中国图象图形学报,2016,21(12):1610-1622.
- [2] CHAPLE G N,DARUWALA R D,GOFANE M S. Co-mparisons of Robert, Prewitt, Sobel operator based edge detection methods for real time uses on FPGA[C]//International conference on technologies for sustainable development. Mumbai, India; IEEE, 2015:1-4.
- [3] 张桂梅,孙晓旭,陈彬彬,等. 结合分数阶微分和 Canny 算子的边缘检测[J]. 中国图象图形学报,2016,21(8):1028-1038.
- [4] KALRA A,CHHOKAR R L. A hybrid approach using Sobel and Canny operator for digital image edge detection[C]//International conference on micro-electronics and telecommunication engineering. Ghaziabad, India; IEEE, 2017:305-310.
- [5] 陈 果,左洪福. 图像阈值分割的两种新技术[J]. 模式识别与人工智能,2002,15(4):468-473.
- [6] QIN Lei,SUN Kaiqiong,LI Shigao. Maximum fuzzy entropy image segmentation based on artificial fish school algorithm[C]//International conference on intelligent human-machine systems and cybernetics. Hangzhou, China; IEEE, 2016:164-168.
- [7] ZHANG Ang,HUANG Siwei,TIAN Xiaolin,et al. Morphologic weak edge detection by multi-structure and multi-scale in anterior chamber OCT images[C]//International congress on image and signal processing. Shanghai; IEEE, 2011:963-966.
- [8] 冀 峰,高新波,谢松云. Mean-shift 滤波和直方图增强的图像弱边缘提取[J]. 中国图象图形学报,2012,17(6):651-656.
- [9] 苏晓帆. 一种线缆表面缺陷在线检测装置及方法:中国, CN201310085593. 1[P]. 2013-03-18.
- [10] 高 峰. 基于机器视觉的线缆在线检测方法:中国, CN201310564470. 6[P]. 2013-11-14.
- [11] 陈允杰,张建伟,韦志辉,等. 基于高斯混合模型的活动轮廓模型脑 MRI 分割[J]. 计算机研究与发展,2007,44(9):1595-1603.
- [12] ZACHEVSKY I,ZEEVI Y Y. Model-based color natural stochastic textures processing and classification[C]//IEEE global conference on signal and information processing. Orlando, FL; IEEE, 2016:1357-1361.
- [13] MARTINS L A O,PÁDUA F L C,ALMEIDA P E M. Automatic detection of surface defects on rolled steel using computer vision and artificial neural networks[C]//36th annual conference on IEEE industrial electronics society. Glendale, AZ, USA; IEEE, 2010:1081-1086.
- [14] YUN J P,PARK C,BAE H,et al. Vertical scratch detection algorithm for high-speed scale-covered steel BIC(Bar in Coil)[C]//International conference on control automation and systems. Gyeonggi-do, South Korea; IEEE, 2010:342-345.
- [15] WANG Lei,SHEN Yuming. Design of machine vision applications in detection of defects in high-speed bar copper[C]//International conference on e-product e-service and e-entertainment. Henan, China; IEEE, 2010:1-4.
- [16] 雷 博,兰 蓉,范九伦. 最大模糊熵阈值法的快速算法[J]. 模式识别与人工智能,2010,23(6):867-873.
- [17] 陈文达. 金属工件表面瑕疵检测技术的研究与开发[D]. 无锡:江南大学,2013.