

玻璃表面缺陷检测系统研究

张彩霞, 陈晓荣, 徐云洁, 卫志豪, 周书辰
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 针对玻璃表面存在的划痕、漏点、结石和水印等 4 种主要缺陷, 研究一种基于背光照射的玻璃表面缺陷检测方法, 提出一种改进 K 均值聚类算法用于水印缺陷的检测。**方法** 首先, 通过设计的图像采集系统对玻璃图像进行采集, 并对采集图像背景估计; 然后根据水印缺陷与其他 3 种缺陷的灰度差异, 将含缺陷的玻璃分成 2 类, 完成缺陷粗分类; 接着利用边缘检测算法对含划痕、漏点和结石缺陷的玻璃图像进行处理, 利用结合了 Otsu 阈值分割方法和补偿系数 f 的改进 K 均值聚类算法对含有水印缺陷的玻璃图像进行处理, 最终实现对玻璃表面 4 种缺陷的识别与标记。**结果** 实验表明, 该系统操作方便, 算法复杂度低, 缺陷识别准确度高, 检测速度快。**结论** 通过上述玻璃表面缺陷检测系统, 可准确高效地检测出玻璃表面存在的 4 种主要缺陷。改进的 K 均值聚类可以准确实现对水印缺陷的检测, 且该方法可以克服聚类迭代次数高, 聚类结果容易陷入局部最小等缺点。极大地提高了缺陷检测的效率, 可用于玻璃生产过程中的实时检测。

关键词: 背光照射; 缺陷检测; 边缘检测; 改进 K-means 聚类; Otsu 阈值分割; 补偿系数

中图分类号: TB487; TP312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)13-0216-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.031

Surface Defect Detection System of Glass

ZHANG Cai-xia, CHEN Xiao-rong, XU Yun-jie, WEI Zhi-hao, ZHOU Shu-chen

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: Aiming at the four major defects such as scratches, missing points, stones and watermarks on the glass surface, the work aims to study a method for detecting surface defects of glass based on backlight illumination, and propose an improved K-means clustering algorithm for watermark defect detection. First, the glass image was acquired by the designed image acquisition system, and the background of the acquired image was estimated. Then, based on the gray difference between the watermark defect and the other three types of defects, the defective glass was divided into two categories to complete the rough classification of the defects. Next, the edge detection algorithm was used to process the glass image with such defects as scratches, missing points and stones, and the improved K-means clustering algorithm combining Otsu threshold segmentation method and compensation coefficient f was used to process the glass image with watermarks. Finally, the identification and marking of four defects on the glass surface were completed. The experiments showed that the system was easy to operate, the algorithm was low in complexity, the accuracy of defect identification was high, and the detection speed was fast. Through the above-mentioned glass surface defect detection system, four major defects on the glass surface can be accurately and efficiently detected. The improved K-means clustering can accurately detect watermarks. It overcomes the shortcomings such as a huge number of cluster iterations and clustering results

收稿日期: 2019-12-05

作者简介: 张彩霞 (1995—), 女, 上海理工大学硕士生, 主攻图像处理与模式识别。

通信作者: 陈晓荣 (1974—), 女, 博士, 上海理工大学副教授, 主要研究方向为工业图像处理与在线检测。

easy to fall into the local minimum. As the proposed method greatly improves the efficiency of defect detection, it can be used for the real-time detection in the process of glass production.

KEY WORDS: backlight illumination; defect detection; edge detection; improved K-means clustering; Otsu threshold segmentation; compensation coefficient

玻璃在机械、食品、家电、仪器仪表等诸多领域有着广泛应用,随着工业发展,其需求量也在不断增加。玻璃生产工序复杂,在镀膜过程中,可能导致玻璃表面产生划痕、漏点、结石和水印等缺陷^[1]。这些缺陷的存在会直接影响玻璃质量,使玻璃无法用于后续产品的加工。在玻璃生产过程中,工厂通常采用人工逐一检测的方式来保证产品的合格率。采用人工检测具有非常高的主观性与不确定性,导致检测过程存在效率低下,准确率不高,数据管理混乱等缺点,并且工人工作环境恶劣,工厂的生产成本消耗巨大。随着人工智能浪潮的兴起,现代工业生产的智能化、人性化要求也越来越高,如何在提高员工舒适度的基础上,建立更加高效智能的玻璃缺陷检测系统,成为该领域尤为关注的一个话题。

自 20 世纪 80 年代开始,国内外学者便开始利用玻璃图像的光学特性来实现玻璃缺陷的识别与分类^[2-4]。Liu 等^[5]提出利用 2 次一维 Otsu 缺陷分割方法并采用 BP 神经网络,实现对缺陷的有效分割和识别,但这种算法对图像的采集系统要求较高,算法适用性差。Latif 等^[6]结合小波理论和共生矩阵的概念,利用马氏分类器将图像子窗口分为缺陷和非缺陷,但这种算法复杂度较高,且前期需要大量的数据对分类器进行训练。Li 等^[7]设计了低角度照明的缺陷检测系统,利用灰度波动曲线还原图像,实现缺陷检测,但这种算法的抗噪性能差,检测过程仍需人为操作,无法做到完全的自动化检测。此外,常用于缺陷检测的算法还有 K 均值聚类算法,它是一种无监督学习算法,具有灵活性高,分类效果好,无需样本标签等优势,因此常被用于缺陷检测中^[8]。由于 K 均值聚类易受初始聚类中心的影响,导致其算法效率较低,并且容易陷入局部最优解。

对此,文中在前人研究的基础上,研究一种基于背光照射的玻璃表面缺陷检测方法,提出对玻璃图像完成预处理后,进行缺陷粗分类,将含有水印缺陷的玻璃与含有划痕、漏点、结石缺陷的玻璃进行区分,然后根据 2 类缺陷特点,分别采用边缘检测算法,结合了 Otsu 阈值分割法与补偿系数 f 的改进 K 均值聚类算法进行处理,完成对玻璃表面缺陷的准确分割,最后进行缺陷识别与标记。

1 图像采集系统设计

为实现玻璃图像采集,文中根据待检测玻璃的特

点,设计了一套基于背光照射的图像采集系统,整个系统包括 1 个线扫描相机、1 个 LED 线光源,运动控制装置及计算机。

在图像采集系统的设计中,照明方式是一个非常重要的因素,照明方式的选择会直接影响成像质量以及图像处理算法的复杂程度^[9]。针对被检测玻璃表面缺陷的灰度特点,文中采用的照明方式为背光照射,同时,线扫描相机的光轴垂直于待测玻璃的运动安装平面,照明原理见图 1。

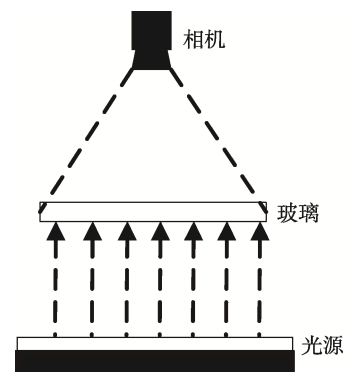


图 1 图像采集系统

Fig.1 Image acquisition system

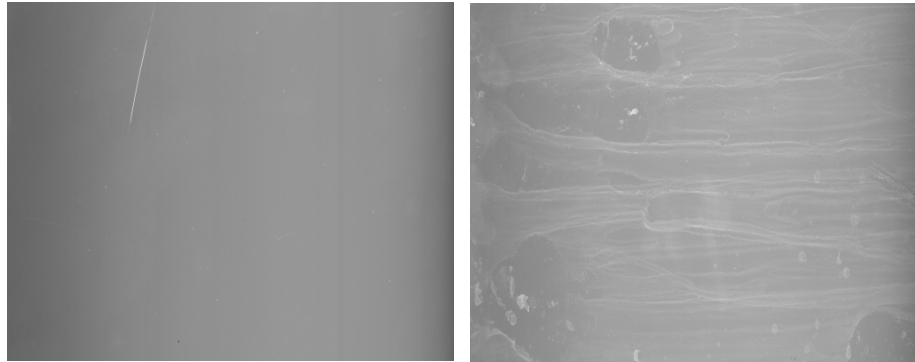
该缺陷检测系统运行流程:计算机通过控制接口向运动控制装置发送信号,使其带动被检测玻璃开始运动,与此同时,计算机通过控制接口向线扫描相机发出信号,线扫描相机进行图像采集,获得当前玻璃制品的灰度图像并传输至计算机进行图像缺陷检测处理。完成缺陷分割识别后,对缺陷类别进行统计,根据统计结果判定玻璃是否合格,并输出检测结果。利用上述图像采集系统采集到的包含缺陷的玻璃制品图像见图 2。

将包含划痕、结石、漏点 3 类缺陷的图像进行局部放大,可清晰地看出缺陷位置,见图 3。

2 图像处理算法与分析

2.1 算法流程

该系统所采用的图像处理算法流程见图 4。由图 4 可知,图像经过预处理后,进行缺陷粗分类,将缺陷玻璃分为含划痕、漏点、结石缺陷的一类 and 含水印缺陷的一类,并分别采用边缘检测算法和改进的 K 均值聚类算法进行缺陷分割,最后完成 4 种缺陷的识别与标记,并进行质量合格判定。



a 划痕、结石、漏点缺陷图像

b 水印缺陷图像

图2 采集到的含缺陷的玻璃图像
Fig.2 Collected defective glass image

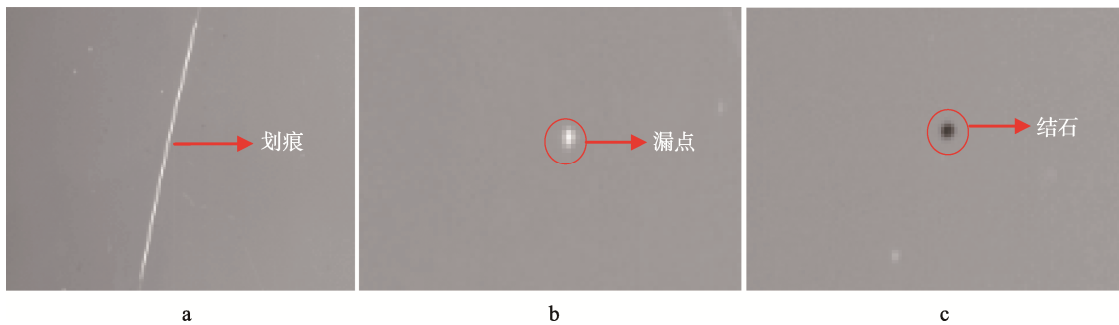


图3 局部放大的玻璃图像

Fig.3 Partially magnified glass image

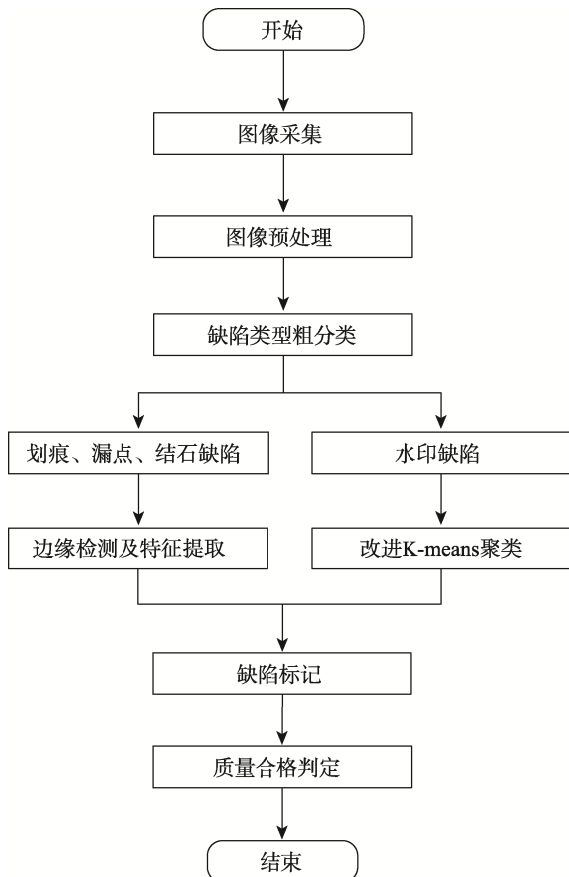


图4 算法流程

Fig.4 Algorithm flow chart

2.2 图像预处理

图像采集过程中，由于硬件、环境等因素影响，可能导致采集到的图像出现背景不均、噪声较多等情况，这样不仅会增大后续缺陷分割的难度，而且会降低缺陷分割的准确性，所以对采集的图像进行预处理，是非常重要的一个环节。

文中图像预处理阶段主要采用高斯滤波实现背景估计，见式(1)。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

由于玻璃表面存在的划痕、漏点、结石和水印等缺陷都没有特定的形状或纹理特性，因此在对图像进行快速傅里叶变换后，设计高斯滤波器对图像进行卷积操作，最后进行快速傅里叶反变换即可得到背景估计的结果图像。用原图像与上述结果图像进行减运算即可有效滤除正态分布的噪声，突出高频部分，实现对待检测图像的背景抑制，使缺陷更加明显，便于后续缺陷分割与识别。

2.3 缺陷类型粗分类

由于玻璃表面存在多种缺陷，其中划痕、漏点和结石缺陷与水印缺陷在灰度分布上呈现较大的差异。水印缺陷分布范围大，其透光性与正常玻璃图像透光性基本一致，故灰度值接近于玻璃的平均灰度值，而

划痕和漏点的透光性强，结石透光性则非常差，所以这 3 种缺陷的灰度值与正常玻璃的灰度值相差较大。故可根据灰度差异将缺陷玻璃进行粗分类。进而针对 2 种玻璃缺陷类型的特点，实施不同的分割算法，可以更好地提高缺陷检测算法的效率。

2.4 划痕、漏点、结石缺陷检测及识别

对于划痕、漏点和结石缺陷，系统采用 Canny 算子边缘检测算法实现缺陷分割，其原理是根据图像中较高的梯度值点确定可能的边缘像素点^[10-13]。由于划痕、漏点和结石在像素灰度值上与背景不连续，所以边缘检测可以有效检测出这 3 类缺陷。

在划痕、漏点和结石 3 种缺陷的识别上，主要利用了它们的灰度特征和形态特征。根据灰度特征，可以将结石与划痕、漏点进行区分，其中，结石的灰度值要低于玻璃图像的平均灰度值，而划痕和漏点的灰度值则高于玻璃图像的平均灰度值。根据形态特征，可以区分划痕缺陷和漏点缺陷，对这 2 种缺陷进行轮廓提取，划痕缺陷的面积和长度要远大于漏点的面积和长度，所以根据行业标准进行比较，即可区分这 2 种缺陷。

2.5 改进 K 均值聚类实现水印缺陷检测及识别

2.5.1 K 均值聚类

K 均值聚类算法是 1967 年由 J.B. Mac Queen 提出的一种解决聚类问题的经典算法，至今仍然得到广泛应用^[14]。该算法作为一种典型的划分式聚类算法，其原理简单，容易实现，在大规模数据的处理应用上较其他聚类算法而言，有非常明显的优势，因此文中选用 K 均值聚类算法作为水印缺陷检测的主要方法。K 均值聚类算法的基本思想是从样本数据中随机选取数据点作为初始聚类中心，将样本划分为相互独立的不同的类别，然后分别计算样本中各个数据与聚类中心之间的距离，并将此数据归类至距离它最近的聚类中心所在的类中，即完成一次聚类。通过迭代不断的更新聚类中心，使评价最优性能的准则函数达到最优，则完成聚类^[15-16]。

设将数据集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 划分为 k 类，并随机选取 k 个初始聚类中心 $\mu_i (i=1, 2, \dots, k)$ ，则评价最优性能的准则函数见式 (2)。

$$J = \sum_{i=1}^k \left[\sum_{x_j \in C_i} d(x_j, \mu_i) \right] \quad (2)$$

式中： x_j 为 C_i 类中的数据； $d(x_j, \mu_i)$ 为数据 x_j 与其对应的 C_i 类的中心点 μ_i 的距离，可表示为：

$$d(x_j, \mu_i) = \sum_{x_j \in C_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad (3)$$

每迭代 1 次，则更新 1 次聚类中心，其计算公

式为：

$$\mu_i^* = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_j \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

式中： n_i 为第 i 类中的数据个数； μ_i^* 为新的聚类中心。

K 均值聚类过程则是寻求最佳的聚类中心 $\mu_i (i=1, 2, \dots, k)$ ，使准则函数 J 的值最小。 J 越小，则表明聚类的效果越好，类间相似度越低。所以当准则函数 J 值最小时，K-means 算法收敛，则完成了对数据集的聚类划分^[17-18]。

2.5.2 Otsu 阈值分割

Otsu 阈值分割法又称为最大类间方差法，是由日本学者大津提出的一种基于最小二乘法的自适应单阈值的分割方法^[19-20]。其算法的基本思想是利用目标与背景的灰度值差异来确定分割阈值。设阈值 T 将图像分为 C_1 和 C_2 2 类（前景和背景），图像的总平均灰度值为 S ，其中 C_1 类像素个数占整个图像的比例为 ω_1 ，其平均灰度值为 μ_1 ； C_2 类像素个数占整个图像的比例为 ω_2 ，其平均灰度值为 μ_2 。设 C_1 和 C_2 2 类的方差为 g ，则：

$$S = \omega_1 \times \mu_1 + \omega_2 \times \mu_2 \quad (5)$$

$$g = \omega_1 \times (\mu_1 - S)^2 + \omega_2 \times (\mu_2 - S)^2 \quad (6)$$

联立式 (5-6) 可得到：

$$g = \omega_1 \times \omega_2 \times (\mu_1 - \mu_2)^2 \quad (7)$$

当类间方差 g 最大时，表明 C_1 （目标）和 C_2 （背景）之间的灰度差异越大，则阈值分割效果越好，此时分割阈值 T 为最佳阈值^[21]。

2.5.3 改进 K 均值聚类

K 均值聚类算法在缺陷分割方面有非常好的效果，但由于 K 均值聚类的初始聚类中心是人为随机指定的，若初始中心指定为孤立点，则会导致聚类结果陷入局部最小，严重影响了缺陷分割的效果，而且初始聚类中心的选择决定了迭代次数，进而直接影响算法速率。针对上述问题，文中结合 Otsu 阈值分割法并加入补偿系数 f 来确定 K 均值聚类的初始聚类中心。

利用 Otsu 阈值分割法，将待检测图像分成目标类 C_1 和背景类 C_2 ，并得到这 2 个类中像素的平均灰度值 μ_1 和 μ_2 ，并将 μ_2 作为背景类的初始聚类中心 m_2 。

由于该系统采用背光照射的方式，而水印缺陷的透光性不稳定，则导致目标与背景的对比较低，所以利用 Otsu 阈值分割法对图像进行分割后，会将部分灰度值较低的水印缺陷误判为背景。针对上述误判现象，需要引入补偿系数 f ，以调整目标类的初始聚类中心 m_1 ，令 $m_1 = f\mu_1$ 。

其中：

$$f = S/T \quad (8)$$

式中： S 为该图像的平均灰度值； T 为 Otsu 阈值

分割法得到的最佳阈值。

综上所述,该系统的初始聚类中心见式(9)。

$$(m_1, m_2) = (f\mu_1, \mu_2) \quad (9)$$

不同光照条件下,利用文中的图像采集系统采集的7幅带有水印缺陷的玻璃图像,通过改进的K均值聚类算法所得到的初始聚类中心与算法运行结束得到的最优聚类中心的值见表1。

表1 初始聚类中心(ICC)与最优聚类中心(OCC)的值

Tab.1 Value of initial cluster center (ICC) and optimal cluster center (OCC)

图片编号	ICC	OCC
1	(56.9, 49)	(59.5,46.4)
2	(68.7,50)	(61.3,47.1)
3	(53.1,49)	(56.9,46.9)
4	(56.7,50)	(60.4,47)
5	(52,48)	(51.6,48.1)
6	(53,48)	(53.2,48.4)
7	(52,49)	(52.7,48.6)

由表1可知,利用Otsu阈值分割法结合补偿系数f的方法确定K均值聚类的初始聚类中心,所以改进K均值聚类算法可以克服传统K均值聚类算法的缺点,可以大幅度减少K均值聚类的迭代次数,进而避免了K均值聚类算法容易陷入局部最优情况。此外,K均值聚类算法采用欧氏距离。与其他方法相比,该方法具有快速、准确的特点,特别适合于玻璃表面缺陷的检测。

3 实验结果分析

3.1 玻璃表面缺陷自动检测软件设计

文中利用 Visual C++开发了玻璃制品表面缺陷自动检测软件,该软件支持用户根据市场标准自行制定质量合格标准,系统将根据此标准判定被检测玻璃制品是否合格。根据文中算法,得到缺陷检测后的玻璃图像见图5和图6。

图5所示处理后的图片中,缺陷由不同颜色进行标识,深色长条代表划痕,浅色圆圈代表漏点,深色圆圈代表结石。为方便用户查看,系统设计了缺陷类型显示框,上面显示了每1种缺陷的颜色及数量。

图6所示处理后的图片中,以白色标识水印缺陷,并在缺陷类型框中显示缺陷类型。

3.2 系统可靠性验证

为了验证所述玻璃表面缺陷检测系统的准确性和可靠性,文中进行了相关实验研究。实验环境:计

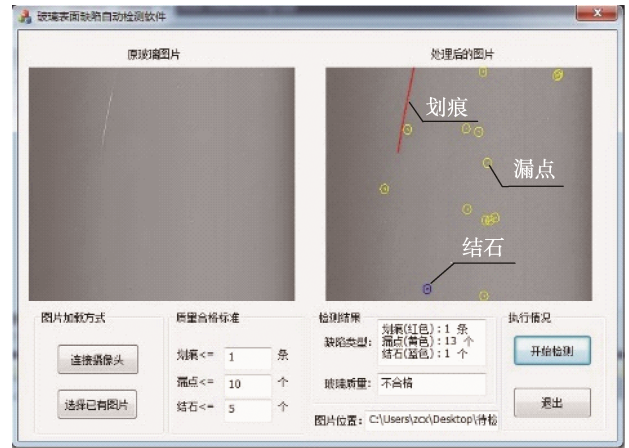


图5 缺陷检测结果1

Fig.5 Defect detection result 1

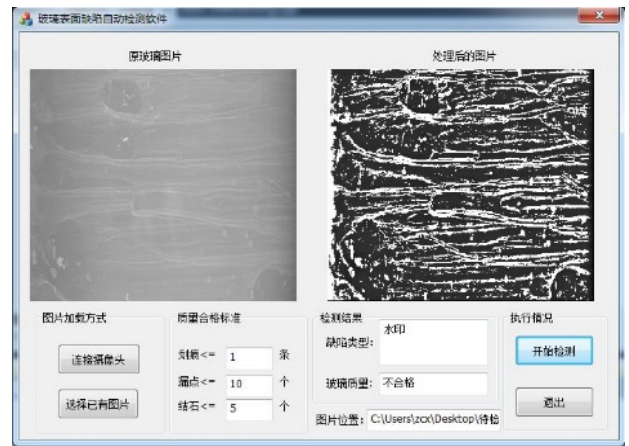


图6 缺陷检测结果2

Fig.6 Defect detection result 2

算机CPU为1.9 GHz,内存为4 GB,工业相机为Linea 4K CL;LED线光源。图像为3156×3156。随机选取实验样本,其中存在划痕、漏点、结石或水印等4种缺陷的玻璃为450张,合格玻璃为150张,通过上述缺陷检测系统进行缺陷识别与分类,统计识别缺陷的准确率和平均检测速度,统计数据结果见表2。

通过表2可知,所述玻璃制品表面缺陷检测系统对玻璃表面缺陷的准确检测可达到96.5%,平均检测时间为3.74 s。实验表明,该系统对玻璃缺陷检测的准确度高、速度快、可靠性好,可满足玻璃生产过程中的自动化实时检测要求。在表2中,有16幅存在缺陷的玻璃图像与5幅合格的玻璃图像被检测错误,

表2 玻璃样本检测结果

Tab.2 Glass sample test results

样本类型	检测数量	准确数量	错误数量	准确率/%	平均检测时间/s
存在缺陷玻璃数量	450	434	16	96.44	4.057
合格的玻璃数量	150	145	5	96.67	1.79
总数	600	579	21	96.5	3.75

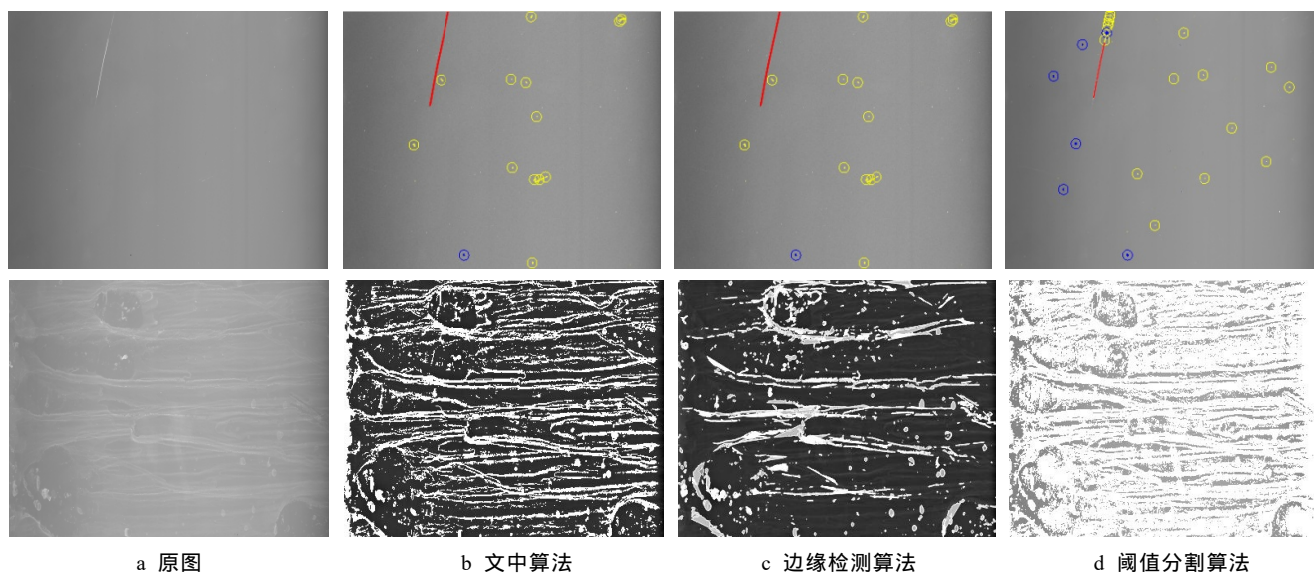


图 7 玻璃缺陷检测算法对比

Fig.7 Comparison of algorithms for glass defect detection

可能是因为在采集玻璃图像时，外界光照发生了变化，导致出现了光照不均匀的现象，使玻璃表面灰度值发生变化，影响了检测过程中的缺陷分割，使检测结果发生错误。

3.3 不同算法比较

为验证文中所提出的玻璃缺陷检测算法的有效性，将文中算法与常用于缺陷检测的边缘检测法和阈值分割法进行比较。用 3 种算法分别对含有各类缺陷的玻璃进行检测，得到的结果见图 7 和图 8，深色长条形代表划痕缺陷，白色代表水印缺陷，漏点缺陷与结石缺陷以圆圈标记，其中浅色圆圈代表漏点缺陷，深色圆圈代表结石缺陷。

由图 7 可知，边缘检测算法虽然可以有效检测出划痕、漏点和结石等缺陷，但在水印缺陷的检测上，会存在严重的缺陷信息丢失，导致缺陷检测不完整。阈值分割算法对划痕、漏点和结石缺陷的检测并不理想，无法正确识别缺陷类别，对水印缺陷进行检测时，由于图像对比度较低，导致缺陷分割时出现错误，无法准确标记缺陷位置。综上所述，与另外 2 种方法相比，文中算法在玻璃缺陷检测上面取得较好的检测效果。

4 结语

文中设计了一种玻璃缺陷检测系统，利用边缘检测算法和结合了 Otsu 阈值分割法与补偿系数 f 的改进 K 均值聚类算法，实现了对 4 种主要玻璃缺陷的检测。通过对设计的玻璃缺陷检测系统进行相关实验，验证了该系统具有结构简单，识别效率高，准确率高等特点，可满足工业生产过程中实时检测的基本要求。该

系统对光照均匀性要求较高，因此需要更进一步完善缺陷检测算法，以适应玻璃表面缺陷检测的要求。

参考文献：

- [1] 简川霞, 高健. 手机玻璃屏表面缺陷视觉检测方法研究[J]. 包装工程, 2018, 39(5): 16—21.
JIAN Chuan-xia, GAO Jian. Visual Detection Method for Surface Defect of Mobile Phone Screen Glass[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 16—21.
- [2] 宋丽梅, 徐婧玮, 杨燕罡, 等. 基于改进梯度幅值的包装缺陷检测算法研究及应用[J]. 应用光学, 2019, 40(4): 644—651.
SONG Li-mei, XU Jing-wei, YANG Yan-gang, et al. Research And Application of Package Defects Detection Algorithm Based on Improved[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(4): 644—651.
- [3] 李锋, 师俊芳. 浮法玻璃带缺陷自动检测技术研究[J]. 中国科技博览, 2013(4): 192.
LI Feng, SHI Jun-fang. Research on Automatic Detection Technology for Float Glass Tape[J]. Transducer And Microsystem Technologies, 2013(4): 192.
- [4] ALI Y J, RYU J H, YOON S, et al. Decision Support in Machine Vision System for Monitoring of TFT-LCD Glass Substrates Manufacturing[J]. Journal of Process Control, 2014, 24(6): 1015—1023.
- [5] 刘怀广, 陈幼平, 谢经明, 等. 浮法玻璃缺陷在线识别技术的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2011(4): 738—742.
LIU Huai-guang, CHEN You-ping, XIE Jing-ming, et al. Research on Online Recognition Technology for Float Glass Defects[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011(4): 738—742.
- [6] LATIF-AMET A, ERTÜZÜN A, ERCIL A. An Effi-

- cient Method for Texture Defect Detection: Sub-band Domain Co-occurrence Matrices[J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(6): 543—553.
- [7] 李长有, 刘遵, 李帅涛. 小型平板玻璃表面缺陷检测系统[J]. 计算机应用, 2017, 37(S2): 167—170.
LI Chang-you, LIU Zun, LI Shuai-tao. Surface Defect Detection System for Small-scale Flat-panel Glass[J]. Computer Applications, 2017, 37(S2): 167—170.
- [8] 李力, 王耀南, 陈铁健. 大尺寸 LCD 玻璃基板多视觉缺陷检测系统研究[J]. 控制工程, 2016(2): 222—226.
LI Li, WANG Yao-nan, CHEN Tie-jian. Multi-visual Detect System for Large-size LCD Glass Substrate[J]. Control Engineering of China, 2016(2): 222—226
- [9] 王一丁. 工业图像处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2018: 42—87.
WANG Yi-ding. Industrial Image Processing[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press. 2018: 42—87.
- [10] 刘俊琪. 基于图像识别的铝塑包装材料边缘检测[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 154—158.
LIU Jun-qi. Edge Detection of Aluminum-Plastic Packaging Materials Based on Image Recognition[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 154—158.
- [11] 李健, 李赫宇, 姚汝婧, 等. 基于均值滤波的改进 Canny 算法在核磁共振图像边缘检测中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5): 1704—1709.
LI Jian, LI He-yu, YAO Ru-jing, et al. Check of MR Image Edge Information of Lumber Intervertebral Disc Using An Improved Canny Algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5): 1704—1709.
- [12] 张红霞, 王灿, 刘鑫, 等. 图像边缘检测算法研究新进展[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(14): 11—18.
ZHANG Hong-xia, WANG Can, LIU Xin, et al. Image Edge Detection Algorithm And Its New Development[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(14): 11—18.
- [13] WANG Gao-chao, TSE, YUAN Mao-dan, et al. Automatic Internal Crack Detection From A Sequence of Infrared Images With A Triple-threshold Canny Edge Detector[J]. measurement science and technology, 2018, 29(2): 1—10.
- [14] 陈本廷, 周鹭, 蔡小舒, 等. 基于 K-均值聚类的岩芯偏振显微图像粒径分析[J]. 上海理工大学学报, 2016, 38(4): 341—345.
CHEN Ben-ting, ZHOU Wu, CAI Xiao-shu, et al. New Method for The Segmentation of Polarizing Microscope Image of Rock Core Based on K-Means Cluster Algorithm[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2016, 38(4): 341—345.
- [15] 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.
TANG Bo, KONG Jian-yi, WU Shi-qian. Review of Surface Defect Detection Based on Machine Vision[J]. Journal of Image And Graphics, 2017, 22(12): 1640—1663.
- [16] 赵文昌, 李忠木. 融合改进人工蜂群和 K 均值聚类的图像分割[J]. 液晶与显示, 2017, 32(9): 726—735.
ZHAO Wen-chang, LI Zhong-mu. Image Segmentation Algorithm Based on Improved Artificial Bee Colony And K-means Clustering[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals And Displays, 2017, 32(9): 726—735.
- [17] 隋心怡, 王瑞刚, 张鸿翔. 一种改进的 K-均值聚类算法[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(4): 682—685.
SUI Xin-yi, WANG Rui-gang, ZHANG Hong-xiang. An Improved K-means Clustering Algorithm[J]. Computer And Digital Engineering, 2018, 46(4): 682—685.
- [18] 左进, 陈泽茂. 基于改进 K 均值聚类的异常检测算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(8): 258—261.
ZUO Jin, CHEN Ze-mao. Anomaly Detection Algorithm Based on Improved K-means Clustering[J]. Computer Science, 2016, 43(8): 258—261.
- [19] 杨陶, 田怀文, 刘晓敏, 等. 基于边缘检测与 Otsu 的图像分割算法研究[J]. 计算机工程, 2016, 42(11): 255—260.
YANG Tao, TIAN Huai-wen, LIU Xiao-min, et al. Research on Image Segmentation Algorithm Based on Edge Detection and Otsu[J]. Computer Engineering, 2016, 42(11): 255—260.
- [20] CHANG Zhan-yuan, CAO Jun, ZHANG Yi-zhuo. A Novel Image Segmentation Approach for Wood Plate Surface Defect Classification Through Convex Optimization[J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29(6): 1789—1795.
- [21] 冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理(英文版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 760—783.
GONZALEZ, WOODS. Digital Image Processing English[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 760—783.