

纸塑复合袋表面缺陷图像分割算法的设计与实现

吴世燃, 严国平, 杨小俊
(湖北工业大学, 武汉 430068)

摘要: **目的** 纸塑复合袋表面缺陷图像受到噪声、光照不均以及自身缺陷等因素的影响, 在对图像缺陷区域进行分割时会造成过分割或欠分割。针对此现象提出一种将边缘检测和自适应区域生长法相结合的纸塑复合袋表面缺陷图像的分割算法。**方法** 首先利用 Sobel 算子和形态学运算对双边滤波后的缺陷图像进行第 1 次分割; 然后对缺陷区域进行最小外接矩形标记并计算其形状特征, 通过判定形状特征大小来决定是否继续分割; 最后将符合继续分割的图像缺陷区域质心作为初始种子点, 在原始图像上进行自适应区域生长, 形成第 2 次分割结果, 完成缺陷图像分割。**结果** 与其他算法相比, 该算法对各类常见缺陷均能取得较好的分割效果, Dice 系数均在 0.93 以上。**结论** 该算法分割精度较高, 有较强的鲁棒性, 可以满足工业上的生产需求。

关键词: 纸塑复合袋; 边缘检测; 区域生长; 形状特征; 图像分割

中图分类号: TB487; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)01-0244-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.01.034

Design and Implementation of Image Segmentation Algorithm for Surface Defects of Paper Plastic Composite Bag

WU Shi-ran, YAN Guo-ping, YANG Xiao-jun
(Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: The surface defect image of paper plastic composite bag surface defect is affected by noise, uneven illumination and the characteristics of the defect itself. It will lead to over segmentation or under segmentation in image defect region segmentation. In view of this phenomenon, a segmentation algorithm of paper plastic composite bag surface defect image which combined edge detection and adaptive region growth method was proposed. Firstly, Sobel operator and morphological operation were used to segment the defect image after bilateral filtering for the first time; then, the minimum circumscribed rectangle was marked on the defect area and its shape feature was calculated, and whether to continue segmentation was determined by determining the size of the shape feature; finally, the centroid of the defect region in the image that conformed to the continuous segmentation was used as the initial seed point to carry out self adaptation on the original image. The second segmentation result was formed by growing the region to complete the defect image segmentation. Compared with other algorithms, this algorithm can achieve better segmentation results for all kinds of common defects, and the Dice coefficients was above 0.93. The algorithm has high segmentation accuracy and strong robustness, which can meet the needs of industrial production.

KEY WORDS: paper plastic composite bag; edge detection; region growing; shape features; image segmentation

收稿日期: 2020-07-19

基金项目: 湖北省技术创新专项(重大专项)(2018AAA026); 湖北工业大学博士启动基金(BSQD2016003)

作者简介: 吴世燃(1994—), 男, 湖北工业大学硕士生, 主攻图像处理与机器视觉。

通信作者: 严国平(1978—), 男, 湖北工业大学教授, 主要研究方向为轻工机械设计。

纸塑复合袋是由 PP 编织布与牛皮纸复合而成，具有强度高、防水性好、外观漂亮等特点，受到生产工艺、生产环境和人为等因素的影响，在其表面难以避免可能产生各种褶皱、脏点等缺陷，严重影响其美观和质量，纸塑复合袋表面缺陷检测已成为复合袋生产过程中必不可少的环节^[1-2]。

图像分割是纸塑复合袋表面缺陷检测过程中的一个关键步骤，分割的精度直接影响后续缺陷检测的准确率。自 20 世纪 60 年代以来，众多学者对图像分割进行了广泛研究，并提出了多种方法，其中较为典型的方法有 3 类，分别是基于阈值的分割方法^[3-4]、基于边缘检测的分割方法^[5-6]和基于区域的分割方法^[7]。邓超等^[8]利用 Sobel 算子方向性准确检测了布匹表面瑕疵。翟红芳等^[9]利用中值滤波和 Sobel 算子相结合的边缘检测算法实现复杂背景图像的分割，但其抑制噪声的同时容易模糊边缘。陈亚楠等^[10]为实现病人肺部 CT 图像的准确有效分割，提出了一种基于 OTSU 和区域生长的分割方法。刘鑫等^[11]利用基于 2 阶段区域生长法的分割算法实现肝内血管的有效分割。严深海等^[12]为实现复杂背景下钉螺图像的提取，提出了一种改进的种子区域生长算法，但这些方法都无法实现种子点的自动定位，且适用对象特定单一，普适性不强。基于阈值的分割方法虽然计算简单快速，但受噪声、光照不均等因素影响，容易出现过分割或欠分割^[13]。

针对上述问题，文中结合实际采集缺陷图像的特点，提出一种将边缘检测和自适应区域生长法相结合的纸塑复合袋表面缺陷图像分割算法，实验表明该算法对各类常见缺陷均能取得较好的分割效果。

1 算法设计和实现

1.1 算法设计

纸塑复合袋表面较为常见的缺陷有褶皱、牛皮纸破损（简称破皮）、孔洞以及脏点，见图 1。

算法的基本流程见图 2，即二次分割法。首先利用双边滤波、Sobel 算子和形态学运算构成的边缘检测算法对缺陷图像进行第 1 次分割；然后对缺陷区域进行最小外接矩形标记并计算其形状特征，通过判定

形状特征大小来确定是否属于褶皱或脏点图像；若属于则停止分割，否则将分割后图像缺陷区域的质心作为初始种子点，在原始图像上进行自适应区域生长，并结合形态学运算，形成第 2 次分割结果，完成其他缺陷图像分割。

1.2 算法实现

1.2.1 边缘检测

Sobel 算子是边缘检测中常用的一种梯度幅值检测算子，该算子先对像素的上、下、左、右四邻域的灰度进行平均或加权平均，然后进行微分运算检测出边缘^[14]。Sobel 算子的模板见式（1）。

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sobel 算子的抗噪能力较弱，传统的图像滤波方式在平滑图像的同时都会弱化边缘。双边滤波算法在去除图像噪声的同时还能保存有用的边缘轮廓信息，计算描述为^[15]：

$$B_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p-q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q \quad (2)$$

$$W_p = \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p-q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) \quad (3)$$

式中： I_p 为图像 I 在坐标点 p 的灰度值； B_p 为滤波后得到的图像 B_1 在坐标点 p 的灰度值定义； q 为像素点 p 的邻域像素点； S 为邻域像素点集合； W_p 为归一化因子； G_{σ_s} 为空间邻近度因子； G_{σ_r} 为灰度相似度因子； σ_s 为基于高斯函数的距离标准差； σ_r 为基于高斯函数的灰度标准差。

文中提出一种将 Sobel 算子与双边滤波相结合的边缘检测算法，具体步骤如下所述。

1) 选择合适的 σ_s 和 σ_r 对缺陷图像进行双边滤波降噪处理，处理结果记为 D_{d0} 。

2) 用 $F(i+m, j+n)$ 表示窗口灰度，利用式（4）求模板卷积。

$$f_k(i, j) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 F(i+m, j+n) M_k \quad (4)$$

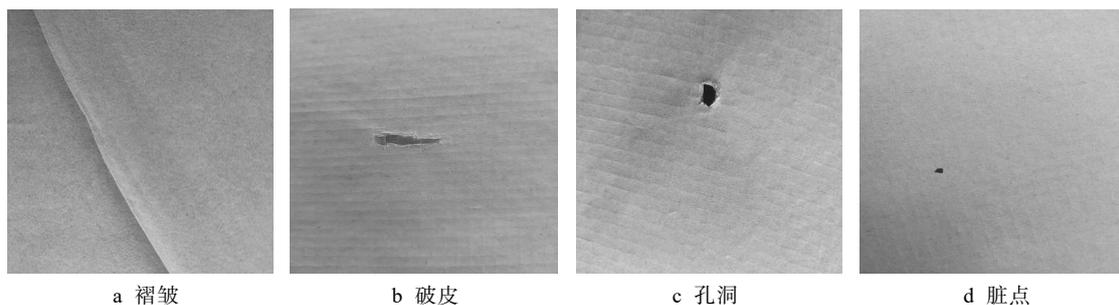


图 1 纸塑复合袋表面缺陷原图

Fig.1 Original drawing of surface defect of paper plastic composite bag

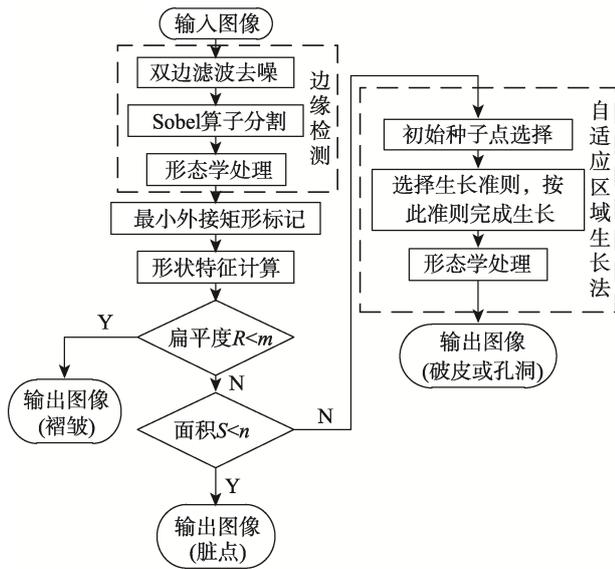


图2 算法流程 Fig.2 Algorithm flow chart

式中: $f_k(i, j)$ 为 Sobel 算子卷积后所得像素点灰度值; k 为水平和垂直 2 个边缘方向, $k=1, 2$; M_k 为 Sobel 算子模板。

3) 将 2 个模板卷积结果中的最大值 p_{max} 替换图像 D_d 中对应模板中心点像素值。

4) 取适当的阈值 T_h , 若 $p_{max} \geq T_h$, 则判定图像像素点为图像边缘, 记为 E_{dge} 。

5) 对边缘图像 E_{dge} 进行闭运算 (Closing Operation)。

利用上述边缘检测算法对图 1 中 4 种常见的纸塑复合袋表面缺陷图像进行分割, 经过多次实验, 其中 $\sigma_s=3$, $\sigma_r=0.12$, $T_h=0.02$ 时, 图像分割效果相对理想, 其效果见图 3。

由图 3 可以看出, 边缘检测算法对褶皱和脏点图像效果较好, 缺陷区域能够较为精确地分割出来; 破皮和孔洞图像缺陷边缘则出现毛刺、伪边缘情况, 缺陷区域整体增大, 造成过分割, 这可能是由于破皮和孔洞图像缺陷边缘附近灰度不均匀以及少量噪声的影响。尽管边缘检测对破皮和孔洞图像分割精度不足, 但已经将缺陷位置和大致轮廓标识出来, 由此可以考虑根据破皮和孔洞图像边缘检测分割的结果, 结

合其他方法对其再次分割, 文中采用自适应区域生长算法对图像进行进一步分割。

1.2.2 自适应区域生长算法

传统区域生长算法的初始种子点需要人工选取或指定, 不能满足自动分割要求, 且分割后的图像受噪声影响还存在边缘不平滑、有空洞的问题^[16]。文中结合纸塑复合袋表面缺陷图像边缘检测分割结果, 对其做出改进, 提出一种自适应区域生长算法, 具体步骤如下所述。

1) 计算边缘检测分割结果缺陷区域 C 的质心 (x_c, y_c) , 作为自适应区域生长的初始种子点, 计算公式为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{1}{N_C} \sum x \\ y_c = \frac{1}{N_C} \sum y \end{cases} \quad (x, y) \in C \quad (5)$$

式中: N_C 为缺陷区域 C 内像素点总数; (x, y) 为缺陷区域 C 内像素坐标。

2) 从初始种子点 (x_c, y_c) 开始, 按生长准则 $S\{I_s, G(x_c, y_c)\}$ 进行生长, 以此判断各邻域像素点是否与种子相似, 若相似则合并该像素点, 同时更新 $I_s, G(x_c, y_c)$ 。

$$S\{I_s, G(x_c, y_c)\} = \begin{cases} 0 & |I_s - G(x_c, y_c)| > T \\ 1 & |I_s - G(x_c, y_c)| \leq T \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_s 为种子区域邻域像素点灰度值; $G(x_c, y_c)$ 为种子区域灰度均值; T 为生长阈值, 目标区域为 1, 非目标区域为 0。

3) 重复式 (6) 过程, 直至不能再合并, 合并结果记为 R_g 。

4) 利用闭运算 (Closing Operation) 对 R_g 进行边缘平滑和孔洞填充。

利用自适应区域生长算法对图 1 中 4 种常见的纸塑复合袋表面缺陷图像进行处理, 其中阈值 T 根据多次实验取 20 较为理想, 其效果见图 4。

由图 4 可以看出, 自适应区域生长法对破皮、孔洞以及脏点图像的分割效果较好, 缺陷区域能够较为

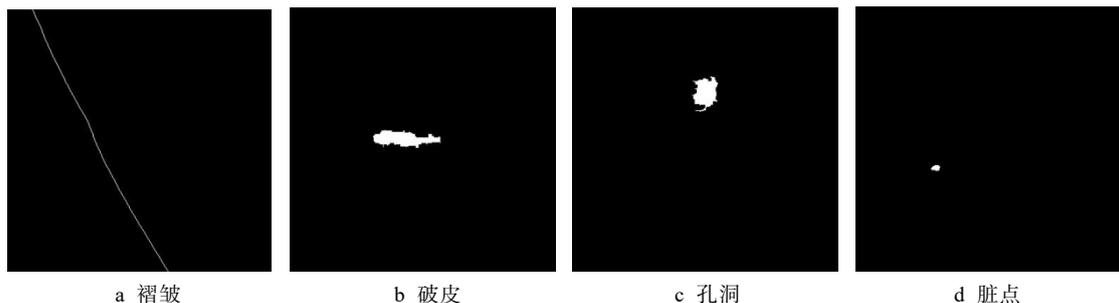


图3 边缘检测分割结果 Fig.3 Segmentation results of edge detection

完整精确的分割出来，但对褶皱图像的分割效果很差，出现明显的过分割和欠分割，原因可能是褶皱图像地被缺陷区域灰度值与背景灰度值差别较小，变化不明显，导致生长准则出现误判，形成错误分割结果。

1.2.3 2 次分割结果融合

根据褶皱细长和脏点面积较小的显著特点，选择形状特征的描述形式扁平度 R 和面积 S 作为 2 次分割结果的融合依据，其公式为：

$$S = \sum_i^M \sum_j^N f(i, j) \tag{7}$$

$$R = \frac{H}{W} \tag{8}$$

式中： $f(i, j)$ 为缺陷区域； M 和 N 分别为区域中像素点横坐标和纵坐标的数量； H 和 W 分别为缺陷区域最小外接矩形的高度和宽度。

文中在采集的褶皱、破皮、孔洞及脏点等 4 种常见的缺陷图像（380 像素×380 像素）中分别随机选取 20 张，对其中褶皱和脏点图像采用边缘检测算法分割，对破皮和孔洞图像采用自适应区域生长法分割，然后进行最小外接矩形标记并计算其形状特征，计算结果见图 5。

由图 5 可以看出，一般情况下，扁平度能够将褶皱与其他 3 种缺陷区分开，面积能够将脏点与其他 3 种缺陷区分开。由此可以设定 2 个常数 m, n ，先对缺

陷图像进行边缘检测分割，若扁平度 R 小于 m ，则停止分割，得到褶皱分割图像；否则继续判断面积 S 是否小于 n ，若是，则停止分割，得到脏点分割图像；否则继续进行自适应区域生长法分割，得到其他缺陷分割图像。 m, n 的计算公式为：

$$m = \frac{R_{p_{\min}} + R_{z_{\max}}}{2} \tag{9}$$

$$n = \frac{S_{z_{\min}} + S_{d_{\max}}}{2} \tag{10}$$

式中： $R_{p_{\min}}$ ， $S_{z_{\min}}$ 分别为破皮扁平度和褶皱面积的最小值； $R_{z_{\max}}$ ， $S_{d_{\max}}$ 分别为褶皱扁平度和脏点面积的最大值。

2 结果与分析

2.1 仿真实验

文中选取不同种类的纸塑复合袋表面缺陷灰度图共 80 张进行实验，其中褶皱、破皮、孔洞及脏点等 4 种缺陷图像各 20 张。为证明文中所述分割算法的优越性，现将文中所述分割算法与 OTSU 算法^[13]、Sobel 算子结合中值滤波算法^[9]以及传统区域生长算法进行对比，4 种常见纸塑复合袋表面缺陷图像分割结果见图 6。

观察图 6 的分割结果可知，OTSU 算法受光照影

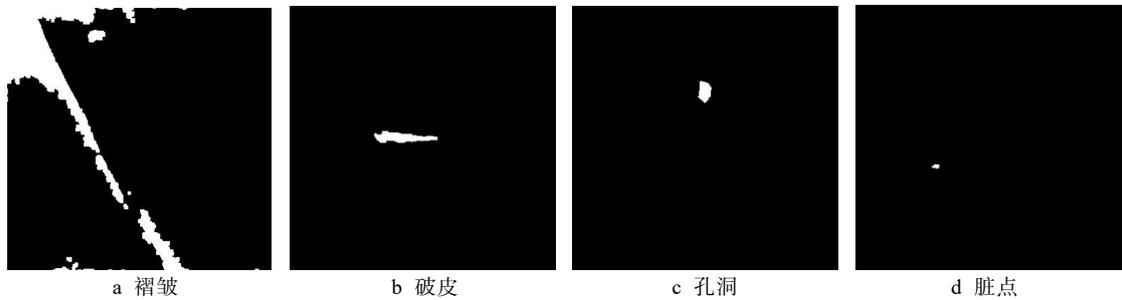


图 4 自适应区域生长法分割结果

Fig.4 Segmentation results of adaptive region growing method

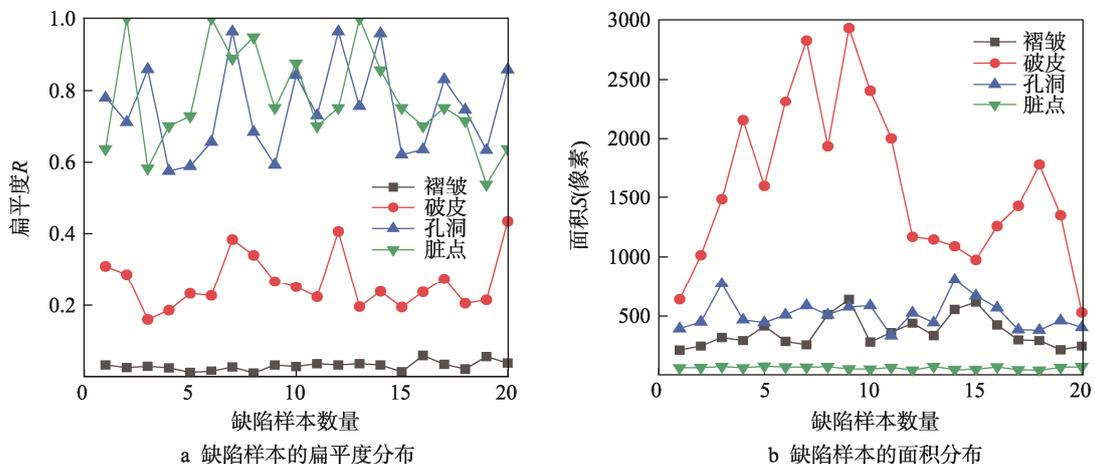


图 5 形状特征计算结果

Fig.5 Calculation results of shape features

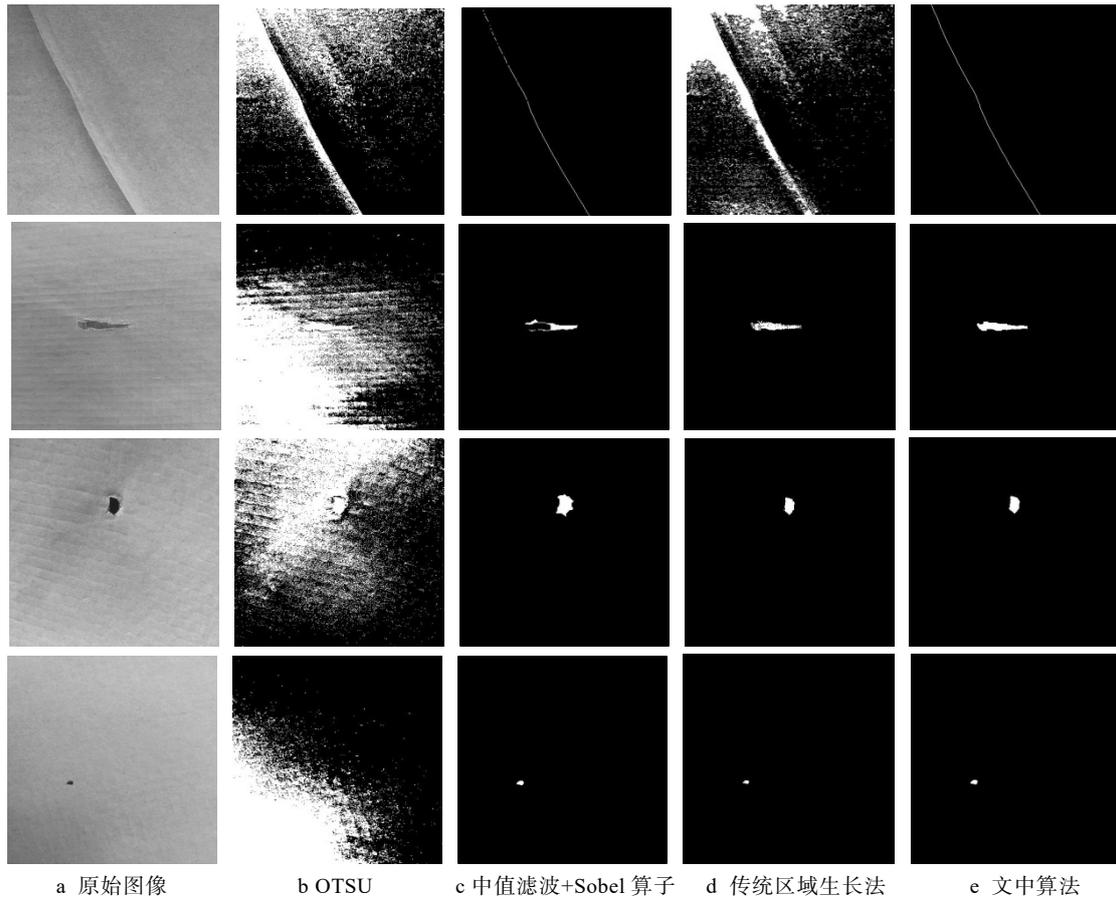


图6 不同算法的图像分割结果
Fig.6 Image segmentation results of different algorithms

响，结果出现大面积误分，分割效果最差；Sobel 算子结合中值滤波算法虽然能达到较好的降噪效果，但同时也模糊了缺陷边缘，导致褶皱、破皮及孔洞图像的分割精度不足，出现过分割和欠分割；传统区域生长法不仅需要人工选取初始种子点，且对褶皱图像的分割效果很差，破皮图像分割区域受噪声影响出现大量细孔和少量毛刺，分割效果不理想；文中所述算法融合边缘检测和自适应区域生长法，在缺陷图像降噪和分割精度方面都达到较为理想效果。

2.2 算法评价

为定量评价各类分割算法的性能，文中引入评价指标——Dice 系数，其值越接近 1，表明缺陷分割精度越高，公式为：

$$Dice(A, B) = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|} \quad (11)$$

式中：A 为手工绘制的缺陷区域；B 为算法分割得到的缺陷区域。

不同算法的分割结果质量定量评估见表 1，其中 Dice 系数取 20 组实验结果的平均值。从表 1 可以看出，对比其他 3 种算法，文中所提出的算法在各类缺陷的评价指标上均有较好的体现，Dice 系数均在 0.93

以上，展示了文中算法对纸塑复合袋表面缺陷图像分割的优势。

表 1 不同算法分割结果质量评估
Tab.1 Quality evaluation of segmentation results by different algorithms

缺陷类型	OTSU	中值滤波+Sobel 算子	传统区域生长法	文中算法
褶皱	0.0087	0.8159	0.0114	0.9931
破皮	0.0351	0.5521	0.8637	0.9384
孔洞	0.0173	0.7716	0.9225	0.9365
脏点	0.0046	0.9547	0.9869	0.9783

3 结语

针对纸塑复合袋表面缺陷图像容易出现过分割或欠分割的现象，提出了一种新的图像分割算法，取得较好的效果，主要结论如下所述。

1) 将 Sobel 算子与双边滤波相结合，实现边缘检测降噪又保留边缘的能力。利用边缘检测分割后缺陷区域的质心作为自适应区域生长法的初始种子点，同时结合形态学运算，提高缺陷区域分割的效果和实

现自动分割。

2) 以形状特征扁平度和面积为融合依据, 实现边缘检测和自适应区域生长法的有效融合。

3) 与 OTSU 算法、Sobel 算子结合中值滤波算法、传统区域生长算法相比, 文中算法可精确实现 4 种常见纸塑复合袋表面缺陷图像的分割, Dice 系数均在 0.93 以上。文中算法阈值的选取是依靠大量实验人工获得的, 可能存在误差, 这将作为日后的研究重点进一步进行完善。

参考文献:

- [1] 李学锋, 王建东, 石彪, 等. PP 编织布与牛皮纸复合工艺易出现缺陷及改进措施[J]. 中国胶粘剂, 2001(4): 36—38.
LI Xue-feng, WANG Jian-dong, SHI Biao, et al. PP Woven Fabric and Kraft Paper Composite Process Prone to Defects and Improvement Measures[J]. China Adhesive, 2001(4): 36—38.
- [2] 李茜, 文豪, 曲蕴慧, 等. 边缘跟踪算法在多纸病图像分割中的应用[J]. 中国造纸, 2017, 36(8): 41—45.
LI Xi, WEN Hao, QU Yun-hui, et al. Application of Edge Tracking Algorithm in Image Segmentation of Multiple Paper Defects[J]. China Paper, 2017, 36(8): 41—45.
- [3] CHANG Z Y, CAO J, ZHANG Y Z. A Novel Image Segmentation Approach for Wood Plate Surface Defect Classification through Convex Optimization[J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29(6): 1789—1795.
- [4] AMINZADEH M, KURFESS T. Automatic Thresholding for Defect Detection by Background Histogram Mode Extents[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015, 37: 83—92.
- [5] SENGUPTA S, MITTAL N, MODI M. Improved Skin Lesion Edge Detection Method Using Ant Colony Optimization[J]. Skin Research and Technology, 2019, 25(6): 846—856.
- [6] 陈亮, 张浩舟, 燕浩. 基于深度学习算法的尿素泵体用铝型材表面瑕疵检测[J]. 流体机械, 2020(8): 47—52.
CHEN Liang, ZHANG Hao-zhou, YAN Hao. Surface Defect Detection of Aluminum Profile for Urea Pump Body Based on Deep Learning Algorithm[J]. Fluid Machinery, 2020(8): 47—52.
- [7] ZHAO W D, CHEN W X, LIU Y J, et al. A Smoke Segmentation Algorithm Based on Improved Intelligent Seeded Region Growing[J]. Fire and Materials, 2019, 43(6): 725—733.
- [8] 邓超, 刘岩岩. 基于边缘检测的斜纹布匹瑕疵检测[J]. 测控技术, 2018, 37(12): 110—113.
DENG Chao, LIU Yan-yan. Detection of Twill Fabric Defects Based on Edge Detection[J]. Measurement and Control Technology, 2018, 37(12): 110—113.
- [9] 翟红芳, 卢焕章, 张申涛. 中值滤波和边缘检测技术在复杂背景图像分割中的应用[J]. 现代计算机, 2006(9): 92—94.
ZHAI Hong-fang, LU Huan-zhang, ZHANG Shen-tao. Application of Median Filtering and Edge Detection Technology in Complex Background Image Segmentation[J]. Modern Computer, 2006(9): 92—94.
- [10] 陈亚楠, 陈丽芳, 芦国军. 基于 OTSU 和区域生长的肺部 CT 图像分割方法[J]. 无线互联科技, 2018, 15(17): 103—104.
CHEN Ya-nan, CHEN Li-fang, LU Guo-jun. Lung CT Image Segmentation Method Based on OTSU and Regional Growth[J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(17): 103—104.
- [11] 刘鑫, 陈永健, 万洪林, 等. 基于两阶段区域生长的肝内血管分割算法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(12): 194—197.
LIU Xin, CHEN Yong-jian, WAN Hong-lin, et al. Segmentation Algorithm of Intrahepatic Vessels Based on Two-stage Region Growth[J]. Computer Engineering and Application, 2015, 51(12): 194—197.
- [12] 严深海, 黄贤通, 刘洋. 种子区域生长法的改进算法及其在钉螺图像提取中的应用[J]. 韶关学院学报, 2011, 32(10): 21—24.
YAN Shen-hai, HUANG Xian-tong, LIU Yang. Improved Seed Region Growing Algorithm and Its Application in Snail Image Extraction[J]. Journal of Shaoguan University, 2011, 32(10): 21—24.
- [13] 陈思. 基于 Otsu 算法的车牌图像二值化及其 Matlab 实现[J]. 长春师范学院学报, 2012, 31(3): 33—35.
CHEN Si. Binarization of License Plate Image Based on Otsu Algorithm and Its Matlab Implementation[J]. Journal of Changchun Normal University, 2012, 31(3): 33—35.
- [14] 杨鹏程, 杨社强, 肖渊, 等. 织物表面几何形状检测中最优边缘检测算法的选取[J]. 毛纺科技, 2018, 46(9): 79—83.
YANG Peng-cheng, YANG She-qiang, XIAO Yuan, et al. Selection of Optimal Edge Detection Algorithm in Fabric Surface Geometry Detection[J]. Wool Technology, 2018, 46(9): 79—83.
- [15] 李俊峰. 双边滤波算法的快速实现及其在图像处理中的应用[D]. 广州: 南方医科大学, 2013: 16—17.
LI Jun-feng. Fast Implementation of Bilateral Filtering Algorithm and Its Application in Image Processing[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2013: 16—17.
- [16] LEVINE M D, NAZIF A M. Dynamic Measurement of Computer Generated Image Segmentations[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(2): 64—155.