

文章编号: 1002-2082 (2020) 03-0508-08

基于局部图像分割与多特征滤波的 自适应桥梁露筋检测算法

贺福强, 罗 红, 姚学练, 平 安

(贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 针对光照不均、多种复杂背景并存的工况下, 采用传统阈值分割方法难以有效将露筋与背景分开的问题, 提出了基于局部图像分割与多特征滤波的自适应桥梁露筋检测算法。首先, 将灰度图像的灰度值进行投影并寻找露筋在投影图上形成的波谷及其坐标; 其次, 以波谷坐标为中心设置分割范围对灰度图进行行和列的分块, 然后对合并行和列分块的灰度图像进行局部阈值分割; 最后, 基于多特征滤波实现露筋特征的提取。采用该算法对7种常见的露筋进行验证。实验表明: 该方法的平均误检率、漏检率与与人工测量的露筋长度相对误差分别为5.15%、3.89%和3.74%, 误差符合公路病害评定标准, 实现了复杂环境下露筋的自适应识别。

关键词: 图像处理; 裂缝检测; 灰度投影; 多特征滤波

中图分类号: TN911.73

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0302004

Self-adaptive bridge bare rebar detection algorithm based on local image segmentation and multi-feature filtering

HE Fuqiang, LUO Hong, YAO Xuelian, PING An

(School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Due to the interference of the uneven illumination and the complex background, the traditional threshold segmentation methods are difficult to effectively separate the bare rebar from the background. An adaptive bridge bare rebar detection algorithm based on local image segmentation and multi-feature filtering was proposed. Firstly, the gray value of the gray image was needed to project, and the wave trough and its coordinates formed by the bare rebar on the projection were found out. Secondly, with the wave trough coordinates as the center, the segmentation range was set to divide the rows and columns of the gray image, and the merged gray image was segmented by the local threshold. Finally, the extraction of the bare rebar feature was realized based on the multi-feature filtering, and the proposed algorithm was used to verify 7 kinds of common bare rebars. The experimental results show that the average error rate, the missing rate and the relative error of the bare rebar length with manual measurement are 5.15%, 3.89% and 3.74%, respectively, which meet the criterion of the highway disease evaluation and realize the adaptive recognition of the bare rebar under complex environment.

Key words: image processing; crack detection; gray projection; multi-feature filtering

引言

桥梁的主体结构多数是由钢筋和混凝土浇筑而成, 由于长期处于复杂的气候环境中, 使得桥墩

侧面和桥面底部的混凝土发生脱落, 裸露出里面的钢筋, 若不及时修复, 将会缩短桥梁的使用寿命, 甚至引发严重的事故^[1-2]。因此及时地发现漏

收稿日期: 2019-11-14; 修回日期: 2020-01-04

基金项目: 贵州省交通科学股份有限公司科技项目 (GZJKY 科技字)

作者简介: 贺福强 (1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事机器视觉与模式识别方面的研究。E-mail: luoh1028@163.com

筋区域并且进行修复是首要问题。目前使用的技术是通过无人机进行桥梁图像的采集, 再结合图像处理技术完成漏筋区域的提取。由于混凝土表面污渍较多, 使得漏筋的提取比较困难。Michael 等人^[3]针对此问题提出了一种基于 HSV(hue, saturation, value)空间的漏筋检测方法。通过提取彩色图像的色度、饱和度、亮度分量再结合自适应分割算法, 完成漏筋的提取, 但提取的结果中有部分噪声的残留。李良福等人^[4]提出了基于深度学习的混凝土缺陷检测算法, 该方法需要对大量的图像进行训练, 最终通过生成的模型来检测缺陷, 检测的结果主要受到训练集数量以及网络层参数设置的影响。以上方法在缺陷的检测过程中都有一定的效果, 但要完成病害的精准提取, 还需对算法进行优化。灰度投影法是一种用于字符分割^[5-9]、车牌识别^[10-12]的算法, 该方法利用图像中灰度信息的分布来确定目标的位置。因此本文结合漏筋区域特性以及投影法的原理完成缺陷的定位, 再结合分割和滤波算法实现缺陷的提取。

1 基于局部图像分割与多特征滤波的自适应桥梁露筋检测算法

针对桥梁漏筋图像中复杂背景的干扰问题, 本文提出了一种自适应阈值分割与多特征滤波相结合的漏筋检测方法, 首先通过投影法完成漏筋区域定位, 缩小检测范围, 再结合特定的分割和滤波方法去除各种噪声, 实现漏筋特征的提取, 图 1 给出了算法实现的流程图。具体的实施步骤如下:

1) 对原图进行图像灰度化, 并对灰度图像进行双边滤波使其平滑;

2) 将滤波后的灰度图进行水平投影和垂直投影; 寻找水平投影和垂直投影图中的峰值及其相邻波谷的坐标和其投影值;

3) 计算每个峰值与其相邻波谷的高度差, 将高度差与所设阈值对比, 记录符合要求的高度差所对应的波谷坐标, 若所记波谷坐标靠近边缘位置, 进一步判断是否为外景与桥梁背景形成的波谷;

4) 求该图像中点到图像边缘在投影图上的投影值的标准差, 将标准差与所设阈值进行比较, 结合高度差确定小于阈值的标准差所对应的波谷的坐标;

5) 以波谷中心位置左右设置剪切宽度对灰度图分别进行行和列的剪切以剔除背景的干扰, 并

将剪切后的图像进行合并;

6) 对合并图像进行自适应阈值分割;

7) 进行形态学处理, 以连接露筋“断层”部分; 进行圆形度阈值滤波以排除排水孔和小面积孤立噪声点; 进行面积阈值滤波处理以去除非目标的干扰; 进行长宽比阈值滤波以去除桥面夹角形成的干扰;

8) 计算漏筋长度。

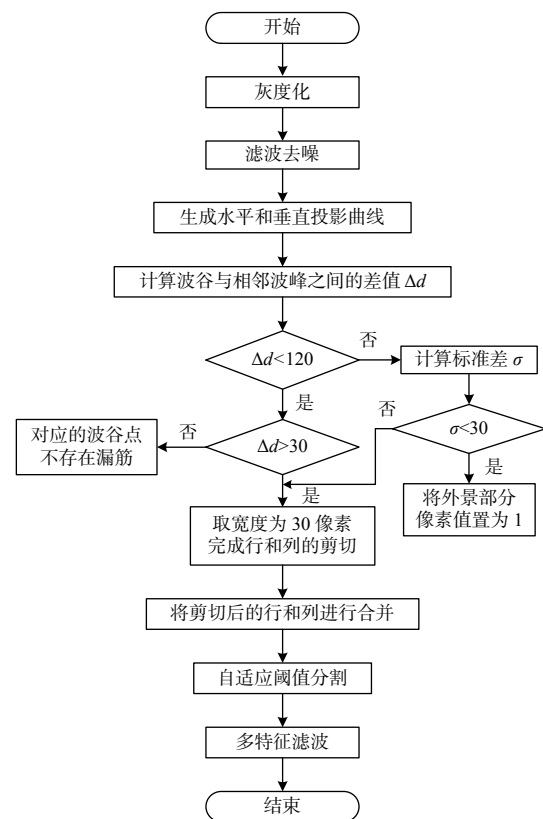


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

2 局部阈值分割

2.1 双边滤波

由于桥面不整洁以及拍摄时光照的影响, 使得漏筋的提取比较困难, 因此首先需要对图像进行降噪处理。双边滤波是一种非线性的滤波器^[13], 它可以在保留边缘的同时平滑背景区域, 其原理是将两种不同性质的函数进行叠加, 从而得到一组权重, 将权重与原图进行卷积操作实现图像的去噪, 其表达式如(1)~(2)式:

$$I(x, y) = \frac{\sum_{u,v} I(u, v) W(i, j, u, v)}{\sum_{u,v} W(i, j, u, v)} \quad (1)$$

$$W(i, j, u, v) = \exp\left(-\frac{(i-u)^2 - (j-v)^2}{2\sigma_k^2} - \frac{\|I(i, j) - I(u, v)\|^2}{2\sigma_l^2}\right) \quad (2)$$

式中: $I(i, j)$ 为图像 I 在点 (i, j) 的像素值; (u, v) 为 (i, j) 的邻域像素点; W 为权重; σ_k 和 σ_l 为平滑系数。滤波后的灰度图像如图 2 所示。

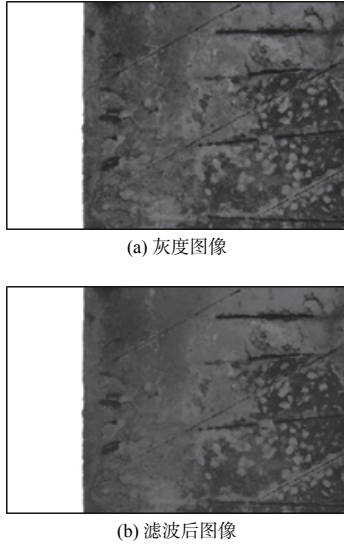


图 2 滤波效果图

Fig. 2 Filtering effect image

2.2 基于灰度值投影法漏筋区域定位

由于漏筋多为条状且颜色发黑, 为了能够排除大部分背景的干扰, 确定漏筋的大致区域, 本文将双边滤波后的灰度图像进行投影, 生成投影曲线, 通过计算曲线中波峰与相邻波谷的高度差与所设阈值进行对比, 保留符合要求的波谷坐标, 以波谷为中心设置分割范围对灰度图进行行和列的剪切, 将最终的剪切结果进行合并以保留露筋完整信息。检测算法步骤如下:

1) 绘制投影曲线。对原图中的像素值按行和列分别累加求和:

$$T(y) = \sum_{x=1}^{row} I(x, y), y = 1, 2, \dots, column \quad (3)$$

$$P(x) = \sum_{y=1}^{column} I(x, y), x = 1, 2, \dots, row \quad (4)$$

式中 $T(y)$ 和 $P(x)$ 分别表示第 y 列和第 x 行的像素值之和。根据求和结果绘制垂直投影曲线和水平投影曲线如图 3 和图 4 所示。

2) 统计曲线中所有的波谷点与波峰点的坐标, 并计算波谷点与相邻波峰点之间的高度差值, 计算公式如(5)~(6)式:

$$\Delta d_1(j) = |V(j) - P(j-1)| \quad (5)$$

$$\Delta d_2(j) = |V(j) - P(j+1)| \quad (6)$$

式中: Δd_1 为左边波峰与波谷的差值; Δd_2 为右边波峰与波谷的差值; V 和 P 分别为波谷和波峰点的投影值。

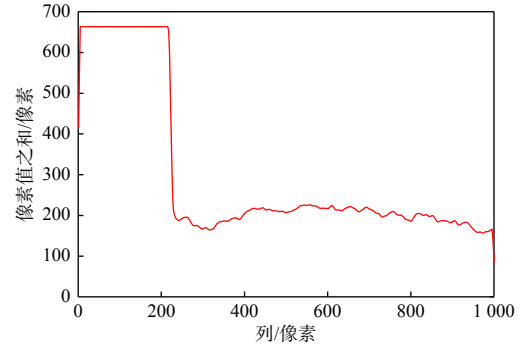


图 3 垂直投影

Fig. 3 Vertical projection

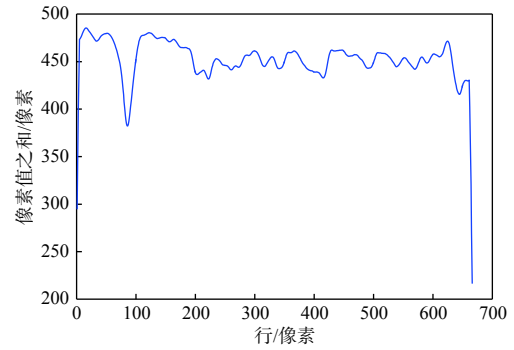


图 4 水平投影

Fig. 4 Horizontal projection

3) 排除外景区域的干扰。拍摄图像的过程中难免会带入天空或森林等外景, 需要首先进行去除, 由于外景中灰度的分布较为均一, 且会与桥梁形成一条水平或垂直的相交线, 因此可以通过投影得到的差值与求取的图像边缘部分标准差来判断是否需要存在外景。若 Δd_1 或 Δd_2 大于 120, 则利用(7)式计算 $V(j)$ 值至曲线最后一个点的投影值之间的标准差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (7)$$

式中: σ 为标准差; N 为对应坐标个数; x_i 为第 i 个坐标对应的投影值; μ 为投影值平均值。

若标准差小于 30, 则存在外景, 将相交线以外的区域像素值置为 1, 若标准差大于 30, 则不存在外景, 执行下一步。

4) 以波谷中心位置左右设置 15 像素的宽度范围对灰度图分别进行行和列的裁剪, 最后再将

剪切后剩下的行和列进行合并, 以剔除背景的干扰, 结果如图 5 所示。

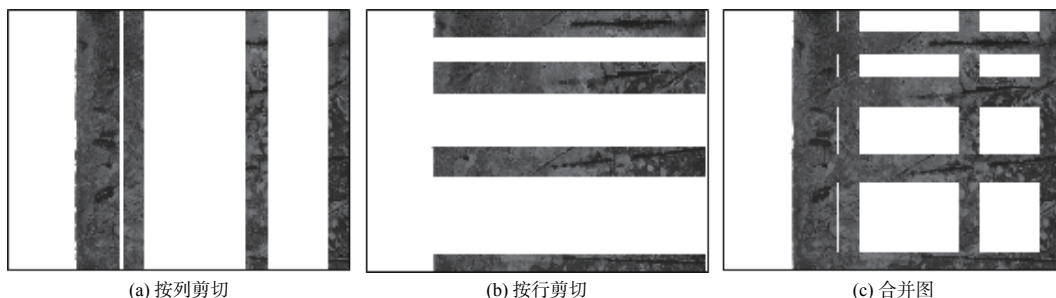


图 5 漏筋区域定位

Fig. 5 Regional location of bare rebar

2.3 局部图像阈值分割

与其他算法中的物体分割识别不同, 桥梁漏筋图像中没有统一的背景和均一的色彩分布, 每一张图都不一样, 因此不能用同一个阈值去处理所有的图像。为了除去背景中与漏筋颜色相似的污渍、直线印记、混凝土脱落和渗水区域像素对分割结果的影响, 提出了一种自适应的阈值分割方法, 步骤如下:

1) 统计合并后的漏筋图像中灰度值小于 1 的像素个数 n 及灰度值均值 $Mean$:

$$Mean = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(i) \quad (8)$$

式中 $I(i)$ 代表第 i 个像素的灰度值。

2) 由于漏筋灰度值较低, 若通过 $Mean$ 值直接进行分割会保留很多噪声, 通过多次试验分析, 当阈值选取为 $Mean/2$ 时分割的效果最佳。

3) 取 $Mean/2$ 为全局阈值 T , 根据(9)式对合并后的图像 $I(x,y)$ 进行二值化:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & I(x,y) \geq T \\ 0 & I(x,y) < T \end{cases} \quad (9)$$

由于 T 是根据每一张图像中的灰度信息求取的, 因此每一张图像 T 的取值都不同, 从而能够实现自适应分割。图 6 为各种算法的分割效果图。

全局阈值分割方法是通过人为设置阈值完成图像分割, 没有考虑到图像中像素的分布情况, 使得分割效果不佳。最大熵值法是通过计算背景与

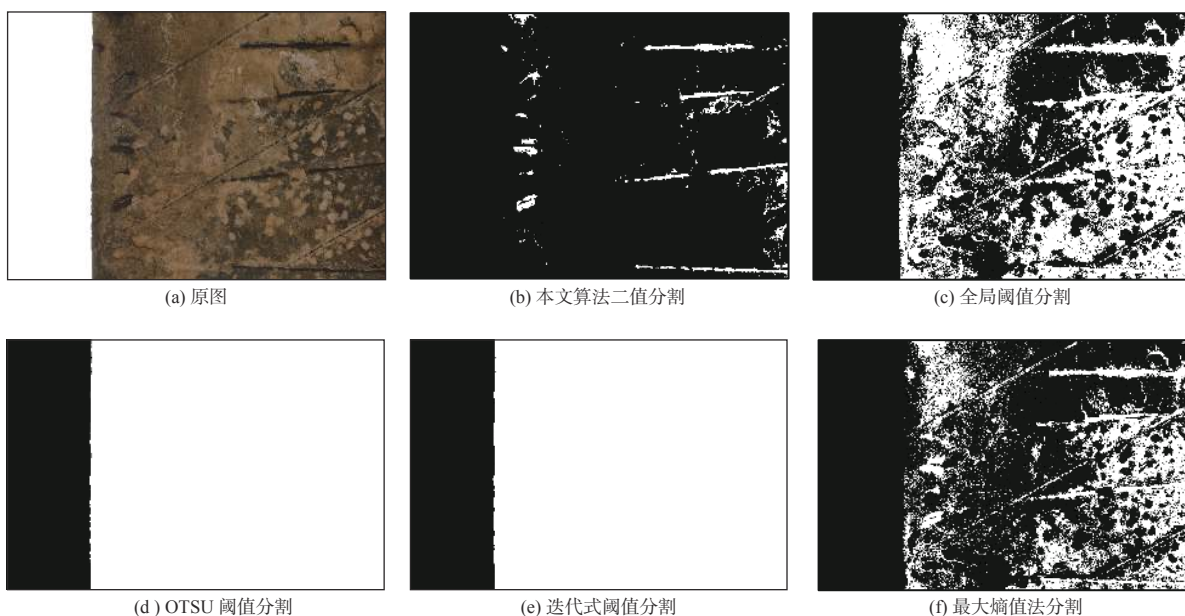


图 6 不同算法阈值分割对比

Fig. 6 Comparison of threshold segmentation with different algorithms

前景中像素分布的概率来确定阈值的,但由于污渍和渗水区域的像素灰度与漏筋十分相似,得到的结果中掺杂了很多干扰,难以去除。OTSU和迭代算法^[14]在外景和漏筋区域存在较为明显的分界线时,直接将桥梁部分所有的像素置为一体,因此无法实现漏筋的提取。采用本文算法可以有效地去除部分背景的干扰,实现目标与背景分割,为多特征滤波提取露筋特征奠定了基础。

3 多特征滤波图像处理

3.1 形态学处理

从图 6(b)可看出露筋部分出现“断层”不连续的情况,增加了露筋的特征提取难度,采用半径为 3 圆盘的结构元素 B ,对灰度图像 A 形态学开运算^[15],即使用同样的结构元素先对图像进行腐蚀操作后进行膨胀操作,开运算公式如(10)式所示:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (10)$$

3.2 圆形度滤波

采用形态学处理后,虽有效将露筋“断层”部分连接,但仍存在小面积孤立的噪声以及有些图像中出现排水孔的干扰等情况,采用圆形度阈值滤波。圆形度计算公式如(11)式所示:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (11)$$

式中: C 为圆形度; A 为连通域面积; P 为连通域周长。当目标为标准圆形时,圆形度最大为 1,而孤立的噪声和排水孔的形态特征接近于标准圆,通过多次试验确定圆形度阈值 $C_T=0.7$,通过(12)式对 $g(x,y)$ 进行圆形度阈值滤波:

$$g'(x,y) = \begin{cases} 0 & g(x,y) \geq C_T \\ 1 & g(x,y) < C_T \end{cases} \quad (12)$$

3.3 面积滤波

获得圆形度滤波后的图像 $g'(x,y)$,根据《公路桥涵养护规范》及实际的检测经验,对于面积较小的露筋可选择性不处理,为了排除其他类似露筋的干扰,如电线、小划痕等,设置面积阈值 $A_T=280$ 像素,通过(13)式进行面积滤波:

$$h(x,y) = \begin{cases} 0 & g'(x,y) \geq A_T \\ 1 & g'(x,y) < A_T \end{cases} \quad (13)$$

3.4 长宽比滤波

经过圆形度滤波和面积滤波有效去除大部分干扰,剩下的大多为露筋连通域和疑似露筋干扰,通过分析二值图像的连通域的形态特征,发现露筋呈长条状,因此计算连通域的长度与宽度,设置

长宽比滤波阈值 $K_T=5$,通过(14)式进行面积滤波:

$$k(x,y) = \begin{cases} 0 & K_T \leq h(x,y) \leq 20K_T \\ 1 & h(x,y) < K_T \end{cases} \quad (14)$$

经过多特征滤波后有效排除了干扰,保留了露筋特征,露筋二值图像如图 7 所示。



图 7 多特征滤波露筋特征二值图

Fig. 7 Bare rebar feature binary image of multi-feature filtering

4 实例验证与分析

本文选取 7 张不同背景环境的漏筋图像进行验证,图像背景包括渗水、混凝土表皮脱落、直线浇筑印记等干扰,其尺寸统一为 1 000×666 像素,算法的硬件运行环境为 ThinkPad P51s Signature Edition;处理器: Intel(R)Core(TM)CPU @3.30 GHz;安装内存(RAM): 4.0GB;软件编程语言 MatlabR 2015b。为了验证算法的有效性,选取了 k-means 聚类算法、二维最大熵值法与本文算法进行了对比,漏筋的检测效果如图 8 所示。图中显示了 7 种复杂背景下的漏筋,分别包括钢筋锈蚀、直线浇筑印记干扰、桥底 T 梁漏筋、表面混凝土脱落、渗水、不明显锈蚀漏筋、盖梁底部漏筋。从漏筋提取的效果来看,不同算法处理得到结果差异较大,由于 K-means 聚类算法对孤立的噪声比较敏感,且不易选取 K 值和初始聚类中心点,导致分类效果差;二维熵值法采用灰度和邻域平均灰度构成的二维直方图选择阈值,使得非漏筋区域的熵值很大,导致混凝土砂浆粘结等干扰无法进行有效的去除;本文算法对噪声采取了分批处理,首先通过双边滤波去除对图像中的麻点,平滑背景。然后根据灰度投影确定漏筋的大致区域,缩小检测范围,最后结合分割和形态学处理得到特征图。从特征图中统计出了漏筋的条数和长度,如表 1 所示。表 1 中的误检率 α 、漏检率 β 和相对误差 ε 分别由(15)、(16)、(17)式给出:

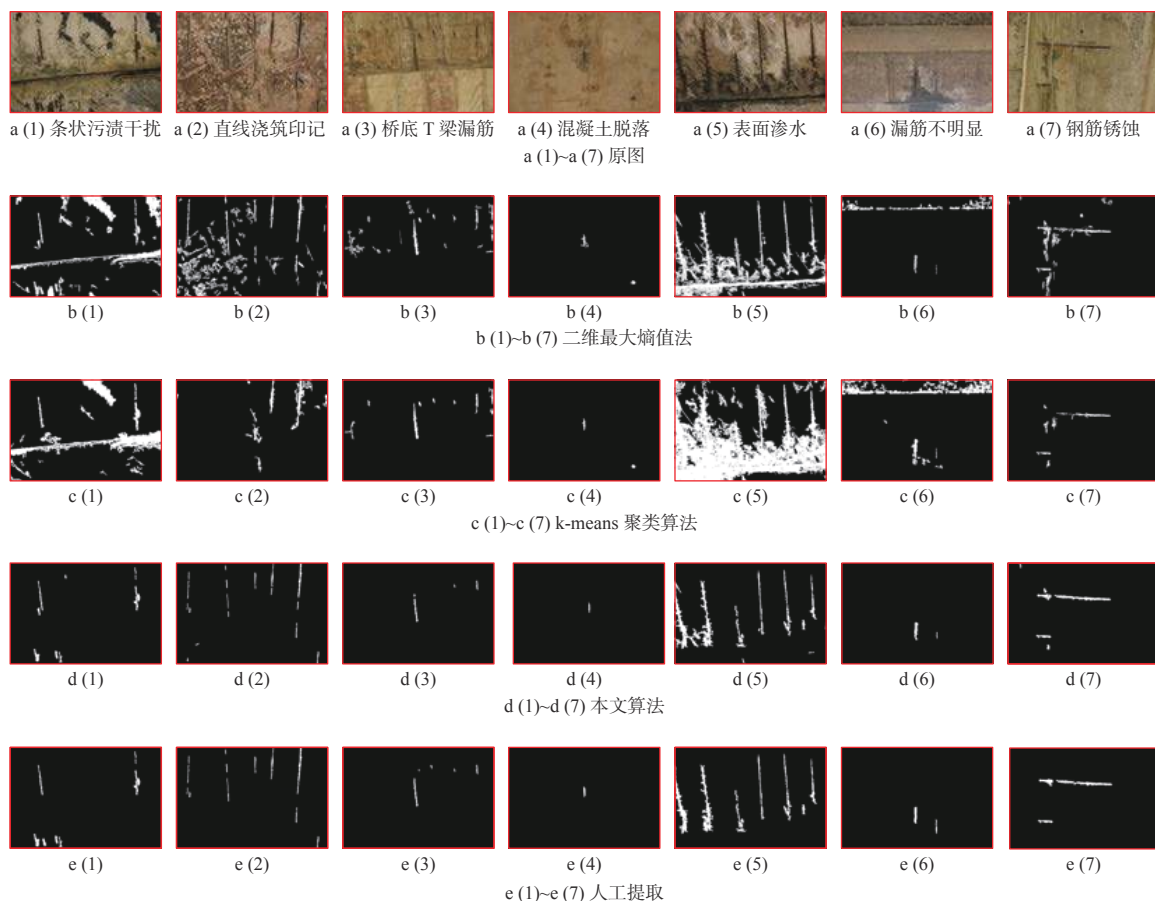


图8 7种常见的露筋特征识别

Fig. 8 Identification of 7 kinds of common features of bare rebar

表1 7种复杂工况下露筋检测结果

Table 1 Test results of bare rebar under 7 kinds of complex working conditions

图像编号	检测露筋个数	实际露筋个数	误检率(α)/%	漏检率(β)/%	算法计算总露筋长度/cm	人工测量总露筋长度/cm	相对误差/%
a(1)	7	6	9.46	9.35	145.77	142.91	1.96
a(2)	6	6	3.70	3.65	357.05	362.90	1.68
a(3)	2	5	0	14.20	80.64	83.90	4.04
a(4)	1	1	0	0	13.93	13.20	5.24
a(5)	8	7	10.53	0	391.27	385.53	1.46
a(6)	2	2	0	0	40.97	44.48	8.57
a(7)	4	2	12.34	0	73.50	75.85	3.20

$$\alpha = \frac{N_b}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (15)$$

$$\beta = \frac{N_d}{N_g} \times 100\% \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{|N_{\text{total}} - N_g|}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (17)$$

式中: N_b 指被误检为露筋的背景区域像素个数; N_d 指没有被算法检测出来的实际露筋区域像素个数; N_{total} 为本文算法检测出的漏筋区域像素个数;

N_g 为实际人工检测出的露筋像素个数。

由表1可知, 本文算法在检测图 a(1) 时漏检率和误检率都较高, 主要原因在于部分漏筋距离较近且周围有大量污渍干扰, 因此在长宽比滤波过程中真实裂缝被当作污渍滤掉了, 图 a(5) 和 a(6) 中的漏筋较多, 根据技术要求, 只需提取较大条漏筋即可, 同一区域小条漏筋便可忽略不计, 所以虽然误检率较高, 但相对误差很小, 满足

检测要求。

表 2 给出不同算法在漏筋检测中的平均误检率、平均漏检率和平均相对误差,本文算法的平均误检率为 5.15%,平均漏检率为 3.89%,与其他算法

相比误差较小,符合公路桥梁病害评定标准;计算的露筋总长度相对于人工测量的平均相对误差为 3.74%,远低于其他算法,说明本文算法在漏筋上具有较高精度。

表 2 不同算法的实验对比

Table 2 Comparison of different algorithm experiments

算法	本文算法	二维最大熵值法	K-means聚类算法
平均误检率/%	5.15	75.85	80.47
平均漏检率/%	3.89	28.62	17.06
平均相对误差/%	3.74	67.70	76.18

5 结 论

本文给出一种基于局部图像分割与多特征滤波的自适应桥梁露筋检测算法。

1) 对投影图进行了分析,通过差分曲线找到波谷,利用高度差和标准差阈值综合判断,确定了露筋的位置;

2) 以露筋位置为基准设置分块范围,对灰度图像进行了行和列分块,合并行列分块图像并进行局部图像阈值分割,对比常用的阈值分割方法,本文算法可以有效地将目标与背景分开;

3) 基于多特征滤波,去除了非露筋的干扰,最大程度保留了露筋的主要信息。

采用该算法对 7 种常见的露筋类型进行了实验验证。实验结果表明:该算法平均的误检率、漏检率和相对误差分别为 5.15%、3.89%、3.74%,误差较小均符合公路病害评定标准。本文算法有效解决了光照不均、多背景并存对桥梁露筋提取的干扰问题,实现了复杂环境下的露筋的自适应识别,降低了人力检测成本,提高了露筋检测效率,为从事桥梁检测的技术人员提供了参考。

参考文献:

[1] GAO Shan, WANG Qian, REN Tengxian, et al. Experimental of shearing behavior of damaged reinforced concrete T-beams strengthened by composite technique[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(24): 371-378.
高珊, 王茜, 任腾先, 李文渊. 组合加固受损钢筋混凝土简支 T 梁抗剪性能试验 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(24): 371-378.

[2] GU Wan, XIAO Peng, FAN Zhao, et al. A review of research on typical disease damage mechanism and main-

tenance measures of concrete slab beam bridge[J]. *Construction Technology*, 2018, 47(S4): 628-633.
顾万, 肖鹏, 范钊, 陆垚峰, 茅荃. 混凝土板梁桥典型病害损伤机理及养护措施研究 [J]. *施工技术*, 2018, 47(S4): 628-633.

[3] O'BYRNE M, SCHOEFS F, GHOSH B, et al. Texture analysis based damage detection of ageing infrastructural elements[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2013, 28(3): 162-177.

[4] LI Liangfu, MA Weifei, LI Li, et al. Research on detection algorithm for bridge cracks based on deep learning[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(9): 1727-1742.
李良福, 马卫飞, 李丽, 等. 基于深度学习的桥梁裂缝检测算法研究 [J]. *自动化学报*, 2019, 45(9): 1727-1742.

[5] WANG Liu, CHEN Chao, GAO Nan, et al. Three-dimensional shape measurement of high reflective objects based on adaptive fringe-pattern projection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 373-378.
王柳, 陈超, 高楠, 张宗华. 基于自适应条纹投影的高反光物体三维面形测量 [J]. *应用光学*, 2018, 39(3): 373-378.

[6] WU Haibing, ZHANG Liang, GU Guohua, et al. Color image enhancement based on LLL tricolor image denoising and fusion[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 57-63.
吴海兵, 张良, 顾国华, 等. 基于低照度三基色图像去噪及融合彩色图像增强方法研究 [J]. *应用光学*, 2018, 39(1): 57-63.

[7] LI Jian, DING Xiaoqi, CHEN Guang, et al. Blade image denoising method based on improved Gauss filtering algorithm[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(6): 1385-1391.

- 李健, 丁小奇, 陈光, 等. 基于改进高斯滤波算法的叶片图像去噪方法[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(6): 1385-1391.
- [8] CHEN Chao, LUO Xiaohua, CHEN Shuqun, et al. Optimizing implementation of Gaussian filter based on field programmable gate array[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2017, 51(5): 969-975.
- 陈超, 罗小华, 陈淑群, 等. 基于现场可编程门阵列的高斯滤波算法优化实现[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(5): 969-975.
- [9] WANG Jianlin, PING Jianping. A method of background segmentation for surface defect of bridge cables[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2018, 27(7): 24-29.
- 王建林, 潘建平. 一种桥梁拉索表面缺陷图像的背景分割方法研究[J]. *测绘工程*, 2018, 27(7): 24-29.
- [10] JIA Fuxi, SHI Cunzhao, WANG Yanna, et al. Grayscale-projection based optimal character segmentation for camera-captured faint text recognition[C]//2017 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). USA: IEEE, 2017: 1301-1306.
- [11] MOUSA M, SAYED M, ABDALLA M. Arabic character segmentation using projection based approach with profile's amplitude filter[C]//International Congress of Information and Communication Technology. USA: IEEE, 2013, 1: 1251-1256.
- [12] DU Yuan. License plate recognition algorithm based on image segmentation and feature model[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2018, 37(8): 20-24.
- 杜媛. 基于图像分割与多特征模型的车牌识别算法[J]. *国外电子测量技术*, 2018, 37(8): 20-24.
- [13] WEN Chao, CUI Mengmeng, LI Guoqiang, et al. Guided trilateral filter and its application to ultrasound image despeckling[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2020, 55: 75-00.
- [14] ZHANG Yun, JIAO Bin. A two-dimensional maximum entropy threshold segmentation algorithm based on canny operator[J]. *Journal of Shanghai Dianji University*, 2018, 21(3): 1-5.
- 张允, 焦斌. 基于Canny算子的二维最大熵阈值分割算法[J]. *上海电机学院学报*, 2018, 21(3): 1-5.
- [15] XU Jiade, SHAN Deshan. Research on adaptive morphological filter of dynamic test signals for bridge structure[J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(4): 15-19.
- 徐佳德, 单德山. 桥梁结构动力测试信号的自适应形态学滤波研究[J]. *铁道建筑*, 2018, 58(4): 15-19.