

基于海森矩阵增强与局部裂缝拼接相结合的桥梁裂缝提取算法

贺福强*, 罗红, 平安, 姚学练

(贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:针对复杂背景桥梁裂缝图像难以提取真实裂缝细节的技术问题,提出基于海森矩阵旋转矢量不变性的滤波去噪和局部区域裂缝走势生长方向连接的联合提取裂缝算法。利用海森矩阵增强图像突显裂缝区域,利用自适应阈值分割算法对图像进行二值分割;采用基于旋转矢量不变性的滤波算法滤掉团状噪声,根据裂缝的走势对生长方向一致的局部区域裂缝进行连接,排除条状非裂缝的影响和部分噪声的干扰;解决了图像处理中存在大量污渍残留和裂缝不连续现象。实验结果表明,本算法对复杂背景桥梁图像提取裂缝的准确度高于其它算法。

关键词:海森矩阵;裂缝检测;矢量不变性;阈值分割

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

裂缝是桥梁病害之一,大部分是由施工误差、混凝土收缩、温度变化、局部锚固、应力过大等因素诱发^[1]。若长期得不到修缮,则会存在严重的安全隐患。图像处理技术是桥梁病害进行检测的常用方法,但由于图像背景较为复杂,使得裂缝特征的提取成为了一个难点。针对这一问题,不少学者展开了研究。

安世全等^[2]提出一种多因子判定与渗流模型相结合的裂缝检测算法。利用改进的渗流加速算法,减少参与渗流处理的冗余像素点,通过对提取到的裂缝种子点进行渗流,虽提高了裂缝连接的准确性,但丢失了裂缝的部分细节。周亚群等^[3]在中值滤波去噪的基础上,采用最大熵值法进行图像分割。由于最大熵值法缺乏对复杂背景、光照不均等干扰的适应性,导致分割效果不理想。DINH 等^[4]提出基于海森矩阵去噪的阈值分割方法。通过搜寻灰度直方图中与最高峰相邻的谷值作为阈值实现分割,然而复杂图像的灰度直方图相邻波峰波谷波动尺度较大,难以有效确定谷值,易导致分割出的裂缝细节缺失。XIAO^[5]、TIAN^[6]、LI^[7]等利用经验 canny 算子结合多种去噪增强算法完成裂缝的

分割和提取。对图像中存在的阴影有很好的去除效果,但当裂缝较宽时,裂缝中间部分像素信息丢失严重。YANG 等^[8]提出了一种基于纹理分析和引力模型特征的裂纹检测算法。通过提取裂纹子块的形状和纹理特征,建立多个正则化项,设计反映裂缝线性特征的方向因子和方向导数判别准则,使裂缝局部信息得到完整的保留。裘国永^[9]、YU-SOF^[10]等通过建立裂缝图像数据集训练卷积神经网络,将生成的模型用于裂缝分类,最后再结合分割算法完成裂缝的提取。然而处理的图像背景较为简单,不具有广泛的适用性。谭小刚等^[11]通过求取区域内每一个像素点的分形维数以此来完成裂缝图像分割。但当背景较为复杂时,各区域之间得到的维数差别不大,不利于背景和裂缝的区分。郭立媛等^[12]将改进的 K-means 聚类算法与其他算法相结合,完成了裂缝的提取。然而,算法在标记裂缝和背景像素块的时候只运用了固定窗口中像素的均值和方差,条件过于单一,准确率较低。李鹏等^[13]基于小波变换和直方图方向梯度对裂缝参数的提取开展了研究。通过计算图像的方向梯度,并设置阈值提取裂缝的轮廓,但该方法对噪声比较

收稿日期:2019-11-25

基金项目:贵州省交通科学研究院股份有限公司科技项目资助(GZJKY 科技字 2017-20)

作者简介:贺福强(1975-),男,副教授,博士,研究方向:机器与模式识别,Email:hefq75@163.com.

* 通讯作者:贺福强,Email:hefq75@163.com.

敏感,容易对渗水区域边缘进行误判。GIRI 等^[14]利用激光位移传感器发出的激光在穿过裂缝区域时位移读数的急剧变化来确定裂缝。该方法可以有效地检测出细小的裂缝,但激光扫描路径的选取不同,会影响位移读数的稳定性。

针对复杂背景下裂缝难提取的问题,本文提出基于海森矩阵联合旋转矢量不变性的局部裂缝生长方向连接算法。利用同一条裂缝在局部生长方向上的一致性以及裂缝细长的结构特征,在充分考虑裂缝形态特征和空间分布的基础上,利用多重滤波技术完成裂缝的提取工作。

1 图像增强

1.1 基于海森矩阵的边缘增强

海森矩阵是一个多元函数的二阶偏导数构成的实对称方阵^[15],常被用于裂缝图像中的裂缝增强处理。若要判断图像中的某像素点 r 是否属于细长的裂缝区域,可通过图像 I 在像素点 r 邻域内的泰勒展开式来近似表示该邻域内的图像结构,其数学表达式为

$$I(r+\Delta r)=I(r)+\Delta r^T \nabla I(r)+\Delta r^T H(r) \Delta r 。 \quad (1)$$

式中: $\nabla I(r)$ 为像素点 r 的梯度向量, $H(r)$ 为海森矩阵。对于二维图像 $I(x, y)$, 像素点 r 的海森矩阵的数学表达式为

$$H(x, y)=\begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{yx} & I_{yy} \end{bmatrix} 。 \quad (2)$$

式中: $I_{xx}, I_{xy}, I_{yx}, I_{yy}$ 分别为二维图像 I 在四个不同方向上的二阶偏微分。通过计算海森矩阵特征值 λ_1 和 λ_2 之间的关系检测图像中的线性结构,并定义特征值线性参数 R_b 和 S 构造滤波函数用于区分背景和目标,表达式为

$$V_0(S)=\begin{cases} 0 & \lambda_2 > 0, \\ \exp\left(-\frac{R_b^2}{2\beta^2}\right)\left(1-\exp\left(-\frac{S^2}{2c^2}\right)\right) & \lambda_2 \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{式中: } R_b = \frac{|\lambda_1|}{|\lambda_2|}, \quad S = \|\mathbf{H}\|_F = \sqrt{\sum_{j \leq 2} \lambda_j^2},$$

β 和 c 分别为 R_b 和 S 的灵敏度。

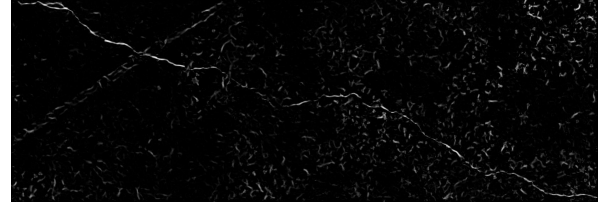
通过海森矩阵增强后,使得较为平滑的背景部分变得更加暗淡,边缘特征较为明显的裂缝轮廓得到了明显的增强,如图 1 所示。

1.2 自适应阈值分割算法

由于裂缝图像中背景较为复杂,采用全局阈值很难完成所有图像的分割,因此提出了一种自适应



(a) 原图



(b) 增强图像

图 1 原图与增强图像

Fig.1 Original drawing and enhanced rendering

的分割算法。该方法是在 Otsu 算法^[16]的基础上进行了改进,通过结合裂缝的灰度信息和局部区域灰度直方图的变化,寻找到合适的阈值,完成图像的分割,具体步骤如下:

(1) 令 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 分别为图像中像素点 (x, y) 的灰度值以及该像素点 $k \times k$ 邻域的平均灰度值,则

$$g(x, y) = \frac{1}{k^2} \sum_{L=-k}^k \sum_{q=-k}^k f(x+l, y+q) 。 \quad (4)$$

(2) 设 $f(x, y)=i, g(x, y)=j$ 。 $M_{i,j}$ 为二元组 (i, j) 出现的频数,定义二元组联合的概率密度为

$$p_{i,j} = \frac{M_{i,j}}{N_0}, N_0 = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} M_{i,j} 。 \quad (5)$$

式中: N_0 为图像的像素点总数。

(3) 计算二维直方图的全部像素点的均值矢量

$$\boldsymbol{\mu} = (\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\mu}_j)^T = \left[\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} i p_{i,j}, \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} j p_{i,j} \right]^T 。 \quad (6)$$

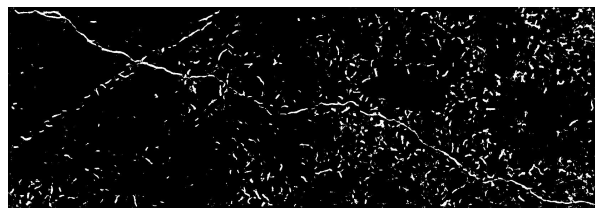
由此可得类间离散度矩阵公式为

$$S_B(h) = \omega_a (\boldsymbol{\mu}_a - \boldsymbol{\mu})^T (\boldsymbol{\mu}_a - \boldsymbol{\mu}) + \omega_b (\boldsymbol{\mu}_b - \boldsymbol{\mu})^T (\boldsymbol{\mu}_b - \boldsymbol{\mu}) 。 \quad (7)$$

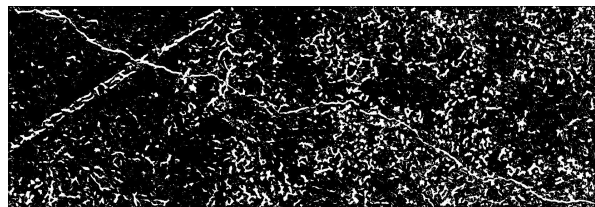
式中: ω_a 和 ω_b 分别为目标区域和背景区域的像素点概率之和, $\boldsymbol{\mu}_a$ 和 $\boldsymbol{\mu}_b$ 分别为两区域对应的像素点的斜率均值矢量。

(4) 取离散度矩阵秩的最大值 $Tr(S_B(h))$ 对应 h 值的 $1/5$ 作为阈值对图像进行分割,分割图像如图 2 所示。

(5) 对分割后的二值图像进行适当的滤波,去除孤立细小的斑点。



(a) Otsu 阈值分割图像



(b) 改进的Otsu 阈值分割图像

图2 阈值分割对比效果图

Fig.2 Threshold segmentation comparison chart

与传统的 Otsu 相比,该算法能够保留更多灰度变化较小的裂缝,使得更多的裂缝细节能够保留。利用改进的 Otsu 算法虽然能够实现裂缝区域的粗提取,但保留下来的裂缝不连续,污渍、附着物等干扰导致裂缝细节丢失,同时带入了很多团状的噪声。因此,为了解决以上问题,本文提出了基于生长方向的裂缝拼接算法。

2 基于生长方向的裂缝拼接算法

2.1 基于旋转矢量不变性的去噪算法

图像二值化以后,图像中保留下的噪声很多。根据裂缝细长的结构特点,通过计算每一个连通域的最小面积外接矩形,可以有效地去除干扰保留裂缝,算法流程如下:

(1)统计图像中每一个连通域边界线的点集,并计算点集的多边形凸包。

(2)计算凸包的所有边与相邻边的夹角 α ,选取第一条边作为起始边。结合距离该边最远点,计算外接矩形。

(3)逆时针旋转 α 到相邻边,计算邻边所对应的外接矩形。以此类推,可以得到每一条边所对应的外接矩形。

(4)比较同一个连通域各边所对应的外接矩形的面积大小。面积最小的即为该连通域的最小外接矩形,如图3所示。

(5)计算外接矩形的长边所对应的斜率,并将其作为该连通域的斜率,便于后续判断相邻连通域是否沿着同一个方向生长。

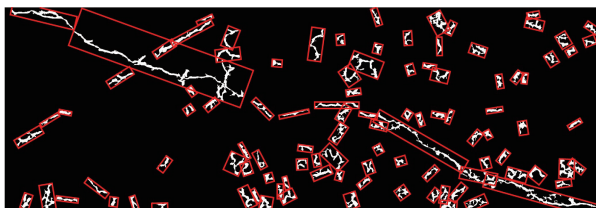


图3 连通域的最小外接矩形

Fig.3 Minimum circumscribed rectangle of connected domain

(6)计算最小外接矩形的长度和宽度的比值。若比值大于2或小于0.5,则保留该连通域;反之,则将该连通域置为背景。

2.2 基于生长方向的局部裂缝连接算法

针对分割后图像中裂缝片段丢失的问题,提出了基于生长方向的裂缝连接算法。既保留了完整的裂缝特征,又可以去除复杂背景的干扰,算法流程如下:

(1)统计所有连通域的端点坐标

①统计每一个连通域边界上的所有点的坐标。

②将每一个连通域上边界点的坐标进行排序,求出横坐标的差值 t_1 ,纵坐标的差值 t_2 。其中,横坐标表示点所在的行,纵坐标表示点所在的列;③比较 t_1 与 t_2 的大小。若 t_1 小于 t_2 ,可以判断裂缝的走向偏纵向,则将横坐标最大和最小的两个点作为该连通域的两端点;反之,则将纵坐标最大和最小的两个点作为该连通域的两端点。

(2)判断相邻的连通域之间是否需要连接

并非任何连通域之间都可以进行连接,仅当两连通域之间的距离较近并且生长方向基本一致时才能进行连接。连接原理图如图4所示。主要步骤:①读取第一个端点,设为 b 点,计算其他端点与 b 点的距离 d_i 。若存在 d_i 小于阈值 T 的端点,则将该点坐标、所在连通域的斜率 k 和距 b 点的距离 d_i 存储在数组 U 中,然后读取下一个端点。通过大量的实验分析发现,当 $T=40$ (像素)时,所连接的裂缝更真实,提取精度更高。②计算 U 中端点的得分 S ,其计算公式为

$$S_i = \frac{\Delta k_i}{\max(\Delta k_i)} + \frac{d_i}{\max(d_i)} \quad (8)$$

式中: Δk_i 为两端点所在连通域斜率差值的绝对值, d_i 为 U 中端点到 b 点的距离。当 S_i 的值越小,表明该连通域的端点与 b 点的距离短,且两端

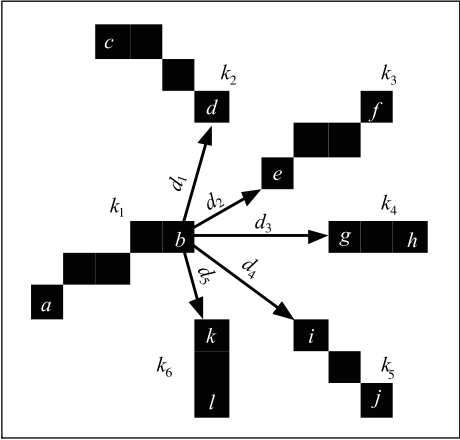


图 4 裂缝连接原理图

Fig.4 Schematic diagram of crack connection

点所在的连通域的生长方向大致相同。因此,取得分最小的端点与 b 点进行连接。

(3)将满足条件的两相邻的连通域进行连接

设需要连接的 2 个端点中,纵坐标较小的点为 p 点,另一点为 q 点, p 、 q 两点的坐标分别是 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 。

①计算两点连线的斜率 K

$$K = \Delta x / \Delta y = (x_1 - x_2) / (y_2 - y_1) \quad x_1 > x_2, \quad (9)$$

$$K = -\Delta x / \Delta y = -(x_2 - x_1) / (y_2 - y_1) \quad x_1 \leq x_2. \quad (10)$$

②将满足下列条件的两点连线周围的像素点 (x, y) 置为 1

$$\begin{cases} x = x_1 - [k \cdot i] \\ y = y_1 + i \end{cases} \quad x_1 < x_2, \quad (11)$$

$$\begin{cases} x = x_1 + [k \cdot i] \\ y = y_1 + i \end{cases} \quad x_1 \geq x_2. \quad (12)$$

式中 i 在 1 到 Δy 之间依次取值。

重新统计连通域并保存该连通域所对应的端点,重复进行步骤(1)(2)(3)的操作,直到所有的连通域都不满足步骤(2)中的条件,停止连接。最终的连接效果如图 5 所示。

(4)去除其他非裂缝区域

裂缝拼接后,周围还存在较多的噪声。由于整条裂缝的走势可以通过最大连通域的斜率来反映,因此通过求取最大连通域的斜率与其他连通域的斜率进行比较。若两者斜率的差值较小,则判定为同一走势下的其他裂缝,保留该连通域;反之,则将该连通域置为背景。

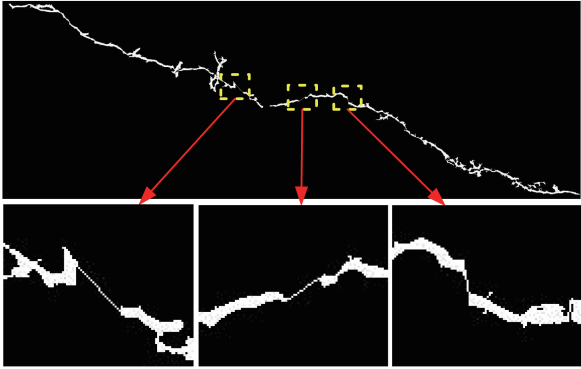


图 5 裂缝局部连接图

Fig.5 Local connection of cracks

3 实验与分析

3.1 阈值的选取

Ostu 算法可以根据每一张图像的像素分布的概率求算出图像对应的分割阈值 h 。由于图像中存在很多的噪声,会使得计算得到的阈值过大,从而导致部分裂缝丢失问题。因此,本文通过一定的比例缩小 h 值,将得到的结果作为新的阈值,完成图像的分割。然后,将分割后的二值图像与真实的裂缝区域进行对比,计算裂缝像素被提取的精度,进一步确定比例因子的大小。试验的结果见表 1。

表 1 不同比例因子下的裂缝提取精度

Tab.1 Crack extraction accuracy under different factors %

图像编号	0.2h	0.4h	0.6h	0.8h	h
1	89.0	75.9	65.6	55.0	42.7
2	90.1	78.6	66.3	57.0	46.2
3	89.5	81.6	68.4	61.1	54.3
4	92.7	80.0	68.1	59.3	50.8

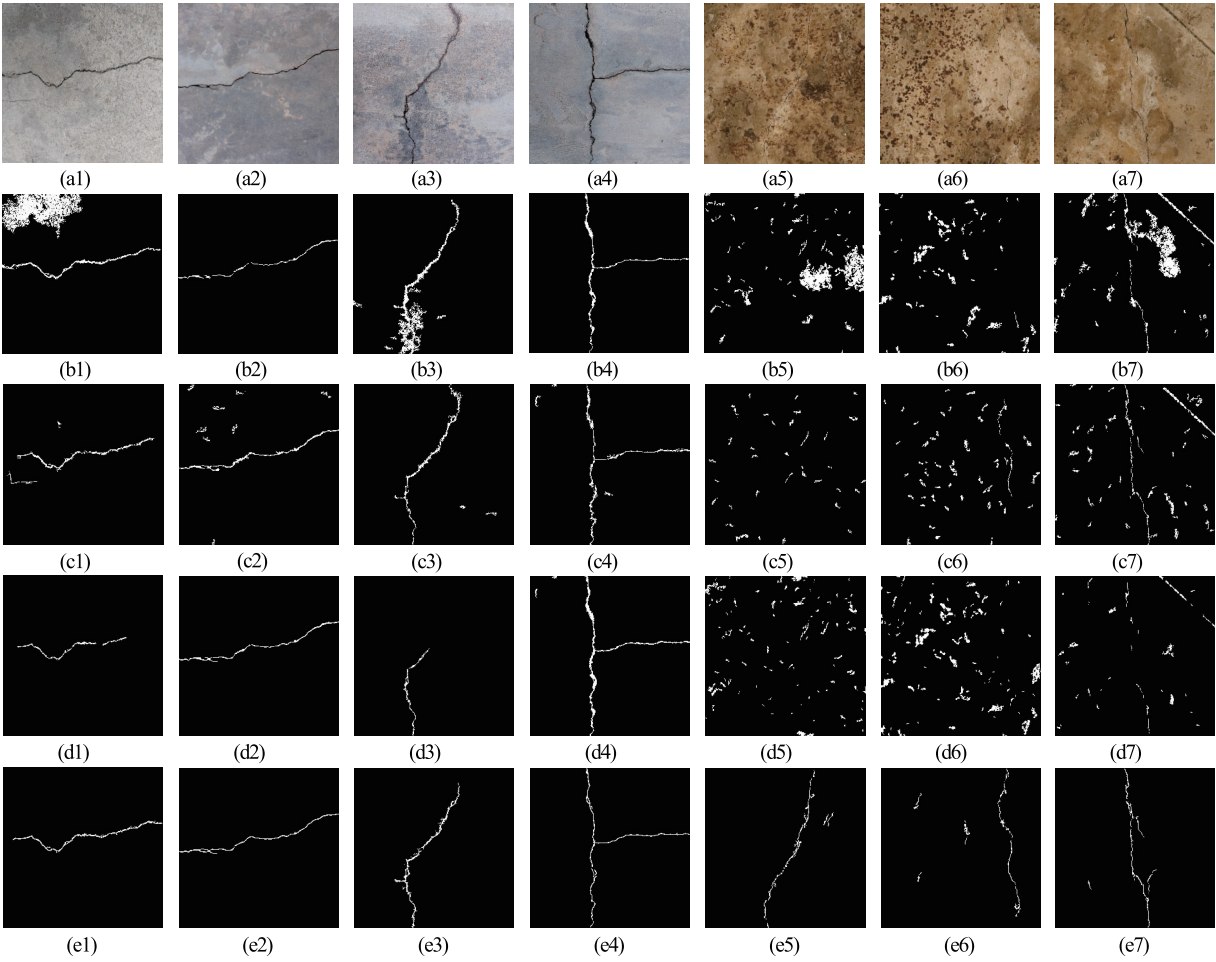
实验中,比例因子以 0.2 的步长递增。当取值小于 0.2 h 时,裂缝点提取的精度改变并不大,同时伴随的噪声会更多,因此选取 0.2 h 作为节点。从试验的结果可以看出,当阈值 h 缩小到原来的 1/5 时,保留下来的裂缝区域是最多的。因此,选取 0.2 h 作为图像分割的阈值。

3.2 分割效果对比实验

本文选取若干张不同背景环境的裂缝图像作为实验图像,图像背景包括渗水、混凝土砂浆粘结等干扰,其尺寸统一为 1 024×1 024 像素。算法的硬件运行环境为 ThinkPad P51s Signature Edition;

处理器为 Intel(R) Core(TM) CPU @ 3.30 GHz; 安装内存 4.0 GB; 软件编程语言 MatlabR2015b。为了验证算法的有效性, 选取了 *K*-means 聚类算法、

文献[2]中的裂缝检测算法和二维最大熵值法与本文算法进行了对比, 4 种算法的实验效果如图 6 所示。



(a1) — (a7) 为原图; (b1) — (b7) 为 *K*-means 聚类算法处理的结果; (c1) — (c7) 为文献[2]中算法处理的结果; (d1) — (d7) 为二维最大熵值法处理的结果; (e1) — (e7) 为本文算法处理的结果。

图 6 不同算法对比实验结果

Fig.6 Comparison experiment results of different algorithms

从裂缝提取的效果来看, 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。文献[2]中的算法在利用滑动窗口寻找的裂缝种子点时, 引入了部分噪声点, 因此, 在渗流的过程中会保留较多的斑点和划痕, 不利于裂缝的提取。二维最大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, 使得非裂缝区域的熵值很大, 导致混凝土砂浆粘结等干扰无法进行有效地去除。本文算法对噪声采取了分批处理。首先, 通过海森矩阵对图像进行增强, 可以使

得灰度突变区域得到锐化; 其次, 对增强后的图像使用改进后的 Otsu 算法进行分割, 得到含有噪声的二值图像; 再次, 利用旋转矢量不变性算法去除图像中团状噪声。此时, 保留下来的裂缝多为片段, 但很难与噪声进行区别。通过裂缝拼接算法可以将裂缝化零为整, 并根据整体的走向, 利用斜率和面积排除其他干扰, 最终实现了裂缝的完整提取。对比发现该算法具有较高的提取精度。

3.3 实时性分析

表 2 列出了 4 种算法在 7 幅图像中的处理时间。

表 2 不同算法的耗时对比

Tab.2 Time consuming of different algorithms s				
图像 编号	K-means 算法	文献[2] 算法	最大 熵值法	本文 算法
1	6.60	4.75	1.55	1.33
2	6.88	4.61	1.68	1.37
3	6.47	4.62	1.72	1.53
4	6.12	5.13	1.56	1.23
5	6.72	5.09	1.26	1.14
6	6.04	5.41	1.45	1.28
7	6.56	5.40	1.50	1.39

从表 2 可以看出:本文算法的处理效率高于其他 3 种算法;K-means 聚类算法和文献[2]算法在对像素点进行分类时,多次的循环迭代,增加了耗时;本文算法通过改进的 Otsu 算法完成图像分割,并结合局部区域裂缝拼接算法实现裂缝的快速提取,因此在检测中具有较高的实时性。

4 结论

本文针对光照不均、背景复杂的桥梁裂缝图像展开了裂缝特征提取算法的研究,利用海森矩阵特征值,结合改进的 Otsu 算法滤除了背景中的部分噪声,通过基于旋转矢量不变性的局部裂缝连接方法,有效地保留了不连续的裂缝片段,解决了提取过程中裂缝遗漏的问题,提高了检测精度,缩短了检测时间,为复杂背景下图像裂缝提取提供了一种新思路。

参考文献:

[1]高珊,王茜,任腾先,等.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]安世全,曹悦欣,瞿中.多因子判定与渗流模型相结合的裂缝检测算法[J].计算机应用,2019,39(1):281-286.
[3]周亚群,黄梦崖,邓林.基于数字图像的裂缝特征参数检测与分析[J].低温建筑技术,2018,40(12):4-7.
[4]DINH T H, HA Q P, LA H M. Computer vision-based method for

concrete crack detection [C]//14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). New York: IEEE, 2016:1-6.
[5]XIAO Y N, LI J Y. Crack Detection algorithm based on the fusion of percolation theory and adaptive canny operator[C]//37th Chinese Control Conference (CCC). New York: IEEE, 2018: 4295-4299.
[6]TIAN B Z, XU S N, LI Z H. Glassware crack defects detection based on wavelet transform [C]//Chinese Automation Congress (CAC). New York: IEEE, 2017:4954-4958.
[7]LI W J, ZHANG M, SHEN Z H, et al. Track crack detection method in complex environment[C]//11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). New York: IEEE, 2018:356-359.
[8]YANG Z L, XU X Y. An improved crack detection algorithm based on characteristics of texture analysis and gravity model[C]//9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). New York: IEEE, 2017:271-275.
[9]裴国永,李丽,李良福,等.基于自适应亮度高程模型的路面阴影消除算法研究[J].轻工学报,2018,33(1):79-87.
[10]YUSOF N A M, OSMAMN M K, NOOR M H M, et al. Crack detection and classification in asphalt pavement images using deep convolution neural network[C]//8th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). New York: IEEE, 2018:227-232.
[11]谭小刚,张洪伟.基于小尺度分形维数的裂缝图像分割方法[J].公路交通科技,2018,35(5):34-39.
[12]郭立媛,张磊,李威,等.基于先验知识 MinMax K-means 聚类算法的道路裂缝研究[J].中国测试,2018,44(4):112-117.
[13]李鹏,赵芬芬,杜敏.基于双树复小波的直方图路面裂缝检测算法[J].安徽大学学报(自然科学版),2018,42(1):38-44.
[14]GIRI P, KHARKOVSKY S. Detection of surface crack in concrete using measurement technique with laser displacement sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(8):1951-1953.
[15]赵婷婷,赵凤展,巨云涛,等.基于定常海森矩阵的配电网三相最优潮流模型[J].电力系统自动化,2018,42(15):11-17.
[16]OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1):62-66.

(责任编辑:周晓南)

Bridge Crack Extraction Algorithm Based on Hessian Matrix Enhancement and Local Crack Connection

HE Fuqiang^{*}, LUO Hong, PING An, YAO Xuelian

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

Abstract: In view of the technical problem that the conventional processing algorithm cannot extract the real crack details in the complex background bridge crack images, a joint crack extraction algorithm based on Hessian matrix and local crack growth connection was proposed. First, Hessian matrix was used to enhance the image to highlight the cracked region, and the adaptive threshold algorithm was used to segment the binary image. Through the minimum circumscribed rectangle of connected domain filter out noise, connecting local cracks with the same growth direction can eliminate the interference of non-cracks and partial noises, and solve the problem of large amount of stains and discontinuous cracks after image processing. The experimental results show that the accuracy of this algorithm for extracting cracks from complex background bridge images is higher than that of other algorithms.

Key words: Hessian matrix; crack detection; rotation vector invariant; threshold segmentation

(上接第 52 页)

A New Type of Tobacco Bale Conveyor Design Based on PLC Control

WANG Kai¹, WU Bing^{1*}, LIAO Zongyu², CAI Jiabin¹, LI Fang¹, LONG Yuanqiang¹, PAN Zheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Zunyi Tobacco Company of Guizhou Provincial Tobacco Company, Zunyi 563000, China)

Abstract: In view of the existing problems such as large occupation area, being easy to change and difficult to move, a new type of tobacco bale conveyor based on PLC control was designed. The device adopts a lifting chain as a conveying device, which can vertically transport the tobacco bale, thereby reducing the floor space; The tray is used as the carrier for the tobacco bale transportation, so that the tobacco bale can be placed stably during the bagging process, and the possibility of dropping the bag is reduced. The SolidWorks software was used to complete the three-dimensional modeling of the mechanical structure of the whole machine, and the PLC control system was used to control the loading process of the conveyor on the tobacco bale. Compared with the traditional tobacco bale charter, the new type of tobacco bale has the advantages of small floor space, stable operation during the bagging operation, simple and light operation, and can be adapted to various workplaces.

Key words: tobacco bale; tobacco conveyor; structural design; programmable logic controller control