

· 信息技术 ·



基于分形理论和二次分割的 图像裂缝特征提取方法与应用

李嘉民¹, 应宗权^{1,2}, 杨帅^{1,2}, 刘梅梅^{1,2}, 王翔¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通运输行业重点实验室, 广东广州 510230;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 519082)

摘要: 在役跨海桥梁、港口工程等的服役环境恶劣, 多数情况下采集到的裂缝图像背景复杂、噪声干扰较多。为了克服现有技术存在的不足, 提出一种基于分形理论和二次分割的图像裂缝特征提取方法。该方法采用分形参数作为裂缝图像的特征参数, 能优先抑制裂缝图像中产生干扰过多的问题, 有效克服灰度不均匀、噪声块多和背景复杂的干扰因素, 同时基于二次分割理论, 结合两种不同的算法特点, 利用粗分割排除干扰区域, 利用细分割对目标区域内裂缝精准分割, 实现混凝土结构裂缝目标准确有效的提取, 具有更好的分割效果。

关键词: 结构监测; 裂缝提取; 分形; 二次分割; 图像增强

中图分类号: U 654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0166-08

Method and application of image crack feature extraction based on fractal theory and secondary segmentation

LI Jiamin¹, YING Zongquan^{1,2}, YANG Shuai^{1,2}, LIU Meimei^{1,2}, WANG Xiang¹

(1. Key Laboratory of Hydraulic Structure Durability Technology for Transportation Industry,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: Due to the bad service environment of sea-crossing bridge and port engineering, the crack images collected in most cases have complex background and high noise. A method of extracting image cracks feature based on fractal theory and secondary segmentation is proposed in this paper to overcome the shortcomings of the existing technology. In this method, fractal parameters are used as the characteristic parameters of the crack image, which can preferentially suppress the problem of excessive interference in the crack image, and effectively overcome the interference factors such as uneven gray level, large noise and complex background. At the same time, two different algorithms are combined based on the quadratic segmentation theory. The first segmentation is used to eliminate the interference area, and the second segmentation is used to precisely segment the cracks in the target area, so as to accurately and effectively extract the cracks of concrete structure and achieve better segmentation effect.

Keywords: structure monitoring; crack extraction; fractal; secondary segmentation; image enhancement

混凝土结构健康监测技术是当前研究的热点之一。强风浪、高腐蚀、高温、高盐的海洋环境下混凝土结构性能退化较快。裂缝的产生和扩展影响结构的完整性和安全性, 裂缝特征是反映结构健

康状态的重要指标之一。实际拍摄水工混凝土结构裂缝图像的分辨率较高, 裂缝目标占全局比例小, 图像背景存在大量的干扰噪声, 还会出现水迹、光照不均匀等问题, 导致图像对比度较低, 现有的图

收稿日期: 2022-07-21

作者简介: 李嘉民(1995—), 男, 硕士, 研究方向为结构耐久性、结构监测、数字图像处理。

像分割算法无法很好地提取出裂缝目标。

K-means 聚类结合区域生长分割算法^[1]从像素相似特征和区域连通性 2 个角度考虑, 能快速有效地分割出裂缝目标对象。然而, 传统 K-means 算法仅基于灰度值的相近性表示区域的一致性, 无法很好地将自然图像中的灰度相近的裂缝结构和各种干扰区分开。对于复杂的、干扰严重的自然图像, 分形理论能在一定尺度条件下, 根据自然背景、不规则的干扰和裂缝空间结构的自相似, 很好地将其区分开^[2]。引入图像分形特征的分割算法能够很好克服背景复杂以及干扰过多等问题, 但因为算法特点以及多特征参数的交叉影响, 分割算法的分割精度降低。

二次分割能结合这 2 种不同分割算法的优点, 优势互补, 改善单一算法的局限性和不足^[3], 也能针对错分割区域进行再分割, 改善目标最终的分割效果^[4]。因此本文根据现有的裂缝提取方法的不足, 引入分形理论解决裂缝图像背景复杂与干扰过多的问题, 同时结合 2 种不同的图像分割算法, 保证复杂裂缝目标分割的精度和完整性, 最终获得理想的提取效果。

1 图像裂缝提取方法

针对裂缝图像存在的问题, 本文基于分形理论及二次分割, 提出一种图像裂缝提取方法。混凝土裂缝提取流程见图 1。

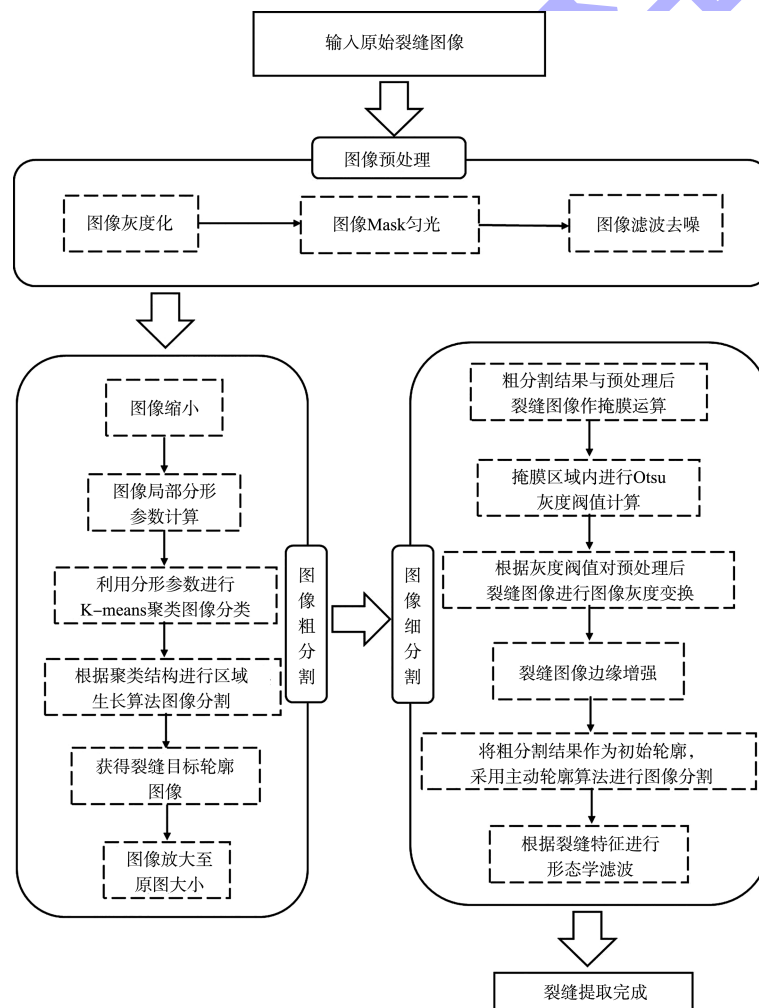


图 1 图像裂缝提取流程

1.1 图像预处理

一般来说, 图像的预处理包含图像灰度化、

缩小、匀光处理、去噪和增强等步骤。图像缩小会导致图像中的细节信息丢失, 而图像增强会同

时增强图像中的噪声和干扰，使裂缝目标与噪声干扰更难以分离。因此，本文在图像预处理过程中不进行图像缩小和增强。裂缝图像灰度化后，分别采用 Mask 匀光算法^[5]和基于小波变换的尺度相关性去噪算法^[6]，解决图像中光照不均匀与高斯噪声的问题。

1.2 图像粗分割

图像粗分割的目的在于图像缩小后，根据图像的局部分形特征，将裂缝目标与大多数背景和干扰噪声分离，初步确定裂缝目标所在区域，锁定裂缝的大致轮廓，然后放大至原图大小，将裂缝目标区域对应预处理后的裂缝图中。

1.2.1 图像局部分形特征计算

分形维数的计算是获得分形特征的重要环节。分形布朗运动模型属于统计上的自仿射分形概念，将自然粗糙表面作为随机游走的结果，而裂缝图像的灰度强度表面可看作是随机游走的结果^[7]，因此本文采用分形布朗运动模型计算图像的分形特征，具体步骤为：

1) 给定某一尺寸的裂缝图像，从图像的起点开始，选取 $n \times n$ 的窗口，以步长 l 沿水平方向和垂直方向移动窗口。在尺寸为 $n \times n$ 的窗口中，可以构造一个多尺度灰度差向量 $H_{DC} = [d_i(1), d_i(2), \dots, d_i(i), \dots, d_i(m)]^T$ 。其中， m 根据窗口大小确定， $d_i(i)$ 为所有距离为 Δr_i 的所述特征参数数据样本对的绝对灰度差的平均值，计算公式为：

$$d_i(i) = \frac{\sum_{x_1=0}^{n-1} \sum_{y_1=0}^{n-1} \sum_{x_2=0}^{n-1} \sum_{y_2=0}^{n-1} |z(x_2, y_2) - z(x_1, y_1)|}{p_n(i)} \quad (1)$$

式中： $p_n(i)$ 为具有标度距离为 $\Delta r_i = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ 的特征参数数据样本对总数， $i = 1, 2, \dots, m$ ， $z(x, y)$ 为坐标 (x, y) 所对应的图像灰度值， (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 为特征参数数据样本对的坐标。

2) 采用最小二乘法对 $(\lg d_i(i), \lg \Delta r_i)$ 数据点进行拟合，Hurst 指数 H 可以通过计算回归线斜率求得，而分形截距 B 可以通过计算回归线在纵轴

上的截距求得。

对于高分辨率图像的分形特征计算，存在计算时间长、速度慢等特点。然而由于分形特征无标度性，对高分辨的裂缝图像进行缩小处理后，仍可以在尽可能避免裂缝目标信息失真的情况下，获得更多的裂缝图像细节信息，一定程度上提高了计算效率。

1.2.2 基于 K-means 聚类 and 区域生长的图像分割

K-means 聚类从图像特征角度对裂缝图像进行分类，一般情况下可大致划分成 3 类：背景、噪声干扰和裂缝区域。区域生长是将像素或子区域按照预定义的准则聚集成更大区域的过程。本文采用 Hurst 指数 H 、分形截距 B 作为图像聚类分析的特征参数区分裂缝目标与背景干扰。根据聚类结果，以裂缝目标聚类中心为初始生长点、裂缝目标聚类结果为约束，搜索范围选取 8 邻域区域，通过区域生长法对分类后裂缝图像进行分割，去除伪裂缝目标区域，得到初次分割的裂缝目标区域。

1.3 图像细分割

对粗分割所得的裂缝目标区域内的信息进行分析利用，使得图像的灰度变换更具有针对性，变换后再进行图像边缘增强，能很好地增强裂缝目标与干扰在边缘处的对比度，最后通过主动轮廓算法图像分割以及形态学滤波算法，实现精准有效地提取裂缝目标。

1.3.1 基于 Otsu 灰度阈值的图像灰度变换

根据图像粗分割所得结果，可以锁定裂缝目标所在的区域，裂缝目标在区域内占比较大，可以利用 Otsu 算法^[8]在初次分割的目标区域内获取合适的灰度阈值 T_g 。把灰度阈值 T_g 作为灰度变换的分段点，通过分段点可以将预处理后的裂缝图像划分成 $[0, T_g]$ 和 $(T_g, 255]$ 两个灰度区间，其分段灰度变换方程式表示为：

$$Z(x, y) = \begin{cases} 0 & (z(x, y) \leq T_g) \\ z(x, y) \cdot \frac{255}{\max(z) - \min(z)} & (z(x, y) > T_g) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $Z(x, y)$ 为变换后点 (x, y) 处的灰度值，

$z(x,y)$ 为变换前灰度值。通过上述灰度变换, 可以增强裂缝目标与干扰之间的对比度, 有利于分割与目标灰度值相近的干扰。

1.3.2 基于图像边缘增强

为了增大目标与干扰在边缘处灰度对比度, 采用二维双曲守恒律方程对灰度变换后的裂缝图像进行边缘增强^[9], 方程可表述为:

$$\begin{cases} u_t + \text{sign}(\Delta Z) [u_x \text{sign}(Z_x) + u_y \text{sign}(Z_y)] = 0 \\ u(x,y,t) |_{t=0} = Z \end{cases} \quad (3)$$

式中: u 为增强后灰度函数, t 为时间参数, 下标 t 、 x 和 y 分别为在 t 、 x 和 y 方向上的一阶导数, Δ 为拉普拉斯算子, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。考虑到高精度迎风紧致差分格式对间断的高分辨率, 在空间方向上, 采用带群速度控制的三阶精度迎风紧致差分算子^[10]对方程进行离散, 而在时间方向上, 采用三阶 Runge-Kutta 法进行离散。

1.3.3 主动轮廓模型图像分割

主动轮廓模型是在图像中定义一条曲线, 曲线在图像数据的约束下进行演化, 并最终停止在目标的边缘上, 实现图像分割。该模型的演化方程^[11]为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \delta(\phi) \left[-\lambda_1 (u - g_1)^2 + \lambda_2 (u - g_2)^2 + \mu \text{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right] \quad (4)$$

式中: ϕ 为目标边界的水平集函数, δ 为 Delta 函数, div 为矢量场的散度, ∇ 为梯度算子, g_1 、 g_2 分别为曲线内、外部区域的平均灰度值, λ_1 、 λ_2 和 μ 均为权重系数。相较于像素阈值分割, 主动轮廓模型计算稳定、分割效果好, 但该模型对初始轮廓敏感。实际拍摄的裂缝图像由于干扰较多、目标较小的原因, 初始轮廓难以有效定位, 而经过本文的图像粗分割及图像对比度增强后, 可以很好地克服主动轮廓模型的这些不足。

2 试验结果及分析

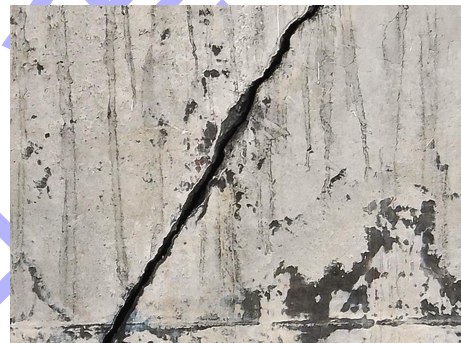
2.1 试验结果

应用本文所提出的算法, 选取 2 张实际拍摄的裂缝图像进行试验, 图像大小为 3 000 px×4 000 px。

1#裂缝为某码头胸墙裂缝图像, 2#裂缝为混凝土受弯梁表面裂缝图像, 其原始图像及本文提取结果分别如图 2、3 所示。



a) 全局, 原始图像



b) 局部, 原始图像



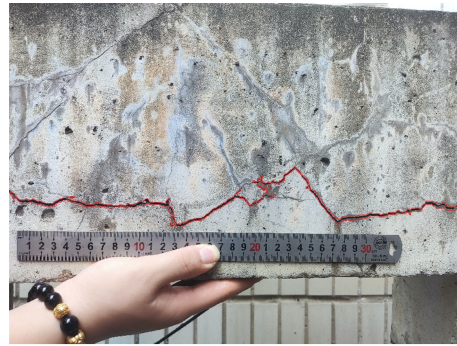
c) 全局, 粗分割结果



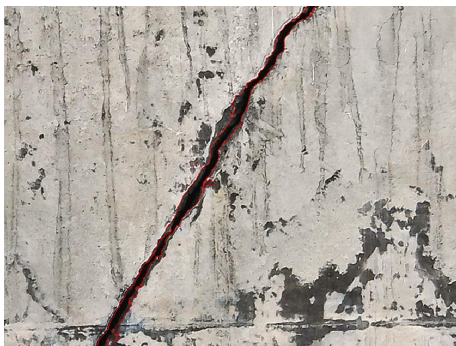
d) 局部, 粗分割结果



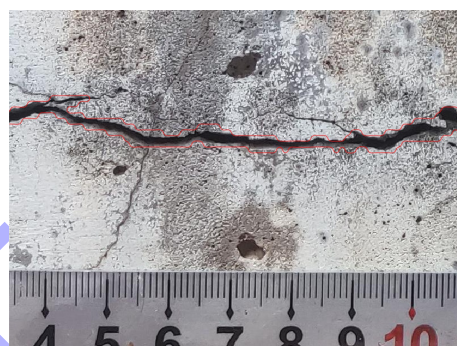
e) 全局, 细分割结果



c) 全局, 粗分割结果



f) 局部, 细分割结果

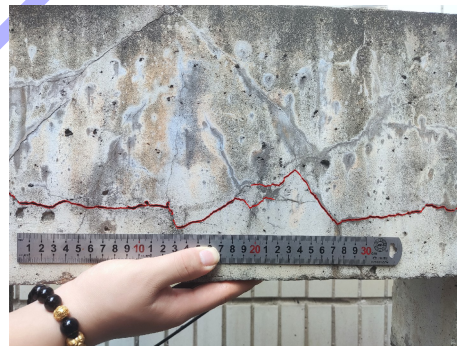


d) 局部, 粗分割结果

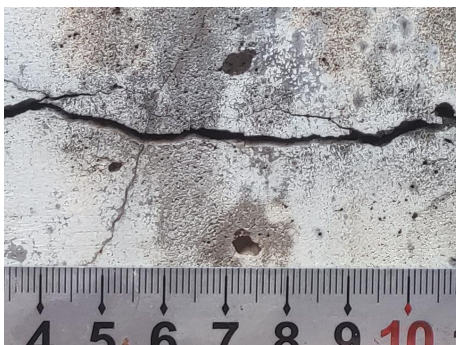
图 2 1# 裂缝原图及其提取结果



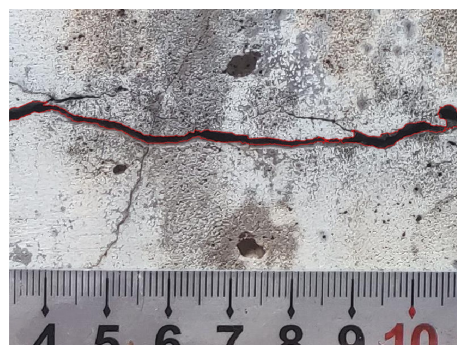
a) 全局, 原始图像



e) 全局, 细分割结果



b) 局部, 原始图像



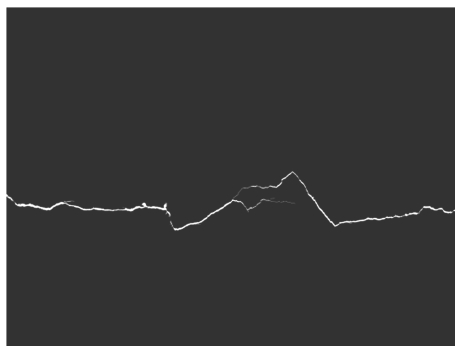
f) 局部, 细分割结果

图 3 2# 裂缝原图及其提取结果

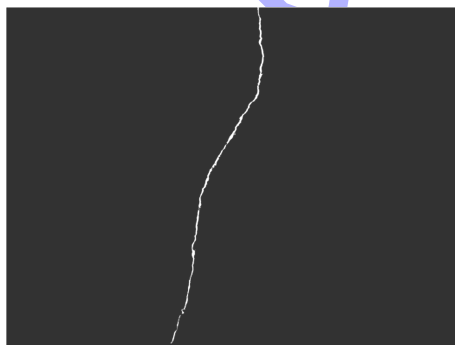
为评价该方法的性能, 本文采用 Adobe Photoshop CS6 软件对样本图像进行人工提取, 其结果作为真实裂缝。另外, 将文献[1]和[12]提出的裂缝图像分割算法以及本文提出的算法, 与人工提取的真实裂缝进行对比分析, 所有结果见图 4。



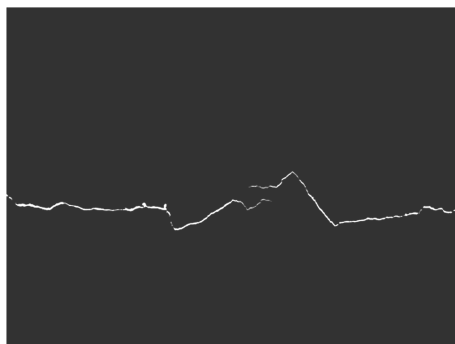
a) 1[#]裂缝, 人工提取结果



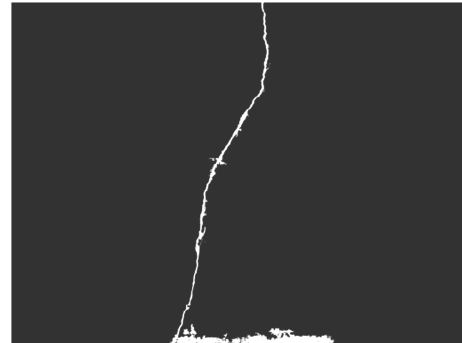
b) 2[#]裂缝, 人工提取结果



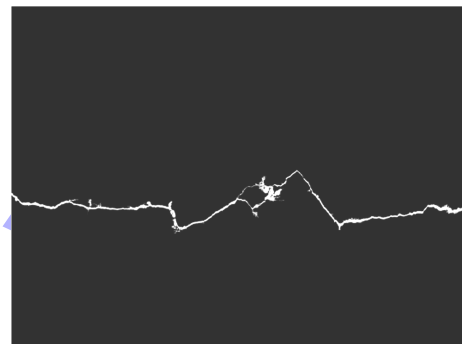
c) 1[#]裂缝, 本文提取结果



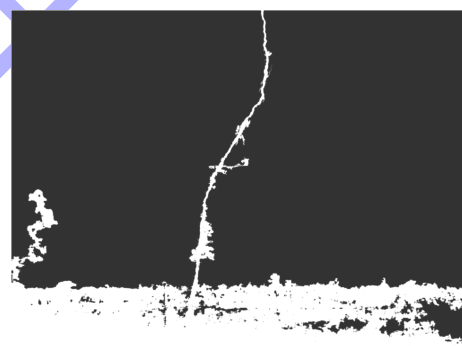
d) 2[#]裂缝, 本文提取结果



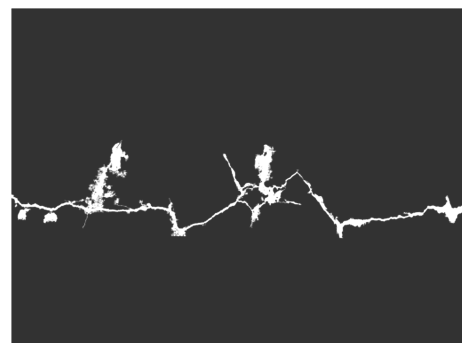
e) 1[#]裂缝, 文献[1]算法提取结果



f) 2[#]裂缝, 文献[1]算法提取结果



g) 1[#]裂缝, 文献[12]算法提取结果



h) 2[#]裂缝, 文献[12]算法提取结果

图 4 1[#]、2[#]裂缝的人工提取和算法提取结果

2.2 定性分析

由图 2、3 可看出, 1[#]裂缝整体相对细长, 裂缝局部存在着混凝土剥落、干扰严重等情况; 2[#]裂缝

目标相对细长且迂曲程度较高，局部存在磨损痕迹、混凝土麻面复杂等情况。经过粗分割后可以初步确定1#、2#裂缝目标位置和轮廓，经过细分割后能有效排除裂缝目标周围零散或不符合裂缝特性的噪声、干扰，最终获得较为完整精确的裂缝目标。

由图4可直观看出，本文算法处理后的裂缝不仅能有效抑制复杂背景下的噪声干扰，抗干扰能力高于其他2种算法，而且能克服由于灰度不均匀引起的图像对比度不足的问题，裂缝的形态信息能较好地分割出来。

2.3 定量分析

采用灵敏度 S_{en} 、特异性 S_{pe} 和准确度 A_{cc} 3个统计参数^[13]量化本文提取的裂缝目标与真实裂缝之间的差异，其公式为：

$$S_{en} = \frac{P_T}{P_T + N_F} \quad (5)$$

$$S_{pe} = \frac{N_T}{N_T + P_F} \quad (6)$$

$$A_{cc} = \frac{P_T + N_T}{P_T + N_T + P_F + N_F} \quad (7)$$

式中： P_T 为预测为目标且实际也是目标的像素点总数， N_T 为预测为背景且实际也是背景的像素点总数， P_F 为预测为目标但实际为背景的像素点总数， N_F 为预测为背景但实际为目标的像素点总数。

文献[1][12]以及本文的提取方法所对应 S_{en} 、 S_{pe} 和 A_{cc} 的计算结果见表1。可以看出，本文方法的性能在特异性和准确度方面优于文献[1][12]的方法，在灵敏度方面也有较好的表现。本文算法中灵敏度表现较差的原因主要是：图像中由于从内往外开裂的方向并非垂直于表面，如图3f)所示，在图像裂缝目标中局部存在内部断裂面裸露的情况，从而导致图像过度分割的情况。

表1 各算法提取结果的灵敏度、特异性和准确度

图像	算法	$S_{en}/\%$	$S_{pe}/\%$	$A_{cc}/\%$
1#裂缝	文献[1]	99.46	98.98	98.98
	文献[12]	100.00	81.52	81.58
	本文	91.24	99.94	99.91
2#裂缝	文献[1]	99.32	99.60	99.60
	文献[12]	100.00	98.00	98.01
	本文	89.79	99.99	99.94

2.4 裂缝几何特征

裂缝提取的目的在于定量地计算裂缝的几何特征，例如裂缝面积 S 、裂缝长度 L 、裂缝宽度 W 等。在最终提取的裂缝二值图像里，统计裂缝目标所占的像素点总数，结合像素解析度，可获得裂缝目标的面积 S 。裂缝长度 L 的计算，首先采用 Zhang-细化算法^[14]提取裂缝骨架并去除多余毛刺，通过分段计算裂缝骨架长度，再乘以像素解析度，就能得到裂缝长度 L 。裂缝宽度主要分为平均宽度 \bar{W} 和最大宽度 W_{max} 。平均宽度 \bar{W} 可通过 S/L 求得；对于最大宽度 W_{max} ，在裂缝二值图像中裂缝宽度最大的窗口位置，根据法线方向统计像素点的个数，计算出窗口内裂缝最大宽度 W_{max} 。

本文提取的裂缝几何特征计算结果见表2。在现场采用裂缝综合测试仪对1#、2#裂缝的最大裂缝宽度进行测量，通过对比实测值与计算值可知，本文提取的裂缝几何特征能满足实际工程中的检测需求。

表2 裂缝几何特征计算结果

裂缝图像	S/mm^2	L/mm	\bar{W}/mm	W_{max}/mm		
				计算结果	实测结果	误差/%
1#裂缝	1450.978	698.210	2.104	5.185	5.40	3.982
2#裂缝	374.271	464.933	0.805	2.642	2.81	5.979

3 结论

1) 本文的裂缝图像粗分割能很好地排除图像中大多数背景噪声及干扰的影响，准确定位裂缝目标所在区域，为后续分割确定较好的裂缝初始轮廓，降低裂缝提取难度，体现分形理论在图像分割中良好的抗噪、抗干扰特性。

2) 本文的裂缝图像细分割过程中利用裂缝目标区域信息进行灰度变换和图像边缘增强，取得较好的对比度增强效果，减弱了裂缝目标与干扰的相似性，随后结合主动轮廓模型分割算法和形态学滤波，实现了裂缝最终提取的完整性和准确性，能够满足实际工程的检测需求。

参考文献:

- [1] 李鹏,李强,马味敏,等. 基于 K-means 聚类的路面裂缝分割算法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(11): 3143-3147.
- [2] 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.
- [3] 陈明,林益贤. 一种结合 GMM 和活动轮廓的混合型图像分割方法[J]. 小型微型计算机系统, 2018, 39(8): 1855-1859.
- [4] 祝恩,殷建平,胡春风,等. 指纹纹路方向计算与图像分割的系统方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 669-674.
- [5] 王密,潘俊. 一种数字航空影像的匀光方法[J]. 中国图象图形学报, 2004(6): 744-748, 767.
- [6] 成智礼,王红霞,罗永. 小波的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] LUNDAHL T, OHLEY WJ, KAY SM, et al. Fractional Brownian motion: a maximum likelihood estimator and its application to image texture [J]. IEEE transactions on medical imaging, 1986, 5(3): 152-161.
- [8] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE transactions on systems man and cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [9] ZHU Q Y, YANG W B, YU H Z. Study on the permeability of red sandstone via image enhancement[J]. Fractals, 2017, 25(6): 1-12.
- [10] 朱庆勇,李岳生. 数值求解 Euler 方程的 UCGVC 差分格式的注记[J]. 计算数学, 2000, 22(2): 209-218.
- [11] CHAN T F, VESE L A. Active contours without edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277.
- [12] 朱鑫,漆泰岳,王睿,等. 一种改进的用于裂缝图像分割的 Otsu 方法[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 80-84.
- [13] TEIMOURI N, OMIID M, MOLLAZADE K, et al. A novel artificial neural networks assisted segmentation algorithm for discriminating almond nut and shell from background and shadow[J]. Computers and electronics in agriculture, 2014, 105: 34-43.
- [14] ZHANG T Y, SUEN C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Communications of the ACM, 1984, 27(3): 236-239.

(本文编辑 王璁)

(上接第 160 页)

3) 本工程为低水整治, 整治建筑物高程较低, 对总体河势与防洪的影响均较小。

4) 从两方案对外部条件的影响分析来看, 本工程与锚地、取水口等涉水建筑物均有一定的距离, 对总体河势、防洪、堤防等外部环境的影响较小。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 长江干线航道总体规划纲要[R]. 北京: 交通运输部, 2009.
- [2] 国家发展和改革委员会综合运输研究所. 长江宜昌至

安庆段航道整治模型试验研究成果总报告[R]. 北京: 国家发展和改革委员会综合运输研究所, 2015.

- [3] 长江航道规划设计研究院. 长江中游蕲春水道航道整治工程工可阶段定床物理模型试验研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2016.
- [4] 长江航道规划设计研究院. 长江中游蕲春水道航道整治工程工可阶段动床物理模型试验研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2016.
- [5] 长江航道规划设计研究院. 长江中游蕲春水道航道整治工程工程可行性研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2016.

(本文编辑 王传瑜)