



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2020
07
VOL.25

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第25卷第7期（总第291期）

2020年7月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 顾行发

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

通信地址 北京市海淀区北四环西路19号

邮 编 100190

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-58887035

网 址 www.cjig.cn

广告发布登记号 京朝工商广登字20170218号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief Gu Xingfa

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

Address No. 19, North 4th Ring Road West, Haidian District,
Beijing, P. R. China

Zip code 100190

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-58887035

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 60.00元



非真实感绘制技术研究现状与展望(第1283页)



图卷积网络下牙齿种子点自动选取(第1481页)



迁移学习下高分快视数据道路快速提取(第1501页)

学者观点

非真实感绘制技术研究现状与展望

钱文华, 曹进德, 徐丹, 吴昊 1283

综述

深度哈希图像检索方法综述

刘颖, 程美, 王富平, 李大湘, 刘伟, 范九伦 1296

严肃游戏中虚拟角色行为建模综述

刘翠娟, 刘箴, 柴艳杰, 刘婷婷, 陈效奕 1318

智能制造中的计算机视觉应用瓶颈问题

雷林建, 孙胜利, 向玉开, 张悦, 刘会凯 1330

图像处理和编码

浅层CNN网络构建的噪声比例估计模型

徐少平, 林珍玉, 李崇禧, 崔燕, 刘蕊蕊 1344

烧结断面火焰图像退化模型及断面图像复原

王福斌, 刘贺飞, 武晨 1356

gyrator变换域的高鲁棒多图像加密算法

王丰, 邵珠宏, 王云飞, 姚启钧, 刘西林 1366

基于透射率修正的湍流模型与动态调整retinex的水下图像增强

汤新雨, 李敏, 徐灵丽, 郝真, 张学武 1380

图像分析和识别

俯视深度头肩序列行人再识别

王新年, 刘春华, 齐国清, 张世强 1393

结合混合池化的双流人脸活体检测网络

汪亚航, 宋晓宁, 吴小俊 1408

增强型灰度图像空间实现虹膜活体检测

刘明康, 王宏民, 李琦, 孙哲南 1421

基于水动力学、分数阶微分及Steger算法的线状目标提取

陈卫卫, 王卫星, 李润青, 蔡晓琰, 郑思凡 1436

时域候选优化的时序动作检测

熊成鑫, 郭丹, 刘学亮 1447

图像理解和计算机视觉

视频中多特征融合人体姿态跟踪

马淼, 李贻斌, 武宪青, 高金凤, 潘海鹏 1459

计算机图形学

插值给定数据点的四次PH曲线构造

方林聪, 阳诚砖, 邸文钰, 刘芳 1473

医学图像处理

图卷积网络下牙齿种子点自动选取

李占利, 孙志浩, 李洪安, 刘童鑫 1481

乳腺超声图像中易混淆困难样本的分类方法

杜章锦, 龚勋, 罗俊, 章哲敏, 杨菲 1490

遥感图像处理

迁移学习下高分快视数据道路快速提取

张军军, 万广通, 张洪群, 李山山, 冯旭祥 1501

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Research status and progress of non-photorealistic rendering technology(P1283)



Automatic selection of tooth seed point by graph convolutional network(P1481)



Rapid road extraction from quick view imagery of high-resolution satellites combined with transfer learning(P1501)

Scholar View

Research status and progress of non-photorealistic rendering technology

Qian Wenhua, Cao Jinde, Xu Dan, Wu Hao 1283

Review

Deep Hashing image retrieval methods

Liu Ying, Cheng Mei, Wang Fuping, Li Daxiang, Liu Wei, Fan Jiulun 1296

Virtual character behavior modeling in serious games: a review

Liu Cuijuan, Liu Zhen, Chai Yanjie, Liu Tingting, Chen Xiaoyi 1318

Bottleneck issues of computer vision in intelligent manufacturing

Lei Linjian, Sun Shengli, Xiang Yukai, Zhang Yue, Liu Huikai 1330

Image Processing and Coding

A shallow CNN-based noise ratio estimation model

Xu Shaoping, Lin Zhenyu, Li Chongxi, Cui Yan, Liu Ruirui 1344

Degradation model and restoration of flame image of sintering section

Wang Fubin, Liu Hefei, Wu Chen 1356

Multiple image encryption of high robustness in gyrator transform domain

Wang Feng, Shao Zhuhong, Wang Yunfei, Yao Qijun, Liu Xilin 1366

Underwater image enhancement based on turbulence model corrected by transmittance and dynamically adjusted retinex

Tang Xinyu, Li Min, Xu Lingli, Hao Zhen, Zhang Xuewu 1380

Image Analysis and Recognition

Person re-identification based on top-view depth head and shoulder sequence

Wang Xinnian, Liu Chunhua, Qi Guoqing, Zhang Shiqiang 1393

Two-stream face spoofing detection network combined with hybrid pooling

Wang Yahang, Song Xiaoning, Wu Xiaojun 1408

Enhanced gray-level image space for iris liveness detection

Liu Mingkan, Wang Hongmin, Li Qi, Sun Zhenan 1421

Linear object extraction based on hydrodynamics, fractional differential and Steger algorithm

Chen Weiwei, Wang Weixing, Li Runqing, Cai Xiaoyan, Zheng Sifan 1436

Temporal proposal optimization for temporal action detection

Xiong Chengxin, Guo Dan, Liu Xueliang 1447

Image Understanding and Computer Vision

Human pose tracking based on multi-feature fusion in videos

Ma Miao, Li Yibin, Wu Xianqing, Gao Jinfeng, Pan Haipeng 1459

Computer Graphics

Construction of quartic PH curves via interpolating given points

Fang Lincong, Yang Chengzhuan, Di Wenyu, Liu Fang 1473

Medical Image Processing

Automatic selection of tooth seed point by graph convolutional network

Li Zhanli, Sun Zhihao, Li Hongan, Liu Tongxin 1481

Classification method for samples that are easy to be confused in breast ultrasound images

Du Zhangjin, Gong Xun, Luo Jun, Zhang Zheming, Yang Fei 1490

Remote Sensing Image Processing

Rapid road extraction from quick view imagery of high-resolution satellites with transfer learning

Zhang Junjun, Wan Guangtong, Zhang Hongqun, Li Shanshan, Feng Xuxiang 1501

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2020)07-1436-11

论文引用格式: Chen W W, Wang W X, Li R Q, Cai X Y and Zheng S F. 2020. Linear object extraction based on hydrodynamics, fractional differential and Steger algorithm. Journal of Image and Graphics, 25(07): 1436-1446 (陈卫卫, 王卫星, 李润青, 蔡晓琰, 郑思凡. 2020. 基于水动力学、分数阶微分及 Steger 算法的线状目标提取. 中国图象图形学报, 25(07): 1436-1446) [DOI: 10.11834/jig.190278]

基于水动力学、分数阶微分及 Steger 算法的线状目标提取

陈卫卫^{1,2}, 王卫星¹, 李润青¹, 蔡晓琰¹, 郑思凡³

1. 长安大学, 西安 710064; 2. 西安航空职业技术学院, 西安 710089; 3. 黎明职业大学智能制造工程学院, 泉州 362000

摘要: 目的 线状目标的检测具有非常广泛的应用领域, 如车道线、道路及裂缝的检测等, 而裂缝是其中最难检测的线状目标。为避免直接提取线状目标时图像分割难的问题, 以裂缝和车道线为例, 提出了一种新的跟踪线状目标中线的算法。**方法** 对图像进行高斯平滑, 用一种新的分数阶微分模板增强图像中的模糊及微细线状目标; 基于 Steger 算法提出一种提取线状目标中心线特征点的算法, 避免了提取整体目标的困难; 根据水动力学思想将裂隙看成溪流, 通过最大熵阈值处理后, 先进行特征点的连接, 再基于线段之间的距离及夹角进行线段之间的连接(溪流之间的融合)。**结果** 对 300 幅裂缝图像及 4 种类别的其他线状目标图像进行试验, 并与距离变换、最大熵阈值法 + 细线化 Otsu 阈值分割 + 细线化、谷底边界检测等类似算法进行比较分析, 本文算法检测出的线状目标的连续性好、漏检(大间隙少)和误检(毛刺及多余线段少)率均较低。**结论** 本文算法能够在复杂的线状目标图像中准确快速地提取目标的中心线, 一定程度上改善了复杂线状目标图像分割难的问题。

关键词: 线状目标; 裂缝; 分数阶微分; Steger; 水动力学

Linear object extraction based on hydrodynamics, fractional differential and Steger algorithm

Chen Weiwei^{1,2}, Wang Weixing¹, Li Runqing¹, Cai Xiaoyan¹, Zheng Sifan³1. Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China;
3. Intelligent Manufacturing Engineering College, Liming Vocational University, Quanzhou 362000, China

Abstract: Objective In all the 2D image segmentation, the objects in an image can be generally classified into area objects and linear objects. The two kinds of object extraction or detection are different, comparing to area object extraction, since the linear object is more elongated, discontinuous based algorithms may be more suitable to use, but vague or tiny edges can be easy lost, which will make the under-segmentation problem. The linear target detection has a very wide range of applications, such as lane line detection in transportation, road extraction in aerial images and remote sensing images, rock fracture analysis in rock engineering, and cement cracks and asphalt cracks in building and road construction applications. In all the linear object extraction or identification applications, the crack detection in an image is one of the most difficult linear object detection. In order to avoid having the difficulty for extracting linear objects directly and accurately, and to solve the problem of crack image segmentation, a new image segmentation algorithm for tracking crack central line is proposed. **Method** The new algorithm includes three aspects, namely, 1) After image smoothing using a Gaussian filter, an improved fractional differential function is applied to enhance small and vague cracks. This function has nonzero coefficient

收稿日期: 2019-06-28; 修回日期: 2019-10-29; 预印本日期: 2019-11-05

compared with traditional Tiansi template, indicating that every neighboring pixel of the testing pixel is used for the central feature point detection; 2) Based on that a crack can be regarded as a river/creep, the crack is of a V shape, and the central line in a crack or river is the deep water line, hence, we try to detect the central lines of cracks. The pixels in the central line are called the feature points in this paper. The feature point extraction of crack central lines is based on Steger algorithm and crack image characteristics, where a 1D curve is extended to a 2D ridge or valley line. Then these structures are modeled using a 1D curve, and the feature point is in the direction when it is a curve feature point: the first derivative is zero, the second derivative takes the extreme value, and the feature points are extracted; 3) Considering the distance between the feature points, short gaps between the neighboring segments or points are connected by a line, and long gaps are filled in a optimal routine based on the basis of the gap length and segment angles. We consider that the extraction of cracks in an image is equivalent that a blind man go to find out rivers/creeks on a silt, he will be first step by step to check if there is a deep water point in his current local area, then mark these points and judge which points belong to the same river/creek, finally makes point connection. We assume that a rough and slender crack in a pavement image is a creek or river filled by water, and the boundary of the crack is the side wall. When the feature points of the crack are obtained, the remaining tasks are to connect adjacent feature points and fill crack central line gaps using the idea of water flow-hydrodynamic theory. **Result** We selected 300 pavement crack and 300 other linear object images in the experiments. Compared with the other four similar traditional algorithms, such as distance transformation, maximum entropy, Otsu, Canny and valley edge detection image segmentation algorithms, the proposed algorithm produces less gaps on the central lines of linear objects or cracks and has less over-segmentation and under-segmentation problems. **Conclusion** The proposed algorithm can be used in complex linear object and rough pavement crack images because it can rapidly and accurately extract the central line and overcome the existing image segmentation problems for linear object images.

Key words: linear object; crack; fractional differential; Steger; hydrodynamics

0 引言

线性目标提取是工程应用领域材料瑕疵检测或大型设施预警的重要工作,也一直是图像处理中的难点。岩石节理裂隙和公路路面裂缝是造成隧道和桥梁坍塌及岩石边坡或公路路面破坏的主要因素之一,提取更加困难。岩体节理裂隙的分布和发育状况及等级特性是矿岩及土木工程中非常重要的物理指标,对地下隧道、洞室、露天边坡及挡土坝等工程中的岩体设施稳定性分析与加固化处理有直接影响(Hakami 和 Wang, 2005)。裂缝是公路或机场路面及桥梁和隧道的主要病害,发育程度较高的裂缝可导致机场或公路路段关闭、桥梁或隧道坍塌。Brantley(2010)详细分析了岩体风化程度与地下水之间的关系,重要的中间因素是岩体节理裂隙和孔隙率的变化。

学者们研究了节理裂隙对应力应变和变形的影响(Ji 等, 2011; Alam 等, 2015),及水流渗透性与节理裂隙的关系(Yang 等, 2015; Noorian-Bidgoli 和 Jiang, 2015)。能否精确实时检测并合理分析评价岩体的节理裂隙状况和发育情况,对岩土工程的安

全设计及安全施工、隧道及各种边坡灾害的预测具有至关重要的作用,也是岩石工程研究领域的热点课题。因为自然条件和人为因素等的影响,常常会发生由节理裂隙的发育引起的岩体滑坡及隧道坍塌等灾害,导致很大的人员伤亡及经济损失(Wang 等, 2017)。若能提前对相关岩体的节理裂隙进行检测与评估,则可防患于未然。

传统的岩石节理裂隙分析是基于人工测量来完成的,测量精度主要依赖测量者的经验,测量者往往需要攀爬到岩体表面甚至悬崖峭壁上进行测量,不仅耗时、费力、危险,而且精度不高。而基于图像技术的测量和分析属于无接触测量方法,能够克服上述弊病,安全、高效并精确,但尚未形成公认的理论和方法。关于岩石节理裂隙的测量和分析方法有很多,李莉等人(2011)对岩石节理裂隙的表征方法的优劣势进行分析和比较,总结归纳为两种:1)宏观的测试表征方法,主要有大型目标的3维激光扫描、钻孔孔内照相、精测线和摄影测量等;2)基于数字图像的模拟表征方法,如蒙特卡洛随机模拟和图像处理与分析等。上述方法也是机场和公路路面的表征方法。

一般的测量和分析方法都包括检测与分析两个

环节,检测是分析的基础,多数研究也主要针对检测环节进行。Shatnawi(2018)提出一种基于人工神经网络的方法用于自动检测公路路面的裂缝;Fakhimi等人(2018)利用图像技术提取岩石节理裂隙并引入到数字模拟计算中;徐金明和赵晓波(2007)基于煤体节理裂隙的发育情况的检测,估算出流体包裹体之迹线,但检测环节和线性拟合环节的精度都有待提高;郭立钱等人(2012)用图像处理及支持向量机方法实现了跟踪岩体裂隙的中心迹线,较好地提取了主要裂隙/裂缝中心迹线,但没有涉及裂隙/裂缝的边缘线提取;Kabir等人(2009)比较了 Sobel、Marr-Hildreth、纹理聚类和 Harr 小波等算法提取岩石节理裂隙的效果,其中纹理聚类算法的精度约 83%,在众多算法中最精确。Singh 等人(2018)在试验试件中,利用 CT 切片技术自动提取了岩石节理裂隙的信息;Wang 等人(2012)用分数阶微分和图论思想创建了一系列图像分割和增强算法对岩石节理裂隙进行分析;Zakeri 等人(2017),和 Mohan 和 Poobal(2018)对节理裂隙更多更详细的信息进行了综述。

由于岩体节理裂隙是 3 维的,随着计算机技术的快速发展,研究者基于 2 维检测来估算 3 维的情况。Kemeny 和 Post(2003)通过跟踪多方面的 2 维信息来估算 3 维信息,总结了一种估算 3 维节理裂隙的新方法;Di 和 Gao(2014)将 2 维图像的灰度变换及 Canny 边缘检测方法延伸到 3 维图像处理中,实现了 3 维岩体节理裂隙测量,而得到的 3 维节理裂隙较为完整;Voorn 等人(2013)采用一种称作 Frangi 的滤波器对 3 维的岩体节理裂隙进行多尺度增强,效果较为明显,但尺度的选取对增强效果影响较大;Li 等人(2016)建立了一种岩体表面 3D 模型用于自动跟踪岩石节理裂隙;Zheng 等人(2015)基于 3D 模型来估算 2D 节理裂隙的密度。

直接利用 3 维激光扫描获取和处理 3D 信息的研究很多。Chen 等人(2016)基于 3 维激光扫描的点云数据获取节理裂隙的方向;Guo 等人(2017)也进行了类似的研究;Cacciari 和 Futai(2018)对隧道内部岩体结构及节理裂隙进行了详细测量和分析,运用点云数据和图像数据处理方法提取了岩体构造和裂隙分布信息。

综上所述,裂隙/裂缝测量和分析在岩石及土木工程中非常重要,图像测量手段有一定的优越性,但

由于裂隙/裂缝图像千变万化及噪声太多,2 维和 3 维的裂隙/裂缝检测或跟踪都困难重重。因此,本文提出了一种不直接提取整体裂隙/裂缝而是提取裂隙/裂缝中线的算法,主要包括 3 个步骤:1)提出一种新的分数阶微分模板,增强裂隙/裂缝信息;2)根据 Steger 算法思想,提取裂隙/裂缝中心线上的特征点;3)综合特征点的方向、强度及亚像素精度定位进行特征点连接,然后基于水动力学思想在端点距离和角度差都满足距离阈值和角度差阈值的情况下,进行线段连接。

1 基于新的分数阶微分模板增强目标

与 1 阶和 2 阶微分不同,分数阶微分(0.1—0.9 阶)可以检测或部分检测模糊的边界和微细的弱边界(Wang 等,2012),而且与传统边界扫描算法相比,还可以减少噪声的增加量,分数阶微分的改进算法(Wang 等,2012)可用于岩石节理裂隙图像及路面裂缝图像的增强。

分数阶 v 阶导数的 Grünwald-Letnikov 定义为

$${}_a D_t^v s(t) = \lim_{h \rightarrow 0} s_h^v(t) = \lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ nh \rightarrow t-a}} h^{-v} \sum_{r=0}^n C_r^{-v} s(t-rh) \quad (1)$$

式中, $C_r^{-v} = \frac{(-v)(-v+1)\cdots(-v+r-1)}{r!}$ 。根据式(1),如果一元信号 $s(t)$ 的持续期是 $t \in [a, t]$,则将信号持续期 $[a, t]$ 按照单位等分间隔 $h = 1$ 进行等分,有

$$n = \left\lceil \frac{t-a}{h} \right\rceil = [t-a] \quad (2)$$

由此可推导出一元信号 $s(t)$ v 阶的分数阶微分差值,具体为

$$\begin{aligned} \frac{d^v s(t)}{dt^v} &\approx s(t) + (-v)s(t-1) + \\ &\quad \frac{(-v)(-v+1)}{2} s(t-2) + \\ &\quad \frac{(-v)(-v+1)(-v+2)}{6} s(t-3) + \cdots + \\ &\quad \frac{\Gamma(-v+1)}{n! \Gamma(-v+n+1)} s(t-n) = \\ &= a_0 s(t) + a_1 s(t-1) + a_2 s(t-2) + \\ &\quad a_3 s(t-3) + \cdots + a_n s(t-n) \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可得分数阶微分的各个系数,具体为

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 1, a_1 = -v \\
 a_2 &= (-v)(-v+1)/2 = (v^2 - v)/2 \\
 a_3 &= (-v)(-v+1)(-v+2)/6 = \\
 &\quad (-v^3 + 3v^2 - 2v)/6 \\
 a_4 &= (-v)(-v+1)(-v+2)(-v+3)/24 = \\
 &\quad (v^4 - 6v^3 + 11v^2 - 6v)/24 \\
 &\quad \vdots \\
 a_n &= \Gamma(-v+1)/n! \Gamma(-v+n+1) \quad (4)
 \end{aligned}$$

若将式(4)的系数按像素之间的距离嵌入到一个 5×5 模板中, 可得传统的 Tiansi 模板, 就有 8 个像素的系数值为 0, 如果将中心像素的系数定义为 8, 则 Tiansi 模板类似于 Laplacian 算子。若用函数 $k(i, j)$ 来表达模板, 那么 Tiansi 5×5 模板中的各个系数之和可表达为

$$\sum_{i=-2}^{i+2} \sum_{j=-2}^{j+2} k(i, j) = -12v + 4v^2 + u$$

式中, $u = Aa_0 = 8$ 。

若定义 $\sum_{i=-2}^{i+2} \sum_{j=-2}^{j+2} k(i, j) = u - 12v + 4v^2 = 1$, 则可求得中心像素系数 $u = 12v - 4v^2 + 1$, 而不是 8。

若模板中每一个点的系数都按像素之间的欧氏距离来确定, 则可以得到一种不同于 Tiansi 的新的

分数阶微分模板。该模板充分利用了每一个邻域像素对检测点的作用, 模板中的每一系数值都为非零值。考虑到像素之间距离计算较繁杂, 可以进行简化, 如两像素斜线距离 $\sqrt{2} \approx 1.5$, 具体为

$$\begin{aligned}
 a_{1-2} &= (a_1 + a_2)/2 = (v^2 - 3v)/4 \\
 a_{2-3} &= (a_2 + a_3)/2 = (-v^3 + 6v^2 - 5v)/12 \\
 a_{3-4} &= (a_3 + a_4)/2 = (v^4 - 10v^3 + 23v^2 - 14v)/48
 \end{aligned}$$

模板的中心像素值为

$$w = (16v^3 - 108v^2 + 164v)/12 + 1$$

图 1 展示了 Tiansi 模板与改进的分数阶模板的比较。与传统的 Tiansi 模板相比, 新模板中的每个像素的系数都不为 0。中心系数值为

$$w = (16v^3 - 108v^2 + 164v)/12 + 1$$

模板尺寸的选择是很重要的, 经过实验得出: 如果为 3×3 , 则由于太小, 处理的结果较为粗糙; 如果大于 7×7 , 则计算量太大。所以选择 5×5 较为合理。待模板大小确定后, 选择合理的分数阶的微分阶数。通过对裂隙和裂缝图像的检测得出: 当阶数 v 从 0.1 增加到 0.5 时, 图像中的模糊边界和弱边界逐渐增强; 当 $v > 0.5$ 时, 图像中的噪声将随着 v 的增长而陡增, 如图 2 所示, 故此, 本文在 5×5 的模板中选择 $v = 0.5$ 。

$(v^2-v)/2$	0	$(v^2-v)/2$	0	$(v^2-v)/2$
0	$-v$	$-v$	$-v$	0
$(v^2-v)/2$	$-v$	8	$-v$	$(v^2-v)/2$
0	$-v$	$-v$	$-v$	0
$(v^2-v)/2$	0	$(v^2-v)/2$	0	$(v^2-v)/2$

$(-v^3+3v^2-2v)/6$	$(-v^3+6v^2-5v)/12$	$(v^2-v)/2$	$(-v^3+6v^2-5v)/12$	$(-v^3+3v^2-2v)/6$
$(-v^3+6v^2-5v)/12$	$(v^2-3v)/4$	$-v$	$(v^2-3v)/4$	$(-v^3+6v^2-5v)/12$
$(v^2-v)/2$	$-v$	w	$-v$	$(v^2-v)/2$
$(-v^3+6v^2-5v)/12$	$(v^2-3v)/4$	$-v$	$(v^2-3v)/4$	$(-v^3+6v^2-5v)/12$
$(-v^3+3v^2-2v)/6$	$(-v^3+6v^2-5v)/12$	$(v^2-v)/2$	$(-v^3+6v^2-5v)/12$	$(-v^3+3v^2-2v)/6$

(a) Tiansi 模板(5×5)

(b) 改进的分数阶模板(5×5)

图 1 Tiansi 模板和改进的分数阶模板比较

Fig. 1 Tiansi and new fractional differential templates

((a) Tiansi template (5×5); (b) improved fractional differential templates (5×5))

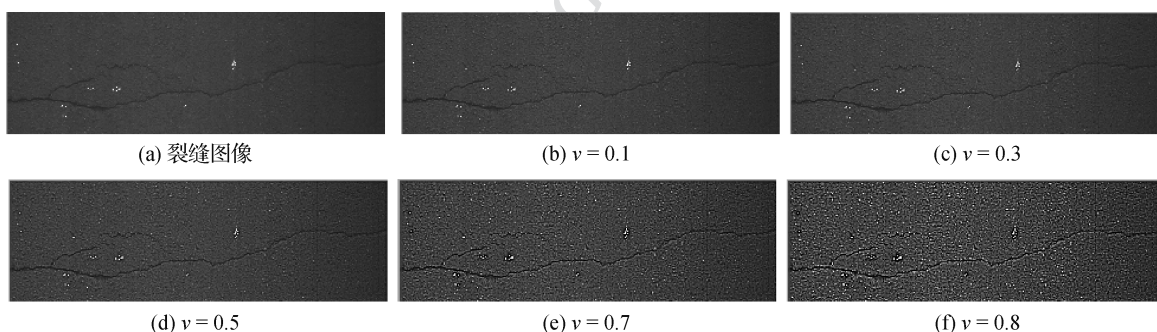


图 2 不同分数阶阶数 v 对裂缝图像的微分结果

Fig. 2 Different fractional differential order v on crack image

((a) crack image; (b) $v = 0.1$; (c) $v = 0.3$; (d) $v = 0.5$; (e) $v = 0.7$; (f) $v = 0.8$)

2 基于 Steger 的中线特征点提取

Steger(1998,2000)通过研究1维曲线尺度的空间特性,得出当 $w = \sigma/\sqrt{3}$ 时,2阶微分取到极值,其中 w 为被测曲线的线宽, σ 为高斯核函数的标准差。若将1维曲线推广到2维山脊线或山谷线的情况,这些结构也可以用1维曲线 $s(t)$ 为模型,而 $s(t)$ 的法线方向为 $n(t)$ 。若某个点为曲线上的特征点,则该点在 $n(t)$ 方向上的1阶微分为0,而2阶微分达到了极值。

这里定义的高斯偏微分核函数为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} g_{\sigma}(x, y) = \frac{d}{dx} g_{\sigma}(x) \times g_{\sigma}(y) \\ \frac{\partial}{\partial y} g_{\sigma}(x, y) = g_{\sigma}(x) \times \frac{d}{dy} g_{\sigma}(y) \\ \frac{\partial^2}{\partial^2 x} g_{\sigma}(x, y) = \frac{d^2}{dx^2} g_{\sigma}(x) \times g_{\sigma}(y) \\ \frac{\partial^2}{\partial^2 y} g_{\sigma}(x, y) = g_{\sigma}(x) \times \frac{d^2}{dy^2} g_{\sigma}(y) \\ \frac{\partial}{\partial x \partial y} g_{\sigma}(x, y) = \frac{d}{dx} g_{\sigma}(x) \times \frac{d}{dy} g_{\sigma}(y) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $g_{\sigma}(x)$ 及 $g_{\sigma}(y)$ 分别为以 x 和 y 为自变量且标准差为 σ 的两个1维高斯核函数。如果将图像 $I(x, y)$ 与上述两个高斯偏微分核函数进行卷积计算,可以分别有

$r_x(x, y), r_y(x, y), r_{xx}(x, y), r_{xy}(x, y), r_{yy}(x, y)$ 具体为

$$\begin{cases} r_x(x, y) = I(x, y) * \frac{\partial}{\partial x} g_{\sigma}(x, y) \\ r_y(x, y) = I(x, y) * \frac{\partial}{\partial y} g_{\sigma}(x, y) \\ r_{xx}(x, y) = I(x, y) * \frac{\partial^2}{\partial^2 x} g_{\sigma}(x, y) \\ r_{xy}(x, y) = I(x, y) * \frac{\partial}{\partial x \partial y} g_{\sigma}(x, y) \\ r_{yy}(x, y) = I(x, y) * \frac{\partial^2}{\partial^2 y} g_{\sigma}(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

将图像 $I(x, y)$ 构造为Hessian矩阵,具体为

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx}(x, y) & r_{xy}(x, y) \\ r_{xy}(x, y) & r_{yy}(x, y) \end{bmatrix} \quad (7)$$

可以通过计算上面矩阵绝对值得到最大特征值 λ 和其对应特征向量 (n_x, n_y) ,当 (n_x, n_y) 满足约

束条件 $\|(n_x, n_y)\|_2 = 1$,则该特征向量就给出了其曲面在此点的法线方向。如果使用二次泰勒多项式的插值,就可得到沿着 (n_x, n_y) 方向上的1阶微分过零点的位置,具体为

$$(p_x, p_y) = (t \cdot n_x, t \cdot n_y) \quad (8)$$

式中, t 可表示为

$$t = \frac{r_x \cdot n_x + r_y \cdot n_y}{r_{xx} \cdot n_x^2 + 2 \cdot r_{xy} \cdot n_x \cdot n_y + r_{yy} \cdot n_y^2} \quad (9)$$

若 $(p_x, p_y) \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \times \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$,则该点就为该中心线上的特征点。如果该点沿 (n_x, n_y) 方向的2阶微分取到极值,即可进一步确定此点为中心线特征凸点。

对于复杂的裂隙/裂缝图像,在应用上述算法之前,先将图像进行高斯平滑,再进行边界扫描。在获取的梯度图像中,在平滑后的图像中检测那些梯度较高的区域,再进行这些中心线特征点的检测。然后基于水动力学的思想进行中心线特征点连接和裂缝的连接。

3 基于水动力学的中心线跟踪

研究水及其他液体的运动规律及其与边界相互作用的学科称为水动力学。影响水的运动主要是其本身的特性和其运动的边界特性。理想运动可以根据普朗特的边界层理论,在边界层以外的区域中,不考虑粘性力。挟有颗粒和/或掺有气泡的流动称为多相流,也是非牛顿流体流动。最常见的是河道中的含沙水流。而水体四周都受固体边壁约束的流动称为压力流,又称满管流。当水体流过固体边壁时,在某些条件下可引起边壁的振动,而边壁的振动又反过来改变水流的特性。研究水和固体边壁相互作用的理论称为水弹性理论,其分支地下水动力学是研究在孔隙岩石、节理裂隙岩石和岩溶石料中的水的运动规律科学(Yih,1969)。

裂隙的提取相当于观测泥沙地上的一条小溪或河流,可以将一幅图像中粗细长短不一的裂隙看成充满水的小溪或河流,裂隙的边界就是边壁。根据上述Steger理论算法求出裂隙的特征点后,剩下的工作就是如何连接临近的特征点及连接不连续的裂隙(溪流的融合)。这里考虑了如下几方面的情况:1)当水流遇到泥沙边壁时,根据水弹性理论,水流

将冲向阻力较小的边壁,而且流动的力量在此处变大,基于此,获取图像中裂缝特征点。确定连接临近特征点的准则:两个特征点距离越近,它们之间的水流越容易冲穿它们共同的边壁,使两溪流贯通,即两特征点连接在一起形成一线段。2)根据水动力学原理,在一般情况下,水是不可压缩的,是沿着下坡流淌的,也就是说在图像中,某段裂缝中的水流朝梯度较陡的方向流去,当判断两相邻裂隙是否可以相连时,需要判断两者之间的图像梯度是否足够高。梯度越高,贯穿溪流的可能就越大。3)当图像中的裂隙特征点连接以后,可能有一部分裂隙还没有完全连接在一起,即一段段不连续的小溪和河流。若要判定两条临近的裂隙是否可以连接,需要至少满足以下条件:(1)判断两条裂缝段(溪流段)可能连接在一起的较短的几条间隙中,哪条间隙上的梯度值最高;(2)两条溪流的流淌方向是否一致或接近,也就是两条裂缝的曲率方向是否接近;(3)两条溪流之间的距离是否足够近,也就是判断临近两条裂缝中线的临近端点之间的距离是否足够近,若距离太远,梯度又不高,则两条临近溪流贯穿的可能性较小。在本文的裂隙/裂缝连接中,先连接特征点以形成裂隙/裂缝线段,然后进行裂隙/裂缝段之间的连接。

3.1 中心线的特征点连接

进行裂隙/裂缝的中心线特征点提取过程时,可以得到所有特征点的3种信息:1)特征点的方向可以表示为 $(n_x, n_y) = (\cos\alpha, \sin\alpha)$,也就是溪流的方向;2)特征点强度,即该点在 (n_x, n_y) 方向的2阶微分,也就是溪流的坡度;3)特征点亚像素的精度定位,即1阶微分过零点的位置 (p_x, p_y) ,也就是溪流的位置。综合利用上述3种信息,中心线上的特征点连接算法如下:

在岩石节理裂隙或路面裂缝图像中有多条裂隙/裂缝曲线,即多条溪流。每条曲线(溪流)对应一个2阶微分的最大值,按此对所有曲线(溪流)进行降序排序。连接2阶微分中最大值的曲线,再定位获得该曲线上的最大值的特征点,将其作为当前的特征点,然后在该特征点的 $n^\perp$ 方向,搜索另一符合约束条件的特征点,最后将搜索到的新特征点添加到这条曲线上,再以此新特征点为起点,继续进行搜索,直至搜索不到新的特征点为止。从2阶微分获取的最大特征点有可能并不是该曲线上的端点,因此搜索过程只能完成该曲线上的2阶微分的最大

特征点的一侧连接,如果来实现另一侧的连接,需要在2阶微分最大特征点的 $-n^\perp$ 方向再重复上面的过程。最后按顺序依次分别完成多条曲线(溪流)的连接,直到遇到某曲线上2阶微分的最大值 $\leq$ 阈值 h_{thr} ,结束曲线的连接。

上述约束条件由以下方式给出:因为检测的中心线上的特征点的某段局部线的方向是足够精确的,所以仅将当前特征点的8个邻域内的3个点作为候选点。例如,如果当前特征点为 (q_x, q_y) ,其方位角为 $\alpha \in (-\pi/8, \pi/8]$,则 $(q_x + 1, q_y - 1)$ 、 $(q_x + 1, q_y)$ 和 $(q_x + 1, q_y + 1)$ 为其3个候选点,分别计算当前点和每一候选点之间的距离 $dis = \|p_1 - p_2\|_2$ 及其角度差 $dif = |\alpha_1 - \alpha_2|$, $dif \in [0, \pi/2]$,再选取 $dis + dif$ 最小且2阶微分值 $\geq$ 阈值 l_{thr} 的点作为连接点。

3.2 线状目标段的连接

上述中心线上的特征点连接后,进行图像的形态学操作,相当于给溪流(裂缝)涨水,会使得小于4个像素距离(较短的边壁)的裂缝间隙缝合,这样就产生了一些短的线段(溪流),这些线段上可能会生出一些毛刺(极短小的溪流)。为了去除这些影响后续操作的溪流,先检测短线(包括毛刺)上的每一个端点和交叉点,根据交叉点位置去掉毛刺。去除短线毛刺噪声后的线段不一定能使得裂隙连续,可在两临近的线段端点周围搜寻是否有其他可连接的候选线(可能的溪流),判断的依据主要是距离和梯度的大小。若有,则根据这些端点之间的像素距离及曲率,即在两条已有短线(大于5个像素长度)方向的角度差及两端点之间假定线的梯度值,判断这两条裂缝是否能够连接再一起。

总之,由于裂隙/裂缝往往较复杂,无论是走向、宽度及弯曲程度都有很大不同;线段两端点处各自的角度不好判定,端点的位置及所要计算的像素个数都对角度的判断有一定影响;连接路径和方式很难有针对性的可靠标准,仅靠主观判定会带来错连和漏连等问题,因此,绘制一条最小成本的曲线更为可靠。为避免或减少线段的连接错误,将连接分为短间隙和长间隙连接两个步骤,如图3所示。

短间隙连接是指当两端点像素距离 ≤ 4 像素时,直接直线连接这两端点,因为距离较小,连接路径对效果影响不大。

长间隙连接的主要步骤如下:1)以分数阶微分

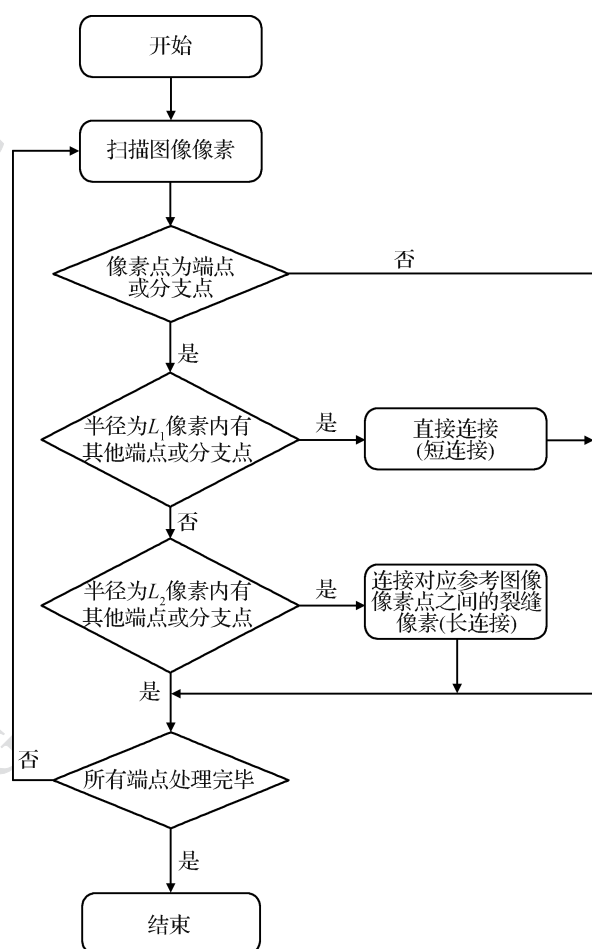


图3 线状目标间隙连接流程图

Fig. 3 Fracture gap connection flowchart

后的图像为背景作为参考图 F ; 2) 由于裂隙/裂缝的像素灰度值较低, 为了减少工作量及增加检测准确度, 用一个阈值剔除不可能有裂隙/裂缝的区域。通过比较几种常用的阈值算法, 对复杂的裂隙/裂缝图像选取最大熵阈值算法。计算 F 的最大熵阈值, 均小于最大熵法确定的阈值 t , 因而利用 t 能够较好地判断端点之间的信息; 3) 确定线段端点和其候选端点在 F 中的位置, 如果两端点之间在 F 中有裂隙信息 (灰度值小于 t), 则在连接图中按曲率和距离连接对应的裂隙/裂缝。

图4是一幅模糊的夜间车道线图像, 包含2条车道线, 中心线点的提取与局部连接结果及最终的中心线段连接结果如图4(b)(c)所示。

4 算法分析比较

为验证本文算法的有效性, 选择一幅表面粗糙

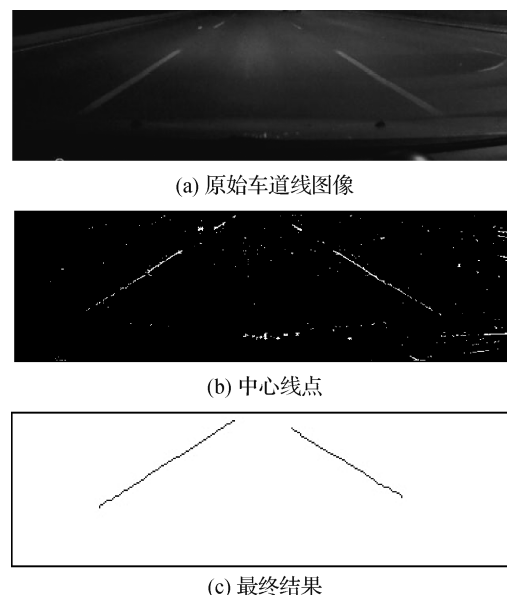


图4 模糊车道线的中心线检测

Fig. 4 Vague lane line central line detection

((a) original lane line image; (b) central line points; (c) final detection result)

的混凝土路面裂缝图像进行实验, 图像中有一条从左到右的长曲线裂缝, 左上有一条弯曲的短裂缝。将本文算法与距离变换法 (Felzenszwalb 和 Huttenlocher, 2012)、最大熵阈值法 + 细线化 (Chen 等, 2015)、Otsu 阈值分割 (Wang, 2011) + 细线化以及谷底边界检测 (Wang 等, 2003; Wang 和 Bergholm, 2008) 等算法的裂隙裂缝提取结果进行比较, 如表1和图5所示。

表1 5种算法检测裂缝中心线的结果

Table 1 Comparison of detecting central line points by five algorithms

算法	分段数	大间隙数	毛刺数
距离变换	63	14	13
最大熵 + 细线化	5	4	5
Otsu + 细线化	4	1	12
谷底检测	8	5	3
本文	2	1	0

表1是5种算法检测裂缝中心线的情况, 计线长度超过2个像素为一条线段, 两条线段的间隙长度超过5个像素为大间隙, 原始的裂缝分布在对比度很弱的粗糙路面上。图5是不同算法提取的中心线结果示意图, 从图5(b)~(f)的裂缝提取结果可

以看出,图 5(b) 提取的中心线上有很多断线与毛刺,而且线的宽度不是一个像素宽;图 5(c) 的结果与图 5(b) 相比,毛刺和间隙较少,虽然能将裂缝主要段提取出来,但还是存在欠分割现象,中心线上有很多长短不一的线段,没有形成较长的裂缝曲线;图 5(d) 的结果存在过分割现象,经细线化后,中心线上留有很多短小毛刺,即多分支的裂缝,检测效果欠佳;图 5(e) 提取的中心线比上述几种算法的效果要好,但由于裂缝宽度及噪声的影响,也存在少量的

短间隙及细小的毛刺,若要使检测效果完全满意,还需加入一些二值图像的后处理;图 5(f) 本文算法提取出两条裂缝,一条从左到右的长裂缝有一个枝杈裂缝,枝杈裂缝与另一条短裂缝相距很近,方向也相近,但它们之间贯穿的梯度条件明显不够,所以没有连接在一起,两条裂缝上既没有毛刺也没有断点,结果很好。

图 6 是 4 组典型的复杂路面裂缝及岩石节理裂隙图像。从图 6 可以看出,对公路混凝土路面的裂

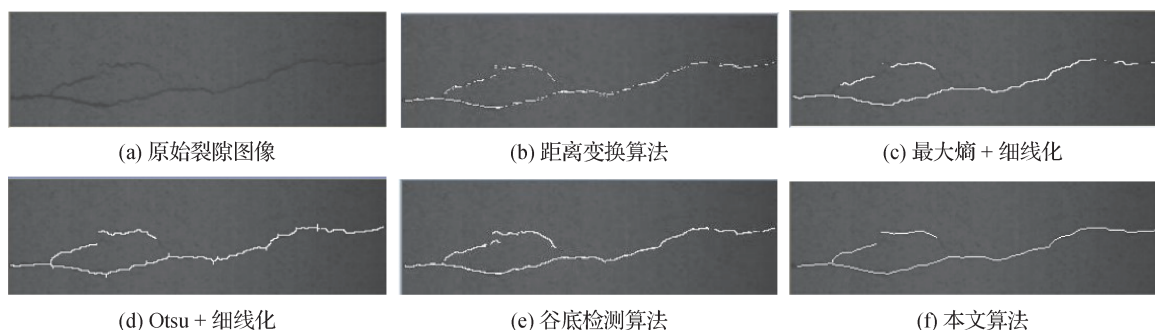


图 5 不同算法提取的中心线结果

Fig. 5 Results of central line extraction by different algorithms ((a) original fracture image; (b) distance transformation; (c) maximum entropy + thinning; (d) Otsu + thinning; (e) valley edge detection; (f) ours)

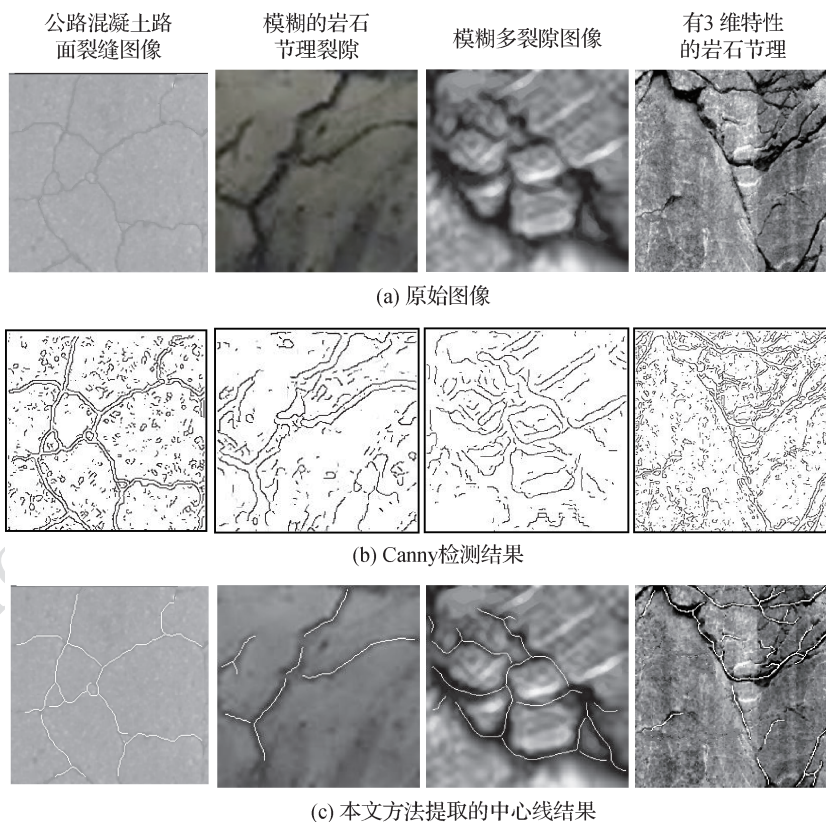


图 6 不同的裂缝裂隙图像及 Canny 检测和本文方法提取的中心线结果

Fig. 6 Images of different crack and fracture, results of Canny detection and results of central line extracted by our method ((a) original images; (b) results of Canny detection; (c) results of central line extracted by our method)

缝图像,在 Canny 检测结果中出现了一些噪声边界,而本文算法提取的中心线结果呈现了整个裂隙网络;对模糊的岩石节理裂隙图像,Canny 检测到了大部分裂缝,但产生了许多噪声边界,而本文算法检测出了明显的裂缝,没有任何噪声边界;在模糊多裂隙图像中,既有深色裂隙又有浅色条纹,Canny 的检测结果包含了所有的边界,而本文算法给出了 6 条长短不一的裂隙中心线,线与线之间的间隙处灰度值较高,所以未能完全连接;对有 3 维特性的岩石节理裂隙图像,岩石表面粗糙,噪声较多,裂隙粗细深浅不一,Canny 检测出了太多的边界,使用本文算法提取的中心线结果能够将大部分长短不同的裂隙检测出来。

5 结 论

以复杂的裂缝及车道线为例,提出了一种新的线状目标中心线的提取算法,提取过程包括 3 个主要步骤:1) 根据线状目标的特点,提出一种新的分数阶微分算法,以增强模糊和微细的线状目标,与传统的模板相比,检测点周围的点信息都在被考虑范围中;2) 基于 Steger 的算法思想及线状目标图像特点,提出了一种检测中心线上特征点的算法,降低了直接提取线状目标的困难;3) 基于水动力学思想进行线状目标中心线的跟踪,综合利用特征点方向、强度、亚像素精度定位来连接特征点,然后连接线段,包括形态学操作及毛刺去除,间隙连接分为短间隙连接和长间隙连接。

在实验中,选取了 300 幅裂缝图像和车道线图像,通过与类似的 4 种传统算法对比,本文算法能够从不同类型的线状目标图像中快速准确地提取中心线,因此可以避免或减少传统算法对此类图像的分割困难。

对部分图像,由于某些线状目标部位的梯度信息不明显,目标上的长间隙很难连接。下一步的研究重点是扩大图像类别的试验,根据线状目标走向,解决无明显梯度信息的长间隙的缝合问题。另外,在条件许可的情况下,将本文算法扩展应用到其他线性目标的检测中,如遥感或航空图像中的公路检测、金属材料的裂纹检测等。

参考文献 (References)

- Alam A K M B, Fujii Y, Fukuda D, Kodama J I and Kaneko K. 2015. Fractured rock permeability as a function of temperature and confining pressure. *Pure and Applied Geophysics*, 172(10): 2871-2889 [DOI: 10.1007/s00024-015-1073-2]
- Brantley S L. 2010. Rock to regolith. *Nature Geoscience*, 3(5): 305-306 [DOI: 10.1038/ngeo858]
- Cacciari P P and Futai M M. 2018. Assessing the tensile strength of rocks and geological discontinuities via pull-off tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 105: 44-52 [DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.03.011]
- Chen J Q, Zhu H H and Li X J. 2016. Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud. *Computers and Geosciences*, 95: 18-31 [DOI: 10.1016/j.cageo.2016.06.015]
- Chen L P, Chen X Y, Wang S L, Yang W Z and Lu S K. 2015. Foreign fiber image segmentation based on maximum entropy and genetic algorithm. *Journal of Computer and Communications*, 3(11): 61267 [DOI: 10.4236/jcc.2015.311001]
- Di H B and Gao D L. 2014. Gray-level transformation and canny edge detection for 3D seismic discontinuity enhancement. *Computers and Geosciences*, 72: 192-200 [DOI: 10.1016/j.cageo.2014.07.011]
- Fakhimi A, Lin Q and Labuz J F. 2018. Insights on rock fracture from digital imaging and numerical modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 107: 201-207 [DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.05.002]
- Felzenszwalb P F and Huttenlocher D P. 2012. Distance transforms of sampled functions. *Theory of Computing*, 8(19): 415-428 [DOI: 10.4086/toc.2012.V008a019]
- Guo J T, Liu S J, Zhang P N, Wu L X, Zhou W H and Yu Y N. 2017. Towards semi-automatic rock mass discontinuity orientation and set analysis from 3D point clouds. *Computers and Geosciences*, 103: 164-172 [DOI: 10.1016/j.cageo.2017.03.017]
- Guo L Q, Liao J B, Zhong F P, Chen J J, Huang H, Yu X and Dong K Y. 2012. Automated detection of rock discontinuity trace based on digital image processing and SVM. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 44(6): 203-210 (郭立钱, 廖俊必, 钟方平, 陈剑杰, 黄昊, 余翔, 董开营. 2012. 基于数字图像处理 and SVM 的岩体裂隙迹线自动检测. *四川大学学报(工程科学版)*, 44(6): 203-210) [DOI: 10.15961/j.jsuese.2012.06.004]
- Hakami E and Wang W X. 2005. Characterisation and Quantification of Resin-impregnated Fault Rock Pore Space Using Image Analysis.

- Svensk Kärnbränsle-hantering AB
- Ji S H, Park Y J and Lee K K. 2011. Influence of fracture connectivity and characterization level on the uncertainty of the equivalent permeability in statistically conceptualized fracture networks. *Transport in Porous Media*, 87 (2): 385-395 [DOI: 10.1007/s11242-010-9690-9]
- Kabir S, Rivard P, He D C and Thivierge P. 2009. Damage assessment for concrete structure using image processing techniques on acoustic borehole imagery. *Construction and Building Materials*, 23 (10): 3166-3174 [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.013]
- Kemeny J and Post R. 2003. Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Computers and Geosciences*, 29 (1): 65-77 [DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00106-1]
- Li L, Wang H J and Wang Y M. 2011. Discussion on description methods of rock fracture structure. *Metal Mine*, (6): 1-5 (李莉, 王洪江, 王贻明. 2011. 岩体裂隙结构表征方法的探讨. *金属矿山*, (6): 1-5)
- Li X J, Chen J Q and Zhu H H. 2016. A new method for automated discontinuity trace mapping on rock mass 3D surface model. *Computers and Geosciences*, 89: 118-131 [DOI: 10.1016/j.cageo.2015.12.010]
- Mohan A and Poobal S. 2018. Crack detection using image processing: a critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2): 787-798 [DOI: 10.1016/j.aej.2017.01.020]
- Noorian-Bidgoli M and Jing L R. 2015. Stochastic analysis of strength and deformability of fractured rocks using multi-fracture system realizations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78: 108-117
- Shatnawi N. 2018. Automatic pavement cracks detection using image processing techniques and neural network. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9 (9): 399-402 [DOI: 10.14569/IJACSA.2018.090950]
- Singh A, Lu X, Armstrong R and Mostaghimi P. 2018. Automatic fracture identification using X-ray images. *ASEG Extended Abstracts*, 2018(1): 1-2 [DOI: 10.1071/ASEG2018abT6_2C]
- Steger C. 1998. An unbiased detector of curvilinear structures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(2): 113-125 [DOI: 10.1109/34.659930]
- Steger C. 2000. Subpixel-precise extraction of lines and edges. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33 (3): 141-156
- Voorn M, Exner U and Rath A. 2013. Multiscale hessian fracture filtering for the enhancement and segmentation of narrow fractures in 3D image data. *Computers and Geosciences*, 57: 44-53 [DOI: 10.1016/j.cageo.2013.03.006]
- Wang W X, Bergholm F and Yang B. 2003. Froth delineation based on image classification. *Minerals Engineering*, 16 (11): 1183-1192 [DOI: 10.1016/j.mineng.2003.07.014]
- Wang W X. 2011. Colony image acquisition system and segmentation algorithms. *Optical Engineering*, 50 (12): #123001 [DOI: 10.1117/1.3662398]
- Wang W X and Bergholm F. 2008. Fragment size estimation without image segmentation. *The Imaging Science Journal*, 56(2): 91-96 [DOI: 10.1179/174313108X268312]
- Wang W X, Li W S and Yu X. 2012. Fractional differential algorithms for rock fracture images. *The Imaging Science Journal*, 60 (2): 103-111 [DOI: 10.1179/1743131X11Y.0000000012]
- Wang W X, Zheng S F, Lian R B and Liang Y J. 2017. Rock fissure pattern characterization by combining 1-D fractal dimension and statistical analysis. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*: 1-7 [DOI: 10.1109/JAS.2017.7510391]
- Xu J M and Zhao X B. 2007. Determination of fluid inclusion lines using edge-detection technique. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(6): 1132-1137 (徐金明, 赵晓波. 2007. 边缘检测技术在确定流体包裹体迹线中的应用. *岩石力学与工程学报*, 26(6): 1132-1137) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.06.005]
- Yang J P, Chen W Z, Yang D S and Yuan J Q. 2015. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*, 64: 20-31 [DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.10.011]
- Yih C S. 1969. *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill
- Zakeri H, Nejad F M and Fahimifar A. 2017. Image based techniques for crack detection, classification and quantification in asphalt pavement: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 24(4): 935-977 [DOI: 10.1007/s11831-016-9194-z]
- Zheng J, Zhang Y S, Li X Z and Shi X X. 2015. Digital method for acquiring discontinuity 2D density based on 3D digital traces model. *Applied Mechanics and Materials*, 738-739: 526-530 [DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.738-739.526]

作者简介



陈卫卫,男,副教授,主要研究方向为图形图像处理。
E-mail:469199943@qq.com



王卫星,通信作者,男,教授,博士生导师,主要研究方向为图形图像处理、计算机视觉。

E-mail: wxwang@chd.edu.cn

李润青,女,硕士研究生,主要研究方向为图形图像处理。

E-mail: 703391885@qq.com

蔡晓琰,女,讲师,主要研究方向为交通运输规划与管理。

E-mail: caixy@chd.edu.cn

郑思凡,男,博士,主要研究方向为图形图像处理。

E-mail: 964898579@qq.com