

利用目标点最小生成树的路面裂缝检测

邹 勤^{1,2} 李清泉^{1,3,4} 毛庆洲^{1,3} 陈 龙¹

(1 武汉大学交通研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(3 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(4 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

摘 要: 分析路面裂缝的成像特点, 提出了一种基于目标点最小生成树的路面裂缝检测方法。最小生成树具有描述空间线性聚集特征的优点, 有利于实现对裂缝的全局分析和提取。实验结果表明, 对不连续裂缝的处理, 本文方法优于传统方法。

关键词: 裂缝检测; 线特征; 最小生成树; 图论

中图法分类号: P208; P237.3

3S 技术的发展推动了公路交通的智能化进程^[1], 公路路面损坏检测技术正经历从人工检测向自动化检测的转变。路面裂缝检测已发展为基于图像的检测技术, 但目前的商业化系统仍需人工交互来实现从图像中提取路面裂缝, 其工作内容枯燥, 工作量巨大, 因此, 研发全自动的路面裂缝检测方法具有重要的意义。

基于图像的路面裂缝自动检测, 其研究始于 20 世纪 90 年代初, 进入 21 世纪后受到广泛关注, 多种裂缝检测算法相继被提出, 其中具代表性的是, Zhou 等^[2] 和 Subirats 等^[3] 提出基于小波变换的裂缝检测方法, 将图像变换到不同方向的子带进行裂缝提取。Yan 等^[4] 将形态学方法用于裂缝检测, 先构造特定的中值滤波器对图像进行增强, 然后用基于灰度形态算子的边缘检测算法检测裂缝, 算法要求裂缝具有较高的对比度。Xu 等^[5] 提出了基于 BP 神经网络的裂缝检测方法。首先对图像进行方格采样, 每个方格影像进行直方图均衡和二值化, 然后提取特征, 构成特征向量用于训练和分类。Liu 等^[6] 提出了一种分割后处理的方法, 先分割得到裂缝碎片, 再按一定的规则, 如设定碎片大小、线性度、合并的距离阈值等, 对碎片进行过滤、合并等操作实现对裂缝的提取。

由于路面影像斑点噪声强、裂缝壁脱落、积灰、裂缝不连续等影响, 基于局部检测的裂缝自动检测具有局限性。针对裂缝的全局性特征, 本文研究对其描述的全局方法。图论提供了对事物及其之间关系进行描述、分析和处理的完整理论和方法。用图来描述裂缝目标像素的空间分布, 将方便对裂缝进行全局分析和操作。本文通过分析裂缝的成像特点, 运用图论最小生成树来表达裂缝目标点的空间线性聚集特征, 并提出了基于目标点最小生成树的路面裂缝检测算法。

1 路面裂缝的成像特点

为了说明路面裂缝的成像特点, 设计了裂缝成像模型, 如图 1 所示, 其中相机在裂缝的正上方垂直拍摄, 与工程实践中相机的工作情况一致。图 2 表达了 4 种典型情况下的裂缝成像结果。其中, 图 2(a) 为光线以一定角度照射, 裂缝形成完整的阴影, 裂缝在影像中的亮度非常弱(黑色); 图 2(b) 显示了当光线垂直照射时的情况, 裂缝没有形成阴影, 因此裂缝与背景亮度相同; 当裂缝中含有小裂隙时, 会造成裂缝深度与宽度的比值较大, 如图 2(c), 裂隙中部分反射光线被缝壁阻挡,

收稿日期: 2011-10-20。

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(40830530); 国家创新团队基金资助项目(40721001); 国家教育部博士点基金资助项目(20070486001); 中央高校基本科研业务费专项资助项目(20102130101000130, 6082031)。

强度减弱,裂缝成像表现为亮度较背景暗(接近黑色);图2(d)显示了当裂缝壁脱落、裂缝积灰时裂缝的成像情况,裂缝呈弧形凹槽状,由于凹面反射效应,裂缝成像表现为中间亮边缘暗。

裂缝是不规则的线目标,由较短的裂缝段组成,图3(a)为其示意图。对于具有一定深度的裂缝段,从某些方向拍摄时会形成阴影,表现为目标

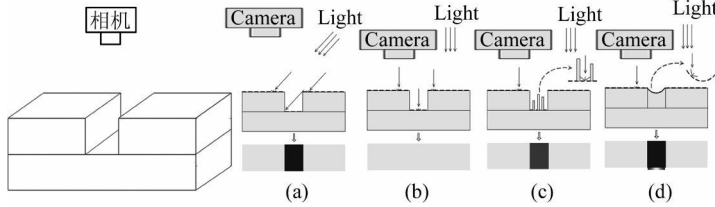


图1 裂缝成像模型

Fig. 1 Crack Imaging Model

较背景暗,称为显缝段;从另一些方向拍摄时不能形成阴影,表现为目标与背景之间对比度低,称为隐缝段。一条路面裂缝通常包括图2中(b)~2(d)3种类型的裂缝段。由于裂缝段分布的不规则性(裂缝通常是曲折的),从单一角度进行拍摄时,所得显缝段和隐缝段通常是交替的,如图3(b)所示,显缝段在整体上构成较背景暗的线性目标。

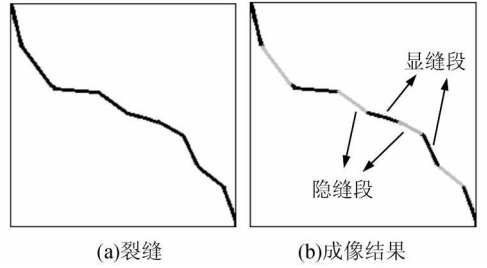


图3 裂缝成像示意图

Fig. 3 Schematic Diagram for Pavement Crack

图2 不同情况下的裂缝成像结果

Fig. 2 Pavement Crack Imaging in Varies Conditions

2 基于目标点最小生成树的裂缝检测

由于路面材料的颗粒特性,路面影像还具有颗粒纹理背景,在目标识别时表现为斑点噪声。路面裂缝作为一种线性目标,在路面图像中表现为:①斑点噪声强,裂缝目标信噪比低;②裂缝与背景之间亮度对比度低;③裂缝目标像素的空间连续性差。当裂缝不连续、缝壁脱落积灰或拍摄时光线强度和方向不能使裂缝形成阴影时,裂缝只在宏观上呈现为线目标,此时,线特征检测的局部方法只能得到裂缝分割的零碎片段,难以获得期望的结果。根据分析裂缝的成像特点及其在路面影像中的特征,本文设计了基于目标点最小生成树的裂缝检测方法。首先用扫描法提取裂缝目标点,然后用图来表达目标点的空间关系,通过对图的分析操作,在全局上实现对裂缝的提取,其流程如图4。



图4 路面裂缝检测流程图

Fig. 4 Flow Chart for Pavement Crack Detection

2.1 扫描法提取裂缝目标点

裂缝在成像时表现为显缝段和隐缝段交替排列,显缝段在整体上构成较背景暗的线性目标。考虑到显缝段是由较背景暗的目标像素组成,本文设计了裂缝目标点提取的扫描法:

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } (i) = \arg \min_x \{I_{x,j} \mid j - L < x < j + L\} \\ & \text{or } (j) = \arg \min_y \{I_{i,y} \mid i - L < y < i + L\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

对图像进行行扫描和列扫描,对每一像素 (i, j) ,在扫描方向上对其亮度值与邻域像素进行比较,用式(1)判断当前像素是否为裂缝目标点。其中 I_{ij} 为像素 (i, j) 的亮度值, L 控制邻域的大小。对于分辨率一定的路面影像, L 取经验值。通过式(1)的扫描,在整体上可以得到较离散的潜在裂缝目标点,并且在裂缝处的目标点呈现线性聚集特征。

2.2 目标点最小生成树

1) 裂缝目标点的图表达

运用扫描法得到潜在的裂缝目标点后,对所有目标点进行编号,构成顶点集合 V ;边的集合 E 由式(3)定义,构成图 G :

$$G = (V, E) \quad (2)$$

$$E = \{ \langle v_i, v_j \rangle \mid v_i, v_j \in V, \text{ and } w_{ij} < T \} \quad (3)$$

$$w_{ij} = \text{Dis}_{\text{Euclid}}(v_i, v_j) \quad (4)$$

式(3)中, w_{ij} 是边 e_{ij} 的权值,为顶点 i 和 j 之间的欧氏距离,即式(4); T 为边长阈值,通常取 $T =$

$L/5$ 。由于边长阈值的作用, 目标点可能形成多个连通图 G_1, G_2, \dots , 且每个图相对独立。

2) 最小生成树

裂缝目标点的图表达方便了对其进行空间分析。生成树具有描述线状特征、分支等的优点; 最小生成树是生成树中权值总和最小的一棵, 因此, 它不仅能描述线状特征, 还能描述聚集特征。由于裂缝像素分布的线性聚集特性, 用最小生成树来描述是合理的。图 5 给出了最小生成树的示例。图 5(a)、~ 5(c) 分别显示了从目标点集到图, 再到最小生成树的结果。构造最小生成树的典型方法有两种, Prim 算法和 Kruskal 算法^[7]。

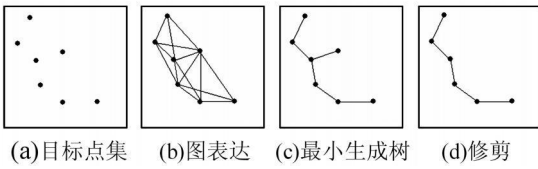


图 5 目标点集构图及其最小生成树示例
Fig. 5 Example of Target Points Graph and MST

2.3 裂缝提取

由目标点图得到最小生成树的集合后, 通过修剪和连接两个操作来实现对裂缝的提取。

1) 修剪

为了说明修剪的原理, 首先定义单树和最大生成单树。

定义 1 设树 $T = (V, E)$, 对任意顶点 v_i , 若 $\text{degree}(v_i) < 3$, 则称 T 为单树。

定义 2 设树 $T = (V, E)$, 其生成单树中, 权值总和最大的一棵单树称为最大生成单树。

本文对最小生成树的修剪是通过求最大生成单树来实现的。其算法流程如下。图 5 中最小生成树图 5(c) 运用 MSST 算法修剪后的结果为图 5(d)。

```

1: procedure MSST
2:   input:  $T$ : 树
3:   output:  $T'$ :  $T$  的最大生成单树
4:   for  $i \leftarrow 0, n$  do
5:     if  $\text{degree}(v_i) = 1$  then
6:        $C_i \leftarrow$  以  $v_i$  为根结点, 计算
7:          $v_i$  到各叶结点的路径
8:       代价, 取最大值
7:        $\text{Path}_i \leftarrow$  记录  $C_i$  对应的路径
8:     end if
9:   end for
10:   $\text{Path} \leftarrow$  查找最大  $C_i$  对应的  $\text{Path}_i$ 
11:   $T' \leftarrow$  跟踪  $\text{Path}$  得到最大生成单树

```

```

12:   $\text{MSST}(T - T') \leftarrow$  处理剪去的部分
13:  end procedure

```

2) 连接

修剪后得到 n 棵最大生成单树, 将一些离散点去掉, 然后进行连接操作, 它由内连接和外连接两个步骤组成。内连接是树内结点与结点之间的连接, 外连接是树与树之间的连接。它们的连接规则分别由式(5)和式(6)定义:

$$\text{Link}(v_i, v_j) = \begin{cases} 1, & e_{ij} \in E_T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Link}(T_a, T_b) = \begin{cases} 1, & \text{Dis}(T_a, T_b) < D_{\text{tol}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Dis}(T_a, T_b) = \min\{\text{Dis}(v_i, v_j) \mid v_i \in V_{T_a}, v_j \in V_{T_b}\} \quad (7)$$

式中, $\text{Dis}(T_a, T_b)$ 为树 T_a 和 T_b 之间的距离, 它由式(7)定义; D_{tol} 为外连接的距离阈值, 可根据式(1)中 L 值进行微调。图 6(a) 中显示了两棵树, 经过内连接操作的结果为图 6(b), 然后进行外连接得到结果图 6(c)。

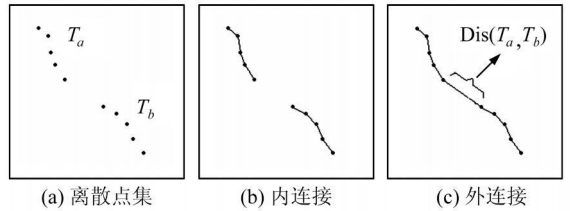


图 6 连接操作

Fig. 6 Linking Operation

3 实验与分析

本文实验数据由车载线扫描相机采集, 地面采样距离 $\text{GSD} = 1 \text{ mm}$ 。实验影像均从原始影像上剪裁得到, 尺寸 $512 \text{ 像素} \times 512 \text{ 像素}$, 且都经过了预处理, 如几何校正、匀光、直方图均衡等。本文算法程序基于 $\text{VC}^{++} 6.0$ 开发, 运行环境为 Windows 7, CPU Inter Pentium(R) 2.5 GHz, RAM 1 G。

实验目的是测试本文方法在检测不连续裂缝时的性能, 并和传统方法(基于边缘检测的方法和基于分割后处理的方法)进行比较。

图 7(a) 显示了一幅典型的路面影像, 斑点噪声强, 裂缝不连续, 且裂缝壁脱落、积灰。此时, 用边缘检测的算法对裂缝进行检测不具备可行性。图 7(b) 为 Canny 算法检测的结果, 由于边缘检测通常基于梯度信息, 裂缝壁脱落、积灰处的梯度值通常低于边缘阈值。另外, 由于斑点噪声的影响,

裂缝边缘信息被湮没。因此,直接运用边缘检测结果无法有效提取裂缝。图 7(c) 是扫描算法提取的裂缝目标点,同时包含一些非目标点;对目标点最小生成树进行修剪,其结果见图 7(d);图 7(e) 和图 7(f) 分别为内连接和外连接的结果;图 7(g) 为采用 NDHM^[8, 9] 分割的结果,图 7(h) 是对图 7(g) 进行后处理的结果,图 7(i) 为真实裂缝,通过实地测量和人工编辑得到。通过对比可发现,本文方法结果图 7(f) 与真实裂缝图 7(i) 基本一致,而分割后处理结果图 7(h) 由于是对裂缝碎片的过滤与合并,难以有效剔除噪声面元,且只能得到裂缝碎片,不连续。

为了对裂缝提取效果进行量化分析和评价,本文引入完成度指数 $Index_{cpt}$ 和正确度指数 $Index_{ert}$ ^[10]。完成度指数用于描述完成裂缝提取这一任务的完成程度,正确度指数则描述完成任务的质量水平,其定义见式(8)和式(9)。另外,为了对算法的时间效率进行分析,实验记录了算法的运行时间。

$$Index_{cpt} = \frac{L_r}{L_{gt}} \quad (8)$$

$$Index_{ert} = \frac{L_r}{L_N} \quad (9)$$

式中, L_r 代表提取结果是真实裂缝的长度; L_{gt} 代表裂缝的实际长度,通过实地测量和手工编辑得到; L_N 代表提取结果的总长度。

对 5 幅典型路面影像进行裂缝提取,如图 8,其统计结果见表 1。在算法的可靠性上,由表 1 可知,对 5 幅影像进行裂缝提取都有 $Index_{cpt} > 0.7$, $Index_{ert} > 0.6$,说明本文算法具有较强的抗斑点噪声能力,提取结果具有较高的准确性。而分割后处理方法的平均完成度和正确度约为 0.5 和 0.4,效果较差。在算法的效率上,从表 2 可知本文算法运行时间在 0.3 s 以内,算法具有较高的效率。

实验结果及对比表明,对不连续、缝壁脱落、积灰的裂缝的处理,传统方法存在很大局限性,而本文方法具有较强的抗斑点噪声能力,对提取裂缝具有较高的效率和可靠性。本算法主要针对对简单裂缝(横裂、纵裂和块裂)的处理,它在提取相互邻近、交叉的复杂裂缝(如龟裂)时存在不足,这将在下一步研究中进行改进。

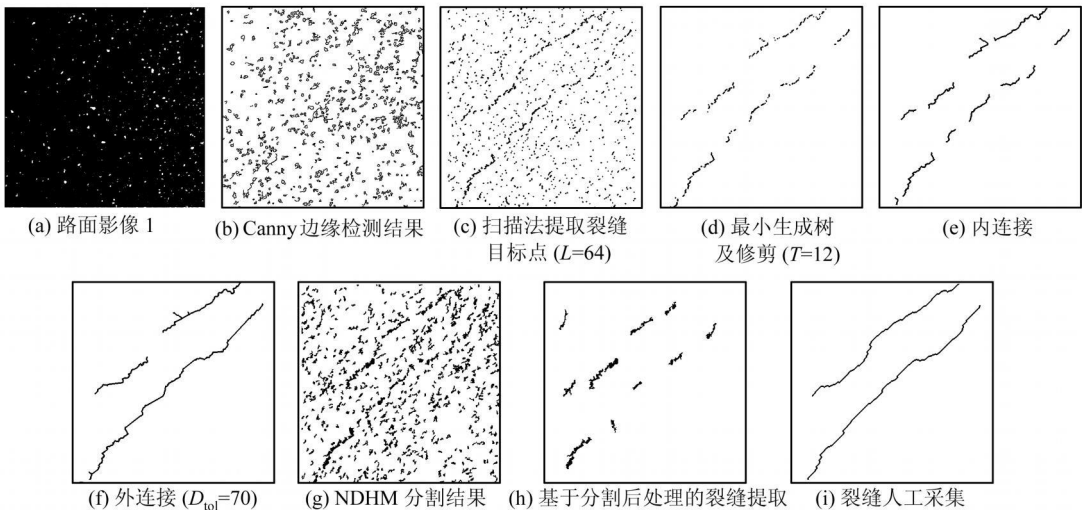


图 7 裂缝提取实验

Fig. 7 Crack Extraction

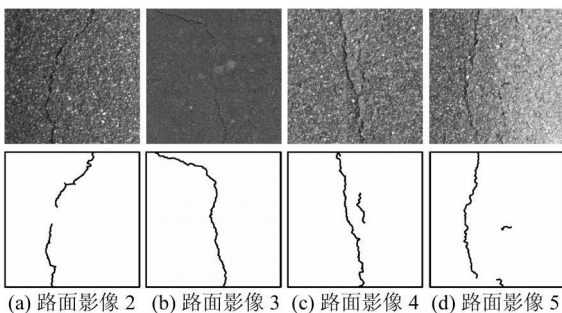


图 8 更多实验及结果

表 1 裂缝提取结果评价

Tab. 1 Evaluation of Crack Extraction Results

影像编号	基于分割后处理方法		本文方法	
	完成度	正确度	完成度	正确度
1	0.576	0.305	0.704	0.649
2	0.445	0.499	0.754	0.732
3	0.479	0.628	0.936	0.891
4	0.747	0.403	0.831	0.825
5	0.483	0.513	0.753	0.772

Fig. 8 More Experiments and Their Results

表 2 本文算法效率评价

Tab. 2 Algorithm Efficiency Evaluation

影像编号	1	2	3	4	5
运行时间/s	0.238	0.226	0.266	0.232	0.255

参 考 文 献

- [1] 李德仁, 李清泉, 杨必胜, 等. 3S 技术与智能交通 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(4): 331-336
- [2] Zhou J, Huang P S, Chiang F P. Wavelet based Pavement Distress Detection and Evaluation [J]. Optical Engineering, 2006, 45(2): 1-10
- [3] Subirats P, Dumoulin J, Legeay V, et al. Automation of Pavement Surface Crack Detection Using the Continuous Wavelet Transform [C]. 2006 International Conference on Image Processing, Florence, Italy, 2006
- [4] Yan M D, Bo S B, Xu K, et al. Pavement Crack Detection and Analysis for High grade Highway [C]. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Vancouver, Canada, 2007
- [5] Xu G A, Ma J L, Liu F F, et al. Automatic Recog-

- inition of Pavement Surface Crack Based on BP Neural Networks [C]. 2008 International Conference on Computer and Electrical Engineering, Atlanta, 2008
- [6] Liu F F, Xu G A, Yang Y X, et al. Novel Approach to Pavement Cracking Automatic Detection Based on Segment Extending [C]. 2008 International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling, Kunming, 2008
- [7] Weiss M A. Data Structure and Algorithm Analysis in C++ (3/E) [M]. USA: Addison Wesley, 2007
- [8] Li Q Q, Liu X L. Novel Approach to Pavement Image Segmentation Based on Neighboring Difference Histogram Method [C]. 2008 Congress on Image and Signal Processing, Sanya, China, 2008
- [9] 刘向龙, 李清泉. 基于金字塔结构的海量路面影像破损统计模型 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(4): 430-432
- [10] Wiedemann C, Ebner H. Automatic completion and evaluation of road networks [J]. Int Arch Photogramm Remote Sens, 2000, 33: 976-986

第一作者简介: 邹勤, 博士生, 研究领域为图像线状目标检测、计算机视觉、机器学习等。

E-mail: qzou@live.com

Target points MST for Pavement Crack Detection

ZOU Qin^{1,2} LI Qingquan^{1,3,4} MAO Qingzhou^{1,3} CHEN Long¹

(1) Transportation Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2) School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3) State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(4) Presidential Secretariat, Luojia Hill, Wuhan 430072, China)

Abstract: From analysis of the imaging characteristics of pavement cracks, a crack detection method based on target-points minimum spanning tree (TMST) is proposed. The minimum spanning tree has the advantage of description of spatial clustering linear feature, which facilitates the global analysis of cracks. The results from empirical experiments indicate that, to detect discrete cracks, the proposed method outperforms the traditional methods.

Key words: crack detection; linear feature; minimum spanning tree; graph

About the first author: ZOU Qin, Ph. D candidate. His research interests include linear / curvilinear structure detection, computer vision, machine learning, etc.

E-mail: qzou@live.com