

## 基于几何特征分析的路面裂缝分类算法研究

张采芳<sup>1</sup>, 田岩<sup>2</sup>, 李江<sup>2</sup>

(1. 文华学院, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 道路裂缝是评价公路质量的一个非常重要的指标, 不同的裂缝类型关系到不同的危急程度及不同的修补策略的制定。针对高速公路中常见的横向裂缝、纵向裂缝、块状裂缝及龟裂裂缝, 提出了一种基于方向及密度特征的路面裂缝分类方法。文中所提方法的主要思想是利用裂缝在方向以及密度分布上的差异性来对裂缝类型进行划分。基本的过程是首先利用方向性特征进行横纵裂缝与块状/龟裂裂缝的提取, 其次, 根据分布密度特性进一步甄别块状和龟裂裂缝。为了验证文中所提算法的有效性, 采用大量实测数据进行测试, 通过与其它算法进行对比, 结果表明: 文中所提方法具有更高的裂缝分类精度。

**关键词:** 裂缝分类; 几何特征; 路面图像

中图分类号: TP751.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)04-1359-06

## Pavement cracks classification algorithm based on geometry feature analysis

Zhang Caifang<sup>1</sup>, Tian Yan<sup>2</sup>, Li Jiang<sup>2</sup>

(1. Wenhua College, Wuhan 430074, China;

2. Department of Electronics and Information Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The cracks of the road is a very important index to assess the quality of a road, since the different classes of the cracks are closely related to evaluate the dangerous degree of the road and the design of the repair strategy. Focusing on the common cracks including horizontal, vertical, block shape and chap cracks, a cracks classification method based on orientation and density characters was described. The main idea of the proposed method was to adopt the differences of the orientation and density distribution of the cracks to distinguish the different cracks. The orientation feature was first utilized to classify the direction cracks and non-direction cracks, and then by using the density feature to distinguish the block and the chap cracks. In order to check the effectiveness of the proposed method in this paper, using a large number of practical test data, by comparing with other algorithms, the results show that this proposed method has higher classification accuracy.

**Key words:** cracks classification; geometry feature; pavement image

收稿日期: 2014-08-05; 修订日期: 2014-09-15

基金项目: 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T201431); 地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室开放研究基金(201110)

作者简介: 张采芳(1975-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事图像处理, 模式识别方面的教学和科研工作。Email: wind\_cf@163.com

## 0 引言

随着国内高速公路建设的飞速发展及公路网建设的日趋完善,道路养护与管理工作的变得越来越重要。道路裂缝的自动检测和分类是道路养护与管理中的一个非常重要的环节。由于不同的裂缝类型其修补的方法会有很大的差异,对于整个道路养护策略的制定也会产生很大的影响,因此如何高效、便捷、快速的对裂缝类型进行分类是目前道路养护所面临的一大难题。

近年来,国内外学者提出了多种道路裂缝的分类方法。所有的道路类型分类方法大致可以分为两类:学习型的分类方法和非学习型分类方法。

针对学习型分类方法,T.Saar<sup>[1]</sup>等提出了一种二级分段的线性神经网络道路裂缝分类器。文中声称该方法的分类效果要优于贝叶斯分类器以及最近邻(KNN)分类器。李刚<sup>[2]</sup>等设计径向基函数神经网络分类器来实现对裂缝的分类。Gavilán M<sup>[3]</sup>等提出了基于支持向量机的路面破损分类方法,该类方法的实施效果除了依赖于算法的分类器外,还直接受样本的数量、正负样本的比例以及样本的广泛性和代表性的影响。针对道路裂缝而言,上述问题的解决策略实际操作中并不容易。

针对非学习型分类方法,Lihao Hong<sup>[4]</sup>等通过分析裂缝的几何形态特征来协助裂缝分类。Henrique Oliveir<sup>[5]</sup>考虑裂缝的连接特性以及方向的一致性,利用多尺度的小波变换以及 Hough 变换来达到对裂缝进行分类的目的。赵轲<sup>[6]</sup>、胡世昆<sup>[7]</sup>使用阈值判断方法来辨别网状裂缝和线形裂缝,然后根据投影法将横向裂缝与纵向裂缝分类。虽然上述罗列的方法均能在一定程度上达到道路裂缝分类的目的,但由于裂缝的复杂性,每种方法其普适性并不尽如人意。

由于每种裂缝都有自身所特有的结构形式,横向裂缝与纵向裂缝具有很明显的横向与纵向的方向特性,块状裂缝与龟裂裂缝的方向特性并不突出,但是它们在分布密度上比横纵裂缝具有更强的辨识性。方向特征作为图像的一种重要特征,谭东杰<sup>[8]</sup>等将图像的边缘方向特征与互信息结合应用于图像的配准中,文中将裂缝的方向特征以及密度分布特征结合,应用于路面裂缝图像的分类中。

## 1 路面裂缝分类算法

横向裂缝一般与道路中线近于垂直,有时伴有少量支缝。纵向裂缝是与道路中线大致平行的裂缝,有时伴有少量支缝。块状裂缝主要是因为道路表面材料遇冷之后收缩以及沥青老化所致。龟裂是由一堆彼此相交的多边形网格组成。横纵道路裂缝、块状裂缝和龟裂裂缝的示意图如图 1 所示。

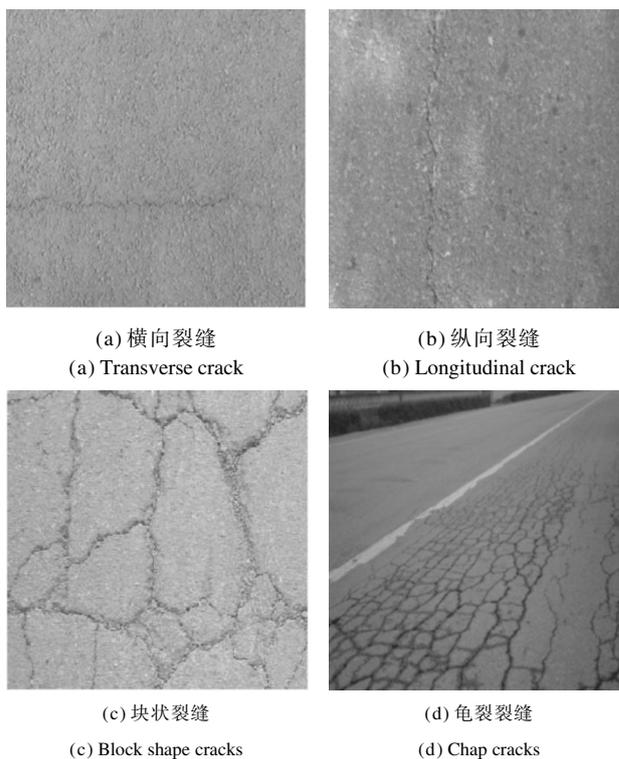


图 1 不同类型的裂缝示例

Fig.1 Examples of different types of cracks

### 1.1 基于二级分类的裂缝类型辨识

从图 1 可以看出,横向裂缝和纵向裂缝具有不同的方向特征(称之为方向性裂缝),而块状裂缝和龟裂裂缝(称之为非方向性裂缝)具有不同的分布密度。文中根据该特征,设计了一个二级分类器来实现一个四分类问题。其算法流程如下:首先对路面图像通过裂缝检测算法得到的裂缝标记图进行预处理,然后求取裂缝的方向特征,根据方向特征可以将横纵裂缝(方向性裂缝)与块状/龟裂(非方向性裂缝)纵向裂缝区分开来。该步骤的合理性在于,横纵裂缝具有显著的方向性信息,而块状裂缝和龟裂裂缝并不具有明显的方向性特征。将裂缝分为方向性和非方

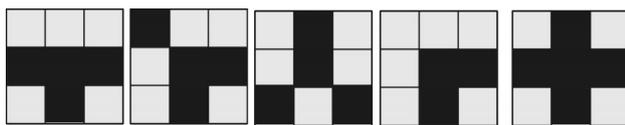
向性裂缝后,由于块状裂缝与龟裂裂缝不具备方向特性,需要进行分类处理。注意到块状裂缝的分布密度特征强度远小于龟裂裂缝,则可以利用它们在该特征上强度的差异性将二者加以区分。

### 1.2 方向性裂缝和非方向性裂缝的识别

文中设计的算法关注的是裂缝的方向特征和分布密度特征,因此裂缝具体的轮廓信息并不重要。在分类之前对裂缝标记图像先进行网格缩小以及骨架的提取操作,目的有二:一是减少计算量,二是有助于增强裂缝的连续性。

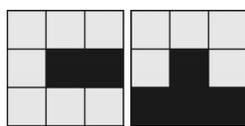
网格缩小是将原始图像按网格大小 ( $M*N$ ) 进行网格化。当原始图像中网格裂缝点像素占网格总像素的比率超过 50% 时,则缩小后该处像素值为 1; 反之,则标记为 0。网格缩小之后,再对图像进行骨架提取以及骨架细化处理,保证提取出来的骨架都是单像素点。

对于骨架提取,这里采用了文中<sup>[9]</sup>介绍的方法,即通过一系列的形态学开闭运算,实现骨架的提取。为了方便分析裂缝骨架结构特点,这里引入裂缝结构点的概念。裂缝的结构点主要分为两类,其一是裂缝的连接点,既两条裂缝之间的交叉点或者单条裂缝的拐点;另外一类是裂缝终点。裂缝结构点模版如图 2 所示。



(a) 连接点结构

(a) Connection point structure



(b) 终点结构

(b) End point structure

图 2 结构点模版

Fig.2 Structure point template

利用结构点中的连接点的个数来对裂缝类型进行判别,并对有相交情况的纵横裂缝进行分割处理。具体步骤如下:

(1) 对裂缝骨架标记图求取它的结构点信息,其

中连接点的数目为  $N$ 。

(2) 当连接点数目  $N$  大于设定的阈值  $K$  时,则认为该裂缝区域属于非方向性裂缝。小于阈值  $K$  时,则认为该裂缝区域属于方向性裂缝,即纵横裂缝。

(3) 在纵横裂缝区域中,去掉其中连接点处的连接结构,将原始裂缝分割成一段段孤立的裂缝并进行后续的纵横裂缝判别。同时为了后续裂缝的合并操作,需要将去掉的连接点结构存储起来。

### 1.3 纵横裂缝的识别

由于横向裂缝和纵向裂缝具有明显的方向差异性,因此,可以通过二者方向性的差异进行进一步的区分,具体方法描述如下。

对网格化裂缝骨架图进行水平与垂直的扫描,建立水平与垂直方向的直方图。具体过程用公式(1)和公式(2)描述:

$$H[i]=\sum_{j=1}^M crack\_tiles[i,j], i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

$$V[j]=\sum_{i=1}^N crack\_tiles[i,j], i=1,2,\dots,M \quad (2)$$

上式中的  $V$  与  $H$  分别图像的水平和垂直直方图,  $M$  与  $N$  表示图像的行数与列数。

如果待分类裂缝是横向裂缝,则其水平直方图就会出现一个波峰。反之,如果待分类裂缝是纵向裂缝,则其垂直直方图也会存在一个波峰。如果待分类裂缝是块状或者龟裂裂缝,则波峰将同时存在于它的水平与垂直直方图中。为了更好的利用这种现象来进行分类,将分别计算图像的水平及垂直直方图的方差,如公式(3)和公式(4)所示。

$$\sigma_v=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(V[i]-\mu)^2} \quad (3)$$

$$\sigma_H=\sqrt{\frac{1}{M}\sum_{j=1}^M(H[j]-\mu)^2} \quad (4)$$

由上面的式子可以得到图像水平直方图以及垂直直方图的方差,建立如图 3 所示的 2-D 特征空间,根据  $(\sigma_H, \sigma_v)$  所处 2-D 空间的位置来确定裂缝类型。当特征组合  $(\sigma_H, \sigma_v)$  最终落在区域一时,则该裂缝被归类为纵向裂缝;如果特征组合  $(\sigma_H, \sigma_v)$  最终落在区域二,则该裂缝被归类为横向裂缝;如果特征组合  $(\sigma_H, \sigma_v)$  最终落在区域三,则该裂缝被归类为非方向性裂缝(块状裂缝或者龟裂裂缝)。

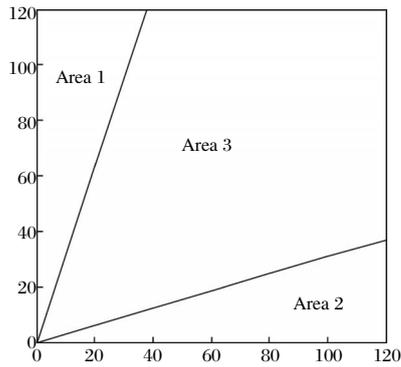


图 3 2-D 特征空间  
Fig.3 2-D feature space

此前为了简化纵横裂缝分类,将简单相交的纵横裂缝在其连接点处进行了分割处理,这样导致了分类之后的裂缝不连续,因此还需要对分类之后的裂缝区域进行合并处理,具体做法如下:

(1) 将裂缝连通区域按照连接点进行划分,属于同一个连接点的裂缝划分为同一集合中。

(2) 以集合为单位,在集合内部进行裂缝合并操作,将属于同一裂缝类型的裂缝进行合并(用去掉的连接点结构进行合并)。

(3) 小集合内的裂缝完成合并之后,将合并形成的裂缝再次进行裂缝合并,合并方法是在每个含连接点处的裂缝处加上原始结构点结构,分别比较相同裂缝类型区域是否相交,如果相交,则将他们合并为同一类型裂缝,如果不小交,则认为其为单一存在。

#### 1.4 裂缝分布密度特征提取及分类

经过上节中描述的方法,可将横向裂缝与纵向裂缝区分开来,但是对块状裂缝与龟裂裂缝效果并不明显,为此,提出一种基于 Delaunay 三角剖分的分布特征提取方法。该方法主要是利用 Delaunay 三角剖分方法,对已经提取到的裂缝结构散点进行三角剖分,然后根据剖分的结果计算相应的特征参量,最终利用特征参量组成的分类特征完成分类。

##### 1.4.1 Delaunay 三角剖分

Delaunay 三角剖分算法是一种专门应对点集的三角剖分方法。Delaunay 三角网具有两个性质,最大化最小角以及空外接圆性质。

文中采用一种应用比较广泛的 Delaunay 三角网构建方法——凸壳插值算法,该算法原理是在二维

欧拉空间中构造 Delaunay 三角网的通用算法。主要分为以下 4 个步骤:

##### (1) 生成初始凸壳

假设待构建 Delaunay 三角网的散点个数为  $n$ ,坐标对应为  $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$ 。对于每个散点,求取  $|\min(x_i - y_i)|$ 、 $|\min(x_i + y_i)|$ 、 $|\max(x_i + y_i)|$ 、 $|\max(x_i - y_i)|$  四个点并进行存储,由这四个点构成一个初始的四边形,称为初始凸壳。

##### (2) 优化凸壳

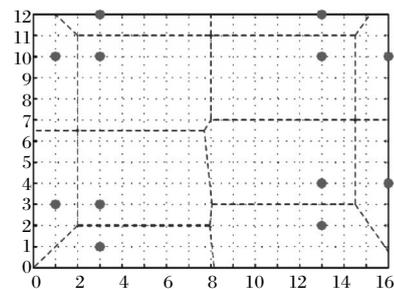
顺时针遍历初始凸壳上面的每条边,寻找每条边左侧所有没有加入凸壳的散点,从中找到距离最远的点,并将该点插入到这条边的两个端点之间。重复上面的步骤,直到凸壳上每条边的左侧没有离散点为止,结束遍历。此时形成的凸壳包括了所有的散点。

##### (3) 形成初始三角网

在上一步骤形成的凸壳中,建立由相邻两条边组成的三角形,如果在该三角形的内部及边界上都不包含凸壳上面的其它点,则将该三角形并入到 Delaunay 三角网中,并删除这两条相邻边的公共点。重复上面的步骤,直到凸壳上只含有三个散点的时候结束。这个散点组成的三角形也并入到 Delaunay 三角网中。

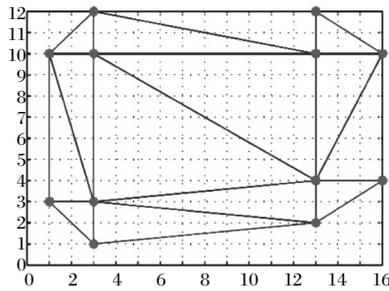
##### (4) Delaunay 三角网的形成

遍历所有不在凸壳上面的散点,寻找出该散点处于的那个凸壳三角形的外接圆的坐标位置,将该散点出入该三角形区域,形成多边形区域。然后删除掉区域内三角形的公共边,将该点与该区域其它多边形顶点进行连线,将形成的多边形并入到 Delaunay 三角网中。完成这一系列过程, Delaunay 三角网就构建完成。结果示意图如图 4 所示。



(a) 散点图

(a) Scatter diagram



(b) Delaunay 三角网

(b) Delaunay triangular mesh

图 4 Delaunay 三角剖分结果

Fig.4 Delaunay triangulation result

### 1.4.2 利用 Delaunay 三角网进行分类

利用 Delaunay 三角剖分方法对提取到的裂缝结构散点进行三角剖分,块状裂缝由于分布较松散,形成的多边形孔洞较大,所以它的结构点剖分的三角网中三角形的个数较少,且三角形所占的面积较大。而龟裂裂缝则相反,利用这一特性,可以将它们区分开来。

假设剖分的 Delaunay 三角网为  $W, (x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k)$  分别为三角网中的三角形三个顶点的二维坐标,  $i, j, k=1, 2, \dots, n$  剖分的三角形的总个数为  $n$ , 已知这些参量,按照以下各式求取裂缝的空间分布特征。

$$a = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5)$$

$$b = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} \quad (6)$$

$$c = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} \quad (7)$$

$$p = (a + b + c) / 2 \quad (8)$$

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (9)$$

式中:  $a, b, c$  分别为三角形的三条边长;  $S$  为求的面积。

$$S_{\min} = \min(S_i), i=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$S_{\max} = \max(S_i), i=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^n S_i / n, i=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

上式中  $S_{\min}, S_{\max}$  分别为剖分三角形的最小最大面积;  $\bar{S}$  为剖分三角形的平均面积;  $n$  为三角形的个数。

由上面的相关计算,可以得到关于裂缝分布特性的相关特征参量,在这些特征参量中,一般选取剖分三角形平均面积  $\bar{S}$  与剖分三角形个数  $n$  以及最大

三角形面积  $S_{\max}$  来作为分类特征进行分类。利用这些特征参量设定适当的阈值就可以将块状裂缝与龟裂裂缝区分开来。

## 2 实验过程及结果

为了验证文中所提裂缝分类算法的有效性,从裂缝检测结果中挑选出各种类型裂缝检测图,组成测试样本图像库,对裂缝分类算法进行有效性测试。由于参考文献[6]及[7]和文中方法属于同类算法(均为非学习型),因此文中选择这两类方法作为比较。具体过程如下:

实验测试数据:在横纵裂缝检测结果图中挑选出横向裂缝、纵向裂缝各 200 幅,块状裂缝与龟裂裂缝各 50 幅组成测试图像库,所有图像均为 2 048×2 048 大小的二值图像。

测试方法:将测试样本库中图像送入分类算法进行分类,记录每个裂缝分类结果,并统计每一类裂缝类型的分类精度以及误分率。

参数配置:文中方法的参数设置为:连接点阈值  $K$  选择为 5,剖分三角形平均面积及三角形总个数阈值分别为 50 与 20。参考文献[6]和[7]的参数设置同文献。三种分类算法测试统计结果如表 1 所示。

表 1 分类结果

Tab.1 Classification result

Crack type	Direction crack		Non-direction crack		
	Horizontal	Vertical	Block shape	Chap	
Proposed method	Number of correct classification	182	185	43	44
	Classification accuracy	91%	92.5%	86%	88%
Method of literature <sup>[6]</sup>	Number of correct classification	30		82	
	Classification accuracy	80%		82%	
Method of literature <sup>[7]</sup>	Number of correct classification	331		79	
	Classification accuracy	82.8%		79%	

从表 1 中可以发现,文中算法可以实现四种裂缝类型(横、纵裂缝,块状和龟裂裂缝)的辨识,而参考文献[6]和[7]仅能实现两种裂缝类型(方向型和非

方向型)的分类,因此文中方法具有更精细的识别能力。从分类效果上看,文中方法的横向裂缝与纵向裂缝的分类精度都高于 90%,分别达到了 91%与 92.5%,块状裂缝与龟裂裂缝的分类精度为 86%和 88%。对于测试库中的所有图像而言,整体分类精度达到了 91.8%。而参考文献[6]对两类裂缝的分类精度分别为 80%和 82%;参考文献[7]的对应分类精度则为 82.8%和 79%。这两种方法的分类精度均明显小于文中所提方法,因此文中方法具有良好的应用潜力。

### 3 结 论

文中基于道路裂缝方向性和分布密度的分析研究了一种二级道路裂缝分类方法。其主要思想是通过方向特性将纵横裂缝与块状/龟裂裂缝进行识别;对于块状和龟裂裂缝利用其分布密度进行进一步分类。通过对大量实测的数据的测试,文中方法的分类精度高于 90%。试验也发现了由于裂缝检测不够准确影响了其分类精度的问题,因此下一步的工作是进一步改进算法,使之分类精度进一步提高。

#### 参考文献:

- [1] Saar T, Talvik O. Automatic asphalt pavement crack detection and classification using neural networks [C]//12th Biennial Baltic Electronics Conference(BEC), 2010, 345-348.
- [2] Li Gang, He Yuyao. A novel image detection and classification for pavement crack under non-uniform illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(8): 1405-1408. (in Chinese)  
李刚, 贺昱曜. 不均匀光照的路面裂缝检测和分类新方法[J]. 光子学报, 2010, 39(8): 1405-1408.
- [3] Gavilán M, Balcones D, Marcos O, et al. Adaptive road crack detection system by pavement classification [J]. *Sensors*, 2011, 11(10), 9628-9657.
- [4] Lihao Hong. Pavement information system: detection, classification and evaluation [D]. USA: The University of Toledo, 2009.
- [5] Oliveira H, Correia P L. Automatic road crack detection and characterization [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(1): 155-168.
- [6] Zhao Ke. Research on pavement crack image automatic identification system [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)  
赵轲. 路面裂缝图像自动识别系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [7] Hu Shikun. Research on pavement crack detection algorithm based on digital image processing [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012. (in Chinese)  
胡世昆. 基于数字图像处理技术的路面裂缝检测算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [8] Tan Dongjie, Zhang An. Multi-model image registration based on weighted orientation correlation and mutual information [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 836-841. (in Chinese)  
谭东杰, 张安. 方向相关与互信息加权组合多模图像配准方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 836-841.
- [9] R C Gonzalez, R E Woods. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.