

# 路面裂缝自动识别与测量

曹建农<sup>1</sup>, 许素素<sup>1</sup>, 李长青<sup>2</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 焦作大学 数学系, 河南 焦作 454003)

**摘 要:**为了提高道路裂缝损伤检测效率, 保证检测工作的安全性, 加强检测数据的标准化建设, 研究了路面裂缝自动识别与测量方法。通过分析既有方法的缺陷, 提出采用均值漂移技术的图像平滑与分割方法, 初步分割候选裂缝, 采用定向跟踪方法提取裂缝骨架; 基于裂缝骨架内插得到完整裂缝, 完成裂缝自动提取与编码; 最后将裂缝骨架分段, 精确计算裂缝形态参数, 实现裂缝形态完整测量。研究表明: 该方法对路面粗糙度和裂缝方向不敏感, 可以识别较细小裂缝, 裂缝识别的定位精度达到 0.5 个像素以下, 裂缝长度的相对误差小于 2%, 具有较高精度和可靠性。

**关键词:**道路工程; 路面裂缝自动识别; 图像测量; 均值漂移; 图像分割

中图分类号: U412.3

文献标志码: A

## Automatic road crack identification and its measurement

CAO Jian-nong<sup>1</sup>, XU Su-su<sup>1</sup>, LI Chang-qing<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Department of Mathematics, Jiaozuo University, Jiaozuo 454003, Henan, China)

**Abstract:** The methods of automatic road crack identification and its measurement were studied for improving the efficiency of road crack detection, ensuring the security of the detection work, and strengthening the standardization of detection data. Through analyzing the defects of existing methods, the image smoothing and segmentation method with mean shift technique were proposed to make a preliminary segmentation of candidate cracks; a directional tracking method was used to extract the crack skeleton; using the crack skeleton to interpolate the full cracks, automatic crack extraction and encoding were achieved; finally, the crack skeleton segments were used to accurately calculate the parameters of crack characterization. All those could guarantee a complete description of crack characterization. The results show that the proposed method, which possesses a higher precision and reliability, is insensitive to the roughness of pavement and the directions of cracks, and is able to detect small cracks, whose accuracy reaches less than 0.5 pixels with relative error of length less than 2%. 2 tabs, 5 figs, 15 refs.

**Key words:** road engineering; automatic crack identification; photogrammetry; mean shift; image segmentation

## 0 引言

裂缝是最常见的道路表面缺陷,传统人工检查方法自动化、标准化程度很低,很不适合高速公路检测,主要原因是缺乏有效的智能技术检测路面病害量化数据<sup>[1]</sup>。道路裂缝影像计算机检测和特征描述是一种高效的路面缺陷数据自动采集方法<sup>[2-3]</sup>。路面的破损类型比较复杂,从大的方面可分为结构性破损和功能性破损 2 大类<sup>[4]</sup>;按形状分主要包括裂缝类、松散类坑槽、变形类沉陷、表面损坏泛油等,对路面使用性能和使用寿命影响较大的是结构性破损,其中最主要的形式之一是裂缝类型,其中,裂缝类比较适合采用影像测量方式检测<sup>[5-6]</sup>。

路面裂缝识别系统始于 20 世纪 70 年代,采用 CCD 摄像机采集路面图像进行检测。然而现有自动检测系统依然普遍存在实时性差、识别率低和分类难的缺点。主要原因为:①由于路面本身所处的环境决定了路面图像必定含有大量的噪声,给识别、分类带来困难;②针对变化多样的路面破损形式,缺少简单有效的识别、分类算法<sup>[7]</sup>;③裂缝宽度计算自动化程度不够等<sup>[8]</sup>。针对裂缝类型,国内外学者进行了多方面的研究,张娟等提出了路面裂缝边缘提取的相位编组法来识别路面裂缝<sup>[7]</sup>;Chambon 等提出了基于马尔可夫随机场的多尺度分割方法来识别裂缝,先用一维的高斯平滑滤波器增强裂缝,再用二维匹配滤波器识别裂缝<sup>[9]</sup>;Sun 等先用非线性滤波增强裂缝与影像背景之间的对比度,再用阈值法进行裂缝分割,最后基于像素的连通性分析识别裂缝<sup>[10]</sup>;其他的学者也进行了大量研究<sup>[11-12]</sup>。通过对比分析可以发现,这些方法都存在不同的局限性。为此,本文针对特定裂缝形式,首先采用均值漂移法初步分割裂缝,然后利用定向跟踪法提取裂缝骨架并编码,接着通过内插技术提取完整裂缝,最后分段计算裂缝形态参数。

## 1 路面裂缝识别方法

路面裂缝识别是指对图像中的裂缝目标进行分割、提取和编码。目前,路面裂缝的分割方法大都是基于像素的分割方法。由于路面防滑的技术要求,路面砂石颗粒形成大量琐碎小目标,根据大数原理,其直方图总体必然呈现近似正态分布,由于很难确定阈值,分割效果通常不好。

### 1.1 基于均值漂移的路面裂缝分割

一些文献分别证明了均值漂移(mean shift,

MS)算法对连续与离散函数的收敛性以及收敛的充分条件<sup>[13]</sup>。文献[13]采用式(1)进行迭代计算,成功地将其应用于图像平滑与分割,即

$$y_{j+1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i g(|(y_j - x_i)/h|^2)}{\sum_{i=1}^n g(|(y_j - x_i)/h|^2)}, j=1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: $y_{j+1}$ 是第  $j$  次迭代得到的过程特征; $x_{i-1}$ 是当前点与  $y_j$  最接近的过程特征,即带宽内数据点中心; $h$  为带宽; $g(\cdot)$  为核函数。

文献[13]证明,当满足一定条件时,序列  $y_{j+1}$  能够收敛到  $y'$ ,则  $y'$  点被称为数据中心  $x_{i-1}$  对应的模式。

本文采用定义在  $N \times N \times D$  带宽内的均匀核函数(Uniform Kernel)进行基于 MS 的图像平滑与分割, $N$  是图像计算窗口的行、列宽度, $D$  是图像灰度差。下页图 1(a)是原始裂缝图像,以灰度为纵轴的三维显示。

算法原理与步骤:①用 MS 计算图像局部灰度极值点集合  $p(N_{m,n}, E_{\text{gray}})$ 。 $N_{m,n}$  为极值坐标, $E_{\text{gray}}$  为极值灰度,如图 1(b) 中黑色点;②计算带宽内的  $N_{m,n}$  处的灰度均值,并替换相应  $E_{\text{gray}}$  值,完成图像平滑,如图 1(c);③对平滑后图像再进行 MS 计算,得到新的  $p(N_{m,n}, E_{\text{gray}})$ ,并对  $E_{\text{gray}}$  的直方图进行峰谷判断,计算出阈值  $Th_{\text{gr}}$ ,如图 1(d) 中黑色箭头<sup>[14]</sup>;④用阈值  $Th_{\text{gr}}$  对平滑后图像进行分割,得到路面裂缝初步分割结果,如图 1(e)。

### 1.2 基于定向跟踪的路面裂缝骨架确定

初步分割的结果是二值图像,没有分类,具有噪声,需要提取出连续的裂缝像素,并对其编码归类。为此,首先提取裂缝骨架,并消除噪声。基本原理为:定裂缝点的当前窗口,如下页图 2 中的灰色格网,用  $W_p$  表示,并在其近邻 8 个方向生成相同尺寸的方向判断窗口,如图 2 中的黑色格网,用  $W_{ju}$  表示。图 2 中白色点为初步分割的裂缝像素点,用  $C_n$  表示窗口内的裂缝点, $n$  为点数,用矢量  $[C_n]_{(8,1)}$  分别表示 8 个方向窗口中的裂缝点密度。

算法步骤:

(1) 计算当前窗口的输出坐标  $W(x, y) = \frac{i=n}{i=1, i \in W_p} \text{mean}(C_i)$ ,并记入骨架或孤立点中,由下一步判断决定。

(2) 方向判断窗口的点密度计算与位置坐标输出,分 3 种情况:①  $[C_n]_{(8,1)}$  中存在唯一最大值,则在该窗口中计算坐标均值  $W_1(x, y) = \frac{i=n}{i=1, i \in W_{ju}} \text{mean}(C_i)$ ,将

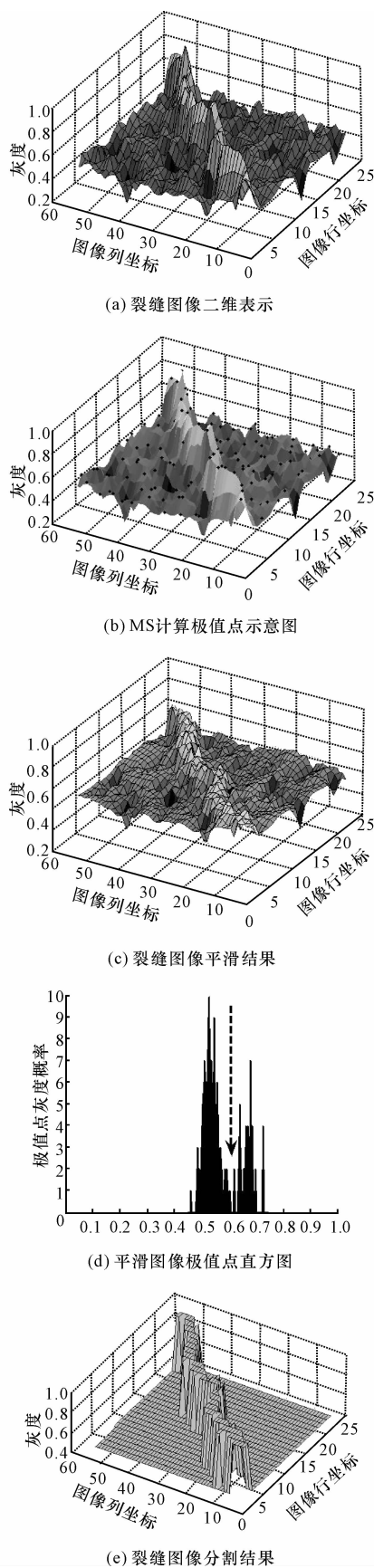


图 1 用 MS 进行图像平滑与分割的原理

Fig. 1 Principles of image smoothing and segmentation using MS

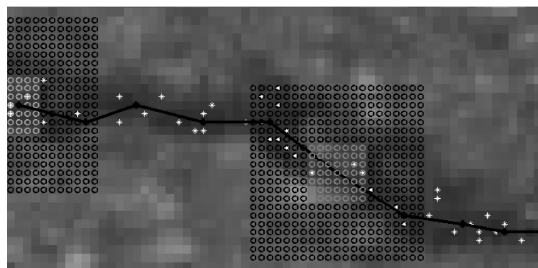


图 2 定向跟踪原理

Fig. 2 Principles of directional tracking

$W_{x,y}$  和  $W_1(x,y)$  记入骨架,并输出  $W_1(x,y)$  为下一个搜索中心;②  $[C_n]_{(8,1)}$  中存在  $k$  个等密度值,则  $W_2(x,y) = \text{mean}_{i=1, i \in W_{ju}}^{\text{mean}(C_i)}_1^k$ , 其中  $k \in (1,8)$ , 将  $W_{x,y}$  和  $W_2(x,y)$  记入骨架,并输出  $W_2(x,y)$  为下一个搜索中心;③  $[C_n]_{(8,1)}$  中的密度值都为 0,当前窗口为孤立点,即噪声,则将前窗口中所有像素  $C_n$  记入为背景。

(3) 新裂缝的搜索起点,总是选取最靠近图像边缘的未搜索点,格网大小为经验值,本文为  $7 \times 7$ 。由此,裂缝骨架被分类提取,同时剔除了噪声。

### 1.3 基于裂缝骨架的路面裂缝内插

裂缝骨架是裂缝的轮廓点,如下页图 3(a)、图 3(b)中的黑色点线,在骨架点间还存在像素缺失,因此需要内插出 1 条连续像素构成的完整裂缝,如图 3(c)、图 3(d)中的白色点。

图 3(a)是 2 条不同裂缝的骨架线与裂缝内插结果的叠加显示,对黑框局部放大,如图 3(b)。可以看到 2 条不同走向的裂缝骨架点线与裂缝内插点,对其黑框局部再放大,得到图 3(c)。图 3(c)中的黑色箭头所指为裂缝骨架点,设为  $S_f$  和  $S_b$ ,分别表示裂缝骨架的前、后点。

算法步骤:①计算前、后点的坐标增量  $(\Delta x, \Delta y) = S_b - S_f$ ,并计算坐标增量最大绝对值的方向  $P_{ori} = \max(P_{ori}^{|\Delta x|}, P_{ori}^{|\Delta y|})$ ,以  $P_{ori}$  为内插方向;②判断坐标增量  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的正负,以骨架前点  $S_f$  为基准,确定坐标是增加还是减小;③将内插得到的坐标值四舍五入取整,得到内插的图像裂缝坐标,即图像行列号,如图 3(c)中的白色点。由此,裂缝被完整提取并编码。

## 2 裂缝骨架自动分段精确计算裂缝形态参数

提取裂缝的形态参数,包括总长度、最大和最小宽度、宽度点位置坐标、宽度点总数、平均值宽度。

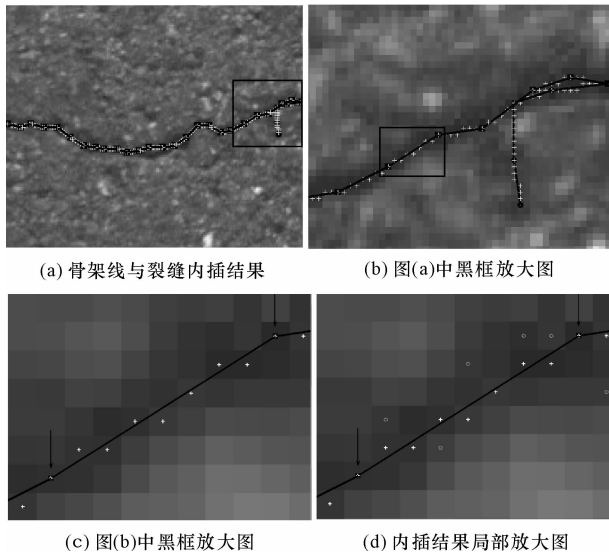


图3 裂缝内插原理

Fig. 3 Principles of crack interpolation

裂缝形态计算与裂缝骨架密切相关,必须沿裂缝走向的拐点分段计算。图3(d)中灰色“°”点为裂缝初步分割的像素点,设为 $C$ ,白色“+”点为内插的裂缝点,设为 $C^{ip}$ , $S_f$ 和 $S_b$ 定义同上节。基本原理为:以骨架前后拐点的中点为圆心,以拐点间距离为半径,在这个范围内,逐个计算 $C$ 中的点与所有 $C^{ip}$ 点的距离,并取其最小值,就是初步分割的像素点与裂缝中线的近似垂线距离,所有最小近距离的平均值的2倍,就是裂缝宽度。裂缝长度是所有骨架拐点间距离之和。

算法步骤:①计算骨架前、后拐点的中点坐标 $p(x_{cet}, y_{cet}) = S_f + \text{mean}(S_b - S_f)$ ;②计算骨架拐点间的距离 $D(S_f, S_b) = |S_b - S_f|$ ;③以 $p(x_{cet}, y_{cet})$ 为中心,以 $D(S_f, S_b)$ 为半径,搜索 $C$ 中的点,存入 $C_{out}$ 向量中,搜索 $C^{ip}$ 中的点,存入 $C_{out}^{ip}$ 向量中;④逐个计算 $C_{out}$ 点与 $C_{out}^{ip}$ 中所有点的距离,并取最小值,存入 $d_{min}$ 向量中,计算其均值的2倍,即 $2\text{mean}(d_{min})$ ,存入 $D_{min}$ 向量;⑤向量 $D_{min}$ 中记录了宽度点的位置,宽度点总数为 $\text{Len}(D_{min})$ ,最大宽度为 $\max(D_{min})$ ,最小宽度为 $\min(D_{min})$ ,平均宽度值为 $\text{mean}(D_{min})$ ,裂缝长度为 $\sum_{i=1}^n D(S_f, S_b)$ 。

### 3 试验分析

研究大量裂缝图像可以发现,裂缝灰度变化范围与路面背景的灰度存在较大的重叠,直接利用灰度幅值信息提取裂缝必然造成裂缝与路面背景混淆。采用MS的平滑方法可以克服或减弱裂缝与路

面背景的灰度重叠,对平滑图像进行分割,可以比较准确地初步分割出裂缝像素群。

在图4和图5中,图(a)是原始图像,图(b)是基于MS的初步分割结果,图(c)是经过方向跟踪提取的裂缝骨架,图(d)是裂缝的最终识别结果。图4(a)

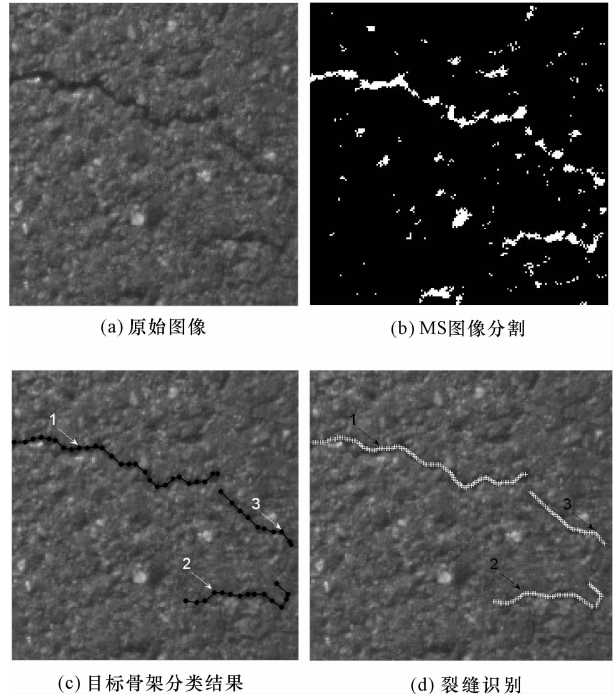


图4 裂缝识别主要过程(路面比较粗糙)

Fig. 4 Main process of crack identification

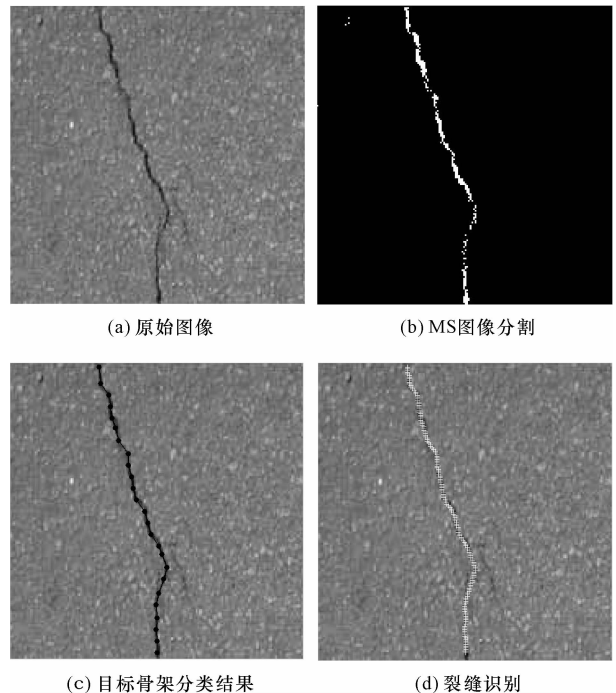


图5 裂缝识别主要过程(路面比较光滑)

Fig. 5 Main process of crack identification

为路面比较粗糙的图像,横向主要存在 3 条较长的波浪状裂缝,如图 4(c)、(d)中的编号 1、2、3;图 5(a)为路面比较光滑的图像,纵向贯穿 1 条裂缝,上方裂缝斜向而下,下方裂缝垂直而下。从图 4 可见:最终识别出 3 条裂缝,很好地提取了裂缝中线,对较短小裂缝比较敏感,对路面噪声具有较强的抑制作用,对初分割中的断裂像素,可以自动连接拟合。从图 5 可见,最终识别出 1 条裂缝,对较细窄裂缝比较敏感。图 4 和图 5 在路面光滑度以及裂缝数量、宽度与方向上都具有典型的代表性。由于图 4 比较粗糙,一般分割法方法噪声都比较大,在裂缝提取时难度也较大,但利用基于 MS 的图像分割克服了这一问题,在分割裂缝的同时,大大减少了分割噪声。图 5 比较光滑,裂缝较细,对一般分割法方法的响应比较迟钝,但对基于 MS 的分割方法则比较敏感。本

文方法具有较强的适应性,图 4 和图 5 路面粗糙度存在明显差异,表明算法对路面粗糙度不敏感,可以识别较细裂缝;图 4 和图 5 的裂缝基本处于 2 个相互正交的方向,表明算法对裂缝方向不敏感;图 4 提取了较短小裂缝,表明算法对短小裂缝比较敏感。

从以上比较典型的裂缝图像的处理结果看,本文方法对裂缝的提取具有很好的效果。表 1 给出了裂缝形态参数的测量结果。参数定义:总长度是沿裂缝走向的实际长度;最大或最小宽度分别是裂缝延伸方向的法线方向的最大或最小变化量;宽度点位是指计算裂缝宽度的图像点坐标;宽度点数是指计算宽度的抽样点总数;平均宽度值是所有抽样点宽度的平均值。显然,表 1 所列参数可以重构裂缝模型,将在另文讨论。

表 1 裂缝形态参数

Tab. 1 Parameters of crack characterization

图号	裂缝		总长度 像素数/个	最大宽度 像素数/个	最小宽度 像素数/个	平均宽度 像素数/个	宽度点位	宽度点 数/个
	数量/条	编号						
图 4	3	1	150.5	3.4	2.1	2.6	有记录	26
		2	81.8	4.7	2.1	2.7	有记录	14
		3	57.8	4.0	2.2	2.9	有记录	9
图 5	1	1	194.5	3.1	2.0	2.1	有记录	24

为检验算法的精度,将图像上实际测量的裂缝结果与算法结果进行对比,精度指标采用基于边缘的像素距离误差评价方法<sup>[15]</sup>。用  $F$  和  $Z$  分别表示算法提取的裂缝和实测裂缝,则  $Z$  上各点到  $F$  的最小距离和  $F$  上各点到  $Z$  的最小距离分别构成 2 个分布  $D_Z^F$  和  $D_F^Z$ ,它们的均值  $\mu D_Z^F$ 、 $\mu D_F^Z$  和方差  $\sigma D_Z^F$ 、 $\sigma D_F^Z$  可用来度量  $F$  和  $Z$  之间的偏离。为评价方便,

对均值  $\mu D_Z^F$ 、 $\mu D_F^Z$  和方差  $\sigma D_Z^F$ 、 $\sigma D_F^Z$ ,分别取平均值  $\mu \bar{D}=(\mu D_Z^F+\mu D_F^Z)/2$ , $\sigma \bar{D}=(\sigma D_Z^F+\sigma D_F^Z)/2$ ,可用来表示  $F$  和  $Z$  之间的综合偏离,单位为像素。数值越小则  $F$  和  $Z$  的吻合程度越高,裂缝准确度就越高,试验精度结果列于表 2。从表 2 可以看出,算法提取裂缝与实测裂缝的定位误差小于 1 个像素,裂缝总长度的相对误差小于 2%。

表 2 算法提取与实际量测结果的精度比较

Tab. 2 Precisions comparison of extraction algorithm and actual measured results

图号	裂缝		裂缝定位误差像素/个						总长度相对误差/%
	数量/条	编号	$\mu D_F^Z$	$\sigma D_F^Z$	$\mu D_Z^F$	$\sigma D_Z^F$	$\mu \bar{D}$	$\sigma \bar{D}$	
图 4	3	1	0.36	0.48	0.37	0.49	0.37	0.49	1.91
		2	0.32	0.47	0.33	0.48	0.32	0.47	1.90
		3	0.17	0.38	0.15	0.36	0.16	0.37	1.70
	平均值		0.28	0.44	0.28	0.44	0.28	0.44	1.84
图 5	1	1	0.33	0.52	0.30	0.46	0.32	0.49	1.82
	平均值		0.31	0.48	0.29	0.45	0.30	0.47	1.83

4 结 语

(1)采用均值漂移技术进行图像平滑与裂缝分割,可以有效增大裂缝与背景之间的特征差异,因此

能够比较完善地分割出裂缝目标。

(2)用定向跟踪方法提取裂缝骨架,可以宏观识别和控制裂缝的形态趋势,并以编码方式记录每条裂缝对象。

(3)对裂缝骨架进行内插,可以细化并完整识别裂缝中线,以裂缝骨架分段精确计算裂缝形态参数,实现裂缝形态测量。

(4)该方法对路面粗糙度和裂缝方向不敏感,可以识别细小裂缝,识别精度较高,可操作性强。

(5)本文方法在计算策略上需要改进,例如采用分开-合并技术并行处理较小图像块,可以进一步提高算法的灵活性以及算法的识别精度和效率,由此将产生直方图动态模式识别与阈值分割等问题,这是需要进一步研究的问题。

## 参考文献:

## References:

- [1] Henrique O, Paulo L C. Automatic road crack detection and characterization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 155-168.
- [2] Tiong P L Y, Mustaffar M, Hainin M R. Road surface assessment of pothole severity by close range digital photogrammetry method[J]. World Applied Sciences Journal, 2012, 19(6): 867-873.
- [3] 刘玉臣, 王国强, 林建荣. 基于模糊理论的路面裂缝图像增强方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(2): 35-37.  
LIU Yu-chen, WANG Guo-qiang, LIN Jian-rong. Image enhancement for pavement crack image based on fuzzy theory[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(2): 35-37. (in Chinese)
- [4] Fukuhara T, Terada K, Nagao M, et al. Automatic pavement distress survey system [J]. Journal of Transportation Engineering, 1990, 116(3): 280-286.
- [5] 焦 莉. 面向对象方法的路面线性裂缝识别与测量方法研究[J]. 测绘通报, 2012(7): 27-30.  
JIAO Li. On approach of pavement crack of line shape automatic recognition and measurement[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(7): 27-30. (in Chinese)
- [6] 肖国清. 公路路面无损检测技术的发展[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(1): 17-20.  
XIAO Guo-qing. Development of non-destructive testing technology of highway pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(1): 17-20. (in Chinese)
- [7] 张 娟, 沙爱民, 孙朝云, 等. 基于相位编组法的路面裂缝自动识别[J]. 中国公路学报, 2008, 21(2): 39-42.  
ZHANG Juan, SHA Ai-min, SUN Zhao-yun, et al. Pavement crack automatic recognition based on phase-grouping method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(2): 39-42. (in Chinese)
- [8] 王荣本, 王 超, 初秀民. 路面破损图像识别研究与进展[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2002, 32(4): 91-97.  
WANG Rong-ben, WANG Chao, CHU Xiu-min. Developments of research on road pavement surface distress image recognition[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2002, 32(4): 91-97. (in Chinese)
- [9] Chambon S, Subirats P, Dumoulin J. Introduction of a wavelet transform based on 2D matched filter in a Markov random field for fine structure extraction; Application on road crack detection[C]// SPIE. Proceedings of SPIE Image Processing: Machine Vision Applications II. San Jose: SPIE, 2009, 365-370.
- [10] Sun Y, Salari E, Chou E. Automated pavement distress detection using advanced image processing techniques[C]//IEEE. Proceedings of the International Conference on Electro Information Technology. Windsor: IEEE, 2009: 373-377.
- [11] Wang K C P, Elliott R P. Investigation of image archiving for pavement surface distress survey[R]. Fayetteville: University of Arkansas, 1999.
- [12] Mei X. Automatic detection of pavement surface crack depth on florida roadways[D]. Tampa: University of South Florida, 2001.
- [13] Comaniciu D, Meer P. Mean shift; a robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.
- [14] 曹建农. 基于直方图重构的极大交叉熵图像分割方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(12): 3373-3377.  
CAO Jian-nong. Image segmentation of maximum cross entropy based on histogram reconstruction[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(12): 3373-3377. (in Chinese)
- [15] Huang Q, Dom B. Quantitative methods of evaluating image segmentation[C]//IEEE. Proceedings of the International Conference on Image Processing. Washington DC: IEEE, 1995: 53-56.

