

文章编号:1001-7372(2014)09-0010-09

基于数字图像处理的路面裂缝自动分类算法

彭 博^{1,2}, 蒋阳升^{1,3,4}, 蒲 云¹

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 俄克拉荷马州立大学 土木与环境工程学院, 俄克拉荷马 静水 OK74078; 3. 西南交通大学 综合运输四川省重点实验室, 四川 成都 610031; 4. 西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031)

摘要:为了充分掌握路面裂缝信息,给路面养护管理、路面性能评价与预测、路面结构和材料设计提供参考,对路面裂缝图像自动分类与严重程度识别进行研究。首先,将裂缝轮廓进行矢量化处理,从而分离出单个裂缝区域进行特征计算与分析,提取倾角、块度、空洞等新的裂缝几何特征;然后,选择裂缝分类特征(裂缝空洞、长宽比和倾角明显程度),基于统计阈值区分线性裂缝和网状裂缝;最后,分别根据倾角和宽度对线性裂缝进行分类和严重程度识别,根据块度特征识别块状裂缝、龟裂及其严重程度。结果表明:裂缝分类和严重程度识别结果准确有效,可在无人干预的情况下准确、自动、实时地提取路面裂缝种类和严重程度信息。

关键词:道路工程;路面裂缝;图像处理;分类算法;轮廓矢量化;块度

中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A

Automated Classification Algorithm of Pavement Crack Based on
Digital Image ProcessingPENG Bo^{1,2}, JIANG Yang-sheng^{1,3,4}, PU Yun¹

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Oklahoma State University, Stillwater OK74078, Oklahoma, USA; 3. Comprehensive Transportation Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: In order to fully obtain pavement crack condition and provide a reference for pavement maintenance and management, pavement performance evaluation and prediction, pavement structure and material design, the research on automatic classification and intensity recognition of pavement cracks was conducted. First, crack contours were vectorized, thus a single crack area was separated from the others, whose crack features could be calculated and analyzed. Second, new crack features such as orientation angle, lumpiness and cavity were extracted. Then, pavement classification features were selected such as cavity, length-width ratio and significant degree of orientation angle, and based on the statistical thresholds, linear cracks and netted cracks were distinguished from each other. At last, linear crack categories and intensities were classified according to orientation angle and width respectively and block and alligator cracks and corresponding intensities were recognized on the basis of lumpiness characteristics. The results

收稿日期:2013-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51108391);中央高校基本科研业务费专项资金项目(A0920502051208-99)

作者简介:彭 博(1986-),男,四川南充人,工学博士研究生,E-mail:pengbo351@126.com。

show that pavement crack types and intensities are identified precisely and effectively, consequently, pavement crack type and intensity information can be collected in an accurate, automatic and real-time manner without human intervention.

Key words: road engineering; pavement crack; image processing; classification algorithm; contour vectorization; lumpiness

0 引言

裂缝类破损是公路路面主要而常见的破损之一,它会加速路面结构损坏,降低公路整体性能和寿命。裂缝自动检测对于路面养护管理、路面性能评价与预测、路面结构和材料设计具有重要的实用价值。

为了快速有效地获取路面裂缝信息,路面裂缝图像自动识别技术受到了各国学者的重视,各种路面检测系统应运而生,如日本的 Komatsu 系统(沿行车方向采集一个车道宽的图像,分辨率为 $2\,048$ 像素 \times $2\,048$ 像素)^[1]、瑞典的 PAVUE 系统(图像分辨率约为 $2\,000$ 像素 \cdot 车道⁻¹)^[1]、美国 DHDV 系统(沿行车方向连续采集约 4 m 宽的路面图像,分辨率为 $3\,704$ 像素 \times $2\,048$ 像素)^[2] 和中国 CiCS 系统(沿行车方向连续采集约 2.6 m 宽的路面图像,分辨率为 $3\,056$ 像素 \times $2\,048$ 像素)。与此同时,涌现出许多路面裂缝图像识别和分类算法,如 OT-SU 分割^[3]、空域边缘检测算法^[4-6]、基于小波分析的裂缝检测算法^[6-8]、基于人工神经网络的裂缝分类算法^[9-13]等。尽管如此,在没有人为干预的情况下,裂缝自动检测仍难获得满意的结果,这在裂缝分类方面尤为突出。

裂缝分类首先需要提取裂缝特征,然后设计分类算法识别裂缝种类,如支持向量机分类法^[14]、阈值判断法^[15]等基于规则判断的无监督方法和基于人工神经网络^[9-13]的有监督方法。总体而言,有监督方法准确率较高,但其需要人为干预,需要大量样本进行训练,计算成本高;无监督方法分类效果较差,但易于自动化、计算量小。综合二者优点,开发准确高效的裂缝种类识别无监督方法具有较好的前景。另外,裂缝分类研究还面临着难以识别裂缝严重程度的困境。基于此,本文中对自动识别路面裂缝种类和严重程度的无监督方法进行研究,力求准确、自动、实时地识别裂缝种类及严重程度。

本文中针对 1 mm 精度的路面图像(在天气晴朗的白天由 DHDV^[2] 和中国 CiCS 路面检测车采集),基于轮廓矢量化精确分离裂缝目标,以适应 1

张图片有多个裂缝的情况;提出 9 个裂缝特征计算方法,遴选出空洞特征、长宽比和倾角明显程度为裂缝分类特征集;设计区分线性裂缝和网状裂缝的阈值分类算法,推算并测试算法的准确率和召回率,并根据裂缝宽度和块度分布特征分别对线性裂缝和网状裂缝进行严重程度识别。

1 裂缝目标分离

裂缝可以分为线性裂缝和网状裂缝,前者包括横向和纵向裂缝,后者包括块状裂缝和龟裂。1 张路面图像可能有若干条线性裂缝(如图 1 所示,具有 S_1 和 S_2 两条裂缝),也可能有多处范围较小的龟裂或块状裂缝。许多裂缝分类算法以裂缝像素投影^[16]和密度^[17]等为特征进行分类,但它们均需具有 2 个前提:①1 张图片只有 1 个裂缝目标;②已经找到了裂缝最小外接矩形。然而事实上这些研究并没有提出将裂缝目标自动分离出来的方法,也没有精确的算法获得其外接矩形^[16]。本文基于 32 像素 \times 32 像素的子块划分(因图像精度为 $1\text{ mm}\cdot$ 像素⁻¹,子块大小约为 $32\text{ mm}\times 32\text{ mm}$)和裂缝边缘矢量化处理,自动将图像中的裂缝目标分离出来,使每次图像处理仅针对 1 个裂缝目标,为后续裂缝特征提取和分类奠定基础。

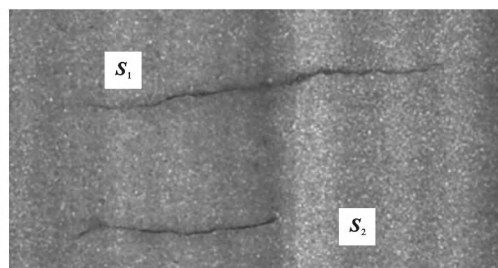


图 1 多裂缝图像

Fig. 1 Pavement Image with Multiple Cracks

1.1 裂缝图像子块化

裂缝形状复杂多变,为了减少轮廓提取的计算成本,首先对裂缝图像进行子块划分:只要 $32\text{ mm}\times 32\text{ mm}$ 子块的覆盖范围含有裂缝像素,就为裂缝块,否则为背景图像。通过这样的子块划分处理,裂缝目标均位于较为规则的多边形内部,如图 2 所示。

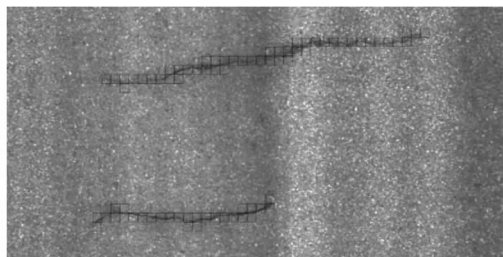


图2 裂缝子块划分

Fig. 2 Subimage Division of Cracks

本文中的裂缝图像一部分由采集系统自动生成,一部分由人工手动标注。显然,裂缝图像的质量会影响种类识别的精度,但本文侧重于裂缝分类,暂不讨论这些影响。

1.2 裂缝轮廓矢量化

为了提取完整而封闭的裂缝轮廓并获得最小外接矩形,区分不同裂缝区域,本文中设计了轮廓矢量化算法,流程如图3所示。

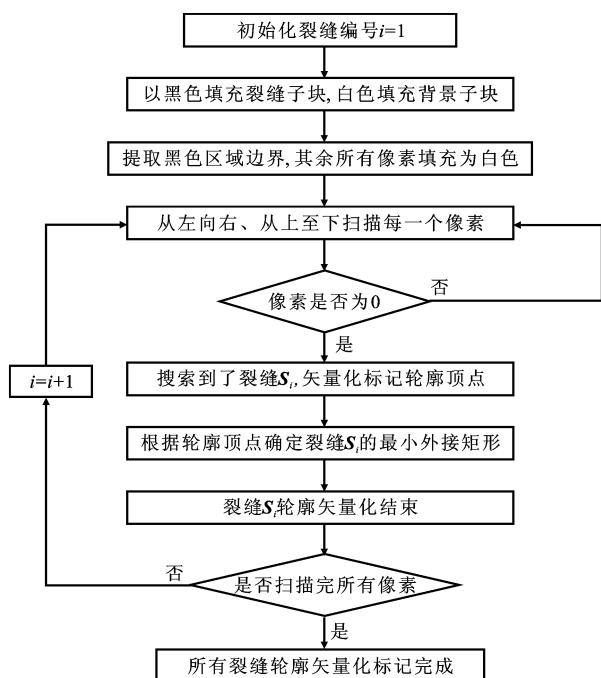


图3 轮廓矢量化流程

Fig. 3 Flow Chart of Contour Vectorization

轮廓矢量化算法具体步骤如下:

步骤1:初始化裂缝编号 $i=1$,将所有裂缝子块填充为黑色(赋灰度值为0),背景填充为白色(赋灰度值为255)。

步骤2:应用腐蚀算子处理图片,使黑色区域向外拓展1个像素宽度,然后提取1个像素宽的黑色区域边界且赋灰度值为0,其余所有像素赋值为255,如图4所示。裂缝轮廓为首尾相连的水平或竖

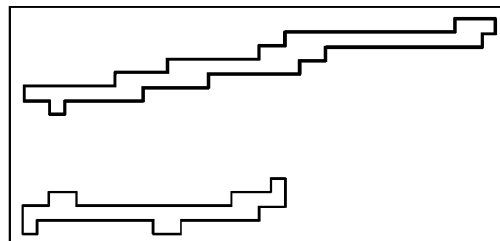


图4 裂缝区域轮廓

Fig. 4 Contour of Crack Area

直线段闭合而成,水平线段的尽头为竖直线段的起点,反之亦然。因此,将线段方向定义为如图5所示的1,2,3,4四个方向。

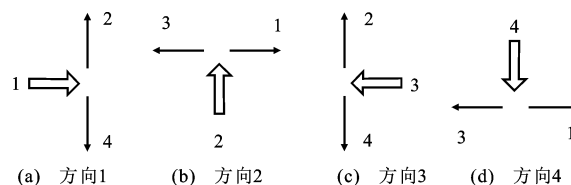


图5 矢量化搜索方向

Fig. 5 Search Directions of Vectorization

步骤3:从左向右、从上至下扫描,将遇到的第1个灰度值为0的像素记为点 V_0 ,表明搜索到了裂缝区域,记为裂缝 S_i ,进入步骤4。

步骤4:轮廓矢量化标记。① V_0 是一条水平线段的起点,朝着方向1搜索下一个顶点 V_1 ,获得水平线段 V_0V_1 ;② V_1 为一条竖直线段的起点,根据轮廓走向判断沿方向2或4搜索顶点 V_2 ,获得竖直线段 V_1V_2 ;③ V_2 为一条水平线段的起点,根据轮廓走向判断沿方向1或3搜索顶点 V_3 ,获得水平线段 V_2V_3 ;④重复进行顶点搜索标记,直到搜索最后一个顶点 $V_T=V_0$,此时裂缝 S_i 的轮廓为 $V_0, V_1, V_2, V_3, \dots, V_0$ 构成的闭合线条,将轮廓赋以灰度值 Q_i ($Q_i \neq 0$),记为 $S_i = (V_0, V_1, V_2, V_3, \dots, V_0, Q_i)$,进入步骤5。

步骤5:获得裂缝最小外接矩形。若 (x_1^i, y_1^i) 和 (x_2^i, y_2^i) 为最小外接矩形的左上角和右下角坐标,由于 S_i 轮廓顶点为 $V_0, V_1, V_2, V_3, \dots, V_{T-1}$,则 $x_1^i = \min x(V_t), y_1^i = \min y(V_t), x_2^i = \max x(V_t), y_2^i = \max y(V_t), t=0, 1, \dots, T-1$,其中 $x(V_t)$ 为顶点 V_t 的 x 坐标, $y(V_t)$ 为顶点 V_t 的 y 坐标。为了将裂缝区域完全包含在矩形内部,将其向外拓展1个像素,记 $W_i = (x_1^i - 1, y_1^i - 1, x_2^i + 1, y_2^i + 1)$ 为 S_i 的最小外接矩形,裂缝目标 S_i 轮廓矢量化结束。

步骤6:从左向右、从上至下扫描,若存在灰度值为0的像素,则 $i=i+1$,重复步骤3~5,获得第

$i+1$ 个裂缝区域的轮廓 S_{i+1} 和最小外接矩形 W_{i+1} ; 若不存在灰度值为 0 的像素, 进入步骤 7。

步骤 7: 获得裂缝区域 $S_1 \sim S_i$ 的轮廓和最小外接矩形, 裂缝矢量化标记结束。

最终裂缝区域轮廓矢量化结果如图 6, 7 所示。图 6 中有 2 条裂缝 (对应于图 1 的 S_1 和 S_2), 虚线为裂缝最小外接矩形。由于两裂缝区域轮廓的顶点和线段均以特定的像素值标记, 因此可以精确地分离出各个裂缝区域。图 7 中在源灰度图中标注了裂缝子块和最小外接矩形, 直观地显示了裂缝目标。

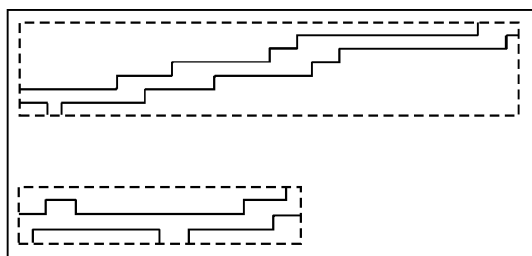


图 6 裂缝轮廓矢量化

Fig. 6 Vectorization of Crack Contour

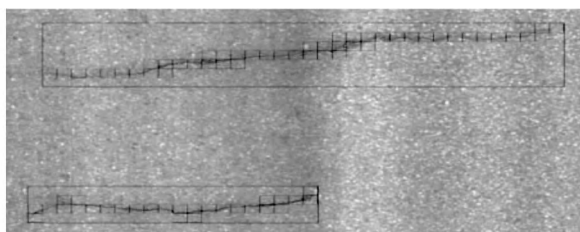


图 7 裂缝标注

Fig. 7 Marking of Cracks

1.3 裂缝像素提取

获得裂缝矢量化轮廓和最小外接矩形后, 需要提取只属于该裂缝的目标像素, 从而保证图像只含有 1 个裂缝区域。如图 8 所示, 最小外接矩形内部的裂缝像素可分为 2 类: 轮廓内部像素, 如 B' ; 轮廓外部像素, 如 A' 和 C' , 显然与 B' 类似的像素才是需要提取出来的裂缝像素。

对于图像中的任意像素, 若同时满足①为裂缝像素, ②位于目标裂缝轮廓内部, 则该像素被提取为目标像素。对于条件②, 可以通过像素沿着水平方向与轮廓的交点情况判断: 对于任意位于最小外接矩形内的像素 O , 以其为起点沿着正、负 x 轴方向搜索, 与轮廓的交点个数分别记为 N_1 和 N_2 , 若 $N_1 \geq 1$ 且 $N_2 \geq 1$, 则 O 为轮廓内部像素, 需要提取出来, 否则为轮廓外像素。图 9 为第 2 条裂缝的提取结果。

2 裂缝特征提取

路面裂缝具有一定特征可用于裂缝分类和损坏

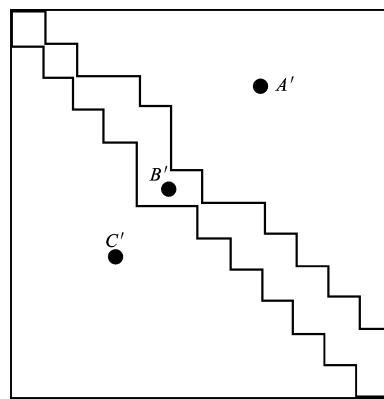


图 8 裂缝像素提取示意

Fig. 8 Schematic Diagram of Crack Pixel Extraction

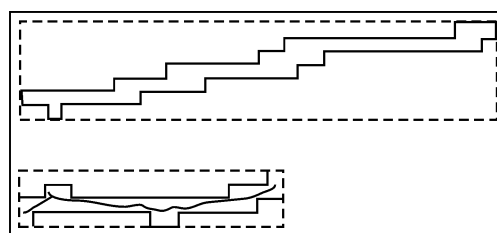


图 9 裂缝像素提取结果

Fig. 9 Extraction Results of Crack Pixels

程度评判, 如长度、宽度、区域长宽比、面积和密度^[17-18]等几何特征, 也有学者提出了投影特征^[16]、小波能量特征^[19]和矩不变量特征^[20]等。目前的裂缝分类研究几乎都只能区分裂缝种类, 而无法识别裂缝严重程度。本文拟精确提取裂缝几何特征, 以进行裂缝分类和严重程度识别, 原因如下: ①投影特征常用于线性裂缝的分类, 但无法判断斜向裂缝和网状裂缝; ②小波能量和矩不变量等特征计算复杂, 对图片分辨率和噪声较为敏感^[21], 只能对裂缝进行分类; ③裂缝根据几何形态差异进行分类; ④龟裂可分为轻、中、重 3 个损坏程度, 块状裂缝和线性裂缝则分为轻、重 2 个损坏程度^[22], 其依据是裂缝的宽度和块度等几何特征; ⑤前文提出的裂缝目标分离算法能精确提取裂缝区域轮廓及所含的裂缝像素, 为计算各类几何特征创造了必要的前提。以下将针对裂缝区域 $S=(V_0, V_1, V_2, V_3, \dots, V_0, Q)$ 及其最小外接矩形 $W=(x_1-1, y_1-1, x_2+1, y_2+1)$, 阐述常见几何特征的计算方法, 并提出新的裂缝几何特征: 倾角、块度和空洞。

2.1 常见几何特征

线性或网状裂缝均具有横向长度 (L_x)、纵向长度 (L_y)、长宽比 (R)、面积 (A) 和密度特征 (ρ), 这些特征可用以下计算公式获得 (几何尺寸均以像素为单位)

$$L_x = x_2 - x_1 \quad (1)$$

$$L_y = y_2 - y_1 \quad (2)$$

$$R = \max\{L_x, L_y\} / \min\{L_x, L_y\} \quad (3)$$

$$A = \sum g_j \quad g_j \in S \quad (4)$$

$$\rho = A / (L_x L_y) \quad (5)$$

式中: x_2, x_1 分别为裂缝最小外接矩形 W 沿 x 轴的最大坐标值和最小坐标值; y_2, y_1 分别为裂缝最小外接矩形 W 沿 y 轴的最大坐标值和最小坐标值; g_j 为裂缝区域 S 的某个像素。

此外, 线性裂缝还具有实际长度 (L) 和实际宽度 (D)。提取裂缝区域 S 一个像素宽的边界 E , 如图 10 所示, E 所含的像素总数即为裂缝的周长 C , 由于线性裂缝宽度较小, 通常只有 $0 \sim 20$ mm, 因此 L 约为周长的一半, 而宽度则近似为裂缝面积除以实际长度, 即

$$L = 1/2C = 1/2 \sum e_j \quad e_j \in E \quad (6)$$

$$D = A/L \quad (7)$$

式中: e_j 为裂缝边缘 E 的某个像素。

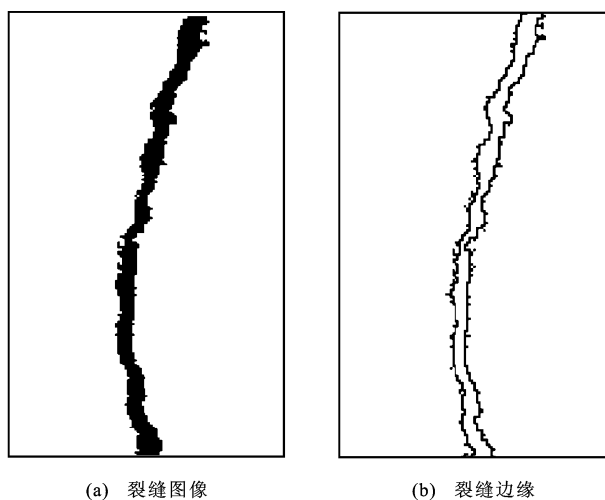


图 10 裂缝边缘提取

Fig. 10 Extraction of Crack Edges

2.2 裂缝倾角

根据定义, 与行车方向基本平行的裂缝为纵向裂缝, 满足条件 $L_y > L_x$; 与行车方向基本垂直的裂缝为横向裂缝, 满足条件 $L_x > L_y$, 但对于 $L_x \approx L_y$ 的情况暂没有清晰的界定。由于线性裂缝方向 (正 x 轴方向为 0°) 可能为 $-\pi/2 \sim \pi/2$, 且纵向、横向和斜向裂缝在概念上并没有十分严格的界限, 本文将计算它们的倾角 β , 并明确区分纵向、横向和斜向裂缝。

裂缝 S 的轮廓包含顶点 ($V_0, V_1, V_2, \dots, V_{T-1}$), 若 S 为线性裂缝, 这些顶点就会大致沿着一条直线分布, 因此可应用最小二乘法进行线性回归, 拟合方程因变量 Y 为轮廓顶点的 y 轴坐标值, 自变量为轮

廓顶点的 x 轴坐标值, 斜率为 K , 截距为 b , 相关系数为 r , 倾角为 β , 则

$$Y = Kx + b \quad (8)$$

$$\beta = \arctan(K) \quad \beta \in [-\pi/2, \pi/2] \quad (9)$$

2.3 裂缝块度

网状裂缝可能具有多个碎块 (图 11), 各板块具有一定的块度, 常用碎块的最大长度表示。图 12 为经过 32×32 降维处理后的裂缝子块二值图像 (尺寸为 $I \times J$), 从水平和竖直 2 个方向计算碎块大小。以水平方向为例, 步骤如下: ①从裂缝区域 S 的第 1 行左端开始扫描, 沿 x 轴方向计算 2 个裂缝子块之间空白区域的长度, 按照先后顺序分别记录获得的长度值 h_x^u , $u=1, 2, \dots$, 直至扫描到图像最右端; ②进入下一行, 按①的方法从左至右扫描计算处理; ③重复①, ②的过程, 直至完成每一行的扫描处理, 将所有结果记为 $H_x = (h_x^1, h_x^2, \dots, h_x^m)$ (m 为记录的个数)。同理, 可获得竖直方向尺寸 $H_y = (h_y^1, h_y^2, \dots, h_y^n)$ (n 为记录的个数)。据此, 可以统计碎块 2 个方向的块度特征 H , 从而奠定裂缝分类及破损严重程度划分的基础。

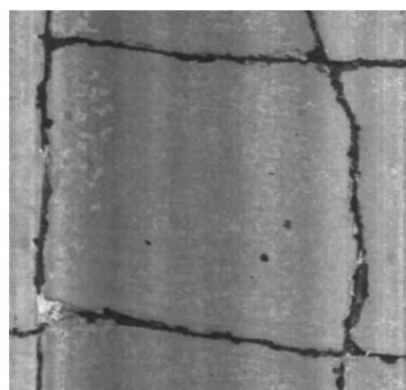


图 11 网状裂缝

Fig. 11 Netted Crack

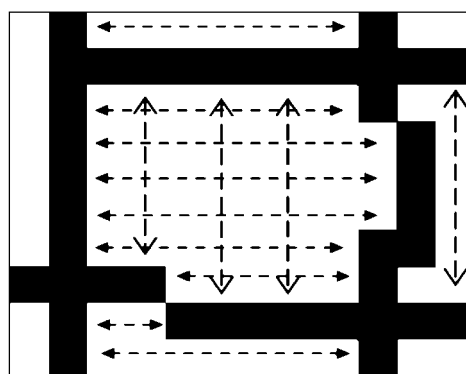


图 12 裂缝块度

Fig. 12 Crack Lumpiness

2.4 裂缝空洞

线性裂缝内部无空洞(图1),网状裂缝将路面分割为若干块,内部具有空洞(图11,12)。图12中的块度计算结果为 $H_x = (h_x^1, h_x^2, \dots, h_x^m)$, $H_y = (h_y^1, h_y^2, \dots, h_y^n)$, 则平均每行具有 m/I 个空白区域,平均每列有 n/J 个空白区域。令 $\Omega = \min\{m/I, n/J\}$ 代表空洞特征,显然 Ω 越大,表明图像在纵向和横向具有的空洞更明显,越可能为网状裂缝;反之,则更可能是线性裂缝。

3 线性裂缝和网状裂缝区分

如前文所述,裂缝整体上有9个几何特征:长度(L)、宽度(D)、长宽比(R)、面积(A)、密度(ρ)、倾角(β)及其相关系数(r)、块度(H)和空洞值(Ω),记为 $\Theta = (L, D, R, A, \rho, \beta, r, H, \Omega)$ 。裂缝分类或损坏程度识别首先需要选择特征集 F ,然后设计分类方法。显然, F 所含元素越多,分类算法越复杂^[9],准确率可能越高;反之,方法越简单易行,而准确率则可能降低。因此,本文遴选关键特征进行裂缝分类,以保证分类效果和算法易行性。

3.1 确定分类特征集

根据裂缝的几何特征和定义可以发现:①面积、长度和宽度无法区分线性裂缝和网状裂缝;②长宽比可以区分横向和纵向裂缝,却无法区分斜向裂缝、块状裂缝和龟裂;③一般而言,龟裂的密度最高,块状裂缝其次,线性裂缝最低,但由于裂缝形态和严重程度各异,较宽的线性裂缝密度常常超过块状裂缝,较为严重的块状裂缝密度也可能超过轻微龟裂;④线性裂缝具有明显的倾角,表现为轮廓顶点的线性回归相关系数绝对值 $|r|$ 较高,而网状裂缝通常为大片区域, $|r|$ 较低,倾角不明显;⑤线性裂缝内部无空洞,网状裂缝通常具有明显的空洞。综上所述,选定空洞特征(可由块度计算确定)、长宽比和倾角明显程度3个因素进行裂缝种类识别,故特征集 $F = \{\Omega, r, R\}$ 。

3.2 裂缝分类方法

在准确计算裂缝特征 Ω , r 和 R 的基础上,通过阈值判别完成裂缝分类,对于某裂缝 S ,分类步骤如下:①若 $\Omega \geq \Omega_0$,空洞十分明显, S 为网状裂缝,否则进入步骤②;②若 $R < R_0$ 且 $|r| < r_0$,为网状裂缝,否则 S 为线性裂缝。因此,算法关键在于确定阈值 Ω_0 , R_0 和 r_0 。

3.2.1 确定阈值 Ω_0

据前述内容, $\Omega = \min\{m/I, n/J\}$, 当 $\Omega = 1$ 时,

平均每行或每列均具有至少1个空白区域,表明裂缝内部存在显著的空洞。对样本量均为60的线性裂缝和网状裂缝进行空洞计算(图13,14),由图13可知,线性裂缝不存在空洞,所有裂缝的 $\Omega < 1$ 。通常情况下,网状裂缝具有若干个空洞, $\Omega \geq 1$,这在图14中也得到了体现,90%以上的网状裂缝 $\Omega \geq 1$ 。因此,取阈值 $\Omega_0 = 1$,能以近乎100%的准确率判断线性裂缝,而将网状裂缝判断为线性裂缝的可能性大约为10%。

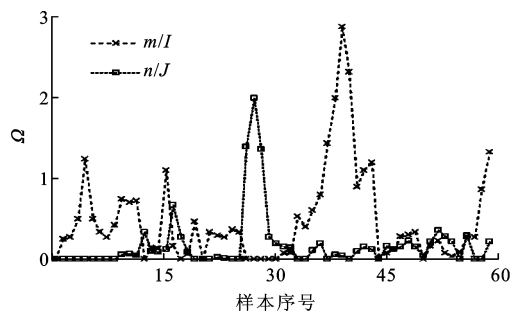


图13 线性裂缝空洞计算

Fig. 13 Cavity Calculation of Linear Cracks

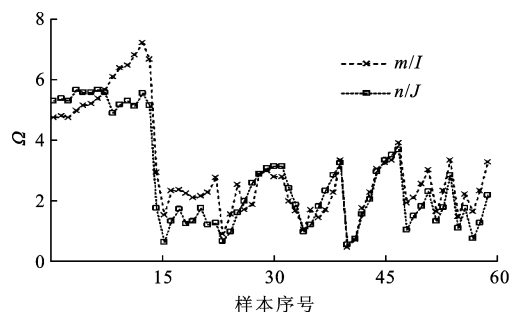


图14 网状裂缝空洞计算

Fig. 14 Cavity Calculation of Netted Cracks

3.2.2 确定阈值 R_0 和 r_0

以 Ω_0 为标准会将少量的网状裂缝判定为线性裂缝,通过检查裂缝的线性特征 r 和 R ,即可将这些网状裂缝识别出来。图15为样本量为30的裂缝长宽比 R ,可以看出,纵、横向裂缝 R 均大于4,斜向裂缝和网状裂缝 R 均小于4,故取 $R_0 = 4$ 。图16为样本量为60的裂缝线性回归相关系数绝对值 $|r|$,90%的线性裂缝 $|r| > 0.5$,93%的网状裂缝 $|r| < 0.3$,因此, r_0 可取0.3~0.5之间的一个数值,本文中取中间值 $r_0 = 0.4$ 。于是,网状裂缝独有的特征为: $R < 4$ 且 $|r| < 0.4$,从而将误判为线性裂缝的网状裂缝甄别出来。

3.3 分类方法效果分析

3.3.1 裂缝被正确分类的概率推算

令网状裂缝 $\Omega \geq \Omega_0$ 的概率为 p_1 , $R < R_0$ 的概率

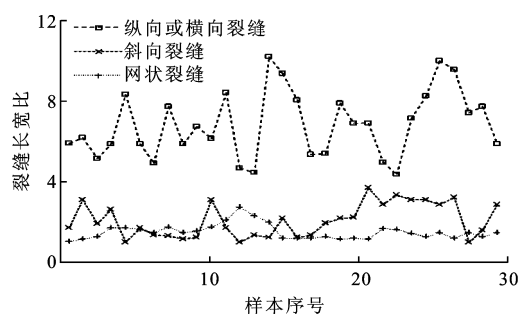


图 15 裂缝长宽比

Fig. 15 Length-width Ratio of Cracks

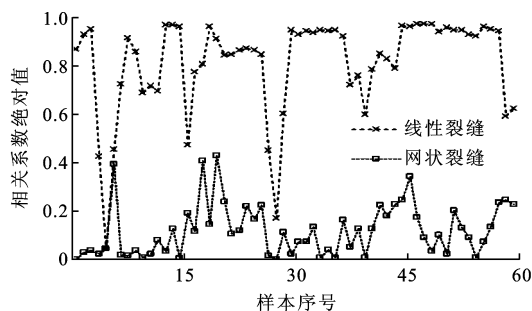


图 16 相关系数绝对值

Fig. 16 Absolute Values of Correlation Coefficients

为 p_2 , $|r| < r_0$ 的概率为 p_3 , 那么网状裂缝正确识别的概率 p 为

$$p = p_1 + (1 - p_1)p_2p_3 \quad (10)$$

由图 14~16 的统计可知, $p_1 \geq 90\%$, $p_2 \approx 100\%$, $p_3 \geq 93\%$, 理论上 p 可以高达 99%, 那么网状裂缝被判定为线性裂缝的可能性 $(1 - p) \approx 1\%$ 。同理, 令线性裂缝 $\Omega < \Omega_0$ 的概率为 q_1 , $R < R_0$ 的概率为 q_2 , $|r| < r_0$ 的概率为 q_3 , 那么线性裂缝正确识别的概率 q 为

$$q = q_1(1 - q_2q_3) \quad (11)$$

据图 13, 15, 16 的统计可知, $q_1 \approx 100\%$, $q_2 < 1$, $q_3 < 10\%$ 。于是, 理论上 $q > 90\%$, 即线性裂缝被判定为网状裂缝的可能性小于 10%。

3.3.2 准确率-召回率计算

现有研究多采用准确率衡量图像识别算法的优劣, 但它具有一定的局限, 如识别结果为 100 个且均正确, 准确率 100%, 而实际上却有 1 000 个目标物, 算法只识别了 10% 的目标物, 综合来看算法并不可靠。算法分类结果既要准确又要全面, 而准确率-召回率 (Precision-recall)^[17] 正好是这样一组指标。为了测试分类效果, 对 200 张路面图片进行分类 (表 1) 并采用式 (12), (13) 计算其准确率-召回率, 计算结果见表 2。

$$P_r = T_p / (T_p + F_p) \quad (12)$$

$$R_e = T_p / (T_p + F_N) \quad (13)$$

表 1 裂缝分类

Tab. 1 Classification of Cracks

序号	Ω	R	$ r $	判定类别
1	0.058 8	6.746 1	0.717 1	线性裂缝
2	2.870 1	1.192 0	0.111 0	网状裂缝
3	0.102 6	5.173 9	0.450 7	线性裂缝
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
200	3.250 0	1.268 7	0.144 0	网状裂缝

表 2 准确率-召回率计算结果

Tab. 2 Precision-recall Calculation Result

裂缝类别	T_p	F_p	F_N	$P_r/\%$	$R_e/\%$
线性裂缝	98	0	2	100.00	98
网状裂缝	100	2	0	98.04	100

式中: P_r 为准确率; R_e 为召回率; T_p 为正确检测出来的目标物数目; F_p 为不是目标物却检测为目标物的数目; F_N 为目标物却未被检测出来的数目。

由表 2 可知, 分类算法准确率和召回率可达 98%, 这说明本文提取的关键特征能有效区分裂缝种类, 且分类阈值选取恰当, 最终形成了性能优良的裂缝分类算法, 分类结果较为准确全面。

需要注意的是, 分类算法的关键在于确定阈值 Ω_0 , R_0 和 r_0 , 而这 3 个关键性阈值的确定依赖于一定样本, 不同的阈值可能影响算法分类效果。本文随机选择的样本具有一定代表性和统计意义, 为确定阈值提供了有益参考。今后研究中, 可通过增加样本量、增强样本随机性和代表性等途径统计裂缝特征, 结合实际经验选择和验证更为合理的阈值。

4 裂缝类别细分

4.1 线性裂缝分类

对任意线性裂缝, 可根据倾角 β 进行分类, 如表 3 所示。

表 3 线性裂缝分类依据

Tab. 3 Classification Criteria of Linear Cracks

裂缝类别	横向裂缝	斜向裂缝	纵向裂缝
分类标准	$ \beta \leq \pi/6$	$\pi/6 < \beta < \pi/3$	$\pi/3 \leq \beta \leq \pi/2$

当然, 还可以根据倾角继续细分裂缝。线性裂缝可根据宽度 D 进行严重程度识别, $D \geq 3$ mm 时为重度裂缝, 否则为轻微裂缝。

4.2 网状裂缝细分

网状裂缝包括块状裂缝和龟裂, 分别如图 11, 17 所示。一般情况下, 它们具有不同的宽度和密度, 但由于网状裂缝纵横交错, 宽度难以计算和衡量, 而较为严重的块状裂缝密度常常超过龟裂密度,

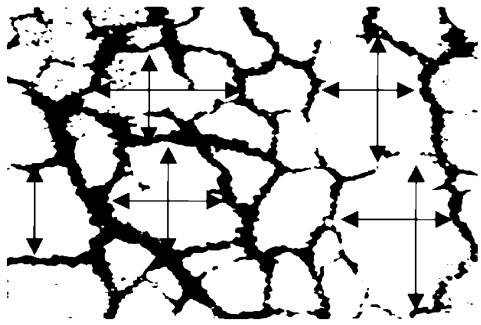


图 17 龟裂

Fig. 17 Alligator Crack

因此,很难判断块状裂缝和龟裂各自具有怎样的宽度和密度,也就无法据此对其进行种类和严重程度划分。进一步观测对比块状裂缝和龟裂,发现它们的关键区别在于二者均把路面分解成为碎块,但前者碎块数量较少、块度大,而后者分块较多、块度小。从直观感觉和机器识别的角度,根据块度易于区分块状裂缝和龟裂,且具有实际的物理意义,即块度越小,破损越严重。综上所述,本文以块度为标准细分网状裂缝,这也与《公路技术状况评定标准》(JTGH20—2007)^[22]中对块状裂缝和龟裂的定义相符。块状裂缝分为轻、重 2 个等级,龟裂分轻、中、重 3 个等级,如表 4 所示。

表 4 网状裂缝严重程度描述

Tab. 4 Intensity Description of Netted Cracks

裂缝类别	严重程度	特征描述
块状裂缝	轻	大部分裂缝块度大于 1.0 m
	重	主要裂缝块度为 0.5~1.0 m
龟裂	轻	主要裂缝块度为 0.2~0.5 m
	中	部分裂缝块度小于 0.2 m
	重	大部分裂缝块度小于 0.2 m

由于网状裂缝具有多个分块(图 17),且规范中定义的“大部分裂缝块度”、“主要裂缝块度”及“部分裂缝块度”都是定性的描述,并没有定量的区分标准,因此,有必要统计不同尺寸空洞所占的确切比例,据以分类。

将裂缝块度 $H_x = (h_x^1, h_x^2, \dots, h_x^m)$ 按尺寸大小分为 4 部分: $\varphi_x^1 = \{h_x^u | h_x^u < 0.2 \text{ m}\}$, $\varphi_x^2 = \{h_x^u | 0.2 \text{ m} \leq h_x^u < 0.5 \text{ m}\}$, $\varphi_x^3 = \{h_x^u | 0.5 \text{ m} \leq h_x^u \leq 1.0 \text{ m}\}$, $\varphi_x^4 = \{h_x^u | h_x^u > 1.0 \text{ m}\}$, $u = 1, 2, \dots, m$ 。令 $a_x^1 \sim a_x^4$ 为具有相应尺寸的空洞区域面积,有

$$a_x^k = \sum h_x^u, h_x^u \in \varphi_x^k \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

那么各尺寸范围空洞所占比例 $\lambda_x^1 \sim \lambda_x^4$ 为

$$\lambda_x^k = a_x^k / \sum_{u=1}^m h_x^u \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

同理,可以求得与 $H_y = (h_y^1, h_y^2, \dots, h_y^n)$ 对应的 $a_y^1 \sim a_y^4$ 和 $\lambda_y^1 \sim \lambda_y^4$ 。当 $(a_x^3 + a_x^4) \geq (a_y^3 + a_y^4)$ 时,表明 x 轴方向大尺寸空洞面积较多,则取 $\lambda_x^1 \sim \lambda_x^4$ 代表裂缝块度分布特征,据以进行裂缝分类,否则取 $\lambda_y^1 \sim \lambda_y^4$ 为分类依据。令 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 为裂缝块度分布特征,则有

$$\lambda_k = \begin{cases} \lambda_x^k & a_x^3 + a_x^4 \geq a_y^3 + a_y^4 \\ \lambda_y^k & a_x^3 + a_x^4 < a_y^3 + a_y^4 \end{cases} \quad (16)$$

λ_1 为块度小于 0.2 m 的比例, λ_2 为块度在 $[0.2 \text{ m}, 0.5 \text{ m})$ 区间的比例, λ_3 为块度在 $[0.5 \text{ m}, 1.0 \text{ m}]$ 区间的比例,而 λ_4 则为块度大于 1.0 m 的比例。据此,网状裂缝类别细分方法如表 5 所示。

表 5 网状裂缝分类依据

Tab. 5 Classification Criteria of Netted Cracks

裂缝类别	分类标准	严重程度	判定标准
块状裂缝	$\lambda_3 + \lambda_4 \geq 0.5$	轻	$\lambda_4 \geq \lambda_3$
		重	$\lambda_4 < \lambda_3$
龟裂	$\lambda_3 + \lambda_4 < 0.5$	轻	$\lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2) \leq 0.2$
		中	$0.2 < \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2) < 0.8$
		重	$\lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2) \geq 0.8$

可见,该分类方法与裂缝定义相吻合,同时,得益于准确计算的空洞尺寸分布,进一步明确了定量划分标准,有利于裂缝的种类识别和破损状况评价,分类实例如表 6 所示。

表 6 网状裂缝分类

Tab. 6 Classification of Netted Cracks

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	类别	严重程度
0.093 2	0.360 3	0.529 3	0.017 2	块状裂缝	重
0.208 7	0.712 0	0.079 3	0.000 0	龟裂	中
0.016 0	0.074 2	0.218 2	0.691 7	块状裂缝	轻

5 算法性能对比分析

文献[10]中提出了基于神经网络的裂缝分类算法,测试准确率为 95.2%;文献[14]中提出了基于支持向量机的裂缝分类算法,准确率测试值为 67.2%~95.3%;文献[17]中根据裂缝空间分布特征提出了基于神经网络的裂缝分类算法,准确率可达 98%。这些算法均只能区分纵向裂缝、横向裂缝、块状裂缝和龟裂,无法识别裂缝严重程度。此外,神经网络结构设计比较复杂、计算成本高,不利于实时处理。

与上述算法相比,本文算法根据裂缝倾角、长宽比、空洞、宽度及块度特征识别裂缝种类和严重程度,在区分网状裂缝和线性裂缝方面准确率可达 98%,不但能准确区分纵向裂缝、横向裂缝、块状裂

缝和龟裂,还能定量划分裂缝严重程度,符合《公路技术状况评定标准》^[22]中的要求。本文算法可准确、自动、实时地进行裂缝种类和严重程度识别。

6 结 语

(1)在裂缝目标矢量化分离的基础上提出了倾角、块度、空洞等新的裂缝特征和计算方法;然后,根据裂缝空洞特征、长宽比和倾角明显程度设计了裂缝分类的无监督方法;最后根据块度特征提出了块状裂缝和龟裂严重程度的定量划分标准。测试表明,裂缝分类的准确率和召回率达 98%,可与复杂的人工神经网络分类方法相媲美;裂缝严重程度识别结果准确可靠,符合国家标准。

(2)本文提出的裂缝分类和严重程度识别算法由 C++ 语言实现,可移植性强,在无人干预的情况下,能自动分离裂缝目标进行计算分析,准确、实时地进行裂缝种类和严重程度识别,对于路面养护管理、路面性能评价与预测、路面结构和材料设计具有重要的实用价值。

(3)由于路面图像复杂多样和统计样本有限,本文提出的裂缝种类和严重程度划分阈值具有一定的局限性,不一定适用于所有图像。如何确定更为合理的阈值以准确有效地识别裂缝种类和严重程度,可从以下几方面进一步探究:①对路面图像进行分组统计,并增加样本量、增强样本随机性和代表性,为每一组确定合理的阈值;②根据图像特征自适应调整阈值;③增补分类特征。

参考文献:

References:

- [1] WANG K C P. Designs and Implementations of Automated Systems for Pavement Surface Distress Survey [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2000, 6(1): 24-32.
- [2] WANG K C P, HOU Z, GONG W. Automated Road Sign Inventory System Based on Stereo Vision and Tracking[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2010, 25(6): 468-477.
- [3] 孙波成, 邱延峻. 路面裂缝图像处理算法研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(2): 64-68.
SUN Bo-cheng, QIU Yan-jun. Pavement Crack Diseases Recognition Based on Image Processing Algorithm [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(2): 64-68.
- [4] 李晋惠. 用图像处理的方法检测公路路面裂缝类病害[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(3): 24-29.
LI Jin-hui. Pavement Crack Diseases Detecting by Image Processing Algorithm[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(3): 24-29.
- [5] 张 娟, 沙爱民, 高怀钢, 等. 基于数字图像处理的路面裂缝自动识别与评价系统[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(4): 18-22.
ZHANG Juan, SHA Ai-min, GAO Huai-gang, et al. Automatic Pavement Crack Recognition and Evaluation System Based on Digital Image Processing[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4): 18-22.
- [6] SOILLE P, TALBOT H. Directional Morphological Filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(11): 1313-1329.
- [7] ROSITO JUNG C, SCHARCANSKI J. Adaptive Image Denoising and Edge Enhancement in Scale-space Using the Wavelet Transform[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(7): 965-971.
- [8] MOGHADAS NEJAD F M, ZAKERI H. A Comparison of Multi-Resolution Methods for Detection and Isolation of Pavement Distress[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3): 2857-2872.
- [9] 初秀民, 王荣本, 储江伟, 等. 沥青路面破损图像分割方法研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 11-14.
CHU Xiu-min, WANG Rong-ben, CHU Jiang-wei, et al. Study of Asphalt Pavement Surface Distress Image Segmentation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3): 11-14.
- [10] LEE B J, LEE H. Position-invariant Neural Network for Digital Pavement Crack Analysis[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19(2): 105-118.
- [11] 樊海玮, 张国翊, 丁爱玲, 等. BP 改进算法及其在路面裂缝检测中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 46-53.
FAN Hai-wei, ZHANG Guo-yi, DING Ai-ling, et al. Improved BP Algorithm and Its Application in Detection of Pavement Crack[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1): 46-53.
- [12] 宋蓓蓓, 韦 娜. 基于脉冲耦合神经网络的路面裂缝提取[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(5): 46-53.
SONG Bei-bei, WEI Na. Pavement Cracks Extraction Based on Pulse Coupled Neural Network[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(5): 46-53.

(下转第 24 页)

- [3] PESHKIN D G, HOERNER T E, ZIMMERMAN K A. Optimal Timing of Pavement Preventive Maintenance Treatment Applications[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2004.
- [4] 董瑞琨. 基于老化的沥青路面预防性养护时机[D]. 上海: 同济大学, 2005.
DONG Rui-kun. Timing of Asphalt Pavement Preventive Maintenance Based on Aging [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [5] GLOVER C J, DAVISON R R, DOMKE C H, et al. Development of a New Method for Assessing Asphalt Binder Durability with Field Validation[R]. Alexandria: National Technical Information Service, 2005.
- [6] LIN J T, GUO P D, WU S P, et al. Effect of Rejuvenator Sealer Materials on the Properties of Aged Asphalt Binder[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(7): 829-835.
- [7] VAN DE VEN M F C, JEMERE Y, MOLENAAR A A, et al. Ageing Prediction of Porous Asphalt[C]//WU S P, MO L T. Proceedings of Second International Conference on Sustainable Construction Materials: Design, Performance, and Application. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 305-317.
- [8] LIU M. The Effects of Asphalt Fractional Composition on Properties[D]. College Station: Texas A&M University, 1996.
- [9] HAGOS E T. The Effect of Aging on Binder Properties of Porous Asphalt Concrete[D]. Delft: Delft University of Technology, 2007.
- [10] KING G N, KING H. Spray-applied Surface Seal; Fog and Rejuvenator Seals [C]//TRB. Proceedings of Transportation Research Board 87th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2008: 1-21.
- (上接第 18 页)
- [13] 张 脩, 胡圣能, 赵鸿铎, 等. 连续配筋混凝土路面裂缝间距特性[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 1-7.
ZHANG Xiao, HU Sheng-neng, ZHAO Hong-duo, et al. Characteristic of Crack Spacing for Continuously Reinforced Concrete Pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 1-7.
- [14] 丁爱玲, 焦李成. 基于支撑矢量机的路面破损识别[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(2): 34-37.
DING Ai-ling, JIAO Li-cheng. Automation of Recognizing Pavement Surface Distress Based on Support Vector Machine[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 34-37.
- [15] 赵 轲. 路面裂缝图像自动识别系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
ZHAO Ke. The Design and Research of Pavement Crack Identification System[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [16] 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.
LI Gang, HE Yu-yao. A Novel Image Detection and Classification for Pavement Crack Under Non-uniform Illumination[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(8): 1405-1408.
- [17] LI Qing-quan, ZOU Qin, LIU Xiang-long. Pavement Crack Classification via Spatial Distribution Features [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011, 2011: 1-12.
- [18] 高建贞, 任明武, 唐振民, 等. 路面裂缝的自动检测与识别[J]. 计算机工程, 2003, 29(2): 149-150.
GAO Jian-zhen, REN Ming-wu, TANG Zhen-min, et al. Automatic Road Crack Detection and Identification[J]. Computer Engineering, 2003, 29(2): 149-150.
- [19] 孙 奥. 路面病害图像自动分类方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
SUN Ao. Study of Automated Classification Methods of Pavement Distress Images [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [20] SUK T, FLUSSER J. Combined Blur and Affine Moment Invariants and Their Use in Pattern Recognition [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(12): 2895-2907.
- [21] STERN A, KRUCHAKOV I, YOAVI E, et al. Recognition of Motion-blurred Images by Use of the Method of Moments [J]. Applied Optics, 2002, 41(11): 2164-2171.
- [22] JTG H20—2007, 公路技术状况评定标准[S].
JTG H20—2007, Highway Performance Assessment Standards[S].