

基于直方图估计和形状分析的沥青路面 裂缝识别算法^{*}

徐志刚, 赵祥模, 宋焕生, 雷涛, 韦娜

(长安大学信息工程学院 西安 710064)

摘要: 提出了一种基于直方图估计和形状分析的沥青路面裂缝识别算法, 该算法首先将 $1\,024 \times 1\,024$ 像素大小的路面裂缝图像分为 256 个 64×64 像素大小的子块, 然后采用直方图估计的方法获得每个子块图像原始直方图的混合高斯拟合函数, 两个高斯函数的交叉点即是每个子块图像的最优分割阈值。利用该阈值对整幅图像进行二值化后, 在两种尺度条件下采用形状分析方法对子块二值图像进行快速分类和“野点”删除, 最终实现了裂缝区域的精确定位。试验结果表明: 本文提出的阈值分割方法应用于裂缝图像分割, 其性能要优于极小误差法、Osu 阈值法、最大熵法等经典算法; 采用形状分析对分割后二值化图像进行后续处理, 可实现裂缝区域的快速、精确定位。

关键词: 图像处理; 路面裂缝检测; 阈值分割; 直方图估计; 形状分析; 神经网络

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520 2040

Asphalt pavement crack recognition algorithm based on histogram estimation and shape analysis

Xu Zhigang, Zhao Xiangmo, Song Huansheng, Lei Tao, Wei Na

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: An asphalt pavement crack recognition algorithm based on histogram estimation and shape analysis is proposed. The original pavement image ($1\,024 \times 1\,024$ Pixels size) is first divided into 256 cells (64×64 Pixels size). With histogram estimation method, a mixed-Gaussian fitting function is obtained for the original histogram of each cell, and the intersection of two Gaussian functions is taken as the optimal segmentation threshold. After image binarization using the threshold value, these binary cells are classified into two different types and the “wild spots” are deleted using shape analysis theory under two scales. So the cracks are located precisely on the whole image. Experiment results show that the proposed thresholding method is superior to those classical algorithms, such as minimal error method, Osu threshold segmentation method and maximum entropy method in crack image segmentation, and with shape analysis, the crack region can be located quickly and accurately.

Key words: image processing; road distress detection; threshold segmentation; histogram estimation; shape analysis; neural network

1 引言

拥有同步更新、内容完整、数据准确的道路综合信息, 对道路养护部门日常管理中的报表编制、数据分析、决策支持至关重要^[1]。这些信息主要包括路产设施完好

状况、道路线形^[2]、道路 GIS^[3]、路面病害、道路平整度等数据。自 20 世纪 80 年代以来, 欧美等发达国家将现代光学技术和计算机技术相结合, 先后开发了基于激光测距和数字图像处理的多功能检测车^[4-6], 这种检测车具有检测效率高、人为因素少、不影响交通的优点, 在路面

收稿日期: 2010-04 Received Date: 2010-04

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (60902075)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队基金 (IRT0951)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-05-0849)、长安大学中央高校基本科研业务费 (CHD2009 JC114, CHD2010 ZY007) 资助项目

检测中得到了越来越多的应用,我国在路面自动检测方面虽起步较晚,但是发展迅速,目前已接近世界先进水平^[7]。由于路面破损图像具有噪声强(路面材料粒径噪声、交通标志白线、路面抛洒物、不均匀光线照度、遮挡阴影等多种干扰)、形式多样(横缝、纵缝、块裂、龟裂、坑槽、麻面、脱皮、啃边、松散等形式)等特点^[8],现有的路面自动检测系统依然普遍存在识别率低、实时性差和分类难等缺点。文献[6]指出:国内现有的路面裂缝调查方法在很大的程度上还都依赖于人工,虽然近几年陆续引进了一些国外先进的路面检测车系统,但应用效果并不理想,寻找一种简单、高效的图像分割算法,正确率高的裂缝分类方法仍是当前急需解决的任务。国内外相关领域的学者对基于数字图像处理的路面裂缝识别问题进行了多年的研究,文献[7]和文献[9]对国内外近30年的研究成果进行了总结,目前的研究算法主要分为4种类型:1)基于灰度统计的方法^[9];2)基于边缘检测的方法^[8];3)基于分形几何理论的方法^[10];4)基于分块分析的方法^[11-13]。本文在前人研究的基础上,将基于直方图估计的阈值分割方法和形状分析理论运用于路面裂缝的识别中,取得了较好的识别效果。

2 沥青路面图像特征分析

文献[2]指出一幅由CCD摄像机拍摄的含有裂缝的灰度图像由3部分组成,设 $I(P)$ 表示一含有裂缝的路面图像,则可表示为:

$$I(P) = I_b(P) + I_n(P) + I_f(P)$$

式中: $I_b(P)$ 是背景灰度变化信号, $I_n(P)$ 是噪音信号, $I_f(P)$ 是路面的裂缝信号, P 为像素坐标 $\{x, y\}$ 。为分割出裂缝信号,就需要对图像阈值化,由于 $I_n(P)$ 及 $I_b(P)$ 的存在,使得 $I_f(P)$ 淹没于其中,很难直接提取出 $I_f(P)$ 信号。对一般裂缝图像而言,结合文献[2]的归纳,具有如下性质:

性质1:裂缝相对于路面背景来说是一些灰度值较低的像素集合。也就是说裂缝相对于路面背景,其像素灰度值要低得多,因此裂缝上的像素值一般来说是局部最小值。

性质2:裂缝中央灰度值低,边缘灰度值高,其剖面呈山谷状,是一种屋脊边缘。

性质3:裂缝一般来说是具有一定的线性特征和一定的方向,在空间上具有连续性。

性质4:由于光照不均匀的影响,裂缝像素在整幅路面图像中的不同位置上可能呈现出不同的灰度均值。

性质5:路面背景和裂缝目标像素灰度直方图均近似服从高斯分布。

性质6:裂缝目标像素在整个路面图像中占据的比

例很小,一般不超过20%。

图1(a)是一幅 1024×1024 大小的256级灰度路面裂缝图像。由于光照不匀、阴影遮挡等原因,道路破损图像经常出现明暗不匀的区域,图像中的裂缝像素灰度值也随着区域的灰度变化,采用全局阈值无法将裂缝从背景中分割出来,图1(b)即为全局Ostu阈值分割的结果,从图中可以看出,图像中暗处的裂缝无法被分割出来,而且亮处的裂缝也被周围噪声淹没。如果采用子块分析方法(Grid Cell Analysis: GCA),即采用局部最优阈值对图像进行二值化其分割效果要明显优于全局阈值^[11],因为在一个子块内,其图像灰度的分布是近似均匀。在GCA方法中,子块大小选取非常重要,通常与裂缝宽度有密切关系,而且必须是2的指数幂,子块过大则不易选取局部阈值,过小又会增加计算量。经试验发现对于10个以下像素宽度的路面裂缝,选取 64×64 作为子块大小较为合适。

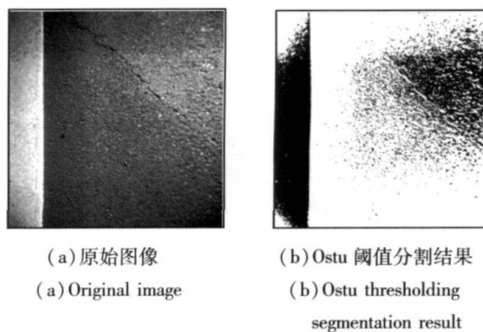


图1 全局阈值分割结果

Fig. 1 Segmentation result using global threshold

3 基于直方图估计的阈值分割算法

在对路面图像进行分块后,需要对每一个图像子块进行自动阈值分割。根据裂缝性质5可知图像子块内背景直方图 $H_b(j)$ 和裂缝直方图 $H_f(j)$ 均近似服从高斯分布,因此可以用直方图拟合的方法估计出这两个高斯分布函数的参数,高斯函数的相交处即为子块图像分割阈值 T 。利用多个高斯分布的叠加来对直方图进行逼近是直方图分析的重要方法之一,文献[14]采用基于EM的直方图逼近方法对拟合函数的参数进行估计,并应用于矿相图像分析,该算法采用迭代的方法对直方图的参数进行估计,求解过程复杂,计算量较大,不适合本文大量图像子块的自动阈值分割。本文对以上算法进行了简化改进,根据分割阈值 T 近似估计高斯函数的参数,并以分解残量能量最小为准则,最终得到一个最佳分割阈值,该算法流程如下:

1) 假设子块图像中背景和裂缝直方图近似服从高斯分布,可以用式(1)、(2)表示:

$$H(j) = a_b e^{-(j-\mu_b)^2/(2\sigma_b^2)} + a_f e^{-(j-\mu_f)^2/(2\sigma_f^2)} \quad (1)$$

$$H(i) = a_b e^{(i-u_b)^2/(2\sigma_b^2)} + E(i) \tag{2}$$

式中: $E_b(i)$ 和 $E_c(i)$ 为随机噪声, 则子块图像的直方图函数为二者的叠加, 即:

$$H(i) = H_b(i) + H_c(i) = a_b e^{(i-u_b)^2/(2\sigma_b^2)} + E_b(i) + a_c e^{(i-u_c)^2/(2\sigma_c^2)} + E_c(i) \tag{3}$$

将 $E_b(i) + E_c(i)$ 用 $E(i)$ 代替得:
$$H(i) = a_b e^{(i-u_b)^2/(2\sigma_b^2)} + a_c e^{(i-u_c)^2/(2\sigma_c^2)} + E(i) \tag{4}$$

2) 令 $\hat{H}(i) = a_b e^{(i-u_b)^2/(2\sigma_b^2)} + a_c e^{(i-u_c)^2/(2\sigma_c^2)}$, 为 $H(i)$ 的估计值, $E(i)$ 为分解残量, 当 $E(i)$ 的能量 $\sum_{i=0}^{255} E(i)^2$

为最小值时, \hat{H} 为 H 的最优估计。最优估计 \hat{H} 的参数可以通过式 (5) 的搜索算法求得, 然后根据这些参数最终求得分割阈值 T 。

$$(a_b^*, u_b^*, \sigma_b^*, a_c^*, u_c^*, \sigma_c^*) = \arg[\min_{\substack{0 \leq a_b \leq 4096, 0 \leq u_b \leq 255, \\ 0 \leq \sigma_b \leq 255, 0 \leq a_c \leq 4096, \\ 0 \leq u_c \leq 255, 0 \leq \sigma_c \leq 255}} (H(i) - a_b e^{-(i-u_b)^2/(2\sigma_b^2)} - a_c e^{-(i-u_c)^2/(2\sigma_c^2)})^2] \tag{5}$$

这是一个 6 自变量的极值搜索算法, 随着搜索步长的细化, 计算量将出现陡增, 明显不适合快速阈值分割。但是可以通过参数估计的方法求出 $a_b, u_b, \sigma_b, a_c, u_c, \sigma_c$ 的估计值, 将这些变量转化为阈值 T 的函数, 从而将多变量的求解问题转化为单变量的求解问题, 而且阈值的变化步长为 1, 这样计算量将大大减小。

3) 假设阈值 T 可以将路面裂缝图像分为背景和裂缝目标两部分, 则 u_b, σ_b 为背景图像的均值和方差, a_b 为背景图像中频度最高的灰度值, 它们的近似估计值分别为:

$$u_b = \frac{\sum_{i=0}^T H(i) \times i}{\sum_{i=0}^T H(i)}, \sigma_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^T H(i) \times (i - u_b)^2}{\sum_{i=0}^T H(i)}}, a_b = H(u_b) \tag{6}$$

同理可得目标图像的均值和方差 u_c, σ_c , 以及目标图像中频度最高灰度值 a_c 的近似估计值:

$$u_c = \frac{\sum_{i=T+1}^{255} H(i) \times i}{\sum_{i=T+1}^{255} H(i)}, \sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=T+1}^{255} H(i) \times (i - u_c)^2}{\sum_{i=T+1}^{255} H(i)}}, a_c = H(u_c) \tag{7}$$

因此式 (5) 的多变量极值求解问题转变为一个单变量极值求解问题, 采用以下搜索方法可以得到 T 的数值解。

4) 令: $f_1(T) = a_b e^{(i-u_b)^2/(2\sigma_b^2)}, f_2(T) = a_c e^{(i-u_c)^2/(2\sigma_c^2)}$, 为了降低式 (5) 的计算复杂度, 可以将平方和函数变为绝对值和函数, 因此建立以下准则函数:

$$f(T) = \sum_{i=0}^{255} |f_1(T) + f_2(T) - H(i)| \tag{8}$$

使准则函数 $f(T)$ 取极小值时的灰度值 T^* , 即是有

最佳分割阈值为:
$$T^* = \arg \min_{0 \leq T \leq 255} f(T) \tag{9}$$

5) 为了进一步减小计算量, 可以缩小阈值 T 的搜索范围, 设阈值搜索上限为 T_{up} , 根据裂缝图像的性质 T_{up} 应满足以下条件:

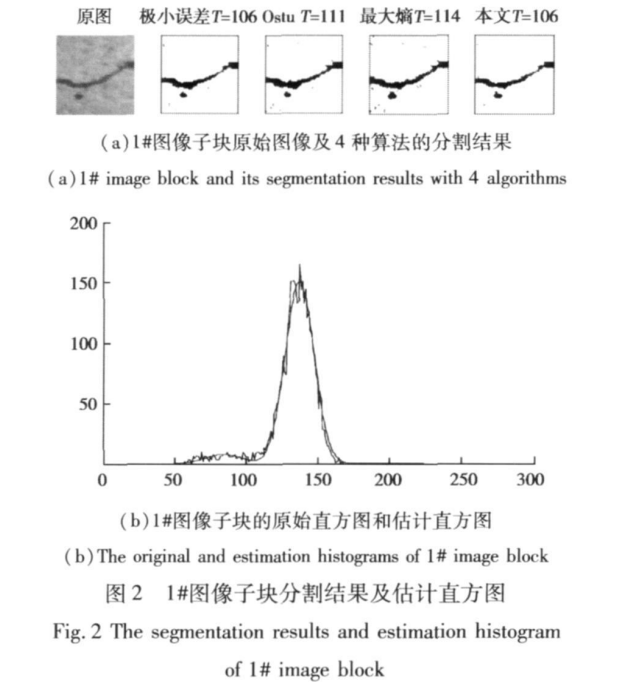
$$\frac{\sum_{i=0}^{T_{up}} H(i)}{\sum_{i=0}^{255} H(i)} \leq 20\% \tag{10}$$

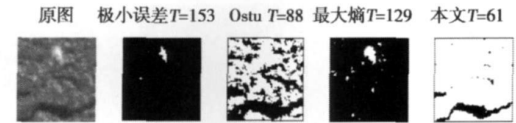
则最佳分割阈值修正为:
$$T^* = \arg \min_{0 \leq T \leq T_{up}} f(T) \tag{11}$$

4 本文算法与经典算法的实验对比

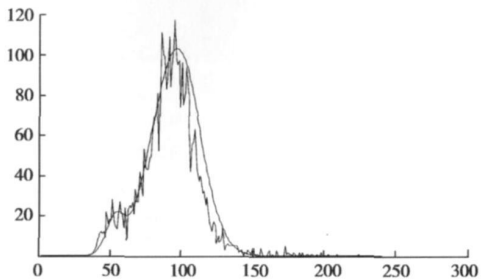
为了证明本文提出算法的有效性、通用性和实用性, 本文选择了 5 幅有代表性的沥青路面子块图像, 与 3 种经典算法: 极小误差法、Ostu 阈值法、最大熵法进行了实验对比, 需要识别的原始图像子块和分割结果如图 2~5 所示, 其中 3 幅图像中含有裂缝, 分别为图 2(a)、图 3(a)、图 4(a), 2 幅图像中不含裂缝, 分别为图 5(a) 和图 6(a), 识别的目标为图像中的较低灰度的裂缝区域。采用主观评价的方式将 4 种算法的分割结果进行打分, 5 分代表“优秀”, 4 分代表“良好”, 2 分代表“一般”, 0 分代表“失败”。4 种算法的性能对比如图 7 所示, 从图中可以看出本文算法的总体分割效果要明显优于其余 3 种经典算法的分割效果。

图 2(b)~6(b) 是图像子块的原始直方图和本文算法估计的直方图, 从图中可以看出原始直方图和估计直方图有极高的相似性。





(a) 2#图像子块原始图像及 4 种算法的分割结果
(a) 2# image block and its segmentation results with 4 algorithms

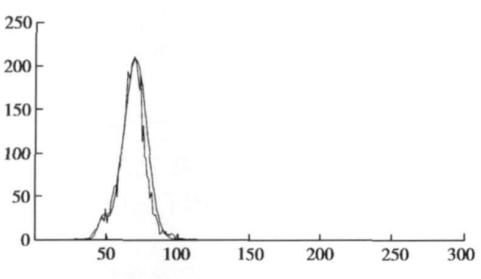


(b) 2#图像子块的原始直方图和估计直方图
(b) The original and estimation histograms of 2# image block

图 3 2#图像子块分割结果及估计直方图
Fig. 3 The segmentation results and estimation histogram of 2# image block

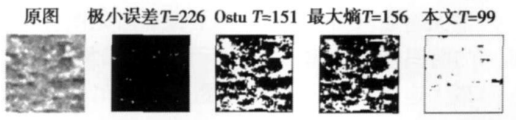


(a) 3#图像子块原始图像及 4 种算法的分割结果
(a) 3# image block and the segmentation results with 4 algorithms

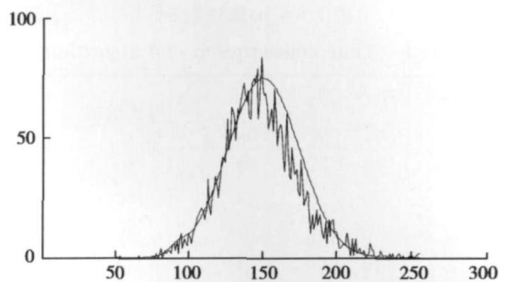


(b) 3#图像子块的原始直方图和估计直方图
(b) The original and estimation histograms of 3# image block

图 4 3#图像子块分割结果及估计直方图
Fig. 4 The segmentation results and estimation histogram of 3# image block



(a) 4#图像子块原始图像及 4 种算法的分割结果
(a) 4# image block and the segmentation results with 4 algorithms

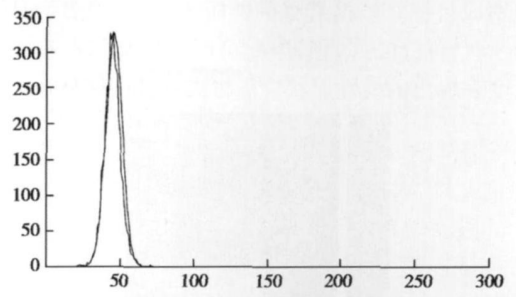


(b) 4#图像子块的原始直方图和估计直方图
(b) The original and estimation histograms of 4# image block

图 5 4#图像子块分割结果及估计直方图
Fig. 5 The segmentation results and estimation histogram of 4# image block



(a) 5#图像子块原始图像及 4 种算法的分割结果
(a) 5# image block and the segmentation results with 4 algorithms



(b) 5#图像子块的原始直方图和估计直方图
(b) The original and estimation histograms of 5# image block

图 6 5#图像子块分割结果及估计直方图
Fig. 6 The segmentation results and estimation histogram of 5# image block

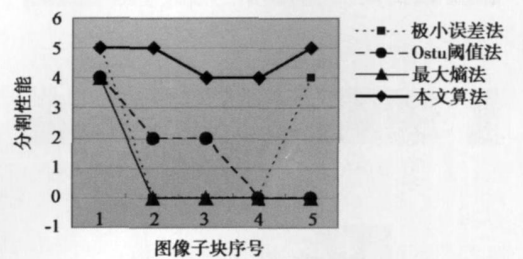


图 7 4 种算法性能对比
Fig. 7 The performance comparison of 4 algorithms

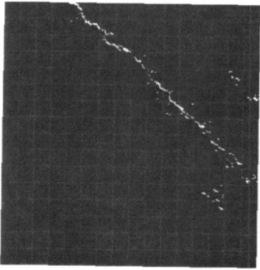
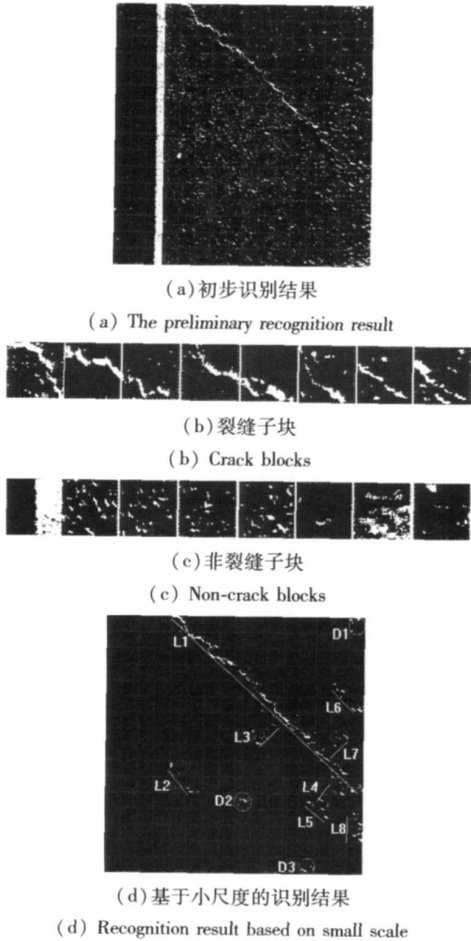
为了验证本文算法的实用性, 本文对 4 种算法的时间复杂度进行了对比, 实验硬件环境为 P4 1.6G 的 CPU 760M 内存的笔记本计算机, 软件环境为 MATLAB7.1, 算法耗时如表 1 所示, 其中 Ostu 算法复杂度最低, 其次是极小误差法, 本文算法与最大熵法相当。

表 1 4种算法耗时
Table 1 Time consumption of 4 algorithms

图像子块	极小误差法	OSTU 阈值法	最大熵法	本文算法
1#	10	< 1	50	50
2#	10	< 1	40	60
3#	10	10	20	20
4#	10	10	40	40
5#	10	< 1	20	10

5 基于裂缝形状特征分析的后续处理

图 8(a)是图 1 经过本文算法分割的结果,图 8(b)和图 8(c)是图 8(a)中裂缝子块和非裂缝子块的放大图像,从图中可以看出裂纹图像子块均被识别出来,但是少量非裂纹图像子块也同样被保留下来,这是因为部分背景区域图像子块中存在较多的低灰度像素,并且这些像素的坐标分布在空间上不连续,而本文的分割算法是基于直方图的,对目标空间信息不敏感,因此会将这些噪声误识别成目标。根据裂缝的性质 3 可知:裂缝的具有明显的线状特征和方向性,因此可以根据裂缝在小尺度和大尺度表现出的线性形状特征将二者进行区分。



(e) 最终识别结果
(e) The final recognition result

图 8 本文算法识别结果

Fig. 8 The recognition result of the proposed algorithm

5.1 基于小尺度线状特征的识别

形状是描述图像内容的一个非常重要的基本视觉特征,它可以认为是物体在某个角度下的光学投影,形状最重要的性质就是具有旋转、缩放、平移不变性,它经常被认为是物体属于某一模式类别的原型,因此被广泛应用于光学字符识别、医学图像处理^[13]、视频修复、图像检索、指纹识别等领域^[16]。文献[17]利用小生境遗传算法提取路面破损图像中的非参数曲线特征来实现裂缝的定位,该算法计算量相当大,而且只能检测图像中的主曲线,不能对多曲线进行检测。文献[18]通过回归类的新概念,讨论了识别图像线状模式的混合模型方法,给出了不同模型误差情形下,估计模型参数的 EM 算法递推公式,该算法计算量大,而且未应用于实际的图像分析。

本文根据小尺度条件下裂缝子块的连通域属性和形状属性选取了以下 6 个形状因子:

- 1) 连通域面积和 S : 指子块二值化图像子块中所有连通域的面积和,裂缝像素的面积一般占整个子块图像的 2% 至 20%, 不在这个区间的子块可以认为是噪声子块;
- 2) 连通域的个数 n : 反映了二值化后像素的聚集程度,含有裂缝的子块像素聚集性较好,因此连通域个数较少,而噪声子块则相反;
- 3) 连通域面积平均值 $mean$: 指子块二值化图像中连通域面积的平均值,该值反映了二值化后像素的分散程度;
- 4) 最大连通域面积 max : 指子块二值化图像中最大连通域的面积,该值反映二值化后像素的聚集程度;
- 5) 最大连通域长短轴比 ρ : 指子块二值化图像中最大连通域的长轴 l 与短轴值 b 之比,长轴指子块二值化图像中最大连通域的两个像素间最长欧式距离,短轴是指长轴的法线与最大连通域的割线长度,该比值反映裂缝的线状特征;
- 6) 最大连通域的圆形度 θ : 指子块二值化图像中最大连通域的面积与最小外接圆面积之比,该比值反映裂

缝的线状性特征;

$$\theta = \frac{4S}{\pi E}$$

采用以上 6 个形状因子组成裂缝子块形状的特征向量 $X = \{s, n, \text{mean}, \max, \rho, \theta\}$, 构建 BP 神经网络, 并采用样本子块对构建的网络进行训练, 然后根据训练的网络参数对两种子块模式进行分类, 去掉非裂缝子块图像即可得到如图 8(d) 所示的识别结果。

5.2 基于大尺度线状特征的识别

如图 8(d) 所示, 经过小尺度形状识别后的二值化图像中仍存在少量的误识别图像子块, 这些子块俗称为“野点”子块, 该子块的定义为: 被误判为路面破损子块的非裂缝子块, 在整个图像模式值矩阵中连续性极差, 大多为孤立点^[12]。产生“野点”子块的主要原因是由于某些噪声子块在小尺度条件下与裂缝子块具有一样的模式, 因此分类器误将其识别为裂缝子块。但是“野点”子块在大尺度条件下不具备裂缝区域的形状特征, 可以通过以下几个形状特征将其剔除:

- 1) 裂缝子块集合的连续长度;
- 2) 裂缝子块集合的线状性;
- 3) 裂缝子块集合主方向与最大连通域主方向的一致性。

例如: 图 8(d) 中 D1、D2、D3 为 3 个孤立图像子块, 可以根据特征 1 删除; I4、I8 线状性较差, 可以根据特征 2 删除; I2、I3、I7 的子块主方向与集合主方向不一致, 可以根据特征 3 删除。通过剔除“野点”子块后, 得到如图 8(e) 所示的最终识别果。

6 结 论

通过本文的研究可以得出如下结论:

- 1) 由于沥青路面图像具有不均匀图像的特点, 采用子块分析方法 (grid cell analysis GCA), 用局部最优阈值对图像进行二值化的效果要优于全局阈值分割的效果。
- 2) 根据裂缝子块中像素灰度分布的先验知识, 采用直方图估计的方法可获取每个子块图像的最优分割阈值, 其分割效果要明显优于极小误差法、Ostu 阈值法、最大熵法等经典算法, 而且时间复杂度与最大熵法相当。
- 3) 根据裂缝区域在小尺度条件下的线状特征, 采用形状分析的方法可以快速准确地将裂缝子块和非裂缝子块 2 种模式进行分类。
- 4) 在大尺度条件下, 根据裂缝子块集合的连续长度、线状性和方向一致性可有效删除二值化图像中的“野点”子块。
- 5) 由于块状裂缝和路面龟裂在大尺度条件下不具备线状特征, 因此本文算法在删除其“野点”子块时会失

效。本文下一步的研究工作是如何对块状裂缝和路面龟裂进行快速自动识别。

参考文献

- [1] TSAI Y, WU M, ADAMSE D. GPS/GIS enhanced road inventory system [J]. Annual TRB Conference, 2003.
- [2] 陈勇, 黄席樾, 唐高友, 等. 基于机器视觉的车道检测与二维重建方法 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(7): 1205-1210.
CHEN Y, HUANG X Y, TANG G Y, et al. Lane detection and two dimensional rebuilding based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(7): 1205-1210.
- [3] 周绍光, 黎瑾慧, 安如. 利用一维纹理特征值及 MRF 模型分割道路影像 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 2105-2111.
ZHOU SH G, LI J H, AN R. Road image segmentation using one dimensional texture information and MRF model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 2105-2111.
- [4] CHENG H D, SHI X J, GLAZIER C. Real time image thresholding based sample space reduction and interpolation approach [J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(4): 264-272.
- [5] WANG K C P, LI Q, GONG W G. Wavelet based pavement distress image edge detection with a trous algorithm [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2024: 73-81.
- [6] HUANG Y X, XU B G. Automatic inspection of pavement cracking distress [J]. Journal of Electronic Imaging, 2006, 15(1): 01301-013017.
- [7] 张宏, 英红. 沥青路面裂缝图像识别技术研究进展 [J]. 华东公路, 2009(4): 81-84.
ZHANG H, YING H. Development of research on image cracks recognition in asphalt pavement [J]. East China Highway, 2009(4): 81-84.
- [8] 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 J, SHA AIM, SUN ZH Y, et al. Pavement crack automatic recognition based on phase grouping method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(2): 39-42.
- [9] LIU X L, LI Q Q. An algorithm for pavement crack detection based on multiscale space [J]. Proc SPIE, 2006, 6419: 15-20.
- [10] 王华, 朱宁, 王祁. 公路路面分形纹理特征分析和分类 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(6): 816-818.
WANG H, ZHUN, WANG Q. Fractal features analysis

- and classification for texture of pavement surfaces[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(6): 816-818
- [11] SORNCHAREAN S, PHIPHOMONGKOL S. Crack detection on asphalt surface image using enhanced grid cell analysis[C]. 4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test & Applications, Hong Kong, 2008, 49-54
- [12] 初秀民, 严新平, 陈先桥. 路面破损图像二值化方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(28): 161-165
CHU X M, YAN X P, CHEN X Q. Study of pavement surface distress image binarization[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(28): 161-165
- [13] 储江伟, 初秀民, 王荣本, 等. 沥青路面破损图像特征提取方法研究[J]. 中国图象图形学报 A 辑, 2003, 8A(10): 1211-1217
CHU J W, CHU X M, WANG R B, et al. Research on asphalt pavement surface distress image feature extraction method[J]. Journal of Image and Graphics A, 2003, 8A(10): 1211-1217
- [14] 邹丹平, 冯涛, 李咸伟, 等. 基于 EM 的直方图逼近及其应用[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(11): 1458-1461
ZOU D P, FENG T, LI X W, et al. Histogram approximation based on expectation maximization algorithm and its application[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(11): 1458-1461
- [15] 雷印胜, 王明时, 秦然. 基于形状的 CT 图像断层间数据插值算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 21(3): 23-27
LEI Y S, WANG M S, QIN R. Data Interpolation Algorithm between the Slices of CT Image Based on Shape[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 21(3): 23-27
- [16] ANDAL F A, MIRANDA P A V, TORRES R D A S, et al. Shape feature extraction and description based on tensor scale[J]. Pattern Recognition, 2010, 43: 26-36
- [17] WEI W, WANG Q, WANG H, et al. The feature extraction of nonparametric curves based on niche genetic algorithms and multi-population competition[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(10): 1483-1497
- [18] 马江洪, 葛咏. 图像线状模式的有限混合模型及其 EM 算法[J]. 计算机学报, 2007, 30(2): 28-34
MA J H, GE Y. The Finite mixture model and its EM algorithm for line-type image patterns[J]. Chinese Journal of Computer, 2007, 30(2): 28-34

作者简介



徐志刚, 2002 年于长安大学获得学士学位, 2005 年于长安大学获得硕士学位, 现为长安大学信息学院博士研究生, 主要研究方向为交通图像处理与分析。

E-mail: xuzhigang@chd.edu.cn

Xu Zhigang received B.Sc. degree in 2002 and master degree in 2005 both from Chang'an University and now is a Ph.D. candidate in Chang'an University. His research interests include traffic image processing and analysis.



赵祥模, 1987 年于重庆大学获得学士学位, 2003 年于长安大学获得硕士学位, 2006 年于长安大学获得博士学位, 现为长安大学信息工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为多源异构交通信息智能检测与融合技术。

E-mail: xmzha@chd.edu.cn

Zhao Xiangmo received B.Sc. degree from Chongqing University in 1987, received master degree in 2003 and Ph.D. degree in 2006 both from Chang'an University. He is a professor and Ph.D. supervisor in Chang'an University. His research interests include heterogeneous traffic information intelligent detection and fusion.