

高速公路路面裂缝识别算法研究*

马荣贵¹ 徐 琨^{1,2} 刘飞飞¹

(1. 长安大学信息工程学院 西安 710064; 2. 陕西省道路交通智能检测与装备工程技术研究中心 西安 710064)

摘 要 经过研究给出了不均匀光照的路面裂缝图像识别的详细算法。算法采用多窗口中值滤波进行图像平滑,既能去除图像的噪声点,又较好地保留了裂缝的边缘信息;使用背景子集图像插值校正法进行灰度校正,有效地克服了不均匀成像对后期图像分割的影响;采用 otsu 阈值分割、形态学去噪及连通区域标记完成裂缝图像分割;选用连通区域个数、投影特征和分布密度 3 个参数完成裂缝分类;最后提取裂缝长度、宽度和破损面积等裂缝参数。实验结果显示分类准确率为 94%,线状裂缝长度误差均值为 7.2%,宽度误差均值为 11.3%,非线状裂缝的面积误差均值为 9.6%,表明这一方法有效、可靠。

关键词 裂缝检测;灰度校正;图像分割;参数计算

中图分类号:TP391.41 文献标志码:A doi:10.3963/j.issn.1674-4861.2014.02.018

0 引 言

随着我国高速公路通车里程的不断增长,高速公路已成为社会经济发展的重要基础设施。由于行车荷载和自然因素的作用,路面车辙、松散、裂缝等病害日益严重。传统的人工检测效率低、劳动强度大、检测速度慢、误差也比较大。因此不同程度、不同类型的路面病害的自动检测及信息管理已成为日益重要的工作。随着光学技术和计算机技术的发展,图像处理方法得到了越来越广泛的应用。国内外学者对基于数字图像处理的路面裂缝识别问题进行了广泛深入的研究。

利用图像中的灰度统计特性进行裂缝提取是应用最广的 1 类方法^[1-2]。Xu 等^[1]将图像分为若干个 8×8 的单元,依据单元内像素灰度值变化将单元分为无裂缝和有裂缝,将有裂缝单元作为进一步判断裂缝的种子,依据种子与邻域像素的对比度剔除非种子单元,从而获得裂缝信息。徐志刚等^[2]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,利用 2 个高斯函数的交叉点作为每个子块图像的最优分割阈值,通过该阈值对整幅图像进行二值化,采用形状分析方法定位裂缝。裂缝边界一般都有较强的边缘性,使用合适的边缘检测算子可检测出图像中灰度有突变

的地方。李刚等^[3]针对光照不均的路面裂缝图像,提出 1 种基于 Sobel 算子和最大熵法的图像分割算法,采用长线段与原图进行操作,判断黑色像素所占比例的方法去除图像孤立噪声点,获得裂缝的准确信息。用于组成道路的石子、沥青以及石子与石子之间的间隔组成了路面的纹理,而当出现病害时其纹理将表现为不同的特性。Paquis 等^[4]研究了路面石子与沥青的随机纹理和裂缝纹理的差异性,采用 1 种类似于经典开运算的、基于二叉树的多分辨率形态学方法对图像进行非线性变换,依据不同分辨率的灰度共生矩阵区分不同类型的路面纹理。除此之外,小波理论、形态学、模糊集理论等也陆续被应用于裂缝图像分割中^[5-8]。

笔者对路面裂缝图像自动识别进行了深入研究,给出了 1 套完整的裂缝图像识别算法。首先对采集的原始图像进行图像增强处理,接着通过灰度校正解决裂缝图像光照不均匀的问题,然后对校正后的灰度图像进行阈值分割、平滑、填充及去噪。最后识别出裂缝的类型,并计算出裂缝长度、宽度和外接矩形面积等参数。

1 裂缝图像处理关键算法

1.1 灰度校正

笔者研究的路面图像采用线阵 CCD 摄像机

收稿日期:2013-11-20 修回日期:2014-03-01

* 交通运输部科技项目(批准号:2012 318 49A 70)、中央高校基金项目(批准号:CHD2010JC110)资助

第一作者简介:马荣贵(1967—),博士,教授,研究方向:路面测试技术、图像处理和智能仪器。E-mail: xkun@chd.edu.cn

获得,由于成像系统本身的特点以及成像时的光照不均,路面图像具有中间亮、周围暗的亮度分布不均的特点,这给图像分割带来很大的困难。笔者采用背景子集图像插值校正方法,将图像分为若干个 $N \times N$ 大小的块,在 $N \times N$ 个像素中,取出 $\frac{N^2}{2}$ 个最低灰度像素 $R(x, y)$,则背景子集像素

$P(x, y) = \frac{N^2}{2} \sum_{i=1}^{\frac{N^2}{2}} R(x, y)$ 。由 $P(x, y)$ 插值计算得到背景图像 I_0 ,灰度校正后的图像 I'_1 用乘系数的方法得到,如式(1)所示。

$$I'_1(x, y) = I_1(x, y) \times \frac{I_{0\max}}{I_0(x, y)} \text{ 或 } I'_1(x, y) = I_1(x, y) \times \frac{255 - I_{0\max}}{I_0(x, y)} \quad (1)$$

式中: $I_{0\max}$ 为 I_0 中的灰度最大值; I_1 为原始不均匀光照图像。

在进行灰度校正之前,需要进行去噪处理。根据裂缝边缘的方向性,依次采用左中右、上中下、左上中右下和右上中左下 4 个窗口对原始灰度图像进行中值滤波处理。不仅消除了噪声还保留了边缘特性。图 1 给出了中值滤波和灰度校正的结果图。

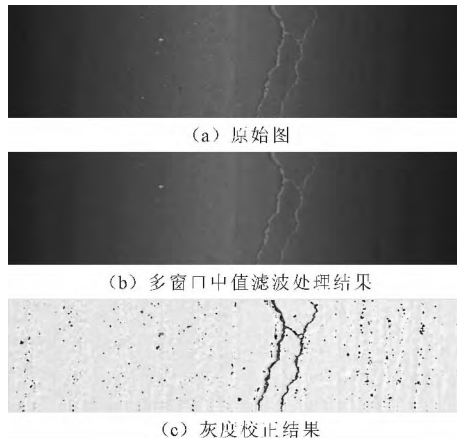


图 1 裂缝 1 灰度校正结果图

Fig. 1 Grey adjustment result of Crack 1

1.2 阈值分割及后处理

采用迭代阈值法对校正后的裂缝图像进行全局 otsu 阈值分割,结果见图 2。采用二值形态学填充裂缝孔洞。由于对称结构元素对图像的边缘影响最小,选用十字形的结构元素对图像进行闭运算。十字形结构元素见图 3,闭运算的结果见图 4(a)。由图 4(a)可见,经过闭运算处理,弥合了裂缝,且裂缝的位置和形状不变。裂缝图像中存在一些孤立噪声点,这些噪声点影响到后续裂

缝分类以及相关参数的提取等工作,需进一步消除这些孤立噪声点。笔者采用连通区域序贯标记法标记,如果每个连通区域面积小于某一阈值,则删除该连通区域。效果图如图 4(b)所示。图 5 给出了多幅裂缝图像的处理结果。可以看出笔者采用的方法能够准确地分割出路面裂缝。

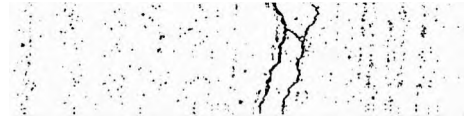


图 2 迭代阈值分割结果图

Fig. 2 Result of iterative threshold segmentation

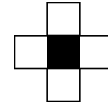


图 3 对称结构元素

Fig. 3 Symmetrical structure element

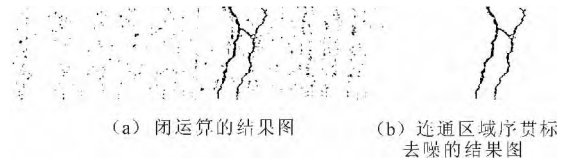


图 4 二值图像后处理结果图

Fig. 4 Post-procedure result of binary image

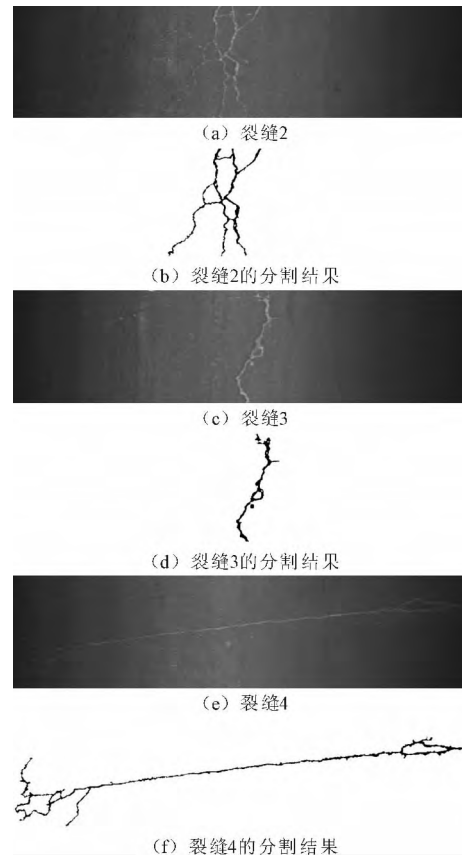


图 5 不同类型的裂缝分割结果

Fig. 5 Segmentation results of different types of cracks

2 裂缝图像识别算法

2.1 裂缝分类

路面裂缝类病害主要包括横向裂缝、纵向裂缝、网状裂缝和块状裂缝。笔者依据连通区域个数、投影特征、分布密度等参数区分裂缝类型。

连通区域个数可将裂缝分为 2 类:线状裂缝(包括横向裂缝和纵向裂缝)和非线状裂缝(包括网状裂缝和块状裂缝)。根据连通区域个数与设定的阈值进行比较,若连通区域个数大于该阈值,则判定该裂缝图像为非线状裂缝,若连通区域个数小于该阈值,则判定该裂缝为线状裂缝。由于路面裂缝图像一般噪音点较多,结合多次实验结果误差分析,连通区域的个数的阈值设定为 10 较为合适。

由于横向裂缝和纵向裂缝具有较强的方向,在不同方向上的投影具有较大差异:①横向裂缝水平投影向量 X 中有一明显峰值;②纵向裂缝垂直投影向量 Y 中有一明显峰值。首先求取路面图像水平、垂直投影向量 X 和 Y 。然后计算 X 和 Y 最大 10 阶差分 X_{\max}, Y_{\max} 。对于横向裂缝, Y_{\max} 较小, X_{\max} 较大;纵向裂缝则 Y_{\max} 较大, X_{\max} 较小。利用 X_{\max} 和 Y_{\max} 可以较好地区分出横向裂缝和纵向裂缝。裂缝的分布密度等于裂缝区域像素总数和裂缝区域的外接矩形面积的比值。网状裂缝的分布密度较小,块状裂缝分布密度较大。在计算外接矩形面积时,需要消除那些与真实裂缝目标距离较远的伪裂缝。裂缝区域像素总数记为 sum ,算法如下。

步骤 1. 计算所有裂缝像素的几何质心坐标 (X_{cen}, Y_{cen}) 。

$$X_{cen} = \frac{1}{sum} \sum_{I(i,j)=1} j, Y_{cen} = \frac{1}{sum} \sum_{I(i,j)=1} i \quad (2)$$

步骤 2. 以 (X_{cen}, Y_{cen}) 为中心,以 $2r+1, 8r+1$ 为长方形(r 初始化为 10)的宽度和长度,计算在长方形区域内的裂缝像素数目 $sumr$ 占裂缝像素总数 sum 的百分比 P ,如 $P \leq 80\%$,转步骤 3;否则转步骤 4。

步骤 3. 令 $r=r+10$,并转步骤 2。

步骤 4. 计算裂缝的分布密度。

本文中, d 大于 0.035 的视为块状裂缝, d 小于 0.035 视为网状裂缝。表 1 给出了不同类型的裂缝特征值的计算结果。依据连通区域个数、水平投影向量、垂直投影向量和裂缝分布密度可区分出不

同类型裂缝:首先根据连通区域个数区分线状裂缝和非线状裂缝;若是非线状裂缝,依据分布密度区分网状裂缝和块状裂缝;若是线状裂缝,依据水平、垂直投影向量区分横向裂缝和纵向裂缝。

表 1 不同类型的裂缝特征值计算结果

Tab. 1 Feature calculation results of different types of cracks

类型	幅数	连通区域 个数均值	均值/ 像素	均值/ 像素	均值
横向裂缝	54	1.3	17	98	0.013
纵向裂缝	66	1.2	59	19	0.020
网状裂缝	35	14.2	19	17	0.030
块状裂缝	40	17.9	60	118	0.037

2.2 参数计算

根据后期的公路路面养护施工要求,需要依据裂缝类型计算其相关参数。非线状裂缝计算其外围面积,线状裂缝计算其长度和宽度。

线状裂缝首先需要进行细化,得到裂缝的骨架,各段骨架的长度和即为裂缝的长度。每段骨架的长度 L_d 通过相邻 2 个像素点得到,见式(3)。

$$L_d = \{[(X_i - X_{i+1})S_h]^2 + [(Y_i - Y_{i+1})S_v]^2\}^{1/2} \quad (3)$$

式中: $(X_i, Y_i), (X_{i+1}, Y_{i+1})$ 是相邻的 2 个像素; S_h 为水平方向比例因子; S_v 为垂直方向比例因子。

在裂缝宽度的计算过程中,计算裂缝的最大宽度。横向裂缝和纵向裂缝的宽度计算方法略有不同,但原理相同。现说明横向裂缝的最大宽度计算方法:

1) 求出二值裂缝图像水平投影值 X 。

2) 设在坐标点 i 处的投影值为 $pro[i]$, $pro[i]$ 大于 0。

3) 遍历二值裂缝细化图像,选取 $i(i, x)$ 点及其相邻点 $j(j, y)$, 计算此处裂缝的倾角 α 。

$$\cos \alpha = \frac{|i - j|}{\sqrt{(i - j)^2 + (x - y)^2}} \quad (4)$$

4) 计算裂缝的宽度值 $W[i]$ 。

$$W[i] = pro[i] \times \cos \alpha \times S_v \quad (5)$$

5) 对各个投影点为横坐标的裂缝点处的宽度都进行上述计算,最大值即为横向裂缝的最大裂缝宽度。

网状裂缝或块状裂缝需要求取裂缝区域外接矩形的面积。首先从图像最上面开始行遍历,当遍历到裂缝像素时,则外接矩形上边界等于该像素点的行号。然后从图像最下面开始行遍历,当遍历到裂缝像素时,外接矩形下边界等于该像素

点的行号。同理,外接矩形左右边界通过列遍历确定。

3 系统性能测试

笔者在 vc6.0 环境下,设计开发了 1 个高速公路路面裂缝检测、识别系统。图像规格为 $4\ 080 \times 1\ 000 \times 256$,系统标定 $S_v = 2\text{ mm/像素}$, $S_h = 0.81\text{ mm/像素}$ 。选用 400 幅路面裂缝图像验证本文算法。实验结果显示分类准确率为 94%。在误判的 24 个实例中,将网状裂缝误判为线状裂缝的有 12 例,占 50%;将线状裂缝误判为网裂的有 10 例,占 42%;二值化失败的有 2 例,占 8%;而纵横裂缝之间没有产生误判。线状裂缝长度误差均值为 7.2%,宽度误差均值为 11.3%,非线状裂缝的面积误差均值为 9.6%。文中 4 个裂缝的计算参数依次为:裂缝 1,实测长度 2 552 mm,计算长度 2 485 mm,实测宽度 48 mm,计算宽度 52 mm,裂缝类型:纵向裂缝;裂缝 2,实测面积 $1\ 324\ 575\text{ mm}^2$,计算面积 $1\ 321\ 479\text{ mm}^2$,裂缝类型:块状裂缝;裂缝 3,实测长度 2 630 mm,计算长度 2 714 mm,实测宽度 4 mm,计算宽度 5 mm,裂缝类型:纵向裂缝;裂缝 4,实测长度 3 573 mm,计算长度 3 686 mm,实测宽度 5 mm,计算宽度 3 mm,裂缝类型:横向裂缝。图 6 给出了部分裂缝的参数计算结果。

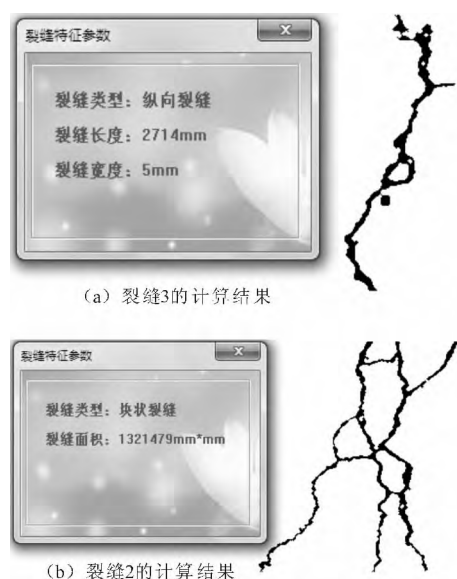


图 6 部分裂缝参数计算结果

Fig. 6 Parameter calculation result of partial cracks

4 结束语

研究了不均匀光照的路面裂缝图像处理算

法,包括去噪、复原、二值化及后处理、特征提取、分类和参数计算等。根据裂缝边缘的方向性,依次采用 4 个不同窗口对原始灰度图像进行中值滤波,最大程度地保留了裂缝的边缘信息。使用背景子集图像插值校正法进行灰度校正,有效地克服了不均匀成像对后期图像分割的影响。采用十字形的结构元素对分割后的二值裂缝图像进行闭运算,弥合了裂缝中的空隙,且保持了裂缝的位置和形状。依据连通区域个数、投影特征、分布密度等参数判别裂缝类型。最后分别计算出不同类型的裂缝参数。实验结果表明,笔者所用方法可靠、实用、有效。

参考文献

- [1] Xu B, Huang Y. Development of an automatic pavement surface distress inspection system[R]. Austin: Technical Report FHWA/ TX-05/7-4975-1, University of Texas at Austin, 2003.
- [2] 徐志刚,赵祥模,宋焕生,等. 基于直方图估计和形状分析的沥青路面裂缝识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2260-2266.
- [3] 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): 1045-1048.
- [4] Paquis S, Legeay V, Konik H J. Road surface textures classification using opening-based image processing[C] // The 19th International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Amsterdam, Netherlands: ISPRS, 2000: 685-691.
- [5] 闫茂德,伯绍波,李 雪,等. 一种自适应模糊的局部区域图像增强算法[C] // Proceedings of the 26th chinese control conference, Wunan, China: TCCT, 2007: 308-311.
- [6] Tanaka N, Uematsu K. A crack detection method in road surface images using Morphology[C] // Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Chiba, Japan: MVA, 1998.
- [7] Subirats, Dumoulin P, Legray J, et al. Automation of pavement surface crack detection using the continuous wavelet transform[C] // IEEE International Conference on Image Processing, Atlanta, USA IEEE, 2006: 3037-3040.
- [8] 孙朝云,沙爱民,谢昌荣. 路面裂缝无损检测图像采集系统设计[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(5): 106-109.

