

一种基于形态学的路面裂缝图像检测与分析方法

闫茂德, 伯绍波, 贺昱曜

(长安大学信息工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 基于数学形态学的原理, 提出了一种路面裂缝图像检测与分析的新方法。该方法通过 4 种结构元素的中值滤波算法增强路面灰度图像, 并利用形态学梯度算子、闭合算子进行边缘检测和裂缝空隙弥合, 能够有效地检测出裂缝边缘, 并保持边缘的平滑性。在此基础上, 利用改进的腐蚀算子细化裂缝并获取其骨架, 通过计数的方法得到裂缝的长度和宽度。实验结果表明, 该方法有抗噪性能好、边缘提取能力强、路面裂缝特性分析精确和计算量较小等优点。

关 键 词: 计算机应用; 裂缝检测; 形态学; 图像处理

中图分类号: TP 391.41

文献标识码: A

文 章 编 号: 1003-0158(2008)02-0142-06

A Method of Image Detection and Analysis for Pavement Crack Based on Morphology

YAN Mao-de, BO Shao-bo, HE Yu-yao

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

Abstract: In order to detect the edge efficiently and get the characteristics of pavement cracks exactly, a novel image processing method based on the theory of the morphology is presented for the pavement crack detection and analysis. The method employs median-filter algorithm with the four structural elements to enhance the gray-scale pavement images, and combines morphology-gradient operator with close operator to extract the crack edges and fill the gaps of the cracks. After the above processing, the presented method utilizes the improved erosion operator to thin the cracks and obtain the skeletons, and then gets the length and width of cracks by counting. Experimental results indicate that the proposed method has good performance of noise reduction, strong ability of extracting edges, exact analysis of pavement crack and fewer calculations.

Key words: computer application; crack detection; morphology; image processing

收稿日期: 2006-11-29

基金项目: 特殊地区公路工程教育部重点实验室资助项目 (KLP200501)

作者简介: 闫茂德 (1974-), 男, 陕西澄城人, 副教授, 主要研究方向为数字图像处理和非线性系统控制等。

图像最基本的特征是边缘,它是图像分割所依赖的最重要的特征,也是纹理特征的重要信息来源和形状特征的基础。对于路面灰度裂缝图像,一方面由于裂缝的方向性比较复杂,另一方面图像噪声比较严重,实现理想的噪声滤波算法、边缘检测算法以及图像分割算法等,都是高等级公路路面裂缝图像检测中的难点。

在高等级公路路面裂缝的图像检测中^{[1],[2]},传统滤除噪声的方法主要是均值滤波和中值滤波,这些算法虽然在某些领域内处理效果很好,但是不能有效地滤除叠加在路面灰度图像中的多种噪声。路面裂缝图像检测中应用的边缘检测算法,主要有 Prewitt 算子^[3]、8 方向模板 Sobel 算子^[4]等,这些算法虽然实现比较简单,处理速度较快,但对路面灰度图像的处理效果不太理想;多尺度结构元素的形态学边缘检测算法^{[5],[6]}在一些领域中检测效果较好,但是实现复杂,处理速度较慢,不能满足路面裂缝检测的实时性。文中将形态学原理^{[7],[8]}引入到路面裂缝图像检测中,通过构造多种结构元素进行中值滤波去噪,再简单地将腐蚀、膨胀算子相结合进行边缘检测,然后采用闭合算子弥合裂缝空隙,能够很好地获得路面裂缝的边缘,最后改进腐蚀算子细化裂缝、获取其骨架,通过计数的方法能较精确地计算出裂缝的长度和宽度,为后面的路面裂缝的分析和处理提供技术基础。

1 多结构中值滤波算法

路面灰度图像在经过线阵 CCD、图像采集卡,到达存储器,在处理之前的一系列形成、传输、接收和处理的过程中,不可避免地存在着外部干扰和内部干扰,存在着一定程度的噪声干扰。这些噪声一般都叠加在有用的路面灰度图像数据中,严重恶化了图像的质量、使图像模糊、特征淹没等,对分析带来困难。因此,滤除噪声,恢复原始图像是路面裂缝检测中的一个重要内容。滤除图像噪声的工作称为图像平滑或滤波。平滑的目的有两个:改善图像质量和抽出对象特征。图像平滑常用的方法是采用均值滤波和中值滤波。

均值滤波往往不只是把噪声滤除,还常把图像的边缘模糊,因而造成视觉上的失真,如果目

的只要把噪声滤除,并且要保护好图像的边缘,则中值滤波是比较好的选择。但一般的中值滤波仅采用单一的模板(如 3×3 大小模板),考虑相邻的 8 连通区域的像素点,对中心点进行取模板的中值处理,有很大的局限性。

为了更好地对噪声进行滤除,将形态学中的结构元素引入到中值滤波中来。如图 1 所示,其原理为:采用 4 种形状的 3×3 结构元素对原始灰度图像进行依次滤波处理。由于采用了多种结构元素,因而可以对多种噪声进行有效地滤除。

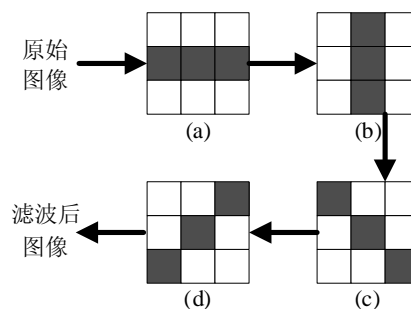


图1 多结构中值滤波

4 种结构元素分别为: $B_1 = ((-1,0),(0,0),(1,0))$, $B_2 = ((0,-1),(0,0),(0,1))$, $B_3 = ((-1,-1),(0,0),(1,1))$, $B_4 = ((-1,1),(0,0),(1,-1))$, 其中 $(0,0)$ 是 3×3 结构元素的中心像素点。其算法描述为:

首先将结构元素 B_1 在图像 f 中逐像素点移动,计算出与 B_1 对应的像素点 $f(-1,0)$ 、 $f(0,0)$ 、 $f(1,0)$ 三者的灰度中值为 u , 作 $f(0,0) = u$ 处理,再依次采用结构元素 B_2 、 B_3 和 B_4 作相同的处理。

2 形态学边缘检测算法

对灰度图像进行膨胀得到结果与进行腐蚀得到的结果相减得到的图像称为形态学梯度。它能使处理的灰度图像中灰度级的跃变更为急剧。与空域梯度算子相比较,用对称结构元素得到的形态学梯度受边缘方向的影响最小。因而,将形态学梯度边缘检测算法应用到路面裂缝检测当中,能得到理想的裂缝边缘特性。

对路面裂缝的特性进行分析,构造全方位的结构元素 b ($b = ((-1,0),(0,-1),(0,0),(0,1),(1,0))$, 如图 2(b)所示)对路面图像 f 进行膨胀和腐蚀处理,并求出形态学的梯度,对路面图像进行边缘

检测, 其原理为:

全方位膨胀处理方法是: 将结构元素 b 在原图像 f 中移动, 如果 b 的中心点 $b(0,0)$ 落在 f 的裂缝区域 (定义为 f_c), 则裂缝区域该点的四周就为设为黑, 如下式

$$f(-1,0) = f(0,-1) = f(0,1) = f(1,0) = 0 \quad (1)$$

全方位腐蚀处理方法与膨胀处理方法刚好相反: 将结构元素 b 在原图像 f 中移动, 如果 b 的所有像素点均落在 f 的裂缝区域 f_c , 则裂缝区域该点保留, 否则将该点去掉, 如下式

$$\begin{cases} f_c(0,0) = 0, & b \in f_c \\ f_c(0,0) = 255, & b \notin f_c \end{cases} \quad (2)$$

将膨胀处理的图像与腐蚀处理的图像相减后得到该图像的边缘检测的结果, 从得到的结果图可以看出: 原图像的裂缝区域中间有一条空隙, 外围都增加了一个像素点。所以对裂缝的长度和宽度进行计算时, 要减去 2 个像素点, 即为真实的裂缝长度和宽度。图 2 给出了形态学边缘检测的示意图。

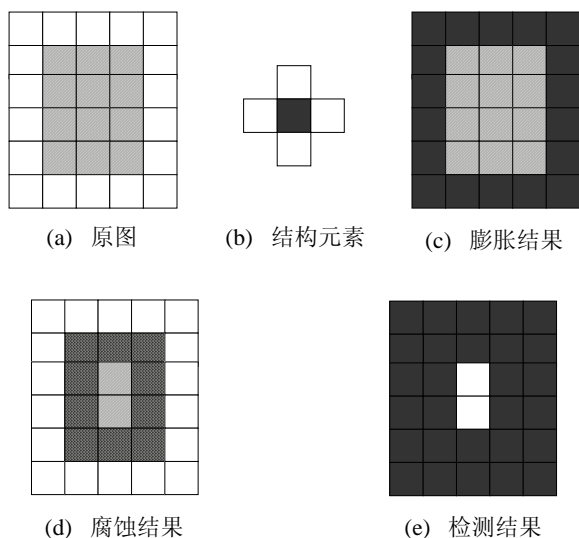


图 2 形态学边缘检测示意图

图 2(a)为被处理的灰度图像 f , 其中白色的部分代表背景, 灰色阴影部分代表裂缝区域; 图 2(b)是结构元素 b , 其中黑色的方格代表结构元素的中心点, 白色的方格代表邻域; 图 2(c)为膨胀后的结果, 其中灰色阴影的部分表示原图像的裂缝区域, 黑色的部分表示膨胀出来的结果; 图

2(d)为腐蚀后的结果, 其中灰色阴影的部分表示原图像的裂缝区域, 黑色网状阴影的部分表示腐蚀掉的裂缝区域; 图 2(e)为检测后的结果, 其中黑色的部分表示检测出的裂缝结果。

由于检测出的裂缝中间有空隙, 可以采用闭合算子填充这些空隙。对图像进行先膨胀处理再腐蚀处理即为闭合运算, 经过闭合运算处理后, 裂缝中间的空隙可以弥合, 并且裂缝的位置和形状不变, 这是采用形态学闭合算子填充这些裂缝的空隙的主要原因。

3 裂缝计算

对裂缝的长度和宽度的计算, 先需要对裂缝进行细化, 得到裂缝的骨架, 并求出各段骨架的斜率, 再通过计数的方式便可得到裂缝的长度和宽度。

3.1 裂缝细化

采用形态学腐蚀的方法对裂缝进行细化处理, 当裂缝的宽度较窄时, 可能会造成裂缝边缘的断裂。文中对腐蚀算子加以改进, 可以很好地对裂缝进行细化, 并得到裂缝的骨架。由于横向裂缝和纵向横裂缝的测量方法完全相同, 文中以纵向裂缝为例介绍裂缝细化的方法, 构造水平方向的结构元素 b 对图像 f 进行细化处理。纵向裂缝细化处理方法:

(1) 将结构元素 b 在原图像 f 中移动, 如 b 的中心点 $b(0,0)$ 落在 f 的裂缝区域 ($b(0,0) \in f_c$), 判断该点对应这一行裂缝区域的像素点个数;

(2) 如果只有一个像素点, 则保留该像素点;

(3) 如果有两个像素点, 保留最靠近上面一行裂缝区域中心的那个像素点;

(4) 如果有 3 个以上像素点, 如果 b 上所有对应的点都落在 f 的裂缝区域内, 则裂缝区域该点保留, 否则将该点去掉。

循环作第 1 步到第 4 步, 一直到 f 不再发生改变, 便得到了所需要的细化裂缝图像。从细化后的图像可以看出: 图像 f 的裂缝中间的骨架可以很好提取出来。图 3 给出了裂缝细化的示意图。

图 3(a)为被处理的灰度图像 f , 其中白色的

部分代表背景,灰色阴影部分代表裂缝区域;图3(b)是结构元素 b ,其中黑色的方格代表结构元素的中心点;图3(c)为细化后的结果,其中灰色阴影的部分表示细化后提取出的骨架,黑色的部分表示细化掉的裂缝边缘。

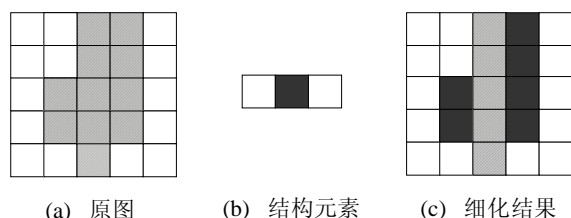


图3 裂缝细化示意图

3.2 裂缝长度计算

所有骨架的长度之和就是裂缝的长度,每段骨架的长度 L_D 通过相邻的两个像素点就可以得到,如下式所示

$$L_D = \left[[(x_i - x_{i+1})S_H]^2 + [(y_i - y_{i+1})S_V]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 (x_i, y_i) , (x_{i+1}, y_{i+1}) ——相邻的两个像素。

S_H ——水平方向比例因子,图像水平方向像素个数与被抓拍的实际路面宽度的比值,单位(毫米/像素);

S_V ——垂直方向比例因子,图像垂直方向像素个数与被抓拍的实际路面长度的比值,单位(毫米/像素)。

文中的路面裂缝图像检测与识别系统采用线阵 CCD 传感器抓拍路面图像,采集的每一线中的各个像素点的长和宽都为 1 mm,即 $S_H = S_V = 1$,因此可得到裂缝的长度 L

$$L = \sum_{i=0}^{n-1} L_D = \sum_{i=0}^{n-1} \left[(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中 n 为图像的高度或宽度。

3.3 裂缝宽度计算

通过骨架中的相邻两个像素点可以求出裂缝各段的斜率 K_D ,由此可以计算出各段裂缝宽度 W_D 。

$$K_D = 1 / \left[(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$W_D = K_D * w_d \quad (6)$$

式中 w_d 为每段裂缝在水平或垂直方向的宽度。

4 实验结果与分析

实验的硬件平台为:P4 2.40GHz 处理器和 256M 内存的工控机,软件开发环境为:Visual C++ 6.0,对上面提到的各种图像处理算法进行实现和比较。实验采用原始数据是 8 位灰度级路面图像,其大小为 500×500 个像素,且每个像素点的长和宽都为 1mm,采集于西安—宝鸡(中国)高等级高速公路。对原始数据(图4(a))分别采用传统中值滤波和多结构中值滤波处理,再采用文中的边缘检测算法处理,如图4所示。

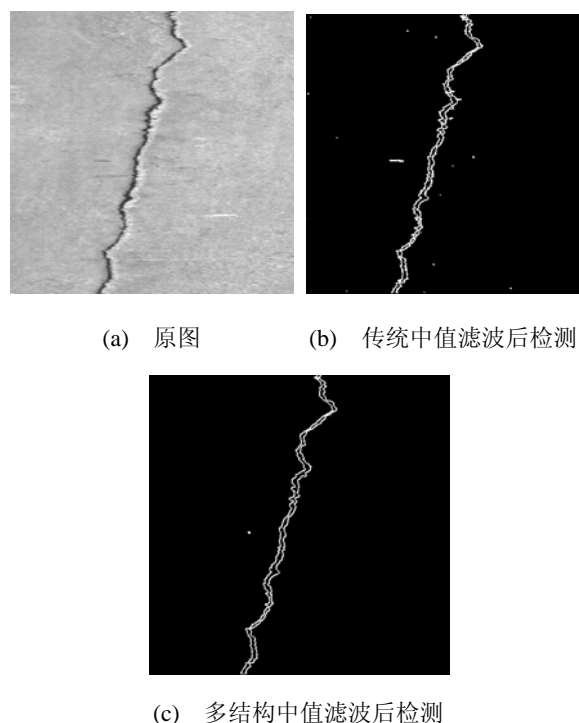


图4 滤波算法实现与比较

在去噪实验的过程中,结合文中的边缘检测算法,由图4(b)和图4(c)可以获得传统中值滤波和多结构中值滤波对路面图像噪声滤除效果的统计,如表1所示。

表1 去噪效果统计

	点状噪声	条状噪声
传统中值滤波	15	1
多结构中值滤波	1	0

由统计的数据可以看出:多结构中值滤波可

以有效地消除叠加在原始数据中的多种形状的噪声。

对图 4(a)采用多结构值滤波算法去噪,再分别采用路面裂缝图像检测常用的边缘检测算法进行边缘检测。对采用文中边缘检测算法处理后的图像(图 4(c))进行闭合运算处理,弥合裂缝中间的空隙,并用结合文中细化方法对其细化得到裂缝的骨架,如图 5 所示。

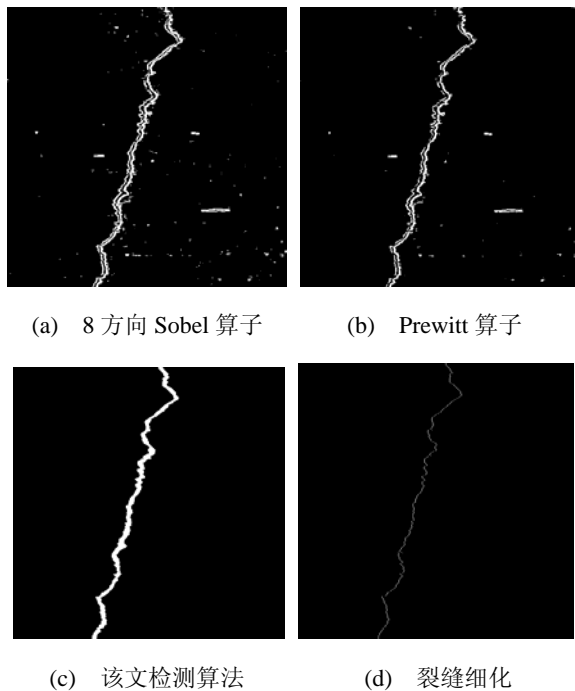


图 5 3 种边缘检测算法比较与裂缝细化

在裂缝边缘检测实验的过程中,由图 5(a)、图 5(b)、和图 4(c)可以得到各种边缘检测算法对路面裂缝检测效果的统计,如表 2 所示。

表 2 边缘检测效果统计

	点状 噪声	条状 噪声	边缘 断裂	处理 速度
8 方向 Sobel 算子	>150	7	4	127ms
Prewitt 算子	<50	6	9	156ms
该文算法	1	0	0	64ms

采用文中的边缘检测算法对路面图像进行裂缝检测,由统计的数据可以看出:能对噪声进行很好的抑制,能较好地检测出裂缝的边缘,保护了裂缝的边缘,而且处理速度最快。再结合闭合算子进行处理,由图 4(c)可以看出:裂缝中间

的空隙被完全地弥合,并且唯一的一个点状噪声也在闭合运算处理中被滤除掉。最重要的是处理过程中,裂缝的位置、形状、长度和宽度都没有改变,并且将裂缝边缘的毛刺平滑掉,使裂缝边缘的形状变得比较有规则。为后面对路面裂缝的长度和宽度进行计算,提供了极大的便利。

通过图 5(d)可以求得该裂缝各段骨架的斜率,再采用裂缝长度和宽度计算方法求出该裂缝的长度和宽度。高等级公路路面裂缝检测最关心的是裂缝宽度的检测精度,该系统要求检测出的裂缝宽度精度为 1mm。文中检测出的裂缝长度为:525.999mm,裂缝宽度最窄处为:0.14mm,最宽处为:11mm,由此可看出文中提出的算法满足了高等级公路路面裂缝检测系统的要求。并对该裂缝各部分宽度进行统计,如表 3 所示。从表 3 可以看出:大于 3mm 的裂缝部分达到了 76.626%,说明该区域路面已严重破损。

表 3 裂缝宽度统计

	>1mm	>2mm	>3mm	>4mm
百分比(%)	99.390	93.089	76.626	57.927

5 结 论

路面裂缝图像检测实验结果表明,多结构值滤波算法对路面中叠加的多种噪声的滤除优于经典的滤波算法,形态学边缘检测方法在边缘连续性及各向同性方面都优于以往的一些算法,对图像细节和边缘定位效果也相当好,克服了经典图像处理算法抗干扰能力小以及现代边缘检测算法运算复杂的缺点,能有效地降低噪声对检测结果的干扰。同时,裂缝计算方法可以较精确地求出裂缝的长度和宽度,且在保证处理效果同时,也保证了处理速度,满足高等级公路路面裂缝图像检测的要求。

参 考 文 献

- [1] Kelvin. Designs and implementation of automated systems for pavement surface distress survey [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2000, 6(3): 24-32.

- [2] Cheng H D, Miyojim M. Automatic pavement distress detection system [J]. *Journal of Information Sciences*, 1998, 108(7): 219-240.
- [3] [美] Castleman K, R 著. 数字图像处理[M]. 朱志刚译. 北京: 电子工业出版社, 1998. 387-392.
- [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.
- [5] 范立南, 韩晓微, 王忠石, 等. 基于多结构元的噪声污染灰度图像边缘检测研究[J]. *武汉大学学报*, 2003, 36(3): 86-90.
- [6] Zaremba Marek B, Palenichka Roman M, Missaoui, *et al.* Multi-scale morphological modeling of a class of structural texture [J]. *Machine Graphics and Vision*, 2005, 14(2): 171-199.
- [7] Guo Xiaoxin, Xu Zhiwen, Pang Yunjie. An adaptive soft morphological gradient filter for edge detection [A]. In: *The 3rd International Conference of IEEE Image and Graphics* [C]. Hong Kong, China, 2004. 64-67.
- [8] Oh Jinsung, Chaparro Luis F. Adaptive fuzzy morphological filtering of impulse noise in images [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2000, 11(3): 233-256.