

基于图像处理的沥青路面裂缝识别算法研究

魏海斌,武少威,张启帆,王丛征,朱厚达,强德娟

(吉林大学 交通学院,吉林 长春 130022)

摘要: 为了提高沥青路面裂缝检测效率,利用 Matlab 软件平台,深入研究了图像灰度化、图像灰度变换、滤波去噪、边缘检测等图像处理算法,并提出一种裂缝宽度计算方法。该文的图像处理算法较好地解决了沥青混合料中集料缝隙对裂缝识别产生干扰的问题。选取 20 幅裂缝图像对该文提出的算法精度进行验证,结果表明:算法可较好地用于沥青路面不规则裂缝、纵缝、横缝的识别与宽度计算。当裂缝宽度在 5 mm 以上时,相对误差可控制在 5% 以内;裂缝宽度为 2~5 mm 时,相对误差可控制在 10% 以内。

关键词: 沥青路面; 裂缝识别; 图像处理; 滤波去噪; 边缘检测

沥青路面是中国目前公路建设中使用最多的一种高级路面,随着公路里程的增加和使用时间的延长,公路的检查及养护工作势必愈加繁重。对路面来说,裂缝是最严重的病害之一。传统的人工检测效率、精度低,且存在安全隐患,不适应快速发展的路面养护需求。数字图像处理技术经不断发展已经被用于裂缝识别中,许多学者研究路面裂缝图像噪声的处理,将传统滤波去噪算法应用到路面裂缝图像中,但缺乏对去噪的同时保留裂缝细节的研究。孙波成提出全局阈值与动态阈值相结合的分割算法,但光线条件差时,集料间缝隙的灰度值与主裂缝灰度值十分相近,容易出现误判。另外,许多研究主要集中在裂缝的形态识别与分类,没有对宽度识别及算法精确度进行验证。

该文针对沥青路面裂缝,深入研究滤波去噪算法的选择、边缘检测算法的选择以及裂缝区域与噪声区域的区分算法。另外,用自制的两个距离恒定的白色圆形仪器计算放大倍率,从而由裂缝像素宽得到裂缝计算宽。利用 Matlab 编制程序,用吻合度以及相对误差对算法的精确度进行验证。

1 沥青路面裂缝图像处理技术

沥青路面裂缝的识别与桥梁裂缝、水泥路面裂缝识别最大的不同在于图像中对于沥青混合料中集料缝隙带来的噪声的处理。数字图像处理大都基于灰度图像,集料缝隙灰度值与主裂缝灰度值相近,对沥青路面

裂缝提取产生很大的干扰。该文主要介绍在使主裂缝被准确提取的前提下尽量减少噪声的算法。

1.1 图像灰度化

由数码相机拍出的照片大部分为 RGB 三色图像,每个像素点包含了 3 种色彩信息,而灰度图像中每个像素点仅包含取值范围为 $[0, 255]$ 的一种亮度信息。彩色图像到灰度图像的转换,又称灰度化,是一个降维问题。将 RGB 图像转换为灰度图像有利于对数字图像进行处理。

目前常用的基于函数的灰度化算法有简单法、直接法等。其中简单法仅计算 RGB 的均值作为灰度值,即 $Y=(R+G+B)/3$;而直接法是使用权重替代简单的求平均的方法,目前最常用的计算方法为 $Y=0.30R+0.59G+0.11B$,其视觉效果更接近原图,如图 1 所示。



(a) 沥青路面 RGB 图像



(b) 直接法处理后的灰度图

图 1 图像灰度化效果

1.2 图像灰度直方图均衡化

直方图均衡化拉大图像的对比度并在视觉上达到

明显增强的效果,使一些原本不易观察到的细节能变得清晰可辨,有利于后续对裂缝细节的提取。

直方图均衡化处理的中心思想是把原始图像的灰度直方图从比较集中的某个灰度区间变成在全部灰度范围内的均匀分布,得到的结果如图 2 所示。

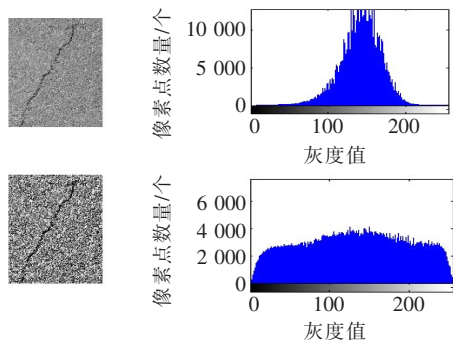


图 2 灰度直方图均衡化效果图

由图 2 可以看出:经过直方图均衡化后的图像中裂缝更明显、颜色更深、易于提取,但同时也造成了集料缝隙更加明显、对裂缝的提取造成干扰。

1.3 线性灰度变换

为了去除图像中集料缝隙带来的噪声,凸显主裂缝,可以采用线性灰度变换的方法。线性灰度变换可以拉伸特征目标的灰度细节,相对抑制不感兴趣的背景灰度级。可以采用分段线性法,通常利用三段线性变换。采用式(1)表达像素的灰度映射关系:

$$\begin{aligned} & [\alpha \times f(i, j), 0 \leq f(i, j) \leq f_a \\ g(i, j) = & \{\beta \times [f(i, j) - f_a] + g_a, f_a \leq f(i, j) \leq f_b \\ & [\gamma \times (f(i, j) - f_b) + g_b, f_b \leq f(i, j) \leq 255 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: α 、 β 、 γ 为三段折线的斜率,其函数图像见图 3。

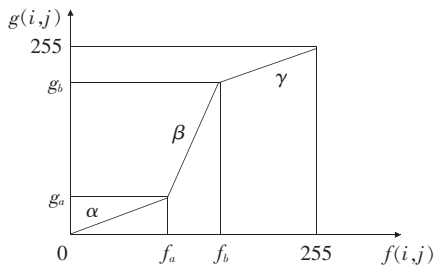


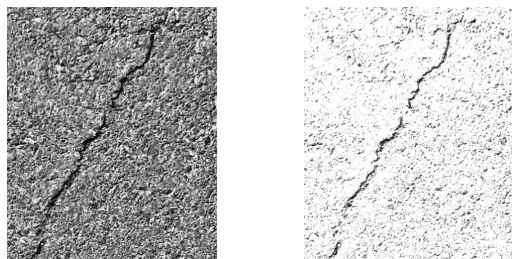
图 3 线性灰度变换的函数图像

图 3 中:横轴为变换前图像的灰度,纵轴则为变换后的灰度,横轴的灰度按照图示折线的方式投影到纵轴上。变换前灰度介于区间 (f_a, f_b) 的像素在变换后介于区间 (g_a, g_b) ,灰度区间变长,即在图像中得到了

凸显。同理,区间 $(0, f_a)$ 及 $(f_b, 255)$ 则被压缩,相应的像素点在图像中变得不那么明显。

对于沥青路面裂缝图片,由于裂缝处颜色最深,故为了更好地保留裂缝信息,可以将 f_a 、 f_b 的值在不丢失信息的前提下选得尽量小。为实现 f_a 、 f_b 值的自动选取,可采用最小误差等方法。

图 1 中,可以选择 f_a 为 0、 f_b 为 55,变换效果如图 4 所示。图 4 中,线性灰度变换可以有效地去除集料带来的噪声,同时又能较为完整地保留裂缝信息。



(a) 变换前

(b) 变换后

图 4 线性灰度变换效果图

1.4 滤波去噪

在图像处理过程中,噪声的存在会严重影响到图像处理的结果。由于沥青路面表面并不平整,其表面布满集料的特性使得滤波去噪在图像处理过程中尤为重要。滤波去噪有许多种算法,参数的选择也不相同,下面分别对算法和参数进行选择。

1.4.1 滤波算法的确定

分别应用维纳滤波、均值滤波、中值滤波 3 种降噪算法对图 4(b)进行处理,得到图像如图 5 所示。

对比图 5,维纳滤波处理后噪点得到了明显的控制,但是许多噪点之间连通起来使图像模糊,可能会使主裂缝区域也变得模糊进而导致后续裂缝宽度测量产生较大误差;均值滤波效果不明显;中值滤波能较好控制噪点且不使图像模糊。因此,选择中值滤波。

1.4.2 卷积模板大小的确定

滤波算法遍历图片中的每一像素,并给出所处理的像素一个卷积模板,该模板是一个以该像素为中心的长 $m=2a+1$ 、宽 $n=2b+1$ 的长方形,常用卷积模板示意图见图 6,图中每一个正方形格代表一个像素点。

不同的滤波算法给出卷积模板中的每个像素点的像素值不同的权重从而重新计算中心像素(图中黑色像素)新的灰度值。即经滤波算法处理的像素综合考虑其邻域像素的灰度值,而选择的卷积模板越大时去噪效果越强,但是也会带来图像模糊的问题。

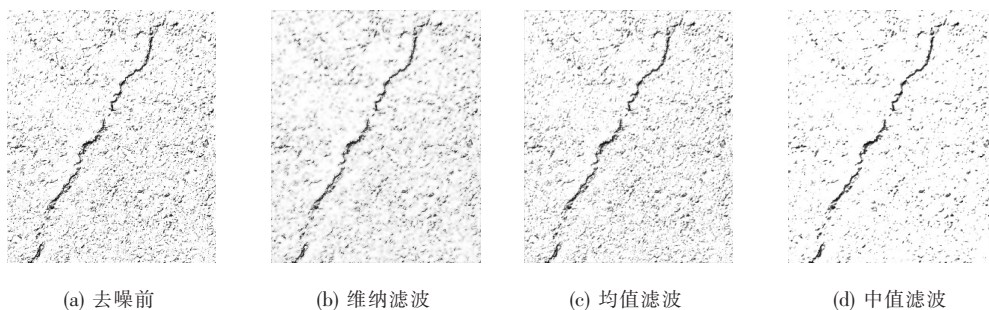


图5 滤波算法效果对比图

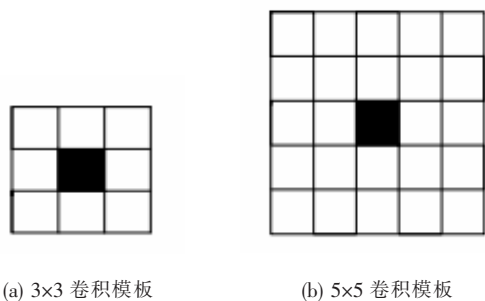


图6 卷积模板示意图

另外,滤波处理图像的质量评价主要有客观评价与主观评价两种,客观评价是计算滤波算法处理后的逼真度、信噪比等参数从而评判滤波算法的优劣;而主观评价是通过肉眼直接观察,和人的视觉系统特性有关。在该文中,图像中由路面集料带来的阴影为主要噪声,而并不是整幅图像均存在噪声,故不能利用客观评价将图像中所有的点做同样的计算。因此,利用主观评价,找到一个既不使沥青路面主裂缝变模糊,又能很好地去除集料带来噪声的临界卷积模板大小(图7)。

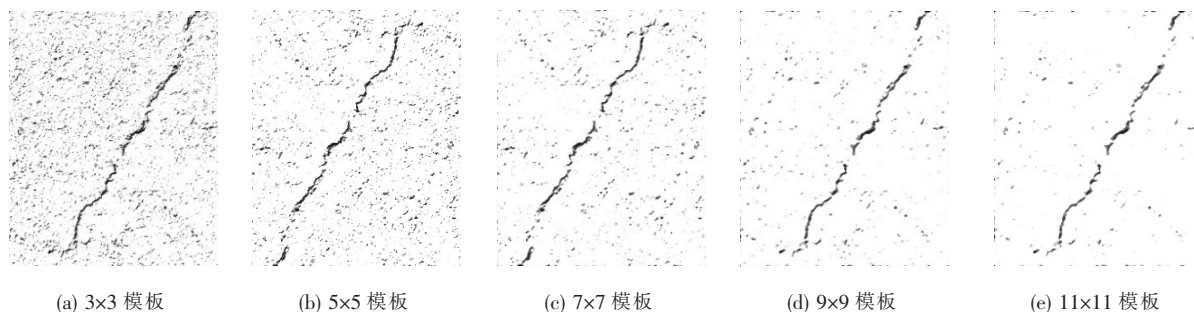


图7 不同大小卷积模板对处理效果的影响

由图7可以看出:随着卷积模板大小的增长,去噪效果越好,但是主裂缝的边缘也变得模糊。通过观察,发现 7×7 卷积模板能较好地作为临界卷积模板。

1.5 边缘检测

在图像中有许多点的梯度幅值比较大,边缘就是图像中灰度发生急剧变化的区域边界,通过检索图像灰度梯度的方法确定图像边缘。

边缘检测算子有多种,该文选取3种常见的算子:Roberts算子、Prewitt算子以及Sobel算子,各算子处理效果及比较见后文。

1.6 提取主裂缝区域

由于图像裂缝识别都是基于灰度值差异,灰度的高低将影响裂缝的识别效果。在拍照时照明条件不好的情况下,可能会出现集料间缝隙的灰度值与路面裂缝的灰度值极为相近的情况。

在1.4节中,使用滤波去噪可以有效地减少集料间缝隙的噪点,但为了不致使裂缝模糊而不能准确地计算其宽度,并不能选用过大的卷积模板。但是,选用不大的卷积模板意味着集料间的缝隙不能够完全过滤掉,这样,按上述算法识别出的裂缝可能包含集料缝隙,对于低分辨率图像尤为明显。

经过边缘检测后,利用拉普拉斯锐化算法将边缘检测后不连续的临近像素点连通、连通边缘填充等算法,可以得到图8(a)。图片中的白色区域既有主裂缝区域,又有集料缝隙区域。区分这两种区域可以采用简单的区域面积区分法、区域圆形体区分法、外接椭圆区分法等,也可进一步研究采用神经网络对区域进行区分。该文采用区域面积区分,可以得到较好的效果。

由于集料间的缝隙较小,故识别后的二值图像其面积也较小。通过统计各区域的面积,得到结果如图

9 所示。从图 9 可以看出:在图像的 940 个白色区域中,99.5%的区域面积小于 1 000 像素,为集料间的缝隙;而仅有 5 个区域的面积大于 1 000 像素,为路面的主裂缝。利用二者面积较大差别的特性,可以通过过滤小面积区域,得到沥青路面主裂缝的图像,如图 8 (b)所示。

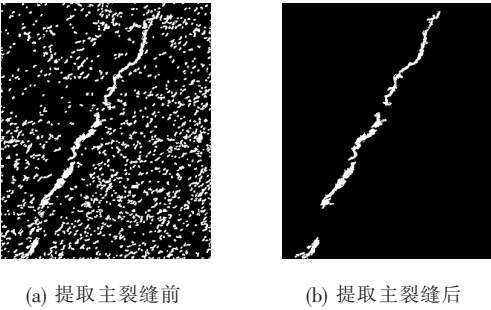


图 8 提取主裂缝效果

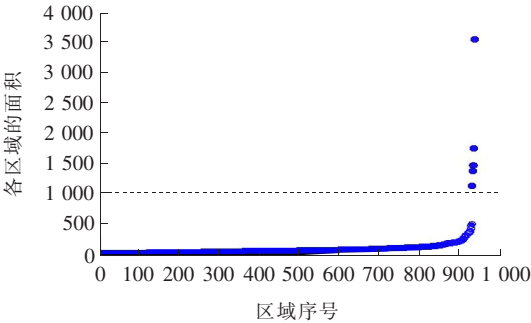


图 9 区域面积统计

1.7 边缘检测算法比较

滤波去噪后的图像,分别经 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子边缘检测,后经锐化、连通区域填充、去除小面积算法得到图 10。

由图 10 可以看出:3 种算子处理效果仅在细节上不同,为了更好地衡量与对比处理效果,提出一种计算吻合度的方法。

将滤波去噪后的图像[图 7(c)]经过人工处理提取出的裂缝图像如图 10(d)所示,并以此图作为标准图片,计算 3 种边缘检测算子与标准图片的吻合度,用于衡量边缘检测算子的效果。设标准图片为 $A(i, j)$,经边缘检测算法得到的图像为 $B(i, j)$,又由于在二值化图像中,白色像素点值为 1,黑色像素点值为 0,则吻合度 P 按式(2)计算:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [A(i, j) \times B(i, j)]}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A(i, j)} \quad (2)$$

分别计算 3 种算子吻合度,结果如表 1 所示。3 种算子吻合度均在 90%以上,表明 3 种算子均可较为精确地提取出裂缝,其中采用 Roberts 算子进行边缘检测效果最好。吻合度高意味着与标准图片的像素点重合度大,保证了边缘检测的准确性,为后续的裂缝宽度计算提供了精度保证。

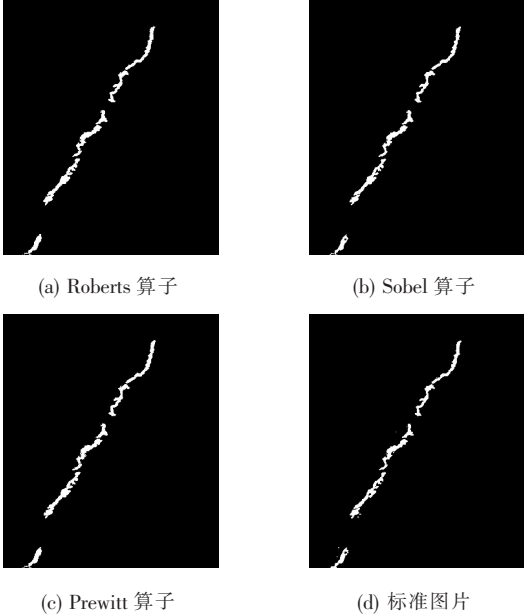


图 10 边缘检测效果对比图

表 1 边缘检测算子吻合度

算子名称	吻合度 $P/\%$
Roberts 算子	94.061 1
Sobel 算子	91.981 1
Prewitt 算子	90.747 4

2 裂缝宽度计算

2.1 裂缝像素宽度计算

提出一种计算横缝、纵缝及斜向裂缝像素宽度的算法。对于多数裂缝,可以用向坐标轴投影等方法判断出裂缝种类,并可将图片分割成为横缝、纵缝及斜向裂缝的组合。

裂缝的二值化图像实际上是一个由 0、1 构成的二维数组,利用循环语句可以遍历图像中每一点。第 i 行、第 k 列像素的坐标可表示为 (i, k) ,其中 $i=1, 2, 3, \dots; k=1, 2, 3, \dots$ 。

宽度计算(图 11)时,首先遍历第 k 列的像素点,找出裂缝上下边缘点对应的行数 $M(k)$ 、 $N(k)$,则可

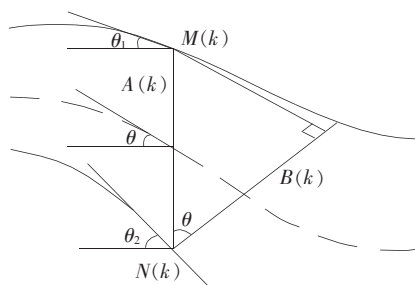


图 11 裂缝宽度计算

计算某一列裂缝垂直像素宽(上下边缘之间的像素点个数)为:

$$A(k) = M(k) - N(k) \quad (3)$$

计算第 k 列像素的上边缘倾角 $\theta_1(k)$, 找出第 $k-1$ 列、第 $k+1$ 列上边缘像素点 $M(k-1)$ 、 $M(k+1)$, 计算式为:

$$\theta_1(k) = \arctan \left[\frac{M(k+1) - M(k-1)}{2} \right] \quad (4)$$

同理, 下边缘倾角为:

$$\theta_2(k) = \arctan \left[\frac{N(k+1) - N(k-1)}{2} \right] \quad (5)$$

大部分裂缝上下边缘倾角不同, 其轴线倾角(裂缝走向)可近似由下式计算:

$$\theta(k) = \frac{\theta_1(k) + \theta_2(k)}{2} \quad (6)$$

第 k 列像素的裂缝像素宽近似为:

$$B(k) = A(k) \times \cos \theta(k) \quad (7)$$

遍历图片的各列像素, 记录各列中最大的裂缝像素宽, 当做裂缝的像素宽 B 。记录最大裂缝像素宽出现的位置 k_{\max} , 并将用于下文与人工检测得到的裂缝实际宽进行对比。

2.2 计算图片与实际宽度间的放大倍率 η

采用检测两圆圆心的方法来得到实测裂缝宽度与照片中裂缝像素宽度的比例大小, 即放大倍率 η 。自制仪器如图 12 所示, 白色圆形的直径为 40 mm, 两圆心间距保持 $D=100$ mm 不变, 并用黑色杆件固定。

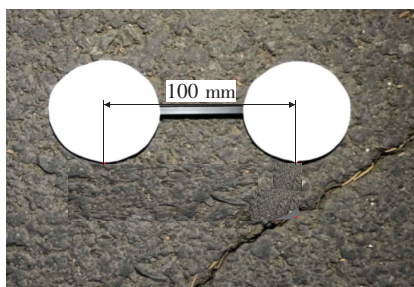


图 12 放大倍率计算

将上述仪器固定在路面上, 用照相机对路面裂缝照片进行采集。经过图像处理得到二值化图片后, 识别图中两白色圆形及两圆圆心坐标 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) , 则两圆心的像素距离为:

$$d = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{D}{d} \quad (9)$$

式中: η 为放大倍率(mm/像素)。

2.3 裂缝计算宽

裂缝计算宽按下式计算:

$$C = \eta \times B \quad (10)$$

式中: B 为裂缝像素宽(像素); C 为裂缝计算宽(mm)。

3 算法验证

利用 Matlab 编制程序, 采用上述算法, 并选择合适的参数, 选取 1.5~10 mm 宽度的 20 条裂缝进行算法的验证, 结果如表 2 所示。

表 2 中, 吻合度 P 、放大倍率 η 、裂缝像素宽 B 、裂缝计算宽 C 均由该文中上述算法计算得到, 裂缝实际宽 E 为图片 k_{\max} 处对应实际地面裂缝上的位置、并由游标卡尺的内测量爪测得(精度 0.02 mm)的裂缝宽, 误差值 $\epsilon = C - E$, 相对误差 $\delta = \frac{|\epsilon|}{E}$ 。

由表 2 可知: 各图片中裂缝的吻合度均在 90% 以上, 即各宽度的裂缝均能被准确地提取。在 20 条不同的裂缝中, 误差较为稳定, 算法通用性较强: 裂缝宽度在 5 mm 以上时, 相对误差可控制在 5% 以内; 裂缝宽度为 2~5 mm 时, 相对误差可控制在 10% 以内; 但裂缝宽度小于 2 mm 时, 相对误差为 20% 左右。裂缝宽度小于 2 mm 时误差较大主要是因为实际宽度是由游标卡尺内测量爪测得的, 宽度过小内测量爪不能够卡紧裂缝内壁而造成实际裂缝宽有较大误差。根据 JTG H20-2007《公路技术状况评定标准》, 不规则裂缝、纵缝、横缝的主要缝宽小于 3 mm 时, 沥青路面裂缝级别为轻。故该文介绍的算法不会对不规则裂缝、纵缝、横缝引起的沥青路面破损状况造成误判。

4 结论

为了提高沥青路面裂缝识别的速度及精度, 该文研究了沥青路面裂缝的识别以及宽度计算算法。可得如下结论:

表 2 计算机计算与人工测量的误差比对

序号	吻合度 $P/\%$	放大倍率 $\eta/$ (mm · 像素 ⁻¹)	裂缝像素宽 $B/(\text{像素})$	裂缝计算 宽 C/mm	裂缝实测 宽 E/mm	误差值 ε/mm	相对误差 $\delta/\%$
1	92.144	0.106	93.47	9.94	9.70	0.24	2.4
2	91.253	0.116	63.23	7.31	7.50	-0.19	2.5
3	91.813	0.082	88.23	7.23	7.40	-0.17	2.3
4	91.742	0.104	61.14	6.39	6.70	-0.31	4.7
5	90.568	0.103	61.91	6.40	6.50	-0.10	1.6
6	93.013	0.106	62.28	6.62	6.44	0.18	2.9
7	94.128	0.136	39.57	5.37	5.50	-0.13	2.4
8	92.785	0.131	42.14	5.51	5.30	0.21	4.0
9	91.467	0.118	41.23	4.86	5.00	-0.14	2.9
10	93.568	0.071	62.38	4.41	4.66	-0.25	5.3
11	92.857	0.107	41.42	4.42	4.60	-0.18	4.0
12	91.455	0.102	39.78	4.05	3.80	0.25	6.6
13	90.716	0.125	31.57	3.94	3.66	0.28	7.5
14	94.655	0.082	43.47	3.57	3.50	0.07	2.1
15	92.579	0.132	21.14	2.80	3.00	-0.20	6.8
16	93.887	0.080	32.66	2.61	2.50	0.11	4.4
17	91.488	0.082	31.88	2.61	2.42	0.19	7.8
18	90.157	0.099	17.35	1.72	2.00	-0.28	13.9
19	93.667	0.102	21.02	2.14	1.80	0.34	18.8
20	91.563	0.106	17.78	1.88	1.50	0.38	25.1

(1) 集料缝隙在灰度图像中的灰度级与主裂缝灰度级相似,给裂缝照片带来很大的噪声,是沥青路面裂缝提取的难点。

(2) 图像处理算法中,滤波去噪算法需在主裂缝不变模糊的前提下尽量减小集料缝隙带来的噪声,采用 7×7 卷积模板的中值滤波能够较好地满足要求,结合去除小面积算法可以比较彻底地去除噪声。Roberts 边缘检测算子处理得到的图片吻合度最高。

(3) 采用检测两圆圆心的方法得到实测裂缝宽度与照片中裂缝像素宽度的比例大小,为正摄影图片的放大倍率计算提供了简便精确的方法。

(4) 采用 Matlab 编程检验该算法,大部分裂缝均能较为准确地识别,但裂缝宽度小于 2 mm 时,受限于路面裂缝测量仪器的精确性,会产生 20%左右的相对误差。

参考文献:

[1] 李普惠.公路路面裂缝类病害图像处理算法研究[J].计算机工程与应用,2003(35).
[2] Siriphan Jitprasithsiri. Development of a New Digital

Pavement Image Processing Algorithm for Unified Crack Index Computation[D]. A Dissertation Submitted to the Faculty of the University of Utah,1997.

[3] 孙波成.基于数字图像处理的沥青路面裂缝识别技术研究[D].西南交通大学博士学位论文,2015.
[4] 英红,丁海明,侯新月,等.基于 BP 神经网络的沥青路面裂缝识别方法研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2018(4).
[5] 朱亮.基于图像的沥青路面裂缝的自动识别算法研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2016.
[6] 周茗琪.基于显著度的图像灰度化算法研究[D].上海交通大学硕士学位论文,2015.
[7] 张俊华.基于分段线性变换的图像增强[C].中国图象图形学学会论文集,2008.
[8] 董林鹭,杨平先,陈明举.基于阶乘权值模板的卷积滤波算法[J].电子世界,2018(17).
[9] 黄子吉,肖杰,陆安江,等.几种图像去噪方法的比较研究[J].通信技术,2017(11).
[10] 张国旗.基于图像处理的混凝土桥梁底面裂缝检测方法的研究[D].北京交通大学硕士学位论文,2010.
[11] JTG H20—2007 公路技术状况评定标准[S].