DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.04.005 文章编号:1671-2579(2025)04-0033-09

基于Sobel+匹配滤波联合算法的裂缝识别技术

文燕[1],郭晓倩[2,3],唐由之[2,3],阳恩慧[2,3*],邱延峻[2,3]

(1.四川乐西高速公路有限责任公司,四川 西昌 615099;2.西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031;
3.西南交通大学 道路工程四川省重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:针对Sobel算法在路面裂缝识别中存在识别结果空心化、噪点多、裂缝连续性差的问题,该文提出一种结合Sobel算法+匹配滤波的联合算法,用于沥青路面三维裂缝识别。该算法通过设计正弦函数形式的匹配滤波器,从Sobel算法的识别结果中提取裂缝特征,再对匹配滤波结果进行阈值过滤和连通域分析,有效解决裂缝识别结果为空心的问题,同时实现了降噪和裂缝连续性的提升。结果表明:Sobel+匹配滤波联合算法的准确率、召回率及F值分别达到84.72%、95.32%、89.44%,其性能优于Sobel算法和Sobel+闭运算联合算法。

关键词:路面工程;三维裂缝检测;Sobel算法;匹配滤波算法;图像处理

中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A

Research on Crack Identification Technology Based on Sobel + Matched Filter Joint Algorithm

WEN Yan[1], GUO Xiaoqian[2,3], TANG Youzhi[2,3], YANG Enhui[2,3*], QIU Yanjun[2,3]

(1. Sichuan Lexi Expressway Co.,Ltd., Xichang, Sichuan 615099, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Key Laboratory of Highway Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: To address the problems of hollow recognition results, high noise, and poor crack continuity in pavement crack identification using the Sobel algorithm, this paper proposed a joint algorithm combining the Sobel algorithm and matched filter for three-dimensional crack recognition of asphalt pavement. A matched filter in the form of a sine function was designed, and the matched filter was used to extract crack features from the results of the Sobel algorithm. The matched filter results were subjected to threshold filtering and connected domain analysis to effectively solve the hollow recognition problem, while also reducing noise and improving crack continuity. The test results show that the Sobel + matched filter joint algorithm can achieve 84.72% accuracy, 95.32% recall, and 89.44% F-value, and its performance is better than that of the Sobel algorithm and the Sobel + morphological closing joint algorithm.

Keywords: pavement engineering; three-dimensional crack detection; Sobel algorithm; matched filter algorithm; image processing

0 引言

路面裂缝作为一种难以避免的病害,严重影响公路行车安全及服务水平。及时对路面进行裂缝修补是防止路面加速开裂、保证道路性能的必要措施,因此准确及时地获取裂缝信息十分重要[1]。传统人工检测效率低,难以满足日益增长的路面养护需求。因此,开展路面裂缝自动识别的相关研究,实现裂缝的高效识别检测成为各国学者的研究热点[2]。在进行路面裂缝自动识别检测之前,必须获取路面的图像。目前路面图像主要分两类:① 二维路面图像,表征光照强度信息[3-4];② 三维路面图像,表征路面深

收稿日期:2024-09-24 **修回日期:**2024-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278460,52178438);四川省科技计划项目(编号:2024NSFSC0016,23NSFSC0015)

作者简介:文燕,女,高级工程师. E-mail: 450056732@qq.com

***通信作者:**阳恩慧,男,博士,教授. E-mail: ehyang@home.swjtu.edu.cn

度信息[5-6]。三维路面图像受光照和油污的影响较小,更有利于裂缝检测[7]。众多学者也在开展基于深度学习的人工智能算法的路面裂缝识别研究[8-9]。

在过去的几十年里,出现了大量路面裂缝识别算法。阈值法通过设置阈值将图像二值化寻找裂纹,对图像背景的一致性要求高,对于噪声较多的图像,最优阈值的寻找存在困难[10]。一些基于空间变换算法的原理是捕获裂纹处出现的高频信号,然后通过高通滤波来提取图像中的裂缝,但是这些方法处理空间连续性的能力有限,易导致裂缝的不连续[11-12]。三维阴影模型通过模拟裂纹区域的阴影行为来检测裂纹,但对于较粗糙的路面纹理可能会产生较多的噪声[7]。各向异性测度法(Conditional Texture Anisotropy,CTA)利用像素沿裂缝方向的差异小和其他方向的差异大的特征来检测裂缝,但是大尺度的CTA会在裂缝周围产生假阳性错误,由于宽裂纹内部的各向同性,小尺度的CTA只能检测宽裂纹的边缘[13-15]。因此,鉴于路面图像存在噪声较多、背景不均匀等特点,实现高性能的路面裂缝自动识别检测是一项具有挑战性的任务。

边缘检测算法通过裂缝边缘较大的像素梯度来检测物体的边缘,比如Sobel、Roberts、Prewitt等[16]。Sobel算法因其耗时短、边缘检测效果较好而得到广泛应用[17]。然而,将Sobel算法用于路面裂缝识别,只能识别裂缝的边缘,无法评价病害的严重程度,且易受噪声影响,裂缝连续性差。为改善算法性能,张建军等[18]利用Sobel算法提取钢管表面裂缝的边缘,然后使用形态学膨胀算法来填补裂缝;李灿灿等[19]结合Sobel算法和形态学闭运算(先膨胀运算,再腐蚀运算)来提取树叶图像的叶脉纹路。但由于路面图像噪声较多,利用膨胀运算来填补裂缝,容易形成大面积噪声[20-21]。

为提高Sobel算法的路面裂缝识别检测性能,本文提出了一种Sobel+匹配滤波联合算法,用于三维路面图像的裂缝识别。该算法设计了一个正弦函数形式的匹配滤波器,用匹配滤波器将裂缝从Sobel的识别结果中提取出来,弥补了Sobel算法只能识别裂缝边缘和连续性差的缺陷,并且过滤了Sobel结果中大部分的噪声,提高了裂缝识别的精度。

1 Sobel算法原理及缺陷

Sobel算法通过计算图像梯度并将梯度局部极大值识别为物体边缘。Sobel算法的卷积核是一种离散性差分算子,常规的Sobel算法包含2个大小为3×3的卷积核,分别对应计算图像在0°方向和90°方向上的像素梯度。改进后的Sobel算法包含4个卷积核。如图1所示,改进后的Sobel算法除了可以计算图像在0°方向和90°方向上的像素梯度,还可以计算图像在45°方向和135°方向上的梯度[22]。

−1	0	1
−2	0	2
−1	0	1

(a) 0°方向

−2	−1	0
−1	0	1
0	1	2

(b) 45°方向

−1	−2	−1
0	0	0
1	2	1

(c) 90°方向

0	−1	−2
1	0	−1
2	1	0

(d) 135°方向

图1 Sobel卷积核

Figure 1 Sobel convolution kernel

将图像在上述4个方向的梯度计算结果进行叠加后取绝对值,最后再取适当的阈值来提取局部梯度极大值得到Sobel算法的识别结果。

图2(a)为路面裂缝的像素特征,即裂缝中心的像素值低于两侧的像素值,像素存在梯度变化,所以可以通过Sobel算法识别出来。但将Sobel算法用于路面裂缝识别存在一定缺陷;图2(b)为白斑或白条像素特征,即白斑或白条中心的像素值高于两侧的像素值,Sobel算法会将其误判为裂缝;图2(d)属于坡面,像素特征为单边上升或下降,Sobel算法同样也会将其误判为裂缝;而图2(c)为宽裂缝的像素特征,裂缝中心的像素梯度较小,致使Sobel算法识别出来的裂缝中间出现空心,不利于裂缝数量与面积的统计,无法评价病害的严重程度。此外,裂缝图像中存在大量对比度低的裂缝,导致这类裂缝的梯度接近背景梯度,所以Sobel算法识别结果中的裂缝连续性差。

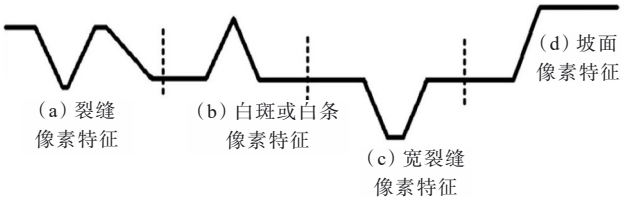
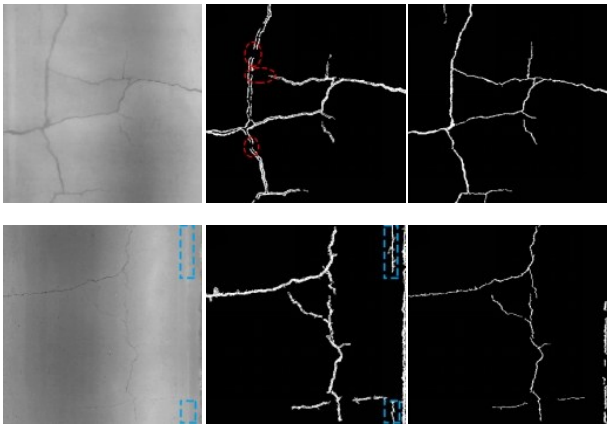


图2 裂缝及噪点的像素特征

Figure 2 Pixel features of cracks and noises

图3为Sobel算法的识别示意图。可以看出:对

于较宽的裂缝，Sobel算法的识别结果有较为明显的空心现象；矩形框标记为白色条纹导致的误判；椭圆形框标记为裂缝连接中断处，所以Sobel算法的识别效果不理想。



（a）原始图像　　（b）识别结果　　（c）标签

图 3　Sobel算法识别结果示意图（上图为1类裂缝，下图为2类裂缝，后文同）

Figure 3　Recognition results of Sobel algorithm（The upper picture shows type 1 cracks, and the lower picture shows type 2 cracks. The following text is the same.）

2　匹配滤波算法原理

匹配滤波（Matched Filtering）算法的核心在于匹配滤波器的设计，使滤波器输出信噪比达到最大时所导出的最佳线性滤波器称为匹配滤波器。

苏卫国等[23]将信号匹配滤波算法推广到二维信号的检测问题，利用高斯型匹配滤波器来识别视网膜图像中的血管。由于裂缝的像素特征和视网膜图像中血管的像素特征相似，Xu等[24]、高凡等[25]将这种高斯型的匹配滤波器应用于路面裂缝识别。该匹配滤波器的表达式为：

$$K(x,y)=-\exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)+m,\ |x|\leqslant 3\sigma, y\leqslant\frac{L}{2} \quad (1)$$

式中：L为匹配滤波器的长度；σ为一常数，决定了高斯曲线的宽窄；m为一常数，使卷积核的均值为0；x、y代表图像距离滤波器中心的像素坐标，其中x为像素坐标值，y为响应影响值。

图4为该匹配滤波器的三维示意图。匹配滤波器与裂缝图像进行卷积时，由于裂缝的像素特征与该匹配滤波器的形状相似，裂缝处则会产生较大响应。

裂缝像素在Sobel算法的识别结果中具有如图5所示的梯度特征。

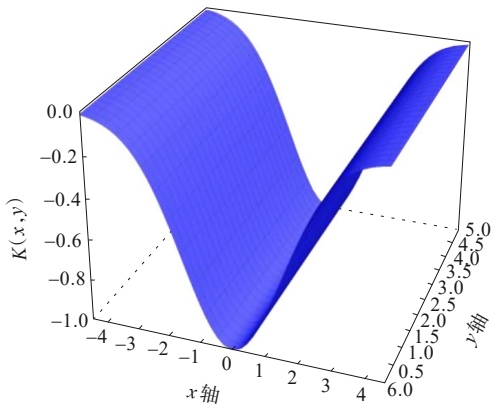


图 4　高斯型匹配滤波的三维示意图

Figure 4　Three-dimensional diagram of Gaussian matched filter

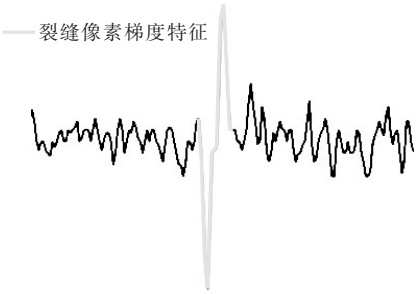


图 5　裂缝像素梯度特征

Figure 5　Crack pixel gradient feature

因此，本文设计了一个正弦函数型的匹配滤波器作用于裂缝在Sobel的识别结果，利用裂缝的梯度特征，将裂缝从Sobel算法的识别结果中提取出来。该正弦函数型匹配滤波器的表达式为：

$$K(x,y)=\sin\left(\frac{\pi}{\omega}x\right),\ |x|\leqslant\frac{W}{2},\ |y|\leqslant\frac{L}{2} \quad (2)$$

式中：W为匹配滤波器的宽度；L为匹配滤波器的长度；$\omega=W/2$，使得匹配滤波器的宽度恰好为正弦函数的一个周期，本研究中$W=12$，$L=10$。

图6为正弦函数型匹配滤波器的示意图。

为识别不同方向的路面裂缝，对匹配滤波器进行旋转。首先需要对匹配滤波器的周围用“0”进行填充（padding），使得匹配滤波器卷积核的尺寸为：

$$D=\sqrt{W^2+L^2} \quad (3)$$

式中：D为方形卷积核的边长。

最后使用式（4）使匹配滤波器在卷积核内进行旋转。

$$p_i=p\begin{vmatrix}\cos\theta_i & -\sin\theta_i\\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\end{vmatrix}^{\mathrm{T}} \quad (4)$$

式中：p_i为第i个核中对应角度为θ_i的点；p为水平方

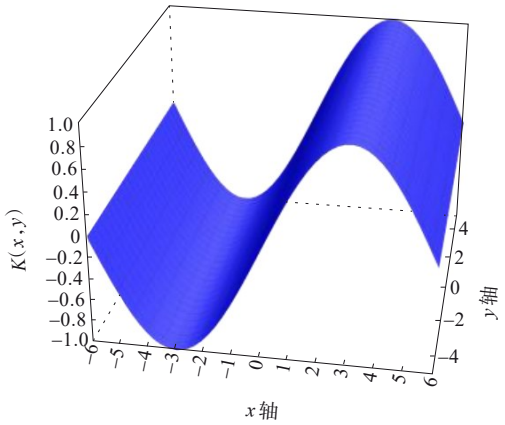


图6 正弦函数型匹配滤波器示意图

Figure 6 Sinusoidal function matched filter

向核中的对应点。

3 算法实现步骤

图3(a)所示的三维路面图像,用本文提出的裂缝识别算法实现流程如下:

(1)采用Sobel算法依次计算0°、45°、90°、135°方向上的梯度。由于梯度的计算结果存在负值,为方便展示,将它们映射到0°～255°之间,如图7所示。

(2)将计算结果依次进行匹配滤波。每个梯度方向会用到3个匹配滤波器,这些匹配滤波器具有不同的方向,如表1所示。3个不同方向的匹配滤波器对同一梯度方向进行卷积运算时,每个像素的计算结果为这3个匹配滤波器输出结果的最大值。图8为4个梯度方向的匹配滤波结果,由于匹配滤波的计算过程同样会产生负值,将它们的计算结果映射到了0°～255°之间。

表1 不同梯度方向所使用的匹配滤波器方向

Table 1 Direction of matched filters used in different gradient directions

梯度方向	匹配滤波器方向
0°	−15°、0°、15°
45°	30°、45°、60°
90°	75°、90°、105°
135°	120°、135°、150°

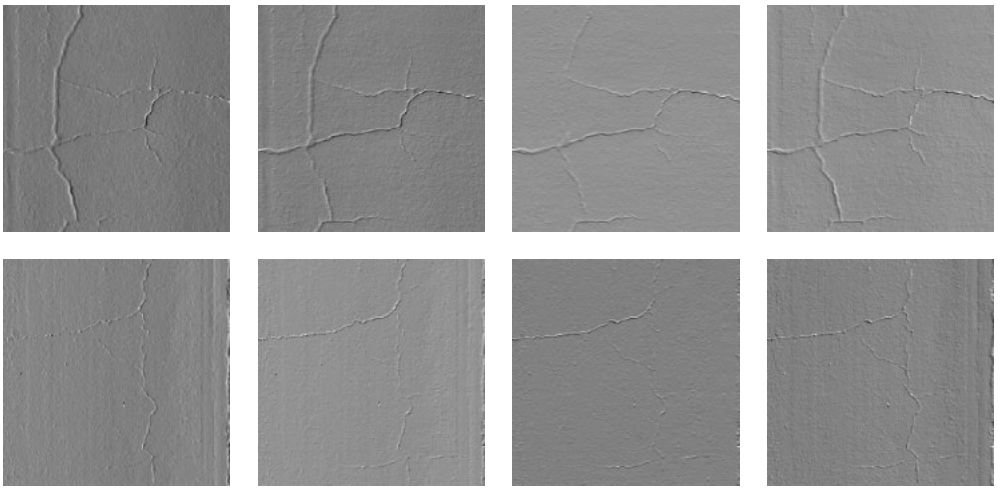
(3)将图8所示的匹配滤波结果依次进行阈值过滤,结果见图9。大于阈值的响应认定为裂缝像素,小于阈值的响应认定为非裂缝像素。

(4)将图9所示的各个方向的阈值过滤结果进行叠加,再进行连通域分析滤掉面积较小的噪点像素,得到该算法的最终结果,如图10所示。

对比图3与图10可知:本文设计的匹配滤波器成功将裂缝从Sobel的识别结果中提取出来,消除了Sobel算法识别出来的裂缝为空心的现象。很大程度解决了Sobel算法把白条或白斑误判为裂缝的问题。该匹配滤波器在裂缝处会产生较大的响应,改善了Sobel算法识别出来的裂缝连续性差的问题。

4 结果与分析

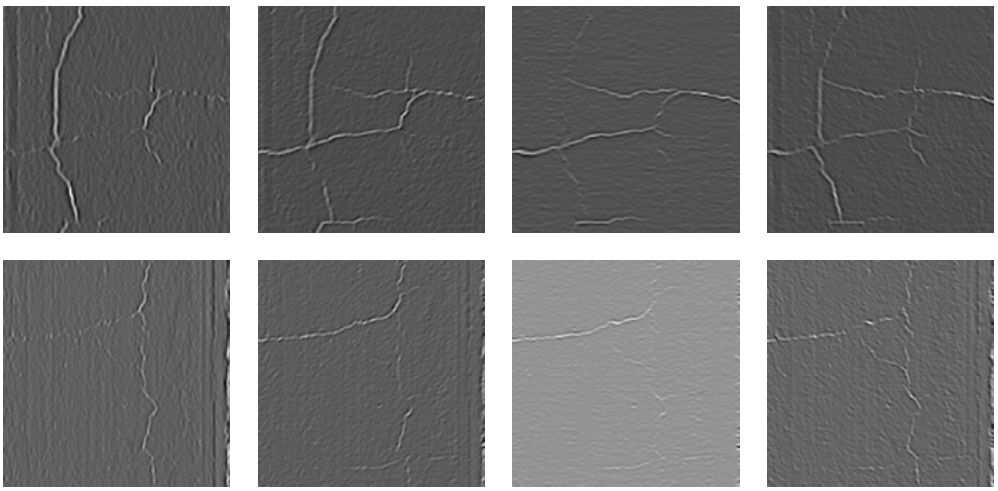
本研究采用准确率(Precision)、召回率(Recall)、F值(F-Measure)来评价裂缝识别算法性能。其中,准确率指在识别结果中,真正裂缝像素所占的比例;召回率指在裂缝标签中,被识别来的裂缝像素所占的比例;F值为准确率和召回率的调和平均值,较高



(a) 0° (b) 45° (c) 90° (d) 135°

图7 Sobel算法在各个方向上的梯度计算结果

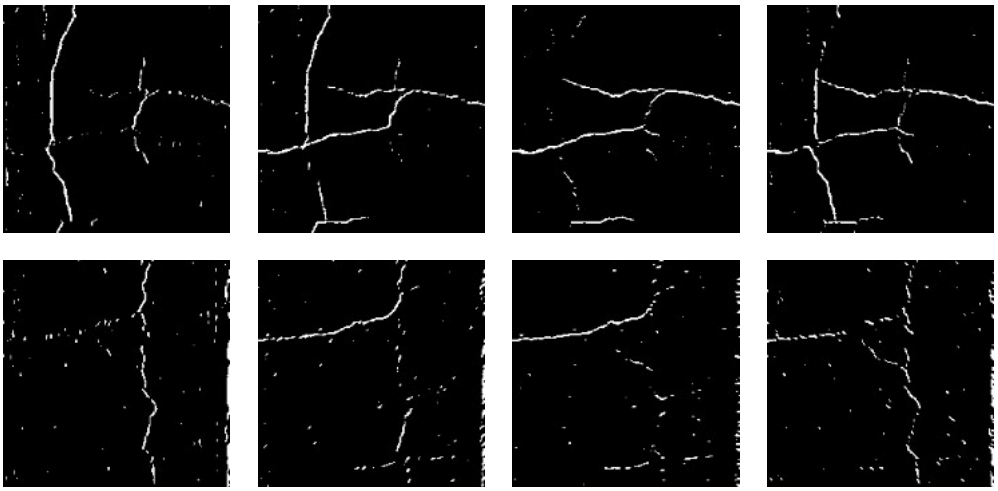
Figure 7 Gradient calculation results of Sobel algorithm in each direction



(a) 0°　(b) 45°　(c) 90°　(d) 135°

图8　匹配滤波算法在各个梯度方向上滤波结果

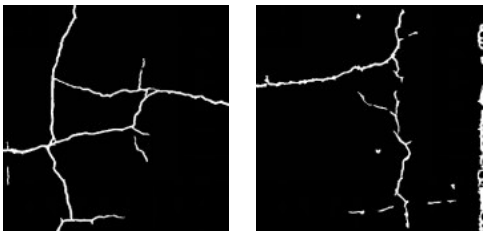
Figure 8　Filter results of matched filter algorithm in each gradient direction



(a) 0°　(b) 45°　(c) 90°　(d) 135°

图9　各个方向上的阈值过滤结果

Figure 9　Threshold filtering results in each direction



(a) 1类裂缝　(b) 2类裂缝

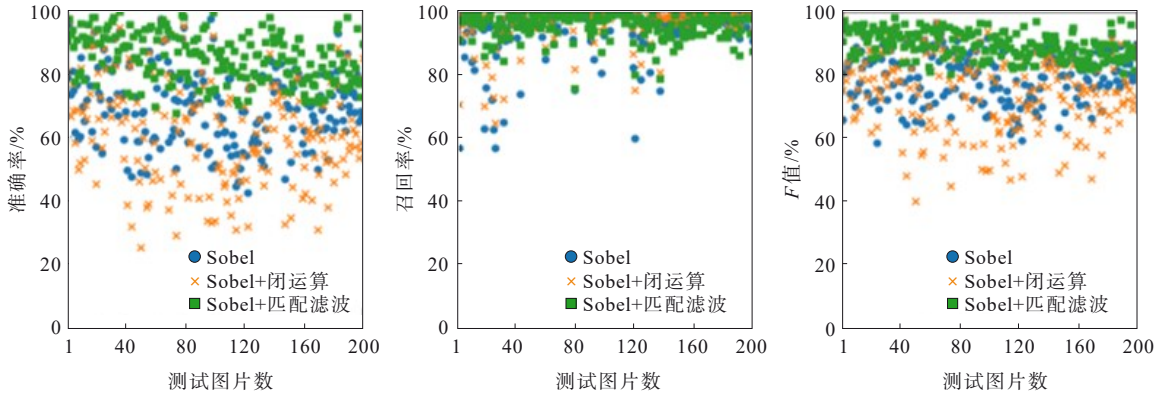
图10　Sobel+匹配滤波联合算法的输出结果

Figure 10　Output results of Sobel + matched filter joint algorithm

的F值反映了较高的准确率和召回率。

本研究使用了200张裂缝图片验证Sobel+匹配滤波联合算法。同时,Sobel算法和Sobel+闭运算(先膨胀运算,再腐蚀运算)联合算法将作为对比试验。图11总结了上述3种算法在每张测试图像上的准确率、召回率、F值。表2列出了3种算法的整体准确率、召回率、F值。

从图11与表2可以看出:Sobel+匹配滤波联合算法准确率最高,说明该算法的抗噪性能优于Sobel算法与Sobel+闭运算联合算法。3种算法均拥有较高的整体召回率,说明3种算法对裂缝的识别率都较高,但Sobel算法与Sobel+闭运算联合算法在部分裂缝图像上召回率仍然较低,但差距不大。在F值方面,Sobel+匹配滤波联合算法远高于Sobel算法与



(a) 各算法准确率 (b) 各算法召回率 (c) 各算法F值

图11 Sobel算法、Sobel+闭运算联合算法、Sobel+匹配滤波联合算法在每一张裂缝图像的准确率、召回率、F值

Figure 11 Accuracy, recall, and F-value per crack image of Sobel algorithm, Sobel + morphological closing joint algorithm, and Sobel + matched filter joint algorithm

表2 Sobel算法、Sobel+闭运算联合算法、Sobel+匹配滤波联合算法的整体准确率、召回率、F值

Table 2 Overall accuracy, recall, and F-value of Sobel algorithm, Sobel + morphological closing joint algorithm, and Sobel + matched filter joint algorithm

方法	准确率/%	召回率/%	F值/%
Sobel	69.67	94.52	79.31
Sobel +闭运算	62.17	96.34	74.04
Sobel+匹配滤波	84.72	95.32	89.44

Sobel+闭运算联合算法,所以Sobel+匹配滤波联合算法的性能最优。

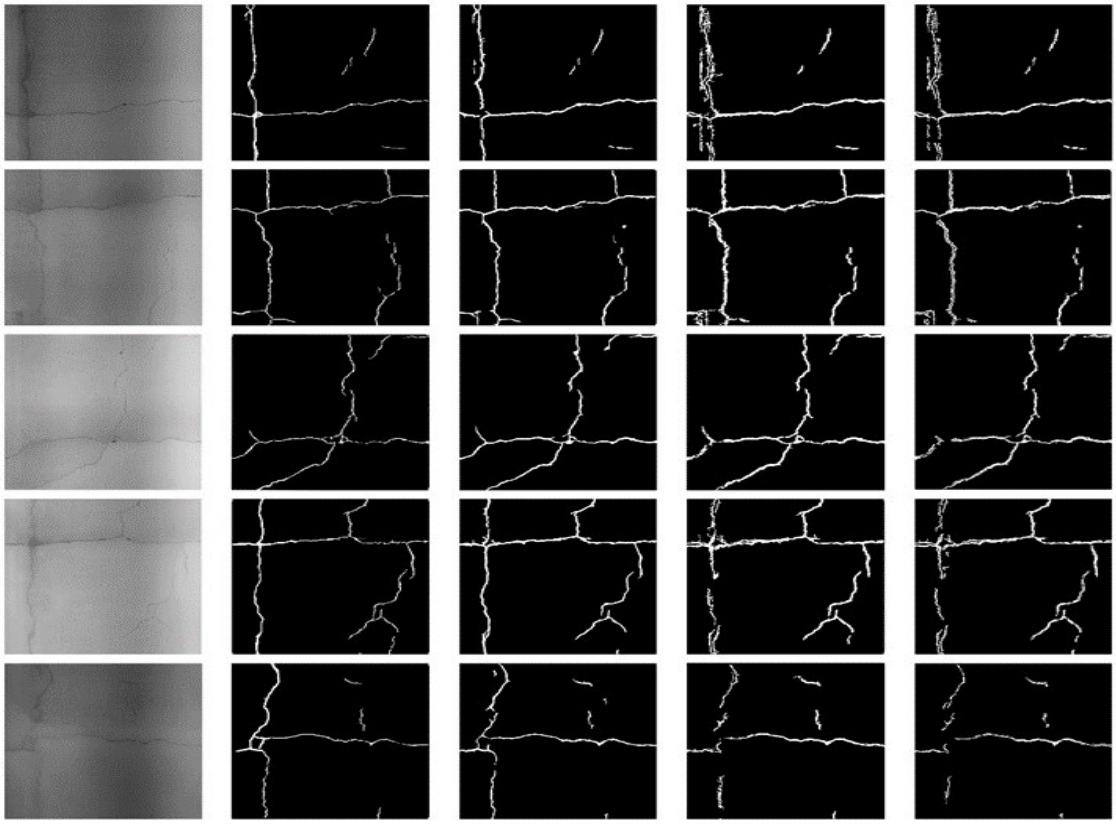
图12展示了Sobel算法、Sobel+闭运算联合算法、Sobel+匹配滤波联合算法在5张典型裂缝图像上的测试效果。可以发现:Sobel算法在部分图片上出现了假阴性错误,即未能检测到实际裂缝,这是因为Sobel算法识别出来的裂缝连续性较差(低对比度裂缝导致),极易受面积过滤降噪的影响,这也解释了Sobel算法在部分图片上的召回率较低的原因。Sobel+闭运算联合算法能够通过膨胀运算来增强裂缝的连续性,能在一定程度上解决Sobel算法在部分图片上假阴性错误的问题。Sobel+匹配滤波联合算法在低对比度裂缝上仍然能产生较强的信号,所以它识别出来的裂缝连续性好,不易受面积过滤的影响,在所有图片上均具有较高的召回率。Sobel算法与Sobel+闭运算联合算法的准确率都较低,这是因为Sobel算法识别出来的裂缝存在空心现象,Sobel+闭运算联合算法也只能填充窄的裂缝;其次,Sobel算法识别结果中的噪点较多。Sobel+闭运算联合算法无法解决Sobel算法的噪点问题,再加上进行膨胀操作时,众多聚集在一起的小面积噪点会成为一个面积较大的噪点,从而无法通过面积过滤来消除,所以Sobel+闭运算联合算法的准确率是最低的。Sobel+匹配滤波联合算法能够将裂缝从Sobel算法的识别结果中提取出来,同时具有对Sobel算法降噪的效果,因此Sobel+匹配滤波联合算法具有较高的准确率。

图13展示了由Sobel+匹配滤波联合算法导致的典型错误。假阴性错误已用矩形框标记,假阳性错误,即误将非裂缝识别为裂缝,已用椭圆形框标记。

分析Sobel+匹配滤波联合算法产生假阴性错误的主要原因是:部分细小裂缝的对比度太小,从而产生的响应小,导致其识别结果连续性差,再加上部分细小裂缝本身的面积小,容易被面积过滤所消除,最终产生假阴性错误。

分析Sobel+匹配滤波联合算法产生假阳性错误的原因有两点:① Sobel+匹配滤波联合算法对路面纹理较为敏感,粗糙的表面部分区域的特征与裂缝的特征相似,从而导致Sobel+匹配滤波联合算法产生假阳性错误;② 图14为裂缝、白斑、白条、坡面产生的响应示意图。由图14可知:Sobel+匹配滤波联合算法能够很大程度消除白斑、白条、坡面对Sobel带来的噪声,但只要它们的对比度足够高,Sobel+匹配滤波联合算法仍能产生较大响应,从而产生假阳性错误。

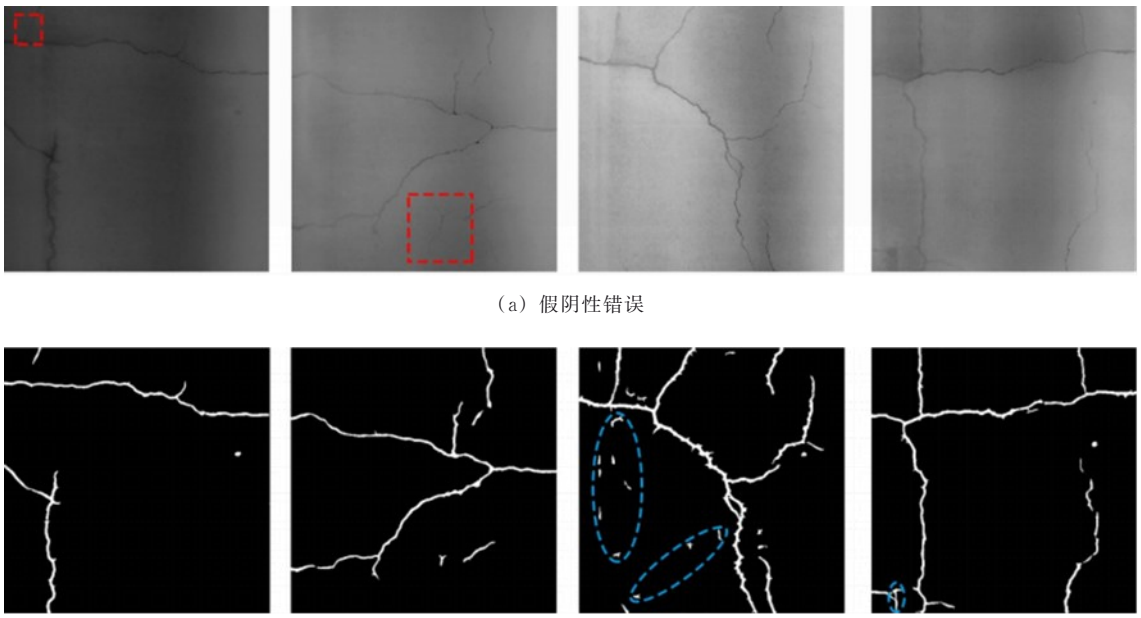
由图14可知:裂缝边缘的响应能够在负数区域产生2个波谷。但本研究只是设置了简单阈值,利用了裂缝在正数区域的响应,所以Sobel+匹配滤波联



（a）三维路面图像　（b）标签图像　（c）Sobel+匹配滤波算法测试效果　（d）Sobel+闭运算联合算法测试效果　（e）Sobel算法测试效果

图 12　Sobel算法、Sobel+闭运算联合算法、Sobel+匹配滤波联合算法在典型图片上的测试效果

Figure 12　Test results of Sobel algorithm，Sobel + morphological closing joint algorithm，and Sobel + matched filter joint algorithm on typical images



（a）假阴性错误

（b）假阳性错误

图 13　Sobel+匹配滤波联合算法的典型错误

Figure 13　Typical errors of Sobel + matched filter joint algorithm

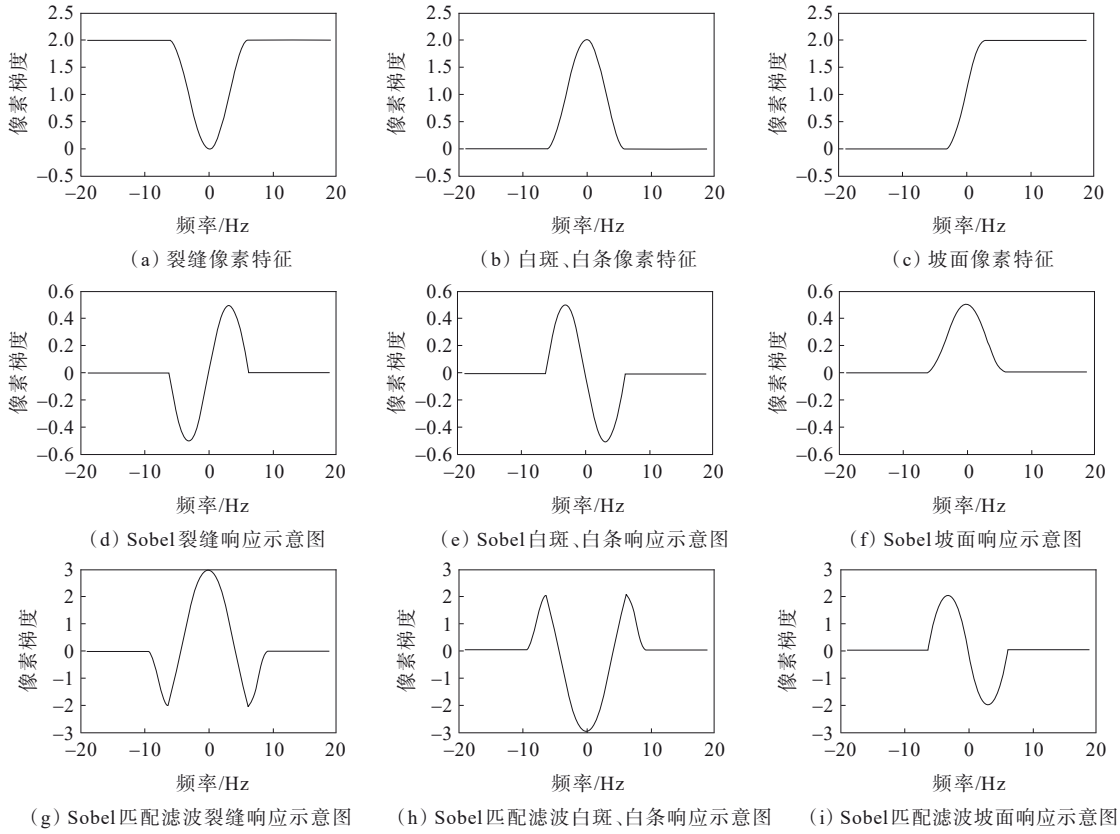


图14 裂缝、白斑、白条、坡面产生的响应示意图

Figure 14 Response of cracks, white spots, white stripes, and slopes

合算法的效果与Xu等[24]使用的匹配滤波算法的效果基本一致。在未来的工作中,应当将裂缝在正数区域和负数区域的响应同时利用起来,从而进一步提高Sobel+匹配滤波联合算法的性能。

5 结论

(1) 提出了一种基于Sobel算法与匹配滤波联合的三维路面裂缝识别方法。通过设计正弦函数形式的匹配滤波器,该方法有效解决了传统Sobel算法存在的3个关键问题:① 消除了裂缝识别的空心化现象;② 显著降低了白条、白斑及坡面等干扰因素的误判率;③ 抑制了噪声干扰,并改善了裂缝的连续性。

(2) 使用200张三维路面图像对该算法进行验证,其准确率、召回率、F值分别达到84.72%、95.32%、89.44%。在对比试验中,Sobel算法+匹配滤波联合算法性能优于Sobel算法和Sobel+闭运算联合算法。

(3) Sobel+匹配滤波联合算法并未达到很高的准确率,这是因为该算法只利用了裂缝在正数区域的响应。因此,下一步的研究工作应同时利用裂缝在正数区域和负数区域的响应,从而进一步提高Sobel+匹配滤波联合算法的性能。

参考文献:

References:

[1] SMITH K L,ROMINE A R.Materials and procedures for sealing and filling cracks in asphalt-surfaced pavements: Manual of practice[R]. Virginia: United States. Federal Highway Administration,1999.

[2] 王国龙.基于三维轮廓特征分析的沥青路面裂缝识别算法研究[D].成都:西南交通大学,2019.
WANG Guolong. Investigation of crack recognition algorithms based on analysis of 3D contour features on asphalt pavement surface[D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.

[3] NI F T,ZHANG J,CHEN Z Q.Pixel-level crack delineation in images with convolutional feature fusion[J]. Structural Control and Health Monitoring,2019,26(1):e2286.

[4] MOGHADAS NEJAD F, 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.

[5] WANG K C P. Elements of automated survey of pavements and a 3D methodology[J]. Journal of Modern Transportation,2011,19(1):51-57.

[6] 阳恩慧,张傲南,丁世海,等.基于三维光影模型的公路路

面裂缝自动识别算法[J].西南交通大学学报,2017,52(2):288-294.
YANG Enhui, ZHANG Aonan, DING Shihai, et al. Automatic detection method for highway pavement cracking based on the 3D shadow modeling[J].Journal of Southwest Jiaotong University,2017,52(2):288-294.

[7] TSAI Y, JIANG C L, WANG Z H. Pavement crack detection using high-resolution 3D line laser imaging technology[C]//Springer Netherlands: 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements,2012:169-178.

[8] LI B X, WANG K C P, ZHANG A, et al. Automatic classification of pavement crack using deep convolutional neural network[J]. International Journal of Pavement Engineering,2020,21(4):457-463.

[9] 阙云,季雪,蒋子平,等.GAN数据增强下路面裂缝语义分割算法[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(11):3166-3175.
QUE Yun, JI Xue, JIANG Ziping, et al. Semantic segmentation algorithm of pavement cracks based on GAN data augmentation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2023,53(11):3166-3175.

[10] 纪建,许双星,李晓.基于形态成分分析和Contourlet变换的自适应阈值图像去噪方法[J].模式识别与人工智能,2014,27(6):561-568.
JI Jian,XU Shuangxing,LI Xiao.An adaptive thresholding image denoising method based on morphological component analysis and Contourlet transform[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 27(6):561-568.

[11] ZHOU J. Wavelet-based pavement distress detection and evaluation[J].Optical Engineering,2006,45(2):027007.

[12] SHU Z B,GUO Y Q. Algorithm on contourlet domain in detection of road cracks for pavement images[C]//Hong Kong: 2010 Ninth International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science,2010:518-522.

[13] ROLI F.Measure of texture anisotropy for crack detection on textured surfaces[J]. Electronics Letters, 1996, 32(14):1274-1275.

[14] NGUYEN T S,AVILA M,BEGOT S.Automatic detection and classification of defect on road pavement using anisotropy measure[C]//Glasgow: 2009 17th European Signal Processing Conference,2009:617-621.

[15] 彭博,WANG K C P,陈成,等.基于各向异性测度的路面三维图像裂缝识别[J].西南交通大学学报,2014,49(5):888-895.
PENG Bo,WANG K C P,CHEN Cheng,et al.3D pavement crack image detection based on anisotropy measure[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2014,49(5):888-895.

[16] 段瑞玲,李庆祥,李玉和.图像边缘检测方法研究综述[J].光学技术,2005,31(3):415-419.
DUAN Ruiling,LI Qingxiang,LI Yuhe.Summary of image edge detection[J].Optical Technique,2005,31(3):415-419.

[17] 王敬飞,邓然然,陈志毅,等.基于SFO-DPC算法的三维沥青路面裂缝检测[J].中外公路,2021,41(3):51-57.
WANG Jingfei, DENG Ranran, CHEN Zhiyi, et al. Crack detection of 3D asphalt pavement based on SFO-DPC algorithm[J].Journal of China & Foreign Highway,2021,41(3):51-57.

[18] 张建军,罗静.基于改进Sobel算子的表面裂纹边缘检测算法[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2011,34(6):845-847,960.
ZHANG Jianjun,LUO Jing.A surface crack edge detection algorithm based on improved Sobel operator[J].Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2011,34(6):845-847,960.

[19] 李灿灿,孙长辉,王静,等.基于改进的Sobel算子和色调信息的叶脉提取方法[J].农业工程学报,2011,27(7):196-199.
LI Cancan,SUN Changhui,WANG Jing,et al.Extraction of leaf vein based on improved Sobel algorithm and hue information[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(7):196-199.

[20] 庞炜辰,王富玉,杨旭.路面裂缝自动化修补中路径规划研究的进展概述与展望[J].中外公路,2022,42(2):68-72.
PANG Weichen, WANG Fuyu, YANG Xu. Overview and prospect of path planning research in automatic pavement crack repair[J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2):68-72.

[21] 魏海斌,武少威,张启帆,等.基于图像处理的沥青路面裂缝识别算法研究[J].中外公路,2020,40(4):73-78.
WEI Haibin, WU Shaowei, ZHANG Qifan, et al. Research on crack recognition algorithm of asphalt pavement based on image processing[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(4):73-78.

[22] 刘建华,董家修,王念念,等.基于Crack Mask R-CNN模型的路面裂缝像素级分割及测量算法应用分析[J].中外公路,2023,43(5):47-52.
LIU Jianhua, DONG Jiaxiu, WANG Niannian, et al. Analysis on application of pixel-level segmentation and measurement algorithm road pavement cracks based on Crack Mask R-CNN model[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(5):47-52.

[23] 苏卫国,王景霄.基于YOLO v3深度学习算法的道路裂缝识别模型研究[J].中外公路,2023,43(2):58-63.
SU Weiguo, WANG Jingxiao. Research on road crack recognition model based on YOLO v3 deep learning algorithm[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(2):58-63.

[24] XU Z G, ZHAO X M, ZHANG L C. Asphalt pavement crack recognition algorithm using shape analysis[J]. ICIC Express Letters,Part B:Applications,2011,2(3):671-678.

[25] 高凡,贺春光,王鹏章,等.数字图像处理在混凝土路面裂缝中的应用[J].中外公路,2023,43(1):44-51.
GAO Fan, HE Chunguang, WANG Pengzhang, et al. Application of digital image processing in cracks of concrete pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(1):44-51.