

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210757

基于亚像素级的墙面裂缝宽度检测方法研究*

朱代先¹ 齐蜻蜓¹ 车路行¹ 刘佳² 刘树林³(1.西安科技大学通信与信息工程学院 西安 710054; 2.西安科技大学理学院 西安 710054;
3.西安科技大学电气与控制工程学院 西安 710054)

摘要: 针对目前计算墙面裂缝宽度精度低的问题,提出一种基于亚像素级裂缝宽度计算方法。该方法在提取裂缝区域的基础上,运用基于中轴线垂线的裂缝宽度测量方法,结合多项式拟合裂缝边缘,提取裂缝左右边缘亚像素坐标点,从而运用欧式距离方法计算出亚像素级裂缝宽度,并且与像素级计算宽度的方法进行了对比。实验的结果表明,该算法计算结果更加精确,可用于多种类型的墙面裂缝宽度测量,其中纵向、横向和交叉裂缝测量的平均相对误差分别为3.02%、2.44%和3.72%,相比于像素级方法,平均误差分别减少了1.87%、1.95%和2.07%,具有较强的泛化能力以及稳定性。

关键词: 亚像素级;中轴线法;欧式距离;多项式拟合

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Research on detection method of wall crack width based on sub-pixel level

Zhu Daixian¹ Qi Qingting¹ Che Luxing¹ Liu Jia² Liu Shulin³(1. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. College of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the problem of low accuracy in calculating the width of wall cracks, a sub-pixel based crack width calculation method is proposed. On the basis of extracting the crack area, this method uses the crack width measurement method based on the vertical line of the central axis, combined with polynomial fitting the crack edge, and extracts the sub-pixel coordinate points of the left and right edges of the crack, so as to calculate the sub-pixel crack width by using the Euclidean distance method, and compares it with the pixel level calculation method. The experimental results show that the algorithm is more accurate and can be used to measure the width of various types of wall cracks. The average relative errors of longitudinal, transverse and cross cracks are 3.02%, 2.44% and 3.72% respectively. Compared with the pixel level method, the average errors are reduced by 1.87%, 1.95% and 2.07% respectively, it has strong generalization ability and stability.

Keywords: sub-pixel level; central axis method; euclidean distance; polynomial fitting

0 引言

随着我国建筑业的快速发展,社会对建筑业的质量提出了更高的要求,不仅应满足居民在功能上的一定需求,还要符合当今社会的审美标准。然而,由于居住时间或天气环境等原因,建筑物表面会出现不同程度或不同类型的裂缝,从而极大地降低建筑物自身的承载能力,同时产生渗透和腐蚀等问题,最终缩短其使用寿命,严重威胁到人身安全以及经济损失^[1]。因此,有必要对墙面裂缝的严重程度进

行深入研究,以评估墙面的状况,以便维护墙面检查数据库,进行长期分析。

图像处理技术的进步使研究人员能够开发出裂缝检测方法,从而产生精确的裂缝分割图像。然而,获得一个准确的裂缝图像只能显示裂缝的位置,而不能表示裂缝的严重程度。裂缝的严重程度由裂缝的特征决定,如裂缝的长度、宽度和面积。早期的墙面破损检测和评估主要是依靠人工来完成^[2],不仅费时费力,成本高,同时裂缝的长度和宽度取决于操作者的专业程度,直接影响了裂缝长度和宽度测

收稿日期:2022-07-21

* 基金项目:陕西省重点研发计划(2021GY-338)、西安市科技局计划项目(21RGSF0017)资助

量的精度^[9],除此还存在相关风险。

到目前为止,文献[4-5]只是对裂缝进行检测定位以及识别,并不能准确分割裂缝而且需要大量数据。文献[6-8]采用平均法获得了平均裂缝宽度,但该方法降低了裂缝的严重程度。因此,研究人员开始测量每个点的裂缝宽度,以提供更准确的裂缝宽度信息。文献[9]提出裂缝的宽度是两个边界到骨架像素之间的最短距离。文献[10-12]将裂缝区域估计为矩形,利用裂缝周长与面积间关系计算裂缝平均宽度,这些方法没有考虑裂缝的延伸方向,因此低估了裂缝的宽度。

随后研究人员结合裂缝扩展方向,以获得更为准确的裂缝宽度估计。在文献[13]中,提出了基于拉普拉斯方程的裂缝宽度建模,其中一个边界上的每个像素对应于相反边界上的另一个像素,裂缝宽度是基于两点轨迹的距离。文献[14]中提出一种将裂缝区域进行分块,将裂缝区域块边缘点与投影点连接,计算连接点的欧式距离,从而计算裂缝块的平均宽度来估算裂缝的宽度,此方法在估算整体裂缝宽度时存在一定误差。文献[15]中提出了一种正交投影方法来测量每个骨架像素处的裂缝宽度,其次根据边界点形成轮廓线,从而简化了裂缝的几何形状,该距离为正交射线相交点与简化的轮廓之间的欧氏距离。该方法高估了不平行边界处的裂缝宽度。文献[16]中通过计算中轴线到裂缝边缘两侧的最小距离来评估混凝土表面的裂缝宽度。但此方法对不规则裂缝不友好。

综上所述,以上所提出方法对细小的裂缝计算精度不高。本文采用亚像素级方法对裂缝宽度进行测量,亚像素是进一步细化像素单元,用于提高边缘检测的精度,并在相同的硬件条件下更准确地提取墙面裂缝的宽度。在图像分割等预处理的基础上,将运用基于中轴线垂线法的裂缝宽度测量算法,结合多项式拟合裂缝边缘,提取裂缝左右边缘亚像素坐标点,更精准地计算裂缝的宽度。并且所有操作都可以在计算机上统一进行,大大提高了检测的效率和精度,符合宽度的测量要求,具有优良的精度以及可行性。

1 传统墙面裂缝宽度测量

裂缝宽度是评估墙面破坏程度的重要指标之一。计算裂缝宽度时应结合应用场景和需求选择合适的宽度定义,根据裂缝宽度的定义,运用所对应的方法。传统裂缝宽度计算的流程如图1所示,首先对采集的墙面裂缝图像进行灰度化、裂缝分割、图像膨胀腐蚀、去除孤立点等预处理,得到较为清晰的裂缝二值化图像;其次在此基础上对纵向裂缝、横向裂缝和交叉裂缝进行分类;最终利用中轴线垂线法计算裂缝的宽度。

1.1 墙面裂缝图像预处理

首先,对图2(a)中的墙面图像进行灰度化处理,结果如图2(b)所示。其次,在墙面裂缝图像中,墙面裂缝区域的灰度值和背景区域的灰度值区别较大,本文采用阈值分

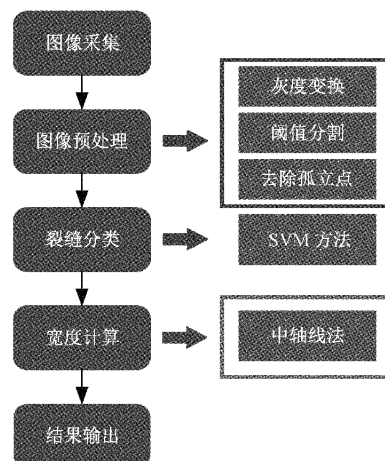
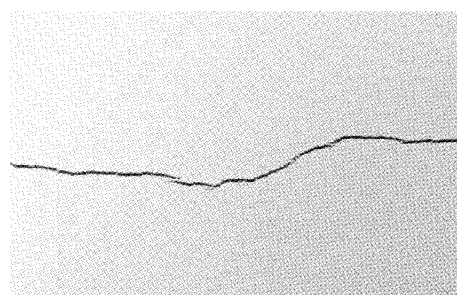
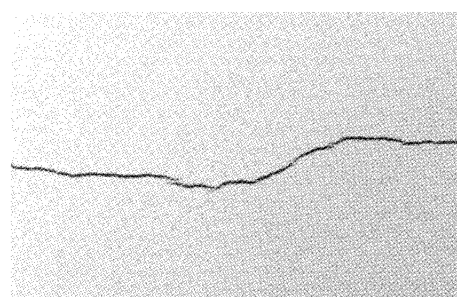


图1 裂缝宽度计算流程

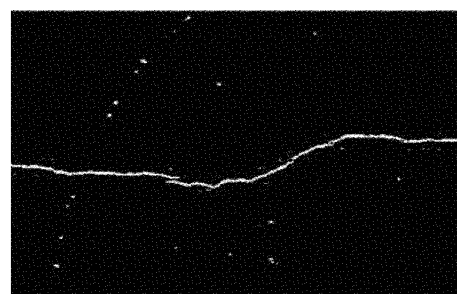
割中的最大类间差法(Otsu)^[17]来分割墙面裂缝图像,从而获得墙面裂缝的二值图像。根据其二值图像的相关特征,可以将墙面裂缝图像分为背景和前景两个区域,如图2(c)所示。由于阈值分割后的图像会存在大量的噪声信息,甚至会出现丢失及断裂等问题,影响其边缘检测。利用形态学方法中的开操作、闭操作以及连通域分析法可以处理以



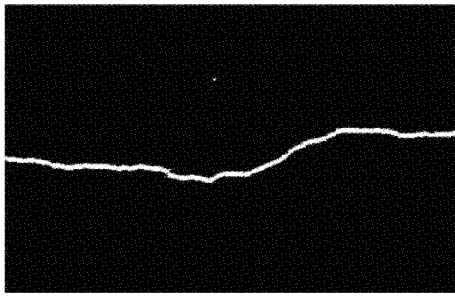
(a) 原图



(b) 灰度变换



(c) 图像分割



(d) 去除孤立点

图 2 墙面裂缝图像预处理

上所存在的问题,保留面积最大的连通域,消除图像上的噪声,墙面裂缝区域的边缘可以被有效的平滑,如图 2(d)所示。

1.2 裂缝目标分类

图像进行预处理之后,可以有效地分割墙面裂缝。由于判断墙面裂缝的类型,可以准确地反映裂缝的走向,精确地计算出裂缝的大小,确定墙面的破损程度。本文从图像中获取目标区域的统计特征(线统计特征、块统计特征)和几何特征(长宽比、圆形度、填充率、裂缝区域),运用传统的机器学习方法——支持向量机(support vector machine, SVM)^[18]分类器对墙面裂缝进行分类,墙面裂缝分类设计的总体流程如图 3 所示。

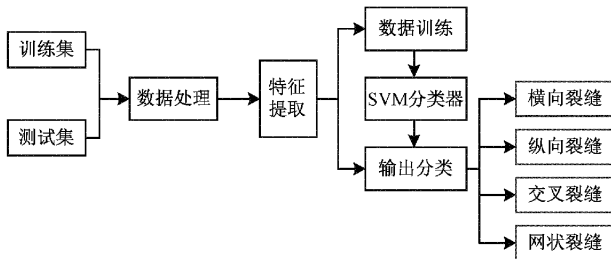


图 3 分类设计流程

SVM 主要是解决二分类识别问题,适用于小样本分类,通过最大化两类之间的边际来分离数据,是一种功能强大的分类方法之一。该方法需要一个训练步骤来为特征空间中的数据找到一个分离的超平面,如图 4 是由最佳超平面分隔的两类数据,其中超平面线位于 $wx - b = +1$ 和 $wx - b = -1$ 所拥有的支持向量模式的中间。计算公式如下:

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} W^T W + C \sum_{i=1}^l \xi_i \quad (1)$$

目标函数如式(2)所示。

$$y_i (W^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i, \xi_i \geq 0 \quad (2)$$

其中, (x_i, y_i) 为数据集的标签对, W 表示分离超平面的法向量, C 是误差项的惩罚参数, b 是超平面的偏移量, 松弛变量 ξ_i 用于分类。支持向量机使用核函数 $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i) T \varphi(x_j)$ 将数据转换为高维特征空间,在该空间中,数据可以有效地线性分离。

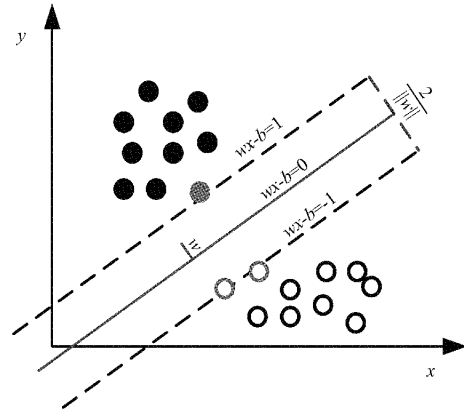


图 4 SVM 超平面

1.3 基于中轴线裂缝宽度计算

基于中轴线垂线法^[19]计算裂缝宽度的过程如下:首先,在对裂缝进行准确分类的基础上,利用形态骨架法来获得裂缝中心线,如图 5 所示;其次,确定中心线上需要检测宽度的点,利用检测点前后的两个点确定其切线,从而可以获得检测点的法线,沿着法线方向延伸到裂缝边界,与边缘相交于两点,计算出两点的欧式距离定义为裂缝的宽度;最后利用标定系数将量化的宽度转换为单位长度。

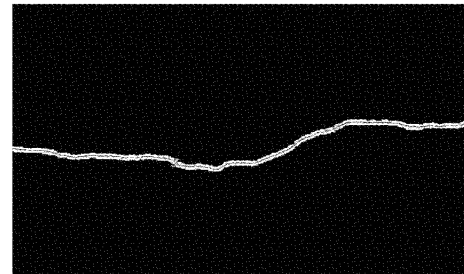


图 5 中心线检测

为保证裂缝宽度的计算精度,选择基于中轴线垂线的方法来计算裂缝宽度。然而根据实验结果,该方法的计算精度受限于图像的精度,即裂缝识别的最小宽度大于 1 个像素点,因此裂缝宽度的误差比较大,识别精度较低。为了解决该问题,从突破像素点的限制方向出发,以基于中轴线垂线的裂缝宽度计算方法为基础,探索更准确的亚像素计算方法来提取裂缝宽度。

2 改进的亚像素级裂缝宽度计算和评估

本文提出的基于亚像素级墙面裂缝宽度计算方法,在进行预处理以及对裂缝类型分类的基础上,利用基于中轴线垂线结合多项式拟合边缘提取亚像素级的方法,准确地计算亚像素级裂缝宽度。

2.1 亚像素级算法

亚像素^[20]是相邻两像素之间细分的情况,是像素的基本单元,从而增加了图像的清晰度。亚像素定位技术可理解为通过软件算法或图像处理技术来增加边缘测量准确度

的方法,所述软件算法或图像处理技术使得相机硬件保持不变并且分辨率小于一个像素。亚像素检测技术一般可分成三种:基于矩的、基于插值的以及基于拟合的,本文将通过基于拟合值的方式来估算亚像素级的宽度裂缝。

2.2 基于多项式拟合的亚像素级裂缝宽度计算

亚像素边缘点通常位于图像区域的渐变中,可以通过多项式拟合等方法获得边缘点的亚像素位置,并且裂缝边缘处的灰度变化比较大,所以本文基于三次多项式拟合曲线的方法模拟灰度变化的近似曲线,二阶导数为0处为裂缝边缘的精确位置。结合基于中轴线垂线的裂缝宽度计算方法,以下是计算裂缝宽度的具体过程如下:

1)假设中轴线的检测点坐标为 P_n ,如图6所示,可以求出检测点上下相邻两个坐标 P_{n-1}, P_{n+1} ,从而计算出检测点 P_n 的切线斜率,计算公式如下:

$$k_{T(P_n)} = \frac{(k_{T(P_n, P_{n-1})} + k_{T(P_n, P_{n+1})})}{2} \quad (3)$$

式中: $k_{T(P_n, P_{n-1})}$ 经过点 P_n 和 P_{n-1} 的直线的斜率, $k_{T(P_n, P_{n+1})}$ 是经过点 P_n 和 P_{n+1} 的直线的斜率。骨架上点 P_n 的法线的斜率与切线的斜率是垂直的,计算公式如下:

$$k_{N(P_n)} = \frac{-1}{k_{T(P_n)}} \quad (4)$$

2)计算出法线斜率之后,可以确定检测点 P_n 的法线方向,从而沿着法线方向向裂缝边缘延伸,因此,可以获得和裂缝边缘相交的左右两个坐标点 F_i, F_j 。

3)得到了裂缝边缘的坐标点 F_i, F_j 之后,在边缘点 F_i 上选择一些像素点,并且这些像素点的方向应该和墙面裂缝的法线方向一样。像素序列必须通过所需的裂缝边缘,当像素点的灰度变化不明显时,应该停止选择像素点;

4)从而将像素点 F_i 作为原点,利用像素序列坐标和像素点的灰度值分别来表示横轴和纵轴,从而绘制出图像的灰度曲线,如图7所示。并且在这里采用了最小二乘法,通过多项式 $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 曲线进行拟合;

5)由于灰度变化在裂缝的边缘最为明显,因此对多项式 $f(x)$ 进行了二阶求导 $\frac{d^2f(x)}{dx^2}$,直至 $\frac{d^2f(x)}{dx^2} = 0$,此时的点就是 F_i 所对应的亚像素点;

6)同理,运用上述步骤3)~5)求取边缘点 F_j 的亚像素点;

7)利用欧式距离公式求出左边缘点 $F(x_i, y_i)$ 与右边缘点 $F(x_j, y_j)$ 的距离,便是要求取的裂缝亚像素宽度,绿色方块表示裂缝宽度(图6),计算公式如下:

$$W_n = \min(\sqrt{(y_j - y_i)^2 + (x_j - x_i)^2}) \quad (5)$$

2.3 墙面裂缝的评估标准

网状裂缝针对面积、块度等来评定严重程度,本文只研究裂缝宽度的计算方法,所以针对分类识别结果中的线性和交叉裂缝进行研究。参考各国墙面裂缝评定标准,结合《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144-2008标准,以中国

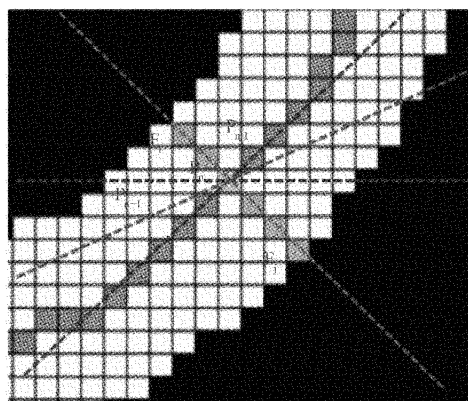


图6 骨架像素点宽度示意图

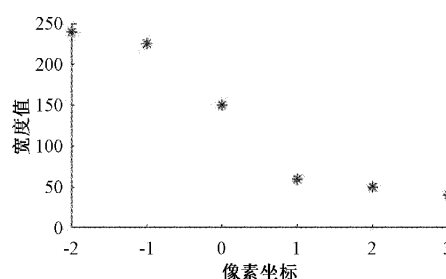


图7 裂缝边缘处的灰度分布

工程建设协会规定的《危险房屋鉴定标准》JGJ 125-2016中裂缝等级划分为依据,如表1将线性和交叉裂缝划分为4个等级,为后续墙面裂缝的维护提供依据,提高我国的房屋安全性能。

表1 裂缝等级评定标准

裂缝类型	损坏等级	破损程度/mm	安全影响
线性与交叉	1	0~0.3	无
	2	0.3~2	未来将会影响
	3	2~20	已将妨害影响
	4	20以上	严重妨害影响
网状	—	面积、块度	—

根据表1所示的墙面裂缝的量化依据和评价标准,就可以在墙面裂缝分类之后进行具体的量化和损伤程度的评价。

3 实验结果与分析

3.1 数据采集系统

针对目前墙面裂缝缺陷依靠人工采集存在劳动强度大、效率低以及存在人体生命安全等问题,本文采用了四旋翼无人机作为墙面裂缝图像采集的平台。无人机的重量大约为1300g,高25cm,长宽均为20cm,如图8所示。该系统由英特尔NUC机载电脑、PX4飞行控制器、双目相机、树莓派、视觉传感器等组件构成。无人机是将双目相机与

树莓派连接,树莓派将采集到的图像输出到电脑端,随着无人机移动不间断的拍摄图像,实时抓取墙面裂缝图像。

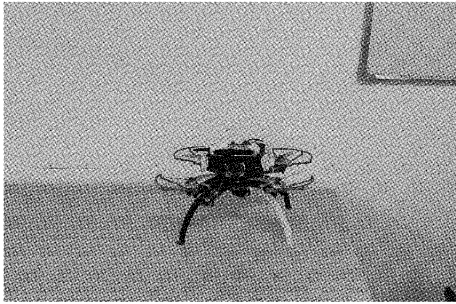


图 8 图像采集系统

3.2 分类结果分析

为了实现 SVM 分类的目标,选择 612 张图片作为分类器训练样本集,分别是 157 张横向裂缝、149 张纵向裂缝、144 张交叉裂缝和 162 张网状裂缝图片,并选择 200 张裂缝图像作为测试集。为了评估分类结果的优越性,本文采用正确率 A_c 、准确率 P_r 、召回率 R_e 和 F_1 分数(F1-score)作为分类方法评价指标。墙面裂缝分类测试的结果如表 2 所示。

表 2 裂缝分类结果 %

裂缝类型	A_c	P_r	R_e	F_1
横向裂缝	91.47	90.13	91.78	90.95
纵向裂缝	90.34	87.69	89.47	88.57
交叉裂缝	86.09	83.44	86.03	84.72
网状裂缝	87.37	85.37	86.74	86.05

由上述实验结果可知,各种裂缝测试集的正确率、准确率以及召回率明显都可以满足墙面裂缝的分类,F1-score 值也明显达到了预期效果,SVM 分类器在本文可以有效的对墙面裂缝进行分类。

3.3 裂缝宽度的结果分析

根据图像大小计算得像素的标定系数 $\delta=0.117 \text{ mm/pix}$ 。为了验证本文方法计算裂缝宽度误差更小,更加适用于墙面细小裂缝,从而在现有数据图像中任选 3 张图像,图 9 为采集的纵向墙面裂缝图像,图 10 为采集的横向墙面裂缝图像,图 11 为采集的交叉墙面裂缝图像,分别在墙面裂缝上随机选取了 8 个测点。

在以上 3 种裂缝图像中任意选取一些测试点,运用本文提出的中轴线垂线法结合多项式拟合裂缝边缘的亚像素级计算方法对裂缝宽度进行计算并与基于中轴线的像素级裂缝宽度的计算结果进行对比,纵向裂缝、横向裂缝和交叉裂缝宽度的计算结果对比分别如表 3~5。在实际应用中,计算结果的准确性一般都采用相对误差来表示,计算公式如下:

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{测试值} - \text{实际值}|}{\text{实际值}} \quad (6)$$

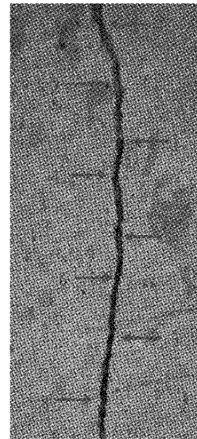


图 9 纵向裂缝图像

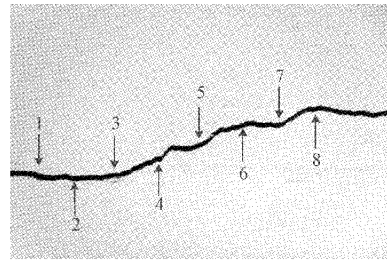


图 10 横向裂缝图像

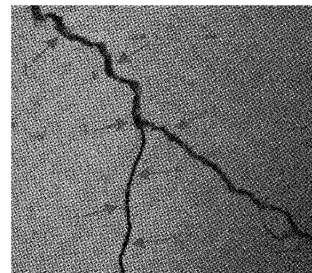


图 11 交叉裂缝图像

表 3 纵向裂缝测量结果对比表

测点序号	人工测宽/mm	像素级方法		亚像素级方法	
		计算宽度/mm	相对误差/%	计算宽度/mm	相对误差/%
1	0.76	0.79	3.95	0.79	3.95
2	1.14	1.20	5.26	1.16	1.75
3	1.68	1.73	2.98	1.70	1.19
4	0.88	0.95	7.95	0.93	5.68
5	0.92	0.96	5.43	0.95	3.26
6	1.17	1.23	4.27	1.21	3.42
7	1.21	1.25	2.48	1.22	0.83
8	0.74	0.69	6.76	0.71	4.05
平均值	—	—	4.89	—	3.02

表4 横向裂缝测量结果对比表

测点 序号	人工 测宽/ mm	像素级方法		亚像素级方法	
		计算 宽度/mm	相对 误差/%	计算 宽度/mm	相对 误差/%
1	1.41	1.47	4.26	1.41	0.00
2	1.44	1.38	4.17	1.39	3.47
3	1.38	1.33	3.63	1.34	2.89
4	1.32	1.23	6.82	1.27	3.79
5	1.43	1.49	4.19	1.47	2.81
6	1.37	1.42	3.65	1.38	0.72
7	1.54	1.45	5.84	1.49	3.25
8	1.57	1.61	2.55	1.61	2.55
平均值	—	—	4.39	—	2.44

表5 交叉裂缝测量结果对比表

测点 序号	人工 测宽/ mm	像素级方法		亚像素级方法	
		计算 宽度/mm	相对 误差/%	计算 宽度/mm	相对 误差/%
1	2.01	2.10	4.48	2.07	2.99
2	1.94	1.89	2.58	1.91	1.55
3	2.18	2.33	5.96	2.27	4.13
4	1.57	1.53	2.55	1.54	1.91
5	1.32	1.47	11.36	1.39	5.30
6	2.09	2.17	3.83	2.16	3.35
7	1.66	1.81	9.04	1.77	6.63
8	1.53	1.63	6.54	1.59	3.92
平均值	—	—	5.79	—	3.72

由表3~5可知,对于纵向裂缝宽度的计算结果,本文算法的相对误差的平均值为3.02%,而像素级方法对应相对误差平均值为4.89%。很显然,本文算法相比于像素级方法相对误差减少了1.87%,计算结果更加接近真实值,可知运用亚像素级的算法可以更加精确地测量纵向裂缝的宽度。同时将横向裂缝和交叉裂缝宽度计算的结果和像素级的宽度进行了对比,可以发现本文的计算方法相对误差的平均值分别为2.44%和3.72%,均比像素级算法相对误差减少了1.95%和2.07%。尽管交叉裂缝的宽度误差还是比其它两个的误差大,但是相比于像素级的裂缝宽度,误差已经减少了很多。计算结果表明,本文提出的方法可以比较准确地得到不同类型和不同宽度的裂缝计算结果,符合实际应用的标准,该方法具有更好的泛化能力。

3.4 实际应用

为了充分掌握墙面裂缝信息,给墙面养护管理、墙面性能评价与预测,对墙面裂缝图像自动分类与严重程度识别进行研究。验证本文所提宽度测量方法的性能,在不考虑人工测量裂缝时存在读数误差的情况下,对图9~11裂缝上各自随机选取8个测点,使用人工测量结果与数字图

像处理计算平均宽度结果进行对比,对不同类型墙面裂缝进行损伤程度评估,计算本文所提出宽度测量方法的相对误差,其结果如表6所示。

表6 墙面损伤程度评价结果

裂缝图像	人工测量/mm	本文方法/mm	损坏等级
图9	1.063	1.083	2
图10	1.433	1.42	2
图11	1.788	1.838	2

由表6可以看出,针对前期分类识别出的纵向、横向和交叉裂缝进行平均宽度计算,人工测量的平均宽度和本文的方法计算出的宽度接近,根据墙面裂缝损坏标准,对人工测量和本文方法计算的裂缝宽度进行损坏等级的评定,其结果一致。因此,可以认为本文所提出的宽度测量方法对监测点处裂缝宽度参数测量的精度较高,数字图像处理技术可以批量计算裂缝宽度,进行墙面损伤评定,效率更高,节省成本,能够有效满足工程应用要求。

4 结 论

本文提出了一种基于中轴线垂线的裂缝宽度计算方法的基础上,结合多项式拟合裂缝边缘提取亚像素坐标,计算出更加准确的亚像素级裂缝宽度。将本文方法与像素级方法进行对比,计算纵向裂缝、横向裂缝和交叉裂缝宽度的平均误差分别减少了1.87%、1.95%和2.07%。可以比较准确地得到不同类型的裂缝宽度,适用性较强,并且符合实际应用的标准,具有较强的泛化能力。目前只能依靠传统的数字图像处理方法来处理和分析2D图像,不能准确的对墙面裂缝的深度进行量化,后期将对如何计算墙面裂缝深度进一步研究。

参考文献

- [1] 缪盾. 基于改进Canny算法的墙面裂缝自动识别及量测[J]. 工程勘察, 2021, 49(10): 49-53.
- [2] JAHANSHAHI M R, MASRI S F. A new methodology for noncontact accurate crack width measurement through photogrammetry for automated structural safety evaluation[J]. Smart Mater Struct, 2020, 22(3): 035019.
- [3] WENG X, HUANG Y, WANG W. Segment-based pavement crack quantification [J]. Automation in Construction, 2019, 105: 102819.
- [4] 廖延娜, 宋超. 基于深度学习的桥梁裂缝定位算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(4): 112-118.
- [5] 陶志勇, 于子佳, 林森. PSO_SVM算法在太阳能电池板裂缝缺陷检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 18-25.
- [6] YANG X, LI H, YU Y, et al. Automatic pixel-level

- crack detection and measurement using fully convolutional network[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018, 33(12): 1090-1109.
- [7] JI A, XUE X, WANG Y, et al. An integrated approach to automatic pixellevel crack detection and quantification of asphalt pavement[J]. *Automation in Construction*, 2020, 114: 103176.
- [8] 郭全民, 刘才臻. 路面病害巡检评估系统中的裂缝检测技术[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(7): 47-50.
- [9] LIU C, TANG C S, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. *Computers and Geosciences*, 2013, 57: 77-80.
- [10] BENZ C, RODEHORST V. Model-based crack width estimation using rectangle transform[C]. *International Conference on Machine Vision and Applications*, 2021: 1-5.
- [11] 刘娟红, 孟翔, 段品佳, 等. 基于 MATLAB 的混凝土裂缝宽度计算方法研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(6): 84-89.
- [12] 马文涛, 樊春玲. 基于计算机视觉路面裂缝的识别与测量[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(19): 85-88.
- [13] WANG W, ZHANG A, WANG K, et al. Pavement crack width measurement based on laplace's equation for continuity and unambiguity[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018, 33(2): 110-123.
- [14] 陈立潮, 张媛媛, 秦宇强, 等. 基于图像处理的隧道裂缝安全预警[J]. *计算机工程与设计*, 2020, 41(12): 3479-3484.
- [15] QIU S, WANG W, WANG S, et al. Methodology for accurate AASHTO PP67-10-based cracking quantification using 1-mm 3D pavement images[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 31(2): 04016056.
- [16] SHAN B, ZHENG S, OU J. A stereovision-based crack width detection approach for concrete surface assessment[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 20(2): 803-812.
- [17] 房铭坤, 付国. 基于数字图像处理的混凝土裂缝宽度检测方法研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(S2): 630-634.
- [18] 袁依文, 雷斌. 无人机视觉技术在道路裂缝分类中的应用[J]. *机械设计与制造*, 2022(5): 235-239.
- [19] PAYAB M, ABBASINA R, KHANZADI M. A brief review and a new graph based image analysis for concrete crack quantification [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2019, 26(2): 347-365.
- [20] 李开平, 蔡萍. 数字图像相关方法的亚像素算法性能研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 180-187.

作者简介

朱代先, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为智能机器人、嵌入式系统。

E-mail: zhudaixian@xust.edu.cn

齐蜻蜓, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、缺陷检测。

E-mail: 394092429@qq.com

车路行, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、目标检测。

E-mail: 252609883@qq.com

刘佳, 博士, 副教授, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理。

E-mail: 453256673@qq.com

刘树林, 博士, 教授, 主要研究方向为开关变换器的分析与设计及本质安全电路。

E-mail: lsigma@163.com