

# 隧道衬砌裂缝的远距离图像测量技术

刘学增<sup>1,2</sup>, 叶康<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木信息技术教育部工程研究中心, 上海 200092; 2. 上海同济建设工程质量检测站, 上海 200092;  
3. 上海同岩土木工程科技有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 针对远距离数字照相所采集的隧道衬砌裂缝图像自身特点, 结合实验数据拟合标定曲线的相机标定方法, 采用图像增强预处理、循环迭代法裂缝区域提取、数学形态学修整、亚像素边缘检测等图像处理手段, 提出隧道衬砌裂缝识别及宽度量测新算法。经室内试验验证, 当拍摄距离小于 8 m 时, 算法精度较高, 裂缝宽度量测误差一般小于 0.40 mm; 根据现场实际情况可知, 该算法误差最大为 0.37 mm, 最小为 0.08 mm, 平均误差为 0.20 mm, 满足工程测量的要求。

**关键词:** 数字图像处理; 隧道衬砌裂缝; 区域提取; 亚像素; 边缘检测; 标定方法

**中图分类号:** U457.2

**文献标识码:** A

## A Long-distance Image Measuring Technique for Crack on Tunnel Lining

LIU Xuezheng<sup>1,2</sup>, YE Kang<sup>3</sup>

(1. Civil Engineering Research Center for Information Technology of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Tongji Construction Quality Testing Station, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Tongyan Civil Engineering Technology Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** According to its own characteristics of long-distance-taken image with cracks on tunnel lining, a new identification and width-measuring algorithm for tunnel lining crack was developed by combining the calibration curve of camera fitted with experimental data, on the basis of some image processing means, such as image enhancement pre-processing, region extraction of crack with loop iteration method, mathematical morphological analysis, edge detection of crack with sub-pixel method. Verified by laboratory tests, when the shooting distance is less than 8 m, the algorithm is of high precision and the measurement error of crack width is generally less than 0.40 mm. According to its application, the maximum error of this algorithm is 0.37mm, the minimum

error is 0.08mm, the average error is 0.20mm which meets the requirements of engineering measurement.

**Key words:** digital image processing; crack on tunnel lining; region extraction; sub-pixel; edge detection; calibration method

裂缝等缺陷的定量化一直是无损检测追求的目标。随着计算机技术的迅猛发展和相关理论的不完善, 基于数字图像处理的照相测量技术已深入到裂缝宽度测量、变形监测、岩体碎石识别等土木工程领域, 并发挥着非接触、相对便捷、直观和精确的优势。

2004 年, 李蒙等自主开发一套裂缝识别与分析软件<sup>[1]</sup>; 同年, 邹轶群等提出了一种基于数字图像处理的表面裂纹检测算法<sup>[2]</sup>; 张娟等分析了基于数字图像处理的路面裂缝识别与评价系统的工作原理<sup>[3]</sup>。2005 年, 刘清元等提出了判断混凝土裂纹的综合算法<sup>[4]</sup>。2006 年, 尹兰等利用了基于光测法的数字图像处理技术对混凝土表面裂缝宽度特征进行了测量和分析<sup>[5]</sup>。

然而, 以上研究的算法主要是针对通过接触式扫描或近距离拍摄所采集的裂缝放大图像, 而对于隧道中位置较高的(如拱顶、拱腰)裂缝, 手持接触采集过程繁琐。裂缝在远距离拍摄图像中的面积占有比例比在接触式采集的图片中的比例要小得多, 使得近照中宽大裂缝的边缘提取算法不适用, 需寻找一种合适的新算法。

针对隧道衬砌结构裂缝的检测, 至今没有专门的数字化识别和分析系统。因此, 开发一种能便捷、定量、快速、准确地测量裂缝特征值的图像检测系统成为隧道工程结构无损检测领域的迫切需要之一。

收稿日期: 2011-01-25

第一作者: 刘学增(1971—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为岩土工程数字化。E-mail: xuezhengl@263.net

通讯作者: 叶康(1983—), 男, 硕士生, 主要研究方向为数字图像处理。E-mail: yekang19831119@163.com

# 1 基于图像处理的裂缝宽度测量方法

本文开发的隧道衬砌裂缝图像检测系统的具体流程如图1所示。

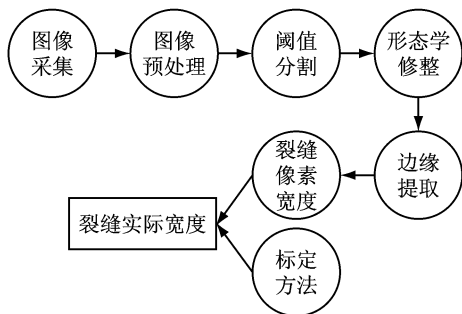


图1 系统流程图

Fig.1 System flowchart

硬件设备及图像采集. 采用高分辨率的数码相机可以有效地提高裂缝宽度识别的准确度, 考虑到工业数码相机的各种优势特点并未对本系统的算法精度有较大贡献, 且价格较贵, 因此本文采用 1420 万有效像素的 Sony α350 普通家用数码相机对裂缝进行正面照相, 用激光测距仪测定拍摄距离, 对工程中较大的裂缝采取分段采集的方法。

图像预处理. 它是图像分析前的重要工作, 目的是提高图像的质量. 本文采用基于中值滤波及灰度变换相结合的目标裂缝区域增强处理。

阈值确定. 阈值分割是最常见的直接检测区域技术. 但在整幅图像中灰度值的变化范围较大, 单一阈值不能满足要求, 本文通过改进的循环迭代算法动态地获取“和区域的灰度特性相匹配”的自适应阈值。

形态学修整. 利用形态学的开、闭运算, 对二值图像的裂缝区域进行处理, 从而达到平滑裂缝边缘的目的。

边缘提取. 裂缝最基本的特征是边缘, 边缘提取是整个过程中最重要的核心步骤, 边缘检测算法的好坏会在很大程度上影响检测的效果与精度, 本文采用基于 Zernike 正交矩的亚像素边缘检测改进算法<sup>[6]</sup>。

裂缝图像的像素宽度计算. 本文采用最小距离法, 所得裂缝宽度用像素数来表示。

标定方法. 通过相机标定来确定图像中像素和毫米之间的换算比例关系(标定系数)。

传统的标定方法为黏贴标尺法或定距标定, 即在裂缝所在平面放置一尺寸大小固定的物体作为标

尺, 标尺必须便于识别, 可以用很简单的图像处理算法量测其用像素表示的尺寸. 假设标尺实际尺寸为  $a$ , 像素尺寸为  $b$ , 通过两者的比值得到标定系数  $R$ , 公式为

$$R = a/b \quad (1)$$

上述方法只适用于待拍摄裂缝位置或拍摄距离固定的情况, 在隧道衬砌裂缝的检测中, 如果裂缝部位和拍摄距离发生变化, 传统标定方法失效. 本文在传统标定方法基础上加入拍摄距离这个影响因素, 运用实验数据拟合标定曲线确定相机在不同拍摄距离下的标定系数。

通过试验求得在固定镜头焦距下, 拍摄距离为  $L$  时, 图像中每个像素对应的实际尺寸  $R$ , 绘制标定曲线. 如图2所示, 根据相机的成像原理, 经过数据的验证, 在不进行光学变焦的情况下, 距离和比例是成线性关系的. 将裂缝像素宽度与标定比例相乘, 便能得到裂缝的实际宽度。

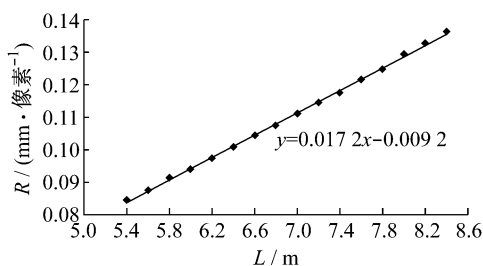


图2 标定曲线图

Fig.2 Calibration curve

## 2 裂缝图像识别算法

### 2.1 图像预处理

通过鼠标交互选择需要进行处理的区域, 防止由于图片太大而目标裂缝较小而出现的处理偏差, 将选中的区域转换成灰度图像, 采用中值滤波法去除图像噪声, 然后采用基于最小方差的掩模平滑法<sup>[7]</sup>与灰度变换相结合的方式, 对裂缝区域进行增强, 为后续步骤提供目标清晰的高质量图像. 如图3~5所示。

### 2.2 寻找全局阈值

经过图像增强, 假设裂缝区域是整幅图像中最暗的区域. 具体迭代算法按如下步骤执行:

(1) 先求出整幅图像的平均灰度值。

$$T_{ave} = \sum P/N \quad (2)$$

式中:  $T_{ave}$  为平均灰度值;  $\sum P$  为图像中所有像素的灰度总和;  $N$  为总像素数。

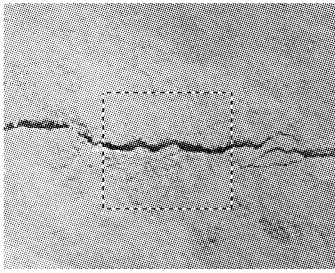


图 3 区域选择  
Fig.3 Selection of region

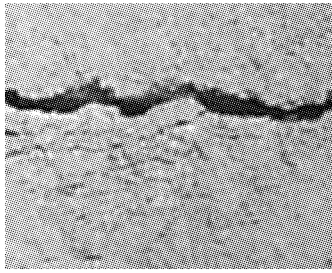


图 4 所选区域放大图(灰度图像)  
Fig.4 Enlargement of the selected region(gray image)

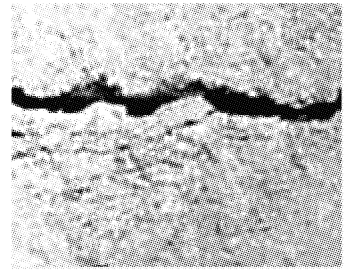


图 5 灰度变换后的增强图像  
Fig.5 Enhanced image after gray-scale transformation

将  $T_{ave}$  设为初始阈值  $T_k$ , 此时  $k=1$ .

(2) 根据  $T_1$  将图像分割成目标和背景 2 个部分, 将灰度小于  $T_1$  的区域称为目标区域, 大于  $T_1$  的区域称为背景区域, 然后再求出 2 个区域的平均灰度分别为  $T_{low}$  和  $T_{high}$ .

(3) 求出新阈值.

$$T_{k+1} = (T_{low} + T_{high})/2 \quad (3)$$

若  $T_{k+1} \neq T_k$ , 则将  $T_{k+1}$  代替  $T_k$ , 返回步骤(2), 同时使  $k$  增加 1 (即  $k=k+1$ ), 直到  $T_{k+1} = T_k$ .

(4) 将  $T_{k+1}$  当作最终的阈值, 进行二值化图像分割, 将图像黑白反转, 如图 6 所示, 目标区域中基本都包含了裂缝区域, 此外还有一些噪声点和一些灰度值与裂缝相差不大的小块区域.

### 2.3 提取裂缝区域

经过上述分割, 再寻找出目标区域中最大的那一块(即白色最大部分), 将其他区域赋值零(黑色), 就可以将包含裂缝的区域提取出来. 再经过以下方法进行判断:

将  $n \times n$  的正方形单位矩阵与图像进行腐蚀操作( $n$  为大于零的整数, 上述图片中的裂缝宽度最大不超过 15 个像素, 所以取  $n=15$ ), 看是否有与其匹配的区域.

(1) 如果有, 则说明所提取的区域中除了裂缝

区域, 还有大块背景区域被划入目标区域, 则进行如下处理:

由于裂缝区域是整幅图片中最暗的区域, 可以采用局部阈值的方法, 对原图像中对应于所提取区域的像素点进行灰度平均, 公式为

$$T_j = \sum P_i / N_i \quad (4)$$

式中:  $T_j$  为原图像中对应于所提取区域像素点的灰度平均值;  $\sum P_i$  为原图像中对应于所提取区域像素点的灰度总和;  $N_i$  为对应于所提取区域的像素点数量.

再根据  $T_j$  将图像二值分割成目标和背景两个部分, 进行图像黑白反转后, 转入判断式进行判断, 如此循环, 直到图像中没有与单位阵匹配的区域为止, 说明目标区域中已无大块非狭长形区域, 裂缝已占目标区域的绝大部分. 进入步骤 2.4.

(2) 如果没有, 则说明提取效果良好, 如图 7 所示, 进入步骤 2.4.

### 2.4 裂缝区域修正

运用形态学方法对图像进行开、闭运算, 达到孔洞填充, 剔除边缘毛刺等效果<sup>[8]</sup>, 然后再次寻找出最大的白色区域, 将其余区域均赋值为零, 保证图像中只有裂缝为白色区域, 最后如图 8 和图 9 所示.

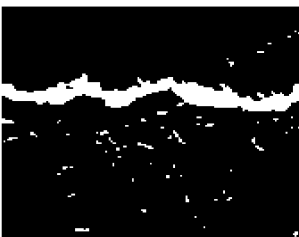


图 6 阈值分割  
Fig.6 Threshold segmentation

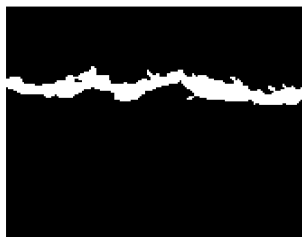


图 7 最大目标区域  
Fig.7 The largest target area

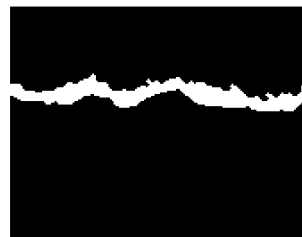


图 8 孔洞填充、剔除边缘毛刺  
Fig.8 Filling the holes and removing the edge burrs

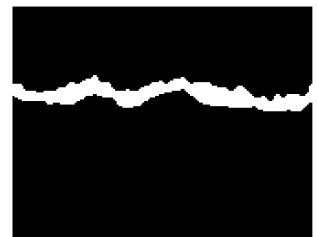


图 9 进一步平滑边缘  
Fig.9 Smoothing the edge

## 2.5 裂缝边缘提取

为了提高提取精度,本文采用了基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法. 图 10 是理想阶跃边缘模型<sup>[12]</sup>.

(1) 将式(5)~(8)中改进的  $7 \times 7$  的 Zernike 模板  $\{M_{00}, M_{11}, M_{20}\}$  和图像的每一个像素点进行卷积运算,以得到相应的图像 Zernike 矩  $\{Z_{00}, Z_{11}, Z_{20}\}$ , 通过图像的 Zernike 矩计算每个像素点的参数  $(\varphi, h, l, k)$ , 以判断该像素点是否为边缘点.

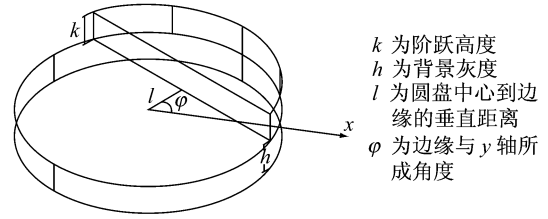


图 10 理想阶跃边缘模型

Fig.10 Ideal step edge model

$$M_{00} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0287 & 0.0686 & 0.0807 & 0.0686 & 0.0287 & 0 \\ 0.0287 & 0.0815 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0815 & 0.0287 \\ 0.0686 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0686 \\ 0.0807 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0807 \\ 0.0686 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0686 \\ 0.0287 & 0.0815 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0816 & 0.0815 & 0.0287 \\ 0 & 0.0287 & 0.0686 & 0.0807 & 0.0686 & 0.0287 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_{11Re} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0150 & 0.0190 & 0 & -0.0190 & -0.0150 & 0 \\ 0.0220 & 0.0470 & 0.0230 & 0 & -0.0230 & -0.0470 & -0.0220 \\ 0.0570 & 0.0470 & 0.0230 & 0 & -0.0230 & -0.0470 & -0.0570 \\ 0.0700 & 0.0470 & 0.0230 & 0 & -0.0230 & -0.0470 & -0.0700 \\ 0.0570 & 0.0470 & 0.0230 & 0 & -0.0230 & -0.0470 & -0.0570 \\ 0.0220 & 0.0470 & 0.0230 & 0 & -0.0230 & -0.0470 & -0.0220 \\ 0 & 0.0150 & 0.0190 & 0 & -0.0190 & -0.0150 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $M_{11Re}$  为  $M_{11}$  的实数模板.

$$M_{11Im} = \begin{bmatrix} 0 & -0.0220 & -0.0570 & -0.0700 & -0.0570 & -0.0220 & 0 \\ -0.0150 & -0.0470 & -0.0470 & -0.0470 & -0.0470 & -0.0470 & -0.0150 \\ -0.0190 & -0.0230 & -0.0230 & -0.0230 & -0.0230 & -0.0230 & -0.0190 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0190 & 0.0230 & 0.0230 & 0.0230 & 0.0230 & 0.0230 & 0.0190 \\ 0.0150 & 0.0470 & 0.0470 & 0.0470 & 0.0470 & 0.0470 & 0.0150 \\ 0 & 0.0220 & 0.0570 & 0.0700 & 0.0570 & 0.0220 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $M_{11Im}$  为  $M_{11}$  的虚数模板.

$$M_{20} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0230 & 0.0390 & 0.0410 & 0.0390 & 0.0230 & 0 \\ 0.0230 & 0.0270 & -0.0130 & -0.0260 & -0.0130 & 0.0270 & 0.0230 \\ 0.0390 & -0.0130 & -0.0530 & -0.0660 & -0.0530 & -0.0130 & 0.0390 \\ 0.0410 & -0.0260 & -0.0660 & -0.0810 & -0.0660 & -0.0260 & 0.0410 \\ 0.0390 & -0.0130 & -0.0530 & -0.0660 & -0.0530 & -0.0130 & 0.0390 \\ 0.0230 & 0.0270 & -0.0130 & -0.0260 & -0.0130 & 0.0270 & 0.0230 \\ 0 & 0.0230 & 0.0390 & 0.0410 & 0.0390 & 0.0230 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(2) 计算角度  $\varphi$ .

$$\varphi = \arctan[(\text{Im } Z_{11})/(\text{Re } Z_{11})] \quad (9)$$

(3) 计算  $Z'_{11}$ .

$$Z'_{11} = \text{Re } Z_{11} \cos \varphi + \text{Im } Z_{11} \sin \varphi \quad (10)$$

然后根据公式  $l = Z_{20}/Z'$ , 得到  $l$ .

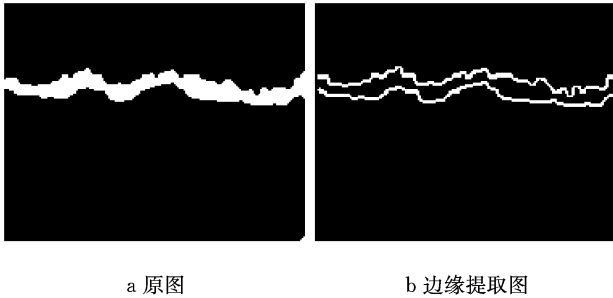
(4) 计算阶跃高度.

$$k = 3Z'_{11}/2(1-l^2)^{3/2} \quad (11)$$

(5) 计算背景灰度.

$$h = \frac{[Z_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin l + kl(1-l^2)^{1/2}]}{\pi} \quad (12)$$

(6) 获得了每一个像素点的边缘参数后,对  $k$  值进行后处理,确定阈值,二值化后再边缘细化得到最终的边缘图.如图 11 和图 12 所示.



a 原图 b 边缘提取图

图 11 亚像素边缘检测

Fig.11 Subpixel edge detection

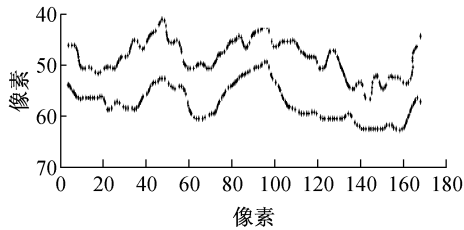


图 12 以亚像素点组成的精确边缘图

Fig.12 Accurate edge composed by subpixel points

## 2.6 横向裂缝及竖向裂缝的判别

分别计算裂缝在  $x$  轴、 $y$  轴上投影的长度,若  $x$  轴像素投影长度大于  $y$  轴像素投影长度,则说明裂缝沿  $x$  轴方向长度大于沿  $y$  轴方向长度,可判定该裂缝图像为横向裂缝;反之则为竖向裂缝.本文主要针对横向裂缝,因此将竖向裂缝进行旋转处理.

## 2.7 裂缝宽度计算

人为区分裂缝的上下边缘,分别选中上边缘的各点,采用“最小距离法”计算目标裂缝的宽度.

如图 13 所示,根据竖直方向上下边缘点的坐标,先从上边缘首个点开始,计算上下边缘点坐标差值的绝对值,算得的最小值作为该点到下边缘的距离,可表示为

$$w_i = \min(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}) \quad (13)$$

其中,  $k=0,1,2,3,\dots$

式(13)表示取上边缘的第  $i$  个点到下边缘所有点的距离的最小值.

依次算出上边缘每点到下边缘的距离值,将这些距离值平均或求最大,便是裂缝宽度的平均值和

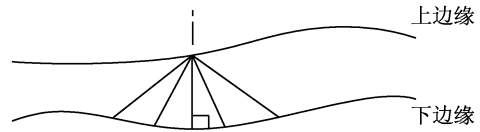


图 13 最小距离法示意图

Fig.13 Sketch map of minimum distance method

最大值,表示为

$$\bar{w} = \sum_i w_i / n \quad (14)$$

$$w_{\max} = \max w_i \quad (15)$$

## 3 算法精度影响因素分析

### 3.1 图像成像质量引起的误差

由于拍摄环境变化而引起的光线、粉尘噪声的变化使得所拍摄裂缝图像成像质量差异较大,在光照阴暗不均,空气中粉尘较多情况下成像,去噪过程会导致一定程度的边缘模糊,图像中阴影部分则会导致裂缝区域的误判,从而引起较大的误差.此外,拍摄技巧也能影响图像质量,如相机抖动、相机参数的设置不当等,均会影响后续的图像处理过程从而导致误差较大.

### 3.2 相机标定误差

相机拍摄距离确定后,为了通过目标区域占有的像素数来确定目标的实际尺寸,需要事先对相机进行标定.标定系数通过实验确定,误差大小取决于实验的精细程度.

### 3.3 图像识别算法本身误差

本文针对隧道衬砌裂缝图像的普遍特征,提出一种适用范围较广、识别效果较好的算法,可保证对大多数裂缝图像产生一个不错的分析效果,但在具体分析每幅裂缝图像过程中,或多或少会产生一定的误差.

### 3.4 拍摄角度变化引起的误差

根据试验分析结果可知:在拍摄距离为 6.0 m 的情况下,2 mm 裂缝图像(裂缝实际宽度为 2 mm)平均误差为 0.19 mm,5 mm 裂缝图像(裂缝实际宽度为 5 mm)平均误差为 0.09 mm,如图 14 所示;在拍摄距离为 7.2 m 的情况下,2 mm 裂缝图像平均误差为 0.34 mm,5 mm 裂缝图像平均误差为 0.22 mm,如图 15 所示.误差随着拍摄角度的变化在平均值周围上下浮动,不具有明显的规律性.一般来说,在拍摄条件较理想的情况下,只要能够保证拍摄角度量测的准确性且所拍摄图像具有良好的视觉效果,经过角度换算之后所得精度与正面拍摄情况下所得精度基本一致.

### 3.5 拍摄距离变化引起的误差

根据试验数据统计结果,量测系统的误差随着拍摄距离的增加而增大,且误差均为正值(即所测得裂缝宽度均偏大).由图 16 发展趋势线可知:当拍摄距离超过 8.0 m 时,裂缝宽度的误差一般均大于 0.40 mm,精度较低,因此,在裂缝图像采集过程中,拍摄距离越近,成像越清晰,分析精度越高.此外,5 mm 裂缝所测得误差始终比 2 mm 裂缝小,说明系统更适用于对宽度较大的裂缝进行分析量测,应尽量避免在距离较远的情况对细微裂缝的拍摄.

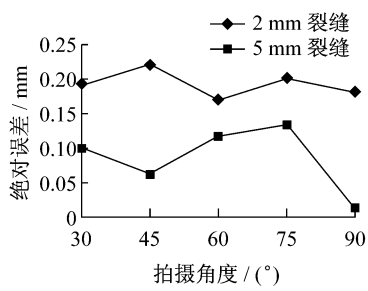


图 14 拍摄距离为 6.0 m 时多角度拍摄裂缝宽度误差  
Fig.14 Multi-angle shooting crack width error in shooting distance of 6.0 m

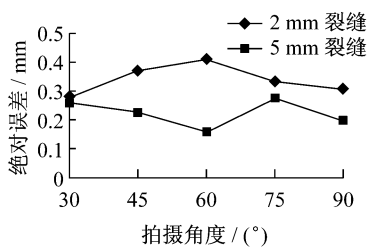


图 15 拍摄距离为 7.2 m 时多角度拍摄裂缝宽度误差  
Fig.15 Multi-angle shooting crack width error in shooting distance of 7.2 m

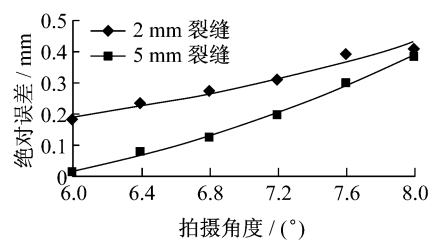


图 16 裂缝宽度量测误差与拍摄距离关系图  
Fig.16 Diagram of crack width measurement error and shooting distance

## 4 工程应用

### 4.1 实际工程图像分析

应用本系统对大连新港 1 号隧道进行裂缝调查,取得了较好效果,具体如下:

(1) 图像采集. 利用 sony  $\alpha$ 350 单反数码相机,采用 18~70 mm 标准镜头,将相机镜头固定为 70 mm 长度,用激光测距仪量测拍摄距离,对隧道衬砌裂缝进行正面照相,获取图像,如图 17 所示.

(2) 程序处理后的图像如图 18 所示.

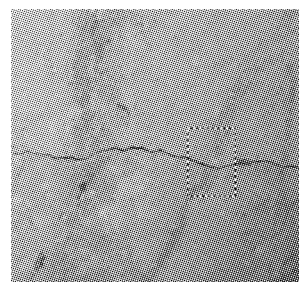


图 17 裂缝图像  
Fig.17 Image of crack

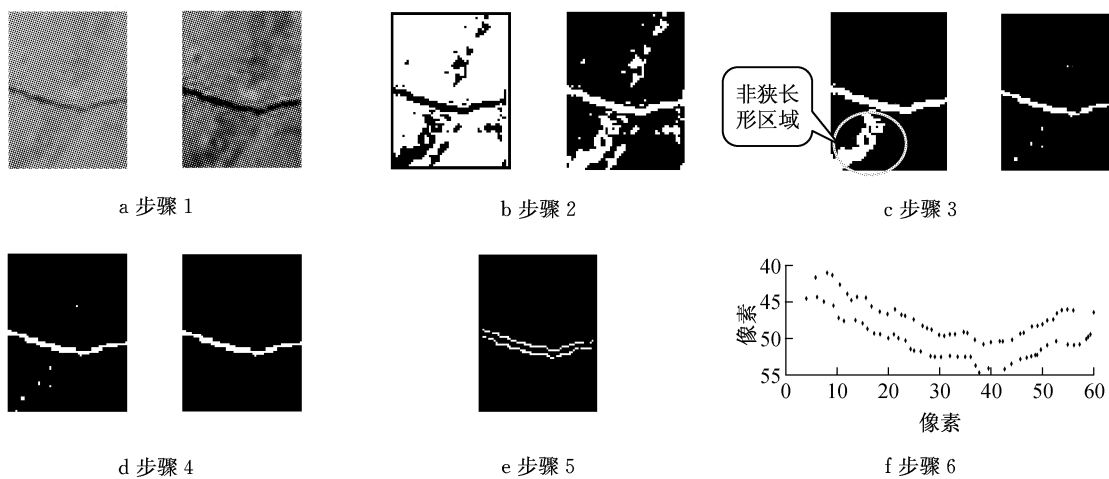


图 18 裂缝图像识别过程  
Fig.18 Identification process of image with crack

对应于图像处理的效果,其算法过程依次为:选择裂缝区域(如图17中虚线框所示),并作图像预处理,然后寻找全局阈值,并进行阈值分割,然后将图像黑白反转,经过匹配判断,证明有非狭长形区域(非裂缝区域)存在,则寻找局部阈值,对图像重新分割,得到较理想图像。接着,对图像进行一系列形态学处理,平滑边缘。最后,通过亚像素算法对裂缝进行边缘提取,描绘出以亚像素点表示的精确边缘图。

(3) 采用“最小距离法”计算目标裂缝的最大宽

度,得出裂缝由像素数表示的宽度 $W$ ,查表1可得标定比例 $R$ ,计算裂缝实际宽度为 $WR$ ,通过近距离接触式测量,得到裂缝真实宽度,进行对比分析。

#### 4.2 分析结果统计

对大连新港1号隧道100多张裂缝照片进行筛选,选取其中10张拍摄角度为正面 $90^\circ$ ,采集质量较好,具有代表性的裂缝图片进行处理分析,数据统计结果如表2所示,其中误差最大为0.37 mm,最小为0.08 mm,平均值为0.20 mm。

表2 裂缝分析结果统计  
Tab.2 Statistics of crack analysis

图像编号	拍摄距离/m	裂缝像素宽度/像素	裂缝实际宽度/mm		绝对误差/mm	相对误差/%
			由裂缝测宽仪量测	由计算机图像识别量测		
1	5.48	25.16	1.84	2.04	0.20	10.87
2	6.33	18.36	1.58	1.83	0.25	15.82
3	5.84	34.19	3.00	3.12	0.12	4.00
4	6.46	23.16	2.20	2.36	0.16	7.27
5	7.25	11.52	0.96	1.33	0.37	38.54
6	6.58	25.29	2.50	2.63	0.13	5.20
7	7.42	11.82	1.12	1.40	0.28	25.00
8	5.54	43.91	3.62	3.78	0.16	4.42
9	5.03	72.69	5.54	5.62	0.08	1.44
10	6.75	13.84	1.22	1.48	0.26	21.31

## 5 结论

(1) 本文将数码照相与数字图像处理相结合的技术首次运用于隧道衬砌裂缝宽度的测量,在传统算法的基础上,针对隧道衬砌裂缝图像的特点,通过手动选择处理区域、灰度变换增强图像、循环迭代法阈值分割、区域匹配排除非裂缝区域、亚像素边缘提取等图像处理技术,并结合实验所得标定数据,提出了隧道衬砌裂缝识别及宽度测量新算法。

(2) 本文算法误差主要是由图像成像质量、相机标定、算法自身不足、拍摄角度变化及拍摄距离变化等5个方面引起的。误差随着拍摄距离增加而增大,且误差均为正值;当拍摄距离超过8.0 m时,裂缝宽度量测误差一般均大于0.40 mm,精度较低,因此,拍摄距离越近,成像越清晰,分析精度越高;5 mm裂缝所测得误差始终比2 mm裂缝小,说明系统更适用于对宽度较大的裂缝进行分析量测。

(3) 工程实践证明,本文算法针对大部分隧道衬砌裂缝图像的分析效果均良好,现场实际应用误差最大为0.37 mm,最小为0.08 mm,平均误差为

0.20 mm,满足工程测量的要求。

#### 参考文献:

- [1] 李蒙. 工程结构构件裂纹的自动搜索与测量技术[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2004.  
LI Meng. Technology of automatic search and measurement of crack on engineering structure component[D]. Tianjin: Tianjin University. College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, 2004.
- [2] 邹铁群, 侯贵仓, 杨峰. 基于数字图像处理的表面裂纹检测算法[J]. 微计算机信息: 测控自动化, 2004, 20(4): 80.  
ZOU Yiqun, HOU Guicang, YANG Fen. A surface crack inspection algorithm based on digital image processing techniques[J]. Computer Control Automation, 2004, 20(4): 80.
- [3] 张娟, 沙爱民, 高怀钢, 等. 基于数字图像处理的路面裂缝自动识别与评价系统[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(2): 18.  
ZHANG Juan, SHA Aiming, GAO Huaigang, et al. Automatic pavement crack recognition and evaluation system based on digital image processing[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 18.
- [4] 刘清元, 谈桥. 基于图像处理的混凝土裂缝的检测[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(4): 69.  
LIU Qingyuan, TAN Qiao. Concrete crack detection based on

- image processing [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(4): 69.
- [5] 尹兰. 基于数字图像处理技术的混凝土表面裂缝特征测量和分析[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2006.
- YIN Lan. Measurement and analysis of crack feature of concrete based on digital image processing techniques [D]. Nanjing: Southeast University. College of Civil Engineering, 2006.
- [6] Ghosal S, Mehrotra R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2): 295.
- [7] 孙波成, 邱延峻. 路面裂缝图像处理算法研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(2): 64.
- SUN Bocheng, QIU Yanjun. Pavement crack diseases recognition based on image processing algorithm[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(2): 64.
- [8] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- Gonzalez R C. Digital image processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [9] 邹宁, 柳健, 周曼丽. 基于 Zernike 矩的边缘检测方法[J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(5): 1.
- ZOU Ning, LIU Jian, ZHOU Manli. Zernike moment-based edge detection[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1999, 27(5): 1.

~~~~~

(上接第 811 页)

- Architectural Institute of Japan. Recommendation for the design of base isolated buildings [M]. Translated by LIU Wenguang. Beijing: Seismological Press, 2006.
- [3] 秋山宏. 基于能量平衡的建筑物抗震设计[M]. 叶列平, 裴星洙, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- Akiyama H. Earthquake resistant design method for buildings based on energy balance [M]. Translated by YE Lieping, PEI Xingzhu. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [4] Takewaki I, Fujita K. Earthquake input energy to tall and base-isolated buildings in time and frequency dual domains [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009(18): 589.
- [5] 赵凤新, 张郁山. 拟合峰值速度与目标反应谱的人造地震动[J]. 地震学报, 2006, 28(4): 429.
- ZHAO Fengxi, ZHANG Yushan. Artificial ground motion compatible with specified peak velocity and target spectrum [J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(4): 429.
- [6] Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson N A, et al. An improved method of matching response spectra of record earthquake ground motion using wavelets [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2006, 10(1): 67.
- [7] Iyama J, Kuwamura H. Application of wavelets to analysis and simulation of earthquake motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999 (28): 255.
- [8] Iyama J. Estimation of input energy for elasto-plastic SDOF systems during earthquake based on discrete wavelet coefficients [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005 (34): 1799.
- [9] 贺瑞, 秦权. 产生时程分析用的高质量地面运动时程的新方法[J]. 工程力学, 2006, 8(8): 12.
- HE Rui, QING Quan. New methods for generating high quality acceleration time histories [J]. Engineering Mechanics, 2006, 8(8): 12.
- [10] Yazdani A. Wavelet-based generation of energy- and spectrum-compatible earthquake time histories [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2009 (24): 623.
- [11] Benavent-Climent A, Pujades L G, Lopez-Almansa F, et al. Design energy input spectra for moderate-seismicity regions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002 (31): 1151.
- [12] Benavent-Climent A, Lopez-Almansa F, Bravo-Gonzalez D A, et al. Design energy input spectra for moderate-to-high seismicity regions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010 (30): 1129.
- [13] Lihanand K, Tseng W S. Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multi-damping design spectra [C]// Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering II. Tokyo: 9th WCEE Organizing Committee, 1988: 819-824.
- [14] Chui C K. An introduction to wavelets [M]. San Diego: Press San Diego, 1992.
- [15] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- HU Yuxian. Earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 2006.