

一种基于编辑距离的汉代画像石裂缝的检测算法

许君扬¹, 王慧琴¹, 吴萌¹, 景亚鹏²

¹西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055;

²西安碑林博物馆, 陕西 西安 710001

摘要 为了得到更好的画像石裂缝区域的检测结果,提出了一种基于编辑距离的画像石裂缝的检测算法。将图像分为若干个大小相等的区域;为了将裂缝区域与背景区域区分开,计算各个区域之间的编辑距离,生成裂缝掩模图像;利用形态学中的膨胀运算进行掩模图中的空白区域填充;通过为掩模图像设定阈值完成对裂缝区域的标定。实验结果表明,该算法可以对汉代画像石的裂缝区域进行精确检测。

关键词 图像处理; 裂缝标定; 形态学; 画像石; 编辑距离

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.081006

A Crack Detection Algorithm Based on Editing Distance in Pictorial Carved Stone

Xu Junyang¹, Wang Huiqin¹, Wu Meng¹, Jing Yali²

¹School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

²Forest of Stone Steles Museum, Xi'an, Shaanxi 710001, China

Abstract In order to get a better detection result of crack regions on pictorial stone, a crack detection algorithm based on editing distance is proposed. The pictorial carved stone image is separated into many patches with identical sizes. For separating the crack regions from the background, the editing distances between each patch are calculated and the mask image is generated simultaneously. The blank area on mask image is filled by dilation operation which belongs to morphology. The crack detection is finished by setting a threshold to the mask image. Experimental results show that this algorithm can detect the crack regions on pictorial carved stone accurately.

Key words image processing; crack detection; morphology; pictorial carved stone; editing distance

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 100.4994

1 引言

汉代画像石是汉代地下墓室、墓地、祠堂等建筑的建筑构件,主要反映了汉代人的信仰和理想追求,为研究汉代的政治、经济、文化、风俗等提供了丰富的资料,具有极高的历史价值^[1]。但受年代久远或挖掘后未妥善保存等因素的影响,画像石裂缝病害现象严重,这无疑是我国文化遗产的一大损失。为了避免对画像石造成二次损害,数字化修复技术已成为目前的研究热点,而数字化修复过程的第一步是对裂缝区域进行图像分割,因此对裂缝区域实现精确、自动标定一直是文物领域中技术人员关心的课题之一。

目前,裂缝检测技术多用于公路、桥梁等领域^[2-3],裂缝检测所用的主要技术为图像分割技术,具体包括

收稿日期: 2017-03-03; **收到修改稿日期:** 2017-04-11

基金项目: 教育部归国留学人员科研扶持项目(K05055)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JM6079)、2016年碑林区科技计划项目(GX1605)

作者简介: 许君扬(1991—),男,硕士研究生,主要从事图像分割方面的研究。E-mail: 29118241@qq.com

导师简介: 王慧琴(1970—),女,博士,教授,主要从事数字图像处理方面的研究。

E-mail: hqwang@xauat.edu.cn(通信联系人)

阈值分割^[4]、边缘检测^[5]、主动轮廓模型^[6]和水平集方法^[7]等。与画像石中的裂缝相比,公路中的裂缝所处的背景颜色和内容都较为单一,所以标定方法较为简单。而画像石中的裂缝存在着干扰因素,如与裂缝结构相似的线条等。2013年,Cornelis等^[8]运用数字图像处理实现了祭坛绘画中的裂缝标定,2014年,王凯等^[9]利用形态学滤波实现了唐墓室壁画中的裂缝标定。2015年,Padalkar等^[10]利用编辑距离对浮雕壁画实现了裂缝标定。上述算法都是对整幅图像进行操作的,但画像石中的阴影区域会对裂缝区域形成干扰,直接利用上述算法进行裂缝标定会出现误检测的现象。

因此,本文通过计算分割的相邻块之间的编辑距离获得裂缝及其周围小范围区域的掩模图像,再通过形态学的膨胀运算完成掩模图像中空白区域的填充,最后通过阈值处理实现对画像石裂缝的精确标定。

2 编辑距离算法

编辑距离^[11]是指两个字符串之间,由一个转化为另一个所需要的最少编辑操作数量,这里编辑操作包括对字符串指定位置的单个字符进行插入、删除、替换的操作。所需操作数越少,两个字符串的相关性越高。因此,编辑距离是一种字符串相似性的衡量方法,主要应用于数据处理、误差检测、字符串匹配等方面^[12-14]。

设有两个字符串 ϕ_m 和 ϕ_n , $\phi_m = \phi_1 \phi_2 \cdots \phi_m$, $\phi_n = \phi_1 \phi_2 \cdots \phi_n$, 要计算这两个字符串(长度分别为 m 和 n) 的编辑距离,首先要构造匹配关系矩阵 $d[m+2, n+2]$, 该矩阵是 $m+2$ 行、 $n+2$ 列。假设 $m=n=3$, 则矩阵 $d[m+2, n+2]$ 如图 1 所示。

		ϕ_{r_1}	ϕ_{r_2}	ϕ_{r_3}
	0	1	2	3
ϕ_1	1			
ϕ_2	2			
ϕ_3	3			

图 1 匹配关系矩阵

Fig. 1 Matching relation matrix

接下来按照下述公式填充该矩阵:

$$d_{ij} = \begin{cases} i, & j = 1 \\ j, & i = 1 \\ \min[d_{(i-1)(j-1)} + a_{ij}, d_{(i-1)j} + 1, d_{i(j-1)} + 1], & i, j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & \phi_i = \phi_{r_i} \\ 1, & \phi_i \neq \phi_{r_i} \end{cases}, \quad i = 2, \dots, m+1; j = 2, \dots, n+1. \quad (2)$$

匹配关系矩阵 d 中位置为 $(m+2, n+2)$ 的元素即字符串 ϕ_m 和 ϕ_n 之间的编辑距离^[15], 记为 l_d 。直观上,是字符串 ϕ_m 变化到字符串 ϕ_n 所需的最少编辑操作次数。以图 1 为例,从位置(3,3)开始计算。取值有三种可能:如果 ϕ_1 不等于 ϕ_{r_1} ,则左上方数字加 1,左方数字加 1,上方数字加 1。将以上三个值进行比较,取最小值赋给(3,3)。循环计算矩阵 d 中的每一个值,则表中右下角的值即位置(5,5)的值为两个向量的编辑距离。

传统图像分割算法有阈值分割、边缘检测等。阈值分割是通过灰度阈值对画面进行分割,但是当画面中存在多个灰度值相近的区域时会出现过度分割情况。边缘检测是根据检测画面中的灰度值跳变来对图像进行分割的,对画面边缘区域检测效果较好,但无法检测内部区域,需要与形态学算法进行结合。

(1)式中 i 和 j 取遍了全值,由此可以看出,本文算法对每个像素点都进行了检测。检测过程更为精细,检测结果更为准确。本文利用阈值分割算法、边缘检测算法以及编辑距离算法对 Matlab 中自带的轮胎图像

进行了分割操作,分割的目标区域为轮胎内部两红色圆圈间的环状区域,具体的分割结果如图 2 所示。

从图 2(b)可以看出,阈值分割法可以将轮胎周围灰度值较大的区域分割出来;从图 2(c)可以看出,边缘检测分割法可以将地面区域分割出来;图 2(d)为本文算法的分割结果,可以看出,本文算法能够得到更为准确的分割结果。

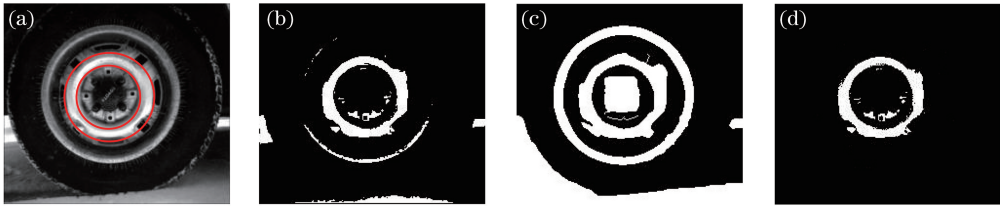


图 2 不同算法的分割结果。(a)原始图像;(b)阈值分割法;(c)边缘检测分割法;(d)本文算法

Fig. 2 Segmentation results by using different algorithms. (a) Original image; (b) threshold segmentation algorithm; (c) edge detection segmentation algorithm; (d) proposed algorithm

3 基于编辑距离的画像石裂缝的检测算法

基于编辑距离的画像石裂缝检测算法的原理是利用裂缝区域与周围画面区域间编辑距离较大的特点,将裂缝区域从画面中分割出来。其算法流程如图 3 所示。

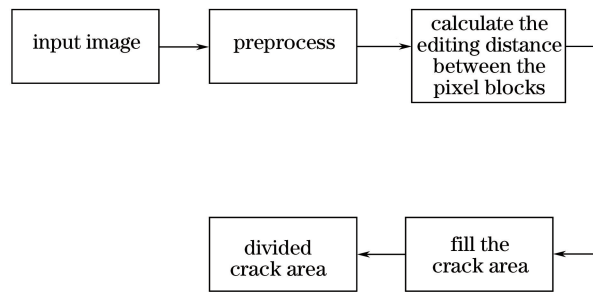


图 3 基于编辑距离的画像石裂缝检测算法框图

Fig. 3 Diagram of cracked regions detection for portrait stone based on editing distance

3.1 预处理

为了检测画像石的裂缝区域,首先对画像石图像进行预处理,预处理过程包括图像灰度化、计算图像权重以及图像腐蚀三个步骤。

将图像灰度化后,利用灰度图像计算图像权重。权重计算公式为

$$I_w(x, y) = \exp[-I_g(x, y)], \quad (3)$$

式中 $I_g(x, y)$ 为图像像素灰度值, $I_w(x, y)$ 为像素权重值。因为裂缝区域在图像中较暗,灰度值较小,因此裂缝区域的权重矩阵值较大,在图像中显示为较亮的区域。

为使裂缝区域的特征更加明显,计算图像权重后进一步进行腐蚀操作^[16]。腐蚀操作的计算公式为

$$I_v = E \ominus I_w = \{y : I_w(y) + E \subseteq I_w\}, \quad (4)$$

式中 I_v 为腐蚀后图像。

由于画像石图像过大,因此选择有裂缝区域的部分画像石图像进行实验,预处理过程及结果如图 4 所示。图 4(a)为原始图像 I_0 ,图 4(b)为灰度图像 I_g ,图 4(c)为对灰度图像 I_g 进行权重计算后获得的图像 I_w ,图 4(d)为对图像 I_w 进行腐蚀后得到的图像 I_v 。在对原始图像预处理得到的最终图像 I_v 的过程中,裂缝区域同画面中其他区域相比灰度值最暗、特征明显,有利于后续采用编辑距离实现裂缝区域的检测。

3.2 计算像素块间的编辑距离

由于腐蚀后的图像 I_v 中裂缝区域与邻近区域有着明显的差异,因此,通过比较非重叠图像块的差距标记裂缝区域。常用的比较方法有绝对误差算法、平方差算法等,但是以上方法均为相邻像素间的单次比

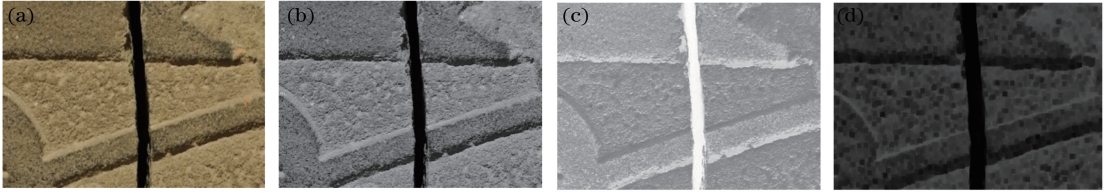


图4 有裂缝区域的部分画像石图像的预处理过程。(a)原始图像 I_o ; (b)灰度图像 I_g ; (c)权重图像 I_w ; (d)腐蚀后图像 I_v 。

Fig. 4 Preprocessing process of partial portrait stone image with cracked regions. (a) Original image I_o ;

(b) gray image I_g ; (c) weight image I_w ; (d) eroded image I_v 。

较,对噪声敏感,检测结果误差明显。而编辑距离通过与周边像素块多次循环比较^[17]可以较好地解决这一问题,因此,利用编辑距离比较非重叠图像块的差距,进而实现画像石裂缝的检测。

计算像素块间的编辑距离时,主要有三个步骤。

1) 将腐蚀图像 I_v 分成若干个 $m \times n$ 的小块,设 ϕ_p 是 I_v 中像素 $p(x, y)$ 处的块,包含像素 (X, Y) 。其中 $X = x, x + 1, \dots, x + m - 1; Y = y, y + 1, \dots, y + n - 1$ 。

2) 将 ϕ_p 与其相邻的块 ϕ_r 和 ϕ_b 转换为向量 V_p, V_r 和 V_b ,并按字典顺序进行排序,其中 $r = (x, y + n)$, $b = (x + m, y)$ 。

3) 分别计算 V_p 与 V_r 以及 V_p 与 V_b 的编辑距离,将这两组编辑距离的均值赋值给 V_p ,重复步骤3)直至整幅图像遍历结束,最终获得的初步检测结果即为掩模图像 I_{ed} ,如图5所示。



图5 掩模图像 I_{ed}

Fig. 5 Mask image I_{ed}

3.3 形态学算法检测裂缝区域

通过编辑距离计算获得的初步分割结果 I_{ed} 存在多个不连续的区域,因此,利用数学形态学中的膨胀运算^[18],将图像 I_{ed} 中的不连续的区域连接,计算公式为

$$I_d = E \oplus I_{ed} = \{y : I_{ed}(y) \cap E \neq \emptyset\}, \quad (5)$$

式中 I_d 为进行形态学膨胀运算后得到的图像, I_{ed} 为编辑距离计算后得到的图像, E 为结构元素,结构元素选择为矩形块,边长设置为 10 pixel。经过膨胀运算得到的 I_d 如图6所示。

经过膨胀运算获得图像 I_d 后,为方便后续操作,需要将二值图像中标定出的裂缝区域映射回原图,得到图像 I_{tw} ,结果如图7所示。

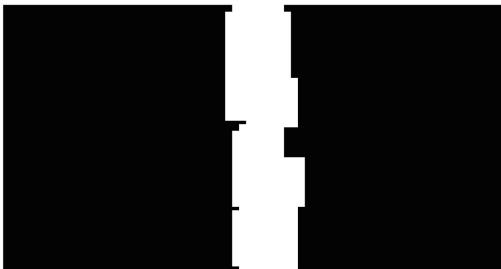


图6 膨胀运算结果

Fig. 6 Result of dilation operation



图7 原图中的裂缝区域 I_{tw}

Fig. 7 Crack region I_{tw} in original image

3.4 分割结果

经过上述处理,图像 I_{tw} 中只保留了原图像的裂缝区域以及其周边的小范围区域,为了进一步获得更好的裂缝检测结果,首先对图像 I_{tw} 进行对比度增强获得图像 I_c ,即通过调整图像的对比度使裂缝区域与其边缘区域的灰度值差距变大。

在图像 I_c 中,灰度值越小的区域越可能是裂缝区域,因此,可以通过阈值分割的方式将灰度值较大的像素舍弃。得到阈值 T 之后,对图像 I_c 进行分割。

$$I_c(x,y) = \begin{cases} 1, & I_c(x,y) \geq T \\ 0, & I_c(x,y) < T \end{cases} \quad (6)$$

为了确定阈值 T ,将 10 幅画像石数字图像进行 10×10 的离散化,构建画像石数字图像样本库。首先,选取其中一幅带有裂缝区域的图像,对其灰度值进行统计,生成灰度直方图,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,裂缝区域的灰度值区间为 $[0,20]$ 。为了确定具体阈值,对样本库中所有含有裂缝区域的样本灰度值小于 20 的像素点个数进行了统计,统计结果如图 9 所示。

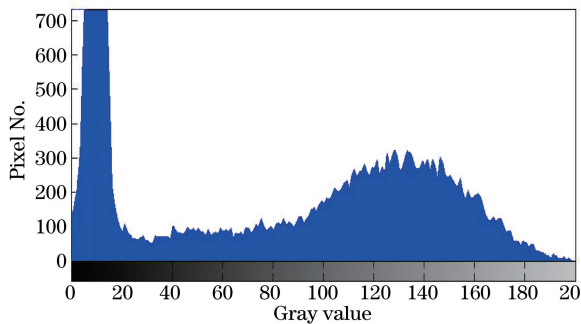


图 8 裂缝区域灰度直方图

Fig. 8 Gray histogram of crack regions

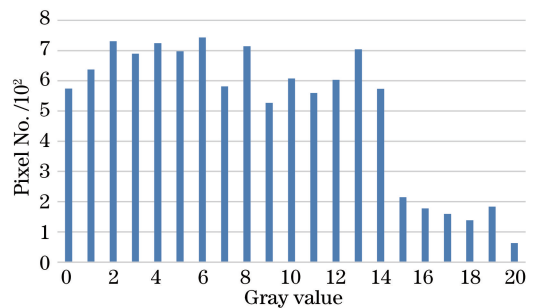


图 9 裂缝区域灰度值统计结果

Fig. 9 Statistical result of gray scale in crack regions

从图 9 可以看出,灰度值小于 15 的像素点个数较多,灰度值超过 15 的像素点数量明显下降,由此可知,应以灰度值 15 作为阈值,进行裂缝检测。之后,对经过(6)式处理后的图像进行形态学闭运算,并将得到的裂缝图像映射回原图,得到最终的裂缝检测图像 I_f ,如图 10 所示。

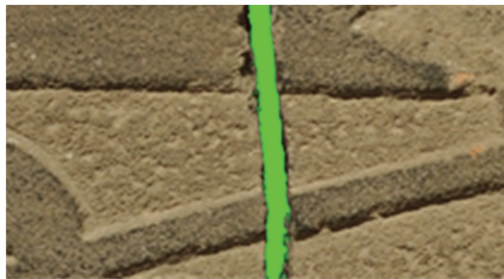


图 10 本文算法得到的裂缝检测结果

Fig. 10 Crack calibration result calculated by the proposed method

4 实验结果与分析

4.1 实验图像来源

实验图像为使用 Nikon D3X 型相机拍摄的十幅画像石照片中的三幅,均来自西安碑林博物馆,原图如图 11 所示。由于原图过大,只在这三幅图像上选择了五个区域 A、B、C、D、E 进行实验,分别用红色、绿色、蓝色、黄色和紫色标记。

4.2 实验结果对比与分析

实验是在计算机上利用 Matlab 仿真实现的,实验中形态学运算所选用的结构元素是边长为 10 的矩形块,阈值设置为 15。将最后的结果与文物专家手工标注结果、文献[9]算法、文献[10]算法的检测结果以及



图 11 画像石原图。(a)图像 1;(b)图像 2;(c)图像 3

Fig. 11 Original images of the portrait stones. (a) Image 1; (b) image 2; (c) image 3

运行时间进行了对比。其中红色区域 A 的检测结果如图 12 所示,绿色区域 B 的检测结果如图 13 所示,蓝色区域 C 的检测结果如图 14 所示,黄色区域 D 的检测结果如图 15 所示,紫色区域 E 的检测结果如图 16 所示,各算法运行时间如表 1 所示。

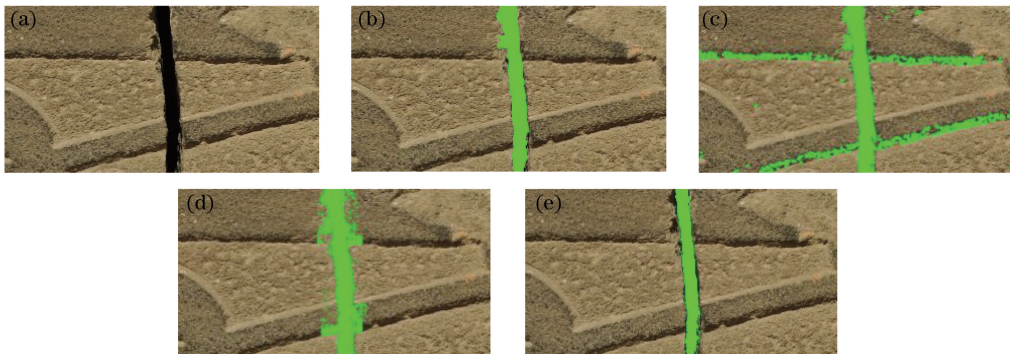


图 12 红色方框区域 A 的实验结果。(a)裂缝区域 1 的原始图;(b)手动标注;
(c)文献[9]算法;(d)文献[10]算法;(e)本文算法

Fig. 12 Experimental results in red area A. (a) Original image of crack region 1; (b) manual marking;
(c) Ref. [9] algorithm; (d) Ref. [10] algorithm; (e) proposed algorithm

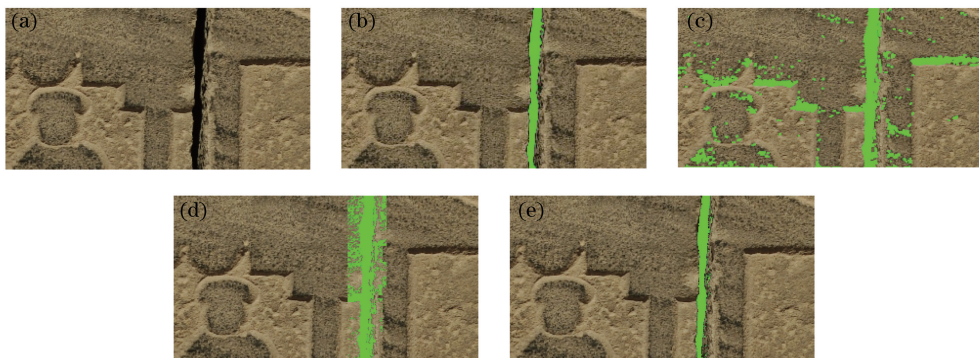


图 13 绿色方框区域 B 的实验结果。(a)裂缝区域 2 的原始图;(b)手动标注;
(c)文献[9]算法;(d)文献[10]算法;(e)本文算法

Fig. 13 Experimental results in green area B. (a) Original image of crack region 2; (b) manual marking;
(c) Ref. [9] algorithm; (d) Ref. [10] algorithm; (e) proposed algorithm

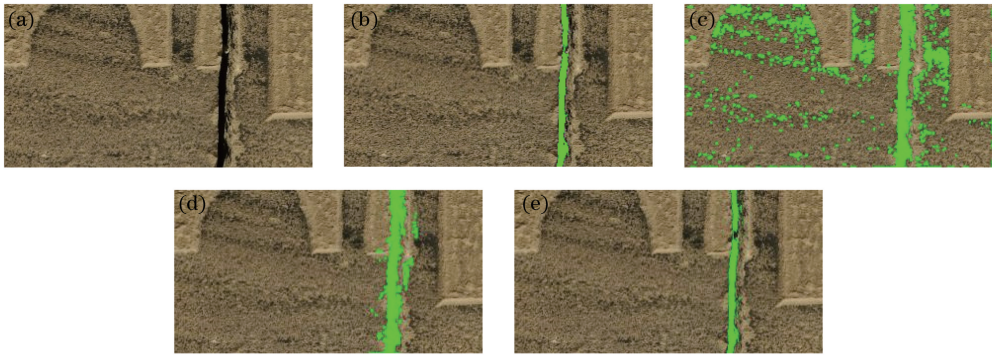


图 14 蓝色方框区域 C 的实验结果。(a)裂缝区域 3 的原始图;(b)手动标注;(c)文献[9]算法;(d)文献[10]算法;(e)本文算法

Fig. 14 Experimental results in blue area C. (a) Original image of crack region 3; (b) manual marking;

(c) Ref. [9] algorithm; (d) Ref. [10] algorithm; (e) proposed algorithm

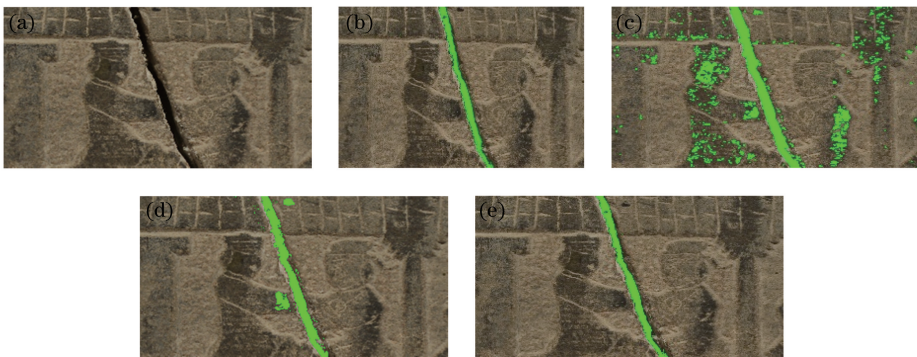


图 15 黄色方框区域 D 的实验结果。(a)裂缝区域 4 的原始图;(b)手动标注;(c)文献[9]算法;(d)文献[10]算法;(e)本文算法

Fig. 15 Experimental results in yellow area D. (a) Original image of crack region 4; (b) manual marking;

(c) Ref. [9] algorithm; (d) Ref. [10] algorithm; (e) proposed algorithm

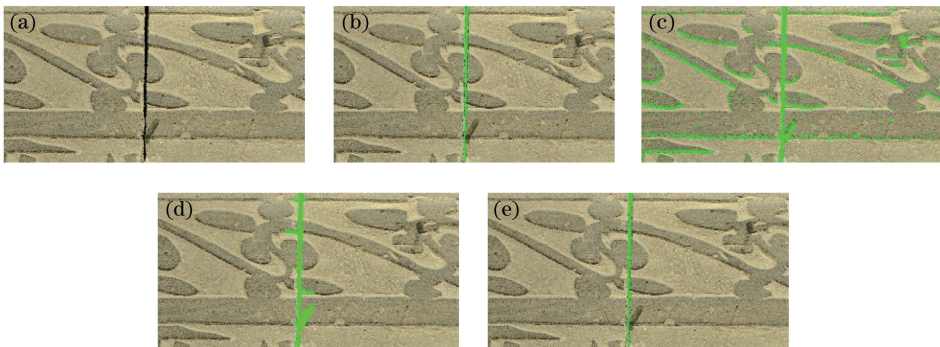


图 16 紫色方框区域 E 的实验结果。(a)裂缝区域 5 的原始图;(b)手动标注;(c)文献[9]算法;(d)文献[10]算法;(e)本文算法

Fig. 16 Experimental results in purple area E. (a) Original image of crack region 5; (b) manual marking;

(c) Ref. [9] algorithm; (d) Ref. [10] algorithm; (e) proposed algorithm

表 1 算法运行时间的比较

Table 1 Comparison of the calculation time

Calculation time /s	Ref. [9] algorithm	Ref. [10] algorithm	Proposed algorithm
Region A	1,784	35.94	36.95
Region B	1,172	31.76	32.71
Region C	1,096	31.24	31.82
Region D	1,084	30.85	31.78
Region E	1,095	31.38	31.54

由对比实验可以看出,本文算法的裂缝检测精度高于文献[9]算法和文献[10]算法,运行时间慢于文献[9]算法,与文献[10]算法几乎一致。

文献[9]中的裂缝检测算法采用的是先设定阈值再进行形态学处理的方式,但由于存在阈值分割的缺陷,在对画像石裂缝区域进行分割的过程中,出现了过度分割的情况。本文先对图像进行编辑距离处理,再选定阈值,使阈值处理的区域更小,提高了分割精度。

本文算法与文献[10]算法都采用了编辑距离算法对裂缝区域进行检测,但由于文献[10]算法处理的为浮雕图像,浮雕背景区域与裂缝区域灰度值的差距更大、更容易分割,而画像石背景区域与裂缝区域的灰度值的差距并不明显,不容易区分,因此在计算编辑距离之前,本文算法选用形态学膨胀、腐蚀运算进行预处理,与文献[10]算法不同。虽然两种算法的核心都是编辑距离,但由于预处理等操作不同致使最终的结果不一样。实验结果表明,本文算法较以上两种算法更适于进行画像石的裂缝检测。

5 结 论

将用于字符串匹配的编辑距离算法运用在图像分割领域,实现了对汉代画像石裂缝的自动标定。通过与文献[9]、文献[10]以及文物专家手动标定结果的对比可知,本文算法结果最贴近文物专家手动标定的结果,可以为后续虚拟修复的开展提供更好的技术支持。但是从最后的实验结果也可以看出,本文算法的标定结果与文物专家的手动标定结果还有一定的差距,因此之后的工作将主要集中于以下两点:1) 继续提高本文算法的精度使其更加接近于文物专家手动标定的结果;2) 本文扩展算法的应用面,实现其在其他文物图像中的应用。

参 考 文 献

- [1] Liu Taixiang. Summary of the study on stone-carving in the Han dynasty[J]. Academic Forum of Nandu (Journal of the Humanities and Social Sciences), 2002, 22(3): 8-18.
刘太祥. 汉代画像石研究综述[J]. 南都学坛(人文社会科学学刊), 2002, 22(3): 8-18.
- [2] Guo Quanmin, Liu Caizhen. Pavement crack detection method in concrete pavement disease detection and estimation system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(7): 47-50.
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.
- [3] Wang X N, Wang X N, Hou D X, *et al.* Surface crack imaging based on delayed temperature difference at symmetric points by laser spot thermography[J]. Instrumentation, 2014, 1(2): 30-37.
- [4] Nie Fangyan, Li Jianqi, Zhang Pingfeng, *et al.* A threshold selection method for image segmentation based on Tsallis relative entropy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071002.
聂方彦, 李建奇, 张平凤, 等. 一种基于 Tsallis 相对熵的图像分割阈值选取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071002.
- [5] Xu Huan, Li Zhenbi, Jiang Yuanyuan, *et al.* Pavement crack detection based on OpenCV and improved Canny operator [J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(12): 4254-4258.
徐欢, 李振璧, 姜媛媛, 等. 基于 OpenCV 和改进 Canny 算子的路面裂缝检测[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(12): 4254-4258.
- [6] Zhao Fangzhen, Liang Haiying, Wu Xianglin, *et al.* Active contour segmentation model based on local and global Gaussian fitting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051006.
赵方珍, 梁海英, 巫湘林, 等. 基于局部和全局高斯拟合的主动轮廓分割模型[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051006.
- [7] Xie Zhinan, Zheng Dong, Chen Jiayao, *et al.* A tumor segmentation method of improved Chan-Vese model for liver cancer ablation computed tomography image[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 021702.
谢志南, 郑东, 陈嘉耀, 等. 改进 Chan-Vese 模型的肝癌消融 CT 图像肿块分割方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 021702.
- [8] Cornelis B, Ruzic T, Gezels E, *et al.* Crack detection and inpainting for virtual restoration of paintings: the case of the Ghent Altarpiece[J]. Signal Processing, 2013, 93(3): 605-619.

- [9] Wang Kai, Wang Huiqin, Wu Meng. Virtual restoration method of cracks in mural[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(15): 136-139.
王凯, 王慧琴, 吴萌. 唐墓室壁画裂缝的自动虚拟修复方法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(15): 136-139.
- [10] Padalkar M G, Joshi M V. Auto-inpainting heritage scenes: a complete framework for detecting and infilling cracks in images and videos with quantitative assessment[J]. Machine Vision and Applications, 2015, 26(2/3): 317-337.
- [11] Wagner R A, Fischer M J. The string-to-string correction problem[J]. Journal of the ACM (JACM), 1974, 21(1): 168-173.
- [12] Zhou Hanping. Study on application of Levenshtein distance in programming test automatic scoring[J]. Computer Applications and Software, 2011, 28(5): 328-331.
周汉平. Levenshtein 距离在编程题自动评阅中的应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(5): 328-331.
- [13] Zhao Zuopeng, Yin Zhimin, Wang Qianping, *et al.* An improved algorithm of Levenshtein distance and its application in data processing[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(2): 424-426.
赵作鹏, 尹志民, 王潜平, 等. 一种改进的编辑距离算法及其在数据处理中的应用[J]. 计算机应用, 2009, 29(2): 424-426.
- [14] Davanzo G, Medvet E, Bartoli A. Anomaly detection techniques for a web defacement monitoring service[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(10): 12521-12530.
- [15] Levenshtein V I. Binary codes capable of correcting deletions, insertions and reversals[J]. Soviet Physics Doklady, 1966, 10(1): 707-710.
- [16] Dai Qingyun, Yu Yinglin. The advances of mathematical morphology in image processing[J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(4): 478-482.
戴青云, 余英林. 数学形态学在图象处理中的应用进展[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(4): 478-482.
- [17] Jiang Hua, Han Anqi, Wang Meijia, *et al.* Solution algorithm of string similarity based on improved Levenshtein distance[J]. Computer Engineering, 2014, 40(1): 222-227.
姜华, 韩安琪, 王美佳, 等. 基于改进编辑距离的字符串相似度求解算法[J]. 计算机工程, 2014, 40(1): 222-227.
- [18] Qu Zhong, Lin Lidan, Guo Yang. Algorithm of image crack detection based on morphology and region extends[J]. Computer Science, 2014, 41(11): 297-300.
瞿中, 林丽丹, 郭阳. 形态学与区域延伸相结合的图像裂缝检测算法研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(11): 297-300.