

《马球图》壁画中裂缝的自动虚拟修复方法研究

王慧琴¹ 韩建武² 吴 萌¹ 李文怡² 王 凯¹ 杨 洁²

(1. 西安建筑科技大学, 西安 710055; 2. 陕西历史博物馆, 西安 710061)

摘要: 古代一些壁画, 由于受到自然因素和人为因素破坏等原因, 出现了不同程度的破损, 为了使人们能够欣赏到原作的风貌, 可以采用计算机进行模拟和复原。裂缝是《马球图》壁画中存在的一种常见的病害, 文章提出了一种对《马球图》壁画中裂缝进行自动虚拟修复的方法。首先就图像从RGB空间转化到HSI颜色空间, 提取亮度分量I从而实现对裂缝的粗提取; 其次利用连通域标注的方法去除壁画中虚假目标, 最后利用基于样本的数字图像修复技术对壁画中裂缝进行自动修复。实验仿真表明本方法能够有效地去除壁画中影响人眼视觉的裂缝, 并实现了对壁画中裂缝的自动化虚拟修复。

关键词: 壁画 裂缝 虚拟修复 自动标记

1. 引 言

壁画是我国珍贵的历史文化遗产, 是反映我国古老文明的重要载体, 具有极高的艺术价值。为了长久地保存这些珍宝供后人欣赏, 壁画的数字化保护工作已经成为众多学者研究的热点, 该研究主要包括两方面, 一方面是壁画的数字化虚拟修复; 另一方面是修复后壁画的虚拟展示。由于自然风化的破坏以及人为破坏等原因, 现在出土的壁画出现了裂缝、褪色、起甲等多种形式的病害。裂缝是马球图壁画中常见的一种病害形式, 是壁画的数字化修复工作中的重点修复对象。但并不是对壁画中所有的裂缝都要进行修复, 我们修复的标准是既要保持壁画原有的沧桑感、还要不影响到人们对壁画的欣赏, 也就是说只对其中颜色深的宽裂缝进行修复, 保留那些颜色浅的细小裂缝, 如图1所示。

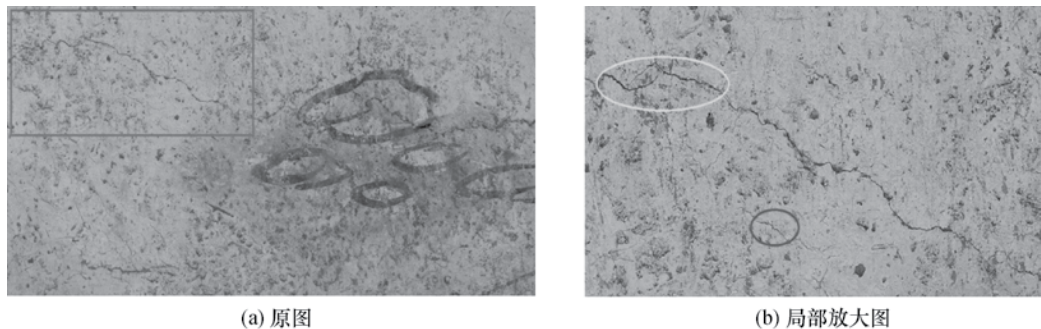


图1 壁画中的裂缝

图1 (a) 为马球图的部分截图, 图1 (b) 是图1 (a) 中黑色区域的局部放大图, 在图1 (b) 中, 白色圈住的区域是要修复的较大裂缝, 黑色区域是要保留的较小裂缝。

在壁画的数字化修复中, 最重要的一步就是对病害的标注, 而目前这项工作主要是靠手工实现。然而壁画与普通的破损照片不一样, 它不仅大而且含有的裂缝数量多, 如果用手工进行标注不仅耗费人力, 也可能由于人为因素而无法较为准确地选定待处理区域。用数字图像处理的方法实现对壁画中裂缝的自动识别和标注, 具有重要的研究价值和应用价值。

本文针对唐朝李贤墓室中出土的马球图, 分析了裂缝在壁画的地仗层中的结构形态和成像条件。考虑了裂缝在图像上的非负性, 采用基于图像连通域的壁画裂缝提取方法, 提取裂缝信息, 同时有效滤除了细小裂缝和噪声点的干扰, 取得了满意的结果。

对提取到的裂缝利用数字图像修复算法, 进行虚拟修复。数字图像修复是指对图像上的信息缺损区域进行修复, 以保证使用者无法观察到图像曾经缺损或已被修复, 在视觉上认为修复后的这幅图像是合理而完整的。目前该技术主要应用在文物字画的保护、破损图像的修补等领域。本文运用的方法是基于样本的图像修复算法, 该算法利用了纹理生成方法的思想, 寻找样本区域并匹配复制, 具有很好的修复效果。

2. 裂缝的自动识别和标注

2.1 壁画的预处理

2.1.1 提取亮度信息

由于人的视觉对亮度的敏感程度远强于对颜色浓淡的敏感程度, 为了便于颜色处理和识别, 人的视觉系统经常采用HSI彩色空间来描述。此外HIS空间中亮度和色度具有可分离特性, 可以将图像从RGB模型转为HSI模型, 提取图像的亮度通道 I , 在亮度通道对图像进行中值滤波, 结果如图2所示。

亮度公式如下所示:
$$I = \frac{R+G+B}{3} \quad (1)$$

由结果可看出, 经过滤波后图像中一些颜色浅的细小裂缝得到了有效的去除。

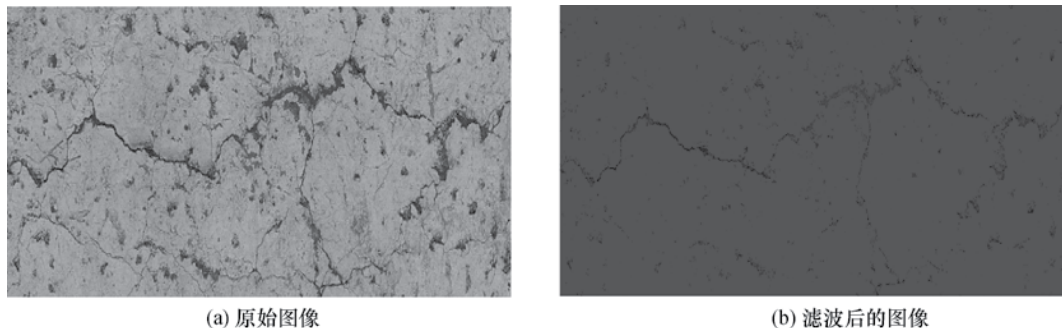


图2 原始图像滤波

2.1.2 图像的分割

裂缝的非负特征：与周围的非裂缝像素相比，裂缝位置的像素灰度值明显低于背景像素灰度值。

$$\begin{aligned} \nabla_k &= V(i+m, j+n) - V(i, j), \\ m > 0, n > 0; \\ M &= \{\nabla_1, \nabla_2, \nabla_3, \dots, \nabla_{m \times n}; \nabla_k > 0\}, \\ k &= \{1, 2, \dots, m \times n\}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $V(i, j)$ 为当前像素灰度； $V(i+m, j+n)$ 为以当前像素为中心设定窗口内的邻域像素灰度值； m 、 n 为设定窗口内像素与中心像素的偏移变量。

满足 $\nabla_k > 0$ 的像素数 M 作为裂缝存在的主要判断标准。

对滤波后的图像利用直方图均衡化进行图像增强，增加裂缝和背景的对对比度，并对增强后的图像利用裂缝非负特征对其进行分割得到二值图像（图3）。

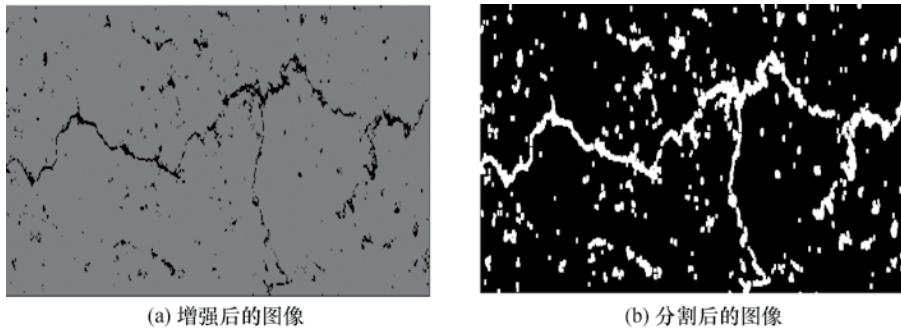


图3 图像的增强和分割

2.2 壁画裂缝的提取

图像经上述预处理后仍存在很多虚假目标，为了精确提取目标，本文提出了一种带连通域标记的去噪算法，去除虚假裂缝目标，并对这一算法进行了试验验证。

第一步：对得到的二值图像进行栅格扫描。在扫描的过程中，将具有相同属性（该处指灰度值为255的连通域）的像素进行联通区域合并。一方面进行连通域标记，得到图像的一维标记图，每个区域只有唯一的标记值；另一方面统计连通域的数目，统计其具有相同标记值的像素个数，即每个区域的面积。

第二步：根据以下两个连通域的几何特征，对其他虚假目标进行滤除。

(1) 连通域的面积 S ：根据二值图像中每个连通域的面积（每个连通域所含像素的个数）特征，设定阈值 T_s 去除单个孤立的噪声点。

(2) 连通域面积和周长比 P ：指二值图像中连通域所确定的最大矩形的面积和周长的比值。该比值反映了裂缝的线状特征，根据这个性质设定阈值 T_p 去除孤立的块状目标。

对标记图上的标记值从大到小进行搜索，对搜索到的标记值 m ，根据以上两个集合特征进行判断，如果满足阈值标准，则原像素点保持不变；否则将标记值为 m 的像素点的值赋值为0。

图4所示为算法的实现流程。

经过以上处理能够较准确地提取壁画中的大裂缝，但是考虑到如果在前期的裂缝提取中裂缝提取偏细，裂缝标注就会不全，周围的破损区域（未标注上的裂缝区域）就会对后期的修复造成很严

重的影响，因此为了减少因为裂缝提取对后期修复的影响，我们秉承标注区域宁多勿少的原则（既要考虑修复的精度又要降低修复的时间），对提取的裂缝进行一次膨胀操作扩大裂缝的标注区域。试验结果如图5所示。

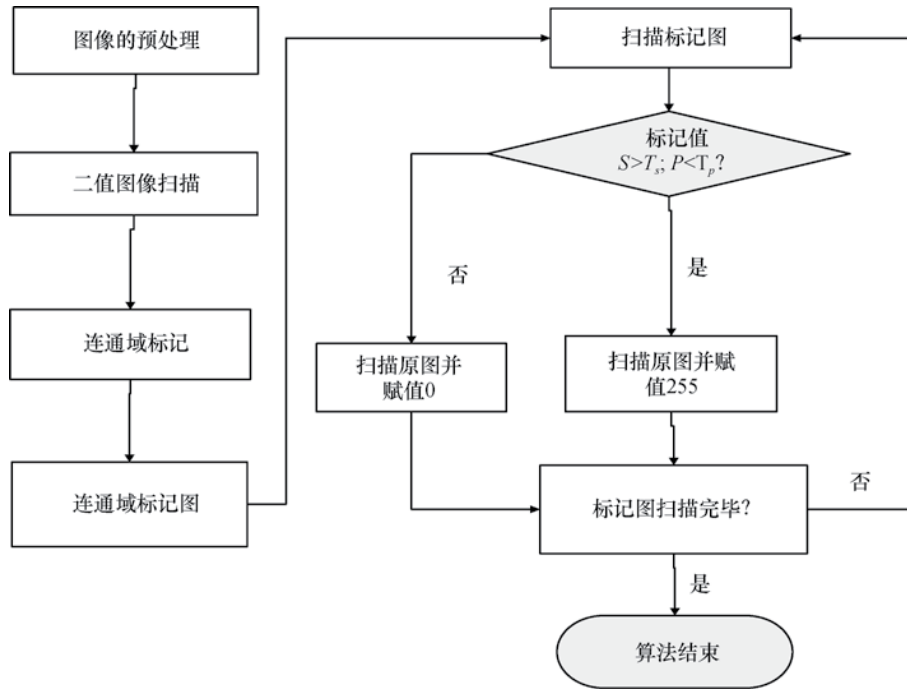


图4 算法流程图

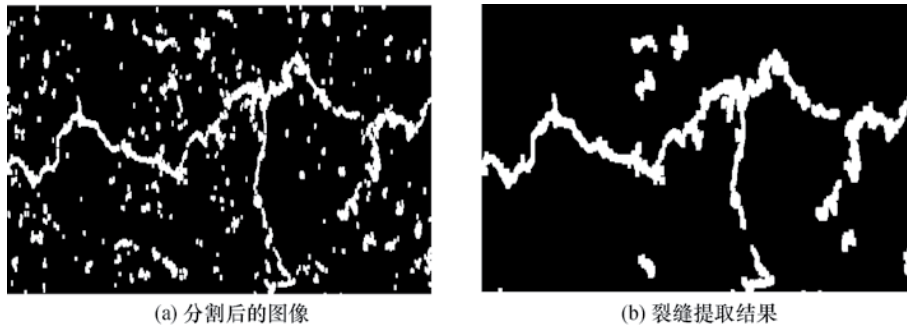


图5 裂缝的膨胀操作

3. 裂缝的修复

基于样本的图像修复方法的核心思想是一个沿等照度线驱动图像采样过程，它利用图像源区域的信息作为修复时所使用的“素材”来填补待修复区域，如图6所示。图6（a）为待修复图像，其中 Ω 为待修复区域， $\delta\Omega$ 为填充边缘， Φ 为源区域。图6（b） $p \in \delta\Omega$ 为填充边缘上的某像素。要填充的是以 p 为中心的模板 Ψ_p 内的区域。图6（c）位于源区域中最可能的候选匹配块在两个纹理之间的边界上，如 Ψ_q' ， Ψ_q'' 。图6（d）把最匹配的块复制到模板 Ψ_p 所在位置，以达到部分填充 Ω 的目的。用这一方法对填充边缘上的每一像素迭代执行，待修复区域 Ω 的面积会不断减小，直至为零。其结果不仅填充了图像的结构部分的信息而且保留了图像的纹理的延伸。

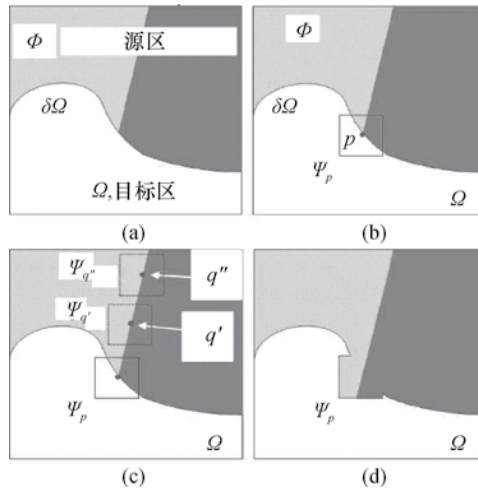


图6 基本原理

算法基本步骤为

(1) 修复过程从填充边缘 $\delta\Omega$ 开始, 首先通过置信度项和数据项计算填充边缘的每个像素的优先值

$$P(p) = C(p) \cdot D(p) \quad (3)$$

式中, $C(p)$ 为置信度项; $D(p)$ 为数据项, 定义:

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap \phi} C(q)}{|\Psi_p|}, \quad D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot n_p|}{\beta} \quad (4)$$

式中, $|\Psi_p|$ 为 Ψ_p 面积; β 为归一化因子(对于常用的灰度图像, $\beta=255$); ∇I_p^\perp , n_p 为单位矢量; ∇I_p^\perp 为 p 点的等光照线的方向, 可以用灰度梯度表示, 即 $\nabla I_p^\perp = (-I_y, I_x)$; n_p 为填充前缘 $\delta\Omega$ 上 p 点处的法向量, 可以使用模板图像, 即用0表示待修复点, 1表示没有损坏点的二值图像, 用 I 表示该二值图像; I_x 和 I_y 为 x 和 y 方向的梯度, 可得 $n_p = (I_x, I_y)$ 。

(2) 找到优先值最高的像素点 p , 以该点为中心用模板 Ψ_p 在源区域寻找与模板中已知部分均方误差最小的最佳匹配块 $\Psi_{\hat{q}}$, 最后用最佳匹配块替换当前模板。定义:

$$\Psi_{\hat{q}} = \arg \min_{\Psi_q \in \phi} d(\Psi_{\hat{p}}, \Psi_q) \quad (5)$$

(3) 当 $\Psi_{\hat{p}}$ 被填充了新的像素后, 置信度需要进行更新:

$$C(p) = C(\hat{q}), p \in \Psi_{\hat{p}} \cap \Omega \quad (6)$$

从图2(a)可以看出, 基于样本的图像修复算法的修复结果既复制纹理又复制结构。假设 $\Psi_p \in \Omega$ 是待填充图像块, 如果 Ψ_p 处于图像一个边界的延长线上, 那么 Ψ_p 的最佳匹配块也可能沿着同一个边界, 故填充后可以保留等光照线的方向。

用该算法对图像提取的裂缝进行修复, 结果如图7所示。

图7中(a)、(e)图为破损的原始图像, (c)、(g)图为掩膜图像, (b)、(f)图为标记的图像, (d)、(h)为修复后的图像。实验结果证明本方法能够很好地修复破损图像。

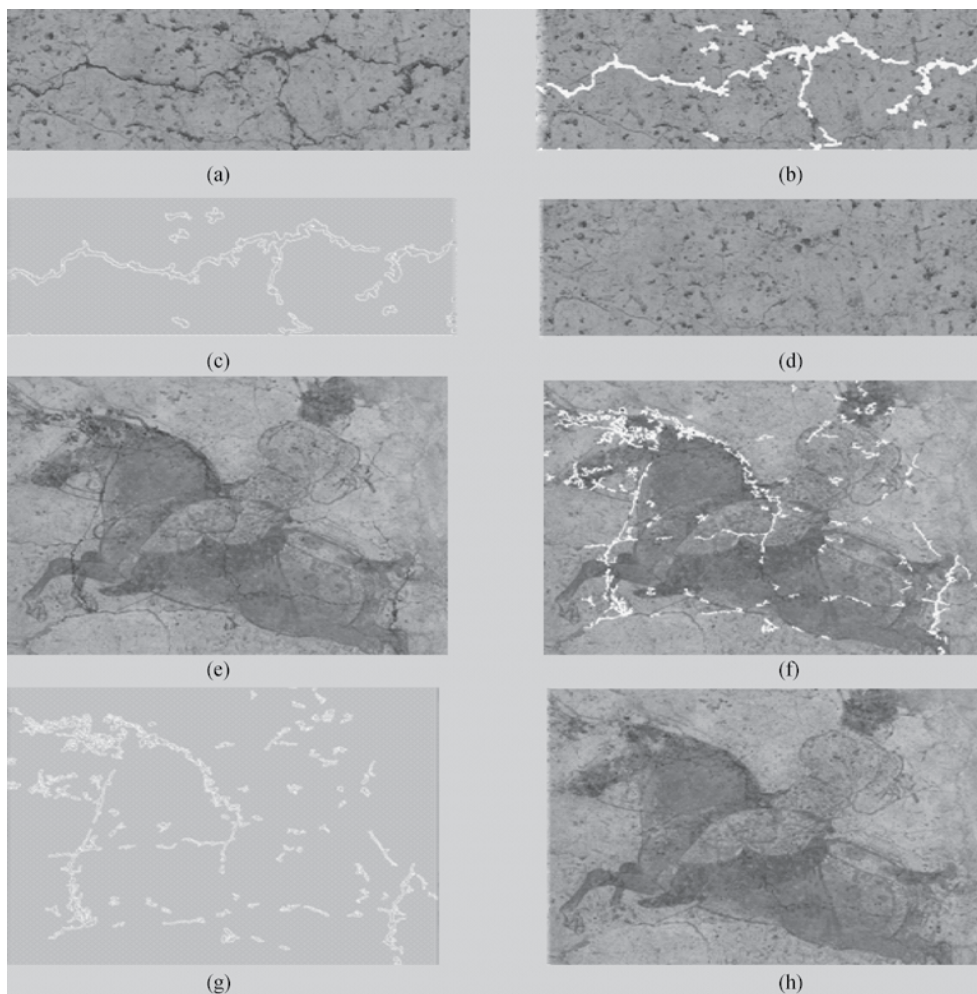


图7 裂缝修复过程

4. 结 论

实验证明本文算法能够很好地实现对《马球图》壁画地仗层中裂缝的自动识别和修复。目前，利用计算机技术对文物进行保护和修复方面的工作还比较少，在国内尚处在试验和起步阶段。本文对《马球图》壁画中裂缝完成虚拟修复，为传统的文物保护开辟了一条新的道路，为古代珍贵文物的保护、复原与研究提供了新的方法，具有很广泛的应用前景。