

一种图像缺损修复算法分析

王永飞^{1,2*}

¹安徽大学计算机科学与技术学院, 安徽 合肥 230601;

²铜陵职业技术学院信息工程系, 安徽 铜陵 244061

摘要 针对图像缺损修复需求设计了一种修复算法。该算法以 Criminisi 算法为基础, 引入标记符控制分水岭算法对图像按景物进行分块, 提高图像缺损部分修复的准确率; 根据最近最佳匹配原则修复图像, 引入像素距离远近控制函数以减少搜索匹配块用时; 引入图像局部色彩方差, 优化 Criminisi 算法的优先权计算方式; 引入协方差, 提高填充块与待修复区域图像的匹配度; 重新设置图像修复的置信度公式, 减小因置信度不断更新时放大的误差。结合多种类型的缺损图像实例进行修复验证, 均取得了很好的修复效果。实验结果表明: 与其他算法对比, 该算法大幅度减少了缺损图像修复用时, 更有效地恢复了图像原有信息。

关键词 图像处理; 图像缺损; 图像景物分块; 划痕图像修复; 图像景物去除

中图分类号 TP391.4 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.121005

Analysis of an Algorithm for Repairing Image Defects

Wang Yongfei^{1,2*}

¹ School of Computer Science and Technology, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;

² Department of Information Technology, Tongling Polytechnic, Tongling, Anhui 244061, China

Abstract In this study, we designed a repair algorithm to satisfy the requirement for repairing the defects in images. Based on the Criminisi algorithm, we introduced the marker-controlled watershed algorithm to segment an image into parts based on the scene for improving the image defect repair accuracy. Further, based on the nearest best matching principle, the image was repaired and a control function was introduced with respect to the pixel distance for reducing time for searching matching blocks. Then, we optimized the priority calculation method of the Criminisi algorithm by introducing the local color variance, and improved matching degree between the filled segments and the sections to be repaired based on the covariance. Subsequently, the confidence formula with respect to image repair was reset to reduce the magnifying error when the confidence value was continuously updated. Additionally, we considered many defect images as examples to verify the repairing effect, and the obtained results demonstrated that the designed algorithm has an excellent repair effect. Experimental results show that compared with other algorithms, the proposed algorithm can considerably reduce the time required to repair the damaged image and more effectively restore the original image information.

Key words image processing; image defects; image scenic segmentation; scratch image repair; image scene removal

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 100.3010

1 引言

随着数字图像处理技术的应用越来越广泛, 图像缺损修复也越来越得到重视, 通过计算机应用技术修复图像缺损部分, 不会对原始图像造成二次损

伤, 特别是在古迹画像缺损修复、珍贵碑刻缺损文字修复和虚拟场景图像中去除多余景物等方面具有重要的研究价值和深远的意义。

已有很多学者提出了不同的修复方法, Bertalmio 等提出按照等照线方向修复的 BSCB 算

收稿日期: 2019-09-23; 修回日期: 2019-10-18; 录用日期: 2019-10-29

基金项目: 安徽省高等学校质量工程项目(2017mooc348)

* E-mail: 121086842@qq.com

法,但修复后的图像模糊度高^[1];文献[2]和文献[3]提出了整体变分法及其改进算法,该类算法的出发点是根据轮廓曲率采用了欧拉-拉格朗日方程和各向异性扩散处理受损区域,但边界处理不够清晰;文献[4]对噪声图像与样本图像对应数据的需求量极大,客观上很难满足;文献[5]修复图像需堆叠多个卷积层构造足够深的神经网络结构,该方法梯度弥散不容忽视,计算量大;文献[6]将观测图像的编码系数与原始图像的估计值进行比较,该方法需要设置良好的观测方法,否则可能由于网络模型的自由性而造成输出结果不理想;文献[7]利用偏微分方程不断将待修补区域边界等值线外部的信息沿轮廓线扩散来修复图像,但计算结果不唯一,修复效果稳定性较差;文献[8]引入粗糙数据推理理论,对于图像缺损区域边缘光滑或信息量小时,修复效果较好;文献[9]改进了梯度优先权来修复图像;文献[10]引入梯度域导向滤波定位修复区域,但精确度有待提高。Criminisi算法是图像修复中的经典算法,但会出现匹配错误和信息丢失,本文以Criminisi算法为基础,探索一种更快、更优的图像缺损修复算法,以提高图像修复后的实际应用价值。

2 图像缺损修复算法的思路

像素点是构成图像特征信息的基础,图像的主要特征信息包括纹理信息、结构信息、灰度信息和颜色信息等。图像缺损修复算法的思路:1)Criminisi算法是一种基于纹理结构合成的图像修复算法,因此以Criminisi算法为基础;2)分析图像结构信息、灰度信息和颜色信息,引入标记符控制分水岭算法对图像按景物进行分块,提高图像缺损部分修复的准确率;3)分析图像像素信息间的相关性,根据最近最佳匹配原则修复图像,引入像素距离远近控制函数以减少搜索匹配块的用时;4)分析图像颜色信息,引入反映图像细节复杂度的图像局部色彩方差,改进Criminisi算法计算优先权取值的精度,精准查找优先权最高的填充块;5)引入协方差,自适应选择最佳匹配块大小;6)重置置信度更新公式,避免置信度在更新过程中的误差放大。通过上述6个步骤,该算法以最快的方式在图像中寻找最佳匹配块并对图像缺损部分进行填充,以恢复图像缺损部分的信息,从而修复图像。

为了验证该算法的修复效果,对当前多种主流

图像进行修复:1)修复人为产生划痕的图像,从视觉效果、相似度和信噪比3个方面进行比较,分析结果证明了所提算法的有效性;2)修复2幅原始古迹画像缺损实例、1幅图像中人物去除实例和1幅原始古迹碑刻文字缺损图像实例,从视觉效果和修复用时2个方面分析结果,证实了所提算法的实用性;3)从视觉效果、相似度、信噪比和修复用时4个方面分析合成前后图像中飞机去除的修复效果,分析结果证明了所提修复算法的通用性。

3 Criminisi 算法

Criminisi算法是一种最相近的样本块优先匹配图像修复算法,该算法修复图像的过程主要有优先权计算、确定最佳匹配块和置信度更新等。

$\partial\Omega$ 表示缺损区域的外环信息; Ω 为缺损区域; Ω 中像素点 p 作为扩散点。

3.1 优先权计算

优先权计算公式^[8]为

$$P(p) = C(p) \times D(p), \quad (1)$$

式中: p 为像素点; $C(p)$ 为点 p 的置信度,用来衡量以点 p 为中心点选取大小固定的待修复块 ψ_p 中的可用信息量; $D(p)$ 为 ψ_p 结构特征的数据项。其中 $C(p)$ 可表示为

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in (\psi_p \cap \Phi)} C(q)}{|\psi_p|}, \quad (2)$$

式中: $|\psi_p|$ 为 ψ_p 的像素数量; Φ 为待修复图像 I 中无需修复的区域; q 为 I 中无需修复的像素点; $C(q)$ 为样本块 ψ_q 中像素 q 的置信度。初始化时,若 $p \in \Omega, C(p) = 0$,反之 $C(p) = 1$ 。

$D(p)$ 可表示为

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^+ \cdot \mathbf{n}_p|}{\alpha}, \quad (3)$$

式中: ∇I_p^+ 为点 p 的等照线强度和方向; ∇ 为微分算子; \mathbf{n}_p 为边线在点 p 的单位法向量; α 为归一化因子,一般取值为255。

3.2 查找最佳匹配块并修复

将优先权最高的 ψ_p 作为模板,以SSD(Sum of Squared Differences)作为匹配准则,在 Φ 中全图探索最佳匹配块 ψ_q ,表达式为

$$\psi_q = \arg \min_{\psi_q \in \Phi} [f_{\text{SSD}}(\psi_p, \psi_q)], \quad (4)$$

式中: $f_{\text{SSD}}(\psi_p, \psi_q)$ 为 ψ_p 和最佳匹配块 ψ_q 中对应已知像素点的颜色差值的平方和; ψ_q 与 ψ_p 位置对应。使用 ψ_q 填充 ψ_p 。

3.3 更新置信度

ψ_p 被新像素填充后就出现在 Φ 中, 已被填充的图像块内像素点的置信度被设置为 1, 图像待修复区域边缘发生变化, 更新置信度的表达式为

$$C(p) = C(\hat{p}), \quad \forall p \in (\Psi_{\hat{p}} \cap \Omega), \quad (5)$$

式中: \hat{p} 为当前优先权最高的被填充块; $C(\hat{p})$ 为 \hat{p} 的置信度; $\Psi_{\hat{p}}$ 为被修复区域; Ω 为 I 中需要修复的区域(缺损区域)。重复上述过程, 直至 Ω 内需修复的像素点为空时停止, 图像修复过程结束。

4 Criminisi 算法的不足及改进

针对 Criminisi 算法的不足, 所提算法在图像景物分块、匹配搜索方式、优先权计算、最佳匹配块选择和置信度更新 5 个方面进行改进和探索。

4.1 图像景物分块

引入标记符控制分水岭算法^[11]对图像中景物进行分块。根据 RGB(Red、Green、Blue) 图像模式色差, 利用最大类间方差(Nobuyuki Otsu)法获取相应区域的二值图像并对图像中景物进行分块, 背景区域与图像区域类间方差公式为

$$\sigma^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2, \quad (6)$$

式中: ω_0 和 μ_0 分别为背景区域像素的概率和平均灰度; ω_1 和 μ_1 分别为图像区域像素的概率和平均灰度。

将图像的梯度幅值作为分割函数, 利用 4 邻域结构元素和 8 邻域结构元素对图像进行交替腐蚀, 以更好地保留图像中较小的凹陷信息。将图像表面颜色特征和亮度特征作为寻找标记依据, 内部标记符为二值图像的局部最小区域的斑点像素, 外部标记符为背景像素, 以获取图像内景物分块图, 结果如图 1 所示。

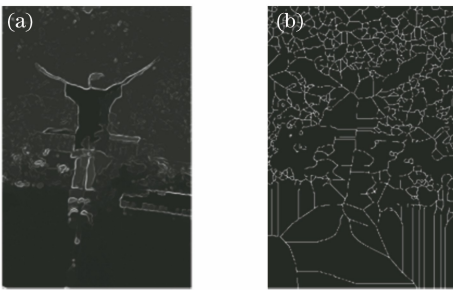


图 1 图像内景物分块图。(a)梯度振幅图;(b)分割图
Fig. 1 Image interior block map. (a) Gradient amplitude image; (b) segmentation image

利用标记符控制分水岭算法获得按景物分块的图像, 利用所提修复算法可优先在指定的景物中选择匹配块, 可提高图像缺损部分修复的准确率。

4.2 最近最佳匹配的搜索方式

图像变化方式为渐进和连续, 缺损区域是图像信息的延伸中断, Criminisi 算法修复图像时是全图搜索匹配。根据最近最佳匹配图像修复原则查找图像修复块优先在最近景物图像区域内进行, 未找到时再扩大至相邻景物图像内, 能极大地提高图像修复速度, 设置像素距离远近控制函数为

$$P_D(p, q) = (x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2, \quad (7)$$

式中: $(x_p, y_p), (x_q, y_q)$ 分别为像素点 p 和 q 的坐标值。

4.3 改进优先权计算

Criminisi 算法的迭代过程: 置信度 $C(p)$ 值从 1 逐步减小且趋向于 0, 或像素点等照线与单位法向量成 90° 时, $D(p) = 0$, 优先权计算公式不再可用。

4.3.1 引入图像局部色彩方差

考虑图像结构信息和纹理信息的相关性, 因图像局部色彩方差能反映图像细节复杂度, 故引入图像局部色彩方差 $E(p)$, 将其作为优先权计算的一部分, 因 HSV(Hue、Saturation、Value) 图像模式空间各分量相对独立, 可将 RGB 等颜色模式转换为 HSV 图像模式。

图像修复块局部色彩方差计算公式为

$$E(p) = \frac{\sum \{S[\psi_{\Phi}(p)] - S[\hat{\psi}_{\Phi}(p)]\}^2}{|\psi_p|}, \quad (8)$$

式中: $\psi_{\Phi}(p)$ 为 ψ_p 中除去缺损区域的像素区域; $S[\hat{\psi}_{\Phi}(p)]$ 为 ψ_p 中已知像素点的色彩均值; $S[\psi_{\Phi}(p)]$ 为 ψ_p 中已知像素点的色彩值。

4.3.2 调整 Criminisi 算法数据项和置信度比例

Criminisi 算法中 $D(p)$ 与 $C(p)$ 互相制约, 针对不同缺损区域, 设置不同的调节权重因子以提高图像修复效果。综上, Criminisi 算法优先权计算公式可改进为

$$P(p) = \alpha C(p) + \beta D(p) + \gamma E(p), \quad (9)$$

式中: α, β 和 γ 为调节权重的平衡因子。经验证, 实验设置 $\alpha = 0.50, \beta = 0.45, \gamma = 0.05$ 。调整后相关项间的关系如图 2 所示。

经过对 Criminisi 算法的优先权公式的修改, 加入了图像局部色彩方差和平衡因子进行调节, 提高了图像修复优先权的取值精度, 以便于更精确地找到优先权最高的填充块进行图像修复填充, 同时避免出现优先权为 0 的情况。

4.4 引入协方差自适应选择修复样本块大小

Criminisi 算法通过计算样本块与匹配块内对应像素点颜色差值平方得到最佳匹配块, 忽略了

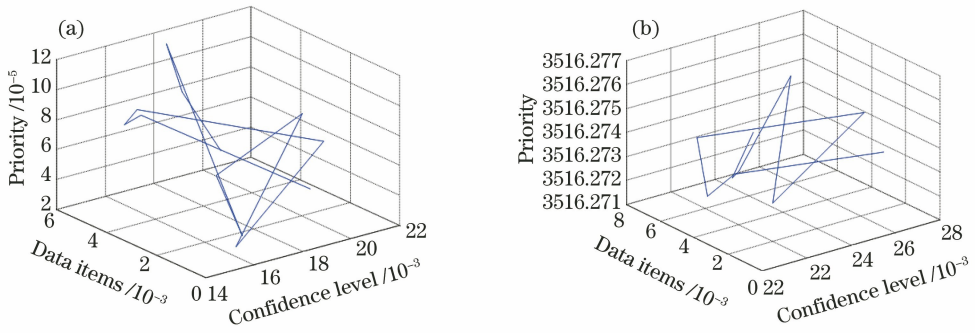


图 2 两种算法中各项关系图。(a) Criminisi 算法;(b)所提算法

Fig. 2 Sub-items relation graph of the two algorithms. (a) Criminisi algorithm; (b) proposed algorithm

整体结构相关性及块间结构一致性,且样本块大小固定,即 9 pixel×9 pixel,实验中样本块大小的不同直接影响修复效果:过于粗糙或出现块效应。Criminisi 算法图像第 350 次修复过程如图 3 所示。

从图 3 可以看到,图像修复块与待修复块大小和颜色不匹配,修复图中石头上出现异常颜色块。为了解决图像修复整体结构相关性及块间结构一致性,所提算法引入协方差来自适应选择样本块大小,计算公式为

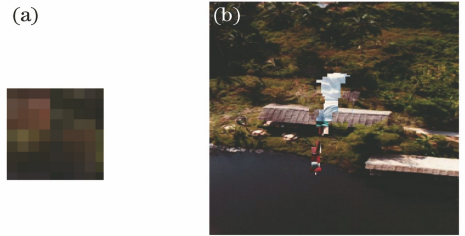


图 3 Criminisi 算法第 350 次修复。(a)修复块;(b)结果
Fig. 3 Repair at the 350th time of Criminisi algorithm.

(a) Repair piece; (b) result

$$f_{SSD}(\psi_p, \psi_q) = \sum_{t \in (\psi_p \cap \psi_q)} [\psi_p(t) - \psi_q(t)]^2, \quad (10)$$

$$f_{STD}(\psi_p, \psi_q) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_t \{[\psi_p(t)M_p(t) - \psi_q(t)M_q(t)] - [\overline{\psi_p}(t) - \overline{\psi_q}(t)]\}^2}, \quad (11)$$

$$d(\psi_p, \psi_q) = f_{SSD}(\psi_p, \psi_q) \times \{[f_{STD}(\psi_p, \psi_q)]^\beta + 1\}, \quad (12)$$

式中: $f_{STD}(\psi_p, \psi_q)$ 为 ψ_p 和 ψ_q 的协方差; t 为样本中像素点序号; m 为修复块中的有效信息量; $\psi_p(t)$ 和 $\psi_q(t)$ 为像素值; $\overline{\psi_q}(t)$ 和 $\overline{\psi_p}(t)$ 分别为 ψ_q 和 ψ_p 的像素均值; $d(\psi_p, \psi_q)$ 为 ψ_p 与 ψ_q 的相似度; $M_p(t)$ 和 $M_q(t)$ 分别为序号为 t 像素点对应的修复

块和匹配块中的有效信息量。(12)式中 $d(\psi_p, \psi_q)$ 值越小,表示 2 个块间相似度越高,为了避免 $d(\psi_p, \psi_q) = 0$,增加常量 1。使用不同大小的样本块修复图像,效果如图 4 所示。

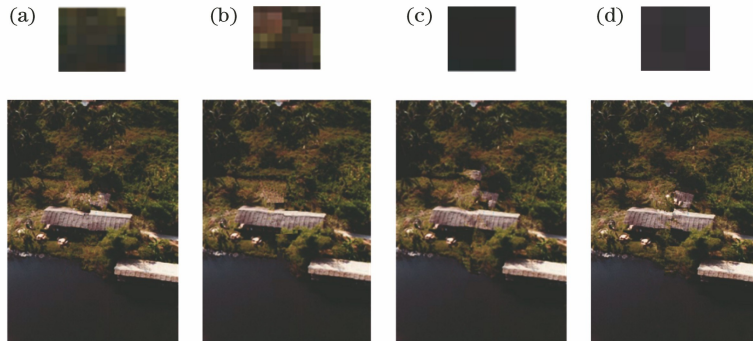


图 4 不同大小块的图像修复效果比较。(a) 9 pixel×9 pixel;(b) 7 pixel×7 pixel;(c) 5 pixel×5 pixel;(d) 3 pixel×3 pixel
Fig. 4 Comparison of image restoration effect for blocks with different sizes. (a) 9 pixel×9 pixel; (b) 7 pixel×7 pixel; (c) 5 pixel×5 pixel; (d) 3 pixel×3 pixel

从图4可以看到,大小为7 pixel×7 pixel的样本块修复效果最佳,9 pixel×9 pixel的样本块修复后石头上出现一块杂草,5 pixel×5 pixel的样本块修复后石头上出现裂痕,3 pixel×3 pixel的样本块修复后石头出现断裂。引入协方差自适应选择样本块大小后,所提算法自动选择了大小为7 pixel×7 pixel的样本块。

4.5 更新置信度

Criminisi算法将已被修复区域的像素点置信度直接设置为1,因填充块与匹配块并不完全相同,有时误差很大,随着迭代次数增加,误差会不断放大,导致图像修复错误。所提算法将置信度更新方式改进为

$$C(p) = C(p') \exp[-d(\psi_p, \psi_{q'})^2], \quad \forall p' \in (\psi_p \cap \Omega), \quad (13)$$

式中: p' 为已修复区域的像素点。从(13)式可以看到,目标块与最佳匹配块越相似, $C(p')$ 值越大,已修复区域像素的置信度就更准确,能更好地减少迭代过程中的误差积累。

5 实验结果与分析

5.1 划痕图像修复

文献[2]算法是在 Ω 靠近 Φ 边缘选取的像素点 p 作为修复点,以点 p 为原点建立平面直角坐标系,由点 p 分别沿直角坐标系的 X 轴和 Y 轴搜索最近非修复点,并标注这4个点 $\{N, S, W, E\}$,比较 X 轴和 Y 轴上两组点与点 p 的距离,距离较小的点与需修复点相关性应更高, $\Lambda_p = \{N, S, W, E\}$ 是点 p 最近相邻点像素值, $\Lambda = \{n, s, w, e\}$ 是点 p 最近相邻半点的像素值。

基于全变分(TV)模型的图像修复算法的能量泛函模型的表达式为

$$J_\lambda(I^*) = \int_{\Phi \cup \Omega} |\nabla I^*| dx dy + \frac{\lambda}{2} \int_{\Phi} |I^* - I|^2 dx dy, \quad (14)$$

式中: λ 为拉格朗日乘子; $\int_{\Phi \cup \Omega} |\nabla I^*| dx dy$ 为正则项; $|\nabla I^*|$ 为梯度模值; I^* 为原始图像; $\frac{\lambda}{2} \int_{\Phi} |I^* - I|^2 dx dy$ 为数据保真项。

利用

$$-\nabla(\nabla I^* / |\nabla I^*|) + \lambda_e(I^* - I) = 0, \quad \lambda_e = \begin{cases} \lambda, & (x, y) \in \Phi \\ 0, & (x, y) \in \Omega \end{cases}, \quad (15)$$

构建修复区域信息块,对缺损块进行修复。式中:

$1/|\nabla I^*|$ 为扩散系数; λ_e 为平滑系数; (x, y) 为 p 点灰度值。

文献[2]对能量泛函模型修改了扩散调节系数,即

$$|\nabla I_p^*| = \sqrt{\frac{|\nabla I_p^*|^3}{l + b \ln(|\nabla I_p^*|)^k}}, \quad (16)$$

式中: l, b 和 k 为常数。

得到文献[2]算法改进的能量泛函模型,即

$$J_\lambda(I^*) = \int_{\Phi \cup \Omega} |\nabla I^*| \times |\nabla I_p^*| dx dy + \frac{\lambda}{2} \int_{\Phi} |I^* - I|^2 dx dy. \quad (17)$$

由于文献[2]算法的修复过程未考虑图像修复过程中梯度变化快慢的影响,出现修复结果边界模糊等现象,修复效果不佳。文献[3]改进了文献[2]算法,令 $V = (v^1, v^2) = \nabla I^* / |\nabla I^*|$, v^1 和 v^2 为待修复区域纵横坐标,则散度中心差分离散化公式为

$$\text{div}(V) = \frac{\partial v^1}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = \frac{v_e^1 - v_w^1}{h} + \frac{v_n^2 - v_s^2}{h}, \quad (18)$$

式中: h 为步长增量; $v_e^1, v_w^1, v_n^2, v_s^2$ 分别为 e, w, n, s 点在不同方向上的梯度。

以点 e 为例,计算 $\Lambda = \{n, s, w, e\}$ 的梯度值,即

$$v_e^1 = \frac{1}{|\nabla I_e^*|} \left(\frac{\partial I^*}{\partial x} \right) = \frac{1}{|\nabla I_e^*|} \frac{I_e^* - I_p^*}{h}, \quad (19)$$

$$|I_e^*| = \frac{\sqrt{(I_e^* - I_p^*)^2 + [(I_{NE}^* + I_N^* - I_s^* - I_{SE}^*)/4]^2}}{h}, \quad (20)$$

式中: u 为修复过程中间修复图; $I_e^*, I_p^*, I_{NE}^*, I_N^*, I_s^*$ 和 I_{SE}^* 分别为对应点 e, p, NE, N, S, SE 的梯度。当 n 次迭代时,则扩散系数 w_q 和权系数 h_{pq} 分别为

$$w_q = \frac{1}{\sqrt{|I_q^*|^2 + g}}, \quad (21)$$

$$h_{pq} = \frac{w_q}{\sum w_q + \lambda_e}, \quad (22)$$

式中: I_q^* 为点 q 梯度; g 为避免分母为0附加的极小值; $q \in \Lambda$ 。利用(20)式和(21)式对待修复区域进行填充,利用

$$u_p^n = \sum h_{pq}^{n-1} u_q^{n-1} \quad (23)$$

更新已修复区域。式中: u_p^n 为第 n 次点 p 梯度; u_q^{n-1} 为第 $n-1$ 次点 q 梯度。当图像稳定时停止迭代,这种方法的缺陷是未考虑填充信息块时数据过度平滑。

为了分析图像的修复效果,对图像人为地加上

微小划痕和大量划痕以验证所提算法的有效性。3种方法实验结果如图5所示。



图5 人为微小划痕图像修复效果比较。(a)原图;(b)微小划痕图;(c)文献[2];(d)文献[3];(e)所提算法

Fig. 5 Comparison of repair effect for image with artificial tiny scratches. (a) Original image; (b) image of artificial tiny scratches; (c) Ref. [2]; (d) Ref. [3]; (e) proposed algorithm

从图5可以看到,微小划痕图像经文献[2]算法修复后,微小划痕得到修复,但原缺损区域周边出现不连续断点,图像颜色加深,图像中颜色出现色变;图像经文献[3]算法修复后,划痕得到修复,但从视觉上观察,仍有划痕暗影;图像经所提算法修复后的视觉效果更佳。比较上述3种算法修复后的图像结构相似度(SSIM)和信噪比(PSNR),结果如表1所示。

从表1可以看到,与文献[2]算法和文献[3]算法比较,所提算法在结构相似度上有所提升,信噪比有大幅度提高。

表1 3种算法图像修复效果比较(微小划痕)

Table 1 Comparison of image repair effects of three algorithms (tiny scratch)

Algorithm	SSIM / %	PSNR / dB
Ref. [2]	0.59	33.83
Ref. [3]	0.69	48.75
Proposed	0.80	84.05

图像划痕的大小目前还没有明确界定,因此,当图像有图6(b)所示大面积划痕时,再利用上述3种算法对图像进行修复,修复结果如图6所示。



图6 人为大面积划痕图像修复效果比较。(a)原图;(b)划痕图;(c)文献[2];(d)文献[3];(e)所提算法

Fig. 6 Comparison of repair effect for image with artificial large area scratches. (a) Original image; (b) image of artificial big scratch; (c) Ref. [2]; (d) Ref. [3]; (e) proposed algorithm

从视觉角度来看,所提算法修复后的图像效果与图6(a)最接近;文献[3]算法修复图像的时间长达123 s,帽子边缘出现微小色差,且原划痕区域边缘出现模糊现象;文献[2]算法修复时间随着

迭代次数的增加而增长,原划痕在修复后图像中非常明显,图像出现明显色变。再从图像结构相似度和信噪比2个方面分析3种方法的修复结果,如表2所示。

表2 3种算法图像修复效果比较(大划痕)

Table 2 Comparison of image repair effects of three algorithms (big scratch)

Algorithm	SSIM / %	PSNR / dB
Ref. [2]	0.71	36.34
Ref. [3]	0.78	39.10
Proposed	0.80	52.62

从表2可以看到,所提算法的修复效果与其他方法相比具有明显优势。

5.2 图像中部分景物去除

目前,主流图像修复算法中,Criminisi算法因自身存在不足,易造成修复图像局部相似而整体不协调的结果。文献[12]定义一个分散度将其纳入优先权计算公式中,该算法只适合修复缺损较小的区

域;文献[13]将Criminisi算法优先权计算公式由乘法改为加法,并加大数据项比重,该算法对直线结构或近似直线结构的大区域破损图像的修复效果较为理想;文献[14]在Criminisi算法优先权计算公式中再加一项平滑度项,该算法根据客户需要进行主观选择优先权高低先后顺序;文献[15]在Criminisi算法优先权计算公式中再加上比重较大的数据项,该算法针对修补航拍厚云有效。

由于文献[2]和文献[3]修复大区域缺损图像的效果特别不理想,后继实验忽略了这2种算法,重点比较所提算法与Criminisi算法、文献[8]、文献[9]、文献[12]、文献[13]、文献[14]和文献[15]的修复效果,实验结果如图7所示。

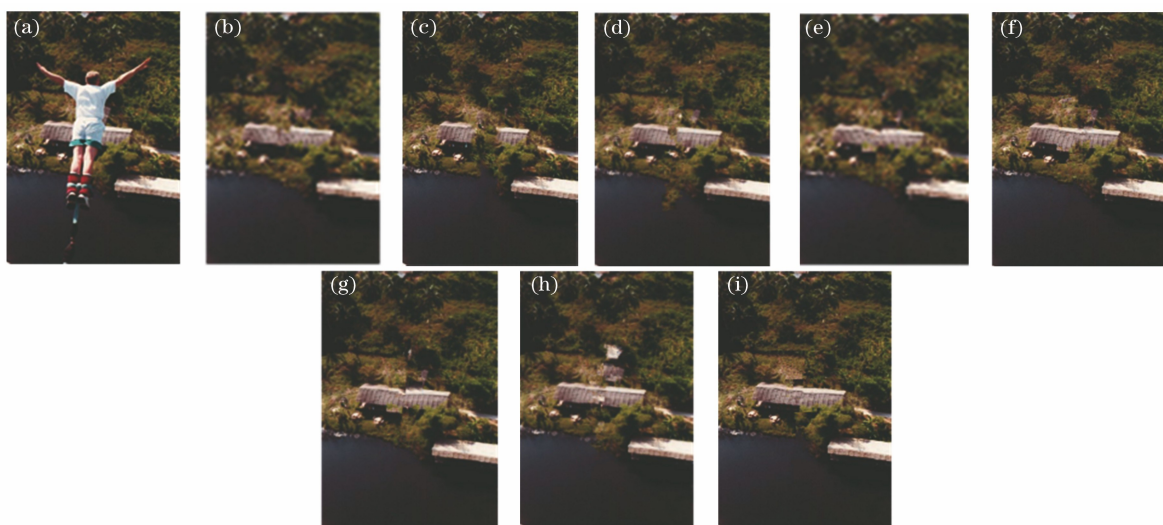


图7 8种算法图像修复效果比较。(a)原图;(b)Criminisi算法;(c)文献[8];(d)文献[9];(e)文献[12];(f)文献[13];(g)文献[14];(h)文献[15];(i)所提算法

Fig. 7 Comparison of image repair effect of eight algorithms. (a) Original image; (b) Criminisi algorithm; (c) Ref. [8]; (d) Ref. [9]; (e) Ref. [12]; (f) Ref. [13]; (g) Ref. [14]; (h) Ref. [15]; (i) proposed algorithm

从图7可以看到,经Criminisi算法修复的效果图,条石上出现杂色块;经文献[8]修复后,条石中间出现断裂现象;经文献[9]修复后,条石中间出现杂色块,水面上出现不协调草块;经文献[12]、文献[13]、文献[14]和文献[15]修复后,条石均未被完整恢复。文献[12]的修复时间为30.5606 s;文献[13]的修复时间为30.8570 s;文献[14]的修复时间为30.8258 s;文献[15]的修复时间为65.4892 s;所提算法的修复时间为11.5129 s。从图像效果和修复时间2个方面来看,所提修复算法最优。

为了进一步验证所提修复算法的有效性和通用性,对原始图像微小划痕修复、原始图像大面积缺损修复、景物去除修复、原始碑刻文字破损修复和人为合成图像中景物去除修复共5个具体实例进行实

验,因文献[8]和文献[9]的修复效果不理想,后面验证忽略了这2种算法。利用所提算法和其他主流算法进行修复效果比较,结果如下。

5.2.1 图像微小划痕修复

从图8可以看到,经Criminisi算法和文献[15]修复后,标记框中都多出一块黑块和白块;文献[3]出现多处面积较大色块;文献[12]、文献[13]和文献[14]都有明显白块;所提算法效果较好。

5.2.2 图像大面积缺损修复

从图9可以看到,Criminisi算法、文献[14]和文献[15]标记框中出现缺块;文献[3]出现大面积模糊;文献[12]出现大面积白块和方向不同黑块;文献[13]出现方向不同黑块;所提算法修复后的图像视觉效果最好。

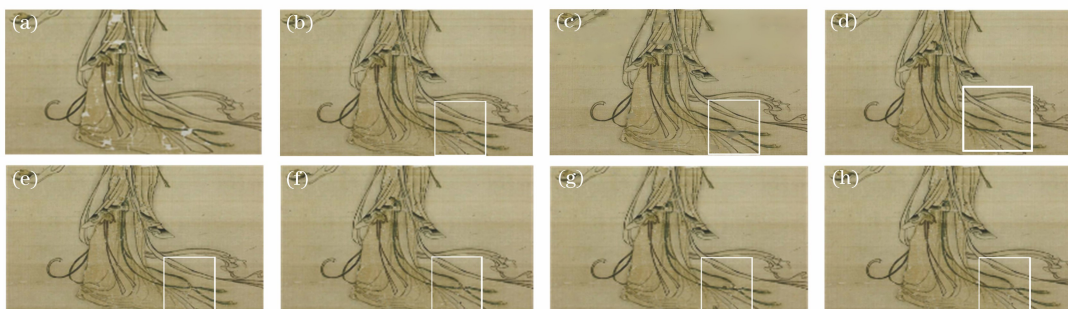


图 8 画像微小划痕修复效果比较。(a)原图;(b)Criminisi 算法;(c)文献[3];(d)文献[12];(e)文献[13];(f)文献[14];(g)文献[15];(h)所提算法

Fig. 8 Comparison of restoration effect for image with tiny scratches. (a) Original image; (b) Criminisi algorithm; (c) Ref. [3];(d) Ref. [12]; (e) Ref. [13]; (f) Ref. [14]; (g) Ref. [15]; (h) proposed algorithm



图 9 画像大面积缺损修复效果比较。(a)原图;(b)Criminisi 算法;(c)文献[3];(d)文献[12];(e)文献[13];(f)文献[14];(g)文献[15];(h)所提算法

Fig. 9 Comparison of restoration effect for image with large area defect. (a) Original image; (b) Criminisi algorithm; (c) Ref. [3]; (d) Ref. [12]; (e) Ref. [13]; (f) Ref. [14]; (g) Ref. [15]; (h) proposed algorithm

5.2.3 图像中景物去除修复

从图 10 可以看到,Criminisi 算法标记框中最下一级台阶处白色块向前延伸超过了图像中台阶垂直分割线,且台阶垂直分割线不清晰;文献[3]出现

大面积模糊;文献[12]和文献[14]多出一块白色块,且文献[14]更明显,台阶垂直分割线出现偏移;文献[13]白色块没有延伸到台阶垂直分割线,台阶垂直分割线不清晰;文献[15]出现明显修复错误;所提算

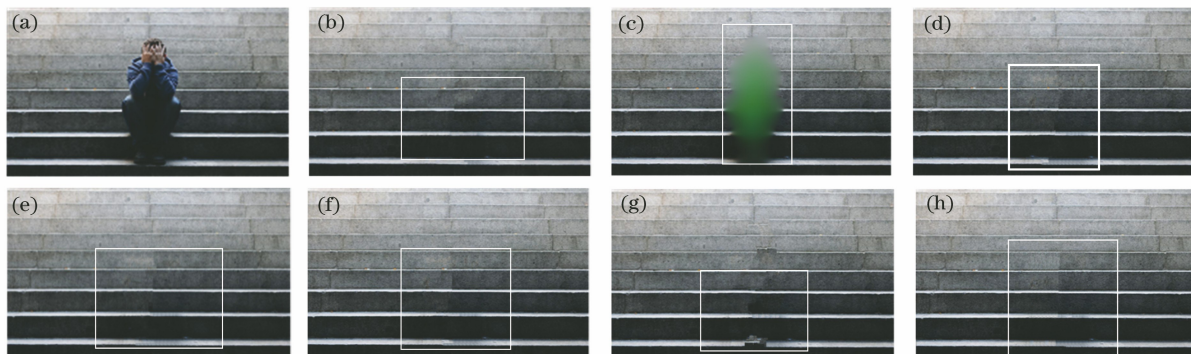


图 10 图像中景物去除修复效果比较。(a)原图;(b)Criminisi算法;(c)文献[3];(d)文献[12];(e)文献[13];(f)文献[14];(g)文献[15];(h)所提算法

Fig. 10 Comparison of restoration effect of moving scene in image. (a) Original image; (b) Criminisi algorithm; (c) Ref. [3]; (d) Ref. [12]; (e) Ref. [13]; (f) Ref. [14]; (g) Ref. [15]; (h) proposed algorithm

法修复效果最佳。

5.2.4 碑刻文字破损修复

图 11 中所有修复后图像的信噪比都超过 60 dB, 相似度都超过 0.9。从表 3 可以看到, 不同之

处是所提算法的修复时间为 1.33 s, 在所有算法中用时最少, 文献[3]修复后的图像非常模糊, 效果特别不理想, 因此在图 11 中没有列出修复后效果, 在表 3 中给出了图像修复用时。

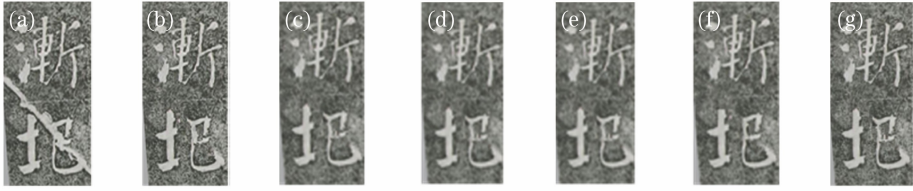


图 11 碑刻破损文字修复效果比较。(a)原图;(b)Criminisi 算法;(c)文献[12];(d)文献[13];(e)文献[14];(f)文献[15];(g)所提算法

Fig. 11 Comparison of restoration effect for damaged inscription. (a) Original image; (b) Criminisi algorithm; (c) Ref. [12]; (d) Ref. [13]; (e) Ref. [14]; (f) Ref. [15]; (g) proposed algorithm

表 3 7 种算法修复图像用时

Table 3 Image repair time of 7 algorithms unit: s

Algorithm	Fig. 8	Fig. 9	Fig. 10	Fig. 11
Criminisi	29.48	178.50	44.40	2.36
Ref. [3]	434.96	680.79	252.60	40.51
Ref. [12]	34.09	198.78	48.91	2.57
Ref. [13]	33.62	188.73	47.35	2.59
Ref. [14]	33.79	193.86	47.83	2.59
Ref. [15]	28.52	162.13	37.90	2.23
Proposed	9.64	97.89	7.14	1.33

5.2.5 合成图像景物去除

为了验证所提修复算法的通用性, 将图 12(a) 和图 12(b)合成一张图片, 要求去除合成图中的图 12(b)图像。

从图 12 可以看到, 为与图 12(a)相比, 效果图中明显缺陷之处已用方框标出。Criminisi 算法图像有明显块填充痕迹; 文献[12]图像修复出现断点; 文献[13]多出白色块; 文献[14]多出深色划痕; 文献[15]多出其他颜色块; 所提算法修复区域与周边景

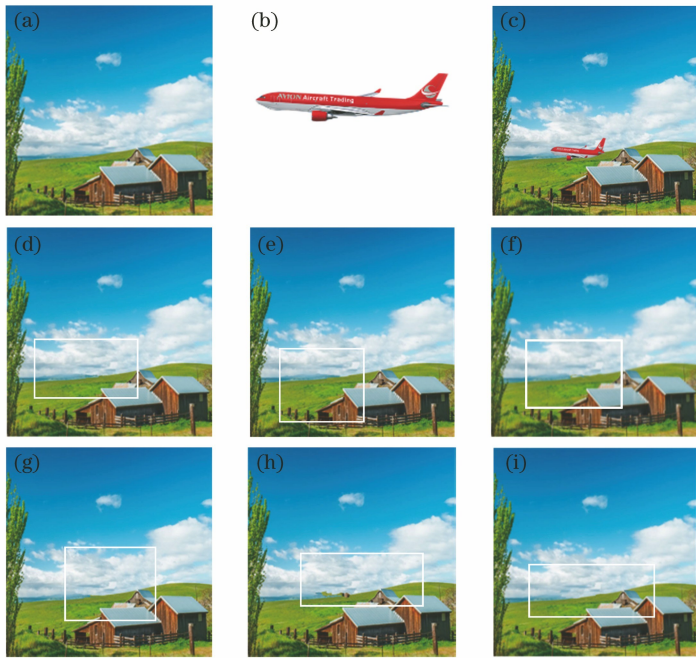


图 12 图像中飞机去除不同算法修复效果比较。(a)原图 1;(b)原图 2;(c)合成图;(d)Criminisi 算法;(e)文献[12];(f)文献[13];(g)文献[14];(h)文献[15];(i)所提算法

Fig. 12 Comparison of repair effects of different algorithms for removing aircraft from image. (a) Original image1; (b) original image2; (c) composite image; (d) Criminisi algorithm; (e) Ref. [12]; (f) Ref. [13]; (g) Ref. [14]; (h) Ref. [15]; (i) proposed algorithm

物融合度更高,更接近原始图像。6种算法的图像修复用时、结构相似度和信噪比数据如表4所示。

从表4可以看到,6种算法修复后图像与原图结构相似度都非常高,而所提算法图像修复后的信噪比高于其他5种算法,修复时间只占用了6.91 s。实验表明,所提算法具有良好的通用性。

表4 6种算法的修复效果分析

Table 4 Analysis of repair effects of six algorithms

Algorithm	Repair time /s	PSNR /dB	SSIM /%
Criminisi	47.85	50.22	0.59
Ref. [12]	52.37	50.18	0.59
Ref. [13]	52.12	49.88	0.59
Ref. [14]	52.74	50.12	0.59
Ref. [15]	40.78	48.84	0.49
Proposed	6.91	51.39	0.59

6 结 论

提出了一种图像缺损修复算法,结合人为图像缺损和原始图像缺损实例,对图像划痕、图像缺损和图像部分景物去除等进行了充分的论证和修复,成功地实现了图像修复,验证了所提算法的有效性、实用性和通用性。从视觉效果、修复用时、图像结构相似度和信噪比等方面与当前多种主流算法进行比较,表明所提算法具有明显的图像修复优势。下一步工作将对模糊图像缺损修复进行探索。

参 考 文 献

- [1] Zhang J. Digital image inpainting algorithm research [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015: 5-9.
张锦. 数字图像修复算法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015: 5-9.
- [2] Yang H. A class of image restoration based on TV model with the method of optimization [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 21-32.
杨卉. 基于TV模型的用于图像修复的优化方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 21-32.
- [3] Du S H, Han C. An improved image inpainting algorithm based on total variation model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 071005.
杜闪闪, 韩超. 基于总变分模型的改进图像修复算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071005.
- [4] Zhang Q B, Zhang X H, Han H W. Backscattered light repairing method for underwater laser image based on improved generative adversarial network

[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041004.

张清博, 张晓晖, 韩宏伟. 基于改进生成对抗网络的水下激光图像后向散射光修复方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041004.

- [5] Zhu X S, Qian Y J, Sun B, et al. Image inpainting forensics algorithm based on deep neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1110005.
朱新山, 钱永军, 孙彪, 等. 基于深度神经网络的图像修复取证算法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1110005.
- [6] Dong W S, Zhang L, Shi G M, et al. Nonlocally centralized sparse representation for image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(4): 1620-1630.
- [7] Zou Y. Image repainting model based on pde with fractional operator [J]. Journal on Numerical Methods and Computer Applications, 2017, 38(3): 225-235.
邹杨. 基于分数阶型算子的偏微分方程图像修复模型[J]. 数值计算与计算机应用, 2017, 38(3): 225-235.
- [8] Zhou N, Zhu Z Z. Criminisi image inpainting algorithm based on rough data-deduction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 021005.
周宁, 朱昭昭. 基于粗糙数据推理的Criminisi图像修复算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 021005.
- [9] Zhang C F. Research on improved image restoration method based on Criminisi and block sparsity [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017: 33-46.
张从飞. 基于Criminisi和块结构稀疏度的改进图像修复方法研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017: 33-46.
- [10] Liu T T, Zhang Y J, Wu F, et al. Diffusion-based image inpainting forensics via gradient domain guided filtering enhancement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 081003.
刘婷婷, 张玉金, 吴飞, 等. 基于梯度域导向滤波增强的图像扩散修复取证[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 081003.
- [11] Jin X, Wang W. Dental hard tissue segmentation based on modified marker-controlled watershed method [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(11): 3479-3483, 3487.
金茜, 汪伟. 基于改进控制标记分水岭的牙体硬组织分割[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(11): 3479-

- 3483, 3487.
- [12] Jiao L J, Wang W J, Li B J, et al. Wutai mountain mural inpainting based on improved block matching algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(1): 118-125.
焦莉娟, 王文剑, 李秉婧, 等. 改进的块匹配五台山壁画修复算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(1): 118-125.
- [13] Tan S. Research on image inpainting technology of large area damaged [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017: 25-44.
谭实. 大区域破损图像修复技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017: 25-44.
- [14] Zhang X, Yin L X, Li Z J. An improved exemplar-based image inpainting method [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(10): 216-219.
张绚, 尹立新, 李振杰. 一种改进的基于样例的图像修复算法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(10): 216-219.
- [15] Zhang S Y, Li C L. Thick cloud restoration of aerial images based on improved criminisi algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 121012.
张思雨, 李从利. 基于改进 Criminisi 算法的航拍图像厚云修复[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121012.