



DOI: 10.13382/j.jemi.B2002941

基于方差调节策略耦合结构特征的图像修复算法*

杨竹青¹ 谢宏²

(1. 江苏信息职业技术学院 物联网工程学院 无锡 214153; 2. 上海海事大学 信息工程学院 上海 200135)

摘要:针对当前图像修复算法主要采用图像的 R、G、B 信息来获取最优匹配块,忽略了图像的结构特征,导致修复图像中含有纹理不连续及块现象等问题,设计了方差调节策略耦合结构特征的图像修复算法。首先,借助图像的梯度模值来构造结构度量因子,以度量图像的结构特征。联合置信度项、结构度量因子和数据项,构造优先权函数,以寻求优先修复块。然后,采用图像的方差特征,建立方差调节策略,考虑图像纹理的动态变化,寻求与当前纹理情况最吻合的样本块尺寸。最后,将结构度量因子引入到最优匹配块的搜索过程中,以弥补通过 R、G、B 信息搜索最优匹配块时所忽略图像结构特征的不足,得出最优匹配块修复图像,实现损坏区域的复原。通过实验结果发现,较当前修复方案而言,所提算法的修复图像具备更优的纹理连续性。

关键词: 图像修复; 梯度模值; 结构度量因子; 方差调节; 优先权函数; 结构特征

中图分类号: TP391; TN0 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Image inpainting algorithm based on variance adjustment strategy coupling structural feature

Yang Zhuqing¹ Xie Hong²

(1. College of Internet of things Engineering, Jiangsu Vocational College of Information Technology, Wuxi 214153, China;

2. School of Information Engineering, Shanghai Maritime University, ShangHai 200135, China)

Abstract: In view of the current image restoration algorithms mainly use the R, G, B information of the image to obtain the optimal matching block, which ignoring the structural features of the image and resulting in the problem of texture discontinuity and block phenomenon in the repaired image, this paper designs an image restoration algorithm with variance adjustment strategy coupling structural features. Firstly, the gradient modulus of image is used to construct the structure measurement factor to measure the structure characteristics of image. The priority function is constructed by combining the confidence term, structure measure factor and data term to find the priority repair block. Then, the variance feature of the image is used to establish the variance adjustment strategy, considering the dynamic changes of the image texture, to find the most consistent sample block size with the current texture situation. Finally, the structure measure factor is introduced into the search process of the optimal matching block to make up for the lack of the ignored image structure features when searching the optimal matching block through R, G, B information, accurately obtain the optimal matching block, and achieve the repair of the damaged area. The experimental results show that the algorithm has better texture continuity and visual effect than the current algorithm, and the performance is better.

Keywords: image inpainting; gradient modulus; structure measure factor; variance adjustment strategy; priority function; structure feature

收稿日期: 2020-01-17 Received Date: 2020-01-17

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61550110252, 51678127)、上海市科委计划重点项目(14590101700)、上海市科学技术委员会(14441900300)、江苏高校优势学科建设工程(苏教高[2017]17号)、江苏省自然科学基金(BK20131097)资助项目



0 引言

科技的发展为人们的生活提供了便利,也为数字图像的获取采集提供了便捷的方法^[1]。在数字图像的使用过程中,人们会面临数字图像损坏现象的出现,损坏的数字图像不仅不利于信息的完整表达,而且也不适于人们的视觉要求^[2-3]。对此,如何对损坏数字图像进行修复,就变成了人们必须面对的一个问题^[4-5]。

通过研究人员的努力,近年来越来越多的图像修复算法得以涌现。Yang 等^[6]采用分数阶微积分的思路,定义了分数阶结构张量,用于控制正则化过程,建立了分数阶张量正则化模型,用于将分数阶导数向量的内积及其转置,与分数阶结构张量成比例的函数,进行最小化运算,根据位移 Grümwald-Letnikov 定义求取了分数阶导数掩模,进而完成图像修复。由于分数阶微积分采用的是空间扩散的方法来修复图像,没有考虑图像的结构特征,易使得修复结果出现振铃现象。Fan 等^[7]利用图像的显著性信息对优先修复块的计算过程进行改进,接着通过图像的稀疏度特征对样本块大小进行选择,采用计算图像块之间的旋转相似性结果来获取最优匹配块。由于该方法在计算图像间旋转相似性时,仅考虑了其图像的 R 、 G 、 B 相似度值,没有考虑其结构特征的相似性,使得其修复图像具有纹理不连续性。Ma^[8]利用图像的边缘及纹理等信息,通过构造微分因子的方法,对待修复块的优先权值进行计算,并利用图像的 R 、 G 、 B 信息,来获取最优匹配块,以修复图像。由于该方法中采用的样本块为单一尺寸,而且获取最优匹配块时没有考虑图像的结构特征,从而使得其修复图像中具有块现象。Ou 等^[9]在对 Criminisi 算法中优先权计算公式改进的基础上,对图像进行分割后,采用测量图像 R 、 G 、 B 信息的方法来完成图像修复。由于该方法中采用测量图像 R 、 G 、 B 信息来对图像进行修复时,没有考虑图像的结构特征,而且对图像进行分割修复难以保持修复后图像的连续性,导致其修复结果较差。

为此,本文利用图像的梯度模值信息,构造了结构度量因子,设计了采用方差调节策略耦合结构特征的图像修复算法。利用结构度量因子设计新的优先权计算公式,获取优先修复块。采用图像的区域方差特性,测量图像的纹理变动情况,以求取适宜样本块尺寸。将结构度量因子与图像 R 、 G 、 B 信息相结合,在搜索最优匹配块时加入图像的结构特征元素,以更为准确的获取最优匹配块。在实验中,利用本文算法对多幅损坏图像进行了修复,通过分析其修复结果验证了其优良的修复特性。

1 本文修复算法设计

本文修复算法的过程如图 1 所示。分析图 1 可知,本文修复算法主要通过优先权值的计算、适宜样本块尺寸的计算以及最优匹配块的 3 个阶段,从而来实现对损坏图像的修复。

1) 优先权值的计算。通过图像的梯度模值,构造结构度量因子,利用其构造优先权计算公式,以获取优先修复块,提高算法修复秩序的合理性和准确性。

2) 适宜样本块尺寸的计算。在图像的区域方差特征基础上,建立方差调节策略,依据图像纹理的变动情况,计算出适宜的样本块尺寸,以增强算法对多纹理情况的适应性。

3) 最优匹配块的计算。将结构度量因子添加到图像块匹配过程,联合图像的 R 、 G 、 B 信息与结构特征,共同计算最优匹配块,以增强所获取最优匹配块的匹配准确性。

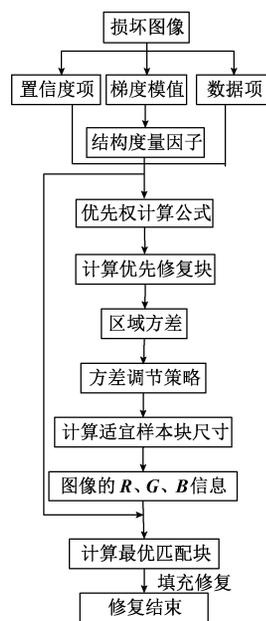


图 1 本文修复算法的过程

Fig. 1 The process of repairing algorithm in this paper

1.1 优先权值的计算

损坏图像 I 的损坏边界 $\partial\varphi$ 上,破损像素点 p 的优先权值 $P(p)$ 为^[10]:

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

其中,置信度项 $C(p)$ 测量了 p 对应待修复块 G_p 所含的已知信息大小,其计算过程为:

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in G_p \cap \delta} C(q)}{|G_p|} \quad (2)$$



式中: δ 为 I 中未损坏区域。

数据项 $D(p)$ 测量了 G_p 的结构特征,其可通过 p 上的等照度线矢量 ∇I_p^+ 求取:

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^+ \cdot n_p|}{\alpha} \quad (3)$$

式中: α 和 n_p 分别为调节系数和 p 上的单位法向量,不失一般性 $\alpha = 255$ [11]。

利用式(1)计算优先权值的方法较为常见,但从式(3)可见,当 ∇I_p^+ 与 n_p 垂直时,将使得 $D(p) = 0$,从而导致 $P(p)$ 出错[12]。对此,本文将利用图像的梯度模值,来构造新的优先权计算公式,以稳定、准确的求取 $P(p)$ 的值。

计算 G_p 的梯度模值 $M(p)$ [13]:

$$M(p) = \sum_{x=1}^K \sum_{y=1}^K ((p(x+1,y) - p(x-1,y))^2 + (p(x,y+1) - p(x,y-1))^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: K 为 G_p 的尺寸; $p(x,y)$ 为 G_p 中像素点的像素值。

通过 $M(p)$ 构造结构度量因子 $J(p)$,以度量图像的结构信息:

$$J(p) = e^{M(p)} \quad (5)$$

利用 $J(p)$ 构造的优先权计算公式为:

$$P'(p) = C(p) [D(p) + J(p)] \quad (6)$$

通过式(6)可知, $P'(p)$ 的计算过程不仅不会随着 ∇I_p^+ 与 n_p 的垂直而出错,而且还通过 $J(p)$ 增强了优先权计算过程中图像结构特征的参考量,使得优先权值的计算更为可靠,确保了修复秩序合理且稳定的进行。

通过式(6)计算优先修复块的过程如图2所示。依图可见,当对多个待修复块的优先权值进行计算后,得出了图2(b)中的待修复块 G_p 为优先修复块。

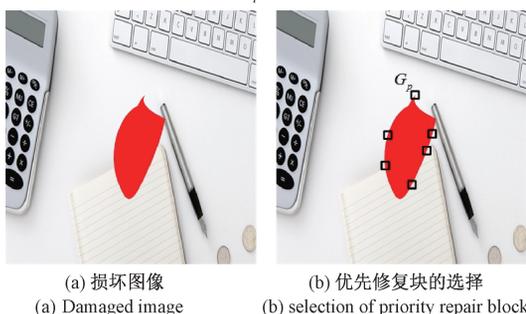


图2 优先修复块的计算

Fig. 2 Calculation of priority repair block

1.2 适宜样本块尺寸的计算

单一样本块尺寸易使得修复图像出现块现象等弊端,为了适应图像的多纹理特性,需要对样本块的尺寸进行计算。对于内容复杂多变的图像,应减小样本块尺寸,以降低纹理间断等副作用产生的概率。对于内

容平滑单一的图像,应扩大样本块尺寸,以降低接缝效应等副作用产生的概率,以及提高修复效率[14-15]。图像的区域方差可反应出图像的纹理变动情况,因此可利用其作为样本块尺寸计算的依据,计算出适宜的样本块尺寸。

样本块 G_p 的区域方差 FC 为[16]:

$$FC = \frac{1}{K \times K} \sum_{x=1}^K \sum_{y=1}^K (p(x,y) - \bar{G})^2 \quad (7)$$

式中: \bar{G} 为 G_p 的像素均值。

通过区域方差 FC 建立方差调节策略,以动态匹配样本块尺寸,计算出适宜的样本块大小。通过方差调节策略计算适宜样本块尺寸的过程如下。

首先,在样本块尺寸为 $K \times K$ 时,利用式(7)计算其区域方差值 FC_i 。将样本块尺寸增大2个像素点至 $K = K + 2$ 时,再用式(7)计算此时区域方差值 FC_{i+1} 。接着计算扩大样本块尺寸后,区域方差的变化度:

$$\Delta FC = \left| \frac{FC_i - FC_{i+1}}{FC_i + FC_{i+1}} \right| \quad (8)$$

最后,将 ΔFC 与预设阈值 β 进行比较。若 $\Delta FC \geq \beta$ 则表示,增大样本块尺寸后,图像的纹理较增大样本块尺寸前变动较大,此时样本块的纹理较为复杂,不宜扩大样本块尺寸,样本块的最终尺寸还是采用 FC_i 值对应的样本块尺寸。若 $\Delta FC < \beta$ 则表示,增大样本块尺寸后,图像的纹理较增大样本块尺寸前变动较小,此时样本块的结构较为平滑单一,可尝试再将样本块扩大至 $K = K + 2$,并按照上述方法再次求取区域方差的变化度,将其与阈值 β 进行比较,直至满足 $\Delta FC \geq \beta$ 时,即可确定适宜样本块的尺寸。

通过方差调节策略确定适宜样本块尺寸的过程如图3所示。由图3可见,在经过几次调节后,选择了图3中标注框所示尺寸作为样本块的最终尺寸。



图3 确定样本块尺寸的过程

Fig. 3 The process of determining the sample block size

1.3 最优匹配块的计算

利用图像的 R, G, B 信息,测量待修复块 G_p 和已知区域 δ 中匹配块 H_q 之间的颜色距离:



$$Dis(G_p, H_q) =$$

$$\sum_{p \in G_p} \sum_{q \in H_q} \sqrt{(p_R - q_R)^2 + (p_G - q_G)^2 + (p_B - q_B)^2} \quad (9)$$

式中: p_R 和 q_R 分别为 G_p 和 H_q 中, 像素点 p 和 q 的 R 值, p_G 和 q_G 、 p_B 和 q_B 也为类似的意义。

通过式(9)从区域 δ 中获取最优匹配块的过程为^[17]:

$$H_q = \operatorname{argmin} DIS(G_p, H_q) \quad (10)$$

利用式(10)易匹配出多个最优匹配块, 导致修复图像出现块现象。对此, 本文将结构度量因子引入到最优匹配块的计算过程, 以抑制配出多个最优匹配块的情况, 提高修复图像质量。

利用式(5)计算待修复块 G_p 和匹配块 H_q 的结构特征值 $J(p)$ 和 $J(q)$, 将其代入式(10)中, 用以计算最优匹配块:

$$H_q = \operatorname{argmin} DIS(G_p, H_q) \&\&\operatorname{argmin} (|J(p) - J(q)|) \quad (11)$$

式中: $\&\&$ 为“且”运算。式(11)表示, 仅当匹配块 H_q 与待修复块 G_p 的颜色距离最小, 且结构特征差异最小时, 才认定 H_q 为 G_p 的最优匹配块。

通过式(11)计算最优匹配块的过程如图4所示。由图4可见, 在经过多次计算后, 最后确定了匹配块 H_q 为最优匹配块。

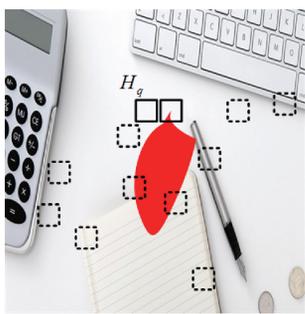


图4 计算最优匹配块的过程

Fig. 4 The process of calculating the best matching block

本文算法的执行步骤如下:

- 1) 利用式(6)计算待修复块的优先权值, 获取优先修复块。
- 2) 利用方差调节策略, 计算出适宜的样本块大小。
- 3) 利用式(11)从已知区域中, 求取最优匹配块, 以修复图像。

通过以上步骤获取的修复图像如图5所示。由图5可见, 本文算法修复的图像质量较好。

2 实验结果

借助 MATLAB 2014a 软件, 在 Intel i3 9100F 处理器、



图5 本文算法的修复图像

Fig. 5 Repair image of the algorithm in this paper

500 GB ROM 的 PC 上进行实验。实验过程中本文算法所涉及的阈值 $\beta = 0.45$ 。同时采用文献[18-19]算法作为对比, 以观测本文算法的修复优越性。

不同算法对损坏图像的修复效果分别如图6~8所示。其中图6为不同算法对划痕花朵图像的修复效果。观察图6中各修复图像可以发现, 图6(c)存在纹理间断和块现象问题, 图6(e)存在修复遗留和振铃现象问题, 图6(g)效果相对较好, 仅存一处细小修复遗留问题。图6(c)、(e)及(g)的局部放大结果分别如图6(d)、(f)、(h)所示。图7为不同算法对插入文字盆栽图像的修复效果。虽然图7(c)、(e)、(g)的修复图像效果较好, 但仔细观察可见, 图7(d)具有修复遗留和边缘间断效应, 图7(f)存在伪吉布斯效应和块效应, 图7(h)存在仅有些许轻微模糊效应。图7(d)、(f)、(h)展示了3种修复结果的局部放大图, 可以发现, 本文算法的修复视觉最好。插入遮挡玉米图像的修复效果如图8所示。从图8不同算法修复的图像可见, 图8(c)存在纹理不连续以及块现象, 图8(e)存在振铃及修复遗留现象, 图8(g)仅存一处轻微振铃现象。图8(c)、(e)及(g)的局部放大结果分别如图8(d)、(f)、(h)所示。通过对比不同算法对不同损坏图像的修复效果可见, 本文算法的修复效果最好, 修复的图像不存在纹理间断以及块效应。因为本文算法利用图像的梯度模值, 构造了结构度量因子, 将图像的结构特征引入到待修复块优先权的计算过程, 使得算法的修复秩序得以稳定、合理的进行。同时本文算法是通过图像的区域方差信息, 建立了方差调节策略, 以获取适宜的样本块大小, 从而提高了算法的修复质量。

结构相似度(structural similarity index, SSIM)可以从客观方面来较好地衡量修复图像的质量^[20], 能从亮度、结构信息相似度以及对比度等3个方面来判断已修复图像和原始未损坏图像之间的相似程度, 从而反映出修复效果。本文将对图9所示的未损坏图像, 造成多种程度的损坏, 接着再利用不同算法对其进行修复, 通过观察不同算法修复图像的 SSIM 结果和修复平均耗时, 来对不同算法的修复特性进行比较。

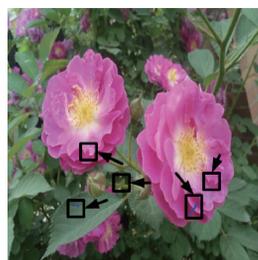
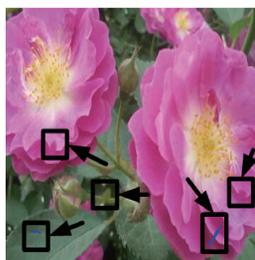
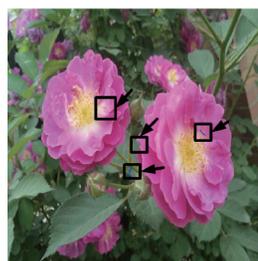
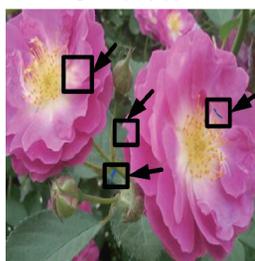
(a) 未损坏图像
(a) Undamaged image(b) 损坏图像
(b) Damaged image(c) 文献[18]算法
(c) Reference [18] algorithm(d) 图(c)的局部放大图
(d) Partial enlarged view of repairing fig.(c)(e) 文献[19]算法
(e) Reference [19] algorithm(f) 图(e)的局部放大图
(f) Partial enlarged view of repairing fig.(e)(g) 本文算法
(g) This algorithm(h) 图(g)修复的局部放大图
(h) Partial enlarged view of repairing fig.(g)

图 6 划痕花朵图像的修复效果

Fig. 6 Repairing effect of scratched flower image

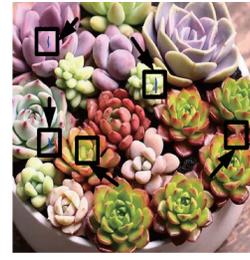
(a) 未损坏图像
(a) Undamaged image(b) 损坏图像
(b) Damaged image(c) 文献[18]算法
(c) Reference [18] algorithm(d) 图(c)的局部放大图
(d) Partial enlarged view of repairing fig.(c)(e) 文献[19]算法
(e) Reference [19] algorithm(f) 图(e)的局部放大图
(f) Partial enlarged view of repairing fig.(e)(g) 本文算法
(g) This algorithm(h) 图(g)修复的局部放大图
(h) Partial enlarged view of repairing fig.(g)

图 7 插入文字盆栽图像的修复效果

Fig. 7 Repairing effect of inserting text potted plant image

图 10 所示为不同算法修复图像的 SSIM 值。对比图中不同算法的 SSIM 值可以发现,本文算法的 SSIM 值强于文献[18-19]算法的 SSIM 值。以 36% 损坏度为参考可见,此时本文算法的 SSIM 值为 93.91%,文献[18-19]算法的 SSIM 值分别是 89.27% 和 91.63%。表 1 为不同算法的修复平均耗时,从表 1 数据可见,文献[18]的修复效率较高,平均耗时仅为 6.59 s。而本文算法由于需要计算图像的 R 、 G 、 B 分量信息,增大了计算量,使其耗时较

高,为 9.76 s。但是该效率也较为理想,与文献[19]较为接近。因为本文算法以区域方差为依据,建立了方差调节策略,对样本块尺寸进行调节,计算出与图像纹理相适宜的样本块尺寸。同时本文算法还将图像的结构特征引入到最优匹配块的搜索过程,增强了最优匹配块搜索的准确性,促进了本文算法修复性能的提高。文献[18]算法中通过小波分解方法获取图像的子带系数,通过估计各子带目标区域的小波系数来实现平滑近似,以修复子

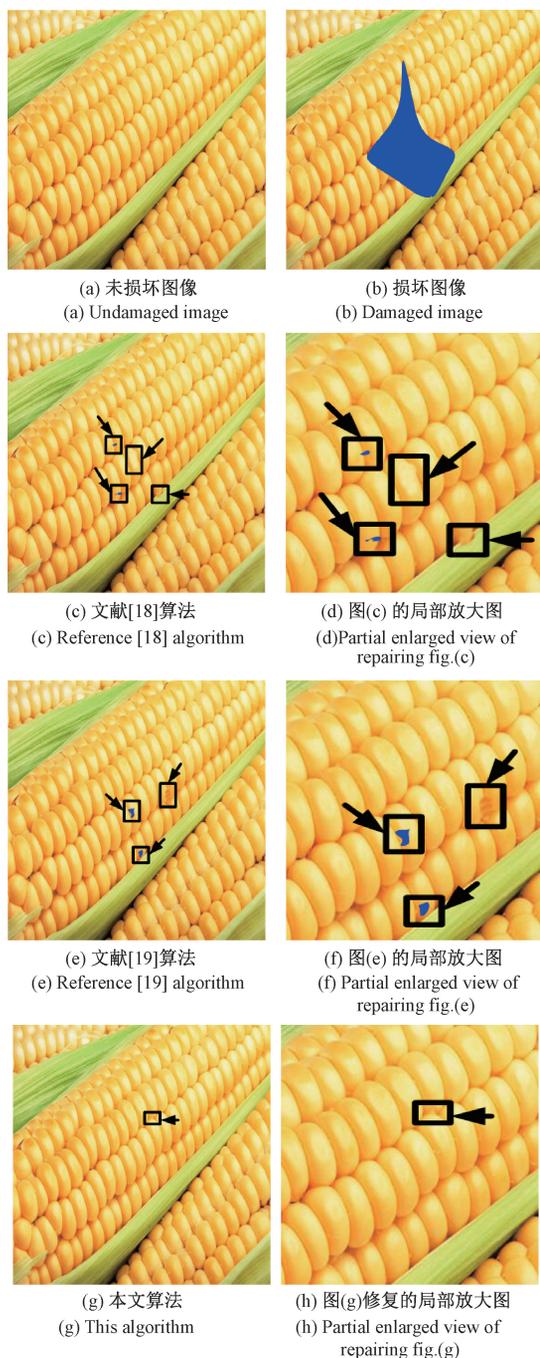


图8 插入遮挡玉米图像的修复效果

Fig. 8 Repairing effect of inserting occluded corn image

带系数中的结构和纹理分量,进而完成图像修复。由于小波分解在方向选择上受限,且平滑近似的方法存在近似误差,从而使得该方法的修复特性较差。文献[19]算法中通过图像的显著信息,构建了自适应的优先权计算方法,在稀疏表示的基础上,选择样本块尺寸,通过图像角度间的近似程度,来获取最优匹配块,以修复图像。由于以显著信息为优先权计算的依据,忽略了图像的弱结构信息,而且以图像角度间的近似程度来获取最优匹配



图9 未损坏图像

Fig. 9 Undamaged image

块,没有考虑图像的结构特征,从而降低了该方法的修复特性。

表1 不同算法的修复平均耗时测试结果

Table 1 Test results of average repair time of different algorithms

修复算法	文献[18]	文献[19]	本文
耗时/s	6.59	8.18	9.76

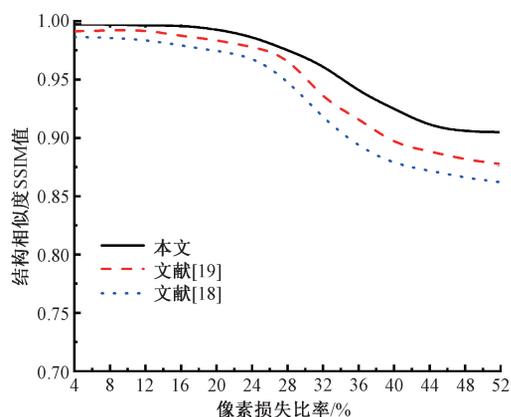


图10 SSIM 值测试结果

Fig. 10 SSIM value test results

3 结论

本文在图像梯度模值信息的基础上,设计了方差调节策略耦合结构特征的图像修复算法。通过图像梯度模值信息构建了结构度量因子,对优先权计算过程进行改进,增强了优先权计算过程的稳定性和准确性。利用图像的区域方差,建立了方差调节策略,以计算出与图像纹理相匹配的样本块尺寸。通过图像 R 、 G 、 B 信息测量图像的颜色距离,引入结构度量因子,测量图像的结构差异,以寻求最优匹配块修复图像。实验结果显示,本文算法修复的图像的 SSIM 较高、质量较好,修复图像中不含



块现象及纹理间断现象。

由于所提算法需要计算图像的 R 、 G 、 B 分量信息,增大了计算量,在一定程度上增加了算法的复杂度。后续将对最优匹配块的搜索区域进行优化,通过减少区域搜索来改善算法的计算复杂度。

参考文献

- [1] 吴一全, 邹宇, 刘忠林. 基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 221-229.
WU Y Q, ZOU Y, LIU ZH L. Sub-pixel level image edge detection algorithm based on Franklin moments [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 221-229.
- [2] 吴亮, 宋旭, 刘国英. 基于相似度因子与最优逼近模型的图像修复算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(6): 131-138.
WU L, SONG X, LIU G Y. Image inpainting algorithm based on similarity factor coupled optimal approximation model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(6): 131-138.
- [3] 陶兆胜, 王磊, 张敬寒. 强化边缘结构分辨的分段自适应图像修复 [J]. 光电子·激光, 2018, 29(12): 1350-1357.
TAO ZH SH, WANG L, ZHANG J H. Enhanced edge resolution image inpainting based on piecewise adaptive algorithm[J]. Journal of Optoelectronics· Laser, 2018, 29(12): 1350-1357.
- [4] LAURENT H. Understanding image inpainting with the help of the Helmholtz equation [J]. Mathematical Sciences, 2017, 11(1): 73-77.
- [5] 温利龙, 徐丹, 张熹. 基于生成模型的古壁画非规则破损部分修复方法 [J]. 图学学报, 2019, 40(5): 925-931.
WEN L L, XU D, ZHANG X. The inpainting of irregular damaged areas in ancient murals using generative model[J]. Journal of Graphics, 2019, 40(5): 925-931.
- [6] YANG X, GUO B. Fractional-order tensor regularization for image inpainting [J]. IET Image Processing, 2017, 11(9): 734-745.
- [7] FAN Q, ZHANG L. A novel patch matching algorithm for exemplar-based image inpainting [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 9(2): 1-15.
- [8] MA G. Inpainting technology in art pictures based on edge and texture feature [J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2018, 21(5): 1199-1203.
- [9] OU X, YAN P, HU W. Research of image inpainting algorithm based on image segmentation [J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2018, 18(3): 637-644.
- [10] 郑成松, 李琦. 基于改进优先权的对称相似图像修复算法 [J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(12): 14-17.
ZHENG CH SH, LI Q. Symmetric similar image completion based on redefined priority [J]. Information Technology and Network Security, 2018, 37(12): 14-17.
- [11] ZHANG N, JI H, LIU L. Exemplar-based image inpainting using angle-aware patch matching [J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2019, 2019(1): 1-13.
- [12] TAN Y, TANG L, WANG X. An improved criminisi inpainting algorithm based on sketch image [J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2017, 14(8): 3851-3860.
- [13] 张劲松, 杨玫, 周立新. 一种改进的 SIFT 篡改检测算法 [J]. 电子器件, 2017, 40(6): 1496-1501.
ZHANG J S, YANG M, ZHOU L X. Detection of copy-move forgery image based on an improved SIFT descriptor [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2017, 40(6): 1496-1501.
- [14] GHORAI M, MANDAL S, CHANDA B. A group-based image inpainting using patch refinement in MRF framework [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(2): 556-567.
- [15] WANG H, JIANG L, LIANG R. Exemplar-based image inpainting using structure consistent patch matching [J]. Neurocomputing, 2017, 269(1): 90-96.
- [16] 陈孝培, 杨学志, 方帅. 一种基于局部方差相似度的自适应图像融合算法 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(12): 1619-1625.
CHEN X P, YANG X ZH, FANG SH. An adaptive image fusion algorithm based on local variance similarity [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(12): 1619-1625.
- [17] LIANG S F, GUO M, LIANG X Q. Enhanced criminisi algorithm of digital image inpainting technology [J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(5): 1314-1318.
- [18] BOROLE R P, BONDE S V. Image restoration and object removal using prioritized adaptive patch-based inpainting in a wavelet domain [J]. Journal of Information Processing Systems, 2017, 13(5): 1183-1202.
- [19] FAN Q, ZHANG L F. A novel patch matching algorithm for exemplar-based image inpainting [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(9): 10807-10821.
- [20] REISENHOFER R, BOSSE S, KUTYNIOK G. A Haar wavelet-based perceptual similarity index for image



quality assessment [J]. Signal Processing-Image Communication, 2018, 61(1): 33-43.

作者简介



杨竹青, 2002 年于江苏理工学院获得学士学位, 2014 年于南京航空航天大学获得硕士学位, 现为江苏信息职业技术学院副教授, 主要研究方向为计算机技术、图形图像处理。

E-mail: YangZq1979wx@yeah.net

Yang Zhuqing received his B. Sc. degree from Jiangsu University of Technology in 2002, and M. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2014. Now he is an associate professor at Jiangsu Vocational College of Information Technology. His main research interests include computer technology, graphics and image processing.



谢宏(通信作者), 1995 年于华北电力大学获得学士学位, 1998 年于华北电力大学获得硕士学位, 2002 年于华北电力大学获得博士学位, 现为上海海事大学教授, 主要研究方向为计算机图像、人工智能技术及其应用。

E-mail: Xiehong1962shhd@yeah.net

Xie Hong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 1995, and received M. Sc. degree from North China Electric Power University in 1998, and Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2002. Now he is a professor at Shanghai Maritime University. His main research interests include computer image, artificial intelligence technology and application system.