

文章编号: 2095-4980(2020)03-0477-06

基于结构信息约束法则耦合匹配模型的图像修复算法

戴远泉¹, 李超²

(1.湖北轻工职业技术学院 信息工程学院, 湖北 武汉 430070; 2.湖北大学 信息化建设与管理处, 湖北 武汉 430062)

摘要: 针对当前较多图像修复算法依靠固定大小样本块来搜寻最优匹配块, 忽略了样本块的结构信息, 使修复图像出现间断现象以及振铃现象等不足, 利用样本块与其邻域块的近似度, 设计了一种采用结构信息约束法则与匹配模型的图像修复算法。将图像的信息熵特征引入到待修复块的优先权计算过程中, 获取优先修复块。通过样本块与其邻域块的近似度构造结构信息度量模型, 对样本块的结构信息进行度量, 并根据度量值建立结构信息约束法则, 实现样本块大小的自适应调整。最后, 利用图像的色彩及灰度特征构造匹配模型, 利用调整后的样本块大小在已知区域中寻找最优匹配块, 从而对待修复块进行修复。实验结果显示, 所提算法得到的修复图像具备较好的纹理连续性, 不存在信息间断现象, 对应的结构相似度较高。

关键词: 图像修复; 信息熵; 结构信息约束法则; 样本块大小; 匹配模型; 最优匹配块

中图分类号: TN911.73; TP391 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2019256

Image inpainting algorithm based on structural information constraint rule coupled with matching model

DAI Yuanquan¹, LI Chao²

(1.College of Information Engineering, Hubei Light Industry Vocational and Technical College, Wuhan Hubei 430070, China;
2.Department of Information Development and Management, Hubei University, Wuhan Hubei 430062, China)

Abstract: In view of the fact that most image restoration algorithms rely on fixed size sample blocks to search for the best matching blocks, ignoring the structure information of the sample blocks, resulting in the discontinuity and ringing phenomenon of the repaired images. Based on the approximation between the sample block and its neighborhood block, this paper designs an image restoration algorithm by using the structure information constraint rule and matching model. The information entropy feature of the image is introduced into the priority calculation of the blocks to be repaired, and the priority repaired blocks are obtained. Structural information measurement model is constructed by the number of known pixels in the sample block to measure the structural information of the sample block. Constraint rules of structural information are established according to the measured values to adaptively adjust the size of the sample block. The matching model is constructed by using the color and gray features of the image, in order to find the best matching block in the known region after adjusting the size of the sample block, and repair the block needing repairing. The experimental results show that the restored image obtained by the proposed algorithm has high structural similarity, good texture continuity, and no information discontinuity.

Keywords: image inpainting; information entropy; structural information constraint rule; sample block size; matching model; optimal matching block

信息技术的发展对数字图像的应用起到了较大的促进作用。目前, 图像已广泛用于各大领域, 如红外、医疗与教育等^[1]。但在图像获取的过程中, 通常会遇到不同程度的损坏, 因此, 如何较好地恢复损坏的图像信息已是当前的研究热点^[2]。图像修复是数字图像处理技术中的一种, 其通过一定的方法, 以图像中完整区域的内

收稿日期: 2019-07-20; 修回日期: 2019-08-30

基金项目: 教育部科技发展中心产学研创新基金资助项目(2018A03021); 湖北省教育厅科学技术研究重点资助项目(D20141005)

作者简介: 戴远泉(1965-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为图像处理、大数据、软件工程。email:Daiyuan1965hbl@tom.com

容为依据，对图像中破损的区域进行修复^[2-3]。近些年图像修复技术在艺术品修复、广告传播以及医护医疗等多个领域得到广泛应用。通过学者的研究，出现了较多的图像修复算法。如 CHEN 等^[3]在优先级函数中引入局部结构乘法运算，获取足够的结构信息，有效保证了结构的连续性。并将颜色特征和空间距离特征相结合，计算每个候选尺度下两个图像子块的平均像素差，选择最小平均像素差为最优匹配块。该方法虽然对优先级的计算进行了优化，保证了修复顺序，但其采用固定样本块大小来获取最优匹配块，使算法不能较好地适应图像结构信息的变化，导致修复图像存在间断现象。LI 等^[4]在非局部变分模型的基础上，设计了一种基于能量项的图像修复算法，通过能量项计算两个像素之间的权重值，以惩罚它们之间的灰度差异，使该能量项达到最小化，从而实现图像复原。但这种利用变分模型的图像修复算法不能较好地利用像素的邻域信息，不利于破损区域较大图像的修复。ALILOU 等^[5]对图像进行奇异值分解，获取具有原始图像灰度的近似矩阵，利用该矩阵重构目标区域。这种方法避免了图像块优先级的计算，但在修复图像块时，采用固定大小的子块，忽略了图像块的结构信息，使修复图像存在振铃现象。彭春华等^[6]设计了一种图像分层的修复算法，通过三元变分图像分解模型对图像进行分层，并对每层图像进行优先权计算以及搜索最优样本块，从而完成每层图像的修复。这种方法虽然是对每层图像进行修复，但修复过程中采用固定尺寸的样本块，易降低修复图像的质量。

为克服上述问题，本文设计了一种基于结构信息约束法则耦合匹配模型的图像修复算法。利用图像的信息熵、数据项以及置信度项来构造优先权计算函数，对待修复块的优先权值进行计算，选出优先修复块。

1 图像修复算法设计

图像修复算法的过程见图 1。观察图 1 可见，利用待修复块的信息熵值以及数据项和置信度项，构造了优先权计算函数，用以对待修复块的优先权值进行计算，使优先权值的计算更为合理，从而选出优先修复块，提高了算法修复顺序的合理性。然后将优先修复块视为样本块，利用样本块与其邻域块的近似度，构建结构信息度量模型，并在此模型基础上建立结构信息约束法则，利用样本块的结构信息度量值，对样本块的大小进行调整，使算法能够适应不同结构信息的图像，提高了算法的修复质量。利用像素点的色彩与灰度双重特征，构造匹配模型，用以准确获取最优匹配块，进而获取修复图像。

1.1 选取优先修复块

利用置信度项 $C(p)$ 和数据项 $D(p)$ 相乘，从而求取损坏图像 I 中的待修复块所对应的优先权值 $P(p)$ ^[7]：

$$P(p) = C(p)D(p) \tag{1}$$

式中： p 表示 I 中待修复区域 ψ 与已知区域 γ 交线 δ 上的任意一个破损像素点。

令 p 点的待修复邻域块为 A_p ，则 $C(p)$ 的表达式为^[8]：

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in A_p \cap \gamma} C(q)}{|A_p|} \tag{2}$$

数据项 $D(p)$ 的表达式为：

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot \mathbf{T}_p|}{255} \tag{3}$$

式中： $\nabla I_p^\perp, \mathbf{T}_p$ 分别表示 p 上的等照度线以及单位矢量。

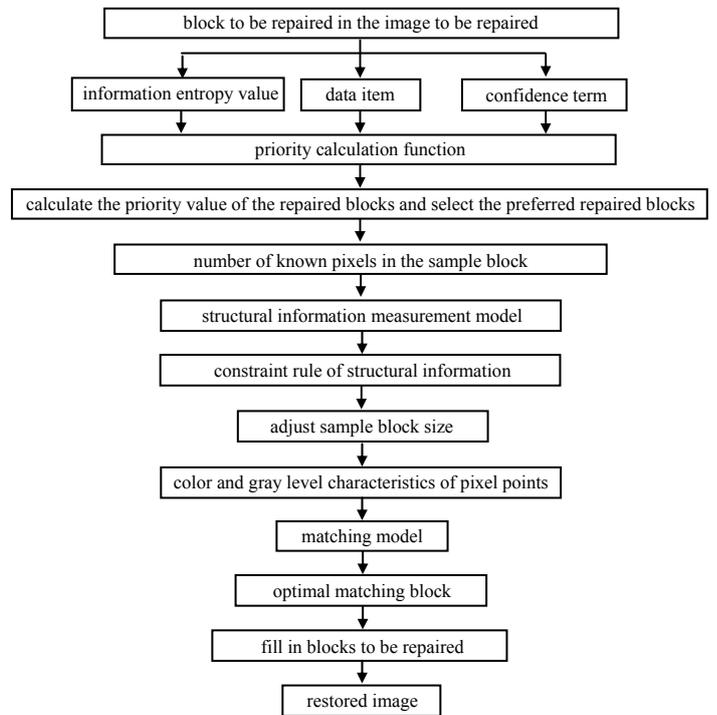


Fig.1 Process of image restoration algorithm in this paper
图 1 本文图像修复算法的过程

利用 $C(p)$ 和 $D(p)$ 相乘虽然可快速求解出 $P(p)$ ，但随着修复过程的进行， $C(p)$ 值会骤减而接近于 0，使 $P(p)$ 值不可靠，导致修复顺序出错^[9-10]。为此，本文通过求取待修复块的信息熵值，并将待修复块所包含的信息量引入到优先权的计算过程，构造优先权计算函数，克服 $C(p)$ 值骤减至零而引起的修复错误，确保更为合理的修复顺序。

对于灰度级为 i 的像素点，令其出现的概率为 p_i ，则信息熵 $G(p)$ 的求取过程为^[11]：

$$G(p) = -\sum_{i=0}^{255} p_i \log_2 p_i \quad (4)$$

随后，利用 $G(p)$ 、 $D(p)$ 和 $C(p)$ 构造新的优先权计算函数 $\bar{P}(p)$ ：

$$\bar{P}(p) = G(p) + C(p) + D(p) \quad (5)$$

通过式(5)可见，在图像修复过程中，不会因为 $C(p)$ 趋近于 0 而引起错误的修复顺序，且将图像的信息量作为优先权值的计算依据，丰富了优先权值计算的参考元素，使优先权值的计算更为准确。

以图 2(a)为修复对象，根据式(5)来确定优先修复块，结果见图 2(b)，可见，其选取了最大优先权值的待修复块 A_p 作为优先目标。

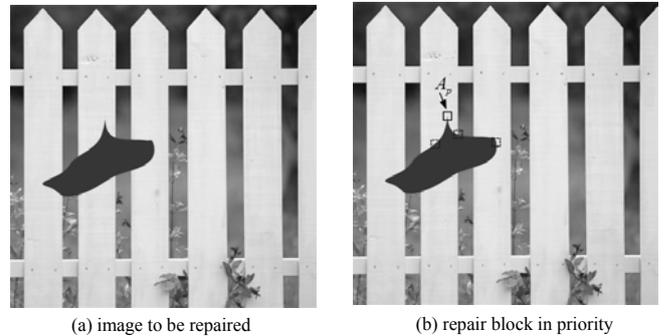


Fig.2 Determination of repair block in priority
图 2 优先修复块的确定

1.2 调整样本块大小

样本块的结构信息反应了图像的复杂情况。对于含有纹理信息以及边缘信息较为丰富的图像，由于其结构较为复杂，在修复过程中，应该采用较小的样本块来保证修复结果中的结构及纹理信息的连贯性。反之，对于较为平滑的图像区域，应该采用较大的样本块，在加快修复速度的同时，减少接缝现象的出现^[12-13]。因此，为了适应样本块的结构信息，本文利用样本块与其邻域块的近似度，构建结构信息度量模型，并以样本块的结构信息度量值建立结构信息约束法则，对样本块大小进行调整。

如图 3 所示，以破损像素点 p 为中心，且在面积大于待修复块 A_p 的图像块 C_p 中， B_q 是以已知像素点 q 为中心，且与 A_p 相邻的子块。 B_q 包含在 C_p 中，其位于 C_p 的已知区域，是 C_p 中的一个已知图像块，则 A_p 与 B_q 的近似度 $\eta_{p,q}$ 为：

$$\eta_{p,q} = \frac{1}{Z(p)} \exp\left(-\frac{d(A_p, B_q)}{\alpha}\right) \quad (6)$$

式中： $d(A_p, B_q)$ 为 A_p 与 B_q 的均方距离； $Z(p)$ 为控制每一个近似度值都小于 1 的一个归一化因子； α 为衰减系数。

随后，利用 $\eta_{p,q}$ 构造结构信息度量模型 $H(p)$ ：

$$H(p) = \sqrt{\sum_{q \in B_q} \eta_{p,q}^2} \quad (7)$$

从式(6)与式(7)可见，当样本块位于平滑区域时，由于 $d(A_p, B_q)$ 值较大，使得 $\eta_{p,q}$ 较小，从而 $H(p)$ 值也减小；反之，当样本块位于结构较复杂区域时，由于 $d(A_p, B_q)$ 值较小，使得 $\eta_{p,q}$ 较大，从而 $H(p)$ 值也较大^[14]。

由于 $H(p)$ 值可对样本块结构的复杂情况进行度量，因此，本文根据 $H(p)$ 值建立结构信息约束法则，对样本块的大小进行调整，具体步骤如下：

- 1) 将样本块的大小设置为 3×3 (为了计算方便，一般将样本块大小设置为奇数值，而 3×3 为最小的奇数值样本块大小)，并利用式(7)计算此时样本块对应的结构信息度量值 $H_1(p)$ 。
- 2) 将 $H_1(p)$ 值与预定阈值 θ 相比较，若 $H_1(p) \leq \theta$ ，表示此时样本块内容较为平滑，可将样本块大小再扩大 2 个像素点，并再次利用式(7)计算扩大后样本块对应的结构信息度量值 $H_2(p)$ 。
- 3) 再次将 $H_2(p)$ 值与预定阈值 θ 相比较，若 $H_2(p) > \theta$ ，则表示此时样本块的结构较为复杂，应该保持 $H_1(p)$ 值对应样本块的大小。反之，则重复步骤 2)~步骤 3)，直到确定样本块大小为止。

图 4 为利用结构信息约束法则得到的样本块大小，通过对不同大小样本块的 $H(p)$ 值进行计算，最后选取了

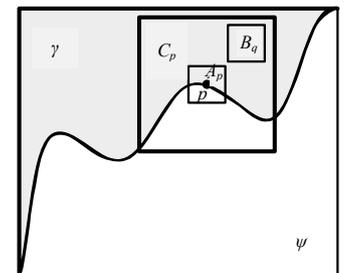


Fig.3 Selection of neighborhood blocks
图 3 邻域块的选取

图 4 中的实线框内容作为样本块大小。

1.3 寻找最优匹配块

与待修复块最相似的已知图像块也称最优匹配块。因此，为更好地修复质量，最优匹配块应该在色彩信息与灰度信息上都与待修复块最匹配。因此可根据样本块大小，在图像的已知区域 γ 内，根据图像的色彩与灰度双重信息，构造匹配模型，从已知区域中匹配出待修复块的最优匹配块。

令 $C_p^i, C_q^i (i=R, G, B)$ 分别为待修复块 A_p 与已知区域中待匹配块 A_q 中任一像素点所对应的色彩信息值的集合， G_p 与 G_q 分别为该像素点对应的灰度值，则构造的匹配模型 $M(A_p, A_q)$ 为：

$$M(A_p, A_q) = \sqrt{\frac{1}{N} \left[(C_p^i - C_q^i)^2 + (G_p - G_q)^2 \right]} \quad (8)$$

从式(8)可见，当待修复块 A_p 与待匹配块 A_q 匹配度较高时，由于其色彩信息与灰度信息都相差较小，此时 $M(A_p, A_q)$ 的值也应该较小。因此，可通过如下函数求取 A_p 对应的最优匹配块 \bar{A}_q ：

$$\bar{A}_q = \operatorname{argmin} M(A_p, A_q) \quad (9)$$

得到最优匹配块 \bar{A}_q 后，利用其像素点填充 A_p ，实现对损坏区域的修复。

图 5(a)为最优匹配块的确定结果，通过对已知区域中不同匹配块与待修复块的 $M(A_p, A_q)$ 进行计算，最终选取已知区域中实线框内容作为最优匹配块。而图 5(b)为利用本文算法对图 2(a)修复后的图像。由图发现，修复效果较好，纹理连续，无间断现象。

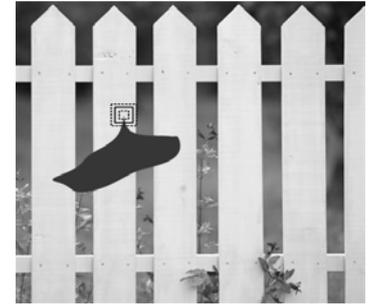


Fig.4 Adjustment of sample size
图 4 调整样本块大小

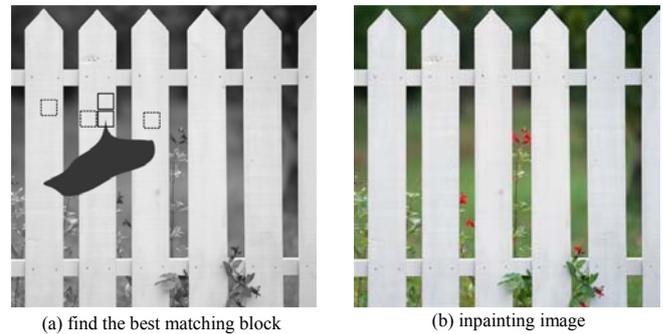


Fig.5 Determination of the optimal matching block and its repair effect
图 5 最优匹配块的确定及其修复效果

2 实验结果

利用 Matlab 7.0 软件，在 Intel I5 双核，500 GB ROM 的 PC 机上进行仿真实验，实验中设置衰减系数 $\alpha = 23$ ，预定阈值 $\theta = 0.4$ 。采用文献[15]及文献[16]中算法作为比较对象，以便更为直观地观察本文算法的修复效果。实验中，首先利用不同算法对划痕、文字以及遮蔽损坏的待修复图像进行修复，然后借助于结构相似度 (Structural Similarity Index Measurement, SSIM) 指标，针对不同算法对不同破损度图像的修复效果进行分析。

图 6 为不同算法对划痕损坏图像的修复结果。从不同算法的修复结果可见，3 种算法都能对划痕损坏图像进行修复。对比不同算法的修复结果发现，图 6(c)中具有修复残留和间断现象，图 6(d)中具有模糊和块效应现象，而图 6(e)中仅有一处轻微模糊现象。

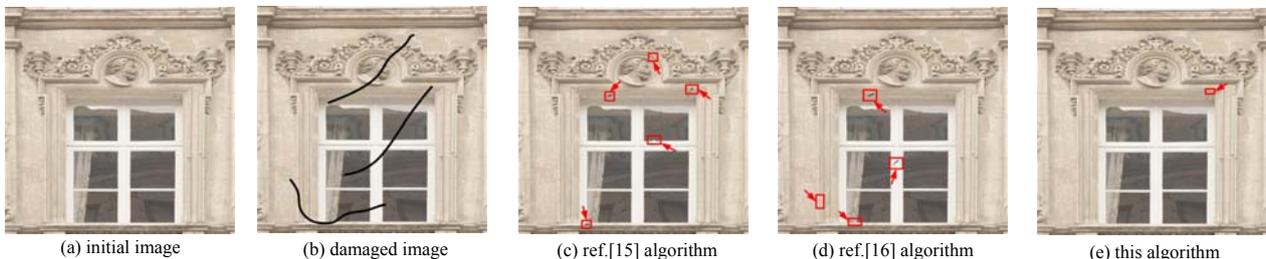


Fig.6 Repair results of scratch damaged images by different algorithms
图 6 不同算法对划痕损坏图像的修复结果

不同算法对文字损坏图像的修复结果如图 7 所示。从不同算法修复图像的整体效果可见，3 种算法都有较好的修复效果。但将不同算法的修复内容进行放大可以发现，图 7(d)中含有间断和振铃现象，图 7(f)中含有修复残留和块效应现象，而图 7(h)中仅存在一处轻微的修复残留现象。图 8 为不同算法对遮蔽损坏图像的修复结果。观察不同算法的修复结果可以发现，文献[15]算法修复的图像具有振铃和块效应现象，文献[16]算法修复的图像具有间断和修复残留现象，而本文算法修复的图像具有一处轻微块效应和修复残留现象。

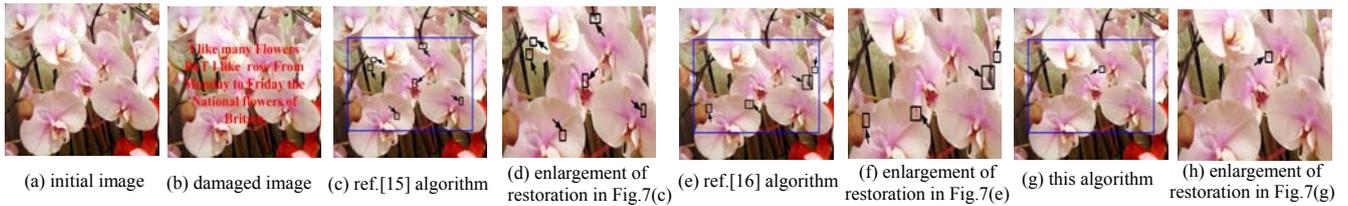


Fig.7 Restoration results of text-damaged images by different algorithms

图 7 不同算法对文字损坏图像修复结果

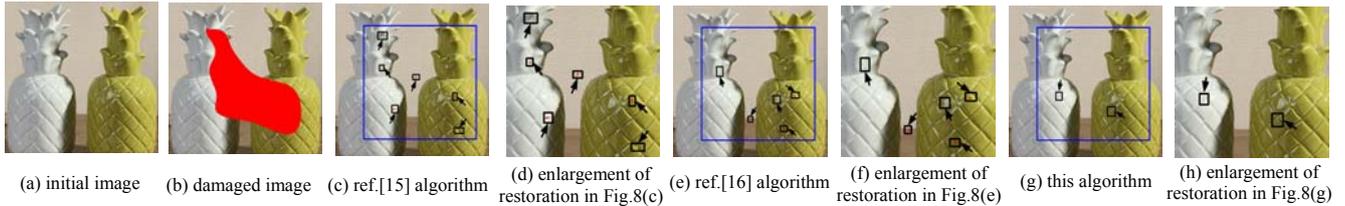


Fig.8 Repair results of occlusion damaged images by different algorithms

图 8 不同算法对遮蔽损坏图像修复结果

对比不同算法对划痕、文字以及遮蔽损坏图像的修复结果可知，本文算法修复图像的质量最高，具有较好的纹理连贯性和清晰度，以及更为自然的视觉效果。因为本文算法将待修复块的信息熵特征引入到待修复块优先权值的计算过程中，联合置信度项和数据项构造了优先权计算函数，使优先权值的计算更为准确，修复顺序更为合理。同时，本文算法还利用图像的色彩及灰度双特征构造了匹配模型，用以寻找最优匹配块，使在已知区域中所得的最优匹配块与待修复块的匹配度更高，本文算法修复的图像具有更好的质量及视觉效果。

为客观量化三者的修复质量，借助 SSIM 指标对其修复性能进行测试^[17]。测试方法为将图 9 所示的测试图像设置不同的损坏度，然后通过不同算法对其进行修复，观测不同算法修复图像的 SSIM 值来分析算法的修复性能。

不同算法修复图像的 SSIM 值如图 10 所示。对比图 10 中不同算法修复图像的 SSIM 值可见，本文算法修复图像的 SSIM 值最大。对破损度为 50% 的图像进行修复时，本文算法修复图像的 SSIM 值为 0.902，文献[16]算法修复图像的 SSIM 值为 0.839，文献[15]算法修复图像的 SSIM 值为 0.773，本文算法 SSIM 值更高，具有更好的修复性能。原因是本文算法利用了样本块与其邻域块的近似度，构建结构信息度量模型，以样本块的结构信息度量值，建立结构信息约束法则，对样本块大小进行调整，使得算法能够较好地适应样本块的结构复杂程度。同时本文算法还将图像块的色彩与灰度双特征引入到最优匹配块的寻找中，有助于准确地获取最优匹配块，从而使本文算法的修复性能有所提高。文献[15]算法通过小波变换获取图像子带信息，并在各子带中选取出优先修复块，通过等光点能量特征获取待修复块的填充块，完成图像修复。由于小波变换在获取子带信息时，缺乏多方向性，使得子带信息有所缺失，而且该算法在求取填充块时，使用的是固定大小的样本块，忽略了图像的结构信息，导致该算法的修复性能不理想。文献[16]算法中在确定损坏区域后，对待修复块的优先权进行了计算，接着利用修剪算子对待修复块进行了分析，缩小了最优匹配块的搜索范围，最后在确定的搜索范围内利用贪婪搜索方法获取最优匹配块。该算法缩小了最优匹配块的搜索范围，使算法的效率有所提升，但其利用贪婪搜索方法获取最优匹配块时，采用的是固定大小的样本块，没有考虑图像的结构复杂度，降低了算法的修复性能。



Fig.9 Testing image

图 9 测试图像

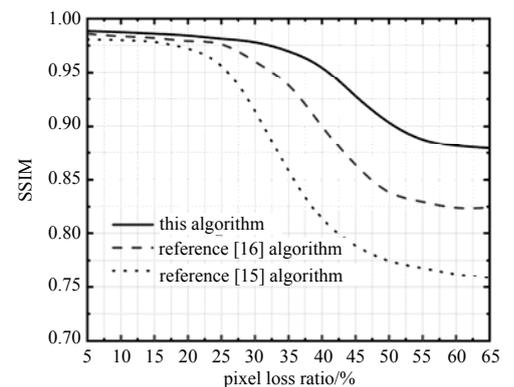


Fig.10 SSIM value testing of repaired images based on different algorithms

图 10 不同算法的修复图像的 SSIM 值测试

3 结论

本文对待修复块的信息熵进行了度量，并利用度量的信息熵值与置信度项和数据项之和，构造了优先权计

算函数,提高了优先权值的合理性。并利用样本块与其邻域块的近似度,构造了结构信息度量模型,以获取样本块的结构信息度量值,从而建立结构信息约束法则,以计算样本块的大小,使算法能够适应样本块中的不同结构信息。通过图像的色彩及灰度双重特征构造了匹配模型,以准确寻找最优匹配块。通过对本文算法修复图像的视觉效果以及 SSIM 值进行分析可见,本文算法修复的图像具有较好的纹理连续性,不存在间断现象,图像的视觉效果较好,其修复图像具备较高的 SSIM 值。

参考文献:

- [1] 王合龙,边栓成. 一种增强细节的红外图像处理算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):139-142. (WANG Helong, BIAN Shuancheng. An infrared image processing algorithm for enhancing details[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):139-142.)
- [2] CHEN Yizhen, HU Haifeng. An improved method for semantic image inpainting with GANs: progressive inpainting[J]. Neural Processing Letters, 2019,49(3):1355-1367.
- [3] CHEN Zhihua, DAI Chao, JIANG Lei. Structure-aware image inpainting using patch scale optimization[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016,40(1):312-323.
- [4] LI Zhi, MALGOUYRES Francois, ZENG Tiejong. Regularized non-local total variation and application in image restoration[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2017,59(2):296-317.
- [5] ALILOU V K, YAGHMAEE Farzin. Exemplar-based image inpainting using svd-based approximation matrix and multi-scale analysis[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017,76(5):7213-7234.
- [6] 彭春华,唐利明. 非均匀纹理图像的分层 Criminisi 修复算法[J]. 红外技术, 2017,39(9):814-823. (PENG Chunhua, TANG Liming. Multi-layer Criminisi inpainting algorithm for non-uniform texture images[J]. Infrared Technology, 2017, 39(9):814-823.)
- [7] 朱耀麟,李张翼,武桐. 针对规则古织物纹理的图像修复[J]. 棉纺织技术, 2017,45(10):9-12. (ZHU Yaolin, LI Zhangyi, WU Tong. Image restoration for regular ancient fabric texture[J]. Cotton Textile Technology, 2017,45(10):9-12.)
- [8] WANG Weilan, JIA Yanjun. Damaged region filling and evaluation by symmetrical exemplar-based image inpainting for Thangka[J]. European Journal on Image and Video Processing, 2017,13(9):1200-1212.
- [9] 曾接贤,王璨. 基于优先权改进和块划分的图像修复[J]. 中国图象图形学报, 2017,22(9):1183-1193. (ZENG Jiexian, WANG Can. Image restoration based on priority improvement and block partition[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(9):1183-1193.)
- [10] 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.
- [11] LIU Yuhong, YAN Hongmei, GAO Shaobing. Criteria to evaluate the fidelity of image enhancement by MSRCR[J]. IET Image Processing, 2018,12(6):880-887.
- [12] FAN Qian, ZHANG Lifeng. A novel patch matching algorithm for exemplar-based image inpainting[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018,77(9):10807-10821.
- [13] ZHU Xinshan, QIAN Yongjun, ZHAO Xianfeng. A deep learning approach to patch-based image inpainting forensics[J]. Signal Processing-Image Communication, 2018,67(1):90-99.
- [14] XU Z B, SUN J. Image inpainting by patch propagation using patch sparsity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010,19(5):1153-1165.
- [15] 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 System, 2017,13(5):1183-1202.
- [16] LEE Jungsan, WEI Kuoju, WEN Kairui. Image structure rebuilding technique using fractal dimension on the best match patch searching[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017,76(2):1875-1899.
- [17] DUAN Jinming, PAN Zhenkuan, ZHANG Baochang. Fast algorithm for color texture image inpainting using the non-local CTV model[J]. Journal of Global Optimization, 2015,4(62):853-876.