

文章编号 1004-924X(2019)01-0251-09

结合梯度特征与色彩一致性的图像修复

李志丹^{1*}, 苟慧玲¹, 程吉祥¹, 谌贵辉²

(1. 西南石油大学 电气信息学院, 四川 成都 610500;

2. 西南石油大学 工程学院, 四川 南充 637001)

摘要:针对现有的样本块修复算法置信度值会迅速衰减至 0, 填充次序不稳定以及易产生误匹配等不足, 提出结合梯度特征与色彩一致性的图像修复算法。为获得更为稳定的填充次序, 一方面引入表征图像结构和纹理变化特征的平均梯度来计算优先权, 以保证优先填充结构部分, 并适度延伸纹理信息; 另一方面提出基于 S 型函数的置信度更新准则以抑制置信度项的快速衰减; 同时比较匹配块与待修复块的色彩一致性, 将其与颜色信息相结合寻找最佳匹配块, 以减轻误匹配现象。实验结果表明: 本文算法较对比算法在峰值信噪比上至少提高 0.82 dB, 证明了本文算法的有效性。结果也显示: 提出的算法获得了更加稳定的修复次序, 能有效减少误匹配率, 使得修复后图像更加满足人眼的视觉需求。

关键词:梯度特征; S 型函数; 色彩一致性; 图像修复

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192701.0251

Image inpainting using gradient features and color consistency

LI Zhi-dan^{1*}, GOU Hui-ling¹, CHENG Ji-xiang¹, CHEN Gui-hui²

(1. College of Electrical Engineering and Information,
Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. College of Engineering, Southwest Petroleum University, Nanchong 637001, China)

* Corresponding author, E-mail: dan.807@163.com

Abstract: In existing exemplar-based algorithms, the confidence value tends to reach zero rapidly, filling order is unstable, and mismatch can easily occur easily. To address these problems, an image inpainting algorithm using gradient features and color consistency was proposed. To obtain a more stable filling order, mean gradient was introduced to represent the change characteristics of an image structure and texture. Mean gradient was also applied to calculate the priority to ensure that the structure was preferentially populated and the texture information was appropriately extended. A confidence update term based on an S-shaped function was also proposed to avoid rapid decay of the confidence term. Color consistency between the candidate patch and the target patch was also combined with color information to identify the most similar patch, and to reduce the false matching rate. Experimental results demonstrate that the peak signal-to-noise ratio of the proposed algorithm is at least 0.82 dB higher than that of existing algorithms, which indicates the validity of the proposed method. The results also show that the proposed algorithm can make the inpainting order more stable and can

收稿日期: 2018-06-06; 修订日期: 2018-08-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61601385, No. 61603319)

reduce the error matching rate, which brings the repaired images more in line with human visual requirements.

Key words: gradient features; S-shaped function; color consistency; image inpainting

1 引言

图像修复技术是利用图像中未缺失的信息,根据一定的填充规则修补出图像的丢失部分,以保持图像的完整性和视觉上的合理性^[1]。图像修复技术现已被广泛应用于珍贵历史文物修护、旧照片修复、图像压缩^[2]和视频通信中错误的修复及移除划痕和特征目标等领域。现有的图像修复技术主要分为两大类,一类是基于偏微分方程(Partial Differential Equation, PDE)的图像修补技术^[3],其利用待修复区域的边缘信息,确定扩散信息和扩散方向,从区域边界各向异性地向破损区域内部扩散,具有代表性的是 BSCB 模型^[4]、整体变分(Total Variation, TV)模型^[5]和曲率驱动扩散(Curvature Driven Diffusion, CDD)模型^[6]。但是,该方法会在修复区域内引入平滑效应,仅适用于修补小尺度破损图像;另一类是基于样本块的图像补全技术,其中最具代表性的是 Criminisi 等^[7]提出的基于匹配的样本块修复算法,该算法将最优匹配块填充到待修复区域,获得了较好的视觉效果。但其置信度会随着图像修复过程的进行迅速衰减并趋近于 0,导致优先级值趋于 0 而造成修复次序出现偏差;同时匹配准则不够合理造成误匹配,且这种错误匹配会随着填充过程的进行而不断延伸,出现误差累积现象。因此,研究者针对填充顺序,置信项更新方式和匹配准则 3 个方面进行了大量研究。

在填充顺序方面,文献[8]通过增加边界距离分量,使得靠近轮廓的样本块获得更大的优先权。Wei 和 Liu^[9]采用不同的方法计算待修复块和已知区域内样本块的置信度值以减少误差传播。Deng 等人^[10]对图像的几何结构和纹理信息分别定义优先权函数,旨在优先修复图像的结构,然后合成纹理部分。李志丹等人^[11]利用颜色与梯度模值信息构造的块结构稀疏度函数确定填充顺序。文献[12]提出了基于边缘长度的优先权准则,以优先修复图像的线性结构。文献[13]基于颜色信息构建加权后的彩色方向距离(Weighted

Color-Direction Distance, WCDD)定义颜色方向结构稀疏度,获得了更稳健的填充顺序。

在置信项更新方面,Wang 等人^[14]利用置信项的空间变化以减缓其衰减速度。文献[15]将置信项减去固定常数,保证优先级值不会趋近于 0 而造成修复错误。

在匹配准则方面:Wang 和 Jia^[16]提出八方向对称相似距离以衡量样本块与匹配块的相似性。文献[17]定义分形的差异维度(difference of the Fractal Dimension, dFD)以寻找样本块与匹配块类似的特征信息,较好地度量了两者的相似程度。文献[18]引入反映图像局部范围内灰度变化的 Census 变换,并结合 SSD 匹配准则,提高了匹配精度。Fan 等人^[19]通过计算不同旋转角度下样本块之间的最大相似度,从而得到最相似的旋转不变匹配块。文献[20]基于结构相似度(Structural Similarity Index Measurement System, SSIM)的块匹配算法来寻找待修复块的最优匹配块。文献[21]通过添加位置项以限制最佳匹配块的数量。赵文昌等人^[22]融合改进的人工蜂群和 K 均值聚类自适应调整邻域搜索范围,提高了算法效率。

但上述算法在修复纹理结构丰富区域时,不能很好地保持与邻域信息的连续一致性。为获得更好的图像修复效果,本文提出一种结合梯度特征与色彩一致性的图像修复算法。首先利用平均梯度信息计算优先权值,以获得更稳定的填充顺序;并且引入 S 型函数作为新的置信度更新准则,以抑制置信度值的衰减速度;最后比较匹配块与待修复块的色彩一致性,并与传统的 SSD 准则相结合寻找最佳匹配块,以减少误匹配率和削弱误差累积现象。

2 Criminisi 算法

Criminisi 算法是在图像丢失区域的边界上选择优先权最大的一个像素点,并以该点为中心,设置一定大小的模板,然后在整个已知区域内按照 SSD 匹配准则,寻找一个与该模板最为相似的

块,最后用最优匹配块填充该模板,如此反复,直到待填充区域修复完成。其中,待填充块的优先级计算是 Criminisi 算法的关键,定义为:

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

式中: $C(p)$ 表示置信项, $D(p)$ 表示数据项,两者表达式分别为:

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap (\Omega - \Omega)} C(q)}{|\Psi_p|}, \quad (2)$$

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

其中: I 表示整幅图像, Φ 表示图像已知区域(即源区域), $\Omega(\Omega = I - \Phi)$ 表示图像未知区域(即待修复区域), Ψ_p 表示以 p 点为中心的待填充块, n_p 表示 p 点的法向量, ∇I_p 表示 p 点等照度线的方向和强度。 $|\Psi_p|$ 表示 Ψ_p 的面积,即待填充块 Ψ_p 中像素点的数目。 α 是一个归一化因子,对于典型的灰度图像,其值为 255。

3 结合梯度特征与色彩一致性的图像修复

3.1 基于梯度特征的优先级确定方式

在图像修复过程中,优先权值大小决定填充的先后顺序,而稳定的填充顺序是保持图像修复

后结构部分连贯性的前提。文献[7]仅利用置信项和数据项的乘积计算优先权,这是不合理的,因为这样忽略了样本块间结构和纹理特征的差异。当样本块位于纹理区域时,即数据项值较小,即使置信项值较大,此时优先权值仍较小,将导致包含丰富纹理信息且处于修复区域外围的样本块无法优先被填充,极有可能出现错误延伸现象。当样本块位于结构区域时,即数据项具有较大值,此时若置信项值较小,得到的优先权值也较小,可能导致结构区域修复滞后,出现结构断裂现象。

平均梯度信息能够反应周围邻域微小细节反差和纹理变化特征,平均梯度值越大,表明图像结构和纹理信息越丰富。为更好地衡量图像局部特征的变化,应该考虑多个已知像素点的梯度信息,即采用样本块中已知区域的平均梯度来决定图像结构及纹理信息的复杂程度。因此,结合平均梯度信息,本节提出基于梯度特征的优先权法则。

$$g(p) = \sqrt{g_x(p)^2 + g_y(p)^2}, \forall p \in \Phi$$

$$\bar{g}(p) = \frac{g(p)}{|\Psi_p \cap \Phi|}, \quad (4)$$

其中: g_x, g_y 为水平方向梯度和垂直方向梯度,利用中值差分计算得到。 \bar{g} 为待修复块已知区域的平均梯度值。

本文基于梯度特征的优先权法则定义为:

$$\begin{cases} \text{if } \bar{g}(p) < 0.1, P(p) = a \times C(p) + b \times D(p) \\ \text{if } 0.1 \leq \bar{g}(p) < 0.5, P(p) = b \times C(p) + a \times D(p) \\ \text{if } \bar{g}(p) \geq 0.5, P(p) = b \times C(p) + a \times (D(p) + \bar{g}(p)) \end{cases}, \quad (5)$$

其中 $a+b=1$ 。当 $\bar{g}(p) < 0.1$,待修复块位于平滑区域,只要置信度值足够大,也能够得到优先修复,有效解决了低纹理区域修复滞后的问题;当 $0.1 \leq \bar{g}(p) < 0.5$,待修复块频率变化较大,图像包含较为复杂的结构和纹理区域,采用结构优先修复的比例因子,使数据项在优先权公式中占主导因素,结构部分先于纹理得到修复。当 $\bar{g}(p) \geq 0.5$,待修复块包含的结构和纹理信息最丰富,在数据项中加入平均梯度以衡量图像结构信息,使结构最明显的区域最先被修复,以保持图像结构部分的连贯性,得到符合人眼视觉需求的修复图像。 a, b 的具体取值将在 4.1 节中讨论。

为验证基于梯度特征的优先权法则的有效

性,对采用本节算法提出的优先权法则和 Criminisi 算法优先权法则的修复结果进行比较。如图 1 所示(彩图见期刊电子版),图 1(a)和图 1(b)分别为原始图像和目标图像,图 1(c)和图 1(d)分别为利用 Criminisi 算法^[7]和本文提出的优先权准则的修复结果(彩图见期刊电子版)。从图 1(c)红色矩形框中可以看出,Criminisi 算法的修复结果中出现了不应该有的“垃圾”,是由于 Criminisi 算法采用的优先级确定方式不合理造成的。用本文提出的基于梯度特征的优先权法则能完整修复图像的结构部分,未出现多余“垃圾”,保持了结构的连贯性和完整性。这充分说明了基于梯度特征优先权法则的有效性。

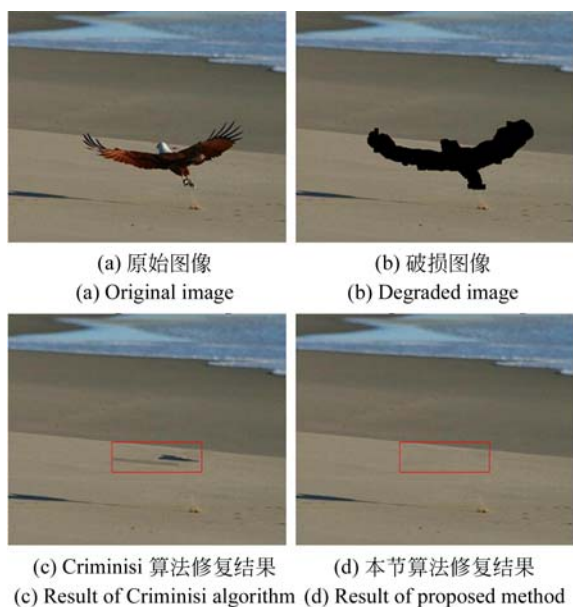


图 1 优先权法则对图像修复效果的影响示意图
Fig. 1 Effects of priority rule on inpainted results

3.2 基于 S 型函数的置信度更新准则

在迭代修复中, Criminisi 算法的置信度 $C(p)$ 值会快速下降并趋近于 0, 使得优先权值也趋近于 0, 造成待修复块即使位于结构区域也无法得到优先修复, 将破坏图像结构部分的连贯性。为抑制置信度项 $C(p)$ 的快速衰减, 本节提出基于改进的 S 型函数的置信度更新准则:

$$C(q) = h(C(p)) = \frac{a}{1 + e^{-Cx}}, \quad (6)$$

即改进的 S 型函数 $h(x)$ 为:

$$h(x) = \frac{a}{1 + e^{-x}}, \quad (7)$$

为减缓 $h(x)$ 的下降速度并使 $h(x) \in [0, 1]$, $a = 1.3$ 。

用 x 代替 Criminisi 算法 $C(p)$ 的值, 其对应的置信度更新函数可认为是 $f(x) = x$, $x \in [0, 1]$ 。Criminisi 算法与本节方法所采用的置信度更新函数的对比如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 在 $x \in [0, 1]$ 时, 当 x 下降时, $y_1 = f(x)$ 斜率较大并快速下降。由于 x 的取值范围较小, 所以 $y_2 = h(x)$ 在 $[0, 1]$ 是一段近似的直线。设 $y_1 = f(x)$ 和 $y_2 = h(x)$ 交点为 (x_0, y_0) , 当 $x \in [x_0, 1]$ 时, $y_2 = h(x)$ 在 $y_1 = f(x)$ 下方; 当 $x \in [0, x_0]$ 时, $y_2 = h(x)$ 在 $y_1 = f(x)$ 上方。从曲线对比图得知, $y_2 = h(x)$ 的绝大部分曲线均在 $y_1 = f(x)$ 上方, 说明 $y_2 = h(x)$ 的下降速度慢

于 $y_1 = f(x)$, 并且 $y_2 = h(x)$ 不会趋近于 0。因此, 可采用 $y_2 = h(x)$ 作为置信度更新函数。

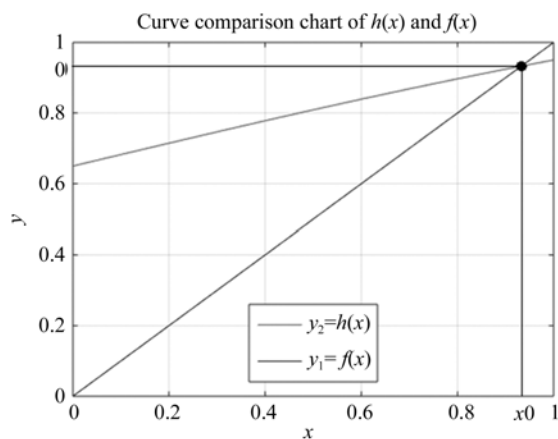


图 2 置信度更新函数对比结果

Fig. 2 Comparison result of confidence update function

3.3 结合色彩一致性的匹配准则

传统的基于样本块的修复算法通常仅用 SSD 匹配准则作相似性度量, 该准则未考虑待修复块和匹配块的邻域一致性, 容易产生误匹配现象。为减少误匹配率并保持修复后图像的邻域连续性, 本节引入色彩一致性, 并结合 SSD 准则寻找最佳匹配块。

本节的结合色彩一致性匹配准则为:

$$d(\Psi_p, \Psi_q)' = \beta \times d(\Psi_p, \Psi_q) + (1 - \beta) \times (\bar{\Psi}_p - \bar{\Psi}_q)^2, \quad (8)$$

其中: $\bar{\Psi}_p$ 表示待修复块已知区域 R, G, B 3 通道的颜色均值, $\bar{\Psi}_q$ 表示匹配块对应区域 R, G, B 3 通道的颜色均值, $\beta \in (0, 1)$ 为权重值, 根据经验取值, $\beta = 0.3$ 。

为测试结合色彩一致性匹配准则的有效性, 图 3 给出了对划痕的修复结果, 图 3(a)~图 3(d) 分别为原始图像、待修复图像、Criminisi 算法修复效果及本文算法修复效果(彩图见期刊电子版)。Criminisi 算法的修复结果中出现了一些与邻域颜色不一致的“垃圾物”, 如图 3(c) 中红色矩形框所示, 这是由于匹配准则不合适造成的。本节采用结合色彩一致性匹配准则的方法, 无误匹配和误差累积现象出现, 获得了良好的修复结果。用 PSNR 值评价修复效果, 本文算法的 PSNR 值较对比算法高出 7.3 dB。这充分说明了本节引入色彩一致性并结合 SSD 准则寻找样本块, 能获

得更优的匹配块并有效减轻误匹配现象。



图 3 匹配准则对图像修复效果的影响示意图
Fig. 3 Influence of matching criterion on inpainted results

4 实验结果和分析

本文实验分为 3 个部分,首先是分析权重系数 a 对修复效果的影响,然后对小尺度破损和目标移除两种类型的图像进行修复并且与 Criminisi 算法^[7]、文献^[10]和文献^[15]进行比较来验证本文算法。本节引入峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio,PSNR)客观评价小尺度破损图像的修复效果。PSNR 计算公式为:

$$PSNR = 10\lg\left[\frac{255^2}{MSE}\right], \quad (9)$$

其中 MSE 为原始图像与修复后图像之间的均方差,MSE 计算公式为:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (U(i, j) - U_1(i, j))^2, \quad (10)$$

$$\begin{cases} \text{if } \bar{g}(p) < 0.1 \\ \text{if } 0.1 \leq \bar{g}(p) < 0.5 \\ \text{if } \bar{g}(p) \geq 0.5, \end{cases} P(p) = a \times C(p) + b \times D(p) \begin{cases} \text{then } a = 0.7, b = 0.3 \\ \text{then } a = 0.3, b = 0.7 \\ \text{then } a = 0.3, b = 0.7 \end{cases} \quad (11)$$

其中: U 为原图, U_1 为修复后的图像, M 、 N 分别表示图像的行数和列数。

所有修复算法均在平台 MATLAB2015b 和 Visual Studio2015 上进行仿真实验。实验计算机采用 Windows10 系统, Intel core i5-7500 CPU,3.40 GHz,8.00 GB 内存。实验中,样本块大小取 9×9 。

4.1 参数 a 分析

首先探究参数 a 对修复性能的影响,对图 4 中包含不同破损类型的图像进行修复。

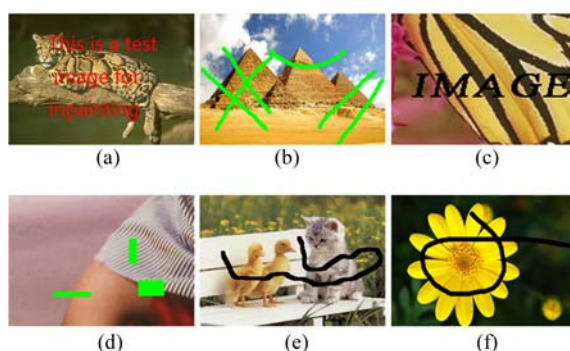


图 4 破损图像
Fig. 4 Degraded images

将 a 从 0 变化到 1,探究 a 取不同值时对图 4 中破损图像的修复效果的影响,PSNR 值如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出,当 a 逐渐增大时,图 4(a)和图 4(b)的 PSNR 值变化均较平缓,在 $a \in (0.6, 0.7)$ 范围内取得较大值,且这个区间内的 PSNR 值相差不大。图 4(c)的 PSNR 值在 $a \in (0, 0.7)$ 时逐渐增大,此后几乎不再发生变化。图 4(d)和图 4(e)的 PSNR 值在 $a \in (0, 0.6)$ 时变化较平缓,当 $a=0.7$ 时取得最大值,而后随着 a 的继续增大,PSNR 值呈现下降趋势。图 4(f)的 PSNR 值变化较剧烈,在 $a=0.7$ 时,取得最大值。从图 5(b)中可以看出,当 $a=0.7$ 时,平均 PSNR 值最大。因此, a 取 0.7,则本文的优先权法则为:

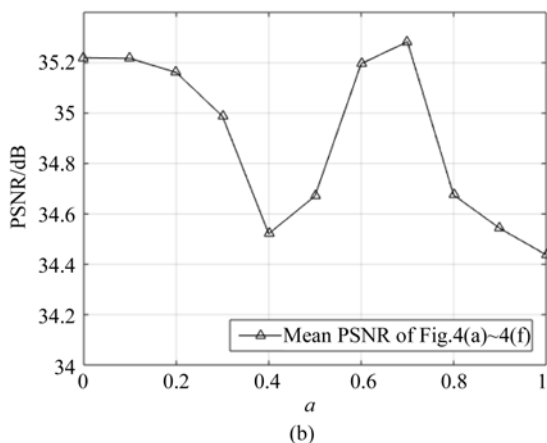
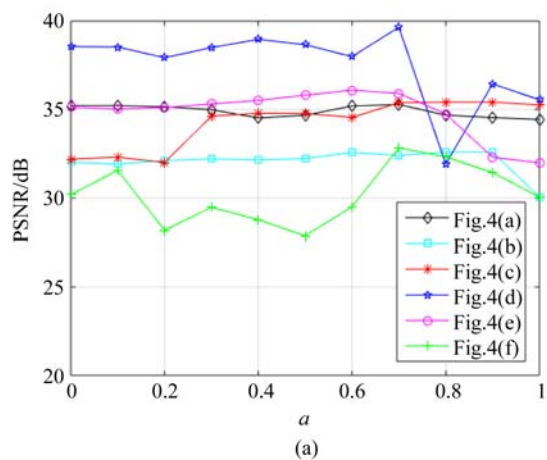


图 5 a 的取值对 PSNR 的影响示意图
Fig. 5 Effect of value a on PSNR

4.2 小尺度破损修复

为说明本文算法能有效地修复含有丰富纹理和结构信息的图像,选择图 6 中包含不同纹理和结构信息的 3 幅图像作为测试图像,其对应的破损图像如图 7 所示。

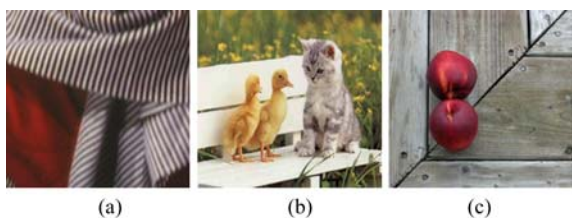


图 6 原始图像
Fig. 6 Original images

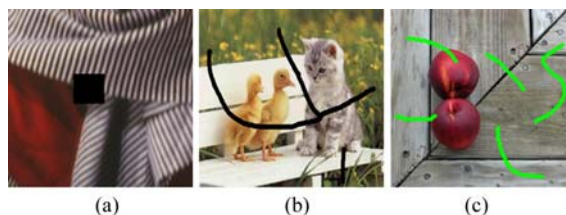


图 7 破损图像
Fig. 7 Degraded images

如图 8 所示,图 8(a)和图 8(b)分别为原始图像和待修复图像,图 8(c)~图 8(f)分别为 Criminisi 算法^[7],文献^[10],文献^[15]以及本文算法的修复结果。修复后图像的 PSNR 值对比如表 1 所示。

从图 8(c)可以看出,Criminisi 算法的修复结果中出现了错误匹配现象,且不能很好地修复含有丰富结构和纹理的图像。文献^[10]的修复结果中出现了结构不连贯的情形,且纹理部分延伸过多,如图 8(d)所示。图 8(e)出现了边缘不连贯的现象,且未能保持纹理信息的连续一致性,出现了“垃圾物”,这是由于文献^[15]采用的优先权法则及匹配准则不合理造成的。本文算法获得了良好的修复效果,较好地保持了结构连贯性及纹理清晰性,且削弱了误差累积现象。从表 1 中可以看出,本文算法取得的 PSNR 值最高,较对比算法至少提高 0.82 dB。

综上所述,本文算法能够有效修复含有丰富纹理和结构的小面积破损,修复后图像满足人眼视觉需求。

表 1 不同修复算法的修复性能对比表

Tab. 1 Repair performance comparison of different algorithms (dB)

序列	图 7(a2)	图 7(b2)	图 7(c2)
Criminisi 算法 ^[7]	34.85	30.70	40.94
文献 ^[10]	31.88	30.13	38.68
文献 ^[15]	35.12	30.92	40.88
本文算法	41.06	37.97	41.76

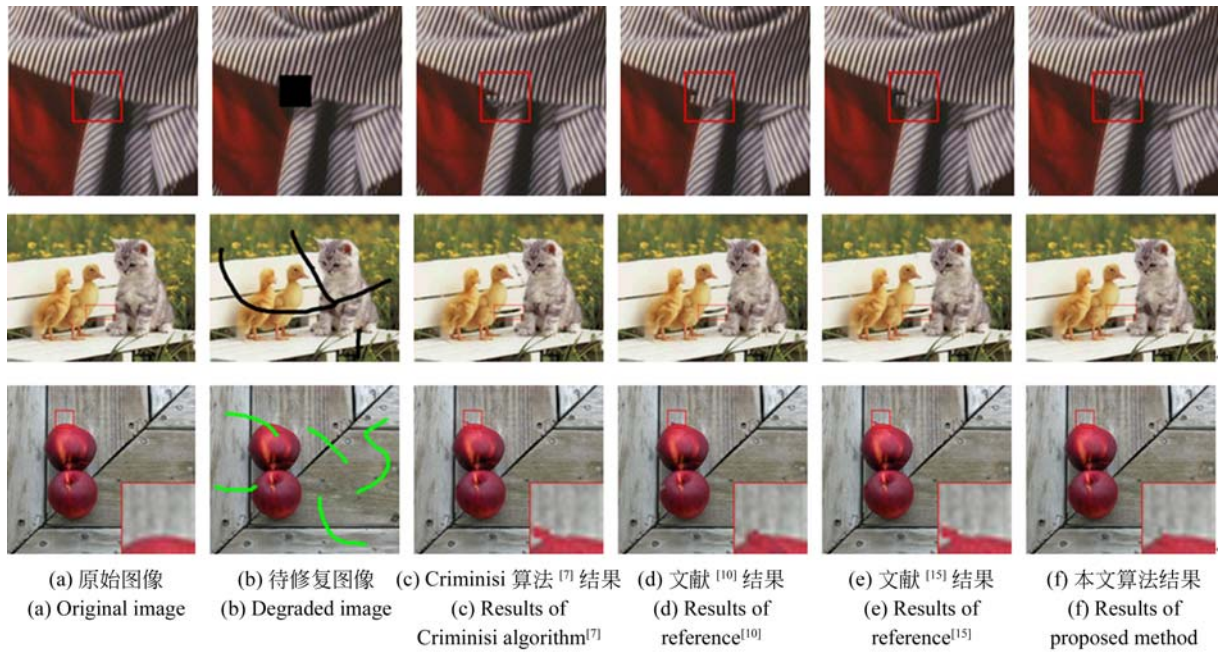


图 8 修复结果对比图

Fig. 8 Comparison figures of inpainted results

4.3 目标移除

为进一步说明本文算法的有效性,选择图 10 中 3 幅不同的破损图像进行修复,并与 Criminisi 算法^[7],文献[10]和文献[15]的算法进行修复性能对比。



图 9 原始图像
Fig. 9 Original images

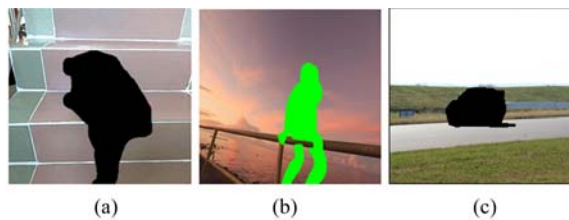


图 10 破损图像
Fig. 10 Degraded images

在图 11 中,图 11(a)和图 11(b)分别是原始图像和待修复图像,图 11(c)~图 11(f)分别为利用 Criminisi 算法^[7],文献[10],文献[15]以及本文算法移除目标物体后的修复结果。

从图 11(c)可以看出,Criminisi 算法的修复结果中出现了严重的邻域不连续性,结构部分未能得到完整修复。文献[10]算法不能很好地保持结构部分的连贯性,且出现了错误匹配和误差累积现象,如图 11(d)所示,这是由于文献[10]采用的匹配准则不合理造成的。文献[15]的方法未能总是保持结构部分的连贯性,且出现了错误延伸的现象,如图 11(e)所示。本文算法构造了稳定的填充顺序和合理的匹配准则,获得了优于文献[7,10,15]的修复结果,如图 11(f)中楼梯和栏杆的连贯性较好,在目标物体移除后,较好地保持了纹理的清晰性及邻域信息的一致性。

综上所述,本文算法能够有效修复图像的结构部分,很好地保持了结构的连贯性,减少了误匹配率和错误延伸现象。

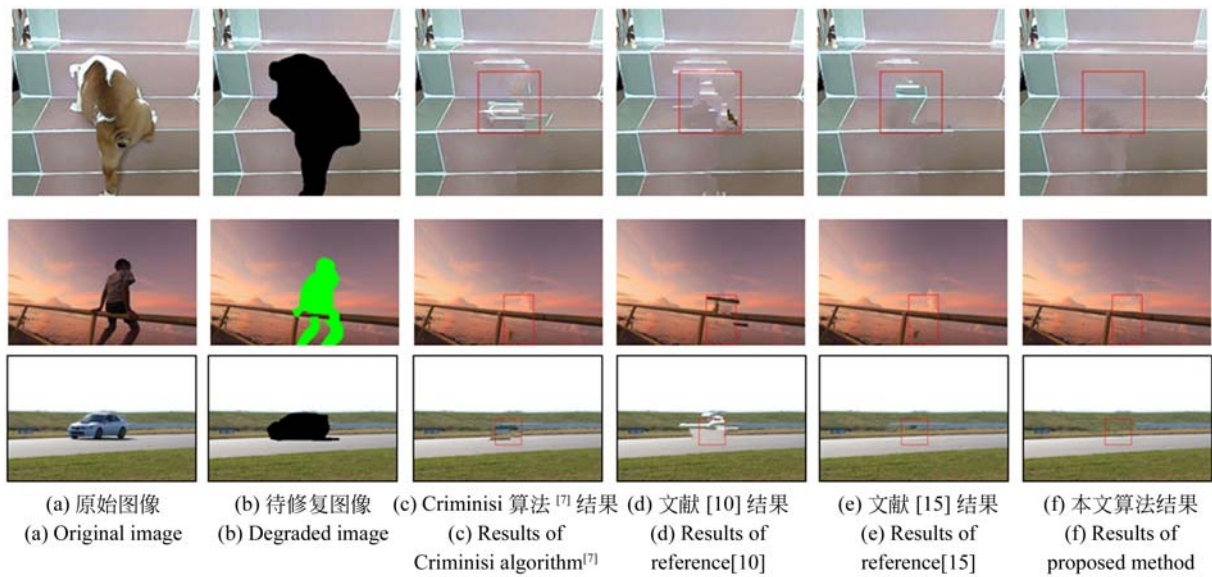


图 11 修复结果对比图

Fig. 11 Comparison figures of inpainted results

5 结 论

为获得更稳定的填充顺序及合理的匹配准则,本文提出一种结合梯度特征与色彩一致性的图像修复算法。首先使用基于梯度特征的优先级法则,获得了稳定的填充顺序,保持了结构部分的连贯性;然后基于 S 型函数提出新的置信项更新方式,抑制了置信度值迅速衰减现象;最后通过比较匹配块与待修复块的色彩一致性,保持了图像

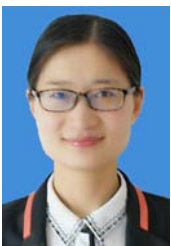
的邻域一致性,并有效减少了误匹配率和误差累积现象。通过对小区域破损修复和目标移除的测试,实验结果表明在峰值信噪比上,本文算法较对比算法至少提高 0.82 dB,并能有效保持结构的连贯性和邻域一致性,减少了错误匹配和误差累积现象的发生率,有效抑制了图像中多余“垃圾物”的产生。但本文方法修复效率较低,主要原因是利用平均梯度计算优先权的复杂度较高。今后将进一步研究采用局部搜索策略以提高修复效率。

参考文献:

- [1] 张红英,彭启琮. 数字图像修复技术综述[J]. 中国图象图形学报,2007,12(1):1-10.
ZHANG H Y, PENG Q C. A survey on digital image inpainting [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] 纪强,石文轩,田茂,等. 基于 KL 与小波联合变换的多光谱图像压缩[J]. 红外与激光工程,2016,45(2):275-281.
JI Q, SHI W X, TIAN M, *et al.*. Multispectral image compression based on uniting KL transform and wavelet transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 275-281. (in Chinese)
- [3] 唐玲,陈明举. 基于图像局部方向特性的自适应全变分去噪模型[J]. 液晶与显示,2016,31(5):477-483.
TANG L, CHEN M J. Adaptive directional total variation denoising model based on image local direction [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(5): 477-483. (in Chinese)
- [4] BERTALMIO M, SAPIRO G, CASELLES V, *et al.*. Image inpainting [C]. *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, New York, USA, 2000: 417-424.
- [5] SHEN J H, CHAN T F. Mathematical models for local nontexture inpainting [J]. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 2001, 62(3): 1019-1043.
- [6] CHAN T F, SHEN J H. Nontexture inpainting by curvature-driven diffusions [J]. *Journal of Visual Communication and image Representation*, 2001, 12(4): 436-449.
- [7] CRIMINISI A, PEREZ P, TOYAMA K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting [J]. *IEEE transactions on image processing*, 2004, 13(9): 1200-1212.

- [8] ZHANG L, SHEN P Y, ZHANG SH E, *et al.*. Depth enhancement with improved exemplar-based inpainting and joint trilateral guided filtering [C]. *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Image Processing, Phoenix, AZ; ICIP, 2016*, 4102-4106.
- [9] WEI Y W, LIU SH G. Domain-based structure-aware image inpainting [J]. *Signal Image and Video Processing*, 2016, 10(5): 911-919.
- [10] DENG L J, HUANG T ZH, ZHAO X L. Exemplar-based image inpainting using a modified priority definition [J]. *Plos One*, 2015, 10(10): e0141199.
- [11] 李志丹,和红杰,尹忠科,等. 结合颜色和梯度信息的稀疏图像修复算法[J]. *计算机研究与发展*, 2014, 51(9): 2081-2093.
LI ZH D, HE H J, YIN ZH K, *et al.*. A sparsity image inpainting algorithm combining with gradient information [J]. *Journal of computer research and development*, 2014, 51(9): 2081-2093. (in Chinese)
- [12] KUMAR V, MUKHERJEE J, DAS MANDAL SK. Image inpainting through metric labeling via guided patch mixing [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2016, 25(11): 5212-5226.
- [13] LI ZH D, HE H J, TAI H M, *et al.*. Color-direction patch sparsity based image inpainting using multi-direction features [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(3): 1138-1152.
- [14] WANG H X, JIANG L, LIANG R H, *et al.*. Exemplar-based image inpainting using structure consistent patch matching [J]. *Neurocomputing*, 2017, 269(SI): 90-96.
- [15] 李旭峰,王静,刘红敏,等. 特征优先块匹配图像修复算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(7): 1131-1137.
LI X F, WANG J, LIU H M, *et al.*. Image inpainting using feature precedence and patch matching [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(7): 1131-1137. (in Chinese)
- [16] WANG W L, JIA Y J. Damaged region filling and evaluation by symmetrical exemplar-based image inpainting for Thangka [J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2017, 77: 10807-10821.
- [17] LEE J S, Wei K J, Wen K R. Image structure rebuilding technique using fractal dimension on the best match patch searching [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(2): 1875-1899.
- [18] 何凯,高俊俏,卢雯霞. 基于改进置信函数及匹配准则的图像修复算法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2017, 50(4): 399-404.
HE K, GAO J Q, LU W X. Image inpainting algorithm based on improved confidence function and matching criterion [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2017, 50(4): 399-404. (in Chinese)
- [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] 金炜,王文龙,符冉迪,等. 联合块匹配与稀疏表示的卫星云图修复[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1886-1895.
JIN W, WANG W L, FU R D, *et al.*. Satellite cloud image inpainting based on patch matching and sparse representation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1886-1895. (in Chinese)
- [21] ZHANG X, HAMANN B, PAN X, *et al.*. Superpixel-based image inpainting with simple user guidance [C]. *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Image Processing, Beijing, P. R. China; ICIP, 2017*: 3785-3789.
- [22] 赵文昌,李忠木. 融合改进人工蜂群和 K 均值聚类的图像分割[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(9): 726-735.
ZHAO W CH, LI ZH M. Image segmentation algorithm based on improved artificial bee colony and k-mean clustering [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(9): 726-735. (in Chinese)

作者简介:



李志丹(1985—),女,河南周口人,硕士生导师,2008年于西南交通大学获得学士学位,2015年于西南交通大学获得博士学位,主要从事数字图像修复和图像处理方面的研究。E-mail: dan.807@163.com