



研究与开发

基于加权优先级和分类匹配的图像修复方法

曹燕, 金炜, 符冉迪

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 待修复像素优先级的计算及最佳匹配块的确定是基于纹理合成图像修复方法的两个基本环节, 传统方法不仅难于确定优先级计算中的置信度, 而且难于搜索到最佳匹配块。提出了一种基于加权优先级和分类匹配的图像修复方法, 该方法在优先级模型中, 引入指数函数和正规化函数分别优化置信度和数据项, 使得计算的优先级更加客观, 从而使修复顺序更加合理。基于此, 将结构信息作为搜索匹配块的一个度量因子, 采用分类筛选方式, 选取最佳匹配块。实验结果表明, 所提方法在获得良好修复效果的前提下缩短了修复时间。

关键词: 纹理合成; 图像修复; 优先级; 匹配方式

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017103

An image inpainting method based on weighted priority and classification matching

CAO Yan, JIN Wei, FU Randi

Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: The calculation of the priority of the pixel to be repaired and the determination of the best matching block are based on two basic steps of the texture synthesis image inpainting method. The traditional method is not suitable because it is difficult to determine the confidence in the priority calculation, and it is difficult to search for the best matching block. An image inpainting method based on weighted priority and classification matching was proposed. In the priority model, the exponential function and the normalization function were introduced to optimize the confidence and data items separately, the further benefit of which was a more objective priority of calculation and a more reasonable repair order. Based on the proposed functions, the structure information was used as a measure factor of the search matching block, and the best matching block was selected by the classification and screening method. Experimental results show that the proposed method can shorten the repair time under the condition of obtaining good repair effect.

Key words: texture synthesis, image inpainting, priority, matching criteria

收稿日期: 2017-01-19; 修回日期: 2017-04-04

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY16F010001); 国家自然科学基金资助项目 (No.61471212); 宁波市自然科学基金资助项目 (No.2016A610091)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China(No.LY16F010001), The National Natural Science Foundation of China(No.61471212), The Natural Science Foundation of Ningbo of China(No.2016A610091)

1 引言

随着互联网技术的不断发展,信息的交流和互动也越来越频繁,图像、语音以及视频等多媒体信息已成为人们生活不可或缺的部分。然而,由于带宽的限制,多媒体信息在传输往往需要经过压缩处理,这使得所传输的信息更易受到信道干扰,从而造成接收端所获得的往往是破损或缺失的信息。因此,在接收端对破损或缺失的图像、语音和视频信息进行修复是十分重要的。

图像修复(image inpainting)技术^[1]是针对图像破损区域,利用已知区域的图像信息及特定的修复算法,填充破损区域内的缺损信息,使得填充后的图像在视觉效果上连续、光滑、自然,且不为人眼所察觉其修复痕迹的一种图像处理技术。目前的图像修复技术主要分为两大类,一类是适用于小区域破损类型的图像修复技术,如 Bertalmio 等人^[1]提出的基于 BSCB(bertalmio sapiro caselles bellester)模型的修复算法,Chan 等人^[2]提出的基于整体变分(total variation, TV)模型的修复算法及基于曲率驱动扩散(curvature-driven diffusion, CDD)模型的修复算法,参考文献[3]提出的基于稀疏表示的图像修复算法。该类方法在修复小区域破损图像时有较好的修复效果,但当破损区域较大时,往往会产生模糊的现象。另一类是基于纹理合成的图像修复方法,该类方法适用于修复存在大区域破损的图像,代表方法为 Criminisi 算法^[4],该算法将图像中已知区域的内容复制到破损区域,实现修复处理,但该算法存在的主要问题是修复顺序及最佳匹配块难于确定。为解决此问题,研究者提出了若干改进方案,参考文献[5]考虑到确定修复顺序时置信度趋于零的情况,将置信度减去一个常数,以保证优先级总能发挥作用,但没有考虑到最佳匹配块的选取;参考文献[6]将平方差之和(sum of squared difference, SSD)和归一化互相关函数

(normalized cross correlation, NCC)相结合来搜索最佳匹配块,使得所选取的最佳匹配块更为准确,但忽略了优先级的的问题;参考文献[7]增强了优先级模型中的结构信息并将颜色特征和空间距离相结合来搜索最佳匹配块,获得了良好的修复效果,但运行速度较慢;参考文献[8]利用 Curvelet 变换提取图像的方向特征来构造匹配准则,采用稀疏表示技术将待修复块表示成多个匹配块的稀疏线性组合,获得更优的修复效果。

为了克服待修复像素优先级计算错误和最佳匹配块选取不佳等缺陷,提出了一种基于加权优先级和分类匹配的图像修复方法。在优先级模型中,引入指数函数和正规化函数分别优化置信度和数据项,且将优先级改为加权形式;待修复块分为平滑块和非平滑块,采用不同的匹配准则来局部搜索最佳匹配块,将最佳匹配块中的像素赋值到待修复块中来修复该块;通过更新置信度,沿等照度线方向实现整个破损区域的修复。该方法能够很好地改善图像所存在的瑕疵和纹理延伸的问题,具有良好的修复效果,且缩短了修复时间。

2 Criminisi 算法

Criminisi 算法^[4]的核心是分别计算边界 $\partial\Omega$ 上各像素的优先权值,选取优先权值最大的像素 p 所在的块为待修复块 ψ_p , 然后根据匹配准则在已知区域 Φ 中选择最佳匹配块 ψ_q , 将相应的像素值填充到待修复块中,并更新边界 $\partial\Omega$, 重复以上的步骤,直到图像完全被修复为止。

Criminisi 算法示意如图 1 所示,其中 I 为待修复的破损图像, Ω 为待修复区域, Φ 为已知信息区域(阴影区域), $\partial\Omega$ 为已知信息区域和待修复区域的边界, p 为边界上的像素,以像素 p 为中心构成 $n \times n$ 大小的待修复块 ψ_p 。

像素 p 的优先权为:

$$P_p = C_p \cdot D_p \quad (1)$$

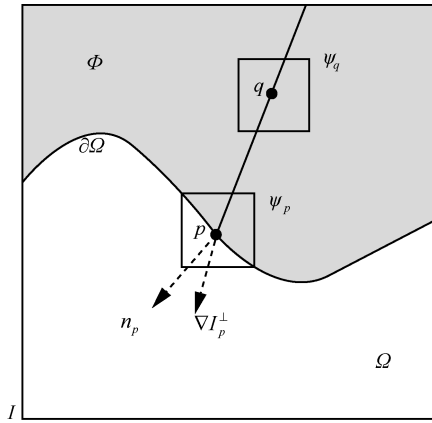


图1 Criminisi 算法示意

$$C_p = \frac{\sum_{q \in N_p \cap \Phi} C_q}{|\psi_p|}, \quad D_p = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot n_p|}{\alpha} \quad (2)$$

其中, C_p 为置信度, 表示待修复块中已知信息占待修复块的比值, 其值越大, 则表示所包含的已知信息越多。 $|\psi_p|$ 表示待修复块 ψ_p 的面积, 在初始化解过程中, 若待修复块 ψ_p 内的像素点 $p \in \Omega$, 则 $C_p = 0$; 若 $p \in \Phi$, 则 $C_p = 1$ 。 D_p 为数据项, 表示待修复块的结构信息, 其值越大, 则具有较强的结构信息。 $\nabla I_p^\perp$ 表示像素 p 的等照度线矢量, n_p 表示像素 p 的单位法向量, 即 $|n_p| = 1$, α 为归一化因子, 对于灰度图像而言, $\alpha = 255$ 。

在已知信息区域 Φ 中搜索待修复块 ψ_p 的最佳匹配块 ψ_q , 引入 SSD 距离计算待修复块 ψ_p 与匹配块 ψ_q 之间的相似度:

$$\begin{aligned} \psi_q &= \arg \min d(\psi_p, \psi_q) \\ &= \arg \min \sum \left[\left(R_{\psi_p} - R_{\psi_q} \right)^2 + \left(G_{\psi_p} - G_{\psi_q} \right)^2 + \left(B_{\psi_p} - B_{\psi_q} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, R_{ψ_p} 、 G_{ψ_p} 、 B_{ψ_p} 为待修复块中像素点的 RGB 值, R_{ψ_q} 、 G_{ψ_q} 、 B_{ψ_q} 是匹配块中像素点的 RGB 值。

将最佳匹配块 ψ_q 中的像素来填充待修复块 ψ_p 中的未知像素点, 这些像素点的置信度更新为:

$$C_{p'} = C_p, \forall p' \in \psi_p \cap \Omega \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 未知像素点 p' 的置信度 $C_{p'}$ 更新为 ψ_p 的置信度 C_p 。对于下一个待修复块 $\psi_{p'}$ 来说, 未知像素点 p' 就变成已知像素点, 而此时式 (4) 赋值得到的 $C_{p'} < 1$, 根据式 (2) 得到 $\psi_{p'}$ 的置信度 $C_{p'}$ 就会偏小。因此, 随着修复次数的增多, 置信度会逐渐变小。

3 基于加权优先级和分类匹配的图像修复方法

为更准确地计算待修复像素的优先级及搜索得到更加精确的最佳匹配块, 提出了一种基于加权优先级和分类匹配的图像修复方法。

3.1 优先级的改进

随着修复的进行, 置信度会逐渐变小趋向于零, 即使数据项增大, 优先权值仍随着置信度的减小而减小, 导致优先权的计算错误, 甚至出现随机选择待修复块进行修复的情况; 对于单一颜色的待修复块而言, 数据项为零, 即使置信度很大, 待修复块也不能及时得到修复, 从而影响最终的修复效果。

Criminisi 算法的优先权是采用相乘的形式, 从数学意义上讲, 乘法对于因子趋于零的情况较为敏感, 而加法则相对更加稳定。因此, 采用如下的优先权计算式^[9]:

$$P_p = \beta C_p + \gamma D_p \quad (5)$$

其中, $\beta + \gamma = 1$, β 、 γ 分别决定着优先权中置信度和数据项的比例, 用以平衡两者之间的关系。为了克服置信度逐渐减小的情况, 采用底数为 e 的指数函数来缓和置信度的变化趋势, 将其转换为 $C_p' = e^{C_p - 1}$; 而对于某一单色待修复块数据项为零和数据项系数设置过大而导致错误纹理的情况, 引入正规化函数来平滑数据项, 将其转换为 $D_p' = (1 - \omega) D_p + \omega$, 其中, ω 为正规化因子, 取 $\omega = 0.7$ 。

因此, 本文的优先权计算式为:

$$P_p = \beta e^{C_p^{-1}} + \gamma[(1-\omega)D_p + \omega] \quad (6)$$

3.2 匹配准则的改进

匹配准则是影响图像修复效果的重要因素，若搜索到的匹配块不是最佳匹配块，则会影响最终的修复效果，从而造成视觉上的误差。

一般一幅图像可以分为平滑区域和非平滑区域两部分。对于平滑区域而言，像素值变化较小，可以通过周围的像素值进行判断；而对于非平滑区域，像素值变化较大，直接采用周围的像素值判断会产生误差。基于此，本文利用梯度信息来判断该区域是平滑区域还是非平滑区域；然后，根据不同区域采用不同的匹配准则来得到最佳匹配块。该方法在有效地寻找最佳匹配块的同时，能够提高运行速度。

第一步：计算待修复块的梯度。假设待修复块 ψ_p 中任意像素的像素值为 $f(x, y)$ ，分别计算该像素上、下、左、右 4 个方向的梯度值，比较这 4 个方向的梯度值，将其中最大的梯度值作为该像素的权重 $g(x, y)$ ，对待修复块 ψ_p 内的所有像素求平均，其值为：

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g(x, y) \cdot f(x, y)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g(x, y)} \quad (7)$$

设定一个界限值 T ，该值为常数。当 $u \leq T$ 时，代表该修复块 ψ_p 为平滑区域，反之，则为非平滑区域。

第二步：进行相似性的度量。待修复块 ψ_p 为平滑块时，则利用局部搜索方法代替全局搜索，将待修复块 ψ_p 向外延伸 $m \times m (m > n)$ 的搜索区域，再在搜索区域内寻找最佳匹配块，该匹配准则的计算方法如式 (3) 所示；反之，待修复块 ψ_p 为非平滑块时，也采用局部搜索方法，但在搜索区域内寻找最佳匹配块时，需要考虑纹理和结构信息，因此，对此时的匹配准则进行改进。Wang 等人^[10]提出的基于人眼视觉特性的结构相似度

(structural similarity index measurement system, SSIM) 图像质量评价系统，将图像分为亮度信息、对比度信息、结构信息。本文引入 SSIM 中的结构信息作为匹配准则的因素，将式 (3) 改进为：

$$\begin{aligned} \psi_p &= \arg \min d(\psi_p, \psi_q) \\ &= \arg \min \sum \left\{ \left(R_{\psi_p} - R_{\psi_q} \right)^2 + \left(G_{\psi_p} - G_{\psi_q} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(B_{\psi_p} - B_{\psi_q} \right)^2 + s(\psi_p, \psi_q) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $s(\psi_p, \psi_q) = \frac{\sigma_{\psi_p, \psi_q} + C}{\sigma_{\psi_p} \sigma_{\psi_q} + C}$ 为 SSIM 中的结构信息， σ_{ψ_p} 、 σ_{ψ_q} 、 σ_{ψ_p, ψ_q} 分别为待修复块的标准差、匹配块的标准差和联合差， C 为常数。

因此，基于加权优先级和分类匹配的图像修复方法实现步骤如下。

步骤 1 检测已知信息区域和待修复区域的边界 $\partial\Omega$ ，通过式 (6) 计算边界像素的优先权值，找到优先权值最大的像素 p ，将其作为起始修复点。

步骤 2 以 p 为中心选取 $9 \text{ dpi} \times 9 \text{ dpi}$ 大小的待修复块 ψ_p ，并以 p 为中心取 $81 \text{ dpi} \times 81 \text{ dpi}$ 大小作为搜索区域，进行可重叠的 $9 \text{ dpi} \times 9 \text{ dpi}$ 分块处理，得到各个匹配块 ψ_q 。

步骤 3 通过式 (7) 计算待修复块 ψ_p 的梯度，若该梯度小于或等于界限值 T ，则该修复块为平滑块，通过式 (3) 计算各个匹配块与待修复块的相似度，选取相似度最大的匹配块，作为该修复块的最佳匹配块；若该梯度大于界限值 T ，则该修复块为非平滑块，采用引入结构信息的式 (8) 计算相似度，获得最佳匹配块。

步骤 4 将获得的最佳匹配块赋值到待修复块中，更新置信度。

步骤 5 重复步骤 1-4，直到破损区域修复完整。

4 实验结果与分析

通过实验来验证本文所提图像修复方法的有



效性,采用不同破损情况的图像,在 3.30 GHz、4 GB 内存、64 位 Windows 7 的计算机系统下进行实验,并将本文方法与其他方法进行对比。实验中相应参数设置为:优先权函数中置信度的系数 $\beta=0.3$,数据项的系数 $\gamma=0.7$,式(7)中的界限值 $T=100$ 。在对图像修复效果评价时,除了采用主观评价外,还可以采用峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)进行客观评价^[11],PSNR 值越高,则表示所获得的图像失真越小,即修复效果越好。

4.1 受损图像修复

为说明本文方法能够较好地修复图像,选择包含不同破损情况的图像作为测试图像。下面给出两种不同受损情况下的图像修复实验,并与 Criminisi 算法^[4]、参考文献[6]算法进行对比分析,其修复结果分别如图 2 和图 3 所示。



图 2 划痕图像修复结果对比

由图 2 的修复结果可知,Criminisi 算法在手臂处出现严重的瑕疵,手掌处产生了纹理延伸问题,破坏了手掌的结构;虽然参考文献[6]算法消除了手臂处的瑕疵,但是对于手掌处并没有得到较好的修复,没有解决 Criminisi 算法所存在的纹理延伸问题;本文方法既解决了手掌处纹理延伸的问题,又消除了瑕疵,具有较好的视觉效果。

由图 3 的修复结果可知,Criminisi 算法在对花瓣处进行修复时,出现了“断裂”和花瓣延伸的现

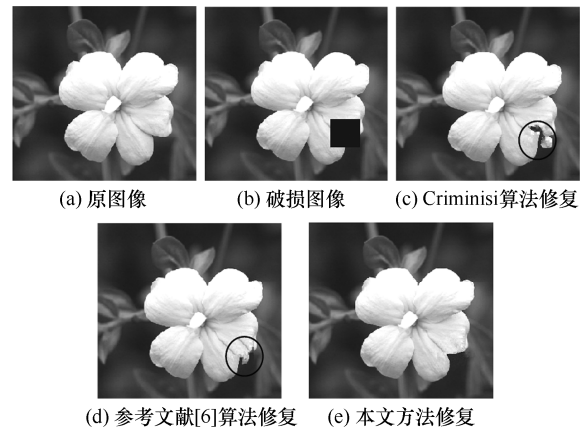


图 3 破损块图像修复结果对比

象;而参考文献[6]算法虽修补了“断裂”现象,但是仍然存在瑕疵和纹理延伸的问题;本文方法克服了上述所存在的缺陷,具有较好的视觉效果。

为了更好地评价图像的修复效果,本文采用 PSNR 作为图像修复的客观评价指标。将 3 种方法的 PSNR 值进行比较,具体数据见表 1。

表 1 3 种修复算法的 PSNR (单位为 dB)

算法	图 2	图 3
Criminisi 算法	34.139 7	27.155 5
参考文献[6]算法	36.445 7	29.003 2
本文方法	38.248 8	34.135 2

由表 1 可知,对于不同破损情况的图像,本文提出的图像修复方法都能够获得较好的修复效果。由于图 2 的破损区域相对图 3 较小,因此无论采用哪种方法进行修复,图 2 修复结果的 PSNR 值都高于图 3。Criminisi 算法存在难于确定优先级计算中的置信度且难于搜索到最佳匹配块的情况,使得该算法修复结果的 PSNR 值最低;参考文献[6]算法虽改善了最佳匹配块的选取,但仍存在优先级计算的问题,使得该算法修复结果的 PSNR 值有所提高;而本文方法既改善了优先权计算的问题,又加强了最佳匹配块的选取,从而本文方法修复结果的 PSNR 值最高。

4.2 目标移除

为进一步说明本文方法的有效性,对目标移除的图像进行修补,同样与 Criminisi 算法^[4]、参

考文献[6]算法进行分析对比,其修复结果如图4所示。

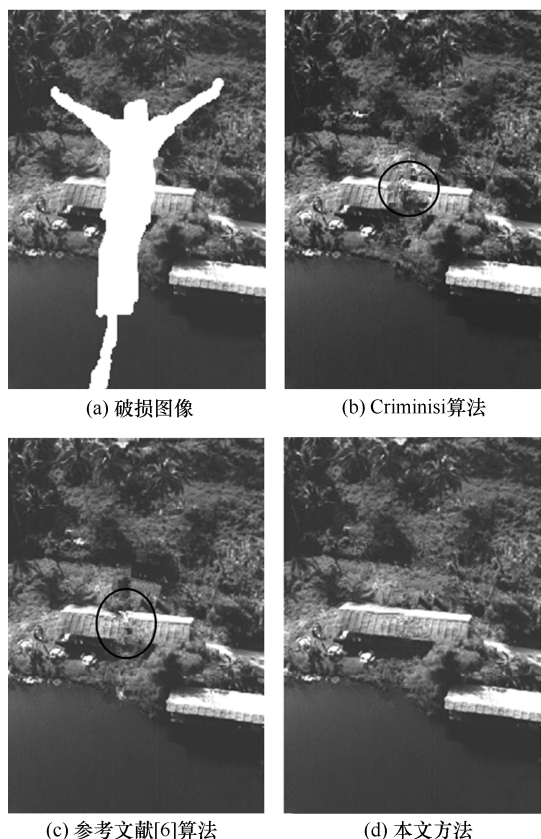


图4 人物移除的结果对比

由图4的修复结果可知,Criminisi算法在对房屋进行修复时,破坏了房屋的结构,使树木的纹理延伸,不符合人眼的视觉效果;参考文献[6]算法修复效果有所提高,但是屋顶仍存在着不连续的现象;而本文方法对屋顶的修复不但保持了屋顶的完整性,使得树木的纹理不再延伸到湖面上,且屋顶上方的树木与周围树木相融合,具有较好的视觉效果。

为了验证本文方法的修复时间,将其与Criminisi算法^[4]、参考文献[6]算法的修复时间相比较,见表2。

由表2可知,修复方法的运行时间与图像大小及破损区域像素多少有关。在对图2进行修复时,虽然破损像素较小,但图像尺寸较大,由于Criminisi算法采用全局搜索,所以耗费的时间较长,而本文提出的图像修复方法采用局部搜索,在保证匹配块在搜索范围内的情况下,加快了修复速率;在对图3进行修复时,由于其破损区域和图像尺寸都相对较小,使得本文方法的修复时间较短;在对图4中人物进行移除时,由于图像破损区域较大,且纹理细节较复杂,相比图2和图3所需的修复时间更长。与Criminisi算法和参考文献[6]算法相比,本文方法复杂度更低,且速度更快。

5 结束语

本文提出了一种基于加权优先级和分类匹配的图像修复方法,该方法对优先级模型进行了修改,通过引入指数函数和正规化函数,采用加权求和的形式,使修复顺序更加合理。此外,调整了在修复过程中匹配块的搜索方式,采用分类筛选来得到最佳匹配块。实验结果表明,本文方法不仅能够抑制纹理延伸,还能去除修复过程中存在的瑕疵,相比于原算法和其他算法而言,修复结果不仅具有良好的视觉效果,且缩短了修复时间。

参考文献:

- [1] BERTALMIO M, SAPIRO G, CASELLES V, et al. Image inpainting[C]//The 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, July 23–28, 2002, New Orleans, USA. [S.l.:s.n.], 2002: 417-424.
- [2] CHAN T F, SHEN J. Non-texture inpainting by curvature-driven diffusions(CDD)[J]. Journal of Visual Communica-

表2 3种图像修复方法运行时间比较

图像	图像大小	破损像素/dpi	Criminisi 算法/s	参考文献[6]算法/s	本文方法/s
图2	512 dpi × 512 dpi	2 381	12 470.9	1 624.5	470.7
图3	292 dpi × 304 dpi	5 007	2 598.9	1 222.6	137.7
图4	308 dpi × 206 dpi	7 954	25 662.8	10 126.6	2 760.2

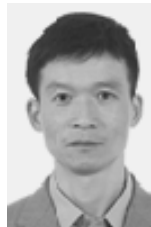


- tion and Image Representation, 2001, 12(4): 436-449.
- [3] XU Z B, SUN J. Image inpainting by patch propagation using patch sparsity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5): 1153-1165..
- [4] CRIMINISI A, PEREA P, TOYAMA K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212.
- [5] 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 and Computer Graphics, 2016, 28(7): 1131-1137.
- [6] WANG J, LU K, PAN D, et al. Robust object removal with an exemplar based image inpainting approach[J]. Neurocomputing, 2014, 123(10): 150-155.
- [7] CHEN Z, DAI C, JIANG L, et al. Structure-aware image inpainting using patch scale optimization[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2016(40): 312-323.
- [8] 李志丹, 和红杰, 尹忠科, 等. 基于 Curvelet 方向特征的样本块图像修复算法[J]. 电子学报, 2016, 44(1): 150-154.
LI Z D, HE H J, YIN Z K, et al. Exemplar based image inpainting algorithm using direction features of Curvelet transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(1): 150-154.
- [9] CHENG W H, HSIEH C W, LIN S K, et al. Robust algorithm for exemplar-based image inpainting[C]//The International Conference on Computer Graphics, Imaging and Vision(CGIV), July 26-29, 2005, Beijing, China. New Jersey: IEEE Press, 2005: 64-69.
- [10] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [11] SHIH T K, CHANG R C, LU L C, et al. Adaptive digital image inpainting[C]//International Conference on Advanced Information Networking and Applications, March 29-31, 2004, Los Alamitos, USA. New Jersey: IEEE Press, 2004: 71-76.

[作者简介]



曹燕 (1993-), 女, 宁波大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为数字图像处理、模式识别。



金炜 (1969-), 男, 宁波大学信息科学与工程学院副教授、硕士生导师, 主要从事压缩感知、模式识别和数字图像处理等方面的研究工作。



符冉迪 (1971-), 男, 宁波大学信息科学与工程学院副教授、硕士生导师, 主要从事数字图像处理、模式识别等方面的研究工作。