

中图分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)01-0123-07

论文引用格式: 张晴, 林家骏. 纹理分布分析的快速图像修复算法 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 123-129

纹理分布分析的快速图像修复算法

张晴 林家骏

华东理工大学自动化研究所, 上海 200237

摘要: 目前基于样本块的图像修复算法均是运用平方差和(SSD)准则遍历固定的样本集以选取最优匹配块, 算法普遍具有运算效率低的缺点。针对现有算法进行改进, 提出一种基于图像纹理分布分析的快速图像修复算法, 该算法根据局部纹理变化动态确定样本集大小, 解决样本集过大时引起的计算时间浪费以及样本集过小时样本多样性不足的问题。实验结果证明, 该算法保证修复结果连续且符合人眼视觉要求, 大大提高了图像修复的效率, 具有实际意义。

关键词: 图像修复; 图像补全; 纹理合成; 无缝拼接

Fast image inpainting algorithm using color texture distribution analysis

Zhang Qing, Lin Jiajun

Research Institute of Automation, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: The computation cost of the current exemplar-based image inpainting algorithms is high due to the fact that the current algorithms compare the exemplar patches with the inpainting patch one after another. In this paper we propose a fast image inpainting algorithm based on color texture distribution analysis which determines the range of exemplar sets according to local texture variances, thus avoiding wasting amount of time searching and comparing with exemplar patches in vain when the exemplar patches set is too large and the lack of the diversity when the exemplar set is too small. The results show that the presented algorithm can ensure good performance of visually high quality while being consistent with the surrounding textures and greatly improving the computation efficiency greatly.

Key words: image inpainting; image completion; texture synthesis; seamless

0 引言

给定一幅有破损区域或空白区域 Ω 的图像 I , 尝试用该图像的已知信息填补未知信息 Ω , 要求最终结果符合人眼的视觉要求的问题称为图像修复或图像补全。该问题是计算机图形和计算机视觉方向的一个极具挑战性的问题, 在图像和视频的编辑和传输、纹理合成、目标移除等领域均有应用, 近年来已逐渐成为一个研究热点。从本质上来说图像修复是一个欠约束问题。

图像修复这一概念最早由 Bertalmio 等人^[1]于 2000 年在 ACM SIGGRAPH 会议上提出, 通过解偏微分方程(PDE)完成修复过程。由于基于 PDE 的算法其本质是平滑扩散过程, 因此基于 PDE^[1-3]或变分法^[4-5]的图像修复技术只适用于小范围、非纹理区域的修复问题, 当用来修复大片的空白区域时, 该方法会导致待填充区域的模糊^[6-7]。

另一类图像修复技术, 即基于样本块的修复能较好地处理大范围缺失或空白的图像。Drori 等人^[8]通过合成自适应片来不断迭代逼近未知区域, 然而在图像不同尺度内找最佳填充片需要大量时间。Jia 等人^[9]

收稿日期: 2010-07-30; 修回日期: 2011-05-11

第一作者简介: 张晴(1983—), 女, 现为华东理工大学控制科学与工程系在读博士研究生, 研究方向为图像处理、信息融合技术。E-mail: zhangqing0329@yahoo.com.cn

依赖输入图像的分割来进行图像修复。另外有些方法需要用户交互 如 Sun 等人^[10]提出的方法要求用户指定结构性强的曲线 算法运用动态规划或置信度算法优先修复这些区域 然后运用一般的图像修复算法修复剩余区域。这些算法均采用贪婪性的修复原则 即像素块一旦填充便不再修改。近来也有学者尝试在小波域下进行修复^[11] 或用优化算法优化能量函数来解决此问题^[12] 如动态规划、置信度扩散^[13]、EM 算法^[14-15]等 虽然在部分情况下全局性效果略优 但复杂度远远大于贪婪性方法。

Criminisi 等人^[16]提出了一种基于像素块级的算法是具有代表性的图像修复算法 之后的大部分算法都是在此算法上的改进^[17-18]。此类算法都将样本块集合固定在一定大小的区域内。由于算法每次迭代均需要遍历样本块集合以比较候选样本块与已知像素块的 SSD 相似度 因此可能会引起样本多样性不足或计算效率低下的问题。

针对上述问题 在已有的基于样本修复算法的基础上 提出在每次迭代过程中根据待修复区域附近纹理变化 动态确定样本集大小 在结构性较强、纹理变化丰富的待修复区域采用较大的样本块集合以满足样本块多样性要求; 在纹理变化较平坦的待修复区域采用较小的样本块集合以提高算法效率。实验结果表明 该算法修复效果良好 提高了算法修复效率 具有实际意义。

1 Criminisi 算法

Criminisi 算法从图像 I 的整个已知区域 $I - \Omega$, 或破损区域 Ω 附近的邻域 $\partial\Omega$ 内选取样本块 样本块与邻接样本块之间存在像素的重叠 形成样本块集合 $P = \{P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_N)\}$, 其中 $P(x_i) \subset I - \Omega$, N 是样本块的总个数, x_i 是样本块的中心像素。按照一定原则确定待修复区域像素 y_j 的优先权, 以最高优先权 y_j 为中心的待修复块 $p(y_j)$ 从 P 中选择与之最相似的样本块 $P(x_i)$ 将样本块 $P(x_i)$ 的像素值填充到 $p(y_j)$ 的相应待填充像素处。经过多次迭代处理 最终完成整个破损区域的修补问题。

1.1 修复优先权的确定

假设某一待修复块为 $p(y_j)$, y_j 是待修复块的中心像素, Criminisi 算法定义修复优先权:

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

式中, $C(p(y_j))$ 为置信度项, 表示待填充块中已知元素所占比例; $D(p(y_j))$ 为数据项, 表示等照度线到达边缘的强度函数。分别定义为

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

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

式中, $|p(y_j)|$ 是待填充块参与 SSD 计算的像素数, α 是个归一化因子, n_p 是垂直于点 p 所在边缘的单位向量, \perp 表示垂直操作。

1.2 最匹配样本块的度量函数

根据图像修复问题的需要 最匹配样本满足

$$\arg \min_{P(x_i) \in P} d(P(x_i), p(y_j))$$

式中 函数 $d(\cdot)$ 是度量两个像素块相似度的函数, 大都采用 SSD 作为相似度度量函数评价待修复块 $p(y_j)$ 和样本块 $P(x_i)$ 的匹配程度, 因为 SSD 能很好地衡量两个像素块中每个相应像素值之间的差异。

对于待修复块 $p(y_j)$, 遍历样本集中的样本块 $P(x_i)$ 进行 SSD 匹配度计算, 使 $d(\cdot)$ 值最小的 $P(x_i)$ 作为最匹配块, 待修复块 $p(y_j)$ 中的未知像素值使用其相应位置上的已知像素值填充。

2 本文算法

2.1 算法总体框架

本文算法是在 Criminisi 经典算法基础上, 针对现有的图像修复算法普遍具有效率低的缺点提出改进。根据待填补像素周围纹理分布, 每次迭代时动态确定样本集的大小, 并在每次修复一像素块后加入泊松无缝处理, 减小拼接产生的块效应。算法伪代码如下:

输入含待修复区域 Ω 的图像 I

for Ω 中的每个像素

for Ω 中的每个像素

计算优先权

end for

计算具有最高优先权的待修复像素的纹理特征值

if 纹理特征值 $V(p_i) >$ 阈值 α

确定样本集大小为 R_1

else

确定样本集大小为 R_2

end if

根据 SSD 准确从样本集中选取最优匹配块

无缝处理

end for

2.2 纹理分布分析

纹理分布分析用来确定待修复元素附近纹理和结构信息的复杂度以确定样本集的大小。目前基于样本块的图像修复算法中,样本集的大小是固定不变的,每次迭代寻找最优匹配块都须遍历样本集。由于自然图像由变化平坦区域和纹理结构变化复杂区域构成,因此根据纹理分布特征值来动态确定样本集的大小必将大大加速算法的运行时间。

2.2.1 纹理分布特征值计算

对每个待修复的像素,其纹理分布特征值为

$$V(p(y_j)) = \sqrt{\frac{\sum (R(p(y_j)) - \bar{R}(p(y_j)))^2}{n_i}} + \sqrt{\frac{\sum (G(p(y_j)) - \bar{G}(p(y_j)))^2}{n_i}} + \sqrt{\frac{\sum (B(p(y_j)) - \bar{B}(p(y_j)))^2}{n_i}} \quad (4)$$

式中, $R(\cdot)$, $G(\cdot)$, $B(\cdot)$ 是某一像素在 R, G, B 通道的有效像素值。 $\bar{R}(\cdot)$, $\bar{G}(\cdot)$, $\bar{B}(\cdot)$ 是某一像素块在 R, G, B 通道有效像素的平均值。 n_i 是待像素块中已知像素的个数。

纹理分布特征值由像素块中的像素在 R, G, B 通道内的标准差确定。默认的像素块大小是 9, 可根据图像大小与空白区域的比例做出适当调整。

2.2.2 确定样本集的大小

在计算出待修复像素的纹理分布特征值之后, 便可根据其值确定样本集大小为

$$R = \begin{cases} R_1 & V(p(y_j)) > \alpha \\ R_2 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

阈值 α 是由全部已知信息的 $V(p(y_j))$ 的平均值确定。

2.3 拼接缝的处理

由于修补块与块之间存在的重叠区域会引起拼接缝, 为使修补结果自然, 须对填补块进行无缝处理。采用 Poisson 方法^[19]消除拼接缝, 即在块与块

的重叠处, 最小化模型

$$\begin{cases} f^* = \arg \min_f \iint_{\Xi} |\nabla f - \nabla g|^2 dx dy \\ \text{s. t. } f^*|_{\partial \Xi} = f|_{\partial \Xi} \end{cases} \quad (6)$$

由 Euler-Lagrange 方程可知, 式(6)等价于

$$\begin{cases} \nabla f^* = \nabla g \\ \text{s. t. } f^*|_{\partial \Xi} = f|_{\partial \Xi} \end{cases} \quad (7)$$

式中, Ξ 表示接缝, $\partial \Xi$ 表示最佳样本块的内部边缘, f 表示待填补区函数, 式(7)是标准 Dirichlet 条件下的 Poisson 方程。为了求解式(7) 将其离散化

$$\begin{aligned} |N_p| f_p^* - \sum_{q \in N_p \cap \Xi} f_q^* &= \\ \sum_{q \in N(p) \cap \partial \Xi} f_q + \sum_{q \in N_p} g_p - g_q & \end{aligned} \quad (8)$$

式中, g 表示最佳样本块的函数, N_p 是点 p 的 4 邻域, $|N_p|$ 是邻域个数。

由此得到一个稀疏线性方程组, 如果样本块不大, 可以由克莱姆法则求此方程组。如果样本块很大, 那么由此得到的将是一个大型的稀疏线性方程组, 可以用 GS 迭代法或 SOR 迭代法求解。

图 1 是加入无缝处理和未加入无缝处理的修复结果局部放大图, 由此可以看出, 加入无缝处理的修复消除了块与块之间的接缝, 修复效果更加平滑、自然。



(a) 未加无缝处理



(b) 无缝处理

图 1 无缝处理

Fig. 1 Seamless

3 实验

从 BSDS300 图像数据库中选取多幅具有代表性的图像进行修复实验。以 Criminisi 算法作为参照,为了使实验结果具有可比性,本文算法在参数选择上尽量使实验结果与 Criminisi 算法结果一致,以此来比较两个算法的效率。在 PC 上,基于 Matlab (R2009b) 语言实现算法。其程序运行环境是 Windows XP,计算机配置为 AMD Athlon(tm) X3

440 Processor (3.01 GHz) 1.75 GB 内存。

由实验结果(图 2—图 7)可知,本文算法的修复效果与 Criminisi 算法的修复效果相近。由于加入了无缝处理,图 7 的修复效果甚至明显优于 Criminisi 算法。由于在图像修复问题中,修复的目的并不是为了使结果与参考图完全一致,而是使人眼尽可能看起来自然,因此通常用来评价图像恢复质量的指标如 PSNR(峰值信噪比)在图像修复问题中并不适用^[20]。本文主要用主观的评价方法。

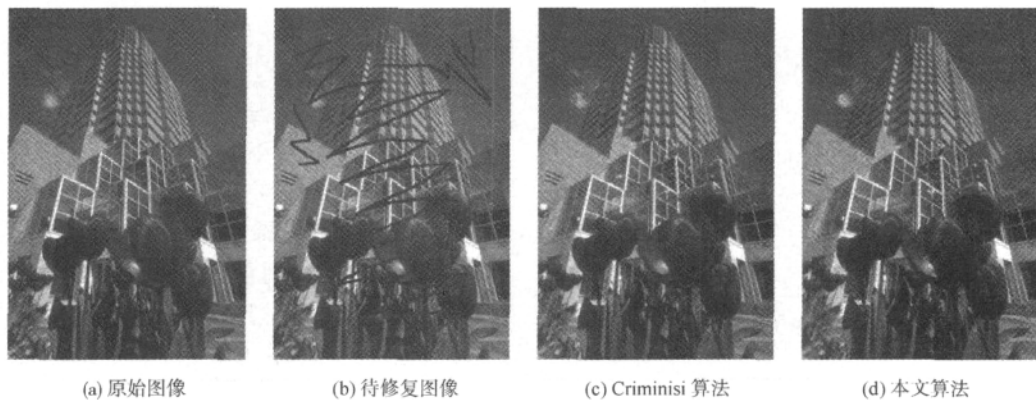


图 2 实验 1 结果

Fig. 2 The results of test one

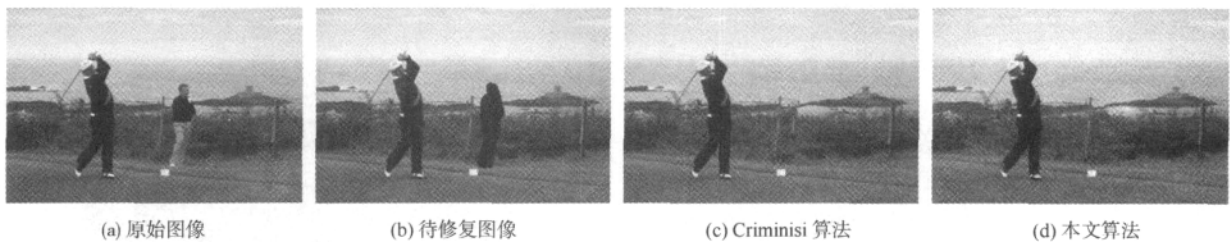


图 3 实验 2 结果

Fig. 3 The results of test two

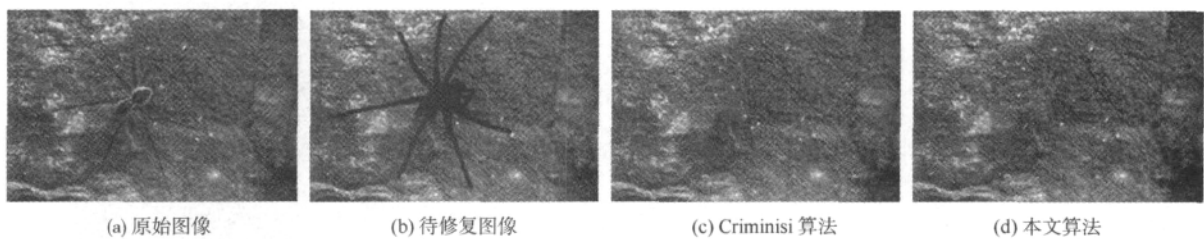
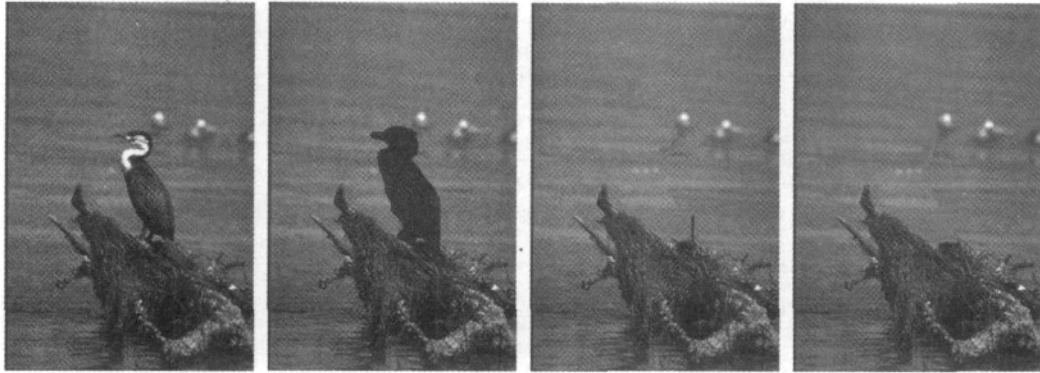


图 4 实验 3 结果

Fig. 4 The results of test three



(a) 原始图像

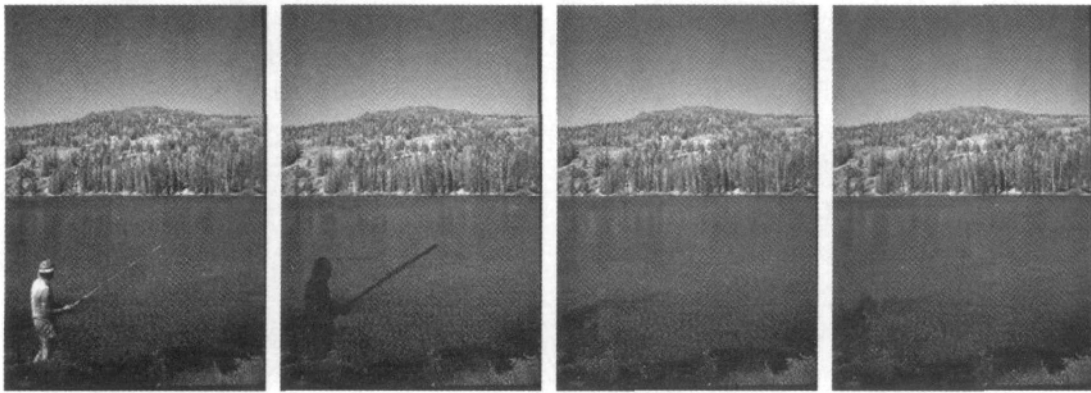
(b) 待修复图像

(c) Criminisi 算法

(d) 本文算法

图 5 实验 4 结果

Fig. 5 The results of test four



(a) 原始图像

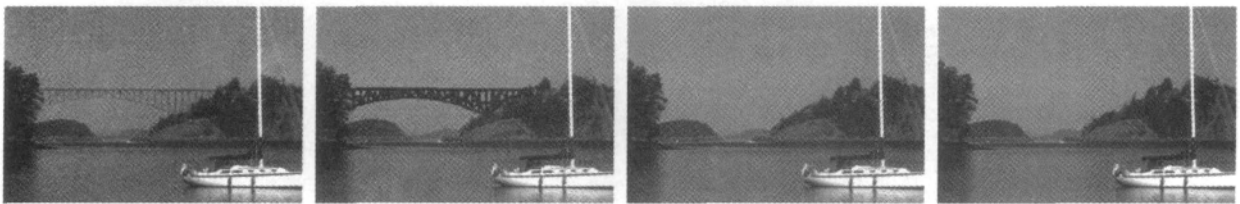
(b) 待修复图像

(c) Criminisi 算法

(d) 本文算法

图 6 实验 5 结果

Fig. 6 The results of test five



(a) 原始图像

(b) 待修复图像

(c) Criminisi 算法

(d) 本文算法

图 7 实验 6 结果

Fig. 7 The results of test six

表 1 是本文算法与 Criminisi 算法运行时间的比较。由表 1 可知,本文算法的实验结果与 Criminisi 算法相比较,效率分别提高了 42.50%, 45.05%, 26.16%, 47.96%, 35.04% 及 70.45%。比较其他实验的效率,实验 3 和实验 5 的效率仅提高了 26.26% 和 35.04%,这是由于该两幅图片的待修复区域周围像素变化较剧烈,算法大部

分时间使用大的样本集选择最匹配块以满足样本多样性要求。实验 6 的效率提高至 70.45%,这是因为待修复区大部分处于纹理变化平缓区域,算法大部分时间使用小的样本集选择最匹配样本块以提高算法效率。进一步分析可知,当图像已知部分尺寸远大于待修复区域尺寸时,这种优势更加明显。

表 1 运行时间比较
Table 1 Computation time

实验	图片大小/像素	运行时间/s		效率提高/%
		Criminisi 算法	本文算法	
实验 1	321 × 481	2 000.72	1 150.42	42.50
实验 2	481 × 321	481.88	264.81	45.05
实验 3	481 × 321	1 242.65	917.57	26.16
实验 4	321 × 481	888.60	462.50	47.96
实验 5	321 × 481	508.02	330.03	35.04
实验 6	481 × 321	742.53	219.39	70.45

4 结 论

根据待修补区域周围纹理分布信息动态确定样本集大小的算法,基本解决了固定样本块集合大小引起的计算效率低下或样本多样性不足的问题,提高了基于样本块的图像修复算法效率,对纹理合成、基于样本块的图像修复等问题具有广泛的适用性,今后还可以在以下方面进行改进:

1) 基于样本块的贪婪修复算法对修复顺序非常敏感,优先权的计算直接受掩码图影响,从而最终影响修复效果。而掩码图的产生需要人为参与,在反复实验中获取经验。今后应当改进优先权计算规则,使得最终的修复结果与初始掩码无关。

2) SSD 准则是现在普遍被接受的比较图像块之间相似性的准则,今后可以根据一定原则,比如待修复区域周围的已知像素信息或者是用户理想的修复结果,引入更多的准则以更加精确地选择最匹配样本块。

3) 现有算法对于较弱边缘的连接性修复不理想,今后应该考虑如何对这个问题进行改进,比如引入图像的深度信息或局部滤波增强边缘。

参考文献(References)

- [1] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting [C]// Proceedings of SIGGRAPH. New York, USA: ACM, 2000: 417-424.
- [2] Bornemann F, Marz T. Fast image inpainting based on coherence transport [J]. Journal of Mathematical Image and Visual, 2007, 28(3): 259-278.
- [3] Tschumperle D, Deriche R. Vector-valued image regularization with PDE's: a common framework for different applications [C]// Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Madison, USA: University of Wisconsin, 2003: 651-656.
- [4] Ballester C, Bertalmio M, Caselles V, et al. Filling-in by joint interpolation of vector fields and gray levels [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(8): 1200-1211.
- [5] Chan T, Shen J H. Euler's elastica and curvature based inpaintings [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 62(3): 1019-1043.
- [6] Shao X W, Liu Z K, Song B. An adaptive image inpainting approach based on TV model [J]. Journal of Circuits and Systems, 2004, 9(2): 113-117. [邵肖伟, 刘政凯, 宋壁. 一种基于 TV 模型的自适应图像修复方法 [J]. 电路与系统学报, 2004, 9(2): 113-117.]
- [7] Ding W. One class of nonlinear diffusion equation and its application in image inpainting [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(1): 153-156. [丁雯. 一种非线性扩散问题及其在图像修复中的应用 [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(1): 153-156.]
- [8] Drori I, Cohen-Or D, Yeshurun H. Fragment-based image completion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 303-312.
- [9] Jia J, Tang C K. Inference of segmented color and texture description by tensor voting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(6): 771-786.
- [10] Sun J, Yuan L, Jia J, et al. Image completion with structure propagation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 861-868.
- [11] Chen R H, Wen Y, Yip A M. A fast optimization transfer algorithm for image inpainting in wavelet domains [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(7): 1467-1476.
- [12] Chen Z G, Liu L G, Wang G J. Exemplar-based image completion using global optimization [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(1): 144-150. [陈中贵, 刘利刚, 王国瑾. 基于全局优化的图像块填充修复方法 [J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(1): 144-150.]
- [13] Komodakis N, Tziritas G. Image completion using efficient belief

- propagation via priority scheduling and dynamic pruning [J]. IEEE Transactions on Image Processing 2007 ,16(11) :2649-2661.
- [14] Kwatra V ,Essa I ,Bobick A ,et al. Texture optimization for example-based synthesis [J]. ACM Transactions on Graphics , 2005 24(3) : 795-802.
- [15] Xiao C X ,Huang Z Y ,Nie Y W ,et al. Global texture optimization incorporating with image detail [J] . Chinese Journal of Computers 2009 ,32(6) : 1196-1205. [肖春霞,黄志勇,聂勇伟,等. 结合图像细节特征的全局优化纹理合成[J]. 计算机学报 2009 ,32(6) : 1196-1205.]
- [16] Criminisi A ,Perez P ,Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based inpainting [J]. IEEE Transactions on Image Processing 2004 ,13(9) : 1200-1212.
- [17] Peng K Y ,Dong L F. A fast image inpainting algorithm based on average gray value [J]. Journal of Image and Graphics ,2010 , 15(1) : 50-55. [彭坤杨,董兰芳. 一种基于图像平均灰度值的快速图像修复算法[J]. 中国图象图形学报 ,2010 ,15(1) : 50-55.]
- [18] Orii H ,Kawano H ,Maeda H ,et al. Image completion with generation of rotated patterns and efficient matching [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) . Taipei ,Taiwan ,China: University of the National Cheng Kung 2009: 3190-3193.
- [19] Perez P ,Gangnet M ,Blake A. Poisson image editing [J]. ACM Transactions on Graphics 2003 22(3) : 313-318.
- [20] Shao X W ,Liu Z K ,Li H Q. An isolated image inpainting approach based on the Poisson equation [J]. Journal of Circuits and Systems 2008 ,13(6) : 1-6. [邵肖伟,刘政凯,李厚强. 一种基于 Poisson 方程的分离型图像修复方法[J]. 电路与系统学报 2008 ,13(6) : 1-6.]