

# 快速自适应模板图像修复算法

屈磊 韦穗 梁栋 王年

(安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

**摘要** 在对图像局部特性分析的基础上, 提出了一种简单的非迭代自适应模板快速图像修复算法。该算法首先通过对待修复点邻域像素梯度值进行排序, 估计出该点的等照度线方向, 从而自适应地确定其修复模板, 然后利用快进法 (fast marching method) 确定修复路径并完成对整个破损区域的修复。实验结果表明, 该算法对边缘细节及平滑区域均有良好的修复能力, 在相近的修复时间内能得到明显优于一般快速图像修复算法的修复效果。

**关键词** 图像修复 自适应模板 快进法

**中图分类号**: TN911.73 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2008)01-0024-05

## A Fast Image Inpainting Algorithm by Adaptive Mask

QU Lei WEI Sui LIANG Dong WANG Nian

(China Educational Department Key Laboratory of IC&SP, Anhui University, Hefei 230039)

**Abstract** Based on the analysis of local characteristic of nature images, a fast and non-iterative inpainting algorithm using adaptive mask is proposed in this paper. First, the direction of isophotes is estimated through sorting. Accordingly, the restore mask can be chosen adaptively. Then, the whole damaged area can be restored along the routine which defined by the fast marching method. The experimental results show that this algorithm has better ability in restoring both smooth area and edge-contained area compared to other fast inpainting algorithms.

**Keywords** inpainting, adaptive mask, fast marching method

## 1 引言

图像修复 (inpainting) 是当前数字图像处理和计算机图形学中的一个热点问题, 其在文物保护、剔除图像或视频中的一些文字、标语以及影视特效制作方面都有很高的应用价值。

现有大部分数字图像修复方法采用的主要思想为: 首先手工选定待修复区域; 后利用其周围已知信息沿边界向内进行推进。采用这种思想的方法包括: 基于 3 阶偏微分方程 (PDE) 的方法<sup>[1]</sup>, 基于曲率驱动扩散 (CDD) 的修复模型<sup>[2]</sup>、TV 修复模型<sup>[3]</sup>、Euler's elastica 修复模型<sup>[4]</sup>、Mumford-shah-Euler 修复模型<sup>[5]</sup>、基于快进法的修复<sup>[6]</sup>及基于卷积的方法<sup>[7]</sup>等。这些方法中除了文献 [6]、[7] 外其余实质上都是求解一个描述信息扩散的 PDE, 求解 PDE 需

要大量的迭代运算以致修复速度很慢, 后两种方法具有较快的修复速度。文献 [6] 首先利用快进算法选择修复路径, 其使用方向、距离和水平集 3 个权值对邻域像素进行加权平均并使用平滑估计器沿等照度线进行推进, 由于其邻域像素权值和梯度分散, 再使用加权平均后对边缘保持效果不理想。文献 [7] 利用高斯卷积核对待修复区域进行重复卷积, 以将破损边缘信息扩散到待修复区域, 该方法速度较快, 但其在修复过程中并没有保持等照度线的方向, 对于边缘细节几乎没有恢复能力。另一类方法是基于纹理合成的方法<sup>[8-9]</sup>, 该类方法对纹理修复有较好的结果, 但对结构信息的恢复能力有限。

本文在对图像局部特性分析的基础上, 采用自适应模板来模拟文献 [1] 中基于 PDE 的信息推进思想, 采用梯度排序来估计等照度线方向并设计相应的模板估计待修复点, 可保证等照度线尽可能平滑

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60473102, 60772121); 安徽省高等学校自然科学研究项目 (2005KJ005ZD, 2006KJ030B)

收稿日期: 2006-05-31; 改回日期: 2006-09-04

第一作者简介: 屈磊 (1980~), 男, 安徽大学计算机学院在读博士研究生。主要研究计算机视觉及数字图像处理。E-mail: qulei@ahu.edu.cn

并获得清晰的修复边缘, 而采用快进法选择修复路径符合信息扩散的思想并使得整个修复过程可一次完成, 因此修复速度很快。实验结果表明, 该算法对平滑区域和边缘细节均有良好的修复能力。

## 2 图像局部特性分析

我们所处理的数字图像一般都是位图图像, 即图像由一系列的离散像素点组成, 在没有图像中物体先验性知识的情况下, 要找出图像中离散像素点间的关系是非常困难的, 这同样也是图像修复所面临的难题。然而对于一般的自然图像, 在其局部区域(宽度在 5~ 15 个像素)内则可以近似归纳出一些简单的特性。本文将这种局部图像特性分为如下两类情况来进行分析: 一类是局部区域内包含边缘, 另一类是不包含边缘。

首先考虑存在边缘的情况, 由于局部区域很小且在真实自然景物图像中边缘变化相对平缓, 因此可以假设局部边缘近似为一条直线且边缘上像素值近似相同, 在边缘两侧像素值沿边缘梯度方向均匀的增加、减小或者近似不变(如图 1 中 (a) ~ (c) 所示), 图 1(a)、(b) 两种情况出现在边缘相对较粗时, 图 1(c) 所示情况出现在边缘较细时。这种假设在梯度值上表现为边缘处有相对较大的梯度, 而在边缘两侧梯度值近似相同且相对较小或近似为 0。在梯度方向上表现为边缘处梯度方向近似相同且垂直于边缘, 边缘两侧梯度方向变化又可分为两种情况: 一是该侧为平坦区域, 如图 1(a) 的左上侧部分和图 1(c) 的边缘两侧, 此时由于其梯度值很小, 各像素梯度方向可能有较大不同; 二是该侧为平滑区域, 如图 1(a) 的右下侧部分和图 1(b) 的边缘两侧, 此时像素的值沿边缘梯度方向均匀地增加或减小, 其梯度方向近似垂直于边缘。

当局部区域内不存在边缘时, 可分为平滑区域和平坦区域两种情况, 分别如图 1(d)、(e) 所示。类似于上述讨论, 这两种情况下, 像素的梯度值近似相同且相对较小或近似为 0, 梯度方向在平滑区域

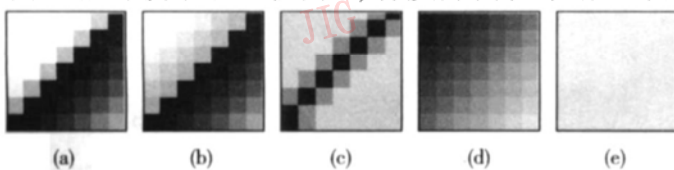


图 1 局部图像特征(区域大小为 7×7 像素)

Fig 1 Image local character(7×7)

时近似相同, 而在平坦区域时则有较大变化。

## 3 自适应模板图像修复算法

由上节讨论可知局部区域内等照度线可近似为一直线, 为了保证修复图像的等照度线尽量平滑且边缘不模糊, 待修复点的值应该只由该点邻域内等照度线附近的点来估计, 又因为采用了快进法选择修复路径, 在待修复点邻域中只有约一半的点为已知点, 因此选择模板形状如图 2 所示的只有一个指针的表盘, 指针的指向即为该点等照度线方向。下面的问题就是如何估计待修复点等照度线的方向及如何找出等照度线附近的点并设计其权值(如图 2 中  $w_1 \sim w_6$ )。

0	0	0	0	$w_5$	$w_6$	0
0	0	0	0	$w_4$	$w_3$	0
0	0	0	$w_1$	$w_2$	0	0
0	0	0	●	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

图 2 修复模板(7×7)

Fig 2 Inpainting mask(7×7)

### 3.1 估计待等照度线方向

令  $p$  为图像中一待修复点,  $\Omega$  为  $p$  点所在的局部区域, 该区域的特性满足上一节的假设。基于上一节中对  $\Omega$  特征的 5 种分类,  $p$  点所在区域可重新归纳为以下 5 类: (1)  $\Omega$  中存在边缘,  $p$  点在边缘上; (2)  $\Omega$  中存在边缘,  $p$  点在边缘一侧区域且该区域为平滑区域, 如图 1(a) 右下区域和图 1(b) 边缘两侧区域; (3)  $\Omega$  中存在边缘,  $p$  点在边缘一侧区域且该区域为平坦区域, 如图 1(a) 左上区域和图 1(c) 边缘两侧区域; (4)  $\Omega$  为平滑区域, 如图 1(d) 所示; (5)  $\Omega$  为平坦区域, 如图 1(e) 所示。

首先假设已知  $p$  点所在区域的类型, 下面将分别给出  $p$  点在各个类型时等照度线方向的确定方法, 最后归纳出适用于上述所有类型的一般方法。

当  $p$  点满足类 1 时, 由第 2 节的分析可知,  $\Omega$  内边缘点的值近似相同, 边缘近似为一条直线且边缘上的梯度方向垂直于边缘。这样我们只需要找出边缘的梯度方向并取其垂直方向即为过  $p$  点等照度线方向。又边缘上点的梯度值较大且方向基本相同, 这样通过对  $\Omega$  内已知点的梯度值进行排序并取其中较大

的几个点的梯度进行平均即可得到边缘的梯度方向。

当  $p$  点满足类 2 时,  $p$  点所在的边缘一侧区域的等照度线与边缘平行, 而边缘方向可由类 1 中相同方法得到。

当  $p$  点满足类 3 时,  $p$  点所在的边缘一侧区域为平坦区域, 其值可直接取该侧平坦区域中点的平均。为保证边缘点不影响该点的估计, 可取其等照度线方向平行于边缘, 即与类 1、类 2 方法相同。

当  $p$  点满足类 4 时,  $\Omega$  中梯度值和方向都近似相同且等照度线方向垂直于梯度方向, 对  $\Omega$  中任意点的梯度方向进行距离加权平均并取垂直方向即可得到  $p$  点的等照度线方向。

当  $p$  点满足类 5 时,  $\Omega$  内各像素的值近似相同,  $p$  点的值可直接取  $\Omega$  内任意点的平均。

此时可看出在所有情形下等照度线方向的估计均可采用类 1 中方法, 这使得修复的复杂性大大简化。

### 3.2 找出等照度线附近点及权值设定

令  $\varepsilon$  为  $\Omega$  的半径,  $q$  为  $\Omega$  内已知点,  $I(q)$  为  $q$  点值,  $|\nabla I(q)|$  为  $q$  点梯度值,  $\nabla I(q)$  为  $q$  点梯度方向。令  $\nabla^\perp I(p)$  为估计的  $p$  点等照度线方向,  $D(p, q) = \frac{p - q}{|p - q|}$  为  $p$  点到  $q$  点归一化后的方向, 用下式来衡量  $q$  点与过  $p$  点等照度线的接近程度:

$$E(p, q) = |\nabla^\perp I(p) \cdot D(p, q)| \quad (1)$$

当  $q$  点与过  $p$  点等照度线越接近,  $E(p, q)$  的值越大。通过对  $\Omega$  内  $E(p, q)$  进行排序, 选择最大的  $2\varepsilon$  个点即为等照度线附近的权值非零点, 记为  $q_i (1 \leq i \leq 2\varepsilon)$ 。为保证等照度线平滑并尽量减少噪声干扰, 令其权值  $W(q_i)$  为  $q_i$  到  $p$  归一化后的距离:

$$W(q_i) = \frac{D(p, q_i)}{\sum_{i=1}^{2\varepsilon} D(p, q_i)} \quad (2)$$

$$D(p, q_i) = \frac{1}{|p - q_i|} \quad (3)$$

### 3.3 修复整个破损区域

将上述模板作用于待修复点即可完成对一个点的修复, 要修复整个破损区域, 需要将待修复区域周围的已知信息从破损边缘处使用上述模板逐步向内扩散到整个待修复区域。这样一个向内扩散的过程, 我们采用了文献[6]中的快进算法。

令  $S$  为整个待修复区域,  $\partial S$  为待修复区域的边缘。简单的说, 快进算法就是对  $S$  内的点解如下的 Eikonal 方程:

$$|\nabla T| = 1 \quad (4)$$

其中,  $T$  是  $S$  中的点到边缘  $\partial S$  的距离。在应用快进算法之前采用如下方式对  $T$  进行初始化: 令图像中所有已知点的  $T$  值为 0, 初始边缘  $\partial S$  上点的  $T$  值为 1, 待修复区域  $S$  内所有待修复点的  $T$  为一个很大的值(在实验中取  $10^6$ )。在  $S$  中解上述方程实际上就是求出  $S$  内所有点到  $\partial S$  的距离  $T$ , 然后按  $T$  值递增的顺序选择路径进行修复。快进算法保证了在修复过程中离初始边缘  $\partial S$  最近的点最先被处理, 对整个修复过程而言就是由边缘处等步向内收缩到修复区域直至最终完成修复。

## 4 实验结果

本文算法以 VC++ .net2003 为平台, 在 PIV1.8G, 512M 内存的微机实现。图像中的破损区域均被初始化为随机噪声, 分别使用模拟图像和真实图像进行了实验, 并与其他两种快速图像修复算法<sup>[6,7]</sup>及 3 阶 PDE 算法<sup>[1]</sup>进行了比较。在实验中本算法采用的模板尺寸为  $7 \times 7$ , 取文献[7]中算法迭代次数为 300, 对文献[1]方法取每进行 15 次信息推进后插入 2 次各项异性扩散, 迭代停止阈值为 0.01。

### 4.1 模拟图像实验

该模拟实验的目的是测试本文算法对边缘及平滑区域的修复能力。对边缘的修复能力测试选用了图 3 中垂直及倾斜边缘和图 4 中的弧形边缘。对平滑区域恢复能力测试选用图 5 中均匀梯度图像。实验比较结果分别如图 3 和图 4 中的 (b) ~ (e) 所示。由模拟图像修复结果可以看出本算法在边缘恢复能力上优于其他 3 种算法, 在平滑区域的恢复能力上该算法与文献[7]和文献[6]算法的修复结果基本相同并同时优于文献[7]算法。

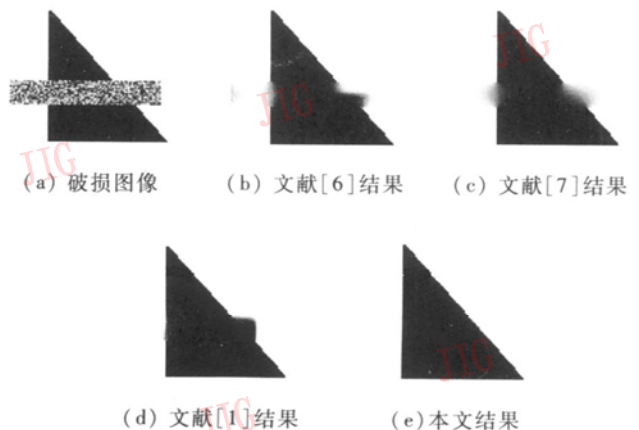


图 3 垂直及倾斜边缘修复

Fig.3 Vertical and declining edge inpainting

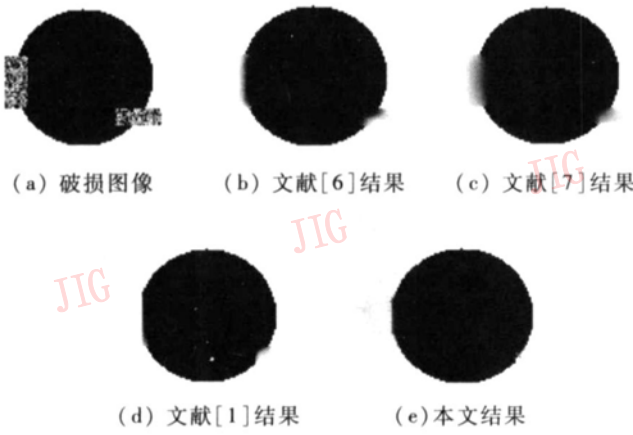


图 4 弧形边缘修复  
Fig. 4 Arc inpainting

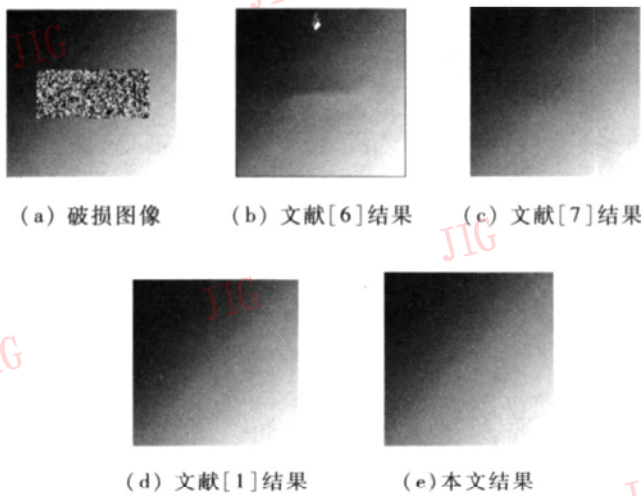


图 5 平滑区域修复  
Fig. 5 Smooth area inpainting

### 4 2 真实图像实验

在真实图像实验中所有图像均由互联网获得。对于本文中给出的图像,其修复时间均小于 1s。在进行修复之前,为削弱噪声影响并使图像尽可能满足 2 节假设,采用了半径为 5 的高斯模板对图像进

行了平滑。

图 6 是对林肯图像中折痕的修复结果,其中第二行是头发部位的局部放大图,从局部放大图中可以轻易发现文献 [6]、文献 [7] 和文献 [1] 算法的修复区域,文献 [6] 算法在修复区域产生了一些不自然的边界,而文献 [7] 和文献 [1] 算法则产生了较明显的模糊,在本文算法的修复结果中则很难发现已修复区域,除此以外还可以发现头发的一些边缘细节被平滑地延伸到了原破损区域内部。图 7 是消除图像中叠加的文字,其中第二行是单词 “disappear” 中字母 “sa” 所在区域的放大图,在图 7(e) 的局部放大图中可以发现本文算法在字母 “a” 的上边缘仍有一些修复痕迹,但总体说来本文算法的修复效果上仍优于其他两种修复算法。

对图像修复质量的判断很大程度上是一个主观问题,在能够获得原始未损坏图像时,则可使用一些常用的误差分析方法对修复质量进行度量。本文采用均方误差 (MSE) 在 R、G、B 3 个通道分别对 3 种修复结果进行了误差分析。由于不能够获得图 6 的未损坏图像,在误差分析中采用了图 7 和图 8。具体数据如表 1 所示,可见本文算法的均方误差均低于其他两种修复方法。

表 1 修复后图像 R、G、B 三通道的均方误差

Tab 2 MSE of RGB

MSE	桥(图 7)			鱼(图 8)		
	R	G	B	R	G	B
文献 [6]	12.24	12.52	11.74	23.73	27.98	25.76
文献 [7]	12.96	13.08	12.14	23.78	28.01	25.90
文献 [1]	12.56	12.87	12.03	23.53	27.87	25.58
本 文	10.97	11.36	10.66	21.91	25.96	23.86



图 6 林肯图像破损区域修复结果

Fig. 6 Restoring damaged area in Lincoln image

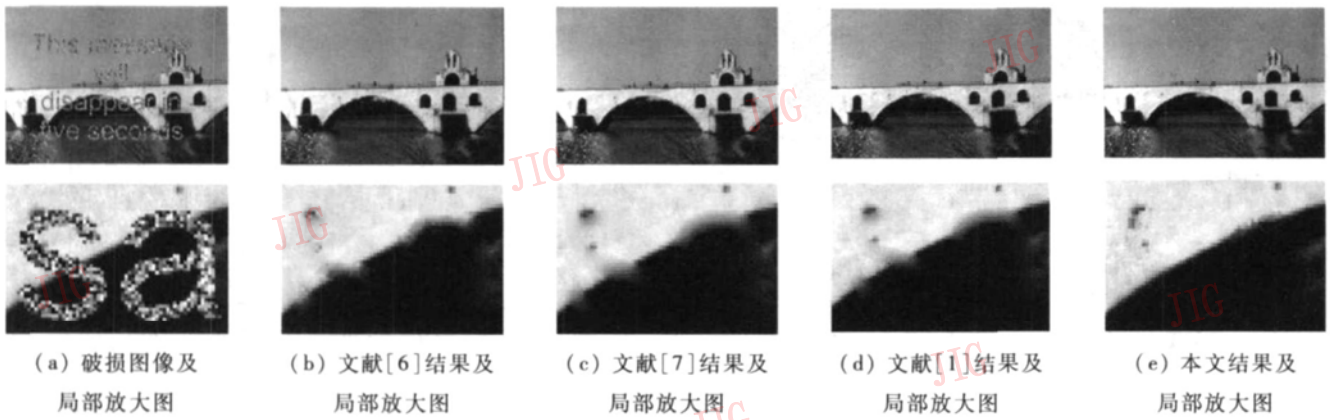


图 7 桥图像中去除文字结果  
Fig. 7 Removing text in bridge image

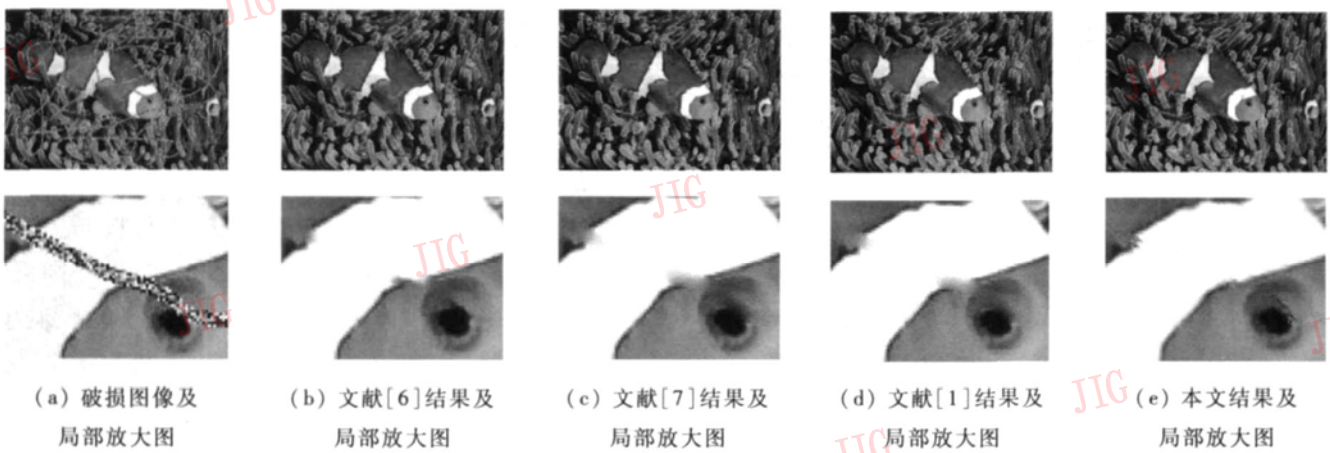


图 8 鱼图像中去除涂鸦结果  
Fig. 8 Removing scratch in fish image

## 5 结 论

在对图像局部特性分析的基础上,提出了一种简单快速的自适应模板图像修复算法。该算法中除了两个小范围内的排序其余均为线性运算,排序虽然是非线性运算,但在一般编程语言中都能快速实现,因此该算法具有很快的运算速度。模拟和真实图像的实验结果表明,该算法能够在相近的修复时间内得到明显优于一般的快速图像修复算法的修复效果。由于该算法是建立在对一般自然图像局部特性分析的基础上,因此对于一些人工合成图像和高噪声图像,上述分析假设可能不成立;除此该算法在修复时并没有考虑待修复图像的全局信息,对于较大的破损区域在其中心的边缘结合处会产生一定的不连续。这些将是有待进一步解决的问题。

### 参考文献 (References)

- Bertalmio M, Sapiro J, Caselles V, et al. Image inpainting[A]. In Proceedings of SIGGRAPH[C], New Orleans USA, 2000: 417~424
- Chan T, Shen J. Non-texture inpainting by curvature-driven diffusions(CDD)[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12(4): 436~449
- Chan T, Shen J. Mathematical models for local non-texture inpaintings[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2001, 62(3): 1019~1043
- Chan T, Kang S, Shen J. Euler's elastica and curvature based inpaintings[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 63(2): 564~592
- Esedoglu S, Shen J. Digital inpainting based on the Mumford-shah-Euler image model[J]. European Journal on Applied Mathematics, 2002, 13(4): 353~370
- Telea A. An image inpainting technique based on the fast marching method[J]. Journal of Graphics Tools, 2004, 9(1): 25~36
- Oliveira M, Bowen B, McKenna R, et al. Fast digital image inpainting[A]. In Proceedings of Visualization, Imaging and Image Processing IASTED Conference[C], Marbella, Spain, 2001: 261~266
- Igehy H, Pereira L. Image replacement through texture synthesis[A]. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Santa Barbara, California USA, 1997, (3): 186~190
- Wei L Y, Levoy M. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization[A]. In Proceedings of SIGGRAPH[C], New Orleans USA, 2000: 479~488