

新搜索策略下的快速图像修复算法

聂栋栋^{1a}, 马勤勇^{1b}, 马利庄²

(1. 燕山大学 a. 信息与计算科学系; b. 计算机科学与工程系, 河北 秦皇岛 066004; 2. 上海交通大学 计算机科学与工程系, 上海 200030)

摘要: 提出了一种新搜索策略下的快速图像修复算法。通过定义新的优先权计算函数, 克服了图像低纹理区域修复过于滞后的问题。又通过预测修复后图像块统计属性, 对所有待匹配的图像块进行筛选, 加快了图像修复速度, 改善了修复效果。实验结果显示, 该算法适用于多种类型的数字图像修复。

关键词: 图像修复; 搜索策略; 优先权; 匹配函数

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2009)05-1991-03

Quick image inpainting algorithm under new searching strategy

NIE Dong-dong^{1a}, MA Qin-yong^{1b}, MA Li-zhuang²

(1. a. Dept. of Information & Computing Sciences, b. Dept. of Computer Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China; 2. Dept. of Computer Science & Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper proposed a quick image inpainting algorithm under a new searching strategy. By a new priority computation function, it overcame the problem caused by the hysteresis of the low texture regions inpainting, and by forecasting the statistical property of the image patch to be inpainted, selected the source image patches which accelerated the inpainting process, improved the inpainting results. Experiments confirm that this algorithm is suitable to various digital images inpainting.

Key words: images inpainting; searching strategy; priority; matching function

0 引言

数字图像修复(digital image inpainting)技术是当前计算机图形学和计算机视觉中的一个研究热点。数字图像修复是一种融合图像修复和图像编辑的技术,它通过适当的算法估计并填充图像指定区域内的缺损数据,尽可能地使修复后的图像看起来自然逼真。这使得该技术在文物保护、影视特技制作、多余目标物体剔除(如视频图像中删除部分人物、文字、标题等)、图像缩放、图像压缩、视频通信错误隐匿等方面有着广泛的应用价值。

虽然某些当前流行的图像处理软件,如 Photoshop 等,也可以对受损图像进行修复处理,但这种方法对用户的专业技术要求很高,而且在操作时用户必须仔细考虑要填充的颜色、纹理等,经过复杂而繁琐的手工处理后才能完成,这就使自动的数字图像修复算法的研究更为迫切。

早期的图像修复技术多数都是基于偏微分方程(partial differential equation, PDE)的^[1],如 Bertalmio 图像修复算法^[2]、Chan 等人^[3,4]提出的变分模型图像修复算法。该类算法通常速度比较慢,而且因为 PDE 模型倾向于光滑地重构目标区域,这样在处理较大区域时,修复的中心区域会出现明显的过于平滑、缺少纹理现象,所以只适用于对非纹理图像或低纹理图像的修复。

目前的图像修复算法多数以基于样本的纹理合成(texture synthesis from samples, TSFS)算法^[5]为核心。该类方法通常不

是以像素而是以图像块为单位进行修复。例如 Drori 等人^[6]提出的基于反向遮片的图像修复算法, Criminisi 等人^[7,8]提出的基于样例的图像修复算法,以及 Sun 等人^[9]提出的交互式图像修复算法。与基于 PDE 的图像修复算法通过信息扩散或能量函数最小化来完成图像修复不同,由于基于纹理合成的图像修复算法是直接从未知的已知区域采样进行修复,不会出现模糊现象,能够很好地修复图像目标区域的纹理细节信息。

1 算法实现

本文提出的算法也是以基于样本的纹理合成算法为核心,它以马尔可夫随机场模型为基础,认为纹理具有局部统计特征,即纹理中的任一部分都可以由其周围邻域完全决定。

具体而言,本文算法通过新的优先权计算函数,确定当前待修复图像块的位置;进而利用其中的已知像素信息,估计修复后图像块在各个色彩分量上的均值,并以此对已知图像区域内的所有待匹配图像块进行筛选,再从中找到与当前待修复图像块匹配代价最小的图像块;最后,通过拷贝最佳匹配图像块中对应的信息到当前图像块的未知像素部分,完成对当前图像块的修复。依此类推,以图像块为单位逐步完成整个指定图像区域的修复。

1.1 确定当前待修复图像块

在图像修复中确定当前待修复图像块也就是要确定一个合理的修复处理顺序,这对提高图像的修复效果是一个至关重要的因素。相对于多数修复算法都采用的从外向内剥洋葱似

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2008-09-23

作者简介: 聂栋栋(1977-),女,博士,主要研究方向为图像处理、计算机网络(niedd.mail@gmail.com); 马勤勇(1977-),男,博士,主要研究方向为计算机网络、数据库、模式识别; 马利庄(1963-),男,教授,博导,主要研究方向为计算机辅助设计、数字图像处理、计算机动画。

的层层推进的处理方式, Criminisi 等人在其图像修复算法中率先提出了边界像素修复优先权的概念, 以确定图像修复顺序。然而, 其边界像素优先权的计算过于简单, 对较为平坦的低纹理区域的修复顺序明显滞后, 容易造成修复后图像高纹理区域向低纹理区域过度扩张的问题。

本文采用式(1)计算优先权, 它通过对当前像素点的信心因子和数据因子规则化, 避免了由于两者数量级上的差异, 使两者对优先权计算有相对均衡的影响力。同时, 又引入了全局梯度强度阈值 T_g , 只有在梯度值大于全局梯度阈值时, 才考虑边缘结构对优先权计算的影响。这就避免了图像细节部分的弱小梯度差异对修复顺序的影响, 突出图像中真正的区域边缘结构对修复顺序的影响。

$$P(p) = \begin{cases} |C(p) - \mu(C(p))| / \sigma(C(p)) + |D(p) - \mu(D(p))| / [2 \times \sigma(D(p))], & \nabla I_p > T_g \\ |C(p) - \mu(C(p))| / \sigma(C(p)), & \nabla I_p \leq T_g \end{cases} \quad (1)$$

一般情况下, 全局梯度阈值 T_g 可以确定如下:

$$T_g = \mu(\nabla Y_i) + \sigma(\nabla Y_i), \forall i \in \bar{\Omega} \quad (2)$$

对图像中待修复区域边界上的任一像素 $\forall p \in \partial\Omega$, 计算其相应的优先权值 $P(p)$, 以优先权值最大的像素点为中心, 构成的邻域窗口 ψ_p 就是当前要修复的边界图像块。

信心因子 $C(p)$ 衡量像素点 p 的邻域窗口 ψ_p 内已知像素信息的可信程度。在优先权计算中, 使用信心因子 $C(p)$ 体现了优先考虑已知像素较多的边界图像块的修复原则。

$$C(p) = \sum_{i \in \psi_p \cap \bar{\Omega}} C(i) / |\psi_p| \quad (3)$$

其中: $|\psi_p|$ 表示邻域窗口 ψ_p 的面积; 像素点 i 为当前像素点 p 的邻域窗口内任意一个已知的像素点。

$C(p)$ 初始化定义如下:

$$C(p) = \begin{cases} 0 & \forall p \in \Omega \\ 1 & p \in \bar{\Omega} \end{cases} \quad (4)$$

在图像修复过程中, 待修复区域外层像素的信心因子普遍相对较高, 从而使它们被优先填充。待修复区域的中间由于被估计像素点的信心因子普遍较低, 使得它们只能较晚被填充。另外在图像待修复区域突出的部分, 在其边界像素点的邻域窗口内有较多的已知像素信息, 其信心因子较大, 也就有可能被优先填充。在图像待修复区域凹进的部分, 在其边界像素点的邻域窗口内只有少量的已知像素信息, 其信心因子比较小, 也就只能被较晚填充。在图像待修复区域边界曲率等大致相等的情况下, 信心因子就退化成了简单的层层推进式的填充顺序。

数据因子 $D(p)$ 表示图像边缘结构信息对当前像素点的优先权值的影响。它不仅要考虑该点的边缘结构强弱, 还要考虑边缘走向与该点待修复区域边界法向之间的一致程度。

$$D(p) = |\nabla I_p^\perp \times n_p| / \alpha_d \quad (5)$$

其中: α_d 是归一化系数, 若图像各分量值为 255 级, 则取 $\alpha_d = 255$; n_p 是待修复区域边界 $\partial\Omega$ 在 p 点的单位法矢量; $\nabla I_p^\perp$ 表示与 p 点图像梯度矢量大小相同、方向垂直的矢量。

对离散的数字图像, p 点的单位法矢量并不容易求解。本文取边界像素点 p 的邻域窗口 ψ_p 内所有未知像素点到 p 点的方向的单位矢量, 然后把这些矢量的平均值单位化后, 作为 p 点的边界法矢量。另外对彩色图像, 本文取图像亮度分量上的梯度值作为边界像素点的图像梯度。

一般利用差分表示离散图像梯度。常用的差分计算方法有前向差分、后向差分和中值差分三种。对边界像素点 p , 其前向或后向邻接点可能恰好是待修复的未知像素点。所以实际计算时并不能固定于某种单一的差分计算, 只能根据实际情况分别计算。以 p 点 x 方向的梯度计算为例, 可计算如下:

$$\nabla I_p = \begin{cases} (Y_{p_x+1, p_y} - Y_{p_x-1, p_y}) / 2 & T_{p_x-1, p_y} = 0 \text{ \& } T_{p_x+1, p_y} = 0 \\ Y_{p_x+1, p_y} - Y_{p_x, p_y} & T_{p_x-1, p_y} = 1 \text{ \& } T_{p_x+1, p_y} = 0 \\ Y_{p_x, p_y} - Y_{p_x-1, p_y} & T_{p_x-1, p_y} = 0 \text{ \& } T_{p_x+1, p_y} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中: Y_{p_x+1, p_y} 、 Y_{p_x, p_y} 、 Y_{p_x-1, p_y} 表示在坐标点 $(p_x + 1, p_y)$ 、 (p_x, p_y) 、 $(p_x - 1, p_y)$ 处图像像素的亮度值; T_{p_x+1, p_y} 、 T_{p_x, p_y} 、 T_{p_x-1, p_y} 表示图像在对应坐标点的标记值 (即当该点是待修复的未知像素点时, 其标记值为 1; 否则为 0)。

边界像素点 p 在 y 方向的梯度计算与此类似, 不再赘述。

1.2 修复当前图像块中的未知像素

在确定了当前待修复区域边界上具有最高优先权的像素点 P 后, 就确定了以 P 点为中心的邻域窗口 ψ_p 作为当前待修复的图像块。在 ψ_p 中, 有部分像素点信息是已知的, 而另一部分像素点信息是未知的。这些未知的像素点就是当前有待算法修复的部分。一般利用 ψ_p 中的已知像素信息, 与已知图像区域 Ω 中所有待匹配的图像块 ψ_q 相匹配, 计算相应的匹配函数值, 并以此确定与 ψ_p 最佳匹配的图像块。利用图像的局部相关性可知, 如果 ψ_p 中的已知像素信息与 ψ_q 中的相应像素非常相似, 在一般情况下 ψ_p 中的未知像素信息与 ψ_q 中的相应像素也会非常相似, 也就可以利用 ψ_q 中对应像素点修复 ψ_p 中未知像素信息。

目前, 多数图像修复算法均采用全搜索的策略, 寻找已知图像区域 Ω 中与当前待修复图像块 ψ_p 最匹配的图像块。这个过程非常慢, 是整个图像修复过于耗时的主要原因。如果能够缩短搜索最匹配图像块所需要的时间, 就能够加快整个图像修复过程。

实际上根据图像的局部相关性, 当前待修复图像块中的已知像素信息作为整个图像块中所有像素信息的一个采样, 可以利用其统计属性预测修复后图像块中所有像素信息的整体统计属性。再利用预测的修复后图像块的统计属性对已知图像区域 Ω 中的所有待匹配的图像块预先进行筛选, 然后只计算那些与预测统计属性相近的图像块的匹配函数值。这样, 就能够有效缩短搜索最匹配图像块所需要的时间。

这里选用的图像块统计属性是其中所有像素在红、绿、蓝三个色彩分量上各自的平均值。搜索最匹配图像块并对当前图像块中的未知像素进行修复的具体过程如下:

a) 对已知图像区域 $\bar{\Omega}$ 中的所有待匹配的图像块 ψ_q , 计算该图像块在红、绿、蓝三个色彩分量上平均值 $[r_{q_m}, g_{q_m}, b_{q_m}]^T$ 。

b) 计算当前待修复图像块 ψ_p 中的所有已知像素在红、绿、蓝三个色彩分量上平均值 $[r_{p_m}, g_{p_m}, b_{p_m}]^T$, 并以此预测修复后图像块在三个色彩分量上的平均值。

c) 选择那些红、绿、蓝三个色彩分量的平均值与修复后图像块的预测值之间的差别在一定阈值范围内的待匹配图像块, 即

$$|r_{q_m} - r_{p_m}| \leq T_{r_m} \text{ 且 } |g_{q_m} - g_{p_m}| \leq T_{g_m} \text{ 且 } |b_{q_m} - b_{p_m}| \leq T_{b_m}$$

这里: T_{r_m} 、 T_{g_m} 、 T_{b_m} 分别是红、绿、蓝三个色彩分量平均值差别的阈值。若色彩分量为 255 级, 一般取 $T_{r_m} = T_{g_m} = T_{b_m} = 8$ 。

本文标记所有满足该条件的待匹配图像块的集合为 Γ_q 。

d) 计算 Γ_q 内所有待匹配图像块与当前待修复图像块 ψ_p 间的匹配函数值,从中选择最佳匹配的图像块。

通常采用的匹配函数 $M(p, q)$ 是以两个图像块 ψ_p, ψ_q 的欧拉距离来表示,但这样无法避免修复图像中某些图像细节重复出现的不自然现象。本文采用文献[10]中提出的匹配函数,它通过利用待匹配图像块重复采样函数,抑制在修复过程中被多次使用的图像块。

具体而言,就是引入变量 dup 表示图像中每个已知像素的重复采样值,也就是记录每个已知像素点在修复过程中被重复使用的次数,在初始化时所有已知像素点重复采样值均设置为 0。匹配函数定义如下:

$$M(p, q) = \begin{cases} w_{\text{dis}_{pq}} + \alpha_w \times w_{\text{dup}_q} & \psi_q \subset \Gamma_q \\ + \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

这里:

$$w_{\text{dis}_{pq}} = 1/N \sum \sqrt{(r_p - r_q)^2 + (g_p - g_q)^2 + (b_p - b_q)^2} \quad (8)$$

$$w_{\text{dup}_q} = \log(\sum_{i \in \psi_q} \text{dup}(i) / |\psi_q| + 1) \quad (9)$$

其中: Γ_q 表示已知图像区域 Ω 中满足色彩差异阈值条件的所有待匹配的图像块构成的集合; $w_{\text{dis}_{pq}}$ 表示当前待修复图像块 ψ_p 中已知像素部分和待匹配的图像块 ψ_q 中相应像素间的欧拉距离; w_{dup_q} 是 ψ_q 内所有像素的平均重复采样次数的函数; α_w 是平衡两个因子的优先权,简单地可取 $\alpha_w = 0.8$ 。

e) 假设匹配函数值最小的图像块为 ψ_q ,其中当前待修复图像块 ψ_p 中未知像素相对应的像素集合为 ψ_q' ,则通过拷贝 ψ_q' 中像素值到 ψ_p 中对应的未知像素,就完成了对当前图像块的修复。同时,还需要更新相应的表示修复处理状态的矩阵和变量:

$$T(i) = 0, \forall i \in \psi_p \cap \Omega \quad (10)$$

$$C(i) = C(p), \forall i \in \psi_p \cap \Omega \quad (11)$$

$$\text{dup}(i) = \text{dup}(i) + 1, \forall i \in \psi_q' \quad (12)$$

2 实验及分析

实验采用用户手工标记或某种图像分割算法的结果作为图像待修复区域。

图 1 给出了本文算法与 Criminisi 等人提出的算法在图像修复时间上的比较。算法采用 MATLAB 6.5 编写,运行时间是在台式 PC (AMD Athlon XP1600 + 1.40 GHz CPU, 256 MB 内存) 上多次实现后的统计结果。实验数据显示,采用本文提出的搜索策略可以有效加快图像修复处理速度。

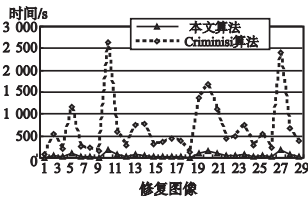


图 1 图像修复时间比较

图 2 显示了采用本文优先权算法与传统算法修复效果间的比较。其中,(a)是原始图像;(b)是指定待修复区域(灰色区域)后的图像;(c)是采用 Criminisi 等人提出的优先权计算方法得到的修复结果;(d)是采用本文提出的优先权计算方法得到的修复结果。图 2(d)中修复效果明显要比(c)中好得多。这主要也是因为按照 Criminisi 等人提出的优先权计算方法,在图像低纹理区域的优先权过于滞后,这样不合理的修复顺序

就造成了山林和岩石部分向河面内的过度延伸。尤其是岩石部分,由于是近景细节要比远处的山林部分更突出,这使得岩石部分甚至一直突入到本该属于山林的区域内,严重影响了图像的修复效果。



图 2 本文优先权算法对修复效果的改进

图 3 是采用新的搜索策略后与传统算法修复效果间的比较。其中:(a)为原始图像;(b)为指定待修复区域(绿色区域)后的图像;(c)为采用原来的全搜索策略修复后的图像;(d)为采用新的搜索策略进行修复后的图像。从中可以看出,当待修复区域尺度较大时,采用本文搜索策略后修复图像的质量明显比采用原来全搜索策略的修复图像质量好。而且本文算法的处理时间只要 128 s,原来算法的处理时间要 1 118 s。

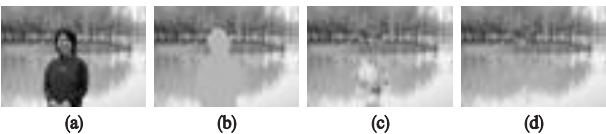


图 3 本文搜索策略对修复效果的改进

图 4 是本文算法与几种传统典型算法的比较。其中:(a)是原始图像;(b)是指定待修复区域后的图像;(c)是 Bertalmio 等人提出的算法修复结果;(d)是 Criminisi 等人提出的算法修复结果;(e)是本文算法的修复结果。从中可以看出,Bertalmio 等人提出的基于偏微分方程的图像修复算法无法处理大面积的图像修复工作,其修复区域过于模糊,缺少相应的图像细节;而 Criminisi 等人提出的基于样例图像的修复结果(e)要好得多,但还存在一些问题。一方面,由于不合理的优先权计算,使河面等低纹理区域受边缘梯度强度的制约,优先权过低,造成了岸边草地区域向河面内的过度延伸,影响了最后图像的修复效果;另一方面,在图像底边附近也有一些修复图像块色彩跳变的问题。在本文算法的修复结果图 4(e)中,这些问题都有了明显改善。

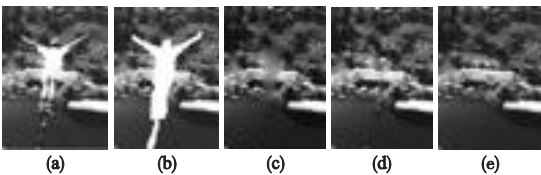


图 4 本文算法与几种传统典型算法的比较

从图 2~4 中也可看出,本文算法在去除图像中特定对象方面效果较好。实验显示本文算法在修复图像划痕和去除图像中的文字方面也达到了令人满意的效果,部分实验结果如图 5 所示。其中:第 1 列为待修复的图像;第 2 列为采用本文算法进行修复后的图像。



图 5 修复图像划痕和去除图像中的文字效果

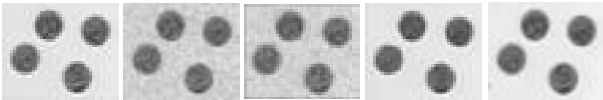
3 结束语

本文提出了一种快速图像修复算法。 (下转第 1996 页)

表 1 器官图像本文滤波与中值滤波输出信噪比比较

噪声密度P	噪声图像	标准中值滤波(9×9)	本文滤波
0.1	37.179	34.624	37.989
0.2	34.196	34.137	37.457
0.4	31.076	33.385	36.872
0.6	29.312	32.699	36.395
0.8	27.966	32.073	35.767
1.0	27.104	30.635	33.643

噪声密度P	噪声图像	标准中值滤波(9×9)	本文滤波
0.1	37.042	34.079	36.677
0.2	33.999	32.405	34.865
0.4	31.080	30.348	32.537
0.6	29.301	28.946	31.084
0.8	28.052	28.008	30.606
1.0	27.082	30.511	32.743



(a) 原图像 (b) 噪声图像 (p=0.2) (c) 均值滤波图像 (d) 中值滤波图像 (p=0.2) (e) 本文滤波

图 2 原图像及其实验结果

表 3 Lena图像本文滤波与中值滤波输出信噪比比较

噪声概率密度P	噪声图像	标准中值滤波(9×9)	本文滤波
0.1	37.079	33.389	36.415
0.2	34.05	31.984	34.746
0.4	31.027	30.082	32.517
0.6	29.306	28.773	30.096
0.8	28.057	27.946	29.574
1.0	27.075	30.411	28.385

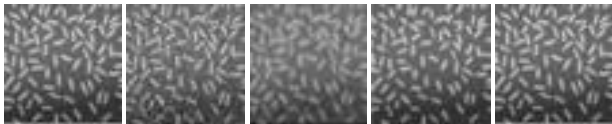


(a) 原图像 (b) 噪声图像 (p=0.4) (c) 均值滤波图像 (d) 中值滤波图像 (e) 本文滤波

图 3 原图像及其实验结果

表 4 米粒图像本文滤波与中值滤波输出信噪比比较

噪声概率密度P	噪声图像	标准中值滤波(9×9)	本文滤波
0.1	37.044	33.078	36.717
0.2	33.962	31.775	33.465
0.4	31.03	29.951	31.796
0.6	29.312	28.708	30.843
0.8	28.032	27.916	29.382
1.0	27.081	30.568	30.515



(a) 原图像 (b) 噪声图像 (p=0.2) (c) 均值滤波图像 (d) 中值滤波图像 (e) 本文滤波

图 4 原图像及其实验结果

4 结束语

通过建立核函数,具有对噪声的识别更加准确的特点,更能准确地反映实际数据的分布特征。本文噪声检测方法标准中值滤波相比,既可有效地滤除脉冲噪声,又可以较好地保持图像边缘细节。说明了该方法的有效性,对数字图像处理的研究工作有重要意义。

参考文献:

[1] 姚天任,孙洪.现代数字信号处理[M].武汉:华中理工大学出版社,2002.

[2] 阮秋琦.数字图像处理学[M].北京:电子工业出版社,2001.

[3] CASTLEMAN K R. Digital image processing[M]. [S. l.]: Prentice Hall, 1996.

[4] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992:241-243.

[5] 李焕荣,林健.基于一类分类的聚类方法及其应用[J].计算机工程,2005, 10(5):36-38.

[6] ARAKAWA K. Median filter based on fuzzy rules and its application to image restoration[J]. Fuzzy Sets and Systems,1996, 77(1): 3-13.

[7] TOPRAK A, GÜLER I. Impulse noise reduction in medical images with the use of switch mode fuzzy adaptive median filter[J]. Digital Signal Processing,2007, 17(4):711-713.

[8] TOPRAK A, GÜLER I. Suppression of impulse noise in medical images with the use of fuzzy adaptive median filter[J]. Journal Medical Systems, 2006, 30(6):465-471.

[9] 孙兆林. MATLAB 6. x 图像处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.

ature based inpaintings[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 63(2): 564-592.

[5] LIANG Lin, LIU Ce, XU Ying-qing, et al. Real-time texture synthesis by patch-based sampling[J]. ACM Trans on Graphics, 2001, 20(3): 127-150.

[6] DRORI I, COHEN-OR D, YESHURUN H. Fragment based image completion[J]. ACM Trans on Graphics, 2003, 22(3): 303-312.

[7] CRIMINISI A, PE' REZ P, TOYAMA K. Object removal by exemplar-based inpainting[C]// Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Madison: [s. n], 2003: 721-728.

[8] CRIMINISI A, PE' REZ P, TOYAMA K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212.

[9] SUN Jian, YUAN Lu, JIA Jia-ya, et al. Image completion with structure propagation[J]. ACM Trans on Graphics, 2005, 24(3): 861-868.

[10] NIE Dong-dong, MA Li-zhuang, Xiao Shuang-jiu. Digital image inpainting by example-based image synthesis method[J]. High Technology Letters, 2006, 12(3): 276-282.

(上接第 1993 页)它通过定义新的优先权计算函数,克服了原有算法在图像低纹理区域受边缘梯度强度的制约,且优先权过低的弊病。尤其是该算法通过预测修复后图像块统计属性,对所有待匹配的图像块进行筛选,不仅加快了图像修复过程,而且通过色彩均值的限制,削弱了传统算法中参与匹配的像素与其他未匹配像素间的色彩跳变问题,减少了由此而来的修复问题。实验分析表明,本文算法在修复时间和修复效果方面的表现都非常突出。

参考文献:

[1] BALLESTER C, BERTALMIO M, CASELLES V, et al. Filling-in by joint interpolation of vector fields and gray levels[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(8): 1200-1211.

[2] BERTALMIO M, SAPIRO G, CASELLES V, et al. Image inpainting [C]// Proc of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New Orleans: [s. n], 2000: 417-424.

[3] CHAN T F, SHEN Jian-hong, ZHOU Hao-min. Total variation wavelet inpainting[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2006, 25(1): 107-125.

[4] CHAN T F, KANG H S, SHEN Jian-hong. Euler's elastica and cur-