

# 自适应偏心窗口平滑滤波图像修复

秦 川, 黄素娟, 王朔中

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

**摘 要:** 提出一种自适应平滑滤波数字图像修复新算法, 采用变动中心的非线性平滑滤波算子, 克服了固定中心点算子产生的边缘模糊问题。为了兼顾处理效果和计算效率, 根据待修复的像素是位于图像平滑区还是边缘突变区, 自适应地切换处理方法。实验表明, 该算法对 2 种类型的像素均能取得较好的修复效果。提出用“分块校验和”方法在需要保护的图像中嵌入脆弱数字水印, 一旦图像受损, 即可精确得到损坏像素的定位模板, 在修复中不再需要人工干预。

**关键词:** 图像修复; 平滑滤波; 边缘; 脆弱数字水印; 损伤定位

## Image Inpainting with Adaptive Offset Smoothing Operator

QIN Chuan, HUANG Su-juan, WANG Shuo-zhong

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

**【Abstract】** An image inpainting technique with adaptive filter is proposed. The filter is a nonlinear smoothing operator with a window whose center may deviate from the current missing pixel to be estimated in order to avoid edge blurring. The size and position of the window are adaptively chosen so that the gray-level variance of the interior pixels is below a given threshold and the number of undamaged pixels is sufficiently large. For a tradeoff between image quality and computation efficiency, the algorithm switches between the eccentric window approach for pixels near edges, and the conventional centered window for pixels in a smooth area. Experimental results show that the proposed method provides good results for both types of pixels. In addition, a fragile watermark is embedded into the image to be protected by using a modified checksum method. In this way, subsequently damaged regions can be easily located.

**【Key words】** image inpainting; smoothing filter; edge; fragile digital watermark; damage localization

### 1 概述

数字图像修复(image inpainting)是一种以不容易察觉的方式修改图像的技术, 它可用于修复损坏的图像或照片、自动填充和去除图像中选定的区域或对象、消除可见水印、实现特技效果, 还可用于 JPEG 图像在恶劣信道传输时丢失块的恢复等。在一般的图像增强和恢复中, 待处理的图像区域既包含噪声又包含有用信息, 而在图像修复中, 待修复的区域通常不含有用信息, 而是利用周围区域的信息生成新的像素来实现的。

21 世纪初以来不少学者对图像修复进行了较系统的研究。文献[1]根据经典流体力学的思想, 提出了基于偏微分方程(Partial Differential Equation, PDE)的图像修复方法。通过 PDE 的不断迭代, 沿着图像的等照度线方向将灰度值信息传播至损坏的图像区域, 直到沿等照度线方向灰度值为常数, 停止迭代完成修复过程。文献[2]提出一种多分辨率图像分块修复算法, 对不满足恢复条件的图像分块继续进行更高分辨率的划分, 直到满足条件后用该分块的信息来恢复分块中的损坏像素。在文献[1]的基础上, 文献[3]又将 PDE 方法与纹理合成方法<sup>[4]</sup>相结合来对损坏图像进行修复: 首先将待修复的图像分解成结构轮廓层和纹理层, 对这 2 个图像分层分别利用 PDE 方法和纹理合成方法进行处理, 再将这 2 个分层叠加得到修复的结果。

文献[5]提出的自适应图像修复算法与文献[2]类似, 即自适应地增大图像中包含损坏像素的窗口, 利用满足条件的窗口内像素的均值来恢复损坏像素。当待修复区离灰度突变的

边缘足够远时, 这种方法可给出良好的修复结果。本文指出该算法存在的问题并进行改进, 提出一种基于自适应变动中心点窗口平滑滤波器的方法, 根据周围未损坏区的灰度值通过特定的插值计算来恢复待修复区的缺损像素值。

另一方面, 绝大多数已公开发表的有关论文均未讨论图像损坏区域的定位问题, 而是人工预先指定受损或需要填补的位置再运用修复算法。损伤区域的准确定位是图像修复方法能够应用于实际的一个关键, 本文给出一种基于脆弱数字水印技术的方法, 可对嵌入水印后产生的损伤进行准确定位。

### 2 自适应变动中心点窗口平滑滤波图像修复

#### 2.1 可变窗口尺寸的修复算法及存在问题

文献[5]建议采用一种基于窗口的算法, 其要点是以某个待修复的损坏像素为中心, 取一个大小为  $n \times n$  的窗口, 计算该窗口内完好像素所占百分比。如果该百分比大于预先设定的对应于这种大小窗口的阈值, 则用窗口内完好像素的均值来替代窗口中心的损坏像素, 完成一个像素的恢复。若窗口内完好像素的百分比小于预先设定的阈值, 则增大窗口尺寸继续执行上述操作, 直到窗口尺寸达到预先设定的最大值时停止迭代。此时就用最大值窗口内完好像素的均值来替代中心像素。遍历每个损坏像素执行上述运算可完成整幅图像的

**基金项目:** 上海市重点学科建设项目资助项目(T0102)

**作者简介:** 秦 川(1980 - ), 男, 博士研究生, 主研方向: 数字图像修复, 信息隐藏; 黄素娟, 讲师、博士研究生; 王朔中, 教授、博士、博士生导师

**收稿日期:** 2007-03-10 **E-mail:** qcme@163.com

修复过程。为了避免误差的扩散，计算窗口均值时不能将恢复出的像素灰度值当作完好像素考虑在内。

当损坏像素位于图像的平滑区域时，上述算法恢复效果良好。但在图像中灰度发生突变处，修复图像中会出现明显的模糊现象，导致修复质量欠佳。产生这一问题的原因如图1所示，其中，A、B分别为图像中2个灰度值差异较大的区域； $p$ 是位于A、B边界附近的待修复像素。根据文献[5]的算法，用图1(a)中虚线窗口内的完好像素均值来产生像素 $p$ 的灰度值。由于A、B两区域中的像素灰度差异很大，得到的平均值显然难以代表 $p$ 受损以前的值，其结果是产生边缘模糊。较为合理的方法是用图1(b)所示的虚线窗口中完好像素的均值来生成像素 $p$ 。就是说，用灰度值方差较大的窗口内的有效像素均值来进行修复不能准确地表示损坏像素的原有信息，而应该用灰度值变化较小并包含待修复像素的窗口来修复。图1(b)所示窗口内的像素值方差较小，得到的修复像素比较接近于受损像素的原有信息。

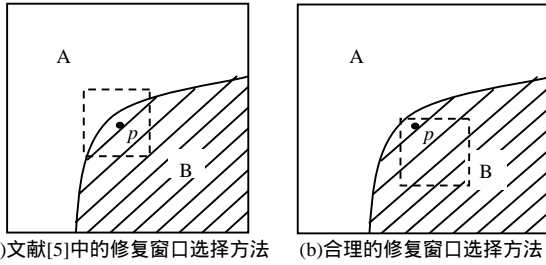


图1 不同窗口选择所导致的不同修复效果

## 2.2 中心位置可变的自适应窗口

针对上述情况，可采用一种基于变动中心点窗口平滑滤波器的修复算法，较好地克服边缘突变区域像素恢复出现的图像模糊问题。算法要点是自动选择包含待修复像素而且灰度值方差小的窗口，待修复像素可以不在窗口中心。对位于边缘突变区域的损坏像素，遍历搜索所有包含该像素的窗口，即不断变动其中心点的位置，待修复像素在窗口中的位置随之变化。计算窗口中完好像素灰度值的方差和损坏像素数所占的百分比，当两者满足预定条件时，则用窗口内的有效像素均值来恢复；若不存在满足条件的位置则增大窗口继续搜索。

可见修改的算法在窗口尺寸自适应算法的基础上增加了对窗口位置的自适应调整。对位于灰度值变化较小的图像区域的损坏像素可直接采用文献[5]的方法，而不必考虑窗口方差的约束条件，以免不必要地增加计算复杂度。可以根据待修复像素是位于平坦区还是灰度突变区来切换处理方法，在处理效果和计算效率两方面达到平衡。算法流程如下：

(1)假设当前待修复像素 $p_0$ 在图像 $I$ 中的坐标位置为 $(x, y)$ 。计算以 $p_0$ 为中心、大小为 $(2d+1) \times (2d+1)$ 的邻域 $P$ 内有效像素的灰度均值 $M_p(x, y)$ 和代表邻域 $P$ 内灰度起伏程度的广义标准差 $V_p(x, y)$ ：

$$M_p(x, y) = \frac{1}{N_e} \sum_{i,j} I(x+i, y+j) - d \quad i, j \quad d \quad (1)$$

$$V_p(x, y) = \frac{1}{N_e} \sqrt{\sum_{i,j} [I(x+i, y+j) - M_p(x, y)]^2 - d \quad i, j \quad d} \quad (2)$$

以上两式中 $N_e$ 为邻域 $P$ 中除了损坏及修复过的像素外的全部有效像素数目，求和是对这 $N_e$ 个有效像素进行的。

(2)判断待修复像素 $p_0$ 是位于图像 $I$ 的平滑区域还是边缘突变区域：

$$\begin{cases} V_p(x, y) < V_{TH} & p_0 \text{属于平滑区域} \\ V_p(x, y) > V_{TH} & p_0 \text{属于边缘区域} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $V_{TH}$ 为预先设定的阈值。

(3)若 $p_0$ 属于平滑区域则利用文献[5]中的算法来恢复，这里不赘述。若 $p_0$ 属于边缘突变区域则利用本文提出的变动中心点窗口平滑滤波器的算法来恢复。遍历搜索方差和损坏像素百分比最小，且包含 $p_0$ 的窗口，综合考虑方差和百分比这两个条件，可得出一个距离 $T_{d0}$ 。在执行算法时将每个窗口的方差和损坏像素百分比数值都归一化到 $[0, 1]$ 之间，分别得到2个值 $D_s$ 和 $D_p$ 。距离 $T_d$ 由 $D_s$ 和 $D_p$ 分别乘以各自的权重 $C_s$ 和 $C_p$ 求和得到：

$$T_d = C_s D_s + C_p D_p \quad (4)$$

其中， $C_s, C_p \in [0, 1]$ ，且 $C_s + C_p = 1$ 。若遍历搜索到所有包含 $p_0$ 窗口的 $T_d$ 值中的最小值小于预定的 $T_{d0}$ ，则用该最小 $T_d$ 值对应的窗口均值来恢复 $p_0$ ，若大于 $T_{d0}$ 则按给定窗口大小序列增大窗口尺寸，并继续步骤(3)。按照一定的次序对待修复区域中的所有损坏像素执行上述算法步骤，完成整个修复过程。

## 2.3 实验结果与分析

实验采用Cameraman标准图像，大小为 $256 \times 256$ 。其中 $2d+1$ 的值取待修复图像高度或宽度的 $1/25$ ； $T_{d0}$ 取值为0.9， $V_{TH}$ ， $C_s$ 值可调节。预定窗口大小的序列为 $[11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91, 101]$ 。图2(a)为原始完好图像；图2(b)为待修复的损伤图像；图2(c)为采用文献[5]算法得到的结果；图2(d)为采用本节算法得到的结果。

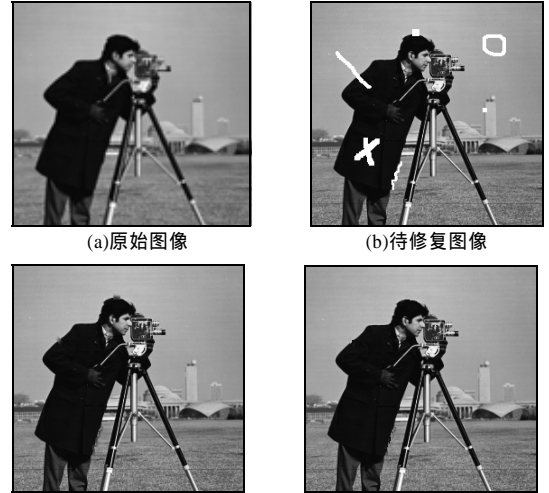


图2 Cameraman 图像修复结果

实验参数为： $V_{TH}=8.0$ ， $C_s=0.8$ ， $C_p=0.2$ 。当损伤区位于边缘时文献[5]的方法使边缘发生模糊，而采用自适应窗口中心移动可避免产生这种模糊现象。通过将修复结果与原始完好图像进行比较，并计算峰值信噪比 $PSNR$ 如式(5)，可见基于自适应变动中心点窗口平滑滤波器的修复算法性能优于文献[5]中提出的算法。

$$PSNR = 20 \lg \frac{M_I}{\sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I_0(i, j) - I(i, j)]^2}} \quad (5)$$

其中， $I_0$ 为用于评价修复结果的完好图像； $I$ 为修复后的图像； $M_I$ 为 $I$ 中所有像素灰度的最大值； $m$ 和 $n$ 为图像 $I_0$ 、 $I$ 的大小。图3是对图2(b)在不同 $V_{TH}$ 和 $C_s$ 参数下修复得到结果的 $PSNR$ 曲线。图中有一条水平线，它对应的 $V_{TH}$ 参数值较大，使得该参数下的损坏像素修复均按平滑区域即文献[5]中的算法处理，

与参数 $C_s$ 无关,因而PSNR为常数。实验结果表明,选取适当的 $V_{TH}$ 和 $C_s$ 值,采用中心偏移的平滑窗口可得到比文献[5]的算法更高的PSNR值。

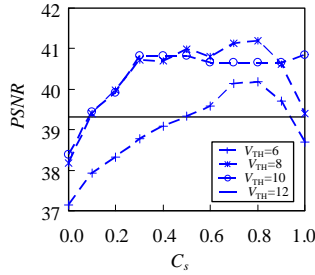


图3 不同 $V_{TH}$ 和 $C_s$ 参数下Cameraman图像修复结果的曲线

### 3 基于脆弱数字水印的损坏像素模板定位

至今公开报道过的修复算法在对图像修复时均不考虑损伤像素的自动定位,而是用人工方法提供一个模板来确定待修复像素的位置,这在实际应用中是不方便的。本文利用完全脆弱数字水印技术实现对损坏像素的精确定位,可在一定条件下解决损伤像素定位的问题。

文献[6]提出的校验和方法是一种空间域完全脆弱水印算法。该算法计算每8个连续像素中最高7位联合长度的二进制位模2和,得到的校验和是一个56比特数据。该算法随后在图像中随机选取56个像素,使每个像素的最低有效位(LSB)变为与上述校验和的各比特对应相同,从而在图像中保存了校验和,完成水印的嵌入。提取水印时,只需再次计算图像的校验和,并检查它是否与指定位置上提出的LSB序列一致,便可知图像是否遭到过篡改。但该算法无法直接确定篡改的位置,只能给出一个图像是否被篡改的二值判断。

以下对该算法进行修改使其具有定位功能。首先将原始图像分成大小为 $S_b$ 的块,针对每个块进行类似校验和算法的操作:计算各块中每 $N_p$ 个连续像素最高 $N_b$ 个比特位联合长度的二进制位模2和,结果为 $N_p \times N_b$ 比特的数据;再将这个比特序列嵌入到分块像素的LSB位中即完成水印的嵌入。注意需满足条件:

$$N_p N_b < S_b S_b \quad (6)$$

在验证时将从LSB位提取出的比特序列与再次计算出的比特序列进行比较,如不一致则判断该图像块遭到损坏,反之完好无损,这样即可得到图像损坏像素的定位模板。可将嵌入脆弱水印的过程作为对要保护的原始图像的预处理,以后当含有水印的图像遭到损坏时就可以自动实现损坏像素的定位,以便进行修复。注意该算法的定位精度为分块大小 $S_b \times S_b$ ,可调节 $N_p$ ,  $N_b$ ,  $S_b$ 这3个参数以达到合适的定位精度同时使其满足式(6)。实验中参数取为: $S_b=3$ ,  $N_b=2$ ,  $N_p=3$ 。实验结果如图4所示,其中,图4(a)为含脆弱水印的待修复Lena图像,图4(b)为提取出的损坏像素定位模板,图4(c)为根据模板定位的修复结果。

需要指出,目前存在一类基于脆弱水印的图像篡改检测和恢复算法,也可以确定篡改位置并能在一定程度上恢复图像。但是与图像修复技术不同,这些算法在预处理阶段不仅要嵌入用于篡改定位的比特,还要嵌入用于恢复图像的比特,因此,嵌入数据量大,对图像质量会产生较大的影响。本文在预处理阶段仅嵌入用于模板定位的脆弱水印,对图像的修复是依靠损伤区域邻近的像素实现的,并不使用图像中嵌入

的额外信息。

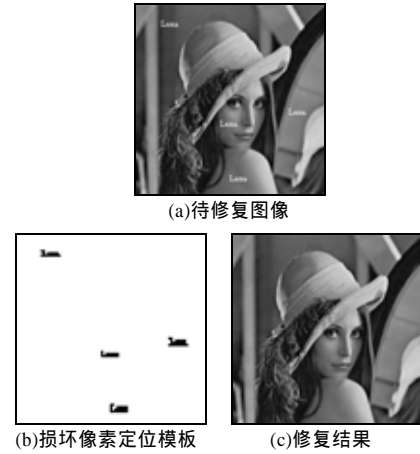


图4 损伤像素定位及修复结果

### 4 结束语

当用于图像修复的平滑窗口跨越灰度突变的边缘时,会使清晰的轮廓变得模糊。本文通过自动寻找起伏较小而且未受损的完好像素数目较多的最佳窗口,对图像中处于边缘附近的损伤区进行修复,有效地避免了这种现象,改进了修复质量。窗口的几何中心通常会偏离要修复的当前像素。为了不过分增加计算复杂度,在较平坦的区域仍应使用中心位于当前待修复像素的窗口。今后将研究更为复杂的情况,例如当同时存在以纹理为主的缺损区域时,需要对基于方差的判断准则式(3)进行修改。

采用分块校验和的方法在图像中嵌入脆弱水印,可在以后图像受损时准确定位需修复的部位。该方法适用于保护某些可能受到破坏的图像,例如拟通过衰落信道传输的JPEG图像。不同于用脆弱水印进行篡改检测和恢复,这里只嵌入用于定位的少量数据,修复时利用的还是缺损区邻域的图像信息。

### 参考文献

- [1] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image Inpainting[C]//Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphic'00. [S. l.]: ACM Press, 2000: 417-424.
- [2] Shih T K, Lu Liangchen, Wang Yinghong, et al. Multi-resolution Image Inpainting[C]//Proceedings of 2003 International Conference on Multimedia and Expo.. Baltimore: IEEE Press, 2003-07: 485-488.
- [3] Bertalmio M, Vese L, Sapiro G, et al. Simultaneous Structure and Texture Image Inpainting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 882-889.
- [4] Efros A A, Leung T K. Texture Synthesis by Non-parametric Sampling[C]//Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision. Corfu, Greece: [s. n.], 1999: 1033-1038.
- [5] Shih T K. Adaptive Digital Image Inpainting[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Fukuoka, Japan: [s. n.], 2004: 71-76.
- [6] Walton S. Information Authentication for a Slippery New Age[J]. Dr Dobbs Journal, 1995, 20(4): 18-26.