

# 基于梯度信息的快速自适应图像修补方法<sup>①</sup>

## A Fast Adaptive Image Inpainting Algorithm Based on Gradient

何 静 赵凤群 晁永国 韩舒然 (西安理工大学 理学院 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 提出了一种基于梯度信息的快速自适应图像修补方法。首先采用快速推移方法决定当前要修补的破损点, 然后采用自适应机制, 根据其周围已知点个数的多少, 选择参考窗口的大小, 最后在此窗口中, 引入已知点梯度信息, 根据本文构造的破损点灰度值计算公式, 计算出破损点的灰度值。实验结果表明, 本文方法能明显减少修补时间, 同时取得很好的修补效果。

**关键词:** 自适应图像修补 梯度 快速推移

### 1 引言

数字图像修复技术最早是由 Bertalmio 等人于 2000 年提出的, 同时提出了一种基于偏微分方程的 BSCB 算法<sup>[1]</sup>, 该算法将破损区域外的信息沿等照线方向扩散到修补区域内, 取得了很好的修补效果。2001 年, Chan 等人提出将整体变分(total variation, TV)模型<sup>[2]</sup>用于图像修补, 该算法能在噪声情况下有效地对图像进行修补, 但容易在图像的平坦区域产生阶梯效应。随后, Chan 等人又在 TV 模型的基础上提出了 CDD 模型<sup>[3]</sup>, 克服了 TV 模型不满足视觉理论中连通原理的缺点。以上各方法本质上都是求解一个偏微分方程, 用它描述缺损区域中的扩散情况, 采用迭代公式, 修补一个点往往需要几千次的迭代, 运算时间比较长<sup>[4]</sup>。另外, Oliveira 等人<sup>[5]</sup>提出了一种基于扩散卷积核的快速图像修补方法, 该方法对结构简单的图像有较好的修补效果, 且修补时间大大缩短。但是这种方法在修补之前必须人工把图像中梯度较大和较小的区域区分开来, 对它们分别进行修补才不至于产生模糊<sup>[4]</sup>。Telea 提出了一种新的图像修补算法<sup>[4]</sup>, 它将破损区域看成水平集, 并用快速推移法来传递图像信息, 具有较快的修补速度, 但是当破损区域的宽度超过 10-15 个像素时, 容易产生模糊现象, 尤为明显的是当变化剧烈的等照线相交时, 修补后的边界不连续。国内许多学者<sup>[6-8]</sup>也在图像修补效果方面做出了一些改进, 但在修补时间方面都没有明显的减少。

为了克服以上算法修补时间长, 自动性差等缺点, 本文提出了一种基于图像梯度信息的快速自适应图像修补方法。首先采用快速推移方法决定当前要修补的破损点, 然后再利用自适应算法对该点进行修补。我们认为对于不同的破损点应当进行不同的处理, 因此对于每个破损点先检测其邻域内已知点个数的多少, 决定参考点的范围, 给出参考窗口的大小, 然后以梯度和距离构造权系数, 设计破损点灰度值计算公式, 并在参考窗口中对破损点的灰度值进行计算。实验结果表明, 本文方法能明显减少修补时间, 同时取得很好的修补效果。

### 2 自适应图像修补方法

通常, 求一个破损点灰度值的方法是通过计算其周围像素点灰度值的平均值。然而, 在大多数情况下, 破损点的周围仍然存在其它的破损点。如果一个修补算法采用破损点邻域内的已知点和已修补的点, 这样得到的破损点的灰度值很可能是错误的。这是因为一个错误的已修补点的灰度值会引起一系列错误的结果, 尤其当破损点位于边缘附近时。因此, 最好的解决方法就是只运用那些已知的像素点。

本文自适应图像修补方法的思想是: 对每一个破损点  $x_0$ , 以它为中心, 构造一个半径为  $w$  的自适应窗口  $S$ , 在  $S$  内分别计算已知点的个数  $U[w]$  和已修补点的个数  $N[w]$ 。当  $U[w]$  大于  $S$  中已知点个数的阈值  $T_1$

① 基金项目: 陕西省教育厅自然科学研究项目(08JK403); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2005A18)

收稿时间: 2008-09-02

时,认为  $S$  中存在足够多的已知点用以修补该破损点,这时用本文构造的基于梯度信息的灰度值计算公式计算该点的灰度值;当  $U[w]$  小于  $T_1$  时,认为已知点的个数不足以修补破损点,增大自适应窗口的半径  $w$ ,直到满足条件。这里有两种极端情况需要说明:第一,当  $w$  增加到一定程度时,如  $w > 10$  时还不满足条件,说明该图像已经严重损坏,在此情况下,采用全局平均灰度值来修补该破损点。第二,当  $U[w]$  等于 0 时,说明在  $S$  中,该破损点周围没有已知点,这时判断已修补点的个数  $N[w]$  是否大于  $S$  中已修补点个数的阈值  $T_2$ ,若是,则认为  $S$  外极有可能存在已知点,增大  $w$ ,继续寻找已知点;若不是,则用全局平均灰度值来修补该破损点。

## 2 基于梯度信息的灰度值计算公式的构造

破损点的灰度值通常是其邻域内所有已知点灰度值的加权平均。破损点与已知点之间的距离越小说明其对破损点的影响越大,反之,距离越大影响越小。采用已知点的梯度信息,可以最大程度地保持图像的结构信息。由于图像沿边缘方向的梯度较小,而垂直边缘的方向梯度较大,因此认为,破损点的灰度值应接近于其周围各点中梯度较小的点,即梯度值越大,权值越小,梯度值越小,权值越大。因此本文利用破损点和已知点之间的距离,以及已知点的梯度信息来构造加权系数。

引入 Perona 各向异性扩散模型中的扩散率函数作为梯度权值,即

$$g(x) = \frac{1}{1 + (I_x^2 + I_y^2) / \lambda^2} \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为待定参数, $\lambda$  值越小越趋于对边缘的增强,越大越趋于增强图像的平滑作用。 $I_x$  和  $I_y$  分别为图像  $I(x)$  在  $x$ ,  $y$  方向的偏导数。

定义距离权值的计算公式  $h(x, x_0)$  为:

$$h(x, x_0) = \left(1 - \frac{|i - i_0|}{w+1}\right) \left(1 - \frac{|j - j_0|}{w+1}\right) \quad (2)$$

其中,  $x$  的坐标为  $(i, j)$ ,  $x_0$  的坐标为  $(i_0, j_0)$ ,  $w$  为自适应窗口的半径。

将梯度权值  $g(x)$ , 距离权值  $h(x, x_0)$  和图像  $I(x)$  的掩码信息  $mask(x)$  结合,定义基于梯度信息的破损点灰

度值计算公式为:

$$I(x_0) = \frac{\sum_{x \in R} g(x) h(x, x_0) mask(x) I(x)}{\sum_{x \in R} g(x) h(x, x_0) mask(x)} \quad (3)$$

其中,  $R$  为自适应窗口  $S$  中所有点的集合。

对于梯度计算过程中偏导数的离散本文采用如下方法:在某一点  $x(i, j)$  求偏导数时,通常采用中心差分格式,然而在图像修补问题中,此点的 4 邻域很可能存在破损点,其灰度值未知,因此用中心差分法无法计算。本文采用从  $x$  向上、下、左、右,4 方向寻找最近已知点,令其坐标分别为  $x_u(i, j_u)$ ,  $x_d(i, j_d)$ ,  $x_l(i, j)$ ,  $x_r(i_r, j)$ 。则在  $x(i, j)$  处,其偏导数计算公式为:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \Big|_{x(i,j)} \approx \frac{I(x_r) - I(x_l)}{i_r - i_l}, \quad \frac{\partial I}{\partial y} \Big|_{x(i,j)} \approx \frac{I(x_u) - I(x_d)}{i_u - i_d} \quad (4)$$

## 3 自适应图像修补方法流程

破损点的修补顺序对修补结果有着极大的影响,通常图像修补的顺序是按图像扫描的顺序从上到下、从左到右进行,但按这种修补顺序得到的修补效果不好。因为当破损区域左边或上边的已修补点误差较大时,其向后传播的误差更大。为此,本文采用快速推移方法(fast marching method, FMM)[9]来确定破损点的修补顺序。这与手工修补相类似,首先从可信度较大的点开始修补,逐步向内推进。

自适应图像修补方法流程如下:

### 1) 初始化

对图像  $I(x)$  手工制作掩码  $mask(x)$  (令  $I(x)$  中破损点对应的位置  $mask(x) = 1$ ; 不需修补的点,令  $mask(x) = 0$ )。

### 2) 修补

① 根据 FMM 确定当前要修补的点  $x_0$ , 定义以  $x_0$  为中心, 初始半径  $w = 1$  的窗口  $S$ 。

② 在  $S$  中, 计算  $U[w]$ ,  $N[w]$ 。

③ 判断  $w$  是否大于 10。若是, 则用全局已知点的灰度平均值赋给  $I(x_0)$ , 转⑤; 若不是, 转④。

④ 判断  $U[w]$  是否为 0。a) 若不是, 则判断  $U[w]$  是否大于  $T_1$ 。若是, 则在  $S$  中, 根据基于梯度信息的灰度值计算公式求出该点的灰度值, 转⑤; 若不是, 则  $w = w + 1$ , 转②。b) 若是, 则判断  $N[w]$  是否大于  $T_2$ 。若是, 则  $w = w + 1$ , 转②。若不是, 则用全局已知点

的平均灰度值赋给  $I(x_0)$ ，转⑤。

⑤ 判断 FMM 的 Band 中有没有新的像素加入。没有，说明图像已修补完毕，结束整个算法。否则转①。

表 1 不同窗口大小下已知点和已修补点个数的阈值

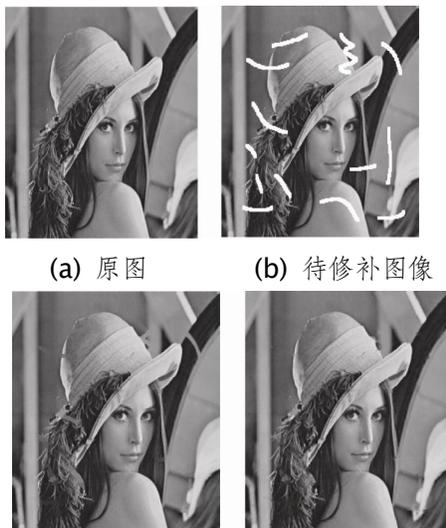
w 阈值	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_1$	1	2	5	8	15	24	41	52	72	97
$T_2$	2	6	12	21	34	51	82	98	130	168

表 1 中， $T_1$  表示在以  $w$  为半径的窗口中已知点个数的阈值， $T_2$  表示已修补点个数的阈值。以上数据是根据 3000 多幅不同类型图像实验结果得到的。

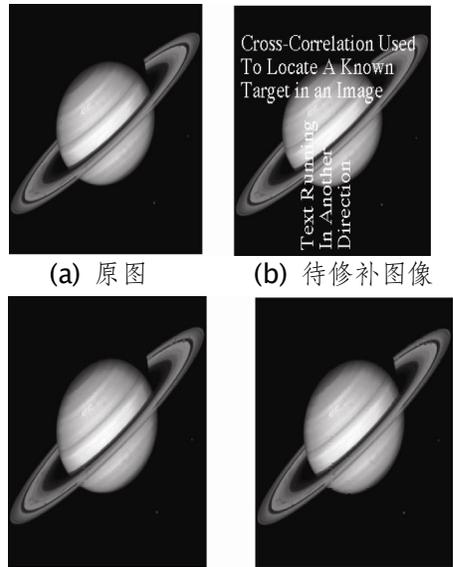
### 4 实验结果分析

图像修补结果好坏的评价目前仍以主观评价为主，本文在 Matlab7.0 上用 TV 修补算法和本文提出的自适应图像修补方法分别进行划痕修复、文字去除以及彩色图像中特技效果方面的实验。TV 算法的迭代终止条件为迭代次数大于 1000 次，或者前后两次迭代的最大误差为。

图 1 是对 Lena 图像中划痕的修复结果。从图 1(c) 中看到，右上角被割断的部分经过 TV 算法的修补并没有连接起来，同时在帽沿、羽毛等处都存在瑕疵和模糊。而在图 1(d) 中，本文方法除在帽子边缘存在不平滑的修补外，将右上角被割断的部分连接起来，同时在帽子上的羽毛处，能看到清晰的纹理结构，修补的质量优于 TV 算法。图 2 是对文字去除的结果图。从图 2 可看出两种算法对文字去除都有很好的修补结果。

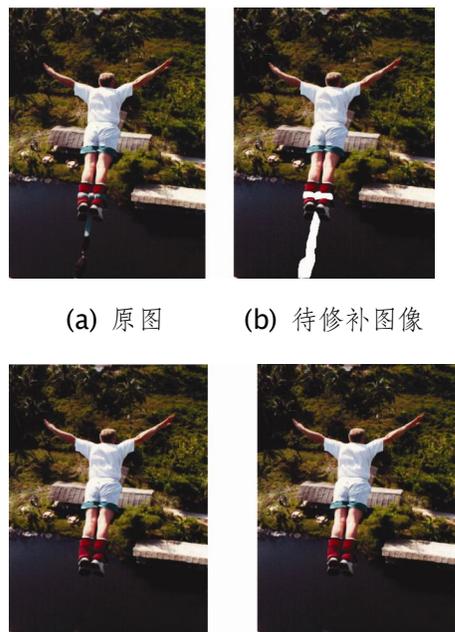


(c) TV 算法 (d) 本文方法结果图  
图 1 Lena 图像划痕修复结果图



(c) TV 算法 (d) 本文方法结果图  
图 2 文字去除结果图

本文算法可以很容易地推广到彩色图像的处理中。图 3 所示为对彩色图像进行特技效果的处理。可以看出，两种方法都有很好的修补结果。



(c) TV 算法 (d) 本文方法结果图  
图 3 特技效果结果图

从表 2 中的数据可以看出，本文快速自适应图像修补方法的运算时间远远小于 TV 算法的运算时间。

(下转第 117 页)

表 2 运算时间对比 (单位: s)

效果图 方法	划痕 修复	文字 去除	特技 效果
TV 算法	215	151	99
本文方法	3	3	2

## 5 结论

本文提出了一种快速自适应图像修补方法。对于破损点的个数在 6000 个之内时,能将修补时间控制在 5 秒之内。同时将梯度信息引入到加权系数中,使图像的结构信息得到较好的保持,所以非常适合作为图像处理软件的插件使用。本文方法的缺点是将图像破损区域的宽度限定在 20 个像素之内,如何对较大区域进行修补,将是今后继续研究的方向。

### 参考文献

- Bertalmio M, Sapiro G, Ballester C, Caselles V. Image inpainting. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, New Orleans, 2000:417 - 424.
- Chan TF, Shen J. Mathematical models for local non-texture inpainting. SIAM Journal of Application Mathematics, 2001,62(3):1019 - 1043.
- Chan TF, Shen J. Non-texture inpainting by Curvature-Driven Diffusions(CCD). Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12(4): 436 - 339.
- Telea A. An image inpainting technique based on the fast marching method. Journal of Graphics Tools, 2004, 9(1): 23 - 24.
- Oliveira M, Brian B, Richard M. Fast Digital Image Inpainting.Proceedings of the International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing(VIIP 2001), Marbella, Spain, 2001:261 - 266.
- 郑精灵,王树根.整体变分算法在图像修补中的应用研究.计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(10): 1218 - 1223.
- 邵肖伟,刘政凯,宋璧.一种基于 TV 模型的自适应图像修复方法.电路与系统学报,2004,9(2):113 - 117.
- 张红英,彭启琼.一种基于 p-laplace 算子的图像修补算法.2005 年通信理论与信号处理年会论文集.北京:电子工业出版社,2005:387 - 391.
- Sethian JA. Fast Marching Methods. SIAM Review, 1999,41:199 - 235.