

一种快速的图像修复算法

侯正信 何宇清 许微

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 处理图像修复问题的一类主要方法是建立偏微分方程,用迭代的方法来求解,其中最具代表性的算法是BSCB(Bertalmio-Sapiro-Caselles-Bellefleur)算法。针对BSCB模型速度很慢的缺点,提出了结合扩散率函数的选择性自适应插值算法。实验结果表明,该算法简便易行,使运算速度比BSCB模型提高了很多,同时修复的效果也有所改善。

关键词 图像修复 BSCB模型 扩散率函数

中图分类号: TN919.8 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)10-1909-04

A Fast Algorithm of Image Inpainting

HOU Zheng-xin, HE Yu-qing, XU Wei

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract A primary class of the image inpainting technique is to build up a partial differential equation, and solve it with some iterative method. One of the most representative inpainting algorithms is BSCB model. Because BSCB model's main drawback is slow calculation, this paper proposes selective adaptive interpolation algorithm based on diffusivity function. The experimental results show that this method is easier to implement and faster in computation than BSCB model, and improves the inpainting effects.

Keywords image inpainting, BSCB model, diffusivity function

1 引言

修复本来是艺术专业名词,一个典型的数字图像修复问题为:设 I 为区域 Ω 上的一幅图像,待修复区域 $D \subset \Omega$ 上的图像缺损。区域 D 可以是非连通的,区域 $I|_{\Omega \setminus D}$ 为已知信息区域,可以包含噪声。如何利用已知数据去除噪声和修复区域 D 上的图像,以恢复图像的本来面目或使整幅图像达到可以接受的视觉效果便是图像修复的任务。

图像修复大致可以分为结构图像修复和纹理图像修复两大类^[1]。本文所提出的算法都是针对结构图像的修复算法。

2 基于扩散率函数的自适应插值算法

对于结构图像的修复,目前大都采用基于偏微分方程的方法,其主要思想是将破损区域周围的信息按一定方式延伸到区域内部,以达到修补图像的目的。

2.1 图像修复的BSCB模型

2000年,Bertalmio首先开始数字图像修复的研究^[2],并提出了一个三阶偏微分方程用于结构图像的修复(该方程称为BSCB模型),BSCB模型模仿了流体动力学中的N-S(Navier-Stokes equations)方程^[3]。Bertalmio等人把图像的灰度场比喻成一个

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060056051);天津市自然科学基金项目(07JCYBJC13800)

收稿日期:2007-07-16;改回日期:2007-07-25

第一作者简介:侯正信(1945-),男,教授,博士生导师,所长。1969年毕业于北京大学无线电电子学系。主要研究方向包括现代数字信号与信息处理理论、数字图像处理与编码技术、数字视频处理与通信等。E-mail: zhengxinhou@163.com

流体,那么图像灰度函数就相当于流函数,等照度线方向就是流的速度方向,而图像的光滑度就是流的漩涡。利用这些量对图像建立一个与 N-S 方程完全类似的迭代方程,用这个方法在图像的破损区域反复迭代处理,仿佛是图像的灰度场这个流体在流动,外面的流体慢慢地流进破损区域,把它填满。

BSCB 模型对待修复区域的拓扑结构没有任何要求,可允许丰富的背景,适应性好。但该模型有两个比较严重的缺点,一个是运算速度太慢,妨碍了算法的应用前景,另一个就是修复后的区域会产生模糊,尤其在修复大区域时,模糊非常明显。

2.2 扩散率函数

文献[4]中的算法改变了双线性插值中的距离权函数的形式,使得修改后的算法可直接用于分数倍的插值。图 1 所示为利用插入像素点周围的 4 个已知像素对其进行赋值。

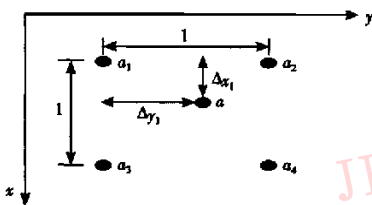


图 1 α 与 $\alpha_i (i=1,2,3,4)$ 的位置关系
Fig. 1 α and $\alpha_i (i=1,2,3,4)$ position

图 1 中, α 表示插入的像素, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 4 个点为其周围的已知像素, $\Delta x_1, \Delta y_1$ 分别表示 α 与 α_1 间的垂直和水平距离。于是

$$p(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^4 W(\alpha_i) S(\alpha_i) p(\alpha_i)}{\sum_{i=1}^4 W(\alpha_i) S(\alpha_i)} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

其中, $p(\cdot)$ 表示像素的灰度值, $S(\alpha_i)$ 是距离权函数, 其表达式为

$$S(\alpha_i) = (1 - \Delta x_i)(1 - \Delta y_i) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

$W(\alpha_i)$ 是梯度权函数, 其表达式为

$$W(\alpha_i) = (-\mu G(\alpha_i) + 1)^n \quad (3)$$

式中, n 为一个正常数, μ 是一个小于 1 的正常数, $G(\alpha_i)$ 为

$$G(\alpha_i) = \frac{|f'_x(\alpha_i)| + |f'_y(\alpha_i)|}{2 \sqrt{(f'_x(\alpha_i))^2 + (f'_y(\alpha_i))^2}} \quad (4)$$

式中, f'_x 及 f'_y 分别为图像在 α_i 处垂直和水平方向

上的导数。

一般来讲, 内插像素的灰度值与它和各原始像素点之间的距离有关, 距离越近, 影响越大。因此, 在决定内插的权值时考虑到距离因素是必要的。但单纯地用距离作为权系数来给内插的像素点赋值并没有考虑到图像的细节信息。为了保护图像的边缘, 若插入点位于平滑区域, 则应使插入像素的灰度值更多地接近平滑区域的原始像素值, 而尽量少的受边缘像素的影响, 反之, 若插入的点在边缘上, 则应使它的灰度值更多地接近边缘点灰度值, 而非平滑区域像素的灰度值。因此引入 Perona 的各向异性扩散模型中的扩散率函数作为另一个权值

$$W(\alpha_i) = \frac{1}{1 + E(\alpha_i)/\lambda^2}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

式中, λ 为待定参数, λ 值越小, 越趋向于对边缘的增强; λ 值的增大可加强对图像的平滑作用。 $E(\alpha_i)$ 为图像在 α_i 处的梯度模的平方, 即

$$E(\alpha_i) = f'^2_x(\alpha_i) + f'^2_y(\alpha_i) \quad (6)$$

由各向异性扩散模型的扩散率函数可知, W 与 E 成反比关系, E 越小, W 值越接近 1, 而随着 E 的增大, W 逐渐趋向于 0, 这一特点正符合我们对图像插值算法的要求。

将梯度权函数式(5)与距离权函数式(2)结合即可计算出插入像素的灰度值:

$$p(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^4 (W(\alpha_i) + S(\alpha_i)) p(\alpha_i)}{\sum_{i=1}^4 (W(\alpha_i) + S(\alpha_i))} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

若 I 表示一幅受损的灰度图像, $I(x, y)$ 是位于 (x, y) 处像素点的灰度值, D 表示 I 中的受损区域, ∂D 为区域的边缘, Ω 表示整幅图像的支撑域, 则 $D \subset \Omega$ 。设 (i, j) 为待修复区域边缘上的一点, 即 $(i, j) \in \partial D$, 则 (i, j) 点的灰度值 $I(i, j)$ 可由其 5×5 邻域中已知像素的灰度值决定, 表达式为

$$I(i, j) = \frac{\sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 W(i+m, j+n) S(i+m, j+n) I(i+m, j+n)}{\sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 W(i+m, j+n) S(i+m, j+n)} \quad (8)$$

其中, m, n 不同时为 0, $W(u, v)$ 和 $S(u, v)$ 分别为像素点 (u, v) 梯度权函数和距离权函数, 其表达式与基于扩散率函数的图像放大算法中的表达式一致, 分别为

$$S(u, v) = (1 - \Delta x(u, v))(1 - \Delta y(u, v)) \quad (9)$$

$$W(u, v) = \frac{1}{1 + (I_x^2(u, v) + I_y^2(u, v))/\lambda^2} \quad (10)$$

式中, $\Delta x(u, v)$ 和 $\Delta y(u, v)$ 分别为 (u, v) 点与 (i, j) 点间的归一化垂直和水平距离; $I_x(u, v)$ 和 $I_y(u, v)$ 分别为图像在 (u, v) 点处垂直和水平方向上的一阶偏导数值。在自适应插值图像修复算法中, $\Delta x(u, v)$ 和 $\Delta y(u, v)$ 的值按照下式计算:

$$\Delta x(u, v) = \frac{|u - i|}{3} \quad (11)$$

$$\Delta y(u, v) = \frac{|v - j|}{3}$$

而 $I_x(u, v)$ 和 $I_y(u, v)$ 的值可通过图像与 sobel 算子掩模来计算, 这种计算方式可在一定程度上抑制噪声。

2.3 选择自适应插值算法

在修复破损图像的过程中, 待修复像素周围的已知像素越多, 该像素就越有可能得到合理的修复结果, 而这一像素的成功修复也能够辅助其他待修复像素得到合理的灰度值, 因此应该优先计算那些被较多已知像素包围的破损像素的灰度值, 以期得到令人满意的修复结果。基于这一思想, 本文提出了基于扩散率函数的选择性自适应插值算法。

优先值是用来确定未知像素赋值的先后顺序, 首先, 建立一个可信度矩阵 R , 矩阵 R 的大小与输入图像 I 的大小一致, 矩阵中各元素的值是这样确定的: 若在输入图像 I 中, 点 $(i, j) \in D$, 则 $R(i, j) = 0$, 反之 $R(i, j) = 1$ 。然后, 选取矩阵

$$M = \frac{1}{24} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

作为模板来对 R 进行掩模, 所得结果存入优先值矩阵 P 中。则 P 中元素的值表明在图像 I 中相应位置的像素点周围已知像素的相对个数, 且 $0 \leq P(i, j) \leq 1$ 。 $P(i, j)$ 的值越大, (i, j) 点的 5×5 邻域内的已知像素就越多, 若 $P(i, j) = 0$, 说明 (i, j) 点在待修复区域内部, 其 5×5 邻域均为未知像素, 若 $0 < P(i, j) < 1$, 说明 (i, j) 点在待修复区域边缘附近, 其 5×5 邻域内既有未知像素也存在已知像素, 若 $P(i, j) = 1$, 则说明 (i, j) 点的 5×5 邻域均为已知像素。

基于扩散率函数的选择性自适应插值算法的步

骤如下:

- (1) 输入破损图像 I 和破损标记图像 $mask$, 令 $R = mask$, 其中, $mask$ 表示破损以外区域的标记;
 - (2) 根据上面的方法计算出 I 的优先值矩阵 P ;
 - (3) 查找破损区域 D 中优先值最大的像素点, 记为点 (m, n) , 即 $P(m, n) \geq P(i, j), \forall (i, j) \in D$;
 - (4) 利用式(8)~(11)在 I 中计算点 (m, n) 的灰度值 $I(m, n)$;
 - (5) 令 $R(m, n) = 1, mask(m, n) = 0$;
- 重复步骤(2)~(5), 直到 R 为全“1”矩阵, 输出处理后的图像 I 。

3 实验结果及分析

图像修复算法的评价目前仍以主观评价为主, 用 Matlab6.5 在 Pentium4, 2.66GHz, 256M 内存的 PC 机上对选择性自适应插值算法进行仿真, 取参数 $\lambda = 10$, 分别进行大斑点划痕, 文字去除方面的实验。

在图 2(d) 的仿真过程中, BSCB 算法的迭代次数为 1200 次。从图中可以看出, 在人物的额头上, 右手臂上方, 桌布以及图像的左上角等处, BSCB 算法的修复结果都存有瑕疵或模糊, 而本文算法的修复结果则不然, 除图像左上角的书脊处, 其他地方都很清晰, 修复质量强于 BSCB 算法。

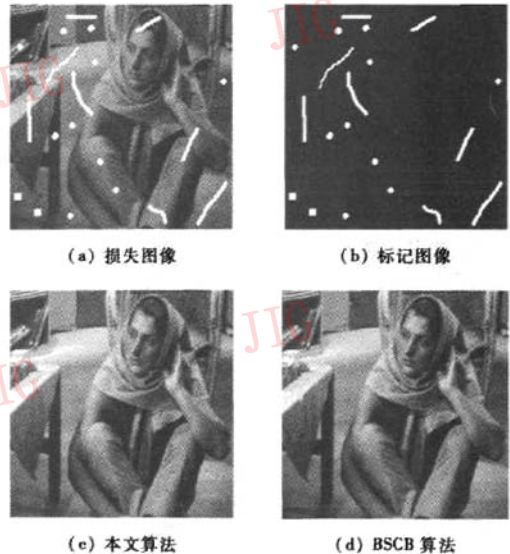


图 2 Woman 图像大斑点划痕的修复结果
Fig. 2 Inpainting result of big stain on women

选择性自适应插值算法除了在修复质量上略胜于 BSCB 模型外,其优势还体现在运算速度上,表 1 所示为本文算法与 BSCB 算法时间比较。

表 1 运算时间比较

Tab.1 Operation time comparison

方法	woman 图像	老鹰图像
BSCB 算法	1 196.875	3 132.4
本文算法	138.922	326.468

单位:s

由表 1 数据可以看出,选择性自适应插值算法的执行时间远远小于 BSCB 算法的执行时间,大约为它的 1/10。

另外,选择自适应插值算法也可以有效地用于图像中文字的去,如图 3 所示。



(a) 原图像

(b) 修复后图像

图 3 选择自适应插值算法的文字去除结果

Fig.3 Result of wiping off character using selective adaptive interpolation algorithm

4 结 论

针对 BSCB 模型在修复图像时运算速度慢的缺点,提出了一种图像修复的快速算法。首先引入优先值概念,得到了选择性自适应插值算法。该算法以改变对破损区域的填充方式为出发点,提高了修复速度,并在一定程度上改善了修复质量。

参考文献 (References)

- 1 Zhang Hong-ying, Peng Qi-cong. A survey on digital image inpainting [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(1): 1 ~ 10. [张红英, 彭启琮. 数字图像修复技术综述[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(1): 1 ~ 10.]
- 2 Marcelo Bertalmio, Guillermo Sapiro. Image inpainting [A]. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics [C], New York, USA, 2000; 417 ~ 424.
- 3 Marcelo Bertalmio, Bertozzi A L. Navier-Stokes, fluid dynamics, and image and video inpainting [A]. In: Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Hawaii, USA, 2001; 1355 ~ 1362.
- 4 Nira Shezaf, Hagit A S, Ilan Sutsukover. Adaptive low complexity algorithm for image zooming at fractional scaling ratio [A]. In: Proceeding of the 21st IEEE Convention of the Electrical and Electronic Engineers [C], Tel-Aviv, Israel, 2000; 253 ~ 256.