

曲率驱动与边缘停止相结合的图像放大

祝 轩 雷文娟 张申华 王 蕾

(西北大学信息科学与技术学院 西安 710127)

摘 要 基于非线性扩散在保留图像重要特征方面表现出的良好性能,提出将曲率作为一个控制传导率因素的曲率驱动与边缘停止相结合的非线性扩散模型(C&E模型)应用于图像放大。该模型在实现热扩散时不仅能够连接等照度线和强化边缘,而且强调保护小曲率和大梯度。针对这一模型进一步讨论了其应用于图像放大的初始化条件和数值实现方案。实验结果证明,具有曲率运动、边缘冲击特性和平滑去噪性能的C&E模型较线性扩散方法能更好地放大图像。

关键词 图像放大,非线性扩散,曲率驱动,边缘增强

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Image Zooming by Combination of the Curvature-driven and Edge-stopping Nonlinear Diffusion

ZHU Xuan LEI Wen-juan ZHANG Shen-hua WANG Lei

(School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract Based on the good performances of nonlinear diffusion in preserving important image features, the Curvature-driven with Edge-stopping(C&E model) was proposed and applied into image zooming. The C&E model has the protection of little curvature and big gradient is emphasized, at same time, it has two effects of connecting broken isophotes and strengthening edge. The condition of the initial and boundary value of image zooming, as well as numerical schemes, were further discussed. For image zooming, the C&E model exhibits better performance than the nonlinear diffusion model.

Keywords Image zooming, Nonlinear diffusion, Curvature-driven, Edge-stopping

1 引言

图像放大一直是图像处理和计算机视觉研究中的重要课题之一,已在实践中有广泛的应用,如医学、航天和电影合成等领域的图像放大显示、传输和分析等。数字图像放大是指通过增加网格点数改变原始图像的尺寸大小,根据图像中原有的信息自动地给新增的网格点赋予合适的值,使放大后的图像接近或达到原始图像的视觉效果。如何给新增的网格点赋值呢?

随着对图像局部特征认识的深入, Sapiro 和 Caselles 指出图像中局部物体的形状信息取决于其周围环境的等照度线(isophote)的形态学特征^[1,2]。 Bertalmio^[3]等人最早提出利用待修补区域的边缘信息,采用传播机制,估计等照度线的方向,进而将信息沿等照度线传播,以实现数字图像修复。借鉴 Bertalmio 思想,我们利用扩散原理延长等照度线(即图像的水平集),使其自然地过渡到放大图像新增的网格点并赋予合适的值,实现数字图像放大。近年来,基于扩散机制的图像放大在理论和实践两个方面的研究工作主要有朱宁等人^[4]提出的线性偏微分图像放大方法,其放大模型是高斯热扩散方程,

该方法能够部分克服灰度偏移现象。众所周知,高斯扩散没有局部自适应能力,因此可想而知其放大图像存在边缘模糊、清晰度和亮度减弱等弊病。

我们在文献[5]中考虑到等照度线的曲率作为一个二阶微分量是等照度线形态学特征的最重要的描述,因此将图像水平集的曲率作为一个控制因素显式地引入非线性扩散,建立了一个曲率驱动与边缘停止相结合的三阶非线性扩散模型(简称 C&E 模型),并将其应用于图像平滑滤波和非纹理图像修复^[6],取得了好的平滑滤波和非纹理图像修复效果。由于 C&E 模型在实现热扩散时不仅能够连接等照度线和强化边缘,而且同时强调保护小曲率和大梯度,因此我们预期同时考虑了图像两个局部特征(梯度和曲率)的 C&E 模型在适当的条件下,也能应用于图像放大并能使放大后的图像具有光滑的水平集和得到陡峭的边缘。本文通过实验对上述内容进行验证,结果表明提出的方法行之有效。

本文第2节讨论 C&E 模型如何解决图像放大问题;第3节讨论解决图像放大问题的 C&E 模型的函数构造和数值实现方法;第4节给出若干实验结果;最后是结束语。

到稿日期:2010-04-07 返修日期:2010-06-28 本文受陕西省自然科学基金(2010JM8026),陕西省教育厅科学研究计划项目(09JK796)资助。

祝 轩(1968-),女,博士,副教授,主要研究方向为图像/图形处理,E-mail:xuan_zhu@126.com;雷文娟(1985-),女,硕士生,主要研究方向为图像/图形处理;张申华(1983-),硕士生,主要研究方向为数字图像处理;王 蕾(1984-),硕士,主要研究方向为数字图像处理。

2 曲率驱动与边缘停止相结合的非线性扩散模型 (C&E 模型)

当对待放大图像增加网格点初始化后,图像的局部灰度值缺失(如图 1(b)中用?表示缺失像素),从而导致等照度线不连续。而我们知道自然图像中的物体所形成的等照度线(包括边缘)应该是足够光顺的曲线,即这些等照度线的曲率的绝对值 $|\kappa|$ 应该足够小。我们在文献[5]中提出了三阶非线性扩散 C&E 模型

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(f(|\kappa|)g(|\nabla u|)\nabla u) \quad (1)$$

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y)$$

式中, $u_0(x, y)$ 是初始图像。传导率 $D = f(|\kappa|)g(|\nabla u|)$, 其中 $f(|\kappa|)$ 称为曲率驱动函数,原则上可以是任何满足 $f(0) = 0$ 的单调递增函数,其作用是维持图像的结构信息,使等照度线得到足够延伸。 $g(|\nabla u|)$ 称为边缘停止函数,原则上可以是任何一种单调递减函数,以保证梯度 $|\nabla u| \rightarrow \infty$ 时, $g(|\nabla u|) \rightarrow 0$,其作用是在 $|\nabla u|$ 足够大的图像局部有足够小的传导率,以实现强化边缘的功能。这样在 $f(|\kappa|)$ 和 $g(|\nabla u|)$ 的共同作用下,图像中强烈并且光顺的边缘由于 $D \approx 0$ 将得到最好的强化,不太强($|\nabla u|$ 较小)但足够光顺的等照度线也能持续扩散延伸足够长的时间。

用扩散方法给初始化放大图像中新增的网格点(如图 1(b)中?所示)赋值,应该考虑借助新增网格点周围的已知信息,将已知信息延伸至新增的网格点,使图像中断裂的等照度线连接起来。同时,为了保证放大后的图像清晰,还应使放大图像中的物体具有较强边缘。根据上述分析,C&E 模型应用于图像放大不仅能够形成光顺的等照度线,而且能使放大图像中的物体具有较强边缘。

3 数值实现

选择合适的边缘停止函数、曲率驱动函数和离散化方案,是 C&E 模型成功放大图像的关键。

对于 $f(|\kappa|)$,我们选择如下函数形式

$$f(|\kappa|) = 1 - \exp\left\{-\left|\frac{\kappa}{\gamma}\right|^3\right\} \quad (2)$$

式中,参数 γ 用来控制需要延伸的等照度线的曲率范围,为 C&E 模型放大不同类型的图像提供灵活性。

$g(|\nabla u|)$ 函数的选择应根据待放大图像的不同而有所区别。对于内容变化比较鲜明的图像来说,选择变化剧烈的单调递减边缘停止函数;对于内容变化比较缓慢、边界不突出的图像,选择缓变的单调递减边缘停止函数。我们在实验中选择如下函数形式

$$g(|\nabla u|) = 1 - \exp(-3.315/(|\nabla u|/K)^8) \quad (3)$$

式中,参数 K 用来控制需要强化的梯度模值范围。

为避免放大图像出现灰度偏移,初始化时应保证放大后图像 u 在 $([k_1(i-1)+1], [k_2(j-1)+1])$ 点上的像素值与原图像 u_0 在 (i, j) 点上的像素值一致。如图 1 所示,(b)是原图(a)放大 2 倍的初始化图,即

$$u([k_1(i-1)+1], [k_2(j-1)+1]) = u_0(i, j) \quad (4)$$

$$(i=1, 2, \dots, m_0, j=1, 2, \dots, n_0)$$

式中, m_0, n_0 分别为原图像的行数和列数, k_1, k_2 分别是横向和纵向的放大倍数。

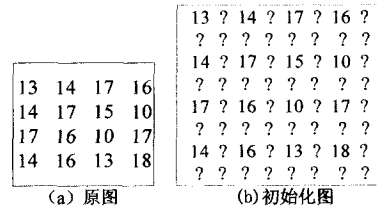


图 1 初始化像素之间的对应关系

C&E 模型根据已知像素点的值,按照等照度线的方向扩散,为其它未知(新增)的网格点赋值。扩散过程中在边界上需要满足绝热条件^[4]。记

$$S = \{(x, y) | x = k_1(i-1)+1, (i=1, 2, \dots, m_0) \\ y = k_2(j-1)+1, (j=1, 2, \dots, n_0)\} \quad (5)$$

$\forall (x, y) \in S$, 则 $u(x, y, t)$ 取值如下

$$\begin{cases} u(k_1(i-1)+1, k_2(j-1)+1, t) = k_0 u_0(i, j), & 0 \leq t \leq t_0 \\ u(k_1(i-1)+1, k_2(j-1)+1, t) = u_0(i, j), & t_0 \leq t \end{cases} \quad (6)$$

式中,参数 k_0 是为了加快初始扩散效率而设置的一个常数,通常取 $k_0 \geq 1$ 。

初始放大图像 $u(x, y, 0)$ 中的未知(新增)像素取

$$u(x, y, 0) = 0, \forall (x, y) \notin S \quad (7)$$

按如下 C&E 模型的半点显式离散化方案为新增像素赋值:令 $J = f(|\kappa|)g(|\nabla u|)\nabla u$, 则 C&E 模型可表示为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(J) = u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n \quad (8)$$

可得

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + \Delta t \text{div}(J) \quad (9)$$

用半点显式方案对式(9)中的 $\text{div}(J)$ 离散化

$$\text{div}(J) = \frac{\partial J}{\partial x} + \frac{\partial J}{\partial y} \approx J_{i+\frac{1}{2},j} - J_{i-\frac{1}{2},j} + J_{i,j+\frac{1}{2}} - J_{i,j-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中,半点梯度 ∇u , 以求 $\nabla u_{i+\frac{1}{2},j}$ 为例

$$\begin{aligned} \nabla u_{i+\frac{1}{2},j} &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i+\frac{1}{2},j}, \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \right) \\ &\approx \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{1}, \frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1} - u_{i+\frac{1}{2},j-1}}{2} \right) \\ &\approx \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{1}, \right. \\ &\quad \left. \frac{\frac{1}{2}(u_{i,j+1} + u_{i+1,j+1}) - \frac{1}{2}(u_{i,j-1} + u_{i+1,j-1})}{2} \right) \\ &= \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{1}, \right. \\ &\quad \left. \frac{(u_{i,j+1} + u_{i+1,j+1}) - (u_{i,j-1} + u_{i+1,j-1})}{4} \right) \quad (11) \end{aligned}$$

半点曲率 κ , 以求 $\kappa_{i,j+1/2}$ 为例

$$\begin{aligned} \kappa_{i,j+1/2} &= \nabla \cdot \left[\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right]_{i,j+1/2} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{u_x}{|\nabla u|} \right]_{i,j+1/2} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{u_y}{|\nabla u|} \right]_{i,j+1/2} \quad (12) \end{aligned}$$

式中, $\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{u_x}{|\nabla u|} \right]_{i,j+1/2}$ 和 $\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{u_y}{|\nabla u|} \right]_{i,j+1/2}$ 的求法与式(11)相同。计算时涉及到的 $\left[\frac{u_x}{|\nabla u|} \right]_{(i+1,j)}$, $\left[\frac{u_y}{|\nabla u|} \right]_{(i,j+1)}$ 等值,仍然采用中心差分计算。

(下转第 299 页)

- [11] 王俊文,等.一种检测图像 Copy-Move 篡改鲁棒算法[J]. 模式识别与人工智能,2009,22(4):630-634
- [12] Yang Qing-chu, Huang Chung-lin. Copy-Move Forgery Detection in Digital Image[C]//Proceedings of the 10th Pacific-Rim Conference on Multimedia: Advances in Multimedia Information Processing. Lecture Notes In Computer Science. 2009, 5879;

816-825

- [13] Srivastava A, Lee A B, Simoncelli E P, et al. On advances in statistical modeling of natural images[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2003, 18(1): 17-33
- [14] 王鑫, 鲁志波. 基于 JPEG 块效应差异的图像篡改区域自动定位[J]. 计算机科学, 2010, 37(2): 269-273

(上接第 291 页)

4 实验结果

在 MATLAB7.0 环境下用非线性 C&E 模型分别放大灰度和彩色图像。

1) 灰度图像放大

图 2(a)是原图, (b)是放大 2 倍的结果(实验参数: 时间步长 $\Delta t=0.26$, $K=80$, $\gamma=0.05$, 迭代次数 $N=2000$), (c)是放大 3 倍的结果(实验参数: 时间步长 $\Delta t=0.26$, $K=80$, $\gamma=0.05$, 迭代次数 $N=4300$)。

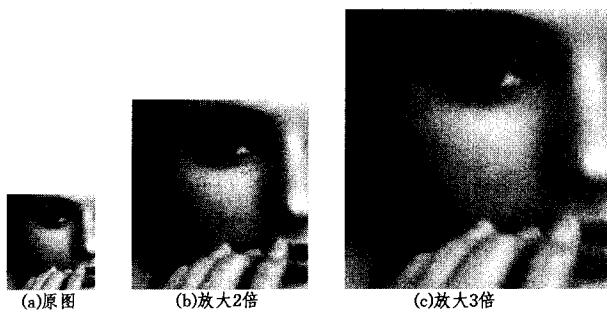


图 2 灰度图像放大

2) 彩色图像放大

图 3(a)是原图, (b)是放大 2 倍的结果(实验参数: 时间步长 $\Delta t=0.1$, $K=80$, $\gamma=0.05$, 迭代次数 $N=7000$), (c)是放大 3 倍的结果(实验参数: 时间步长 $\Delta t=0.1$, $K=80$, $\gamma=0.05$, 迭代次数 $N=7000$)。

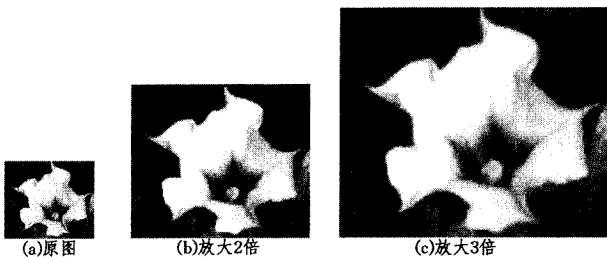


图 3 彩色图像放大

观察图 2 和图 3 可以明显看出, C&E 模型放大图像中的等照度线连接得比较紧密(如人物的轮廓、花的叶边等)、很光滑并且得到了强化陡峭的边缘。

值得指出的是, 由于彩色图像具有 3 个分量, 因此我们对图 3 用 C&E 模型每迭代 1000 次插入一次中值滤波, 用以克服 C&E 模型过度强化边缘所带来的网格效应, 保证图像整体更加光滑。

为了比较 C&E 方法和文献[4]方法, 图 4 给出文献[4]线性扩散放大图像的结果: (a)是原图, (b)是放大 2 倍的结果(实验参数: 时间步长 $\Delta t=0.1$, 迭代次数 $N=7000$), (c)是放大 3 倍的结果(实验参数: 时间步长 $\Delta t=0.1$, 迭代次数 $N=7000$)。

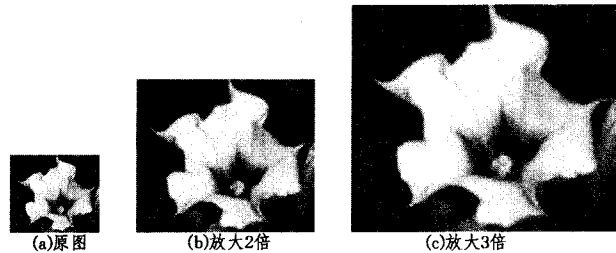


图 4 文献[4]方法

对比图 3 和图 4 不难看出, 非线性 C&E 模型放大的图像无论是从清晰度还是光滑性等方面都明显优于线性偏微分方法放大的图像。

结束语 本文从图像形态学的观点出发, 分析了等照度线在图像形态结构中的重要作用, 提出将沿等照度线方向扩散的三阶非线性偏微分曲率驱动与边缘停止相结合的 C&E 模型应用于图像放大, 并论述了模型在图像放大中的构造、实现条件和数值方案。实验结果表明, C&E 模型在沿等照度线方向扩散的同时强调了保护小曲率和大梯度的重要性, 应用于图像放大性能良好。

参考文献

- [1] Sapiro G, Caselles V. Histogram Modification Via Differential Equations [J]. Journal of Differential Equations, 1997, 135(2): 238-268
- [2] Caselles V, et al. Shape Preserving Local Contrast Enhancement [J]. Proceedings of the 1997 International Conference on Image Processing (ICIP'97). Washington: IEEE Computer Society, 1997, 1(8): 314-317
- [3] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting[C]//Proc. of the ACM SIGGRAPH 2000. New Orleans, 2000: 417-424
- [4] 朱宁, 吴静, 王忠谦. 图像放大的偏微分方程方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 1941-1945
- [5] 祝轩, 周成全, 耿国华, 等. 一种新的三阶非线性扩散图像平滑方法及其算法实现[J]. 计算机科学, 2007, 34(12): 227-230
- [6] 祝轩, 周成全, 耿国华, 等. 曲率驱动与边缘停止相结合的非纹理图像修复[J]. 计算机科学, 2008, 35(12): 212-213, 238