

基于双向模糊扩散的保持特征的图像锐化

付树军^{1,2}, 阮秋琦², 穆成坡³, 王文洽¹

(1. 山东大学数学与系统科学学院, 山东济南, 250100; 2. 北京交通大学信息科学研究所, 北京, 100044;
3. 北京理工大学宇航科学技术学院, 北京, 100081)

摘 要: 本文基于模糊集合理论, 提出了一个双向模糊扩散框架. 这个框架沿着等照度线(边缘)的梯度方向实施模糊的反向扩散; 而相反地沿切线方向实施确定的正向扩散. 为了保持图像特征的自然过渡, 利用图像的局部结构张量的特征值检测图像的不同特征, 并进行相应的锐化处理.

关键词: 图像增强; 边缘锐化; 方向选择的扩散; 模糊集合; 结构张量

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)11-2172-04

Feature Preserving Bidirectional Fuzzy Flow for Image Sharpening

FU Shu-jun^{1,2}, RUAN Qiu-qi², MU Cheng-po³, WANG Wen-qia¹

(1. School of Mathematics and System Science, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China;
2. Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. School of Aerospace Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, we propose a bidirectional fuzzy flow framework based on fuzzy sets, which performs a fuzzy backward (inverse) diffusion along the gradient direction to the isophote lines (edges), while a certain forward diffusion along the tangent direction on the contrary. To preserve the natural transition of image features, the eigenvalues of local image structure tensor are used to detect different features, which are sharpened correspondingly.

Key words: image enhancement; edge sharpening; direction-selective diffusion; fuzzy sets; structure tensor

1 引言

一幅图像的主要信息存在于它的边缘, 细节和纹理等特征中. 图像特征不但对于增强图像的视觉质量来说意义重大, 而且对于图像分割, 图像识别和图像理解等图像后续处理任务来说, 也是非常重要的. 其中, 将图像中的不同目标分割开来的边缘是图像的最普遍和最重要的特征之一. 然而, 通过不同的成像设备获取的图像的边缘并不总是锐利的: 当跨过边缘的图像灰度差别太小或者边缘太宽时, 图像看起来模糊而且不清晰.

图像增强和锐化是图像处理中的经典问题. 研究人员已经提出了很多不同的方法^[1]. 传统的图像锐化方法面临的一个重要挑战是: 在锐化图像时, 保持并增强原始图像的重要特征, 同时避免振铃效应的出现; 而且, 在增强图像的同时, 去除而不是放大图像噪声. 另一方面, 传统的图像锐化方法主要是增加跨过边缘的灰度差别, 而边缘的宽度保持不变. 对于增强对比度低而宽度狭小的边缘, 这是有效的; 对于模糊而宽度较大的边缘, 只增

加它们的对比度带来了非常有限的效果.

在过去的十几年中, 偏微分方程方法在图像处理得到了很大的发展^[2]. 它的基本思想是在一个偏微分方程模型中进化一幅图像, 一条曲线或一个曲面, 通过数值求解这个偏微分方程得到期望的结果. 实质上, 通过有效的数值离散之后, 偏微分方程便转化为一种非线性局部迭代滤波器. 本文是我们前面工作^[3~5]的继续. 这里, 我们利用图像的局部结构张量的特征值检测图像的不同特征, 并进行相应的锐化处理. 具体地说, 借助于模糊集合理论的思想, 提出了一个保持图像特征的双向模糊扩散框架: 沿着等照度线(边缘)的梯度方向实施模糊的反向扩散以增强边缘, 而相反地沿切线方向实施确定的正向扩散以去除人工伪像(例如锯齿状图形等)和噪声.

2 各向异性扩散和冲击滤波器

1990 年, P. Perona 和 J. Malik 提出了非线性各向异性扩散 (Anisotropic Diffusion, AD) 滤波器^[6], 广泛地应用

于图像去噪,增强和边缘锐化.图像 $u(x, y, t): \Omega \times [0, +\infty) \rightarrow R$ 按照以下方程扩散:

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = \operatorname{div}(g(|\nabla u(x, y, t)|) \nabla u(x, y, t)) \quad (1)$$

其中标量扩散系数 $g(|\nabla u|)$ 为一个非增函数,控制扩散方程的行为.通过展开散度项,方程(1)可以表示为梯度方向(n)上的二阶导数项和正交的切线方向(t)上的二阶导数项的和:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= (g'(|\nabla u|)|\nabla u| + g(|\nabla u|))u_{nn} + g(|\nabla u|)u_{tt} \\ u_{nn} &= \frac{1}{|\nabla u|^2}(u_x^2 u_{xx} + u_y^2 u_{yy} + 2u_x u_y u_{xy}), \\ u_{tt} &= \frac{1}{|\nabla u|^2}(u_x^2 u_{yy} + u_y^2 u_{xx} - 2u_x u_y u_{xy}) \end{aligned} \quad (2)$$

这个形式可以清楚地解释方程(1)对于边缘和角点的锐化:在梯度方向上,对于满足 $|\nabla u| > K$ 的像素点实施局部反向扩散.

1994 年, L. Alvarez 和 L. Mazorra 将上述各向异性扩散与 S. J. Osher 和 L. I. Rudin 提出的冲击滤波器^[7]结合起来,提出了下列方程(Anisotropic Diffusion with Shock Filter, ADSF)^[8]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\operatorname{sign}(G_\sigma * u_{nn})|\nabla u| + cu_{tt} \quad (3)$$

这里 G_σ 是一个标准差为 σ 的高斯函数, c 是一个正的常数.上述方程右边的第一项在被平滑的二阶法向导数的零交叉点形成冲击波,这些冲击波将图像分离为一些逼近于分片常数的区域.上述方程右边的第二项是沿着等值线方向各向异性扩散.

3 双向模糊扩散

3.1 模糊扩散

为了描述人类从自然界获取的信息的模糊性, L. A. Zadeh 提出了模糊集合理论^[9].在过去的十几年中,模糊集合理论已经被成功地应用于许多图像处理和计算机视觉领域,例如图像增强,边缘检测,分割和目标跟踪等等.在区域 R 上定义模糊集合 S :

$$S = \int \frac{\mu_S(x)}{x}, x \in R \quad (4)$$

这里 $\mu_S(x) \in [0, 1]$ 叫做模糊集合 S 在区域 R 上的隶属度函数.陈武凡等^[10]进一步将上面的模糊集合推广为广义模糊集合,他们定义了广义隶属度函数 $\mu_S(x) \in [-1, 1]$.

对于锐化边缘的反扩散速度,在边缘上越靠近中心点的像素点,应该沿着梯度方向以更快的速度远离中心点.因此,方程(3)选择了一个更加适合的反扩散速度,比方程(1)更加合理有效.然而,应用符号函数 $\operatorname{sign}(x)$ 和边缘的零交叉点来控制边缘的锐化,是一个二值决策过程:数值 1 表示属于上边缘的像素点;数值

-1 表示属于下边缘的像素点.在实验中,我们发现获得的结果是一个虚假的由分片常数区域组成的图像(参见图 2).

由于边缘的模糊性,我们借助于模糊集合的理论,在这些区域用一个双曲正切隶属度函数来代替符号函数:当像素点趋近于上边缘时,其隶属度函数值趋近于 1;而当像素点趋近于下边缘时,其隶属度函数值趋近于 -1 (参见图 1).由此,我们构造了模糊扩散.

3.2 特征检测

考虑图像梯度方向的局部变化,定义一个区域描述算子^[11].为了避免噪声带来的虚假的特征检测,计算下列张量积:

$$J(\nabla u_\sigma) = \nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^\perp = \begin{pmatrix} u_{\sigma,x}^2 & u_{\sigma,x}u_{\sigma,y} \\ u_{\sigma,x}u_{\sigma,y} & u_{\sigma,y}^2 \end{pmatrix}, u_\sigma = G_\sigma * u$$

利用高斯核 G_σ 分片卷积 $\nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^\perp$, 得到下列对称的半正定矩阵:

$$J_\rho(\nabla u_\sigma) = G_\rho * \nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^\perp$$

它蕴含了一个图像邻域内被平均的局部信息.这个矩阵的相应的特征值是:

$$\mu_1 = \frac{1}{2}[j_{11} + j_{22} + \sqrt{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2}]$$

$$\mu_2 = \frac{1}{2}[j_{11} + j_{22} - \sqrt{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2}]$$

这里 j_{lk} 是矩阵 $J_\rho(\nabla u_\sigma)$ 的对应元素.特征值 μ_1 和 μ_2 描述了一个邻域内在特征方向上的平均对比度,它们传递了形状信息.

一幅图像由包含不同特征的区域组成.在一个图像处理任务中,应该不同地对待这些区域,以获得比较好的结果.我们利用图像的特征值将图像划分为边缘区域($\mu_1 \gg \mu_2 \approx 0$)和细节纹理区域($\mu_1 \approx \mu_2 \gg 0$).

3.3 双向模糊扩散

为了适应图像灰度值在不同区域的自然变化,我们利用上述特征值提出了一个双向模糊扩散(BiDirectional Fuzzy Flow, BDFF)框架:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \alpha(-\operatorname{sign}(u_{nn}))|u_n| + \beta(u_{tt}), \lambda > \operatorname{Th} \\ \frac{\partial u}{\partial t} = \alpha(-\operatorname{th}(lu_{nn}))|u_n| + \beta(u_{tt}), \lambda \leq \operatorname{Th} \end{cases} \quad (5)$$

带有诺伊曼边界条件.这里 $\lambda = |\mu_1 - \mu_2| / |\mu_1 + \mu_2|$, Th 是一个阈值, α, β 是反向和正向扩散控制系数.

4 实验结果

利用计算流体力学中的通量限制技术(TVD 格式)

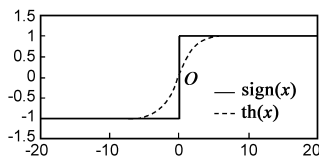


图 1 模糊隶属度函数比较: $\operatorname{sign}(x)$ 和 $\operatorname{th}(x)$

实现数值计算^[12].我们实验了很多图像来验证本文的算法.在图 2 中,利用提出的算法 BDFE 来增强辣椒(peppers)图像.模型的参数选取为: $[\alpha, \beta] = [2, 1.5]$, $\text{Th} = 0.96$, $l = 150$, $[\sigma, \rho] = [0.4, 5]$.

在图 2 中, (a) 是原始的模糊图像, (b), (c) 和 (d) 分别是利用 AD(1), ADSF(3) 和 BDFE 三种方法处理得到的结果; (e), (f), (g) 和 (h) 分别是原始模糊图像和上面的结果的局部放大图像.可以看出, 虽然 AD 方法能够较好地去除图像噪声, 但是由于它本身带有的不适当的扩散系数, 它的边缘锐化能力不是很强; 在图 2(b) 中边缘仍然是模糊的. 另一方面, 虽然图 2(c) 产生了锐利的边缘, 但是由于不同图像区域之间存在不连续的过渡, 它看起来是不自然的, 是一个虚假的分片常数图像. 最后, 利用我们提出的 BDFE 方法增强图像得到了最好的视觉效果

果: 图 2(d) 保持了图像的大多数特征, 不同图像区域之间过渡自然, 产生了令人满意的锐利的边缘和平滑的轮廓. 局部放大图 2(e), (f), (g) 和 (h) 更加清晰显示了它们之间的比较: AD 方法产生了过度平滑的结果, 边缘仍然模糊; ADSF 方法在辣椒的表面产生了不自然的纹理, 而且在边缘上存在过冲; 只有 BDFE 方法产生了自然的过渡纹理和令人满意的结果.

关于模型参数的选择. 如果图像的噪声很大, 高斯平滑函数的标准差 σ 和 ρ 应该选取的足够大, 以保证较好地估计图像特征. 图像的特征阈值 Th 可以利用 λ 参数的直方图进行选择, 以保证较好地将边缘和细节纹理区域分开. 扩散控制系数 σ 和 β 应该视图像的模糊程度和噪声污染程度而平衡地加以确定, 以得到较好的视觉效果.

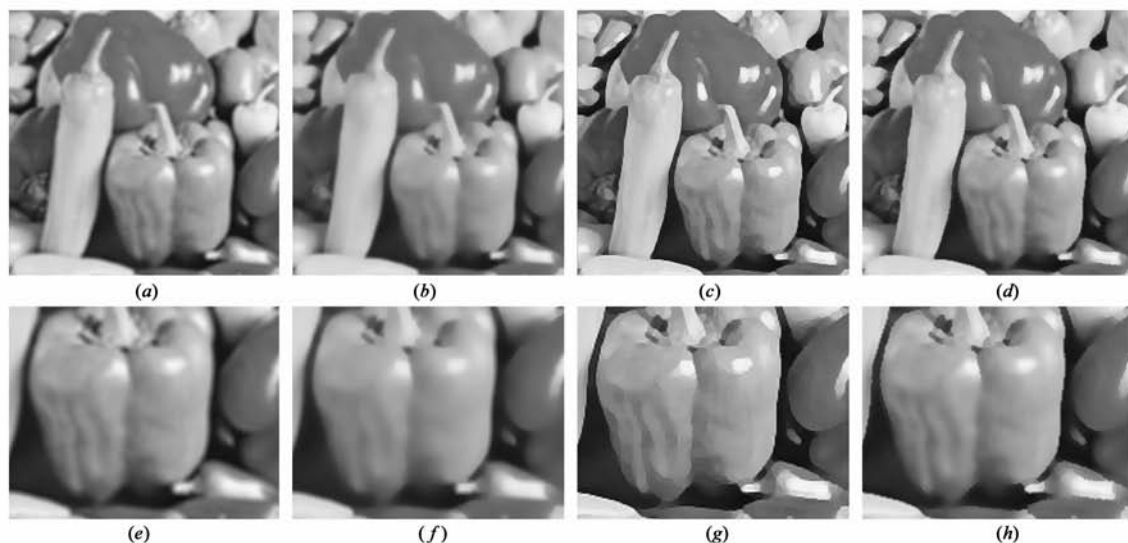


图 2 三种方法应用于辣椒图像的比较: (a) 原始的模糊图像, (b), (c) 和 (d) 分别是 AD, ADSF 和 BDFE 的处理结果, (e), (f), (g) 和 (h) 分别是上面相应图像的局部放大结果.

5 结论

本文提出了一种锐化边缘的保持图像特征的双向模糊扩散方法. 利用图像的局部结构张量的特征值检测图像的不同特征, 并进行相应的锐化处理. 本文方法不但能够有效地锐化边缘, 而且能够平滑图像轮廓. 由于保持了图像特征, 例如边缘, 细节和在不同图像区域之间过渡自然的图像纹理, 同其它相关的偏微分方程模型相比, 本文方法产生了更加令人满意的视觉结果.

参考文献:

- [1] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [2] Aubert G, Kornprobst P. Mathematical Problems in Image Processing: Partial Differential Equations and the Calculus of Vari-

ations, volume 147 of Applied Mathematical Sciences [M]. Springer-Verlag, 2001.

- [3] 付树军, 阮秋琦, 李玉, 王文洽. 基于各向异性扩散方程的超声图像去噪与边缘增强 [J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1191 - 1195.
Fu Shu-jun, Ruan Qiu-qi, Li Yu, Wang Wen-qia. Anisotropic diffusion equation based ultrasonic image denoising and edge enhancement [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1191 - 1195. (in Chinese)
- [4] Shujun Fu, Qiuqi Ruan, Wenqia Wang, Jingnian Chen. Feature-oriented fuzzy bidirectional flow for image enhancement [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(1): 155 - 157.
- [5] Shujun Fu, Qiuqi Ruan, Wenqia Wang, Fuzheng Gao, Heng-Da Cheng. A feature-dependent fuzzy bidirectional flow for adaptive image sharpening [J]. Neurocomputing, 2007, 70(4 - 6): 883 - 895.
- [6] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using

- anisotropic diffusion[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629 – 639.
- [7] Osher S J, Rudin L I. Feature-oriented image enhancement using shock filters[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1990, 27: 919 – 940.
- [8] Alvarez L, Mazorra L. Signal and image restoration using shock filters and anisotropic diffusion[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1994, 31(2): 590 – 605.
- [9] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and control, 1965, 6: 338 – 353.
- [10] Chen W F, Lu X Q, Chen J J, Wu G X. A new algorithm of edge detection for color image: generalized fuzzy operator [J]. Science in China (Series A), 1995, 38(10): 1272 – 1280.
- [11] Weickert J. Coherence-enhancing diffusion filtering[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 31(2 – 3): 111 – 127.
- [12] 刘儒勋, 舒其望. 计算流体力学的若干新方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

作者简介:



付树军 男, 1968 年生于山东济南, 山东大学数学与系统科学学院副教授. 主要研究方向为图像处理、偏微分方程、小波分析.
E-mail: shujunfu@163.com



阮秋琦 男, 1944 年生于黑龙江绥化, 北京交通大学信息科学研究所教授, 博士生导师, 主要研究方向为图像处理、视频编码、计算机视觉、虚拟现实.