

文章编号: 1673- 9620 (2008) 04- 0068- 05

基于测地线活动轮廓模型的图像除噪和增强^{*}

石澄贤¹, 赵志新¹, 林红章²

(1. 江苏工业学院 数理学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 讨论曲线演化的活动模型去除图像噪声的性质。利用不同尺度小波变换系数的边缘映射指示图像的 边缘。把不同尺度下的边缘映射经复合设置成曲线演化方程的边缘指示函数。为了防止边缘尖点被平滑, 采用一种新的数值离散迭代格式求解曲线演化方程。这样使曲线演化方程在均匀区域能更好地平滑噪声, 边缘点得到保护且不被模糊。通过对图像的仿真试验说明提出的方法在图像除噪方面有良好的效果。

关键词: 图像除噪; 曲线演化; 小波变换; 边缘

中图分类号: TP 391 **文献标识码:** A

Denoising and Enhancement Image Based on Geodesic Active Contour Model

SHI Cheng-xian¹, ZHAO Zhi-xin¹, LIN Hong-zhang²

(1. School of Mathematics and Physics, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The property of the active contour model for image denoising was studied. At each resolution level, the image edges are estimated by gradient magnitudes obtained from the wavelet transform coefficients. New edge indicator function is constructed by combining gradient magnitudes obtained from the wavelet transform coefficients at different resolution levels. New discrete numerical scheme is used. The edge, salience and local detail can be preserved well in images. The image denoising numerical results demonstrate the good performance based on modifying geometric model.

Key words: image denoising; curve evolution; wavelets transform; edge

在图像处理和计算机可视化领域, 去除噪声是一个重要的研究课题。一个较好的平滑噪声的方法应该是既能消除噪声, 又能保持图像的边缘轮廓和细节^[1, 2]。图像处理领域利用偏微分方程实现形状恢复越来越受重视^[3]。对于图像除噪也可以作为一个形状恢复的问题^[4, 5]。目前, 利用偏微分方程除噪和平滑已发展了多种具有鲁棒性的技术方

法^[6, 7]。基于曲线演化运动的几何模型^[8], 其运动方程是一个非线性扩散方程, 用于图像的除噪和恢复有良好的性能。Alvarez L. 等较早地构造了一个图像除噪模型^[3] (简称为 ALM 模型), ALM 模型实质上可以作为曲线按曲率相关的速度沿法向量演化的运动方程。它把曲线演化和图像的非线性扩散滤波结合起来。Malladi R. 等直接利用曲线演

* 收稿日期: 2008- 09- 04

基金项目: 江苏教育厅高校自然科学研究项目 (06KJD520048); 江苏工业学院科研基金资助

作者简介: 石澄贤 (1961-), 男, 江苏无锡人, 博士, 教授, 主要研究方向计算机图像处理和数值计算; 2- 硕士研究生。

化的水平集方法实现图像的除噪和恢复^[4,6]。Caselles V. 等基于曲线积分的能量泛函最小化导出了隐式测地线活动轮廓模型^[9]。测地线活动轮廓被广泛应用于图像分割、运动目标跟踪和形状恢复。这一模型应用于图像除噪比 ALM 模型增加了自聚焦项,在对图像平滑的同时能增强边缘。基于曲线演化的图像除噪效果依赖于曲线演化速度的控制。上述模型都是要求在图像边缘处演化速度小,在图像均匀处演化速度快,这样可以保护图像的边缘同时去除均匀区域图像的噪声。模型都是利用图像高斯滤波后的梯度模的大小来指示边缘。因为图像高斯滤波后平滑掉噪声、较弱的边缘和细节,故曲线演化在去除噪声时,图像的边缘仍会被模糊、细节被平滑。本文利用小波变换得到不同尺度下的系数,利用小波系数模作为边缘映射。曲线演化速度由多尺度小波系数模和曲率的乘积决定。因为是多尺度估计,能更好地反映图像的边缘和细节,以至在曲线演化时能保持更多的细节,减少曲线演化对轮廓的模糊。同时,为了保持边缘尖点,我们应用新的数值离散迭代格式求解方程。

1 图像除噪的几何模型

Alvarez L. 等人构造一个具有曲线演化几何意义的图像除噪模型^[3],该模型求解如下方程

$$\begin{cases} I_t = g(|\nabla G^* I|) \kappa |\nabla I| \\ I(x, y, t=0) = I_0(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $I_0(x, y)$ 为原始图像, $G^* I$ 代表图像与标准差为 σ 的高斯核的卷积,符号 $*$ 表示卷积, $||$ 表示范数, ∇ 为梯度算子, $\kappa = \text{div}(\nabla I / |\nabla I|)$ 是平均曲率, div 表示散度算子。其中 $g(x)$ 是一个单调下降的函数,当 $x \rightarrow +\infty$ 时 $g(x) \rightarrow 0$; 当 $x \rightarrow 0$ 时 $g(x) \rightarrow 1$ 。该模型的几何解释是,把图像看成是一系列等强度的轮廓线,这些轮廓线沿法线方向以速度 $g(|\nabla G^* I|) \kappa$ 演化。认为 $|\nabla G^* I_0|$ 大的地方为边缘,小的地方为均匀区域。这样,给定图像的等地线或等强度轮廓以曲率相关的速度移动。边缘处等地线运动慢,均匀区域运动快,使曲线演化方程在平滑图像的同时保持了边缘。方程右边的项也是抛物扩散项,具有扩散噪声和平滑图像的作用。1997 年 Caselles V. 等基于曲线积分的能量泛函最小化提出了测地线活动轮廓模型^[9]:

$$\begin{cases} u_t = g(|\nabla G^* I_0|) \kappa |\nabla u| + \nabla g(|\nabla G^* I_0|) \cdot \nabla u \\ u(x, y, t=0) = u_0(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $u(x, y, t)$ 是演化曲线的嵌入超曲面, $u_0(x, y)$ 为初始曲面,其余符号的意义和式(1)的相同。只要方程初始条件设为 $u(x, y, t=0) = I_0(x, y)$, 最后式(2)的稳定解 $\lim_{t \rightarrow \infty} u(x, y, t)$ 就是平滑和除噪后的图像。方程右边的第一项是抛物扩散项,具有扩散噪声和平滑图像的作用。第二项是双曲项,在边缘上表现出自聚焦特征(逆扩散),具有保护和增强边缘的性能。这一模型是选择性的光滑图像,其中可以保护图像边缘。边缘指示函数 $g(x)$ 允许决定一个细节是否足够强到需要保留的程度。因此函数 $g(|\nabla G^* I_0|)$ 是决定方程除噪效果的重要因素。经常取 $g(x) = \exp(-x/\gamma)$ 或 $g(x) = 1/(1+x/\gamma)$, γ 为正常数。但是, $g(|\nabla G^* I_0|)$ 作为边缘指示函数存在二点不足: ①图像先与标准差为 σ 的高斯滤波器进行卷积。当 σ 的值大时,高斯滤波平滑噪声,同时平滑较弱的边缘和细节,强边缘的定位也不精确。当 σ 的值小时,高斯滤波虽能保留较弱的边缘和细节,强边缘的定位也较精确,但不能除噪声。②当 $|\nabla(G^* I_0)|$ 大为图像的边缘时, $g(|\nabla(G^* I_0)|)$ 的值较小。但当边缘曲率 κ 的绝对值很大时, $g(|\nabla G^* I_0|) \kappa$ 可能并不接近于零,在边缘处曲线运动没能停止。图像的边缘尖点被平滑模糊或消失。因此,需要多个尺度下的边缘和细节,更精确的边缘定位。而高斯滤波器难以满足这一要求。下面将利用不同尺度的小波变换和边缘映射作为边缘指示函数来改善测地线活动轮廓模型除噪效果。

2 小波系数指示的边缘曲线演化方程

2.1 图像的边缘映射

常见的二维小波分解都是分解成 3 个细节图像部分(水平、垂直和对角细节),这里二维小波分解采用二个细节图像^[10]。设两个小波函数为 $\phi(x, y)$, $\phi^2(x, y)$, 对应的尺度函数 $\phi(x, y)$ 。对于尺度 s , 设

$$\begin{aligned} \phi_s(x, y) &= \frac{1}{s} \phi\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right), \quad i=1, 2, \\ \phi_s(x, y) &= \frac{1}{s^2} \phi\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \end{aligned}$$

函数 $f(x, y)$ 在尺度 s 的小波变换两个部分分别为

$$W_s^i f(x, y) = (f * \phi_s^i)(x, y), \quad i=1, 2$$

对应尺度函数部分, $S_s f(x, y) = (f * \phi_s)(x, y)$, 因此, 多尺度小波系数为 $\vec{W}_s = (W_s^1 f(x, y), W_s^2 f(x, y))$ (3)

$S_s f(x, y)$ 是作为 $f(x, y)$ 的平滑近似部分。当 $S_{2^0} f(x, y)$ 经平滑变成 $S_{2^J} f(x, y)$, 丢失的图像细节就是成分 $\vec{W}_{2^j} = (W_{2^j}^1 f(x, y), W_{2^j}^2 f(x, y))$, $j = 1, 2, \dots, J$ 。详细的内容可以参见文献 [10]。

下面利用小波变换来确定图像的边缘。先要确定两个小波基函数, 要求在尺度 s 的小波系数 $\vec{W}_s f(x, y)$ 与尺度 s 的平滑图像的局部梯度相关。选取光滑函数 $\theta(x, y)$, 使下面定义的两个函数:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} \theta(x, y), \\ \psi(x, y) &= \frac{\partial}{\partial y} \theta(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

成为小波函数。这时

$$\vec{W}_s(x, y) = \begin{bmatrix} W_s^1 f(x, y) \\ W_s^2 f(x, y) \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f * \theta_s)(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f * \theta_s)(x, y) \end{bmatrix} = s \nabla (f * \theta_s)(x, y) \quad (5)$$

这样 $\phi(x, y)$, $\psi(x, y)$ 是小波基函数。这时 $\vec{W}_s(x, y)$ 对应应在尺度 s 下函数 $f(x, y)$ 平滑后的梯度。图像的边缘提取最常见的方法是通过图像的梯度模的局部极大值沿着梯度方向确定。因此, 由 (5) 式可知在尺度 s 下可以经 $\vec{W}_s(x, y)$ 确定边缘。 $\theta(x, y)$ 可以选具有紧支撑的 3 次样条。上述方法要应用于图像, 只要使用离散小波变换。采用二进尺度 2^j , 对于数字图像 $I_0(n, m)$, 可以得到细节图像 $W_{2^j}^1 I_0$, $W_{2^j}^2 I_0$ 和平滑近似图像 $S_{2^j} I_0$ 。以图像梯度模计算的图像边缘映射可用下式计算 (相差一个尺度系数) 得到:

$$M_s I_0 = \sqrt{(W_{2^j}^1 I_0)^2 + (W_{2^j}^2 I_0)^2} \quad (6)$$

因为边缘映射是原图像的一种小波平滑系数的模, 通过尺度可以控制噪声的影响。

2.2 多尺度边缘指示的曲线演化方程

利用每一尺度的小波变换能计算图像每一点的边缘映射。在曲线演化方程中可以利用多尺度边缘映射控制演化速度。当边缘的概率大时, 演化速度要慢。否则演化速度要快。设 $g^s(x, y) = M_s I_0$,

将方程 (2) 的边缘指示函数改成如下形式:

$$g(x, y) = \frac{K + 1}{1 + c_1 g^1(x, y) + c_2 g^2(x, y) + \dots + c_K g^{2^K}(x, y)} \quad (7)$$

式中 c_1, \dots, c_K 是一组正数。当然, 一般取 $K = 2$ 就能较好地刻画边缘特征。当 (x, y) 是边缘点时, $g(x, y)$ 的值小, 当 (x, y) 是噪声点时, $g(x, y)$ 的值大。通过调节 c_1, \dots, c_K 的大小, 可以对特定尺度的边缘进行保护或平滑。一般 c_i 的值随尺度增大而增大。这是因为小尺度小波系数带有比大尺度小波系数更多的噪声。多尺度边缘指示测地线活动轮廓方程

$$\begin{cases} u_t = g(x, y) |\nabla u| + \nabla g(x, y) \cdot \nabla u \\ u(x, y, t = 0) = I_0(x, y) \end{cases} \quad (8)$$

这是具有多尺度边缘指示的非线性扩散方程。在平滑图像的同时能更好的保护和增强图像的边缘和细节。

3 方程的数值解和实验结果

3.1 一种混合型数值计算格式

方程 (8) 利用有限差分来逼近, 常用的迭代更新算法像文献 [8] 使用如下的迎风 (upwind) 迭代格式进行求解。

方程 (8) 右边第一项是抛物扩散项 $g^k |\nabla u|$, $|\nabla u|$ 用中心差分来逼近。曲线沿法向量方向运动, 运动速度由 g 和 k 决定。边缘尖点处曲率很大, 对应的 g 的值较小, 两者相乘不一定是一个小量。若 $|\nabla u|$ 数值计算有误差, 当 $|\nabla u|$ 的值不能接近于零时, 曲线的演化仍将较快。这必然导致边缘尖点被光滑, 抹平目标的部分结构 (见图 1)。为了较好地保持边缘, 对方程 (8) 的数值离散化采用混合形式的离散格式。对于 $|\nabla u|$ 的离散格式, 在点 $(i \Delta x, j \Delta y)$ 处考虑 8 个方向的单边差分:

$$\frac{|u_{l,m} - u_{i,j}|}{\sqrt{(l-i)^2 + (m-j)^2}}, \quad (l, m) \neq (i, j)$$

$$(l, m) \in [i-1, i+1] \times [j-1, j+1],$$

将上述差分排序记 $D_{j,1} \leq D_{j,2} \leq \dots \leq D_{j,8}$ 。梯度模为

$$(|\nabla u|)_{\bar{j}} = \begin{cases} \sqrt{D_{\bar{j},1}^2 + D_{\bar{j},2}^2} & |K| > a \\ (\max(D^{-x}u_{ij}, 0)^2 + \min(D^{+x}u_{ij}, 0)^2 + \max(D^{-y}u_{\bar{j}}, 0)^2 + \min(D^{+y}u_{\bar{j}}, 0)^2)^{\frac{1}{2}} & -a \leq K \leq 0 \\ (\min(D^{-x}u_{ij}, 0)^2 + \max(D^{+x}u_{ij}, 0)^2 + \min(D^{-y}u_{\bar{j}}, 0)^2 + \max(D^{+y}u_{\bar{j}}, 0)^2)^{\frac{1}{2}} & 0 < K \leq a \end{cases}$$

其中 $a > 0$ 为常数, 方程 (8) 的离散格式:

$$u_{ij}^{n+1} = u_{ij}^n + \Delta t (g_{ij} K_{ij}^n (|\nabla u|)_{ij}^n + \beta (\max(D^{0x}g_{ij}, 0) D^{-x}u_{ij}^n + \min(D^{0x}g_{ij}, 0) D^{+x}u_{ij}^n + \max(D^{0y}g_{ij}, 0) D^{-y}u_{ij}^n + \min(D^{0y}g_{ij}, 0) D^{+y}u_{ij}^n))$$

(9)

式中 D^- 为后向差分, D^+ 为前向差分, D^0 为中心差分, 上标 x, y 为差分方向, 下标 ij 表示在点 $(i\Delta x, j\Delta y)$ 处, u_{ij}^n 是函数 u 在时间 $n\Delta t$, 点 $(i\Delta x, j\Delta y)$ 处的 $u(x, y)$ 值。上述迭代格式 (9) 能较好地保持边缘尖点 (见图 1 (c))。这时, 梯度模受噪声的影响小。

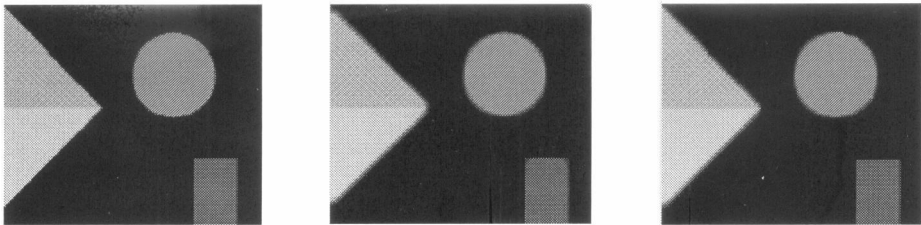


图 1 两种迭代格式对边缘尖点的不同影响

Fig 1 Two iteration formats cause differences of sharp angles

3 2 实验和除噪有效性评价

下面是多尺度边缘保护几何模型滤波与小波阈值滤波和维纳滤波作实验数据比较 (见图 2)。对高斯噪声图像进行线性 Wiener 滤波 (见图 2 (c)) 和小波阈值滤波 (见图 2 (d))。小波阈值滤波采

用整体 Global 方法选定阈值, 分解图像两层。本文曲线演化滤波, 尺度取 1、2、4, $\Delta t = 0.4$, (见图 2 (e))。3 种滤波结果的信噪比见表 1。与小波阈值除噪、Wiener 滤波相比本文方法具有更好的除噪效果, 保持图像细节和纹理。



图 2 图像几种滤波方法滤波结果

Fig 2 The results of several filtering method image

表 1 几种滤波方法的信噪比

Table 1 RSN of some filtering methods

原图	Wiener 滤波	小波域值滤波	本文方法滤波
信噪比	6 25	11 13	10 33
信噪比	12 65	16 54	14 69

选取一幅星载 SAR 图像^[11, 12]的局部进行试验。图 3 (a) 为原始的 SAR 图像。如图 3 所示从目视效果来看, 图 3 (b) 采用小波阈值滤波算法

滤波后基本消除了斑点, 能保持图像边缘, 但新的摄动条纹干涉图像; 图 3 (c) 为本文的运动演化滤波结果。图 3 (d)、(e)、(f) 分别是图 3 (a)、(b)、(c) 左上角局部区域经线性插值放大 2 倍的结果。图 3 (c) 和 (f) 的斑点噪声得到有效抑制且图像细节、边缘保持较好, 具有良好的视觉效果。

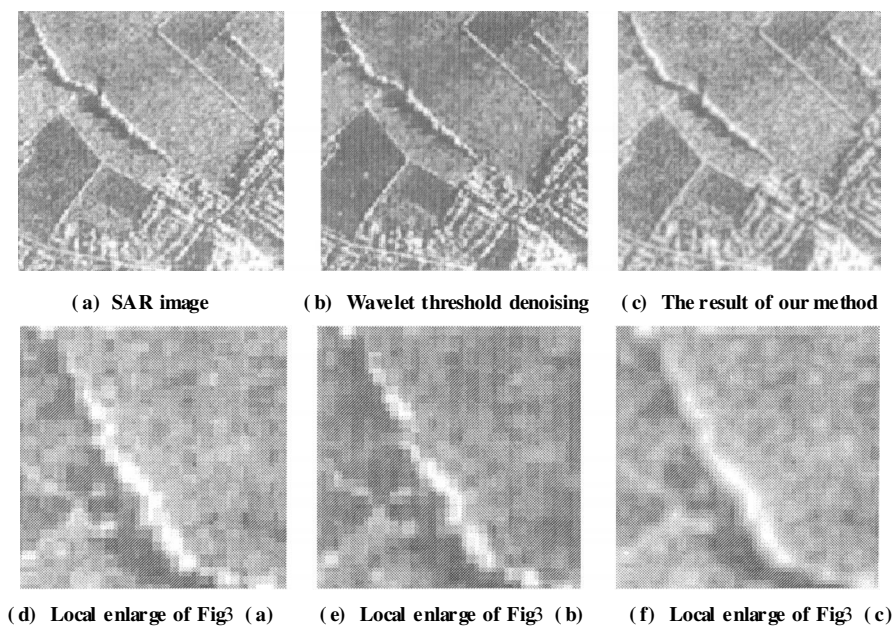


图 3 SAR 图像二种滤波方法除噪结果

Fig 3 The results of SAR image using two filtering methods

4 结 论

本文依据测地线活动轮廓模型对图像进行恢复。通过图像的多尺度小波变换系数构造边缘映射，再利用边缘映射提出了多尺度边缘指示函数来控制曲线演化方程的演化速度。演化曲线可以有选择平滑还是保护边缘和细节。对模型数值计算采用新的格式提高保持边缘尖点的能力。实验结果证明，该算法在目视效果、斑点噪声抑制、细节保护和边缘增强获得了比几种传统方法更好的效果。如何利用测地线活动轮廓模型去除图像噪声，同时保护和增强图像有效特征的自适应方法值得进一步深入研究。

参考文献:

[1] Perona P, Malik J. Scale- space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Trans on PAMI, 1990, 12 (7): 629- 639

[2] Catte F, Lions P L, Morel J M, et al. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion [J]. SIAM J Num Anal, 1992, 29 (1): 182- 193

[3] Alvarez L, Lions P L, Morel J M. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion: II [J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1992, 29 (3): 845- 866.

[4] Martin Burger, Frank Haub er, Christina St cker, et al. A

level set approach to anisotropic flows with curvature regularization [J]. Journal of Computational Physics, 2007, 225 (1): 183- 205.

[5] Sarti C Ortiz de Solorzano, Lockett S, Malladi R. A geometric model for 3D confocal image analysis [J]. IEEE Trans on Biomedical Engineering, 2000, 47 (12): 1 600- 1 609.

[6] Malladi R, Sethian J A. A unified approach to noise removal, image enhancement and shape recovery [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1996, 5 (11): 1 554- 1 568.

[7] Malladi R, Sethian J A, Vemuri B C. Shape modeling with front propagation: a level set approach [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17 (2): 158- 175.

[8] Osher S, Sethian J A. Fronts propagation with curvature dependent speed: Algorithm based on Hamilton- Jacobi formulation [J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79 (1): 12- 49.

[9] Caselles V, Kimmel R, Sapiro G. Geodesic active contours [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 22 (1): 61- 79.

[10] Mallat S G, Zhong S. Characterization of signals from multi-scale edges [J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1992, 14 (7): 710- 732.

[11] 郭小卫, 田铮. 基于小波域边缘方向的 SAR 图像噪声抑制方法 [J]. 中国图象图形学报 A, 2003, 8 (4): 453- 458.

[12] 石澄贤, 王洪元. 利用各向异性扩散去除 SAR 图像中的斑点噪声 [J]. 江苏工业学院学报, 2004, 16 (1): 53- 55