

文章编号: 1001-1455(2006)04-0351-05

一种新的闪光照相 CCD 图像的扩散滤波方法^{*}

钱伟新, 刘瑞根, 王婉丽, 祁双喜, 王伟, 程晋明
(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了提高闪光 CCD 图像质量, 提出了基于偏微分方程 (partial differential equation, PDE) 的智能中值-非线性扩散滤波 (intelligent median-nonlinear diffusion filtering, IMNDF) 方法, 充分发挥了智能中值滤波和非线性扩散滤波的优势。数值实验结果证明, 该方法对于两类最具代表性的噪声 (高斯和脉冲) 的混合问题有很好的消噪效果, 其信噪比改善因子 (promotion of signal-to-noise ratio, PSNR) 较传统方法提高了 3~5 倍。对闪光照相 CCD 图像取得了很好的消噪声结果。

关键词: 爆炸力学; 图像消噪; 非线性扩散; 闪光照相; PDE

中图分类号: O389; O434.1

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

闪光照相是一个十分复杂的物理过程^[1], 在其成像、传输、接收过程中, 由于受到多种因素的影响, 接收到的 CCD 图像的质量很差, 表现为噪声多、模糊大。所以, 在闪光照相的图像处理工作中, 首要的任务是对图像进行消噪声处理, 以得到高质量的闪光图像, 为后续的图像处理奠定良好的基础。

另外, 闪光照相 CCD 图像中噪声的种类十分复杂^[2], 并不能用某单一的噪声类型来表示。

基于 PDE 的非线性扩散滤波方法是近十多年来研究十分活跃的图像滤波方法。它的基本思想是: 通过建立噪声图像为某非线性 PDE 的初始条件, 然后求解这个偏微分方程, 得到在不同时刻的解, 即为滤波结果。基于 PDE 的非线性扩散滤波方法 (以下简称 P-M) 是由 P. Perona 等^[3]提出来的, 用方向性分布的扩散系数来代替线性热传导方程中的常系数, 形成了基于图像局部特征的局部自适应扩散滤波方法。

基于 PDE 的非线性扩散滤波只是对接近高斯分布的噪声可取得好的效果, 而对于脉冲噪声, 其效果并不理想。针对此问题, 本文中提出了一种将智能中值滤波和非线性扩散滤波方法相结合的滤波方法, 称之为智能中值-非线性扩散滤波 (IMNDF) 方法。它兼有智能中值滤波和非线性扩散滤波的优点, 在有效消除闪光图像噪声的同时, 可以很好地保持图像的边缘, 在一定程度上克服了边缘保持和噪声消除之间的矛盾。

1 传统非线性扩散滤波

P-M 非线性扩散方案的表示形式如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} &= \nabla \cdot (g(|\nabla u|) \nabla u) & t > 0 \\ u(x, y, 0) &= u_0(x, y) & t = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $g(|\nabla u|)$ 为扩散系数函数, 也称边缘停止函数, 其作用是通过图像梯度大小 $|\nabla u|$ 来调整扩散系数的大小从而具有边缘保护的优良性能 (因为梯度的大小在某种程度上反映了图像的特征, 一般的边缘检测算法也都是以梯度为依据的)。P-M 方案正是由于引入了此函数, 才使得在消除噪声的同时能够保持图像的边缘信息。因此, $g(|\nabla u|)$ 的设计应满足如下条件:

(1) $g(|\nabla u|)$ 是以 $|\nabla u|$ 为自变量的减函数, 并且有 $g(|\nabla u|) > 0$;

* 收稿日期: 2005-04-14; 修回日期: 2005-10-10

作者简介: 钱伟新 (1979—), 男, 硕士研究生。

(2) $|\nabla u| \rightarrow \infty$ 时, $g(|\nabla u|) = 0$;

(3) $|\nabla u| \rightarrow 0$ 时, $g(|\nabla u|) = 1$ 。

基于以上的原则, *P. Perona* 等^[3]在实际应用中, 采用了如下的扩散系数函数

$$g(|\nabla u|) = \frac{1}{1 + (|\nabla u|/K)^2} \tag{2}$$

式中: K 为边缘界阈值, 其作用是用来判断边缘区域和平坦区域。

图 1 给出了扩散系数函数及其通量函数的曲线($K=10$)。结合扩散系数函数(2)对上述 $g(|\nabla u|)$ 设计原则进行分析: $g(|\nabla u|)$ 是随着梯度的增大而减小的。边缘阈值 K 是边缘梯度和平坦区梯度的分界线。梯度大的地方很可能有需要保护的边缘, 因此要减小其扩散程度; 而梯度小的地方很有可能是平坦区域, 因此要增大扩散程度, 以进行消噪。

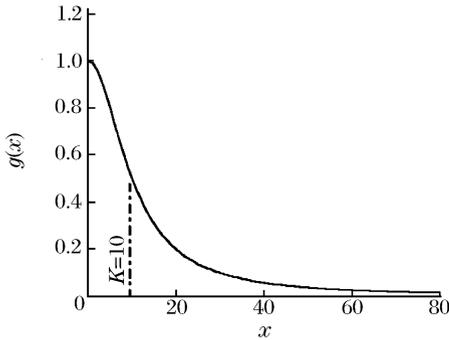


图 1(a) 扩散系数函数

Fig. 1(a) Diffusion coefficient function

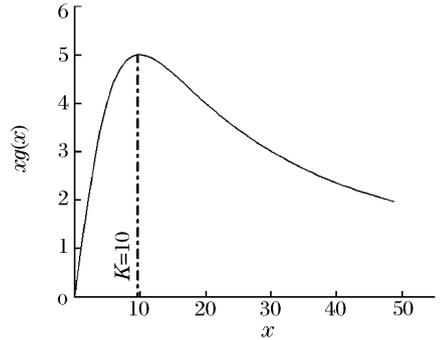


图 1(b) 通量函数

Fig. 1(b) Flux function

尽管如此, $P-M$ 扩散方案仍然存在着问题。理论上, $P-M$ 扩散方程实际上是一个病态的方程, 即方程解的唯一性和稳定性得不到保证^[4]。实际应用中, 如果图像中存在大幅度噪声, 这些噪声也产生大的梯度值, 这就无法将噪声和边缘区分开来, 使得大噪声得以保持, 降低了滤波性能。

一种成功的改革就是 *F. Catte* 等^[4]提出的采用高斯预平滑来估计梯度值的非线性扩散滤波方法, 即采用高斯卷积来预平滑大噪声图像, 再以此图像来计算梯度则可以消除由于噪声起伏大而引起的较大梯度。

F. Catte 等^[4]的非线性扩散方案在一定程度上保护了突出的边缘信息。但是此方案中高斯函数方差的确是一个十分困难的问题, 方差太小则不能克服 $P-M$ 方案的缺点, 方差太大则会严重模糊边缘。特别对于脉冲噪声, 经高斯卷积后的脉冲幅值仍然相对较高, 所以很难较好地消除脉冲噪声对真实边缘估计的影响。

2 智能中值-非线性扩散滤波

中值滤波(MF)方法是一种排序滤波方法, 是非线性的。中值滤波的基本原理是: 用该像素的相邻像素的灰度中值来替代该像素的值。中值滤波适用于脉冲噪声, 但对高斯噪声是无效的。中值滤波表示为

$$\hat{u}(x, y) = \text{Med}_{(s,t) \in S_{xy}}(u(s, t)) \tag{3}$$

MF 对边缘的保护存在着不足。因此, 改进中值滤波, 提出了智能中值滤波(IMF)方法, 在保护边缘方面要优于 MF, 它采用了判断噪声的标准, 并不是单纯的用中值替代。IMF 表示为

$$\hat{u}(x, y) = \text{Int}(\text{Med}(u(s, t))) = \begin{cases} u_0 & u_{\text{med}} + \sigma_{\text{var}} > u_0 > u_{\text{med}} - \sigma_{\text{var}} \\ u_{\text{med}} & \text{else} \end{cases} \tag{4}$$

式中: u_{med} 为当前窗口中值, σ_{var} 为当前窗口方差, u_0 为当前像素。

闪光照相光电接收系统获得的 CCD 图像中含有多种噪声, 分别来自于散射的 X 光子、电磁干扰、CCD 的暗电流噪声和读出噪声等。

以上几种噪声中,白斑噪声和涨落噪声对图像的污染最严重,对图像的后期处理影响也最大。白斑噪声呈随机的颗粒状,且大小不同,其灰度值比相邻象素灰度值大得多,一般把它看成脉冲型噪声。涨落噪声起伏较小,一般把它看成高斯型噪声。

由于白斑噪声的存在,要想克服噪声振荡对梯度估计的影响,必须采用较大方差的高斯卷积核,这会使边缘错位。为了克服上述不足,发展了传统非线性扩散滤波,采用智能中值滤波的预滤波来进行对梯度值的估计。智能中值滤波有很好边缘保持能力。这样在消除噪声的同时也能很好地保护图像边缘。智能中值-非线性扩散滤波方案的表达式为

$$\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial t} = \nabla \cdot (g(|\nabla(\text{Int}(\text{Med } u))|)\nabla u) \quad t > 0$$

$$u(x,y,0) = u_0(x,y) \quad t = 0$$
(5)

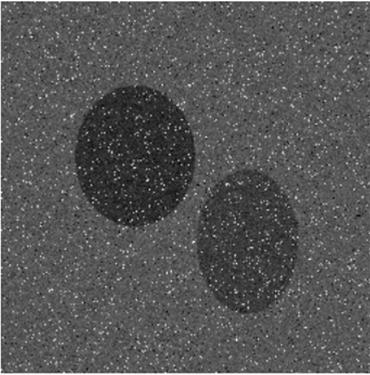
式中: $\text{Int}(\text{Med } u)$ 表示对图像 u 进行智能中值滤波。在实际的实现过程中不需要每次迭代都对图像进行智能中值滤波,整个发展过程中只需进行一次,所以不会明显增加滤波的时间。

3 数值实验结果及分析

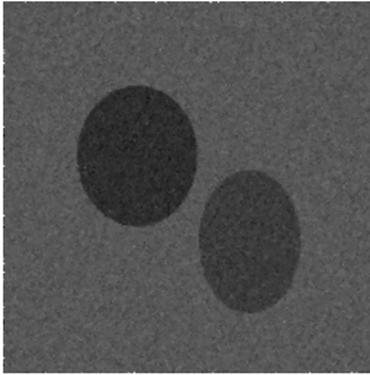
为了验证本文方法的有效性,采用模拟的图像进行扩散实验,分别对比了 P-M 扩散方案和 Catte 扩散方案的结果,见图 2。为了定量地说明问题,采用均方误差(MSE)和信噪比改善因子(PSNR)来衡量图像消噪的效果,分别定义为

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y(i,j) - s(i,j))^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N s^2(i,j)}$$
(6)

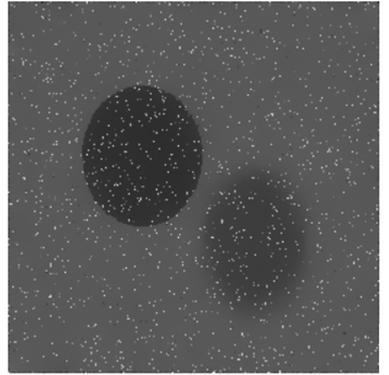
(a) Gaussian noise and impulse noise



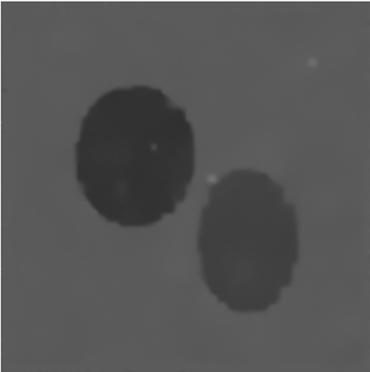
(b) Intelligent median filter



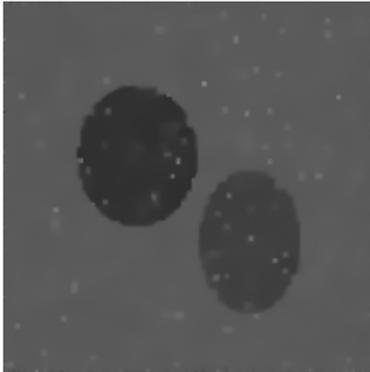
(c) P-M method



(d) Catte's method with large variance



(e) Catte's method with small variance



(f) IMNDF method

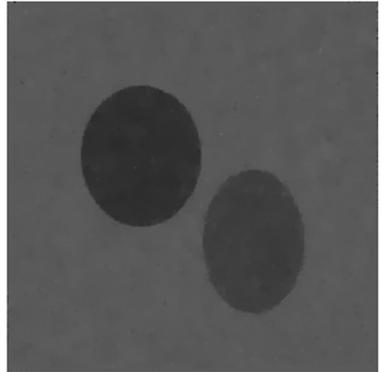


图 2 滤波结果

Fig. 2 Filtered images

$$\frac{\text{PSNR}}{\text{dB}} = -10 \lg \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y(i,j) - s(i,j))^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x(i,j) - s(i,j))^2} \quad (7)$$

式中: M 和 N 分别为图像的宽度和高度; $s(i,j)$ 是未加噪声的原始图像; $x(i,j)$ 是加入噪声后的输入图像; $y(i,j)$ 是滤波结果。(6) 式中加入负号使 PSNR 为正。显然, PSNR 值越大, MSE 越小, 消噪和保边效果越好。

在数值实验中, 选择(2)式的扩散系数函数。对于 Catte 方法和本文方法的比较, 选择统一的边缘阈值 K 。标准图像为 256×256 的 16 位灰度图像。P-M 扩散方案, 迭代次数为 2 000, 边缘阈值 $K=1\ 000$, Catte 方法和 MADF 方案迭代次数为 2 000, 边缘阈值 $K=200$ 。

表 1 给出了三种不同扩散滤波方法的滤波性能参数比较。

表 1 三种扩散滤波方案的消噪性能参数

Table 1 Comparison of the efficiency of three nonlinear diffusion filters

方法	σ^2	MSE	PSNR
P-M	—	0.006244	3.678755
Catte	0.05	0.003859	5.814059
Catte	0.15	0.002964	6.855083
IMNDF	—	0.000921	11.936740

从上述的实验结果可以看出, 采用 P-M 扩散方案要选择较大的边缘阈值来滤除高幅度的脉冲噪声, 所以造成了图像的模糊, 并且对于幅度更大的噪声仍然没有消除, 消噪结果的均方误差较大, 信噪比改善因子较小。Catte 方法, 采用较小方差的高斯卷积效果并不好, 而较大方差的高斯卷积引起边缘位

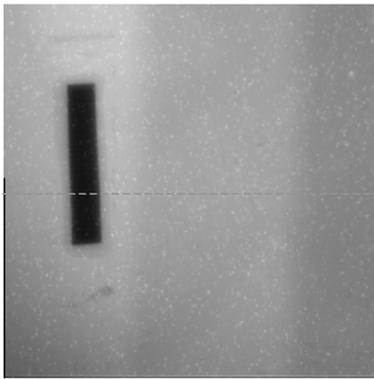


图 3(a) 原始 CCD 图像

Fig. 3(a) Original CCD image

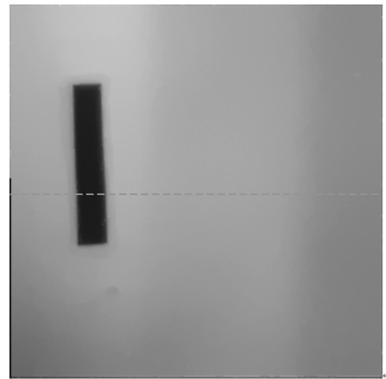


图 3(b) IMNDF 方法消噪后的图像

Fig. 3(b) Filtered image after IMNDF method

置的偏移, 它的均方误差也较大。而本文方法, 采用中值滤波的方法并不会破坏边缘位置, 取得了较好的效果, 信噪比得到很好的改善, 均方误差也较小。此外, 比较相同条件下 Catte 方法和本文方法, 可以看出 IMNDF 的效果要比 Catte 方法好。

从上述的实验结果可以得出结论: 对于带有高斯和脉冲混合的噪声图像, 采用智能中值-非线性扩散滤波方法可以取得较好的效果, 边缘位置不会发生错位, 从而满足闪光照相 CCD 图像处理的要求。图 3 是对闪光照相 CCD 图像的处理结果, 图 4 是对应的剖面, 可以看出消噪的效果。图 4 中, G 为灰度值。

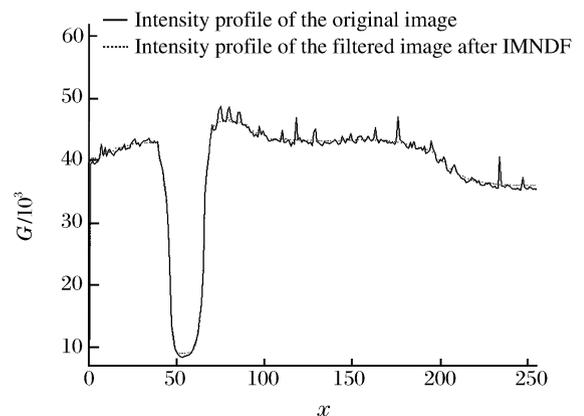


图 4 剖面比较

Fig. 4 Comparison of profiles

4 结论及展望

讨论了闪光照相中 CCD 图像中噪声的来源和类型,指出了对于此类图像进行消噪声的难度。单一的基于 PDE 的 P-M 非线性散滤波方法对于高斯噪声的消除有着十分理想的效果,但是对脉冲噪声效果不好。本文中提出的 IMNDF 对混合噪声的消噪效果较好,且不会破坏边缘的位置,可以在消除噪声的同时尽可能地保护图像边缘。试验结果表明,IMNDF 方法取得的效果较 P-M 方案和 Catte 方法都要好。

在今后的工作中还需要设计更好的中值滤波器进行预滤波,如自适应中值滤波,目的是要更好地保护一些可能被破坏的细节。另外,对于边缘阈值的自适应寻找方式也是今后要改进的一个方面。

参考文献:

- [1] 施将君. 高能闪光照相引论[R]. 绵阳:中物院流体物理所科协,1998.
- [2] 王婉丽,江孝国,吴廷烈,等. 台阶法测量 CCD 成像系统 MTF 的数据处理方法[J]. 光电子·激光,2002,13(2):173-175.
WANG Wan-li, JIANG Xiao-guo, WU Ting-lie, et al. Data processing method of measuring CCD imaging MTF with step sample[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2002,13 (2):173-175.
- [3] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Trans PAMI, 1990,12(7):629-639.
- [4] Catte F, Lions P L, Morel J M, et al. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion[J]. SIAM J Numerical Analysis, 1992,29 (1):82-193.

A new method of diffusion filtering for flash X-ray radiographic CCD image

QIAN Wei-xin*, LIU Rui-gen, WANG Wan-li,

QI Shuang-xi, WANG Wei, CHEN Jin-ming

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: In order to improve CCD images received from the flash X-ray radiography, a new method called intelligent median-nonlinear diffusion filtering (IMNDF) were proposed based on nonlinear Partial Differential Equation (PDE). This method takes the advantage of both the intelligent median filter and the nonlinear diffusion filter. The numerical results show that the proposed method can eliminate the combination of Gaussian noise and impulse noise efficiently with edge-preserving. The PSNR (promotion of signal-to-noise ratio) of the new method is 3~5 times larger than that of the traditional methods. Well denoised results were obtained for flash X-ray radiographic CCD images.

Key words: mechanics of explosion; image denoising; nonlinear diffusion; flash X-ray radiography; PDE

* Corresponding author: QIAN Wei-xin
E-mail address: qwensence@etang.com
Telephone: 0816-2484178