

基于广义变分正则化的红外图像噪声抑制方法

钱伟新,王婉丽,祁双喜,程晋明,刘冬兵

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:文中提出了一种广义变分正则化的红外图像噪声抑制方法,该方法采用 p -范数代替目前广泛被采用的全变分范数作为正则项,构造了用于抑制图像噪声的展平泛函,从而将图像噪声抑制问题转化为能量泛函优化问题。通过推导,得到了相应的用于图像噪声抑制的非线性偏微分方程,并采用固定点迭代算法进行线性化求解,使得迭代解稳定收敛。数值试验结果表明,该方法能够有效地去除图像噪声,较之全变分图像噪声抑制方法,新方法进一步提高了对小宽度图像边缘的保持能力,是一种有效且性能优良的红外图像噪声抑制方法。

关键词: 广义变分; 正则化; 全变分; 非线性偏微分方程

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0067-05

Generalized variation-based regularization method for infrared image denoising

Qian Weixin, Wang Wanli, Qi Shuangxi, Chen Jinming, Liu Dongbing

(Institute of Liquid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstracts: A generalized variation (GV) regularization based infrared image denoising method was proposed in this paper. In the new method, a p -norm was used as regularized term to replace total variation (TV) norm in traditional TV based image denoising methods which were used popular in image processing domain. Then a smoothing functional was constructed for noised removal. Thus, the problem of image denoising was transformed to a problem of a functional minimization. A nonlinear partial differential equation (PDE) was deduced from the new image denoising model. To solve the nonlinear PDE, the fixed point iteration (FPI) scheme was introduced to linear the PDE. The stability and convergence of regularized solution were ensured by FPI scheme. The numerical experimental results show that comparison with TV regularized method, the GV regularized method can preserve image edge including those small width edges more efficiently while removing noise. The GV regularized method is an efficient image noise removed method with better performance of noise removal and edge preserving.

Key words: generalized variation; regularization; total variation; nonlinear partial differential equation

收稿日期:2013-05-10; 修订日期:2013-06-13

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61307014);中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B0402006);

国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ130019);科工局技术基础科研项目(2012XXX)

作者简介:钱伟新(1979-),男,副研究员,硕士,主要研究工作是辐射成像光电接收技术及其图像处理方法方面的研究。

Email:qwensence@163.com

0 引言

红外焦平面阵列(IRFPA)在成像系统中发挥着重要作用。红外图像在获取、传播过程中往往会受到多种因素的影响,导致图像退化,而噪声则是图像退化最典型的一种表现。特别是在目前多数红外技术应用中,由于目标的红外辐射非常微弱,探测器的光生电流通常为 nA(甚至 pA)量级,由此接收到的红外图像信噪比很低。为了能够较好地进行后期处理以提取所需信息,抑制红外噪声、增强边缘对比度是红外图像预处理阶段的首要任务。陈维真等人^[1]基于探测器噪声分析提出了一种红外图像的滤波方法,采用小波域的自适应维纳滤波器,达到滤波并增强图像的功能。

图像消噪声的方法很多,在早期的图像消噪声处理中,均采用线性方法,此类方法可归结为 Tihkonov 正则化方法^[2],该类方法不适于处理不连续函数问题,所以,在抑制噪声的同时,会平滑图像边缘信息(通常,图像边缘都是间断的)。为了解决上述问题,Rudin、Osher 和 Fatemi^[3]提出了一种基于全变分(Total Variation, TV)模型的图像噪声抑制方法。它的实质就是一种非线性扩散滤波方法,能在抑制噪声的同时较好地保持图像的边缘,因而引起了研究者的极大重视,由此发展成为一类目前十分流行的图像处理方法^[4-7]。刘永进等人^[8]将数字全变分滤波引入红外图像序列的非均匀性校正中,取得了良好的效果。但是,该方法对低信噪比图像进行噪声抑制处理时,对小宽度图像边缘仍然存在较严重的模糊效应。

为了能更好地保护红外图像中的各类边缘信息,以提高提取目标的准确性,文中提出了一种广义变分正则化的图像噪声抑制的方法,该方法采用 p -范数来代替传统 TV 方法中的 TV 范数作为正则项,构造了新的展平泛函,将图像噪声抑制问题转换为能量泛函优化问题,并采用变分求导的方法推导了新模型相应的非线性偏微分方程,同时引入固定点迭代法将非线性偏微分方程进行线性化数值求解,使得迭代解稳定收敛。

1 全变分图像噪声抑制方法

假设一幅真实的清晰图像为 $u(x, y)$,退化图像

为 $g(x, y)$,则图像退化过程可表示为:

$$g(x, y) = Hu(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

式中: H 为模糊算子,通常表示点扩展函数与实际图像的卷积作用; $n(x, y)$ 为高斯白噪声。文中只考虑图像噪声抑制问题,故此处的 H 为单位矩阵,即公式(1)可以改写为

$$g(x, y) = u(x, y) + n(x, y) \quad (2)$$

图像噪声抑制问题就是由已知的退化图像 $g(x, y)$ 恢复真实图像 $u(x, y)$ 的泛函问题。Rudin 等人将图像噪声抑制问题表示成能量优化问题(即最小化能量泛函),提出了全变分(TV)正则化的图像噪声抑制方法,表示如下:

$$\min J(u) = \alpha TV(u) + \frac{1}{2} \|u - g\|_{L^2}^2 \quad (3)$$

式中: $TV(u) = \int_{\Omega} |\nabla u| dx dy = \int_{\Omega} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} dx dy$; ∇u 为 u 的梯度; Ω 为图像的支持域。能量泛函表示最小二乘项和惩罚项(正则化项)的和,最小化能量泛函就是使解图像逼近原始图像,从而达到抑制噪声的作用。根据参考文献[5],问题(3)允许被求解函数不连续,只要它是有界变差函数即可。所以,公式(3)是一个稳定泛函。考虑到 ∇u 在 $u=0$ 处不可微,通常采用一较小的正常数对全变分函数做少许扰动,即

$$TV_{\beta}(u) = \int_{\Omega} \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + \beta^2} dx dy \quad (4)$$

这样,基于 TV 正则化的图像噪声抑制问题就表示为:

$$\min J(u) = \min \left[\alpha TV_{\beta}(u) + \frac{1}{2} \|u - g\|_{L^2}^2 \right] \quad (5)$$

TV 像图像噪声抑制的最大优点就是能够在消噪声的同时较好地保护图像边缘信息,但是对于宽度较小的边缘也会产生平滑,即模糊边缘,这对某些图像是极为不利的,特别是对红外图像细节的保护是非常不利的。

2 广义变分正则化的图像噪声抑制方法

为了解决 TV 正则化图像噪声抑制方法的不足,进一步提高对小细节的保护能力,文中采用 p -范数作为正则项来构造图像噪声抑制问题的能量泛函,称为 $GV(GV = \int_{\Omega} |\nabla u|^p dx dy)$ 正则化图像噪声抑制

方法,相应的能量最优化问题表示为:

$$\min J(u) = \min \left[\alpha GV + \frac{1}{2} \|u - g\|_{L^2}^2 \right] \quad (6)$$

式中: $p \in (0, 2]$ 为广义参数。由公式(6)可知, $p=1$ 时,该方法就退化为 TV 正则化图像噪声抑制方法; $p=2$ 时,该方法就退化为 Tikhonov 正则化图像噪声抑制方法。进一步分析表明:当 $p>1$ 时,正则解倾向于连续函数,且随着 p 的增大其光滑性越来越强;当 $p \leq 1$ 时,其正则解倾向于不连续函数,且随着 p 的减小其不连续性越来越强。图1和图2给出了在相同正则参数条件下的不同广义参数 p 对图像边缘的影响。

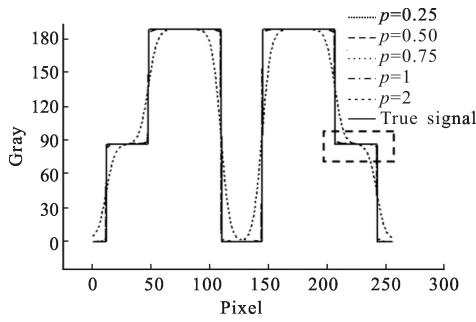


图1 不同 p 对边缘的影响

Fig.1 Influence to edge with different p

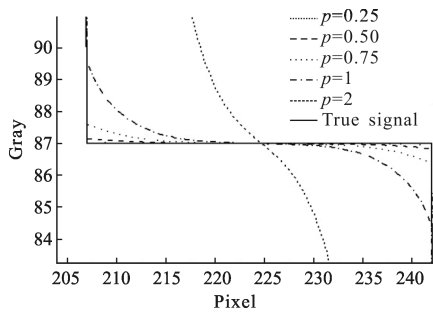


图2 图1虚线框区域的放大

Fig.2 Local zoomed image in Fig.1

从图1和图2可知,在正则参数较大时,采用较小 p 值的广义变分正则化方法对边缘有较好的保护作用。

下面,笔者来求解最优化问题(公式(6))。从公式(6)可以看出,该泛函属于

$$J[u(x, y)] = \iint_{\Omega} F \left(x, y, u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy$$

型的泛函,对应的 F 为:

$$F = \alpha |u|^p + \frac{1}{2} (u - g)^2 \quad (7)$$

该类泛函求极值的必要条件要满足欧拉-拉格朗日方程:

$$F_H - \frac{\partial}{\partial x} (F_m) - \frac{\partial}{\partial x} (F_n) = 0 \quad (8)$$

式中: $H=u$; $m=\frac{\partial u}{\partial x}$; $n=\frac{\partial u}{\partial y}$ 。所以,对于公式(7),有:

$$F_H = u - g; F_m = u_x \frac{p}{(1 \nabla |u|)^{2-p}}; F_n = u_y \frac{p}{(1 \nabla |u|)^{2-p}} \quad (9)$$

将公式(9)代入公式(8),得:

$$\begin{aligned} & -\alpha \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[u_x \frac{p}{(1 \nabla |u|)^{2-p}} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[u_y \frac{p}{(1 \nabla |u|)^{2-p}} \right] \right\} + \\ & (u-g)=0 \Rightarrow -\alpha \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right] \cdot \left[u_x \frac{p}{(1 \nabla |u|)^{2-p}}, u_y \frac{p}{(1 \nabla |u|)^{2-p}} \right] + \\ & (u-g)=0 \Rightarrow -\alpha \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right] \cdot \left[\frac{p}{(1 \nabla |u|)^{2-p}} [u_x, u_y] \right] + \\ & (u-g)=0 \Rightarrow -\alpha \nabla \cdot \left[\frac{p}{(1 \nabla |u|)^{2-p}} \nabla u \right] + (u-g)=0 \quad (10) \end{aligned}$$

式中: $\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$ 为梯度算子。

为了防止 $u=0$ 处 ∇u 不可微,对GV范数做与TV范数同样的扰动处理,这样,GV正则化图像噪声抑制模型的欧拉-拉格朗日方程为:

$$-\alpha \nabla \cdot \left[\frac{p}{(1 \nabla |u|)_{\beta}^{2-p}} \nabla u \right] + (u-g)=0 \quad (11)$$

求解此方程的主要问题是高度非线性项 $\nabla \cdot \left(\frac{p \nabla u}{\sqrt{(1 \nabla |u|)_{\beta}^{2-p} + \beta^2}} \right)$ 的线性化,典型的Newton法已不是很有效。文中利用C.Vogel和M.Oman^[9]提出了固定点迭代法来求解上述Euler-Lagrange方程,则有:

$$-\alpha \nabla \cdot \left[\frac{p}{(1 \nabla |u^k|)_{\beta}^{2-p}} \nabla u^{k+1} \right] + (u^{k+1} - g) = 0 \quad (12)$$

从公式(12)可以看出,对给定初始条件 $u^0=g$ 的情况, u^{k+1} 均由每一步迭代的 u^k 求出,这是一种逐次线性化的方法。另外,这种固定点迭代法是线性收敛的,但在实际的图像噪声抑制处理中发现,它的收敛是很快的,一般迭代几次~几十次就能有效收敛。此迭代方法还有一个好处,即它是全局收敛的,因此它与初值的选择无关。

3 数值试验及分析

该节中,首先给出了GV正则化图像噪声抑制方法的数值试验结果,并与TV正则化图像噪声抑制方法进行了比较。采用峰值信噪比(Peak Signal-

to-Noise Ratio, PSNR)和归一化均方误差(Normalized Mean Squared Error, NMSE)来客观评价噪声抑制方法的性能。

图 3 是原始图像,图 4 是加入高斯噪声的噪声图像(信噪比为 8.79 dB),图 5 是 TV 正则化图像噪声抑制结果,图 6~8 是 GV 正则化图像噪声抑制结果(说明:为了能够说明问题,在同等条件下比较噪声抑制方法的噪声抑制和边缘保护能力,所以,上述方法中的正则参数均相同)。

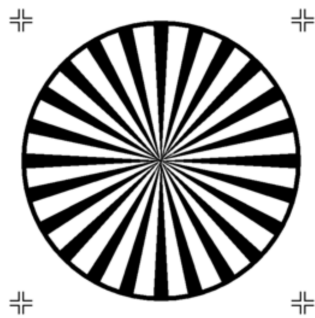


图 3 原始图像
Fig.3 Original image

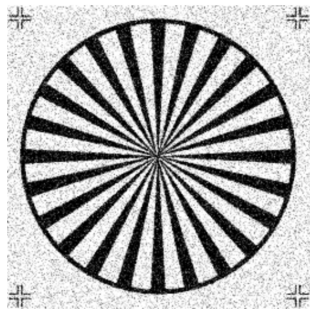


图 4 噪声图像
Fig.4 Noisy image

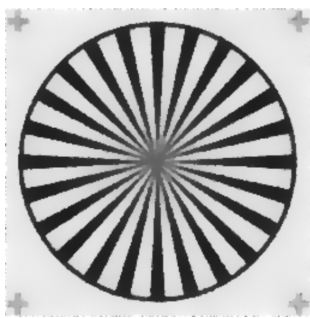


图 5 TV 方法消噪声结果
Fig.5 Denoised by TV method

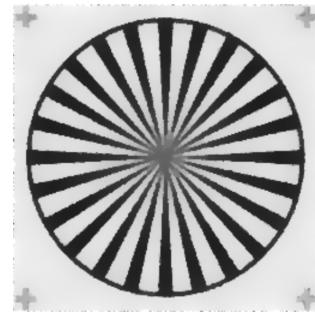


图 6 GV 方法消噪声结果($p=0.75$)
Fig.6 Denoised by GV method($p=0.75$)

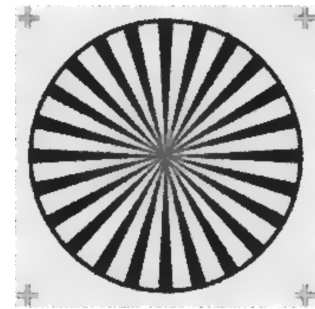


图 7 GV 方法消噪声结果($p=0.5$)
Fig.7 Denoised by GV method($p=0.5$)

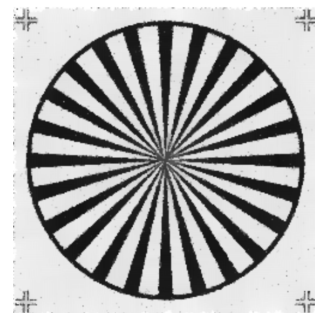


图 8 GV 方法消噪声结果($p=0.25$)
Fig.8 Denoised by GV method($p=0.25$)

由图 5~8 可以看出,TV 正则化噪声抑制方法能够较好地保持图像的边,但是对于宽度较小的边

缘仍然存在着较大的模糊,特别是对信噪比较低的图像,这是因为为了有效地抑制噪声,必须增大正则参数,从而导致了图像边缘的模糊。从图 5 来看,四个角上的十字细线及圆盘中心的边角都存在着较为严重的模糊。而采用了 GV 正则化方法后的消噪声结果能够较好地保持这些宽度较小的图像边缘。随着广义参数的减小,对于小宽度边缘的保护能力更为突出,说明该方法对小宽度图像边缘保护存在着明显的优势。

表 1 给出了评价两种不同方法抑制噪声的性能参数指标。

表 1 不同方法对噪声图像噪声抑制的性能比较

Tab.1 Comparison in PSNR and NMSE of different methods for noisy image with SNR=7.89 dB

	TV	GV($p=0.75$)	GV($p=0.5$)	GV($p=0.25$)
PSNR	16.447 3	16.536 3	17.259 6	18.779 5
NMSE	0.033 9	0.033 2	0.028 1	0.019 8

从表 1 中的数据可以看出, GV 正则化图像噪声抑制方法对于低信噪比且存在小宽度边缘的图像有较好的噪声抑制性能, 随着 p 值的减小, GV 正则化方法的图像噪声抑制性能越来越好。总之, GV 方法较之 TV 方法有较好的噪声抑制性能与边缘保持能力。

图 9(a) 是一幅直升飞机的红外图像, 其中包含一些细节信息, 如尾部标志、机身伪装等。图(a)为带有噪声红外成像图像, 图(b)~(d)比较了 TV 正则化方法和 GV 正则化方法的噪声抑制效果。通过比较可以发现, TV 正则化方法对于红外图像产生了较大的模糊, 使得许多细节都无法辨认, 如尾部标志和机身伪装; 而 GV 正则化方法则能较好地保护这些细节信息, 抑制噪声后的图像更加清晰可辨。



(a) 原始红外图像 (b) TV 方法消噪声结果
(a) Original infrared image (b) Denoised by TV method



(c) GV 方法消噪声结果($p=0.5$) (d) GV 方法消噪声结果($p=0.25$)
(c) Denoised by GV method ($p=0.5$) (d) Denoised by GV method ($p=0.25$)

图 9 红外图像的噪声抑制结果比较

Fig.9 Comparison of denoised results by different methods for infrared image

4 结 论

红外图像噪声抑制是红外图像图像处理中最基本且十分重要的研究课题。TV 正则化图像噪声抑制方法是近几年来在图像消噪声领域里应用广泛且效果较好的图像处理方法, 已经在红外图像处理中得到了一定的应用。文中针对 TV 图像噪声抑制方法对小宽度图像边缘存在模糊的不足, 提出了基于广义变分的 GV 正则化红外图像噪声抑制方法, 利用 p -范数构造用于图像噪声抑制的正则化泛函, 将图像噪声抑制问题转为能量泛函优化问题, 推导了求解能量优化问题的非线性 PDE, 通过固定点迭代法进行线性化数值求解。数值试验结果表明, 该方法在抑制图像噪声的同时进一步加强了对小宽度图像边缘的保护, 对于低信噪比图像能够取得较好的噪声抑制结果, 是一种有效且性能优良的红外图像噪声抑制方法。当然, 在信噪比很低时, 较小的 p 值可带来较好的噪声抑制效果, 但是在信噪比较高时, 较小 p 值的噪声抑制能力相对要弱一些, 这时需要权衡噪声抑制与边缘保护之间的关系, 这是今后工作中进一步深入研究的重点。

参考文献:

- [1] Chen Wei zhen, Zhou Xiaodong, Zhang Chunhua. IR image enhancement algorithm based on analysis of detector noise characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 629-633. (in Chinese)
- [2] Tikhonov A N. On solving incorrectly posed problem and method of regularization [J]. *Dokl Acad Nauk USSR*, 1963, 151(3): 501-504.
- [3] Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physica D*, 1992, 60: 259-268.
- [4] Vogel C R, Oman M E. Fast, robust total variation-based reconstruction of noisy, blurred images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(6): 813-824.
- [5] Chan T F, Wong C K. Total variation blind deconvolution[J]. *IEEE Transactions on ImageProcessing*, 1998, 7(3): 370-375.
- [6] Chan T F, Osher S, Shen J. The digital TV filter and nonlinear denoising [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2001, 10(2): 231-241.
- [7] Acar R, Vogel C R. Analysis of bounded variation penalty methods for ill-posed problem [J]. *Inverse Problem*, 1994, 10: 1217-1229.
- [8] Vogel C R, Oman M E. Iterative methods for total variation denoising[J]. *SIAM J Sci Comput*, 1996, 17(1): 227-238.
- [9] Liu Yongjin, Zhang Guohua, Zhao Yigong. Application of digital total variation filter to nonuniformity correction in infrared image sequences[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2216-2221. (in Chinese)