

基于各向异性扩散的红外图像噪声滤波算法

白俊奇 陈 钱

(南京理工大学光电工程国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要 抑制红外焦平面阵列探测器噪声时,为了有效保持边缘细节,在塔基(Tukey)扩散模型的基础上,提出了一种基于各向异性扩散的滤波算法。算法由微分法提取边界点集,利用信号和噪声的空间分布特性对图像进行预处理,从而改善了 Perona-Malik(P-M)方程的病态性。建立了新的扩散系数且该系数在理论上满足 Charbonnier 等人构造准则。通过给定边界条件实现了有利于保持边缘的目的。该算法已在基于 DSP+FPGA 的硬件平台上实时运行,较好地抑制了噪声,又有效地保持了边缘,处理后的图像具有良好的视觉效果。

关键词 红外焦平面阵列; 各向异性扩散; Tukey 模型; 滤波

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A

Algorithm for Infrared Image Noise Filtering Based on Anisotropic Diffusion

Bai Junqi Chen Qian

(National Defense Key Laboratory of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract To achieve better infrared focal plane array (IRFPA) noise suppression with minimum edge blurring, an anisotropic filtering algorithm is proposed based on Tukey model. This algorithm distills edge by differential, and then the image preprocessing is carried out to improve ill-posed problem of Perona-Malik (P-M) equation based on the distribution properties of signal and noise. A new diffusion coefficient was established to satisfy Charbonnier rule. Initialized edge conditions are presented to preserve edge. It has run on the DSP+FPGA platform, and has good effect in the respect of noise removal and edge preservation. The visual effect of the treated image is promoted.

Key words infrared focal plane array; anisotropic diffusion; Tukey model; filtering

1 引 言

红外焦平面阵列(IRFPA)在成像系统中发挥着重要作用,然而在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,目标信号几乎隐没在各种噪声中,导致目前图像存在低信噪比、边缘模糊^[1]等问题。因此,抑制红外噪声,增强边缘衬比度是一个重要的研究课题。

传统的各向同性滤波对图像平滑区和边缘进行相同尺度滤波,虽然噪声得到抑制,但是边缘会被模糊甚至消失,不利于提高信噪比。近年来,各向异性

扩散技术^[2~4]被广泛应用于图像处理领域,其特点是实现保边缘平滑。Perona-Malik (P-M)等^[5]首次将其运用于图像的多尺度描述及增强,由于扩散因子对噪声的敏感性导致方程是病态的。于是,许多学者都提出改进的各向异性扩散方法^[6]。Tukey^[7]提出了一种性能较好的扩散函数,通过设定梯度阈值实现边缘保持,然而选择合理的阈值区分边缘和噪声是一个难题。

为了尽可能削弱噪声、最大限度地保持边缘,本文首先利用导数算子,通过设置门限的方法,提取含噪图像的边界点集;其次根据噪声空间不相关性剔

收稿日期: 2007-10-24; 收到修改稿日期: 2007-11-29

基金项目: 国防预研基金(40405050303)和预研基金(51403030905BQ0216)资助课题。

作者简介: 白俊奇(1982—),男,博士研究生,主要从事红外图像实时处理、光电图像噪声理论等方面的研究。

E-mail: baixiaoqi168@yahoo.com.cn

导师简介: 陈 钱(1964—),男,教授,主要从事光电信息探测与处理,红外图像实时处理和数字视频技术等方面的研究。

E-mail: cheng@mail.njust.edu.cn

除噪声点,根据信号空间相关性更新已预处理的图像边界;最后利用本文提出的各向异性扩散算法对图像进行去噪处理,实验表明:本文提出的滤波算法在去除噪声的同时能有效地保持边缘。

2 各向异性扩散理论

各向异性扩散的基本思想:将定义在凸域 $\Omega \subset R \times R$ 上的原始图像 I_0 作为一种媒介,在上面以可变的速率发生扩散,从而得到一系列逐渐增加的平滑图像 $I(x, y, t)$ 。

1990年,Perona等^[5]在满足各向异性扩散原理的前提下,给出了偏微分方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}[g(|\nabla I|) \cdot \nabla I(x, y, t)], \\ I(x, y, t)|_{t=0} = I(x, y, 0), \end{cases} \quad (1)$$

式中 $I(x, y, t)$ 表示图像强度, ∇ 表示梯度算子, div 表示散度, $g(\cdot)$ 表示扩散系数(非负有界递减函数),是局部图像梯度幅值 $|\nabla I|$ 的函数。

从统计角度对各向异性扩散进行了解释,通过比较几个典型的扩散函数,指出 Tukey 扩散函数是一种性能较好的函数,其定义如

$$g(|\nabla I|) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{|\nabla I|}{T} \right)^2 \right], & |\nabla I| \leq T \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

可以看出, Tukey 扩散函数选用一个梯度阈值 T , 当图像梯度小于 T 时,根据各个方向的 $|\nabla I|$ 决定扩散系数的大小;当大于 T 时,不管扩散时间怎样选取,扩散过程都将被终止。

然而, Tukey 扩散函数并不能解决扩散因子对噪声的敏感性问题,阈值 T 一旦选定,图像中噪声梯度大于 T 的像素点将被保留,假设噪声梯度大于 T 的点很多,则图像去噪效果不理想。针对 Tukey 扩散函数的这个缺点,本文从去除高梯度噪声点的角度出发,通过噪声去除、边界更新的方法实现图像的保边缘平滑。

3 图像预处理

3.1 噪声剔除模型

一幅给定的图像,若噪声与图像信号无关,则退化模型可表示为

$$g(x, y) = f(x, y) + n(x, y), \quad (3)$$

式中 $f(x, y)$ 表示原图像, $n(x, y)$ 表示噪声, $g(x, y)$ 表示含噪图像。

对于实际的红外成像探测器而言,由于半导体材料性能及读出电路的干扰,成像过程中会产生热噪声、高斯噪声、非均匀性散粒噪声^[8~11]等。这些噪声严重制约各向异性扩散的应用,因此,需尽可能将其减弱。假定空间位置 (x, y) 的噪声 $n(x, y)$ 与其他位置的不相关;则噪声剔除模型如下:

利用微分法

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial \alpha} = \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \sin \alpha, \quad (4)$$

计算含噪图像(图1) $g(x, y)$ 灰度在方向 α 上的灰度变化率,则得到如图2所示的边界点集。

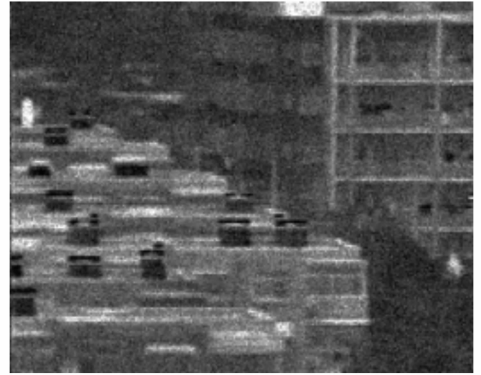


图1 初始含噪图像

Fig. 1 Original image with noise



图2 含噪图像的边界点集图

Fig. 2 Edge nod set image of image with noise

噪声剔除准则:由噪声空间不相关性可知,满足如下条件可视为噪声点:1)高梯度点 $g(x, y)$ 周围八邻域不存在其他高梯度点;2)若存在,点 $g(x, y)$ 与该点之间的差值较大。经上述判断准则获得的噪声点可通过平滑滤波将其剔除。

3.2 边界更新模型

由于提取含噪图像 $g(x, y)$ 边界不能完全反映原图像 $f(x, y)$ 的边界信息,所以必须对边界重新定义。边界更新是本算法能否最大程度保持边缘细节的关键。因为该模型给定边界条件,直接决定该边

缘点是否被保持。边界更新模型如下:

更新算法从信号空间相关性角度出发,对噪声剔除后的边界点集重新划定。更新准则:若边界点 $g(x,y)$ 在其邻近八邻域和十六邻域均不存在其他边界点,算法认定该点相关性弱,不进行更新处理;反之,若 $g(x,y)$ 在其八邻域不存在其他边界点,在其十六邻域存在其他边界点,且与 $g(x,y)$ 大小相近,算法认定该点和 $g(x,y)$ 之间的空间相关性强,它们属于同一边界,并且认定这两点之间由于噪声影响而遗失一边界点。算法将通过补充遗失点来连接图像的边缘,完成边界更新,经更新的边界点集如图 3。



图 3 更新后的边界点集图

Fig. 3 Updated edge nod set image

3.3 滤波算法

针对 P-M 各向异性扩散方程解的不适定性问题,提出了一个新的扩散系数:

$$g_1(|\nabla I|) = \frac{1}{1 + k_1 \cdot |\nabla I(i,j)| \cdot \sigma(i,j)^{k_2}} \quad (5)$$

$$\sigma(i,j) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N [I - \bar{T}(p_0, q_0)]^2 \quad (6)$$

式中 k_1, k_2 为平滑系数, $\sigma(i,j)$ 表示窗口 $M \times N$ 的标准差, I 表示点 (p,q) 的值, $\bar{T}(p_0, q_0)$ 表示邻域 $M \times N$ 内的均值。

(5) 式中 $\sigma(i,j)$ 不仅能合理反映边界点与平滑区域的梯度差异,由于它与滑动窗口内多像素点相关,可减弱对噪声的敏感性。该扩散系数满足 Charbonnier^[11] 等人提出的构造准则,简要证明如下:

$$\frac{\partial I(x,y,t)}{\partial t} = \text{div}[g_1(\nabla I) \cdot \nabla I(x,y,t)] = g(\nabla I) \cdot I_{\varepsilon} + \Phi'(\nabla I) \cdot I_{\eta} \quad (7)$$

式中 I_{ε} 和 I_{η} 分别为垂直于 ∇I 方向和沿 ∇I 方向的扩散项, $g(\nabla I)$ 为垂直于边缘方向的扩散系数, $\Phi'(\nabla I) = [\nabla I \cdot g(\nabla I)]'$ 为沿边缘方向的扩散系数。

在图像平滑区域内,由于扩散系数中的 $\sigma(i,j)$ 和 $|\nabla I(i,j,t)|$ 都接近于 0,

$$\lim_{|\nabla I \rightarrow 0} [\Phi'(|\nabla I|)/g(|\nabla I|)] = 1,$$

算法对各个方向的平滑程度相同,抑制了噪声;而在边缘和细节区域,由于 $\sigma(i,j)$ 和 $|\nabla I(i,j,t)|$ 很大, $\lim_{|\nabla I \rightarrow a} [\Phi'(|\nabla I|)/g(|\nabla I|)] = \infty$, 沿边缘方向的扩散速度远大于沿垂直边缘方向,所以算法保持了边缘细节。算法滤波过程为

$$g_2(|\nabla I|) = \begin{cases} g_1(|\nabla I|), & \text{no edge} \\ 0, & \text{edge} \end{cases} \quad (8)$$

由此可知, $g(x,y)$ 在边界点时停止扩散,保持了边界; $g(x,y)$ 在平滑区域时,随着梯度和方差对图像进行不同尺度滤波。

3.4 滤波步骤

1) 算法初始化:获取图像 $I(x,y)$, 即

$$I(x,y,t)|_{t=0} = I(x,y);$$

2) 在以 $|\eta_s|$ 为邻域的移动窗口 η_s 中,求方向导数 $\nabla I_s(x,y,t)$;

3) 利用(5)式计算扩散系数 g_d ;

4) 根据离散更新方程

$$[I(x,y)]_{t+1} = \left[I(x,y) + \frac{1}{|\eta|} \sum_{d=1}^{|\eta|} g_d \cdot \nabla I_s(x,y) \right]_t$$

计算滤波迭代后的图像;

5) 是否结束迭代,是则停止;否则从第 2) 步开始新的迭代。

4 实验结果

使用标准差、等效视数、辐射分辨率衡量各种滤波算法的效果,如表 1 所示。其中,等效视数由 $\text{ENL} = E(I)^2 / \text{Var}(I)$ 求出,反映滤波算法的平滑能力,辐射分辨率由 $\gamma = 10 \cdot \lg[1 + \sqrt{\text{Var}(I)}/E(I)]$ 求出,反映边缘保持能力。

表 1 各种滤波算法比较

Table 1 Difference of filtering algorithms

Image	Var	ENL	γ
Image with noise	49.971	2.205	1.510
Average Filtering	40.808	2.948	1.072
Tukey Algorithm	42.869	2.782	1.280
Our Algorithm	40.992	2.658	1.399

由表 1 可以看出,均值滤波、Tukey 滤波、本文算法均降低了图像标准差。均值滤波的 ENL 最大,对噪声滤波能力最强,但是边缘保持能力较差(γ 值小); Tukey 算法在提高图像 ENL 的同时,一定程度上保持了图像高梯度边界;与前两者相比,本文

算法在较大程度提高图像 ENL 的同时,较好地保持了图像边缘细节信息。

图 4~图 6 是采集 320×240 HgCdTe 热像仪的单帧图像,经滤波处理后的效果。分析可知,原图像的噪声很大,目标边缘对比度较高(图 1);经均值滤波处理后(图 4),噪声得到较好地抑制,但平滑掉图像的边缘细节,视觉效果较差;Tukey 滤波在较好地抑制噪声的同时,保持了高梯度边缘(图 5);而本文的算法不仅在均匀区域的平滑效果较好,而且在保持边缘细节方面效果也很明显(图 6)。

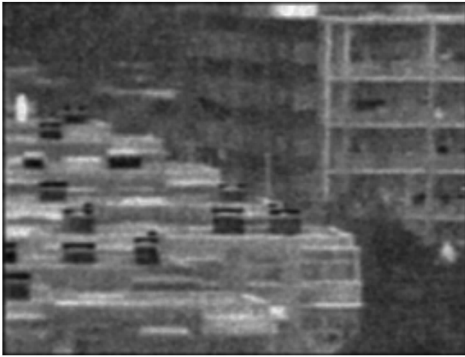


图 4 均值滤波
Fig. 4 Average filtering



图 5 Tukey 滤波
Fig. 5 Tukey filtering



图 6 本文滤波方案
Fig. 6 The proposed filtering

5 结 论

根据红外图像的空间分布特性,提出了一种基于各向异性扩散的红外图像滤波算法。该算法从噪声剔除和边界更新的角度出发,有效地降低了扩散系数对噪声的敏感程度,实验结果表明,本文算法在消除噪声的同时较好地保留了目标特性和边缘细节,无论从视觉效果,还是从辐射分辨率等参量都能达到较好的效果。

参 考 文 献

- 1 Nan Zhang, Weiqi Jin, Binghua Su *et al.*. Map-based infrared image expansion[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8): 451~454
- 2 Ju Shan, Deng Yong, Luo Qingming *et al.*. Monte Carlo simulation of polarization gating for superficial tissue detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1465~1469
鞠 珊,邓 勇,骆清铭 等. 浅表组织后向散射检测中偏振门的蒙特卡罗研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1465~1469
- 3 Huang Qian, Wang Yanfei, Zhang Bingchen *et al.*. A new anisotropic diffusion method for SAR speckle reduction[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(9): 1553~1557
黄 倩,王岩飞,张冰尘,等. 一种新的各向异性扩散 SAR 相干斑抑制算法[J]. *电子学报*, 2006, **34**(9): 1553~1557
- 4 Wang Huaiye, Zhang Ke, Li Yanjun. Anisotropic Gaussian filtering for infrared image[J]. *Infrared Millim Waves*, 2005, **24**(2): 109~113
王怀野,张 科,李言俊. 各向异性滤波在红外图像处理中的应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(2): 109~113
- 5 Pietro Perona, Jitendra Malik. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1990, **12**(7): 629~639
- 6 Yu-Li You, Wenyuan Xu, Allen Tannenbaum *et al.*. Behavioral analysis of anisotropic diffusion in image processing[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1996, **5**(11): 1539~1553
- 7 M. Black, G. Sapiro, D. Marimount *et al.*. Robust anisotropic diffusion[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1998, **17**(3): 421~431
- 8 Zeng Ming, Li Jianxun. Optimized design of morphological improved top-hat filter based on improved genetic algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 510~515
曾 明,李建勋. 基于改进遗传算法优化的形态学修正 TOP-HAT 滤波器设计方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 510~515
- 9 Wang Xiaorui, Zhang Jianqi, Feng Zhuoxiang *et al.*. Triangle orientation discrimination threshold curve prediction based on starting thermal imaging simulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1036~1041
王晓蕊,张建奇,冯卓祥 等. 凝视热成像系统的三角方向鉴别阈值曲线预测[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1036~1041
- 10 Cheng Xiang'ai, Lu Qisheng, Ma Liqin *et al.*. Experimental study of HgCdTe(PV) detector irradiated by CW 1.319 μm laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 622~626
程湘爱,陆启生,马丽芹. 1.319 μm 连续波激光辐射 PV 型 HgCdTe 探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 622~626
- 11 Zhang Shihua, Wu Qianrong. Noise suppression in ROIC for uncooled infrared focal plane arrays[J]. *Microelectronics*, 2007, **37**(2): 294~297
张实华,伍乾永. 非制冷红外焦平面阵列读出电路的噪声抑制[J]. *微电子学*, 2007, **37**(2): 294~297
- 12 Pierre Charbonnier, Laure Blanc-Féraud, Gilles Aubert *et al.*. Deterministic edge-preserving regularization in computed imaging [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1997, **6**(2): 298~311