

文章编号: 0253-2239(2009)01-0176-04

一种新的各向异性扩散红外噪声实时抑制算法

王娴雅 陈 钱 顾国华

(南京理工大学近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要 提出一种基于各向异性扩散偏微分方程的红外图像噪声抑制算法。通过将形态学处理和红外图像局部特征相结合,建立了一种新的扩散系数。该系数利用形态学膨胀腐蚀操作获取梯度算子,改善了 Perona-Malik(P-M)梯度算子对噪声的敏感性,实现了均匀区域扩散增强且边缘细节区域扩散减弱的目的。算法已在 EVM-DM642 硬件平台上实时运行,实验表明:它在有效平滑噪声的同时较好的保持了图像边缘细节信息。

关键词 图像处理; 红外噪声; 各向异性扩散; 形态学; P-M 方程

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0176

Real-Time Infrared Noise Reduction Based on Anisotropic Diffusion Method

Wang Xianya Chen Qian Gu Guohua

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract An infrared noise reduction algorithm based on anisotropic partial differential equation is proposed. By combining morphological operations with infrared imaging local features, a new anisotropic coefficient is established. This coefficient gets gradient operator by morphological dilating and eroding, improves the sensibility of Perona-Malik (P-M) gradient, strengthens diffusion in homogeneous area and weakens diffusion in heterogeneous area. The algorithm has run on the EVM-DM642 hardware platform in real time, and experiments indicate the noise is smoothed out effectively, and the image edge is also preserved better.

Key words image processing; infrared noise; anisotropic diffusion; morphology; Perona-Malik (P-M) equation

1 引 言

凝视型红外焦平面探测器成像受内部噪声^[1,2](如热噪声、散离噪声、产生-复合噪声和 $1/f$ 噪声)影响,具有对比度低、边缘模糊、信噪比低等特点,如果采用常用的高斯滤波或各向同性滤波器进行滤波,在噪声平滑的同时会丢失边缘细节信息,不利于进一步处理。因此,红外噪声抑制和图像增强是一个重要的研究课题。

近年来,非线性偏微分方程^[3,4]逐渐应用于边缘检测和图像去噪等领域,各向异性偏微分方程更是得到广泛关注。1990年,Perona和Malik^[5]首次

提出基于图像梯度各向异性扩散方程,然而在图像噪声很强的情况下,梯度函数对噪声的敏感性导致方程是病态的(即相同的输入得到不同的输出结果)。Catté和Lions^[6]采用高斯平滑的方法解决方程的病态性,但在实际应用中,如何选取高斯核尺度 σ 是一个难题,尺度太小噪声不能有效抑制,相反则会模糊图像的边缘细节特征。

为解决 Perona-Malik (P-M)扩散方程病态性和 Catté-Liens (C-L)高斯核尺度不易选择的难题,首先利用形态学开闭运算特点,对预扩散区域进行处理从而消除亮暗强噪声影响;其次结合红外成像

收稿日期: 2008-04-01; **收到修改稿日期**: 2008-09-25

基金项目: 国防预研基金(40405050303)和武器装备预先研究项目(40405030103)资助课题。

作者简介: 王娴雅(1983-),女,博士研究生,主要从事红外图像实时处理和光电噪声理论等方面的研究。

E-mail: xiaotuo1212@yahoo.com.cn

导师简介: 陈 钱(1964-),男,教授,主要从事光电探测与图像处理、光电信号处理与数字视频技术等方面的研究。

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

的空间近邻性和像素相似性特征,提出了改进型基于形态学梯度的扩散系数。实验结果显示该系数对噪声具有较强的自适应能力。

2 各向异性扩散和形态学理论

2.1 各向异性扩散(P-M 方程)

各向异性扩散的基本思想:将定义在凸域 $\Omega \subset R \times R$ 图像 I_0 作为一种媒介,在上面以可变速率扩散,从而得到一系列逐渐增加的平滑图像 $I(x, y, t)$ 。Perona 和 Malik 通过选取适当的扩散因子,实现了沿尺度空间前向扩散的同时保持了边缘细节特征。Perona 和 Malik 给出的偏微分方程(简称 P-M 方程)如下:

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

式中 $I(x, y, t)$ 表示图像强度, ∇ 是梯度算子, $\nabla I(x, y, t) = \begin{bmatrix} \partial I / \partial x \\ \partial I / \partial y \end{bmatrix}$, div 为散度算子, $g(\cdot)$ 为扩散系数且有界非负递减函数。Perona 和 Malik 给出了两种形式扩散系数,如下式所示

$$g(|\nabla I|) = \frac{1}{1 + (|\nabla I|/K)^2}, \quad (2)$$

$$g(|\nabla I|) = \exp[-(|\nabla I|/K)^2], \quad (3)$$

式中 K 为图像幅值参数。

2.2 形态学运算

数学形态学以数学集合论为理论基础,是一种有效的非线性图像处理工具。假设灰度图像是 $f(x, y)$, 结构元素为 $b(x, y)$, 其基本运算可表示如下:

1) 灰度腐蚀

$$(f \ominus b)(s, t) = \min\{f(s+x, t+y) - b(x, y) \mid (s+x), (t+y) \in D_f; (x, y) \in D_b\}. \quad (4)$$

2) 灰度膨胀

$$(f \oplus b)(s, t) = \max\{f(s-x, t-y) + b(x, y) \mid (s-x), (t-y) \in D_f; (x, y) \in D_b\}. \quad (5)$$

3) 灰度开运算

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b. \quad (6)$$

4) 灰度闭运算

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b, \quad (7)$$

式中 D_f 和 D_b 分别表示 $f(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 的定义域。

3 基于形态学的各向异性扩散模型

3.1 噪声预平滑模型

P-M 扩散因子具有平滑噪声快、保持边缘细节、耗时少的优点,然而, P-M 模型平滑图像过程中会出现“块效应”,对噪声(尤其脉冲噪声)敏感,会产生虚假边缘。为解决这些问题, Catte 和 Lions 提出改进型扩散系数,定义如下

$$g(|\nabla I|) = 1/[1 + (|\nabla P|/K)^2], \quad (8)$$

$$P = I * G(\sigma). \quad (9)$$

$G(\sigma)$ 是扩散尺度为 σ 的高斯核, Catte 采用高斯核和噪声图像卷积进行预处理平滑,降低了噪声点梯度,同时灰度阶跃较强的边缘细节特征被保留下来,在此基础上运用 P-M 模型进行滤波就能达到较好效果。但由于高斯核尺度 σ 不易选择且卷积运算计算量很大,实时硬件系统无法应用。因此提出一种既能实现图像边缘平滑,又满足实时性要求的形态学噪声平滑处理方法,表达式如下:

$$P = (I \circ b) \bullet b, \quad (10)$$

式中 I 为噪声图像, b 为 $m \times n$ 的结构元素, $I \circ b$ 为灰度开运算(从图像下方磨光表面向上凸出的波峰,从而去除相对于结构元素较小的亮噪声), $I \bullet b$ 为灰度闭运算(从图像上方磨光表面向下凹入的波谷,从而去除暗噪声),将两种运算组合,即先对图像进行开运算再闭运算,就能有效去除亮暗噪声,起到平滑的作用。

3.2 改进的扩散系数

针对 P-M 模型中扩散系数对噪声敏感性强的问题,利用膨胀和腐蚀运算求取形态学梯度,来替代 P-M 中的梯度;并结合红外成像的空间近邻和像素相似性特征调整梯度值,使其对噪声具有更强的自适应性,改进的扩散系数如下:

$$g(|\nabla I|) = 1/[1 + (|\nabla P|/K)^2], \quad (11)$$

$$\nabla P = \begin{cases} A \cdot [(I \oplus b) - (I \ominus b)], & |B_1 - B_2| \leq \epsilon \\ \frac{1}{A} [(I \oplus b) - (I \ominus b)], & |B_1 - B_2| > \epsilon \end{cases} \quad (12)$$

上式求解过程描述为:若扩散处于图像平滑区(即满足 $|B_1 - B_2| \leq \epsilon$) 则增强扩散;否则削弱扩散保持边缘。其中,常数 A 是增强系数(满足 $A \geq 1$), B_1 和 B_2 是邻域均值(描述及求解稍候阐述),误差 ϵ 需初始化, $(I \oplus b) - (I \ominus b)$ 是形态学梯度,具有不增强噪声的特点,使用对称结构元素还能保证边缘受方向影响较小。

定义 B_1 和 B_2 邻域模型分别如图 1(a)和图 1(b)所示。

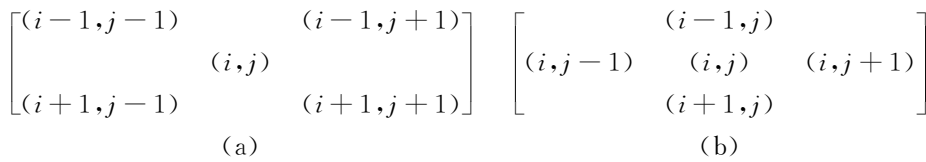


图1 邻域结构

Fig.1 Neighborhood structure

$$B_1 = \frac{I_{i-1,j-1} + I_{i-1,j+1} + I_{i,j} + I_{i+1,j-1} + I_{i+1,j+1}}{5}, \quad (13)$$

$$B_2 = (I_{i-1,j} + I_{i,j+1} + I_{i,j} + I_{i,j-1} + I_{i+1,j})/5, \quad (14)$$

由红外成像的空间近邻和像素相似特征可知,若扩散处于平滑区或为噪声点,邻域均值 B_1 和 B_2 相差不大;反之,若扩散处于边缘处,因为边缘是图像灰度变化最剧烈的区域,所以 B_1 和 B_2 相差则会较大,我们可通过设定误差 ϵ 来判定扩散属于哪个区间,进而选择扩散强度,增强扩散系数对噪声的自适应性。

3.3 算法特点

1) 平滑区扩散增强,边缘扩散削弱:

P-M 方程中的散度运算表达如下:

$$\text{div}[g(\nabla I) \cdot \nabla I(x, y, t)] = g(\nabla I) \cdot I_{\epsilon\epsilon} + \Phi'(\nabla I) \cdot I_{\eta\eta}, \quad (15)$$

式中 $I_{\epsilon\epsilon}$ 和 $I_{\eta\eta}$ 分别为垂直 ∇I 和沿 ∇I 方向, $g(\nabla I)$ 为垂直于边缘的扩散系数, $\Phi'(\nabla I) = [\nabla I \cdot g(\nabla I)]'$ 为沿边缘系数。图像平滑区域,由于 $|g(\nabla I)|$ 和 $|\nabla I(i, j, t)|$ 接近于 0,

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

扩散增强抑制了噪声;而在边缘和细节区域,由于 $|g(\nabla I)|$ 和 $|\nabla I(i, j, t)|$ 很大,

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

沿边缘方向的扩散远大于沿垂直边缘方向,扩散削弱保持了边缘细节特征。

2) 噪声自适应性强:

由 3.2 节可知:算法定义了平滑区和边界评判标准 ($|B_1 - B_2|$ 与误差 ϵ),因此,能更好选择扩散系数大小,抑制噪声对扩散带来的干扰,增强算法对噪声的自适应性。

4 实验结果及数据分析

为客观评价滤波效果,我们利用峰值信噪比 (PSNR) 和辐射分辨率 (RR) 对图像进行衡量,其定义如下:

$$R_{\text{PSN}} = 10 \times \lg \left\{ \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i, j) - \bar{I}(i, j)]^2} \right\}, \quad (16)$$

$$R_{\text{R}} = 10 \cdot \lg[1 + \sqrt{\text{Var}(\bar{I})/E(I)}], \quad (17)$$

式中 I 为待评价图像, \bar{I} 为图像均值, $M \times N$ 为图像 I 的大小, $\text{Var}(\bar{I})$ 为图像 I 的方差, $E(I)$ 为图像 I 的期望。

表 1 反映,信噪比 (SNR) 方面,本文滤波后图像信噪比最高, Catte&Lions 次之,各向同性滤波较差;辐射分辨率 (Radiation Resolution) 方面,本文算法对边缘保持最好, Catte&Lions 滤波次之,各向同性滤波最差。由此反映,本文算法在噪声抑制和边缘细节保持方面都比较成功。

表 1 算法滤波效果

Table1 Filtering effects of algorithms

Image	PSNR	RR
Noise image	12.301	3.717
Isotropy filtering	13.944	3.028
Catte&Lions filtering	16.284	3.236
Our algorithm	26.662	3.404

图 2~图 5 是 320×240 凝视型红外探测器成像,观察后发现:图 2 中噪声明显;图 3 是经各向同性滤波的图像,噪声比较明显,边缘细节特征被平

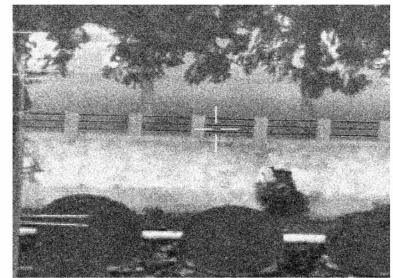


图 2 噪声图像

Fig.2 Noise image



图 3 各向同性滤波

Fig.3 Isotropic filtering

滑;图 4 在信噪比和边缘保持都有一定提高;图 5 是经本文算法处理的效果,可看出噪声得到有效抑制,并且边缘细节(如栏杆、树叶边缘)保持较好。经对比说明本文算法是一种有效的各向异性处理方法。

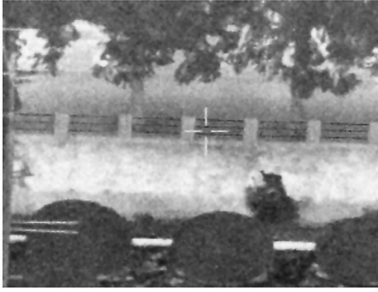


图 4 Catte 和 Lions 滤波
Fig. 4 Catte and Lions filtering



图 5 本文算法
Fig. 5 Proposed algorithm

5 结 论

在 P-M 模型的基础上,提出了一种基于形态学

梯度的各向异性扩散模型。该模型借助空间近邻和像素相似性特征,对图像平滑区域和边缘进行判定,增强了扩散系数对噪声自适应能力。实验结果表明,该算法具有较强的噪声抑制能力,无论是在边缘保持还是在实时性方面都优于 Catte-Lions 滤波器。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 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 Xie Meihua, Wang Zhengming. Edge-directed enhancing based anisotropic diffusion denoising [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **1**(34): 59~64
谢美华, 王正明. 基于边缘定向增强的各向异性扩散抑噪方法[J]. *电子学报*, 2006, **1**(34): 59~64
- 5 Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. *IEEE Trans. Pattern. Anal. Machine Intell.*, 1990, **12**(7): 629~639
- 6 Catte F, Lions P-L, Morel J-M *et al.*. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion[J]. *SIAM J. Numer. Anal.*, 1992, **29**: 182~193