

结合非连续性测度的方向偏微分方程在电子散斑干涉中的应用

肖志涛 袁泉 张芳* 吴骏 耿磊 冯铁君 陈颖 王丹钰
(天津工业大学电子与信息工程学院 天津 300387)

摘要:近年来,电子散斑干涉测量技术(ESPI)在光学粗糙表面的变形测量和无损检测方面应用广泛。应用该技术时,条纹图中大量的散斑噪声给提取条纹信息带来了极大的困难。偏微分方程图像滤波方法是一种方案灵活、处理效果良好的图像去噪方法,尤其是方向偏微分方程,因其只沿着条纹方向进行滤波,更适合电子散斑干涉条纹图。由于条纹图的疏密程度不同,因此在考虑滤波方向的同时,还应考虑不同位置像素点的滤波程度。该文在方向偏微分方程基础上引入非连续性测度,提出结合非连续性测度(DCM)的方向偏微分方程。利用该方程对模拟的条纹图以及实际获得的条纹图进行滤波,实验结果表明该文方法能够充分滤除稀疏条纹处的噪声,同时有效保持密集条纹处的重要特征。

关键词:图像处理;电子散斑干涉测量技术;偏微分方程;条纹滤波;非连续性测度

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)11-2600-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01814

The Oriented Partial Differential Equation Based on the Discontinuities Measure for Electronic Speckle Pattern Interferometry

Xiao Zhi-tao Yuan Quan Zhang Fang Wu Jun
Geng Lei Feng Tie-jun Chen Ying Wang Dan-yu

(School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) is widely used for deformation measurement and nondestructive testing of the optical rough surface in recent years. Removal of the speckle noise is of fundamental importance for accurate extraction of the phase information. The Partial Differential Equation (PDE) filters are well-known for their good processing results, especially the oriented partial differential equation can control the direction of the filtering, which is more suitable for the ESPI image. Furthermore, the filtering degree of different pixels is considered. A new oriented PDE filter model is proposed for the ESPI fringe, in which the DisContinuities Measure (DCM) of an image is introduced to control the diffusion speed. The effectiveness of the proposed method is tested by means of the computer simulation and the experimentation on a real ESPI fringe patterns respectively. The results show that noise is effectively suppressed and the fringe edge is well preserved, even for very dense fringes.

Key words: Image processing; Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI); Partial Differential Equation (PDE); Fringe filtering; DisContinuities Measure (DCM)

1 引言

电子散斑干涉测量技术(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)是一种无损检测技术,可测量物体表面各点的位移量或应变量^[1]。但电子散斑干涉条纹图中伴随着强烈的噪声,不利于后续的二值化、骨架线提取^[2]等处理,因此条纹图的滤波具有重要意义。

条纹结构具有明显的方向性,在滤波的过程中

考虑条纹的方向性至关重要^[3]。根据条纹图方向性特点,近年来人们提出了许多新的条纹图滤波方法。文献[4]提出通过跟踪条纹方向获得等值线窗口,然后在此窗口内对条纹图进行滤波。文献[5]将条纹的方向融入偏微分方程(Partial Differential Equation, PDE)中提出了二阶方向偏微分方程滤波模型。此外,如果对整幅条纹图进行同等程度的滤波,势必会导致稀疏条纹处滤波程度不够而密集条纹处过分滤波的问题。因此,在考虑滤波方向的同时,还必须对不同位置像素点的滤波程度加以考虑。在这方面,文献[6]提出了PM方程,利用与图像梯度有关的扩散系数对扩散速率施加影响。但是电子散斑干涉条纹图中含有大量噪声,基于图像梯度设置扩散

2013-11-15 收到, 2014-05-30 改回

国家自然科学基金(61102150)和天津市科技支撑计划重点项目(13ZCZDZX02100, 14ZCZDZX00033)资助课题

*通信作者: 张芳 hhzhangfang@126.com

系数的方法必然受到噪声的影响。在图像分割领域，文献[7]提供了一种利用尺度理论，即非连续性测度(DisContinuities Measure, DCM)来检测图像中的区域同质属性的方法。本文借鉴非连续测度的思想，在方向偏微分方程的主体上加入非连续测度检测图像的特征，使得不同特征处滤波程度不同，以此来控制每一点的扩散速率。

2 基于方向的 ESPI 条纹图滤波方法

2.1 条纹图方向的求取

与自然图像不同，条纹图的方向特征显著。选取条纹图像中的一小块区域进行观察，能够发现相邻条纹近似平行，条纹的方向变化很微小，如图 1

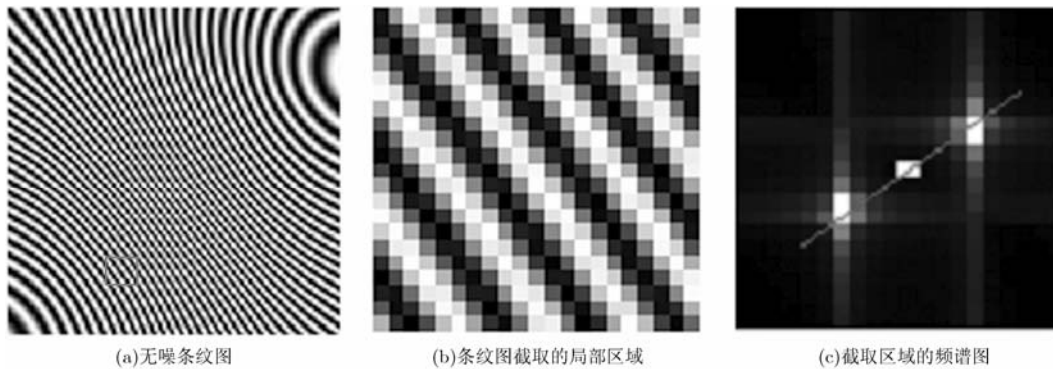


图 1 一幅无噪条纹图及其局部区域的频谱图

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{\int_{\theta} |F(r, \theta)|^2 \sin(2\theta) d\theta}{\int_{\theta} |F(r, \theta)|^2 \cos(2\theta) d\theta} \right\} \quad (1)$$

其中， $F(r, \theta)$ 为频域图的极坐标表达形式， θ_0 为条纹方向与 x 轴方向的夹角。

在初步计算得到条纹方向 θ_0 后，需要对其进行平滑处理，可以采用 3×3 高斯滤波器 G_{σ} [10] 进行滑动滤波，最终求得的条纹方向为 θ 。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \sin(2\theta_0(x+i, y+j)) G_{\sigma}(i, j)}{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \cos(2\theta_0(x+i, y+j)) G_{\sigma}(i, j)} \right) \quad (2)$$

2.2 二阶方向偏微分方程(SOOPDE)滤波方法

应用偏微分方程进行图像滤波是将图像滤波变换看作偏微分方程的算子，代入初始图像 $I(x, y)$ ，通过求解偏微分方程实现图像滤波[11]。由图 2 建立的内在坐标系知，理想的干涉条纹图在沿着条纹方向的灰度不变，所以为了充分滤除 ESPI 条纹图中的噪声，应该加强此方向的灰度扩散，而为了保护条纹的信息，在条纹图的法向应减少扩散。二阶方

所示。当局部区域足够小时，稳定的方向性是条纹图的内在属性特征。在理想情况下，局部区域经 2 维傅里叶变换[8]后，均匀分布的条纹转化为两个关于原点对称分布的亮斑。同时，亮斑的连线与条纹所在的方向相垂直。因此，可以根据频域中亮斑的位置来计算条纹方向。

实际的条纹图像并非严格的周期函数，并且当条纹图存在严重的噪声或者条纹对比度较差时，就会分散理想条件下形成的亮斑的能量。但是条纹图像的主要频率的能量在总能量中占绝大部分，而其他频率的能量较少。针对这种情况，可以采用概率论中求期望的方法来估算方向[9]。

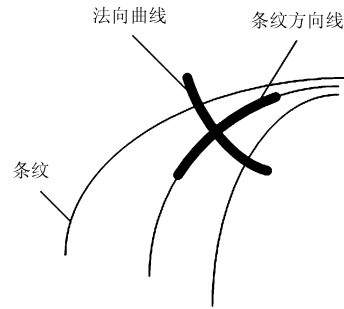


图 2 沿着条纹方向线和法向曲线示意图

向偏微分方程(Second-Order Oriented Partial Differential Equation, SOOPDE)充分利用条纹图的方向性，使方程仅沿着条纹方向进行滤波，其表达式为

$$\partial_t u = u_{xx} \cos^2 \theta + u_{yy} \sin^2 \theta + 2u_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

SOOPDE 仅考虑了条纹图的方向性，但是就整幅条纹图而言，各处的滤波程度是一样的。这势必会导致稀疏条纹处对噪声的滤波程度不够而密集条纹处过分滤波的问题。因此，在考虑滤波方向的同时，还必须对不同位置像素点的滤波程度加以考虑。Perona 和 Malik 提出了 PM 方程[6]，利用与图像梯

度有关的扩散系数对扩散速率施加影响。因此，结合扩散系数可以得到选择扩散方向偏微分方程 (Selective Second-Order Oriented Partial Differential Equation, SSOOPDE)。

$$\begin{aligned} \partial_t \mathbf{u} = c(|\nabla(\mathbf{G}_\sigma * \mathbf{u})|) & (\mathbf{u}_{xx} \cos^2 \theta + \mathbf{u}_{yy} \sin^2 \theta \\ & + 2\mathbf{u}_{xy} \sin \theta \cos \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 \mathbf{G}_σ 为 3×3 的高斯滤波器，“*”是卷积符号， c 函数的表达式^[12]为

$$c(|\nabla(\mathbf{G}_\sigma * \mathbf{u})|) = \frac{1}{1 + (|\nabla(\mathbf{G}_\sigma * \mathbf{u})|/k)^2} \quad (5)$$

其中 k 为常数， c 满足式(6)

$$\left. \begin{aligned} c(0) &= 1 \\ \lim_{s \rightarrow \infty} c(s) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由 $c(\cdot)$ 的表达式可知在图像梯度较大的地方，方程扩散较小；反之，扩散较大。因此选择扩散方向偏微分方程模型能有效滤除图像噪声以及在一定范围内保持图像的边界特征。

3 结合非连续性测度的方向偏微分方程滤波方法

SSOOPDE 滤波方法的基本思想是基于图像的梯度来设置扩散系数，控制图像中不同区域像素点的滤波程度，使像素的灰度值与图像局部特征相符。虽然 SSOOPDE 模型能够在一定的程度上解决条纹较稀疏地方的内部噪声处滤波程度不够而条纹较密集处过分滤波的问题，但是梯度特征对噪声敏感，检测不稳定，无法将噪声和重要特征区分开。

3.1 非连续性测度

文献[7]提出一种基于尺度的非连续性测度，用来描绘图像中的两点 (x, y) 和 (i, j) 所在区域的不连续性。

第 1 步 对给出图像中的任意像素，确定一个合适的邻域，其大小为 $2R \times 2R$ ，使得邻域中所有像素都满足一个灰度一致准则。

中心点在 $(x, y) \in I$ ，邻域半径为 R 的邻域区域 $N_{xy}(R)$ 定义为

$$N_{xy}(R) = \{(v, w) \mid \|(v, w) - (x, y)\| \leq R\} \quad (7)$$

其中， $\|\cdot\|$ 取 ∞ -范数。

$N_{xy}(R)$ 对应的邻域边界区域 $B_{xy}(R)$ 定义为

$$B_{xy}(R) = \{(v, w) \mid (v, w) \in N_{xy}(R) - N_{xy}(R-1)\} \quad (8)$$

其中， $R > 0 (R \in Z)$ ，且需保证 $B_{xy}(R)$ 在图像之内。

下面说明如何确定邻域参数 R 的大小。首先计算中心像素点 (x, y) 与其边界区域 $B_{xy}(R)$ 全体像素的灰度一致性

$$ST_{xy}(R) = \frac{\sum_{(v,w) \in B_{xy}(R)} W_\sigma(|I(v,w) - I(x,y)|)}{|B_{xy}(R)|} \quad (9)$$

其中 $|B_{xy}(R)|$ 为 $B_{xy}(R)$ 中像素的个数， $W_\sigma(|I(v,w) - I(x,y)|)$ 取 $W_\sigma(s) = e^{-s^2/(2\sigma^2)}$ 的函数形式。 W_σ 中的参数 σ 反映图像中局部灰度差异，具体计算方法为：对图像上的每一个像素点的最小边界区域 $B_{xy}(1)$ ，计算 $|I(v,w) - I(x,y)|$ ，将灰度差值从小到大排列，去除后百分之十的部分，假设保留的灰度差值服从高斯分布，均值为 M_k ，方差为 σ_h ，则局部灰度差异 σ 的表达式为

$$\sigma = M_k + 3\sigma_h \quad (10)$$

$ST_{xy}(R)$ 给出了图像中像素点 (x, y) 与其邻域边界上的所有点的灰度之间的相似关系， (x, y) 与 $B_{xy}(R)$ 中的像素 (v, w) 灰度值越接近， $ST_{xy}(R)$ 的值越大，故基于式(11)可以找到与像素点 (x, y) 同质的最大邻域。根据 (x, y) 与 $B_{xy}(R)$ 中全体像素的灰度一致性可以判断合适邻域的大小。

给一致性判断标准 $ST_{xy}(R)$ 设定一个阈值 T_s ，一般取 $T_s = 0.85$ 。对于每一点 (x, y) ，其最优邻域半径为

$$R_{xy} = \max \{ST_{xy}(R) \geq T_s\} \quad (11)$$

第 2 步 计算相邻两点相同大小的邻域中所有像素的对应灰度差。

对于两个相邻像素点 (x, y) 和 (i, j) ，它们互为对方最小邻域中的像素，两像素点的最优邻域半径分别为 R_{xy} 和 R_{ij} 。由于邻域大小相同时才可以建立两个邻域之间的对应关系来计算局部灰度差，因此取两像素点最优邻域半径的较小值 $R_{xy,ij}$ ，记为

$$R_{xy,ij} = \min \{R_{xy}, R_{ij}\} \quad (12)$$

则分别以 (x, y) 和 (i, j) 为中心像素点， $R_{xy,ij}$ 为半径的邻域区域表示为

$$N_{xy}(R_{xy,ij}) = \{(v, w) \mid \|(v, w) - (x, y)\| \leq R_{xy,ij}\} \quad (13)$$

$$N_{ij}(R_{xy,ij}) = \{(v', w') \mid \|(v', w') - (i, j)\| \leq R_{xy,ij}\} \quad (14)$$

假设 (v, w) 和 (v', w') 是邻域 $N_{xy}(R_{xy,ij})$ 和 $N_{ij}(R_{xy,ij})$ 中对应位置上的像素点，如图 3 所示。

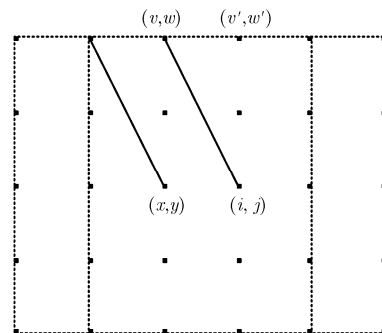


图 3 两邻域对应关系

定义邻域中任一点 (v, w) 到中心点 (x, y) 的距离为

$$d_{xy,vw}^2 = (x - v)^2 + (y - w)^2 \quad (15)$$

灰度正差为

$$\delta_{vw,v'w'}^+ = \begin{cases} \mathbf{I}(v, w) - \mathbf{I}(v', w'), & \mathbf{I}(v, w) - \mathbf{I}(v', w') > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (16)$$

灰度负差为

$$\delta_{vw,v'w'}^- = \begin{cases} \mathbf{I}(v, w) - \mathbf{I}(v', w'), & \mathbf{I}(v, w) - \mathbf{I}(v', w') < 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (17)$$

累积灰度正差为

$$D_{xy,ij}^+ = \sum_{\substack{(v,w) \in \mathbf{N}_{xy}(R_{xy,ij}) \\ (v',w') \in \mathbf{N}_{ij}(R_{xy,ij}) \\ \text{s.t. } x-v=i-v', y-w=j-w'}} [1 - \mathbf{W}_{R_{xy,ij}}(\delta_{vw,v'w'}^+)] \cdot \mathbf{W}_{R_{xy,ij}}(\delta_{vw,v'w'}) \quad (18)$$

累积灰度正差反映了邻域 $\mathbf{N}_{xy}(R_{xy,ij})$ 相对于邻域 $\mathbf{N}_{ij}(R_{xy,ij})$ ，灰度提高的程度。其中， $1 - \mathbf{W}_{R_{xy,ij}}(\delta_{vw,v'w'}^+)$ 反映灰度变化， $\mathbf{W}_{R_{xy,ij}}(\delta_{vw,v'w'})$ 相当于基于距离的权值，仍取 $\mathbf{W}_\sigma(s) = e^{-s^2/(2\sigma^2)}$ 的函数形式。

累积灰度负差为

$$D_{xy,ij}^- = \sum_{\substack{(v,w) \in \mathbf{N}_{xy}(R_{xy,ij}) \\ (v',w') \in \mathbf{N}_{ij}(R_{xy,ij}) \\ \text{s.t. } x-v=i-v', y-w=j-w'}} [1 - \mathbf{W}_{R_{xy,ij}}(\delta_{vw,v'w'}^-)] \cdot \mathbf{W}_{R_{xy,ij}}(\delta_{vw,v'w'}) \quad (19)$$

它反映了邻域 $\mathbf{N}_{xy}(R_{xy,ij})$ 相对于邻域 $\mathbf{N}_{ij}(R_{xy,ij})$ ，灰度降低的程度。

第 3 步 计算每一点的非连续性测度。

由上述定义可知，累积灰度差可以用来表示相邻像素点 (x, y) 和 (i, j) 对应邻域之间的灰度值变化。累积灰度正差与累积灰度负差之间的差异越大，则 (x, y) 和 (i, j) 邻域内的像素差别越大，表明两像素间的不连贯性越大。由此定义两相邻像素 (x, y) 和 (i, j) 间的不连续性为

$$\psi[\mathbf{N}_{xy}(R_{xy,ij}), \mathbf{N}_{ij}(R_{xy,ij})] = \frac{|D_{xy,ij}^+ - D_{xy,ij}^-|}{\sum_{(v,w) \in \mathbf{N}_{xy}(R_{xy,ij})} \mathbf{W}_{R_{xy,ij}}(\|(v, w) - (x, y)\|)} \quad (20)$$

它描述了像素点 (x, y) 的邻域 $\mathbf{N}_{xy}(R_{xy,ij})$ 和 (i, j) 的邻域 $\mathbf{N}_{ij}(R_{xy,ij})$ 间的不一致程度。如果像素点 (x, y) 和 (i, j) 位于图像的边缘附近或者纹理结构上显示不连续的地方， $\psi[\mathbf{N}_{xy}(R_{xy,ij}), \mathbf{N}_{ij}(R_{xy,ij})]$ 的值就会比较大，否则较小。

求取每一点的非连续性测度时，可根据式(20)分别计算当前点与其最小边界区域 $\mathbf{B}_{xy}(1)$ 中的所有点的不连续性，然后取均值。因此像素点 (x, y) 处的

非连续性测度可表示为

$$\mathbf{H}(x, y) = \frac{\sum_{(i,j) \in \mathbf{B}_{xy}(1)} \psi[\mathbf{N}_{xy}(R_{xy,ij}), \mathbf{N}_{ij}(R_{xy,ij})]}{|\mathbf{B}_{xy}(1)|} \quad (21)$$

非连续性测度反映一个像素与其周围环境之间的不连贯性，取值范围为[0,1]。图 4 展示了图像的梯度信息和非连续性的差异，第 1 列分别为含有脉冲噪声的自然图像和 ESPI 条纹图像，第 2 列和第 3 列分别显示了图像的梯度信息和非连续性测度。从图中可以看出，梯度对噪声非常敏感，而非连续性测度在区分噪声和图像特征方面具有明显的优越性，尤其是在条纹比较密集的情况下，非连续性测度具有很好的鲁棒性。由于非连续性测度能很好地区分噪声与图像的重要信息，本文利用非连续性测度来设置方向偏微分方程的扩散系数改善方程的滤波性能。

3.2 结合非连续性测度的方向偏微分方程滤波方法

基于方向 PDE 滤波方法形式简洁且偏微分方程的离散数值解法容易实现，故本文仍采用方向 PDE 的主体形式来实现滤波时对滤波方向的控制。利用像素的非连续性测度控制不同位置方程的扩散速率，本文提出结合非连续性测度的方向偏微分方程 (Discontinuities Measure Oriented Partial Differential Equation, DCMOPDE)，具体形式为

$$\partial_t \mathbf{u} = (1 - \mathbf{H})(\mathbf{u}_{xx} \cos^2 \theta + \mathbf{u}_{yy} \sin^2 \theta + 2\mathbf{u}_{xy} \sin \theta \cos \theta), \quad \mathbf{u}(x, y, 0) = \mathbf{I}(x, y) \quad (22)$$

其中 \mathbf{H} 为上文提到的非连续性测度。该方程的基本思想是，方程仅在沿着条纹的方向进行滤波；同时在条纹密集处，扩散速率较小，保护条纹特征，在条纹稀疏的地方，扩散速率较大，进行充分滤波。

4 偏微分方程的离散数值解

利用偏微分方程进行图像处理是通过迭代求解方程实现的，因此处理前先对方程进行离散化^[13]。假设迭代时间步长为 Δt ，在方程的迭代滤波过程中，迭代次数为 n ， $t_n = n\Delta t$ 时刻的演化图像 $\mathbf{u}(i, j, t_n)$ 可表示为 $u_{i,j}^n$ 。采用的时间差分为

$$\partial_t u_{i,j}^n = \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (23)$$

采用的空间差分为

$$(u_{xx})_{i,j}^n = u_{i+1,j}^n + u_{i-1,j}^n - 2u_{i,j}^n \quad (24)$$

$$(u_{yy})_{i,j}^n = u_{i,j+1}^n + u_{i,j-1}^n - 2u_{i,j}^n \quad (25)$$

$$(u_{xy})_{i,j}^n = (u_{i+1,j+1}^n - u_{i,j+1}^n) - (u_{i+1,j}^n - u_{i,j}^n) \quad (26)$$

由此，可得结合非连续性测度的方向偏微分方程(DCMOPDE)的差分格式为

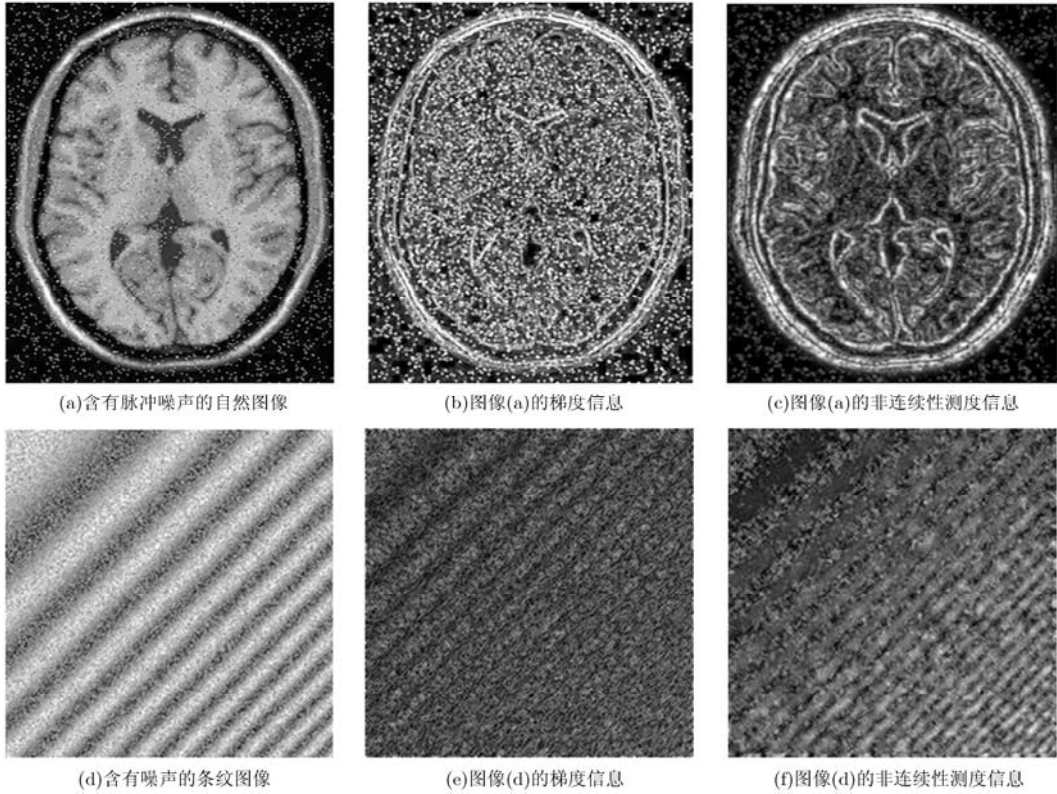


图 4 梯度信息与非连续性测度的比较

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + \Delta t (1 - H_{i,j}) \left((u_{xx})_{i,j}^n \cos^2 \theta_{i,j} + (u_{yy})_{i,j}^n \sin^2 \theta_{i,j} + 2(u_{xy})_{i,j}^n \sin \theta_{i,j} \cos \theta_{i,j} \right) \quad (27)$$

5 实验与结果分析

将本文方法用于电子散斑干涉条纹图，并与 SSOOPDE 进行比较。这里给出 3 组对比结果，包括两组模拟的条纹图和一组实验获得条纹图，离散求解方程时所采用的滤波参数为 $\Delta t = 0.2$ ， $k = 25$ 对于模拟条纹图(图 5 和图 6)， $n = 30$ ，对于实验条纹图(图 7)， $n = 150$ 。

模拟条纹图的生成方式^[14]为

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos \varphi(x, y) + I_n(x, y) \quad (28)$$

其中， I_0 为背景光强的幅值， I_1 为条纹光强的幅值， φ 为条纹图的相位， I_n 为高斯噪声。通过设置不同形式的 $\varphi(x, y)$ ，可以模拟不同形状的条纹图。

从 3 组对比结果可以看出，带非连续性测度扩散系数的方向偏微分方程(22)能够有效控制不同特征像素点的扩散滤波速度，在充分滤除稀疏条纹处噪声的同时，有效保护密集条纹处的条纹信息，滤波效果优于基于梯度扩散系数的方向偏微分方程(4)。

为了更加客观地比较各模型的滤波结果，本文采用散斑指数和保真度两个参数来评估其性能，文献[15]中详细给出了这两个参数的计算方法。散斑指

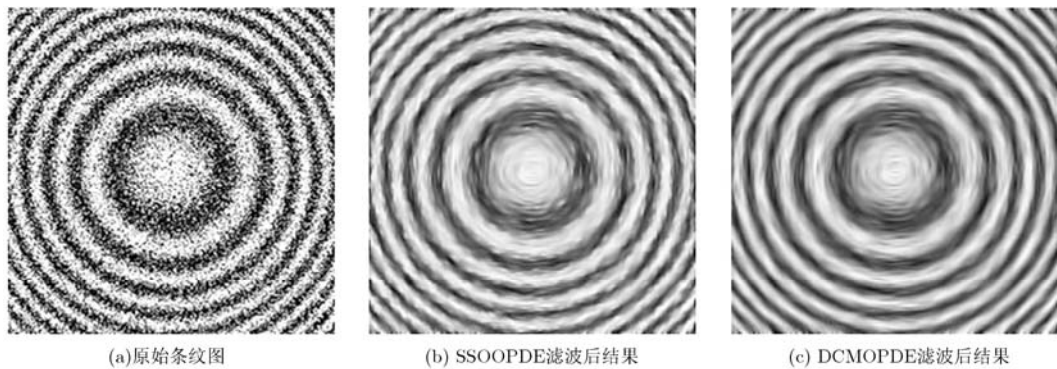


图 5 一幅模拟的稀疏条纹图及其滤波结果比较

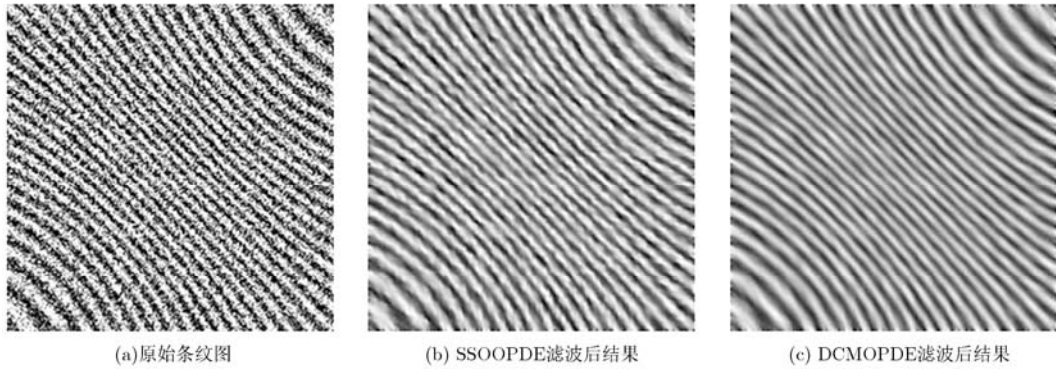


图 6 一幅模拟的密集条纹图及其滤波结果比较

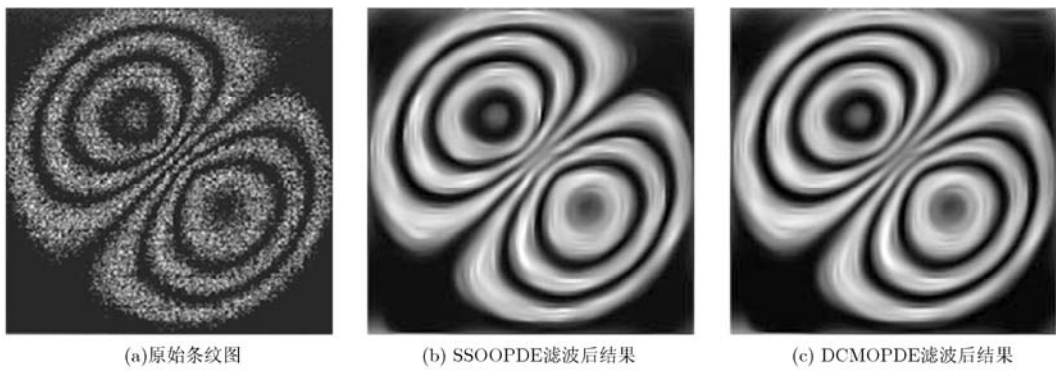


图 7 一幅实验拍摄的条纹图及其滤波结果比较

数 s 用来衡量滤波后条纹图像 I 的局部平滑程度。保真度 f 用来评价滤波后图像和理想的无噪声图像之间的差异，即滤波后图像对原始图像细节的保持程度。 s 越小，表明处理后图像的局部平滑程度越好，

f 越大，表明处理后图像越接近理想无噪声图像。评价结果如表 1 所示。由于图 7 是一幅实验图像，所以无法计算滤波后图像与理想图像之间的差异，即对于这幅图像无法计算各滤波结果的保真度。

表 1 两种滤波模型的性能比较

	图 5		图 6		图 7	
	SSOOPDE	DCMOPDE	SSOOPDE	DCMOPDE	SSOOPDE	DCMOPDE
s	0.2035	0.1966	0.2971	0.2660	0.2088	0.1370
f	0.9335	0.9454	0.9258	0.9335	-	-

从表 1 中的数据可以看出，结合非连续性测度的方向偏微分方程式(22)优于基于梯度的选择扩散方向偏微分方程式(4)，这说明 DCMOPDE 模型在滤除条纹图像噪声和保留图像重要特征方面都有显著的优势。

此外，本文采用的滤波参数是经验值，在所选参数下，方程是稳定的、收敛的，即能够得到正确的滤波结果。以图 5 所示的模拟条纹为例，计算过程中选取的迭代时间步长为 0.2，迭代次数为 30。本文分析了迭代过程中前后两次迭代结果均差 ΔI (如式(29)所示， $M \times N$ 为图像的尺寸)的变化情况，结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出，随着迭

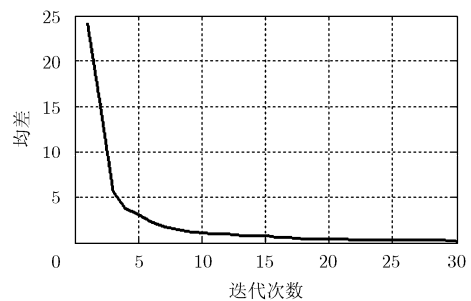


图 8 滤波过程中前后两次迭代结果的均差曲线

代次数的增大，前后两次迭代结果的均差是在逐步减小的，说明本文提出扩散方程是收敛的，同时本

文选取的迭代时间步长满足方程的稳定性要求。此外,结合表1中列出的比较结果,迭代30次后,结果图像的散斑指数约为0.2,说明在此迭代次数下,图像已经平滑,方程的去噪效果良好。

$$\Delta I(n) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i,j} (I_{i,j}^{n+1} - I_{i,j}^n) \quad (29)$$

6 结束语

本文在方向偏微分方程的基础上,提出了结合非连续性测度的方向偏微分方程。该方法能够控制滤波方向,使滤波仅沿着条纹方向进行;同时本文方法能够有效控制不同特征像素点的扩散滤波速度,在充分滤除稀疏条纹处噪声的同时,有效保护密集条纹处的条纹信息。将本文方法应用于电子散斑干涉条纹图中,定性和定量分析均表明了本文方法是一种较好的条纹图预处理方法。

参考文献

- [1] Tang C, Wang L, Yan H, *et al.* Comparison on performance of some representative and recent filtering methods in electronic speckle pattern interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 1036-1051.
 - [2] 王新强,张丽娟,班宝龙.基于滤波图像相减二值化的干涉条纹骨架线提取的研究[J].*激光杂志*, 2012, 33(6): 28-29.
Wang Xin-qiang, Zhang Li-juan, and Ban Bao-long. Study on the extraction of interference fringes skeleton based on the binarization of the difference between filtering images[J]. *Laser Journal*, 2012, 33(6): 28-29.
 - [3] 张芳.散斑干涉信息提取技术及其应用研究[D]. [博士论文], 天津大学, 2009.
Zhang Fang. Speckle interferometry information extraction technology and application[D]. [Ph.D. dissertation], Tianjin University, 2009.
 - [4] Yang X, Yu Q, and Fu S. A combined method for obtaining fringe orientations of ESPI[J]. *Optics Communications*, 2007, 273(1): 60-66.
 - [5] Tang C, Han L, and Ren H. Second-order oriented partial-differential equations for denoising in electronic-speckle-pattern interferometry fringes[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(19): 2179-2181.
 - [6] Perona P and Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 629-639.
 - [7] Saha P K and Udupa J K. Optimum image thresholding via class uncertainty and region homogeneity[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(7): 689-706.
 - [8] 迟华山,王红星,郭奇,等.短时傅里叶变换在线性调频信号时频滤波中的应用[J].*电讯技术*, 2012, 52(2): 155-159.
Chi Hua-shan, Wang Hong-xing, Guo Qi, *et al.* Application of STFT in time-frequency filtering of LFM signals[J]. *Telecommunication Engineering*, 2012, 52(2): 155-159.
 - [9] Chikkerur S, Cartwright A N, and Govindaraju V. Fingerprint enhancement using STFT analysis[J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(1): 198-211.
 - [10] Hong L, Wan Y, and Jain A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(8): 777-789.
 - [11] 刘西林,王泽文,邱淑芳.基于Priwitt算子的偏微分方程图像去噪模型[J].*计算机应用*, 2012, 32(12): 3385-3388.
Liu Xi-lin, Wang Ze-wen, and Qiu Shu-fang. PDE-based image noise removal models based on Priwitt operator[J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(12): 3385-3388.
 - [12] Zhou X, Baird J P, and Arnold J F. Fringe-orientation estimation by use of a Gaussian gradient filter and neighboring-direction averaging[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(5): 795-804.
 - [13] Zhang F, Liu W, and Xia L. Homomorphic partial differential equation filtering method for electronic speckle pattern interferometry fringes based on fringe density[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(3): 210-213.
 - [14] 邢月启.图像去噪的偏微分方程方法研究[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2009.
Xing Yue-qi. The research of partial differential equations for image denoising[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2009.
 - [15] Xiao Z, Xu Z, Zhang F, *et al.* ESPI filtering method based on anisotropic coherence diffusion and Perona-Malik diffusion[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(10): 101101-1-101101-4.
- 肖志涛: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像处理与模式识别、智能信号处理。
袁泉: 女, 1990年生, 硕士生, 研究方向为图像处理与模式识别。
张芳: 女, 1981年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为光学图像处理与检测技术。