

# 基于改进旋滤波的电子散斑干涉图滤波方法

贾大功 马彩滨 武立强 张红霞 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 电子散斑干涉术条纹图在成像时不可避免地受散斑噪声调制, 去除噪声是散斑干涉条纹处理的一项重要任务。利用散斑条纹图的方向性, 提出一种基于模糊方向的旋滤波: 在当前点的领域内定义 4 个模糊方向窗口, 将传统旋滤波的一维、精确方向窗口的确定, 转变为模糊方向窗口的确定; 在确定的窗口内进行低通滤波时, 采用自适应加权均值滤波代替传统的中值滤波。利用该方法分别处理模拟散斑条纹图和实验所得的真实条纹图, 并与传统旋滤波、双边滤波和小波丢弃子带方法比较。实验结果表明, 该改进算法在滤除散斑条纹图噪声的同时, 有效保护了条纹的细节信息。

**关键词** 图像处理; 电子散斑干涉术; 散斑噪声; 改进旋滤波; 模糊方向窗口; 自适应加权均值滤波

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0311001

## Denoising of Electronic Speckle Interferogram Based on Improved Spin Filtering

Jia Dagong Ma Caibin Wu Liqiang Zhang Hongxia Zhang Yimo

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, the Ministry of Education,

College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Speckle noise is inevitably involved in fringe pattern in electronic speckle pattern interferometry (ESPI), removing the noise is an important issue in ESPI. By exploiting the directionality of speckle pattern, an improved spin filtering is presented; four fuzzy directional windows in the field of current point are defined, so as to turn the determination of accurate one-dimensional directional window is turned into the determination of fuzzy directional window, and then the adaptive weighted mean filtering is applied instead of traditional median filtering is applied as denoising in the determined direction. The performance of the improved spin filtering is analyzed by using both computer-simulated fringes and experimental fringe. Bilateral filtering, wavelet subband removal method are introduced for making a comparison and validation in the image processing effect. The experimental results show that the proposed method is effective in noise removal and edge preservation for ESPI images.

**Key words** image processing; electronic speckle interferometry; speckle noise; improved spin filtering; fuzzy directional window; adaptive weighted mean filtering

**OCIS codes** 110.6150; 030.6140; 120.6160; 100.2000

## 1 引 言

电子散斑干涉术以其非接触、高灵敏度、全场和快速实时的优点, 成为现代测量领域的重要方法<sup>[1,2]</sup>。为得到应变位移等信息, 需提取条纹图的相位信息, 相移法和载波法<sup>[3]</sup>是两种常用的方法, 但都不方便在动态测量中应用。近年来, 人们提出了

多种不需要引入载波的单幅条纹图提取相位方法, 如基于连续小波变换<sup>[4]</sup>和加窗傅里叶变换的方法<sup>[5]</sup>等。然而, 无论是何种方法, 散斑条纹图含有大量的散斑噪声, 图像信噪比较低, 直接影响到相位信息的精确计算和缺陷识别, 所以能够很好地滤除条纹图中的噪声并保持原有的条纹信息是电子散斑干涉术

收稿日期: 2011-08-29; 收到修改稿日期: 2011-09-23

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327806, 2010CB327604)、天津市科技支撑重点项目(11ZCKFSF00400)和天津市自然科学基金(09JCYBJC01300)资助课题。

作者简介: 贾大功(1972—), 男, 副教授, 主要从事光互连技术、图像处理和光电检测等方面的研究。

E-mail: dagongjia@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: macaibin@126.com

图像处理中非常重要的一步<sup>[6]</sup>。

目前针对散斑条纹图去噪的方法很多,主要可以分为两大类,空域类和变换域类。空域类方法中,常用的有中值、均值、双边滤波<sup>[7]</sup>、旋滤波<sup>[8]</sup>、等值线滤波<sup>[9]</sup>和方向偏微分滤波<sup>[10]</sup>等。其中,中值和均值方法简单但效果不佳<sup>[11]</sup>;双边滤波通过灰度加权和距离加权的非线性组合,去噪效果得到很大提高;旋滤波利用了条纹的方向性,在条纹切线方向进行低通滤波,较通用滤波方法更能保护条纹细节;等值线滤波将曲面窗口代替旋滤波的直线窗口,取得了更好的效果;随后的方向偏微分方程滤波、方向相干扩散方程滤波<sup>[12]</sup>等方法,也利用了条纹的方向性,与等值线滤波方法比较,此类方法不需要逐个像素建立小的滤波窗口,移动滤波窗口,时间和滤波效果都得到了很大的突破。但以上利用条纹方向性的算法均依赖于对每一个像素点条纹方向的准确估计,而条纹图中大量的噪声势必会影响条纹方向的准确估计,而且条纹越宽,条纹方向的偏差越大,从而越影响去噪的效果。变换域中用于条纹图去噪的常用变换包括 Gabor 滤波<sup>[13]</sup>、小波阈变换<sup>[14~16]</sup>等。小波变换由于其具备良好的时频特性,在图像去噪领域得到了广泛发展和使用,文献<sup>[16]</sup>将正交小波变换中的阈值处理改进成子带去除,取得了更好的效果。通过对现有散斑条纹图滤波方法的比较,发现利用了条纹方向性的滤波方法表现更佳。为了更好地利用条纹的方向性,避免了每一个像素点方向精确估计的偏差对去噪效果的影响,本文提出一种基于模糊方向窗口的改进旋滤波方法,运用该方法对模拟条纹图和电子剪切散斑干涉系统真实条纹图进行滤波,并与传统旋滤波、双边滤波和小波丢弃子带方法进行比较。

## 2 改进旋滤波的理论分析

在干涉条纹图中,条纹图的灰度值分布呈现一定规律。在条纹的切线方向,灰度变化最小,对应的频谱是在零频附近的窄带,而噪声仍然分布在高频段,因而在条纹切线方向采用低通滤波方法,就可滤除噪声,且不损害条纹信息<sup>[8]</sup>。

正确地估计条纹切线方向是旋滤波取得良好去噪效果的关键,但由于散斑条纹图的噪声较多,极易导致传统旋滤波找到的一维滤波线方向偏离真实的切线方向,使滤波结果产生误差。为避免这一误差,提出将传统旋滤波的 8 条(也可以是 16 或者 32 条)等角度间隔,一维精确方向窗口的确定,转变为 4 个

模糊方向窗口的确定,单个方向窗口角度范围的增大,有效地保证了像素点的条纹切线方向落在估计的方向窗口内。由于方向窗口的增大,窗口内非条纹切线方向上的像素点也将增多,在选定方向窗口内进行低通滤波时,本文采用的自适应加权均值滤波(AWMF)代替传统的中值等低通滤波,其灰度加权因子能自适应的降低噪声和非条纹等值线上像素点对灰度值估计的影响,同时将降低旋滤波对窗口选取的敏感度。

本文的旋滤波是在囊括精确方向的模糊方向窗口内进行滤波。具体步骤如下,首先在当前点  $M(i, j)$  的领域内,定义一个矩形窗口,以图 1 中的  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  的矩形窗口为例,图中的白色像素区域分别表示 4 个模糊方向窗口;水平、竖直和 2 个对角方向窗口,4 个方向窗口内的像素均关于当前点中心对称,且大小均为  $3 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 。为了在保证 4 个模糊方向囊括当前点任意切线方向的同时,避免偏离条纹切线方向像素的增多,经计算,矩形窗口取  $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ ,  $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$  和  $11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$  时,方向窗口分别取  $3 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 、 $3 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$  和  $3 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$ ,即窗口宽度  $m$  仍适于取  $3 \text{ pixel}$ ;当矩形窗口取  $13 \text{ pixel} \times 13 \text{ pixel}$ 、 $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$  和  $17 \text{ pixel} \times 17 \text{ pixel}$  时,方向窗口宽度  $m$  取  $5 \text{ pixel}$  更加有效。

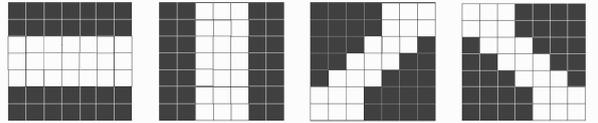


图 1  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  窗口四个方向窗口像素分布  
Fig. 1 Pixel distribution of four direction windows of  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  windows

方向窗口确定后,与传统旋滤波一样,分别计算 4 个方向窗口内的平均值  $A_{ij}^d$  和方差  $\sigma_{ij}^{2d}$  为

$$A_{ij}^d = \frac{1}{mn} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n I_{kl}^d, \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}^{2d} = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n (I_{kl}^d - A_{ij}^d)^2}{mn}, \quad (2)$$

式中上标  $d$  表示第  $d$  个方向窗口,  $m$  和  $n$  分别表示方向窗口的宽度和长度,  $I_{kl}^d$  是第  $d$  个方向窗口内的第  $k$  行第  $l$  列像素点的灰度值。

由于方差  $\sigma_{ij}^{2d}$  表示了第  $d$  个方向窗口内灰度分布的变化,根据旋滤波的基本原理,条纹切线方向的灰度变化最小,因此假定方差  $\sigma_{ij}^{2d}$  最小的方向窗口包含了条纹的切线方向,并用  $D$  表示为

$$D = \text{dir}(\min \sigma_{ij}^{2d}). \quad (3)$$

在方向窗口  $D$  内进行滤波时,采用文献[7]中灰度加权的 AWMF 代替传统的中值滤波。定义  $I_{kl}^D$  为方向窗口  $D$  内第  $k$  行第  $l$  列像素点的灰度值,其对应的灰度加权因子  $\omega_{kl}^D$  取参数为最小方差  $\min \sigma_{ij}^{2d}$  的高斯函数

$$\omega_{kl}^D = \exp\left[-\frac{(I_{ij} - I_{kl}^D)^2}{2\min \sigma_{ij}^{2d}}\right], \quad (4)$$

式中  $I_{ij}$  为当前点  $(i, j)$  滤波前的灰度值,则滤波后的灰度值  $\hat{I}_{ij}$  为

$$\hat{I}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n I_{kl}^D \omega_{kl}^D}{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \omega_{kl}^D}. \quad (5)$$

最后,对全图逐点运用改进旋滤波,便可实现条纹图的去噪处理。

## 3 实验验证

### 3.1 图像处理结果的对比

图 2(a) 是计算机模拟的条纹图,大小为  $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ ,图 2(b) 是加了均值为零、方差

为 0.1 的乘性噪声后的条纹图,条纹宽度约为 25 pixel。文献[17]认为,传统旋滤波的矩形窗口应取约  $1/4$  条纹宽度,因而运用  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  窗口的传统旋滤波对图 2(b) 进行三次滤波处理,处理结果见图 2(c)。

图 2(d) 和 (e) 分别是  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  窗口三次和  $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$  窗口两次改进旋滤波的处理结果。与图 2(c) 的处理结果相比,图 2(d) 和 (e) 中条纹的光滑度有很大改进,验证了本文对传统旋滤波的改进是有效的。同时,图 2(d) 的窗口虽然增大到约  $1/3$  条纹宽度,但处理结果和图 2(e) 相近,仍能很好地保护细节,证明了对旋滤波的改进降低了对矩形窗口大小选取的敏感度。

图 2(f) 的双边滤波虽然去噪能力很强,但条纹细节明显变模糊了,对条纹信息的保护能力不如本文的改进方法。利用小波 db10 丢弃两层子带的方法去噪效果明显不足,如图 2(g) 所示。利用小波 db10 丢弃三层子带的去噪效果虽然很好,但是振铃现象明显,损害了条纹信息图,如图 2(h) 所示。

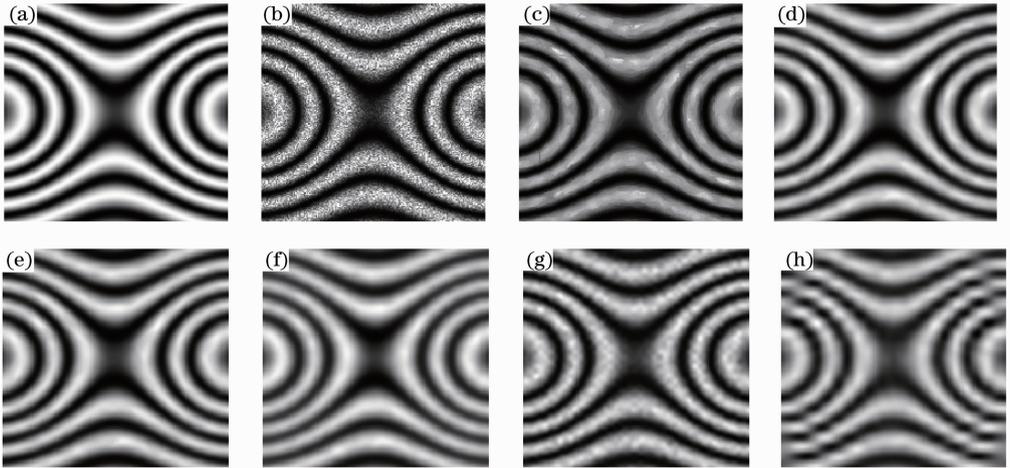


图 2 滤波结果对比。(a) 无噪声模拟条纹图; (b) 加噪条纹图; (c) 传统旋滤波 ( $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ ) 三次; (d) 改进旋滤波 ( $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ ) 三次; (e) 改进旋滤波 ( $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ ) 两次; (f) 双边滤波 ( $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ ) 两次; (g) 小波(两层); (h) 小波(三层)子带丢弃法

Fig. 2 Comparison of denoising result. (a) Simulated noiseless fringe pattern; (b) noisy fringe pattern; (c) original spin filtering ( $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ ) three times; (d) improved spin filtering ( $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ ) three times; (e) improved spin filtering ( $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ ) two times; (f) bilateral filtering ( $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ ) two times; (g), (h) wavelet subband removal method with two and three levels

为进一步验证本文方法的有效性,图 3(a) 是运用电子剪切散斑干涉系统对内部有缺陷的轮胎实施真空压力加载,并采用相减模式得到的蝴蝶斑条纹图,大小为  $277 \text{ pixel} \times 284 \text{ pixel}$ ,条纹宽度约为 28 pixel。图 3(b) 是  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  窗口四次传统旋滤波的处理

结果。图 3(c) 和图 3(d) 是  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  窗口四次和  $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$  窗口三次改进旋滤波的处理结果,滤波效果明显优于图 3(b),同时,与图 3(e) 的双边滤波和图 3(f) 的小波 db10 丢弃三次子带比较,条纹细节保护能力更强,与模拟条纹图的处理结论一致。

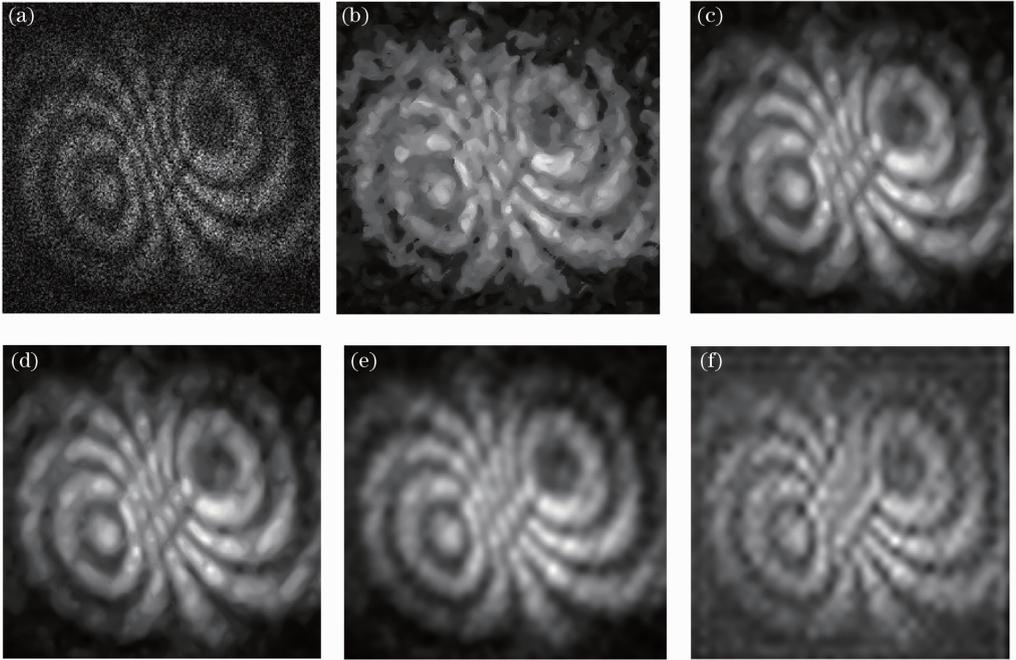


图3 滤波结果对比。(a)真实条纹图;(b)传统旋滤波(7 pixel×7 pixel)四次;(c)改进旋滤波(7 pixel×7 pixel)四次;(d)改进旋滤波(9 pixel×9 pixel)三次;(e)双边滤波(7 pixel×7 pixel)三次;(f)小波(三层)子带丢弃法

Fig. 3 Comparison of denoising result. (a) Original fringe pattern; (b) original spin filtering result (7 pixel×7 pixel) four times; (c) improved spin filtering result (7 pixel×7 pixel) four times; (d) improved spin filtering (9 pixel×9 pixel) three times; (e) bilateral filtering (7 pixel×7 pixel) three times; (f) three-level wavelet subband removal method

### 3.2 评价参数的对比

为了更好地对滤波效果进行评价,采用散斑指数、保真度<sup>[7]</sup>和峰值信噪比作为定量评价指标。散斑指数  $I_s$  表示为

$$I_s = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\sigma(i,j)}{\mu(i,j)}, \quad (6)$$

式中  $M$  和  $N$  表示图像的大小,  $\sigma(i,j)$  和  $\mu(i,j)$  分别表示测量窗中像素灰度值的标准差和平均值, 测量窗口一般取 3 pixel×3 pixel 或 5 pixel×5 pixel, 本文取 5 pixel×5 pixel。

保真度  $f$  为

$$f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - I_0(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_0(i,j)]^2}, \quad (7)$$

式中  $I_0(i,j)$  和  $I(i,j)$  分别是模拟条纹图不含噪声和加噪声滤波后图像的灰度值。

峰值信噪比  $R_{\text{PSN}}$  为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - I_0(i,j)]^2}, \quad (8)$$

式中  $I_0(i,j)$  和  $I(i,j)$  分别是真实条纹图滤波前后

图像的灰度值。

散斑指数  $I_s$  反映噪声抑制能力, 数值越小表示去噪能力越强。保真度  $f$  和峰值信噪比  $R_{\text{PSN}}$  反映对图像细节信息的保持能力, 数值越大表示细节保护的越好。保真度  $f$  一般用于模拟图像的评估, 处理效果越好, 保真度趋近于 1, 峰值信噪比  $R_{\text{PSN}}$  常用于真实图像的评估。

表 1 的第 2 组数据是运用传统窗口结合 (AWMF), 7 pixel×7 pixel 窗口三次滤波所得结果, 第 3 组数据是运用模糊方向窗口结合中值滤波, 7 pixel×7 pixel 窗口三次滤波所得结果。前 4 组的数据定量地说明了对传统旋滤波 2 个方面的改进均在提高保真度的同时, 降低了散斑指数。将矩形窗口由 7 pixel×7 pixel 增大到 9 pixel×9 pixel 后, 迭代次数由 3 变 2, 2 个评价参数小幅度的变化验证了本方法增大了窗口选取的范围。经大量实验验证, 矩形窗口的范围为 1/4 至 1/3 条纹宽度, 迭代次数则根据噪声水平适当增加, 一般迭代 2~4 次即可。虽然双边滤波的散斑指数稍低于本文方法, 但其较低的保真度 (0.9672) 证明其在细节保护能力上不如本文方法, 对比两种方法, 双边滤波是  $n \times n$  矩形窗口内所有的像素参与加权滤波, 没有利用条纹的方

向性,本文改进旋滤波中参与加权滤波的像素分布在条纹的方向上,因而能有效地避免过平滑现象,保护条纹细节。小波丢弃子带的方法,丢弃层数取2时,散斑指数较高(0.4067),去噪不足;层数取3时,

虽然散斑指数降低了,但保真度也随之降低(0.9769),不能在取得好的去噪效果的同时又保护细节信息。

表1 对图2(b)模拟条纹图滤波结果的参数比较

Table 1 Parameter comparison of simulated fringe pattern denoising result

	Fig. 2(c)	Original window AWMF	Improved window mean filtering	Fig. 2(d)	Fig. 2(e)	Fig. 2(f)	Fig. 2(g)	Fig. 2(h)
Fidelity	0.9832	0.9879	0.9890	0.9899	0.9913	0.9672	0.9951	0.9769
$I_s$	0.3790	0.3351	0.2964	0.2094	0.2236	0.2113	0.4067	0.0161

表2 对图3(a)真实条纹图滤波结果的参数比较

Table 2 Parameter comparison of experimental fringe pattern denoising result

	Fig. 3(b)	Original window AWMF	Improved window mean filtering	Fig. 3(c)	Fig. 3(d)	Fig. 3(e)	Fig. 3(f)
$R_{PSN}$	19.2522	19.2973	20.9038	21.0137	20.9655	18.8268	19.0090
$I_s$	0.0824	0.0680	0.0430	0.0338	0.0324	0.0313	0.0625

表2的第2组数据是运用传统窗口结合AWMF,7 pixel×7 pixel窗口四次滤波所得结果,第3组数据是运用模糊方向窗口结合中值滤波,7 pixel×7 pixel窗口四次滤波所得结果。表2中的峰值信噪比的变化趋势与保真度一致,改进后的旋滤波在取得更大的峰值信噪比的同时,散斑指数大大降低。7 pixel×7 pixel窗口四次和9 pixel×9 pixel窗口三次改进旋滤波的效果相当,两者的散斑指数与双边滤波接近,小于小波丢弃三层子带方法,但峰值信噪比明显大于较双边滤波和小波丢弃子带方法,充分说明了本文改进方法的优势性。

引进条纹密度信息,根据条纹密度自适应的调节窗口的大小以适用于条纹密度变化较大的条纹图。

## 参 考 文 献

- 1 N. K. Mohan, P. K. Rastogi. Recent developments in digital speckle pattern interferometry[J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2003, **40**(5): 439~445
- 2 Sun Ping, Fan Xiangju, Wang Xinghai. Three-dimensional electronic speckle pattern interferometry with carrier modulation by using large-shearing block prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 04120121  
孙平, 范香菊, 王兴海. 基于大错位方棱镜的三维载频电子散斑干涉技术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 04120121
- 3 Sun Ping, Li Aihua, Tao Chunxian *et al.*. Carrier modulation for large-shearing electronic speckle patterns and displacement measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 447~451  
孙平, 李爱华, 陶春先等. 大剪切电子散斑干涉的载频调制与位移场测量[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 447~451
- 4 Li Kai, Zhang Dazhi, Wang Jingjing *et al.*. Phase extraction of an ESPI fringe pattern by using two-dimensional continuous wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 733~738  
李凯, 张大治, 王晶晶等. 基于二维连续小波变换的ESPI条纹图相位提取方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 733~738
- 5 Q. Kema. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(13): 2695~2701
- 6 Haixia Wang, Qian Kema. Comparative analysis on some spatial-domain filters for fringe pattern denoising [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(12): 1687~1696
- 7 Pablo D. Ruiz, Guillermo H. Kaufmann. Evaluation of a scale-space filter for speckle noise reduction in electronic speckle pattern interferometry [J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(8): 2395~2401
- 8 Q. Yu, K. Andresen. New spin filters for interferometric fringe patterns and grating patterns [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3705~3711
- 9 Yang Xia, Yu Qifeng, Fu Sihua. Adaptive window for electric speckle pattern interferometry fringe pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 625~630

## 4 结 论

散斑条纹图因其含有大量的噪声而难以提取相位信息,所以很好地滤除噪声并保护原有的条纹信息是散斑条纹图处理中非常重要的一步。为了更好地利用了条纹的方向性,提出一种基于模糊方向窗口的改进旋滤波,对模拟图和真实图的良好滤波结果表明,该方法对传统旋滤波的改进是成功的。比较传统旋滤波、双边滤波和小波丢弃子带方法,在保护条纹细节信息的同时具有更好的去噪能力,且对旋滤波的改进降低了对矩形窗口大小选取的敏感度,增大了窗口选取的范围,方便了旋滤波的实际应用。该改进旋滤波同样可用于云纹、全息、光弹等条纹图的去噪,具有广阔的应用前景。下一步的研究工作将详细分析窗口大小和迭代次数的对滤波效果影响,以便精确选取窗口大小和迭代次数,还可尝试

- 杨 夏, 于起峰, 伏思华. 散斑条纹图的自适应窗口滤波方法 [J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 625~630
- 10 C. Tang, L. Han, H. Ren *et al.*. Second-order oriented partial-differential equations for denoising in electronic-speckle-pattern interferometry fringes [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33** (19): 2179~2181
- 11 Fu Sihua, Yu Qifeng. Filtering methods of the digital speckle fringe pattern[J]. *J. Appl. Opt.*, 2005, **26**(4): 5~8  
伏思华, 于起峰. 散斑条纹图的滤波方法[J]. 应用光学, 2005, **26**(4): 5~8
- 12 Haixia Wang, Qian Kema, Wenjing Gao *et al.*. Fringe pattern denoising using coherence enhancing diffusion [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **4**(8): 1141~1143
- 13 Li Kai, Zhang Qingchuan. Speckle fringe pattern smoothing method based on Gabor filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2751~2755  
李 凯, 张青川. 基于 Garbor 滤波的散斑条纹图平滑方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2751~2755
- 14 Guillermo H. Kaufmann, Alejandro Federico. Denoising in digital speckle pattern interferometry using wave atoms [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(10): 1232~1234
- 15 Saba Mirza, Rajesh Kumar, Chandra Shakher. Study of various preprocessing schemes and wavelet filters for speckle noise reduction in digital speckle pattern interferometric fringes [J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(4): 045603
- 16 Alejandro Federico, Guillermo H. Kaufmann. Comparative study of wavelet thresholding methods for denoising electronic speckle pattern interferometry fringes [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(11): 2598~2604
- 17 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenyue *et al.*. Preprocess method for speckle interference image based on spin filtering [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 230~234  
王 峰, 彭晓世, 刘慎业等. 基于旋滤波的散斑干涉图预处理方法 [J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(2): 230~234

栏目编辑:李文喆