

基于 Gabor 滤波的散斑条纹图平滑方法

李 凯 张青川

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要 提出了一种基于伽博(Gabor)滤波的散斑条纹图平滑方法。通过加窗傅里叶运算提取散斑条纹图的条纹频率和条纹梯度方向,并利用它们确定具有频率和方向选择性的 Gabor 滤波器对散斑条纹图进行 Gabor 滤波。数值模拟和实验结果表明,该方法在滤除散斑噪声的同时能够有效的保留散斑条纹图的条纹结构,为从单幅散斑条纹图中进一步提取条纹相位场奠定了良好的基础。

关键词 图像处理;伽博滤波;散斑条纹图;散斑噪声;条纹梯度方向;条纹频率;加窗傅里叶运算

中图分类号 TN713 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092910.2751

Speckle Fringe Pattern Smoothing Method Based on Gabor Filtering

Li Kai Zhang Qingchuan

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract A method based on Gabor filtering for speckle fringe pattern smoothing is presented. The fringe frequencies and fringe gradient orientation of the speckle fringe pattern are obtained by windowed Fourier operation. The Gabor filters with the particular frequencies and orientation are then determined and applied to smooth the speckle fringe pattern. Simulation and experimental results show that the speckle noise in the speckle fringe patterns is removed efficiently as well as the fringe structure is well-preserved. This method provides a good basis for further extracting fringe phase field from one speckle fringe pattern.

Key words image processing; Gabor filtering; speckle fringe pattern; speckle noise; fringe gradient orientation; fringe frequencies; windowed Fourier operation

1 引 言

散斑干涉法是光测实验力学中的重要测量方法之一。它以激光散斑作为信息载体,可实现高灵敏度的非接触全场测量。根据实验光路和处理过程的不同,散斑干涉方法可分为剪切散斑法^[1],电子散斑法^[2],频闪散斑干涉法^[3],时间平均散斑法^[4]等。然而,无论哪种测量方式,散斑在充当信息载体的同时也带来了严重的散斑噪声。如何有效的滤除散斑条纹图中的散斑噪声是散斑干涉技术面对的一个重要课题^[5]。

图像的滤波技术已有不少,较为常用的有均值滤波、中值滤波以及频域滤波等,但这些滤波技术对散斑条纹图的滤波效果并不好,主要的问题是它们在滤除散斑噪声的同时也损害了条纹结构^[6]。条纹结构是所要探测信息(如表面位移,表面应变)的信

息载体,如何在滤除散斑噪声的同时保留这些条纹结构正是散斑条纹图的滤波难点。于起峰^[7]于 1988 年提出基于条纹方向的旋滤波技术,并在之后的工作中^[8~11]进一步将此思想发展为曲线大窗口滤波。该方法在沿着条纹方向的等值线窗口内进行低通滤波,滤除散斑噪声的同时有效的保留了散斑条纹图的条纹结构。唐晨等^[12]提出各向异性偏微分方程滤波方法,在充分利用条纹图方向信息的基础上也取得了较好的滤波效果。此外,还有其它的一些滤波技术,如小波变换法^[13]、加窗傅里叶变换法^[14]等,由于采用了与条纹结构相似的基元函数对散斑条纹图进行匹配滤波,这些方法也取得了较好的滤波效果。可见,在对散斑条纹图进行滤波时充分利用条纹图自身的条纹结构信息是取得良好滤波效果的有效途径。

收稿日期: 2008-12-08; 收到修改稿日期: 2009-01-07

作者简介: 李 凯(1978—),男,博士研究生,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: ppplikai@ustc.edu.cn

导师简介: 张青川(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

Gabor 在 1946 年提出了伽博(Gabor)函数^[15], 并将其用于对声音信号的时频局域分析。之后, 基于 Gabor 函数的 Gabor 滤波器发展起来, 由于具有良好的方向和频率选择性, 其在纹理识别^[16]、机器视觉^[17]等领域得到了广泛的应用。Hong 等^[18]将 Gabor 滤波器用于对指纹图像的增强, 取得了很好的效果, 考虑到指纹图像与光学干涉条纹图像之间的相似性, 本文将 Gabor 滤波方法用于对散斑条纹图的噪声滤除。由于充分利用了条纹图本身的条纹结构(条纹频率和条纹梯度方向)信息, 该方法在有效滤除散斑噪声的同时还较好的保留了散斑条纹图的条纹结构, 为进一步从单幅散斑条纹图中提取条纹相位奠定了良好的基础。

2 基本原理

2.1 Gabor 滤波

Gabor 滤波器具有良好的方向和频率选择性, 其脉冲响应函数 $h(x, y, \phi, f)$ 如下^[18]:

$$h(x, y, \phi, f) = \exp\left[-\left(\frac{x_\phi^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y_\phi^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \cos(2\pi f x_\phi), \quad (1)$$

$$x_\phi = x \cos \phi + y \sin \phi, \quad (2)$$

$$y_\phi = -x \sin \phi + y \cos \phi. \quad (3)$$

其中 (x, y) 为空域坐标, ϕ 为滤波器方向与 x 轴的夹角, f 为滤波器中心频率, (x_ϕ, y_ϕ) 为滤波器局域坐标, x_ϕ 和 y_ϕ 分别沿 ϕ 方向和垂直于 ϕ 的方向, σ_x 和 σ_y 分别为沿着 x_ϕ 和 y_ϕ 轴的高斯包络系数。可以看出, Gabor 滤波函数由一个沿着 ϕ 方向以频率 f 传播的正弦平面波被高斯函数包络后形成, 正是这一特点使其成为一种具有方向和频率选择性的滤波器, 将(1)式分解为沿 x_ϕ 轴和 y_ϕ 轴的两部分更能看出其滤波特性:

$$h(x, y, \phi, f) = h_y \times h_x = \exp\left(-\frac{y_\phi^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \exp\left(-\frac{x_\phi^2}{2\sigma_x^2}\right) \cos(2\pi f x_\phi), \quad (4)$$

从频域的观点看, h_x 是带通的, 中心频率在 f 处, 带宽由 σ_x 决定; h_y 则是低通的, 带宽由 σ_y 决定, 将二者结合起来可知: Gabor 滤波函数 $h(x, y, \phi, f)$ 是一种沿着 ϕ 方向带通, 沿着垂直于 ϕ 的方向平滑的滤波器, 这一特性使其非常适合于处理具有条纹结构的图像。当选择 ϕ 为条纹梯度方向, f 为条纹频率时, Gabor 滤波器将在沿条纹梯度的方向限带通过中心频率为 f 的条纹结构信息, 而在沿着条纹的方向

(与条纹梯度方向垂直的方向)则对条纹进行平滑, 从而有效的保留条纹结构。

对于一幅散斑条纹图 $I(x, y)$, 提取了它的条纹梯度方向场 $\phi(x, y)$ 和条纹频率场 $f(x, y)$ 后, 便可确定任一点 (x, y) 处的 Gabor 滤波函数 $h(x, y, \phi, f)$, 而后通过以下的卷积运算便可完成对散斑条纹图 $I(x, y)$ 的 Gabor 滤波:

$$I_{\text{filter}}(x, y) = \int_{D_f} I(\zeta, \eta) h[x - \zeta, y - \eta, \phi(x, y), f(x, y)] d\zeta d\eta, \quad (5)$$

其中 D_f 表示以 (x, y) 点为中心的积分窗口。

2.2 条纹梯度方向和条纹频率的确定

由前面的讨论可知, Gabor 滤波的关键在于提取散斑条纹图的条纹梯度方向和条纹频率。对于条纹梯度方向(由于其与条纹方向相互垂直, 故二者的计算是等价的)已有不少算法: 如梯度平均法、平面拟和法以及方向方差法等^[10], 它们都是在空域内通过对图像灰度进行运算而提取条纹方向的。条纹频率的确定则通常是在条纹方向确定后, 沿着条纹梯度的方向提取条纹周期并对其取倒数而得到^[10, 18]。

本文采用加窗傅里叶运算^[14]直接提取散斑条纹图的条纹梯度方向和条纹频率, 为此, 引入加窗傅里叶运算:

$$\mathcal{F}_s(x, y, \omega_x, \omega_y) = \int_{D_s} I_o(x + \zeta, y + \eta) \times \exp[-2\pi j(\omega_x \zeta + \omega_y \eta)] d\zeta d\eta, \quad (6)$$

式中 $I_o(x, y)$ 是将 $I(x, y)$ 滤除直流分量的结果, D_s 为以 (x, y) 点为中心的积分窗口, 运算结果 $\mathcal{F}_s(x, y, \omega_x, \omega_y)$ 含有 4 个自变量: (x, y) 为空域坐标, (ω_x, ω_y) 为频域坐标。根据文献^[14]的分析可知, (x, y) 处的条纹频率分量 (f_x, f_y) 为

$$(f_x, f_y) = \arg \max_{\omega_x, \omega_y} [|\mathcal{F}_s(x, y, \omega_x, \omega_y)|], \quad (7)$$

式中 (f_x, f_y) 为使 $|\mathcal{F}_s(x, y, \omega_x, \omega_y)|$ 取最大值的 (ω_x, ω_y) 。所以, 通过求解极值问题(7)式便可得到散斑条纹图的条纹频率场 $f(x, y)$ 和条纹梯度方向场 $\phi(x, y)$:

$$f(x, y) = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \quad (8)$$

$$\phi(x, y) = \arctan(f_y / f_x). \quad (9)$$

本文采用简单的穷尽算法求解极值问题, 其思想是将 (ω_x, ω_y) 在其可能出现的范围内均匀离散化, 记为 $(\omega_{xi}, \omega_{yi}), i = 1, 2, \dots$, 而后在这些离散点 $(\omega_{xi}, \omega_{yi})$ 中找出使 $|\mathcal{F}_s(x, y, \omega_x, \omega_y)|$ 取最大值的 $(\omega_{xi}, \omega_{yi})$ 作为问题的解 (f_x, f_y) 。该方法的求解精

度取决于离散点的取法,当离散点取得足够细密均匀时求解精度是可以保证的。为验证此算法,生成了一幅 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的散斑条纹图,如图 1(a) 所示,其相位分布 $\phi(x, y)$ 为

$$\phi(x, y) = 4\pi \times 0.07 \times [(x - 128)^2 + (y - 128)^2] / 256, \quad (10)$$

根据采样定理:一幅数字图像所能表达的条纹频率不会超过 0.5,所以可将 (ω_x, ω_y) 在频率范围 $-0.5 \leq \omega_x \leq 0.5, -0.5 \leq \omega_y \leq 0.5$ 内以间隔 0.01 离散化为 $(\omega_{xi}, \omega_{yi}), i = 1, 2, \dots$ 。通过 (6) 式计算 $\mathcal{F}_s(x, y, \omega_x, \omega_y)$ 时,积分窗口 D_s 取为 21×21 的矩形窗^[19]。

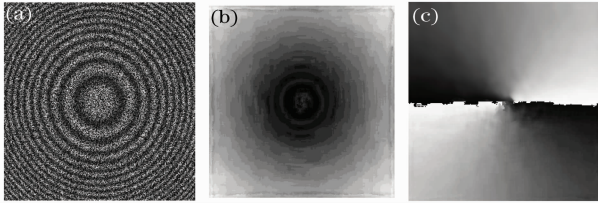


图 1 模拟散斑条纹图的条纹频率和条纹梯度方向的提取 (a) 模拟散斑条纹图; (b) 条纹频率图; (c) 条纹梯度方向图

Fig. 1 Extraction of the fringe frequencies and fringe gradient orientation from a simulated speckle fringe pattern (a) simulated speckle fringe pattern; (b) fringe frequencies; (c) fringe gradient orientation

图 1(b) 显示了条纹频率场的计算结果,为方便显示,将频率按其大小对应到了 $0 \sim 255$ 的灰度范围。图 1(c) 是条纹梯度方向场的计算结果,同样对其进行了灰度对应:方向角 $0 \sim \pi$ 对应灰度 $0 \sim 255$ 。为衡量计算结果,定义方向误差 E_ϕ 和频率误差 E_f 如下:

$$E_\phi = \text{mean} \{ |\sin[\phi(x, y) - \phi_T(x, y)]| \}$$

$$E_f = \text{mean} [|f(x, y) - f_T(x, y)|], \quad (11)$$

其中 $\phi(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 是计算值, $\phi_T(x, y)$ 和 $f_T(x, y)$ 是准确值, $\text{mean}(\cdot)$ 则表示对整幅图像取平均值。在 E_ϕ 的定义中取 $\sin(\cdot)$ 函数,是为了避免方向角存在 π 跳变时引起的计算错误。计算结果显示,条纹频率场和条纹梯度方向场的误差分别为 $E_f = 0.005 \text{ rad/pixel}$ 和 $E_\phi = 0.04 \text{ rad}$, 由此证实该算法求取条纹梯度方向和条纹频率的有效性。

3 数值模拟和实验结果

求得条纹梯度方向场 $\phi(x, y)$ 和频率场 $f(x, y)$ 后,便可使用 (5) 式对散斑条纹图进行 Gabor 滤波。(5) 式涉及几个参数: σ_x, σ_y 以及积分窗口 D_f 。为计

算方便选取 $W_{x_\phi} \times W_{y_\phi}$ 的矩形积分窗口,其中 W_{x_ϕ} 和 W_{y_ϕ} 分别为沿着局部坐标 x_ϕ 和 y_ϕ 方向的窗口宽度。为达到较好的滤波效果, Gabor 滤波函数在沿着条纹梯度方向至少应包含一个条纹宽度,故可取 $W_{x_\phi} = 1/f$, 而在沿着条纹的方向则可取 $W_{y_\phi} = 2W_{x_\phi}$ 以增强条纹平滑的效果。 W_{x_ϕ} 和 W_{y_ϕ} 确定后, σ_x 和 σ_y 也就可以确定了: 因为高斯函数 $\exp\{-[x^2/(2\sigma^2)]\}$ 的能量绝大部分集中在零点附近的 4σ 宽度内,故可取 $\sigma_x = W_{x_\phi}/4, \sigma_y = W_{y_\phi}/4$ 。需要指出的是,对条纹频率 $f = 0$ 的点(比如那些相位驻点)以上参数确定方法会出现问题: $1/f \rightarrow +\infty$, 为此,可事先根据散斑条纹图给定一个最大条纹宽度 T , 当 $f \leq 1/T$ 时,令 $f = 1/T$, 而后再按上述方法确定相关参数。

3.1 数值模拟结果

图 2(a) 和图 1(a) 是同一幅模拟散斑条纹图,图 2(b) 显示了对图 2(a) 的 Gabor 滤波结果,可以看出:在沿着条纹的方向,散斑噪声得到了很好的平滑,而在沿着条纹梯度的方向,条纹结构则被较好的保留了下来。图 2(c) 是在图 2(b) 的基础上用 Hilditch 算法^[20] 对黑条纹骨架进行提取的结果,可以看出骨架线连续而光滑,这为进一步的条纹相位提取打下了很好的基础。

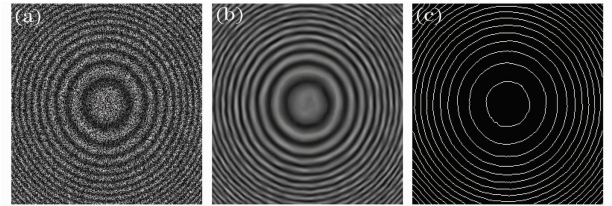


图 2 简单的模拟散斑条纹图的 Gabor 滤波以及条纹骨架提取。(a) 模拟散斑条纹图; (b) Gabor 滤波结果; (c) 提取条纹骨架的结果

Fig. 2 Gabor filtering and fringe skeleton extraction from a simple simulated speckle fringe pattern (a) simulated speckle fringe pattern; (b) after filtering by Gabor filter; (c) extraction of fringe skeletons

图 2(a) 是一幅比较简单圆形条纹图,为进一步对 Gabor 滤波算法进行验证,生成了一幅更为复杂的散斑条纹图,如图 3(a) 所示(大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$),其相位分布为

$$\phi(x, y) = 8\pi \times \{ \cos[2\pi(x + 64)/256] + \cos[2\pi \times (y + 64)/256] \}. \quad (12)$$

图 3(b) 显示了对图 3(a) 进行 Gabor 滤波的结果,图 3(c) 是在图 3(b) 的基础上提取条纹骨架的结果。可以看出,散斑条纹图的散斑噪声得到了很好

的平滑,而条纹图本身的条纹结构则被较好的保留了下来,提取的条纹骨架也与原图吻合得很好。

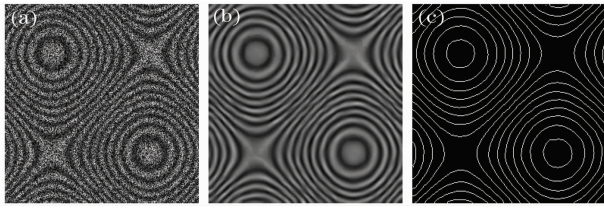


图3 复杂的模拟散斑条纹图的 Gabor 滤波以及条纹骨架提取 (a) 模拟散斑条纹图; (b) Gabor 滤波结果; (c) 提取条纹骨架的结果

Fig. 3 Gabor filtering and fringe skeleton extraction from a complex simulated speckle fringe pattern (a) simulated speckle fringe pattern; (b) after filtering by Gabor filtering; (c) extraction of fringe skeletons

3.2 实验结果

为进一步验证 Gabor 滤波算法,对电子散斑干涉(ESPI)实验中得到的真实散斑条纹图进行了处理。图 4(a)和图 5(a)(大小均为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$)代表了二类典型的散斑条纹图,开条纹图和闭条纹图。图 4(b),(c)和图 5(b),(c)分别显示了用窗口傅里叶运算得到的条纹频率场和条纹梯度方向场结果。可以看出,由于散斑噪声比较严重,计算结果存在一定的误差,但条纹结构信息还是被有效地提取了出来。图 4(d)和图 5(d)显示了用 Gabor 滤波器进行滤波处理的结果。可以看出,两幅散斑条纹图中的散斑噪声都得到了有效滤除,与此同时,原始散斑条纹图中的条纹结构则被有效地保留了下来。图 4(e)和图 5(e)所显示的条纹骨架提取结果

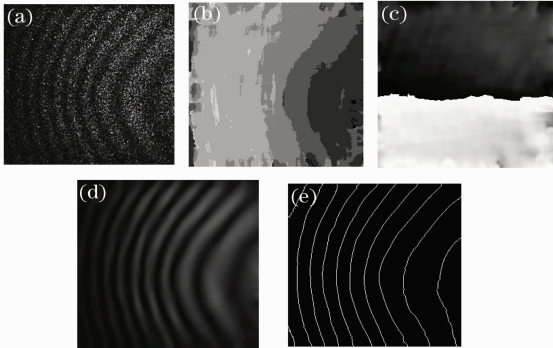


图4 ESPI 开条纹图的 Gabor 滤波以及条纹骨架提取。(a) ESPI 开条纹图; (b) 条纹频率图; (c) 条纹梯度方向图; (d) Gabor 滤波结果; (e) 提取条纹骨架的结果

Fig. 4 Gabor filtering and fringe skeletons extraction from an ESPI open fringe pattern. (a) ESPI open fringe pattern; (b) fringe frequencies; (c) fringe gradient orientation; (d) after filtering by Gabor filter; (e) extraction of fringe skeletons

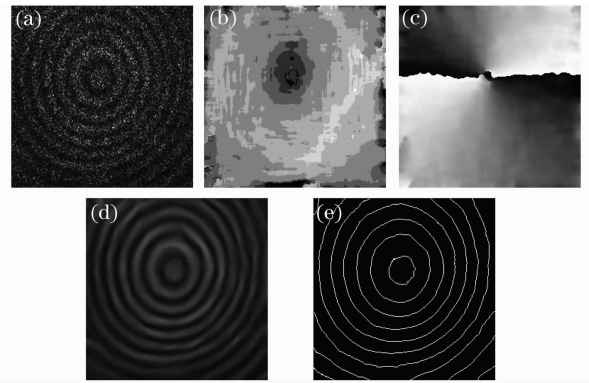


图5 ESPI 闭条纹图的 Gabor 滤波以及条纹骨架提取。(a) ESPI 闭条纹图; (b) 条纹频率图; (c) 条纹梯度方向图; (d) Gabor 滤波结果; (e) 提取条纹骨架的结果

Fig. 5 Gabor filtering and fringe skeletons extraction from an ESPI closed fringe pattern. (a) ESPI closed fringe pattern; (b) fringe frequencies; (c) fringe gradient orientation; (d) after filtering by Gabor filter; (e) extraction of fringe skeletons

进一步证实了 Gabor 滤波方法的有效性,为进一步提取条纹相位打下了很好的基础。

本文计算所用计算机为 AMD 2.0 GHz 处理器,1024 MB 内存。处理一幅 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的散斑条纹图的时间约为 3 min。

4 结 论

提取散斑条纹图的条纹频率和条纹梯度方向后,可确定出具有方向和频率选择性的 Gabor 滤波器。基于此,本文提出一种基于 Gabor 滤波的散斑条纹图平滑方法。数值模拟和实验结果表明,该方法在滤除条纹图中散斑噪声的同时还能有效的保留散斑条纹图的条纹结构,为从单幅散斑条纹图中进一步提取条纹相位打下了很好的基础。

参 考 文 献

- 1 Sun Ping, Wang Haifeng, Zhang Xi *et al.*. Study on three-dimensional ESPI and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 840~844
孙平,王海峰,张熹等. 三维电子散斑干涉技术及其应用研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 840~844
- 2 Sun Ping, Liu Duanjin, Han Qing *et al.*. Simultaneous quantitative evaluation of in-plane and out-of-plane deformation by use of a carrier method of large image-shearing shearography [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(12): 709~711
- 3 Chen Bingquan. Defect measurement based on rotating aperture-stroboscopic speckle interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 76~79
陈炳泉. 旋转孔径频闪散斑干涉法用于缺陷检测[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 76~79
- 4 Le Kaiduan, Zhou Xiang, Tang Jingyuan *et al.*. ESPI for full field vibration model measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*,

- 2003, **32**(5): 608~611
乐开端, 周 翔, 唐经源 等. 激光全场模态测量技术研究[J]. 光子学报, 2003, **32**(5): 608~611
- 5 Sirohi R. S. Speckle Metrology[M]. New York: Marel dekker, 1993, 99~157
- 6 Kaufmann G, Davila A, Kerr D. Interview-smoothing of speckle interferometry fringe patterns[J]. *Optical Testing Digest*, 1997, **2**(4): 4504~4509
- 7 Yu Qifeng. Spin filtering process and automatic extraction of fringe center-lines from interferometric patterns [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(18): 3782~3784
- 8 Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Liu Xiaolin. Spin filtering with curve windows for interferometric fringes[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(14): 2650~2654
- 9 Yang Xia, Yu Qifeng, Fu Sihua. Adaptive window filter for electric speckle pattern interferometry fringe pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 625~630
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 Yu Qifeng, Fu Sihua. ESPI and InSAR Interferometry Fringe Pattern Processing Based on Fringe Orientation and Fringe Contour[M]. Beijing: Science Press, 2007, 36~57
于起峰, 伏思华. 基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 36~57
- 11 Fu Sihua, Lin Hui, Yu Qifeng *et al.*. Fringe-contoured-window sine/cosine filter for saw-tooth phase maps of electronic speckle pattern interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 864~870
- 伏思华, 林 珩, 于起峰 等. 电子散斑相位主值图的等值线正余弦滤波方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 864~870
- 12 Tang Chen, Han Lin, Ren Hongwei *et al.*. Second-order oriented partial-differential equations for denoising in electronic-speckle-pattern interferometry fringes[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(19): 2179~2181
- 13 Watkins L. R, Tan S. M, Barnes T. H. Determination of interferometer phase distributions by use of wavelets[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(13): 905~907
- 14 Qian Kemao. Windowed fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(13): 2695~2702
- 15 Gabor D. Theory of communication[J]. *Instit. Electr. Eng.*, 1946, **93**: 429~457
- 16 Bodnarova A, Bennamoun M, Latham S. Optimal Gabor filters for textile flaw detection [J]. *Pattern Recognition*, 2002, **35**: 2973~2991
- 17 Lin lin, Shen Libai. A review on Gabor wavelets for face recognition[J]. *Pattern Anal. Appl.*, 2006, **9**: 273~292
- 18 Hong L, Wan Y, Jain A. K. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1998, **20**(8): 777~789
- 19 Qian Kemao. On window size selection in the windowed Fourier ridges algorithm [J]. *Opt. & Laser in Engng.*, 2007, **45**: 1186~1192
- 20 Louisa L, Seong W. L, Ching Y. S. Thinning methodologies-a comprehensive survey[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1992, **14**(9): 869~885