

提高小波变换轮廓术测量精度的方法

张 诚, 陈 文 静

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 小波在空域和频域上均具有良好的局域化性能, 适合于非平稳信号分析。在传统的小波变换轮廓术中, 对基小波进行尺度伸缩, 即调整子小波的中心频率, 去匹配局部条纹, 以获取对应的相位信息。但仅在局部位置对 Morlet 小波进行尺度伸缩不能最佳地提取局部相位信息。详细分析了振荡波形随高斯窗宽变化的复 Morlet 小波在条纹分析中的特点, 提出了一种改进的小波处理方法。将所提方法的相位重建结果与基于代价函数的小波方法的相位重建结果进行比较。结果表明: 所提方法综合了不同窗宽的复 Morlet 小波优点, 具有更可靠的脊提取结果; 所提的优化小波脊提取方法在条纹分析中具有更好的抑噪能力, 提高了小波变换轮廓术的测量精度; 计算机模拟和实验均验证了所提方法的有效性。

关键词 测量; 相位提取; 复 Morlet 小波; 条纹分析; 三维面形测量; 小波变换

中图分类号 O438.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0712002

Method for Improving Measurement Accuracy of Wavelet Transform Profilometry

Zhang Cheng, Chen Wenjing

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract Wavelets are suitable for analyzing non-stationary signals because of their good localized capabilities in both space domain and frequency domain. In traditional wavelet transform profilometry, the scaling of the mother wavelet, which moves the center frequency of the daughter wavelet, can be used to meet local signals for acquiring phase information. It is not accurate enough to extract the local phase information just changing the scale of the complex Morlet wavelet in the local position. To solve this problem, we discuss the characteristics of complex Morlet wavelets with different Gaussian window widths in fringe analysis and propose an improved wavelet processing method. The phase reconstruction results of the proposed method was compared with those of the wavelet processing by employing a cost function. The results show that the proposed method combines merits of the complex Morlet wavelets with different Gaussian window widths, which gives more reliable ridge information. The measurement accuracy of the wavelet transform profilometry is improved by employing optimized wavelet ridge extraction technique because it has stronger noise suppression ability in fringe analysis. The validity of the proposed method is verified by computer simulations and experiments.

Key words measurement; phase extraction; complex Morlet wavelet; fringe analysis; three-dimensional surface measurement; wavelet transform

OCIS codes 120.6650; 100.2650; 100.7410

1 引 言

基于结构光照明的主动三维面形测量技术在实物仿形、工业检测、机器视觉、生物医学等领域具有广

阔的应用前景^[1]。常用方法包括傅里叶变换轮廓术^[2-4]、窗口傅里叶变换^[5-6]、小波变换轮廓术^[7-13]和相移测量轮廓术^[14-15]等。相移测量轮廓术的测量精度高, 但至少需要 3 帧条纹图来获取被测物体的三维面

收稿日期: 2017-12-05; 收到修改稿日期: 2018-02-02

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项(2013YQ490879)

作者简介: 张诚(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学三维测量方面的研究。E-mail: zhangcheng413074@163.com

导师简介: 陈文静(1968—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学三维传感与光信息处理方面的研究。

E-mail: chengwj0409@scu.end.cn(通信联系人)

形信息,不适合动态过程测量。傅里叶变换轮廓术可以从1帧条纹图中计算出被测物体的三维面形信息,测量速度快,适合于实时、动态过程的测量;但当变形条纹图的全局傅里叶谱存在严重频谱混叠时,傅里叶变换轮廓术难以正确地获取条纹的基频分量,导致其测量精度降低,甚至出错。近年来,具有多分辨率分析能力的连续小波变换被引入到三维测量领域,称为小波变换轮廓术,它在处理复杂变形条纹方面具有显著优势。该方法通过对基小波函数进行平移、伸缩变换,得到了一系列空-频分辨率不同的子小波,用以计算小波变换系数,再从中提取出条纹的相位信息。

小波变换轮廓术的核心是从小波脊处提取条纹的瞬时相位。小波脊提取的准确性决定了小波变换轮廓术的测量精度。Carmona等^[7]将沿尺度因子方向的小波系数模值最大处定义为小波脊,从中提取相位。为了获得更高的脊提取精度,研究人员提出了一些改进型脊提取方法:Liu等^[8]提出了基于代价函数的一维小波脊提取算法,将条纹瞬时频率的连续性引入小波系数模值最大的判断中;Abid等^[9]将代价函数应用于二维小波变换;徐东瀛等^[11]对用于二维小波变换中的代价函数进行改进,并设计了动态优化算法,提高了测量速度与脊提取精度。Wang等^[16]指出,在不考虑噪声影响的情况下,高斯窗宽度为0.5的复Morlet小波的性能优于高斯窗宽度为2的复Morlet小波的性能。本文从信号与子小波的相关程度出发,分别从空域和频域角度讨论振荡波形随高斯窗宽变化的复Morlet小波在条纹分析中的特点,提出了一种基于不同高斯窗宽的复Morlet小波的改进型小波处理方法,研究其在小波脊提取中的抑噪能力,并将本文所提方法与Liu等^[8]提出的基于一维代价函数的小波处理方法的结果进行对比,探讨改进后小波变换轮廓术的测量精度。

2 基本原理

2.1 小波变换轮廓术

小波变换轮廓术的测量光路如图1所示。其中 E_p 为投影仪的出瞳, E_{CCD} 为电荷耦合器件(CCD)的入瞳, E_p 与 E_{CCD} 的连线平行于参考平面, E_p 与 E_{CCD} 之间的距离为 d , E_p 与 E_{CCD} 到参考面的距离为 l_0 。投影仪的光轴与CCD的光轴交于参考平面上的 O 点, D 为物面上的点,其到参考面 R 的距离为 h , A 、 C 分别为投影仪与CCD过 D 交到参考面上的点。投影仪投射正弦光栅到待测物体表面,CCD拍摄受物面调制的变形条纹图,变形条纹可表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] + n(x, y), \quad (1)$$

式中: x 和 y 分别为CCD上 x 轴和 y 轴方向的像素坐标; $I(x, y)$ 为变形条纹; $a(x, y)$ 为背景光强; $b(x, y)$ 为物面非均匀反射率; f_0 为光栅的基频; $\varphi(x, y)$ 为物面高度变化引起的相位调制; $n(x, y)$ 为系统噪声。解调出条纹中携带的相位信息后,通过获取图1所示系统的结构参数,可以得到被测物面的高度信息为

$$h(x, y) = \frac{l_0 \Delta\varphi(x, y)}{2\pi f_0 d + \Delta\varphi(x, y)}, \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi(x, y)$ 为由被测物面高度分布引起的相位分布。此外,也可以采用相位与高度的标定映射方法得到被测物面的高度信息^[17]。

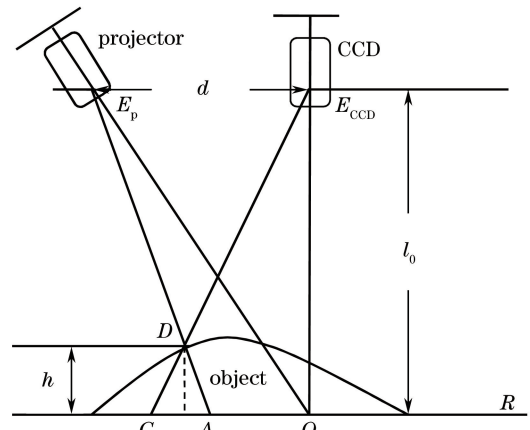


图1 测量系统光路图

Fig. 1 Optical geometry of measurement system

采用一维小波变换获得变形条纹图中携带的相位信息。设变形条纹 $I(x, y)$ 为竖条纹, y 方向对应条纹发生周期性变化的方向。 $I(x, y)$ 的结构方向中任意一行 $I_x(y)$ 的一维小波变换定义为

$$W_I(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} I_x(y) \left[\frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{y-b}{a} \right) \right] dy = \langle I_x(y), \psi_{a,b}(y) \rangle, \quad (3)$$

式中: a 为尺度因子, $a > 0$; b 为平移因子, $b \in \mathbf{R}$; $W_I(a, b)$ 为小波系数; $*$ 表示共轭; $\psi_{a,b}(y) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{y-b}{a}\right)$ 为子小波。(3)式表明小波系数是子小波与信号进行相关运算的结果,反映了信号与小波的相似程度。通过调整小波的尺度因子使小波逼近所覆盖区域的信号,使得它们之间具有最大的相似度。最大小波系数模值处对应的子小波即为与局部信号最相似的小波,其对应的尺度因子 a 即为最佳伸缩因子。

在频域中,小波变换的计算公式为

$$W_I(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{I}(f) [\sqrt{a} \hat{\psi}^*(af) \exp(j2\pi bf)] df = \text{IFT} \langle \hat{I}(f), \hat{\psi}_{a,b}(f) \rangle, a > 0, b \in \mathbf{R}, \quad (4)$$

式中: f 为频率; $\hat{I}(f)$ 为信号的傅里叶频谱;IFT傅里叶逆变换操作; $\hat{\psi}_{a,b}(f) = \sqrt{a} \hat{\psi}(af) \exp(-j2\pi bf)$ 为具有尺度因子 a 与位移因子 b 的子小波的傅里叶谱。即,在频域中,小波变换可以看作是对信号频谱的加权滤波操作。通过调节尺度因子就可改变滤波窗的大小,得到最佳的滤波效果,此时 a 即为最佳的尺度因子。

采用连续小波变换计算 $I_x(y)$ 的小波变换系数 $W_I(a, b)$,其实部与虚部分别为 $\text{real}[W_I(a, b)]$ 与 $\text{imag}[W_I(a, b)]$,幅值 $A(a, b)$ 和相位 $\phi(a, b)$ 分别为

$$A(a, b) = \sqrt{\text{imag}^2[W_I(a, b)] + \text{real}^2[W_I(a, b)]}, \quad (5)$$

$$\phi(a, b) = \arctan\{\text{imag}[W_I(a, b)]/\text{real}[W_I(a, b)]\}. \quad (6)$$

在每个位置 b 处,小波系数最大模值的连线为小波脊,即

$$\text{ridge}(b) = \max |A(a_i, b)|, \quad (7)$$

式中: $\text{ridge}()$ 为小波脊; a_i 为尺度因子, i 为尺度因

子序号。 $A(a_i, b)|_{a_i=a_r}$ 具有最大值, a_r 为每个位置上的最佳伸缩因子。 $A(a_r, b)$ 对应的相位 $\phi(a_r, b)$ 就是条纹在此处携带的相位值。小波变换提取的相位均截断为 $-\pi \sim \pi$,相位展开后即可得到连续的相位信息。最后通过物体高度与相位的映射关系,就可计算出被测物体的三维信息。

2.2 改进的小波处理方法

在小波变换轮廓术中,复 Morlet 小波定义为

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \exp(-x^2/f_b) \exp(j2\pi f_c x), \quad (8)$$

式中: $\psi(x)$ 为复 Morlet 小波; f_b 为高斯窗宽; f_c 为振荡频率。对应的频域形式为

$$\hat{\psi}(f) = \exp\left[-\frac{f_b}{4} (2\pi f - 2\pi f_c)^2\right]. \quad (9)$$

图 2(a)所示为固定 f_b 与 f_c (均为 1),调整尺度因子 a 分别为 0.5、1.0、1.5 与 2.0 时,复 Morlet 子小波的空域波形分布。由图 2(a)可知,各子小波波形不变,空间持续长度发生了改变。图 2(b)所示为各子小波对应的频谱分布。由图 2(b)可知,其中心频率和宽度均随尺度因子的调整而改变。(9)式表明,固定小波的中心频率 f_c ,通过调整 f_b 来改变复 Morlet 小波的频谱宽度,可以进一步提高小波的空-频域局域化能力。图 2(c)所示为 f_b 分别取 0.5、1.0、1.5 与

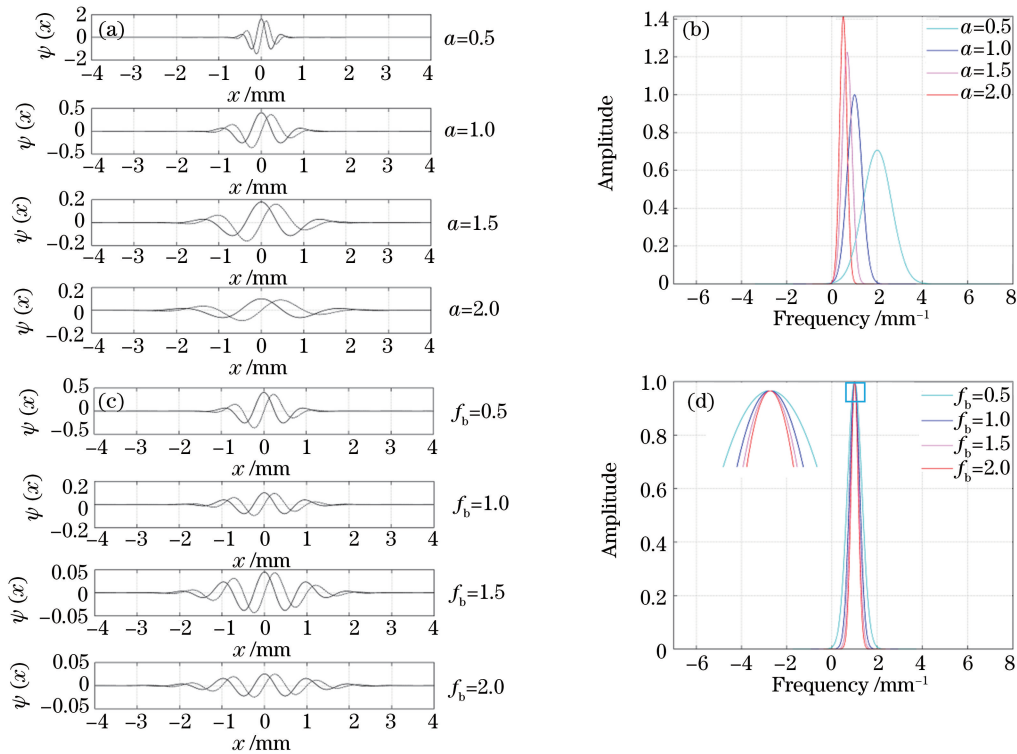


图 2 (a)不同尺度的子小波;(b)子小波的傅里叶频谱;(c)具有不同 f_b 值的基小波;(d)基小波的傅里叶频谱

Fig. 2 (a) Daughter wavelets with different scales; (b) Fourier spectra of daughter wavelets;

(c) mother wavelets with different f_b values; (d) Fourier spectra of mother wavelets

2.0, f_c 、 a 均为 1.0 时,复 Morlet 小波的空域形式;图 2(d)所示为其对应的傅里叶频谱。由图 2 可知,在固定尺度因子下,调整 f_b 得到了一组中心频率相同、频谱宽度伸缩的小波,可以更好地匹配局部信号。

由图 2(a)可知,高斯窗宽较小的小波具有更好的空域局域化能力。不考虑噪声影响时,用图 2(c)中的各小波分别对图 3(a)所示的条纹信号[图 5(b)中的 256 行]进行小波变换,得到的小波脊线如图 3(b)所示,从脊处提取的连续相位分布如图 3(c)所示。图 3(b)和图 3(c)中的红线($f_b=0.5$)表明,振

荡波形越短的小波经过伸缩后,可以实现与局部条纹更好的匹配,其脊的模值更大,重建的相位更接近原始信号的相位。 f_b 较大的小波的空间局域化能力减弱,与局部信号的相关程度降低。例如,当 $f_b=2.0$ 时,图 3(b)和图 3(c)中脊的模值变小,重建相位局部出错。若采用 f_b 过小的小波,如 $f_b=0.2$,虽然与局部信号的相关程度很高,但小波的频窗过宽,容易引起条纹局部频谱混叠,导致小波脊线波动很大,相位提取出错,如图 3(d)与图 3(e)所示。

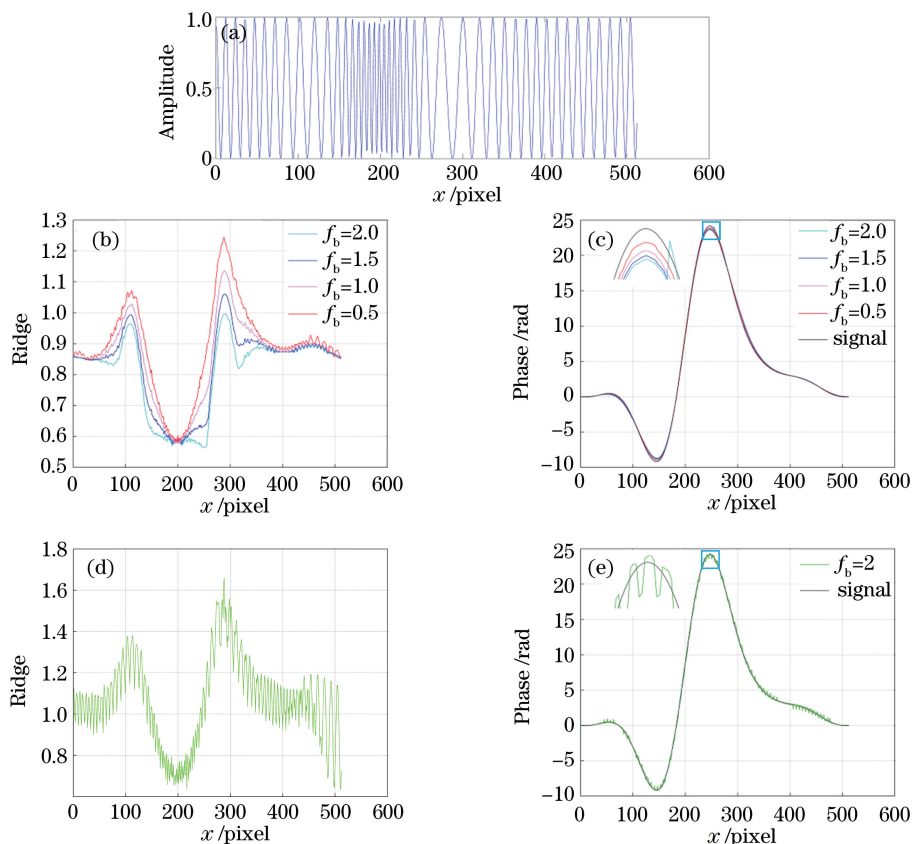


图 3 (a)无噪声时的变形条纹;(b)具有不同 f_b 值的小波脊;(c)图 3(b)的恢复相位;
(d) $f_b=0.2$ 时的小波脊;(e)图 3(d)的恢复相位

Fig. 3 (a) Deformed fringe pattern without noise; (b) wavelet ridges with different f_b values;

(c) unwrapped phase of Fig. 3(b); (d) wavelet ridges when f_b is equal to 0.2; (e) unwrapped phase of Fig. 3(d)

当信号存在噪声时,噪声对脊值的影响较大^[8], f_b 较大的小波具有更好的频域局域化能力,抑噪能力更好。在图 3(a)所示的条纹中添加均方差为 0.20 的随机噪声,得到图 4(a)所示的含噪条纹。在条纹过密的区域, f_b 较小的复 Morlet 小波与信号的相关度降低,其提取相位出错,在图 4(b)和图 4(c)中用青色方框标出;在条纹信号疏密变化的过渡区域, f_b 较大的复 Morlet 小波提取的相位出现局部毛刺,在图 4(c)中用红色方框标出。

为了提高基于复 Morlet 小波变换轮廓术的三维重建精度,提出了一种改进的小波处理方法。在每个位置 b 处,该方法通过从不同 f_b 对应的小波脊序列中选取相关程度最高的脊点,形成新的小波脊线,从中可以提取更准确的相位,如图 4(d)和图 4(e)中绿线所示。新的小波脊的计算公式为

$$\text{ridge}_{\max}(b) = \max[\text{ridge}_{f_{b_i}}(b)], \quad (10)$$

式中: ridge_{\max} 为最大小波脊; $\text{ridge}_{f_{b_i}}$ 为采用不同 f_b 的复 Morlet 小波计算出的小波脊; f_{b_i} 为不同的 f_b

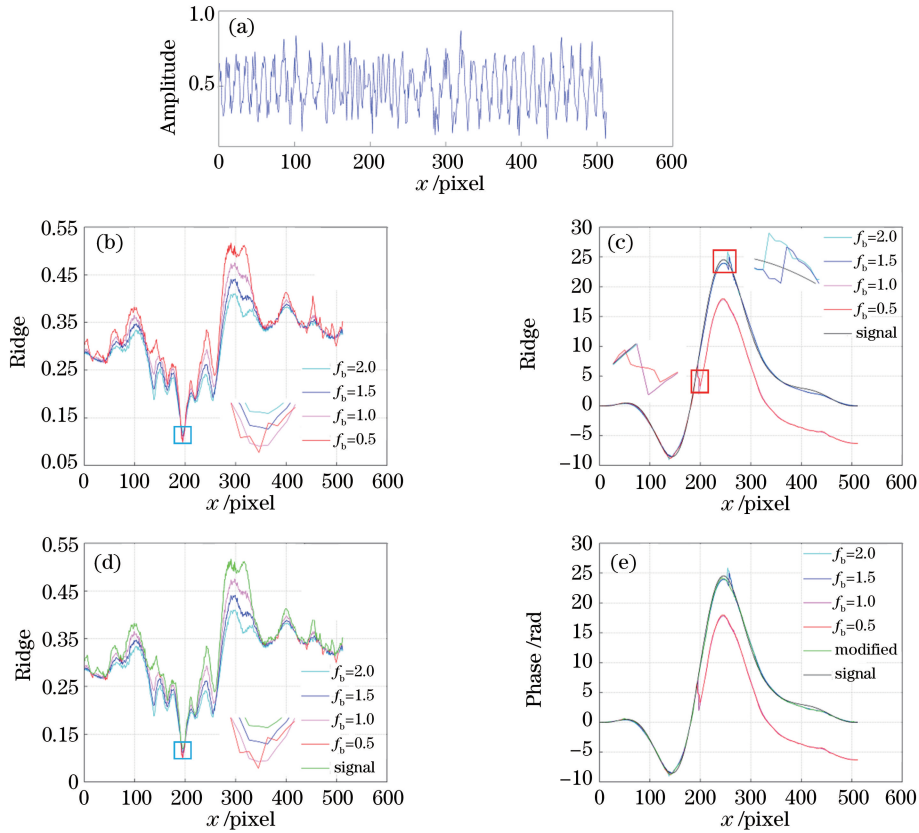


图 4 (a)引入均方差为 0.20 的随机噪声的变形条纹;(b)具有不同 f_b 值的小波脊;(c)图 4(b)对应的恢复相位;
(d)包含改进的小波处理方法的小波脊;(e)改进的小波处理方法对应的恢复相位

Fig. 4 (a) Deformed fringe pattern considering random noise with mean square deviation of 0.20; (b) wavelet ridges with different f_b values; (c) unwrapped phase of Fig. 4(b); (d) wavelet ridges introducing improved wavelet processing method; (e) unwrapped phase of improved wavelet processing method

序列。在基于结构光投影的三维面形测量中,准确的相位提取是高精度面形重建的保障。

3 计算机模拟

首先模拟噪声对选取不同 f_b 值的复 Morlet 小波方法与改进的小波处理方法的影响。为了简化相位与高度之间的映射,模拟时,设系统结构参数为 $d/l_0=1$ 。图 5(a)所示为计算机模拟的被测物体,由 peaks 函数与 sinc 函数叠加生成的复杂物体的表达式为

$$h(x, y) = 5[\text{peaks}(x, y) + 8\text{sinc}(x, y)]. \quad (11)$$

投影光栅的基频 $f_0 = 1/12$, 模拟的变形条纹为

$$I(x, y) = 0.5 + 0.5\cos\left[2\pi f_0 x + 2\pi f_0 \frac{d}{l_0} h(x, y)\right] + n(x, y). \quad (12)$$

$n(x, y)$ 取 0 时的变形条纹如图 5(b)所示,图像尺寸为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。

在变形条纹图 5(b)中加入随机高斯噪声,噪声的均方差范围为 $0 \sim 0.20$, 间隔为 0.05。采用 f_b 分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 的复 Morlet 小波方法和改进的小波处理方法,对变形条纹图进行一维连续小波变换,重建物体的三维形貌。图 6 所示为条纹图不受噪声影响时 f_b 分别为 0.5、1.0、1.5 与 2.0 的复 Morlet 小波的重建误差。当 f_b 为 0.5 时,重建误差最小。在条纹中加入均方差分别为 0.05、0.10 与 0.15 的噪声时,采用 f_b 分别为 0.5、1.0、1.5 与 2.0 的复 Morlet 小波提取的截断相位均没有出现级次错误,此时 f_b 较小的复 Morlet 小波计算的重建结果的均方差仍然较小,改进的小波处理方法的误差与 $f_b = 0.5$ 时的误差相当,与理论分析一致。

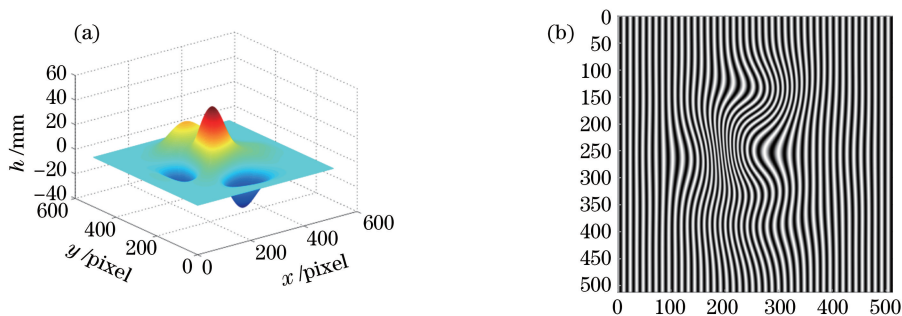


图 5 (a)模拟物体;(b)变形条纹

Fig. 5 (a) Simulated object; (b) deformed fringe pattern

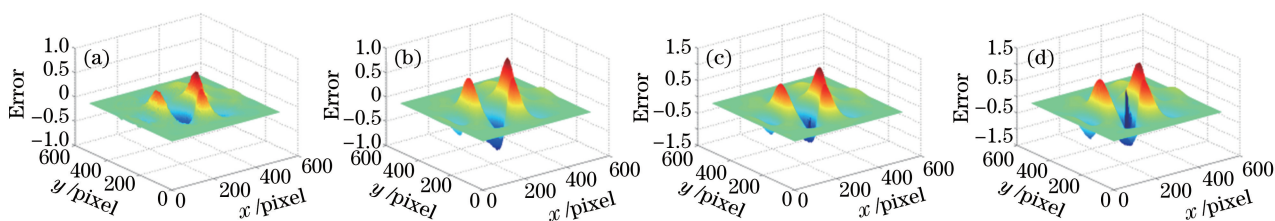


图 6 无噪声影响时的误差分布。(a) $f_b=0.5$;(b) $f_b=1.0$;(c) $f_b=1.5$;(d) $f_b=2.0$

Fig. 6 Error distribution without noise. (a) $f_b=0.5$; (b) $f_b=1.0$; (c) $f_b=1.5$; (d) $f_b=2.0$

当引入更大的噪声时,例如均方差为 0.20 的随机噪声, f_b (取 0.5 或 1.0)较小的复 Morlet 小波计算的截断相位出现了级次错误。如果空间相位展开路径选择不当,就会引起误差的扩散。例如:采用 MATLAB 软件自带的展开函数就会出现拉线误差;而采用 f_b (为 1.5 或 2.0)较大的复 Morlet 小波计算时,虽然没有出现级次错误,但由于小波和条纹的局部相关度降低,因此重建结果的均方差也较大。引入均方差为 0.20 时随机噪声的误差分布如图 7 所示。改进的小波处理方法能得到更好的物面重建结果与更小的重建误差,如图 8(a)和图 8(b)所示,其中 h' 为改进的小波处理方法的重建物面高度。由于噪声具有随机性,因此模拟过程重复 10 次,选取不同 f_b 的复 Morlet 小波方法和改进的小波处理方法的重建标准差如表 1 所示。由表 1 可知,随着

条纹图受噪声影响的增大,改进的小波处理方法仍然具有好的重建结果。进一步将所提方法与 Liu 等^[8]提出的基于代价函数的小波脊提取方法进行比较。在图像信噪比较低的区域,大噪声可能导致虚假的脊点,而引入代价函数可以忽略虚假的脊点,找出相对正确的脊^[8]。但是噪声较小时,代价函数的引入并不会使精度提高。例如:当噪声均方差为 0.05, $f_b=0.5$ 时,采用代价函数方法重建误差的均方差为 0.1440 mm;当噪声很大时(噪声均方差为 0.20, $f_b=1.0$),采用传统的小波处理方法得到的恢复结果存在拉线误差,如图 7(b)所示。采用代价函数方法处理的误差分布如图 8(c)所示,不存在拉线误差,但重建误差的均方差较大,为 0.2775 mm。比较而言,改进的小波处理方法避免了拉线误差,且重建效果更好。

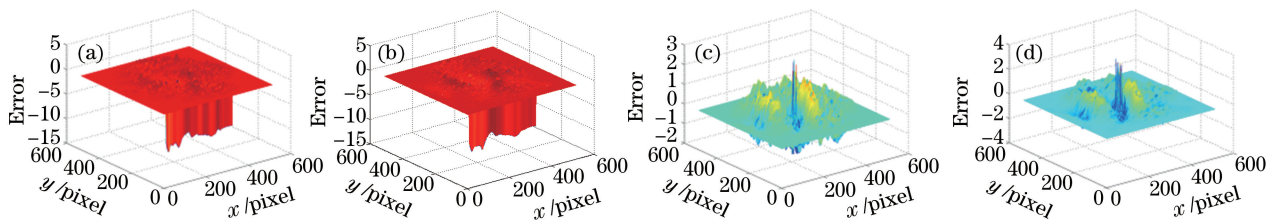


图 7 引入均方差为 0.20 时随机噪声的误差分布。(a) $f_b=0.5$;(b) $f_b=1.0$;(c) $f_b=1.5$;(d) $f_b=2.0$

Fig. 7 Error considering random noise influence with mean square deviation of 0.20.

(a) $f_b=0.5$; (b) $f_b=1.0$; (c) $f_b=1.5$; (d) $f_b=2.0$

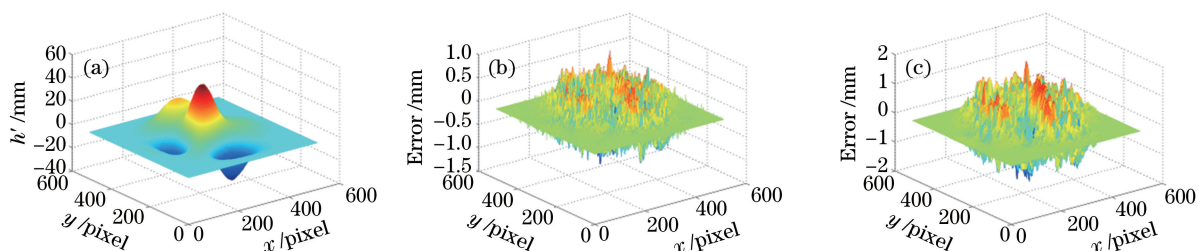


图 8 均方差为 0.20 时随机噪声影响的重建结果与误差分布。(a)改进的小波处理方法的重建结果；
(b)改进的小波处理方法的重建误差分布；(c) Liu 等^[8]所提方法的重建误差分布

Fig. 8 Results and error distribution considering random noise with mean square deviation of 0.20.

(a) Reconstruction results by improved wavelet processing method; (b) reconstruction error distribution by improved wavelet processing method; (c) error distribution by method proposed by Liu *et al.*^[8]

表 1 不同 f_b 的复 Morlet 小波方法与改进的小波处理方法在不同噪声程度下重建误差的标准差

Table 1 Standard deviation of reconstruction errors for complex Morlet wavelet method with different f_b values and improved wavelet processing method at different noise levels

Mean square deviation of noise	Standard deviation for improved wavelet processing method /mm	Standard deviation for complex Morlet wavelet method /mm			
		$f_b=0.5$	$f_b=1.0$	$f_b=1.5$	$f_b=2.0$
0	0.0700	0.0699	0.1021	0.1297	0.1520
0.05	0.0776	0.0766	0.1056	0.1320	0.1537
0.10	0.0945	0.0935	0.1150	0.1384	0.1587
0.15	0.1143	0.1154	0.1276	0.1465	0.1645
0.20	0.1392	0.2645	0.2665	0.1597	0.1753

4 实 验

通过实验进一步验证所提方法的有效性。准确的相位提取是高精度面形重建的保障。只要能准确地提取相位,利用相位-高度的映射关系就能高精度地重建三维面形。本研究并未涉及相位-高度映射算法的研究,实验部分的结果均以相位的形式给出。图 9(a)所示为受噪声污染较小的变形条纹图,图像经裁剪后的尺寸为 762 pixel×762 pixel,其第 381 行的条纹分布如图 9(b)所示。采用 f_b 分别为 0.5、1.0、

1.5与 2.0 的复 Morlet 小波方法和改进的小波处理方法提取该变形条纹的截断相位,均未出现级次错误,相位展开后能得到正确的连续相位分布。由于相移测量轮廓术(pmp)具有很高的测量精度,因此通常用来检验其他测量方法。作为对比,用六步相移测量轮廓术提取图 9(a)的相位信息,改进的小波处理方法提取的相位如图 10(a)所示,不同方法提取的第 381 行的相位分布如图 10(b)所示。改进的小波处理方法与 $f_b=0.5$ 的小波方法提取的相位分布基本一致,更接近于相移测量轮廓术的相位分布。

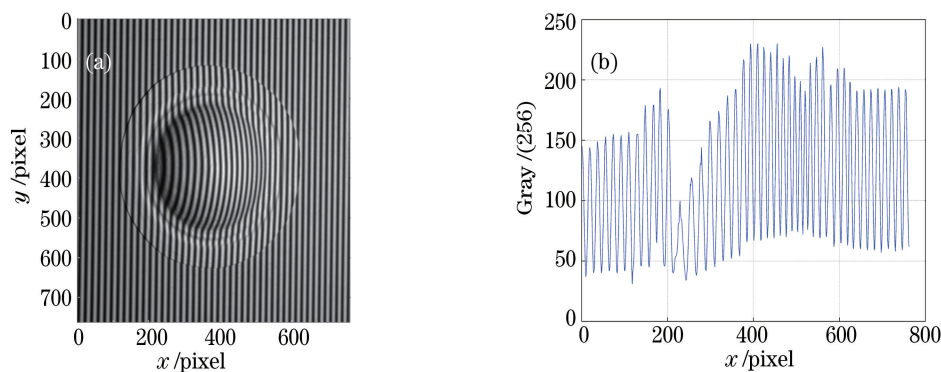


图 9 (a)噪声污染小的变形条纹图;(b)图 9(a)第 381 行的条纹分布

Fig. 9 (a) Deformed fringe with low noise; (b) fringe distribution of the 381th row in Fig. 9(a)

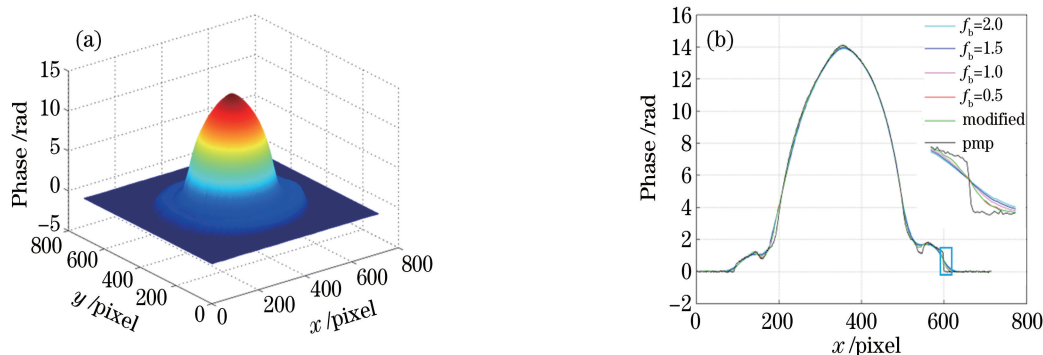


图 10 (a) 采用改进的小波处理方法提取的相位; (b) 变形条纹图第 381 行提取的相位

Fig. 10 (a) Unwrapped phase by employing improved wavelet processing method; (b) unwrapped phase of the 381th row of deformed fringe pattern

当条纹图受噪声影响较大时,若采用 f_b 较小的 Morlet 小波进行处理(如 $f_b=0.5$),则提取的截断相位多处出现级跳变,须选取 f_b 较大的小波来处理。图 11(a)所示为受噪声严重污染的变形条纹图,且条纹部分位置出现饱和。图像尺寸为 512 pixel×512 pixel,其第 286 行的条纹分布如图 11(b)所示。图 12(a)和图 12(b)所示分别为 f_b 分别为 1.0 与 2.0 的复 Morlet 小波方法提取的截断相

位。由图 12(a)可知,青色框线区域的截断相位有级次跳变。由图 12(b)可知,在条纹疏密变化处,对应的截断相位也有错。为了避免误差传递,采用调制度展开算法来展开此截断相位,对应的展开相位分别如图 12(c)和图 12(d)所示。采用代价函数方法(取 $f_b=2.0$)与改进的小波处理方法得到截断相位和展开相位,如图 12(e)~(h)所示。由图 12 可知,改进的小波处理方法得到了更好的重建结果。

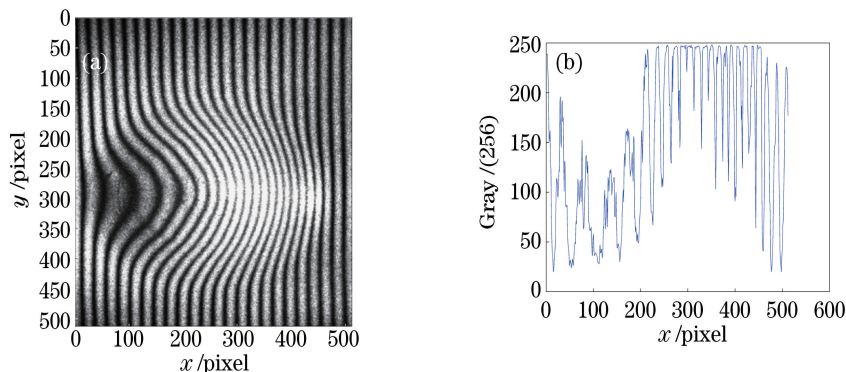


图 11 (a) 噪声污染大的变形条纹图; (b) 图 11(a) 第 286 行的条纹分布

Fig. 11 (a) Deformed fringe pattern with high noise level; (b) fringe distribution of the 286th row in Fig. 11(a)

5 结 论

从空域和频域角度分别讨论了振荡波形随高斯窗宽变化的复 Morlet 小波在条纹分析中的特点,提出了一种改进的小波处理方法。所提方法综合了不同窗宽的复 Morlet 小波的优点,具有更可靠的脊提取结果。特别是在变形条纹图受到噪声影响时,在调整尺度因子的基础上附加高斯窗宽的调整,可以

得到一组中心频率相同、频谱宽度伸缩的子小波,用以匹配局部信号时,可以得到更好的重建相位,提高了小波变换轮廓术的测量精度。所提方法的相位重建精度高于基于代价函数的小波方法的相位重建精度。改进的复 Morlet 小波处理方法慢于传统的小波脊提取方法,但快于基于代价函数的小波处理方法。随着并行处理方法的实现,小波测量轮廓术的处理速度将得到极大提高。

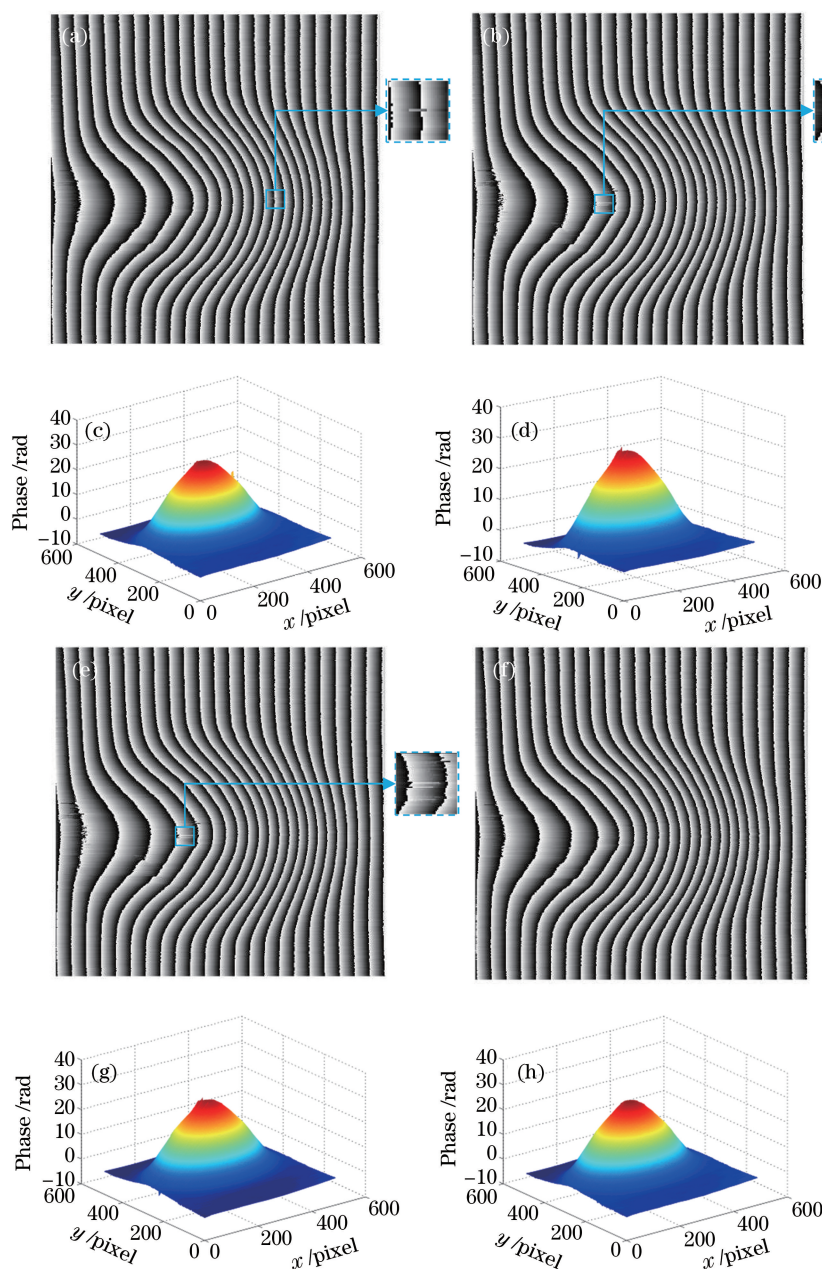


图 12 (a) $f_b=1.0$ 时提取的截断相位;(b) $f_b=2.0$ 时提取的截断相位;(c) $f_b=1.0$ 时获取的恢复相位;
 (d) $f_b=2.0$ 时获取的恢复相位;(e)采用 Liu 等^[8]所提方法提取的截断相位;(f)采用改进的小波处理方法提取的截断相位;
 (g)采用 Liu 等^[8]所提方法提取的恢复相位;(h)采用改进的小波处理方法提取的恢复相位

Fig. 12 (a) Wrapped phase when $f_b=1.0$; (b) wrapped phase when $f_b=2.0$; (c) unwrapped phase when $f_b=1.0$;
 (d) unwrapped phase when $f_b=2.0$; (e) wrapped phase extracted by method proposed by Liu *et al.*^[8];
 (f) wrapped phase extracted by improved wavelet processing method; (g) unwrapped phase extracted by method
 proposed by Liu *et al.*^[8]; (h) unwrapped phase extracted by improved wavelet processing method

参 考 文 献

[1] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.

[2] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35(5): 263-284.
 [3] Chen W J, Su X Y, Cao Y P, *et al.* Improved FTP based on bi-color fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1153-1157.
 陈文静, 苏显渝, 曹益平, 等. 基于双色条纹投影的

- 快速傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1153-1157.
- [4] Yue H M, Su X Y, Li Z R. Improved fast Fourier transform profilometry based on composite grating[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 767-771.
岳慧敏, 苏显渝, 李泽仁. 基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 767-771.
- [5] Qian K M. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(2): 304-317.
- [6] Qian K M. Applications of windowed Fourier fringe analysis in optical measurement: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 66: 67-73.
- [7] Carmona R A, Hwang W L, Torresani B. Characterization of signals by the ridges of their wavelet transforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(10): 2586-2590.
- [8] Liu H, Cartwright A N, Basaran C. Moiré interferogram phase extraction: a ridge detection algorithm for continuous wavelet transforms[J]. Applied Optics, 2004, 43(4): 850-857.
- [9] Abid A, Gdeisat M A, Burton D R, *et al.* Spatial fringe pattern analysis using the two-dimensional continuous wavelet transform employing a cost function[J]. Applied Optics, 2007, 46(24): 6120-6126.
- [10] Zhang Z B, Zhong J G. Applicability analysis of wavelet-transform profilometry[J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18777-18796.
- [11] Xu D Y, Li S K, Wang X Z, *et al.* Wavelet ridge extraction method employing a cost function in two-dimensional wavelet transform profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0412006.
徐东瀛, 李思坤, 王向朝, 等. 基于评价函数的二维小波变换轮廓术小波脊提取方法[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0412006.
- [12] Huang J J, Chen W J, Su X Y, *et al.* Application of wavelet transform in modulation measurement profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0707001.
黄静静, 陈文静, 苏显渝, 等. 小波变换在调制度测量轮廓术中的应用[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0707001.
- [13] Zhong M, Chen F, Xiao C. Research on the nonlinearity mitigation by wavelet transform method in modulation profilometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071205.
钟敏, 陈锋, 肖朝. 小波变换减小调制度轮廓术中非线性的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071205.
- [14] Zhong L J, Cao Y P. An on-line phase measuring profilometry with phase shifting perpendicular to moving direction of measured object[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 417-420.
钟立俊, 曹益平. 相移正交物体运动方向的在线相位测量轮廓术[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 417-420.
- [15] Liu Y F, Cao Y P, He Y H. An improved algorithm to three-unequal step length for PMP[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(1): 83-86.
刘玉凤, 曹益平, 何宇航. 新改进型三步非等步相位测量轮廓术算法[J]. 光电子 • 激光, 2010, 21(1): 83-86.
- [16] Wang Z Y, Ma H F. Advanced continuous wavelet transform algorithm for digital interferogram analysis and processing[J]. Optical Engineering, 2006, 45(4): 045601.
- [17] Li W S, Su X Y, Liu Z B. Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method[J]. Applied Optics, 2001, 40(20): 3326-3333.