

文章编号: 0253-2239(2009)06-1563-07

# 使用离散小波变换的相位轮廓术

周 翔 赵 宏

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要** 提出了两种在相位轮廓术中使用离散小波变换提取条纹相位的方法: 单次分解法和多次分解法。前者用多分辨率分析的多孔算法计算变形条纹解析信号的离散小波变换, 寻找每一位置的小波系数在尺度方向上的模极大值点, 通过提取该点的相位就可以得到原条纹的相位值; 后者是在前者的基础上, 通过插值改变条纹信号的抽样率, 再次进行多分辨率分析, 得到冗余的小波系数, 提取条纹相位。单次分解法适合处理正弦载频条纹图, 多次分解法抗噪性好, 可以处理带有高次谐波的准正弦载频条纹图。相对于使用连续小波变换的方法, 这两种方法较适合处理离散信号, 对于  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  的条纹图计算速度分别提高 90% 和 50%。计算机模拟和实验验证了方法的有效性。

**关键词** 傅里叶光学; 相位轮廓术; 小波变换; 多分辨率分析

**中图分类号** O439      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS20092906.1563

## Phase Profilometry Using Discrete Wavelet Transform

Zhou Xiang Zhao Hong

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract** Two approaches, single decomposition approach and multi-decomposition approach, using discrete wavelet transform for extracting phase in phase profilometry are proposed. In the former approach, wavelet multi-resolution analysis is chosen to perform discrete wavelet transform of the pattern after converting original signal into the analytic form. The phase distribution is recovered from every coefficient whose modulus reaches maximum in the scale direction at the position. In the latter one, an interpolation to original signal is used to vary the sampling rate and multi-resolution analysis is reused to acquire redundant detail coefficients. The first approach is suitable for sinusoidal fringe pattern. In contrast, the second one is more robust to noise and capable of handling quasi-sinusoidal fringe pattern. Compared with the method employing continuous wavelet transform, these two approaches have 90% and 50% increases in computing speed respectively for a  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  image, and are more appropriate to discrete signal processing. The numerical simulation and experiment have proved the validity of the approaches.

**Key words** Fourier optics; phase profilometry; wavelet transform; multi-resolution analysis

## 1 引 言

在相位轮廓术中, 测量的直接结果经常以变形条纹图的形式出现, 条纹中蕴含的相位信息对应着物体的高度信息。在解调相位的许多方法中, 傅里叶变换轮廓术 (Fourier transform profilometry,

FTP)<sup>[1, 2]</sup> 应用广泛。它只需一幅条纹图就可以解调出相位分布。但由于要在条纹全场做傅里叶变换, 局部相位计算误差会扩散到全局, 因此不适合处理具有相位突变的条纹图<sup>[3]</sup>。近年来, 小波变换作为一种非平稳信号的强有力的分析工具<sup>[4]</sup>, 已成功

**收稿日期:** 2008-08-25; **收到修改稿日期:** 2008-11-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(50575169)资助项目和国家 973 计划(2005CB724106)资助项目。

**作者简介:** 周 翔(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事三维视觉测量和图像处理等方面的研究。

E-mail: zhouxiang@mail.xjtu.edu.cn

**导师简介:** 赵 宏(1964—), 男, 教授, 主要从事智能光电检测、实时在线测试以及机器人视觉技术、生物组织成像等方面的研究。E-mail: zhaohong@mail.xjtu.edu.cn

用于光学条纹的分析和相位的提取<sup>[5~10]</sup>。为了克服 FTP 的不足,有学者提出了基于连续小波变换(Continuous wavelet transform, CWT)的相位提取方法<sup>[11]</sup>。但是,CWT 法有三个缺点:1) 在每个尺度都要按定义计算一次小波基函数,消耗了时间;2) 缺少快速算法,随着尺度的增长计算量陡增。3) 用数值方法实现积分,不适合数字信号处理。因此,研究适合处理数字信号条纹图的小波变换算法是十分必要的。由 Mallat 等<sup>[12]</sup>创立的多分辨率分析理论为此问题的解决提供了途径。该理论将离散小波变换(Discrete wavelet transform, DWT)和多抽样信号处理中的滤波器组结合起来,构成了小波分析的重要工具。

本文提出了两种使用离散小波变换提取条纹图相位的方法:1) 单次分解法(Single decomposition approach, SDA),首先计算条纹对应的解析信号,用多分辨率分析的多孔算法( $\hat{a}$  trous algorithm)<sup>[13]</sup>计算解析信号的离散小波变换,寻找每一位置的小波系数在尺度方向上的模极大值点,通过提取该点的相位就可以得到原条纹的相位值。该方法对正弦光栅投影的条纹图能很好的提取相位;2) 多次分解法(Multi-decomposition approach, MDA),它在 SDA 的基础上,通过插值和抽取改变条纹信号的抽样率,在多个抽样率下进行多分辨率分解,得到冗余的小波系数。提取模极大值处相位信息,即为条纹相位。MDA 抗噪性更好,可以处理带有高次谐波的准正弦载波条纹图。和 CWT 法相比,这两种方法不用数值积分,不用计算小波基函数,适合处理数字条纹图。以三维测量为例,阐述了使用 DWT 提取相位的理论依据和相位提取算法,并将该方法 CWT 法进行了比较,最后从计算机模拟和实验两方面给出了结果。

## 2 理 论

### 2.1 基于 CWT 的相位轮廓术

典型的交叉光轴光栅投影轮廓术光路如图 1 所示。投影仪投影一副正弦光栅到被测物表面,CCD 从另一角度拍摄被物面高度调制的变形条纹,对应每一固定  $y$  坐标条纹的光强分布为

$$g(x) = u(x) + v(x)\cos[\omega_0 x + \varphi(x)], \quad (1)$$

式中  $u(x)$  表示条纹背景光强, $v(x)$  表示条纹对比度, $\omega_0$  为载频条纹的角频率。而  $\varphi(x)$  为由物面高度调制的相位分布,它与高度有如下关系:

$$h(x, y) \approx -\frac{L}{\omega_0 d}[\varphi(x) - \varphi_0(x)], \quad (2)$$

式中  $\varphi_0(x)$  为参考面相位分布,分别解调出参考面和物面的相位就可以恢复物体三维形貌。

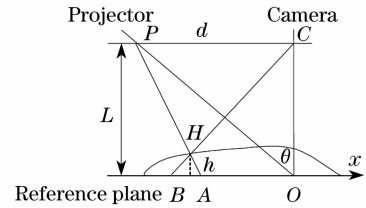


图 1 测量的光路原理图

Fig. 1 Optical geometry

对(1)式表示的载频条纹信号进一步作分析。借助希尔伯特变换(HT)消除  $g(x)$  的负频率后可以得到相应的解析信号  $z(x) = [1 + iH]g(x)$ ,  $H$  为 HT 变换算子。对信号  $z(x)$  进行连续小波变换,其表达式为

$$W(a, b) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} z(x) \psi^* \left( \frac{x-b}{a} \right) dx, \quad (3)$$

式中  $a > 0$ ,  $b$  是实数,  $*$  表示共轭。 $\psi \left( \frac{x-b}{a} \right)$  是对母小波  $\psi(x)$  的伸缩和平移, $\psi(x)$  可以是复 Morlet 小波或对称的实小波。若  $g(x)$  为窄带信号,并假设  $u(x)$  和  $v(x)$  是缓变的,那么(3)式可近似为<sup>[14]</sup>

$$W(a, b) \approx \hat{\psi}^* \{ a[\omega_0 + \varphi'(b)] \} v(b) e^{j[\omega_0 b + \varphi(b)]} + O(|v'| / |v|, |\varphi\varphi''| / |\varphi'|^2), \quad (4)$$

式中  $\hat{\psi}$  代表  $\psi(x)$  的傅里叶变换。假设  $\hat{\psi}(\omega)$  在  $\omega_c$  处达到最大值,则小波变换的模  $|W(a, b)|$  在曲线  $a = a_r, (b) = \omega_c / [\omega_0 + \varphi'(b)]$  上达到最大,该曲线被称为小波变换的脊<sup>[14]</sup>,对应着信号的瞬时频率  $\omega_0 + \varphi'(b)$ 。在小波脊上有  $\varphi(b) \approx \text{angle}\{W[a_r(b), b]\} - \omega_0 b$ 。要实现式中定义的积分,一般要靠数值方法。最简单的是矩形法,一个离散化的方案是  $a = 1, 2, 3, \dots$  及  $b = k(k \in Z)$ 。此时有

$$W(a, k) = \frac{1}{a} \sum_n z(n) \psi^* \left[ \frac{(n-k)}{a} \right]. \quad (5)$$

### 2.2 基于 DWT 的相位提取

#### 2.2.1 单次分解法(SDA)

多分辨率分析理论同时使用两个函数,即尺度函数  $\varphi(x)$  和小波函数  $\psi(x)$ ,并由它们的伸缩和移位形成了在不同尺度下的正交基。利用尺度函数和小波函数将信号逐级分解到概貌空间  $V_j$  和细节空间  $W_j$ 。多分辨分析的实现有 Mallat 算法和  $\hat{a}$  trous 算法两种。前者数据长度会逐级减半,后者数据长度保持不变,因此选择后者。该算法如图 2 所示,它

将多分辨率分析用一对共轭正交滤波器组  $H(z)$  和  $G(z)$  实现<sup>[15]</sup>,  $a_j$  和  $d_j$  分别是  $V_j$  和  $W_j$  中的概貌系数和细节系数。

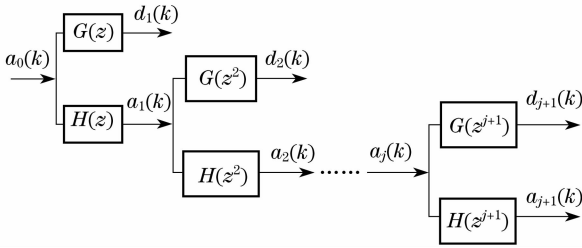


图 2 多分辨率分析的多孔算法

Fig. 2 À trous algorithm for multi-resolution analysis

对信号进行 6 层的多分辨率分解, 等效于经过如图 3 所示的一组恒 Q 滤波器。在本法中, 首先计算条纹信号的解析信号, 对解析信号作 6 层分解, 得到 6 组细节系数和 1 组概貌系数。类似于小波脊的概念, 在每一位位置定位细节系数在尺度方向的模极大值点, 通过提取该点的相位就可以得到原条纹的相位值。需要注意的是, 为使相位没有失真, 这里应采用具有线性相位的基小波, 如双正交样条小波。

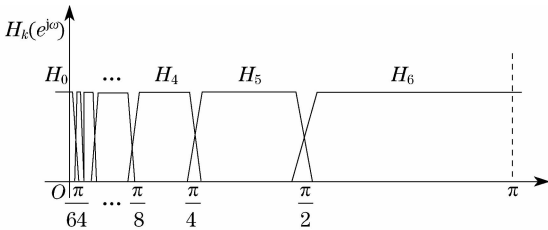


图 3 等效滤波器组幅频响应

Fig. 3 Amplitude-frequency response of equivalent filter bank

2.2.2 多次分解法 (MDA)

SDA 只进行一次多分辨率分解, 频带冗余少, 对于正弦光栅投影的条纹图可以得到较好的结果。但它的缺点是抗噪声干扰能力弱, 特别是实际工作中正弦光栅不易获得, 常用准正弦光栅代替, 如离焦投影罗奇光栅。准正弦光栅投影的一维光强分布可表示为

$$g(x) = r(x) \sum_{-\infty}^{+\infty} A_n \exp[jn\omega_0 + jn\varphi(x)]. \quad (6)$$

式中  $r(x)$  表示物体表面非均匀反射率,  $A_n$  表示  $n$  次谐波幅度,  $\omega_0$  为载频条纹的基频角频率,  $\varphi(x)$  是由物面高度调制的相位分布。从上式可看出, 准正弦条纹中含有高次谐波噪声, 这会给相位提取带来误差。要想提高抗干扰能力, 需要进一步加密频带间隔, 使其有一定程度的冗余和重叠。为此, 提出一

种对条纹信号先插值再分解, 最后抽取复原的办法。其原理如图 4(a)~(c)所示。在图 4(b)中,  $H_1(z) \sim H_7(z)$  相当于 6 层分解的小波滤波器组, 在其前后分别增加一个  $L$  插值和  $L$  抽取环节, 根据图 4(a) 所示的多抽样率系统中的恒等关系<sup>[15]</sup>, 图 4(b) 等效于图 4(c) 中的滤波器组  $H_1(z^{1/L}) \sim H_7(z^{1/L})$ , 即原滤波器频谱扩展了  $L$  倍。经过滤波器组后, 信号将被分解到图 5(a) 所示的频带划分中。若分别取  $L=3$  和  $L=5$ , 那么频带划分具体如图 5(b)、(c) 所示。图中需要说明的是, 当原滤波器  $H(z)$  的最高频率超过  $\pi/L$  时, 频谱扩展  $L$  倍后会出现频谱混叠, 那么该频带是无效的, 应被舍去。这样, 图 5(b) 有 4 个带通频带, 图 5(c) 有 3 个。最后, 这 7 个新产生的带通滤波器和 SDA 的 6 个共同组成全部滤波器, 它们的中心频率如图 5(d) 所示, 带下划线的数字代表对应  $L$  值。可以验证, 它们仍是一组恒 Q 滤波器, 且互相有一定重叠。从频带重叠的小波系数上提取模极大值处相位信息, 即为条纹相位。

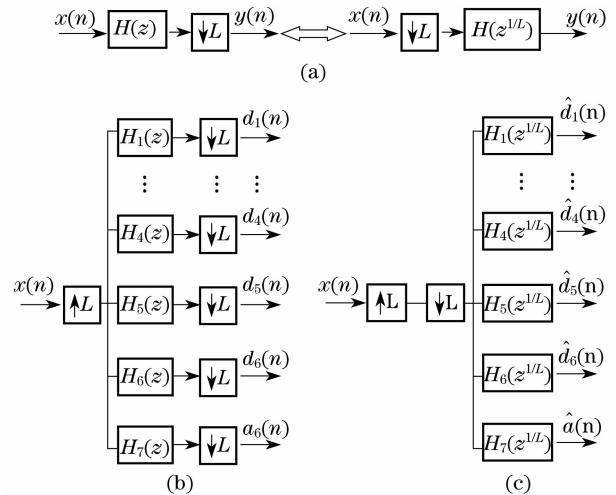


图 4 (a) 抽取的等效变换; (b) 滤波器组的插值与抽取; (c) 图 4(b) 等效形式

Fig. 4 (a) Equivalent transformation for decimation; (b) interpolation and decimation of filter bank; (c) equivalent form of Fig. 4 (b)

图 6 显示了算法的整体流程, 有两点需要说明: 1) 一般意义上的插值是插补零后再低通滤波, 以消除频谱映像, 因此可以仅仅对原信号插补零即可, 因为之后紧跟的是带通滤波, 可以消除查补零造成的频谱映像; 2) 第一次 à trous 分解后, 可以确定模极大值所在频带的大体范围, 称之为有效频带。这样, 第二、三次分解可以仅在有效频带内进行, 以减少计算量。

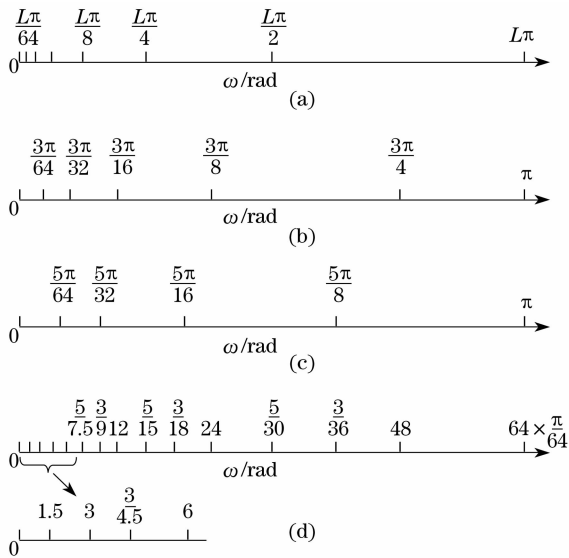


图 5 (a)  $L$  倍插值和抽取后的频带划分; (b)  $L=3$  和 (c)  $L=5$  时的情况; (d) 所有滤波器的中心频率  
 Fig. 5 Frequency band divisions after (a)  $L$ , (b)  $L=3$  and (c)  $L=5$  interpolation and decimation; (d) central frequencies of all filters

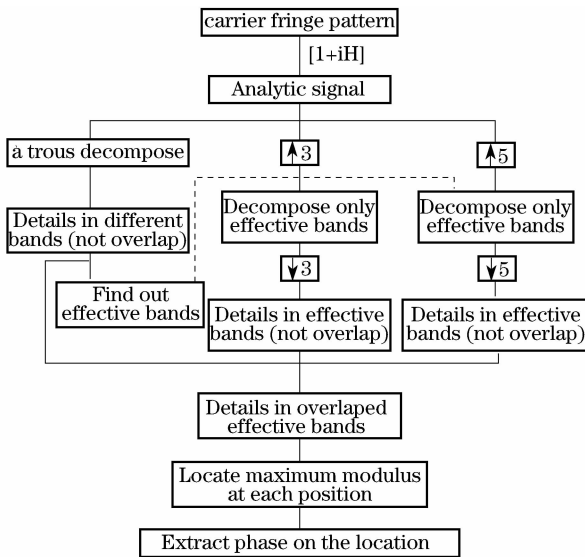


图 6 算法的整体流程  
 Fig. 6 Flow chart of the proposed algorithm

### 3 计算机模拟

图 7(a)和(b)分别是由计算机生成  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  的正弦和准正弦载波条纹图。准正弦载波条纹的产生方法是对方波做一定的平滑,再进行相位调制。调制相位的表达式为

$$\varphi(x) = \begin{cases} (\pi/40) \sqrt{(160^2 - x^2 - y^2)} & x^2 + y^2 \leq 160^2 \\ 0 & x^2 + y^2 > 160^2 \end{cases} \quad (7)$$

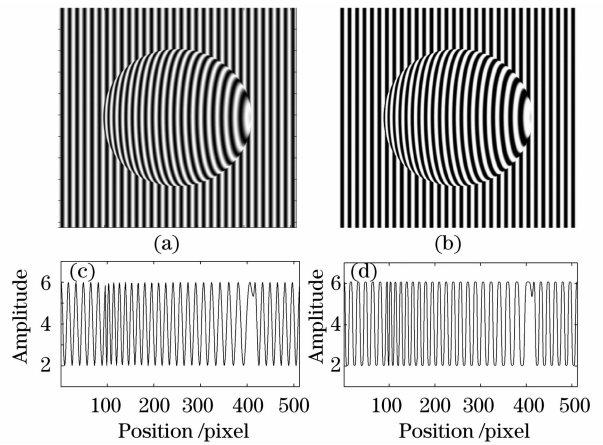


图 7 计算机模拟的载频条纹:(a)正弦和(b)准正弦条纹以及它们的第 256 行信号(c)和(d)  
 Fig. 7 Simulated (a) sinusoidal and (b) quasi-sinusoidal carrier fringe patterns; (c) and (d), the signals at the 256th row from Fig. (a) and Fig. (b) respectively

取图 7(a)和(b)条纹的第 256 行信号分别显示于图 7(c)和(d)中。采用 bior5.5 小波,运用 2.2.1 节 SDA 对图 7(c)中的正弦载频信号做小波变换,得到的模值分布和相位分布分别如图 8(a)和(b)所示。从模极大值连线上恢复出条纹的相位分布并减去载频,得到调制相位  $\varphi(x)$ 。为方便比较,将其与采用 Morlet 小波的 CWT 法所得结果一并显示于图 9 中。从图中可以看出,两种方法的精度很相近。

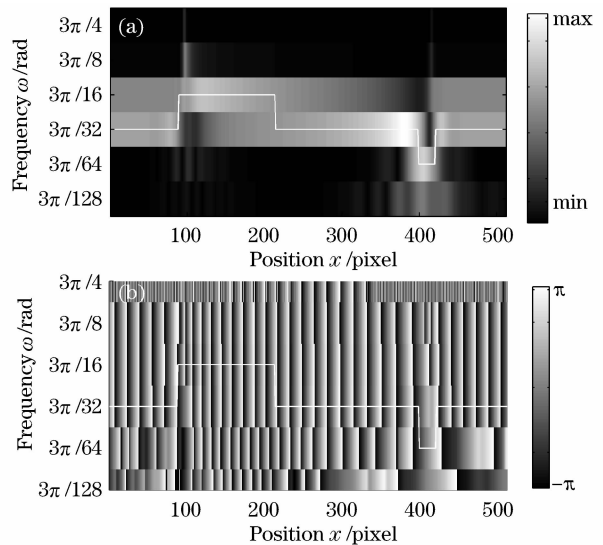


图 8 图 7(c)信号的 SDA 小波变换:(a)模值分布; (b)相位分布。白实线为模极大值连线  
 Fig. 8 (a) Amplitudes and (b) phases of DWT at the 256th row using SDA with modulus maximum curve (white solid line)

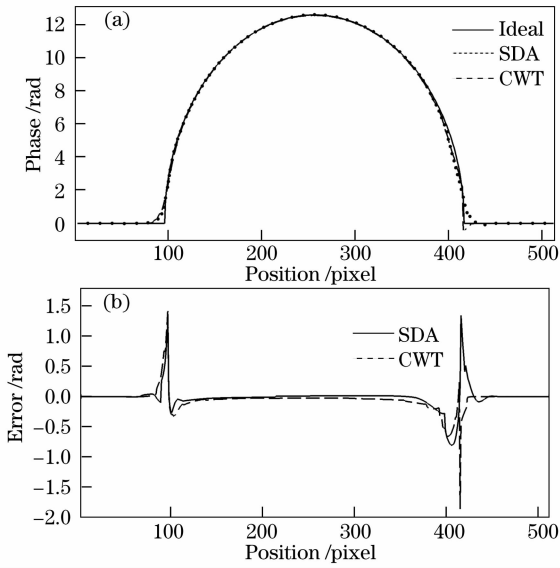


图 9 (a) 相位分布；(b) 相位误差

Fig. 9 (a) Phase distribution; and (b) phase errors

再运用 2.2.2 节 MDA 对图 7(d) 中的准正弦载波信号做小波变换, 得到的模值分布和相位分布分别如图 10(a) 和 (b) 所示。从模极大值连线上恢复出条纹的相位分布并减去载频, 得到调制相位  $\varphi(x)$ 。为方便比较, 同时用 SDA 对图 7(d) 计算一次, 所得结果一并显示于图 11 中。从图中可以看出, 对于准正弦载频信号, MDA 精度较高。

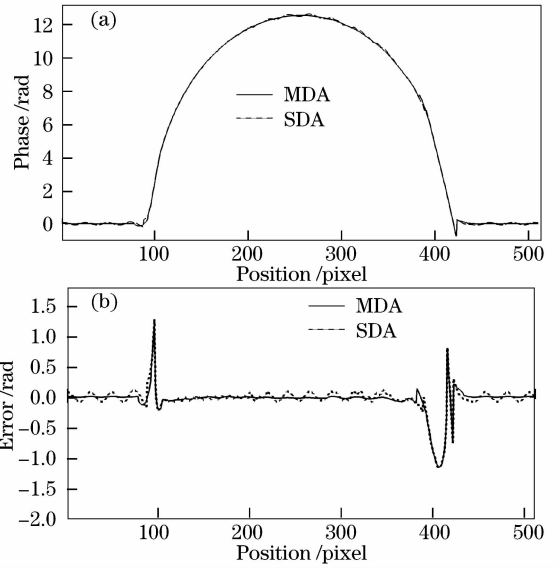


图 11 (a) 相位分布；(b) 相位误差

Fig. 11 (a) Phase distribution and (b) phase errors

图 12 所示。用分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$  的数字投影仪分别投影正弦条纹和准正弦条纹至物体表面, 准正弦条纹的产生方法是离焦投影等间隔的黑白条纹。图 13(a) 和 (b) 显示了由 CCD 从另一角度拍摄的  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  变形条纹图。用 SDA 对条纹图进行了分析, 恢复的相位分布分别如图 13(c) 和 (d) 所示; 用 MDA 得到相位分布分别如图 13(e) 和 (f) 所示。从图中可以看出, 对于正弦条纹图, 图 13(c) 和图 13(e) 的精度比较接近, 这是因为没有高次谐波的干扰时 SDA 和 MDA 一样能取得较好的结果; 而对于准正弦条纹图, 图 13(d) 和图 13(f) 相比有明显的波纹, 这是因为 SDA 分解频带划分的较粗略, 对高次谐波引起的波纹干扰不能较好地滤除, 而 MDA 使用的冗余的频带划分, 能够较好地滤除干扰。

### 5 计算复杂度分析

为简便起见, 仅分析乘法次数。假设 DWT 和

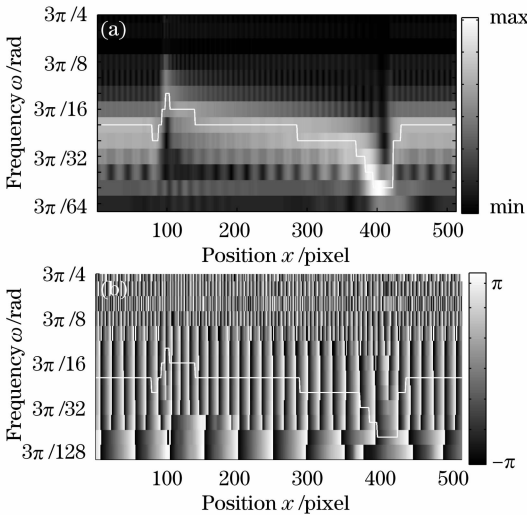


图 10 图 7(d) 信号的 MDA 小波变换: (a) 模值分布; (b) 相位分布。白实线为模极大值连线

Fig. 10 (a) Amplitudes and (b) phases of DWT at the 256th row using MDA with modulus maximum curve (white solid line)

## 4 实 验

以一个人脸石膏像作为测量对象, 实验装置如

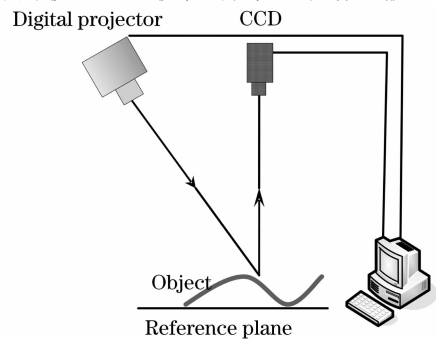


图 12 实验装置

Fig. 12 Experimental setup

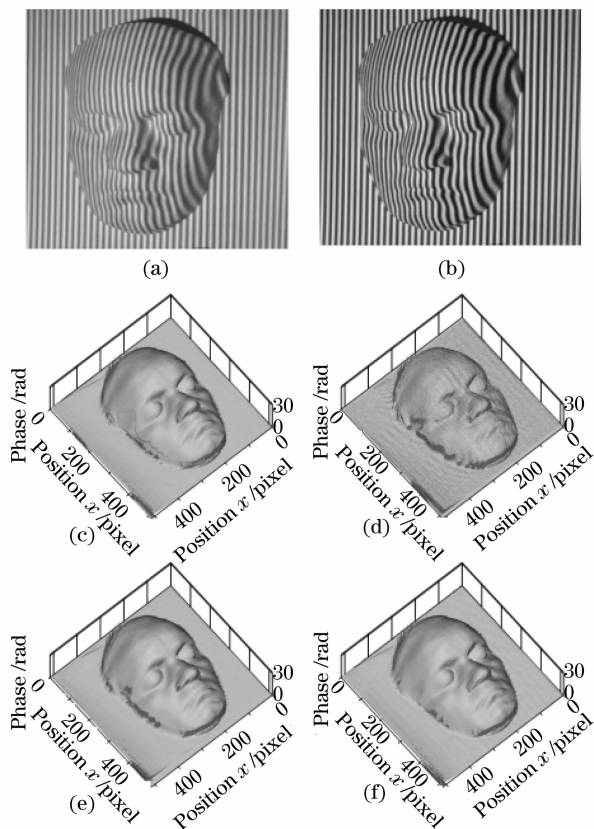


图 13 (a)正弦光栅和(b)准正弦光栅投影下的石膏像变形条纹图;(c)和(d),用 SDA 分别计算(a)和(b)的相位分布;(e)和(f)分别为用 MDA 分别计算(a)和(b)得到的相位分布

Fig. 13 (a) Sinusoidal and (b) quasi-sinusoidal fringe projected images of a plaster face; (c) and (d), 3-D reconstructions by SDA for (a) and (b) respectively; (e) and (f), 3-D reconstructions by MDA for (a) and (b) respectively

CWT 的母小波有共同的长度  $N$ , 原始信号的长度为  $L$ 。对于 SDA, 每层分解需要  $2LN$  次乘法, 如果作  $J$  层分解则需要  $2LNJ$ 。因此该算法的乘法次数是随尺度级数以线性方式增加的。而用 CWT 定义计算的乘法次数是  $LN \sum_{k=0}^{J-1} 2^k$ , 是随尺度级数以指数累加和的方式增加的, 并且 CWT 还有计算每个尺度的小波函数所带来的计算量。

对于 MDA, 情况稍复杂一些。除单次分解的计算量外还要加上 3 倍和 5 倍的零插值后分解带来的计算量, 总共  $18LNJ$  次乘法。但实际上可以用信号处理的多相结构对算法进行简化, 以消除对零作乘法的不必要的计算, 以及抽取环节前的多余的计算。最终乘法次数可以降到  $10LNJ$ 。这相对于 CWT 算法还是有优势的。

在 Pentium IV 2.5 GHz 的计算机上计算  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  的条纹图的相位, SDA 耗时 5 s, MDA 耗时 24 s, CWT 法耗时 48 s。可见, 相对于 CWT 法, 这两种方法在计算速度上可以分别提高 90% 和 50% 左右。

## 6 结 论

提出了两种使用 DWT 提取光栅投影条纹图相位的方法: 单次分解法和多次分解法。它们用多分辨率分析中的多孔算法计算信号的小波变换系数, 在每一位置定位系数在尺度方向的模极大值点, 通过提取该点的相位就可以得到原条纹的相位值。相对于单次分解法, 多次分解法抗噪声干扰能力强, 可以处理准正弦载频条纹图。与 CWT 法相比, 这两种方法的优点是计算仅由一组高通和低通滤波器卷积完成, 不需要数值积分, 也不需要重复计算每个尺度下的小波基函数, 所以速度更快, 更适合数字条纹图。实验表明两种方法对于  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  的条纹图计算速度可以分别提高 90% 和 50% 左右。这些优点使它们在工程中有很好的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Takeda M., Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24):3977~3982
- 2 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu. Analysis on an improved Fourier transform profilometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):99~104  
毛先富, 陈文静, 苏显渝. 傅里叶变换轮廓术新理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):99~104
- 3 Su X. Y., Chen W. J. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**(5):263~284
- 4 Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets* [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992, 17~52
- 5 Quan C. G., Tay C. J., Chen L. J. Fringe-density estimation by continuous wavelet transform[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(12):2359~2365
- 6 Tay C. J., Quan C., Sun W. *et al.*. Demodulation of a single interferogram based on continuous wavelet transform and phase derivative[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**(2):327~336
- 7 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
- 8 Zhong J. G., Weng J. W. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19):2560~2562
- 9 Sun Juan, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Study the measurement range of wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):647~653  
孙娟, 陈文静, 苏显渝等. 小波变换轮廓术的测量范围研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):647~653
- 10 Li Sikun, Chen Wenjing, Su Xianyu. Phase unwrapping guided by amplitude of wavelet ridge coefficients in wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):715~721

- 李思坤,陈文静,苏显渝. 小波变换轮廓术中用小波脊系数幅值引导相位展开的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(4):715~721
- 11 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Apply wavelet transform to phase analysis of spatial carrier-fringe patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4):454~459
- 翁嘉文, 钟金钢. 小波变换在载频条纹相位分析法中的应用研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(4):454~459
- 12 Mallat Stephane G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [ J ]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7):674~693
- 13 Shensa Mark J. The discrete wavelet transform: Wedding the atrous and Mallat algorithms[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, **40**(10):2464~2482
- 14 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
- 15 Hu Guangshu. *Modern Signal Processing Tutorial* [ M ]. Beijing: Tsinghua Univ Press, 2004, 296~299
- 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2004, 296~299

## 《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于2009年12月正刊(EI核心收录)上推出“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

### 征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

### 特邀组稿专家:

钟敏霖 教授 清华大学机械工程系 E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期: 2009年9月30日

### 投稿方式以及格式:

可直接将稿件电子版发至“激光制造”专题组稿专家、《中国激光》常务编委、清华大学钟敏霖教授邮箱: zhml@tsinghua.edu.cn(主题标明“激光制造专题”投稿),或通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光制造专题”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjj.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话:021-69918427。

《中国激光》编辑部