

利用小波变换实现基于结构光投影的 S 变换轮廓术

王 焘 陈文静

(四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610064)

摘要 S变换是一种集合了窗口傅里叶变换和小波变换优点的时-频分析技术,将一维的信号映射到二维的时-频空间,具有良好的时频分辨能力。由于S变换谱和傅里叶变换频谱之间存在直接联系,且具有类似于小波变换的多分辨率能力,S变换可以通过快速傅里叶变换算法实现,也可以通过小波变换算法实现。研究了基于小波变换算法的S变换在基于结构光投影的三维光学测量中的应用,给出了理论分析,特别讨论了S变换中频率因子的选择,并同基于快速傅里叶变换算法的S变换轮廓术结果进行了比较。完成了计算机模拟和实验研究。

关键词 信息光学;光学三维测量;时-频分析;S变换

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.061202

Using Wavelet Transform to Actualize S Transform Profilometry Based on Structured Light Projection

Wang Tao Chen Wenjing

(*Opto-Electronic Department, School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*)

Abstract S transform is a time-frequency analysis technique which combines the advantages of both short-time Fourier transform and wavelet transform. It maps a one-dimensional spatial signal into two-dimensional time-frequency domain and has a perfect time-frequency resolution. S transform has direct relation with Fourier transform and wavelet transform, and has the similar multiresolution ability of wavelet transform. It can be derived from Fourier transform coefficient and wavelet transform coefficient of a signal respectively, but the key technology that the implementation of S transform by wavelet analysis algorithm applied in three-dimensional optical measurements is rarely related at present. Focusing on the implementation of S transform by wavelet analysis algorithm, the application of S transform in three-dimensional optical measurement based on structured light projection is discussed, especially the selection of the frequency factor in S transform for obtaining good reconstruction. The reconstructed results of S transform profilometry based on fast Fourier transform and that based on wavelet transform are compared. The computer simulations and experiments verify our analysis.

Key words information optics; optical three-dimensional measurement; time-frequency analysis; S transform

OCIS codes 120.6650; 120.2650; 200.3050; 350.6980

1 引言

基于结构光投影的光学传感技术是一种非接触、全场、高精度的主动三维测量方法,广泛应用于工业零件的检测、机器视觉和生物医学等领域^[1],主要包括基于多帧条纹处理的移相测量轮廓术^[2~4]、基于单帧条纹处理的傅里叶变换轮廓术(FTP)^[5~7]、窗口 FTP^[8]和小波变换(WT)轮廓术等^[9~11]。FTP是最常用的单帧条纹处理方法,它将时域信号映射到频域进行分析,通过对获得的全局频谱进行滤波,提取有用的频率分量来重构物体的三维分布。此方法数据获取速度快,具有全局高精度的特点。FTP虽然在频域可获得很高

收稿日期: 2012-02-28; 收到修改稿日期: 2012-03-13; 网络出版日期: 2012-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 王 焘(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学三维传感方面的研究。E-mail: 112400039@qq.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和光学信息处理等方面的研究。

E-mail: chenwj0409@scu.edu.cn

的分辨率,但由于丢失了空间位置信息,不适合处理非平稳信号。结构光投影的三维轮廓术中,待测物体复杂时,获得的变形条纹图被看作非平稳信号,有用的基频分量与其他的谐波频率分量之间发生混叠,导致 FTP 不能正确重建被测物体的三维形状。傅里叶变换存在的不足促进了信号时-频分析技术在条纹处理中应用的研究,窗口 FTP 和 WT 轮廓术被提出并得到广泛应用^[8~11]。近年来,由 Stockwell 等^[12]在 1996 年提出的 S 变换也被用于条纹分析^[13,14]。S 变换克服了傅里叶变换缺乏局部分析能力的不足,且相对于窗口傅里叶变换,其窗口大小可以随着频率变化,具有很好的时-频分辨率。相对于 WT,S 变换谱和傅里叶变换谱之间存在着直接联系,S 变换得到的局部频谱沿位置的积分同傅里叶变换相同。

S 变换既可以看作频率可调的窗口傅里叶变换,借用快速傅里叶变换(FFT)算法实现,也可以看成是对 WT 的一种相位修正,其变换系数是以 Morlet 小波为基小波的连续 WT 系数与一个指数相移因子的乘积^[15],因此 S 变换也可以借用快速 WT 算法实现。由 FFT 实现的 S 变换在基于条纹投影的三维面形测量中的应用已开展了基于“脊”处理^[13]和滤波处理方法的研究^[14],并且取得了一些成果。而采用 WT 算法实现的 S 变换在基于条纹投影的三维面形测量中的应用还未得到深入的研究。本文重点研究了基于 WT 算法的 S 变换中的关键技术,并与基于 FFT 算法的 S 变换进行了比较,完成了计算机模拟和初步实验,证实了所提方法的正确性。

2 一维 S 变换的基本理论

一维形式的 S 变换定义为

$$S(b, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x)g(b-x, f) \exp(-i2\pi fx) dx, \quad (1)$$

式中 $h(x)$ 为待测的信号, $g(b-x, f)$ 为尺度伸缩的高斯窗函数,窗口伸缩受到频率因子 f 控制($f > 0$),表示为

$$g(b-x, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{f^2(b-x)^2}{2}\right], \quad (2)$$

b 为空域平移因子,控制窗口中心在 x 轴方向上的移动。为了保证 S 变换的可逆操作,窗口需要归一化:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(x, f) dx = 1. \quad (3)$$

利用傅里叶变换的性质,S 变换可以写成:

$$S(b, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\alpha + f) \exp\left(-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}\right) \exp(i2\pi\alpha b) d\alpha, \quad (4)$$

式中 $H(\alpha)$ 为 $h(x)$ 的傅里叶变换对, α 为频率域变量。目前 S 变换系数的计算都是利用(4)式,借用 FFT 算法实现的。

3 基于 WT 算法的 S 变换理论

对(1)式进行改写,可以写为

$$S(b, f) = \frac{\sqrt{|f|} \exp(-i2\pi bf)}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \sqrt{|f|} \exp\{-[f^2(x-b)^2/2]\} \exp[-i2\pi f(x-b)] dx, \quad (5)$$

再进一步改写为

$$S(b, f) = \frac{\exp[-i2\pi b/(1/f)]}{\sqrt{|1/f|}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \frac{1}{\sqrt{|1/f|}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-i2\pi\left(\frac{x-b}{1/f}\right)\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-b}{1/f}\right)^2\right] dx. \quad (6)$$

把(6)式积分号前的一项记为 $C_{us}(b, 1/f)$,积分号后的一项记为 $W(b, 1/f)$,则(6)式可以写成

$$S(b, f) = C_{us}(b, 1/f)W(b, 1/f). \quad (7)$$

对 $W(b, 1/f)$ 进行改写:

$$W(b, 1/f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \frac{1}{\sqrt{|1/f|}} \psi^* \left(\frac{x-b}{1/f} \right) dx, \quad (8)$$

式中 $\psi(x)$ 是中心频率和带宽分别为 1 和 2 的复 Morlet 小波函数, 表示为

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(i2\pi x) \exp(-x^2/2), \quad (9)$$

式中 $\psi^*(x)$ 为 $\psi(x)$ 复共轭, (8) 式正好是对信号 $h(x)$ 的 WT, 尺度因子 $\lambda = 1/f$ 。(7) 式给出了 S 变换和 WT 之间的关系: S 变换可由以 Morlet 小波为基本母小波的连续 WT 系数乘以一个加权因子 $C_{us}(b, 1/f)$ 实现。这给出了实现 S 变换的另一条途径, 即先求出信号的 WT 系数, 再用 WT 系数乘以一个转换因子就可以得到信号的 S 变换系数。

4 基于 WT 算法的 S 变换的条纹分析

4.1 测量装置

基于三角原理的条纹投影方法测量装置如图 1 所示, 投影仪将正弦结构光栅条纹投影到三维面形物体上, 在另一个方向用电荷耦合器件 (CCD) 获取受物体表面高度调制的变形条纹图, 变形条纹的光场分布可以表示为

$$h(x, y) = I_0(x, y) \{1 + v(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)]\}, \quad (10)$$

式中 $I_0(x, y)$, $v(x, y)$ 分别表示背景光场和条纹对比度, f_0 为空间载频, $\varphi(x, y)$ 为物体的表面高度分布引起的相位调制。

4.2 一维 S 变换的条纹相位解调原理

变形条纹的任意一行表示为

$$h(x) = I_0(x) \{1 + v(x) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x)]\}. \quad (11)$$

对变形条纹的任意一行进行一维 S 变换, 当窗口滑到 b 处时, S 变换相当于在高斯窗局部化后的傅里叶基的支撑上进行。 $I_0(x)$, $v(x)$ 的变化很缓慢, 可以认为在窗口中心所在位置附近, $I_0(x) = I_0(b)$, $v(x) = v(b)$ 。将 $\varphi(x)$ 在 b 处进行一阶泰勒展开:

$$\varphi(x) = \varphi(b) + \varphi'(b)(x - b). \quad (12)$$

将 (11), (12) 式代入 (1) 式, 可以得到一维条纹的 S 变换表达式为

$$S(b, f) = S_0(b, f) + S_1(b, f) + S_2(b, f). \quad (13)$$

而

$$S_0(b, f) = I_0(b) \exp(-2\pi^2) \exp(-i2\pi fb), \quad (14)$$

$$S_1(b, f) = \frac{1}{2} I_0(b) V(b) \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f + f_0 + \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right]^2\right\} \exp\{-i[2\pi fb - 2\pi f_0 b - \varphi(b)]\}, \quad (15)$$

$$S_2(b, f) = \frac{1}{2} I_0(b) V(b) \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right]^2\right\} \exp\{-i[2\pi fb + 2\pi f_0 b + \varphi(b)]\}, \quad (16)$$

由于 $f > 0$, 只有 $S_1(b, f)$ 在 (b, f_b) , $f_b = f_0 + \frac{\varphi'(b)}{2\pi}$ 处, 能取得最大值, 称为信号的 S 谱“脊”线。因为 $\exp(-2\pi^2) \approx 0$ 和 $\exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right]^2\right\} \Big|_{f=f_b} = \exp(-8\pi^2) \approx 0$, $S_0(b, f)$ 和 $S_2(b, f)$ 可忽略。

根据 (15) 式, 可以从 S 变换“脊”处的复指数函数中得到相位值为

$$\phi_s(b, f_b) = \arctan\left\{\frac{\text{Im}[S(b, f_b)]}{\text{Re}[S(b, f_b)]}\right\} = -[2\pi f_b b - 2\pi f_0 b - \varphi(b)]. \quad (17)$$

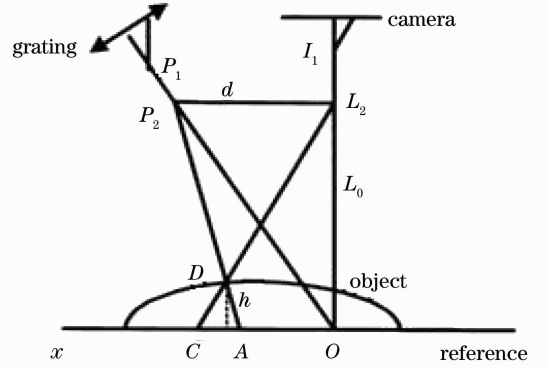


图 1 测量光路图

Fig. 1 Schematic of the geometry

于是得到

$$\varphi(b) = U[\phi_s(b, f_b) + 2\pi(f_b - f_0)b], \quad (18)$$

式中 U 表示相位展开操作。再利用测量系统投影装置、成像装置和参考面之间的位置关系,就可以恢复出三维面形。 S 变换的“脊”处理思想与基于连续 WT 的“脊”方法是一致的。WT 中伸缩因子的选择是影响虚小波“脊”提取可靠性的关键之一,因此基于 WT 算法的 S 变换的实现也必须注意伸缩因子的选择。

4.3 尺度因子间隔的选择

计算机处理的是离散信号。比如在离散的 WT 系数的计算过程中,由于尺度因子 λ 不是连续变化的,设 WT 尺度因子间隔为 $\Delta\lambda$,由离散化的 λ 计算出来的小波“脊”可能并未对应位置 b 处真正的 WT 系数的最大值,而对应“脊”的精确 λ_{b^*} 在 $[\lambda_b - \Delta\lambda/2, \lambda_b + \Delta\lambda/2]$ 之间。利用计算机计算 S 变换系数时,频率因子也是离散的,本文中基于 WT 算法实现 S 变换是以(7)式为理论依据编程的,由于在 S 变换中频率参数与 WT 的尺度参数之间存在 $f=1/\lambda$ 的关系,在利用 WT 算法获得 S 变换系数的过程中,可以得到“脊”处对应的频率参数 f_b 的倒数 $\lambda_b = 1/f_b$,而对应“脊”的精确的 $1/f_{b^*}$ 的取值与 $1/f_b$ 之间存在偏差,离散所造成的 $\Delta\lambda/2$ 的不确定度对基于 WT 算法的 S 变换“脊”处理技术的相位提取方法会产生影响。本文中,基于 WT 算法的 S 变换的实现所采用的 WT 函数是 Matlab 软件库函数中常用的连续 WT 函数 `CWT.m`,它是采用 WT 的空域卷积算法编写的,其核心代码如下:

```
1 nb_SCALES=length(scales);%求取尺度因子 scales 的长度
2 coefs=zeros(nb_SCALES, lenSIG); %开辟 WT 系数存储矩阵
3 val_SIG=val_SIG(:); %输入的信号
4 ind=1;
5 for k=1:nb_SCALES
6 a=scales(k);
7 a_SIG=a/stepSIG;
8 j=1+floor((0:a_SIG * xMaxWAV)/(a_SIG * stepWAV)); %求取尺度 a 下的采样点
9 if length(j)==1, j=[1 1]; end
10 f=fliplr(val_WAV(j));
11 coefs(ind,:)= -sqrt(a) * wkeep1(diff(wconv1(val_SIG,f)),lenSIG); %求 WT 系数
12 ind=ind+1;
13 end
```

通过对 `CWT.m` 中尺度因子选择的程序段的分析,发现小波的伸缩是借助代码的第 8 行实现的,这条代码中存在一个向零取整的操作,使得在数值实现的时候,在某些尺度间隔下采样所得的各子小波之间波形上存在细微差异。比如尺度间隔为 0.2 时,尺度为 4.0 和 4.2 时采样所得的子波波形如图 2 所示,可以看出两个子波波形存在细微差异。由此代码造成的各子波波形之间的细微差异,会造成解得的光学条纹调制相位出现毛刺。为了减小这种影响,可按照下式选取尺度因子间隔来确定 S 变换中频率控制变量 f 的选择^[16]:

$$\Delta\lambda = k2^{-i}, \quad (k = 1, 2, 3, 4, \dots; i = 1, 2, 3, \dots). \quad (19)$$

在使用连续 WT 函数 `CWT.m` 时,采用(19)式来确定小波的伸缩因子,可以避免 WT 的计算机程序实现向零取整操作时所引起的各子小波的波形差异,有效地减少解得的调制相位出现的毛刺。

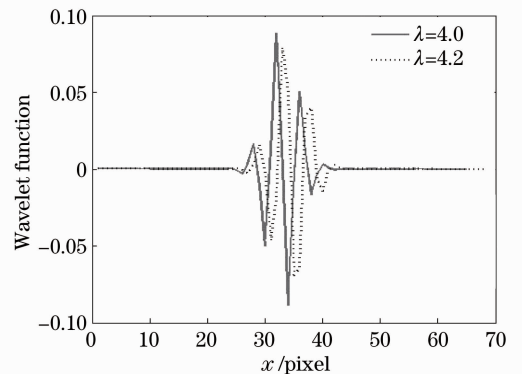


图 2 λ 分别为 4.0 和 4.2 时子波波形
Fig. 2 Waveform of wavelet when the scale factor λ is 4.0 or 4.2

5 计算机模拟

由上述分析可知 S 变换可以利用 FFT 算法实现,如(4)式所示;也可以通过 WT 算法实现,如(7)式所示。为了验证基于 WT 算法实现 S 变换的理论,进行了计算机模拟。模拟的物体 $Z(x, y) = 7.5P(x, y)$, 如图 3 所示。Peaks 函数 $P(x, y)$ 的表达式为

$$P(x, y) = 3(1-x)^2 \exp[-(x^2) - (y+1)^2] - 10(x/5 - x^3 - y^5) \times \exp(-x^2 - y^2) - \frac{1}{3} \exp[-(x+1)^2 - y^2]. \quad (20)$$

考虑到噪声影响,模拟的参考条纹和变形条纹可以表示为

$$I_{re}(x, y) = a + b \cos(2\pi f_0 x) + n(x, y), \quad (21)$$

$$I_{de}(x, y) = a + b[2\pi f_0 x + \tan \theta \cdot Z(x, y)] + n(x, y), \quad (22)$$

式中 $n(x, y)$ 为噪声分布函数, $\tan \theta = d/L_0$ 。图 4 是模拟的变形条纹,条纹的尺度为 $264 \text{ pixel} \times 264 \text{ pixel}$, 载频 $f_0 = 1/12 \text{ pixel}^{-1}$, 噪声为 30 dB, $d = 190 \text{ cm}$, $L_0 = 540 \text{ cm}$, $a = b = 0.5$, 白线表示变形条纹的第 64 行。

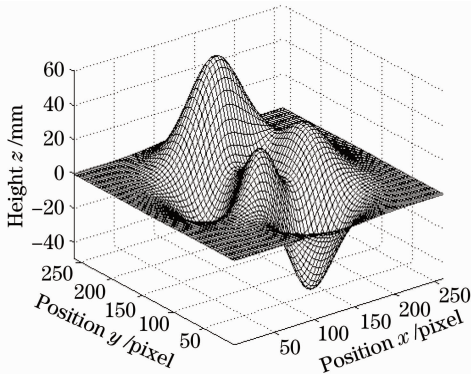


图 3 模拟物体

Fig. 3 Simulated object

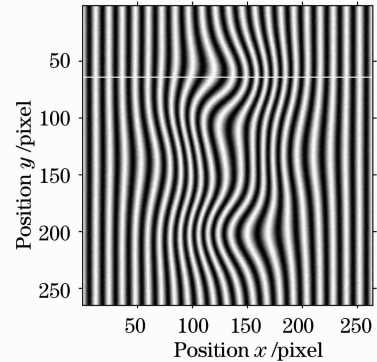


图 4 变形条纹的第 64 行

Fig. 4 64th row of deformed fringe pattern

利用 S 变换和 WT 之间的关系和 Matlab 提供的连续 WT 函数实现 S 变换。根据 S 变换的定义, S 变换系数计算过程中,频率 f 的取值范围是 $0 \sim 0.5$ 之间,上限可以小于 0.5,只要能保证获得完整的“脊”。在下面的计算过程中,频率选择在 $[0.03, 0.25]$ 之间,等步长地设置 $\Delta f = 0.00378$, WT 的尺度因子 λ 由 f 取倒数得到,相邻的两个尺度因子之差即为 λ 的间距 $\Delta \lambda$,显然 $\Delta \lambda$ 不满足(19)式。计算条纹中每一行的 S 变换谱,例如变形条纹的第 64 行的 S 谱[如图 5(a)所示],找到“脊”,进行相位提取得到在 $[-\pi, \pi]$ 之间的截断相位,展开并完成相位与高度的映射,得到恢复的重建面形和误差分布,如图 5(b), (c) 所示。可以看出重建面形出现了很多的毛刺,这是由于所用的 WT 函数的尺度因子间距没有选择恰当所造成的。

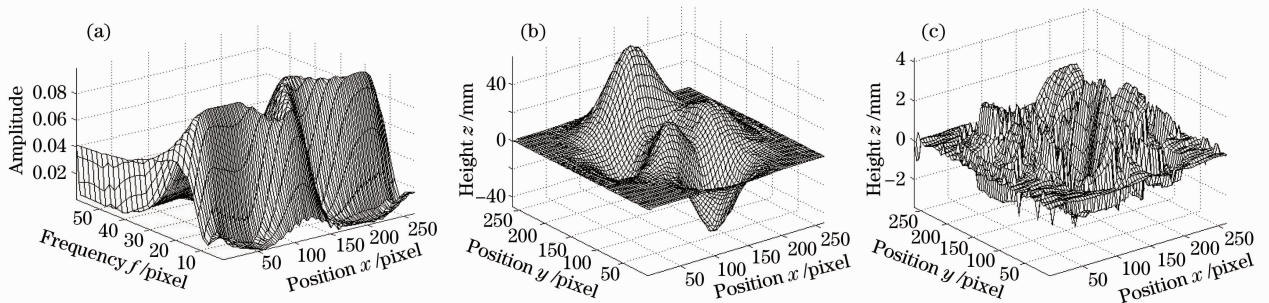


图 5 基于 WT 算法的 S 变换结果。(a) 变形条纹的第 64 行的 S 谱;(b) 基于 WT 算法的 S 变换“脊”

处理方法重建面形;(c) 基于 WT 算法的 S 变换“脊”处理方法重建面形误差分布

Fig. 5 Reconstruction result by S transform based on WT. (a) S transform spectrum of the 64th row of the deformed fringe pattern; (b) reconstructed surface by S transform ridge method based on WT; (c) error distribution by S transform ridge method based on WT

为了减少毛刺,做如下改进:先确定尺度因子的范围,此处 λ 选择在 $[4, 28]$ 之间,间隔 $\Delta\lambda = 1/2$,符合(19)式选择尺度间隔的要求,再由 λ 取倒数得到 f ,依然采用S变换“脊”处理方法得到重建面形和误差分布,如图6(a),(b)所示。相对于图5(b),(c),毛刺减少了。为了更加清楚,在图6(c),(d)中分别画出图5(b)中的第64行和图6(a)中的第64行进行比较,图6(d)中的曲线要平滑得多。

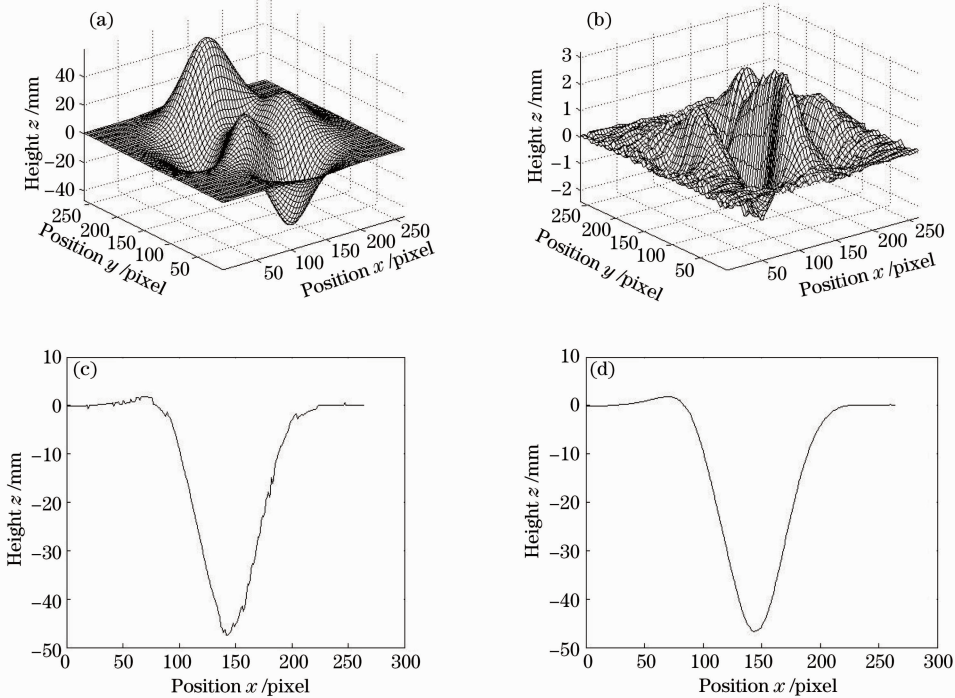


图6 尺度间距为 $1/2$ 的基于WT算法的S变换“脊”处理方法结果。(a)重建面形;(b)重建面形误差分布;
(c)图5(b)中面形分布的第64行;(d)图6(a)中面形分布的第64行

Fig. 6 Reconstruction result by S transform based on WT when the scale interval equals $1/2$. (a) Reconstructed surface;
(b) error distribution; (c) the 64th row of the reconstructed surface in Fig. 5 (b); (d) the 64th row of the
reconstructed surface in Fig. 6(a)

为了说明S变换在分析存在频谱混叠的变形条纹时的优势,下面通过模拟实验对比FTP和S变换轮廓术。图7(a)是采用FTP重建的面形,图7(b)是重建误差分布。由于物体的高度变化较大,导致变形条纹的傅里叶频谱混叠,滤波操作不能获得正确的基频分量,恢复的相位存在错误。图8(a),(b)分别是采用S变换“脊”处理方法(采用FFT算法)的重建面形和误差分布,重建结果和基于WT算法的S变换“脊”处理方法所恢复的面形基本一致。从图6~8可以得到以下结论:对于高度变化较大的面形,不适合用FTP方法处

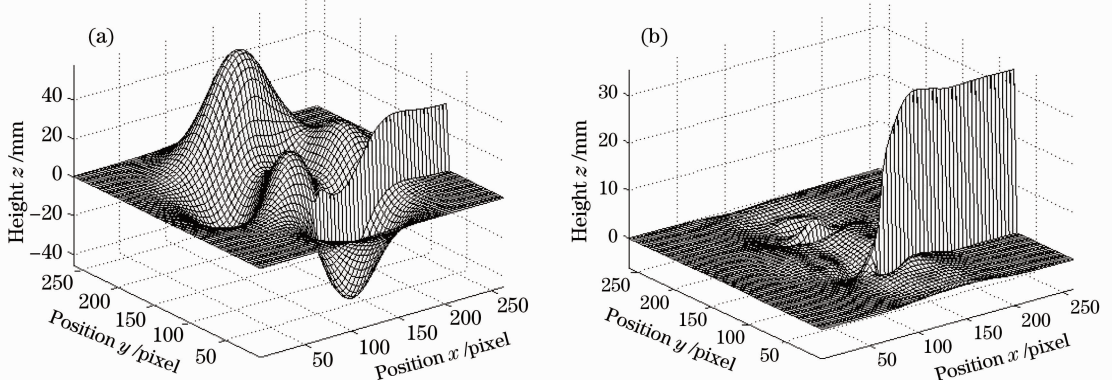


图7 基于FTP的重建结果。(a)重建面形;(b)重建面形的误差分布

Fig. 7 Reconstruction result by FTP method. (a) Reconstructed surface; (b) error distribution

理, 而用两种方法实现的 S 变换均能得到较为满意的重建效果。表 1 列出了分别采用三种方法的解相误差统计, η_e 、 μ_e 、 σ_e 分别表示解相的最大误差、平均绝对误差和标准差。

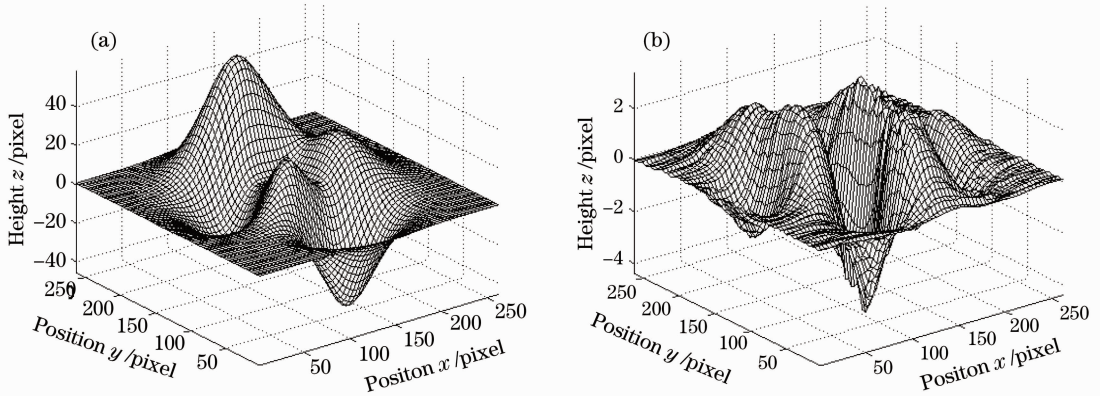


图 8 基于 FFT 算法的 S 变换“脊”处理方法结果。(a)重建面形;(b)重建面形误差分布

Fig. 8 Reconstruction result by S transform ridge method based on FFT. (a) Reconstructed surface; (b) error distribution

表 1 三种方法的误差

Table 1 Errors of three different methods

Method	η_e	μ_e	σ_e	Result
S transform based on WT when the scale interval equal to 1/2	3.2489	0.5219	0.7841	Right
FFT	35.5589	0.6632	3.0910	False
S transform ridge method based on FFT	3.3417	0.5569	0.8531	Right

6 实验验证

为了进一步验证理论的正确性, 采用如图 9 所示实验装置完成了初步实验。分别投影正弦条纹到参考平面和被测物体(形如一个倒扣在参考平面上的碗)上, 在投影仪的另一端用 CCD 拍下参考条纹, 如图 10(a)所示, 受物体调制的变形条纹如图 10(b)所示。图形尺寸均为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 把采集到的参考条纹和变形条纹输入计算机, 分别采用傅里叶变换方法、基于 FFT 算法的 S 变换“脊”处理方法和基于 WT 算法的 S 变换“脊”处理方法处理图像。图 10(c)是采用 FTP 得到的重建面形, 由于条纹的载频低, 并且条纹受到投影装置非线性的影响, 傅里叶频谱存在混叠, 恢复的碗的圆弧形部分出现了明显的往下凹陷的情况。图 10(d)是采用基于 FFT 算法的 S 变换“脊”处理方法的重建面形, 未出现明显的错误。图 10(e)是采用基于 WT 算法的 S 变换“脊”处理方法的重建面形, 此时频率 f 的取值在 $[0.005, 0.05]$ 之间, 等步长地设置 $\Delta f = 0.001$, 对 f 取倒数得到尺度因子 λ , 则间距 $\Delta\lambda$ 显然不满足 (19) 式, 重建面形出现了比较明显的毛刺现象。针对上述方法的不足, 做以下改进: 先选择尺度因子 λ , 本实验中, 选择 λ 在 $[20, 100]$ 之间, 间隔为 2, 符合 (19) 式的选择规则, 然后再由尺度因子 λ 取倒数得到 S 变换的频率因子 f 。采用 S 变换“脊”处理方法得到重建面形如图 10(f)所示, 毛刺减少了, 其重建面形和基于 FFT 算法的 S 变换“脊”处理方法的重建面形基本一致。

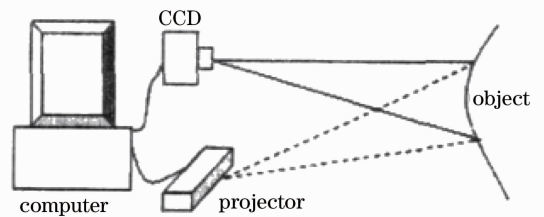


图 9 实验装置图

Fig. 9 Experimental setup

7 结论

S 变换是一种在 FFT 和 WT 的基础上发展而来的时-频分析技术, 不仅与 FFT 之间有着直接联系, 能够通过 FFT 算法实现, 同时也可以由 WT 来实现。主要对利用 WT 算法实现 S 变换的方法做了理论分析,

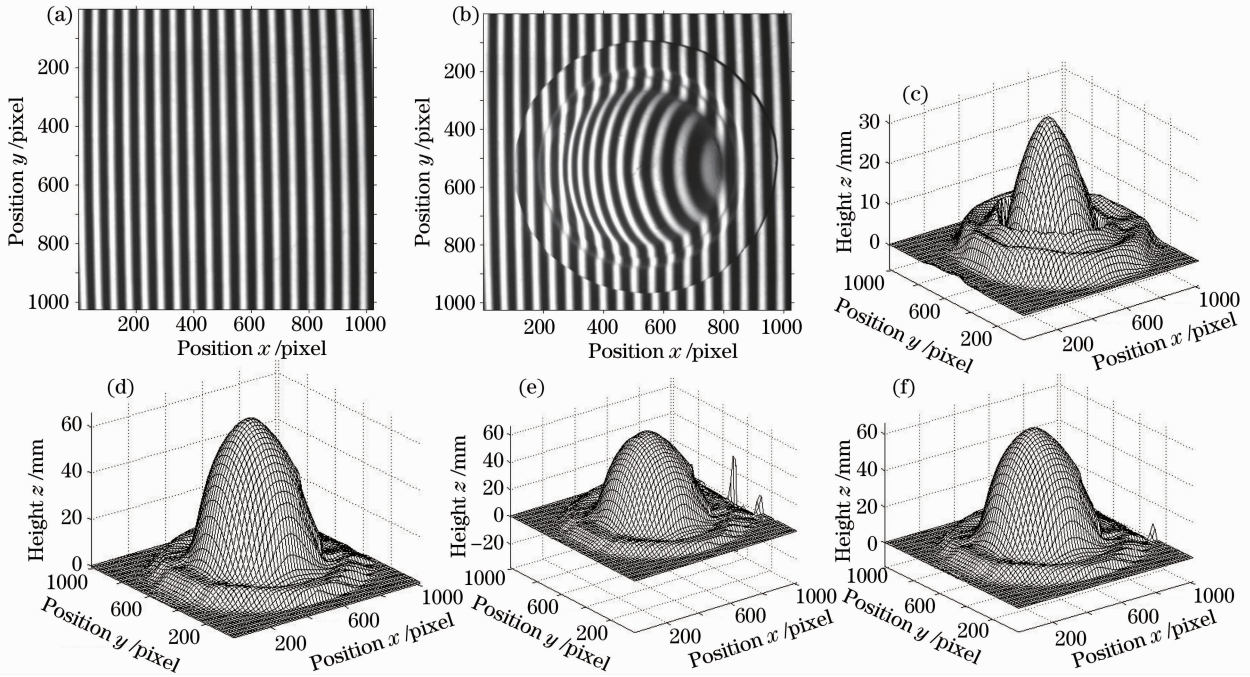


图 10 实验结果。(a) CCD 采集到的参考条纹;(b) CCD 采集到的变形条纹;(c)傅里叶变换方法重建面形;(d)基于 FFT 算法的 S 变换“脊”处理方法的重建面形;(e)基于 WT 算法的 S 变换“脊”处理方法的重建面形(未选择合适的尺度间隔);(f)基于 WT 算法的 S 变换“脊”处理方法的重建面形(尺度间距为 2)

Fig. 10 Experimental results. (a) Reference fringe pattern taken by CCD; (b) deformed fringe pattern taken by CCD; (c) reconstructed surface by FTP; (d) reconstructed surface by S transform ridge method based on FFT; (e) reconstructed surface by S transform ridge method based on WT (without an appropriate scale interval); (f) reconstructed surface by S transform ridge method based on WT when the scale interval equals 2

研究了基于 WT 算法的 S 变换轮廓术的关键技术——尺度因子的选择方法,给出了理论分析,并同 FTP 和基于 FFT 算法的 S 变换轮廓术结果进行了比较。计算机模拟和初步实验的结果证实了所提方法的可行性。

参 考 文 献

- 1 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999. 306~338
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 306~338
- 2 Sai Siva Gorthi, Pramod Rastogi. Fringe projection techniques; whither we are? [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2010, **48**(2): 133~140
- 3 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse object[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 4 Yu Ruizhi, Cao Yiping. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1139~1143
喻睿智, 曹益平. 一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J]. 光子学报, 2008, **37**(6): 1139~1143
- 5 M. Takeda, K. Motoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 6 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer based topography and interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 7 Xianyu Su, Wenjing Chen. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2001, **35**(5): 263~284
- 8 Kemao Qian. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(13): 2695~2702
- 9 Jingang Zhong, Jia Weng. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of wavelet transform[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2560~2562
- 10 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
- 11 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
- 12 R. G. Stockwell, L. Mansinha, R. P. Lowe. Localization of the complex spectrum; the S-transform[J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1996, **44**(4): 998~1001
- 13 Jiang Mohua, Chen Wenjing, Zheng Zhiping. Research of phase demodulation technique based on S-transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412001
- 蒋模华, 陈文静, 郑志平. 基于 S 变换的解相技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412001
- 14 Zhong Min, Chen Wenjing, Jiang Mohua. S-transform profilometry eliminates nonlinear error in deformed fringe pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112003
- 钟敏, 陈文静, 蒋模华. S 变换轮廓术中消除条纹非线性影响的方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112003
- 15 Sergi Ventosa, Carine Simon, Martin Schimmel *et al.*. The S-transform from a wavelet point of view[J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2008, **56**(7): 2771~2774
- 16 Sikun Li, Xianyu Su, Wenjing Chen. Wavelet ridge techniques in optical fringe pattern analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(6): 1245~1254