

提高二维 S 变换轮廓术测量精度的方法

韩梦奇, 陈文静*

四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610064

摘要 S 变换轮廓术是一种采用无损可逆时频技术来获取物体三维面形的方法。该方法利用 S 变换的多分辨率特性, 从单幅条纹中高精度地提取相位信息, 重建物体的三维面形。分析了影响 S 变换轮廓术精度的因素, 提出采用分段均值和曲线拟合的方法来抑制条纹背景分量, 在 S 变换核函数中引入调节因子来进一步提高 S 变换的时频分辨能力。模拟和实验均验证了所提方法能更准确地得到 S 变换系数, 提高物体三维面形的重建精度。

关键词 测量; 结构光投影; 三维面形测量; S 变换; 条纹分析; 相位计算

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1012001

Improving Measurement Accuracy of Two-Dimensional S-Transform Profilometry

Han Mengqi, Chen Wenjing*

Department of Optoelectronic Science and Technology, College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract S-transform profilometry is a three-dimensional shape reconstruction method based on a lossless and reversible time-frequency technology. This method, a multiresolution technique, can reconstruct the three-dimensional shape of the tested object using the phase information demodulated from a single-shot fringe pattern. Herein, we analyze the factors that may affect the accuracy of S-transform profilometry. Piecewise-mean and curve-fitting methods are proposed to eliminate the background intensity of the fringe. In addition, adjusting factors are introduced into the S-transform kernel function to improve the time-frequency resolution. Simulation and experimental results verify that the proposed method exhibits high accuracy of three-dimensional shape reconstruction because of accurate S-transform coefficients.

Key words measurement; structured light projection; three-dimensional shape measurement; S-transform; fringe analysis; phase calculation

OCIS codes 120.6650; 100.2650; 100.7410

1 引 言

基于结构光投影的主动光学三维测量技术具有非接触、全场分析、分辨率高等优点, 广泛用于地质勘探、生物医学、机器视觉等领域^[1-3]。早期出现的方法主要有相位测量轮廓术(PMP)^[4-5]及傅里叶变换轮廓术(FTP)^[6-7]。FTP 可以从一帧条纹图中计算出被测物体的三维面形信息, 测量速度快, 适用于实时、动态过程的测量。但当被测物体的高度变化率导致变形条纹的变形度较大时, 条纹将出现明显的非平稳特征。采用傅里叶变换处理这类条纹时, 频谱混叠问题的出现, 会导致出现大的面形重建错

误。为了弥补 FTP 的不足, 一些时频分析技术被引入到三维面形测量领域, 如窗口傅里叶变换^[8-9]、小波变换轮廓术^[10-11]以及 S 变换轮廓术^[12-20]等。

S 变换是一种无损可逆的、具有多分辨率特点的时频技术, 可以将它看作是介于窗口傅里叶变换和小波变换之间的一种变换方法。信号的 S 变换的频谱不仅与信号的傅里叶变换谱有着直接的联系^[12-13], 还与信号小波变换系数之间存在联系^[14]。S 变换轮廓术利用信号的 S 变换系数来重建被测物体的三维面形, 分为“脊”分析方法^[15]和“滤波”方法^[16]。文献^[17]给出了这两种处理方法的详细对比。S 变换轮廓术弥补了 FTP 的不足, 成为一种高

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-05-23; 录用日期: 2019-06-10

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项(2013YQ490879)

* E-mail: chenwj0409@scu.edu.cn

精度的单帧三维面形测量方法。为了进一步提高 S 变换方法测量三维面形的精度,需要抑制条纹背景分量对 S 变换系数计算的影响。本文以二维 S 变换“脊”处理方法为例,对比了全场均值、曲线拟合、分段均值抑制条纹背景的效果,并在 S 变换核函数中引入调节因子来更准确地得到 S 变换系数。模拟和实验证明:在 S 变换轮廓术中,采用曲线拟合和分段均值可抑制条纹背景,再将调节因子引入到 S 变换核函数中,可以提高 S 变换测量的精度。

2 原理及分析

2.1 二维连续 S 变换定义

图像 $h(x, y)$ 的二维 S 变换的定义为^[12-13,17]

$$S(u, v, f_u, f_v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) \omega_{f_u, f_v}(u-x, v-y) \times \exp[-i2\pi(f_u x + f_v y)] dx dy, \quad (1)$$

式中: $h(x, y)$ 为二维待分析信号; f_u 和 f_v 分别为位置 (u, v) 处两个正交方向上的频率因子, $f_u \neq 0, f_v \neq 0$; $\omega_{f_u, f_v}(u-x, v-y) = \frac{|f_u| |f_v|}{2\pi} \times$

$\exp\left(-\frac{f_u^2 x^2}{2} - \frac{f_v^2 y^2}{2}\right)$ 为窗宽受到频率变量 f_u 和 f_v 控制的高斯窗;空间位置坐标变量 u 和 v 分别表示二维高斯窗在 x 轴和 y 轴上的中心位置。由于 f_u 和 f_v 因子自适应调整二维窗口尺寸的大小,在条纹的每个空间位置上,都可以获得对应的一组 S 变换系数。信号的 S 谱与其傅里叶谱之间的关系可表示为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(u, v, f_u, f_v) du dv = H(f_u, f_v), \quad (2)$$

式中: $H(f_u, f_v)$ 为 $h(x, y) \exp[-i2\pi(f_u x + f_v y)]$ 的傅里叶谱。此外,每个位置 (u, v) 对应一组 S 变换系数, S 变换系数为 (f_u, f_v) 的二维函数,其中由 $(f_u, f_v) |_{\max[\text{abs}(S)]}$ 高斯窗得到的 S 谱中的相位与条纹的局部相位接近, $\max[\text{abs}(S)]$ 可以看作是对应的“脊”。可以采用 S“脊”处理方法来获得条纹中的相位。

2.2 结构光投影三角测量基本原理

基于三角原理的结构光三维测量方法的原理光路如图 1 所示。 P_1 为投影仪的出瞳位置, P_2 为相机的入瞳位置。投影仪将结构光条纹投影在物体表面,在另一个方向上, CCD 相机采集受到被测物物体面形调制的变形条纹图。 L_0 为 CCD 相机到参考平面的距离, d 为 P_1 与 P_2 之间的距离, O 为投影仪光

轴与 CCD 相机光轴的交点, D 为物体表面上的一点, C, A 分别为 D 点的反射光线和入射光线的延长线与参考平面的交点。

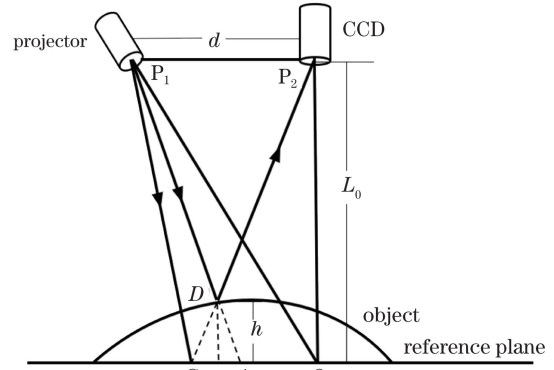


图 1 测量装置图

Fig. 1 Schematic of measurement geometry

不失一般性,投影双频结构条纹时,投影仪和 CCD 采集的条纹可分别表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\pi(f_{0u}x + f_{0v}y) + \phi(x, y)], \quad (3)$$

$$I_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\pi(f_{0u}x + f_{0v}y) + \phi_0(x, y)], \quad (4)$$

式中: $a(x, y)$ 为背景光场; $b(x, y)$ 为条纹对比度; f_{0u} 和 f_{0v} 为条纹在两个正交方向上的载频分量,条纹频率 $f_0 = \sqrt{f_{0u}^2 + f_{0v}^2}$; $\phi(x, y), \phi_0(x, y)$ 分别为 (u, v) 位置处平面和变形条纹中的相位调制。由物体高度分布引起的调制相位 $\Delta\phi(x, y)$ 为

$$\Delta\phi(x, y) = \phi_0(x, y) - \phi(x, y). \quad (5)$$

其中 $\Delta\phi(x, y)$ 截断在 $(-\pi, \pi)$ 之间,需要进行相位展开才能得到连续的相位分布。采用图 1 所示的结构光路,当 $L_0 \gg h(x, y)$ 时,得到 $\Delta\phi(x, y)$ 与 $h(x, y)$ 的映射关系近似为^[1]

$$\Delta\phi(x, y) \approx \frac{2\pi f_0 d}{L_0} h(x, y). \quad (6)$$

如果测量装置的结构光路不满足图 1 的条件,则 $\Delta\phi(x, y)$ 与 $h(x, y)$ 的关系需要通过标定得到^[18]。

3 提高 S 变换轮廓术测量精度的方法

不同于小波变换^[10-11], S 变换系数的计算会受到条纹背景的影响,目前通常采用全场均值来消除背景对 S 变换系数计算的影响^[15-17],即

$$\begin{cases} I_s(x, y) = I(x, y) - \bar{I}_0 \\ \bar{I}_0 = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} I_{kq}(x, y) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $I_s(x, y)$ 为减去背景均值的变形条纹; $I(x, y)$

为 CCD 采集的变形条纹; \bar{I}_0 为全场均值; $I_{kq}(x, y)$ 为条纹行列的表示, $k \subset M, q \subset N, M, N$ 为条纹图像的尺寸。为了提高 S 变换系数提取的可靠性, 引入两种零频抑制方法来消除条纹背景。

3.1 曲线拟合

入射光强受到被测物体的调制, 实际采集的变形条纹图中的背景强度是位置 (x, y) 的函数^[21], 采用全场求均值的方法不能很好地消除条纹的背景强度。本文通过对条纹 $h(x, y)$ 的每一行进行包络拟合来得到条纹的近似背景分布。设 $h(x, y)$ 中的任一行条纹 $h_i(x, y)$ 可表示为

$$h_i(x, y) = a_i(x, y) + b_i(x, y) \times \cos[2\pi(f_{0u}x + f_{0v}y) + \phi_i(x, y)], \quad (8)$$

式中: i 为条纹的行号; $a_i(x, y)$ 、 $b_i(x, y)$ 和 $\phi_i(x, y)$ 分别为第 $f(x, y)$ 段的背景强度、条纹对比度和物体高度分布引起的调制相位。

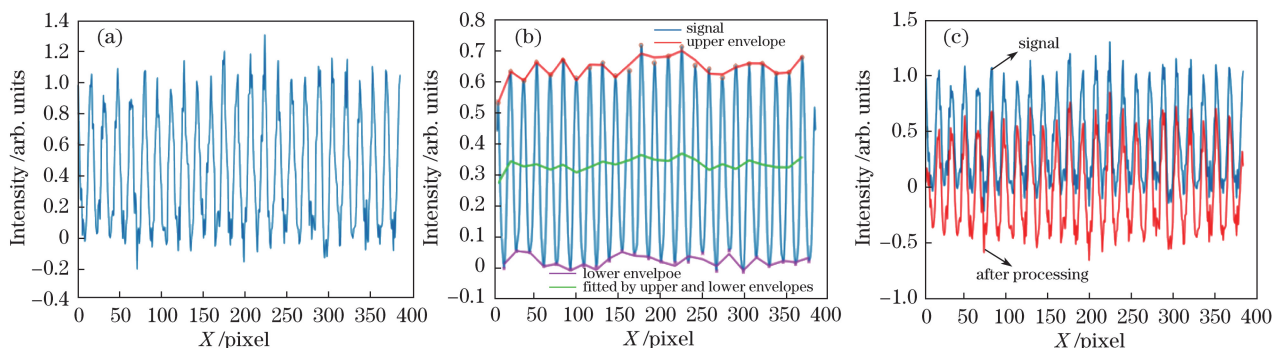


图 2 曲线拟合处理。(a) 其中的一行条纹; (b) 通过极值点得到的条纹的上下包络; (c) 背景消除后的条纹

Fig. 2 Curve-fitting processing. (a) One line of fringes; (b) upper and lower envelopes of fringes obtained by extreme points; (c) background-eliminated fringes

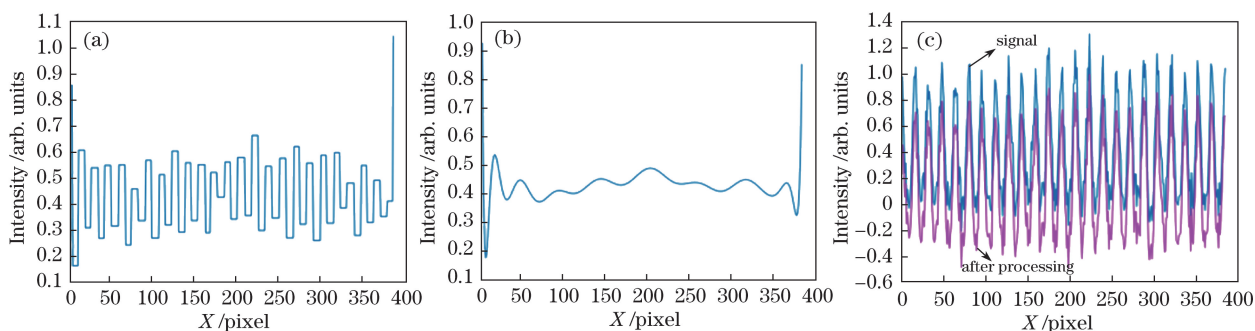


图 3 分段均值处理。(a) 其中一行的分段条纹; (b) 分段拟合后的条纹; (c) 背景消除后的条纹

Fig. 3 Piecewise-mean processing. (a) One line of piecewise fringes; (b) fringes after piecewise fitting; (c) background-eliminated fringes

3.3 在 S 变换核函数中引入调节因子

利用 Pinnegar 等^[19] 提出的广义高斯窗来解调变形条纹的相位。在二维 S 变换中, 引入时频调节因子来进一步调整标准高斯窗。引入的两个调节因子的二维 S 变换时频的表达式为

根据条纹图的背景强度是慢变化函数的特点, 可将局部区域内的背景强度近似为常数, 因此, 找出条纹的上下包络, 采用对条纹的每一行进行拟合来得到每一行的背景分布, 最终得到近似的背景强度。

实际的条纹[图 2(a)]会存在噪声干扰, 需要对条纹进行滤波, 找出条纹的极值点, 得到上下包络[图 2(b)], 再进行拟合背景。最后得到的背景消除条纹后的效果图如图 2(c)所示。

3.2 分段均值

对条纹进行分段处理, 以条纹的半周期为分段长度, 求取分段均值分布, 再拟合条纹背景强度的近似值, 用以抑制条纹的背景强度。对于图 2(a), 采用分段均值得到的背景效果如图 3(a)所示, 分段拟合后的背景曲线如图 3(b)所示, 消除背景后的效果如图 3(c)所示。

$$S(u, v, f_u, f_v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) \frac{|f_u| |f_v|}{2\pi\gamma_x\gamma_y} \times \exp\left[-\frac{f_u^2(u-x)^2}{2\gamma_x^2} - \frac{f_v^2(v-y)^2}{2\gamma_y^2}\right] \times \exp[-i2\pi(f_u x + f_v y)] dx dy, \quad (9)$$

式中： γ_x, γ_y 为调节因子。在 u, v 两个方向分别加入 γ_x, γ_y ，以加强对局部谱的分析能力。两个调节因子的引入使二维 S 变换在条纹处理中更为灵活，可以根据不同的条纹频率以及物体的面形变化改变时频分辨率，得到更好的重建效果。

引入调节因子后，时域中高斯窗的宽度为 $(\Delta x) = \sqrt{2}\gamma_x/2f_u, (\Delta y) = \sqrt{2}\gamma_y/2f_v$ ，而频域中高斯窗的宽度为 $(\Delta\alpha) = \sqrt{2}f_u/4\pi\gamma_x, (\Delta\beta) = \sqrt{2}f_v/4\pi\gamma_y$ 。当 $\gamma_x(\gamma_y)$ 的取值大于 1 时，时域中高斯窗函数在 $x(y)$ 方向上的窗宽变大，强度变小；当 $\gamma_x(\gamma_y)$ 的取值小于 1 时，时域中高斯窗函数的变化与上述相反。 $\gamma_x(\gamma_y)$ 因子在频域引起的窗口变换与时域情况下相反。由上面的时(频)窗宽的表达式可见， $\gamma_x(\gamma_y)$ 因子的引入，会对高斯窗宽的时频分辨率进行进一

步调整。但是 $\gamma_x(\gamma_y)$ 不能设置的过大(或小)，否则会导致高斯窗的变时(频)分辨率降低。在处理条纹时，可将 $\gamma_x(\gamma_y)$ 设置在 0.4~1.5 范围内，按设定的步距来计算 S 变换系数，再寻找 S 变换系数的“脊”值。本文推导了双调节因子的二维 S 变换相位表达式(以“脊”方法为例)。在 (u, v) 附近， $h(x, y)$ 中的 $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 变化缓慢，如果采用前面的背景抑制方法，则有 $a(x, y) \approx a(u, v) \approx 0, b(x, y) \approx b(u, v)$ 。在 (u, v) 处对相位 $\phi(x, y)$ 进行二维泰勒展开，则一阶近似为

$$\phi(x, y) \approx \phi(u, v) + \phi'_x(u, v)(x - u) + \phi'_y(u, v)(y - v)。 \quad (10)$$

将(3)式和(10)式代入 S 变换系数表达式[(9)式]中，推导后可得

$$S(u, v, f_u, f_v) = S_1(u, v, f_u, f_v) + S_2(u, v, f_u, f_v), \quad (11)$$

$$S_1(u, v, f_u, f_v) = \frac{1}{2}b(u, v) \exp\{i[\phi(u, v) + 2\pi(f_{0u} - f_u)u + 2\pi(f_{0v} - f_v)v]\} \times \exp\left\{-\frac{[\phi'_x(u, v) + 2\pi(f_{0u} - f_u)]^2\gamma_x^2}{2f_u^2}\right\} \exp\left\{-\frac{[\phi'_y(u, v) + 2\pi(f_{0v} - f_v)]^2\gamma_y^2}{2f_v^2}\right\}, \quad (12)$$

$$S_2(u, v, f_u, f_v) = \frac{1}{2}b(u, v) \exp\{-i[\phi(u, v) + 2\pi(f_{0u} - f_u)u + 2\pi(f_{0v} - f_v)v]\} \times \exp\left\{-\frac{[\phi'_x(u, v) + 2\pi(f_{0u} + f_u)]^2\gamma_x^2}{2f_u^2}\right\} \exp\left\{-\frac{[\phi'_y(u, v) + 2\pi(f_{0v} + f_v)]^2\gamma_y^2}{2f_v^2}\right\}。 \quad (13)$$

设 f_{ur} 和 f_{vr} 为频域变量，当 $f_{ur} = f_{0u} + \phi'_x(u, v)/(2\pi), f_{vr} = f_{0v} + \phi'_y(u, v)/(2\pi)$ 时，S 变换系数 $S(u, v, f_u, f_v)$ 的模取得最大值 $S_1(u, v, f_u, f_v)$ ，而

$$\exp\left\{-\frac{[\phi'_x(u, v) + 2\pi(f_{0u} + f_u)]^2\gamma_x^2}{2f_u^2}\right\} \times \exp\left\{-\frac{[\phi'_y(u, v) + 2\pi(f_{0v} + f_v)]^2\gamma_y^2}{2f_v^2}\right\} \approx 0, \quad (14)$$

即 $S_2(u, v, f_u, f_v) \approx 0$ 可忽略，则 S 变换系数为 $S_g(u, v, f_u, f_v)$ ，即 S 变换的“脊”。 (u, v) 的相位由反正切函数得出，为

$$\phi(u, v, f_{ur}, f_{vr}) = \arctan\left\{\frac{\text{Im}[S_{gr}(u, v, f_{ur}, f_{vr})]}{\text{Re}[S_{gr}(u, v, f_{ur}, f_{vr})]}\right\} = 2\pi(f_{0u} - f_{ur})u + 2\pi(f_{0v} - f_{vr})v + \phi(u, v), \quad (15)$$

式中： $\text{Im}[S_{gr}(u, v, f_{ur}, f_{vr})]$ 为 S 变换系数的虚部； $\text{Re}[S_{gr}(u, v, f_{ur}, f_{vr})]$ 为 S 变换系数的实部。即 (u, v) 相位表达为

$$\phi(u, v) = \phi(u, v, f_{ur}, f_{vr}) + 2\pi(f_{ur} - f_{0u})u + 2\pi(f_{vr} - f_{0v})v。 \quad (16)$$

调节因子的引入使得窗函数的时频宽度更好调节^[15]，并提高了 S 变换系数的计算精细度，但不改变条纹的相位分布。

3.4 二阶相位修正

在前面的相位提取公式中，由于利用泰勒一阶近似来表示局部相位，故在物体高度变化率较大的区域，会存在较大的相位计算误差。为了应对这种情况，需要对采用二维 S 变换得到的条纹相位进行二阶相位修正。通过推导，采用二阶泰勒展式修正得到了物体的展开相位，其表达式为

$$\phi(u, v) = \text{unwrap}\left[\phi_S(u, v, f_{ur}, f_{vr}) + 2\pi(f_{ur} - f_{0u})u + 2\pi(f_{vr} - f_{0v})v - \frac{1}{2}\arctan\frac{\phi''_x(u, v)}{f_{ur}^2} - \frac{1}{2}\arctan\frac{\phi''_y(u, v)}{f_{vr}^2}\right], \quad (17)$$

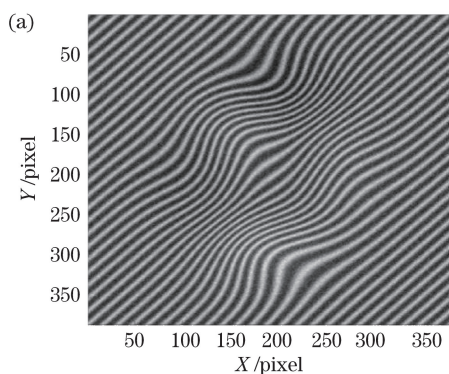
式中： $\phi_S(u, v, f_{ur}, f_{vr})$ 为截断相位； $\phi''_x(u, v)$ 、

$\phi_y''(u, v)$ 为 $\phi_x(u, v)$ 二阶泰勒展开式中的项; $\text{unwrap}[\cdot]$ 表示相位展开操作, 可采用不同的展开算法来实现。当 S 变换遍历整幅条纹后将得到连续相位 $\phi(x, y)$, 最后根据高度-相位关系即可计算出物体高度。从修正后的相位中得到的物体高度更接近物体的实际高度, 特别是在被测物体高度变化率较大的地方。

4 计算机模拟

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 $L_0/d=1$, 模拟的物体高度为

$$\begin{cases} Z = 2.5 \times \text{Peaks}(x, y) \\ \text{Peaks}(x, y) = 3(1-x)^2 \exp\{-x^2 - (y+1)^2 - 10(x/5 - x^3 - y^5)\} \times \exp(-x^2 - y^2) - (1/3) \times \exp[-(x+1)^2 - y^2] \end{cases} \quad (18)$$



条纹载频 $f_0=1/16$, 条纹尺寸为 $384 \text{ pixel} \times 384 \text{ pixel}$ 。考虑到被测物体高度变化引起的条纹不均匀性、噪声以及非线性的影响^[21], 在变形条纹中加入 $0.05Z$ 来表示条纹的背景强度。模拟的变形条纹表示为

$$I(x, y) = 0.05Z + \{0.5 + 0.5 \cos[2\pi f_0(x + y) + Z]\}^R + n(x, y), \quad (19)$$

式中: $R=1.5$ 表示非线性的影响; $n(x, y)$ 为 0.1 倍的随机高斯噪声。

模拟的物体和条纹如图 4 所示。

分别采用前面提到的方法来消除背景对 S 变换系数的影响, 得到的重建物体的面形以及误差图分别如图 5~9 所示。图 5 为采用全场均值方法去除背景后的重建结果和误差。图 6 为采用曲线拟合方法去除背景后的重建结果和误差。图 7 为采用分段拟合方法去除背景后的重建结果和误差。

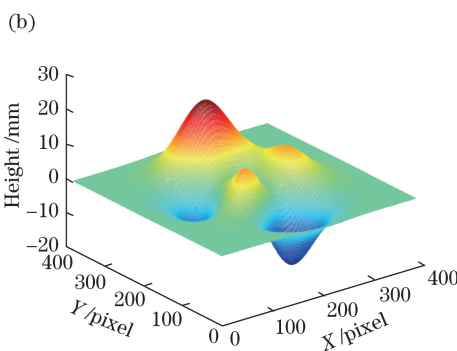


图 4 模拟的物体和条纹。(a) 变形条纹; (b) 模拟的物体

Fig. 4 Simulated object and fringes. (a) Deformed fringes; (b) simulated object

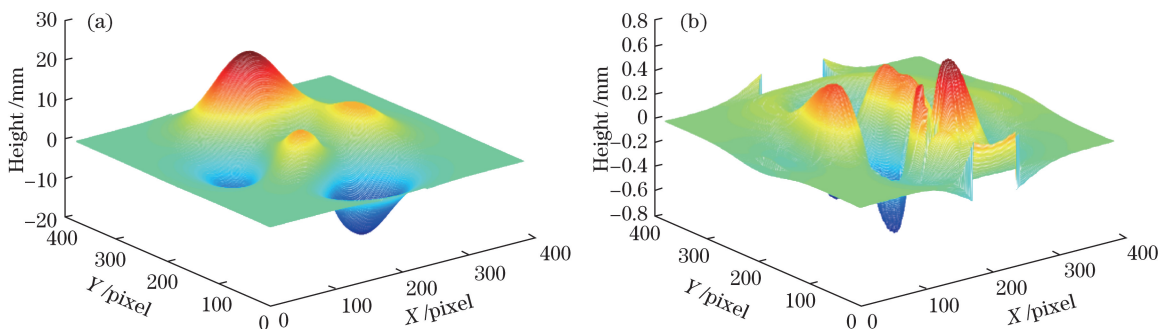


图 5 全场均值重建的物体及重建误差。(a) 重建的物体; (b) 重建误差

Fig. 5 Reconstructed object by global-mean processing and reconstruction error.

(a) Reconstructed object; (b) reconstruction error

采用分段均值方法抑制背景强度后, 引入一个调节因子(只调整一个方向的高斯窗宽)来重建面形, 结果如图 8 所示。图 9 为引入两个调节因子重建的结果及重建误差。

表 1 给出了分别采用傅里叶变换和前面提到的几种改进 S 变换方法的最大误差、平均误差、方差和

所用计算时间。

当噪声为 0.2 倍高斯噪声时, 以上方法均能重建出面形, 两个调节因子方法的重建效果最好, 其最大重建误差、平均误差、标准差分别为 0.36406, 0.043636, 0.074474 mm。

下面采用模拟进行验证; 当物体的高度变化率大

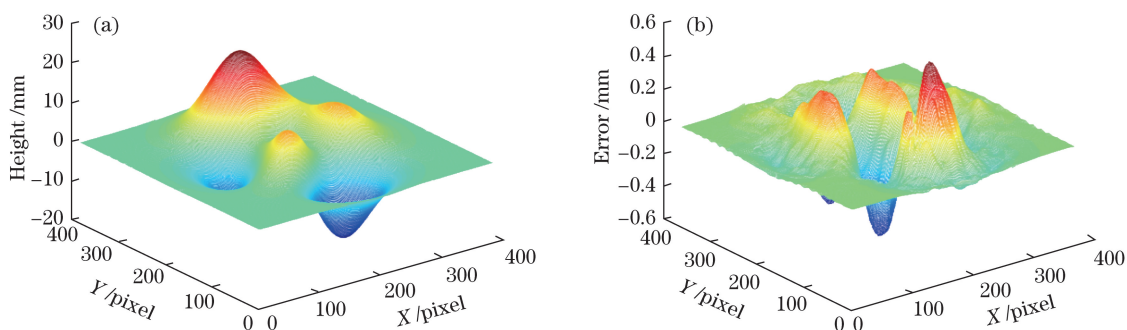


图 6 曲线拟合重建的物体及重建误差。(a)重建的物体;(b)重建误差

Fig. 6 Reconstructed object by curve-fitting processing and reconstruction error. (a) Reconstructed object; (b) reconstruction error

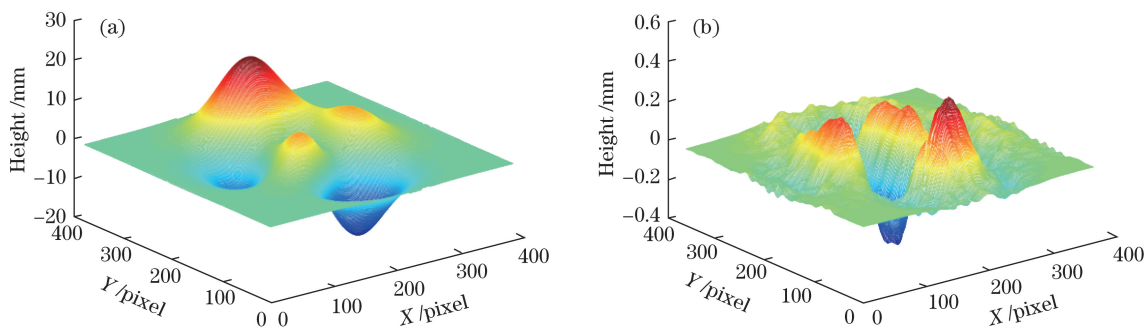


图 7 分段均值方法重建的物体和重建误差。(a)重建的物体;(b)重建误差

Fig. 7 Reconstructed object by piecewise-mean processing and reconstruction error.

(a) Reconstructed object; (b) reconstruction error

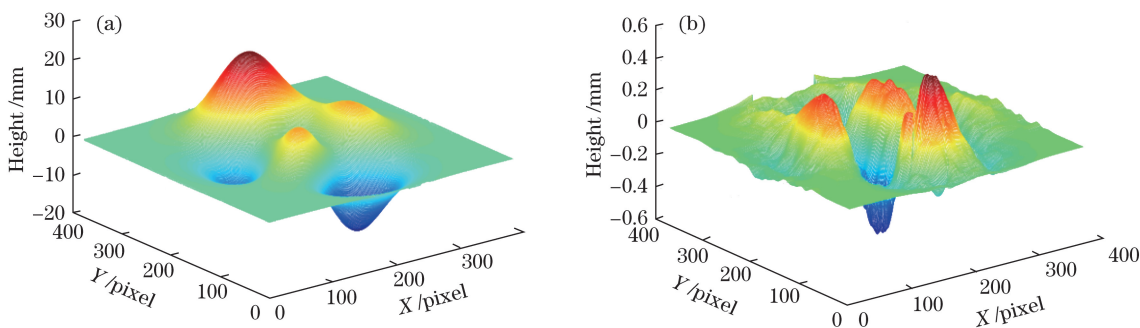


图 8 一个调节因子方法重建的物体及重建误差。(a)重建的物体;(b)重建误差

Fig. 8 Reconstructed object by one-adjusting-factor processing and reconstruction error. (a) Reconstructed object;

(b) reconstruction error

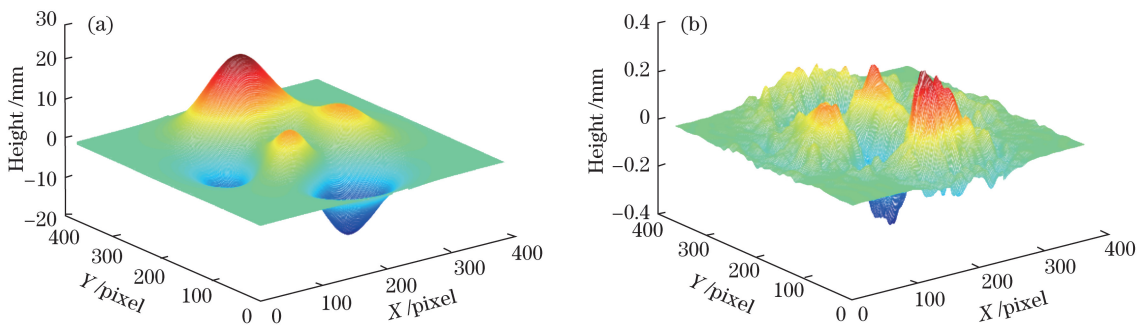


图 9 两个调节因子方法重建的物体及重建误差。(a)重建的物体;(b)重建误差

Fig. 9 Reconstructed object by two-adjusting-factor processing and reconstruction error.

(a) Reconstructed object; (b) reconstruction error

表 1 几种方法的结果对比

Table 1 Comparison of results by several methods

Method	Maximum error /mm	Mean of error /mm	Standard deviation /mm	Time /s
Fourier transform	7.36140	0.178190	0.495160	7.503960
Global mean	0.75495	0.106940	0.175780	14.120838
Curve-fitting	0.56657	0.072519	0.130660	25.083935
Piecewise mean	0.40549	0.055582	0.098196	20.676546
One factor	0.52737	0.073518	0.127150	12.993006
Two factors	0.36769	0.041162	0.077612	10.702224

时,采用二阶相位修正能提高 S 变换轮廓术的重建精度。模拟物体的高度调整为 $Z = 3.0 \times \text{Peaks}(x, y)$,

经过分段均值处理,并引入两个调节因子,修正前后的结果分别为图 10、11 所示。表 2 给出了结果的对比。

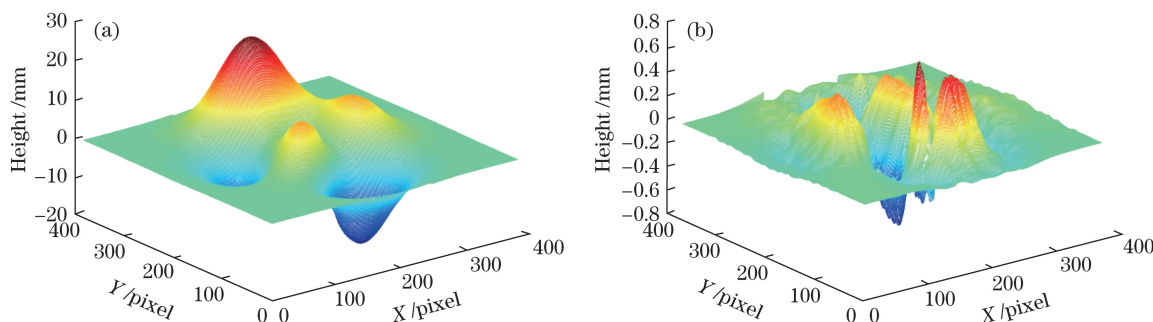


图 10 相位未修正时重建的物体及重建误差。(a)重建的物体;(b)重建误差
Fig. 10 Reconstructed object with uncorrected phase and reconstruction error.

(a) Reconstructed object; (b) reconstruction error

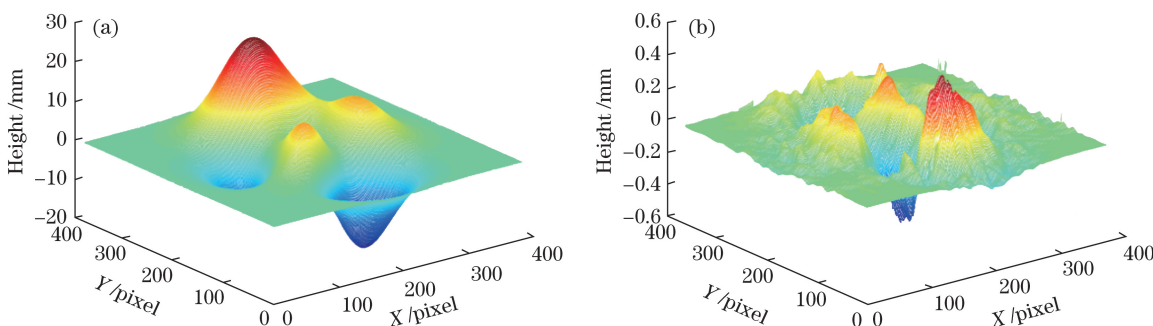


图 11 二阶相位修正后重建的物体及重建误差。(a)重建的物体;(b)重建误差
Fig. 11 Reconstructed object with second-order corrected phase and reconstruction error.

(a) Reconstructed object; (b) reconstruction error

表 2 二阶相位修正前后的结果对比

Table 2 Comparison of results before and after second-order phase correction

Parameter	Second-order modified	Unmodified
Maximum error /mm	0.512370	0.799370
Mean of error /mm	0.054201	0.094652
Standard deviation /mm	0.096853	0.157670
Time /s	10.343965	2.912564

由上述计算机模拟结果可见,分段均值、曲线拟合在精度上都有所提高,代价是计算时间相对较长。当需要从一帧条纹中高精度重建物体的面形时,修正的 S 变换值得推荐。

5 实验验证

通过实验进一步验证本文所提方法的有效性。实验中被选定的物体为一个猫脸面具。投影装置投影正弦条纹到被测物体表面,CCD 采集的参考条纹和

变形条纹经裁剪后尺寸为 700 pixel×700 pixel,如图 12所示。将采用几种改进的 S 变换方法得到的

结果和傅里叶变换结果以及相移测量结果进行对比,结果如图 13 所示。

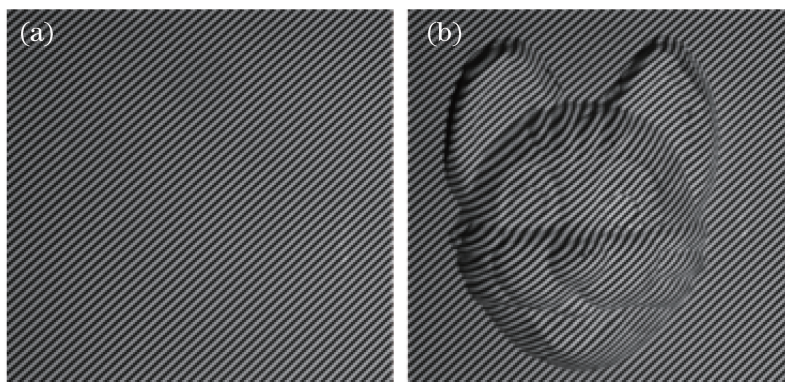


图 12 实验。(a)参考条纹图;(b)变形条纹图

Fig. 12 Experiment. (a) Reference fringes; (b) deformed fringes

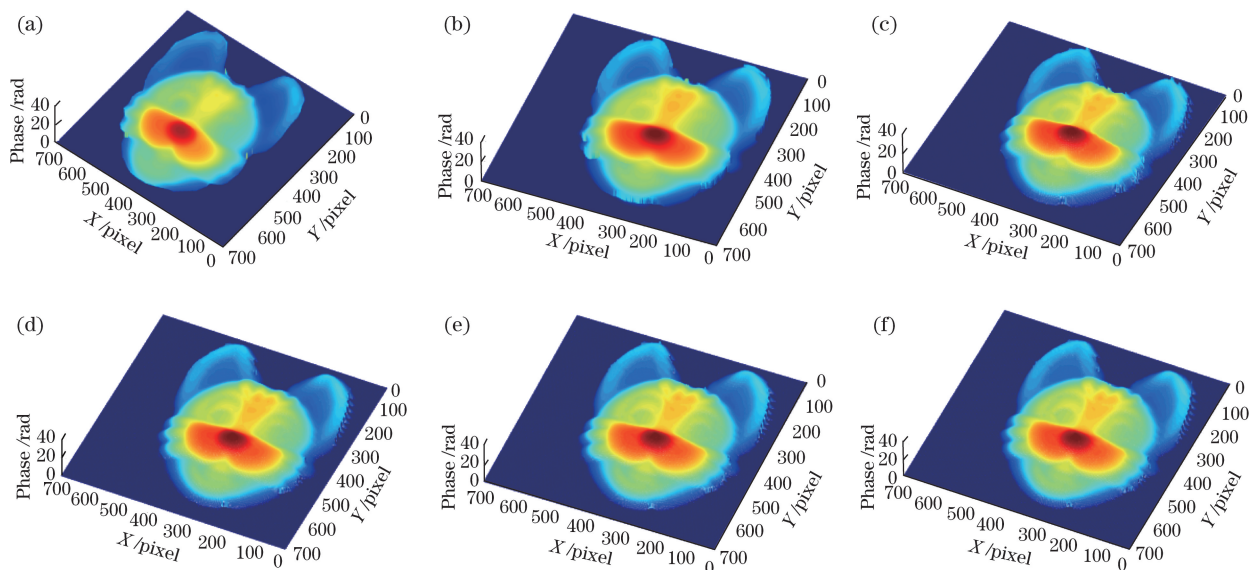


图 13 多种方法的重建结果。(a)傅里叶变换重建;(b)全场均值重建;(c)曲线拟合重建;(d)分段重建;
(e)一个调节因子;(f)两个调节因子

Fig. 13 Reconstructions by multiple methods. (a) Reconstruction by Fourier transform; (b) reconstruction by global mean;
(c) reconstruction by curve fitting; (d) reconstruction by piecewise mean; (e) reconstruction by one adjusting
factor; (f) reconstruction by two adjusting factors

由图 13 中的重建效果可以看出,几种方法均能重建出面形变换平缓的表面。为了对比重建的精度,将实验结果与八步相移算法 PMP 的结果进行对比。高步相移由于精度高,测量结果通常可以作为标准^[18]。其余方法的结果与其进行减运算后的误差如图 14 所示。相减之后误差的标准差如表 3

所示。

由表 3 可以看出,FTP 重建的面形由于细节损失重建,误差较大,S 变换方法的物体细节保留较好,特别是引入双调节因子的 S 变换轮廓术。为了更直观地显示,图 15 绘出了第 220 行的重建面形及局部细节放大。

表 3 几种方法与相移作差的标准差

Table 3 Standard deviation between multiple methods and PMP

Method	Fourier transform	Global mean	Curve-fitting	Piecewise mean	One factor	Two factors
Standard deviation /mm	2.6877	0.4628	0.2984	0.2774	0.3047	0.2745

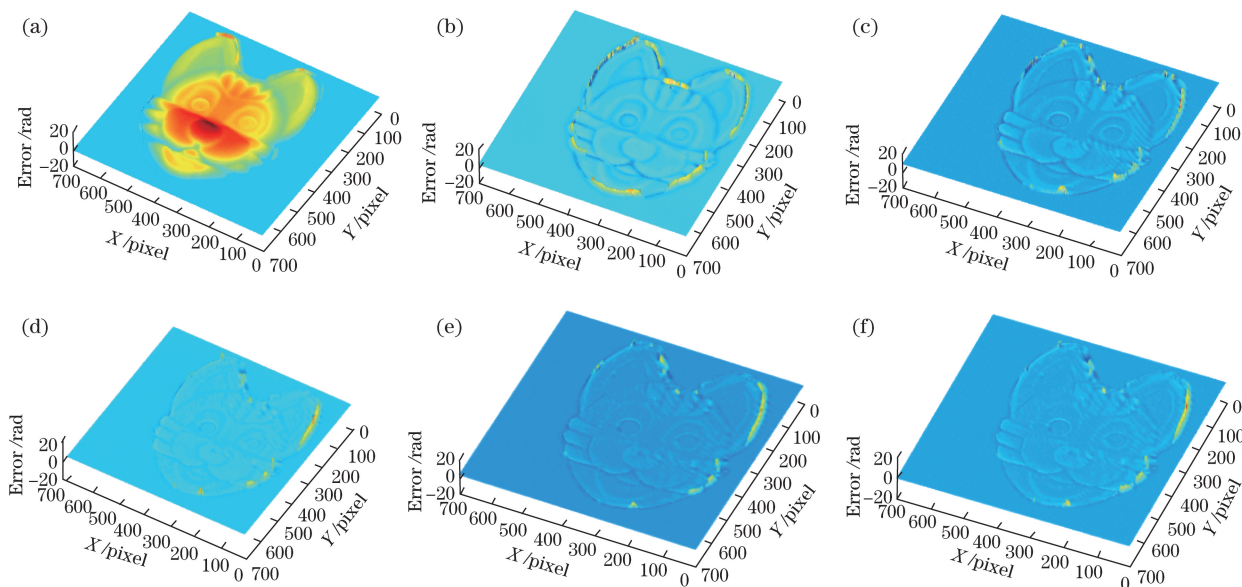


图 14 多种误差。(a)傅里叶变换误差;(b)全场均值重建误差;(c)曲线拟合重建误差;(d)分段重建误差;(e)一个调节因子重建误差;(f)两个调节因子重建误差

Fig. 14 Errors of reconstructions by multiple methods. (a) Reconstruction error by Fourier transform; (b) reconstruction error by global mean; (c) reconstruction error by curve fitting; (d) reconstruction error by piecewise mean; (e) reconstruction error by one adjusting factor; (f) reconstruction error by two adjusting factors

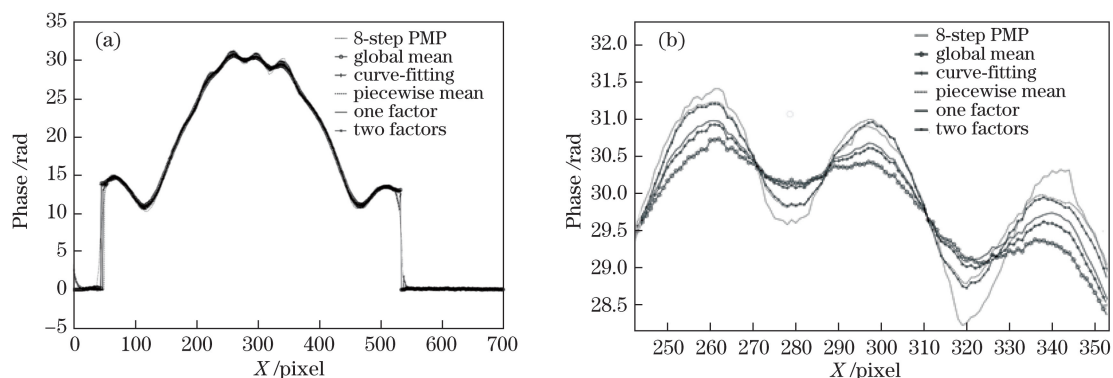


图 15 细节对比。(a)第 220 行重建面形 (b)局部细节放大

Fig. 15 Detailed comparisons. (a) Line 220 reconstructed surface; (b) magnification of local detail

放大重建物体顶部的细节后可知重建结果与前面的分析、模拟一致。

6 结 论

研究了 S 变换轮廓术中抑制条纹背景分量的方法,并在 S 变换核函数中通过引入调节因子更准确地得到了 S 变换系数,提高了物体三维面形的重建精度。计算机模拟和实验验证结果表明:在相同的条件下,分段均值与双调节因子的方法得到的 S 变换的谱更准确,二维 S 变换的三维面形的测量精度最高,但计算耗时稍大。改进的二维 S 变换由于只需要采集一帧条纹,测量时间短,在动态测量中比 PMP 具有更大的优势。

参 考 文 献

- [1] Su X Y, Li J T. Information optic[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] Jin G F, Li J Z. Laser metrology[M]. Beijing: Science Press, 1998: 337.
金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 337.
- [3] 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.
- [4] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated

- phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [5] He Y H, Cao Y P, Zhong L J, *et al.* Improvement on measuring accuracy of digital phase measuring profilometry by frequency filtering [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 220-224.
何宇航, 曹益平, 钟立俊, 等. 采用频域滤波提高数字相位测量轮廓术的测量精度[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 220-224.
- [6] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [7] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35(5): 263-284.
- [8] Fu Y H, Chen W J, Su X Y. Windowed Fourier transform for 3-D shape measurement[J]. Laser Journal, 2006, 27(1): 39, 41.
付艳华, 陈文静, 苏显渝. 窗口傅里叶变换的三维面形测量[J]. 激光杂志, 2006, 27(1): 39, 41.
- [9] Qian K M. Two-dimensional windowed Fourier frames for noise reduction in fringe pattern analysis[J]. Optical Engineering, 2005, 44(7): 075601.
- [10] Zhang P, Zhang W. Efficient very large scale integration architecture of multi-level discrete wavelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0412004.
张盼, 张为. 多级离散小波变换的高效超大规模集成架构[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0412004.
- [11] Zhang C, Chen W J. Method for improving measurement accuracy of wavelet transform profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0712002.
张诚, 陈文静. 提高小波变换轮廓术测量精度的方法[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0712002.
- [12] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [13] Mansinha L, Stockwell R G, Lowe R P, *et al.* Local S-spectrum analysis of 1-D and 2-D data[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1997, 103(3/4): 329-336.
- [14] Ventosa S, Simon C, Schimmel M, *et al.* The S-transform from a wavelet point of view[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(7): 2771-2780.
- [15] Jiang M H, Chen W J, Zheng Z P. 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.
- [16] Zhong M, Chen W J, Su X Y, *et al.* Optical 3D shape measurement profilometry based on 2D S-transform filtering method[J]. Optics Communications, 2013, 300: 129-136.
- [17] Song M S, Chen W J. Application of two-dimensional S-transform in optical 3D shape measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041206.
宋梦洒, 陈文静. 二维 S 变换在光学三维面形测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041206.
- [18] Zhao W J, Su X Y, Chen W J. Discussion on accurate phase-height mapping in fringe projection profilometry[J]. Optical Engineering, 2017, 56(10): 104109.
- [19] Pinnegar C R, Mansinha L. The Bi-Gaussian S-transform[J]. Siam Journal on Scientific Computing, 2006, 24(5): 1678-1692.
- [20] Luo F, Chen W J, Su X Y. Improve measurement range and accuracy of Fourier transform profilometry by Hilbert transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110701.
骆凤, 陈文静, 苏显渝. 利用 Hilbert 变换提高傅里叶变换轮廓术的测量范围和精度[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110701.
- [21] Wang T, Chen W J, Zhong M, *et al.* 2D S-transform profilometry based on the structured light projection[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1207002.
王焘, 陈文静, 钟敏, 等. 基于结构光投影的二维 S 变换轮廓术[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1207002.