

改进的三步空域准相移单帧条纹位相解调技术

马 晓¹ 张子邦¹ 钟金钢^{1,2}

¹暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632

²光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632

摘要 三步空域准相移技术是一种单帧相位解调技术,适用于动态条纹相位分析。本文在已有的三步空域准相移技术的基础上,提出了一种改进的三步空域准相移技术。改进后,在计算每个像素点相位时,可以根据具体情况,灵活选择邻域范围,调节所使用像素点的个数,有利于噪声的隔离,避免误差的传播,从而提高动态条纹分析中相位解调的精度。

关键词 测量; 条纹分析; 相移; 相位测量

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.091203

Improved Three-Step Spatial Quasi-Phase-Shifting Technique for Single-Frame Fringe Analysis

Ma Xiao¹ Zhang Zibang¹ Zhong Jingang^{1,2}

¹Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

²Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract Three-step spatial quasi-phase-shifting technique is able to demodulate the phase from a single frame of fringe pattern. This technique is suitable for dynamic fringe analysis. An improved three-step spatial quasi-phase-shifting technique is presented in this paper. According to actual situation, the number of pixels and the size of neighborhood are able to be tuned arbitrarily to calculate the phase of each pixel. It is conducive to the noise isolation, the error-propagation prevention, and the accuracy improvement in phase demodulation for dynamic fringe analysis.

Key words measurement; fringe analysis; phase shift; phase measurement

OCIS codes 120.2650; 050.5080; 120.5050

1 引言

条纹投影轮廓术通过使用条纹相位解调技术,实现表面形貌测量,被广泛应用于工业、医学和科研等领域。目前所使用的条纹相位解调技术,根据所使用的算法不同,可以分为多帧和单帧条纹算法两类。多帧条纹算法,如时域相移算法(TPS)^[1],尽管相位解调精度较高,但很难用于动态条纹分析中。基于单帧条纹算法的相位解调技术,更适用于动态条纹信号的相位解调。在单帧条纹算法中,一个像素点携带的噪声,会影响到其邻域的相位计算。因此,单帧条纹算法的相位解调精度与其空间局域性有关。所谓空间局域性,是在单帧位相解调算法中,每个像素点的相位计算,需要使用以该点为中心的多个邻域像素点进行计算,而这个邻域的宽度或参与计算的邻域像素点个数,就表征了空间局域性的高低。对于单帧条纹算法,其空间局域性是必须要考虑的因素。目前单帧条纹算法,包括傅里叶变换算法(FT)^[2]、窗口傅里叶变换算法(WFT)^[3-7]、小波变换算法(WT)^[8-14]、次条纹积分算法(SI)^[15-16]。其中傅里叶变换算法是一种全局变换,不具有空间局域性,对于一维傅里叶变换而言,一个像素点携带的噪声,会影响到一维信号所有像素点的相位计算。针对这个问题,窗口傅里叶变换算法和小波变换算法被提出,其空间局域性在数个条纹周期之间。对于窗口傅里

收稿日期: 2015-03-15; 收到修改稿日期: 2015-04-05; 网络出版日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61475064, 41206081)、广东省科技计划项目(2013B060100001)

作者简介: 马 晓(1988—),男,硕士研究生,主要从事光电信息技术方面的研究。E-mail: mx_jn2007@163.com

导师简介: 钟金钢(1964—),男,博士,教授,主要从事光电信息技术方面的研究。E-mail: tzjg@jnu.edu.cn(通信联系人)

叶变换算法,空间局域性取决于窗口的选择,而窗口宽度的最优选择又是一个新的问题。小波变换算法的空间局域性与条纹信号的载频有关^[14]。次条纹积分算法的空间局域性约为一个条纹周期,这种算法将条纹的一个周期分成四个相邻的区间进行积分,然后计算相位,但是这种算法没有严格的条纹周期估计过程,在计算中遇到相位变化较快的区域,就会导致频率失配,产生误差。最近一种单帧的三步空域准相移(SQPS)技术^[17]被提出,这种技术采用条纹信号的调频表达形式,结合三步相移算法,适用于动态条纹的相位解调。然而目前这种算法的空间局域性不能实现连续取值,不能根据信号特点,连续调整算法的空间局域性。因此,本文提出了一种改进的三步空域准相移(ISQPS)技术。这种技术可以实现空间局域性的灵活、连续调节,在动态条纹分析中,有利于提高相位解调的精度。

2 三步空域准相移技术^[17]

通常一维条纹信号可表示为:

$$I(x) = a(x) + b(x)\cos[2\pi f_0 x + \phi(x)], \quad (1)$$

式中 $a(x)$ 和 $b(x)$ 分别表示背景光强和条纹信号的幅值; f_0 代表了条纹信号的载频; $\phi(x)$ 是包含待测信息的调制相位。根据相位与频率间的关系,(1)式也可以表示为:

$$I(x) = a(x) + b(x)\cos[2\pi f_L(x) \cdot x + \phi_L^0(x)], \quad (2)$$

式中 $f_L(x)$ 是瞬时频率, $\phi_L^0(x)$ 是初相位。在大多数情况下, $a(x)$, $b(x)$, $f_L(x)$ 和 $\phi_L^0(x)$ 在一个周期内,变化十分缓慢,几乎可以忽略不计,可以假设: $a(x) \approx a$, $b(x) \approx b$, $f_L(x) \approx \bar{f}_L$, $\phi_L^0(x) \approx \phi_L^0$ 。那么(2)式可以简化为:

$$I(x) = a + b \cos(2\pi \bar{f}_L \cdot x + \phi_L^0). \quad (3)$$

将信号每 k 个像素点划分为一个区间,且区间连续,如图 1 所示(图中每个区间 5 个像素点)。

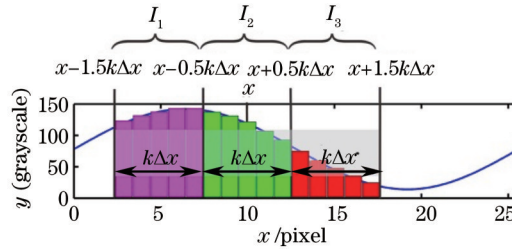


图 1 三步空域准相移算法示意图

Fig.1 Illustration of the SQPS algorithm

对图 1 中每个区间进行光强积分:

$$\begin{cases} I_1 = \int_{x-1.5k\Delta x}^{x-0.5k\Delta x} I(x)dx = A + B \cos(2\pi \bar{f}_L x + \phi_L^0 - 2\pi \bar{f}_L k\Delta x) \\ I_2 = \int_{x-0.5k\Delta x}^{x+0.5k\Delta x} I(x)dx = A + B \cos(2\pi \bar{f}_L x + \phi_L^0) \\ I_3 = \int_{x+0.5k\Delta x}^{x+1.5k\Delta x} I(x)dx = A + B \cos(2\pi \bar{f}_L x + \phi_L^0 + 2\pi \bar{f}_L k\Delta x) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $A = ak\Delta x$, $B = \frac{b}{\pi \bar{f}_L} \cdot \sin(\pi \bar{f}_L k\Delta x)$, I_i 表示第 i 个区间积分后的光强, Δx 代表了探测器的像素尺寸。(4)

式中得到的积分光强之间存在恒定的相位差 $2\pi \bar{f}_L k\Delta x$, 应用三步相移公式,得到三步空域准相移算法的相位计算公式^[17]:

$$\phi(x) = \arctan \left[\frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_3 - I_1} \tan(\pi \bar{f}_L k\Delta x) \right] - 2\pi f_0 x. \quad (5)$$

(5)式中为了求解调制相位 $\phi(x)$,需要使用其他办法进行瞬时频率探测,这里可以使用连续小波变换来探测瞬时频率 \bar{f}_L 。根据空间局域性的定义,三步空域准相移算法的空间局域性为 $L = 3k$,是 3 的整数倍(例如 3, 6, 9, 12, ...),不能根据信号特点,灵活、连续调节算法的空间局域性。

3 改进的三步空域准相移技术

通过上述分析可以看出,由于积分区间的连续划分,不论如何调节 k 值,都不能实现空间局域性的连续取值。因此,需要考虑积分区间存在交叠,或者分开的情况。为了便于重新划分区间,这里引入一个新的变量 n ,当 $n=0$ 时,相当于原有的三步空域准相移算法,此时积分区间是连续划分的,如图1所示。而当 n 是负整数时,积分区间是分开的,如图2所示;当 n 是正整数时,积分区间是相互交叠的,如图3所示。

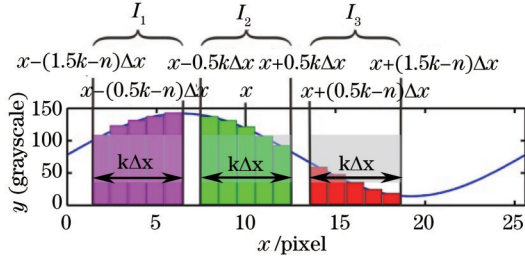


图2 改进的三步空域准相移算法示意图($k=5, n=-1$)

Fig.2 Illustration of the ISQPS algorithm ($k=5, n=-1$)

经过区间的重新划分,积分光强可以表示为:

$$\begin{cases} I_1 = \int_{x-(1.5k-n)\Delta x}^{x-(0.5k-n)\Delta x} I(x)dx = A + B \cos[2\pi\bar{f}_l x + \phi_l^0 - 2\pi\bar{f}_l(k-n)\Delta x] \\ I_2 = \int_{x-0.5k\Delta x}^{x+0.5k\Delta x} I(x)dx = A + B \cos(2\pi\bar{f}_l x + \phi_l^0) \\ I_3 = \int_{x+(0.5k-n)\Delta x}^{x+(1.5k-n)\Delta x} I(x)dx = A + B \cos[2\pi\bar{f}_l x + \phi_l^0 + 2\pi\bar{f}_l(k-n)\Delta x] \end{cases} \quad (6)$$

相邻光强之间仍然存在恒定的相位差 $2\pi\bar{f}_l(k-n)\Delta x$ 。因此,可以得到改进后三步空域准相移算法的相位计算公式:

$$\phi(x) = \arctan\left\{\frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_3 - I_1} \tan[\pi\bar{f}_l(k-n)\Delta x]\right\} - 2\pi f_0 x. \quad (7)$$

改进的三步空域准相移算法的空间局域性为 $L=3k-2n$,参数 k 与 n 之间存在一定的制约关系:根据光强积分原理需满足 $k>n$ 且 $k\geq 1$ 。引入新变量 n 以后,实现了 L 连续取值(例如 24, 25, 26, 27, ...),可以针对不同的信号,通过两个参数的合理选择,实现空间局域性的灵活、连续调节。而且由于两个参数的调节,相同的空间局域性,能够使用不同的参数组合,灵活取得,例如 $L=27$,可以取 $k=7, n=-3$; $k=9, n=0$; $k=13, n=6$; $k=17, n=12$ 等。

4 数值模拟

为了验证改进算法的有效性和优越性,以及分析如何合理选取参数 k 与 n ,首先对数值模拟信号进行了相位解调。使用的条纹信号采用(1)式的形式,其中背景项和幅值项为:

$$\begin{cases} a(x) = 128 - 10(x/3)^2 + 19.2(x/3)^3 - 3.2(x/3)^4 \\ b(x) = 100 \exp(-x^2/36) \end{cases}, \quad (8)$$

调制相位为:

$$\begin{cases} \phi(x) = p(x/100 - 3) \\ p(x) = 3(1-x)^2 \exp(-x^2 - 1) - 10(x/5 - x^3) \exp(-x^2) - 1/3 \exp[-(x+1)^2] \end{cases}, \quad (9)$$

信号的载频 $f_0=0.045$ 。为了验证改进后算法的抗噪能力,在生成的条纹信号上加入高斯白噪声。高斯白噪声的均值和标准差分别为 -0.0805 和 2.3079 。条纹信号光强分布,附加的高斯白噪声,以及调制相位如图4所示。

使用 SQPS 算法和 ISQPS 算法分别对条纹信号进行相位解调,如图5所示。其相位解调误差,如图6所示。图5(a)和图5(d)分别表示采用原有的算法,对于 $k=8$ 和 $k=9$ 的相位解调结果,其空间局域性分别为 $L=24, L=27$,图6(a)和图6(d)分别表示其相位解调误差;图5(b)和图5(c)分别采用改进后的算法,对于 $k=9, n=1$ 和 $k=10, n=2$ 的相位解调的结果,其空间局域性分别为 $L=25, L=26$,图6(b)和图6(c)分别表示其相位解调误差。对于图像边界上空间局域性小于 L 的点,在解调后将这一区域内的结果置

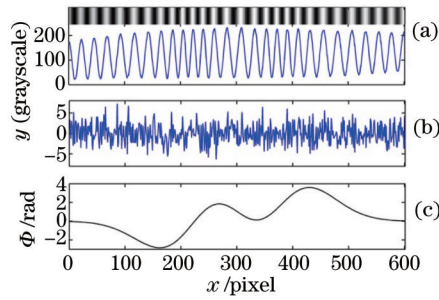


图4 (a) 一维条纹信号的光强分布, (b) 高斯白噪声和(c)调制相位

Fig.4 (a) Intensity distribution, (b) Gaussian white noise, and (c) modulated phase of 1-D fringe signal zero, below simulation and experiment both take the same operation.

从图5和图6中可看出,当 $k=9, n=1$,也就是空间局域性为 $L=25$ 点时,相位重建结果较好。而空间局域性 $L=25, L=26$,都是原有算法无法实现的。因此改进的三步空域准相移算法可以根据信号特点,选择参数调整空间局域性。那么在计算中,可以首先使用原有算法大概找出 L 的取值范围^[17],再使用改进算法,对 L 做微小调整,可以有效改善解调效果。

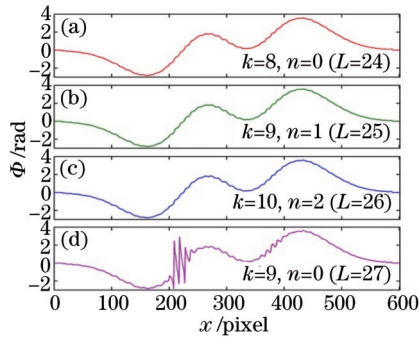


图5 相位解调结果。(a) 原有算法($k=8, n=0$), (b) 改进算法($k=9, n=1$) (c) 改进算法($k=10, n=2$), (d) 原有算法($k=9, n=0$)

Fig.5 Results of phase demodulation by (a) SQPS algorithm ($k=8, n=0$), (b) ISQPS algorithm ($k=9, n=1$), (c) ISQPS algorithm ($k=10, n=2$), and (d) SQPS algorithm ($k=9, n=0$)

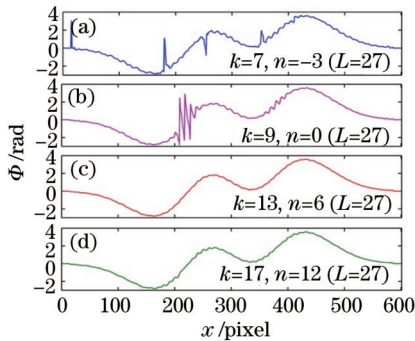


图7 相位解调结果。(a) 改进算法($k=7, n=-3$), (b) 原有算法($k=9, n=0$), (c) 改进算法($k=13, n=6$), (d) 改进算法($k=17, n=12$)

Fig.7 Results of phase demodulation by (a) ISQPS algorithm ($k=7, n=-3$), (b) SQPS algorithm ($k=9, n=0$), (c) ISQPS algorithm ($k=13, n=6$), and (d) ISQPS algorithm ($k=17, n=12$)

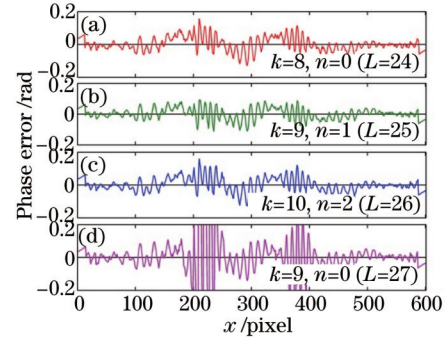


图6 相位解调误差。(a) 原有算法($k=8, n=0$), (b) 改进算法($k=9, n=1$), (c) 改进算法($k=10, n=2$), (d) 原有算法($k=9, n=0$)

Fig.6 Errors of phase demodulation by (a) SQPS algorithm ($k=8, n=0$), (b) ISQPS algorithm ($k=9, n=1$), (c) ISQPS algorithm ($k=10, n=2$), and (d) SQPS algorithm ($k=9, n=0$)

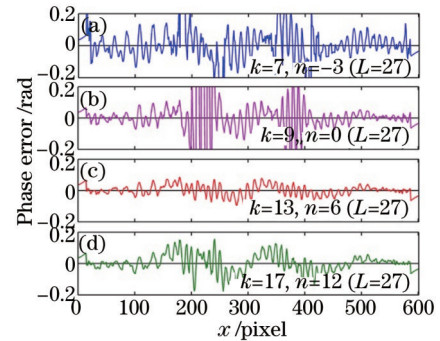


图8 相位解调误差。(a) 改进算法($k=7, n=-3$), (b) 原有算法($k=9, n=0$), (c) 改进算法($k=13, n=6$), (d) 改进算法($k=17, n=12$)

Fig.8 Errors of phase demodulation by (a) ISQPS algorithm ($k=7, n=-3$), (b) SQPS algorithm ($k=9, n=0$), (c) ISQPS algorithm ($k=13, n=6$), and (d) ISQPS algorithm ($k=17, n=12$)

下面对于空间局域性相同的情况进行模拟。使用原有算法和改进的算法分别对条纹信号进行相位解调,如图7所示。相位解调误差,如图8所示。两种算法的空间局域性都为 $L=27$ 。图7(a)、图7(c)和图7(d)是分别采用改进算法($k=7, n=-3$)、改进算法($k=13, n=6$)和改进算法($k=17, n=12$)的相位解调结果,图8(a)、图8(c)和图8(d)分别表示其相位解调误差。图7(b)采用原有的算法($k=9, n=0$)的相位解调结果,图8(b)表示其相位解调误差。

图7和图8显示,尽管空间局域性相同,但不同的参数组合,获得的相位解调精度是不一样的。当 $k=7, n=-3$; $k=9, n=0$ 和 $k=17, n=12$ 时,误差较为明显;当 $k=13, n=6$ 时,相位解调精度较高。模拟结果表明:改进后的算法在参数 k 与 n 组合不同时,可以获取不同的相位解调结果,可以看出 k 值的大小,决定了积分区域的长度,积分区域越长,对噪声的抵抗能力越好,但是 k 值过大,有可能不满足 $a(x), b(x), f_i(x)$ 和 $\phi_i^0(x)$ 变化可以忽略不计的假设,产生明显的误差。另外,若 L 一定, n 取负值, I_i 积分区间间隔,导致参与积分的采样点数减少,不利于抵抗白噪声。

5 实验及结果

采用改进后的算法,对条纹投影轮廓术的条纹信号进行了相位解调。图9是条纹投影轮廓术的光路示意图,其中 h 代表物体的实际高度, l 表示投影仪与参考平面之间的距离, d 代表投影仪与数码相机的距离, C 和 P 分别表示投影仪和数码相机的出瞳。实验中,向待测物体投射一幅 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的标准条纹图。图10是拍摄得到的变形条纹图。

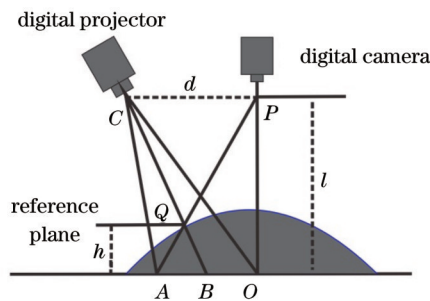


图9 条纹投影轮廓术的光路图



图10 拍摄得到的变形条纹图

Fig.9 Optical geometry of the fringe projection profilometry

Fig.10 Captured deformed fringe patterns

根据模拟结果,首先使用原有算法对 L 进行估计,得出当 $k=3, n=0, L=9$ 和 $k=4, n=0, L=12$ 时,解调效果较好,然后使用改进算法,取 $k=4, n=1, L=10$; $k=5, n=2, L=11$; $k=3, n=-1, L=11$,对图10中变形条纹图,进行相位计算。此外使用TPS算法进行对比。解包裹后的相位三维分布如图11所

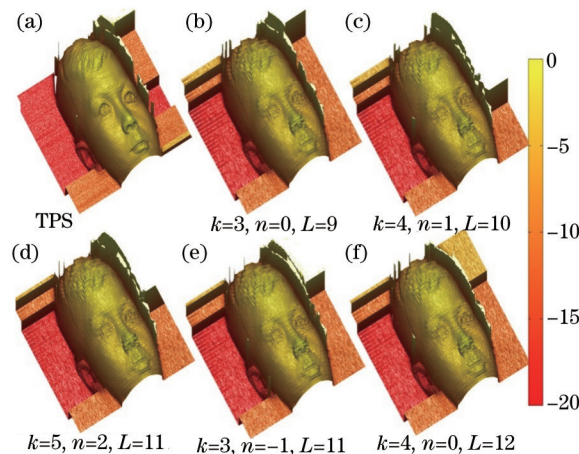


图11 解包裹后的三维重建结果。(a) 四步相移算法; (b) 原有算法($k=3, n=0$); (c) 改进算法($k=4, n=1$); (d) 改进算法($k=5, n=2$); (e) 改进算法($k=3, n=-1$); (f) 原有算法($k=4, n=0$)

Fig.11 3-D distributions of demodulated unwrapped phase by (a) TPS algorithm, (b) SQPS algorithm ($k=3, n=0$), (c) ISQPS algorithm ($k=4, n=1$), (d) ISQPS algorithm ($k=5, n=2$), (e) ISQPS algorithm ($k=3, n=-1$), and (f) SQPS algorithm ($k=4, n=0$)

示,按 L 大小依次排列。其中 $L=10$, $L=11$ 的情况,是原有算法不能实现的。

由于使用四张条纹图进行计算,TPS解调效果最佳,因此选作参考。为了便于观察,选取其中第750列(石膏像面部中心线)放大对比,放大区域 $y \in [740, 940]$ 如图12所示。

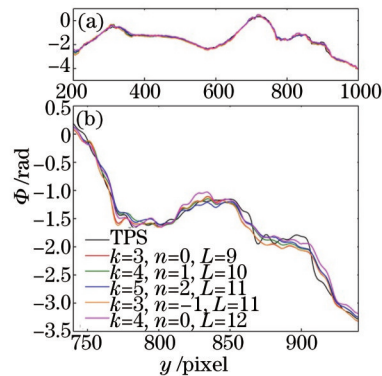


图12 (a) 解包裹后第750列和(b) $y \in [740, 940]$ 放大后的结果

Fig.12 (a) Unwrapped results at the 750th column and (b) magnified section of $y \in [740, 940]$

从图11和图12(b)可以看出改进算法($k=4, n=1, L=10$)和改进算法($k=5, n=2, L=11$)较为接近TPS算法的解调结果。

6 结 论

通过分析原有算法的空间局域性特点,针对其不能连续调节的问题,首先提出了一种改进的算法,这种算法对原有积分区间进行重新划分,引入了新的参数,可以根据待测信号特点,连续地设置算法的空间局域性,对于相同的空间局域性,可以实现不同参数的组合;然后通过模拟和实验具体讨论了参数的取值问题,得到了较好的解调效果,有效地隔离噪声,避免了误差传播,提高了相位解调的精度。由于改进后的算法是单帧算法,为解决动态测量中的条纹相位解调问题,提供了一种新的可供选择的途径。根据数值模拟以及实验结论,目前改进算法还只能根据经验对 k 和 n 进行取值。若要实现参数的计算机自动选取,需要确定瞬时频率与最佳 L 之间的关系,这部分研究工作还在进行中。

参 考 文 献

- 1 J H Bruning, D R Herriott, J E Gallagher, *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. Appl Opt, 1974, 13(11): 2693-2703.
- 2 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.
- 3 Q Kemao. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. Appl Opt, 2004, 43(13): 2695-2702.
- 4 J Zhong, J Weng. Dilating Gabor transform for the fringe analysis of 3-D shape measurement[J]. Opt Eng, 2004, 43(4): 895-899.
- 5 J Zhong, H Zeng. Multiscale windowed Fourier transform for phase extraction of fringe patterns[J]. Appl Opt, 2007, 46(14): 2670-2675.
- 6 Dong Fuqiang, Da Feipeng, Huang Hao. Windowed Fourier transform profilometry based on advanced S-transform[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512008.
董富强, 达飞鹏, 黄昊. 基于S变换的改进窗口傅里叶三维测量法[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512008.
- 7 Wang Chenxing, Da Feipeng. A novel adaptive windowed Fourier transform for phase retrieval in 3D shape measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0612005.
王辰星, 达飞鹏. 三维测量中一种新的自适应窗口傅里叶相位提取法[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0612005.
- 8 J Zhong, J Weng. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: Wavelet transform profilometry [J]. Appl Opt, 2004, 43(26): 4993-4998.
- 9 J Zhong, J Weng. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform[J]. Opt Lett, 2005, 30(19): 2560-2562.

- 10 Yu Cheng, Li Sikun, Wang Xiangzhao. Fast three-dimensional shape measurement technique by means of wavelet transform based on parallel computing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512005.
余程, 李思坤, 王向朝. 基于并行小波变换的快速三维面形测量技术[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512005.
- 11 Zhang Yuyan, Lü Kunkun, Wen Yintang, *et al.*. High-precision measurement of surface damage based on wavelet transform[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1208007.
张玉燕, 吕坤坤, 温银堂, 等. 基于小波变换的高精度表面损伤测量[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208007.
- 12 Zheng Yi, Chen Wenjing, Zhong Min, *et al.*. Study of profilometry measurement precision improvement based on Morlet wavelet transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 111203.
郑毅, 陈文静, 钟敏, 等. 提高基于 Morlet 小波“脊”处理方法的相位解调精度研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 111203.
- 13 M Gdeisat, D Burton, M Lalor. Spatial carrier fringe pattern demodulation by use of a two-dimensional continuous wavelet transform[J]. *Appl Optics*, 2006, 45(34): 8722-8732.
- 14 Z Zhang, J Zhong. Applicability analysis of wavelet-transform profilometry[J]. *Opt Express*, 2013, 21(16): 18777-18796.
- 15 J C Wyant. Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems[J]. *Appl Opt*, 1975, 14(11): 2622-2626.
- 16 M A El-Morsy, K Harada, M Itoh, *et al.*. A subfringe integration method for multiple-beam Fizeau fringe analysis[J]. *Opt Laser Technol*, 2003, 35(3): 223-232.
- 17 Z Zhang, J Zhong. Spatial quasi-phase-shifting technique for single-frame dynamic fringe analysis[J]. *Opt Express*, 2014, 22(3): 2695-2705.

栏目编辑: 殷建芳