

基于正则化主量分析的相移阴影叠栅解调技术

杜虎兵¹ 艾永旭²

¹ 西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021

² 西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 传统的相移阴影叠栅轮廓术在垂直于光栅面方向移动光栅实现相移, 由于相移是非线性的, 需要较多帧的条纹图进行相位解调。为了减少条纹图帧数, 节约测量时间, 并简化测量过程, 提出一种基于主量分析法的三帧随机相移阴影叠栅技术。主量分析法通过时域平均去除背景, 对较少帧的条纹图直接使用主量分析法会产生直流分量去除误差, 因而先将条纹图正则化, 再应用主量分析法求取相位。实验表明, 相对于直接使用主量分析法, 利用正则化主量分析法可以明显减小测量误差。分别使用正则化主量分析法和五步相移法对同一物体表面进行测量, 两次测量结果之差在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 内, 说明了正则化主量分析法的有效性。

关键词 衍射; 光学三维测量; 阴影叠栅轮廓术; 主量分析法; 相位

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.100501

Phase Shift Shadow Moiré Demodulation Based on Normalized Principal Component Analysis

Du Hubing¹ Ai Yongxu²

¹ School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

² State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Conventional phase shifting shadow moiré profilometry usually needs more phase shifting images to demodulate the measurement phase because of the nonlinear phase shifting. The data sampling process is time-consuming and the measurement method is complex. We proposed a random three-frame object surface measurement method based on the principal component analysis and the shadow moiré profilometry. The phase shift is introduced by translating grating perpendicular to its own plane. Given that the background of captured fringe patterns is a smooth signal, we firstly normalized the sampled fringe patterns. Then principal component analysis based phase shifting algorithm is used to estimate the phase. The proposed method is fast and can be implemented easily in many applications. We also did optical experiments to demonstrate the effectiveness of the proposed method by referring to the result of conventional five-step phase shifting shadow moiré. The results show that the difference of the measurement results is within $\pm 5 \mu\text{m}$.

Key words diffraction; optical three-dimensional measurement; shadow moiré profilometry; principal component analysis; phase

OCIS codes 050.1940; 120.4120; 120.6650

1 引言

阴影叠栅技术是一种全场、非接触的光学三维轮廓测量方法, 目前已经发展成为主要的叠栅测量方法, 并广泛应用于人体测量、晶圆表面检测、球栅阵列共面度测试、自动生产、航空工业等领域。阴影叠栅包括一个普通光源, 一块基准光栅和一个 CCD 摄像机, 结构简单, 且测量装置产生的误差容易校正, 因此有望应用

收稿日期: 2016-05-19; 收到修改稿日期: 2016-06-24; 网络出版日期: 2016-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61471288, 51475351)、陕西省自然科学基础研究计划(2015JM5190)

作者简介: 杜虎兵(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电检测、实时在线测试以及机器视觉方面的研究。

E-mail: xhdhub@126.com

相移技术获得较高的测量分辨力。

按照解调方法的不同,阴影叠栅技术可分为叠栅等高线法、傅里叶变换法和相移阴影叠栅技术。叠栅等高线法简单直观,但不能有效利用条纹间距的灰度级信息,其测量灵敏度仅限一个条纹间距。

基于傅里叶的阴影叠栅方法需要倾斜被测物体为测量视场引入载频^[1]。若倾斜角较大,受衍射的影响(假定主光栅的周期大于等于0.1 mm),此时产生的叠栅条纹图对比度会随物体和光栅间距的增加而减小。这使得条纹图光强分布不均匀。若倾斜角太小,引入的载频过小,则不能有效进行不同频率信号的分离。

相移法阴影叠栅技术是一种简单的自动解调方法。基本原理如下:在时域改变实验参数,引起测量光场的相位变化,同时使用摄像机记录并存储该变化,进而运用计算机程序进行逐点分析,实现测量相位的自动解调。相移技术中最重要的是相移的标定。按照相移的标定方式,相移算法又可分为特殊值相移算法、补偿相移算法、等相移增量相移算法和随机相移算法。

特殊值相移算法是将一个已知的特殊值相移,如 $\pi/2$,引入视场。由于引入的实际相移往往与标定的相移不符,特殊值相移算法容易产生较大的误差。补偿相移技术则假定引入的相移可与名义相移 $\pi/2$ 偏离一个很小值,获得相移算法谱线与频率轴的相切性条件以使失调误差最小化^[2],同时对相移要求稍有放松。补偿技术要求相移固定,当失调误差超出 $\pi/2$ 的邻域时,其作用不明显。

假定测量视场可引入全局的相移增量,一些研究者提出通过干涉图数据自身对相移量进行标定的自标定相移技术。按照相移标定方法的不同,自标定相移技术可分为正弦依赖型和迭代型。正弦依赖型相移技术假定条纹图光强严格符合正弦分布,然后运用反余弦函数确定相移^[3]。实际的干涉图受摄像机非线性响应、噪声等影响而表现出非正弦分布特点。实际应用中这类相移算法误差较大,而且求解不稳定。Guo等^[4]提出通过抗噪设计提高求解相移的稳定性,但抗噪设计不能囊括所有噪声类型,因此该技术在实际复杂噪声场合的应用还需进行进一步研究。

迭代型相移技术一般与最小二乘技术密切相关。假定引入的相移增量不精确或者是一个估计值,结合对时域干涉图数据和空域干涉图数据的迭代处理,迭代相移技术可获得较高精度的测量相位,并对光强的非正弦性不敏感。Wang等^[5]提出的算法是这类技术的典型代表。

随机相移技术中假定引入的相移是任意的。Xu等^[6]提出了一般相移技术,并使用两帧干涉图抽取任意相移。Gao等^[7]利用三帧图像结合迭代技术提取了任意相移。另一种思路是通过空间变换得到条纹图的正交信号^[8],进而直接提取相位。该方法需要运用计算机视觉中的光流方法估计条纹方向。Zeng等^[9]使用空域图像处理技术和频率估计对正则化光流方法进行了拓展。Deng等^[10]利用相移条纹间光强差的欧氏范数与相移呈正弦关系的特点,提出了一种基于欧氏范数的相移确定算法。该算法对测量条件的要求降低,但精度较低。

上述相移技术的基础是假定测量视场中可引入一个全局相移,显然,将相移技术应用于阴影叠栅需要满足两个条件:1)为阴影叠栅视场引入一个全局的、均匀的相位变化;2)引入的相移量必须与实验参数的变化成正比。由于阴影叠栅使用一块光栅,不能像投影叠栅一样通过移动光栅在时域中精确控制每一采样点的相位变换。而改变其他实验参数,如被测物与光栅间距、光源与摄像机间距等,产生的相移全场不匀,不能产生全局相位变化。Mavoisin等^[11]指出由于阴影叠栅特殊的相位-高度非线性关系,不能为阴影叠栅视场引入全场均匀的相位变化。传统的相移阴影叠栅技术只能通过近似的方法实现,即忽略相位-高度的非线性关系。该类研究主要包括:Dirckx等^[12]提出在垂直光栅面方向上移动物体的方法;杜虎兵等^[13]提出在垂直光栅面方向上移动光栅的方法;Xie等^[14]提出通过旋转光栅,进而改变光栅有效周期的方法为测量视场引入相移。

为了应用特殊值相移技术,必须忽略相位-高度非线性关系,但同时为测量视场引入了原理性相移误差,致使特殊值相移算法不能获得精确解。Ladak等^[15]对相移阴影叠栅系统误差源进行了研究,指出忽略相位-高度非线性关系是测量系统的主要误差源。这促使研究人员着手研究相移不匀的补偿。

Yoshizawa等^[16]提出在改变光源与摄像机间距的同时,再在垂直栅面方向上移动光栅,从而获得近似均匀相位变化。Jin等^[17]提出在垂直栅面方向上移动光栅、同时旋转光栅的方法为测量视场引入均匀相移。但同时改变两个实验参数增加了测量系统的复杂性,为测量系统引入了新的系统误差源。Arai等^[18]提出了

基于一般函数的条纹分析方法,需要应用数值分析进行方程求解,如 Newton-Raphson 方法。该方法可以直接确定测量高度,无需去包裹操作,主要缺点是计算量大。

Degrieck 等^[19]提出的数字相移技术,先拍摄投影在测量面上的变形光栅图,然后与计算机模拟的光栅交叠,形成相移叠栅条纹图。该方法不能一般化,用于高灵敏度情况(使用周期小于 20 line/mm 的细光栅)时栅线过密,摄像机不能拍摄到需要的变形光栅栅线图,从而使测量过程无法进行。

2011 年本课题组提出了一种迭代阴影叠栅相移技术^[20],克服了相移不匀问题的影响。该方法对系统的结构参数标定要求高,需要控制光栅垂直其所在的平面进行精确的相移运动,且需要较多的条纹图,难以适应一些中等测量精度场合中快速、简单测量的要求。因此,需要发展一种简化的相移阴影叠栅法。

Vargas 等^[21-22]提出了基于正交信号的条纹图分析技术。其中主量分析法应用方便,解调速度快,且相移是随机的^[21]。该技术需要在 $[0, 2\pi]$ 范围内采样较多的时域条纹图,以保证条纹图的直流分量得到较高精度的去除。在相移阴影叠栅技术中相移一般是在光栅平面垂直移动光栅获得的,如果在 $[0, 2\pi]$ 范围内采样较多的时域条纹图,则要求相移装置的移动量为几微米,因而对光栅移动机构的要求十分苛刻。为了简化测量过程,减少条纹图帧数,本文提出一种基于条纹图正则化的随机相移阴影叠栅技术。

2 测量原理

2.1 相移阴影叠栅轮廓术

点光源入射下阴影叠栅测量的原理如图 1 所示,当光源和相机位于同一高度时($h_1 = h_2 = h$),点光源发出的光透过周期为 p 的光栅照射在距离光栅为 z 的物体平面上,其光栅阴影是周期为 $p' = p(h+z)/h$ 的条纹。相机透过光栅观察可得到阴影叠栅条纹图。

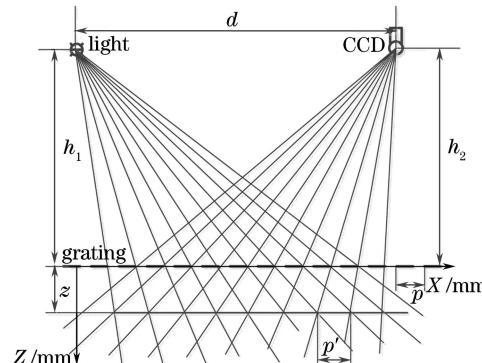


图 1 阴影叠栅原理图

Fig. 1 Illustration of shadow moiré

由于相机不能分辨高频光栅和光栅阴影,只能看到携带物体表面形貌信息的低频叠栅条纹,通常相机观察到的光强表达式为^[19]

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \frac{dz}{h+z} \cos \frac{2\pi}{p}, \quad (1)$$

式中 p 为光栅周期, $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 分别为背景和振幅, $B(x, y) \frac{dz}{h+z} \cos \frac{2\pi}{p}$ 为轮廓项, 携带物体表面形貌信息。在垂直光栅平面移动光栅两次,每次间距为 Δh ,可得

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta_n(x, y)], n = 0, 1, 2, \quad (2)$$

式中 $\phi(x, y)$ 为相位, $\Delta_n(x, y)$ 为引入的相移,

$$\phi(x, y) = 2\pi dz / [p(h+z)], \quad (3)$$

$$\Delta_n(x, y) = 2\pi d \Delta h / [p(h+z)]. \quad (4)$$

显然,如果引入的相移为常数时,使用一般的相移算法便可获得测量视场的相位分布,但(4)式表明,引入的相移与高度有关。如果在 $h \gg z$ 条件下忽略非线性影响,使用三步相移算法提取测量相位,必定为测量系统

引入相移误差,因此提出使用随机相移的方法提取测量相位并简化测量过程。

2.2 正则化相移阴影叠栅轮廓术

主量分析法是一种有效的条纹图分析法,解调速度快,对相移标定要求低,自2011年提出后得到了广泛的研究,但是该方法要求在 $[0, 2\pi]$ 范围内采样较多的时域条纹图,因而难以应用于相移阴影叠栅技术。为此,提出了基于正则化的主量分析法。

背景项相对轮廓项是一个缓变信号,因此应用高通滤波器与相移条纹图卷积,则去除背景后的条纹图可表述为

$$F_i = \{1 - \exp[-(x^2 + y^2)/2f^2]\} * I_i(x, y) = B(x, y)\cos[\phi(x, y) + \Delta_i(x, y)] = \\ B(x, y)[\cos \phi(x, y)\cos \Delta_i(x, y) - \sin \phi(x, y)\sin \Delta_i(x, y)], i = 0, 1, 2, \quad (5)$$

式中 f 为滤波频率。

设摄取的条纹图大小为 $m \times n$,将每一帧二维干涉图逐列重组为向量,则摄取的3帧条纹图用矩阵表示为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} B(x, y)\cos(\varphi_{11} + \Delta_0) & \cdots & B(x, y)\cos(\varphi_{m1} + \Delta_0) & \cdots & B(x, y)\cos(\varphi_{mn} + \Delta_0) \\ B(x, y)\cos(\varphi_{11} + \Delta_1) & \cdots & B(x, y)\cos(\varphi_{m1} + \Delta_1) & \cdots & B(x, y)\cos(\varphi_{mn} + \Delta_1) \\ B(x, y)\cos(\varphi_{11} + \Delta_2) & \cdots & B(x, y)\cos(\varphi_{m1} + \Delta_2) & \cdots & B(x, y)\cos(\varphi_{mn} + \Delta_2) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

进一步定义 $a_i = \cos \Delta_i$, $\mu = B \cos \phi$; $b_i = \sin \Delta_i$, $\nu = B \sin \phi$ [为了表述清楚,此处省去像素坐标 (x, y)],重写(5)式为

$$F_i = a_i\mu + b_i\nu. \quad (7)$$

由于 $\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \mu(x, y)\nu(x, y) \approx 0$,因此(7)式表明,正则化(滤除背景)后的条纹图可表述为两个不相关的正交信号 μ 和 ν 的线性组合。显然将 μ 和 ν 从 F_i 分离,即可得到测量相位。首先计算协方差矩阵 \mathbf{C} :

$$\mathbf{C} = \mathbf{FF}^T, \quad (8)$$

应用奇异值分解算法(SVD)将矩阵对角化为

$$\mathbf{C} = \mathbf{UDU}^T, \quad (9)$$

式中 \mathbf{D} 为对角阵, \mathbf{U} 为正交变换矩阵。根据Hotelling变换可知 \mathbf{F} 的主量 \mathbf{y} 按照特征值大小顺序可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{UF}. \quad (10)$$

其中特征值最大的前两个主量分别对应 μ 和 ν ,因此可得测量相位。另外,上述推导过程中测量相位符号是模糊的,可以应用典型二帧测量算法确定,如对 I_1 和 I_2 应用克莱姆正交化二帧条纹图算法^[22],设其获得的测量相位为 ϕ' ,则测量相位为

$$\phi = \text{sign}(\phi') \left| \arctan \frac{\mu}{\nu} \right|, \quad (11)$$

当上述相位展开后^[23-24],得测量高度为

$$z = \frac{ph\phi}{2\pi d - p\phi}. \quad (12)$$

3 实验

实验系统如图2所示^[25]。测量对象是一块金属球面,表面经过精铣。光栅为20线Ronchi光栅。光源与相机的距离为100 mm。相机光心和光栅表面的距离为120 mm,光栅水平放置,光源和相机光心位于同一水平面。为了提高测量精度,采用高精度位移平台作为相移器,分辨率为1 μm。

调整光栅的位置使之靠近待测物体,相机可观察到清晰的叠栅条纹。以此位置为基准位置,在垂直光栅面方向上,使用精密位移台移动光栅,每次移动距离为0.02 mm,每次相移约为 $\pi/2$,采集5帧叠栅条纹图,如图3所示。

由于实际的原因,往往难以获得被测物体表面高度分布,为与提出方法的测量结果进行对比,首先使用典型的五步Harlharan算法^[26]对图3条纹图进行解调,并将其结果作为参考。五步Harlharan算法能对较

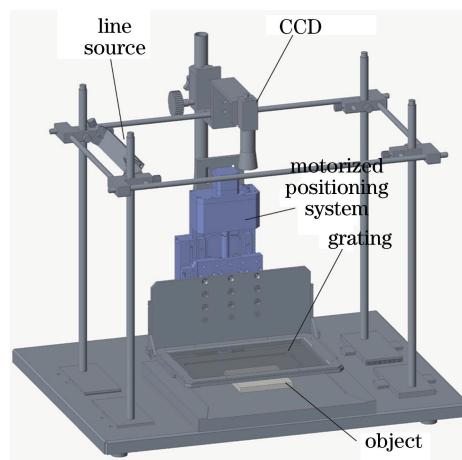


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Illustration of experimental system

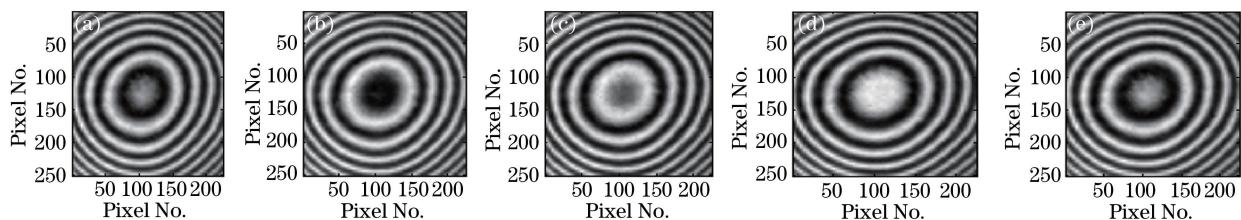


图 3 相移叠栅条纹图

Fig. 3 Phase shifting images obtained by grating translation

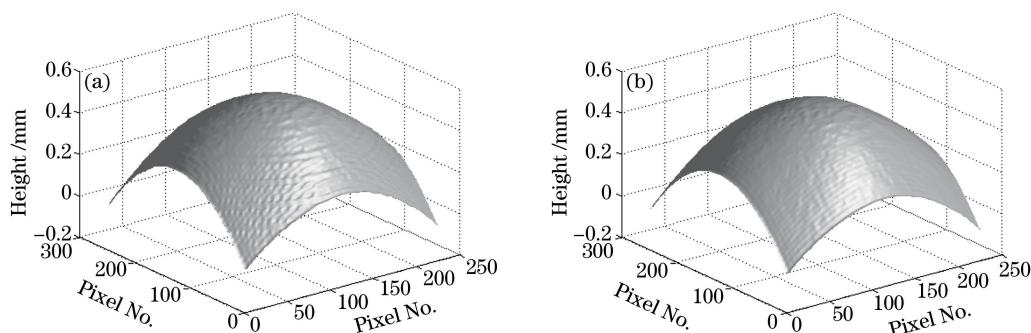


图 4 测量结果。(a)提出方法;(b)五步算法

Fig. 4 Processing results. (a) Proposed algorithm; (b) Harlharan algorithm

小的相移误差进行补偿,因此,将其作为测量高度的参考是可信的。使用条纹图 I_1, I_2, I_3 ,应用提出的方法测量高度,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出由于使用的条纹图帧数较多,具有均化作用,五步算法的结果较好,提出方法的测量结果有明显的波纹,但对于精度要求适中的测量场合是一种快速、方便的测量途径。

分别运用主量分析法和提出的方法对条纹图 I_1, I_2, I_3 进行相位提取,其结果与五步算法的结果之差定义为测量误差,如图 5 所示。

由于没有进行正则化处理,应用时域平均不能有效去除直流分量,此时直接应用主量分析产生的误差较大。本文提出的方法主动去除了条纹图的直流分量,由于减小了直流分量去除误差的影响,再应用主量分析法提取相位时取得了较好的效果。

4 结 论

针对相移阴影叠栅轮廓术的解调方法提出了一种正则化主量分析法阴影叠栅三维轮廓测量技术。该技

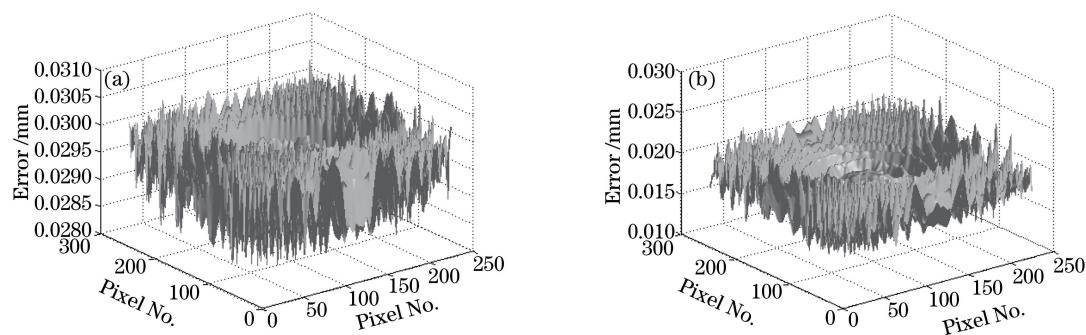


图 5 测量误差。(a)原主量分析方法;(b)提出方法

Fig. 5 Measurement error. (a) Original principal component analysis; (b) proposed method

术仅使用三帧相移条纹图,而且测量过程不需要精确确定相移量,是一种随机相移阴影叠栅技术。实验结果表明,该技术可以减小直流分量误差对测量高度的影响,应用于测量精度适中的场合时可以大大简化阴影叠栅测量结构,具有方便、快捷的特性。

参 考 文 献

- 1 D'Acquisto L, Fratini L, Siddiolo A M. A modified moiré technique for three-dimensional surface topography [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(4): 613-622.
- 2 Servin M, Estrada J C, Quiroga J A . The general theory of phase shifting algorithms [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21867-21881.
- 3 Luo Zhiyong, Yang Lifeng, Chen Yunchang. Error evaluation of cosine dependent algoithm in precision interference measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(12): 1629-1633.
罗志勇, 杨丽峰, 陈允昌. 精密干涉测量中余弦依赖算法的误差研究[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1629-1633.
- 4 Guo H W, Chen M Y. Least-squares algorithm for phase-stepping interferometry with an unknown relative step [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(23): 4854-4859.
- 5 Wang Z Y, Han B. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14): 1671-1673.
- 6 Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, et al. Simple direct extraction of unknown phase shift and wavefront reconstruction in generalized phase-shifting interferometry: Algorithm and experiments[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(8): 776-778.
- 7 Gao P, Yao B L, Lindlein N, et al. Phase-shift extraction for generalized phase-shifting interferometry [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(22): 3553-3555.
- 8 Vargas J, Quiroga J A, Sorzano C O S, et al. Two-step interferometry by a regularized optical flow algorithm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3485-3487.
- 9 Zeng F, Tan Q, Gu H, et al. Phase extraction from interferograms with unknown tilt phase shifts based on a regularized optical flow method[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 17234-17248.
- 10 Deng J, Wang H, Zhang D, et al. Phase shift extraction algorithm based on Euclidean matrix norm[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1506-1508.
- 11 Mavoisin G, Brémard F, Lagarde A. Three-dimensional phase reconstruction by phase-shifting shadow moiré[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(11): 2163-2169.
- 12 Dirckx J J J, Decraemer W F, Dielis G. Phase shift method based on object translation for full field automatic 3-D surface reconstruction from moire topograms[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(6): 1164-1169.
- 13 Du Hubing, Zhao Hong, Li Bing, et al. Phase shifting shadow moiré by iterative least squares fitting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(7): 978-982.
杜虎兵, 赵宏, 李兵, 等. 相移阴影莫尔基于迭代 LSM 拟合[J]. 光子学报, 2011, 40(7): 978-982.
- 14 Xie X, Atkinson J T, Lalor M J, et al. Three-map absolute moiré contouring[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(35): 6990-6995.
- 15 Ladak H M, Decraemer W F, Dirckx J J J, et al. Systematic errors in small deformations measured by use of shadow-

- moiré topography[J]. Applied Optics, 2000, 39(19): 3266-3275.
- 16 Yoshiwaza T, Tomisawa T. Shadow moiré topography by means of the phase-shift method[J]. Optical Engineering, 1993, 32(7): 1668-1674.
- 17 Jin, L, Kodera Y, Yoshizawa, T, *et al*. Shadow moiré profilometry using the phase-shifting method[J]. Optical Engineering, 2000, 39(8): 2119-2123.
- 18 Arai Y, Yokozeki S, Yamada T. Fringe-scanning method using a general function for shadow moiré[J]. Applied Optics, 1995, 34(22): 4877-4882.
- 19 Degrieck J, van Paepeghem W, Boone P. Application of digital phase-shift shadow moiré to micro deformation measurements of curved surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 36(1): 29-40.
- 20 Du H, Zhao H, Li B, *et al*. Algorithm for phase shifting shadow moiré with an unknown relative step[J]. Journal of Optics, 2011, 13(3): 035405.
- 21 Vargas J, Quiroga J A, Belenguer T. Phase-shifting interferometry based on principal component analysis[J]. Optics Letters, 2011, 36(8): 1326-1328.
- 22 Vargas J, Quiroga J A, Sorzano C O S, *et al*. Two-step demodulation based on the Gram-Schmidt orthonormalization method[J]. Optics Letters, 2012, 37(3): 443-445.
- 23 Li Xinghua, Qian Xiaofan, Lin Chao, *et al*. Application of phase unwrapping algorithm based on lateral shearing interferometry in three-dimensional measuring by lighting projection[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s112005.
李兴华, 钱晓凡, 林超, 等. 横向剪切相位解包裹算法在光学投影三维测量中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s112005.
- 24 Qian Xiaofan, Zhang Yongan, Li Xinyu, *et al*. Phase unwrapping algorithm based on mask and least-squares iteration[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 440-444.
钱晓凡, 张永安, 李新宇, 等. 基于掩膜和最小二乘迭代的相位解包裹方法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 440-444.
- 25 Ai Yongxu, Zhou Xiang, Du Hubing, *et al*. Shadow moiré using Talbot effect under point light illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0412003.
艾永旭, 周翔, 杜虎兵, 等. 点光源下的 Talbot 效应在阴影叠栅中的应用[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0412003.
- 26 Harlharan P, Oreb B F, Eiju T, *et al*. Digital phase-shifting interferometry: A simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. Applied Optics, 1987, 26(13): 2504-2506.