

任意相移阴影叠栅相位解调技术的研究

杜虎兵^{1,2} 赵 宏¹ 李 兵¹ 赵金磊¹ 曹士旭¹

(¹ 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)
(² 西安航空学院, 陕西 西安 710077)

摘要 结合时域和频域干涉图分析方法,提出一种任意相移阴影叠栅条纹图相位解调技术,降低了干涉图在采样过程中对相移量的严格标定要求,补偿了相移阴影叠栅技术固有的相移不匀误差。使用空域技术确定采样干涉图的正交信号,进而得到了采样干涉图的相移量,然后运用任意相移相位提取算法搜索测量相位信息。实验证明此方法简单方便、求解迅速,且优于典型的相移算法,其测量误差的标准差不超过 3×10^{-3} mm,该方法为提高相移阴影叠栅技术的测量精度提供了有效手段。

关键词 测量;阴影叠栅;相移算法;任意相移;三维轮廓

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0912003

Demodulating the Phase of Phase-Shifting Shadow Moiré Using Arbitrary Phase Shift

Du Hubing^{1,2} Zhao Hong¹ Li Bing¹ Zhao Jinlei¹ Cao Shixu¹

(¹ State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)
(² Xi'an Aeronautical University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract Combined with the temporal and frequency domain fringe analysis methods, a new phase shifting shadow moiré technique to relax the restriction on the phase shift between frames is proposed. The proposed algorithm can extract the precise phase using three or more interferograms in an arbitrary sequence. The first stage of the algorithm is to estimate the heights and determines the frame differences based on the spiral phase transform technique. The second stage uses the generalized least-squares method to extract the temporal phase. Experimental results show that high accuracy phase estimates are obtained by the proposed algorithm. It is shown the standard deviation of the proposed method is less than 3×10^{-3} mm. The proposed algorithm gives an effective solution to improve measurement accuracy of shadow moiré.

Key words measurement; shadow moiré; phase-shifting algorithm; arbitrary phase shift; 3-D profile

OCIS codes 150.1135; 100.7410; 110.7410; 050.5080; 330.1400

1 引言

目前相移技术已经成为相移干涉条纹图分析最有效的方法之一^[1]。标准的相移技术将 CCD 摄像机拍摄的 M 帧具有 $2\pi/M$ 相移的干涉条纹图存储在计算机里,然后运用相移算法获取包裹在 $[0, 2\pi]$

内的测量相位。该技术求解简单、测量精度高,但其测量精度依赖相移量的正确标定^[2]。因此,在相移阴影叠栅技术中,标准的相移技术遇到了困难(由于相移不匀误差和机械运动误差,无法精确标定相移量)。对此可考虑应用的一种直观的方法是补偿相

收稿日期: 2012-03-12; 收到修改稿日期: 2012-04-23

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724207)和国家自然科学基金(50975228)资助课题。

作者简介: 杜虎兵(1976—),男,博士研究生,讲师,主要从事光电检测和干涉图分析等方面的研究。

E-mail: xh.dhub@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 赵 宏(1964—),男,博士,教授,主要从事光电检测、实时在线测试以及机器视等方面的研究。

E-mail: zhaohong@mail.xjtu.edu.cn(中国光学学会会员号:S040420080S)

移算法^[3~6]。该算法假定引入的相移量偏移其名义值 $\pi/2$ 一个很小量,可将测量误差减小到一个可忽略的恒定范围内。考虑到补偿算法使用了特殊值相移量,另一种自标定相移算法^[7~10]提出运用干涉图数据计算引入的相移值,满足了相移量灵活的要求。但这些方法因为假定测量全场可引入一个全局的相移或假定采样干涉图具有正弦光强分布而限制了其在阴影叠栅中的应用。文献[11]分析了相移阴影叠栅的基本问题,指出受相位高度非线性关系限制,阴影叠栅全场无法引入一个全局相移(如果同时改变两个实验参数可得到近似均匀的全场相移,但会为系统引入新的误差源,也会增加系统的复杂性)。因此自标定相移算法^[7~9],在相移阴影叠栅技术中不能有效应用。另一类自标定相移算法^[10]提出了确定测量场中逐点相移量的技术。无疑该方法可解决阴影叠栅全场相移不匀问题,但该方法强调测量光场强度正弦分布的特点。显然对于具有复杂的强度分布的阴影叠栅条纹^[12],这种正弦依赖性算法^[13,14]在实际测量中误差较大。对此,杜虎兵等^[15~18]最近提出的基于自调相移算法的迭代技术有效地解决了阴影叠栅相移不匀问题,并实现了相移量的自标定。需提及的是,该方法假定相邻测量条纹图对应点在时域里可引入等步长相移量。实际测量时,由于机械误差,这种条件很难保证。

为了解决上面问题,本文提出一种基于任意相移的相移阴影叠栅相位解调技术。此方法只需要3帧干涉图,且事先不需要对干涉图相移量进行精确标定,因此降低了测量过程中相移量标定要求,节约了测量时间。另外此方法相移量灵活,可在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 范围内任意选取。

2 原 理

2.1 相移阴影叠栅原理

图1给出了本文所采用的阴影叠栅实验测量排布,其包括:光源、CCD摄像机和置于测量物面上的测量光栅。显然,通过在垂直光栅面方向上移动光栅,便可获得3帧相移干涉条纹图,其光强分布在数学上其可表述为

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

式中 $A(x,y)$, $B(x,y)$ 和 $\phi(x,y)$ 分别为条纹图背景、调制因子和测量相位,假定光栅每次相对其当前位置移动的任意距离为 Δh_n (不需要仔细标定),则产生的相移可表述为^[16]

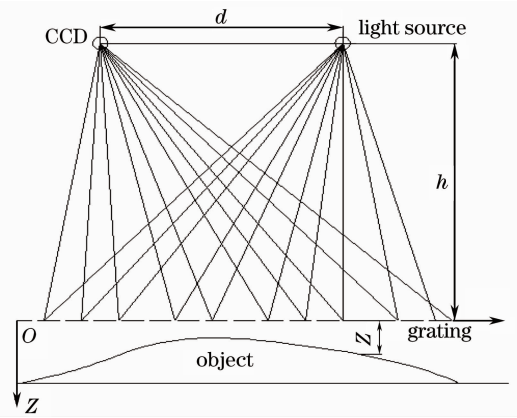


图1 相移阴影叠栅测量排布

Fig. 1 Optical arrangement of shadow moiré

$$\delta(x,y) = 2\pi d \Delta h_n / \{p[h + z(x,y)]\}, \quad (2)$$

式中 p 为光栅周期, h 为光源至光栅平面间距, d 为光源与摄像机中心的水平距离, $z(x,y)$ 描述了被测物面形貌函数。为了简化,以下推导将略去空间坐标 (x,y) , 则测量相位可以表述为

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

(1)式具有4个未知数,由相移技术原理可知,在相移量等步长条件下,采用4个方程可求解出测量相位值。实际测量时,由于相移量等步长假定很难满足,导致经典相移算法在相位解调过程引入了误差。因此本文提出结合时域和频域条纹图处理技术的任意相移量相位解调技术,提高解调精度,简化测量过程,并减少解调帧数。

2.2 确定光栅移动量

由于上述相移量是任意的,时域条纹处理技术不能直接求解。为了确定光栅移动量,首先在傅里叶变换域里使用高通滤波器对(1)式中的直流量进行了抑制,进而作逆傅里叶变换得

$$\tilde{I}_n = b \cos(\phi + n\delta), \quad n = 0, 1, 2 \quad (4)$$

需提及的是在阴影叠栅中,可使用高频闪光灯,保证背景是一个空间平滑函数,因此在频域里很容易实现主瓣和旁瓣的分离。对(4)式应用螺旋相位变换(SPT, f_{SPT})^[19],可得其正交信号

$$\tilde{I}'_n = b \sin(\phi + n\delta) = -i \exp(-i\eta) f_{\text{SPT}}(\tilde{I}_n), \quad (5)$$

式中 η 为条纹方向图。其估计方法可参阅文献[19]。据此可得逐点相移量

$$\delta(x,y) = \arctan[(\tilde{I}_0 \tilde{I}'_1 - \tilde{I}'_0 \tilde{I}_1) / (\tilde{I}_0 \tilde{I}_1 + \tilde{I}'_0 \tilde{I}'_1)]. \quad (6)$$

注意到上面求解相移量时,受反正切函数值域限制,因此在相移相邻干涉图间的引入的相移量应属于 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。应用两步可调相移算法^[20]得到

测量相图估计值为

$$\phi = \arctan \left[\cot \delta - \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_0 \sin \delta} \right], \quad (7)$$

进而得到测量高度的估计值为

$$z = p h \phi / (2 \pi d - p \phi). \quad (8)$$

将(6)式和(8)式代入(2)式可得光栅的移动量为

$$\Delta h_1 = E \{ \delta p (h + z) / (2 \pi d) \}, \quad (9)$$

式中 $E\{\}$ 为 Matlab 平均函数 (mean2[])。显然将上面的 $\bar{I}_1, \bar{I}'_1, \bar{I}_2$ 和 \bar{I}'_2 代入(6)式,按照上述方法便可求解 Δh_2 。综上可确定相移为

$$\delta_1(x, y) = 2 \pi d \Delta h_1 / \{ p [h + z(x, y)] \}, \quad (10a)$$

$$\delta_2(x, y) = 2 \pi d (\Delta h_1 + \Delta h_2) / \{ p [h + z(x, y)] \}. \quad (10b)$$

需提及的是,传统的相移阴影叠栅技术忽略相位高度非线性^[15],从而产生失调误差。但在(10)式中,由于估计的高度值被代入了(2)式,考虑了相位高度非线性关系,因此补偿了阴影叠栅固有的相移不匀误差。

2.3 提取测量相位

由于上述的相移量是任意的,为了提取测量相位,现定义一套变量: $B = b \cos \phi, C = -b \sin \phi, I_{N_1} = I_1 - I_0, I_{N_2} = I_2 - I_0$,因此可将(1)式写成矩阵形式

$$\mathbf{JX} = \mathbf{I}_N, \quad (11)$$

式中

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 - 1 & \sin \delta_1 \\ \cos \delta_2 - 1 & \sin \delta_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{I}_N = \begin{bmatrix} I_{N_1} \\ I_{N_2} \end{bmatrix}.$$

根据上面求解的相移量,运用文献[16]的方法可得精确的测量相图为

$$\phi(x, y) = \arctan(-C/B), \quad (12)$$

最后测量高度

$$z = \frac{p h \phi}{2 \pi d - p \phi}. \quad (13)$$

3 实验

为了说明该算法的正确性,下面给出实际测量的结果。本文的实验参数为: $p = 0.05 \text{ mm}, d = 100 \text{ mm}, h = 160 \text{ mm}, \Delta h = 0.02 \text{ mm}$ 。实验的测量对象为一小块表面光滑的球面,相移是通过精密移动台(最小移动单位 0.01 mm)垂直光栅平面移动光栅引

入的。每次移动距离设计为 0.02 mm ,依次移动光栅两次,获取 3 帧条纹图。为了抑制干涉图噪声,首先采用文献[16]的方法对其进行了降噪。图 2 给出了经过降噪后的 3 张干涉图,其光强分布分别为 I_1, I_2, I_3 。

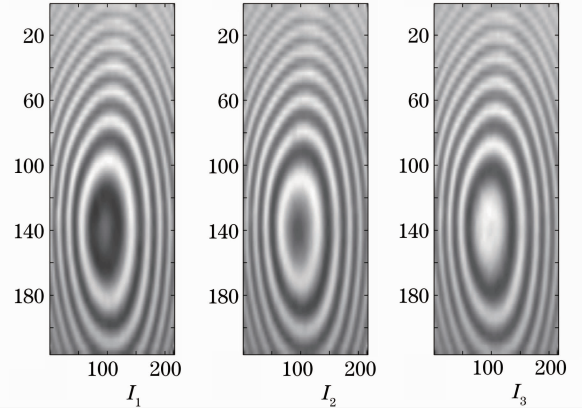


图 2 相移阴影叠栅条纹图样。(a) I_1 ; (b) I_2 ; (c) I_3

Fig. 2 Phase-shifting shadow moiré fringe patterns. (a) I_1 ; (b) I_2 ; (c) I_3

图 3 给出了使用本文的方法得到的包裹相位图和运用一般相位去包裹技术^[21]得到解包裹相位图。图 4 为使用(13)式进行相位高度转换后得到的三维曲面。

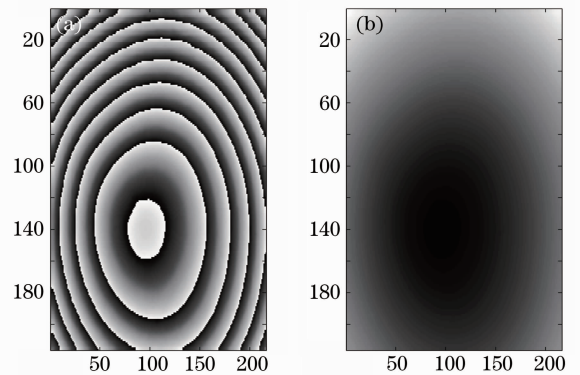


图 3 算法处理结果。(a)包裹相位图;(b)解包裹相位图

Fig. 3 Results of the proposed algorithm. (a) Wrapped phase map; (b) unwrapped phase map

为了量化说明该方法的求解精度,又以一小块表面光滑并倾斜了一个小角度的晶圆为测量对象进行测量实验。实验方法同上,但本次实验拍摄了 4 张干涉图。由于该方法仅使用 3 帧条纹图进行高度解调,因此这里对该方法和经典的三步相移算法^[4]的求解结果进行了实验比较。图 5 给出了经过降噪后的 4 张干涉图。图 6 为使用图 5 中的 I_1, I_2, I_3 的搜索三维曲面。

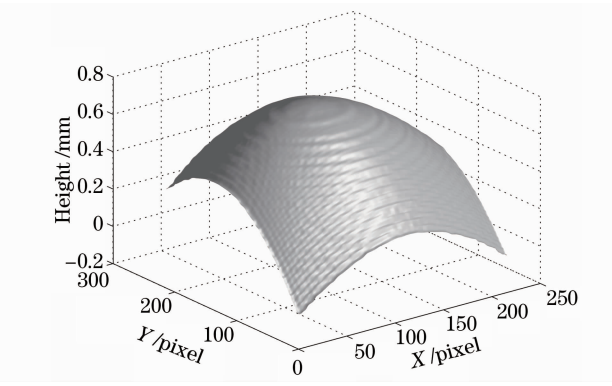


图 4 3-D 本文算法表面重建结果

Fig. 4 3-D surface reconstructed by the proposed phase shifting shadow moiré method

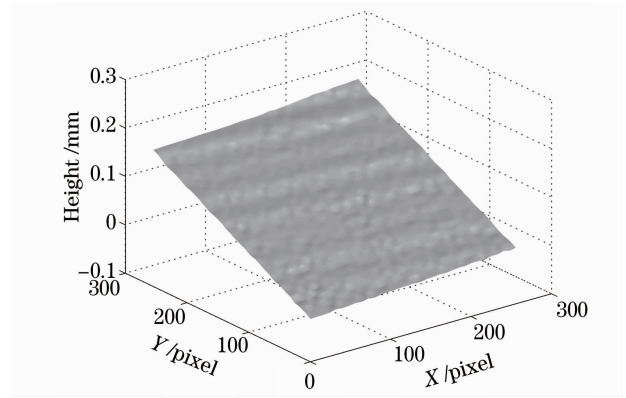


图 6 3-D 本文算法表面重建结果

Fig. 6 3-D surface reconstructed by the proposed phase-shifting shadow moiré method

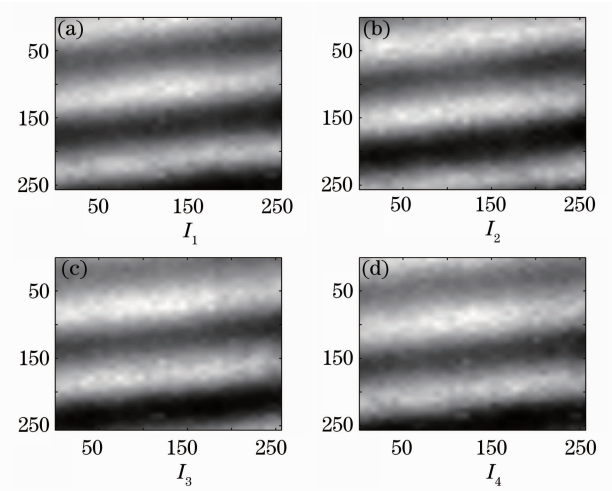


图 5 相移阴影叠栅条纹图样。(a) I_1 ; (b) I_2 ; (c) I_3 ; (d) I_4

Fig. 5 Phase-shifting shadow moiré fringe patterns. (a) I_1 ; (b) I_2 ; (c) I_3 ; (d) I_4

验方法可得

$$z_1 - z_2 = \Delta h, \quad (14)$$

式中 z_1 和 z_2 分别为采用图 5 中前 3 张干涉图 (I_1 、 I_2 、 I_3) 和图 5 中后 3 张干涉图 (I_2 、 I_3 、 I_4) 进行两次测量得到的晶圆表面高度分布。由于在两次测量过程中光栅位置发生了改变,因此(14)式中的 Δh 为光栅移动量(其设计值为 0.02 mm,但其实际值往往在 0.02 mm 附近变化)。文中运用(14)式的计算结果间接比较本文方法和三步相移算法解调性能。图 7 给出了两种方法按照(14)式计算的结果。可见本文方法由于考虑了相移不匀误差和光栅移动的随机误差取得了较好的效果。而经典的三步相移算法虽然求解简单,但由于相移等步长假定在实际测量中不能满足,同时又受阴影叠栅技术中固有的相移不匀误差影响,其测量结果偏离 0.02 mm 较多(大于精密移动台最小移动单位 0.01 mm),解调结果相对较差。图 8 给出了两种方法的标准差。可见该方法具有较小的随机误差。

在实际的测量中,已知表面难以得到,因此这里采用了间接的方法进行了比较实验。根据文中的实

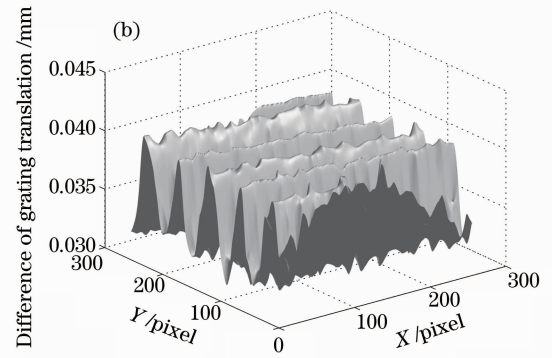
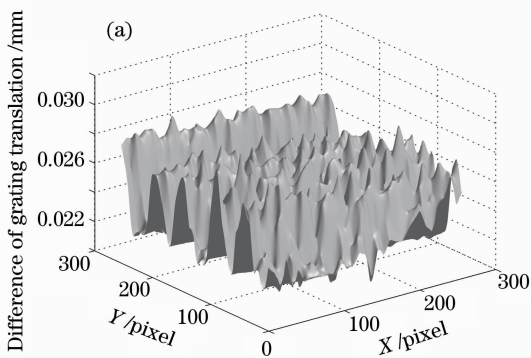


图 7 测量结果对比。(a)任意相移阴影叠栅相位算法(本文方法);(b)三步相移算法

Fig. 7 Comparison of measurement result. (a) Phase-shifting shadow moiré algorithm (the proposed algorithm); (b) 3-step phase-shifting algorithm

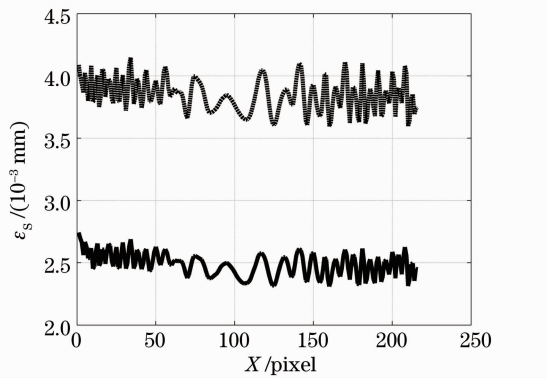


图8 测量结果的标准差

Fig. 8 Standard deviation of measurement result

4 结 论

针对相移阴影叠栅技术中由于存在相位(高度)非线性关系和光栅移动误差而致使相移量难以正确标定的问题进行了研究,提出了基于任意相移的阴影叠栅相移干涉图相位抽取算法,精确地提取了测量相位。本文的方法实现了对相移阴影叠栅技术相移量的自标定,降低了数据采用过程对相移的严格标定要求,简化了测量过程。实验表明提出方法的正确性,以及相对于现有的典型相移算法的一定的优越性。

参 考 文 献

- 1 M. Servin, J. C. Estrada, J. A. Quiroga. The general theory of phase shifting algorithms [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 21867~21881
- 2 J. F. Mosiño, M. Servin, J. C. Estrada *et al.*. Phasorial analysis of detuning error in temporal phase shifting algorithms [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5618~5623
- 3 P. Hariharan, B. F. Oreb, T. Eiju. Digital phase-shifting interferometry; a simple error-compensating phase calculation algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(13): 2504~2505
- 4 J. Schmit, K. Creath. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(19): 3610~3619
- 5 J. Schwider, O. Falkenstorfer, H. Schreiber *et al.*. New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry [J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(8): 1883~1885
- 6 Luo Zhiyong, Chen Zhaohui, Gu Yingzi *et al.*. Five-bucket phase-shifting algorithm based on numerical simulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1687~1690
罗志勇, 陈朝晖, 顾英姿等. 基于数值模拟的高准确度五步相移算法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1687~1690

- 7 Z. Y. Wang, B. T. Han. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14): 1671~1673
- 8 J. C. Estrada, M. Servin, J. A. Quiroga. A self-tuning phase-shifting algorithm for interferometry [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(3): 2632~2638
- 9 Xu Jiancheng, Chen Jianping, Xu Qian *et al.*. Multiple-beam phase shifting algorithms based on least-squares iteration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 224~228
徐建程, 陈建平, 许巧等. 基于最小二乘迭代的多光束相移算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 224~228
- 10 H. Guo, M. Chen. Least-squares algorithm for phase-stepping interferometry with an unknown relative step [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(23): 4854~4858
- 11 J. A. Gómez-Pedrero, J. A. Quiroga. Measurement of surface topography by RGB Shadow-Moiré with direct phase demodulation [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2006, **44**(12): 1297~1310
- 12 C. Han, B. Han. Error analysis of the phase-shifting technique when applied to shadow moiré[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(6): 1124~1133
- 13 Luo Zhiyong, Yang Lifeng, Chen Yunchang. Error evaluation of cosine dependent algorithms 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
- 14 Y. Surrel. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(1): 51~60
- 15 Du Hubing, Zhao Hong, Li Bing *et al.*. Phase shifting shadow moiré by iterative least squares fitting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(17): 979~982
杜虎兵, 赵宏, 李兵. 相移阴影叠栅基于迭代 LSM 拟合[J]. *光子学报*, 2011, **40**(17): 979~982
- 16 H. B. Du, H. Zhao, B. Li *et al.*. Algorithm for phase shifting shadow Moiré with an unknown relative step[J]. *J. Opt.*, 2011, **13**(3): 030405
- 17 H. Du, H. Zhao, B. Li *et al.*. Phase-shifting shadow moiré based on iterative self-tuning algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(36): 6708~6712
- 18 Du Hubing, Zhao Hong, Li Bing *et al.*. Compensating algorithm for the nonlinear phase-shift error for phase-shifting shadow moiré technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512006
杜虎兵, 赵宏, 李兵等. 阴影叠栅相移非线性误差补偿算法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0512006
- 19 K. G. Larkin. A self-calibrating phase-shifting algorithm based on the natural demodulation of two-dimensional fringe patterns [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(5): 236~253
- 20 X. F. Xu, L. Z. Cai, Y. R. Wang *et al.*. Accurate phase shift extraction for generalized phase-shifting interferometry [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(2): 024215
- 21 Guo Renhui, Li Jianxin, Zhu Rihong. Seed point unwrapping algorithm based on DCT algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0212006
郭仁慧, 李建欣, 朱日宏. 基于 DCT 算法的种子点相位解包算法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0212006

栏目编辑: 何卓铭