

基于双频正交光栅一维相移的相位测量偏折术研究

刘元坤¹ Evelyn Olesch² 杨 征² Gerd Häusler² 苏显渝¹

¹四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610065

²德国埃尔兰根纽伦堡大学光、信息与光子研究所, 埃尔兰根 91058

摘要 提出一种新的相移方法,该方法将原独立的水平和垂直一维正弦光栅集成为单幅正交正弦光栅图,再采用双频光栅相移方法,从而实现仅通过某一特定方向相移即可获取两正交相位分布,并进而计算出待测面的梯度分布并由梯度分布恢复待测表面面形。详细介绍了双频光栅相移方法,推导了相移方向与双频光栅相移的对应关系。在传统方法中,须独立投影或显示水平和垂直一维正弦光栅,且分别进行相移测量,因此共需 $2 \times N$ 幅图像($N \geq 3$);而在双频正交光栅相移方法中,最少需要5幅图像。当采用机械相移时,传统方法需要二维相移机构,而该方法仅需一维相移机构,因此该方法具有成本低、测量速度快、结构简单等优点。实测的眼镜片结果,验证了该方法的可行性。

关键词 测量; 正交光栅; 相移; 相位测量偏折术; 结构光照明; 三维成像

中图分类号 O438

文献分类号 A

doi: 10.3788/CJL201542.0308005

A One-Dimensional Phase-Shift Technique Based on Dual-Frequency Crossed Fringe for Phase Measuring Deflectometry

Liu Yuankun¹ Evelyn Olesch² Yang Zheng² Gerd Häusler² Su Xianyu¹

¹Opto-Electronic Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

²Institute of Optics, Information and Photonics, University of Erlangen-Nuremberg, Erlangen 91058, Germany

Abstract Phase measuring deflectometry (PMD) needs the two components of the local surface gradient via a sequence of two orthogonal sinusoidal fringe patterns that have to be displayed and captured separately. A novel phase-shift technique by using the cross fringe pattern is introduced, in which a one-dimensional N -phase shift allows for the acquisition of the two orthogonal phases, with only N exposures instead of $2N$ exposures. Therefore, it makes PMD possible be implemented by a one-dimensional translation of the fringe pattern, instead of the common two-dimensional translation, which will be quite useful for certain applications.

Key words measurement; crossed fringe; phase-shift; phase measuring deflectometry; structured illumination; three-dimensional imaging

OCIS codes 120.2650; 120.6650; 120.5050; 150.0155; 150.6910

1 引 言

近年来,三维光学传感技术中的相位测量偏折术由于其可实现对镜面或类镜面物体的高精度测量而备受关注,与广泛应用的干涉计量^[1]相比,相位测量偏折术具有测量系统简单、成本低、无需补偿器件等优点。在现有的相位测量偏折术中,Kanuer等^[2-3]分别用基于条纹反射和相移技术的光学三维面形测量方法对光学表面进行了高精度测量;Tang等^[4]将移动显示屏与光线追迹相结合实现了对光学非球面的面形检测;Su等^[5]用条纹反射软件可配置光学测试系统(SCOTS)的方法测量大口径光学元件;刘元坤等^[6]将条纹反射技术用于测量具有类镜面性质的瓷砖表面面形;赵文川等^[7]将相位测量偏折术用于测量反射镜面形;王华荣等^[8]采用条纹反射术完成了槽式抛物面单元镜面形的测量。

收稿日期: 2014-09-26; 收到修改稿日期: 2014-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(61177010)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ490879)

作者简介: 刘元坤(1975—),男,博士,副教授,主要从事光学三维传感方面的研究。E-mail: lyk@scu.edu.cn

在这些相位测量偏折术的应用中,都需要分别投影或显示一维水平和垂直光栅,然后再完成各方向相移,进而获取相位分布,若测量系统中采用物理光栅和机械装置相移时,则需在水平和垂直两种光栅中进行切换,并进而完成相应的相移,为此 Canabal 等^[9]将正交光栅用于叠栅偏折术中,避免了在水平和垂直两种光栅之间的切换,但是仍需要二维平移装置分别完成水平和垂直方向相移,且在进行一个方向(比如水平方向)相移时,另一方向光栅(垂直光栅)中的低强度区域将会降低相位测量精度,为提高测量精度需要是将垂直光栅相移半周期,对水平方向再次进行相移测量,因此最终需要 $2 \times 2 \times N (N \geq 3)$ 幅图像。Huang 等^[10]将正交光栅用于相位测量偏折术,采用窗口傅里叶变换方法从单帧图像中提取两正交相位信息,但由于傅里叶条纹分析法,因此舍弃了误差较大的边缘数据区域。

在相位测量轮廓术中,为解决相位展开问题, Li 等^[11]提出采用双频光栅相移方法,将低频光栅和高频光栅集成于单一光栅中,高频光栅提供高精度相位分布,低频光栅用于辅助高频光栅的相位展开,根据设计:低频光栅周期为高频光栅周期的 N 倍 ($N \geq 3$),因此通过两次相移,共获取 $2 \times N$ 幅图像,即可计算出绝对相位分布; Liu 等^[12]采用数字双频光栅相移的方法,低频光栅相移量为高频光栅相移量的 2 倍,仅需 $N (N \geq 5)$ 幅图像即可计算出绝对相位分布。须指出,在以上的双频光栅相移中,两种光栅仅仅是频率不同,而光栅的方向是相同的。

本文提出一种双频正交光栅相移方法,将正交光栅用于相位测量偏折术,测量中无需更换光栅,并且由于正弦光栅的移动方向为某一特定方向,因此仅仅需要一维平移装置,此外,相移过程中也不会出现固定的低强度区域,即无需额外测量,在实际测量中,仅需 $N (N \geq 5)$ 幅图像即可计算出相位分布,通过对眼镜片进行实际测量,验证了该技术的可行性。

2 原 理

测量装置如图 1 所示。由待测物体表面、光栅显示屏与电荷耦合器件(CCD)相机组成相位测量偏折术系统。CCD 相机记录下待测物体表面的反射像,通过相移可以计算出相位分布,在预先标定好的系统中,通过相位分布就可以计算出对应的显示屏坐标,在确定入射光线 I 和反射光线 R 的方向后,即可计算出法线方向,进一步可计算出待测表面梯度,并由面形重建算法^[13-14]可计算出待测面形。

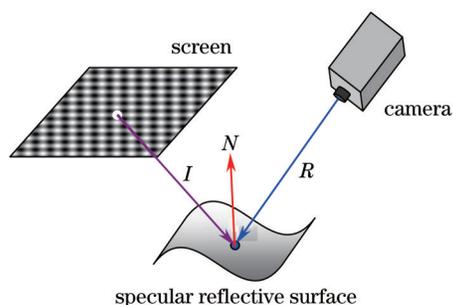


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

当采用一维正弦光栅时, CCD 拍摄的像可表示为

$$\begin{cases} I_{x_n}(x, y) = a + b \cos[\varphi_x(x, y) + 2\pi n/N] \\ I_{y_n}(x, y) = a + b \cos[\varphi_y(x, y) + 2\pi n/N] \end{cases}, n = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

式中 a 为背景光强, b 为调制度, x 和 y 为世界坐标, φ_x 和 φ_y 是待测相位, $N (N \geq 3)$ 为相移次数, 可以看出需要 $2N$ 幅图像才能计算出相位分布。若采用正交光栅, 如图 1 所示, 其强度函数可表示为

$$I(x, y) = a + b_1 \cos[\varphi_x(x, y)] + b_2 \cos[\varphi_y(x, y)]. \quad (2)$$

若对正交光栅进行二维相移^[7], 即分别进行水平和垂直方向相移, 共获取 $2N$ 幅图像从而计算出相位分布, 即最少需要 6 幅图像; 而从(2)式可以看出, 有 5 个未知量(包括待求相位), 那么最少 5 幅图像即能计算出待求相位分布, 其相移方法为

$$\begin{aligned}
 I_n &= a + b_1 \cos\left[\phi_x(x,y) + n\frac{2\pi}{N}\right] + b_2 \cos\left[\phi_y(x,y) + nk\frac{2\pi}{N}\right] \\
 n &= 0, \dots, N-1, \\
 N &= 5, 6, 7, \dots,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

式中 b_1 和 b_2 分别为水平和垂直方向光栅的调制度, ϕ_x 和 ϕ_y 是待测相位, N 为相移次数, k 为指定整数, 取值范围为 $[2, N-2]$ 。对于 x 方向, 其每帧相移量为 $2\pi/N$; 而在 y 方向, 其每帧相移量为 $2k\pi/N$ 。即对于 x 方向的光栅, 其相移总量为 2π , 对应一个周期, 而在 y 方向相移总量则为 $2k\pi$, 对应 k 个周期。相位计算的方法与相位测量轮廓术类似^[15-16], 为

$$\begin{cases}
 \phi_x(x,y) = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin\left(n\frac{2\pi}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos\left(n\frac{2\pi}{N}\right)} \\
 \phi_y(x,y) = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin\left(nk\frac{2\pi}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos\left(nk\frac{2\pi}{N}\right)}
 \end{cases}
 \tag{4}$$

获取的相位值是介于 $[-\pi, \pi]$ 的截断相位, 需展开为连续相位分布, 并且由于需要换算为屏幕坐标, 因此采用预设标记点的方式, 将其作为相位展开的起点, 从而解决条纹越级问题, 得到准确连续相位。

在计算出相位分布后, 则可根据已知标定参数计算出待测表面梯度, 由梯度分布恢复待测表面面形, 本文采用径向基函数拟合法^[12]。

在双频正交光栅相移中, 正交光栅的移动方向将由 x 和 y 方向各自的光栅周期以及整数 k 确定, 若设定 $N=5, k=2$, 则相移过程将如图 2 所示。红点表示正交光栅中某一固定高亮点, 该高亮点随着相移移动, 可以看出: 经过 5 步相移后, 水平光栅移动了一个周期, 而垂直光栅则移动了两个周期, 并且光栅的移动方向既不是水平方向也不是垂直方向, 而是与水平和垂直方向成一定夹角。在图 2 中两个方向的条纹周期相等, 因此图 2 中光栅移动方向与水平轴的夹角为 $\arctan(1/k)=\arctan(1/2)$ 。

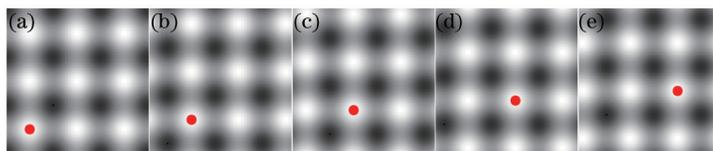


图 2 正交光栅相移过程示意图

Fig.2 Virtual movement of the cross fringe pattern for a five-phase-shift

3 实验及结果分析

为比较常规相移与双频正交光栅相移, 在实验中, 采用投影仪与漫反射屏及 CCD 相机构成相位测量偏折术测量系统, 投影仪分辨率为 $1400 \text{ pixel} \times 1050 \text{ pixel}$, 相机分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$, 首先进行相机标

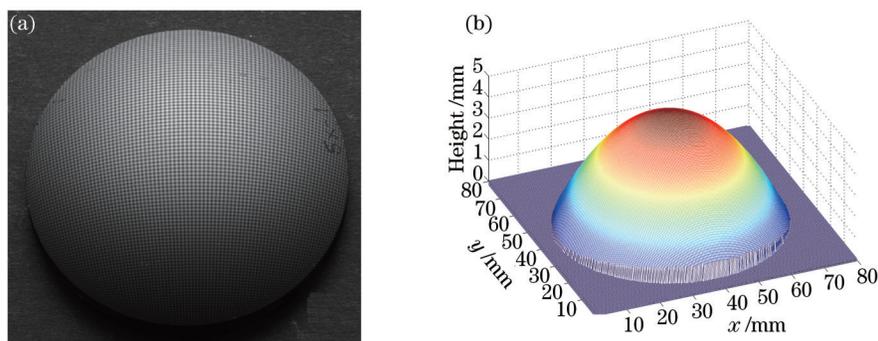


图 3 (a) 拍摄的条纹图; (b) 重建的三维面形

Fig.3 (a) Captured fringe image; (b) reconstructed shape

定、显示屏标定并进而完成系统标定。待测对象为一眼镜片,尺寸为 $\Phi 70$ mm,实验中光栅周期为8 pixel, $N=5$, $k=2$,并且由于非线性效应将影响测量精度,因此实验中需预先进行非线性校正^[17]。所拍摄的某一帧变形条纹和重建的三维面形如图3所示。获取的截断相位如图4(a)和(b)所示,图4(c)和(d)为展开相位,图5为计算得到的待测面形梯度。

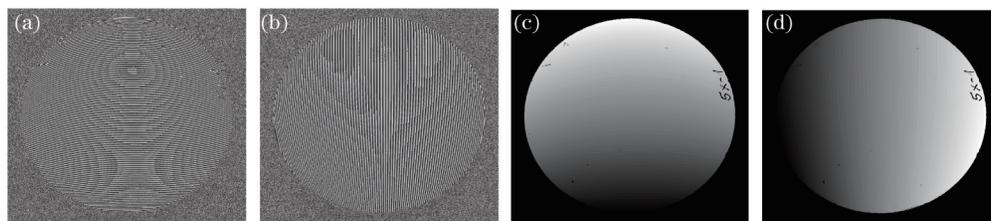


图4 (a) 水平截断相位; (b) 竖直截断相位; (c) 水平展开相位; (d) 竖直展开相位

Fig.4 (a) Horizontal phase; (b) vertical phase; (c) horizontal unwrapped phase; (d) vertical unwrapped phase

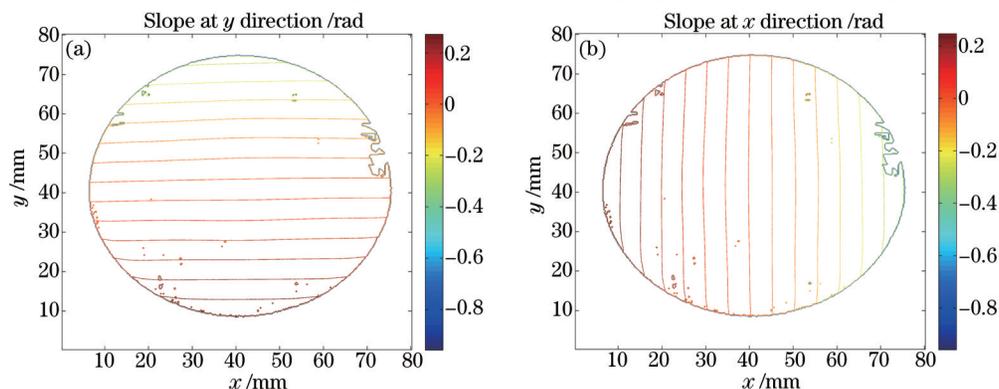


图5 计算出的梯度数据。(a) y方向斜率; (b) x方向斜率

Fig.5 Calculated gradients. (a) Slope at y direction; (b) slope at x direction

由(1)式与(2)式对比可知,在(1)式中水平或垂直光栅的调制度为 b ,且 $b \leq a$,而在(2)式中,水平或垂直光栅的调制度分别为 b_1 和 b_2 ,且 $b_1 \leq a/2$, $b_2 \leq a/2$ 。而在条纹分析方法中,调制度越高,相应的相位精度越高。为验证调制度与测量精度的关系,在实验中,还进行了标准相位测量偏折术(PMD)实验,所谓标准PMD是指:实验中先分别生成两种一维光栅,即水平和垂直光栅,再依次对水平光栅按垂直方向相移,对垂直光栅按水平方向相移。与本文方法的区别在于产生的光栅不同且相移方式不同,其他系统结构参数均相同。实验中,对每一种方法,均进行了多次测量,用多次测量标准差表征重复测量精度。图6(a)和(b)为水平方向梯度的某一行数据的重复测量精度(垂直方向梯度与此相同),可以看出当总图像数不变时,正交光栅的测量精度低于标准PMD的测量精度。

此外,在采用正交光栅时,不仅可以采用一维相移,也可以进行二维相移,即先对水平条纹进行水平方向相移,再对垂直条纹进行垂直方向相移。由图2可以看出,当进行水平方向相移时,则垂直条纹中的暗区的信噪比将低于亮区的信噪比,因此测量精度将受到影响,反之,进行垂直方向相移时也会出现相同情况。实验结果表明在总图像数相同的情况下,一维相移具有更高的测量精度。图6(c)表示采用5帧相移时基于正交光栅的二维相移方法的测量结果。

在相移技术中,随着相移帧数的增加,测量结果的精度也会提高。双频正交光栅相移方法至少需要5幅图像,为了与标准PMD相比较,对一维相移分别采用6 frame和10 frame满周期相移,相应的二维相移即为3 frame和5 frame满周期相移,所测面形梯度的重复测量精度如表1所示。可以看出,随着相移帧数的增加,系统测量精度相应提高;此外本文相移方法的测量精度略低于标准PMD,但高于采用正交光栅与二维相移方法的测量精度。

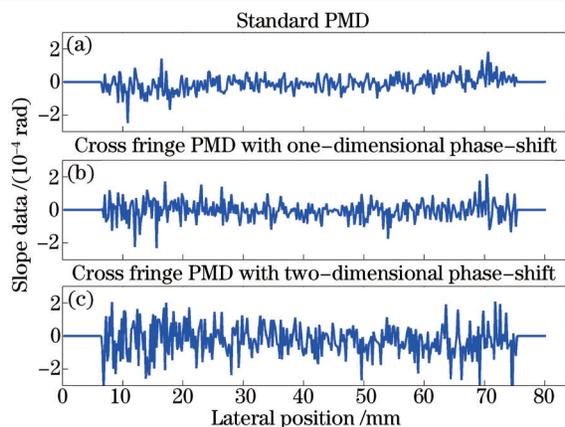


图6 重复测量精度。(a) 标准PMD; (b) 正交光栅一维相移; (c) 正交光栅二维相移

Fig.6 Repeatability errors. (a) Standard PMD; (b) cross fringe PMD with one-dimensional phase shift;

(c) cross fringe PMD with two-dimensional phase shift

表1 不同相移方法下梯度的重复测量精度对比[单位: (°)]

Table 1 Slope repeatability of different methods [unit: (°)]

Number of exposures	6	10
Standard PMD	11.9	9.4
Cross fringe PMD with one-dimensional phase-shift	15.8	11.1
Cross fringe PMD with two-dimensional phase-shift	24.5	18.7

4 结 论

提出一种基于双频正交光栅相移的相位测量偏折术方法,与传统的相位测量偏折术不同,该方法只需一种光栅图样,即正交光栅,并且只需要一维相移,即可计算出两个正交方向相位,并进而计算出待测表面法线及重建待测三维面形。该方法具有相移技术的优点:相移帧数越高,则测量精度越高,并且在采用机械装置进行相移的系统中,本方法中的一维相移只需一维平移装置,而在传统偏折术测量系统中,若采用一维光栅,则不仅需要二维平移装置,还需要精确设计和精密调节确保将独立的水平和垂直光栅组合为一个整体;若采用正交光栅,同样需要二维平移装置,且存在低强度区域的低精度问题。此外,在正交光栅双频相移方法中,最少需要5步相移,5幅图像即可计算出两个正交方向的相位分布。本文所提的方法为相位测量偏折术方法提供了一种新的思路,为基于物理光栅的偏折术测量系统提供了一种新的手段,拓宽了偏折术的应用领域。

参 考 文 献

- 1 Jin Guofan, Li Jingzhen. 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.
- 2 M C Knauer, J Kaminski, G Häusler. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C]. SPIE, 2004, 5457: 366-376.
- 3 T Bothe, W Li, C von Kopylow, *et al.*. High resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection[C]. SPIE, 2004, 5457: 411-422.
- 4 Y Tang, X Y Su, F Wu, *et al.*. 3D shape measurement of the aspheric mirror by advanced phase measuring deflectometry[J]. Opt Express, 2009, 17(22): 19778-19784.
- 5 P Su, R E Parks, L Wang, *et al.*. Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. Appl Opt, 2010, 49(23): 4404-4412.
- 6 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. 3-D shape measurement for specular surface based on fringe reflection[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1636-1640.
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1636-1640.

- 7 Zhao Wenchuan, Fan Bing, Wu Fan, *et al.*. Experimental analysis of reflector test based on phase measuring deflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112002.
赵文川, 范斌, 伍凡, 等. 基于PMD的反射镜面检测实验分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112002.
- 8 Wang Huarong, Li Bing, Wang Zhifeng, *et al.*. Surface measurement of parabolic trough unit mirror based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112007.
王华荣, 李彬, 王志锋, 等. 基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面形测量[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112007.
- 9 H Canabal, E Bernabeu. Phase extraction methods for analysis of crossed fringe patterns[C]. SPIE, 1999, 3744: 231-240.
- 10 L Huang, C S Ng, A K Asundi. Dynamic three-dimensional sensing for specular surface with monoscopic fringe reflectometry[J]. *Opt Express*, 2011, 19(13): 12809-12814.
- 11 J L Li, H J Su, X Y Su. Two-frequency grating used in phase-measuring profilometry[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(1): 277-280.
- 12 K Liu, Y Wang, D L Lau, *et al.*. Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement[J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 5229-5244.
- 13 Jin Hailong, Su Xianyu, Liu Yuankun, *et al.*. Specular surface measurement based on fringe reflection and analysis of 3D shape reconstruction technique[J]. *Photoelectric Engineering*, 2008, 35(10): 37-42.
荆海龙, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的镜面测量及三维重建算法分析[J]. *光电工程*, 2008, 35(10): 37-42.
- 14 S Ettl, J Kaminski, M C Knauer, *et al.*. Shape reconstruction from gradient data[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(12): 2091-2097.
- 15 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6): 792-796.
李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, 20(6): 792-796.
- 16 Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese J 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.
- 17 Zheng Dongliang, Da Feipeng. Gamma correction method for accuracy enhancement in grating projection profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0512003.
郑东亮, 达飞鹏. 提高数字光栅投影测量系统精度的Gamma校正技术[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0512003.

栏目编辑: 何卓铭