

# 基于二维光学点阵形变的面形测量

凌秋雨, 胡春光, 查日东, 胡晓东, 胡小唐

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 反射镜是光学仪器的核心元件,其面形的精密测量一直是研究领域的重要内容。利用光场调控产生大小灵活可变的空间周期性分布的光学点阵,并提出了一种基于二维光学点阵形变实现面形快速测量的方法。结合几何光学和空间三维变换理论,建立了二维光学点阵几何形变量与反射镜三维面形的数学关联模型,并提出了基于点阵质心的面形重构算法,研究分析了测量方法的测量范围和单像素点分辨率,并对反射镜进行了多倾角的实验测试,实现了对直径为 10.5 mm 的反射镜的亚微米级的测量。通过将测试数据与商用干涉仪的测量数据进行比较,验证了所提方法的可行性。该方法具有测量精度高、速度快和适应性强等特点。

**关键词** 测量; 面形测量; 高精度反射镜; 光学点阵; 激光三角法

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0112003

## Shape Measurement Based on Deformation of Two-Dimensional Optical Lattice

Ling Qiuyu, Hu Chunguang, Zha Ridong, Hu Xiaodong, Hu Xiaotang

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** A reflector is the core element of optical instruments, and the precision measurement of its shape has always been an important part of research areas. A method for rapid shape measurement based on the deformation of two-dimensional optical lattice is proposed based on the variable spatial periodic distribution optical lattice generated by the modulation of optical fields. Based on the theory of geometric optics and space three-dimensional transformation, a mathematic correlation model between a two-dimensional optical lattice deformation and a three-dimensional shape of reflector is established. A surface reconstruction algorithm based on lattice centroid is proposed. The measurement range and single pixel resolution of the proposed measurement method are analyzed. The multi-dip angle experiments are carried out, and a submicron measurement of the reflector with a diameter of 10.5 mm is achieved. The feasibility of the method is verified when we compare the test data with the measurement data of the commercial interferometer. In addition, the method has the characteristics of high precision, fast speed and strong adaptability.

**Key words** measurement; shape measurement; high precision reflector; optical lattice; laser triangular method

**OCIS codes** 120.6650; 120.5700; 120.4630; 120.3940

## 1 引 言

镜面、类镜面等高精度反射器件在航空航天、医疗器械、精密制造、国防科技等领域的应用十分广泛。反射镜面形的精确测量一直是测试领域研究的热点,现有的面形检测方法不能完全满足高精度反

射镜的面形检测需求,如大面形的高精度测量和在线/实时测量等。光学测量方法具有非接触、高精度、高效率等优点,是面形测量的重要技术之一。光学非接触测量法通过接收被物体调制后的光信号来获取被测面的面形信息,从测量原理上可分为干涉测量法、光学探针法和相位测量偏折术等。干涉测

收稿日期: 2017-08-08; 收到修改稿日期: 2017-09-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0107003)、天津市应用基础及前沿技术研究计划(15JCZDJC31600)

作者简介: 凌秋雨(1993—),女,硕士研究生,主要从事光学测量和超分辨显微技术方面的研究。

E-mail: 2015202122@tju.edu.cn

导师简介: 胡春光(1981—),男,博士,副教授,主要从事光学测量和生物单分子力谱等方面的研究。

E-mail: cghu@tju.edu.cn(通信联系人)

量法具有纵向分辨率高、测量速度快、精度高等优点,但容易受测量环境的影响,且横向分辨率低、垂直测量范围较小,不适合测量表面面形起伏大的复杂曲面<sup>[1]</sup>。光学探针法与传统的机械探针法类似,利用聚焦光束代替物理探针,具有无损、可靠性高、垂直分辨力高、精度高的优点,但其垂直测量范围较小,且测量速度慢,仅适用于纳米级或亚纳米级的光滑连续表面测量,不适用于大面积复杂表面的测量<sup>[2]</sup>。根据提取相位的方法可将相位测量偏折术分为叠栅条纹轮廓术、傅里叶变换轮廓术和相移法等,通过相位求解被测面形信息的方法速度快,测量结果稳定、精度高,可实现大视场全局三维形貌测量,但相位展开因受被测面形不连续、噪声和条纹采样欠缺等因素的影响而存在误差,获得的的面形信息可能失真。尽管已经有人提出了很多的相位展开算法,但通常只是针对其中一种因素的干扰,不能满足一般性需求<sup>[3-7]</sup>。

基于以上问题,提出了一种高反射面的面形测量方法,将光学点阵应用到高反射面的面形测量中。光学点阵是一种由有限数量的平面波集合叠加产生的空间周期性相干图案,其周期性分布的空间特性使其可应用于许多领域,如超高分辨显微技术<sup>[8-10]</sup>、光通信<sup>[11]</sup>、原子的捕获和冷却以及三维形貌测量<sup>[12]</sup>等。Bulut 等<sup>[15]</sup>利用四芯光纤产生的四光束来形成干涉条纹,并结合结构光法将光学点阵应用于三维形貌测量,但该方法产生的光学点阵尺寸、周期固定,若需要调整光学点阵的参数,需对光纤结构进行重新设计和加工,且产生的光学点阵图像易受外界环境的影响,测量精度不高。本文通过光场调控产生光学点阵,其尺寸灵活可调,直接利用光学点阵结构受被测面面形调制后产生的形变量来计算被测面的面形,无需通过相位解算面形信息,并且仅需采集一幅图像便可测量被测面的面形。

## 2 测量原理

采用的面形测量方法的系统结构如图 1 所示。利用计算机将设计好周期的光学点阵相位图输入空间光调制器,将经空间光调制器调制后的出射光经两个透镜(焦距分别为  $f$  和  $f_1$ )的两次傅里叶变换后在被测面上形成光学点阵。反射的光学点阵受样品表面高度调制后会在位置和形状上发生变化。变形的光学点阵经成像系统后被 CCD 相机接收,对比平面测量和非平面测量时 CCD 相机采集的图像中的光学点阵,计算光学点阵的形变量。根据空间光

调制器的出射面、被测样品、CCD 相机成像面之间的几何关系,利用空间三维变换理论和几何光学原理可计算出光学点阵的形变量与被测面的面形之间的关系。CCD 相机成像面上光学点阵形变量的分布反映了被测面上面形的梯度分布情况,最后采用模式重构法将形变量转化为被测面的面形信息。

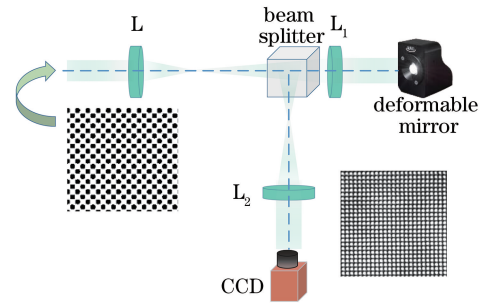


图 1 面形测量系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of surface measurement system

所提出的面形测量方法与 Hartmann 波前传感器测量面形具有相似之处。Hartmann 波前传感器采用微透镜阵列实现对波前的测量,适用于像差、球差较大的非球面透镜的检测。由于微透镜是固定的,Hartmann 波前传感器的测量范围也受到限制,为此,提出利用光场调控产生光学点阵的方法,该方法可实现光学点阵的可控变化,其测量能力显著提升,测量对象可以是倾斜表面、球面和自由曲面等。

将面形测量系统进行简化,如图 2 所示。图 3 为面形测量方法的几何模型。被测面水平放置, $O$  为坐标原点,点  $M$  为被测面上一点,点  $H$  在点  $M$  下方且与点  $M$  的距离为  $h$ ,且  $OH$  与  $x$  轴的夹角为  $\beta_x$ 。入射光线正入射到被测面上,若被测面面形为水平面时,反射光线将原路返回。经点  $M$  反射的光线沿  $HB$  出射,出射光经过成像系统后投射到 CCD 相机上的点  $B''$ ,而由被测面上点  $H$  反射的光线  $HA$  经成像系统后投射到 CCD 相机上的点  $A''$ 。因此,相机成像面上受表面面形调制的光学点阵的理论形变量为  $A''B''$ 。

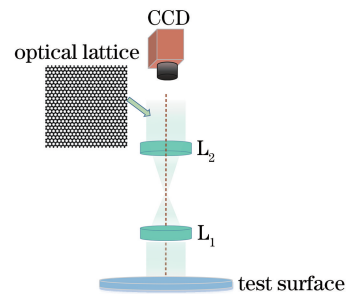


图 2 简化系统图

Fig. 2 Diagram of simplified system

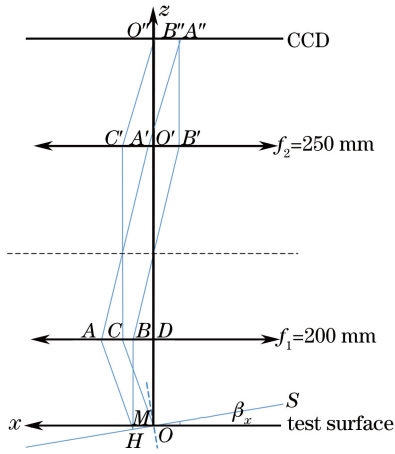


图 3 几何模型

Fig. 3 Geometric model

计算光线经点  $H$  反射后到达透镜  $L_1$  下表面时与光线经点  $M$  反射后到达透镜  $L_1$  下表面时的位置差  $AB$  可表示为

$$AB = HB \tan(2\beta_x) = (f_1 + M_1 x \tan \beta_x) \tan(2\beta_x), \quad (1)$$

式中  $HB = MB + MH$ ,  $MB$  为透镜  $L_1$  的焦距  $f_1$ ,  $OM$  的长度为  $M_1 x$ ,  $M_1$  为照明系统的系统放大倍数。点  $O$  处在  $x$  方向上且存在角度为  $\beta_x$  的倾斜时,经点  $O$  反射的出射光线  $OC$  与透镜  $L_1$  下表面相交于点  $C$ ,则  $DC$  可表示为

$$DC = OB \tan(2\beta_x) = f_1 \tan(2\beta_x). \quad (2)$$

经过成像系统后,点  $M$  和点  $H$  在 CCD 相机成像面上的位置差即光学点阵受被测表面面形的调制而产生的形变量  $A''B''$  可以表示为

$$A''B'' = O''A'' - O''B'' = A'C' - O'B' = M_2 \cdot AC - M_2 \cdot DB, \quad (3)$$

式中  $M_2$  为成像系统的系统放大倍数。  $AC = DA - DC = AB + DB - DC$ , 则  $AC$  可表示为

$$AC = M_1 x \tan \beta_x \cdot \tan(2\beta_x) + M_1 x. \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式中,可得到 CCD 相机成像面上光学点阵受面形高度变化调制的形变量为

$$\Delta S_x = A''B'' = M_1 M_2 x \cdot \tan \beta_x \cdot \tan(2\beta_x). \quad (5)$$

上面讨论了点  $M$  在  $x$  方向上倾斜  $\beta_x$  时,光学点阵受面形调制在  $x$  方向上变形的情况。同理,当点  $M$  在  $y$  方向上倾斜  $\beta_y$  时,则 CCD 相机接收的光学点阵在  $y$  方向上的形变量为

$$\Delta S_y = M_1 M_2 x \cdot \tan \beta_y \cdot \tan(2\beta_y). \quad (6)$$

已知光学点阵在  $x$ 、 $y$  方向上的形变量,通过基于 Zernike 多项式的模式重构法可获得被测面的面

形。模式重构法利用 Zernike 多项式进行面形拟合,被测面的面形  $W(x, y)$  可用  $k$  项 Zernike 多项式  $Z_i(x, y)$  表示为

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^k a_i Z_i(x, y), \quad (7)$$

式中  $a_i$  为 Zernike 多项式系数。将(7)式分别对  $x$ 、 $y$  求偏微分,可得到

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \sum_{i=1}^k a_k \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \sum_{i=1}^k a_k \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y}. \quad (9)$$

已知  $m$  个光学点阵在  $x$ 、 $y$  方向上的形变量分别为  $\Delta S_x$  和  $\Delta S_y$ , 即  $W^x(x_j, y_j)$  和  $W^y(x_j, y_j)$ , 其中  $j = 1, 2, \dots, m$ , 则

$$\mathbf{W} = \mathbf{K} \mathbf{a}, \quad (10)$$

式中  $\mathbf{W} = [W^x(x_j, y_j) W^y(x_j, y_j)]^T$ , 且  $\mathbf{K} = [\partial Z_i(x, y) / \partial x \partial Z_i(x, y) / \partial y]$  是已知的, 则可以求出 Zernike 多项式系数  $\mathbf{a} = [a_1 a_2 \dots a_k]^T$ 。最终将求得的多项式系数代入(7)式中可重构出被测面的面形。

### 3 高反射面面形测量的分辨率与测量范围

在高反射的面形测量系统中,系统的横向分辨率指 CCD 相机上一个像素点所对应的被测面相对于水平面的偏移量,用  $x_{\text{cam}}$  表示。当被测面有一个  $\alpha$  倾角时,光学点阵经过成像系统被 CCD 接收后会产生一定的偏移,偏移量  $A''B''$  可表示为

$$A''B'' = M_1 M_2 x \cdot \tan \alpha \cdot \tan(2\alpha). \quad (11)$$

如图 4 所示,假设 CCD 相机上相邻两个像素对应不同的反射角,那么被测面法线相对于水平面法线的偏转角  $\alpha$  的正切为

$$\tan \alpha = \Delta h / x_{\text{cam}}. \quad (12)$$

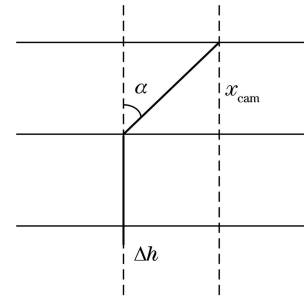


图 4 面形测量几何原理的放大图

Fig. 4 Enlarged figure of geometrical principle of surface shape measurement

将(12)式代入(11)式中,可得到

$$A''B'' = \frac{5}{2} \frac{M_1 x (\Delta h)^2}{x_{\text{cam}}^2}, \quad (13)$$

$$x_{\text{cam}} = x_{\text{pixel}} / M_1, \quad (14)$$

式中  $x_{\text{pixel}}$  指 CCD 相机成像面上单个像素点的大小。根据光学点阵的质心来计算光学点阵的偏移量,令(11)式中  $x$  等于光学点阵的周期。对于像素尺寸为  $4.665 \mu\text{m}$  的相机,结合成像系统的放大倍数,由(14)式计算得到的系统单像素点分辨率为  $3.732 \mu\text{m}$ ,即系统的横向分辨率。系统能够测量的最小高度变化  $\Delta h$  称为垂直分辨率,实验中照射到被测面上的光学点阵周期为 10.08 pixel,由(13)式可得到系统的垂直分辨率  $\Delta h = 1.175 \mu\text{m}$ 。

提出的面形测量方法是利用光学点阵的形变量来求取表面面形信息,为了确保其准确度,光学点阵的形变量不能超出光学点阵在 CCD 上的周期  $T$ ,以防止光学点阵的堆叠,从而导致测量失真。故系统的垂直测量范围为

$$x_{\text{cam}} \leq A''B'' \leq T. \quad (15)$$

实验中横向测量范围与空间光调制器的像素尺寸以及光学系统的放大倍数等有关,且  $T = 12.6 \text{ pixel}$ 。根据(15)式,实验的垂直测量范围为  $4.173 \mu\text{m}$ 。实验中的光学点阵为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ,即横向测量面积为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。实验使用的光学点阵产生于有限数量的平面波集合的叠加,光学点阵的空间属性(如对称性、原始晶胞形状和周期等)仅取决于所给定的平面波的波矢量。根据测量需求可改变平面波的波矢量和光学点阵的周期,从而改变系统的测量分辨率和测量范围,增强了系统适应性。通过增大周期可以提高系统的测量分辨率并增大系统的垂直测量范围,使单像素点分辨率达到亚微米级、亚像素点分辨率达到纳米级,整个系统具有高分辨率、大阶跃测量范围和适应性强的特点。

#### 4 实验测量与结果分析

利用变形镜(DM)面形可调的特点,将直径  $R = 10.5 \text{ mm}$  的变形镜作为被测面。选取法国 Alpao 公司的高速可变形镜 DM69,该变形镜具有调制量大、动态范围大、线性度好和低迟滞等优势。实验中通过不同的控制信号控制变形镜产生不同的面形。

检测时,计算机将设计好周期以及点阵单元大小的光学点阵相位图输入空间光调制器。经空间光调制器调制后的出射光依次经过焦距  $f = 500 \text{ mm}$  和焦距  $f_1 = 200 \text{ mm}$  的透镜,出射光经两次透镜傅

里叶变换后在第二个透镜的后焦面处即变形镜的反射面(被测面)处形成光学点阵。光学点阵由变形镜反射,同样经过焦距  $f_1 = 200 \text{ mm}$  和焦距  $f_2 = 250 \text{ mm}$  的透镜,出射光经两次傅里叶变换后在焦距为  $f_2$  的透镜后焦面处形成光学点阵,并由位于焦距为  $f_2$  透镜后焦面处的 CCD 接收。

实验时,首先将变形镜复位,使变形镜的表面为平面,CCD 采集得到此时的光学点阵图像如图 5(a)所示。然后调整变形镜的表面,使其在  $x$  方向上倾斜一定的角度,采集得到此时的光学点阵图像如图 5(b)所示。通过简单的对比可发现,光学点阵的大小没有发生变化,仅光学点阵的位置发生变化。

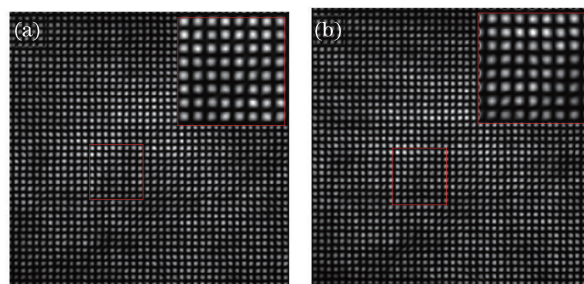


图 5 CCD 相机采集的光学点阵图像。

(a)被测面为平面;(b)被测面为斜面

Fig. 5 Optical lattice images acquired by CCD.

(a) Flat surface; (b) slope surface

利用 Matlab 对采集到的图像进行处理,处理流程如图 6 所示。首先,通过自适应阈值处理的方法对 CCD 相机采集的光学点阵图像进行二值化处理;然后,利用连通组件标记算法找到二值化后图像中所有的连通区域,运用计算几何距算法得到每个连通区域质心的位置信息,标记质心位置,并剔除图像边缘处标记出的不完整晶胞的质心,如图 7 所示;最后,将先后采集到的平面与斜面的光学点阵图像的质心按位置分布排列在同一幅图中,如图 8 所示。可以看出,光学点阵在  $x$  方向上整体发生了平移,而在  $y$  方向上没有变化。

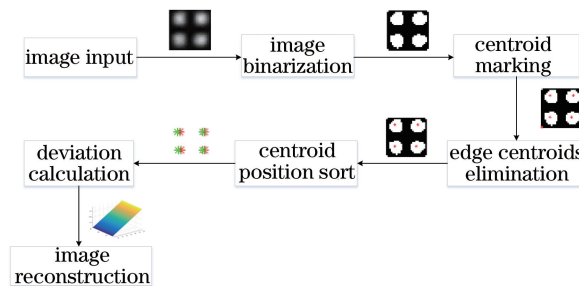


图 6 图像处理流程图

Fig. 6 Flow chart of image processing

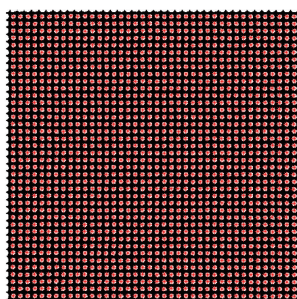


图 7 剔除边缘不完整晶胞后的质心标记图

Fig. 7 Centroid marking after eliminating incomplete edge cells

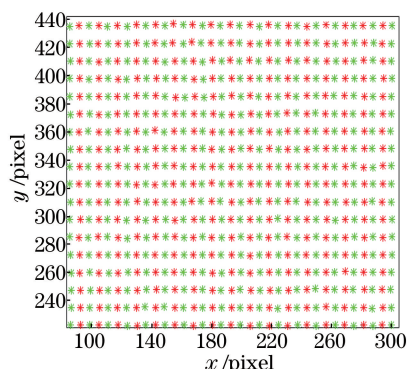


图 8 质心位置分布

Fig. 8 Distribution of centroid position

为了更加清楚地观察光学点阵图像在  $x$ 、 $y$  方向上变化的规律,在反射面高度为  $10\ \mu\text{m}$  时所测得的光学点阵图像中选取第 181, 194, 206, 219, 232,

245 行所对应的光学点阵,对比被测面倾斜前后光学点阵的质心位置在  $x$ 、 $y$  方向上的变化,质心的位置变化如图 9 所示。

对比发现斜面所对应的光学点阵的质心相对于平面所对应光学点阵的质心位置在  $x$  方向上整体偏移了一段距离,而在  $y$  方向上基本没有产生位移,该结果与被测面为  $x$  方向上的斜面的理论预测结果保持一致。光学点阵质心的偏移量反映了被测面的梯度分布,利用基于 Zernike 多项式的模式重构法可重构出被测面的面形。

根据质心重构算法重构出的面形如图 10(b) 所示。为了更好地验证所提出的检测方法,将利用光学点阵形变法重构出的面形与商用干涉仪 (GPI™ XP/D, Zygo 公司, 美国, 测量精度为  $\lambda/10$ ,  $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ ) 检测的面形数据进行比较,将两种测量方法测得的面形数据相减,得到的面形差如图 10(c) 所示。从图 10(c) 可以看出,重构出的面形与商用干涉仪所测得的面形相符,且将两种测量方法测得的面形数据相减得到的面形误差的均方根 (RMS) 为  $0.131\ \mu\text{m}$ , 小于一个波长。该对比结果验证了所提出的面形测量方法的可行性和精确性。

此外,控制变形镜的表面在  $x$  方向上倾斜,通过改变变形镜的控制信号使得变形镜的倾角不同,

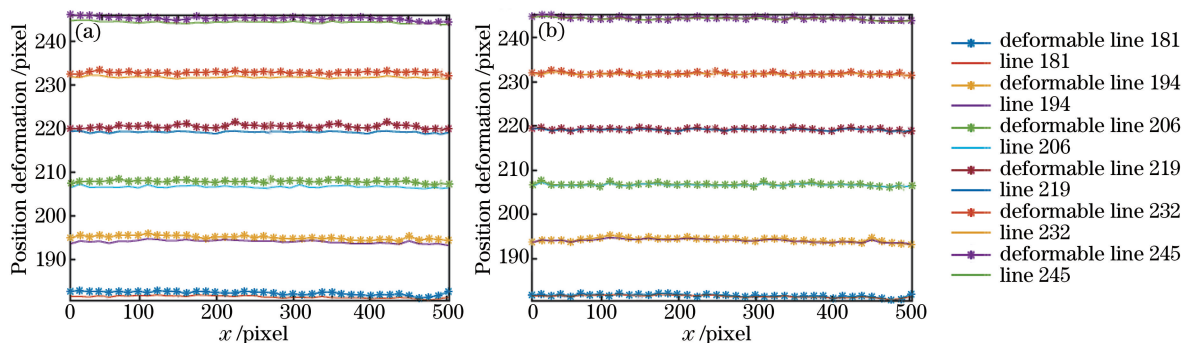


图 9 被测面变形前后的质心位置变化。(a)  $x$  方向;(b)  $y$  方向

Fig. 9 Changes of centroid position. (a)  $x$  direction; (b)  $y$  direction

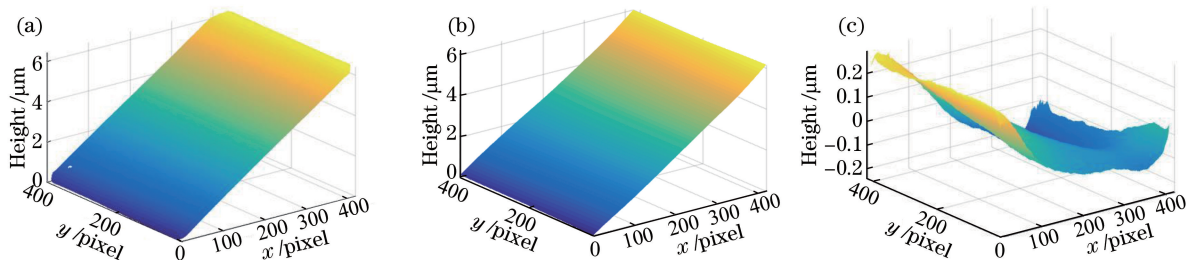


图 10 面形测量结果。(a)用 Zygo 干涉仪测量;(b)采用光学点阵形变法测量;(c)两种测量面形的差值

Fig. 10 Results of surface measurement. (a) Measured by Zygo interferometer;

(b) measured by optical lattice deformation method; (c) difference between two methods

分别对应的斜面高度为 $\pm 2, \pm 5, \pm 10 \mu\text{m}$ ,利用质心重构算法可重构出被测面的面形。此外,利用 Zygo 干涉仪对变形镜的倾斜面形进行测量,并将其与所重构的面形进行比较。实验中测量的面形为斜面,通过斜面的倾角进行比较。比较情况如表 1 所示。

表 1 光学点阵形变法与 Zygo 干涉仪的测量结果对比

Table 1 Results measured by optical lattice deformation method compared with that measured by Zygo interferometer

Method	Height / $\mu\text{m}$	Angle /( $^{\circ}$ )
Interferometer	-10	-0.0550
	-5	-0.0259
	-2	-0.0109
	2	0.0115
	5	0.0279
	10	0.0550
Deformed lattice	-10	-0.0546
	-5	-0.0276
	-2	-0.0119
	2	0.0100
	5	0.0277
	10	0.0542

通过对比发现,利用所提测量系统测量的面形与采用高精度的 Zygo 干涉仪测量的面形基本一致,随着倾角的增大,两者测量数据更加接近。这种现象与采用光学点阵的质心确定点阵的位置有关,因为随着倾角的增大,光学点阵质心位置偏移量的误差会减小。实验结果表明利用光学点阵形变量计算高反射面面形是可行的,并且测量精度较高。

## 5 结 论

介绍了利用光学点阵形变量计算被测面面形的原理,建立了光学点阵形变量与被测面面形信息相对应的几何模型,并对不同倾角的反射面进行了测量,实验结果验证了该方法对面形检测的可行性和准确性。利用光场调控产生的光学点阵,并根据不同的测量需求改变投射到被测面上光学点阵的大小。相对于条纹反射技术,利用光场调控产生的光学点阵可以灵活更改投射到被测表面的图案,且无须改变实验光路,适应性强。所提系统实现了对高反射面进行亚微米级的高分辨率的检测,检测精度较高,并且可通过改变光学点阵的周期来改变系统的分辨率和测量范围。所提出的通过变形光学点阵计算被测面面形信息的方法,只需一幅图像便可得到被测面的面形信息,且无须进行相位测量和相位解调,计算简单便捷。

## 参 考 文 献

- [1] Wyant J C. Improved interferometric optical testing [J]. *Optics and Photonics News*, 2007, 18(7): 32-37.
- [2] Li S H. Optical 3D shape measurement of ultra-precision specular surface[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 5-6.  
李绍辉. 超精密加工高反射曲面光学非接触三维形貌测量[D]. 天津: 天津大学, 2012: 5-6.
- [3] Bothe T, Li W S, Kopylow C V, *et al.* High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection[C]. *SPIE*, 2004, 5457: 411-422.
- [4] Liu Y K, Su X Y, Wu Q Y, *et al.* Three-dimensional 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, 等. 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.
- [5] Wang H R, Li B, Wang Z F, *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, 王志峰, 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.
- [6] Yuan T, Zhang F, Tao X P, *et al.* Test of mirror surface using fringe reflection system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(9): 0912004.  
袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 条纹反射法检测光学反射镜面形[J]. *光子学报*, 2015, 44(9): 0912004.
- [7] Yuan T, Zhang F, Tao X P, *et al.* Three-dimensional shape measuring for specular surface based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212004.  
袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0212004.
- [8] Yang B, Przybilla F, Mestre M, *et al.* Large parallelization of STED nanoscopy using optical lattices [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5581-5589.
- [9] Bergermann F, Alber L, Sahl S J, *et al.* 2000-fold parallelized dual-color STED fluorescence nanoscopy [J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 211-223.
- [10] Chen B C, Legant W R, Wang K, *et al.* Lattice light-sheet microscopy: imaging molecules to embryos at high spatiotemporal resolution[J]. *Science*, 2014, 346(6208): 1257998.
- [11] Chen Y, Ponomarenko S A, Cai Y J. Experimental

- generation of optical coherence lattices[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(6): 061107.
- [12] Dong Y, Wang F, Zhao C, *et al.* Effect of spatial coherence on propagation, tight focusing, and radiation forces of an azimuthally polarized beam[J]. Physical Review A, 2012, 86(1): 013840.
- [13] Zhao C, Cai Y, Lu X, *et al.* Radiation force of coherent and partially coherent flat-topped beams on a Rayleigh particle[J]. Optics Express, 2009, 17(3): 1753-1765.
- [14] Zhang J F, Wang Z Y, Cheng B, *et al.* Atom cooling by partially spatially coherent lasers[J]. Physical Review A, 2013, 88(2): 023416.
- [15] Bulut K, Inci M N. Three-dimensional optical profilometry using a four-core optical fibre[J]. Optics & Technology, 2005, 37(6): 463-469.