

引用格式: WAN Xin-jun, LÜ Song, SONG Ke, *et al.* A Specular Stepped Surface Profile Measurement System Based on Fringe Reflection Principle with Micrometer-level Height Resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0412001  
万新军, 吕宋, 宋可, 等. 一种微米级高度台阶镜面条纹反射的三维测量系统[J]. *光子学报*, 2020, **49**(4):0412001

# 一种微米级高度台阶镜面条纹反射的三维测量系统

万新军, 吕宋, 宋可, 解树平

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘 要:**提出了一种检测微米级高度衍射台阶结构的条纹反射三维检测方法.对条纹反射光路的理论分析表明,合理选择入射光线角度和液晶屏放置角度以及液晶屏像素尺寸等系统参数,条纹反射系统能够分辨微米乃至亚微米级的镜面台阶.实际构建了一套微米级台阶镜面条纹反射测量实验装置;采用四步相移法进行条纹相位解算,运用移动屏幕方法确定反射光线方程,结合三角交汇原理,对待测台阶镜面进行三维重构.实际测量了名义值为  $5\ \mu\text{m}$  和  $10\ \mu\text{m}$  的台阶镜面,测量结果不确定度在  $0.5\ \mu\text{m}$  内,和商业仪器测量结果的偏差  $< 0.5\ \mu\text{m}$ ,证明了设计方法的可行性.本文结果对于包含衍射台阶结构的光学元件三维测量研究具有一定的借鉴意义.

**关键词:**条纹反射;台阶镜面;相位测量;三角法;三维重构

中图分类号: TH741

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204904.0412001

## A Specular Stepped Surface Profile Measurement System Based on Fringe Reflection Principle with Micrometer-level Height Resolution

WAN Xin-jun, LÜ Song, SONG Ke, XIE Shu-ping

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** A fringe reflection three dimensional (3D) profile measurement system is proposed for micrometer-level height stepped mirrors. A systematic theoretical analysis of fringe reflection ray path is conducted, showing that by proper selection of the structure parameters including the ray incident angle, the Liquid Crystal Display (LCD) screen orientation angle and the LCD screen pixel size, the fringe reflection system can resolve micron and even sub-micron level stepped mirrors. A micrometer-level resolution fringe reflection measurement setup for stepped mirrors is constructed, which calculates the fringe phase using the four-step phase shift method, determines the reflected light equation using the moving screen method and reconstructs the 3D shape based on triangulation method. A stepped mirror sample with  $5\ \mu\text{m}$  and  $10\ \mu\text{m}$  steps is finally measured. The measurement uncertainty is within  $0.5\ \mu\text{m}$  and the discrepancy with the commercial system result is less than  $0.5\ \mu\text{m}$ , which proves the feasibility of the designing method. The result of this paper can be of great reference to the 3D reconstruction study of specular surfaces with diffractive structures.

**Key words:** Fringe reflection; Specular stepped surface; Phase measurement; Triangulation; 3D reconstruction

**OCIS Codes:** 120.2650; 120.6650; 120.5700; 120.2830

## 0 引言

随着光学设计和加工技术的发展,自由曲面和折衍射混合光学表面在各类成像系统中的应用日趋广

基金项目:国家自然科学基金(No.61505107),国家重大科研仪器项目(No.2012YQ170004),上海市科技创新行动计划(No.19511104600)

第一作者:万新军(1981-),男,讲师,博士,主要研究方向为光学精密测量仪器研发. Email: xinjun.wan@usst.edu.cn

收稿日期:2019-12-17;录用日期:2020-01-17

<http://www.photon.ac.cn>

泛<sup>[1]</sup>,面向此类非规则光学表面的三维面型检测技术变得日趋重要<sup>[2]</sup>.光学自由曲面的三维面型测量方法通常分为接触式与非接触式两类.接触式测量主要是利用高分辨率位移传感测头对待测面进行离散或者连续测量以获得空间坐标数据,如三坐标测量仪<sup>[3]</sup>、触针式以及摆臂式轮廓仪<sup>[4]</sup>等,但是检测速度较慢,易划伤表面.光学自由曲面非接触式测量主要是利用各类非接触式距离传感测量头配合精密运动系统扫描测量,或者利用干涉或者波前测量原理全场测量,获得待测面表面轮廓三维数据.目前较成熟的有共焦测头扫描法,多波长干涉测头扫描法,计算全息干涉测量法及夏克-哈特曼检测法等.哈尔滨工业大学设计<sup>[5]</sup>的大口径光学共焦轮廓仪将共焦光学测头与精密激光干涉仪相结合,自由曲面面型检测误差在 300 nm 以内,但该仪器需提前进行扫描轨迹规划,装夹复杂且耗时较长.目前市面上应用多波长干涉测头扫描法的仪器有 Taylor Hobson 公司开发的 LumphoScan 测量系统<sup>[6]</sup>,使用多波长干涉探头进行螺旋扫描,测量精度达到 50 nm,但该系统结构只能测量回转对称的待测件且同样需要提前进行扫描轨迹规划,操作较为复杂,且该技术仍处于保密阶段.计算全息干涉测量法<sup>[7]</sup>的基本原理是将计算全息元件衍射产生的理想波前与待测件的实际波面干涉,从而得到待测面面型误差干涉图,测量精度可达 1/100 个波长,但该方法检测自由曲面通用性差,成本较高.Shack-Hartmann 检测法<sup>[8-9]</sup>将入射波前经过微透镜阵列后聚焦于 CCD 像面上,通过比对光斑位置可重构波前和待测面的轮廓;中国科学院光电技术研究所对哈特曼波前传感器的研究成果颇丰,用于“神光-III”主机装置的哈特曼波前传感器测量动态范围大于 21.7  $\mu\text{m}$ 、测量精度优于 0.02  $\mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>,但应用于自由曲面测量此方法动态范围仍显不足.上述非接触式测量方式检测精度高,但是应用于自由曲面测量时在测量动态范围以及测量灵活性等方面都各有限制,而且系统价格昂贵.

条纹反射法也属于非接触测量方法,近年来在自由曲面光学面检测领域受到广泛关注.它利用液晶屏生成标准条纹图案,由相机捕捉到经待测样品表面反射的变形的条纹图,利用相位跟踪原理,对样品表面形貌进行恢复<sup>[11-14]</sup>.条纹反射法测量动态范围大,测速快,受到广泛关注.与坐标测量方法不同,条纹反射测量法通常直接测量的是被测表面的梯度信息,再积分重构出面型数据<sup>[15-17]</sup>.积分条纹反射法利用了光线反射的偏折效应,具有很高的面型检测灵敏度;但是,积分法在遇到非连续台阶面型时会重构失败.

为解决积分法的台阶跳变检测局限,条纹反射法也发展出采用三角交汇方法来直接重构被测面形.张宗华等基于条纹反射三角法,利用双液晶屏对 4 至 7 mm 高度的台阶镜面成功开展了非接触测量,平均测量误差约 32  $\mu\text{m}$ <sup>[18-20]</sup>.英国赫德斯菲尔德大学精密技术中心<sup>[21]</sup>采用类似方法,利用数字投影仪照射在可移动的散射平面代替双液晶屏,对 4 至 11 mm 高度的阵列阶梯镜面样品成功进行了测量,镜面台阶的高度测量误差约 50  $\mu\text{m}$ .现代光学设计中,很多光学元器件表面包含微米级高度的衍射结构.比如,红外热成像镜头为消色差普遍采用折衍射混合光学设计,该类透镜表面的衍射结构周期一般在数毫米至数十毫米量级,结构高度仅数微米.目前测量此类衍射结构一般只能依靠三维测量显微镜局部测量,或者采用接触式轮廓仪作截面测量,局限性较大.前述文献报道的台阶测量条纹反射测量方案也不能解决此类微米级高度台阶镜面的测量问题.

本文针对微米级高度台阶镜面的测量问题,提出一种微米级高度台阶镜面条纹反射三维测量系统,理论分析了系统结构参数和台阶高度检测灵敏度的依赖关系,构建了一套基于四步相移和移动显示器屏幕的条纹反射测量装置,并对一个微米级高度台阶镜面样品开展了三维重构测试和精度分析.

## 1 基本原理

### 1.1 条纹反射三维测量原理

条纹反射三维测量系统示意图如图 1 所示.处在位置 1 与 2 的液晶屏幕发出的入射光线以一定入射角照射到待测面,被反射后进入相机系统;因此,液晶屏幕上显示的条纹图案经被测镜面反射调制后会成像于相机像面.该系统基于条纹反射三角交汇原理重构镜面三维轮廓.液晶屏幕处于位置 1 和 2 时,相机分别拍摄两组变形的相移正弦条纹图,通过对变形的条纹图进行相位解算和相位映射,可以确定两个位置液晶屏中的同名点,分别为  $P'$  和  $P''$ ,连接两个同名点即得到入射光线  $P'P''$ .根据相机针孔成像模型,反射光线的方程可由相机光心和像面上的同名点连线得到.根据三角交汇方法即可得到待测镜面的三维面形.

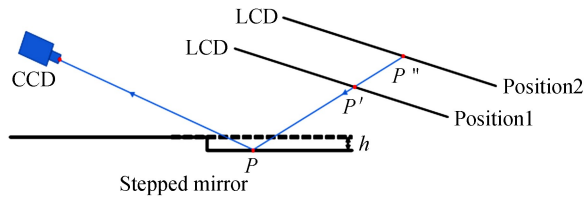


图 1 条纹反射台阶镜面三维测量系统示意图

Fig.1 Schematic of stepped mirror 3D measurement system based on fringe reflection step mirror

本文和已报道的条纹反射测量系统的主要区别在于,为实现微米级台阶高度检测,本文系统分析了反射光线跳变量与台阶高度的依赖关系,通过合理选择系统结构参数来实现微米级分辨率.

### 1.2 反射光线跳变量和台阶高度的关系

根据光路可逆原理,图 1 光路可以逆向理解为从相机光心发出的光线经待测镜面反射到液晶屏平面上,如图 2 所示;此时,按照相机针孔模型,经光心  $O$  发出的光线成为入射光线,入射于待测面  $B$  点,反射后反射光线交于屏幕上  $P'$  点.如果高度  $h$  的台阶面不存在,光心  $O$  发出的入射光线本应交于虚线上的  $A$  点,经反射后交于屏幕上的  $P$  点,台阶面的高度差造成反射光线与屏幕的交点产生跳变,即由  $P$  跳变到  $P'$  处,定义  $|P'P|$  为反射光线跳变量  $\Delta$ .假设待测样品水平放置,根据图 2 可推导出,反射光线跳变量  $\Delta$  为

$$\Delta = 2h \sin \alpha / [\cos(\alpha + \gamma)] \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为入射光线的入射角度,  $\gamma$  为液晶屏与水平方向的夹角(逆时针为正).当液晶屏幕上显示正弦条纹图时,台阶面的高度差会表现为条纹错位,通过条纹相位测量即可以确定  $\Delta$  值.

在现有报道条纹反射测量结构中,  $\alpha$  通常取值  $20^\circ \sim 50^\circ$ ,  $\gamma$  取值在  $-50^\circ$  至  $-10^\circ$  区间,这种结构利于清晰拍摄样品和条纹<sup>[15]</sup>.但是,如果被测台阶高度降至微米量级,采用上述结构参数时  $\Delta$  值也降低到微米级,而普通液晶屏单像素尺寸即为数十至数百微米,相位噪声会导致很难检测出微米量级的反射光线跳变.

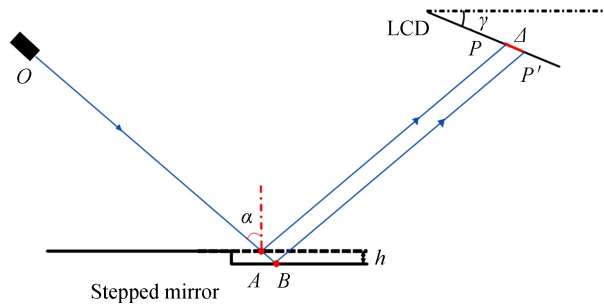


图 2 光线逆向传播的条纹反射系统工作原理示意图

Fig.2 Schematic of the reverse propagation ray tracing of the fringe reflection system

### 1.3 结构参数设计

根据式(1),改变结构参数  $\alpha$  和  $\gamma$  的取值可以调整光线跳变量对台阶高度的灵敏度.下面对条纹反射测量中影响光线跳变量检测分辨率的三个因素展开仿真分析.

按照图 2 结构,台阶高度设定为  $5 \mu\text{m}$ .首先假定液晶屏角度  $\gamma = -10^\circ$ .图 3(a)为反射光线跳变量  $\Delta$  随入射角度  $\alpha$  的变化关系;可以看出,  $\Delta$  正比于入射角度,即入射角度增大可以提高台阶检测分辨率.但是,入射角度增大意味着大角度斜向成像,这会导致在入射平面内样品的成像横向分辨率降低,同时要求相机有更大的景深.本文中均衡考虑选择入射角度选择约  $70^\circ$  值.

图 3(b)反映了入射角度不同取值下,反射光线跳变量随液晶屏角度  $\gamma$  的变化关系.按图 2 中  $\gamma$  定义,反射光线跳变量也正比于  $\gamma$  值.理论上,当  $(\alpha + \gamma)$  值趋近  $90^\circ$  时,反射光线跳变量趋向无穷大,此时反射光线趋近平行于液晶屏平面.实际成像中,液晶屏的有效观察角度达不到接近  $90^\circ$ .根据实际测试,  $(\alpha + \gamma)$  值约  $70^\circ$  时液晶屏显示图案尚可清晰观察,因此,图 3(b)以  $(\alpha + \gamma) < 70^\circ$  为条件来确定  $\gamma$  的取值区间.综合图 3(a)和(b),本文选取  $\alpha$  约  $70^\circ$  和  $\gamma$  约  $0^\circ$  为系统结构参数,此时  $5 \mu\text{m}$  高度台阶引起的反射光线跳变量  $\Delta$  达到  $27 \mu\text{m}$ .

条纹反射测量通过计算条纹相位来确定反射光线跳变量,因此液晶屏幕像素尺寸也影响反射光线跳变

的检测分辨率.图 3(c)显示了不同液晶屏像素尺寸下  $27\ \mu\text{m}$  的反射光线跳变所对应的相位变化量(假定 10 个液晶屏像素显示一个正弦条纹周期).经过测试一般相位检测噪声标准差约  $0.03\ \text{rad}$ ,因此为分辨  $5\ \mu\text{m}$  高度台阶,至少需要选择像素尺寸在  $100\ \mu\text{m}$  以下的液晶屏.

综合理论计算结果,图 3(d)为合理选择设计的条纹反射系统结构参数,其具备了分辨微米级台阶跳变的能力.

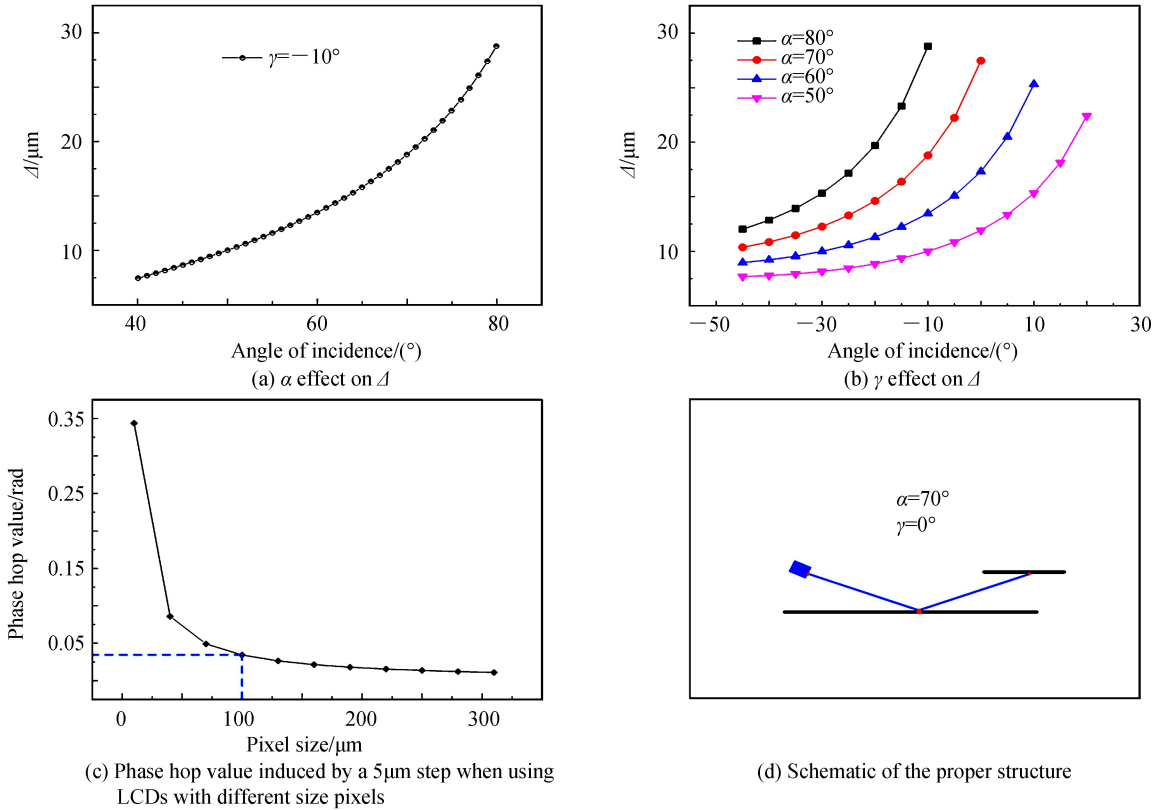


图 3 反射光线及相位跳变仿真结果和最终合理选择的结构

Fig.3 Simulation of the reflection ray and phase hop values and the proper structure

## 2 实验及分析

### 2.1 微米级台阶镜面条纹反射三维测量系统

基于结构参数设计,本文搭建的条纹反射台阶镜面三维测量实验系统如图 4(a)所示.系统使用了一块像素分辨率为  $1\ 440 \times 2\ 560$  的液晶屏(型号:LS055R1SC01)作为正弦条纹图案生成器,单像素尺寸  $47.3\ \mu\text{m}$ .液晶屏固定在一个  $25\ \text{mm}$  行程的精密线性位移平台(型号:PI M110)上,位移台的零位和正向移动  $15\ \text{mm}$  的位置为液晶屏的两个工作位置.系统使用了一个分辨率为  $960 \times 1\ 280$  的工业相机(型号:AVT Stingray F-125),镜头焦距  $50\ \text{mm}$ ,单次测量区域约  $20\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ .

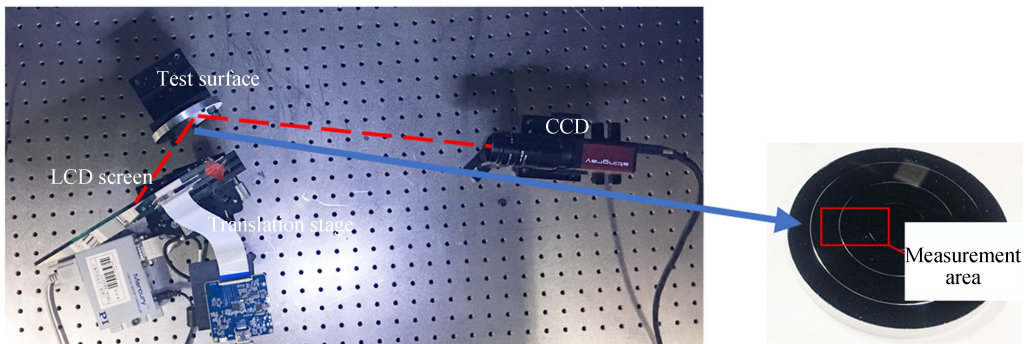


图 4 微米级分辨率条纹反射三维测量实验装置及待测台阶镜面样品实物图

Fig.4 Micron-level resolution fringe reflection 3D measurement experimental setup and physical image of the stepped mirror sample to be measured



实验中,采用单点金刚石车床(型号:Nanotech 350)车削了一个微米级台阶镜面样品,如图 4(b)示.该零件直径 76 mm,包含名义高度为 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$  的台阶镜面,实验测量了其中的 5  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  台阶验证本文方法可行性.台阶镜面样品、相机和样品基本按照 1.3 节所确定的空间结构参数布置.

## 2.2 系统标定

系统标定主要用于确定相机成像参数以及液晶屏在相机坐标系中的位置参数.首先通过棋盘格标定板和 Matlab 相机标定工具箱完成相机内参数和畸变参数的标定.液晶屏空间位置标定采用的是标准平面镜多角度反射成像方法<sup>[22]</sup>;在液晶屏上显示如图 5(a)所示的棋盘格图案,通过一块标准平面反射镜反射成像在相机像面,旋转平面反射镜得到多张棋盘格图片;通过极小化棋盘格角点的重投影误差来确定液晶屏在相机坐标系的位置.图 5(b)为位置 1 液晶屏参数优化后的棋盘格角点重投影误差分布,标准偏差 0.08 像素.位置 2 液晶屏的空间参数通过平移变换得到.

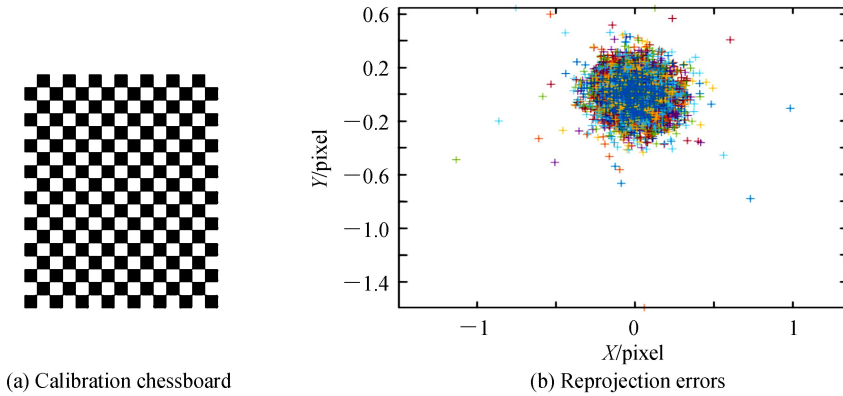


图 5 标定棋盘格和标定重投影误差

Fig.5 Calibration chessboard and calibration reprojection errors

## 2.3 条纹相位求解和相位映射

位置 1 液晶屏依次显示 4 幅相移 90 度的水平和竖直正弦条纹图,相机接收到经待测台阶镜面反射后变形的条纹图,如图 6(a)所示;精密位移平台移动 15 mm 到第二位置处,相机再次采集相移的条纹图,如图 6 (b)所示.图 6 上方和下方分别为横向和竖向的四步相移正弦条纹图,分别用于映射液晶屏的纵向和横向像素坐标.

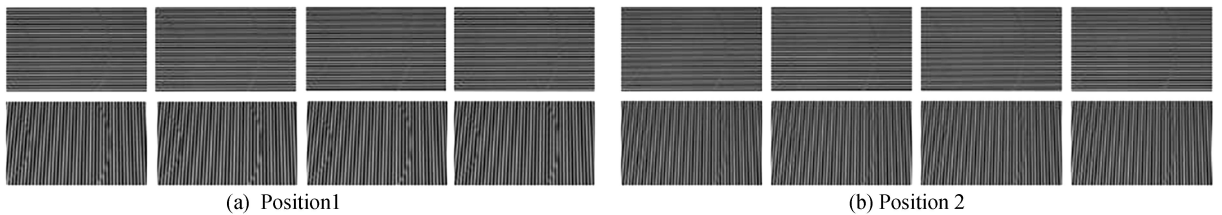


图 6 位置 1 和位置 2 采集的反射条纹

Fig.6 Reflection fringe image collected at positions 1 and 2

相机拍摄的条纹图案可以表示为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y)] \quad (2)$$

式中,  $A(x, y)$  是背景光强度,  $B(x, y)$  是正弦条纹的调制强度,  $\varphi(x, y)$  是检测时待求的条纹相位.

利用四步相移法求解待求相位  $\varphi(x, y)$

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (3)$$

式中,  $I_n(x, y)$ ,  $n=1, 2, 3, 4$ , 分别对应相移量为  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$  的 4 幅变形条纹图.再根据解相位算法即可分别求解得到水平和竖直相位分布图,如图 7 所示.图 7 中 X、Y 轴代表 CCD 像面上的像素坐标,Z 轴为该点处对应的解算得到的液晶屏正弦条纹的相位值.

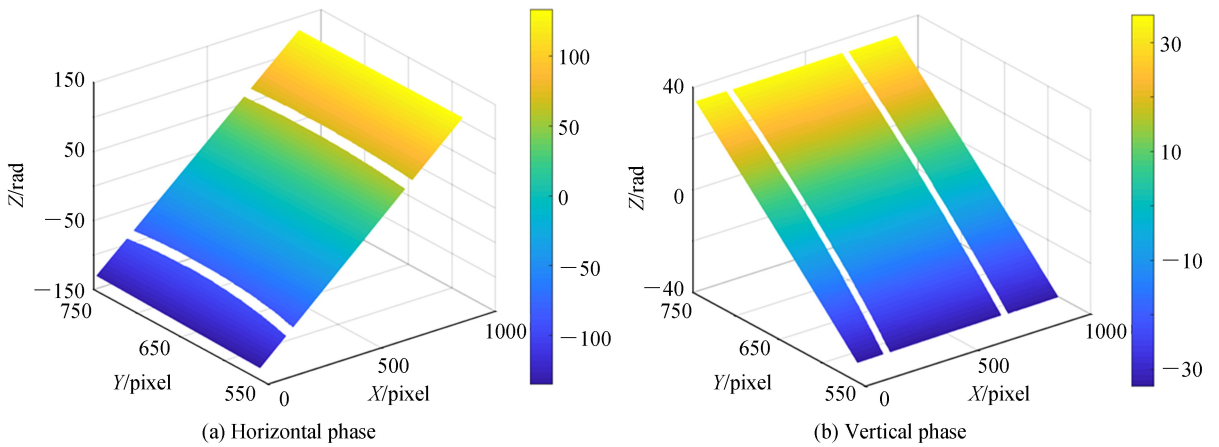


图7 解包裹得到的水平和垂直相位图

Fig.7 Unwrapped horizontal and vertical phase diagrams

结合一个已知的液晶屏参考点的水平和竖直相位值,按照图7通过相位映射就可以确定待测面形上各点与液晶屏上各像素点间的对应关系.

## 2.4 台阶镜面三维重构

由系统标定得到的相机的内参,可以得到相机光心位置及像面位置,连接相机光心和像面上点,即为图2中的反射光线;对两个位置处的液晶屏像素进行同名点匹配,将两位置处液晶屏上的同名点进行连接,得到入射光线.对应的入射光线及反射光线交点即为待测面上点的位置,将所有对应光线相交后即可得到待测面整体面形.

图8(a)为计算得到的整个测量结构的光线追迹图;以相机光心为世界坐标系原点,相机光轴为世界坐标系Z轴,连接光心和像面上的对应点为反射光线,连接LCD在位置1和位置2处的正弦条纹的相位映射同名点得到入射光线,入射光线和反射光线相交得到台阶镜面表面轮廓,如图8中蓝色待测面所示.将得到的待测面离散点数据进行平面拟合<sup>[23]</sup>,图8(b)为得到的拟合残差图,可以清晰看到待测台阶镜面样品上的两个台阶面;其中,红线标出的部分为本文分析的台阶截面,如图9(a)和(b)所示,分别对应 $5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 台阶的测量结果.图9中横坐标为像素坐标,纵坐标对应点的高度值.为验证精度,采用白光干涉显微镜(型号:Bruker,GTK)对所测台阶样品进行三维显微测量.图10为已扣除倾斜的白光干涉显微镜台阶截面测量结果.表1显示为本文方法和白光干涉显微镜测量结果的对比,可以看出本文方法测量微米级台阶镜面的精度基本可靠,同时单次测量区域( $\sim 20\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ )相比白光干涉显微镜( $1\ \text{mm} \times 0.8\ \text{mm}$ )有明显优势,具有较好应用前景.但是,本文方法台阶测量结果的不确定性相对较大,这主要是由于相位测量噪声和系统标定误差影响了三角交汇计算的精度,后续可以通过建立更精密的标定模型和采用更高像素分辨率的相机来进一步提高系统的测量分辨率和测量精度.

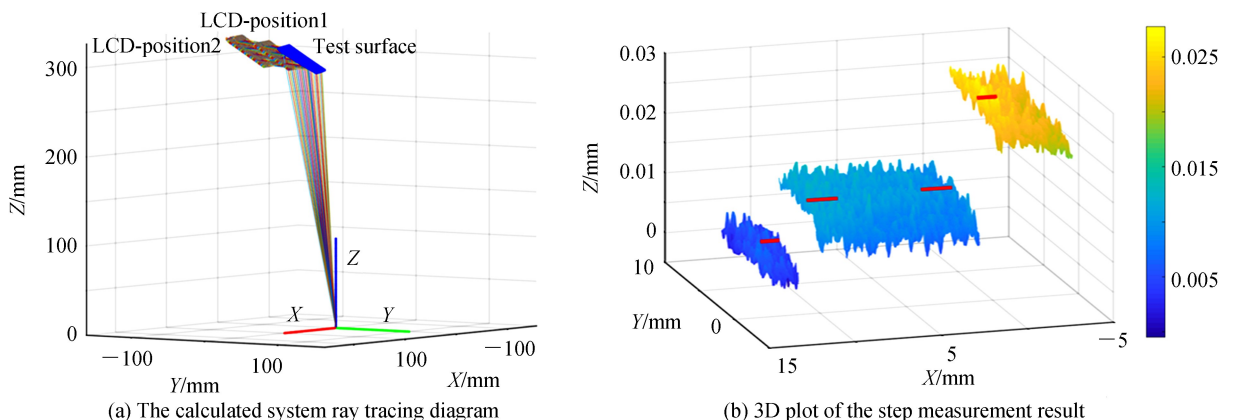


图8 台阶镜面3D测量结果

Fig.8 Step mirror 3D measurement result

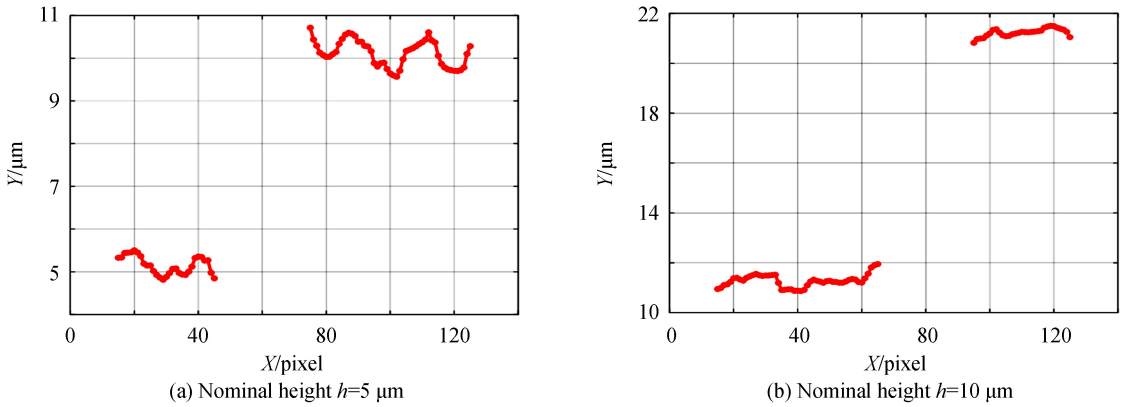


图9 台阶镜面测量结果截面分析  
Fig.9 Step mirror cross section analysis

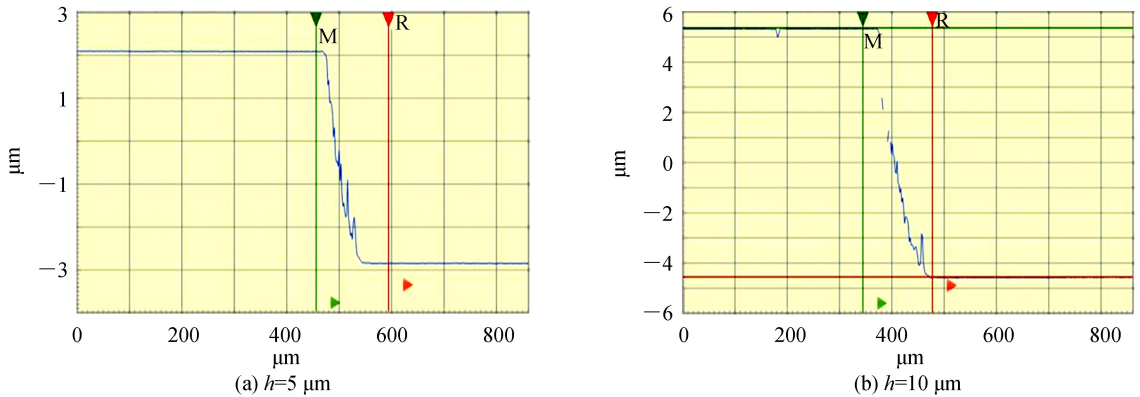


图10 白光干涉显微镜测量样品台阶高度值结果  
Fig.10 Step height measurement results of the test part from a white light interference microscope

表1 台阶面高度测量值  
Table 1 Measurement results of the step height

Step height	White light interference microscope/ $\mu\text{m}$	Proposed method/ $\mu\text{m}$
5 $\mu\text{m}$	4.928	$4.963 \pm 0.524$
10 $\mu\text{m}$	9.893	$9.952 \pm 0.416$

### 3 结论

现代光学设计中折衍射混合设计方法的逐步普及使得很多光学透镜表面附加了微米级高度的衍射台阶结构,这类表面的非接触三维测量需求越来越强烈.条纹反射测量方法在连续光滑镜面三维面型测量领域已经得到了广泛关注和研究,但是微米级高度台阶镜面的测量对于条纹反射测量方法提出了挑战.本文通过理论分析表明,镜面台阶引起的反射光线跳变量与样品的入射光线角度和液晶屏的放置角度直接相关;在提高反射光线跳变灵敏度的同时,权衡考虑相机景深和液晶屏的可视角度因素,最终确定入射光线角度为 $70^\circ$ 和液晶屏放置角度 $0^\circ$ 为系统结构参数;结合使用像素尺寸为 $47.3 \mu\text{m}$ 的液晶屏,最终条纹反射系统能够分辨微米级的镜面台阶.根据理论设计实际构建了一套微米级台阶镜面条纹反射三维测量实验装置;采用四步相移法进行条纹相位解算,运用移动屏幕方法确定反射光线方程,结合三角交汇原理,对待测台阶镜面进行三维重构.实际测量了名义值为 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的台阶镜面,测量结果和白光干涉显微镜结果相符,证明了本文所提设计方法的可行性.

传统上微米级台阶镜面非接触测量需要通过白光干涉显微镜或者精密光学测头扫描测量,代价高昂.本文测量系统结构简单,单次测量区域大,三维重构分辨率高,对包含诸如衍射台阶结构的镜面光学元件三维面型测量具有一定的借鉴意义.另外,本文设计方法对于条纹反射三维测量方法的完善发展具有一定的推动作用.

## 参考文献

- [1] FANG F Z, ZHANG X D, WECKENMANN A, *et al.* Manufacturing and measurement of freeform optics[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2013, **62**(2):823-846.
- [2] SU X, ZHANG Q. Dynamic 3-D shape measurement method: A review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(2):191-204.
- [3] SHEN Dong-hui. Study on three-dimensional measurement on aspheric surface using contact profilometer[D]. Suzhou: Soochow University, 2016.  
沈栋慧. 非球面接触式轮廓仪三维测量研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2016.
- [4] WANG Y, SU P, PARKS R, *et al.* Swing arm optical coordinate-measuring machine: high precision measuring ground aspheric surfaces using a laser triangulation probe[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(7):073603.
- [5] NIU Bin. The design of large diameter confocal profiler and the research on dynamic compound scanning method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.  
牛斌. 大口径共焦轮廓仪设计及动态复合扫描方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [6] AMETEK. LuphoScan fast non-contact 3D form measurement of aspheric optics[M]. LuphoScan, 2014.
- [7] SHEN Hua, ZHU Ri-hong, GAO Zhi-shan, *et al.* Design and fabrication of computer-generated holograms for testing optical freeform surfaces[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **11**(3): 032201.
- [8] XIA Ai-li, MA Cai-wen. Method for improving wavefront detection accuracy based on high moment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(2):472-477.  
夏爱利, 马彩文. 提高波前探测精度的高阶矩阵方法[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(2):472-477.
- [9] PLATT B C, SHACK R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2001, **17**(5):S573-7.
- [10] YANG Ze-ping, LI En-de, ZHANG Xiao-jun, *et al.* Adaptive optics correction systems on Shen Guang III facility[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 87-94.  
杨泽平, 李恩德, 张小军, 等. “神光-III”主机装置的自适应光学波前校正系统[J]. 光电工程, 2018, **45**(3):87-94.
- [11] ZHANG Z, WANG Y, HUANG S, *et al.* Three-dimensional shape measurements of specular objects using phase-measuring deflectometry[J]. *Sensors*, 2017, **17**(12):2835.
- [12] YUAN Ting, ZHANG Feng, TAO Xiao-ping, *et al.* Test of optical 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.
- [13] KNAUER M C, KAMINSKI J, HAUSLER G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C]. *Optical Metrology in Production Engineering*. International Society for Optics and Photonics, 2004, **5457**: 366-376.
- [14] ZHAO Wen-chuan, ZHONG Xian-yun, LIU Bin. The surface flaws inspection of optical components based on the fringe reflection. [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9):0912007.  
赵文川, 钟显云, 刘彬. 基于条纹反射的光学表面疵病检测法[J]. 光子学报, 2014, **43**(9):0912007.
- [15] HUANG L, IDIR M, ZUO C, *et al.* Review of phase measuring deflectometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **107**:247-257.
- [16] WAN X, BIN B, XIE S, *et al.* Development of an integrated freeform optics measurement system based on phase measuring deflectometry[C]. *Optical Precision Manufacturing, Testing, and Applications*, International Society for Optics and Photonics, 2018, **10847**: 1084710.
- [17] ZHU Yong-jian, ZHU Li-xin, ZHONG Jian-ping, *et al.* Integration algorithm in three-dimensional plane shape measuring by fringe reflection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11):1112001.  
朱勇建, 朱立新, 钟建平, 等. 条纹反射法测量三维面形中的积分算法[J]. 光子学报, 2018, **47**(11):1112001.
- [18] ZHANG Z, LIU Y, HUANG S, *et al.* Full-field 3D shape measurement of specular surfaces by direct phase to depth relationship[C]. *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications IV*, International Society for Optics and Photonics, 2016, **10023**: 100230X.
- [19] LIU Y, HUANG S, ZHANG Z, *et al.* Full-field 3D shape measurement of discontinuous specular objects by direct phase measuring deflectometry[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1):10293.
- [20] WANG Yue-min, ZHANG Zong-hua, GAO Nan. Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field reflection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(5):16-29.  
王月敏, 张宗华, 高楠. 基于全场条纹反射的镜面物体三维面形测量综述[J]. 光学精密工程, 2018, **26**(5): 16-29.
- [21] ZHANG Z, HUANG S, GAO N, *et al.* Full-field 3D shape measurement of specular object having discontinuous surfaces[C]. *Fifth International Conference on Optical and Photonics Engineering*, International Society for Optics and Photonics, 2017, **10449**: 104490T.
- [22] XIAO Yong-liang, SU Xian-yu, CHEN Wen-jing. Fringe reflection photogrammetry based on pose estimation with free planar mirror reflection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **32**(5): 86-93.  
肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于自由镜面反射位姿评估的条纹反射摄影测量[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 86-93.
- [23] WAN Xin-jun, BIN Bo-yi, LV Song, *et al.* Automatic leveling of aspherical point cloud data based on Zernike polynomial fitting[J]. *Optical Technique*, 2019, **45**(2):170-175.  
万新军, 宾博逸, 吕宋, 等. 基于Zernike多项式拟合的非球面点云数据自动调平[J]. 光学技术, 2019, **45**(2):170-175.