

引用格式: YE Lu, ZHANG Xiangchao, WANG Junhua, et al. High Precision Deflectometric Measurement Based on Pinhole Camera with an External Stop[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(12):1212003

叶璐,张祥朝,王军华,等.基于外置光阑针孔相机的高精度偏折测量技术[J].光子学报,2023,52(12):1212003

基于外置光阑针孔相机的高精度偏折测量技术

叶璐^{1,2},张祥朝¹,王军华¹,徐敏¹,郑列华²

(1 复旦大学 上海超精密光学制造工程中心, 上海 200438)

(2 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:设计了一种外置光阑的针孔相机镜头,可免去传统方法复杂的相机标定过程,采用影像仪和三坐标测量机实现测量系统各元件空间位置的几何标定,并依靠相移算法实现屏幕与相机像素的精准匹配。实验结果表明,本文提出的偏折测量结果与干涉仪测试结果偏差优于 20 nm RMS,可满足光学镜面加工研磨阶段到抛光阶段的过渡测量需求,为光学加工车间提供了可靠、经济、高效的面型评估,具有广泛的应用前景。

关键词:偏折术;离轴抛物面;相机标定;几何标定;面型重构

中图分类号:TH74

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235212.1212003

0 引言

随着光学系统分辨率不断提高,光学镜面面型的复杂度和加工精度要求也随之提高,从而导致检测难度大、检测时间长。传统的非球面检测方法^[1,2]可以分为点扫描检测法和干涉检测法两大类。光学非球面通常在研磨阶段采用以三坐标为代表的驻点扫描三维轮廓测量,此方法检测时间长、成本高、被测镜的大小受限于测量仪器的结构尺寸。在光学加工的抛光阶段,通常采用高精度的干涉测量法,但也存在着弊端。由于干涉量程的限制,不同参数的非球面需要一个特定的零位补偿器^[3]辅助测量,导致测量成本高,并且对于非球面度比较大的情况,全口径出光较难。尤其是研磨阶段到抛光阶段的过渡测量,现有方法均无法同时满足测量精度和动态范围的要求。

偏折测量技术是近年来新兴的三维光学检测技术。该方法将特定编码的图样显示在屏幕上,用相机记录被测面反射的图像,进而重构被测面的三维形貌。国内四川大学^[4]、长春光机所^[5]、复旦大学^[6,7]等都对该技术展开了全方位的研究,并实现了多种镜面物体的测量。国外,SU P等^[8,9]提出了基于相位测量偏折术的软件配制光学检测系统(Software Configurable Optical Test System, SCOTS),目前有报道显示他们已成功将 SCOTS 运用于巨型麦哲伦(Giant Magellan Telescope, GMT)主镜子镜(RMS 为 0.4 μm)的检测。

偏折测量具有动态范围大、抗噪能力强、测量速度快、硬件成本低的优势,且不存在干涉测量的量程限制问题,能明确指导修正加工,减少面型迭代次数,因此适用于车间中的复杂工况测量。但是偏折测量又有其自身的局限性,测量精度直接依赖于系统中各个元件相对位置的计算准确性,即几何标定精度。偏折测量通常将相机视为针孔相机模型,拍摄标定板在不同位姿下的图片,通过张正友标定法^[10]获取相机内参和外参,通过软件计算获取相机 CCD 上每个像素的坐标。传统的相机标定方法过程复杂,受标定板精度的影响较大,并且相机标定和几何标定一般是分别获得的,坐标系的转换过程中也会存在误差的传递和耦合。大多数工业相机镜头为了消除像差采用对称结构,孔径光阑位于镜组中间,为了直接获得相机光阑中心坐标(也叫光心坐标),需在镜头前添加外置光阑,虽然可以直接通过测量获取光心坐标,可是会影响相机的视

基金项目:国家自然科学基金(No. 51875107),江苏省重点研究发展计划(No. BE2021035)

第一作者:叶璐, yeludun@163.com

通讯作者:张祥朝, zxchao@fudan.edu.cn

收稿日期:2023-06-14;录用日期:2023-08-01

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

场角,给测量带来不便。偏折测量需要一个理论曲面模型来估计整个表面的测量点的位置,一般的初始模型为了方便计算采用平面模型或者球面模型,但是不确定的表面模型往往对算法线产生较大的误差,从而影响测量精度^[11, 12]。

为了解决以上问题,本文提出了一种针孔相机镜头的设计方法,能够快速、准确的获取光心坐标并可以实现简单便捷的反射光线标定,适用于多种应用场景的标定。

1 基本原理

偏折测量技术是一种获得光学表面斜率的方法,测量原理如图1所示,液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)显示编码的结构光图样,相机采集经过镜面反射后畸变的条纹,根据反射定律,入射光线和反射光线的角平分线为镜面被测点的法线,进而得到被测镜表面的梯度,而表面面型可通过表面斜率积分来拟合重构。

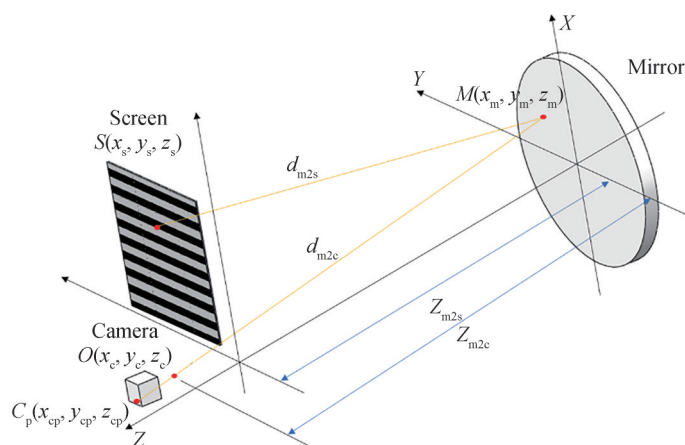


图1 偏折测量原理图

Fig. 1 Diagram of deflectometric measurement

由光线的反射定律,可以得到关系式^[8, 9]

$$\begin{cases} g_x(x_m, y_m) = \frac{\frac{x_m - x_s}{d_{m2s}} + \frac{x_m - x_c}{d_{m2c}}}{\frac{z_s - W(x_m, y_m)}{d_{m2s}} + \frac{z_c - W(x_m, y_m)}{d_{m2c}}} \\ g_y(x_m, y_m) = \frac{\frac{y_m - y_s}{d_{m2s}} + \frac{y_m - y_c}{d_{m2c}}}{\frac{z_s - W(x_m, y_m)}{d_{m2s}} + \frac{z_c - W(x_m, y_m)}{d_{m2c}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x_c, y_c, z_c) 为相机光心坐标,由几何标定获得; x_m 和 y_m 为被测点的横坐标,由每个相机像素与光心相连所得反射光线与待测表面计算交点得到; (x_s, y_s, z_s) 为对应的屏幕像素坐标,可以通过相移算法获得; d_{m2s} 和 d_{m2c} 分别为被测点到屏幕像素点和被测点到相机光心的空间距离,也是通过精确的几何标定来获得; $W(x_m, y_m)$ 实际上是未知的,初始值由理想的设计参数代替,在迭代过程中替换为当前重构的值; $g_x(x_m, y_m)$ 和 $g_y(x_m, y_m)$ 是测量得到的被测点在 x 和 y 方向上的斜率。

如果光源为LCD屏投射四步相移条纹,偏折术测量系统的分辨率^[13]表示为

$$\Delta z \approx \text{NA} \cdot \frac{x_{\text{pix}}}{2\pi} \cdot \Delta\varphi \quad (2)$$

式中, Δz 为偏折测量系统的 z 坐标分辨率, NA 为相机的数值孔径, $\Delta\varphi$ 为相位分辨率,文献[13]给出经验值为 $2\pi/400$, x_{pix} 为相机像素大小,对于像素尺寸为 $7 \mu\text{m}$ 和 $F\#$ 为 2 的相机,由式(2)可以计算,系统分辨率约等于 4 nm ,因此,偏折术测量方法的检测精度可以达到纳米级测量分辨率。

根据图1的测量原理,可以推导出

$$\Delta z = \tan \alpha \cdot x_{\text{cam}} \quad (3)$$

式中, Δz 为被测点局部的高度变化值, x_{cam} 为相机的空间分辨率,即每个像素对应的镜面的大小, $\tan \alpha$ 为被测点的斜率。外置光阑中心坐标由三坐标测量,测量误差可以控制在0.02 mm之内,若光阑到被测镜的距离为1 m,镜面分辨率为0.1 mm,则由于光阑位置测量误差导致的被测点斜率偏差为20 μrad ,根据式(3),被测点的高度误差为2 nm。

若光阑大小为1 mm,所有进入相机的光线在光阑位置的坐标横向偏差最大为0.5 mm,是测量误差的25倍,根据上面的推导可以计算出,相机边缘视场的光线由于光阑大小引起的被测点的高度误差为50 nm。因此,可通过增加被测面到相机的距离来提高测量精度。

2 实现过程

2.1 针孔相机镜头设计

本文设计了一款光阑位于镜头外部的可见光相机镜头,这样设计的好处是不仅可以免去商业镜头复杂的相机标定,而且可以通过光阑的物理位置快速获取相机光心坐标,提高光心坐标点的获取精度。通过计算分析,此镜头适用于大多数光学反射镜的偏折测量。实验室原有的一台工业相机,相机参数如表1所示,相机靶面大小为14.18 mm \times 10.37 mm,对角线约为17.56 mm。

表1 相机参数列表
Table 1 Camera specification list

Items	Properties
Camera model	Manta G 1 236 B
Sensor	CMOS
Camera resolution	4 112 \times 3 008
Pixel size	3.45 μm \times 3.45 μm

光学加工车间中常见的反射镜 $F\#$ 一般大于1.3,为了减小所需屏幕的尺寸,在偏折测量光路中一般将相机放置在被测镜曲率中心附近,通过式(4)计算相机焦距。其中 D 为被测镜口径, R_0 为被测镜顶点曲率半径, d 为相机靶面大小, f 为相机焦距。

$$\frac{D}{R_0} \leq \frac{d}{f} \quad (4)$$

相机镜头的像面大小要与相机感光面的大小兼容,尺寸不匹配的话,会影响边缘视场的像质。在这里设计相机镜头焦距为22 mm,视场角 $\pm 15^\circ$,基本满足本实验室加工中所有反射镜的偏折测量要求。在光阑前置的设计方案中,光学结构失去对称性,导致像差矫正困难,最终优化结果为四片式结构,其中一片为双胶合镜片,需要注意考虑相机探测器的保护窗厚度。设计光路如图2所示。

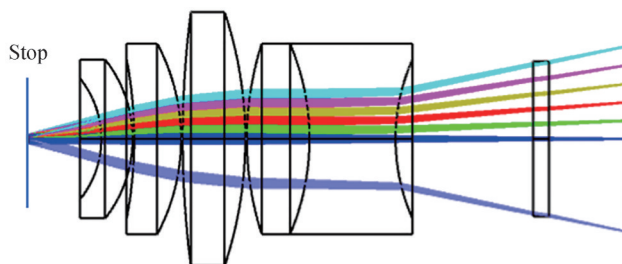


图2 相机镜头光路图
Fig. 2 Camera lens layout

光阑位于第一片镜片之前4 mm的位置。改变光阑的大小不影响镜头的视场角,仅仅改变入射到镜头内部的光通量。

镜头系统的点列图如图3所示,随着光阑口径缩小,屏幕的分辨力得到提升,即数值孔径越小景深越大,有利于保证条纹成像的清晰度,这对测量是有利的,但是同时,光阑口径减小,光通量随之减小,造成图像信噪比的下降,而通过额外的照明来增加光通量,则会导致产生杂光,影响面形的重构精度。因此,实验中在不过曝的前提下,采用增加曝光时间的方法来改善图像清晰度。

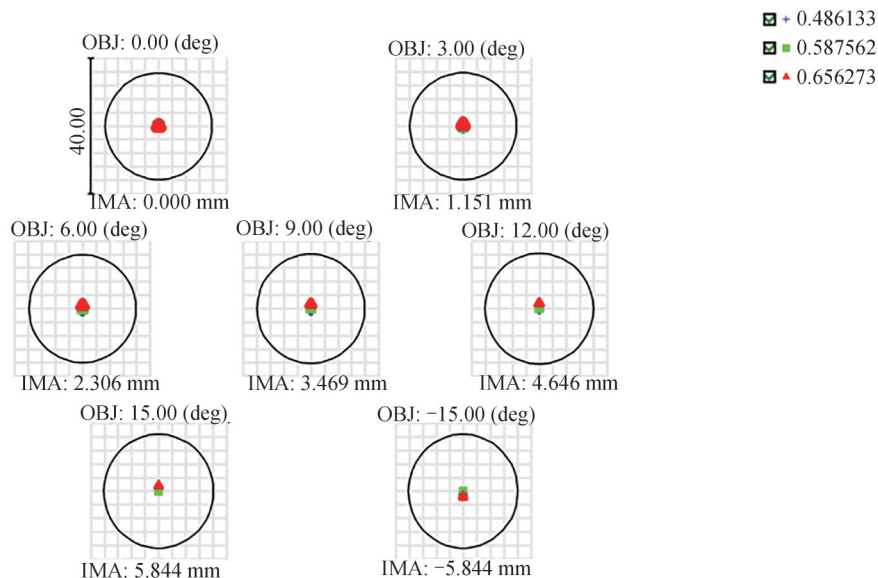


图3 相机镜头点列图

Fig. 3 Camera lens standard spot diagram

镜头的成像质量好坏是指显示图样能否清晰成像或者有没有失真情况,当各视场的弥散斑面积均小于艾里斑时,表明系统具有较高的成像质量,偏折术中主要关注镜头的畸变,一般的商业镜头畸变小于2%,并且畸变可通过相机标定及软件算法进行后期补偿,这里的光学系统畸变设计值为0.707%,如图4所示,可以满足使用要求。

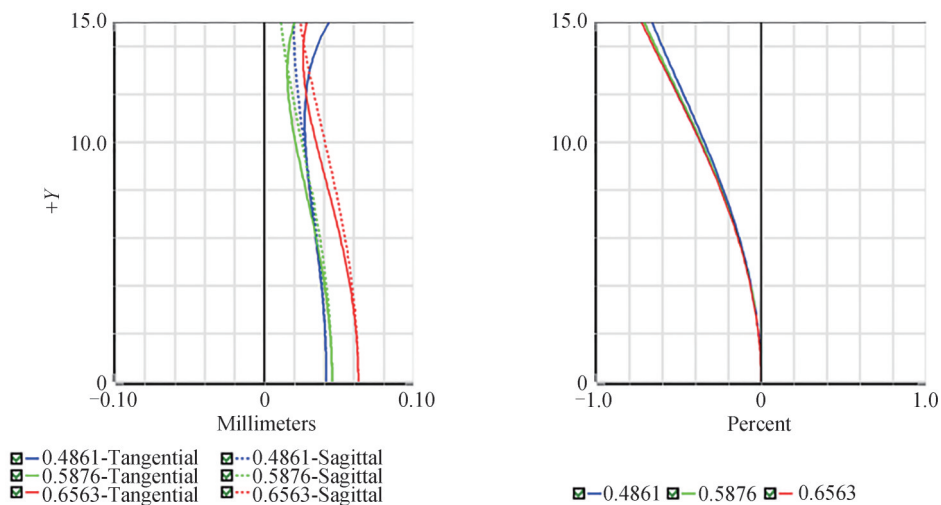


图4 相机镜头畸变

Fig. 4 Camera lens distortion

镜头的机械结构如图5所示,在镜头的最前端做一个可更换光阑的螺纹结构,方便更换不同大小的光阑,光阑的外形设计为一个较长的圆柱,方便采用三坐标或者激光跟踪仪等外部测量设备获取光阑中心坐标。根据被测镜的参数不同,相机的工作距离也有相应的调整。小于最小工作距离或大于最大工作距离的系统一般都不能清晰成像,设计调焦结构,使镜头组与相机感光面之间可通过螺纹结构调节,来适应不同曲率的被测镜。

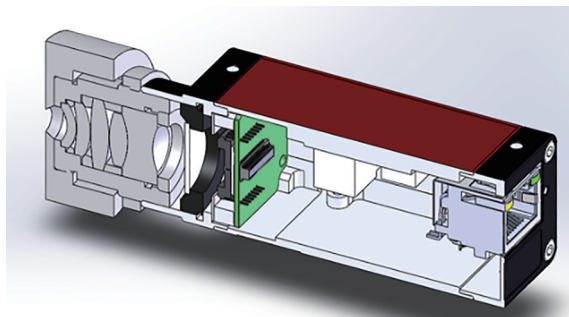


图5 相机结构模型

Fig. 5 Camera structure model diagram

2.2 几何标定

如图1所示,偏折测量系统的几何标定主要是确定相机、屏幕以及被测镜之间的相对位姿关系,并且将三者统一至以被测镜中心点建立的世界坐标系中。规定坐标系的转换均使用右手坐标系,其中固定一个旋转轴,旋转方向从固定轴的反方向观察,顺时针为旋转逆向,逆时针为正向。

若坐标系绕着X轴旋转角度 θ_x ,绕着Y轴旋转角度 θ_y ,绕着Z轴旋转角度 θ_z ,则坐标系转换前后的关系可以用式(5)和式(6)来表示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T \quad (6)$$

以罗德里格矩阵的变换理论为基础^[14],任意两个坐标系之间需要已知三个不共线的点坐标,即可完成坐标系之间的转换,在被测镜工装上添加标志物,用三坐标或激光跟踪仪等外部设备测量标志物的几何位置,构建出空间三个不共线的点坐标。相机光心坐标可通过外置光阑直接确定,屏幕坐标通过影像仪获取,依靠已知点的像素坐标转换至工件坐标系,使屏幕和相机都转换至工件坐标系下,实现坐标系的统一。

2.3 反射光线标定与被测点求解

为了标定相机光线方向,即测量光路中反射光线的方向,本文采用一种简单便捷的方法,运用高精度的相移算法来确定反射光线方向,原理如图6所示。

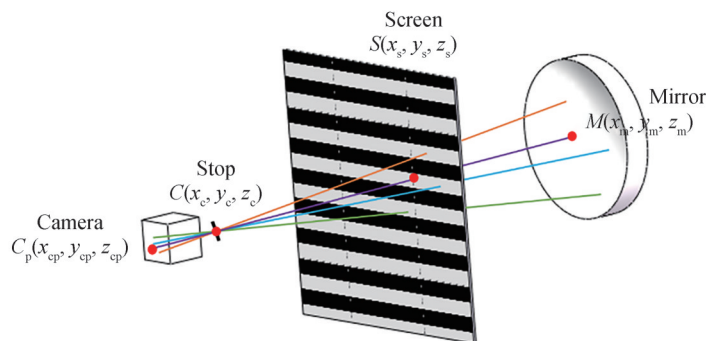


图6 光线方向标定

Fig. 6 Calibration diagram of rays

反射光线求解过程如图7所示。

相移法计算的相位值在 $(-\pi, \pi)$ 之间折叠,并不是真正的相位,采用相位展开算法,可得到连续光滑的相位值,本文采用标志点的方法,从标志点的像素点开始遍历,比较前后两个相位值的大小,如果前后相位之差超过 π ,则说明出现了截断相位,判断条纹周期 k ,再加上或减去 $2k\pi$ 使其回归到真实周期。

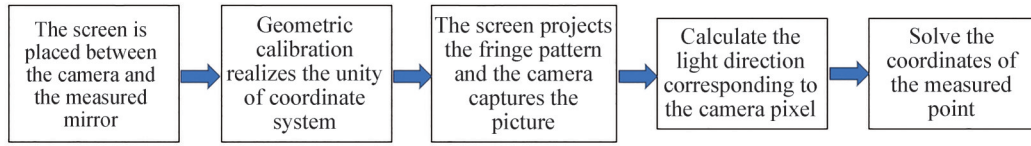


图7 反射光线与被测点的求解过程

Fig. 7 The calculating process of reflected rays and measured points

测量光路中每一个相机像素对应的光线方向可以用式(7)来表示。

$$\begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2 + (z_s - z_c)^2}} \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, x_c, y_c, z_c 为相机光阑中心坐标, x_s, y_s, z_s 为每一个相机像素对应的屏幕像素坐标, l, m, n 为每一个相机像素对应的方向向量, 代表了反射光线的方向。

由空间直线对称式方程很容易导出空间直线参数方程, 由式(8)表示, 其中 t 为参数。

$$\frac{x - x_c}{l} = \frac{y - y_c}{m} = \frac{z - z_c}{n} = t \quad (8)$$

每一个相机像素对应的反射光线可表示为

$$\begin{cases} x = x_c + t \cdot l \\ y = y_c + t \cdot m \\ z = z_c + t \cdot n \end{cases} \quad (9)$$

若被测面为二次非球面, 则被测面可以表示为

$$z = \frac{c \cdot (x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k) \cdot c^2 \cdot (x^2 + y^2)}} \quad (10)$$

式中, $c = 1/R_0$, R_0 为非球面顶点曲率半径, k 为非球面二次曲率系数, 联立式(9)和式(10), 有

$$\begin{cases} At^2 + Bt + C = 0 \\ A = 1 + n^2 k \\ B = 2(x_c l + y_c m + (1 + k)z_c n - n/c) \\ C = x_c^2 + y_c^2 + (1 + k)z_c^2 - 2z_c/c \end{cases} \quad (11)$$

从式(11)可看出 t 为一元二次方程的解, 将 t 代入式(9), 即可求出每一个相机像素对应的被测点坐标矩阵。

空间光学系统中, 由于离轴反射系统无色差、无遮拦的优点, 大口径的离轴反射镜常常出现在光学加工车间, 对此类镜面面型, 无法用简单的表达式来表示, 因此被测点坐标的计算难度增大, 若用平面或球面模型, 导致计算法线的误差较大, 影响面型重构精度。离轴非球面的坐标系 XYZ 和母镜坐标系 $X'Y'Z'$ 之间的关系如图8所示。

通过公式推导^[15], 离轴反射镜面在坐标系 XYZ 中的表达式可以表示为

$$\begin{cases} z = \frac{D}{E + \sqrt{E^2 - FD}} \\ F = c(1 + k \cos^2 \theta) \\ E = \frac{1}{\sqrt{1 + k \sin^2 \theta}} - ck \sin \theta \cos \theta x \\ D = c(1 + k \sin^2 \theta)x^2 + cy^2 \end{cases} \quad (12)$$

令 $a = 1 + k \sin^2 \theta$, $b = 1 + k \cos^2 \theta$, 代入式(9), 可得

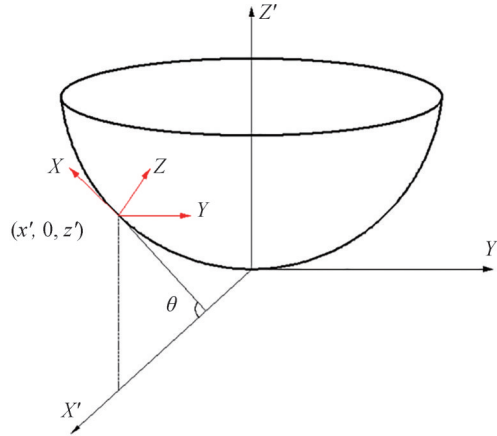


图8 离轴非球面的坐标系

Fig. 8 Coordinates of off-axis aspheric surface

$$\begin{cases} Pt^2 + Qt + T = 0 \\ P = a \cdot l^2 + m^2 + 2k \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot n \cdot l + b \cdot n^2 \\ Q = 2a \cdot x_c \cdot l + 2m \cdot y_c - \frac{2n}{\sqrt{a \cdot c}} + 2k \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot (z_c \cdot l + n \cdot x_c) + 2b \cdot z_c \cdot n \\ T = a \cdot x_c^2 + y_c^2 - \frac{2z_c}{\sqrt{a \cdot c}} + 2k \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot z_c \cdot x_c + b \cdot z_c^2 \end{cases} \quad (13)$$

从式(13)可看出 t 为一元二次方程的解,将 t 代入式(9),即可求出每一个相机像素对应的被测点坐标矩阵。此公式推导为被测点坐标的精确解,有利于重构精度的提升。

3 实验验证

实验中被测镜为一个凹抛物面铝镜,由单点金刚石车床加工,口径为 110 mm,曲率半径为 800 mm,屏幕为 7.9 英寸(1 英寸=2.54 cm)的 iPad mini2,屏幕分辨率为 2 048×1 536,相机型号为 Manta G-1236,分辨率为 4 112×3 008,像素大小为 3.45 μm×3.45 μm,镜头焦距 22 mm,光阑直径为 1 mm,偏折测量实验装置如图 9 所示,相机和屏幕分别放在被测镜曲率中心附近,调焦使相机采集的条纹具有清晰的对比度。

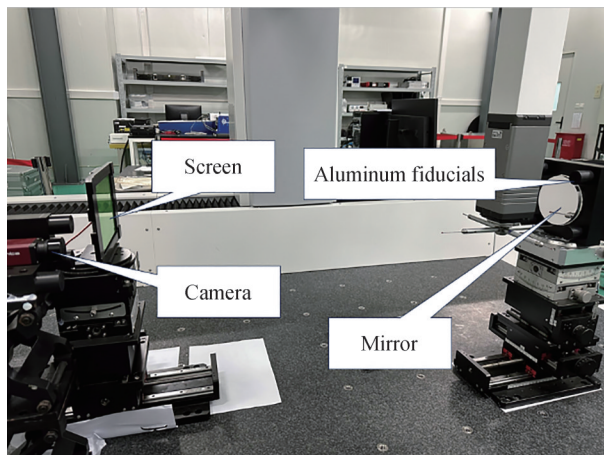


图9 实验装置

Fig. 9 Experimental setup

用影像仪标定屏幕像素坐标系下的像素坐标以及屏幕工装坐标系下的像素坐标,如图 10 所示,通过第 2.2 节的坐标转换公式,通过点亮已知像素并测量在屏幕像素坐标系与屏幕工装坐标系的坐标值,即可计算两个坐标系之间的旋转矩阵和平移向量,实现坐标系的转换。如图 9 所示,镜子工装上安装了 3 个发黑的铝

块,作为参考点,用三坐标测量工件坐标系下三个铝块的坐标值以及屏幕坐标系下三个铝块的坐标值,确定两个坐标系之间的变换关系,相机光心坐标可以直接测量获得。

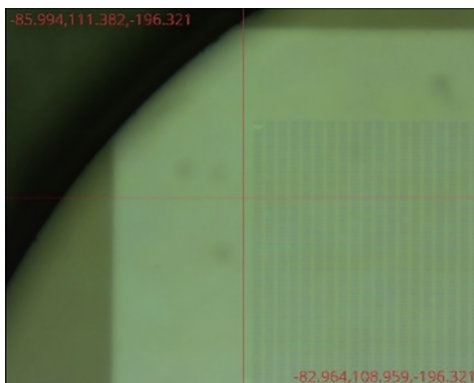


图10 屏幕像素坐标标定

Fig. 10 Calibration of screen pixel coordinates

相机采集经过被测镜反射的畸变条纹后,用三坐标进行高精度的几何标定,将屏幕移至相机与被测镜之间,如图11所示,按2.3节中的方法标定光线的反射方向,并求解被测点坐标。

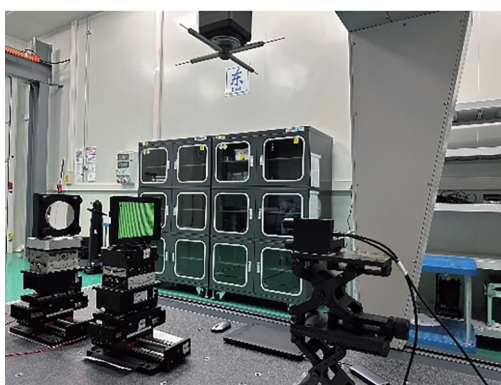


图11 反射光线方向的标定

Fig. 11 Calibration of reflected light direction

将以上步骤获得的数据代入式(1),求得被测点 x 和 y 方向的斜率,采用区域波前重构获得被测镜的面型。图12对SCOTS法的面型重构结果进行了详细的对比,和Luphscan轮廓仪测量结果在一个数量级,面型高低分布也基本相同,面型分布有较大的离焦和像散证明了这些像差为被测镜本身的面型误差而非测量引起的误差,为了进一步对比分析,采用Zygo干涉仪用平面镜自准的方式来测量抛物面面型,平面镜自身的面形精度RMS优于 $1/80\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),干涉仪采用 F 数为5.1的球面镜头,测量光路中平面镜中孔遮拦大小为22 mm,因为干涉仪无法测出光焦度,因此SCOTS重构数据去除Zernike项 $Z_1\sim Z_4$ 后,再去除中心22 mm后与干涉仪数据对比,干涉仪测试RMS为 0.121λ ,SCOTS法重构结果为 0.131λ ,可以证明,通过高精度的几何标定,偏折测量可以达到干涉仪同等测试精度。

偏折测量数据的重构处理仅仅采用一次面型重构,没有采取迭代算法,证明了反射光线标定的准确性以及被测点求解的准确性,面型重构的结果可以达到和LuphoScan相当的测量精度,并且可以测量出离焦和像散等低阶误差,说明几何标定精度较高。

为了验证测量精度,采用偏折术的重构结果分别与Luphoscan和激光干涉仪测试结果逐像素做差,重构误差如图13所示,均表现为高级彗差。与Luphoscan的面型偏差为 0.043λ (27 nm)RMS,在镜子的中心点面型误差有局部高点,这是因为Luphoscan测量为螺旋线扫描,最终的面型数据由插值算法获取,在局部陡度位置会产生微小的偏差,面型逐像素做差的过程中由于微小的位置错位导致中心区域误差较大。与激光干涉仪的面型偏差为 0.032λ (20 nm)RMS,经分析,偏折术测量光路的基准位于被测镜的顶点位置,而激光干

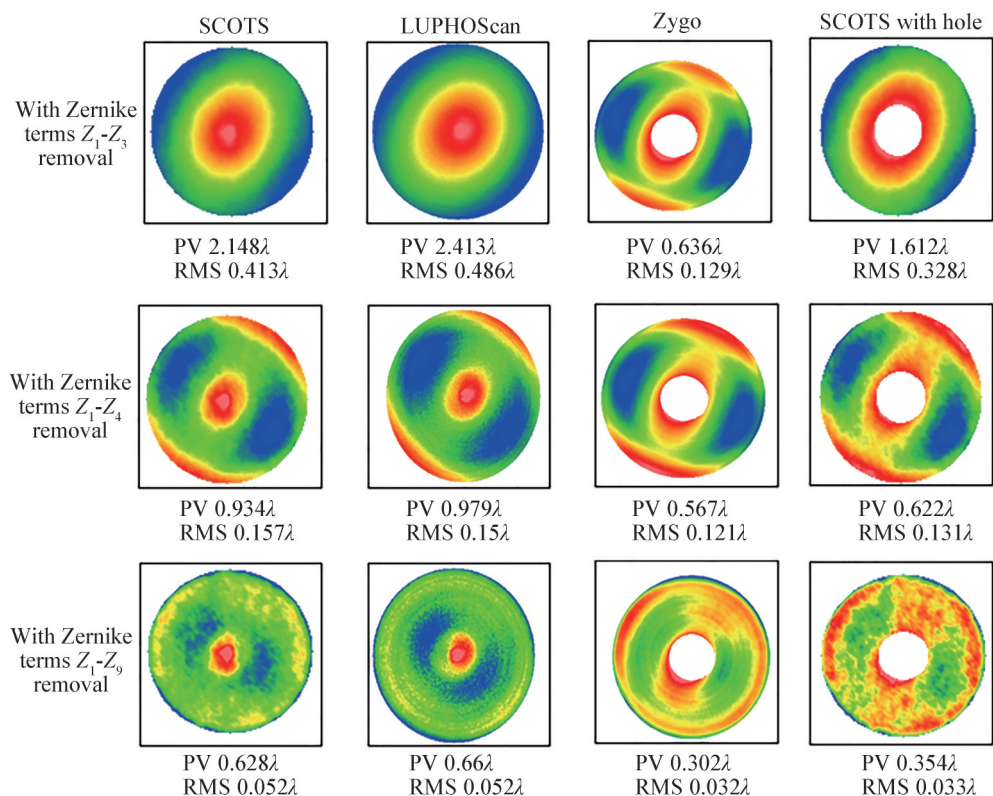


图 12 重构结果

Fig. 12 Reconstruction results

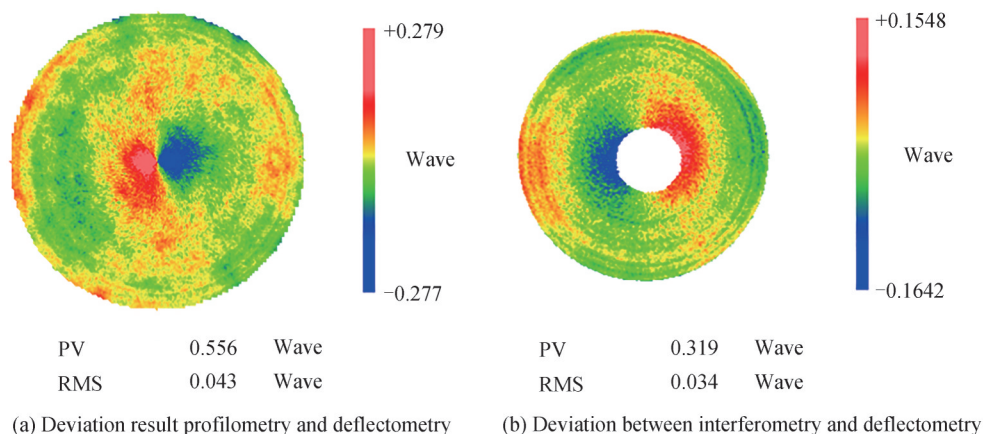


图 13 不同测量方法的比较

Fig. 13 Comparison of different measurement methods

涉仪测量光路中,三维空间的镜面成像到二维的探测器表面,此过程产生畸变,因此采集的面形图基准有可能偏离非球面的顶点,两种测量方法的基准存在偏差,因此导致面型做差产生误差,根据实验结果有理由认为实际上测量误差应该小于 20 nm,并且证明此精度不仅可以满足光学镜面从研磨到抛光阶段的测量精度需求,而且可以满足更高精度的测量需求。

偏折术测量的是待测面的梯度,不受被测镜表面对称性与非球面度的影响,不仅可以测量球面、非球面,也可以测量离轴非球面与自由曲面。为了验证离轴非球面交点公式推导的准确性,采用本次实验测量数据,取镜面离轴区域数据, x 方向离轴量设为 27.5 mm,离轴区域设为口径 50 mm 的圆形区域,找出屏幕像素坐标、计算反射光线的屏幕坐标与被测镜离轴区域一一对应的数据,将坐标系由初始的同轴抛物面的中心转换至被测镜离轴区域中心,采用坐标转换后的相机光心数据和标定反射光线的屏幕数据连线,带入式

(12)和式(13)求解离轴抛物面被测点坐标,离轴区域的重构面形如图14(a)所示。同轴抛物面的重构面形取离轴区域后面形如图14(b),两幅图面形分布和数量级基本一致,说明离轴镜被测点求解公式正确。

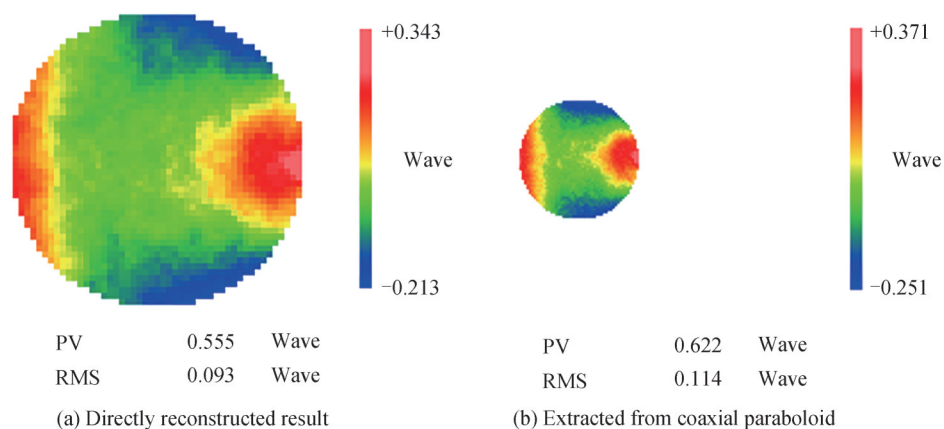


图14 离轴区域重构结果对比
Fig. 14 Comparison of reconstruction results of off-axis paraboloid

4 结论

本文阐述了偏折测量系统中针孔相机的设计理念和结果,采用光阑中心坐标结合高精度的相移算法来确定反射光线方向,实现了相机校准和几何校准的融合。该方法操作简单、结果可靠、实验数据表明偏折测量精度与干涉测试相当,同时它结合了干涉仪与三坐标各自的优点,可测量球面、非球面、自由曲面等多种面型,且动态范围大、测量速度快、硬件成本低、抗噪能力强,可满足光学车间复杂工况下镜面的测量需求,对光学加工有重要的指导意义。

参考文献

- [1] YANG Li. Advanced optical manufacturing technology[M]. Beijing: Science Press, 2001.
杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] PAN Junhua. Optical problems in imaging optical engineering[J]. Engineering Science, 2003, 2(3): 32-35.
潘君骅. 成像光学工程面临的光学问题[J]. 中国工程科学, 2003, 2(3): 32-35.
- [3] YE Lu, ZHANG Jinping, ZHENG Liehua, et al. The design of back null compensator test method of convex aspherical surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(4): 154-159.
叶璐, 张金平, 郑列华, 等. 凸非球面背向零位补偿检验的设计方法[J]. 光子学报, 2015, 44(4): 154-159.
- [4] TANG Yan, SU Xianyu, LIU Yuankun, et al. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection[J]. Acta Optica Sinic, 2009, 29(4): 965-969.
唐燕, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面型测量[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 965-969.
- [5] YUAN Ting, ZHANG Feng, TAO Xiaoping, et al. Three-dimensional shape measuring for specular surface based on phase measuring deflectometry[J]. Acta Optica Sinic, 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型测量[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0212004.
- [6] XU X, ZHANG X, NIU Z, et al. Extra-detection-free monoscopic deflectometry for the in-situ measurement of freeform specular surfaces[J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4271-4274.
- [7] XU X, ZHANG X, NIU Z, et al. Self-calibration of in situ monoscopic deflectometric measurement in precision optical manufacturing[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7523-7536.
- [8] SU P, PARKS R E, WANG L, et al. Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. Applied Optics, 2010, 49(23): 4404-4412.
- [9] SU P, PARKS R E, WANG L, et al. SCOTS: a quantitative slope measuring method for optical shop use [C]. International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing, 2010: OTuB3.
- [10] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [11] NIU Z, WU Z, WAN S, et al. Iterative space-variant sphere-model deflectometry enabling designation-model-free measurement of the freeform surface[J]. Optics Express, 2022, 30(9): 14019-14032.
- [12] GRAVES L, CHOI H, ZHAO W, et al. Model-free deflectometry for freeform optics measurement using an iterative

- reconstruction technique[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2110-2113.
- [13] BOTHE T, LI W, KOPYLOW C V, et al. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection[C]. *SPIE*, 2004, 5457: 411-422.
- [14] YUAN Yulei, JIANG Lixing, LIU Lingjie. Applications of Lodrigues matrix in coordinates transformation[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(2): 178-179.
原玉磊, 蒋理兴, 刘灵杰. 罗德里格矩阵在坐标系转换中的应用[J]. *测绘科学*, 2010, 35(2): 178-179.
- [15] CORDERODAVILA A, CORNEJORODRIGUEZ A, OCTAVIO C. Ronchi and Hartmann tests with the same mathematical theory[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(13): 2370-2376.

High Precision Deflectometric Measurement Based on Pinhole Camera with an External Stop

YE Lu^{1,2}, ZHANG Xiangchao¹, WANG Junhua¹, XU Min¹, ZHENG Liehua²

(1 *Shanghai Engineering Research Center of Ultra-precision Optical Manufacturing, Fudan University, Shanghai 200438, China*)

(2 *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Abstract: With the increasing requirements of complex shapes and high resolution of optical systems, the precision measurement of optical mirrors is of great challenge. In the grinding stage, a coordinate measurement machine is generally adopted, which is realized by contact measurement, but it suffers from long measurement time and low accuracy. In the polishing stage, laser interferometry is generally adopted. Due to its limited measurement range, a specially designed compensator is required for measuring an aspheric surface. Usually, it is impossible to achieve full aperture interferometric measurement of a surface with deep asphericity, especially when it has a large form deviation.

Fortunately, the Phase Measuring Deflectometry (PMD) can overcome this problem, which has the advantages of fast measurement speed, low cost, high dynamic range and high flexibility. However, it also has limitations. First, the accuracy of system calibration directly affects the measurement accuracy. The camera is usually regarded as a pinhole camera. The internal and external parameters of the camera are obtained through complicated calibration. Images of a calibration plate are taken at different positions and poses, and the coordinates of each camera pixel are obtained accordingly. The traditional calibration method has a complicated process and it is greatly affected by the quality of the calibration plate. Moreover, camera calibration and geometric calibration are generally obtained separately, and there will be error coupling and propagation in the conversion of coordinate systems. Second, most industrial camera lenses adopt a symmetrical structure in order to eliminate aberrations. The aperture stop is located in the middle of the lens group. In order to directly specify the position of the camera stop, an external stop can be set at the front of the lens, which will greatly affect the camera's field angle and bring inconvenience to measurement. Third, a theoretical model is needed for the surface under test to estimate the position of measured points to solve the height slope ambiguity problem. Generally, a plane model or spherical model can be used as the initial guess, but large errors can be yielded when there exists severe deviations and the measurement accuracy is affected in turn.

As a consequence, a pinhole camera lens is designed with external stop, which can be measured easily. The camera lens consists of four pieces, one of them is glued, and the lens has good image quality. The size of the standard spot diagram is much smaller than the size of Airy disk, and the distortion is 0.707%, which is superior to most commercial lenses. It eliminates the need for complicated camera calibration. Combined with the calibration of reflected light, the camera coordinates can be obtained quickly and accurately. The screen pixel coordinates can be conveniently converted to the workpiece coordinates by pre-calibration. In this paper, at least three non-collinear markers made of aluminum blocks are applied. The spatial position relationship between camera, screen and workpiece can be obtained by external devices such as a coordinate measurement machine, and the coordinate system is henceforth unified. The phase shift algorithm is used to establish the correspondences between camera and screen pixels. The coordinates of the intersection points between the reflected light and the off-axis aspheric surface were deduced by the

formula. Finally, surface reconstruction can be achieved using the above data at one time, without the need for iterative calculation.

An aluminum parabolic mirror with a diameter of 110 mm and a vertex curvature radius of 800 mm is used as the surface under test. Surface measurement is carried out by using the designed pinhole camera with an external stop and the calculating method of measured points. The experimental results show that the accuracy of the reconstruction results is of the same order of magnitude with the profilometer and laser interferometer, and the distribution of the obtained form deviations is consistent. In addition, low-order aberrations including power, coma and astigmatism can be accurately measured by deflectometry, which indicates that the geometric calibration accuracy is very high. The reconstruction results of deflectometry are subtracted pixel by pixel with the results by LuphoScan and interferometry, and the relative errors are 27 nm RMS and 20 nm RMS, respectively.

Firstly, the material of tested mirror is aluminum, which is fabricated by a single point diamond turning machine. The central area is steep, and the entire surface can be captured by one spiral scan by LuphoScan, and the final surface data are obtained by numerical interpolation. There will be a small deviation in some steepness areas due to sample size. Secondly, the profile data collected by the laser interferometer may not be of full aperture, and there may be data missing in the area with a large sphericity deviation at the edge. These two reasons can lead to the possibility of position dislocation in the surface alignment, and it is reasonable to believe that the actual measurement error should be less than 20 nm. This implies that the accuracy can meet the measurement requirements of optical mirrors from grinding to polishing stage.

Deflectometry combines the advantages of coordinates measurement machines and interferometry, with high measurement accuracy, fast measurement speed, and a large dynamic range. It provides a reliable, economical and efficient tool for surface assessment in optical machining shop, and henceforth, and has a wide application prospect.

Key words: Deflectometry; Off-axis paraboloid; Camera calibration; Geometrical calibration; Surface reconstruction

OCIS Codes: 120.6660; 040.1490; 080.3620