

基于直接相位测量术的系统参数标定方法

邓小婷, 高楠, 张宗华

河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

摘要 基于条纹反射的相位测量术被广泛用于获取镜面物体的表面三维形貌数据, 系统标定是相位测量术中重要的一步, 它直接决定了测量结果的精度。提出一种基于相位信息获得系统模型中未知参数的方法, 建立相位和深度间的直接关系, 并对比了采用相位信息和传统几何特征标识点棋盘格标定显示屏外部参数的准确度, 证明了在离焦状态下, 采用相位信息的方法具有更高的精度。使用标定好的系统测量了一个凹面镜和一个具有不连续反射表面的台阶工件, 得到系统测量结果的误差约为 $22\ \mu\text{m}$ 。实验结果表明所提方法可以精确地标定系统参数, 并能获得高精度的三维测量数据。

关键词 测量; 条纹反射; 镜面物体测量; 系统参数标定; 直接相位测量术

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061204

Calibration of System Parameters Based on Direct Phase Measuring Deflectometry

Deng Xiaoting, Gao Nan, Zhang Zonghua

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

Abstract Phase measuring deflectometry (PMD) based on fringe reflection has been widely studied as a way of obtaining three-dimensional shape of specular objects. System calibration is an important step, and it determines the accuracy of the measurement results. We propose a calibration method to obtain the system parameters based on phase information. As a result, it can build the relationship between the absolute phase map and depth data. A contrast experiment is done for verification about extrinsic parameters of the LCD screen by phase data and the checkerboard. The experiment shows that the method using phase data is more accurate when images are out of focus. Using the calibration system, we test a concave mirror and an artificial specular step with discontinuous reflective surface, and the error is about $22\ \mu\text{m}$. Experiment results show that the proposed method can precisely determine the system parameters, so that 3D shape of specular objects can be measured with a high accuracy.

Key words measurement; fringe reflection; specular surface measurement; system parameter calibration; direct phase measuring deflectometry

OCIS codes 120.5050; 120.3940; 120.5700

1 引言

自 20 世纪 50 年代起, 基于条纹投影的漫反射物体三维形貌测量已经取得了长足进步, 并广泛应用于逆向工程、工业检测、虚拟现实、文物保护等领

域^[1-3]。由于工业发展的需要, 一些具有反射表面的光学元件、汽车零件、抛光模具等也需要被测量^[4-5]。然而根据镜面反射定理, 只有在与入射光线成特殊夹角的方向才能接收到较强的光信号^[6]。因此, 无法采用条纹投影方法测量高反光表面的物体。

收稿日期: 2017-10-08; 收到修改稿日期: 2017-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0106404)、国家自然科学基金(51675160)、河北省应用基础研究计划重点基础研究(15961701D)、河北省高层次人才资助项目(GCC2014049)、河北省人才工程培养经费(A201500503)、江苏省双创人才资助项目、European Horizon 2020 through Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowship Scheme (707466-3DRM)

作者简介: 邓小婷(1993—), 女, 硕士, 主要从事光学三维测量方面的研究。E-mail: 1240650883@qq.com

导师简介: 张宗华(1974—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事光学测量技术、三维生物测定方面的研究。

E-mail: zhzhang@hebut.edu.cn(通信联系人)

条纹反射法具有结构简单、动态范围大、测量准确度高、检测速度快、抗干扰性能好、成本低、易于操作等优点,被广泛用于测量镜面反射物体的三维形貌^[7-9]。曹华梁等^[10]给出了用干涉条纹图案重建反射镜三维面形的方法;用泰曼格林干涉仪采集被测的干涉条纹图像,通过对干涉条纹图像进行处理得到镜面高度采样,采用 Zernike 多项式拟合镜面的曲面函数,从而测量镜面高度的三维数据。宋雷等^[11]基于条纹反射法对得到的相位数据进行求导和积分,获得了表面曲率和高度分布,实现了对镜面手机外壳的三维测量。

系统标定是三维测量中最重要的一步,直接决定了测量数据的精度。系统标定是根据系统的物理模型,利用采集的二维图像计算系统中的所有相关参数,并用这些参数直观地描述系统的三维空间坐标。Xiao 等^[12]提出一种几何标定方法,优化了相机与 LCD 显示屏间的关系,然而由于每个步骤得到的数据都有误差,故而会造成误差的累积和传播。Ren^[13]等提出的迭代优化法则提高了系统参数的标定精度,但过程较为复杂。Zhang 等^[14-15]提出了一种基于模型的三维重建方法,直接建立了相位和深度的关系,该方法可用于非连续镜面等复杂面形的

测量。由于反射面和经此面所成虚像位于相机景深的不同深度,已有标定方法存在因图像离焦而造成的标识点定位不准的问题,最终导致测量结果不精确。基于所提相位和深度间的关系模型,提出了一种利用相位信息标定系统参数的方法,避免了因图像离焦而导致的标识点定位不准确的问题。

2 参数标定的原理

2.1 测量系统模型

直接相位测量法的系统模型如图 1 所示。 φ_1 是经过参考镜面反射的 LCD₁ 屏的绝对相位, φ_2 是经过参考镜面反射的 LCD₂ 屏的绝对相位, φ'_1 是经过被测面反射的 LCD₁ 屏的绝对相位, φ'_2 是经过被测面反射的 LCD₂ 屏的绝对相位, h 是被测面某一点到参考镜面的距离, θ 是该点的切线与参考镜面的夹角, β 是经过参考镜面的反射光线与法线的夹角。根据反射的基本原理,当物面偏转 θ 时,反射光线偏转 2θ ,所以经过被测物体的反射光线与法线的夹角为 $2\theta + \beta$ 。 d_1 是 LCD₁ 与参考镜面的距离, d_2 是 LCD₂ 与参考镜面的距离。该模型由 2 个 LCD 屏、1 个半透半反(BS)镜、1 个 CCD 相机组成。图中的参考镜面用于系统参数的标定。

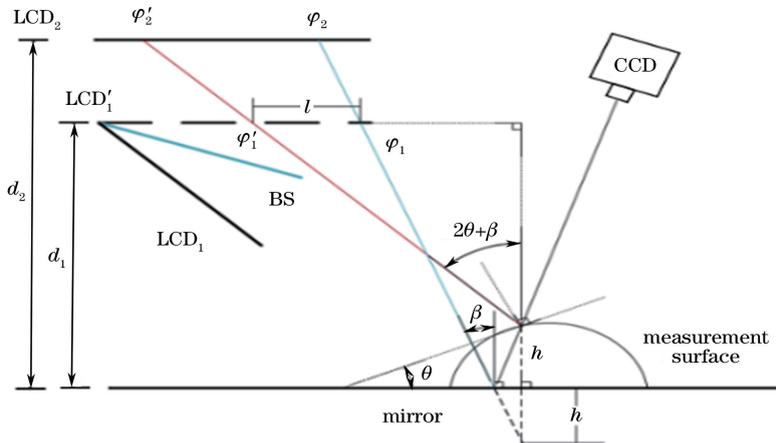


图 1 测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of the measuring system

根据图 1 中各个参数的几何关系,可以得到被测面的深度公式:

$$h = \frac{d_1(\varphi_2 - \varphi'_2) - d_2(\varphi_1 - \varphi'_1)}{(\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi'_1 - \varphi'_2)}. \quad (1)$$

根据(1)式可知,只要确定参数 d_1 和 d_2 ,就可以直接建立深度和相位的关系。

2.2 参数标定

2.2.1 相机内参标定

进行参数标定之前首先使用文献^[16]的方法对

相机内参进行标定:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{R} 为旋转矩阵; \mathbf{T} 为平移矩阵; $[X_w, Y_w, Z_w]$ 为物点在世界坐标系中的坐标向量; $[u, v]$ 为对应点在像素坐标系中的坐标向量; λ 为任意比例因子; \mathbf{A} 为 CCD 相机的内参矩阵,其中包含相机在

图像坐标 x 方向和 y 方向的焦距 (F_u, F_v)、两个主点坐标 (P_u, P_v) 和 4 个径向及切向畸变系数 (K_1, K_2, K_3, K_4)。将棋盘格在相机视场内摆放几个位置,采集图像,使用相机标定工具箱标定相机的内部参数。

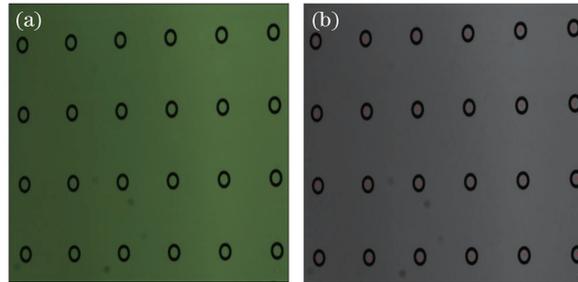


图 2 相机采集圆环矩阵的图像。(a)纹理图;(b)圆环标识的中心分布图(红色圆点)

Fig. 2 Images of hollow ring marker matrix captured by the camera. (a) Texture image; (b) red dots representing the center of each hollow ring marker

由于相邻两个圆环中心的距离已知,根据已经标定好的相机内部参数^[19],可以得到参考镜面在相机坐标系中的空间位置关系,即得到旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 。

2.2.3 LCD 屏外部参数

在图像编码时进行非线性校正,以降低显示屏灰

2.2.2 参考面外部参数

为标定参考面到显示屏的距离,在参考面位置放置 1 面表面带圆环的镜子。采用相机采集圆环的图像,如图 2(a)所示,提取圆环的边界,根据调和共轭和配极对应^[17-18]的原理确定圆环中心,如图 2(b)所示。

度非线性失真的影响^[20-21]。分别生成两种一维光栅,即水平光栅和垂直光栅,这比采用正交光栅与二维相移方法的精度更高^[22]。因此在 LCD_1 和 LCD_2 显示屏上分别产生横、竖正弦条纹,条纹个数为 64、63、56。为了保证条纹的正弦性,同时保证其具有较高的精度,所产生的最大条纹个数为 64,如图 3 所示。

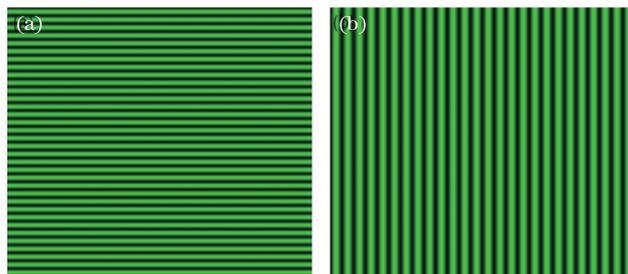


图 3 在显示屏上显示的条纹图。(a)横条纹;(b)竖条纹

Fig. 3 Fringe patterns displayed on the screen. (a) Horizontal fringe; (b) vertical fringe

显示屏上的条纹被参考镜面反射,相机从反射方向采集变形的条纹图,并传输到计算机中进行解调计算,获得采集图像的绝对相位图。由于 LCD 屏上每一个像素点的相位已知,因此根据相位匹配原则就能够找到该点在所采集展开相位图上的对应位置,如图 4 所示,从而可以精确建立 LCD 屏世界坐标系和相机像素坐标系之间的关系。

2.2.4 系统参数

将参考镜面、 LCD_1 和 LCD_2 的空间位置转换到同一相机坐标系中,所用公式如下:

$$\mathbf{R}_{MC} \times \mathbf{P}_{MW} + \mathbf{T}_{MC} = \mathbf{P}_{MC}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{L_1C} \times \mathbf{P}_{L_1W} + \mathbf{T}_{L_1C} = \mathbf{P}_{L_1C}, \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_{L_2C} \times \mathbf{P}_{L_2W} + \mathbf{T}_{L_2C} = \mathbf{P}_{L_2C}, \quad (5)$$

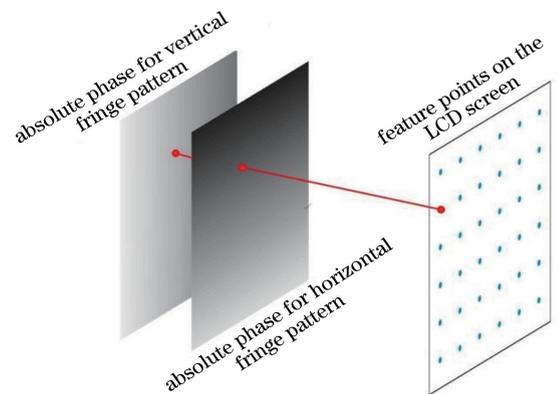


图 4 特征点在绝对相位图上的位置匹配

Fig. 4 Feature points matching using absolute phase image

式中： R_{MC} 、 R_{L_1C} 和 R_{L_2C} 分别为参考镜面、LCD₁和LCD₂从世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵； P_{MW} 、 P_{L_1W} 和 P_{L_2W} 分别为参考镜面、LCD₁和LCD₂的世界坐标； T_{MC} 、 T_{L_1C} 和 T_{L_2C} 分别为参考镜面、LCD₁和LCD₂从世界坐标系到相机坐标系的平移

矩阵； P_{MC} 、 P_{L_1C} 和 P_{L_2C} 分别为参考镜面、LCD₁和LCD₂在相机坐标系中的位置坐标。

参考镜面、LCD₁和LCD₂都转换到同一相机坐标系后，参数 d_1 和 d_2 分别是LCD₁和LCD₂到参考平面的距离，如图5所示。

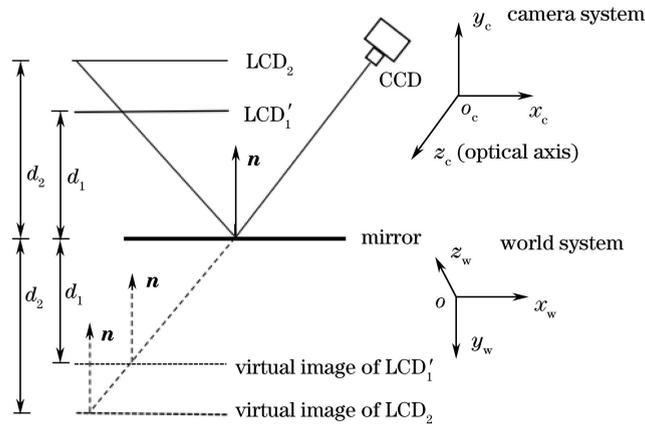


图5 参数 d_1 和 d_2 的标定

Fig. 5 Calibration of parameters d_1 and d_2

3 实验

3.1 实验系统

搭建的实验系统硬件结构如图6所示。CCD相机采用SVS公司的ECO655CVGE系列，分辨率为2448 pixel×2050 pixel；LCD显示屏采用LG公司的LP097QX2系列，分辨率为1380 pixel×768 pixel；300 mm行程电动水平移动台采用大恒新纪元科技股份有限公司的GCD-203300M系列，单脉冲分辨率为0.001 mm；参考镜面上的圆环数量为12×9，圆环间距为6 mm。

3.2 显示屏外部参数标定对比实验及结果

使用9×12黑白相间的间距为6 mm的棋盘格标定板对相机内部参数进行标定。为了得到较高的标定精度，棋盘格在摆放时应尽可能与成像光轴对

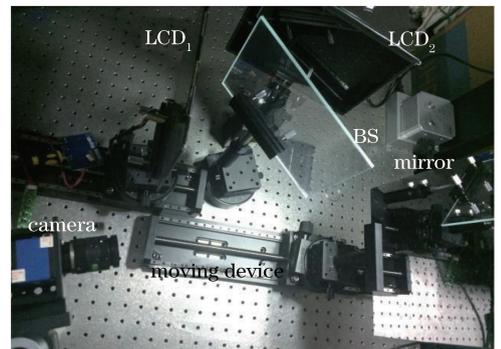


图6 实验系统结构图

Fig. 6 Experimental system

称，并与光轴夹角较大，以减小镜头畸变的影响，标定结果如表1所示。使用相机标定工具箱对相机进行了畸变校正，沿 x 、 y 方向的平均反投影误差分别为0.0856 pixel和0.0668 pixel，反投影误差如图7所示。

表1 相机内部参数的标定结果

Table 1 Calibrated internal parameters of the camera

Focal length /pixel		Radial distortion/pixel		Tangential distortion			
F_u	F_v	P_u	P_v	K_1	K_2	K_3	K_4
10137.452	10137.811	1204.783	1011.174	-0.2712	-1.8758	-0.0002	0.0003

传统方法使用几何特征标识物来标定物体的外部参数，如十字、圆环、棋盘格等。其外部参数标定的精度取决于标识点提取的准确度。在本测量模型中，采用相位信息来设置特征点，从而标定显示屏外部参数。使用1个LCD显示屏和1个CCD相机对

两种方法的精度进行比较，过程如下：1) 将LCD显示屏固定在水平移动台上，显示6 mm×6 mm黑白相间的棋盘格，调节LCD显示屏位置使其成像较为清晰，采集棋盘格图像，标定其外部参数。2) 使用水平移动台分别步进10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80,

90,100 mm;相机分别采集图像,并标定 LCD 屏在不同位置的外部参数。3)用标定好的外部参数分别计算每个位置与初始位置之间的距离,并与水平移动台的实际步进距离进行对比,结果如表 2 第 2 列所示。4) 按照同样的方式,在 LCD 屏上分别显示横、竖条纹图,相机采集条纹图,解算相位,选取标识点标定其外部参数,重复上述过程,结果如表 2 第 3 列所示。两种方法的标定结果如图 8 所示。

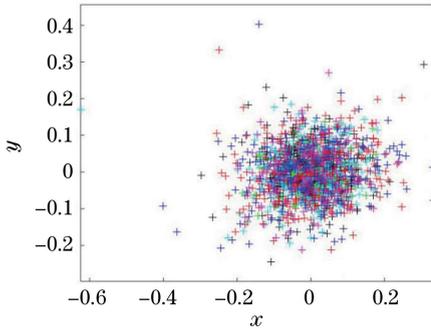


图 7 相机标定的反投影误差(像素)

Fig. 7 Reprojection error of the calibrated camera (pixel)

表 2 使用棋盘格和条纹图标定显示屏外部参数的结果

Table 2 Results of LCD's extrinsic parameters using checkerboard and fringe patterns mm

Step distance	Calculated distance 1	Calculated distance 2
10	10.058	9.915
20	19.923	19.880
30	30.122	30.172
40	40.154	40.194
50	49.789	49.758
60	60.294	60.246
70	70.314	70.288
80	80.468	80.327
90	89.454	89.606
100	99.342	99.558

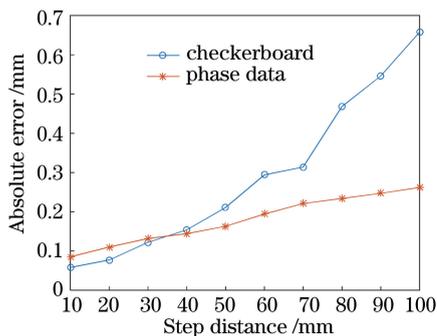


图 8 外部参数标定误差

Fig. 8 Error of the calibrated extrinsic parameters

实验结果表明:随着步进距离增大,图像从清晰变为模糊,两种方法的精度都在下降;当成像清晰

时,使用棋盘格标定外部参数的精度更高;当成像模糊时,使用条纹图标定的精度更高。

根据测量模型可知,当参考镜面上的圆环在相机靶面上成像较清晰时,经参考镜面反射的 LCD 显示屏的像已经处于离焦状态,采集到的图像是模糊的,这是因为受到了相机景深的限制,此时使用相位信息标定外部参数相较棋盘格具有更高的精度。

3.3 系统标定精度验证及实验结果

在系统参数标定之前,首先调节两个 LCD 显示屏,使之与参考镜面保持平行。方法如下:将参考镜面固定在精密角位移台上,角位移台有 3 个自由度,可以任意变换位置。LCD₂ 显示棋盘格,分别标定 LCD₂ 与参考镜面的外部参数,根据其差值用角位移台进行粗调节,使得 LCD₂ 与参考镜面保持基本平行,半透半反镜改变 LCD₁ 的成像光路,并且通过软件校正^[23],使得 LCD₁ 经过其所成的虚像 LCD'₁ 与 LCD₂ 及参考镜面均保持平行。

然后进行测量模型系统的标定,过程如下:1) 相机采集 1 幅参考镜面的纹理图,基于上面已知间距的圆环来标定参考镜面的外部参数,并转换到相机坐标系;2) LCD₁ 和 LCD₂ 显示屏上分别显示横、竖条纹图,相机采集图像,根据四步相移^[24]和最佳三条纹选择法获取绝对相位图;3) 在 LCD 屏上选取 12×9 个标识点,确定其对应的相位,依据相位匹配原则在相应的绝对相位图中找到匹配点,从而标定 LCD₁ 和 LCD₂ 显示屏的外部参数,并转换到相机坐标系;4) 根据转换到同一相机坐标系下的参考平面、LCD₁ 和 LCD₂ 显示屏的空间位置,确定参数 d_1 和 d_2 的值,从而建立测量模型中深度和相位的关系;5) 由于相邻圆环间距已知,可以确定参考镜面像素坐标和空间 xy 坐标的关系,即完成横向标定。

使用标定好的系统测量了一个凹面镜(北京微纳光科自动化设备有限公司),由于已经完成系统的横向标定,得到所有点的 x 、 y 值,因此,用测量得到的凹面镜的所有点的深度值拟合一个球面,然后根据球面半径公式可以求出凹面镜的曲率半径;最后将凹面镜上所有点与拟合的球面中心作差,求取平均值,得到深度数据的系统误差为 23 μm 。此外,还测量了一个非连续的台阶,相邻台阶面的深度值通过三坐标机测量获得,测量使用的三坐标机的测量误差为 $\pm 1 \mu\text{m}$,将这个结果作为测量的真值。凹面镜和台阶的实物图如图 9 所示。三维形貌测量结果如图 10 所示。选取台阶某一个面获得的所有点的

深度值,并拟合一个平面,用相邻台阶面所有点到拟合平面距离的平均值来表示测量得到的相邻台阶的距离,并与三坐标测量机的测量值进行比较,相邻台

阶面的测量深度值及误差如表 3 第 2、第 3、第 4 列所示。从中可以看出,相邻台阶面测量的误差不超过 $22 \mu\text{m}$ 。

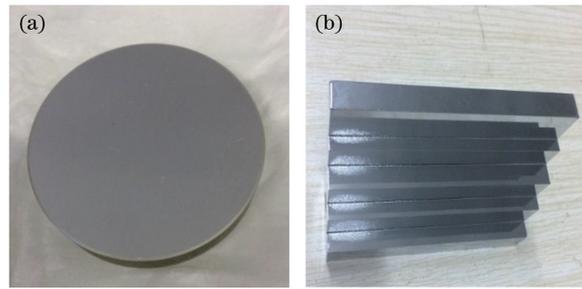


图 9 (a)凹面镜和(b)台阶的实物图

Fig. 9 Photos of (a) concave mirror and (b) manufactured artificial step

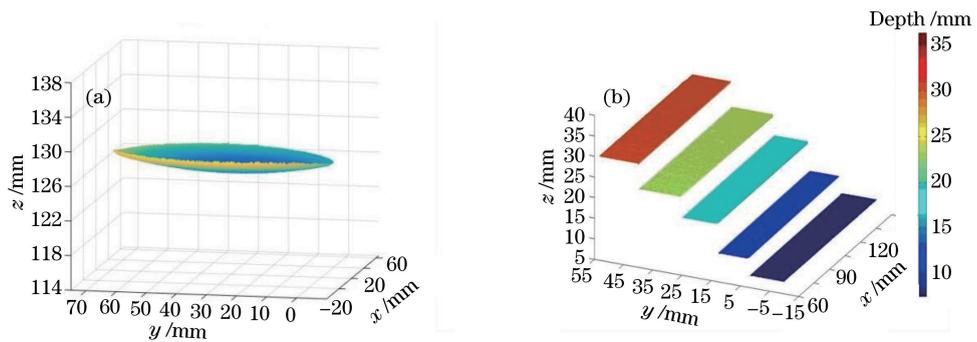


图 10 三维测量形貌。(a)凹面镜;(b)台阶

Fig. 10 Measured 3D shapes. (a) Concave mirror; (b) artificial specular step

表 3 台阶真实值与测量值及误差

Table 3 True and measured distances of the artificial specular step and their errors mm

Actual distance	Measured distance	Absolute error	Root mean square error
3.987	3.969	0.018	0.022
7.025	7.010	0.015	0.019
5.006	5.028	0.022	0.024
6.099	6.120	0.021	0.020

实验结果表明,使用所提方法标定模型中的未知参数建立的测量系统可以有效测量具有复杂反射性表面的物体,并且测量结果具有较高的精度和可靠性。

4 结 论

提出了基于直接相位测量术的系统参数标定方法,使用相位数据标定 LCD 显示屏在相机坐标系中的位置。利用数字标定板标定处于离焦状态的显示屏时,由于数字标定板对图像离焦不敏感,且特征点大小和个数可以任意选取,因此有效减小了因模型中图像模糊而造成的测量误差。利用所标定的系统

测量了非连续高反射性台阶以及一个光学工件凹面镜,验证了标定精度。所提方法标定简单,易于实现,为相位测量偏折术中系统的标定提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Xu J, Liu S L, Wan A, *et al.* An absolute phase technique for 3D profile measurement using four-step structured light pattern [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2012, 50(9): 1274-1280.
- [2] Da J, Qu H M, Tao T Y, *et al.* Real-time three-dimensional measurement composite of epipolar constraint and speckle correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1012003.
笮健, 屈惠明, 陶天阳, 等. 结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1012003.
- [3] Wu Q Y, Zeng Z, Zhang B C, *et al.* A 360° three-dimensional measurement system and its calibration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0404002.
吴庆阳, 曾增, 张佰春, 等. 一种新的 360° 三维测量系统及标定技术 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4):

- 0404002.
- [4] Liu Y K, Su X Y, Wu Q Y. 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. 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] Ou P, Wang T, Li R X. A three-dimensional teeth measurement system based on structured light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 011102.
欧攀, 王婷, 李瑞祥. 一种基于结构光的牙齿三维测量系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 011102.
- [6] Zhang H, Ji L S, Liu S G, *et al.* Three-dimensional shape measurement of a highly reflected, specular surface with structured light method[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7724-7732.
- [7] Yuan T, Zhang F, Tao X P, *et al.* Test of optical mirror surface using fringe reflection system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(9): 86-91.
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): 86-91.
- [8] Sun X, Liu Y, Yu X, *et al.* Three-dimensional measurement for specular reflection surface based on reflection component separation and priority region filling theory[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 215.
- [9] Xiao Y L, Su X Y, Chen W J. Specular shape measurement with phase measuring deflectometry based on bundle adjustment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1212007.
肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于光束法平差的相位测量偏折术镜面面形测量[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1212007.
- [10] Cao H L, Cheng Z H, Yu L Y. Reconstruction of 3D surface of mirror by processing fringe pattern[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 599-603.
曹华梁, 程祖海, 余亮英. 用干涉条纹图像重建反射镜的三维面形[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 599-603.
- [11] Song L, Yue H M, Wu Y X, *et al.* Surface profile measurement of specular cell phone cases on variable lateral scales by fringe reflection technique[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(11): 2154-2162.
宋雷, 岳慧敏, 吴雨祥, 等. 条纹反射法测量镜面手机外壳多尺度三维形貌[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(11): 2154-2162.
- [12] Xiao Y L, Su X Y, Chen W J. Flexible geometrical calibration for fringe-reflection 3D measurement[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 620-622.
- [13] Ren H Y, Gao F, Jiang X Q. Iterative optimization calibration method for stereo deflectometry[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22060-22068.
- [14] Zhang Z H, Liu Y, Huang S J, *et al.* Full-field 3D shape measurement of specular surfaces by direct phase to depth relationship[C]. *Proceedings of the SPIE*, 2016, 23: 100230X.
- [15] Liu Y, Huang S J, Zhang Z H, *et al.* Full-field 3D shape measurement of discontinuous specular objects by direct phase measuring deflectometry[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10293.
- [16] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [17] Xing D K, Da F P, Zhang H. Research and application of locating of circular target with high accuracy[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(12): 2593-2598.
邢德奎, 达飞鹏, 张虎. 圆形目标精密定位方法的研究与应用[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(12): 2593-2598.
- [18] Chen X Y, Ma Z, Hu Y, *et al.* A new method for accurate location of concentric circles in visual measurement[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(8): 1524-1528.
陈新禹, 马孜, 胡英, 等. 视觉测量中圆形标记点的高精度定位[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(8): 1524-1528.
- [19] Zhang Z H, Huang S J, Meng S S, *et al.* A simple, flexible and automatic 3D calibration method for a phase calculation-based fringe projection imaging system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12218-12227.
- [20] Wang Z Y, Nguyen D A, Barnes J C. Some practical considerations in fringe projections profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 218-225.
- [21] Zheng D L, Da F P. 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

- gamma 校正技术 [J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512003.
- [22] Liu Y K, Olesch E, Yang Z, *et al.* A one-dimensional phase-shift technique based on dual-frequency crossed fringe for phase measuring deflectometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0308005.
- 刘元坤, Olesch E, 杨征, 等. 基于双频正交光栅一维相移的相位测量偏折术 [J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308005.
- [23] Zhang Z H, Guo J, Wang Y M, *et al.* Parallel alignment and correction of two displays in three-dimensional measuring system of specular surfaces [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(2): 289-296.
- 张宗华, 郭佼, 王月敏, 等. 镜面物体三维测量系统中两显示屏的平行正对校正 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 289-296.
- [24] Creath K. V phase-measurement interferometry techniques [J]. Progress in Optics, 1998, 26: 349-393.