

透射显示双屏偏折系统中透明屏折射误差补偿方法

王月霞, 张宗华*, 高楠, 孟召宗

河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

摘要 透射显示双屏偏折系统解决了传统方法无法测量非连续镜面三维形貌的难题, 其使用透明显示屏, 既增大了测量视场又减小了系统结构的复杂性。但透明显示屏的折射效应会导致三维测量结果产生误差。在分析透射显示双屏系统中折射光路的基础上, 提出一种透明显示屏折射误差补偿方法。首先分析透射显示双屏系统测量原理及折射误差产生原因。在参数标定过程中, 从相位角度对透明显示屏引入的折射误差进行补偿。在所研制的测量系统上验证所提出的折射误差补偿方法。实验结果表明, 该方法消除了折射效应带来的误差, 提高了镜面物体三维形貌测量的精度。

关键词 测量; 光学三维测量系统; 相位测量偏折术; 透明显示屏; 折射效应; 相位计算

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0512003

Compensation Method of Refraction Error Caused by Transparent Display Screen in Transmissive Display Dual-Screen Deflectometric System

Wang Yuexia, Zhang Zonghua*, Gao Nan, Meng Zhaozong

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

Abstract The proposed transmissive display dual-screen deflectometric system solves the challenging problem that traditional methods fail to obtain the three-dimensional (3D) shape of a mirror object with a discontinuous surface. The usage of a transparent display screen not only widens the measurement field of view but also reduces the complexity of the system structure. However, the refraction effect of the transparent display screen will cause errors in the 3D measured data. After analyzing the refraction light path in the transmissive display dual-screen system, this paper proposes a method of compensating the refraction error caused by the transparent display screen. To start with, we analyze the measurement principle of the transmissive display dual-screen system and the cause of the refraction error. Then, the refraction error introduced by the transparent display screen is compensated through phase in the parameter calibration process. Finally, the proposed method of refraction error compensation is verified on the developed measurement system. The experimental results show that the proposed method eliminates the error caused by the refraction effect and improves the measurement accuracy of 3D mirror object shape.

Key words measurement; optical three-dimensional measurement system; phase measurement deflectometry; transparent display screen; refraction effect; phase calculation

1 引言

光学三维形貌测量技术以其非接触、高精度和高效率等优点被广泛应用。光学三维形貌测量技术应用中的测量对象可以分为两大类: 漫反射物体和

镜面物体。现阶段针对漫反射物体测量的结构光条纹投影技术已经应用于许多领域^[1-3]; 但对于镜面物体的三维测量, 这类光学技术还不是完全成熟。因此, 国内外研究人员进行了大量的研究, 其中针对镜面物体的三维测量方法主要分为接触式测量和非接

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-09-06; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(52075147, 51675160)

通信作者: *zhzhang@hebut.edu.cn

触式测量。接触式测量的主要方法是利用三坐标测量机(CMM)^[4]对镜面物体进行测量;非接触式测量方法中被广泛使用的是基于条纹反射的相位测量偏折术(PMD)。相位测量偏折术^[5-8]主要采用梯度积分的方法,测量精度很高,但其在测量过程中会引入累积误差,并且不能测量非连续和大梯度物体的表面形貌。Liu 等^[9-12]提出了直接相位测量偏折术(DPMD),实现了非连续镜面物体的测量,但系统结构复杂且引入的半透半反镜限制了视场。因此,本文提出了透射显示双屏测量方法。基于该方法的系统由一块液晶显示屏和一块透明显示屏(TD)组成,其结构简单并且实验操作方便。但该测量系统中显示屏的显示效果直接影响镜面物体三维形貌的测量结果,所以显示屏存在的非理想特性亟待研究和解决。

Petz 等^[13]利用球面反射镜对相位偏折术系统进行了测量不确定度分析。通过控制不同的系统参数进行仿真,结果表明液晶显示屏中透明层的折射效应是造成其测量误差的主要原因。Fischer 等^[14]基于相位偏折系统,通过观察灰度渲染特征曲线与观测角度的相关性,得到不同类型的显示屏对于测量结果的影响,实验结果表明平面转换型的液晶显示屏具有与观测角无关的灰度特性曲线,使用这一类液晶显示屏有利于提高测量精度。Huang 等^[15]利用软件可配置光学测试系统对镜面物体进行高精度测量,利用光学显微镜测量显示屏的厚度及其他参数,从透明层的折射效应、显示屏的亮度和表面平整度三个方面对系统的光学模型进行了补偿。Feng 等^[16]提出一种基于透明玻璃标定板的多摄像机标定新方法,利用迭代的方法解决了透明玻璃板的折射误差。Li 等^[17]利用改进的相位测量偏折术来测量镜面物体,将透明显示屏的折射参数引入系统位姿关系标定中,利用迭代 L-M(Levenberg-Marquardt)算法对系统位姿关系进行优化。最后通过径向基函数插值法从优化后的梯度数据中恢复被测物体形貌,从而提高系统的测量精度。

透射显示双屏系统是将直接相位偏折术中的半透半反镜和一块液晶显示屏替换为一块透明显示屏,透射显示双屏系统与直接相位测量偏折系统相比,系统更加简单。但透明显示屏的显示特性不同于一般液晶显示屏,其引入的折射误差亟待解决。本文首先通过对透射显示双屏系统的成像过程以及光线经透明显示屏时发生的折射进行分析,然后利用折射参数计算出由透明显示屏折射引起的相位误差,并对实际测量的相位值进行补偿,最后利用相位

与深度之间的关系恢复物体的三维形貌。因此,本文方法避免了误差积累,提高了透射显示双屏系统的测量精度。实验结果证明了本文所提方法的有效性。

2 基本原理

2.1 透射显示双屏系统的测量原理

透射显示双屏系统是由一块普通的液晶显示屏(LCD)、一块透明显示屏、一台电荷耦合元件(CCD)相机以及一块参考镜面组成,如图 1 所示。当两个显示屏显示的条纹图经参考镜面和被测物体反射后,可得到相位值。根据相位与深度之间的关系得到被测物体的深度信息,从而恢复被测镜面物体的三维形貌。其中透明显示屏的显示特性不同于液晶显示屏:透明显示屏在关闭时,屏幕就相当于一块平行平板;当其工作时,人眼不仅能够看到在屏幕上显示的内容,同时也能透过透明显示屏看到后面液晶显示屏上的内容。但相机不能同时清晰地采集到两个显示屏显示的图像。相机采集透明显示屏显示的图片时,需要有光源照亮透明显示屏,这样才能保证采集到完整清晰的图片。透明显示屏高亮白色背景是指透明显示屏显示白色的背景,具有更好的透光功能。液晶显示屏显示图像时,其前面的透明显示屏相当于一个平行平板。液晶显示屏高亮白色背景显示纯白色,作为透明显示屏的背景光源,使透明显示屏上的图像有更好的对比度。

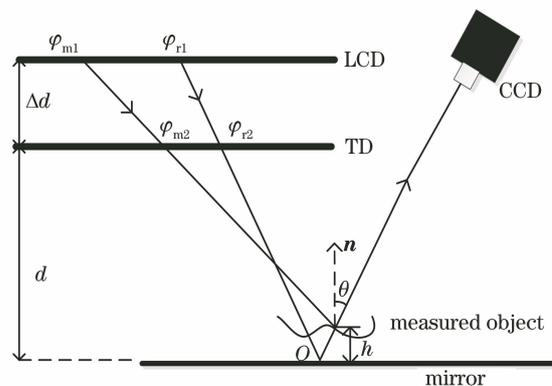


图 1 透射显示双屏系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission display double screen system

通过透射显示双屏系统获得被测物体三维形貌的具体方法如下:首先调整好参考镜面、液晶显示屏、透明显示屏和相机之间的空间位置关系;分别在液晶显示屏与透明显示屏上显示条纹图;利用相机采集经参考镜面反射的条纹,利用最佳条纹选择

法^[18]和四步相移法^[19]得到两组对应参考镜面的绝对相位值;将参考镜面换成被测的镜面物体,分别在双屏显示条纹,同样得到两组对应待测镜面的绝对相位值;最后将得到的相位值代入相位与深度的关系式中,即可获取被测物体的深度信息。相位与深度的关系式为

$$h = \frac{\Delta d(\varphi_{m2} - \varphi_{r2}) - d[(\varphi_{r1} - \varphi_{r2}) - (\varphi_{m1} - \varphi_{m2})]}{\varphi_{r1} - \varphi_{r2} + \varphi_{m1} - \varphi_{m2}}, \quad (1)$$

式中: Δd 和 d 分别是透明显示屏和液晶显示屏之间的距离以及透明显示屏和参考镜面之间的距离,通过系统标定就可以得到;下标 m 代表被测物体, r 代表参考镜面; φ_{m1} 表示液晶显示屏显示的图案经被测物体反射的绝对相位值; φ_{m2} 表示透明显示屏显示的图案经被测物体反射的绝对相位值; φ_{r1} 表示液晶显示屏显示的图案经参考镜面反射的绝对相位值; φ_{r2} 表示透明显示屏显示的图案经参考镜面反射的绝对相位值; h 是镜面相对于参考镜面的深度值。

2.2 考虑折射误差的透射显示双屏系统

基于透明显示屏的显示特性,在利用透射显示双屏系统测量镜面物体时,相机采集到液晶显示屏上的图片经过透明显示屏会产生折射现象。所获取的绝对相位值包含一定的误差,从而导致被测物体的深度值有一定的误差。图 2 所示是考虑折射误差的透射显示双屏系统原理图。为便于分析,将透明显示屏的厚度进行了放大。图中 O 代表不考虑折射偏差时入射光线与反射光线相交的位置, O_r 代表考虑折射时入射光线与反射光线相交的实际位置, h_r 为考虑折射时被测物体的实际深度值。

根据系统原理图,实际深度值与相位的关系式为

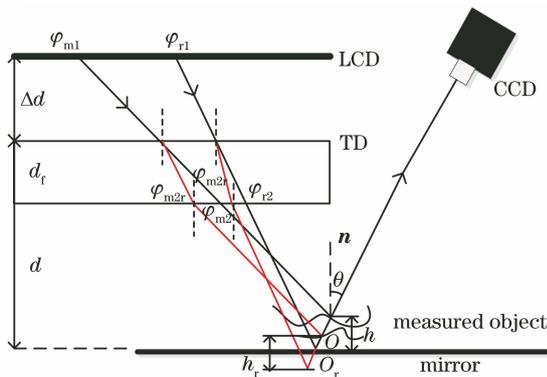


图 2 考虑折射的系统原理图

Fig. 2 System schematic diagram considering refraction

$$h_r = \frac{\Delta d(\varphi_{m2r} - \varphi_{r2r}) - d[(\varphi_{r1} - \varphi_{r2r}) - (\varphi_{m1} - \varphi_{m2r})]}{\varphi_{r1} - \varphi_{r2r} + \varphi_{m1} - \varphi_{m2r}}, \quad (2)$$

式中: φ_{m2r} 为液晶显示屏显示的图案在透明显示屏处发生折射再由被测物体反射的绝对相位值; φ_{r2r} 为液晶显示屏显示的图案在透明显示屏处发生折射再由参考镜面反射的绝对相位值。

由图 2 可知,从 LCD 发出的光线在 TD 处发生折射,引起了相位偏差,即 $\varphi_{m2r} - \varphi_{m2}$ 和 $\varphi_{r2r} - \varphi_{r2}$ 。求出相位偏差就可以对实际相位进行补偿,得到理想相位值,从而得到修正后的深度值 h 。

3 折射参数标定方法

3.1 折射模型分析

在恢复物体三维形貌的过程中,相机需要采集液晶显示屏显示的条纹图案,此时液晶显示屏显示的图案会经透明显示屏发生折射。此时可以将透明显示屏当作一块平行平板,光线在透明显示屏处发生折射的模型如图 3 所示,图中 P' 点和 Q' 点是在测量过程中不考虑折射时光线与显示屏的交点,二者的坐标矢量分别为 P' 和 Q' 。

首先,液晶显示屏上的像素点 P (其坐标矢量为 P)所在的沿着入射光线方向(方向向量为 i)的直线与透明显示屏相交于点 Q ,则 Q 的坐标矢量 Q 可表示为

$$Q = P + |PQ|i; \quad (3)$$

入射光线在透明显示屏发生折射后与显示屏交于点 Q' ,其坐标矢量 Q' 可表示为

$$Q' = Q + |QQ'|t, \quad (4)$$

式中: $|QQ'| = \frac{d_f}{\cos \beta}$ 表示两点之间的距离; $\cos \beta = n \cdot t$, t 为折射光线的单位向量, d_f 是透明显示屏的厚度。折射光线的单位向量 t 可以表示为

$$t = \eta i + \beta n, \quad (5)$$

式中: n 是法向量; η 为折射率; $\beta = \eta \cos \alpha - \sqrt{1 + \eta^2 (\cos^2 \alpha - 1)}$, $\cos \alpha = -n \cdot i$ 。最后,像素点 P 发出的光线沿 i 所在方向经相机光心 O 成像,光心 O 的坐标矢量 O 可表示为

$$O = Q' + |Q'O|i, \quad (6)$$

式中: $|Q'O| = \frac{\Delta d}{\cos \alpha}$ 表示两点之间的距离。根据图 3 中的几何关系,有

$$\Delta l = d_f (\tan \alpha - \tan \beta), \quad (7)$$

$$\varphi_{2r} - \varphi_2 = \frac{\Delta l}{p} \cdot 2\pi, \quad (8)$$

式中: φ_2 和 φ_{2r} 是光线经参考镜面反射分别在透明显示屏处考虑折射前的理想相位值和考虑折射后的实际相位值, 则 $\varphi_{2r} - \varphi_2$ 为折射引起的相位偏差; Δl 是由折射产生的像素偏移量; α 是最终在相机处成像的折射角。相位偏差与像素偏移量之间的关系如(8)式所示, p 是条纹周期所占像素的长度, 可根据显示的条纹数量和屏幕像素获得。根据折射定律 $\eta = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$, 像素偏移量可以表示为

$$\Delta l = d_t \left\{ \tan \alpha - \tan \left[\arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{\eta} \right) \right] \right\}. \quad (9)$$

为求得相位偏差, 首先要求出像素偏移量。由以上推导得出像素偏移量主要与透明显示屏的厚度、折射率以及折射角有关。

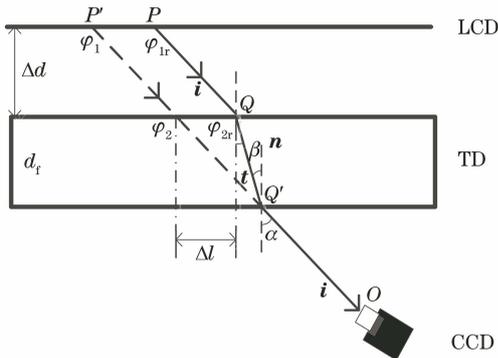


图 3 折射模型

Fig. 3 Refraction model

3.2 厚度、折射率及折射角的标定

为了标定厚度与折射率, 通过相机采集计算机显示的棋盘格图像, 利用信赖域反射算法进行标定。

首先确定透射显示双屏系统中两个显示屏和相机的位置关系, 如图 3 所示。

标定的具体步骤如下:

1) 当透明显示屏高亮白色背景时, 可将其当作一个平行平板, 相机透过前面的透明显示屏采集液晶显示屏上的棋盘格图像, 通过提取图片上的特征点, 标定透明显示屏的厚度 d_t 和折射率 η 。

2) 改变相机的位置。每个位置对应相机采集到的一幅图像, 并且要保证棋盘格图像显示在相机的景深范围内, 以使相机采集到清晰完整的棋盘格图像。

3) 用信赖域反射算法^[20]求解以 η 和 d_t 为初值的代价函数最小值。不断改变初值, 所求函数值最小时的初值就是厚度 d_t 和折射率 η 。代价函数为

$$[\eta, d] = \min \sum_{k=1}^{n_p} \left[\frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{\mathbf{M}}_k - \mathbf{M}_{kj}) \right]^2, \quad (10)$$

式中: n_p 是提取的每幅图像特征点的数量; n_i 是相机采集的图像数量; \mathbf{M}_{kj} 是第 j 幅图像中第 k 个特征点的世界坐标向量; $\bar{\mathbf{M}}_k$ 是特征点在不同视角的坐标均值向量, $\bar{\mathbf{M}}_k = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \mathbf{M}_{kj}$ 。

为了标定折射角, 将最终的出射光线与法线的夹角定义为折射角。由折射模型的几何关系可得到

$$\alpha = \arctan \left[\frac{(\varphi_{2r} - \varphi_{1r}) \cdot p}{\Delta d \cdot 2\pi} \right]. \quad (11)$$

通过系统标定就可以求得 φ_{1r} 和 φ_{2r} , 从而求出折射角 α 。

4 实验装置与操作

基于上述所提方法, 研制了透射显示双屏实验系统, 如图 4 所示。CCD 相机的型号为 SVS SVCam-ECO-4I0 系列 eco655CVGE4I0, 像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$ 。液晶显示屏是由深圳市维辰思科技有限公司生产, 尺寸为 17.45 inch (1 inch = 2.54 cm), 分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 透明显示屏是由广州市诺锐维赫电子科技有限公司生产的 NVS133 型显示屏, 尺寸为 17.45 inch, 分辨率为 $1366 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。选用大恒光电生产的型号为 GCD203200M 的水平移动台。图 5 为双屏显示的图像, 字母“LCD”显示在液晶显示屏上, 字母“TD”显示在透明显示屏上。

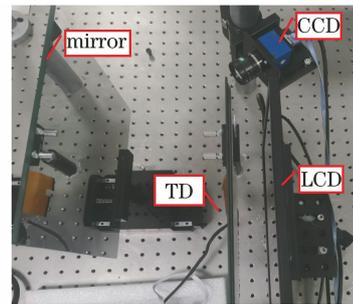


图 4 实验系统实物图

Fig. 4 Photo of experimental system

4.1 参数标定实验

为了标定厚度和折射率, 让透明显示屏高亮白色背景, 液晶显示屏显示软件生成的棋盘格。改变相机的位置, 以保证在相机景深范围内采集到液晶显示屏的全貌。实验过程中将相机摆放了 6 个不同的位置, 让相机在 6 个不同的角度下进行采集, 利用 MATLAB 标定工具箱提取特征点后, 通过信赖域

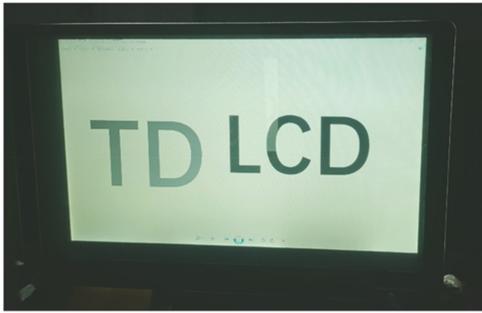


图 5 双屏显示的图像

Fig. 5 Dual-screen displayed image

反射算法计算出透明显示屏的折射率和厚度分别为 1.86 和 2.56 mm。

为了标定折射角,首先让液晶显示屏显示条纹,透明显示屏高亮白色背景。相机拍摄的条纹通过参考镜面成虚像。为保证标定的精度,相机通过拍摄八步相移的条纹得到折叠相位,然后通过最佳条纹选择法得到绝对相位值 φ_{1r} 。条纹个数为 64, 63, 56。同理,让液晶显示屏显示纯白色,对透明显示屏

显示相同条纹序列进行拍摄,得到透明显示屏通过参考镜面反射的绝对相位值 φ_{2r} 。双屏之间的距离根据文献[9]中的方法求得。通过将以上所获得的参数代入(11)式就可以求出折射角。

求出三个参数后根据公式求出像素偏移量,进而求出相位偏差,根据相位与深度的关系进行补偿,得到理想的深度信息,用于恢复镜面物体的三维形貌。

4.2 精度验证及实验结果

对测量系统的深度数据进行了验证。利用水平导轨向前移动参考镜面至 5 mm、10 mm 处以及向后移动 5 mm、10 mm 处 4 个已知位置作为真值,水平导轨的精度为微米量级。由计算机生成条纹数为 64, 63, 56 的正弦直条纹,由参考镜面反射两个显示屏显示的条纹,用相机拍摄两个显示屏上的相移图像,如图 6 所示。利用条纹的相位信息获取深度信息,对系统折射误差补偿前和补偿后的深度值进行比较分析。表 1 为系统测量深度值和真值的对比。

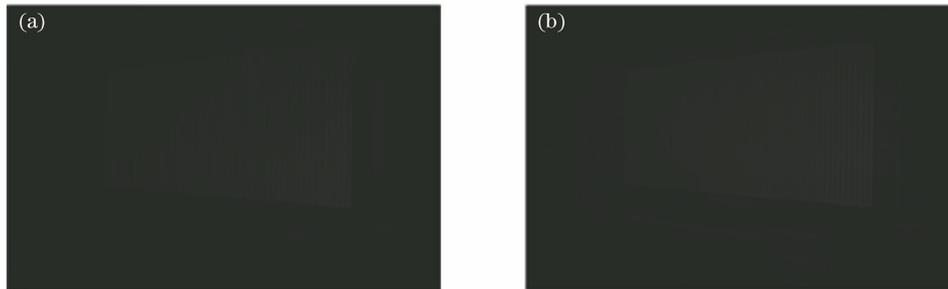


图 6 双屏显示的相移图像。(a) TD;(b) LCD

Fig. 6 Dual-screen displayed phase shift images. (a) TD; (b) LCD

表 1 精度验证结果分析

Table 1 Analysis of accuracy verification results

mm

Known depth of rail movement	Depth measured by system before compensation	Depth measured by system after compensation	Absolute error before compensation	Absolute error after compensation
5	5.033	4.980	0.033	-0.020
10	9.967	9.981	-0.033	-0.019
-10	-10.023	-9.987	-0.023	0.013
-5	-4.971	-5.016	0.029	-0.016

根据表 1 中补偿前后的绝对误差值,可知本文的补偿方法提高了系统测量深度值的精度。

为了验证本文方法的有效性,测量了一个高精度镜面台阶,如图 7 所示。首先将 Zeiss Countura G2 三坐标测量机测量的台阶高度作为真值,如表 2 第一列所示。然后由所标定的系统测量此镜面台阶各点的深度值。利用某一台阶面获得的所有点的深度值拟合一个平面,计算相邻台阶面的所有点到拟

合平面的距离的平均值,将其作为相邻台阶间距离的测量值。利用本文方法补偿前及补偿后台阶面间的深度值及误差如表 2 所示。根据表 2 中的测量结果,可知补偿前的最大绝对误差值为 0.031 mm,补偿后的最大绝对误差值为 0.022 mm。补偿后的绝对误差减小,测量精度提高,最终恢复的台阶三维形貌如图 8 所示。

表 2 直角台阶的测量结果及误差

Table 2 Measurement results and error of right-angle steps

mm

CMM measured distance	Depth measured by the system before compensation	Depth measured by the system after compensation	Absolute error before compensation	Absolute error after compensation
3.987	4.016	4.006	0.029	0.019
7.025	7.048	7.038	0.023	0.013
5.006	4.981	4.990	-0.025	-0.016
6.099	6.130	6.121	0.031	0.022

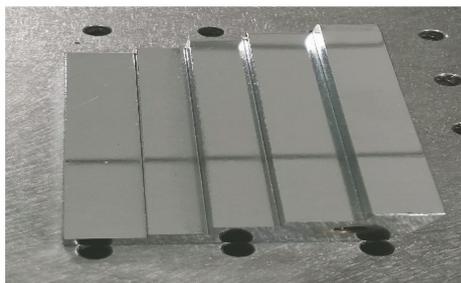


图 7 台阶实物图

Fig. 7 Photo of steps

为了进一步验证补偿方法对镜面物体测量效果的影响,实际测量了一个环形台阶,如图 9(a)所示。环形台阶一共有 6 个台阶面,每个台阶面都相互平行,将 CMM 测量得到的结果作为相邻台阶面之间距离的真值,如表 3 第一列所示。首先用计算机生成条

纹数为 64,63,56 的正弦直条纹,然后将环形台阶放在相机景深范围内,环形台阶反射显示屏投射的条纹,如图 9(b)所示。

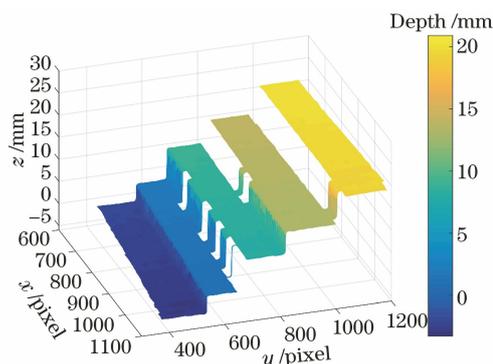


图 8 直角台阶三维测量形貌

Fig. 8 Measured 3D shape of right-angle step

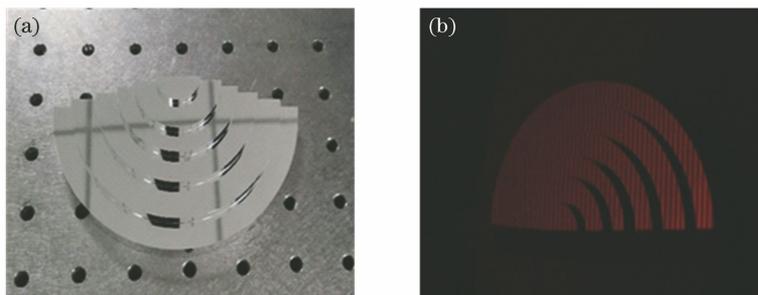


图 9 环形台阶。(a)台阶实物图;(b)台阶反射的条纹图

Fig. 9 Annular steps. (a) Photo of step; (b) fringe pattern reflected by step

经上述相同的处理过程得到被测镜面的深度信息。表 3 为补偿前后环形台阶面的深度值及误

差。补偿后最终恢复的环形台阶三维形貌如图 10 所示。

表 3 环形台阶测量结果及误差

Table 3 Measurement results and error of annular steps

mm

CMM measured distance	Depth measured by system before compensation	Depth measured by system after compensation	Absolute error before compensation	Absolute error after compensation
3.000	2.978	2.986	-0.022	-0.014
4.000	4.028	4.022	0.028	0.022
5.000	5.032	5.024	0.032	0.024
5.500	5.520	5.487	0.020	-0.013
6.500	6.479	6.485	-0.021	-0.015

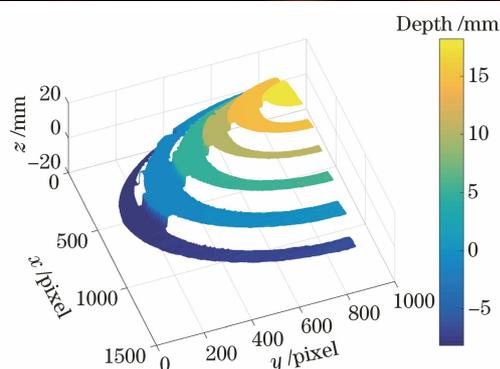


图 10 环形台阶表面形貌

Fig. 10 Surface shape of annular steps

5 结 论

在分析透射显示双屏测量系统中误差产生原因的基础上,提出了一种补偿折射效应的方法,该方法提高了镜面物体形貌测量精度。首先介绍了透射显示双屏测量系统的工作原理,详细给出了考虑透明显示屏处折射效应的参数标定补偿方法。研制了透射双屏系统,并对所提折射误差补偿方法进行了验证。水平移动台定位验证结果和两个非连续镜面台阶的测量结果表明所提出的折射效应补偿方法可使测量精度提高 30%,这验证了所提方法的可行性及有效性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Xiao Y L, Xue J P, Su X Y. Robust self-calibration three-dimensional shape measurement in fringe-projection photogrammetry [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 694-696.
- [3] Feng W, Tang S J, Zhao X D, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0512003.
冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40 (5): 0512003.
- [4] Mansour G. A developed algorithm for simulation of blades to reduce the measurement points and time on coordinate measuring machine (CMM) [J]. *Measurement*, 2014, 54: 51-57.
- [5] 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.
- [6] Huang L, Idir M, Zuo C, et al. Review of phase measuring deflectometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 247-257.
- [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] An H H, Cao Y P, Li H M, et al. A composite grating phase-measuring profilometry based on mixed filtering window [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0604007.
安海华, 曹益平, 李红梅, 等. 一种基于混合滤波窗口的复合光栅相位测量轮廓术 [J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0604007.
- [9] 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.
- [10] Huang S J, Liu Y, Gao N, et al. Distance calibration between reference plane and screen in direct phase measuring deflectometry [J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 144.
- [11] Deng X T, Gao N, Zhang Z H. Calibration of system parameters based on direct phase measuring deflectometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061204.
邓小婷, 高楠, 张宗华. 基于直接相位测量术的系统参数标定方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55 (6): 061204.
- [12] Guo Z N, Liu X H, Zhang Z H. Simulation and verification of three-dimensional shape measurement method for composite surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 191202.
郭志南, 刘小红, 张宗华. 复合表面三维形貌测量方法的仿真与验证 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 191202.
- [13] Petz M, Tutsch R. Reflection grating photogrammetry: a technique for absolute shape measurement of specular free-form surfaces [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5869: 58691D.

- [14] Fischer M, Petz M, Tutsch R. Evaluation of LCD monitors for deflectometric measurement systems [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7726: 77260V.
- [15] Huang R. High precision optical surface metrology using deflectometry[D]. Tucson: The University of Arizona, 2015.
- [16] Feng H Z, Li Q, Feng M C. A novel multi-camera calibration method using transparent glass calibration board[J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1820: 060003.
- [17] Li C, Li Y F, Xiao Y, et al. Phase measurement deflectometry with refraction model and its calibration [J]. Optics Express, 2018, 26 (26): 33510-33522.
- [18] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection [J]. Optics Express, 2006, 14(14): 6444-6455.
- [19] Hou L Z, Qiang X F, Sun X M. Analysis and comparison of errors in several phase stepping algorithm with an arbitrary step [J]. Optical Technology, 1999, 25(5): 7-10.
侯立周, 强锡富, 孙晓明. 几种任意步距步进相移算法的误差分析与对比[J]. 光学技术, 1999, 25(5): 7-10.
- [20] Sekhar R, Singh T. Determination of Johnson cook parameters in turning of micro and nano reinforced aluminum composites using trust region reflective algorithm [J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019, 8 (12): 1712-1716.