

文章编号 1004-924X(2025)09-1377-11

直接相位偏折测量系统中两显示屏 折射误差补偿

田秀秀¹, 倪育博¹, 孟召宗¹, 高楠^{1,4}, 杨泽青¹, 张国锋²,
尹伟³, 赵洪伟^{2,3}, 张宗华^{1,4*}

- (1. 河北工业大学机械工程学院, 天津 300401;
2. 西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049;
3. 中国飞机强度研究所强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065;
4. 河北工业大学创新研究院(石家庄), 河北 石家庄 050299)

摘要:在直接相位偏折系统中, 由于液晶显示屏(Liquid Crystal Display, LCD)和透明显示屏(Transparent Display, TD)的特殊结构, 光线在测量过程中会发生折射, 从而引起相位偏差。因此, 提出了一种补偿系统中LCD和TD折射误差的方法。该方法将两显示屏建模为单一的透明层结构, 利用光线追踪算法建立测量过程中的折射误差模型, 分析光线传播路径并确定求解相位偏差所需参数。之后利用多立体视觉技术结合优化后的信赖域反射算法, 标定两显示屏的折射参数, 再基于系统中的几何关系分析标定测量过程中的折射角。最后, 利用推导出的公式对系统中的深度信息进行补偿, 逐像素地修正相位偏差, 以提高测量系统的精度。实验结果表明: 利用本文所提方法对折射误差进行补偿后, 镜面环形台阶面间最大绝对误差从33 μm 降低至21 μm , 测量凹面反射镜与平面镜的组合镜面时, 面形均方根误差由38.55 μm 降低至24.92 μm , 系统的整体测量精度可提高30%~40%。该方法有效减少了两显示屏的折射误差, 提高了系统镜面三维形貌的测量精度。

关键词: 三维测量; 直接相位偏折测量术; 液晶显示屏; 透明显示屏; 折射误差

中图分类号: TH744.5; O439 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253309.1377 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253309.1377

Refraction error compensation of two displays in direct phase measuring deflectometric system

TIAN Xiuxiu¹, NI Yubo¹, MENG Zhaozong¹, GAO Nan^{1,4}, YANG Zeqing¹, ZHANG Guofeng²,
YIN Wei³, ZHAO Hongwei^{2,3}, ZHANG Zonghua^{1,4*}

- (1. College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity,
Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China;
4. Innovation and Research Institute of Hebei University of Technology in Shijiazhuang,

收稿日期: 2024-11-30; **修订日期:** 2025-01-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. U2341275, No. 52075147); 河北省教育厅科学研究项目(No. JZX2024021); 河北工业大学创新研究院(石家庄)石家庄市科技合作专项基金资助项目(No. SJZZXA24008)

Shijiazhuang 050299, China)

* Corresponding author, E-mail: zhzhzhang@hebut.edu.cn

Abstract: In direct phase measuring deflectometric systems, the unique structure of liquid crystal displays (LCDs) and transparent displays (TDs) induces light refraction during measurements, resulting in phase deviations. This study presents a method to compensate for the refractive errors of these displays. By modeling the two displays as a single transparent layered structure, a ray tracing algorithm is employed to establish refraction error models throughout the measurement process. The light propagation paths are analyzed to identify the parameters necessary for correcting phase deviations. Subsequently, multi-stereo vision technology, combined with an optimized three-domain reflection algorithm, is utilized to calibrate the refraction parameters of the displays. Based on a geometric analysis of the system, the refraction angle during measurement is calibrated. Finally, an error compensation formula is derived and applied to correct the depth values pixel by pixel, enhancing measurement accuracy. Experimental results demonstrate that the proposed compensation method reduces the maximum absolute error between the mirror ring and the stepped surface from $33\text{ }\mu\text{m}$ to $21\text{ }\mu\text{m}$, and decreases the root mean square error (RMSE) of the combined mirror assembly, comprising a concave and a plane mirror, from $38.55\text{ }\mu\text{m}$ to $24.92\text{ }\mu\text{m}$. These improvements correspond to an overall enhancement of measurement accuracy by 30% to 40%. The method effectively mitigates refraction errors in the two displays and significantly improves the three-dimensional measurement precision of the system.

Key words: three-dimensional measurement; direct phase measuring deflectometry; liquid crystal display; transparent display; refraction error

1 引言

随着科学技术的发展进步,光学三维测量技术在航空航天、机械制造、生物医疗和文物保护等领域应用广泛^[1-3]。在这些领域中,以天文望远镜为代表的大型装备,其内部由大量镜面反射类器件组成。镜面物体的表面反射特性主要采用相位偏折测量术(Phase Measuring Deflectometry, PMD)^[4-6]进行形貌测量,但传统 PMD 是对物体表面进行梯度积分获取高度信息,不适用于测量非连续镜面物体。因此,众多学者提出了直接相位偏折测量术(Direct Phase Measuring Deflectometry, DPMD)。任虹宇等^[7]将液晶显示屏(Liquid Crystal Display, LCD)前后移动,通过相位计算可直接获得非连续镜面物体表面的深度信息。随后,刘玥等^[8]提出在此系统基础上引入半透半反镜,避免了 LCD 移动过程中产生的系统误差。张宗华等^[9]又提出了基于透射显示双屏

的 DPMD,利用 LCD 和透明显示屏(Transparent Display, TD)构成双屏结构,在系统简化的同时扩大了视场。但 LCD 和 TD 内部组成结构复杂,导致在测量过程中存在折射效应,降低了系统的测量精度。

Petz 等^[10]利用相位测量偏折系统测量一球面反射镜形貌,指出显示屏透明层的折射效应是引起相位偏差的主要因素。Feng 等^[11]提出一种利用透明玻璃板代替普通标定板的多相机标定方法,并在标定过程中通过迭代法消除了透明玻璃板折射效应的影响。Li 等^[12]提出结合折射模型测量镜面物体的相位偏折法,通过引入透明屏折射参数优化了系统位姿。Chen 等^[13]提出了一种使用 LCD 作为标定板的相机校准方法。该方法考虑并修正了显示屏玻璃板引入的相位误差,提高了相机校准精度。王月霞等^[14]提出在相位偏折测量系统中建立透明显示屏的折射误差模型,有效降低了误差,但未考虑到液晶显示屏同

样存在折射效应。

综上所述,在针对镜面物体的测量系统中,显示屏是一个很重要的结构光源^[15]。而目前使用的显示屏大多采用无碱玻璃多层印刷,可视为理想平面结构,忽略表面平整度对测量系统的影响^[16]。因此,本文针对基于透射显示双屏结构的DPMD系统展开研究,提出了一种补偿系统中LCD和TD折射误差的方法。将两显示屏建模为不同厚度的单一透明层结构,通过建立相应的折射模型,分析测量过程中光线的偏折现象,并确定求解折射误差所需参数,逐像素地修正相位偏差,以提高测量系统的精度。

2 原理

2.1 基于透射显示双屏的DPMD系统

基于透射显示双屏的相位偏折测量系统原理如图1所示。该系统由LCD、TD、参考镜面和相机(Charge-Coupled Device, CCD)组成。 Δd 为LCD与TD之间的距离; d 为TD与参考镜面之间的距离; φ_{r1} 和 φ_{r2} 分别为相机采集到的TD与LCD上条纹图案经参考镜面反射后的相位值; φ_{m1} 和 φ_{m2} 分别相机采集到的TD与LCD上条纹图案经被测镜面反射后的相位值; h 为被测物体相对参考镜面的高度; l_1 为入射光线; l_2 为出射光线; α 为被测物体相对参考镜面的梯度; θ 为经参考镜面的出射光线与法向量间的夹角。当出射光线 l_2 不变时,入射光线由 l_1 变成 l_3 , l_3 相对于 l_1 发生的偏折角度为 $\theta + 2\alpha$,光线 l_3 与被测物表面相交于点 M ,点 M_1 为点 M 经参考镜面所成的

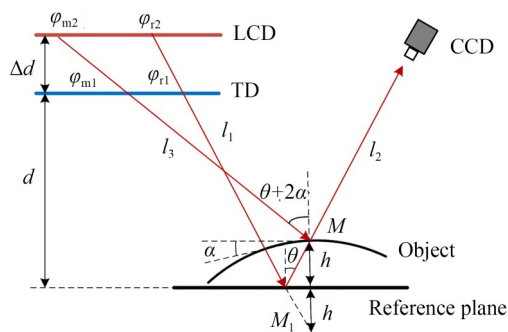


图1 相位偏折测量系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of phase measuring deflectometric system

像点。

由几何关系推导,可得出被测物体表面高度与相位之间的关系式:

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

由于TD的显示特性不同于LCD,故在实际测量的过程中,当LCD显示正弦条纹时,TD显示高亮度的纯白色背景,增加自身透光度;当TD显示正弦条纹时,LCD显示高亮度的纯白色背景作为TD的背光源,增强TD上的图像对比度。之后,由相机拍摄被测镜面与参考镜面上反射的变形条纹,通过图像处理解算相位信息。最后,根据相位与深度之间的匹配关系,重建镜面物体形貌。

2.2 考虑折射误差的DPMD

在基于透射显示的相位偏折测量系统中,LCD和TD的非理想性会影响系统的测量精度,导致在测量过程中对光线产生折射,从而引起相位偏差。在分析误差影响因素时,将两显示屏近似视为理想平面结构,忽略表面平整度对测量系统的影响,仅考虑两显示屏的折射误差,并提出补偿方法。

图2所示为考虑折射误差后的相位偏折测量系统原理。在理想情况下,参考相位为 $\varphi_{r1}, \varphi_{r2}$,测量相位为 $\varphi_{m1}, \varphi_{m2}$ 。但在考虑折射误差的情况下,实际测得的参考相位为 $\varphi_{r1}', \varphi_{r2}'$,测量相位为 $\varphi_{m1}', \varphi_{m2}'$,具体关系如下:

$$\Delta\varphi_{r1} = \varphi_{r1} - \varphi_{r1}', \quad (2)$$

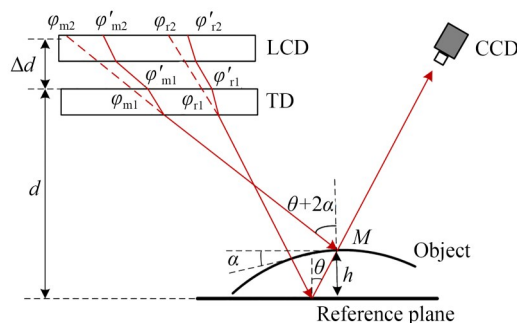


图2 考虑折射误差的相位偏折测量系统

Fig. 2 Phase measuring deflectometric system considering refractive error

$$\Delta\varphi_{r2} = \varphi_{r2} - \varphi'_{r2}, \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_{m1} = \varphi_{m1} - \varphi'_{m1}, \quad (4)$$

$$\Delta\varphi_{m2} = \varphi_{m2} - \varphi'_{m2}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\varphi_{r1}, \Delta\varphi_{r2}, \Delta\varphi_{m1}, \Delta\varphi_{m2}$ 分别为 TD 和 LCD

上条纹参考相位和测量相位的理想相位与实际相位的偏差值。

由式(1)~式(5)推导得出,理想深度值 h' 为:

$$h' = \frac{\Delta d \cdot [(\varphi_{m1}' - \varphi_{r1}') + (\Delta\varphi_{m1} - \Delta\varphi_{r1})]}{(\varphi_{m1}' - \varphi_{m2}') + (\varphi_{r1}' - \varphi_{r2}') + (\Delta\varphi_{m1} - \Delta\varphi_{m2}) + (\Delta\varphi_{r1} - \Delta\varphi_{r2})} - \frac{d \cdot [(\varphi_{r1}' - \varphi_{r2}') - (\varphi_{m1}' - \varphi_{m2}') + (\Delta\varphi_{r1} - \Delta\varphi_{r2}) - (\Delta\varphi_{m1} - \Delta\varphi_{m2})]}{(\varphi_{m1}' - \varphi_{m2}') + (\varphi_{r1}' - \varphi_{r2}') + (\Delta\varphi_{m1} - \Delta\varphi_{m2}) + (\Delta\varphi_{r1} - \Delta\varphi_{r2})}. \quad (6)$$

3 折射模型及参数标定

3.1 折射模型分析

利用光线追踪算法,建立测量过程中的折射效应误差补偿模型。TD 在显示条纹图案时,折射现象主要源自其自身特性。具体而言,TD 在后表面所呈现的条纹图案,实际上是光线经过其前表面时发生折射的结果。另一方面,当 LCD 显示条纹图案时,除了 LCD 自身会产生折射外,光线在穿过 TD 前后表面时也会再次发生折射。为了简化分析,这里不考虑 TD 的内部结构,而是将它视作一个平行平板模型。本文以求解测量相位偏差为例,具体分析测量过程中的两种不同折射误差模型,以及相应公式推导过程。

3.1.1 TD 显示条纹图案

图 3 所示为透明屏显示条纹时的折射模型,该模型仅截取测量系统中两显示屏的部分。由图可以看出,光线经过 TD 前表面时发生折射。

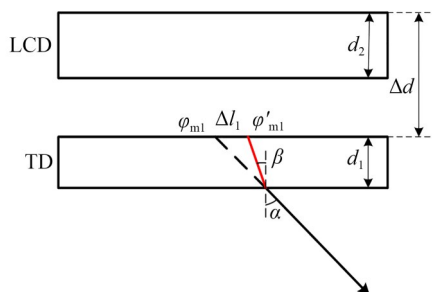


图 3 TD 显示条纹时的折射模型

Fig. 3 Refraction model of fringe pattern displayed on TD

具体的误差公式如下:

$$\Delta l_1 = d_1 (\tan \alpha - \tan \beta), \quad (7)$$

$$\Delta\varphi_{m1} = d_1 \left\{ \tan \alpha - \tan \left[\arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n_1} \right) \right] \right\} \cdot 2\pi / p_1 n_{p1}, \quad (8)$$

式中: d_1, n_1 分别为 TD 的厚度与折射率, Δl_1 为折射引起的像素偏移量, p_1 为 TD 单像素的物理尺寸, n_{p1} 为每个条纹周期所占 TD 的像素数, α 为折射角, β 为入射角。

3.1.2 LCD 显示条纹图案

图 4 所示为 LCD 显示条纹图时的折射模型。由图中可以看出,这个过程中一共发生了 3 次折射,分别是在 LCD 内部发生的一次折射和光线经 TD 前后表面发生的两次折射。

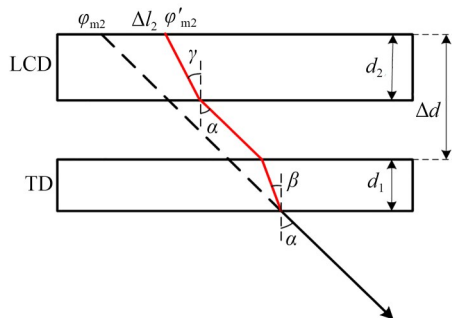


图 4 LCD 显示条纹图时的折射模型

Fig. 4 Refraction model of fringe pattern displayed on LCD

具体的误差公式如下:

$$\Delta l_2 = (d_1 + \Delta d + d_2) \tan \alpha - d_1 \tan \beta - \Delta d \tan \alpha - d_2 \tan \gamma, \quad (9)$$

$$\Delta\varphi_{m2} = \{ (d_1 + d_2) \tan \alpha - d_1 \tan \left[\arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n_1} \right) \right] - \right.$$

$$\left. d_2 \tan \left[\arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n_2} \right) \right] \right\} \cdot 2\pi / p_2 \cdot n_{p2}, \quad (10)$$

式中: d_2, n_2 分别为 LCD 的厚度与折射率, Δl_2 为

折射引起的像素偏移量, Δd 为 LCD 与 TD 之间的距离, p_2 为 LCD 单像素的物理尺寸, n_{p2} 为每个条纹周期所占 LCD 的像素数, γ 为入射角。

综上所述,在直接相位偏折测量系统中,由于两显示屏折射效应引入的相位偏差,不仅与显示屏厚度、折射率有关,还与光线在 TD 处的折射角有关。

3.2 显示屏厚度及折射率的标定

为方便分析折射光路的传播路径,将折射模型简化为图 5。光学中心位于 O_c 的摄像机观察显示屏。将构成屏幕的不同层建模为厚度为 d 、折射率为 n 的单层结构。虽然显示屏前表面不完全平整,但考虑到其变形的低空间频率,可认为局部平整。为清晰起见,放大了折射层的厚度。

显示屏后表面 S_2 上的像素点 M 发出的光线沿 t 方向在折射层中传播,与前表面 S_1 相交于点 P ,经 P 点折射后沿 i 方向在空气中传播,最终在相机靶面点 m 处成像。若无折射效应,则由像素点 M_c 发出的光线沿 i 方向传播,于相机靶面上同一点处成像。将世界坐标系建立在显示屏前表面 S_1 上,假定 S_1 和 S_2 为纯平面, v 为点 P 处的法向量。

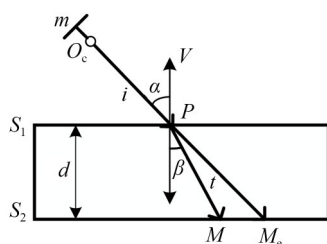


图5 显示屏折射光路

Fig. 5 Refracted optical path of display

光线在空气中的传播过程可以表示为:

$$P = O_c + |PO_c| i, \quad (11)$$

式中: P 为点 P 的世界坐标, O_c 为相机光心 O_c 的世界坐标, i 为单位向量。其表达式为:

$$i = R^{-1} A^{-1} m, \quad (12)$$

式中: R 为显示屏相对于相机的旋转矩阵, A 为相机内参矩阵, m 为点 M 在像素坐标系中的齐次坐标。

光线在折射层中的传播过程可以表示为:

$$M = P + |MP| \cdot t, \quad (13)$$

式中: M 为光源点 M 的世界坐标, t 为单位向量, 表达式为:

$$t = ni + \lambda v, \quad (14)$$

$$\lambda = n \cos \alpha - \sqrt{1 + n^2 [(\cos \alpha)^2 - 1]}. \quad (15)$$

综上可得,显示屏后表面 S_2 上任一光源点 M 的世界坐标与显示屏厚度 d 、折射率 n 、相机内参矩阵 A 、显示屏相对于相机的旋转矩阵 R 有关。

在相位偏折测量系统搭建前,分别求解两显示屏的折射参数。采用多立体视觉技术标定前显示屏的折射参数,并利用平面镜作为辅助设备。将平面镜固定在角位移台上,旋转不同角度,在旋转过程中,需要保证相机能通过平面镜反射观察到显示屏的共同区域。

利用 Matlab 工具箱提取图案中相同位置处的棋盘格角点,坐标记为 m_{kj} ,下标 kj 表示第 j 幅图像的第 k 个角点,同时计算不同相机视角下显示屏的旋转矩阵 R_j 。结合式(11)~式(15)的推导可以得出,光源点 M 在世界坐标系下的坐标 M_{kj} 仅取决于两显示屏各自的折射率与厚度。

但在实际测量过程中,由于系统标定不准确或者显示屏表面每一点处的折射率以及厚度存在差异,相机从不同角度观测同一点时,其位姿可能会有所不同。因此,利用信赖域反射算法最小化每个特征点观测值的平均误差,同时为避免相机畸变导致提取角点有误,将每幅棋盘格图像赋予不同权重,建立关于 n 和 d 的损失函数,如下:

$$[n \ d] = \min \sum_{k=1}^{N_p} \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j \cdot |\overline{M}_k - M_{kj}| \right)^2, \quad (16)$$

$$\overline{M}_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N M_{kj}, \quad (17)$$

式中: N_p 为每幅图像所提取的角点数, N 为所拍图像数, M_{kj} 为第 j 幅图像中的第 k 个角点, $\overline{M}_k$ 为第 k 个角点的算数平均值, P_j 为第 j 幅图像的权重。

3.3 折射角的标定

求得 LCD 与 TD 相对应的折射率与厚度外,还需求解系统测量过程中入射光线与 TD 前表面的夹角,即折射角,才能得出两显示屏的参考相位偏差和测量相位偏差。

如图 6 所示,虚线部分为理想情况下测量光线的传播路径,实线部分为考虑折射误差情况下

的测量光线传播路径。相机采集到的测量相位实际为光源点 A 处相位 φ_{m1}' 与光源点 B 处相位 φ_{m2}' 。根据图中几何关系,线段 AC 与线段 BD 的长度可以表示为:

$$AC = \frac{\varphi_{m1}' - \varphi_c}{d_1} \cdot \frac{p_1 \cdot n_{p1}}{2\pi} = (\Delta d - d_2) \cdot \tan \alpha_m. \quad (18)$$

$$BD = \frac{\varphi_d - \varphi_{m2}'}{d_1} \cdot \frac{p_2 \cdot n_{p2}}{2\pi} = d_2 \cdot \tan \gamma_m, \quad (19)$$

式中 φ_c 和 φ_d 分别为点 C 与点 D 处的相位值。

联合上述公式,可得测量光线折射角的关系式为:

$$\tan \alpha_m = \frac{\varphi_{m1}' - \varphi_{m2}'}{\Delta d - d_2} \cdot \frac{p_1 \cdot n_{p1}}{2\pi} - \frac{d_2}{\Delta d - d_2} \tan \left[\arcsin \left(\sin \frac{\alpha_m}{n_2} \right) \right] \cdot \frac{2\pi}{p_2 \cdot n_{p2}}. \quad (20)$$

由于 $\Delta d \ll d_2$, 式(20)可化简为:

$$\tan \alpha_m = \frac{\varphi_{m1}' - \varphi_{m2}'}{\Delta d - d_2} \cdot \frac{p_1 \cdot n_{p1}}{2\pi}. \quad (21)$$

同理,求解参考相位时折射角 α_r 的关系式为:

$$\tan \alpha_r = \frac{\varphi_{r1}' - \varphi_{r2}'}{\Delta d - d_2} \cdot \frac{p_1 \cdot n_{p1}}{2\pi}. \quad (22)$$

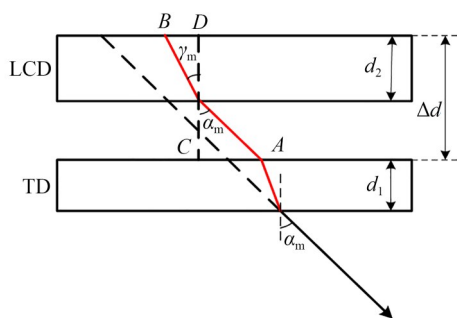


图6 测量光线折射角几何光路

Fig. 6 Geometric optical path of refractive angle of measured rays

4 测量实验与结果

基于透射显示双屏结构的 DPMD 系统如图 7 所示,该系统主要由 LCD、TD、参考镜面和 CCD 相机构成。CCD 相机为 SVS 公司生产的 SVCam-ECO445,分辨率为 $964 \text{ pixel} \times 1\,296 \text{ pixel}$ 。TD 为诺锐维赫公司生产的

NVS133,物理尺寸为 13.3 inch (33.78 cm),分辨率为 $1\,366 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。LCD 为维辰思公司生产,物理尺寸为 13.3 inch ,分辨率为 $1\,920 \text{ pixel} \times 1\,080 \text{ pixel}$ 。

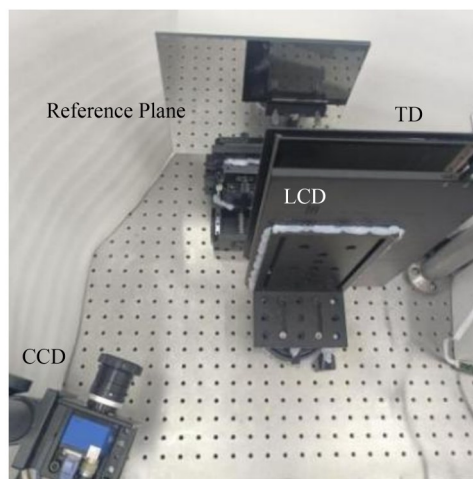


图7 DPMD实验系统实物

Fig. 7 Physical diagram of DPMD experimental system

为验证系统的标定精度,将镜面标定板置于水平移动台(精度为 $1 \mu\text{m}$)上,沿深度方向移动 3 mm 作为真实值。经多次测量取平均后,测得移动距离为 2.972 mm ,绝对误差为 0.028 mm 。

4.1 参数标定

利用第3节所提方法进行折射参数标定,将平面镜固定在角位移台上,分别旋转 $0^\circ, \pm 1^\circ, \pm 2^\circ, \pm 3^\circ$,共采集7幅图像,每幅图像采集30个角点。提取每个角点的像素坐标,利用3.2中所述公式计算相机参数、显示屏与相机之间的位姿关系,以及每个角点在世界坐标系下实际光源点 M 的坐标。再根据式(16)进行迭代运算,当损失函数达到最小值时,相对应的 n 和 d 即为显示屏的折射参数。最终,LCD 的折射率和厚度分别为 1.0721 和 1.3820 mm ,TD 的折射率和厚度分别为 1.1771 和 2.4344 mm 。

实物测量过程中,对折射角进行了标定。首先,TD 显示条纹数为 $[49, 48, 42]$ 的竖直正弦条纹图,LCD 显示高亮白色背景,采用八步相移法以及最佳三条纹选择法,计算被测镜面以及参考镜面上反射条纹图案的绝对相位值 $\varphi_{m1}', \varphi_{r1}'$;同理,LCD 显示条纹图,TD 显示高亮白色背景,经图像处理得到 $\varphi_{m2}', \varphi_{r2}'$ 。之后,利用文献[9]中所

提方法求得两显示屏间的距离 $\Delta d = 35.5559 \text{ mm}$ 。TD的单像素物理尺寸 $p_1 = 0.216 \text{ mm}$ 。基于以上参数可以求得折射角 α_m, α_r 。

4.2 仿真实验

为避免实际测量中系统标定及环境光噪声等影响,构建考虑折射误差的仿真系统。主要参数设定:相机分辨率为 $964 \text{ pixel} \times 1296 \text{ pixel}$,像素间距为 $3.45 \text{ }\mu\text{m}$;LCD分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,像素间距为 $153 \text{ }\mu\text{m}$;TD分辨率为 $1366 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,像素间距为 $216 \text{ }\mu\text{m}$ 。显

示屏以平行光出射,由于不平行度引入了入射角导致出现相位偏差。两显示屏的折射率与厚度设定为4.1节中求得的数值,系统折射角标定根据式(21)和式(22)在相位计算过程中获得。被测物为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的球冠曲面,测量结果如图8所示。误差补偿前均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为 $23.06 \text{ }\mu\text{m}$,表明两显示屏产生的折射效应确实会影响测量系统精度。本文所提方法可使RMSE降低至 $0.93 \text{ }\mu\text{m}$,验证了本文所构建折射模型的准确性以及算法的有效性。

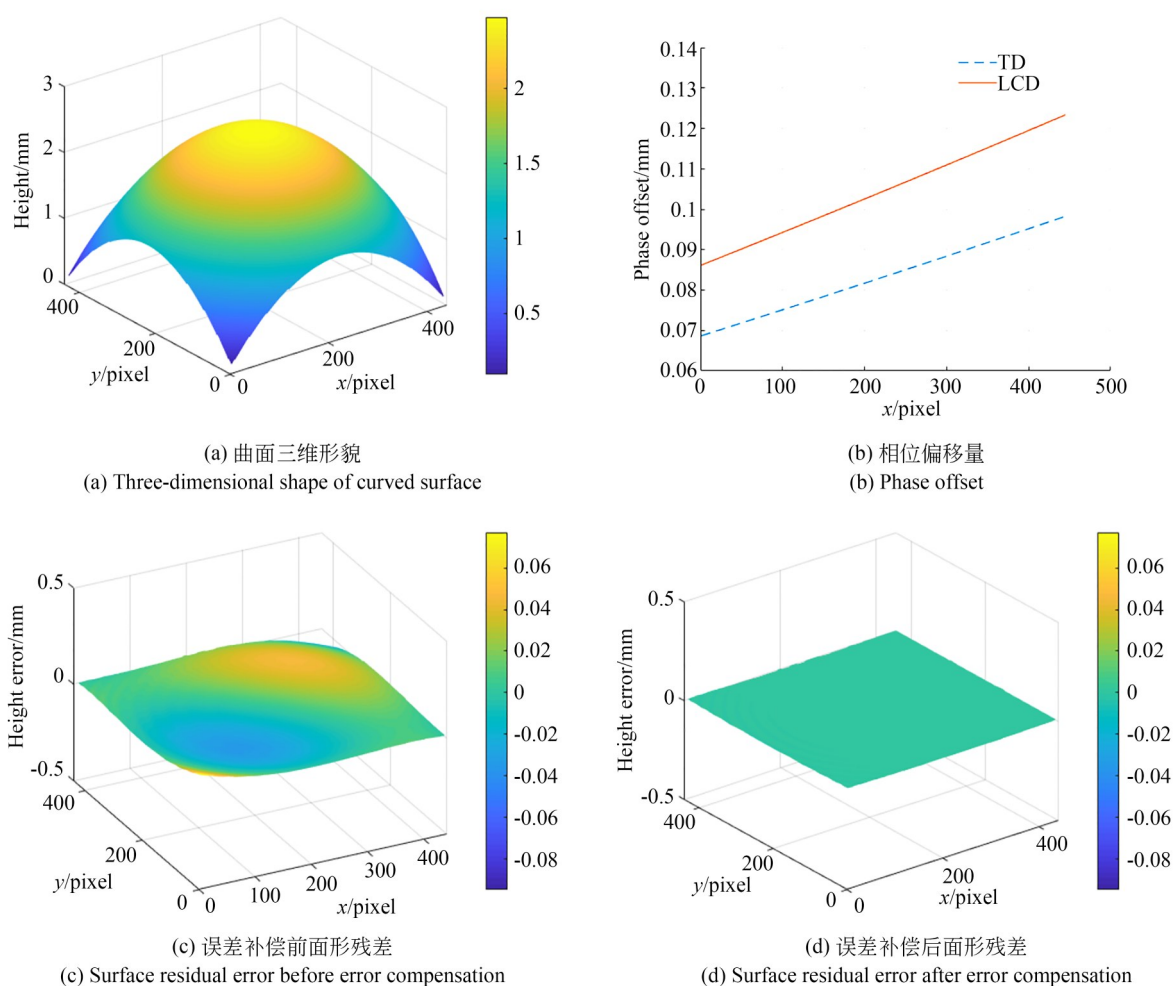


图8 仿真实验的测量结果

Fig. 8 Measurement results from simulation experiment

4.3 实物测量实验

为进一步验证补偿算法在实际测量中的有效性,对一镜面环形台阶进行三维形貌恢复。考虑到环境光的影响以及透明屏的特性,实验设置

两显示屏分时显示条纹数为 $[49, 48, 42]$ 的绿色正弦条纹与高亮白色背景。采用八步相移法计算由参考镜面与被测镜面反射的变形条纹,获得折叠相位,再采用最佳三条纹选择法获得连续相

位信息,最后通过相位与深度的匹配关系,重建镜面物体形貌。镜面环形台阶的测量结果如图 9 所示。表 1 为 LCD 与 TD 折射误差补偿前后的系统测量结果。

利用 Zeiss Calypso 三坐标测量机(重复定位误差为 0.5 μm)分别测量各台阶面间的距离,并以

此作为真值。利用本系统测得的环形台阶三维深度信息,选取同一台阶面的数据进行平面拟合,将拟合平面作为基准面,计算相邻台阶面上各点到该基准面的距离,并取距离的平均值作为系统的测量值。由表 1 可知,经折射误差补偿后最大绝对误差从 33 μm 降低到 21 μm ,精度提升了 36.4%。

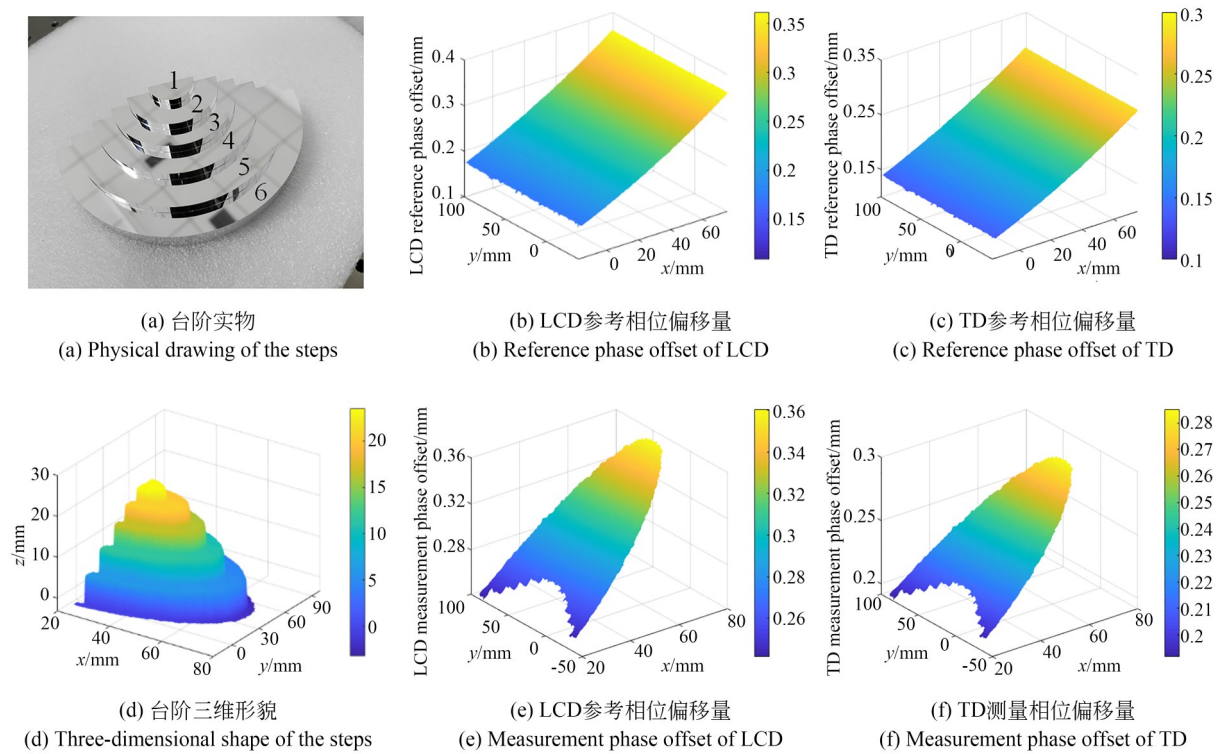


图 9 环形台阶的实验结果

Fig. 9 Experimental results of ring steps

表 1 误差补偿前后环形台阶的测量结果

Tab. 1 Measurement results of ring steps before and after error compensation (mm)

台阶面	三坐标测量机测得真值	测量结果		绝对误差	
		补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
1—2	3.000	3.023	3.014	0.023	0.014
2—3	3.998	3.966	3.979	0.032	0.019
3—4	5.001	4.968	4.980	0.033	0.021
4—5	5.504	5.528	5.519	0.024	0.015
5—6	6.499	6.480	6.487	0.019	0.012

采用同一方法对一标准 K9 平凹球面反射镜与一平面镜组成的非连续镜面物体进行三维形

貌测量,其中凹面反射镜的曲率半径为 400 mm。利用相位计算得到的深度信息,求解凹面反射镜

每一点到拟合球心的距离与真实曲率半径之差,以及平面镜每一点与拟合平面间的距离误差,比较折射误差补偿前后组合镜面的RMSE。同时将王月霞等^[14]所提方法与本文所提方法进行比较,实验结果如图10所示。

从图10可以看出,利用本文所提方法对系统中两显示屏折射效应的补偿效果更为明显。从

定量角度分析,折射误差补偿前RMSE为 $38.55\text{ }\mu\text{m}$,前人所提方法可使RMSE降低至 $30.64\text{ }\mu\text{m}$,而利用本文所提方法使得RMSE降低至 $24.92\text{ }\mu\text{m}$,精度提高了35.4%。上述实验证明,本文所提方法可有效减少由于LCD和TD折射效应引起的相位偏差,从而提高系统镜面形貌的三维测量精度。

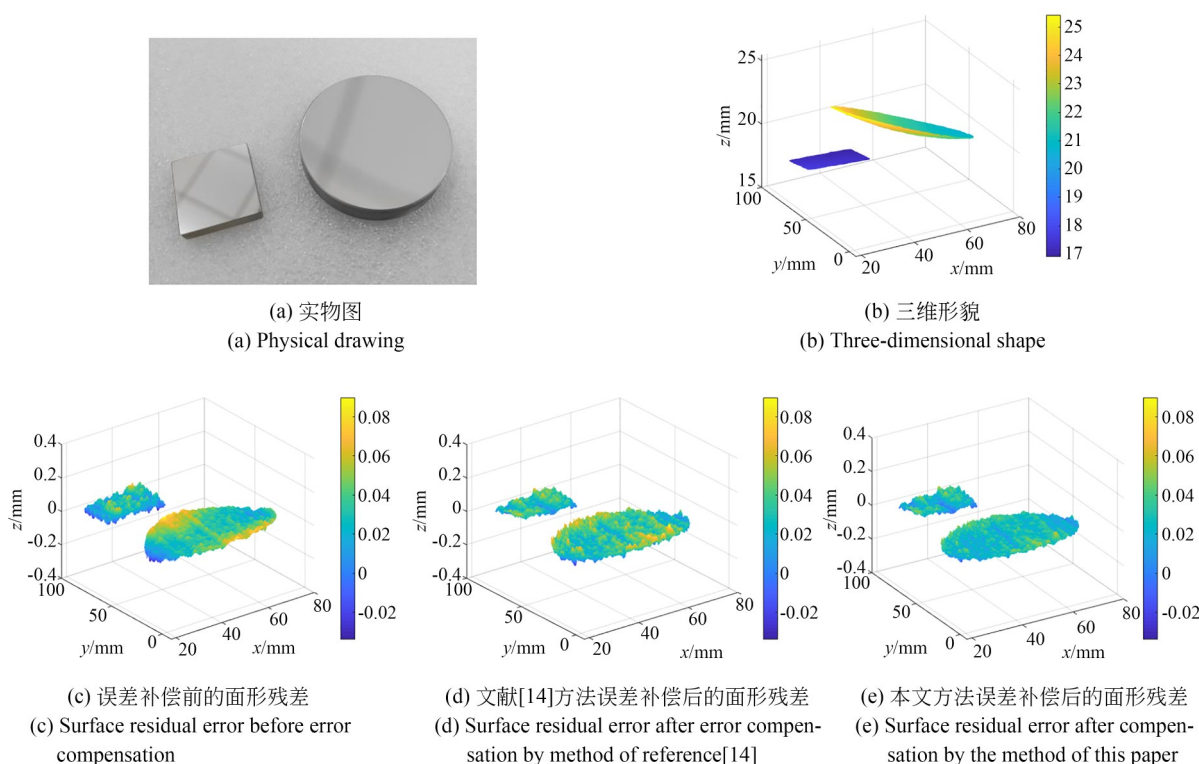


图10 组合镜面物体的实验结果

Fig. 10 Experimental results of combined mirror object

5 结 论

本文针对基于透射显示双屏结构的DPMD系统展开研究,提出了一种补偿系统中LCD和TD折射误差的方法。首先构建了测量过程中的折射模型,分析光线传播路径,之后利用本文所提方法标定LCD与TD的折射率、厚度以及测量过程中的折射角,根据推导公式对测量系统逐像素地修正深度信息。最终,搭建实验系统对环形台阶和非连续组合镜面进行三维形貌测量。实验结果表明:利用本文所提方法对折射误差进行补偿

后,环形台阶面间最大绝对误差从 $33\text{ }\mu\text{m}$ 降到 $21\text{ }\mu\text{m}$;测量凹面反射镜与平面镜的组合镜面时,面形RMSE由 $38.55\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $24.92\text{ }\mu\text{m}$,系统的整体测量精度可提高30%~40%。因此,该方法可以减少由于LCD和TD折射效应造成的相位偏差,有效提高了系统镜面形貌的三维测量精度。

作者贡献声明:

田秀秀:论文构思,实验的设计与实施,以及论文撰写;

倪育博、高楠、孟召宗:研究指导,论文审核

修订;

杨泽青、尹伟、赵洪伟、张国锋:实验验证;

张宗华:项目协调与管理,研究设计,论文修订与润色。

参考文献:

- [1] 杨小娜,倪育博,孟召宗,等. 基于镜面和漫反射面标定板的系统参数标定[J]. 光学精密工程, 2024, 32(9): 1338-1346.
YANG X N, NI Y B, MENG ZH Z, *et al.* System parameter calibration based on a specular and diffuse calibration plate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(9): 1338-1346. (in Chinese)
- [2] 骆志明,周易非,李睿,等. 数字图像相关法辅助的条纹投影轮廓术相位展开方法[J]. 光学学报, 2024, 44(14): 134-142.
LUO Z M, ZHOU Y F, LI R, *et al.* Digital image correlation-assisted phase unwrapping for temporal phase shifting fringe projection profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(14): 134-142. (in Chinese)
- [3] 张昂,孙亚琴,高楠,等. 三灰度编码相位展开方法条纹投影轮廓术[J]. 光学精密工程, 2022, 30(5): 518.
ZHANG A, SUN Y Q, GAO N, *et al.* Fringe projection profilometry by ternary-gray encoded phase unwrapping method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(5): 518. (in Chinese)
- [4] CHENG X M, WANG T T, ZHU W B, *et al.* Phase deflectometry for defect detection of high reflection objects[J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1607.
- [5] NI Y B, FU S, SU C Y, *et al.* Computational grayscale dithering phase measuring deflectometry for accurate specular surface inspection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 174: 107928.
- [6] 熊玉朋,陈适宇,黄钺,等. 基于自由曲面光学元件的大视场光学成像系统[J]. 光学精密工程, 2024, 32(9): 1261-1272.
XIONG Y P, CHEN S Y, HUANG C, *et al.* Large field optical imaging system based on freeform surface optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(9): 1261-1272. (in Chinese)
- [7] REN H Y, JIANG X, GAO F, *et al.* Absolute height measurement of specular surfaces with modified active fringe reflection photogrammetry [J]. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2014, 9204: 37-44.
- [8] 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.
- [9] 张宗华,李月,高楠,等. 基于双屏透射显示的镜面物体三维形貌测量方法及装置: CN111765851B [P]. 2021-09-28.
ZHANG Z H, LI Y, GAO N, *et al.* Research on deflectometry based on double-screen of transmission and display: CN111765851B[P]. 2021-09-28. (in Chinese).
- [10] PETZ M, TUTSCH R. Reflection grating photogrammetry: a technique for absolute shape measurement of specular free-form surfaces[C]. *Optical Manufacturing and Testing VI. San Diego, California, USA*. SPIE, 2005: 58691D.
- [11] FENG H Z, LI Q, FENG M C. A novel multi-camera calibration method using transparent glass calibration board [C]. *11TH Asian Conference on Chemical Sensors: (ACCS2015), Penang, Malaysia. Author(s)*, 2017: 060003.
- [12] 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.
- [13] CHEN C, YU J, GAO N, *et al.* High accuracy 3D calibration method of phase calculation-based fringe projection system by using LCD screen considering refraction error[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105870.
- [14] 王月霞,张宗华,高楠,等. 透射显示双屏偏折系统中透明屏折射误差补偿方法[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0512003.
WANG Y X, ZHANG Z H, GAO N, *et al.* Compensation method of refraction error caused by transparent display screen in transmissive display dual-screen deflectometric system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(5): 0512003. (in Chinese)
- [15] Wang J, Liu W, Guo J, *et al.* Ultra high-speed 3D shape measurement technology for specular sur-

faces based on μ PMD[J]. *Optics Express*, 2024, 32(20): 34366-34380.

- [16] 李林峰, 黄启泰, 任建锋, 等. 单屏相位测量偏折术中的透明层折射误差补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0912002.

LI L F, HUANG Q T, REN J F, *et al.* Refraction error compensation of transparent layer in single-screen phase measuring deflection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0912002. (in Chinese)

作者简介:



田秀秀(2000—),女,河北沧州人,硕士研究生,2022年于河北工业大学获得学士学位,主要研究方向为多维光视精密测量原理、方法及系统。E-mail: xxtian1105@163.com

通讯作者:



张宗华(1974—),男,江苏徐州人,博士,教授,1996年、1998年、2001年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析方面的研究。E-mail: zhzhang@hebut.edu.cn