

直接相位测量偏折术中显示屏折射效应补偿方法

张泽雨, 刘小红, 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 直接相位测量偏折术 (Direct Phase Measuring Deflectometry, DPMD) 解决了非连续镜面物体的测量问题, 其通过数学模型直接建立了相位与深度之间的关系。在 DPMD 系统中, 采用液晶显示屏 (Liquid Crystal Display, LCD) 显示具有高对比度的条纹图案, 通过相机采集经被测镜面反射的变形条纹图像, 但是 LCD 透明层的折射效应导致 DPMD 测量结果出现误差。因此, 提出了一种补偿 DPMD 系统中显示屏折射效应的方法。先建立单层折射模型, 并利用光线方程标定透明层厚度及折射率。然后利用系统几何关系标定折射角角度。最后基于标定好的参数计算偏移量, 对系统的深度数据进行补偿。对一个镜面台阶和一个凹面镜进行了测量, 结果表明, 测试精度提高了 30%。因此, 该方法有效提高了偏折术的测量精度。

关键词 测量; 直接相位测量偏折术; 液晶显示屏; 折射效应; 误差补偿

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.191205

Method for Refraction Effect Compensation of Liquid Crystal Display in Direct Phase Measuring Deflectometry

Zhang Zeyu, Liu Xiaohong, Zhang Zonghua*, Gao Nan, Meng Zhaozong

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

Abstract Direct phase measuring deflectometry (DPMD) solves the measurement problem of discontinuous mirror objects. It uses a new mathematical model to directly establish the relationship between phase and depth. In the DPMD system, a liquid crystal display (LCD) is used to display a high-contrast fringe pattern, and a camera captures the deformed fringe image reflected by the mirror surface to be tested. However, the refractive effect of the LCD transparent layer causes errors in the DPMD measurement results. Therefore, we propose a method for compensating the refraction effect of the display in the DPMD system. By establishing a single layer refraction model, the thickness and refractive index of the transparent layer are first calibrated using the light equations, and then the refraction angle is calibrated using the system's geometric relationship. Finally, the offset is calculated based on the calibrated parameters to compensate the system's depth data. The measurement results of a specular step and a concave mirror show that the measurement accuracy is enhanced by 30%. Therefore, this method effectively increases the measurement accuracy of the DPMD.

Key words measurement; direct phase measuring deflectometry; liquid crystal display; refraction effect; error compensation

OCIS codes 120.5050; 120.2040; 120.5710

1 引言

光学三维形貌测量由于其高速、非接触、无损检测等优点, 目前已经成为工业质量控制、逆向工程、精密制造和艺术品数字化等领域的关键技术^[1-3]。

在工业生产和日常生活中存在着大量具有镜面反射效应的物体^[4-6], 由于镜面的特殊光学性质, 针对漫反射表面物体的光学测量方法^[7]不再适用于镜面物体的测量。而相位测量偏折术 (PMD, Phase Measuring Deflectometry) 能很好解决这一问题, 并

收稿日期: 2020-02-15; 修回日期: 2020-02-18; 录用日期: 2020-02-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFF0106404)、国家自然科学基金 (51675160)

* E-mail: zh Zhang@hebut.edu.cn

被广泛应用于各个行业^[8-10]。该技术通过显示屏显示正弦直条纹,利用相机从另外一个方向采集经被测镜面反射的变形条纹,从而基于相位信息获得镜面的三维形貌。已有的PMD技术通过对斜率进行积分的方法获得镜面的三维形貌数据,因此无法测量非连续的镜面,同时积分过程造成误差的积累。Zhao等^[11-12]提出了直接相位测量偏折术(DPMD),实现了对非连续镜面物体的测量。液晶显示屏(LCD, Liquid Crystal Display)能通过软件编程显示各种条纹图案,具有高的亮度和对比度等优点,而被广泛应用于PMD和DPMD系统。在多数情况下,LCD被认为是一种理想的条纹结构光显示设备。然而,其复杂的内部结构以及机械应力带来的表面形貌的改变等导致非理想的LCD性质。如果不充分考虑显示屏的真实显示效果,后续测量会出现误差,从而对被测物体的形貌测量产生影响。

詹总谦^[13]利用LCD进行相机标定时,模拟标定精度与实际标定精度相差较大;通过对控制点的残差进行逐步回归分析发现,造成实际标定精度偏低的原因是由LCD的不平性引起的系统误差;通过数据分析得到的回归分析函数对LCD的不平性进行了修正,即修正了LCD控制点的Z坐标,重新标定后系统精度得到显著提高。Petz等^[14]通过测量球面反射镜,对相位偏折术测量系统进行了不确定度分析,总共考虑了31个系统参数,最终得出结论,即LCD中透明层的折射效应是造成测量误差的主要因素。LCD在背光层的上方有若干透明层,包括液晶层、玻璃基板、偏光片、彩色滤光片等。由于光在不同材料之间的边界处发生折射,因此这些透明层导致实际观察到的图案与显示的图案之间产生偏移。因为大部分折射发生在玻璃基板上(其他层的厚度可以忽略不计),所以LCD的层结构可以简化建模为单个透明层。Bartsch等^[15]通过程序仿真的方法评估了LCD在角度相关的发射特性、透明层的折射、分辨率、表面形状平整度等方面的特性,发现显示屏平整度及折射效应为显示屏中最重要的误差源。Huang^[16]利用光学测试系统对镜面物体进行高精度测量,从透明层的折射效应、显示屏的强度非线性以及表面平整度三个方面进行了分析,并对系统的光学模型进行了补偿。

本文针对DPMD系统中的LCD,提出了一种补偿透明层折射效应的新方法。将LCD玻璃基板及其之间的多个透明层建模为单层透明层折射模型,利用光线方程结合信赖域折射的方法对透明层厚度及折射率进行最优求解,通过系统几何关系对折射角度进行标定。然后利用标定好的参数求出每个像素点的偏移量,对系统的深度计算数据进行补偿以提高系统的测量精度。

2 基本原理

2.1 DPMD

DPMD需要两个平行正对放置的显示屏,通过图1所示的半透半反平面镜实现了它们的等效平行正对,其中BS为分光镜。待测镜面反射在两个显示屏上的变形条纹被另一侧的彩色CCD相机同步采集。

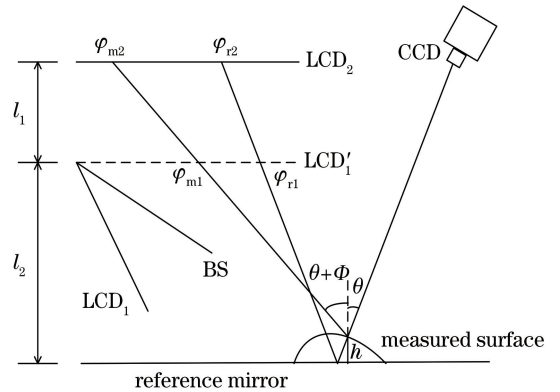


图1 DPMD原理图

Fig. 1 Schematic of DPMD

LCD₁与LCD₂显示正弦条纹图。LCD'₁为LCD₁正弦条纹图通过半透半反镜所成的虚像。LCD₂、LCD'₁、参考镜面三者互相平行。CCD相机在另一侧进行条纹图的采集。 h 为被测量面上任意一点的深度, l_1 为LCD'₁与LCD₂间的距离, l_2 为LCD'₁与参考面间的距离, θ 为被测点对应的反射光线与参考面法向量间的夹角。 Φ 为被测点处的二倍梯度角。 φ_{r1} 和 φ_{r2} 分别是LCD₁与LCD₂显示的条纹图经过参考面反射的绝对相位, φ_{m1} 和 φ_{m2} 分别是LCD₁与LCD₂显示的条纹图经过被测面反射的绝对相位。由图1中的几何关系,可以得到理论深度值为

$$h = \frac{l_1(\varphi_{m1} - \varphi_{r1}) - l_2[(\varphi_{r1} - \varphi_{r2}) - (\varphi_{m1} - \varphi_{m2})]}{(\varphi_{r1} - \varphi_{r2}) + (\varphi_{m1} - \varphi_{m2})} \quad (1)$$

由(1)式可知,通过标定系统参数 l_1 和 l_2 ,再利用解相位技术获取 φ_{r1} 、 φ_{r2} 、 φ_{m1} 和 φ_{m2} 四个绝对相位值,即可计算得到对应点的深度信息。(1)式适用于相机靶面上的每个像素点,逐点计算后即可恢复物体的整体三维形貌。

2.2 考虑折射效应的 DPMD

发生在显示屏透明层的折射是限制 LCD 测量精度的一个重要因素。由于显示屏透明层的厚度为

1.0~1.5 mm,因此显示图案与观测图案会发生与观测角度相关的偏移。通过引入折射模型可提高系统测量精度。

图 2 所示为考虑折射的 DPMD 原理图。对于 CCD 相机靶面同一像素点,其获取的四个相位值不再是 φ_{r1} 、 φ_{r2} 、 φ_{m1} 和 φ_{m2} ,而是 φ_{r1d} 、 φ_{m1d} 、 φ_{r2d} 和 φ_{m2d} 。结合系统参数得到的计算深度值为

$$h' = \frac{l_1(\varphi_{m1d} - \varphi_{r1d}) - l_2[(\varphi_{r1d} - \varphi_{r2d}) - (\varphi_{m1d} - \varphi_{m2d})]}{(\varphi_{r1d} - \varphi_{r2d}) + (\varphi_{m1d} - \varphi_{m2d})}, \quad (2)$$

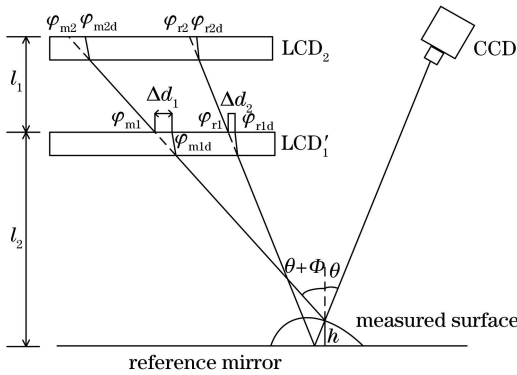


图 2 考虑折射的 DPMD 原理图

显示的条纹图经参考面和被测面反射以及 LCD₂ 显示的条纹图经参考面和被测面反射的实际发光点所携带的绝对相位值信息。

比较(1)式和(2)式可以看出,计算深度值 h' 与理论深度值 h 之间存在误差。根据图 2 中的几何关系得出

$$\varphi_{m1} - \varphi_{m2} = \varphi_{m1d} - \varphi_{m2d}, \quad (3)$$

$$\varphi_{r1} - \varphi_{r2} = \varphi_{r1d} - \varphi_{r2d}, \quad (4)$$

$$(\varphi_{m1d} - \varphi_{m1}) \cdot n_p \cdot p / 2\pi = \Delta d_1, \quad (5)$$

$$(\varphi_{r1d} - \varphi_{r1}) \cdot n_p \cdot p / 2\pi = \Delta d_2. \quad (6)$$

结合(3)~(6)式,可以计算出理论深度值 h 与计算深度值 h' 的差值为

$$\Delta h = h' - h = \frac{2\pi(\Delta d_1 - \Delta d_2)}{n_p \cdot p} \cdot \frac{l_1}{(\varphi_{m1d} - \varphi_{m2d}) + (\varphi_{r1d} - \varphi_{r2d})}, \quad (7)$$

式中: n_p 为一个条纹周期的条纹所占的屏幕像素数; p 为屏幕单像素物理尺寸; Δd_1 和 Δd_2 分别为同一反射光线下 LCD 像素点在参考镜面和被测面上的像素偏移量。在(7)式中,除偏移量 Δd_1 和 Δd_2 外,其余参数均为已知量。只要求出 Δd_1 和 Δd_2 ,就可以求得深度差值 Δh ,从而实现了对计算深度值的补偿。

图 3 给出了显示屏透明层的折射示意图。根据图 3 中的几何关系得出

$$\Delta d = d \cdot (\tan \alpha - \tan \beta), \quad (8)$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \eta, \quad (9)$$

$$\Delta d = d \cdot \left\{ \tan \alpha - \tan \left[\arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{\eta} \right) \right] \right\}, \quad (10)$$

式中: β 为入射角; Δd 为像素偏移量; d 为透明层厚度; η 为折射率; α 为折射角。厚度 d 和折射率 η 是

显示器的固有参数。折射角 α 因测试配置的不同而不同,具体取决于测试的光学器件尺寸和系统各个部件之间的几何位置关系。

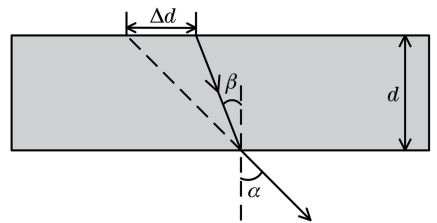


图 3 透明层折射示意图

Fig. 3 Schematic of refraction by transparent layer

3 参数标定方法

由(10)式可以看出,要求出像素偏移量 Δd ,需要标定三个参数,厚度 d 、折射率 η 以及折射角 α 。下面将介绍三个参数的标定方法。

3.1 厚度及折射率的标定

本文标定折射参数采用的模型如图 4 所示,将 LCD 屏幕的各个透明层建模为厚度为 d 、折射率为 η 的透明层。利用 CCD 相机观察显示屏,光源位于透明层的正下方。

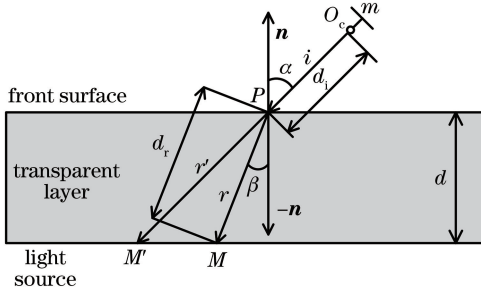


图 4 透明层的折射光路

Fig. 4 Light path refracted by transparent layer

在折射模型中,显示屏上任一光源点 M 的成像过程为:光源点 M 发出的光线 r 传播至前表面,并与前表面相交于折射点 P ;光线在点 P 发生折射,折射光线 i 经过光心 O_c ,最终成像在 CCD 靶面 m 处,其中 r' 为没有折射效应的情况下与光线 i 对应的光线, M' 为没有折射效应的情况下与光源点 M 对应的显示屏光源点。

空气中的光路部分可以表示为

$$\mathbf{P} = \mathbf{O}_c + d_i \mathbf{i}, \quad (11)$$

式中: \mathbf{P} 是折射点向量; \mathbf{O}_c 是相机光心在世界坐标系中的点向量; d_i 是点 O_c 和点 P 之间的距离; \mathbf{i} 是光线 i 的单位向量,表示为

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

式中: \mathbf{R} 是相机的旋转矩阵; \mathbf{A} 是相机的内参矩阵; $\tilde{\mathbf{m}}$ 是像素点 m 的齐次坐标形式。

透明层中的光路部分可以表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{P} + d_r \mathbf{r}, \quad (13)$$

式中: \mathbf{M} 是光源点向量; d_r 是折射点 P 与光源 M 之间的距离,可以表示为

$$d_r = \frac{d}{\cos \beta} = \frac{d}{-\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}}, \quad (14)$$

式中: \mathbf{r} 是光线 r 的单位向量,可以表示为

$$\mathbf{r} = \eta \mathbf{i} + \lambda \mathbf{n}, \quad (15)$$

式中: η 是折射层相对于空气的折射率; \mathbf{n} 为屏幕前表面的法向量; λ 可以表示为

$$\lambda = \eta \cos \alpha - \sqrt{1 + \eta^2 (\cos^2 \alpha - 1)}, \quad (16)$$

式中: $\cos \alpha = \mathbf{n} \cdot (-\mathbf{i})$ 。

由上述分析可知,光线的传播光路除了与折射参数(η, d)有关之外,还与相机内外参数(\mathbf{A}, \mathbf{R})、折射点

P 以及法向量 \mathbf{n} 有关。折射参数的求解步骤如下。

1) 利用张正友标定法^[17]对相机进行标定,得到相机的内参矩阵 \mathbf{A} 。

2) 如图 5 所示,通过显示屏显示棋盘格,同时将标定板粘附在另一区间前表面,利用标定好的相机对显示屏进行拍摄,利用标定板获得相机相对于显示屏的旋转矩阵 \mathbf{R} ,世界坐标系原点建立在标定板上。

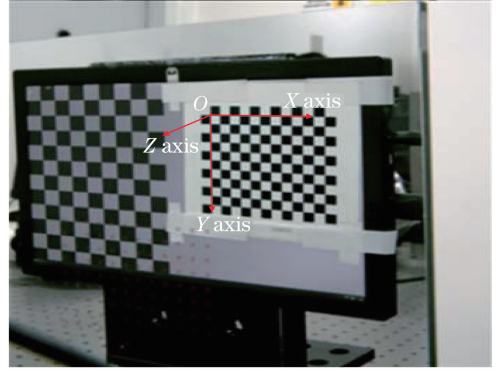


图 5 折射参数标定所使用的屏幕图像

Fig. 5 Screen image used for refraction parameter calibration

3) 通过多次改变相机位置,对显示屏进行拍摄,相机的两个位置如图 6 所示,其中 β_1, β_2 分别为相机在两个位置时的入射角, α_1, α_2 分别为相机在两个位置时的折射角, $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$ 分别为相机在两个位置时空气中光线的单位向量, O_{c1}, O_{c2} 分别为相机在两个位置时世界坐标系中的光心, P_1, P_2 分别为相机在两个位置时世界坐标系中的折射点, m_1, m_2 分别为相机在两个位置时相机靶面的像素点, $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 分别为相机在两个位置时折射层中的光线方向向量, $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ 分别为相机在两个位置时屏幕前表面的法向量。

4) 在采集的图像 j 中,提取特征点 k 对应的相机像素坐标 m_{kj} ,然后根据 (12) 式求得每个相机像素对应的光线向量 \mathbf{i}_{kj} ,根据本文建立的坐标系可

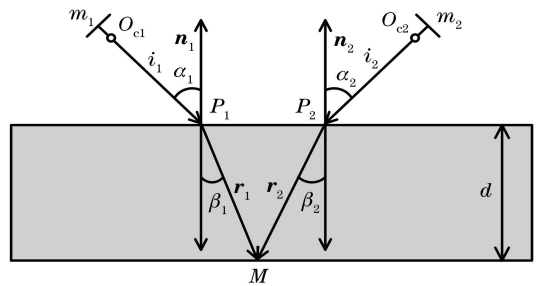


图 6 观察同一特征点的多个相机

Fig. 6 Multiple cameras used for observing same feature point

知,显示屏前表面为 $Z = -1$ 的平整表面。光线向量 i_{kj} 与显示屏前表面的交点即为折射点 P_{kj} ,对显示屏前表面的表达函数进行部分微分,得到每个折射点对应的法向量 n_{kj} ;

5) 从(13)~(16)式可以看出,已知 i_{kj} 、 P_{kj} 和 n_{kj} ,特征点 M_{kj} 的位置仅取决于折射参数 η 和 d 。首先给定一组折射参数 η 和 d 的初始值,将其代入到代价函数中,得到代价函数的初始值;然后利用信赖域反射算法改变折射参数的值,并迭代计算代价函数值,当代价函数取最小值时,对应的一组折射参数即为最优折射参数。代价函数为

$$\sum_{k=1}^{N_p} \left(\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} |\bar{M}_k - M_{kj}| \right)^2, \quad (17)$$

式中: N_p 为每幅图像所使用的特征点数量; N_i 为图像的数量; M_{kj} 为图像 j 中特征点 k 的世界坐标;每幅图像中第 k 个显示特征点的世界坐标的和平均值 $\bar{M}_k = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} M_{kj}$ 。

理论上,在系统参数和折射参数没有误差的情况下,不同图像同一个特征点的世界坐标相同。但在实际实现过程中,通过信赖域反射算法计算代价函数的最小值,从而确定透明层的最佳折射参数 η 和 d 。

3.2 折射角的计算

每条反射光线对应一组参考面和被测面反射光路中的出射光线,为了求解偏移量,还需要对该出射光线的折射角进行计算。以任一反射光线为例, t 为反射光线, s_1 为被测镜面反射光路中的出射光, s_2 为参考镜面反射光路中的出射光,两条出射光线对应的折射角分别为 α_1 和 α_2 ,如图 7 所示。根据图 7 中几何关系得出

$$\alpha_1 = \arctan \left[\frac{(\varphi_{m1d} - \varphi_{m2d}) \cdot n_p \cdot p}{l_1 \cdot 2\pi} \right], \quad (18)$$

$$\alpha_2 = \arctan \left[\frac{(\varphi_{r1d} - \varphi_{r2d}) \cdot n_p \cdot p}{l_1 \cdot 2\pi} \right]. \quad (19)$$

根据(18)式和(19)式,在标定系统参数后,就可以计算出每条反射光线对应的一组折射角 α_1 和 α_2 。

4 实验和结果

本文搭建的实验系统为简易 DPMD 系统,硬件设备主要为一个 CCD 相机、一个 LCD 以及一个高精度水平移动台。通过高精度水平移动台将同一显示屏移动到两个位置,以代替 DPMD 系统中的两个显示屏。搭建简易系统的目的是为了实现 DPMD 系

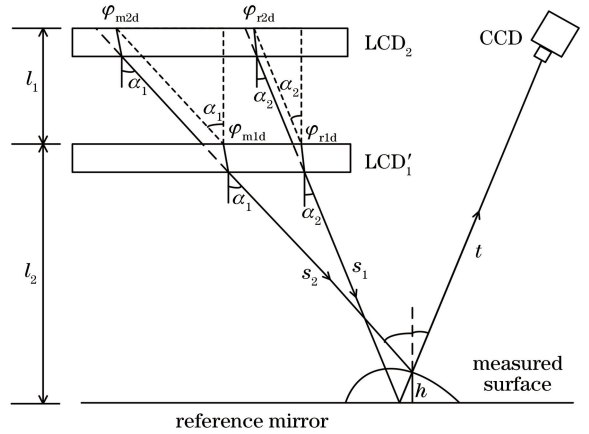


图 7 折射角的计算模型

Fig. 7 Calculation model of refraction angle

统中 LCD1'与 LCD2 二者平行正对。实验硬件系统如图 8 所示。CCD 相机是 SVS 公司的 ECO655CVGE 系列,分辨率为 2448 pixel×2050 pixel,单像素物理尺寸为 3.45 μm ;LCD 采用夏普公司的 LQ101R1JX02 系列,分辨率为 2560 pixel×1600 pixel,单像素物理尺寸为 0.08475 mm;电动水平移动台采用大恒新纪元科技有限公司的 GCD-203300M 系列,单脉冲分辨率为 0.001 mm。

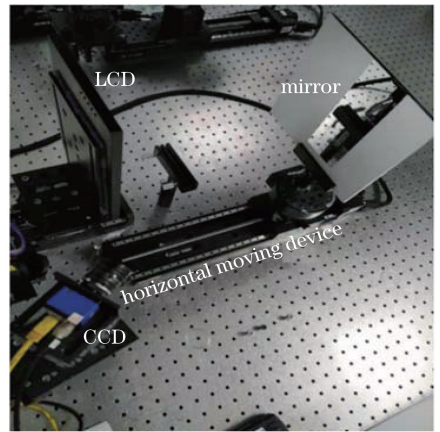


图 8 实验系统结构图

Fig. 8 Structural diagram of experimental system

4.1 标定实验

如图 6 所示,进行折射参数标定实验时,多个相机从不同角度观察显示屏并采集对应的图像。为了减小误差的引入,避免相机移动过程中内参发生改变,引入平面镜作为辅助装置以实现多相机的不同视角观测。通过多次改变平面镜姿态,相机获得显示屏虚像。根据镜像原理可知,显示屏等效经平面镜反射的镜像。因此,无论相机是通过平面镜获得屏幕图像,还是直接获得屏幕图像,折射参数的标定结果都一致。平面镜被摆放在 6 个不同位置,相机

可以清晰地观察到显示屏上显示的图像。在获取每个镜面位置处的显示屏图像后,利用黏附的标定板计算显示屏与相机之间的位姿关系。通过提取每幅图像中显示屏显示的棋盘格角点的相机像素坐标,计算每个角点对应的折射点坐标和法向量。最后通过(17)式,利用信赖域反射算法调整折射参数的值,当代价函数的值最小时,选用的一组折射参数即为最优的折射参数。实验过程中共采集了6幅图片,每幅图片提取30个特征点,最终获得显示屏的折射率和厚度分别为1.63和1.37 mm。

为了标定折射角角度,显示屏在两个位置分别显示正弦条纹图,相机采集经参考镜面和被测物体反射的条纹图案。然后利用四步相移法^[18]并结合最佳三条纹选择法^[19]获得绝对相位,从而获得相机每个像素点的四个绝对相位值 φ_{r1d} 、 φ_{m1d} 、 φ_{r2d} 、 φ_{m2d} 。根据最佳三条纹选择法,通过控制LCD,使条纹数分别为36,35,30的条纹图得以显示,显示屏单像素物理尺寸为0.08475 mm,显示屏的两个位置之间距离为20 mm。根据以上参数计算出折射角度。

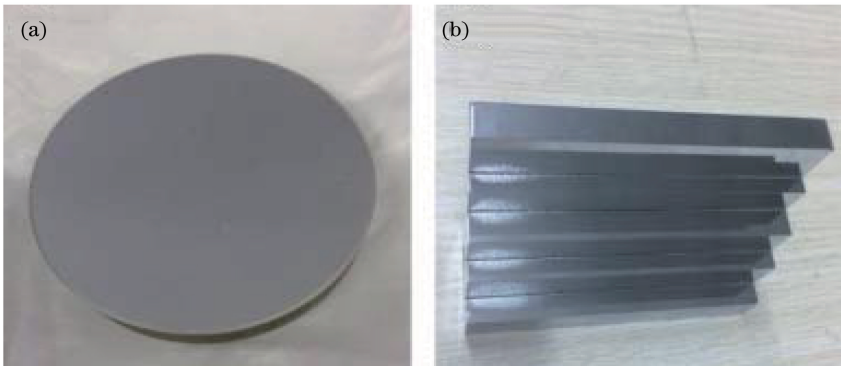


图9 实物图。(a)凹面镜;(b)台阶

Fig. 9 Physical figures. (a) Concave mirror; (b) specular step

对一个台阶进行了测量。将三坐标测量机(测量误差为 $\pm 1 \mu\text{m}$)获得的相邻台阶面间的距离作为真值。然后利用本文方法求得补偿前的深度数据及补偿后的深度数据。以某一台阶面作为基准面,选取基准面内一个有效区域,利用该区域深度值拟合一个平面,计算相邻台阶面有效区域内的点到拟合平面的垂直距离的平均值,将其作为相邻台阶面间距离的测量值。在进行台阶面间距离计算时,补偿前及补偿后所选取的有效区域是一致的。测量结果如表1所示。恢复的台阶三维形貌如图10所示。根据表1中数据可以看出,深度数据补偿后,计算的距离值更加接近真值,证明系统测量精度会受到折

4.2 实物实验

为了验证方法的有效性及其测量精度,利用搭建的硬件系统对一个具有镜面反射效应的高精度台阶和一个光学凹面镜进行了测量。台阶及凹面镜的实物图如图9所示。在进行实物测量前需先进行系统标定。首先对LCD与参考镜面间的平行度进行调节,通过LCD显示棋盘格图像,参考镜面采用含有圆环标识点的反光镜,其相邻圆环的圆心间的距离已知。利用标定好的CCD相机拍摄参考镜面圆环及被参考镜面反射的棋盘格图像。计算两者的外部参数,根据其差异,利用角位移台对LCD与标准镜面间的平行度进行粗调节,用机器视觉的方法对LCD与参考镜面间的平行度进行细调节;然后标定系统参数 l_1 和 l_2 , l_1 由水平位移台的移动量决定,根据平行度调节时获得的LCD与参考镜面的外部参数计算求得 l_2 。系统标定完成后,利用计算机控制LCD,并向参考镜面及被测物体表面投射正弦条纹图,由CCD相机采集参考条纹图及变形条纹图。最后,通过四步相移法并结合最佳三条纹选择法获得绝对相位,进而进行深度值计算。

射效应的影响,利用本方法可适当提高精度。

利用同样的系统对一个凹面反射镜进行了测量。利用计算得到的凹面镜深度值拟合了一个球面,基于球面的半径及球心坐标求解凹面镜每个点到球心的距离,以该距离与球面半径的差的均方根作为系统的重建误差。补偿前及补偿后的误差如图11所示。经过计算,补偿前系统的重建误差为 $50.5 \mu\text{m}$,补偿后系统的重建误差为 $35.7 \mu\text{m}$ 。由图11可以看出,补偿前系统中含有边缘噪声;补偿后边缘噪声基本被消除,各个方向的误差分布均匀;补偿后误差较补偿前误差小,补偿后拟合的凹面更接近真实凹面镜形貌。

表1 台阶真值、测量值、补偿值及误差

Table 1 True value, measured value and compensation value of specular step and their errors unit: mm

Actual distance	Distance before compensation	Distance after compensation	Absolute error before compensation	Absolute error after compensation
3.987	3.966	3.971	0.021	0.016
7.025	7.011	7.014	0.014	0.011
5.006	5.025	5.019	0.019	0.013
6.099	6.121	6.116	0.022	0.017

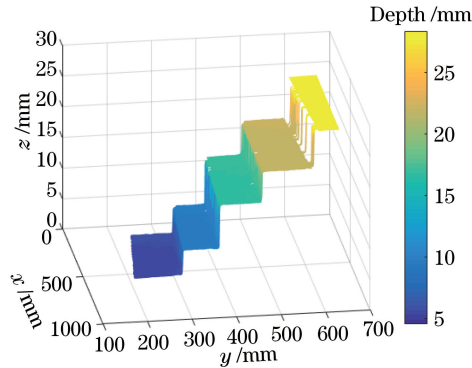


图10 台阶的三维测量形貌

Fig. 10 Measured 3D shape of specular step

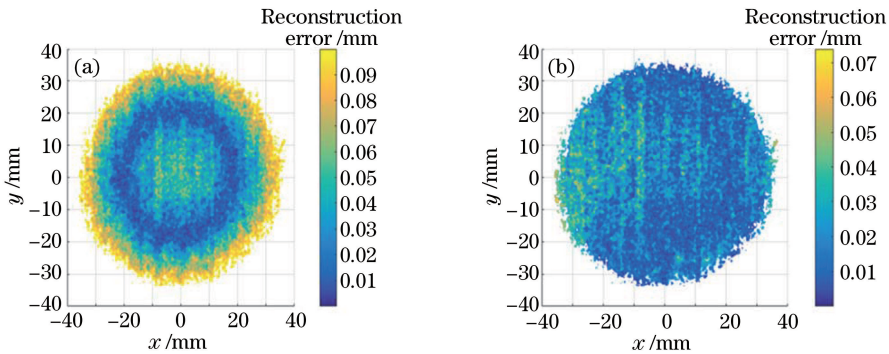


图11 凹面反射镜的重建误差。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 11 Reconstruction error of concave mirror. (a) Before compensation; (b) after compensation

通过以上研究发现,先使用所提的标定方法标定显示屏的折射参数,再利用误差补偿公式对DPMD系统中的计算深度值进行补偿,可以测量具有镜面反射效应的物体,并且可以有效提高系统的测量精度。

5 结 论

提出了一种针对直接相位测量偏折术中显示屏折射效应的参数标定及深度误差补偿方法。首先将显示屏内的多个透明层建模为单层透明层模型,利用多相机从不同视角观测并通过信赖域折射算法对透明层的折射参数进行标定及优化。然后利用相位数据及系统参数对折射角度进行标定。最后搭建DPMD系统,对一个非连续镜面反射台阶以及一个

光学凹面反射镜进行测量。利用获得的参数对被测物的深度数据进行补偿,测量精度提高了30%,验证了所提补偿方法的可行性及测量精度。该方法易于实现,有利于减小基于LCD的镜面测量光学系统的误差。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Harding K. Industrial metrology: engineering

- precision[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(11): 667-669.
- [3] 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 and Lasers in Engineering*, 2012, 50(9): 1274-1280.
- [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] Tao T, Guo H W, He H T. Overview of optical three-dimensional measurement technique for specular reflection surfaces [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(2): 90-95.
陶涛, 郭红卫, 何海涛. 镜面反射面形光学三维测量技术综述 [J]. *光学仪器*, 2005, 27(2): 90-95.
- [6] 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.
- [7] Zhang Z H. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 1097-1106.
- [8] Zhang Z H, Wang Y M, Huang S J, et al. Three-dimensional shape measurements of specular objects using phase-measuring deflectometry [J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2835.
- [9] Balzer J, Werling S. Principles of shape from specular reflection [J]. *Measurement*, 2010, 43(10): 1305-1317.
- [10] 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.
- [11] Zhao P, Gao N, Zhang Z H, et al. Performance analysis and evaluation of direct phase measuring deflectometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 103: 24-33.
- [12] 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: 10293.
- [13] Zhan Z Q. Camera calibration method and application research based on flat LCD [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006.
詹总谦. 基于纯平液晶显示器的相机标定方法与应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2006.
- [14] 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.
- [15] Bartsch J, Nüß J R, Prinzler M H U, et al. Effects of non-ideal display properties in phase measuring deflectometry: a model-based investigation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10678: 106780Y.
- [16] Huang R. High precision optical surface metrology using deflectometry [D]. Tucson: The University of Arizona, 2015.
- [17] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] Cai Z W, Liu X L, Jiang H, et al. Flexible phase error compensation based on Hilbert transform in phase shifting profilometry [J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 25171-25181.
- [19] 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.