

基于相位测量偏折术的镜面物体三维测量

吕蓓婷*

中国电子科技集团公司第三十二研究所, 上海 201800

摘要 基于相位测量偏折术,构建了一个由 LED 平板显示器、被测镜面物体和 CCD 摄像机组成的测量系统。提出一种一般几何设置下测量几何模型及其系统的标定方法。该方法对设备要求低,灵活度、精度较高。对凹面镜的初步实验结果证明了该方法的可行性。

关键词 测量; 光学检测; 相位测量; 相位解包裹; 条纹分析

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.031201

Three-Dimensional Measurement of Specular Surfaces Using Phase Measuring Deflectometry

Lü Beiting*

The 32nd Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201800, China

Abstract The phase measuring deflection is used as a basic technical principle, a measurement system composed of an LED plate display, a measured mirror object and a CCD camera is constructed. The geometric and physical model for general geometric settings and the corresponding calibration method is proposed, which has low equipment, high flexibility and accuracy. The preliminary experimental results of concave mirror demonstrate the feasibility of this method.

Key words measurement; optical inspection; phase measurement; phase unwrapping; fringe analysis

OCIS codes 120.4630; 120.5050; 110.5086; 100.2650

1 引言

目前,国内外学者针对现代制造业中广泛存在的镜面、类镜面光学三维测量,进行了大量研究,并提出了许多方法。相位测量偏折术是一种较好的镜面自由表面测量方法,其原理简单,成本低,动态测量范围大,能快速进行全场测量,适用于各种镜面物体的测量。

2000 年,德国 Erlangen-Nuremberg 大学的 Horneber 等^[1]提出相位测量偏折术概念,简单介绍了其基本原理,并进行了实验验证;2002 年,Knauer 等^[2]进一步阐述了相位测量偏折术中的标定问题,2003 年,其和该项目合作伙伴——3D-Shape GmbH 公司研制了一台样机,并对精密的球面镜进行了测量,在一个较小的测量场得到了理想的测量结果^[3];2009 年至 2011 年,Richter^[4]、Olesch 等^[5]

针对相位测量偏折术测量镜面时的标定问题分别提出了测量系统标定新方法;2012 年,Olesch 等^[6]提出一种新的反射镜面重构方法,使镜面重构不再依赖于假定的表面点,从而使镜面形貌测量更精确;同年,Faber 等^[7]系统讨论并解决了制约相位测量偏折术发展的两大问题,即无法在较大测量范围实现高精度测量和透明物体的背面虚假反射,进一步丰富了相位测量偏折术的理论体系^[8]。

在国内,四川大学的苏显渝等^[9]从 2006 年开始相关研究,先后开展主动条纹偏折术测透明物体波前、双目视觉相位测量偏折术^[10]、基于结构光的光线追迹与波前重建^[11]以及应用相位测量偏折术测量非球面镜^[12]等研究,取得了一些成果,特别是在相位测量偏折术测量非球面镜方面提出了新方法,使得测量非球面时无需复杂的光学附件和标定,就能达到较高的精度,并具有较大的动态测量范围和

收稿日期: 2018-07-16; 修回日期: 2018-08-16; 录用日期: 2018-08-22

* E-mail: lvbeiting@163.com

强抗干扰性;上海大学的郭红卫等^[10,13]针对相位测量偏折术中的相位不确定性、计算复杂性以及累积误差等问题,提出相应的解决方案。以上工作积累了应用相位测量偏折术实现镜面测量的知识成果,为进一步研究奠定了基础。

本文以相位测量偏折术为基本技术原理,构建了由 LED 平板显示器、被测镜面物体和 CCD 摄像机组成的测量系统,提出一种一般几何设置下测量几何模型及其系统的标定方法,以此实现镜面物体三维形貌的测量与重建。该方法可实现任意位置的标定和测量,无需精确控制测量器件在特定的几何位置上,灵活性、精度较高,通过对两个镜面物体的初步实验验证了该方法的可行性。

2 测量原理与系统构建

2.1 测量原理

相位测量偏折术的测量系统通常由标准条纹投射平面(本研究中采用 LED 平板显示器作为投射平面)、被测物体和 CCD 摄像机构成,如图 1 所示。其基本原理为:将计算机产生的正弦条纹图像通过 LED 平板显示器投射于被测物体,经被测镜面物体反射后,由图像采集设备(如 CCD 摄像机等)从另一方向获取因镜面轮廓变化而变形的条纹图像,通过相位求解算法和相应的相位展开技术,得到变形条纹的绝对相位分布,进而得到表面的斜率分布,最后对斜率分布进行数值积分获取被测镜面物体的三维面形。简而言之,就是通过测量镜面表面对入射光线产生的偏折角度,建立偏折角度与物面局部梯度或法向矢量之间的关系,进而重建面形。

2.2 测量系统坐标系

图 2 所示为测量系统的几何物理模型,其中包括世界坐标系、摄像机坐标系、平面光源坐标系、平

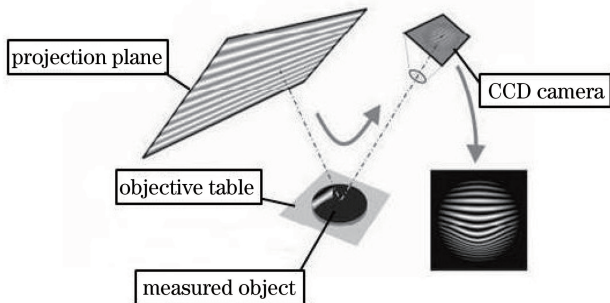


图 1 相位测量偏折术原理图

Fig. 1 Principle for phase measuring deflectometry

面光源的镜像坐标系和摄像机图像坐标系。

世界坐标系 $O-xyz$ 中, $O-xy$ 平面与载物台表面重合, z 轴垂直于载物台表面向上。世界坐标系是整个测量系统几何物理模型的基准坐标系,其余 4 个坐标系内的点都将转换到该坐标系中,世界坐标系的原点位置和轴的方向由测量系统的标定过程获得。摄像机坐标系 $O_c-x_c y_c z_c$ 中,点 C 为摄像机的入瞳中心,即摄像机坐标系原点, x_c 轴沿图像的竖直方向, y_c 轴沿图像的水平方向。平面光源坐标系 $O_s-x_s y_s z_s$ 中,点 O_s 为平面光源坐标系原点, x_s 轴沿像素阵列水平方向, y_s 轴沿像素阵列竖直方向,其坐标可通过条纹图像的相位计算得到。平面光源的镜像坐标系 $O'_s-x'_s y'_s z'_s$ 和平面光源坐标系 $O_s-x_s y_s z_s$ 是关于 $O-xy$ 平面对称的。平面光源的镜像坐标系的原点位置 O'_s 和轴的方向由测量系统的标定过程获得。点 P 为 $O-xyz$ 内一点,由 LED 平板显示器上一点 Q 发出的入射光线经平面 $O-xy$ 反射后的出射光线为 PC ,点 C 、 Q 在平面 $O-xy$ 内的投影分别为点 C_{xy} 和点 Q_{xy} ,且 PC 和 QP 的投影在同一条直线上。点 Q' 为平面光源的镜像坐标系内一点,且与点 Q 关于 $O-xyz$ 对称,点 Q' 与点 C 的连线经过点 P 。除了上述 4 个坐标系,本测量系统还有第 5 个坐标系,即摄像机的图像坐标系。

2.3 测量系统各坐标系之间的变换关系

2.3.1 摄像机模型参数

摄像机标定是根据摄像机模型,由已知特征点的图像坐标和世界坐标求解摄像机的模型参数。摄像机需要标定的模型参数分为内部参数和外部参数^[14-15],如表 1 所示。

表 1 中, α_x 、 α_y 、 u_0 、 v_0 、 γ 为线性模型的内部参数, α_x 、 α_y 分别为 u 、 v 轴的尺度因子,或称为有效焦距(即 $\alpha_x = f/dx$, $\alpha_y = f/dy$, dx 、 dy 分别为水平和垂直方向的像元间距), u_0 、 v_0 为光学中心, γ 为 u 轴和 v 轴的不垂直因子,多数情况下令 $\gamma=0$ 。 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为旋转矩阵和平移矩阵,称为外部参数。非线性模型的内部参数,除了线性模型的内部参数外,还包括径向畸变参数 k_1 、 k_2 和切向畸变参数 p_1 、 p_2 。本研究中将摄像机模型视为线性模型,故忽略径向畸变参数和切向畸变参数^[16-17]。

2.3.2 图像坐标系、摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系

定义直角坐标系,每一像素的坐标 (u, v) 为该像素在数组中的列数和行数。 (u, v) 为以像素为单位的图像坐标系坐标,再建立以物理单位 (mm) 表

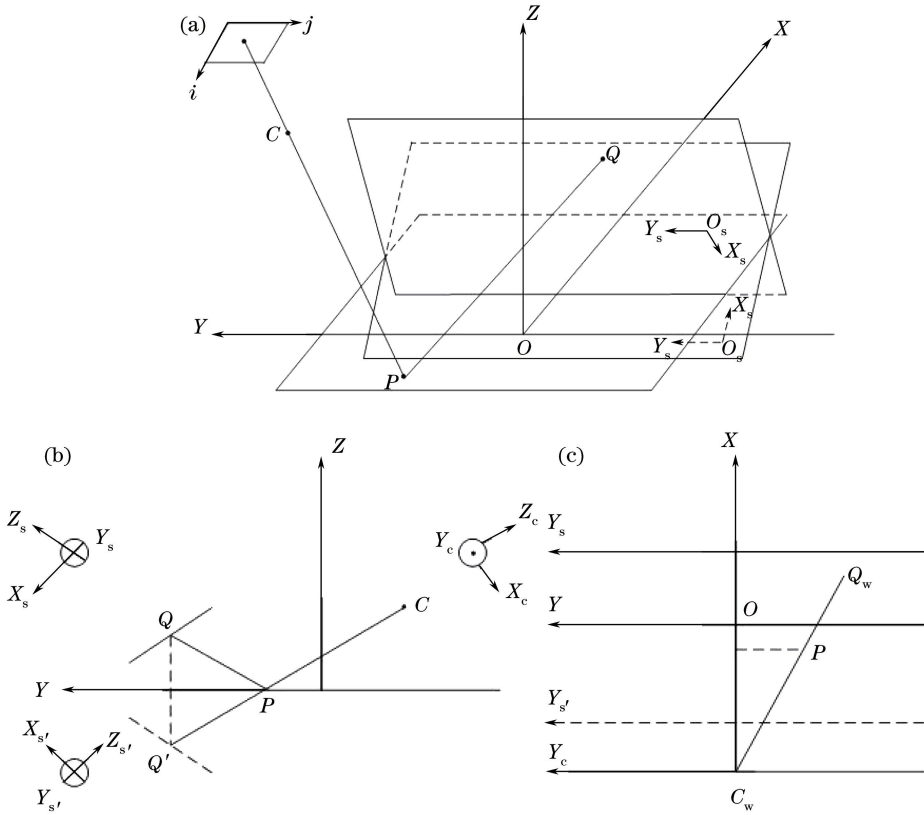


图2 测量系统的几何物理模型。(a)立体图;(b)左视图;(c)俯视图

Fig. 2 Geometric and physical model of measurement system. (a) Three-dimensional figure; (b) left view; (c) vertical view

表1 摄像机模型参数

Table 1 Parameters for camera model

Parameter	Expression	Degree of freedom
Perspective collineation	$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_x & g & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	5
Radial distortion, tangential distortion	k_1, k_2, p_1, p_2	4
External parameters	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$	6

示的图像坐标系,该坐标系以图像内某点 O_1 为原点, X, Y 轴分别与 u, v 轴平行。在 X, Y 坐标系中, O_1 定义在摄像机光轴与图像平面的交点,一般位于图像中心,某些原因也会导致偏离,若 O_1 在 u, v 坐标系中坐标为 (u_0, v_0) , 每一个像素在 X, Y 轴方向上的物理尺寸为 dX, dY , 则图像中任意一个像素在两个坐标系下的坐标可用齐次坐标和矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dX & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dY & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{A} 为摄像机内部参数矩阵。

摄像机成像的几何关系如图3所示。其中点 O 为摄像机光心, x, y 轴分别与图像的 X, Y 轴平行, z 轴为摄像机光轴, 其与图像平面垂直。光轴与图像平面的交点, 即为图像坐标系原点, 由点 O 与 x, y, z 轴组成的直角坐标系称为摄像机坐标系。 OO_1 为摄像机的焦距。

由于摄像机可放置在测量系统中的任意位置, 在系统中选择一个基准坐标系来描述摄像机的位置, 其可描述系统中任何物体的位置, 该坐标系即为

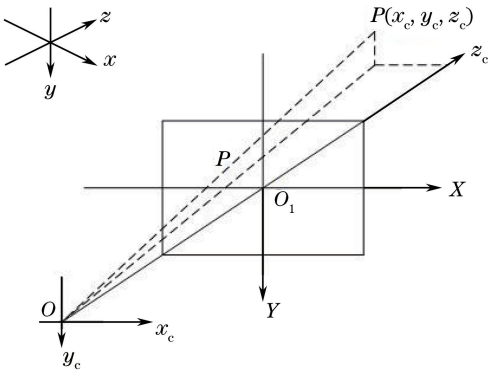


图3 摄像机成像的几何关系图

Fig. 3 Geometric relationship for camera

世界坐标系。摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系可由旋转矩阵 \mathbf{R} 与平移向量 \mathbf{t} 描述。因此,空间中某点 P 在世界坐标系与摄像机坐标系下的齐次坐标分别为 $\mathbf{P} = (x, y, z, 1)^T$ 与 $\mathbf{P}_c = (x_c, y_c, z_c, 1)^T$,两者之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_c & y_c & z_c & 1 \end{bmatrix}^T = [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

式中 \mathbf{R} 为 3×3 旋转矩阵, \mathbf{t} 为三维平移向量。由(2)式可知,将 $x_c = y_c = z_c = 0$ 代入,可得摄像机坐标系在世界坐标系中的原点位置。

由(1)式和(2)式可推导出图像坐标系与世界坐标系之间的关系为

$$s \begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{A} [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (3)$$

2.3.3 平面光源坐标系与世界坐标系之间的关系

若平面光源坐标系上点 Q 的齐次坐标为 $Q = (x_s, y_s, z_s, 1)$,由(2)式可得平面光源的镜像坐标系与摄像机坐标系之间的关系,进一步可得平面光源的镜像坐标系与世界坐标系之间的关系,又因为平面光源坐标系与其镜像坐标系关于 O - xy 平面对称,可得平面光源坐标系与世界坐标系之间的关系,最终将点 Q 表示为世界坐标系内的点,即

$$s [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = s_1 [\mathbf{R}_1 \quad \mathbf{t}_1] \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{R}_1 为平面光源的镜像坐标系与摄像机坐标系之间的旋转矩阵, \mathbf{t}_1 为平移向量。

2.3.4 条纹相位与平面光源坐标系之间的关系

点 Q 为屏幕上任意一点,其在 O_s - $x_s y_s$ 坐标系中可表示为

$$\begin{cases} Q_x = \frac{\psi_x}{2\pi} \times p_x + \Delta x \\ Q_y = \frac{\psi_y}{2\pi} \times p_y + \Delta y \end{cases}, \quad (5)$$

式中 ψ_x 、 ψ_y 分别为采用横、纵向条纹投射时计算出的点 Q 绝对相位, p_x 、 p_y 分别为横、纵向采用 N 条正弦条纹投射时两个方向的条纹节距。由于平面光源坐标系的原点并不在 LED 平板显示器的中心点,则由条纹相位求得的坐标还需分别加上 Δx 和 Δy ,即平面光源坐标系原点与 LED 平板显示器中心点沿 x_s 和 y_s 轴的距离。

2.4 相位与物面法矢的映射

要求解物面法矢,首先要确定入射和出射光线的矢量。假设 LED 平板显示器上点 Q 发出的光线经被测物面上一点 P 反射后,由 CCD 摄像机捕捉并成像后的像素为 (i, j) ,如图 2(b)所示。由反射定律,即反射角等于入射角可知,被测物面点 P 处的法向矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k} = \frac{\mathbf{a}}{l_{pc}} + \frac{\mathbf{b}}{l_{pq}} = \\ & \left[\frac{(x_c - x)}{l_{pc}} + \frac{(x_q - x)}{l_{pq}} \right] \mathbf{i} + \\ & \left[\frac{(y_c - y)}{l_{pc}} + \frac{(y_q - y)}{l_{pq}} \right] \mathbf{j} + \\ & \left[\frac{(z_c - z)}{l_{pc}} + \frac{(z_q - z)}{l_{pq}} \right] \mathbf{k}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} 分别为世界坐标系中沿 x 、 y 、 z 轴方向的单位向量, \mathbf{a} 的起点为 P ,终点为 C , \mathbf{b} 的起点为 P ,终点为 Q , l_{pc} 、 l_{pq} 分别为 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 的模。归一化后,可进一步获取物面点 P 处的单位法向矢量。

2.5 物面的重建方法

用方程 $z(x, y)$ 表示被测物面,得到被测物面上任意点处的梯度后,通过数值积分即可求出物面面形,再利用多项式逼近模型表示物面面形可得

$$z(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} a_{ij} x^i y^j, \quad (i+j \neq 0), \quad (7)$$

式中 a_{ij} ($i=0, 1, \dots, N; j=0, 1, \dots, N-1; i+j \neq 0$) 为逼近多项式系数, N 为取点的个数, i 和 j 为 $0 \sim N$ 的自然数。

3 测量系统的标定与测量过程

3.1 测量系统的标定

首先标定摄像机的内部参数,即确定摄像机的主点坐标 (u_0, v_0) , u 、 v 轴的尺度因子 α_x 、 α_y 和不垂

直因子 γ 。任意变换靶标位置,利用 CCD 摄像机拍摄 10 幅图像,使用 Matlab 摄像机标定工具箱计算得到标定结果为 $[u_0, v_0] = [333.56845, 333.17333]$, $\alpha_x = 3468.34813$, $\alpha_y = 3457.38019$, $\gamma = 0$ 。

摄像机与世界坐标系之间的参数标定,就是获得旋转矩阵 \mathbf{R} 与平移向量 \mathbf{t} 。将黑白棋盘格靶标平面置于镜面标定平板上,该标定平板所在平面即为世界坐标 $z=0$ 的平面。利用 CCD 摄像机采集 1 幅图像,标定得到世界坐标系 $O\text{-}xyz$ 中单位坐标 dx 、 dy 的方向,计算后

$$\text{可得外部参数 } \mathbf{t} = \begin{bmatrix} -26.538685 \\ -23.486311 \\ 319.517468 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.062319 & 0.997224 & -0.040759 \\ 0.683886 & -0.012922 & 0.729474 \\ 0.726922 & -0.073335 & -0.682793 \end{bmatrix}.$$

通过计算机在 LED 平板显示器上显示黑白棋盘格图像,将其投射到镜面的标定平板,再用 CCD 相机采集 1 幅图像,重复上述标定过程,得到坐标系 $O_s\text{-}x_s y_s z_s$,以及摄像机与 LED 平板显示器投影之

$$\text{间的外部参数 } \mathbf{t}_1 = \begin{bmatrix} -19.804204 \\ -38.719611 \\ 464.358246 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} -0.014183 & 0.984982 & 0.172071 \\ 0.999574 & 0.018359 & -0.022702 \\ -0.025520 & 0.171676 & -0.984823 \end{bmatrix}.$$

3.2 测量过程

通过测量原理和系统几何物理模型分析,在实际测量中拟采用以下测量步骤:将被测物体置于标定平台($O\text{-}xy$),使其处于 CCD 摄像机视场中适当区域;由计算机分别生成水平、竖直两个方向的变频条纹图像,且每个频率有相移量不同的若干幅图像,将条纹图像通过 LED 平板显示器依次投射于被测物体表面,CCD 摄像机从另一个方向采集被测物面的条纹图像,并依次存储于计算机;分析处理所采集的条纹图像,求解被测物面精确、有效的绝对相位分布;由绝对相位分布求解点 P 在 LED 平板显示器上对应点 Q 的显示坐标($O_s\text{-}x_s y_s z_s$ 坐标系),进而求得点 Q 的空间三维坐标和物面在点 P 处的单位法矢;由物面点单位法矢求得逼近多项式系数,而后代入(7)式拟合得到面形,实现镜面三维物体形貌的测量与重建。

4 测量实验

根据测量系统的几何物理模型,搭建由电脑、图像采集卡、LED 平板显示器、CCD 摄像机、精密调整平台以及相配套的控制设备组成的测量系统。根据标定得到的测量系统的几何参数,参照 3.2 节的测量过程对凹面镜展开实际的测量。凹面镜直径为 50 mm,球面半径为 100 mm,焦距为 50 mm。

测量时,首先将凹面镜置于载物台,且保证 CCD 摄像机可以捕捉到完整的凹面镜图像。分别投射水平和竖直两个方向的变频条纹图像于凹面镜上,条纹频率按 2 的幂函数形式变化,即 $f_0 = 2^n$ ($n=0,1,\dots,7$),每次的相移值为 $a_i = i2\pi/N$ ($i=0,1,\dots,N-1; N \in N^*$), N 为相移次数,当 $f_0 = 2^7$ 时, N 取 8,其余每个频率的 N 均取 4。采集物体表面的条纹图像并存储。根据图像相位分析方法,采用确定的同步探测法求解采集频率为 $f_0 = 2^7$ 时得到的条纹图像相位,求解出包裹相位后进行相位解包裹。由于相位分布中存在无效测量区,为保证其不影响测量,运用基于调制度的有效测量区分割方法,剔除无效测量区数据,最终得到有效测量区绝对相位分布,结果如图 4 所示。

根据得到的绝对相位分布,可求出 LED 平板显示器上光源点的空间三维坐标;然后求取被测物面的单位法矢分布,结果如图 5 所示。

采用 5 次多项式逼近模型表示反射镜面,根据求解得到的逼近多项式系数和物面点在 $O\text{-}xy$ 面内的坐标即可实现该凹面镜的三维测量与重建。为了去除系统误差引起的倾斜,还要进行相应的去倾斜处理,最终测量结果如图 6 所示。

由测量结果可得该凹面镜的凹面深度为

$$h = z_{\max} - z_{\min} = 3.2093. \quad (8)$$

由该被测凹面镜已知的几何尺寸,可计算出凹面深度的理论值为

$$h_L = 100 - \sqrt{100^2 - (50/2)^2} = 3.1754. \quad (9)$$

因此,测量得出的该凹面镜的凹面深度与其理论值之间相差 0.0339 mm。由该测量结果可推断:所提出的基于相位测量偏折术的镜面物体三维测量方法可行且有效。

5 结论

相位测量偏折术在镜面、类镜面物体的测量方面具有其自身的技术优势,工程实际中往往无法精

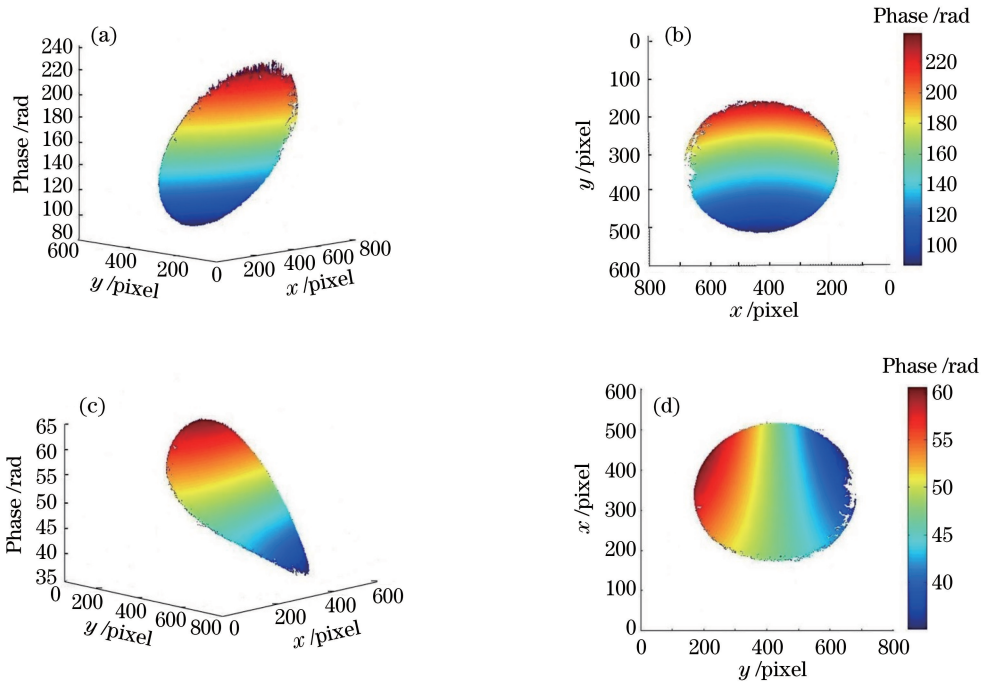


图 4 凹面镜有效测量区域的绝对相位分布。(a)立体图(横向条纹);(b)俯视图(横向条纹);
(c)立体图(纵向条纹);(d)俯视图(纵向条纹)

Fig. 4 Absolute phase distribution for effective measuring area of concave mirror. (a) Three-dimensional figure (transverse fringe); (b) vertical view (transverse fringe); (c) three-dimensional figure (vertical fringe); (d) vertical view (vertical fringe)

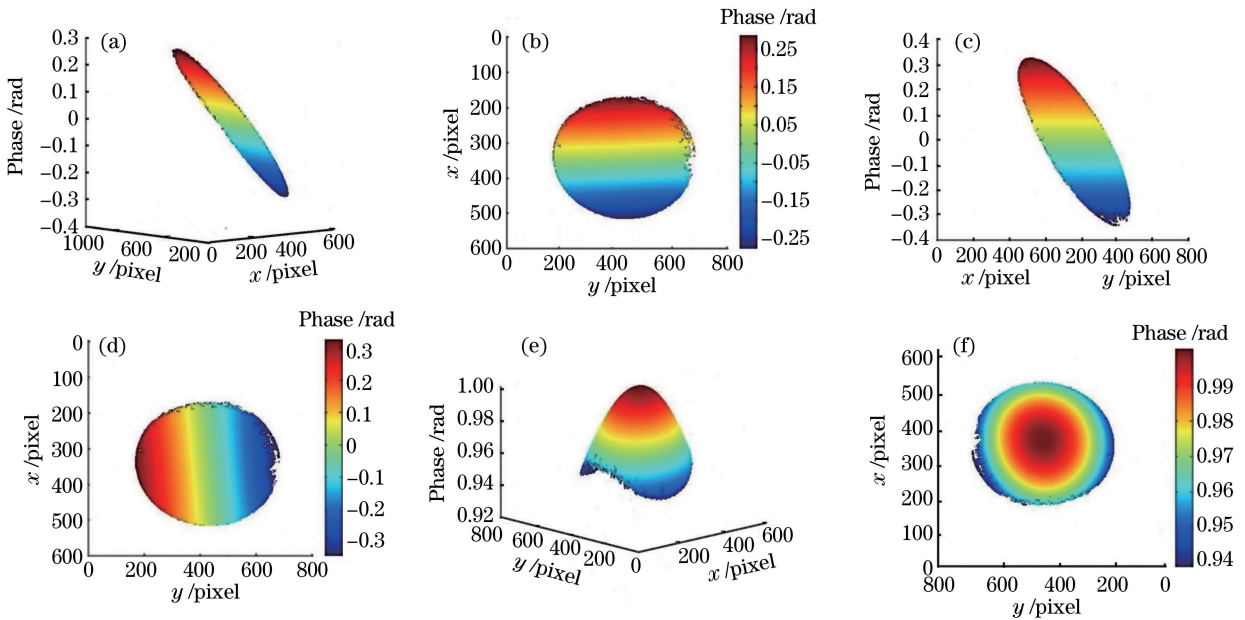


图 5 凹面镜的单位法矢分布图。(a)立体图(沿 x 轴分量);(b)俯视图(沿 x 轴分量);(c)立体图(沿 y 轴分量);
(d)俯视图(沿 y 轴分量);(e)立体图(沿 z 轴分量);(f)俯视图(沿 z 轴分量)

Fig. 5 Unit normal vector distribution of concave mirror. (a) Three-dimensional figure (component along x axis); (b) vertical view (component along x axis); (c) three-dimensional figure (component along y axis); (d) vertical view (component along y axis); (e) three-dimensional figure (component along z axis); (f) vertical view (component along z axis)

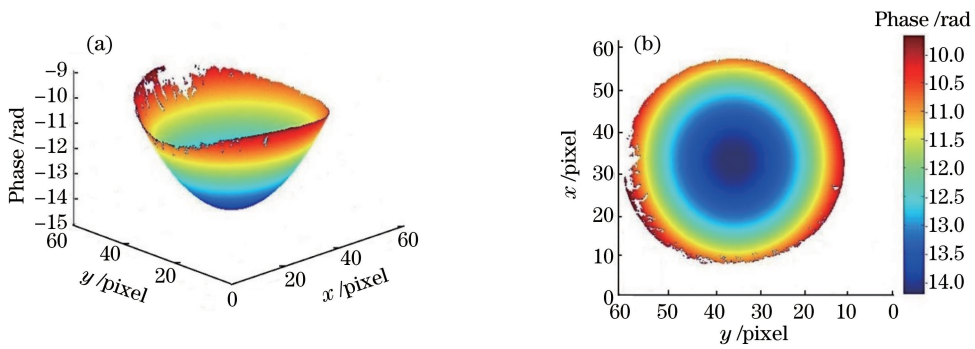


图6 凹面镜测量结果。(a)立体图;(b)俯视图

Fig. 6 Measuring results of concave mirror. (a) Three-dimensional figure; (b) vertical view

确控制测量器件在特定的几何位置上,基于相位测量偏折术原理建立和开发的镜面测量系统具有实用性。测量实验证明了所提模型及其标定方法具有可行性,且该方法具有较高的精度。长远来说,该研究领域还存在诸多需拓展和深入的方面,如深度-梯度耦合问题、标定过程智能化、相位多义性问题以及其他误差因素影响等。

参 考 文 献

- [1] Guo C F, Lin X Y, Hu A D, *et al.* Improved phase-measuring deflectometry for aspheric surfaces test [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(8): 2059-2064.
- [2] Ren H Y, Gao F, Jiang X Q. Iterative optimization calibration method for stereo deflectometry [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22060-22068.
- [3] Ettl S, Kaminski J, Knauer M C, *et al.* Shape reconstruction from gradient data [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2091-2097.
- [4] Richter C, Kurz M, Knauer M, *et al.* Machine-integrated measurement of specular free-formed surfaces using phase-measuring deflectometry [C] // *International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2009: 90-93.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Li C, Zhang X, Tu D W, *et al.* Deflectometry measurement method of single-camera monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1012007. 李晨, 张旭, 屠大维, 等. 单相机监控偏折术测量方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1012007.
- [8] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070003. 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070003.
- [9] Liu Y K, Su X Y, Wu Q Y. Wavefront measurement for transparent object by active deflectometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(4): 515-518. 刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于主动条纹偏折术的透明相位物体波前测量方法 [J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 515-518.
- [10] Guo H W, Feng P, Tao T. Specular surface measurement by using least squares light tracking technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 166-171.
- [11] Zhao W C, Su X Y, Zhang Q C, *et al.* Ray tracing and wavefront reconstruction based on structured-light imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1868-1871. 赵文川, 苏显渝, 张启灿, 等. 基于结构光的光线追踪与波前重建方法 [J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1868-1871.
- [12] Zhao W C, Fan B, Wu F, *et al.* Testing of aspheric surface normal vector based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0612007. 赵文川, 范斌, 伍凡, 等. 基于相位测量偏折术的非球面法线向量测量 [J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0612007.
- [13] Guo H W, Tao T. Specular surface measurement by using a moving diffusive structured light source [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6834: 68343E.
- [14] Wu J, Zhou Y, Yu H M, *et al.* Improved 3D depth

- image estimation algorithm for visual camera [C] // International Congress on Image and Signal Processing, 2009: 5305324.
- [15] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [16] Gudmundsson S A, Aanaes H, Larsen R. Fusion of stereo vision and time-of-flight imaging for improved 3D estimation[J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 2008, 5(3/4): 425-433.
- [17] Yang Q X, Yang R G, Davis J, *et al.* Spatial-depth super resolution for range images [C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 383211.