

# 基于光束法平差的相位测量偏折术镜面面形测量

肖永亮 苏显渝 陈文静

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 为了简化相位测量偏折术的系统标定,并减少系统标定和图像噪声对测量精度的影响,提出在相位测量偏折术中引入自由参考系,并在自由参考系内对测量结果进行光束法平差。由于基于梯度恢复面形的相位测量偏折术缺少绝对高度信息,因而不能直接进行光束法平差,自由参考系使入射光线和反射光线处于同一个坐标系内,通过光线三角交会计算自由参考系下的待测点三维坐标。根据待测点与其对应入射光线共线的几何约束,采用约束光束法平差对摄像机内外参数和面形三维坐标同时进行优化,使重投影误差最小。数值模拟和实验结果表明,光束法平差可以提高相位测量偏折术的测量精度。

**关键词** 测量;光学三维测量;镜面反射;相位测量偏折术;光束法平差

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1212007

## Specular Shape Measurement with Phase Measuring Deflectometry Based on Bundle Adjustment

Xiao Yongliang Su Xianyu Chen Wenjing

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** In order to simplify the system calibration and reduce the influence of the error of system calibration and image noise on measurement accuracy by phase measuring deflectometry (PMD), free frame of axes is introduced in PMD, and bundle adjustment in free frame of axes is performed to improve the measurement accuracy. Commonly, the specular shape is measured by PMD with gradient information. However, bundle adjustment can not be directly performed since there is no absolute height information. The introduction of free frame unifies the incident and reflected ray in the same frame, and the absolute coordinate of tested points can be obtained by intersection of incidence and reflected ray. According to the geometrical constraint that, the 3D points must be located on the corresponding incident ray, constraint bundle adjustment is performed to refine the intrinsic, extrinsic parameters and 3D coordinates of shape simultaneously to minimize the reprojection error. Numerical simulation and experimental results demonstrate that bundle adjustment can indeed improve the measurement accuracy in PMD.

**Key words** measurement; optical three-dimensional measurement; specular reflection; phase measuring deflectometry; bundle adjustment

**OCIS codes** 150.6910; 120.2650; 150.3045; 100.2650

## 1 引言

非球面镜能够减少系统中光学元件数量,校正像差,改善像质,越来越广泛地应用于各种光学系统,其相应的检测方法已成为当前研究的热点。目前通常采用干涉计量技术,而多数干涉仪要求相干照明以及精确设计的光学系统,其测量动态范围很

小,需要制造辅助元件<sup>[1]</sup>。三维坐标测量仪可以用来检测,但测头对被测面接触式单点测量,非常费事和费时。

结构光投影获取的物体三维面形具有快速全场测量、测量精度较高等优点,已被广泛地应用于漫反射表面的三维测量。针对光学反射镜面,根据条纹

**收稿日期:** 2011-07-04; **收到修改稿日期:** 2011-08-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

**作者简介:** 肖永亮(1983—),男,博士研究生,主要从事计算机视觉和光学三维传感等方面的研究。

E-mail: yl.xiao@yahoo.com.cn

**导师简介:** 苏显渝(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学和光学三维传感等方面的研究。

E-mail: xysu@scu.edu.cn(中国光学学会会员号:610015)

反射特性<sup>[2]</sup>,众多学者<sup>[3-7]</sup>提出利用计算机视觉测量的方法测量镜面面形。其中 Hausler<sup>[4]</sup>提出利用相位测量偏折术(PMD)测量镜面面形。其原理是根据条纹的相位信息确定光线偏折,利用待测镜面的梯度信息,积分重建镜面的三维面形。但是其方法需要两个标定的摄像机和冗繁的系统标定,而且积分步长的选择会影响到面形重建的精度。刘元坤等<sup>[8]</sup>提出利用条纹反射测量类镜面三维面形。根据非球面面形测量的实际要求,唐燕等<sup>[9,10]</sup>利用一个摄像机对非球面上的变形条纹进行共轴或离轴拍摄,均可以完成非球面的面形测量,且离轴拍摄在实践中更具备灵活性。其核心是利用几何光学提出虚拟抛物面的概念。但是,其测量过程采用的是摄像机针孔模型,其测量精度非常依赖于摄像机标定的精度。在非球面镜测量,特别是大口径非球面镜测量中,摄像机镜头畸变将会对测量精度有很大的影响。根据摄像测量理论,光束法平差<sup>[11]</sup>作为摄像测量的最后优化步骤,可以最大程度地减少摄像机畸变和图像噪声对测量精度的影响。但是,由于根据梯度信息通过积分测量的面形是相对高度信息<sup>[10]</sup>,且与摄像机不在同一个坐标系内,无法直接进行光束法平差。本文根据计算机视觉和摄像测量理论,引入自由参考系,利用相位测量确定入射光线和反射光线在自由参考系下的直线方程,通过三角交会求解待测点在自由参考系下的三维坐标。当引入自由参考系后,其面形是自由参考系下的绝对坐标,可进行光束法平差。实际测量时,只需要一个摄像机,两次移动液晶显示器即可完成测量。

## 2 相位测量偏折术三角交会原理

### 2.1 基本原理

测量装置采用摄像机离轴形式拍摄变形条纹,其结构如图1所示。其中液晶显示器用来显示条纹图像,摄像机固定不动。相位测量偏折术的基本原理简述如下:由于镜面反射,反射光线和入射光线满足反射定律,镜面面形上某点的三维坐标由反射光线和入射光线三角交会确定。如图1中的C点,由于反射定律,其反射光线只对应于一条方向矢量确定的入射光线,将液晶显示器移动到两个不同的位置,就可以找到其对应的入射光线。其反射光线可由C点在摄像机成像面相应的图像点和摄像机光心确定,其入射光线由与C点在液晶显示器在两个不同位置的同名点A和B两点确定。但是,入射光线与反射光线不处于同一个坐标系,因此不能直接

进行三角交会,必须统一在同一个坐标系内。引入自由参考系,如图1中的虚线所示,可以将摄像机坐标系和液晶显示器的坐标系统一于自由参考系下,完成三角交会和光束法平差。此时,待测点的三维坐标测量类似于双目视觉的三角交会。自由参考系属于辅助参考系,其作用是完成坐标系的统一,因此其位置和方位是自由的,仅需要其位于摄像机的视场范围内。液晶显示器可以用来构建自由参考系。

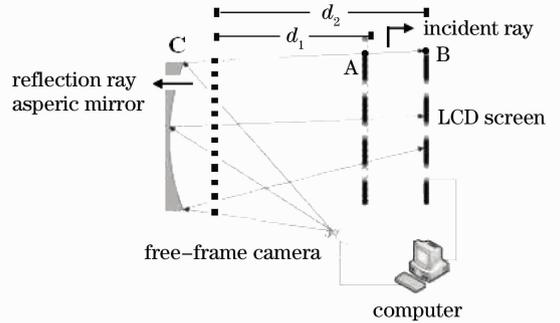


图1 相位测量偏折术镜面面形测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the specular shape by phase measuring reflectometry

在测量之前,摄像机的参数包括主点、等效焦距和畸变系数,需要进行标定。利用基于傅里叶条纹分析的摄像机标定法完成参数标定<sup>[12,13]</sup>。测量时,首先,将液晶显示器置于摄像机视场范围内,即位于图1虚线处的自由参考系,通过摄像机拍摄条纹图,评估摄像机与自由参考系之间的位姿关系<sup>[14]</sup>;然后,将液晶显示器平行反向并移动至某处,直到不遮挡摄像机拍摄变形条纹的视场,记下移动的距离 $d_1$ 。摄像机拍摄经过非球面反射后的横竖条纹变形条纹图,由计算机控制条纹三步相移,根据绝对相位信息寻找变形条纹图像素坐标在液晶显示器上的同名点。最后,继续将液晶显示器继续后移至某处不动,记下移动距离 $d_2$ 并拍摄变形横竖条纹图,完成此处的同名点匹配。整个实验操作结束。

### 2.2 算法描述

首先,可以根据液晶显示器上正弦条纹和摄像机拍摄变形条纹的相位信息,确定像素同名点。由于镜面反射,液晶显示器某点的相位与变形条纹上其同名点的相位一致,因此采用相位编码正弦条纹,寻找摄像机图像点对应于液晶显示器上的同名点。假设显示在液晶显示器上的横正弦条纹设计为

$$I(x, y) = a + b \cos \varphi(x, y), \quad (1)$$

式中 $x, y$ 表示液晶显示器的像素坐标, $\varphi(x, y) = 2\pi x/T$ , $T$ 为条纹周期。由于光照背景,由摄像机获

取的变形条纹图像强度函数为  $I_k(u, v)$ ,  $k = 1, 2, 3$ , 表示相移的次数,  $u, v$  表示摄像机像平面的像素坐标。根据三步相移法求解变形条纹的截断相位<sup>[15]</sup>, 每步相移的程度为  $2\pi/3$ , 获得的截断相位为

$$\varphi_{\text{wrap}}(x, y) = \arctan \frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3}. \quad (2)$$

对截断相位进行相位展开<sup>[16]</sup>, 得到连续相位分布。但此时的连续相位属于相对相位。为了保持相位的一致性, 必须求解绝对相位。在液晶显示器上相位为零的地方显示十字叉标记点, 根据此标记点对展开的相对相位进行平移, 就可以得到绝对相位分布<sup>[17]</sup>。对竖条纹进行相同的处理, 并结合横条纹的结果, 就可以完成同名相位点的匹配。根据条纹的相位信息进行同名点匹配, 具有空间分辨率高的优点。

然后, 通过摄像机与自由参考系之间的位姿关系, 将拍摄的变形条纹图像坐标和摄像机光心转换到自由参考系。根据自由参考系下液晶显示器的共面特征点, 完成摄像机与自由参考系之间的位姿评估, 即旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矢量  $\mathbf{T}$ 。那么, 在自由参考系下, 摄像机光心  $r_o = [X_o, Y_o, Z_o]^T$  满足

$$[0, 0, 0] = \mathbf{R}r_o + \mathbf{T}. \quad (3)$$

假设摄像机成像面变形条纹某点的图像坐标为  $[u_i, v_i]$ , 此点在摄像机坐标下的物理坐标为  $[\frac{u_i - C_x}{F_x}f, \frac{v_i - C_y}{F_y}f, f]$ ,  $C_x, C_y$  表示摄像机的主点,  $F_x, F_y$  表示摄像机的归一化焦距, 即摄像机标定的焦距,  $f$  表示摄像机的物理焦距, 其在自由参考系下的坐标  $r_i$  可以表示为

$$\left[ \frac{u_i - C_x}{F_x}f, \frac{u_i - C_y}{F_y}f, f \right]^T = \mathbf{R}r_i + \mathbf{T}. \quad (4)$$

因此, 在自由参考系下, 反射光线的直线方程可以由  $r_o$  与  $r_i$  确定。

最后, 将液晶显示器上正弦条纹图像特征点的物理坐标转换到自由参考系下。假设变形条纹某点在  $x$  和  $y$  方向的绝对相位分别为  $\phi_x$  和  $\phi_y$ , 那么, 在两个不同位置上液晶显示器同名点的坐标分别为  $[\Delta T\phi_{1x}/2\pi, \Delta T\phi_{1y}/2\pi]$  和  $[\Delta T\phi_{2x}/2\pi, \Delta T\phi_{2y}/2\pi]$ ,  $\Delta$  为液晶显示器的点间距。则这两个同名点在自由参考系下的坐标可以表示为  $r_{i1} = [\Delta T\phi_{1x}/2\pi, \Delta T\phi_{1y}/2\pi, d_1]$  和  $r_{i2} = [\Delta T\phi_{2x}/2\pi, \Delta T\phi_{2y}/2\pi, d_2]$ 。因此入射光线在自由参考系下的直线方程可以确定。

入射光线和反射光线的交点是自由参考系下的绝对坐标。但是, 由于畸变和噪声的影响, 两条求解

的光线有可能不相交, 而是异面直线。此时, 以与两异面直线垂直的线段的中点为交点。摄像机的内参数, 相对于自由参考系下的外参数, 和镜面在自由参考系下的绝对坐标都已知, 满足光束法平差的条件。

### 3 光束法平差

相位测量偏折术镜面面形的测量精度依赖于摄像机标定的内外参数和相位同名点的匹配精度, 这些因素受摄像机镜头畸变的影响。为了使此类影响的程度降低, 将摄像测量的经典技术光束法平差应用到相位测量偏折术。光束法平差的核心思想是将图像成像坐标看作观测值, 对摄像机的主点、等效焦距、畸变系数、旋转矩阵、平移矢量和空间坐标同时优化, 使重投影误差最小, 提高求解空间坐标的精度。光束法平差的数学原型为非线性最小二乘算法, 其优化过程具有统计意义, 能够减小镜头畸变和高斯噪声对测量精度的影响<sup>[11]</sup>。

一般采用考虑像差的非线性摄像机模型描述成像关系, 即基于中心透视投影的线性摄像机模型加上引起镜头畸变的像差<sup>[14]</sup>。设空间点世界坐标系中的坐标为  $X^w = [X, Y, Z]$ , 其图像点经过中心透视变换后在摄像机图像坐标系中的坐标为  $[x, y]$ 。实际像点等于理想像点  $(x, y)$  与像差  $(\delta_x, \delta_y)$  之和。采用考虑了径向像差和切向像差的像差模型来描述像差的实际大小, 即  $(x_{\text{real}}, y_{\text{real}})$ ,  $x_{\text{real}} = x + \delta_x$ ,  $y_{\text{real}} = y + \delta_y$  其中, 
$$\begin{cases} \delta_x = k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_5 r_d^6 + 2k_3 x_d y_d + k_4 (r_d^2 + 2x_d^2) \\ \delta_y = k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_5 r_d^6 + k_3 (r_d^2 + 2y_d^2) + 2k_4 x_d y_d \end{cases}$$
  $x_d = (x - C_x)/F_x$ ,  $y_d = (y - C_y)/F_y$ ,  $r_d^2 = x_d^2 + y_d^2$ ,  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$ , 表示畸变系数。

将非线性成像过程抽象为映射函数  $g$ , 对于某点的重投影误差表示为

$$\begin{cases} \Delta_{ix} = g(F_x, F_y, C_x, C_y, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, X_i^w) - x_{\text{real}} \\ \Delta_{iy} = g(F_x, F_y, C_x, C_y, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, X_i^w) - y_{\text{real}} \end{cases}. \quad (5)$$

光束法平差的目标是  $[\sum_i (\Delta_{ix}^2 + \Delta_{iy}^2)]$  的最小化。

另一方面, 根据相位测量偏折术的光线几何关系, 待测非球面上的一点与其对应的入射光线的两点共线。此时, 确定入射光线的两点在自由参考系的坐标为观测值, 由相位对应求解,  $X_i$  为平差参数值。根据待测点的三维坐标, 可以构建约束方程

$$\rho_i(X_i^w) = X_i^w - [\gamma r_{i1} + (r_{i2} - r_{i1})], \quad (6)$$

式中  $\gamma$  为比例因子。在实际构建约束方程时, 根据两点式直线方程构建三个子方程, 并将三个子方程

求和构建一个约束方程。因此,构建约束光束法平差的模型为

$$\begin{cases} \min \sum_i (\Delta_{ix}^2 + \Delta_{iy}^2) \\ \text{subject to } \rho_i(X_i^w) = X_i^w - [\gamma_{i1} + (r_{i2} - r_{i1})] \end{cases}, \quad (7)$$

令

$$\alpha_i = \left[ \frac{\partial g_i}{\partial F_x}, \frac{\partial g_i}{\partial F_y}, \frac{\partial g_i}{\partial C_x}, \frac{\partial g_i}{\partial C_y}, \frac{\partial g_i}{\partial k_0}, \frac{\partial g_i}{\partial k_1}, \frac{\partial g_i}{\partial k_2}, \frac{\partial g_i}{\partial k_3}, \frac{\partial g_i}{\partial k_4}, \frac{\partial g_i}{\partial X_1^w}, \frac{\partial g_i}{\partial X_2^w} \dots \frac{\partial g_i}{\partial X_3^w} \right]$$

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_i]^T, \quad \beta = \left[ \frac{\partial \rho_1}{\partial X_1^w}, \frac{\partial \rho_2}{\partial X_2^w} \dots \frac{\partial \rho_i}{\partial X_i^w} \right]^T \quad \begin{bmatrix} \alpha^T \alpha & \beta^T \\ \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{\omega} \\ \Delta \kappa \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g_i(\bar{\omega}_n) \\ \rho_i(\kappa_n) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$\bar{\omega} = [F_x, F_y, C_x, C_y, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, X_1^w, X_2^w \dots X_3^w]^T$  为平差参数矢量。根据法方程(8)式,可以求得改正数  $\Delta \bar{\omega}$  和  $\Delta \kappa$ ,通过迭代得到的平差参数矢量参数为  $\bar{\omega}_{n+1} = \bar{\omega}_n + \Delta \bar{\omega}$ ,  $\kappa$  的初始值取零向量,而其他参数的初始值采用标定的结果和三角交会的坐标。经过有限次迭代,设置收敛标准,优化面形。约束光束法平差的几何意义可以概括为:通过摄像机内外参数和待测点坐标的同时调整,且待测点坐标只能在其对应的入射光线上调整,使重投影误差最小。

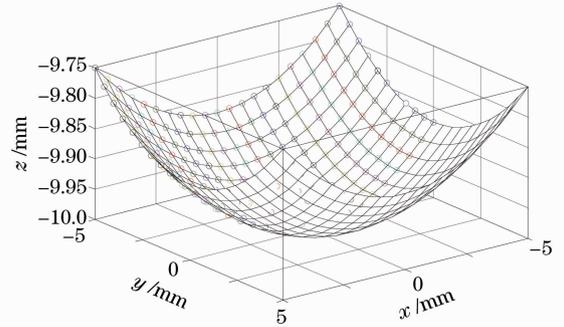


图 2 理想抛物面模拟面形

Fig. 2 Simulated ideal paraboloid shape

#### 4 数值模拟及讨论

数值模拟研究无约束光束法平差与约束光束法平差在面形精度提高方面的表现。在进行数值模拟时,利用计算机生成的抛物面作为待测面。为了简化成像过程,将摄像机放置在抛物面的焦点上,那么其成像面上每一个像点对应的入射光线与抛物面的轴向平行。模拟成像过程时,摄像机的主点为[323.67, 284.21],等效焦距为[1255.01, 1513.68],畸变系数为[-0.27, 0.07, -0.0034, 0.0009],旋转角在[0,  $\pi/4$ ]随机产生,整个数值模拟中,以像素为基本单位。产生的抛物面如图 2 所示,由于成像参数的限制,只有部分点在成像面内,对应于图 2 中的圆圈点。在摄像机标定模拟方面,利用 10 幅增加一定方差的高斯噪声图像进行标定,然后固定摄像机于抛物面的焦点上,利用标定的摄像机评估摄像机与自由参考系的位姿关系,评估位姿的图像也加了相同程度的噪声,然后进行三角交会,最后分别使用不带约束和带约束的光束法平差优化重建三维点。图 3 显示了两种光束法平差优化三维点的对比图,横坐标为三角交会后统计的方差,纵坐标为光束法平差后的重投影误差的方差。图 3 表明,增加了几何约束的光束法平差结果要明显好于无约束的光束法平差结果。图 4 和图 5 分别显示了光束法平差迭代停止时其法方程(8)式的系数矩阵分布,其矩阵为大型稀疏矩阵,图

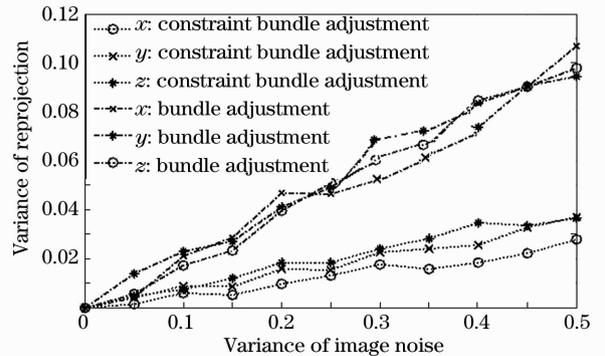


图 3 光束法平差对比图

Fig. 3 Comparison of bundle adjustment

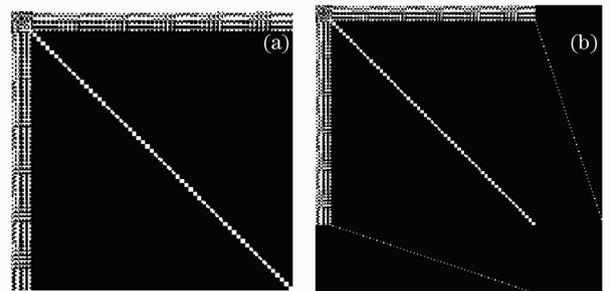


图 4 (a)无约束光束法平差法方程系数矩阵分布; (b)约束光束法平差法方程系数矩阵分布

Fig. 4 Distribution of normal coefficient equation. (a) Unconstraint bundle adjustment; (b) constraint bundle adjustment

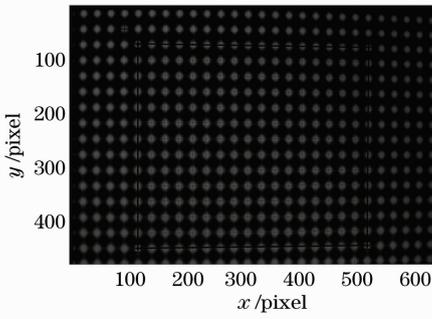


图5 用于摄像机位姿评估的参考点

Fig. 5 References used for camera pose estimation

中的黑色区域表示系数为零。由于参与光束法平差的抛物面点数为60,无约束光束法平差方程的系数矩阵维度为 $195 \times 195$ ;对于约束光束法平差,比

表1 摄像机标定结果

Table 1 Camera calibration results

Focal length /pixel	Principle point /pixel	Reprojective error /pixel	Distortion coefficient /pixel
$1255.07 \pm 0.31$	$323.58 \pm 0.11$	0.013	[-0.2601, 0.0732, -0.00031, 0.0]
$1513.35 \pm 0.24$	$284.32 \pm 0.38$	0.012	

对摄像机与自由参考系间的位姿进行评估,用于位姿评估的二维正弦条纹图如图5所示,图中的十字表示用于位姿评估的特征点,根据全局位姿评估算法<sup>[14]</sup>,评估结果

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -0.0034 & 0.9953 & 0.0968 \\ 0.9994 & 0.00031 & 0.0322 \\ 0.0321 & 0.09682 & -0.9948 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = [-53.569, -46.431, 345.274]$$

完成摄像机与自由参考系的位姿评估后,将液晶显示器反向,反向的过程需要保证与自由参考系平行且像素对应。实际测量实验中,被测对象为口径约为4 cm的凹面镜,其实验结构图如图6所示,利用电控平移台准确控制液晶显示器移动的距离,其中 $d_1=36$  mm,  $d_2=40$  mm。在寻找相位同名点时,液晶显示器需要在两个不同的位置分别显示横竖条纹,实际显示的条纹周期为12 pixel。液晶显示器在第一次移动的位置上横竖条纹的绝对相位分布如图7所示,将横竖绝对相位椭圆区域内同一个像素点的绝对相位转化为液晶显示器上两个方向的坐标,就可以找到摄像机上图像坐标在液晶显示器上的坐标同名点,从而确定反射光线和入射光线。图8(a)显示了三角交会未经过光束法平差的镜面面形测量结果,图8(b)显示了测量结果与拟合的标准面形误差,误差分布主要集中在0.1~0.2 mm之间。三角交会误差较大的主要原因是实际实验中,液晶显示器反向后与自由参考系很难做到标准的像

无约束的情况增加60个约束条件,其法方程的系数矩阵维度为 $255 \times 255$ 。

## 5 实验

摄像机标定采用基于傅里叶条纹分析的摄像机标定方法<sup>[12]</sup>。实验中,采用JAI CV-A50黑白摄像机拍摄条纹,摄像机的分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ ,像素尺寸为 $8.3 \mu\text{m} \times 8.6 \mu\text{m}$ 。采用Philips 170S87液晶显示器显示条纹,分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$ ,显示器的点间距为0.264 mm。进行摄像机标定时,液晶显示器显示的是二维正弦条纹,条纹周期为24 pixel。利用15幅条纹图像完成标定。摄像机参数标定结果如表1所示。

素对应。图9(a)显示了经过约束光束法平差后镜面面形的测量结果,图9(b)显示了约束平差后与拟合的标准面形的误差,误差分布主要集中在0.06~0.07 mm。很明显,在实际实验中,尽管由于实验系统的精密控制不足而使测量的精度有待提高,但是可以肯定,经过光束法平差后的面形误差明显减小,这主要是因为平差的优化步骤中,系统的标定误差,图像噪声误差等有待测点受约束的情况下进行了整体优化。在实际应用中,由于光束法平差属于局部优化算法,其收敛性取决于初始值的精度。在高精密机械控制下的相位偏折术的测量精度是比较高的<sup>[4]</sup>,光束法平差对进一步提高测量精度会有一些的帮助。



图6 实验装置实物图

Fig. 6 Photo of the experiment setup used to camera pose estimation

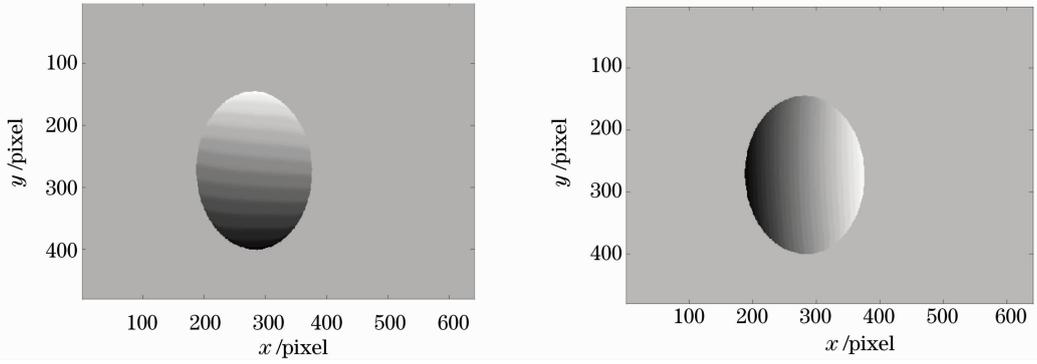


图 7 (a)横条纹绝对相位分布;(b)竖条纹绝对相位分布

Fig. 7 Absolute phase distribution of horizontal (a) and vertical (b) deformed fringes

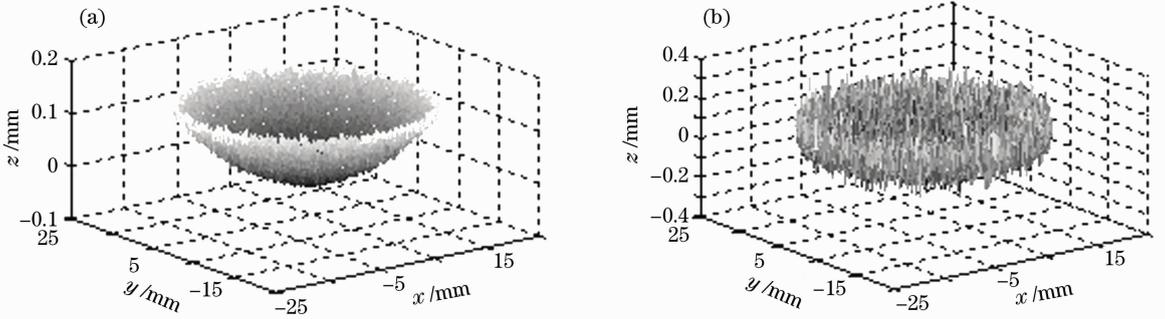


图 8 (a)三角交会的面形分布;(b)与标准面形的误差分布

Fig. 8 (a) Specular shape by triangulation; (b) error distribution against the standard shape

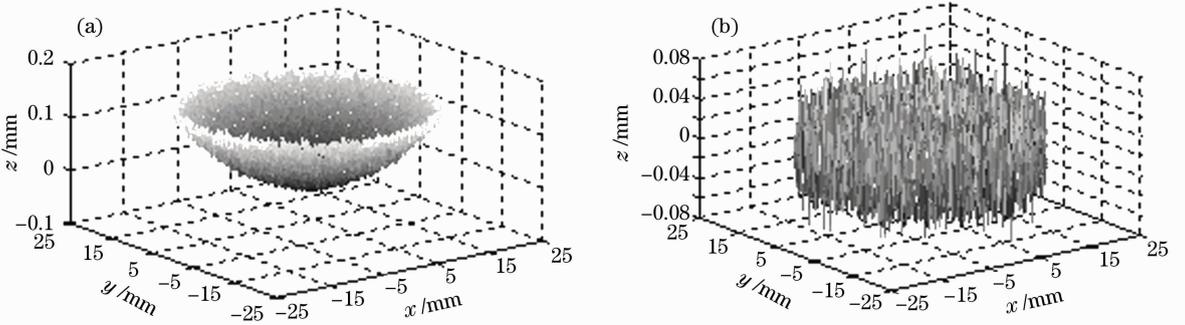


图 9 (a)约束光束法平差后的面形分布;(b)与标准面形的误差分布

Fig. 9 (a) Specular shape after constraint bundle adjustment; (b) error distribution against the standard shape

## 6 结 论

提出在相位测量偏折术中引入自由参考系,并在自由参考系内对测量结果进行光束法平差,提高测量精度。光束法平差是将测量中的摄像机内参数,外参数和待测点三维坐标作为统一优化参数,以重投影误差作为代价函数进行同时优化,其优化过程对高斯噪声具备统计意义。在实际实验中,测量精度有待提高,液晶显示器反向时要求与自由参考系绝对平行和像素对应,这成为影响本文测量方法精度的主要因素。由于液晶显示器的液晶层具有一

定的厚度和折射率,其投射到非球面镜的过程经过了液晶的折射,其同名点定位受到了一定的影响。此外,摄像机图像坐标特征点虽然具有空间分辨率高的优点,但是属于像素级,对特征点进行亚像素特征定位,会提高同名点定位的精度。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Li. Advanced Optical Manufacturing Technology [M]. Beijing: Science Press, 2001. 23~24  
杨 力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 23~24
- 2 J. Balzer, S. Werling. Principles of shape from specular

- reflection [J]. *Measurement*, 2010, **43**(10): 1305~1317
- 3 L. Huang, C. Ng, A. Asundi. Dynamic three-dimensional sensing for specular surface with momoscopic fringe reflectometry [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(13): 12809~12814
- 4 M. C. Knauer, J. Kaminski, G. Hausler. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular freeform surfaces[C]. *SPIE*, 2004, **5457**: 366~376
- 5 T. Bothe, W. Li, C. V. Kopylow *et al.*. High resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [C]. *SPIE*, 2004, **5457**: 411~422
- 6 S. Savarese, M. Chen, P. Perona. Local shape from mirror reflections [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, **64**(1): 31~67
- 7 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. 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
- 8 Tang Yan, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror by advanced phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 965~969  
唐燕, 苏显渝, 刘元坤等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 965~969
- 9 Zhao Wenchuan, Xu Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1338~1341  
赵文川, 苏显渝, 刘元坤等. 基于相位偏折术的非球面镜检测方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1338~1341
- 10 Zhao Wenchuan, Fan Bin, Wu Fan *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
- 11 Yü Qifeng, Shang Yang. Videometrics. Drinciples and Researches [M]. Beijing: Science Press, 2009. 47~48  
于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 47~48
- 12 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Multicamera calibration by FTP technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1734~1737  
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于傅里叶条纹分析的多摄像机标定方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1734~1737
- 13 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **22**(11): 1330~1334
- 14 Xiao Yongliang, Su Xianyu, Chen Wenjing. Fringe inverse videogrammetry based on global pose estimation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0808003  
肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于全局位姿评估的条纹反向视觉测量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0808003
- 15 S. Zhang, P. S. Huang. Novel method for structure light system calibration [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(8): 083601
- 16 X. Su, W. Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Opt. & Laser in Engng.*, 2004, **42**(3): 245~261
- 17 S. Zhang, S. T. Yau. High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2644~2649

栏目编辑：李文喆