

一种立体相位偏折测量系统标定方法

刘方明, 林嘉睿, 孙岩标, 郝继贵*

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 相位偏折测量系统的标定是影响其测量精度的重要因素。针对立体相位偏折测量系统中显示屏和相机位姿关系标定困难的问题, 研究了一种新的系统标定方法。通过在显示屏上构造特征点, 引入摄影测量系统作为显示屏坐标系与相机坐标系的转换中介, 实现了显示屏坐标系与相机坐标系转换关系的高精度标定。搭建立体偏折系统进行标定精度验证, 得到的重建表面平面度结果小于 $1\ \mu\text{m}$, 这证明了本标定方法的可行性和有效性。

关键词 测量; 标定; 相位偏折术; 立体视觉; 镜面物体; 摄影测量

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.051202

Calibration Method for Stereo Phase Measuring Deflectometry System

Liu Fangming, Lin Jiarui, Sun Yanbiao, Zhu Jigui*

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The calibration of the phase measuring deflectometry (PMD) system is an important factor affecting the accuracy. Aiming at the difficulty of the calibration of posture relationship between the screen and camera in PMD system, a new system calibration method is proposed. By constructing retro-reflectors on the screen, a photogrammetry system is introduced as the medium of transformation between the screen coordinate system and the camera coordinate system. Therefore, a high precision calibration of geometric parameters is achieved. The calibration accuracy is verified using a stereo PMD system. The experimental results show that the reconstruction surface flatness is less than $1\ \mu\text{m}$, which demonstrates that the proposed method is feasible and effective.

Key words measurement; calibration; phase measuring deflectometry; stereo vision; specular object; photogrammetry

OCIS codes 120.5700; 120.2650; 150.1488; 110.5200

1 引言

随着航空工业、汽车生产、精密光学、模具开发等行业制造技术的不断提升, 如何快速可靠实现物体三维形貌的测量成为保证项目开发进度和产品制造质量的关键。对于漫反射物体, 已有包括条纹投影法^[1-4]在内的多种成熟的手段可以实现快速精确测量, 但对于镜面物体, 则缺乏有效的测量方式。传统的镜面测量方法主要包括接触式三坐标测量法和非接触式光学干涉法^[5]。上述测量方法测量速度慢且成本高昂, 难以满足现代制造业对镜面、类镜面物

体日益增长的测量需求。

为解决镜面物体测量需求日益增长和测量手段相对落后的矛盾, Knauer 等^[6-13]将相位偏折术 (PMD) 引入镜面物体测量。相位偏折术具有高精度、非接触、测量范围大、数据实时性强等优点, 近年来得到了广泛的关注与研究。其中, 基于双目视觉的立体相位偏折术^[14-15]克服了传统相位偏折法中测量面型受限、相位存在多义性误差等问题, 适合工业现场复杂环境下的面型测量。但如何实现相位偏折系统的精确标定, 成为了影响其测量精度的关键。相位偏折系统标定分为相机标定和几何参数标定两

收稿日期: 2019-08-14; 修回日期: 2019-08-22; 录用日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(51775380, 41701522)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51721003)、天津市自然科学基金(17JCQNJC07500)

* E-mail: jigui@tju.edu.cn

部分。相机标定即双目相机内外参数的标定,目前已有包括张正友标定法在内的多种经典标定手段^[16-18],该类技术相对成熟,可较好地解决相机标定问题。但针对系统几何参数的标定,即显示屏-相机相对位姿关系的标定,尚缺少统一高效的标定手段。现有主流标定方法根据所使用的标定装置分为平面镜法^[19-21]和辅助相机法^[22]两大类。平面镜法通过平面镜反射拍摄得到显示屏的虚像,若想实现二者之间的标定,还需通过其他复杂手段获取平面镜在空间中相对于相机的位姿,标定操作繁琐。此外平面镜精度对标定结果有直接影响,在进行大视场标定时,采用大型平面镜加工精度难以保证,无法实现高精度标定。辅助相机法则使用辅助相机和标定板进行标定,要求辅助相机能够同时拍摄到标定板和显示屏。在标定相位偏折系统时,标定板摆放位置受限,与显示屏平面夹角过小,导致辅助相机拍摄二者时,拍摄角度过大,图像质量不佳且标志点提取偏心误差显著^[23-24],难以保证标定精度。

为实现立体偏折系统的大视场、高精度标定,本文研究了一种利用摄影测量方法的新的几何参数标定方法。该方法通过在显示屏上构造特征点,引入摄影测量系统作为显示屏坐标系和相机坐标系的转换中介,建立起显示屏坐标系和相机坐标系的旋转平移关系,可高效实现显示屏-相机位姿关系标定,满足大视场和高精度标定需求。本文将结合立体相位偏折测量原理,详细阐述所提标定方法的原理和关键技术。最后通过实验验证了本文所述标定方法的可行性和有效性。

2 立体相位偏折测量原理

相位偏折系统利用镜面反射特性,采集经被测物表面调制的显示屏虚像。如图1所示,立体相位偏折测量系统通常由两台工业相机、一台液晶显示器(LCD)及相应配套设施组成。显示屏显示相移条纹图像,两相机对焦到被测物表面,采集由被测物镜面反射后的条纹虚像。利用相位提取算法,可分别计算得到显示屏显示图像和两相机采集图像的相位分布。

由图1可以看出,由于镜面物体的反射特性,相机1(位于像面点 P_1)经由物体上 S 点采集得到显示屏上 Q_1 点的相位值,相机2(位于像面点 P_2)经由 S 点采集得到显示屏上 Q_2 点的相位值,两相机采集的经由物体表面同一点反射的条纹相位不同,无法利用相位相等实现同名点匹配。考虑到物体上

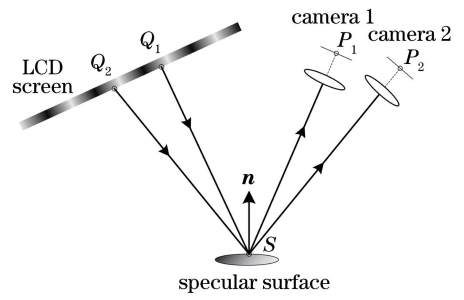


图1 立体相位偏折测量系统示意图
Fig. 1 Schematic of stereo phase measuring deflectometry system

同一点的法向量 n 具有唯一性,入射光线和反射光线角平分线即为法向量,通过确定入射光线和反射光线向量,即可利用法向量约束实现双目匹配。

如图2所示,已知双目相机内外参数及显示屏与相机1坐标系的转换关系,以相机1坐标系为世界坐标系,由转换关系可求得显示屏上任意一点的世界坐标。利用相位相等原理,匹配得到相机1像面上点 P_1 对应的显示屏上的点 Q_1 。假设被测点 S 坐标已知,将 P_1 、 Q_1 、 S 点坐标用世界坐标表示,可分别计算得到相机1的归一化入射光线向量 $\overrightarrow{Q_1S}$ 、反射光线向量 $\overrightarrow{SP_1}$ 。利用(1)式可以计算得到点 S 的法向量 n_1 :

$$n_1 = \frac{\overrightarrow{SP_1} - \overrightarrow{Q_1S}}{\|\overrightarrow{SP_1} - \overrightarrow{Q_1S}\|} \quad (1)$$

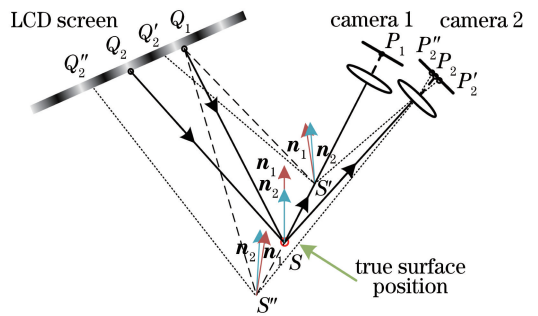


图2 立体相位偏折测量相机匹配原理
Fig. 2 Camera matching principle of stereo phase measuring deflectometry

根据双相机内外参,结合相机小孔成像模型将 S 点反向投影至相机2的像平面上得到点 P_2 。与相机1一致,可匹配得到点 P_2 对应的屏幕上的点 Q_2 ,进一步计算得到相机2的入、反射光线及 S 点的法向量 n_2 。如图2所示,通过不断假设一系列 S 点的坐标值(如 S' 、 S 、 S''),可计算得到对应的相机2像面点(如 P_2' 、 P_2 、 P_2'')、显示屏点(如 Q_2' 、 Q_2 、 Q_2'')和一系列法向量 n_1 、 n_2 。

由于物体上任一点的法向量是唯一确定的,仅当 S 点坐标与真实值相等时,向量 n_1 、 n_2 重合。故通过判定由两相机求取的法向量是否重合即可确定 S 点的坐标及其法向量。利用法向量求取被测镜面梯度信息,通过积分重建即可恢复被测面三维信息^[25-26]。

由上述立体相位偏折测量原理可知,获取双目相机内外参数及显示屏坐标系与相机坐标系的转换关系是实现相位偏折测量的必要环节,即需要分别实现双相机及显示屏-相机几何参数的高精度标定。

3 系统标定原理

立体相位偏折测量系统标定包括相机标定和几何参数标定两部分。针对系统相机标定问题已有多种成熟的标定手段,其中,最常用的标定方法是张正友标定法^[16]。张正友标定法采用平面标定板(如棋盘格、圆点阵列等),只需要在几个特定位姿拍摄标定板,提取特征点后即可解算出双相机内外参数,操作简单,技术成熟,标定精度高,能够较好地解决双相机内外参数标定问题。因此,本文的研究重点聚焦在系统几何参数的高精度标定方面。

系统几何参数的标定,即显示屏和相机相对位姿关系的标定,本质上就是求解显示屏坐标点位置矢量 O_{xyz_LCD} 与相机坐标点位置矢量 O_{xyz_cam} 之间的转换矩阵 ${}^{O_{xyz_cam}}[R|T]_{O_{xyz_LCD}}$,即

$$O_{xyz_cam} = {}^{O_{xyz_cam}}[R|T]_{O_{xyz_LCD}} \cdot O_{xyz_LCD} \quad (2)$$

由于显示屏位于相机视场之外,相机无法直接获取显示屏图案,实现二者坐标系的直接标定,故需要借助其他途径将二者联系起来。本文引入摄影测量系统作为联系二者坐标系的转换中介,如图 3 所示,通过确定显示屏坐标系与摄影测量坐标系的转换关系、摄影测量坐标系与相机坐标系的转换关系,间接实现显示屏坐标系与相机坐标系转换关系的标定。

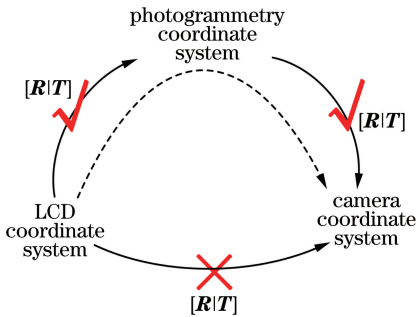


图 3 坐标系转换关系示意图

Fig. 3 Schematic of transformation relationships among different coordinate systems

由上述分析可知,若想利用摄影测量系统作为显示屏坐标系与相机坐标系的转换中介,必须分别实现摄影测量系统与二者的转换标定。摄影测量系统与相机的转换标定可直接利用标定板实现,相对简单;但由于显示屏亮度有限,摄影测量系统无法直接测量显示屏显示的图案特征,二者之间的标定存在一定的困难。若想利用摄影测量系统作为转换中介,实现立体相位偏折测量系统几何参数的标定,必须解决这一难题。为此,本文在显示屏边缘构造了若干反光特征点,该特征点特征清晰、与摄影测量用特征点具有相同的光学性质。通过提前获取这些特征点在显示屏坐标系下的坐标,利用其代替显示屏显示的图案特征,满足了摄影测量需求,解决了这一难题,实现了显示屏坐标系与摄影测量坐标系的转换标定和最终的系统几何参数标定。下文将分别介绍特征点构造方法和具体标定原理。

3.1 特征点构造

如图 4 所示,双目相机内外参数已标定。在显示屏边缘构造若干反光特征点,该特征点与摄影测量用特征点光学性质一致。显示屏显示标定图案,标定图案特征点在显示屏坐标系下的齐次坐标矩阵 M_{c_LCD} 已知。

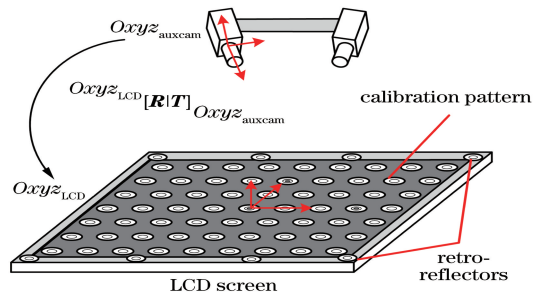


图 4 特征点在显示屏坐标系下的坐标标定

Fig. 4 Coordinate calibration for retro-reflectors in screen coordinate system

双目相机拍摄位置固定,通过设置不同的曝光值进行拍摄,可有效解决构造特征点与显示屏标定图案亮度不一致的问题。分别提取得到构造特征点和标定图案特征点在相机坐标系下的齐次坐标矩阵 M_{r_auxcam} 、 M_{c_auxcam} ,则根据标定图案特征点在相机坐标系下的齐次坐标 M_{c_auxcam} 和在显示屏坐标系下的齐次坐标 M_{c_LCD} ,经刚体变换^[27]可得相机坐标系到显示屏坐标系的转换矩阵 ${}^{O_{xyz_LCD}}[R|T]_{O_{xyz_auxcam}}$:

$${}^{O_{xyz_LCD}}[R|T]_{O_{xyz_auxcam}} = \min \{ M_{c_LCD} - {}^{O_{xyz_LCD}}[R|T]_{O_{xyz_auxcam}} \cdot M_{c_auxcam} \} \quad (3)$$

进一步地,经坐标系转换可求得构造特征点在显示屏坐标系下的齐次坐标矩阵 \mathbf{M}_{r_LCD} :

$$\mathbf{M}_{r_LCD} = {}^{Oxyz_LCD}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_auxcam} \cdot \mathbf{M}_{r_auxcam} \quad (4)$$

通过获取特征点在显示屏坐标系下的坐标,将利用显示标定图案确定显示屏坐标系与摄影测量坐标系转换关系的问题,转化为利用特征点确定显示屏坐标系与摄影测量坐标系转换关系的问题。所构造的特征点特征清晰,光学性质与摄影测量用特征点一致,有效保证了显示屏坐标系与摄影测量坐标系转换关系的高精度标定,且标定完成后,特征点在显示屏坐标系下的坐标固定不变,可作为系统固有参数重复使用,需要重新标定时,仅需利用摄影测量系统直接拍摄特征点,即可实现显示屏坐标系与摄影测量坐标系的高精度标定。

3.2 几何参数标定

图5为系统几何参数标定示意图。坐标系 $Oxyz_cam$ 为相机坐标系,坐标系 $Oxyz_LCD$ 为显示屏坐标系,坐标系 $Oxyz_phg$ 为摄影测量系统坐标系,双相机系统与显示屏相对位姿固定。

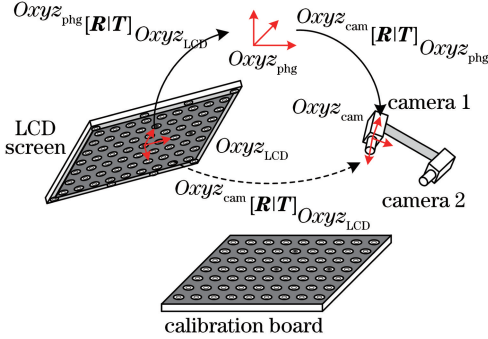


图5 显示屏-相机位姿标定原理示意图

Fig. 5 Schematic of posture calibration of screen and camera

为确定显示屏坐标系 $Oxyz_LCD$ 与相机坐标系 $Oxyz_cam$ 的转换关系,需分别确定显示屏坐标系 $Oxyz_LCD$ 与摄影测量坐标系 $Oxyz_phg$ 的转换关系 ${}^{Oxyz_phg}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_LCD}$ 和摄影测量坐标系 $Oxyz_phg$ 与相机坐标系 $Oxyz_cam$ 的转换关系 ${}^{Oxyz_cam}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_phg}$ 。

利用摄影测量系统进行拍摄,分别提取得到显示屏上构造特征点和标定板特征点在摄影测量坐标系下的齐次坐标矩阵 \mathbf{M}_{r_phg} 和 \mathbf{M}_{c_phg} 。利用 \mathbf{M}_{r_phg} 结合构造特征点在显示屏坐标系下的坐标 \mathbf{M}_{r_LCD} ,经刚体变换^[27]可得显示屏坐标系到摄影测量坐标系的转换矩阵 ${}^{Oxyz_phg}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_LCD}$:

$$\min\{\mathbf{M}_{r_phg} - {}^{Oxyz_phg}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_LCD} \cdot \mathbf{M}_{r_LCD}\} \quad (5)$$

利用双目相机拍摄标定板,提取得到标定板特征点坐标在相机坐标系下的齐次坐标矩阵 \mathbf{M}_{c_cam} ,结合标定板特征点在摄影测量坐标系下坐标矩阵 \mathbf{M}_{c_phg} ,经刚体变换^[27]可得摄影测量坐标系到相机坐标系的转换矩阵 ${}^{Oxyz_cam}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_phg}$:

$$\min\{\mathbf{M}_{c_cam} - {}^{Oxyz_cam}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_phg} \cdot \mathbf{M}_{c_phg}\} \quad (6)$$

进一步地,求解得到显示屏坐标系到相机坐标系的转换矩阵 ${}^{Oxyz_cam}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_LCD}$:

$${}^{Oxyz_cam}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_LCD} = {}^{Oxyz_cam}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_phg} \cdot {}^{Oxyz_phg}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]_{Oxyz_LCD} \quad (7)$$

基于以上原理,实现了基于摄影测量系统的立体相位偏折测量系统几何参数标定。

4 实验验证

为验证本文所提标定方法是否可行有效,进行了一系列相关实验。图6为获取特征点在显示屏坐标系下坐标的实验图。其中,双目相机分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$,镜头焦距为 28 mm ;显示屏尺寸为 23.8 inch ($1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$),分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $0.2745 \text{ mm} \times 0.2745 \text{ mm}$ 。

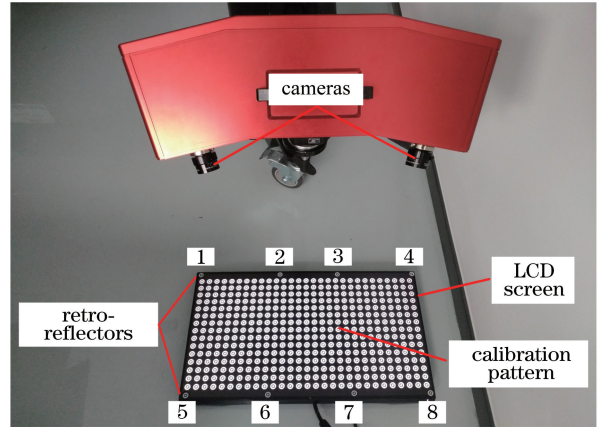


图6 特征点坐标标定实验图

Fig. 6 Experimental setup diagram of coordinate calibration of retro-reflectors

双相机由机械结构固连,提前利用张正友标定法,标定得到两相机内参,结果如表1所示。

两相机旋转矩阵 \mathbf{R} 、平移矩阵 \mathbf{T} 的标定结果为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9180 & -0.001301 & 0.3966 \\ -0.002344 & 0.9999 & 0.008709 \\ -0.3965 & -0.008924 & 0.9180 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} = [-296.9700 \quad 6.43404 \quad 53.2381] \end{array} \right. \quad (8)$$

表 1 相机内参标定结果

Table 1 Calibration results of intrinsic parameters of cameras

Parameter	Camera 1	Camera 2
Focal length (f_x, f_y) /pixel	(5596.57, 5596.34)	(5591.55, 5591.95)
Principal point coordinate /pixel	(994.89, 1046.91)	(1014.24, 999.845)
Radial distortion /pixel	(-0.04581, -0.1153)	(-0.04481, -0.1212)
Tangential distortion /pixel	(-2.217×10^{-7} , -3.122×10^{-4})	(0.0001418, 0.0001599)
Back-projection error /pixel	0.084	0.083

通过设定不同的曝光值,控制双目系统在同一位置进行拍摄,分别提取得到显示屏显示标定图案特征点及构造特征点在相机坐标系下的坐标,经处理后得到各构造特征点在显示屏坐标系下的坐标,如表 2 所示。

表 2 特征点在显示屏坐标系下的坐标

Table 2 Coordinates of retro-reflectors in screen coordinate system

Target point	x/mm	y/mm	z/mm
Point 1	-257.4249	144.4859	0.9548
Point 2	-64.1152	144.0392	1.2618
Point 3	77.9880	143.8510	0.9720
Point 4	261.7679	145.0059	0.5220
Point 5	-254.9611	-144.7364	0.8096
Point 6	-83.1235	-144.4372	1.0634
Point 7	97.9883	-143.0992	1.0906
Point 8	258.8036	-144.2348	0.9420

获取特征点坐标后,将双目系统与显示屏固定,组成立体相位偏折测量系统。采用 V-STARS S8 摄影测量系统,按图 7 所示搭建标定系统。

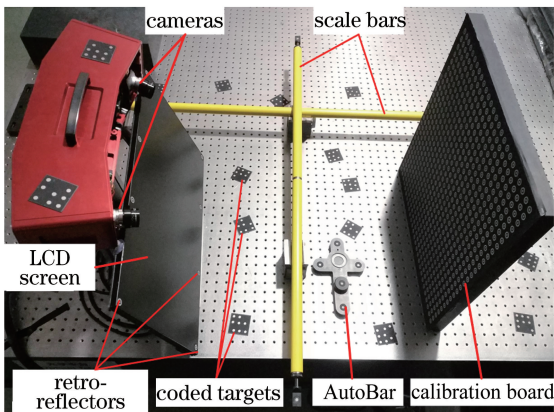


图 7 系统标定图

Fig. 7 Picture of system calibration

在系统周围布置若干摄影测量用编码块和基准尺,控制双目相机及摄影测量系统分别采图,经刚体变换后得到显示屏坐标系到相机坐标系的转换矩阵

$${}^{O_{xyz}_{cam}}[R | T]_{O_{xyz}_{LCD}}:$$

$${}^{O_{xyz}_{cam}}[R | T]_{O_{xyz}_{LCD}} =$$

$$\begin{bmatrix} -0.9755 & 0.08499 & -0.2028 & 79.11 \\ 0.01826 & -0.8878 & -0.4598 & 161.476 \\ -0.2191 & -0.4522 & 0.8645 & 103.546 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\circ}$$

(9)

为验证本标定方法是否可行有效,利用上述标定数据,对一组标准量块表面进行了实际测量,实验装置如图 8 所示。

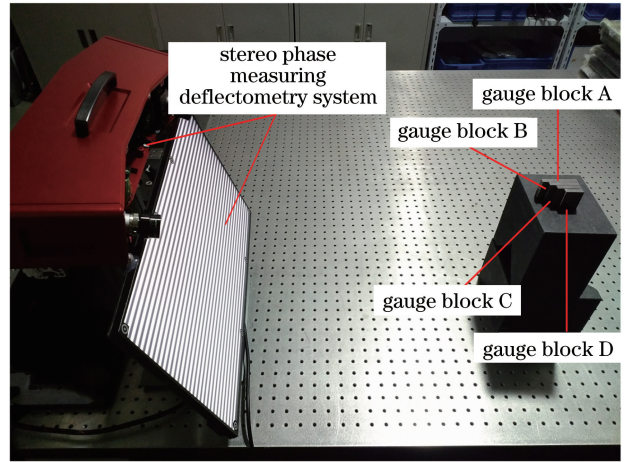


图 8 测量实验图

Fig. 8 Picture of measurement experiment

重建得到各量块表面点云,结果如图 9 所示。拟合标准平面,计算重建面型平面度,结果如图 10 所示。由图 10 可以看出,4 块量块表面重建的平面度结果均在 $1 \mu\text{m}$ 以下。为进一步验证本测量系统测量精度的可靠性,证明本文所提标定方法的可行性,利用该系统对标准平面镜进行了测量。该平面镜平面度为 316 nm (平面度为 $\lambda/2$, λ 为 632 nm 红光波长),实物图如图 11 所示,面型重建结果及面型重建误差如图 12(a)、(b)所示。

由图 12 可以看出,平面镜面型重建误差大部分集中在 400 nm 以内,仅平面镜被夹持部分误差达到 700 nm ,整体重建误差保持在 $1 \mu\text{m}$ 以下,证明了本测量系统可实现高精度面型测量。由于测量系统

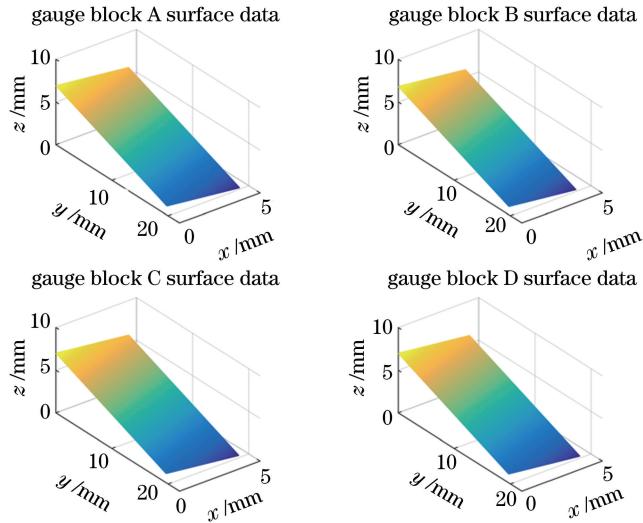


图 9 量块面型重建结果

Fig. 9 Surface reconstruction results of gauge blocks

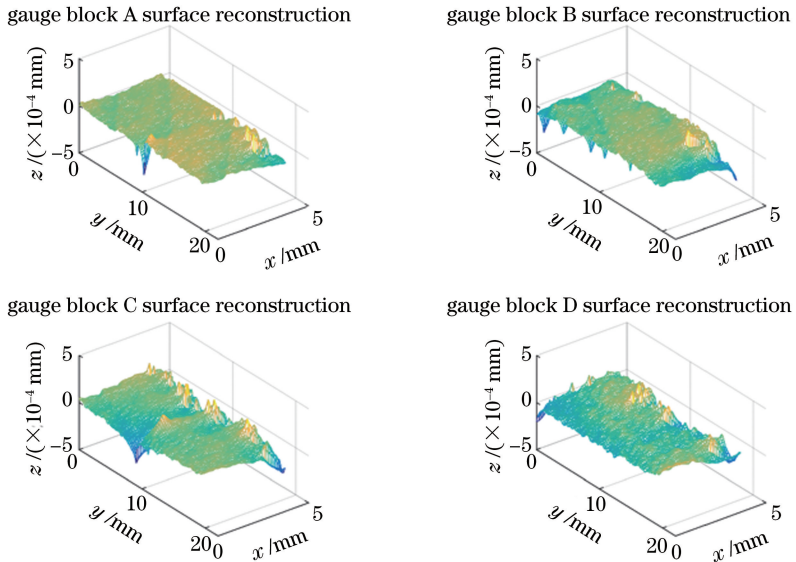


图 10 量块表面重建平面度结果

Fig. 10 Reconstruction flatness of gauge block surfaces

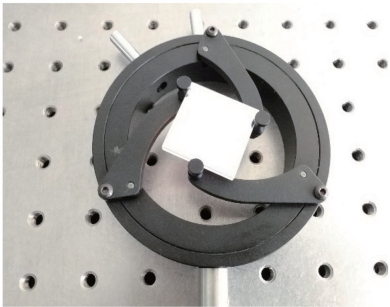


图 11 被测平面镜实物图

Fig. 11 Picture of mirror to be measured

精度受相机标定精度、几何参数标定精度和面型重建算法等多种因素共同影响,几何参数标定的好坏

也将直接影响面型重建结果。本测量系统能够达到微米、亚微米量级的测量精度,也证实了所提标定方法的有效性和可行性。

5 结 论

在立体相位偏折测量原理的基础上,研究了一种利用摄影测量系统的几何参数标定方法。通过在显示屏边缘构造反光特征点,解决了摄影测量系统无法直接拍摄提取显示屏显示图案特征的问题,进而以摄影测量系统为中介,实现了显示屏坐标系到相机坐标系的转换标定。所提方法克服了传统方法存在的弊端,满足了高精度、大视场标定需求,且

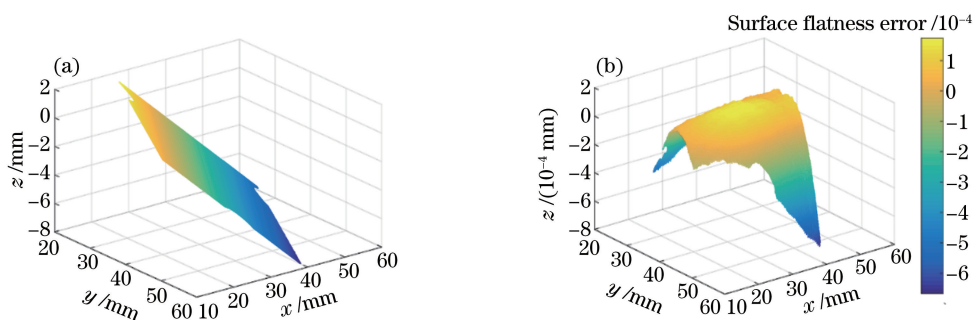


图 12 平面镜测量结果。(a)平面镜面型重建结果;(b)平面镜平面度误差

Fig. 12 Measurement results of mirror. (a) Result of mirror surface reconstruction; (b) result of surface flatness error

操作简单,对于环境要求低,有效适用于工业现场标定。利用该方法标定立体相位偏折测量系统后,对一组标准量块和一个标准平面镜表面进行了实际测量,重建表面平面度均不超过 $1 \mu\text{m}$,这表明本系统可进行高精度测量,证明了本标定方法的有效性和可行性。

参 考 文 献

- [1] Yue H M. Research on three-dimensional profilometry based on temporal phase unwrapping [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005: 46-80.
岳慧敏. 基于时间相位展开的三维轮廓测量研究 [D]. 成都: 四川大学, 2005: 46-80.
- [2] Wang L Y, Da F P. Three-dimensional shape measurement technique based on complementary color-encoded fringe projection [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612004.
王露阳, 达飞鹏. 基于互补色编码条纹投影的三维形貌测量方法 [J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612004.
- [3] Yang F J, Geng M, Dai M L, et al. 3D shape measurement of discontinuous objects based on single frequency fringe projection in 4-step phase shifting profilometry [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(8): 1535-1538.
杨福俊, 耿敏, 戴美玲, 等. 基于单频四步相移条纹投影的不连续物体三维形貌测量 [J]. 光电子·激光, 2012, 23(8): 1535-1538.
- [4] Yang S R. Method and technology for robotic measurement of complex surface on large-scale components [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017: 101-114.
杨守瑞. 大型构件复杂曲面自动化测量方法与技术 [D]. 天津: 天津大学, 2017: 101-114.
- [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.
- [6] Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5457: 366-376.
- [7] 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.
- [8] Tang Y, Su X Y, Liu Y K, et al. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection [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 W C, Su X Y, Liu Y K, et al. Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry [J]. Chinese Journal of 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] 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] Yue H M, Li R, Pan Z P, et al. High quality fringe patterns captured from phase measuring

- deflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1112004.
岳慧敏, 李绒, 潘志鹏, 等. 相位测量偏折术中高质量条纹的获取[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1112004.
- [12] 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.
- [13] Shao S C, Tao X P, Wang X K. On-machine surface shape measurement of reflective mirrors by ultra-precision turning based on fringe reflection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071203.
邵山川, 陶小平, 王孝坤. 基于条纹反射的超精密车削反射镜的在位面形检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071203.
- [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] Lowitzsch S, Kaminski J, Knauer M C, et al. Vision and modeling of specular surfaces [J]. *Vision Modeling & Visualization*, 2005, 1: 479-486.
- [16] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [17] Datta A, Kim J S, Kanade T. Accurate camera calibration using iterative refinement of control points[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops, September 27-October 4, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE, 2009: 1201-1208.
- [18] Xue J P, Su X Y. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0115001.
薛俊鹏, 苏显渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0115001.
- [19] Zhou T, Chen K, Wei H Y, et al. Improved system calibration for specular surface measurement by using reflections from a plane mirror[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 7018-7028.
- [20] Xiao Y L, Su X Y, Chen W J. Fringe reflection photogrammetry based on pose estimation with free planar mirror reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512003.
肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于自由镜面反射位姿评估的条纹反射摄影测量[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512003.
- [21] Wu Y X. Study on specular surface quality inspection based on optical three dimensional metrology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 23-27.
吴雨祥. 基于光学三维成像的镜面物体表面质量检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 23-37.
- [22] Zhang X, Li X, Li C. Calibration for phase-measuring deflectometry based on binocular vision [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2017, 44(8): 98-101.
张旭, 李祥, 李晨. 基于双目立体视觉偏折术的标定[J]. *计量与测试技术*, 2017, 44(8): 98-101.
- [23] Luhmann T, Robson S, Kyle S, et al. Close-range photogrammetry and 3D imaging [M]. 2nd ed. Berlin, Boston: Walter de Gruyter, 2013: 225-227.
- [24] Chen X Y, Ma Z, Hu Y, et al. A new method for accurate location of concentric circles in visual measurement[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(8): 1524-1528.
陈新禹, 马孜, 胡英, 等. 视觉测量中圆形标记点的高精度定位[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(8): 1524-1528.
- [25] Agrawal A, Raskar R, Chellappa R. What is the range of surface reconstructions from a gradient field?[M]//Leonardis A, Bischof H, Pinz A. Computer vision - ECCV 2006. Lecture notes in computer science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, 3951: 578-591.
- [26] Jing H L, Su X Y, Liu Y K. Shape reconstruction methods from gradient field [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(6): 41-43.
荆海龙, 苏显渝, 刘元坤. 基于梯度数据的三维面形重建方法[J]. *激光杂志*, 2007, 28(6): 41-43.
- [27] Eggert D W, Lorusso A, Fisher R B. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms [J]. *Machine Vision and Applications*, 1997, 9(5/6): 272-290.