

doi: 10.3788/gzxb20174601.0105003

单周期条纹双四步相移投影仪的标定方法

冀红彬¹, 张慧博¹, 范京京¹, 刘今越¹, 戴士杰^{1,2}, 王志平²

(1 河北工业大学 机器人及自动化研究所, 天津 300130)

(2 中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300)

摘 要:针对投影仪标定方法中存在畸变及倾斜投影引起条纹周期、条纹级数变化的问题,提出一种单周期条纹双四步相移投影仪的标定方法.设计生成横向和纵向各两组单周期条纹图像,经投影仪投影到带有圆形标识的标定板上,相机同步采集标定板图像,叠加由双四步相移获得的两幅相位主值图,对叠加相位主值图相位展开,利用展开的绝对相位值计算投影仪像素坐标值,最终将投影仪标定转换为成熟的相机标定.实验结果表明:仿真投影仪标定实验准确度的最大重投影误差约为 0.4 pixel,均方根误差为 0.132 96 pixel;实际投影仪标定实验准确度的最大反投影误差约为 0.46 pixel,均方根误差为 0.143 12 pixel;实验结果与仿真结果的最大反投影误差相差 15%,均方根误差相差 7.6%.与现有的采用三频相位展开进行投影仪标定的方法相比,投影光栅图像数可减少 8 幅.该方法改善了现有投影仪标定方法的不足,标定准确度和标定效率均得到提高.

关键词:光学测量;光栅投影;投影仪标定;双四步相移;单周期条纹

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)01-0105003-8

Projector Calibration Method with Single Period Fringe and Double Four-step Phase Shifting

JI Hong-bin¹, ZHANG Hui-bo¹, FAN Jing-jing¹, LIU Jin-yue¹, DAI Shi-jie¹, WANG Zhi-ping²

(1 *Research Institute of Robotics and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China*)

(2 *Tianjin Key Laboratory for Civil Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*)

Abstract: Aiming at the projector distortion and the change of fringe periods and fringe series, a calibration method of single period fringe and double four-step phase-shifting algorithm was proposed. Designing and generating two groups of horizontal and vertical single period grating fringe images respectively, the camera captures the single period grating fringe images which projected onto the calibration plate with circular logo at the same time, and superposes the two phase master maps which obtained by double four-step phase shift and unwrapping the phase master map. Then the pixel coordinate of projector is calculated by the unwrapping absolute phase. Finally, the projector calibration is converted into a mature camera calibration. Experimental results indicate that the maximum re-projection error and the root mean square error of the projector calibration precision of simulation experiment are about 0.4 pixel and 0.132 96 pixel respectively. The maximum re-projection error and the root mean square error of the projector calibration precision of simulation experiment are about 0.46 pixel and 0.143 12 pixel respectively. Compared with the existing projector calibration methods of projecting

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合项目(No. U1433117)、中国民用航空局重大专项(MHRD20130104)和天津市民用航空器适航与维修重点实验室开放基金资助

第一作者:冀红彬(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为三维测量. Email: jihongbin92@163.com

导师(通讯作者):戴士杰(1970-),男,教授,博士,主要研究方向为机器人学和视觉等. Email: dshj70@163.com

收稿日期:2016-06-24; **录用日期:**2016-10-28

<http://www.photon.ac.cn>

fringes by tri-frequency phase unwrapping, 8 grating images can be reduced by the proposed method. The shortcomings of projector calibration method by projecting grating fringes and the calibration accuracy and the calibration efficiency can be improved.

Key words: Optical measurement; Fringe projection; Projector calibration; Double four-step phase shifting algorithm; Single period fringe

OCIS Codes: 050.5058; 100.5088; 120.2830; 120.5050

0 引言

在机器视觉领域,光栅投影三维测量技术作为主要的三维立体视觉测量方法,具有非接触、高准确度、高效率、高分辨率等优点,在工业检测、逆向工程、文物保护等方面得到了广泛的应用^[1-3]. 单相机-单投影仪组成的光栅投影三维测量系统,由数字光处理(Digital Light Processing, DLP)投影仪分别向参考平面和被测物体投射光栅条纹,利用 CCD 相机同步采集条纹图像,通过对采集到的变形条纹图像处理,得到代表物体高度的相位信息,最后根据获得的相位信息和已标定的系统参量进行三维点云重构,恢复物体三维形貌. 其中系统标定是影响三维测量准确度的重要因素之一,主要包括相机标定和投影仪标定^[4-5]. 相机的标定方法和技术相对成熟^[6-8],而投影仪标定存在标定准确度低、标定算法复杂、对标定设备要求严格等问题,急需寻找一种简单合理、高准确度、低成本的投影仪标定方法.

现有投影仪的标定方法根据是否依赖相机标定结果可分为两类:一类是先标定相机,再利用相机的标定参量进行投影仪标定,此方法对相机的标定准确度依赖性较强^[9-10];另一类是不依赖相机标定参量^[11-12],通过建立投影仪图像和相机图像的对应关系,使投影仪具有“拍照功能”,从而利用相机的标定方法标定投影仪. 例如,Zhang^[13]提出了投影仪“拍摄图像”的理念,建立相机像素和投影仪像素一一对应的关系,但未考虑设备非线性对标定的影响;李中伟^[14]等建立了相位补偿查找表,对投影仪畸变带来的相位误差进行补偿,但并未考虑投影仪倾斜投影导致条纹周期和条纹级数发生变化对标定的影响;Huang^[15]等在李中伟的基础上,提出一种投影仪与相机共轴系统,解决了倾斜投影时相机与投影仪光轴不共线对标定的影响,标定准确度虽高但设备复杂. 总而言之,投影仪标定尚存在标定准确度低、标定过程算法复杂、计算量大、标定设备要求严格等问题.

针对现有投影仪标定方法在准确度和效率方面兼顾性差的问题,将设计生成的单周期条纹和双四步相移相位提取原理用于投影仪标定. 建立理想投影仪成像模型,分析双四步相移相位提取法去除畸变引起的非线性误差的原理,设计生成横向和纵向各两组单周期条纹光栅图像,搭建投影仪标定系统,论述投影仪标定流程. 仿真实验证明单周期条纹双四步相移投影仪标定方法,可避免标定时条纹周期和条纹级数发生变化的问题,同时解决了由投影仪畸变引起的非线性相位误差问题,不需要对投影仪进行畸变校正或相位误差补偿,相对于文献[14]和文献[15]中的方法,投影图像数可减少 8 幅,缩短图像处理时间,操作方便,设备简单,标定准确度不依赖相机的标定准确度,无二次误差传播.

1 分析投影仪畸变误差

1.1 投影仪模型

由于投影仪可看作逆向“相机”,所以投影仪可采用相机的针孔模型进行描述. 投影仪的数学模型为

$$s \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}]\tilde{\mathbf{M}} \quad (1)$$

式中, s 为缩放比例, $\tilde{\mathbf{m}} = [\mu \quad \nu \quad 1]$ 表示投影仪物平面上某点的像素坐标, \mathbf{A} 是投影仪的内部参量矩阵,用式(2)表示, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 是投影仪的外部参量,分别表示投影仪坐标系到世界坐标系的旋转矩阵和平移矩阵, $\tilde{\mathbf{M}} = [X \quad Y \quad Z \quad 1]$ 表示投影仪空间某点的世界坐标.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & \mu_0 \\ 0 & \beta & \nu_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

参量 α 、 β 和 γ 与投影仪镜头的焦距、发光单元尺寸及其变形有关, $[\mu_0, \nu_0]$ 表示投影仪物平面的主点坐标. 但

是实际的投影仪模型并不按理想的针孔模型成像,存在畸变,给标定和测量带来较大的误差。

1.2 双四步相移去除误差原理

由于投影仪存在畸变,使输入图像与输出图像灰度呈非线性对应关系,经相机采集到的光栅条纹图不具有良好的正弦性,该非正弦性会引起相移算法的相位误差.所以当采用传统的四步相移提取投影仪标定所需的相位信息时会存在一定的误差,此误差降低了投影仪的标定准确度.常用解决方法是对该非线性误差进行补偿或畸变校正,操作复杂且耗时.为解决上述问题,将双四步相移思想^[16]应用于投影仪标定.

正弦光栅图像经四步相移提取获得的理想相位信息表示为

$$\varphi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{i=1}^4 I_i^1(x, y) \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^4 I_i^1(x, y) \cos \delta_i} \quad (3)$$

式中 $\varphi(x, y)$ 表示理想相位信息, $I_i^1(x, y)$ 表示相机拍摄的第 i 幅理想条纹图信息, $\delta_i = \pi i/2$ 表示第 i 幅理想条纹图的初始相位,其中 i 可取 1、2、3、4.

由相机拍摄的非正弦光栅条纹图提取到的实际相位信息表示为

$$\varphi_1'(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{i=1}^4 I_i^2(x, y) \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^4 I_i^2(x, y) \cos \delta_i} \quad (4)$$

式中 $\varphi_1'(x, y)$ 表示实际获得的相位信息, $I_i^2(x, y)$ 表示相机拍摄第 i 幅非正弦化的条纹图像信息,相位误差 $\Delta\varphi_1(x, y)$ 的三角函数关系为

$$\tan \Delta\varphi_1(x, y) = \tan[\varphi_1'(x, y) - \varphi(x, y)] = \frac{\tan \varphi_1'(x, y) - \tan \varphi(x, y)}{1 + \tan \varphi_1'(x, y) \tan \varphi(x, y)} \quad (5)$$

进一步整理可得相位误差近似函数表示为

$$\Delta\varphi_1(x, y) \approx -A \sin [4\varphi(x, y)] \quad (6)$$

经上述分析可知投影仪畸变带来的非线性误差近似于一个正弦函数,有一定的规律性.同理,当每幅条纹图像的初始相位均增加 $\vartheta = \pi/4$ 时,再次用传统的四步相移进行相位提取,此时理想相位变为 $[\varphi(x, y) + \vartheta]$,通过上述相同的计算方法推导出相位误差近似函数表示为

$$\Delta\varphi_2(x, y) \approx -A \sin [4\varphi(x, y) + 4\vartheta] = A \sin [4\varphi(x, y)] \quad (7)$$

基于以上理论推导可知当初始相位存在 $\pi/4$ 的偏差时,两次使用传统的四步相移进行相位提取,得到的相位误差均近似于一个正弦函数,且相差一个负号,将两次获得的实际相位值相加便可去除误差项,所以可以通过叠加两幅相位主值图,使相位误差尽量相互抵消,叠加公式为

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} [\varphi_1'(x, y) + \varphi_2'(x, y)]/2 & \varphi_1'(x, y) < \varphi_2'(x, y) \\ [\varphi_1'(x, y) + \varphi_2'(x, y) + 2\pi - \vartheta]/2 & \varphi_1'(x, y) > \varphi_2'(x, y) \end{cases} \quad (8)$$

当投影仪或相机倾斜摆放时,相机采集到的条纹图像在条纹周期和级数方面均会发生变化,影响投影仪标定过程中绝对相位信息与投影仪像素坐标间的转换.为此,设计生成一种单周期条纹,该单周期条纹只拥有一个完整的正弦波形,并且该正弦波形覆盖整个投影图像,由于投影仪标定中的标定板是一个高准确度的二维平面,投影单周期条纹可以得到投影到二维平面标定板上的所有相位信息,不会出现标定所需相位信息丢失的问题.并且单周期条纹是一个完整的正弦波形,同样可利用双四步相移理论进行相位提取,图 1 为单周期条纹使用一次四步相移和使用双四步相移后相位展开图中某一行的像素-相位对比图,为了更明显地看出对比效果,在投影条纹图像时,投影仪畸变的 Gamma 值取 2.8.

对比图 1(a)和图 1(b)可看出,单周期条纹双四步相移得到的像素-相位关系更接近一条平滑直线,由于投影仪畸变设置较大,所以像素-相位关系线会有小幅度的波动.单周期条纹双四步相移投影仪标定不仅可以避免出现条纹周期和条纹级数变化的现象,而且缩短了相位提取和相位展开的时间,投影仪标定准确度和

标定效率均可以得到提高。

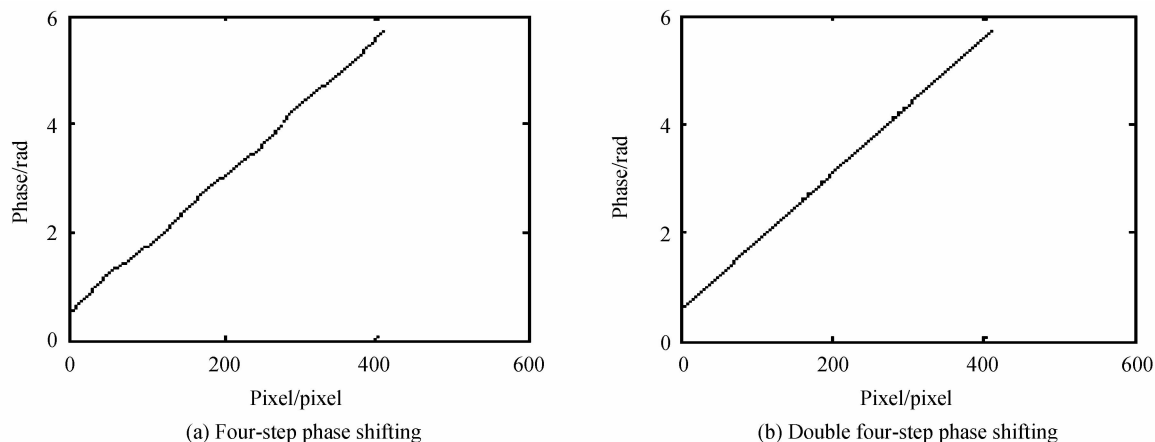


图 1 单周期条纹相位展开某行的像素-相位分步对比图
Fig. 1 Pixel-phase comparison of single period fringe phase unwrapping image

2 投影仪标定

基于单周期条纹双四步相移的投影仪标定,选用有圆形标识的标定板,共有 11×9 个黑色圆标识,相邻两个圆在水平和垂直方向的距离均为 15 mm,圆的直径约为 5 mm.图 2 为投影仪标定流程,具体标定步骤为:

1)利用 CCD 相机拍摄一幅标定板图像,通过椭圆拟合算法获得圆的中心坐标位置^[17];

2)利用计算机生成单周期正弦条纹,纵向和横向条纹各两组,每组包含 4 幅图像,每组 4 幅图像间的相位差为 $\pi/2$,纵向条纹两组图像中的第一幅图像初始相位差为 $\pi/4$,横向条纹两组图像的第一幅图像初始相位差也为 $\pi/4$,将生成的纵向和横向各组单周期正弦条纹投射到标定板上,并用 CCD 相机同步拍摄;

3)对纵向和横向各两组采集的图像进行双四步相移相位提取,将各组获得的相位主值图进行叠加,展开叠加后的相位主值图,标定板上的圆形标识点中心位置在投影仪像素坐标系下的坐标可通过相位展开图中获得的纵向和横向绝对相位值获得,进而得到用于投影仪标定的虚拟图像;

4)重复上述步骤,将标定板在允许范围内至少三次小幅度的倾斜或翻转不同角度,利用不同姿态的标定板图像生成虚拟的投影仪图像坐标图,实现投影仪的“拍照功能”,进而利用成熟的相机标定技术对投影仪进行标定。

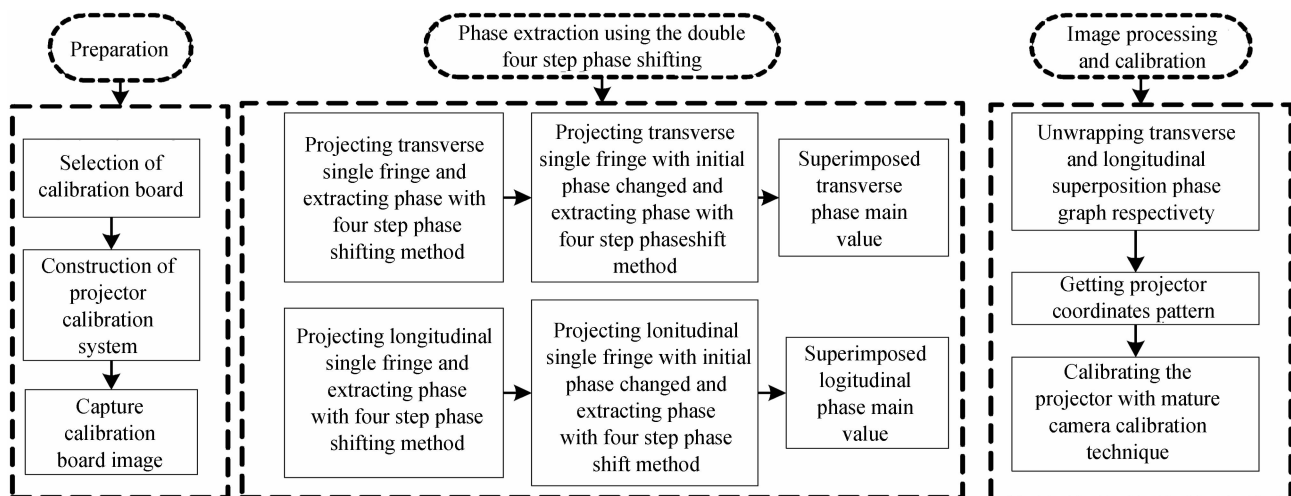


图 2 投影仪标定流程
Fig. 2 The flowchart of projector calibration

3 实验与结果分析

3.1 仿真实验与结果分析

为了验证本文所提投影仪标定方法的可行性,在 3D Max 软件中搭建如图 3 所示的投影仪标定系统. 投影仪标定时,需要获得多幅用于投影仪标定的数字微镜(Digital Micro mirror Device, DMD)虚拟图像,理论上虚拟图像的幅数越多准确度越高,但是试验发现当 DMD 虚拟图像超过六幅后对准确度的影响变小,所以标定过程中将标定板变换 6 个不同的位置及方向,如图 4 所示,得到用于投影仪标定的六幅 DMD 虚拟图像,然后用 Matlab 工具箱对投影仪进行标定,内参量标定结果见表 1,用矩阵形式表示投影仪的外参量 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} .

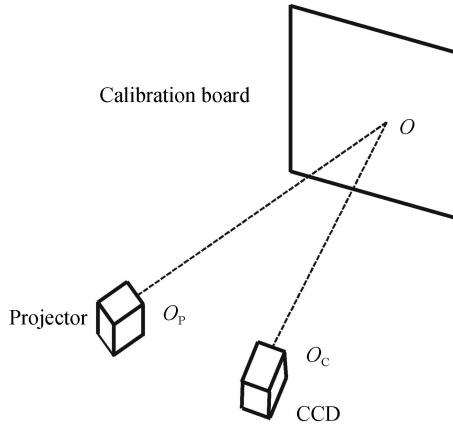
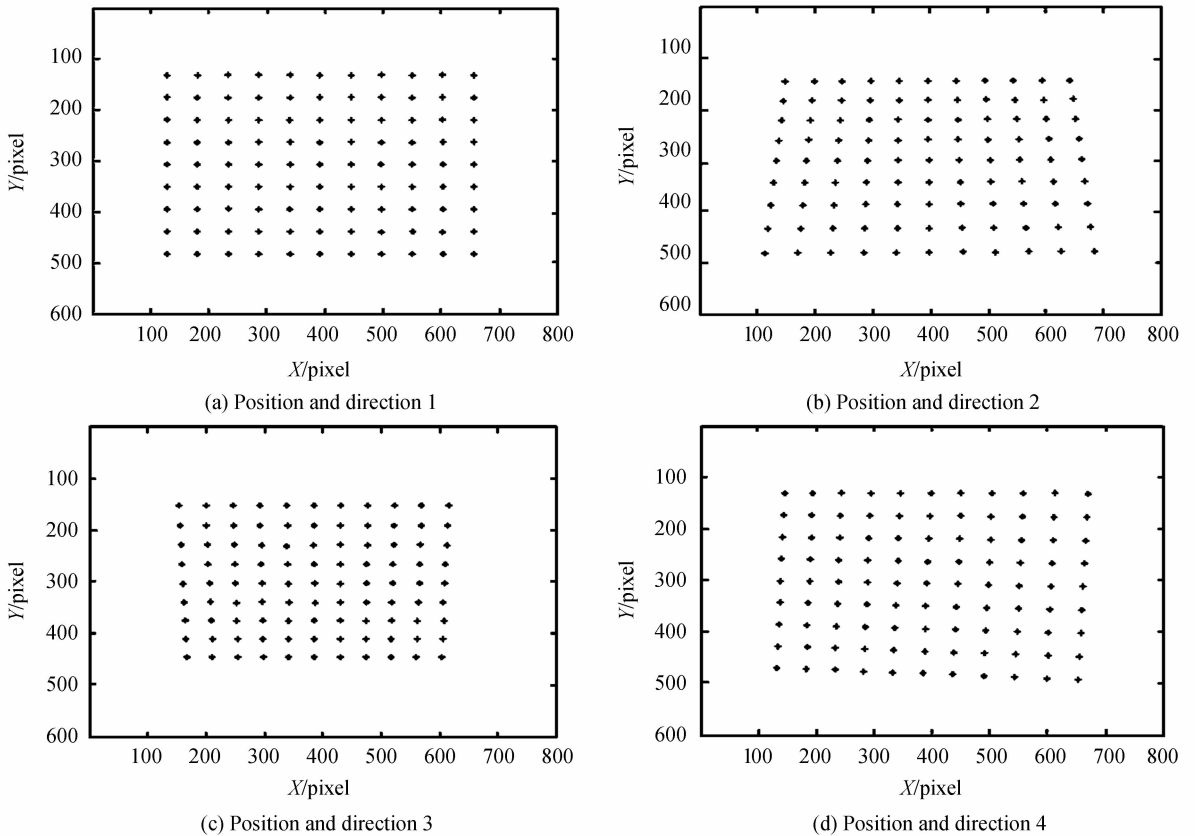


图 3 投影仪标定系统

Fig. 3 Projector calibration set up system



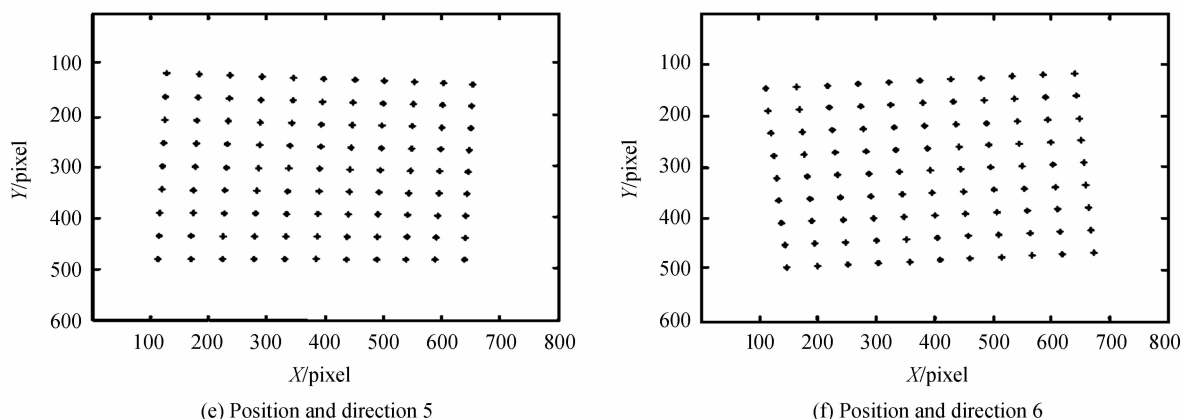


图 4 虚拟投影仪 DMD 图像

Fig. 4 Projector to generate DMD images

表 1 投影仪内参量标定结果

Table 1 Intrinsic parameters of projector calibration

Coordinate of main point/pixel		Focus		Radial distortion		Tangential distortion	
μ_0	ν_0	f_u	f_v	K_1	K_2	K_3	K_4
410.05	106.19	2 592.87	2 560.49	0.124 05	-0.641 67	-0.005 47	-0.000 15

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.000413 & 0.099927 & 0.003988 \\ 0.016950 & -0.000457 & -0.011248 \\ -0.011250 & 0.003983 & -0.009829 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = [-214.619756 \quad -51.510556 \quad 726.767684]$$

为了分析投影仪的标定准确度,验证投影仪生成 DMD 图像的准确性,将生成的六幅 DMD 图像全部反投回标定板,对应圆心重合度越高,标定准确度就会越高,计算所有圆形标识点圆心位置的反向投影误差,如图 5 所示,图中有六种不同灰度值的十字标识,每一种灰度值代表一幅 DMD 虚拟图像的反投影误差,不同灰度值十字标识的分布代表不同 DMD 图像反投影误差的分布,十字架越向(0,0)点集中,DMD 图像的反投影误差越小,投影的标定准确度越高,图 5 中的最大反投影误差为 0.4 pixel,均方根误差 X 方向为 0.132 96 pixel, Y 方向为 0.129 59 pixel.将上述实验结果与引言中提到的几类投影仪标定方法得到的标定结果进行对比,对比结果见表 2,表 2 中的第二列为相机标定误差,投影标定不依赖与相机标定的方法,均忽略相机标定误差,在表中以“0”表示.

由表 2 可以看出本文提出的单周期条纹双四步相移投影仪标定方法不依赖于相机标定,所以无相机标定误差的传播.通过对比可知,单周期条纹双四步相移投影仪标定方法的最大误差和均方根误差均较小,投影仪标定准确度相对较高.与 Huang 的投影仪标定方法相比,最大投影误差和均方根误差虽然都略大,但是单周期条纹双四步相移投影仪标定方法不需要引进半透半反镜设备,操作简单.且采用单周期条纹代替多周

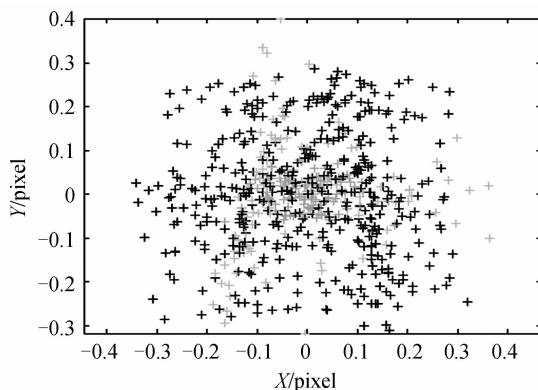


图 5 投影仪反向投影误差

Fig. 5 Reprojection errors of projector

表 2 投影仪标定结果对比
Table 2 Comparison of projector calibration results

Method of calibration	Camera error Maximal error	Projector error		Number of picture projected	Any additional equipment	Rely on the camera calibration
		Maximal error	Mean error			
Falcao's method	0.5	1.6	0.8671	0	No	Yes
Zhang S's method	0	0.9	0.2176	6	No	No
Li Zhong wei's method	0	>0.6	0.312	24	No	No
One period with double step phase shifting	0	0.4	0.1329	16	No	No
Huang S J's method	0	0.3	0.0704	24	Yes	No

期条纹进行投影仪标定,不仅避免了条纹周期和级数的变化,而且缩短了相位提取和相位展开的时间,与表中李中伟和 Huang 的方法相比,可以少投影 8 幅图像,大大提高了投影仪的标定效率.综合考虑,单周期条纹双四步相移投影仪标定方法有较高的标定准确度和较高的标定效率.

3.2 实际试验与结果分析

为验证单周期条纹双四步相移投影仪标定方法在实际投影仪标定中的标定效果,在实验室搭建了投影仪标定系统,标定系统由分辨率为 800×600 pixel 的明基 MP515 型投影仪、分辨率为 1360×1024 pixel 的 SVCam-ECO267 彩色工业 CCD 相机、型号为 M3Z1228C-MP 的镜头、型号为宏碁 4750G 的计算机及若干光学平台固定件组成,实验系统如图 6.

实验过程中将带有黑色圆圈标识点的标定板变换与仿真实验中接近的 6 个不同的位置及方向,得到标定投影仪时使用的六幅 DMD 虚拟图像,然后用 Matlab 工具箱对投影仪进行标定,重复仿真实验中的实验步骤,得到如图 7 所示标定结果的反投影误差,最大反投影误差为 0.46 pixel,均方根误差 X 方向为 0.143 12 pixel,Y 方向为 0.141 86 pixel.与仿真实验比较,X 方向的均方根误差相差 7.6%,Y 方向的均方根误差相差 9.5%.单周期条纹双四步相移投影仪标定方法在实际投影仪标定时具有较高的准确度.

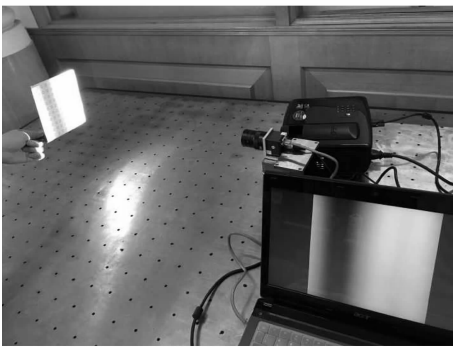


图 6 实验系统图
Fig. 6 Experiment system diagram

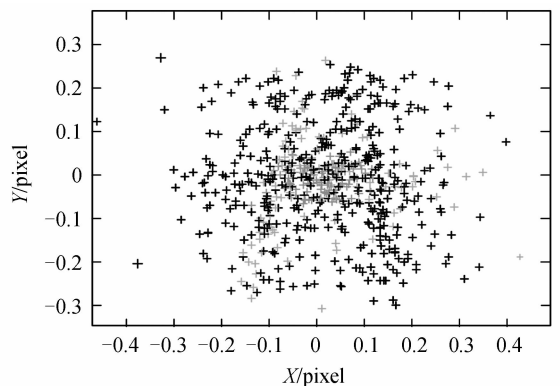


图 7 实际试验投影仪反向投影误差
Fig. 7 Reprojection errors of projector in actual experiment

4 结论

针对投影仪畸变和倾斜投影等影响投影仪标定准确度的问题,提出了一种单周期条纹双四步相移投影仪标定方法,设计生成横向和纵向各两组单周期光栅图像,将其投射到标定板上再同步采集相应标定板上的图像,用双四步相移对采集图像进行相位提取并展开,得到用于投影仪标定的 DMD 图像.此方法无需对存在误差的相位信息进行补偿或畸变校正,操作方便,设备简单.仿真结果的投影仪标定准确度较高,最大反投影误差为 0.4 pixel,均方根误差为 0.132 96 pixel,实际投影仪标定结果最大反投影误差为 0.46 pixel,均方根误差为 0.143 12 pixel,实验结果与仿真结果的最大反投影误差相差 15%,均方根误差相差 7.6%.单周期条纹双四步相移投影仪标定方法图像相位信息处理简单,减少投影图像数量,提高了投影仪标定效率.

参考文献

- [1] GAO Peng, LI Yong, TU Yan-shuai, et al. Binarization methods of sinusoidal grating in 3D measurement based on defocused fringe projection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0512006.

- 高鹏, 李勇, 涂颜帅, 等. 离焦条纹投影三维测量中正弦光栅的二值化方法研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0512006.
- [2] BI Chao, FANG Jian-guo, LIU Jing-liang, *et al.* Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(3): 678-685.
毕超, 房建国, 刘京亮, 等. 基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(3): 678-685.
- [3] XU Li, ZHANG Zhi-jiang. Error propagation analysis of structured light system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(2): 306-313.
许丽, 张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(2): 306-313.
- [4] LI Ming-lei, GAO Xin-yuan, LI Guang-yun, *et al.* High accuracy calibration of installation parameters between 3D terrestrial laser scanner and external-installed digital camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(9): 2158-2166.
李明磊, 高欣圆, 李广云, 等. 地面三维激光扫描仪与外架数码相机间安置参量的高准确度标定[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(9): 2158-1566.
- [5] YANG Jing-hao, LIU Wei, LIU Yang, *et al.* Calibration of binocular vision measurement system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(2): 300-308.
杨景豪, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(2): 300-308.
- [6] LIU Jin-bo, ZHANG Xiao-hu, YU Qi-feng. A calibration method for camera intrinsic parameters and image distortion decoupling with extrinsic parameters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(3): 0312001.
刘进博, 张小虎, 于起峰. 相机内参量及像差系数与外参量的解耦标定方法[J]. 光子学报, 2016, **45**(3): 0312001.
- [7] LIU Ming-qin, ZHANG Xiao-guang, ZHANG Yuan-liang, *et al.* Calibration algorithm of mobile robot vision camera [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, **17**(1): 51-57.
- [8] WACKROW R, FERREIRA E, CHANDLER J, *et al.* Camera calibration for water-biota research: the projected area of vegetation[J]. *Sensors*, 2015, **15**(12): 30261-30269.
- [9] FALCAO G, HURTOS N, MASSICH J. Plane-based calibration of a projector-camera system[J]. *VIBOT master*, 2008, **9**(1): 1-12.
- [10] MA Suo-dong, ZHU Ri-hong, QUAN Cheng-gen, *et al.* Flexible structured-light-based three-dimensional profile reconstruction method considering lens projection-imaging distortion[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(13): 2419-2428.
- [11] CHEN Chia-yen, CHIEN Hsiang-jen. An incremental target-adapted strategy for active geometric calibration of projector-camera systems[J]. *Sensors*, 2013, **13**(2): 2664-2681.
- [12] ANWAR H, DIN I, PARK K. Projector calibration for 3D scanning using virtual target images[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, **13**(1): 125-131.
- [13] ZHANG Song, HUANG P S. Novel method for structured light system calibration[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(8): 083601.
- [14] LI Zhong-wei, SHI Yu-sheng, ZHONG Kai, *et al.* Projector calibration algorithm for the structured light measurement technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3061-3065.
李中伟, 史玉升, 钟凯, 等. 结构光测量技术中的投影仪标定算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3061-3065.
- [15] HUANG S, XIE L, WANG Z, *et al.* Accurate projector calibration method by using an optical coaxial camera[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(4): 789-795.
- [16] ZHENG Dong-liang, DA Fei-peng. Double-step phase-shifting algorithm for fringe-projection measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 86-92.
郑东亮, 达飞鹏. 双步相移光栅投影测量轮廓术[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 86-92.
- [17] NIE Jian-hui, MA Zi, HU Ying. Robust detection of artificial circular target center[J]. *Journal Applied Sciences*, 2013, **31**(1): 91-96.
聂建辉, 马孜, 胡英. 一种鲁棒的圆形标记点中心提取方法[J]. 应用科学学报, 2013, **31**(1): 91-96.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China and the China Civil Aviation Administration Jointly Funded Project (No. U1433117), China Civil Aviation Administration of Major Projects (No. MHRD20130104), Project of Open Foundation of Key Laboratory of Civil Aircraft Maintenance and Service of Tianjin