

文章编号:1002-2082(2018)02-0225-05

# 单摄像机单投影仪结构光三维测量系统标定方法

耿楷真,高治华

(中国船舶重工集团公司第七一三研究所,河南 郑州 450015)

**摘要:**系统参数的标定是结构光三维测量系统工作的基础,且参数标定的精度直接影响测量的精度,其中投影仪目前还存在标定过程复杂、精度较低等问题。为解决该问题,通过投影一组圆阵图案到一块本身带有特征圆的平板上,并由摄像机拍摄;基于二维射影变换理论,通过误差补偿法建立投影仪图像坐标和摄像机图像坐标的对应关系,利用该对应关系计算获取标定点的投影仪图像坐标;以标定点的两组图像坐标和世界坐标为初始值,使用非线性算法对系统进行全参数整体优化,完成系统的标定。实验验证了系统标定误差最大值小于0.05 mm,误差均方根小于0.03 mm,结果表明该方法标定过程简单,能够有效地提高标定精度,具有较广的适用性。

**关键词:**三维测量;系统标定;射影变换;全参数优化

中图分类号:TN206;TH391

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0203003

## Calibration method for structured light 3D measurement system having single camera and single projector

Geng Kaizhen, Gao Zhihua

(713 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China)

**Abstract:** Calibration of the system parameters is the basis of three-dimensional measurement system of the structured light, and accuracy of parameter calibration directly affects accuracy of the measurement, in which the projector still has the problems of complex calibration process and low precision. In order to solve this problem, a calibration method is put forward, which is done by projecting circles pattern to a flat with circular signalized points. Based on projective transformation theory, projective corresponding relation is established between projector image coordinates and camera image coordinates through error compensation method, and accurate projector image coordinates of calibration points is obtained. Taking two groups of image coordinates and world coordinates as initial value, nonlinear algorithm is used to optimize the whole system parameters. Experimental results show that the maximum error of the system is less than 0.05 mm and the error root mean square is less than 0.03 mm. The results show that the calibration process is simple and can improve the calibration accuracy and has wide applicability.

**Key words:** 3D measurement; system calibration; projective transformation; all parameters optimization

收稿日期:2017-04-24; 修回日期:2017-06-20

基金项目:国家自然科学基金(61602421)

作者简介:耿楷真(1976—),男,河南浚县人,硕士,高级工程师,主要从事自动化物流技术和舰载导弹发射技术研究工作。  
E-mail: wjdyxa@163.com

通信作者:高治华(1988—),男,河南淇县人,工程师,硕士,主要从事自动化物流技术和弹药贮运技术研究工作。  
E-mail: believegao@163.com。

## 引言

结构光三维测量技术具有非接触、测量速度快、效率高、硬件配置要求低等的优点,近年来广泛应用于实物造型设计、逆向工程、质量检测、医学、文物保护等领域。结构光三维测量系统的基本组成是计算机、投影仪和摄像机,根据系统的测量原理<sup>[1]</sup>,摄像机、投影仪的标定是系统工作的最基本和关键的环节,其标定精度直接影响整个系统的测量精度。

目前,摄像机的标定技术已相对成熟<sup>[2]</sup>,Tsai的典型两步法<sup>[3]</sup>,魏国庆等人研究的双平面模型<sup>[4]</sup>,张正友提出的基于二维或一维物体的标定方法<sup>[5]</sup>,摄像机自标定法<sup>[6]</sup>等。投影仪不能拍摄成像,无法直接获取对象在空间的位置与其映射到投影仪靶面上对应位置的关系,导致投影仪的标定相对困难,目前投影仪主要的标定形式有:1)借助已标定的摄像机计算投影的特征点的空间坐标,结合特征点的投影仪图像坐标,完成投影仪标定<sup>[7-8]</sup>;2)使用相位解算技术建立投影仪和摄像机图像坐标的对应关系,识别特征点的空间坐标,实现投影仪标定<sup>[9-10]</sup>。方法1)投影仪标定依赖于摄像机的标定精度,使整个系统标定精度受限;方法2)中对象投影的相位条纹解算要进行相位识别和去包裹,易受环境因素影响,标定精度鲁棒性较低。系统标定是得到摄像机和投影仪参数的最佳组合值<sup>[11-12]</sup>,才能保证系统测量精度,因此还需要对系统参数进行捆绑优化。

本文介绍的标定方法是:1)利用二维标定板,通过非线性优化的方法进行摄像机标定;2)基于二维射影变换理论及误差补偿法建立标定板上特征圆心的世界坐标与投影仪图像坐标的对应关系,再使用与摄像机相同的标定方法进行投影仪标定;3)利用获得的标定板上特征圆心的摄像机图像坐标、投影仪图像坐标、世界坐标进行系统全参数整体优化,实现系统标定。

## 1 系统模型

结构光三维测量系统模型如图1,建立物空间坐标系  $O_w-X_wY_wZ_w$ ,摄像机坐标系  $O_c-X_cY_cZ_c$ ,摄像机图像坐标系  $o_c-u_cv_c$ ,摄像机成像过程可简化为透视投影模型,从而点在摄像机图像平面及物空间的对应关系可表示为

$$\sigma_c \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = A_c R_c [E \quad T_c] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $(X_w, Y_w, Z_w)$  表示点  $P$  的世界坐标;  $(u_c, v_c)$  表示点  $P$  的摄像机图像坐标;  $\sigma_c$  为归一化系数;  $R_c$  和  $T_c$  是表示物空间坐标系到摄像机坐标系之间的旋转及平移关系矩阵,分别为  $3 \times 3$  矩阵和  $3 \times 1$  矩阵;  $E$  表示单位矩阵;  $A_c$  表示摄像机内部参数矩阵。

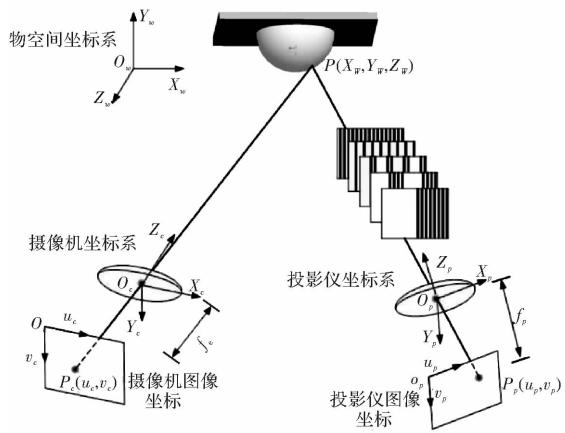


图 1 结构光三维测量系统模型示意图

Fig. 1 Structural diagram of structured light 3D measurement system model

从投影仪光学成像角度来看,投影仪是一个逆向的摄像机,所以投影仪模型可用与摄像机类似的模型表示<sup>[9-10]</sup>,从而点在投影仪图像平面及物空间的对应关系可表示为

$$\sigma_p \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = A_p R_p [E \quad T_p] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $(u_p, v_p)$  表示点  $P$  的投影仪图像坐标;  $\sigma_p$  为归一化系数;  $R_p$  和  $T_p$  是表示物空间坐标系到投影仪坐标系之间的旋转及平移关系矩阵;  $E$  表示单位矩阵;  $A_p$  表示投影仪内部参数矩阵。

实际的镜头存在镜头畸变误差<sup>[2-3]</sup>,通常需考虑径向畸变和切向畸变。

## 2 系统标定

本文的标定方法是使用带有均匀分布的特征圆的标定板,通过拍摄一组图片完成对系统的标定。实验中调整标定板与平移导轨垂直,并保证

其垂直度不大于 0.01 mm,如图 2 所示,建立右手世界坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$ ,其中  $X_w O_w Y_w$  面为标定板面,  $Z_w$  轴垂直于标定板,沿导轨移动方向指向摄像机。通过导轨移动标定板至几个不同的位置,可以获得一组世界坐标已知的空间点;同时由计算机生成可将标定板各圆包围起来的  $10 \times 12$  圆阵图案,并分别在各个位置将图案投影到标定板上,在各个位置都可获得投影图像和相应的摄像机拍摄图像。

## 2.1 摄像机标定

标定过程示意图如图 2 所示,标定板在各个位置拍摄图像,标定板上各特征圆心的摄像机图像坐标可通过椭圆拟合法<sup>[13]</sup>精确得到。摄像机模型参数的计算方法为:1)根据(1)式建立一组点的世界坐标和摄像机图像坐标的关系,根据摄像机模型内外部参数间的关系,使用最小二乘法解出摄像机模型各参数;2)以得到的内外部参数为初值,畸变参数初值取 0,使用 Levenberg-Marquardt 的非线性最小二乘法对所有参数进行优化得到摄像机模型参数。

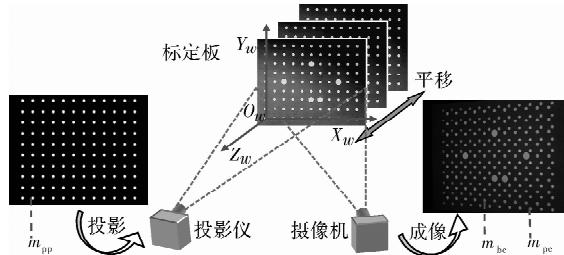


图 2 系统标定过程示意图

Fig. 2 Structural diagram of system calibration process

## 2.2 投影仪标定

投影仪标定的难点是建立点的三维空间坐标与其投影仪图像坐标的对应关系。文献[14]采用了前期研究提出的基于二维射影变换理论及误差补偿的方法获取标定点的投影仪图像坐标。投影仪标定具体分为 3 步:第一步建立标定点摄像机图像坐标到投影仪图像坐标的射影变换关系;第二步对第一步中的射影变换关系进行误差补偿,获取准确的投影仪图像坐标;第三步计算投影仪标定参数。

标定过程如图 2 所示,在投影仪图像平面到标定板再到摄像机图像坐标的两次射影变换过程中,标定板上是连接纽带,从而可建立投影仪图像平面与摄像机图像平面的射影变换关系,选择投

影图像上位于四角的圆心建立两平面间射影变换关系,则投影圆心在投影仪图像平面的图像坐标  $m_{pp} = (u_{pp}, v_{pp}, 1)^T$  和其在摄像机图像平面的图像坐标  $m_{pc} = (u_{pc}, v_{pc}, 1)^T$  的关系表示为

$$m_{pp} = H_{cp} m_{pc} \quad (3)$$

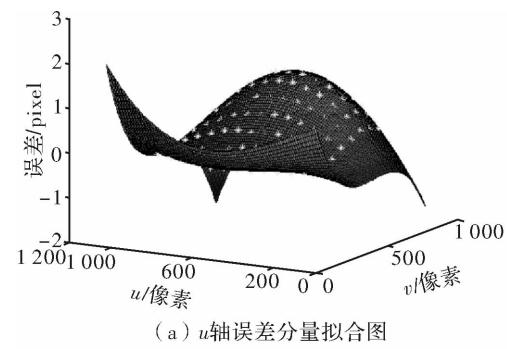
式中,  $H_{cp}$  称为射影变换矩阵,是归一化的  $3 \times 3$  矩阵。

实际上,由于投影仪和摄像机存在畸变镜头,按上面得到的射影变换矩阵带来误差。针对该问题,使用二元多项式对两组图像坐标射影变换后的误差进行拟合,如下式所示:

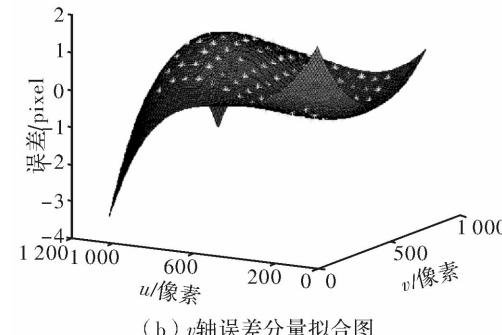
$$\begin{aligned} \delta_u &= n_{u0} + n_{u1} u + n_{u2} v + n_{u3} u^2 + n_{u4} v^2 + n_{u5} uv + \\ &\quad n_{u6} u^3 + n_{u7} v^3 + n_{u8} u^2 v + n_{u9} uv^2 + \dots \\ \delta_v &= n_{v0} + n_{v1} u + n_{v2} v + n_{v3} u^2 + n_{v4} v^2 + n_{v5} uv + \\ &\quad n_{v6} u^3 + n_{v7} v^3 + n_{v8} u^2 v + n_{v9} uv^2 + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\delta_u$  与  $\delta_v$  表示拟合点图像坐标在  $u$  轴、 $v$  轴两个方向的误差补偿量;  $(u, v)$  表示拟合点在投影仪图像上的坐标值;  $n_u = (n_{u0}, n_{u1}, n_{u2}, \dots)^T$  与  $n_v = (n_{v0}, n_{v1}, n_{v2}, \dots)^T$  为误差补偿系数。

对射影变换矩阵的误差进行补偿,可以获得标定点在投影仪上较准确的图像坐标,误差补偿图如图 3 所示。因此采用射影变换矩阵及二元多



(a)  $u$  轴误差分量拟合图



(b)  $v$  轴误差分量拟合图

图 3 射影变换误差补偿图

Fig. 3 Diagram of projective transformation error

项式补偿函数计算标定板上特征圆心的投影仪图像坐标  $(u_p, v_p)$  的关系式表示为

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = H_{cp} \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_u \\ \delta_v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

标定板在不同的位置时,分别使用上述方法获得标定板上标定圆心的投影仪图像坐标,然后使用与摄像机标定相同的方法计算投影仪标定参数。

### 2.3 系统全参数整体优化

为了获得更好测量结果,需要系统对全参数进行整体优化,使用测量过程的逆过程对系统参数整体优化,即根据标定板上圆心的投影仪图像坐标  $x_p = (u_p, v_p)$ 、摄像机图像坐标  $x_c (u_c, v_c)$  和世界坐标  $X_i = (X_w, Y_w, Z_w)$  使用基于 Levenberg-Marquardt 的非线性最小二乘法对系统全参数进行整体优化。

## 3 实验及结果

本文中的结构光三维测量系统如图 4 所示,

表 1 结构光三维测量系统标定参数

Table 1 Structured light 3D measurement system calibration parameters

	摄像机参数	投影仪参数
平移参数/mm	95.6615, 5.549.2794, -674.3158	257.5300, 135.6848, -820.5576
旋转参数/rad	0.5649, -0.0052, 0.0029	0.0093, -0.0146, 0.0097
焦距/(mm/pixel)	6020.0, 6021.0	2202.1, 2196.1
图像主点坐标/pixel	2008.1, 1311.2	507.8790, 865.1897
图像坐标轴倾斜系数	2.6648	-29.5614
	$k_1 = 4.67e-9$	$k_1 = 1.34e-8$
	$k_2 = 4.77e-17$	$k_2 = 3.34e-15$
畸变参数	$k_3 = -3.57e-23$	$k_3 = 5.98e-22$
	$p_1 = 1.00e-7$	$p_1 = 5.16e-7$
	$p_2 = 7.79e-8$	$p_2 = -9.71e-7$

对系统的标定误差进行统计,得到各标定点位置误差最大值为 0.043 mm,均方根值为 0.021 mm,说明本文的系统标定方法有较高的精度。

在完成系统标定后,为验证本文测量系统的精度,将标定板移动到 5 个不同的位置(世界坐标系中  $Z$  值分别为 30、10、-10、-30、-50),然后分别投影 120 个圆点到标定板上,使用各投影点的  $Z$  向坐标测量值与理论值的偏差表示系统的测量误差,具体见表 2,平面的最大误差为 0.132 mm,均方根值为 0.029 mm。

其中摄像机分辨率为  $4016 \times 2688$ ,投影仪分辨率为  $1024 \times 768$ ,标定板上均匀分布有圆心距 25 mm 为  $9 \times 11$  圆阵,且平面度为 0.03 mm。标定过程中标定板距投影仪 800 mm 左右,通过导轨移动标定板至 6 个不同的位置(即  $Z_w$  值分别为 40、20、0、-20、-40、-60),获得各位置投影圆和标定板上特征圆的图像,可分别提取各圆圆心。



图 4 测量系统组成图

Fig. 4 Composition diagram of measurement system

根据前文描述的方法进行系统标定,得到系统的标定参数见表 1。

表 2 平面测量的  $Z$  向坐标值误差统计

Table 2 Statistical values of  $Z$ -axis component of planes measurement result

位置	平均值/mm	标准差/mm	最大值/mm	均方根值/mm
$Z=30$	0.023	0.029	0.132	0.037
$Z=10$	0.004	0.026	0.105	0.027
$Z=-10$	-0.011	0.025	0.102	0.029
$Z=-30$	0.01	0.026	0.111	0.028
$Z=-50$	0.002	0.023	0.081	0.023
统计值	0.005	0.026	0.132	0.029

## 4 结论

本文研究的单摄像机单投影仪结构光三维测量系统标定方法:1)通过带有特征圆标定板采用直接线性变换方法(DLT)完成摄像机标定;2)基于射影变换及误差补偿法获取标定点的投影仪图像坐标,并建立标定点的世界坐标与对应的投影仪图像坐标的对应关系,再采用直接线性变换方法完成投影仪标定;3)基于标定板上特征圆心的摄像机图像坐标、投影仪图像坐标、世界坐标进行系统全参数整体优化,实现系统标定。实验结果表明该标定方法有较高的标定精度和稳健性,且经过系统参数整体优化后,可减小因标定点的不准确等因素而引起的标定误差,具有较高的标定精度。

## 参考文献:

- [1] YANG Zaihua, LI Yuhe, LI Qingxiang, et al. Measuring profile system based on optical triangular method [J]. Optical Technique, 2005, 31(4): 622-626.  
杨再华,李玉和,李庆祥,等.一种基于光学三角法的形貌测量系统[J].光学技术,2005,31(4):622-626.
- [2] QIU Maolin, MA Songde, LI Yi. Overview of camera calibration for computer vision [J]. Acta Automation Sinica, 2001, 26(1): 43-55.  
邱茂林,马颂德,李毅.计算机视觉中摄像机标定综述[J].自动化学报,2001,26(1):43-55
- [3] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE J. Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [4] WEI Guoqing, MA Songde. Two-plane calibration: a unified model[C]. US: IEEE, 1991: 133-138.
- [5] ZHANG Zhengyou. Camera calibration with one-dimensional objects [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(7): 892-899.
- [6] MAYKHANK S J, FANGERAS O D. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. Intl. J. Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [7] LI Zhongwei, SHI Yusheng, ZHONG Kai, et al. Projector calibration algorithm for the structured light measurement technique[J]. Acta Optic 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.
- [8] WANG Heng, WANG Zeyong, LI Jinlong, et al. A projector calibration method for structured-light system[J]. Information Technology, 2016(3): 36-40  
王衡,王泽勇,李金龙,等.一种用于结构光测量系统的投影仪标定技术[J].信息技术,2016(3):36-40.
- [9] WANG Luyang, DA Feipeng. Three-dimensional shape measurement technique based on complementary color-encoded fringe projection [J]. Acta Optic 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.
- [10] AN Dong, DA Feipeng, GAI Shaoyan, et al. New system calibration method based on fringe projection profilometry [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 81-84.  
安冬,达飞鹏,盖绍彦,等.新的基于条纹投影轮廓测量的系统标定方法[J].应用光学,2014,35(1):81-84.
- [11] CHEN Xiaobo, XI Juntong, JIN Ye, et al. Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47: 310-319.
- [12] ZHU Tongjing, ZHOU Ping, LIU Xinran, et al. Crucial algorithms for structural light 3D measurement system calibration [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 848-852.  
朱统晶,周平,刘欣冉,等.结构光三维测量系统标定的关键算法研究[J].应用光学,2014,35(5):848-852.
- [13] HUANG Bin, SUN Yongrong, YANG Bowen, et al. Drogue image detecting and tracking based on iterative least squares ellipse fitting [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(8): 1202-1209.  
黄斌,孙永荣,杨博文,等.迭代最小二乘椭圆拟合的锥套图像检测与跟踪[J].中国图象图形学报,2014,19(8):1202-1209.
- [14] GAO Zhihua, WANG Zhao, HUANG Junhui, et al. Projector calibration method based on projective transformation for structured light measurement system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1008004. 1-1008004. 6.  
高治华,王昭,黄军辉,等.基于射影变换的结构光测量系统中投影仪标定方法[J].中国激光,2012,39(10):1008004. 1-1008004. 6.