# 基于投影光线交会面不平性的投影器精确检校研究\*

郑 莉<sup>1a,1b</sup>,罗跃军<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 a. 测绘学院; b. 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079; 2. 光庭导航数据(武汉)有限 公司, 武汉 430073)

摘 要:借鉴数码相机检校的方法对投影器进行检校,即采用的投影器检校模型与数码相机的检校模型类似, 但检校精度却低于数码相机的检校精度,从物方详细分析其原因并对由于纸张(避免成像在平面格网板上虚拟 影像的格网点与真实格网点的混淆,使用白纸进行遮挡)厚度引起的物方点误差,通过模拟数据对物方点的Z值 进行补偿以提高投影器检校精度。经过实验及结果分析,证明该方法具有很好的可行性。

关键词:投影器检校;相机检校;平面格网;空间点坐标

中图分类号: TP234 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)06-2332-04 doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.088

# Research on accurate calibration of projector based on uneven intersection flat from projection light

ZHENG Li<sup>1a,1b</sup>, LUO Yue-jun<sup>2</sup>

(1. a. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping & Remote Sensings, b. School of Geodesy & Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Kotei Navi & Data Corporation, Wuhan 430073, China)

Abstract: Based on the same calibration model, the calibration precision of projector is lower than that of CCD camera. It was analyzed by the following aspects, such as image and space. For the space point error by paper thickness and distortion, this paper compensated the Z value of space point through stimulant data. Then it completed the improvement of projector calibration successfully after bundle adjustment and the calculation to the projector parameters again. Its feasibility was validated through our experiments.

Key words: projector calibration; camera calibration; planar net; special coordination

## 0 引言

随着信息科学技术的迅猛发展,人们迫切地希望能准确、 快速、方便地获取客观存在的三维世界的信息,尤其是在文物 三维重建及鉴定,工业产品快速设计、自动检测和质量控制,以 及医学诊断和治疗等领域<sup>[1,2]</sup>。本文研究对象是光滑、缺乏可 用于匹配的纹理以及无明显灰度变化的小型银器文物,因此引 入了主动视觉的研究方法,用投影器和数码相机构成类似双目 视觉的三维量测系统来实现小型银器文物的三维精细建模,为 实现其精细的三维模型,有必要进行投影器的精确检校。

#### 1 投影器物方空间点坐标的获取

基于投影条纹的虚拟影像以及 CCD 相机拍摄所获得的影像构建立体像对,自动匹配立体像对中的点线关系,已知相机与投影器的内外方位元素,通过空间前方交会解算出三维曲面表面点的空间坐标,最后对其构建三角网并进行真实纹理映射,完成三维曲面重建<sup>[3,4]</sup>。与相机检校相同,投影器的检校目的就是求解投影器的内方位元素为(*f*,*x*<sub>0</sub>,*y*<sub>0</sub>)。在实际检校

过程中是联合二维 DLT 和共线方程求解投影器的内外方位元素的初值,利用光束法平差对投影器进行检校,投影器的 13 个参数是一起求解的,即投影器的内方位元素 $(f,x_0,y_0)$ 、外方位元素 $(\varphi, \omega, \kappa, X_s, Y_s, Z_s)$ 及其畸变参数 $(K_1, K_2, P_1, P_2)$ 。这些参数为后面的三维量测奠定了基础<sup>[5,6]</sup>。

投影器与平面格网的位置或距离的不同,会导致虚拟影像 投影到平面格网的位置不确定,因此用直接量测的方法来求解 投影器的物方点坐标是不可取的。利用数码相机的检校结果 来求解投影器物方点的空间坐标是一个行之有效的方法。如 图1所示,投影器把虚拟影像投射到平面格网上,保持投影器 和平面格网相对位置不变的情况下,用数码相机拍摄带有虚拟 影像的平面格网。从拍摄的影像中,利用图像处理的方法获取 虚拟影像中十字丝中心的坐标。根据共线方程和 Z 坐标为零 的约束条件,利用已经检校的数码相机的参数,可解算出虚拟 影像点对应的空间点坐标,这样便获得了投影器物方点的空间 坐标。已知投影器像方的像点二维坐标以及物方空间点的三 维坐标,利用与相机检校类似的方法,即基于二维 DLT 和光束 法平差便可求解出投影器的13 个参数。

收稿日期: 2011-06-13; 修回日期: 2011-07-25 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41001309);测绘遥感信息工程国家重点实验室 专项科研经费资助;精密工程与工业测量国家测绘局重点实验室开放基金资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3101055)

作者简介:郑莉(1979-),女,福建福鼎人,副教授,博士,主要研究方向为数字摄影测量(lzheng@sgg.whu.edu.cn);罗跃军,博士,主要研究方 向为地理信息系统及相关测绘工作.



### 2 投影器精确检校的实现

#### 2.1 分析投影器检校精度低的原因

基于二维 DLT 和光束法平差的检校方法,先对数码相机 进行检校,得到其内外方位元素,再利用共线方程和空间 Z 坐 标为零的约束条件,反算投影器的物方坐标,对投影器进行检 校。由此可知,投影器的检校精度十分依赖于数码相机的检校 精度。随着数码相机检校的误差增大,投影器的检校误差也随 之增大。表1列出的中误差是指像点 X 方向的中误差。从表 中可看出,数码相机检校的结果对投影器的检校有很大的影 响。当数码相机的像方中误差大于 0.5 个像素时,由于此时通 过相机参数反算得到的投影器物方点坐标已经完全错误,平差 方程无法得到结果,投影器的检校无法完成。

表1 投影器检校和相机检校之间的关系

仪器		中误差	售/像素	
数码相机 投影器	0.26 0.48	0.42 0.83	0.56	0.68

从表2可以看出,相机检校的像方精度能够达到0.2个像素,而投影器检校的像方精度只能达到0.4个像素。两者采用 同样的检校模型,而投影器的检校精度不能达到相机检校的精 度,有必要对此结果所产生的原因进行探讨。

衣 4	相机位仪与投	家希位仪的沃	差
比车	交项	相机	投影器
点	数	386	240
$V \rightarrow c (0, E)$		0.00	0 42

Y方向像点中误差/像素

根据多元回归分析原理可知,利用回归分析可容易地确定 出一组自变量与另一个随机变量的关系。对空间点平面误差而 言,空间点的平面坐标构成一组自变量(Z=0),而残差则是随 机变量。因此,如果可以通过回归分析获取空间点平面坐标与 残差某种关系的显著结果,则说明空间点平面误差服从某种分 布。选取如下两个一般多项式作为回归分析的回归方程<sup>[7]</sup>:

$$dx = b_0 x + b_1 y + b_2 x^2 + b_3 xy + b_4 y^2 + b_5 x^3 + b_6 x^2 y + b_7 xy^2 + b_8 y^3 + b_9$$
(1)  
$$dy = b_0 x + b_1 y + b_2 x^2 + b_3 xy + b_4 y^2 +$$

0.24

0.46

$$b_5 x^3 + b_6 x^2 y + b_7 x y^2 + b_8 y^3 + b_9$$
(2)

其中: $b_i(i = 0 \sim 9)$ 为待回归分析的 10 个回归系数;x,y 是与回归系数对应的自变量(因子);dx 和 dy 为随机变量。

根据逐步回归分析原理,若最后得到的某个回归系数等于 0,则表示对应的自变量可剔除;复相关系数 c 表示当前回归分 析的显著性,它越接近于 1,则表示回归分析效果越好,即最终 筛选出来的自变量与随机变量的关系越紧密。对本研究中四 组检校数据的空间点平面误差进行逐步回归分析。实验证明 这四组回归分析的复相关系数都大于等于 0.9,即它们均得到 显著效果,说明空间点平面误差肯定服从某种分布,它们的分 布规律基本上是一样的,应该属于相同的一种或者多种系统误 差引起。下面通过实验分析说明误差来源引起空间点平面误 差的可能性。

#### 2.2 投影光线交会面非零误差及其交会面的不平性误差

对数码相机检校时,其算法的推导是基于平面格网的空间 坐标 Z = 0。而投影器检校时,采用的算法与数码相机检校的 类似,仍基于空间坐标 Z = 0 这一点,但实际上此时的空间点 Z 值并不是理想的 0 值。在投影器检校时,为与真实格网点区别 而垫上白纸,纸张是有一定的厚度,因而此时的空间坐标 Z 并 不为 0 而是纸张的厚度。

借助实际检校数据生成模拟数据,即直接取已进行过相机 检校和投影器检校的实际影像的外方位元素、相机参数以及投 影器参数等作为模拟数据的计算参数。因纸张的厚度引起每 个十字丝投到物方均产生残差 dX 和 dY,如图 2 所示。理论 上,投影器投到 Z<sub>e</sub> = 0.01 平面时应该1'是物方点,而由于忽略 了纸张的厚度便认为1 为物方点,1'和1 之间存在一定的残差 dX 和 dY、相应地,2'和2、3'和3 等均存在这种问题。因此有必 要讨论纸张的厚度对投影器检校精度产生影响的大小。投影 器的投影中心与每个投影交会面均有交点,已知投影器的内外 方位元素以及物方点的 Z<sub>e</sub> 值,通过共线方程便可解算出物方 点(如1',2',3')的空间坐标 X<sub>e</sub>和 Y<sub>e</sub>,公式如下:



**图2 投影光线交会面** 又因为 CCD 相机的内外方位元素已知,根据三点共线,便可解算出 Z = 0 平面时的物方点的空间坐标 X,和 Y,(如1、2、 3),如式(8),此时便可解算出相对应的点间的残差 dX 和 dY 的 差值。每个 Z 值对应着很多十字丝的残差 dX 和 dY 的一个面。

$$\begin{cases} X_{r} = \frac{-Z_{s_{c}}}{Z_{s_{c}} - Z_{v}} \times (X_{s_{c}} - X_{v}) + X_{s_{c}} \\ Y_{r} = \frac{-Z_{s_{c}}}{Z_{s_{c}} - Z_{v}} \times (Y_{s_{c}} - Y_{v}) + Y_{s_{c}} \end{cases}$$
(8)

$$\begin{cases} dX = X_r - X_v \\ dY = Y_r - Y_v \end{cases}$$
(9)

Z=0 mm

利用首次检校出的投影器和数码相机的内外方位元素的 数据模拟出残差 dX、dY 随 Z 值变化的结果,对投影器检校后 分别所得的残差 dX、dY(从精度表中获得)对应的点的 Z 值进 行相应的补偿。根据模拟数据,本研究对不同厚度的点分别获 得相应的补偿值 dZ,因此分别得到回归分析函数如下;

 $dz = -0.003816x^{2} + 0.008452xy + 0.007124y^{2} - 15.2478 \quad (10)$ 

- $\mathrm{d} z = -0.\ 002741 x^2 + 0.\ 006912 xy + 0.\ 005422 y^2 12.\ 5852 \ (\ 11\ )$
- $\mathrm{d} z = -0.\ 002046 x^2 + 0.\ 007421 xy + 0.\ 007541 y^2 20.\ 3625 \ (\ 12 \ )$
- $\mathrm{d} z = -0.\ 003621 x^2 + 0.\ 005998 xy + 0.\ 005126 y^2 16.\ 2584 \ (\ 13\ )$

通过这四个回归分析函数对相对应的空间点的 Z 值进行 修正,然后使用修正后的点坐标重新进行检校。残差 dX、dY 与 Z 之间的变化如图 3 所示。



#### 图3 残差dX、dY与Z之间的变化

表 3 所示的是投影器和数码相机的内外方位元素的数据 模拟出残差 dX、dY 随 Z 值变化的结果。由于篇幅有限,代表 性地列出 Z = 0.10 mm,Z = 0.15 mm,实际上 Z 的范围是 0 ~ 0.7 mm,间隔为 0.05 mm。

нП	Z = 0.10  mm		Z = 0.15  mm	
点亏 -	$\mathrm{d}X$	$\mathrm{d}Y$	$\mathrm{d}X$	$\mathrm{d}Y$
1	0.525	-0.562	0.687	-0.542
2	0.565	-0.597	0.647	-0.595
10	0.625	-0.483	0.637	-0.510
11	0.535	-0.414	0.602	-0.421
中误差/mm	0.582	0.521	0.680	0.603

表3 残差 dX、dY 随 Z 的模拟值变化的结果

表4 所示的是采用厚度 0.11 mm 纸张对投影器检校后所得的残差 dX、dY。根据表3,对表4 所对应的点的 Z 值进行相应的补偿。如纸张1 中的点号1 的残差 dX、dY 值与表 3 中Z = 0.15 mm 的相对应点号1 的残差 dX、dY 值最为接近,因此,对该点的 Z 值进行补偿,补偿值为 0.15。而纸张1 中的点号 10 的残差 dX、dY 值与表 3 中 Z = 0.10 mm 相对应点号10 的残差 dX、dY 值 最为接近,因此,对该点的 Z 的补偿值为 0.10。

表4 采用厚度 0.11 mm 纸张对投影器检校后所得的 dX、dY

占旦	纸张1(厚度0.11 mm)		
点 与	$\mathrm{d}X$	$\mathrm{d}Y$	
1	0.682	-0.545	
2	0.625	-0.562	
10	0.630	-0.502	
11	0.851	-0.559	
由误差/mm	0.852	0 651	

表5 所示的是修正空间点 Z 值前、后的检校结果误差表。 从表中可以看出,修正后比修正前的检校精度明显提高。

表5 修正空间点Z值前、后的检校结果误差

数据 一	像点中误差/像素		空间点中误差/mm		
	X方向(前/后)	Y方向(前/后)	X方向(前/后)	Y方向(前/后)	
1	0.45/0.32	0.44/0.30	0.87/0.70	0.69/0.57	
2	0.46/0.34	0.42/0.31	0.85/0.72	0.70/0.55	
3	0.44/0.31	0.40/0.30	0.88/0.79	0.72/0.60	
4	0.45/0.30	0.41/0.29	0.87/0.77	0.74/0.59	

#### 3 投影器精确检校的流程

因纸张的厚度引起每个十字丝投到物方均产生残差 dX 和 dY。借助实际检校数据生成模拟数据,即直接取已进行过 相机检校和投影器检校的实际影像的外方位元素、相机参数以 及投影器参数等作为模拟数据的计算参数,模拟出残差 dX、dY 随 Z 值变化的结果,每个 Z 值对应着很多十字丝的 dX 和 dY 的一个面。对未经过 Z 值补偿的投影器检校所得的残差 dX、 dY(从精度表中获得)与模拟出的相应点的残差 dX、dY进行匹 配,进而获取相应的 Z 值并进行补偿。最后通过回归分析函 数对所有相对应的空间点的 Z 值进行修正,然后使用修正后 的点坐标重新进行检校。其流程如图 4 所示。



#### 4 实验结果与分析

本文采用的实验系统如图 5 所示,整个三维量测硬件系统 主要由 DLP 数字投影器、Basler A302fs 工业 CCD 摄像机、平面 格网板、旋转平台、计算机五个部分组成。计算机控制 CCD 数 码相机拍摄、DLP 数字投影器投影以及旋转平台旋转,配置要 求不高,显卡需支持双屏显示,显示器的分辨率设置为 1024 × 768 像素。整个量测系统均通过计算机精确控制,实现投影和 拍摄的自动化,提高了整体实验的系统效率,具有便携、快速、 精度高的特点。



图5 实验系统结构

图 6 是从实验数据中随机抽取的几张空间点平面误差 (Z=0)的三维分布图(俯视图),十字丝中心(直线的某个端 点)代表空间点的空间位置,直线(非十字丝的一端)代表残差 偏移方向,其长度代表残差大小。图 7 为修正空间点 Z 值后进 行检校所得到的空间点平面误差的三维分布图(俯视图),它 所采用的相关实验数据与图 6 的一样。与图 6 相比,其残差 dX、dY 值明显减少。



表 6 为改进前后的投影器检校结果(内方位元素不变), 第一行为改进前的参数。第二行为改进后的参数,表 7 为相机 检校与投影器检校的误差对比表。可以看出,通过对空间点 Z 值修正后,投影器检校的精度在像点 X 方向上由原来的 0.46 像素提高到 0.31 像素,在像点 Y 方向上由原来的 0.45 像素提 高到 0.33 像素。

表6 改进前后的投影器检校结果

改进前后	$\varphi$	ω	к	$X_S$	$Y_S$	$Z_S$	
改进前	0.706	0.791	-0.731	- 593.722	- 1001.7	701 728.676	
改进后	0.706	0.793	-0.733	- 596. 722	- 1005.7	701 726.676	
	表7 相机检校与投影器检校的误差						
]	北较项		CCD	投影	器(前)	投影器(后)	
点数		380	2	228 2			
像点 X 中误差/像素		象素	0.23	0.	0.46 0.31		
像点 Y 中误差/像素		象素	0.21	0.	0.45 0.3		

#### 5 结束语

本文借鉴了数码相机的检校方法,投影器的检校方法是联 合二维直接线性变换和基于光束法平差进行的。投影器的检 校方法与数码相机的相同,精度却比数码相机的低,本文从投 影光线交会面非零误差对影响投影器检校精度的因素进行了 深入分析。实验证明这一因素对投影器检校精度影响最大,进 而对其空间点 Z 值进行补偿,从而实现投影器精确检校。

#### 参考文献:

- [1] SUN Jun-hua, ZHANG Guang-jun, WEI Zhen-zhong, et al. Large 3D free surface measurement using a mobile coded light-based stereo vision system [J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2006, 132 (2):460-471.
- [2] ISHII I, YAMAMOTO K, DOI K, et al. High-speed 3D image acquisition using coded structured light projection [C]//Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2007: 925-930.
- [3] ZHENG Li, ZHANG Jian-qing. Three dimensional reconstruction of irregular object with indigent texture based on structured light [C]// Proc of SPIE- the International Conference on Space Information Technology. 2005:1-6.
- [4] 郑莉,张剑清. 多视结构光点云的自动无缝拼接[J]. 武汉大学 学报:信息科学版,2009,34(2):199-202.
- [5] ZHANG Yong-jun, ZHANG Zu-xun, ZHANG Jian-qing. Digital camera calibration using 2D-DLT and collinear equation with planar scenes
  [J]. Geomatics and Information of Wuhan University, 2002, 27 (6):566-571.
- [6] ZHANG Zu-xun, ZHANG Jian-qing. Digital photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1996.
- [7] 詹总谦.基于纯平液晶显示器的相机标定方法与应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2006.
- [8] GRUEN A, AKCA D. Least squares 3D surface and curve matching [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 2005,59:151-174.