

文章编号 1004-924X(2008)11-2127-05

# 离轴三反光学镜头像面畸变的标定方法

吴国栋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**介绍了一种离轴三反光学镜头像面畸变的标定方法和步骤,以及标定系统的原理和组成。对三反系统镜头的像面畸变进行了分析,建立了畸变的数学模型,应用最小二乘一元回归的方法,求得镜头的成像像面方向的畸变,并利用高精度单轴转台和长焦距平行光管标定系统完成了离轴三反镜头像面畸变的标定。实际标定结果表明:该方法对像面绝对畸变的标定精度 $<2 \mu\text{m}(1\sigma)$ ,相对测量精度 $<1 \times 10^{-4}(1\sigma)$ ,可以满足离轴三反镜头高精度畸变标定要求,具有实际应用价值。

**关键词:**离轴三反镜头;像面畸变;数学模型;标定

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## Calibration of distortion for three-mirror off-axis

WU Guo-dong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** To obtain the distortion of three-mirror off-axis, the calibration method and procedure of a system are presented, the principle and the composition of calibration system are also introduced. The distortion of three-mirror off-axi is analyzed, then a mathematical model for distortion calibration is established by means of least square regress method and the image distortion of a three-mirror off-axis is calibrated by combining a high accuracy turn table and a long focal length collimator. The results show that the calibration accuracy of absolute distortion is less than  $2 \mu\text{m}(1\sigma)$ , and the calibration accuracy of relative distortion is less than a  $1 \times 10^{-4}(1\sigma)$ , which shows that proposed method can meet the request of high accuracy calibration of the distortion for three-mirror off-axis. It is valuable for the practical application.

**Key words:** three-mirror off-axis; image distortion; mathematical model; calibration

## 1 引言

摄影测量是 19 世纪以来在测绘领域发展起来的一个新分支,其主要内容是利用摄像机摄取

像的信息,来测定空间点的位置<sup>[1]</sup>。用像的信息准确描述空间物点的精确位置,前提是相机必须是精确的,相机使用前必须进行精密标定<sup>[2]</sup>。其中相机的镜头畸变大小在这里起着至关重要的作用,要求相机在多光谱条件下,分辨率高、体积小、

无色差、平像场。离轴三反系统可以满足上述要求<sup>[3]</sup>,该系统应用于测绘是未来的发展趋势。

本文介绍的系统是一种特殊设计的离轴三反系统<sup>[4]</sup>,整个光学系统是由主、次和三镜构成的。光学系统焦距为 650 mm,离轴角为  $5.8^\circ$ ,光学视场角为  $6^\circ \times 0.5^\circ$ ,光学设计最大相对畸变  $< 0.012\%$ ,装调后镜头的畸变要求  $< 0.03\%$ 。该系统像面使用了一块线阵 CCD,根据使用要求,沿使用方向测量像面畸变具有实际意义,为此引入像面畸变的数学模型,采用高精度单轴转台和长焦距平行光管标定系统完成了离轴三反镜头像面畸变的标定。

利用该方法在对镜头进行精密测量的基础上,采用最小二乘一元回归计算得到镜头的像面畸变,从而达到高精度的标定要求。

## 2 标定系统原理

根据精密测角法的原理,建立相应的数学模型,通过最小二乘一元回归求得镜头畸变。该方法可以完成长焦距小视场离轴光学系统的高精度标定。

离轴三反系统的畸变测量模型如图 1 所示。

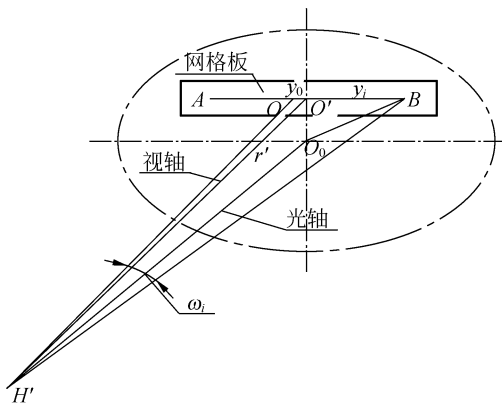


图 1 像面畸变示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distortion

其中, $O'$ 为网格板中心, $O$ 为像面主点, $O_0$ 为镜头光轴中心, $H'O'$ 为视轴, $H'O_0$ 为光轴, $AB$ 为网格板, $y_i$ 为离轴视场的像高, $y_0$ 为主点偏移量, $\omega_i$ 为离轴视场的视场角, $f'$ 为沿视轴测量的视轴主距。

根据上述数学模型,可以得到沿像面方向畸

变  $D_i$  的数学模型为:

$$D_i = y_i - (y_0 + f' \cdot \tan \omega_i), \quad (1)$$

该系统组成<sup>[5]</sup>如图 2 所示。整个系统主要由长焦距平行光管、焦面分划板、监视器、高精度网格板、LED 均匀照明组件、高精度单轴转台、高稳定度气浮平台组成。

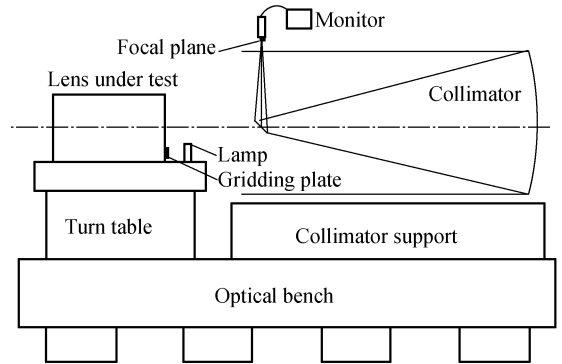


图 2 镜头标校仪原理图

Fig. 2 Principle of calibration instrument

将极限误差  $< 0.5''$  单轴转台和长焦距平行光管安装到气浮平台(固有频率  $f \leq 2$  Hz,  $2 \sim 100$  Hz 台面振动速度振幅频域  $v_{rms} \leq 10 \mu\text{m/s}$ )上,光管焦面安放线宽  $0.02$  mm 十字丝分划板,被测镜头焦面安装经计量部门标定的刻线间距误差  $< 1 \mu\text{m}$  的石英玻璃网格板,为避免温度影响采用 LED 均匀光源照明分划板。此外还要建立恒温(测试期间温度范围  $(18 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ,超净(10 万级超净间)实验室,为避免气流影响,整个平台要封闭,设备操作间与设备隔离,编制专用测试软件完成自动测试标定。

## 3 标定方法

标定时,首先把单轴转台调平 ( $< 0.4''$ ),其次利用自准直方法将十字丝准确安放到平行光管焦面并调平 ( $< 5''$ ),然后将镜头、网格板、光源和调整机构安装到单轴转台上,确保安装机构的稳定性,使镜头入瞳在光管的出瞳之内,入瞳尽量靠近转台回转中心。

利用经纬仪测量镜头立方镜基准,通过调整镜头支撑工装,将镜头视轴与光管同轴,使像面水平,这样完成了镜头的安装。

在平行光管像面处,利用测量显微镜观察网

格板目标像,利用网格板的调整工装,使得网格板在全视场内成像清晰,无倾斜和主点偏移,这样就完成了网格板的安装。

在光管焦面加装摄像机,将分划板和网格板像放大显示在控制室的监视器上,将网格板的刻线依次对准十字丝,计算机记录转台各个位置的读数,重复测量多次记录数据,这些数据包含了镜头畸变。

经以上步骤,得到了镜头像面上的像高真值对应的视场角测量值,将其作为镜头标定的测量数据。

## 4 标定数据的解算<sup>[6-7]</sup>

解算时,利用前述  $n$  组测量数据  $y_i$  和  $\omega_i$ ,采用最小二乘一元回归的方法,使用公式  $y_i = y_0 + f' \cdot \tan \omega_i$ ,求解正规方程组得到主点偏移量和主距的最佳估计值:

主距:

$$f' = \frac{n \cdot \sum (y_i \cdot \tan \omega_i) - \sum \tan \omega_i \sum y_i}{n \cdot \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2}, \quad (2)$$

主点偏移量:

$$y_0 = [\sum y_i - (\sum \tan \omega_i) \cdot f'] / n, \quad (3)$$

各视场像面畸变:

$$D_i = y_i - (y_0 + f' \cdot \tan \omega_i). \quad (4)$$

## 5 标定误差的理论分析

误差分析方法很多,这里采用微分法<sup>[8]</sup>对标定误差进行分析。

### 5.1 主要误差源

#### 5.1.1 单轴转台测角误差

由于单轴转台转角极限误差可以达到  $\Delta_{\omega_1} = 0.5''$ ,取均匀分布,标准差为  $\sigma_{\omega_1} = 0.5'' / \sqrt{3} = 0.29'' = 1.4 \times 10^{-6}$ 。

#### 5.1.2 刻线瞄准误差

光管焦距 7 500 mm,十字丝宽度 0.02 mm 对应的角度为  $0.55''$ ,瞄准时误差  $< 1/2$  线宽,取正态分布:

$$\sigma_{\omega_2} = 0.275'' / 3 = 0.09'' = 4.4 \times 10^{-7}.$$

#### 5.1.3 网格板的刻线误差

网格板经过国防科技工业第一计量测试研究中心校准,其最大误差为  $1 \mu\text{m}$ 。取正态分布  $\sigma_y = 1 \mu\text{m} / 3 = 0.33 \mu\text{m}$ 。

#### 5.1.4 温度、振动、气流的影响

在标定中要对温度、振动和气流等环境因素进行控制,采取建立恒温室、气浮隔振平台等措施,避免环境影响。

## 5.2 误差分析计算结果

在畸变误差分析中,畸变的测量结果和所有网格刻线误差及物方视场角测角误差有关,每一次瞄准测量都会对畸变的测量精度产生影响,在畸变的误差分析中应同时计算。

应用式(2),求得畸变标准差  $\sigma_{f'}$ :

$$\sigma_{f'} = \sqrt{\sum (\frac{\partial f'}{\partial y_i})^2 \sigma_y^2 + \sum (\frac{\partial f'}{\partial \omega_i})^2 \sigma_{\omega}^2}, \quad (5)$$

应用式(3),求得主点标准差  $\sigma_{y_0}$ :

$$\sigma_{y_0} = \sqrt{\sum (\frac{\partial y_0}{\partial y_i})^2 \sigma_y^2 + \sum (\frac{\partial y_0}{\partial \omega_i})^2 \sigma_{\omega}^2 + (\frac{\partial y_0}{\partial f'})^2 \sigma_{f'}^2}, \quad (6)$$

应用式(4),求得各视场绝对畸变标准差  $\sigma_{D_i}$ :

$$\sigma_{D_i} = \sqrt{(\frac{\partial D_i}{\partial y})^2 \sigma_y^2 + (\frac{\partial D_i}{\partial \omega})^2 \sigma_{\omega}^2 + (\frac{\partial D_i}{\partial y_0})^2 \sigma_{y_0}^2 + (\frac{\partial D_i}{\partial f'})^2 \sigma_{f'}^2}. \quad (7)$$

相对畸变为:  $\frac{\sigma_{D_i}}{y}$ 。

畸变的标定精度的计算结果见表 1。

表 1 镜头标定精度计算结果

Tab.1 Calibration accuracies for lens

Field of view	0.1 $\omega$	0.2 $\omega$	0.3 $\omega$	0.4 $\omega$	0.5 $\omega$
Calibration accuracy of absolute distortion( $\mu\text{m}$ )	1.50	1.51	1.52	1.54	1.55
Field of view	0.6 $\omega$	0.7 $\omega$	0.8 $\omega$	0.9 $\omega$	1 $\omega$
Calibration accuracy of absolute distortion( $\mu\text{m}$ )	1.58	1.61	1.64	1.68	1.72
Calibration accuracy of relative distortion	0.43				
	[ $1 \times 10^{-4}$ ]				

从以上分析计算结果来看,绝对畸变的标定精度均 $<2\ \mu\text{m}$ ,相对畸变标定精度 $<1\times 10^{-4}$ 。该精度可以满足该镜头的标定要求。

## 6 实际标定结果

根据上述的分析和方法,本文对该镜头进行了实际测试,畸变标定现场照片如图 3 所示。测试时利用标定好的网格板,网格间距为  $2.5\ \text{mm}$ ,长度为  $80\ \text{mm}$ ,测出每个网格对应的角度,共计 32 组数据。经过数据处理得到的标定结果见畸变曲线图 4。

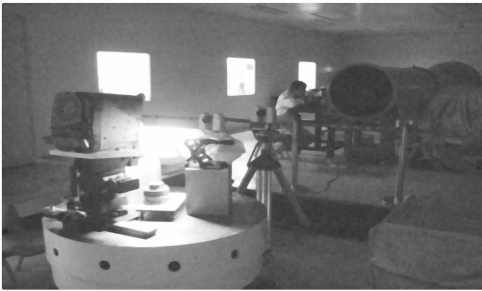


图 3 畸变标定照片

Fig. 3 Photo of distortion calibration

根据实际标定结果,最大的畸变  $1.2\ \mu\text{m}$ ,说明镜头本身畸变很小,实际测量中对误差源进行了严格控制,实际引入误差小于理论分析值,实际标定精度稍好于分析结果,说明该标定方法和数据处理方法合理可行。

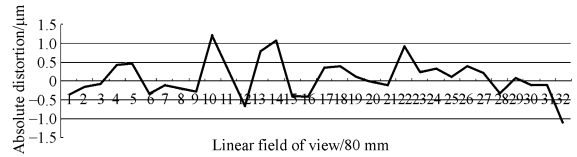


图 4 畸变测试曲线

Fig. 4 Curve of distortion

## 7 结 论

该方法已在实际项目中得到应用。利用该方法对像面绝对畸变的标定精度可以 $<2\ \mu\text{m}$  ( $1\sigma$ ),相对测量精度 $<1\times 10^{-4}$  ( $1\sigma$ )。通过该方法获得的畸变标定精度满足系统总体提出的标定精度要求,为工程上测绘产品镜头的高精度畸变标定提供了一种方法,尤其适用于长焦距小视场光学系统的畸变标定。

## 参考文献:

- [1] 杨秉新. 国外航天侦察相机和测绘相机发展概况[J]. 航天返回与遥感, 1998,19(2):16-24.  
YANG B X. The development survey of foreign space reconnaissance camera and mapping camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1998,19(2):16-24. (in Chinese)
- [2] 刘金国. 大视场光电测量系统的精密几何标定和畸变校正的研究[J]. 光学 精密工程, 1994,2(4):109-110.  
LIU J G. Study on high accurate geometric calibration of precision photoelectronic measuring system with large field of view and distortion correcting[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994,2(4):109-110. (in Chinese)
- [3] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,1994.  
WANG ZH J. *Handbook of Optic Technology*[M]. Beijing:China Machine Press,1994. (in Chinese)
- [4] 扬晓飞,张晓辉,韩昌元. Zemax 软件在离轴三反射镜系统计算机辅助装调中的应用[J]. 光学 精密工程, 2004,12(3):120-121.  
YANG X F,ZHANG X H,HAN CH Y. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(3):120-121. (in Chinese)
- [5] OHLHOF T,KORNUS W. Geometric calibration of digital three-line CCD cameras[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1994,30(1):71-81.
- [6] 吴国栋,宋丹. 测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定[J]. 光学 精密工程, 2007,15(11):1725-1730.  
WU G D,SONG D. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1725-1730. (in Chinese)
- [7] 吴国栋,韩冰,何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法[J]. 光学 精密工程, 2007,15(10):

1629-1631.

WU G D, HAN B, HE X. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1629-1631. (in Chinese)

[8] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2003:67-74.

FEI Y T. *Error Theory and Data Processing*[M]. Beijing, China Machine Press, 2003:67-74. (in Chinese)

作者简介:吴国栋(1965—),男,辽宁阜新人,研究员,主要研究方向为光学遥感器像质评价及测绘相机的几何标定技术。E-mail:wuguodong586@163.com

## ●下期预告

# 压电陶瓷与电流变液结合的新型声学及振动控制系统

李全禄<sup>1</sup>, 李 媛<sup>2</sup>, 黄朝晖<sup>2</sup>

(1. 陕西师范大学 物理学与信息技术学院 应用声学研究所, 陕西 西安, 710062;

2. 第四军医大学 军事预防医学系, 陕西 西安, 710033)

研究了由压电陶瓷与电流变液结合的一种新型声学及振动控制系统。通过分别制备高性能压电陶瓷 FD-PZT 和 PD-PZT 以及复合电流变液并对其性能进行测量后,研究和制作了由压电陶瓷与电流变液结合的一种新型声学及振动控制系统(在该系统中的压电陶瓷与电流变液之间连接有一高压延迟电路)。实验结果表明当外界施加一个瞬时冲击力作用于该新型声学及振动控制系统中的压电陶瓷上时,压电陶瓷由于压电效应产生瞬时高压(d-c current)输入复合电流变液,电流变液在短时由于其具有的流变性(其电致流变性可逆)迅速由液态变为固态,从而抵消了外来的瞬时冲击力。该新型声学及振动控制系统在振动控制和声学方面有广泛的应用前景。