

文章编号 1004-924X(2007)10-1628-05

# 精密测角法的线阵 CCD 相机几何 参数实验室标定方法

吴国栋, 韩冰, 何煦

(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:**建立了线阵 CCD 相机几何参数标定系统, 对该标定方案所用的设备、实验条件、基于精密测角法的算法和精度进行研究。根据标定精度要求, 确定了实验室主要测试设备和环境条件。利用高精度二维转台和 CCD 细分技术测得被标定系统的一系列视场角和对应像高。最后, 利用建立的数学模型, 应用最小二乘回归的方法, 求得相机几何参数。误差分析结果表明: 该方法对主距主点的标定精度可以达到  $\mu\text{m}$  级, 相对畸变的标定精度可以优于  $1 \times 10^{-4}$ 。该方法可以满足线阵相机的高精度几何标定要求, 具有较高的实际应用价值。

**关键词:**线阵; CCD 相机; 几何参数; 标定; 角度测量

**中图分类号:** V447.3 **文献标识码:** A

## Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab

WU Guo-dong, HAN Bing, HE Xu

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

**Abstract:** A calibration system for geometric calibration of line-array CCD camera is established. The equipment, environment, algorithm based on exact measuring angle and calibration precision are investigated. According to the requirement of calibration precision, equipment and environment are confirmed. The field angles and image heights are tested by combining high-accuracy two-dimension turntable with CCD subdivision measurement. Finally, the geometric parameters of the camera are calculated by a least square regression analysis. The analysis results show that the calibration precision of principal distance and principal point have reached micron level and the calibration precision of relative distortion is smaller than  $1 \times 10^{-4}$ . This method can meet the requirements of high precision calibration of line-array CCD and has higher practical application value.

**Key words:** line-array; CCD camera; geometric parameter; calibration; angle measurement

## 1 引言

线阵 CCD 相机是随着 CCD 器件问世而逐渐发展起来的。三线阵 CCD 相机由前视、正视和后视三个相机组成,其瞬间获取的三线阵影像在几何上等同于相同参数的框幅相片上的三条影像,使其在无地面控制点的摄影测量中具有重要价值<sup>[1]</sup>,同时具有测绘精度高,范围大和测绘实时动态等特点<sup>[2-3]</sup>,目前在测绘、军事、医疗、通讯等众多领域都得到了广泛应用。

要想实现高精度测绘,在实验室精确标定出线阵相机主点、主距和畸变等的各个参数是一个首要条件。如在德国柏林空间中心利用 DLR 系统对航空数字相机 ADS40 进行标定<sup>[4]</sup>,在瑞士 LH 实验室利用 CVG 设备对航空数字相机 ADS40 进行标定<sup>[5-6]</sup>,在德国柏林空间中心利用标定设备对 MOSM-2P<sup>[7-8]</sup>标定,以及在日本东京对 TLS 航空相机的标定<sup>[9]</sup>。本文从测角原理出发,提出了实验场地和设备要求,给出了数据处理方法,并对该方法的精度进行了分析,通过分析,证明了该方法用于线阵 CCD 相机的几何参数标定的可行性。

## 2 实验室标定内容

线阵相机在地面实验室标定时,对于透射式光学系统,由于空气的折射率( $n_a=1.000\ 297$ )和真空的折射率( $n_v=1.000\ 000$ )的不同,相机的几何参数会有变化,在地面标定时,需要模拟真空中的环境。如果在地面建立真空装置,价钱十分昂贵,在真空装置中检测几何参数也十分困难,因此,在地面标定时需要使用专门设计的校正镜加装到被测系统前模拟真空中的使用情况。另外,此标定方法要应用内插细分技术,而线阵 CCD 在垂直线阵  $x_0$  方向只有一个像元,无法进行内插细分,所以该方法不适用于主点坐标  $x_0$  的确定,因此,像主点的坐标取为像元中心。

线阵 CCD 相机的实验室标定内容很多,本文主要研究以下内容:

(1)相机主距( $f$ )的标定,标定精度 $\leq 10\ \mu\text{m}$ ;

(2)相机沿线阵方向主点( $y_0$ )的标定,标定精度 $\leq 0.2\ \text{pixel}$ ;

(3)相机的畸变( $D_i$ )的测定,标定精度 $\leq 1 \times 10^{-4}$ 。

### 2.1 实验室和配套设备要求

线阵 CCD 相机要想达到高精度标定,亚秒级高精度的测角设备、高质量平行光管和环境良好的实验室是必不可少的条件。

(1)二维转台

转台定位精度:方位误差 $\leq 0.5''$ (极限误差),俯仰误差 $\leq 0.5''$ (极限误差);转台工作范围:方位 $360^\circ$ ,俯仰 $360^\circ$ ;工作台载荷(有效): $\geq 300\ \text{kg}$ 。

(2)大口径平行光管

主镜材料采用德国肖特微晶玻璃,光管焦距 $f=7\ 500\ \text{mm}$ ,主镜面形精度: $0.025\lambda(\text{rms}, @633\ \text{nm})$ , $0.17\lambda(\text{PV}, @633\ \text{nm})$ 。

(3)气浮隔振平台

平台系统固有频率 $f \leq 2\ \text{Hz}$ , $2 \sim 100\ \text{Hz}$ 范围台面振动速度振幅频域 $V_{\text{rms}} \leq 10\ \mu\text{m/s}$ ,平行光管和二维转台放置在同一个气浮平台上。

此外还要建立恒温(温度范围 $18 \pm 2\ ^\circ\text{C}$ , $4\ \text{h}$ 温度变化 $< 0.5\ ^\circ\text{C}$ )超净(10 万级超净间)实验室,为避免外界影响,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。

### 2.2 标定过程

根据测角法的原理,标定装置原理图如图 1 所示。

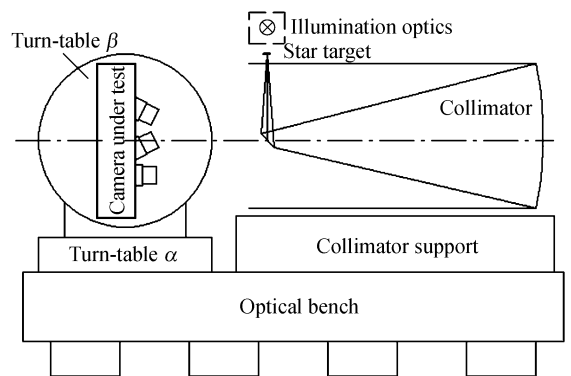


图 1 相机标定装置原理图

Fig. 1 Principle of camera calibration device

将自准直光管和高精度二维转台安放到气

浮光学平台上,利用 0.2 水平仪将二维转台调平到 0.5 以内,利用 0.5 徕卡经纬仪和标准平面镜,采用自准直的方法将光管调水平,将相机安装到高精度转台上,采用正倒镜测量的办法,利用事先制作的相机与转台的接口工装调整好相机相对转台位置,使相机光轴垂直于转台水平轴,在光管焦面加装带有分划板的自准直目镜,通过光学方法使线阵在光管焦面成像,按方位方向转动转台观察 CCD 边界是否扫过分划板刻线上一点,通过调整使 CCD 线阵方向与转台方位转动方向平行,并保证星点的亮度和光谱范围合适,每隔一定角度使星点在 CCD 靶面成像,记录星点坐标和转台转角。其中,像点坐标利用对 CCD 线阵方向成像的灰度值进行内插细分<sup>[10]</sup>求出,实现亚像元精度测量,经过多次测量,使像点坐标测量精度标准差达到 1/20 pixel<sup>[11]</sup>。转角值由转台电控系统和计算机采集,转角测量精度极限误差 $<0.5''$ 。使用上述的一系列测量数据,利用最小二乘回归法<sup>[12]</sup>,可以求得相机的主距、主点和径向畸变。

### 2.3 主点主距和畸变的计算方法

基于上述  $n$  组测量数据  $y_i$  和  $\omega_i$ ,利用最小二乘多元回归的方法,使用公式

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

式中, $y_i$  为不同物方视场角下像点位置坐标; $y_0$  为主点位置坐标; $f$  为相机主距; $\omega_i$  为不同物方视场角。

误差方程为:

$$v_i = y_i - (y_0 + f \cdot \tan \omega_i) \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

由正规化方程组:

$$\begin{cases} n \cdot y_0 + (\sum \tan \omega_i) \cdot f = \sum y_i \\ (\sum \tan \omega_i) \cdot y_0 + (\sum \tan^2 \omega_i) \cdot f = \sum (y_i \cdot \tan \omega_i), \end{cases} \quad (3)$$

求解正规方程组得到主点、主距的最佳估计值:

主距:

$$f = \frac{n \cdot \sum (y_i \cdot \tan \omega_i) - \sum \tan \omega_i \sum y_i}{n \cdot \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2}, \quad (4)$$

主点:

$$y_0 = [\sum y_i - (\sum \tan \omega_i) \cdot f] / n, \quad (5)$$

各视场径向畸变:

$$D_i = v_i = y_i - (y_0 + f \cdot \tan \omega_i). \quad (6)$$

该方法的计算结果能保证求得的系统主点主距,使该系统视场范围内的畸变均方和最小,最有利于测绘精度的提高。

## 3 标定方法的误差分析

误差分析方法很多,这里采用微分法<sup>[13]</sup>对标定误差进行分析。

### 3.1 主要的误差源

(1) 二维转台测角误差

由于二维转台转角极限误差可以达到  $\Delta_\omega = 0.5''$ ,取均匀分布,标准差为  $\sigma_\omega = 0.5''/\sqrt{3} = 0.29'' = 1.405 \times 10^{-6}$ 。

(2) CCD 细分误差

星点像位置坐标精度主要由 CCD 细分精度决定,CCD 经灰度内插细分后测量精度可达 1/20 pixel(像元尺寸  $6.5 \mu\text{m}$ ), $\sigma_y = 6.5/20 = 0.325 \mu\text{m}$ 。

(3) 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。

### 3.2 误差计算

在主距误差分析中,主距的测量结果与所有星点像位置坐标及物方视场角有关,每一次对星点像位置坐标测量及物方视场角的测量都会对主距的测量精度产生影响,所以在主距的误差分析中应同时计算。我们认为测量中位置坐标及物方视场角测量标准差是不变的。

应用公式(4),求得主距标准差  $\sigma_f$ :

$$\sigma_f = \sqrt{\sum (\frac{\partial f}{\partial y_i})^2 \sigma_y^2 + \sum (\frac{\partial f}{\partial \omega_i})^2 \sigma_\omega^2}. \quad (7)$$

在主点误差分析中,主点的测量结果和所有星点位置坐标及物方视场角有关,每一次的星点位置坐标测量及物方视场角的测量都会对主距的测量精度产生影响,同时还要考虑主距测量精度对主点测量结果的影响,这些在主点的误差分析中都应同时计算。

应用公式(5),求得主点标准差  $\sigma_{y_0}$ :

$$\sigma_{y_0} = \sqrt{\sum (\frac{\partial y_0}{\partial y_i})^2 \sigma_y^2 + \sum (\frac{\partial y_0}{\partial \omega_i})^2 \sigma_\omega^2 + (\frac{\partial y_0}{\partial f})^2 \sigma_f^2} \quad (8)$$

在畸变误差分析中,畸变的测量结果和相应星点位置坐标及物方视场角有关,同时还要考虑主距、主点测量精度对畸变测量结果的影响,在畸变的误差分析中上述 4 项应同时考虑。

应用公式(6)求得各视场绝对畸变标准差

$$\sigma_{D_i} = \sqrt{(\frac{\partial D_i}{\partial y})^2 \sigma_y^2 + (\frac{\partial D_i}{\partial \omega})^2 \sigma_\omega^2 + (\frac{\partial D_i}{\partial y_0})^2 \sigma_{y_0}^2 + (\frac{\partial D_i}{\partial f})^2 \sigma_f^2} \quad (9)$$

相对畸变为:  $\frac{\sigma_{D_i}}{y}$  (取  $y$  为半线视场尺寸)

### 3.3 误差分析结果

本文以不同参数的相机<sup>[14]</sup>为例,主距、主点和相对畸变的标定精度的计算结果见表 1:

从以上分析计算结果来看,对于视场角较大的系统,主距主点的标定精度可以达到 1  $\mu\text{m}$ ,对于视场角较小的系统,主距主点的标定精度可以达到 5  $\mu\text{m}$ ,相对畸变测量精度优于  $1 \times 10^{-4}$ 。该精度可以满足航空航天测绘要求。

表 1 相机标定精度计算结果

Tab.1 Data of calibration accuracy for camera

Characteristics	Camera			
	WAAC	DPA	HRSC	TLS
Focal length (mm)	21.65	80	175	60
Field of view (°)	80	74	12	61.5
CCD-line (pixel)	5 184	12 000	5 184	10 200
Pixel size ( $\mu\text{m}$ )	7.0	10.0	7.0	7.0
Principal distance calibration accuracy ( $\mu\text{m}$ )	0.46	0.68	4.48	0.69
Principal point calibration accuracy ( $\mu\text{m}$ )	0.22	0.33	0.29	0.24
Relative distortion calibration accuracy ( $1 \times 10^{-4}$ )	0.27	0.12	0.33	0.16

## 4 结 论

根据分析结果可以看出,该标定方法和数据处理方法可以使主点主距标定精度达到  $\mu\text{m}$  量级,径向畸变的标定精度优于  $1 \times 10^{-4}$ 。上述分析选用了 10 组测试数据,如果有更高的要求,增加采样点还可以提高测量精度。该装置还可以进行多线阵相机间的交会角、视轴平行性以及线阵 CCD 间平行性的检测。

### 参考文献:

[1] 胡燕,胡莘,王新义,等. 偏流角对星载三线阵相机摄影的影响[J]. 测绘科学,2006,31(4):62-63.  
 HU Y, HU X, WANG X Y, et al.. The influence of drift angle on satellite photography of three-line array camera [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(4): 62-63. (in Chinese)

[2] 王冬,冯文灏,卢秀山,等. 基于多片空间后方交会的 CCD 相机检校[J]. 测绘科学,2006,31(4):64-66.  
 WANG D, FENG W H, LU X SH, et al.. CCD camera calibration based on space resection with multi-image[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(4): 64-66. (in Chinese)

[3] 扬秉新. 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)

[4] OHLHOF T, KORNUS W. Geometric calibration of digital three-line CCD cameras[C]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Como, Italy*, 1994,30:71-81.

[5] PACEY R E, WALKER A S, SCHEIDT M. Calibration of analog and digital airborne sensors at LH systems[C]. *Proceedings of the 1999 ASPRS Annual Conference, Portland, Oregon*, 1999:950-956.

[6] SCHUSTER R. Sensor calibration and geometric calibration of a three line stereo camera[C]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Como, Italy*, 1994,30:265-271.

[7] DORRER E, MAIER W, UFFENKAMP V. Analytical kinematic sensor orientation of MOMS-02 linear array stereo imagery[J]. *Integrated Sensor Orientation*, 1995:261-273.

[8] LEHNER M, KORNUS W. Digital photogrammetric processing of MOMS-02/D2 magery[J]. *ISPRS Congress*

Commission 111/WG2,1996,7:9-19.

- [9] CHEN T, SHIBASAKI R, MORITA K. High precision georeference for airborne three-line scanner(TLS) imagery [C]. *3rd International Image Sensing Seminar on New Developments in Digital Photogrammetry, Gifu, Japan*, 2001:71-82.
- [10] 李广泽, 刘金国, 郝志航. 基于双正交小波的星点细分定位方法研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增):218-221.  
LI G Z, LIU J G, HAO ZH H. Research of subpixel subdivision location algorithm for star image based on biorthogonal wavelet[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.):218-221. (in Chinese)
- [11] 刘金国, 李杰, 郝志航. 三线阵相机亚像元精度几何标定方法研究[J]. *光电工程*, 2004, 31(1):36-39.  
LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on a geometric calibration method for three-linear-array CCD camerawith sub-pixel accuracy[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(1): 36-39. (in Chinese)
- [12] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.  
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing*[M]. Beijing:China Machine Press, 2003. (in Chinese)
- [13] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春:长春光机所, 2003.  
WANG J Q. *Total Design of Optic Instrument*[M]. Changchun:Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics, 2003. (in Chinese)
- [14] 王金堂, 乌崇德. 国外几种星载光学遥感器的的发展情况简介[J]. *航天返回与遥感*, 2002, 23(2):15-20.  
WANG J T, WU CH D. Introduction of some foreign spaceborne optical remote sensing[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(2):15-20. (in Chinese)

**作者简介:**吴国栋(1965—),男,辽宁阜新,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,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研究。E-mail:wuguodong586@163.com