

文章编号 1004-924X(2012)03-0462-06

离轴三反时间延迟积分 CCD 相机内方位元素和畸变的标定

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: 由于测绘相机的关键几何参数内方位元素和畸变的标定精度决定相机的立体测绘精度, 本文提出了一种离轴三反时间延迟积分(TDI)CCD 相机内方位元素和畸变的标定方法。介绍了离轴三反 TDI)CCD 相机的光学系统和像面拼接方法, 明确了该相机内方位元素和畸变的含义。建立了标定系统及相应的数学模型, 应用最小二乘回归法求得了内方位元素和畸变的表达式。利用提出的方法标定了相机的内方位元素和畸变, 并对标定误差进行了分析。结果表明: 该方法对主点的标定精度可达 $1.0 \mu\text{m}(1\sigma)$, 对主距的标定精度可达 $2.0 \mu\text{m}(1\sigma)$, 对畸变的标定精度为 $2.3 \mu\text{m}(1\sigma)$ 。结果显示提出的标定方法快捷且有效。

关键词: 时间延迟积分 CCD 相机; 离轴三反相机; 内方位元素; 畸变; 标定

中图分类号: V447.3; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122003.0462

Calibration of inner orientation parameters and distortion for three-mirror off-axis TDI)CCD camera

WU Guo-dong*

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

* Corresponding author, E-mail: wuguodong@163.com

Abstract: The stereo mapping precision of mapping cameras depends on the calibration precision of the geometric parameters, such as inner orientation parameters and distortion, therefore, a new calibration method of inner orientation parameters and distortion for a three-mirror off-axis Time Delay Integration(TDI)CCD camera was proposed. The optical system and image plane stitching of the camera were introduced, and the meanings of the inner orientation parameters and distortion were defined. A calibration system and corresponding mathematical model were established, then the expressions of inner orientation parameters and distortion were settled by the least square poly-regress method. A calibration experiment was performed on the camera, and results show that the point calibration accuracy and the focal calibration accuracy are better than $1.0 \mu\text{m}(1\sigma)$ and $2.0 \mu\text{m}(1\sigma)$, respectively. Moreover, the distortion calibration accuracy has been $2.3 \mu\text{m}(1\sigma)$. Obtained results demonstrate that the calibration method has the advantages in the speed and efficiency for three-mirror

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60575025)

off-axis TDICCD cameras.

Key words: Time Delay Integration (TDI) CCD camera; three-mirror off-axis camera; inner orientation parameter; distortion; calibration

1 引 言

摄影测量是 19 世纪在测绘领域发展起来的一个新分支,其主要内容是利用摄影相机获取像的信息来测定空间点的位置。为了使像的信息准确描述空间物点的位置,其前提是相机必须是准确的,故相机使用前必须进行内方位元素和畸变的精密标定。

目前,由于离轴三反光学系统在多光谱条件下,具有大视场、无遮拦、无一次杂光、理想传函高、光学筒长短、无色差、平像场等诸多优点,因此在测绘相机上得到了广泛应用。如印度立体测绘卫星 CARTOSAT-1^[1-2](又名 IRS P5)采用离轴三反两线阵相机;日本研制并发射了先进的陆地观测卫星 ALOS^[3-5],该卫星配备了目前世界上公开报道的最先进的三线阵 CCD 立体测绘相机 PRISM,采用的也是离轴三反系统。人们对测绘相机的标定进行了大量的专业研究,并找出了多种有效的标定方法^[6-8],精密测角算法是测绘相机内方位元素实验室内标定采用的一种经典方法,然而,由于经典的标定理论模型是建立在同轴光学系统上的,而离轴三反光学系统由于视场的偏置,像面不在轴上(相当于同轴系统的轴外部分),因此需对相机的内方位元素的定义、标定理论模型做相应的改动。本文着重描述了离轴三反 TDICCD 相机内方位元素和畸变的标定方法。

2 离轴三反 TDICCD 相机介绍

本文要标定的相机是一种特殊设计的离轴三反系统^[9],相机的光学系统是由主镜、次镜、三镜和折叠镜构成的,光学系统如图 1 所示。光学系统焦距为 2 184.5 mm,离轴角为 6°,相对孔径 $D/f' = 1/9$ 。光学视场角为 $7^\circ \times 0.7^\circ$,光学设计最大相对畸变为 0.003 9%。光学系统的畸变曲线如图 2 所示,装调后相机的畸变要求小于 0.03%。

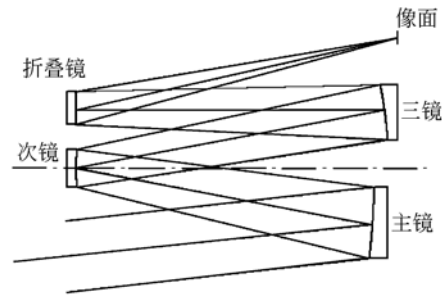


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Sketch map of optical system

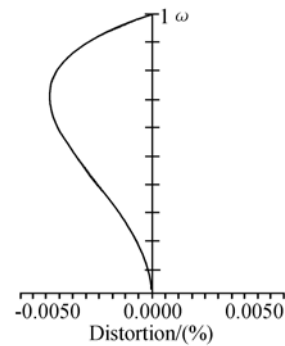


图 2 光学系统的畸变曲线

Fig. 2 Curve of distortion

焦平面 CCD 有棱镜分光、直线拼接、交错拼接等几种拼接方式。由于交错拼接无需使用分光棱镜,不会引入额外的色差,也不会造成成像光能的减弱,因此,该系统焦平面采用 8 片 TDICCD 交错拼接的方式,其焦平面如图 3 所示。TDICCD 的拼接精度如下:

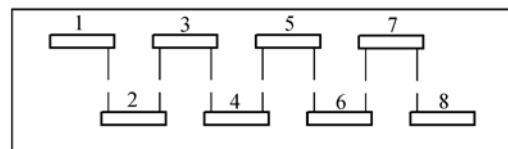


图 3 焦平面示意图

Fig. 3 Sketch map of focal plane

- (1) 各片 CCD 共面性为 $\pm 0.002 5 \text{ mm}$;
- (2) 两片 CCD 间搭接像元数及搭接精度为 $\pm 0.002 \text{ mm}$;

(3) 两行 CCD 平行性误差为 $\pm 0.002 \text{ mm}$;

(4) 每行 CCD 共线性误差为 $\pm 0.002 \text{ mm}$ 。

因为 TDICCD 不在同一条线上, 输出图像空间上沿推扫成像方向存在错位, 相邻 CCD 对同一直线上的目标在输出时间上有一个延迟, 而利用图像处理技术对图像进行配准融合, 可以等效于单一宽视场传感器的成像效果。因此, 这里将相机内方位元素和畸变的标定简化为对 1357 一行 TDICCD 所在线视场的标定。

3 标定方法

3.1 标定系统的组成

该标定系统^[10]如图 4 所示。整个系统由平行光管、焦面星点分划板、高精度单轴转台、转台控制系统、相机图像处理系统(含标定软件)和高稳定度光学平台组成。

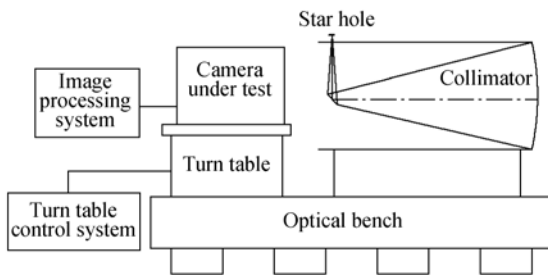


图 4 相机标定系统示意图

Fig. 4 Calibration system

3.2 标定方法^[11-12]

标定时, 首先把单轴转台调平(调平精度优于

$0.4''$), 其次将装有星点的平行光管调平(调平精度优于 $5''$), 然后将相机安装到单轴转台上, 将相机 TDICCD 调平。

利用相机光轴基准镜, 通过调整相机支撑工装, 使相机视轴与平行光管同轴, 记录转台方位角值, 转动转台, 使星点在 CCD 靶面成像, 每隔一定角度记录星点坐标 x_i 和转台转角 ω_i ($i=1, 2, 3, \dots$)。其中, 像点坐标利用 CCD 线阵方向成像的灰度值进行细分求出, 实现亚像元精度测量, 像点坐标测量标准差达到 $1/20 \text{ pixel}$ 。转角值由转台电控系统和计算机采集, 转角测量极限误差为 $0.5''$ 。

3.3 标定数据的解算

解算时, 利用测量数据 x_i 和 ω_i , 采用最小二乘回归分析的方法, 使用公式 $x_i = x_0 + f' \cdot \tan \omega_i$, 求解正规方程组得到主点偏移量 x_0 和主距 f' 的最佳估计值:

$$f' = \frac{n \cdot \sum (x_i \cdot \tan \omega_i) - \sum \tan \omega_i \sum x_i}{n \cdot \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2}, \quad (1)$$

$$x_0 = [\sum x_i - (\sum \tan \omega_i) \cdot f'] / n. \quad (2)$$

各视场畸变

$$D_i = x_i - (x_0 + f' \cdot \tan \omega_i). \quad (3)$$

3.4 标定误差的分析

本文采用微分法^[13]对标定误差进行分析。

主距公式按照不同视场展开可表示为如下 2 种形式:

$$f' = \frac{n(x_1 \tan \omega_1 + x_2 \tan \omega_2 + \dots + x_n \tan \omega_n) - \sum \tan \omega_i (x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2} =$$

$$\frac{(n \cdot \tan \omega_1 - \sum \tan \omega_i) \cdot x_1}{n \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2} + \frac{(n \cdot \tan \omega_2 - \sum \tan \omega_i) \cdot x_2}{n \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2} + \dots + \frac{(n \cdot \tan \omega_n - \sum \tan \omega_i) \cdot x_n}{n \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2}, \quad (4)$$

$$f' = \frac{n(x_1 \tan \omega_1 + x_2 \tan \omega_2 + \dots + x_n \tan \omega_n) - (\tan \omega_1 + \tan \omega_2 + \dots + \tan \omega_n) \cdot \sum x_i}{n \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2} =$$

$$\frac{(n \cdot x_1 - \sum x_i) \cdot \tan \omega_1}{n \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2} + \frac{(n \cdot x_2 - \sum x_i) \cdot \tan \omega_2}{n \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2} + \dots + \frac{(n \cdot x_n - \sum x_i) \cdot \tan \omega_n}{n \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2}. \quad (5)$$

主点偏移量公式按照不同视场展开可表示为如下 2 种形式:

$$x_0 = \left[x_1 + x_2 + \dots + x_n - \left(\sum \tan \omega_i \right) \cdot f \right] / n = \frac{x_1}{n} + \frac{x_2}{n} + \dots + \frac{x_n}{n} - \frac{\left(\sum \tan \omega_i \right) \cdot f}{n}, \quad (6)$$

$$x_0 = \left[\sum x_i - \left(\tan \omega_1 + \tan \omega_2 + \dots + \tan \omega_n \right) \cdot f \right] / n = \frac{\sum x_i}{n} - \left(\frac{f \cdot \tan \omega_1}{n} + \frac{f \cdot \tan \omega_2}{n} + \dots + \frac{f \cdot \tan \omega_n}{n} \right). \quad (7)$$

主距的测量方差为:

$$\sigma_{f'}^2 = \left(\frac{n \cdot \tan \omega_i - \sum \tan \omega_i}{n \cdot \sum \tan^2 \omega_i - \left(\sum \tan \omega_i \right)^2} \right)^2 \cdot (\delta x)^2 + \left(\frac{\left(n \cdot x_i - \sum x_i \right) \cdot \sec^2 \omega_i}{n \cdot \sum \tan^2 \omega_i - \left(\sum \tan \omega_i \right)^2} \right)^2 \cdot (\delta \omega)^2. \quad (8)$$

主点位置的测量方差为:

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{1}{n} \right)^2 (\delta x)^2 + \left(\frac{f}{n} \cdot \sec^2 \omega_i \right)^2 \cdot (\delta \omega)^2. \quad (9)$$

畸变测量方差为:

$$\sigma_D^2 = (\delta x)^2 + \left(f \cdot \sec^2 \omega_i \right)^2 \cdot (\delta \omega)^2. \quad (10)$$

式(8)、(9)、(10)是对某一视场 i 求得的。评价整个视场时,求得各个视场的测量误差之后取算术平均值即可。方差取平方根得到均方根误差 σ 。

3.4.1 主要误差源

(1)单轴转台测角误差

单轴转台小角度的转角极限误差 $\Delta_{\omega_1} = 0.5''$, 取均匀分布,标准差为 $\sigma_{\omega_1} = 0.5'' / \sqrt{3} = 0.3''$ 。

(2)TDICCD 拼接测量误差

由于像面 CCD 是由多片 CCD 拼接而成, CCD 拼接仪的测量极限误差 $\Delta_{r_1} = 2 \mu\text{m}$,取正态分布, $\sigma_{r_1} = 2 \mu\text{m} / 3 = 0.67 \mu\text{m}$ 。

(3)星点位置判读误差

星点位置判读误差(像元尺寸为 $8.75 \mu\text{m}$):

$$\sigma_{r_2} = 8.75 \mu\text{m} / 20 = 0.44 \mu\text{m}.$$

3.4.2 误差分析结果

内方位元素及畸变的标定精度如图 5~7 所示。

根据上述分析结果可知,主点偏移量的均方根误差平均值为 $1.2 \mu\text{m}$;主距的均方根误差平均值为 $2.3 \mu\text{m}$;畸变的均方根误差平均值为 $3.4 \mu\text{m}$ 。

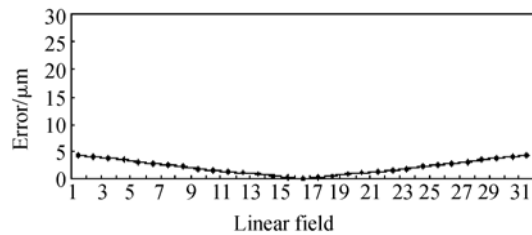


图 5 主距标定误差曲线

Fig. 5 Curve of focal calibration errors

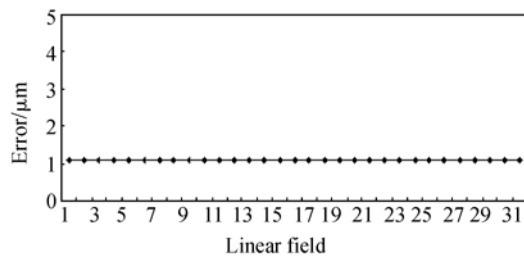


图 6 主点标定误差曲线

Fig. 6 Curve of point calibration errors

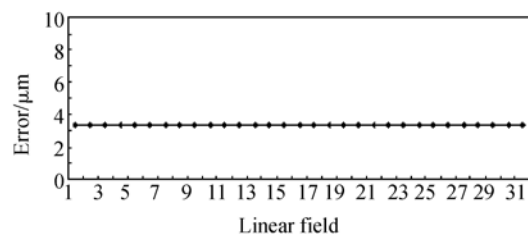


图 7 畸变标定误差曲线

Fig. 7 Curve of distortion calibration errors

4 实际标定结果

根据上述的分析和标定方法,本文对该相机进行了实际测试。测试时在相机的左右视场各取 15 个点,共计 30 组数据。重复测量 5 次,经过数据处理得到的内方位元素的标定结果如表 1 所示,畸变标定结果如图 8 所示。

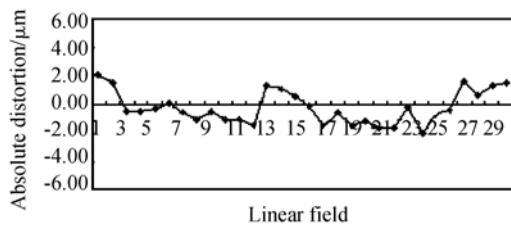


图 8 畸变标定结果

Fig. 8 Results of distortion calibration

表 1 内方位元素标定结果

Tab. 1 Results of inner orientation parameters

Number	Focal/mm	X coordinate/pixel
1	2 187. 613	48. 832
2	2 187. 616	48. 952
3	2 187. 612	48. 789
4	2 187. 617	48. 861
5	2 187. 614	48. 941
Average	2 187. 614	48. 875
MRS(1 σ)	0. 002	0. 114

根据实际标定结果,主点标定精度的均方根

为 $1.0 \mu\text{m}$ (0.114 pixel),主距标定精度的均方根为 $2.0 \mu\text{m}$,畸变标定精度的均方根为 $2.3 \mu\text{m}$ 。实际测量需要严格控制误差源,其标定结果是数学规划后的结果,且好于分析结果,因此,该标定方法和数据处理方法合理可行。

5 结 论

本文介绍了一种离轴 TDICCD 相机内方位元素和畸变的标定方法。通过对离轴 TDICCD 相机光学系统和像面拼接方法的介绍,明确了离轴 TDICCD 相机内方位元素和畸变的含义,建立了标定系统及内方位元素和畸变的数学模型。实测结果显示:该方法对主点的标定精度可达 $1.0 \mu\text{m}$ (1σ),对主距的标定精度可以达 $2.0 \mu\text{m}$ (1σ),对畸变的标定精度可达 $2.3 \mu\text{m}$ (1σ)。由此表明,该方法是一种有效实用的离轴三反 TDICCD 相机内方位元素和畸变的标定方法,并在离轴三反 TDICCD 相机研制中发挥了重要作用。

参考文献:

- [1] CRESPI M, BARBATO F, De VENDICTIS L, *et al.*. Orientation, or thorectification, terrain, and city modeling from Cartosat-1 stereo imagery: preliminary results in the first phase of ISPRS-ISRO C-SAP [J]. *J. Appl. Remote Sens.*, 2008, 2: 023523-1-14.
- [2] NIKOLAKOPOULOS K G, TSOMBOS P I, LAT HOURAKIS G. DSM from ALOS and comparison with airphoto DSM: The case of Thessaloniki, Greece[J]. *SPIE*, 2009,7478: 74780L-1-10.
- [3] NIKOLAKOPOULOS K G, VAIPOULOS A D, TSOMBOS P I. DSM from ALOS data: The case of Andritsena, Greece [J]. *SPIE*, 2010, 7831: 78310K-1-10.
- [4] TADASHI I, HARUYOSHI K, HIROTO I, *et al.*. Current status of Advanced Land Observing Satellite-3 (ALOS-3)[J]. *SPIE*, 2010,7826: 78260C-1-6.
- [5] YU J H, GE L L, RIZOS C. Digital elevation model generation using multibaseline Advanced Land Observing Satellite/phased array type L-band synthetic aperture radar imagery [J]. *J. Appl. Remote Sens.*, 2011,5: 053510-1-13.
- [6] 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):109-120.
LIU J G. Study on high accurate geometrical calibration of precision photo electronic measuring system with large field of view and distortion correcting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(4): 109-120. (in Chinese)
- [7] 刘波,贾继强,丁亚林,等.基于测角法的 CCD 航测相机实验室几何标定[J]. *激光与红外*, 2010,40(3):298-301.
LIU B, JIA J Q, DING Y L, *et al.*. Geometric calibration with angle measure for CCD aerial photogrammetric camera in laboratory[J]. *Laser & Infrared*, 2010,40(3):298-301. (in Chinese)
- [8] 刘伟毅,丁亚林,贾继强,等.借助于星点标定相机内方位元素[J]. *光学 精密工程*, 2010,18(9):2086-2089.
LIU W Y, DING Y L, JIA J Q, *et al.*. Calibration of inner orientation elements for camera by means of star points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2086-2089. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] OHLHOF T,KORNUS W, Geometric calibration of digital three-line CCD cameras[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1994,30:71-81.
- [11] 吴国栋. 离轴三反镜头像面畸变的标定方法[J]. *光学精密工程*,2008,16(11):2127-2130.
WU G D. Calibration of distortion for three-mirror off-axis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (11): 2127-2130. (in Chinese)
- [12] 吴国栋,韩冰,何煦,等. 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, *et al.*. 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)
- [13] 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,1987年于天津大学获得学士学位,主要研究方向为光学遥感器像质评价及测绘相机几何标定技术。E-mail: wuguodong586@163.com

●下期预告

基于正弦波磁光调制的大范围高精度 空间方位失调角传递方法

杨志勇,周召发,张志利

(第二炮兵工程学院 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室,陕西 西安 710025)

为了扩大基于正弦波磁光调制的方位传递系统的传递范围、提高传递精度,建立了一种空间大范围高精度方位失调角传递方法。该方法在分析当前方位失调角传递原理的基础上,通过引入二倍角公式扩大了失调角的传递范围;通过分析失调角与磁光调制后光强信号中横坐标不变的极值点的关系,建立了失调角测量模型,并利用信号中极值点的对比细化了测量模型;提出了大角度查表和小角度近似逼近的方法,解决了测量模型中反正切函数的具体实现问题。仿真结果表明:失调角的理论传递范围明显扩大,精度较高。实验结果表明:实际的失调角传递范围为 $-64^{\circ}\sim 64^{\circ}$,传递误差在 $10''$ 以内,优于当前方法。提出的方法为实现空间方位失调角大范围、高精度传递提供了一种切实可行的参考。