

## 新的相机交会角在轨标定方法

刘姜伟, 黄海乐

(中国天绘卫星中心, 北京 102102)

**摘要:** 提出了一种新的在轨标定相机交会角的方法, 该方法不同于目前广泛采用的摄影测量中的后方交会。以三线阵 CCD 测绘相机为例, 通过对其工作原理的分析, 建立了求解相机交会角的几何模型, 并利用天绘卫星三线阵影像数据进行了相关试验。结果表明, 该方法可行, 计算结果精度较高, 与摄影测量方法所得结果非常接近。同时, 计算分析了定轨精度和地面控制点精度对相机交会角精度的影响。相对于摄影测量的方法而言, 该方法理论简单, 易于理解, 可进一步应用于高分辨相机和多光谱相机离轴角的在轨标定, 具有重要意义。

**关键词:** 三线阵 CCD 相机; 相机交会角; 几何模型; 天绘卫星

**中图分类号:** V445.8    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3423-06

## New method for in-flight calibration of camera's intersection angle

Liu Jiangwei, Huang Haile

(Center of TH-Satellite of China, Beijing 102102, China)

**Abstract:** A new method for the in-flight calibration of camera's intersection angle was put forward. It is different from the photogrammetric resection which is widely used at present. Take the three-line-array CCD surveying and mapping camera as example, through the analysis of its working principle, the geometric model to calculate the camera's intersection angle was established, and the correlative experiment using the image data of TH satellite was carried out. Result shows that this method is feasible, and the outcome is very close to the conclusion got by the photogrammetric method. Meanwhile, the affection of the orbit determination precision and the ground control points' precision on the camera's intersection angle was calculated and analyzed. Compared with the photogrammetric method, it is easier to understand, and can further be used to calibrate the off-axis angle of the multispectral camera and high definition camera in-flight. It is of great significance.

**Key words:** three-line-array CCD camera; camera intersection angle; geometric model; TH satellite

收稿日期: 2014-02-11; 修订日期: 2014-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61108066)

作者简介: 刘姜伟(1987-), 男, 硕士, 主要从事摄影测量与遥感方面的研究。Email: 459845964@qq.com

## 0 引言

对于无地面控制点的传输型卫星摄影测量,三线阵 CCD 相机是较为理想的传感器<sup>[1-2]</sup>。三线阵 CCD 相机的内方位元素对测绘精度影响很大,尤其是相机交会角。有计算表明,1"的相机交会角误差可以带来超过 5 m 的高程误差。三线阵 CCD 相机的内方位元素,在发射前可以通过地面实验室精确检定进行标定,但发射过程中由于发射振动,以及卫星在轨飞行期间由于失重、温度变化等影响,会导致相机内方位元素发生一系列变化,尤其是相机交会角的变化,会给测绘精度带来很大影响<sup>[1,3-5]</sup>。因此,研究三线阵 CCD 相机的交会角在轨标定,对于提高测绘卫星的测量精度,具有重要意义。

目前,国内外针对三线阵 CCD 测绘相机交会角的在轨标定研究报道很少。韩旭、马军等人通过计算机仿真,计算了测绘相机在两种极端温况下正视相机和后视相机在轨交会角的变化,为测绘相机光学结构设计和热控方案的制定提供了数据保障<sup>[6]</sup>;吕勇、冯其波等人综合三线阵 CCD 前视和正视相机的所有自由度参量建立了相机交会角模型,通过计算仿真,指出只需监测 5 个自由度就可以构建完整的三线阵 CCD 测绘相机交会角在轨检测系统,为测绘相机交会角在轨监测提供了技术支撑<sup>[9]</sup>。但他们都没有提出有效的测绘相机交会角在轨标定的解决方法。传统的摄影测量中后方交会的方法,虽然计算结果精确,但模型复杂,计算繁琐。文中根据三线阵测绘相机工作原理,提出了一种新的基于几何模型的标定方法。该方法理论简单,易于理解,并经过试验验证,标定结果精度较高,对于三线阵测绘相机交会角的在轨标定具有重要意义。

天绘一号卫星是国内首颗传输型立体测绘卫星,可获取三线阵全色影像、高分辨率影像和多光谱影像<sup>[7-8]</sup>。文中依据三线阵 CCD 测绘相机的工作原理,建立了求解三线阵 CCD 相机交会角的几何模型,并利用天绘一号卫星三线阵影像数据进行了试验验证。

## 1 相机交会角几何模型

### 1.1 三线阵 CCD 测绘相机工作原理

三线阵 CCD 测绘相机的光电扫描成像部分是

由光学系统焦平面上的三个线阵 CCD 组成,三个线阵 CCD 平行排列并与卫星飞行方向垂直。卫星飞行期间,三个线阵 CCD 以同步扫描周期  $N$  对地面连续扫描进行成像。值得注意的是,由于透镜成像是左右颠倒的,所以线阵 CCD 的右端点的影像对应扫描的地物条带的左端点,线阵 CCD 的中心处影像对应扫描地物条带的中间位置。由于推扫获得的前视、正视、后视影像的角度不同,因而可以构建立体影像<sup>[9-12]</sup>。三线阵 CCD 测绘相机工作原理示意图如图 1 所示。

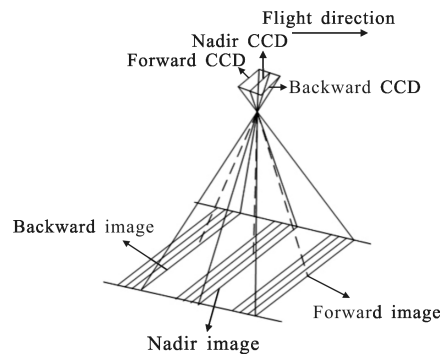


图 1 三线阵 CCD 测绘相机工作原理

Fig.1 Work principle of three-line-array CCD mapping camera

### 1.2 相机交会角几何模型

在理论计算中,假定三线阵 CCD 相机的前视、正视、后视摄站中心重合,为  $O$  点,在某一摄影时刻  $T$ ,前视、正视、后视 CCD 对应的地面像元条带分别为  $A_1A_2$ 、 $N_1N_2$ 、 $B_1B_2$ ,则摄影平面  $A_1OA_2$  与平面  $N_1ON_2$  夹角  $\alpha$  即为前正相机交会角,平面  $B_1OB_2$  与平面  $N_1ON_2$  夹角  $\beta$  为正后相机交会角,如图 2 所示。因此,只要获取特定摄影时刻  $T$  对应的摄站中心  $O$  坐标,以及前视、正视和后视影像在  $T$  时刻所扫描地面条带的地面控制点坐标,就可以分别拟合出前视平面、正视平面和后视平面,进而解算出相机交会角。

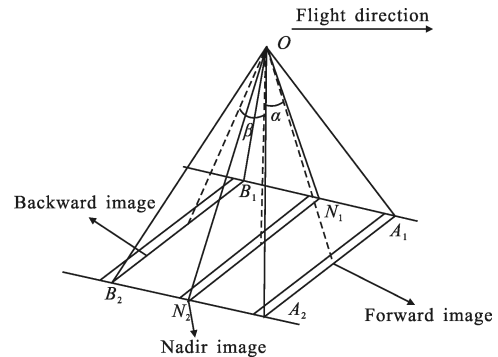


图 2 相机交会角几何模型

Fig.2 Geometric model of camera intersection angle

### 1.3 数学原理

设摄影时刻  $T$  对应的摄站中心  $O$  坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 前视 CCD 扫描地面条带对应的  $n$  个地面控制点坐标分别为  $(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n, n \geq 3$ 。由于存在定轨误差等多种因素,  $n$  个地面控制点与摄站中心  $O$  不可能完全共面, 因此, 采用最小二乘的方法进行拟合。设前视平面方程为  $z=a_0x+a_1y+a_2$ , 求得参数  $a_0, a_1, a_2$  即可。

首先, 前视平面过摄站中心  $O$  点, 即满足:

$$z_0=a_0x_0+a_1y_0+a_2 \quad (1)$$

其次, 要用点  $(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n$  通过最小二乘拟合前视平面, 则使

$$S=\sum_{i=1}^n (a_0x_i+a_1y_i+a_2-z_i)^2=\sum_{i=1}^n [a_0x_i+a_1y_i+(z_0-a_0x_0-a_1y_0)-z_i]^2 \quad (2)$$

最小即可。

要使  $S$  最小, 应满足:

$$\frac{\partial S}{\partial a_k}=0, k=0, 1 \quad (3)$$

即

$$\begin{cases} \sum 2(a_0x_i+a_1y_i+z_0-a_0x_0-a_1y_0-z_i)(x_i-x_0)=0 \\ \sum 2(a_0x_i+a_1y_i+z_0-a_0x_0-a_1y_0-z_i)(y_i-y_0)=0 \end{cases} \quad (4)$$

整理, 得:

$$\begin{pmatrix} \sum (x_i-x_0)^2 & \sum (y_i-y_0)(x_i-x_0) \\ \sum (x_i-x_0)(y_i-y_0) & \sum (y_i-y_0)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum (z_i-z_0)(x_i-x_0) \\ -\sum (z_i-z_0)(y_i-y_0) \end{pmatrix} \quad (5)$$

通过公式(1)和公式(5)解线性方程组, 即可求得参数  $a_0, a_1, a_2$ 。

正视平面和后视平面拟合方法同上。

设前视平面方程为  $z=a_0x+a_1y+a_2$ , 则其法向量为  $\mathbf{a}=(a_0, a_1, -1)$ , 正视平面方程为  $z=b_0x+b_1y+b_2$ , 则其法向量为  $\mathbf{b}=(b_0, b_1, -1)$ , 后视平面方程为  $z=c_0x+c_1y+c_2$ , 则其法向量为  $\mathbf{c}=(c_0, c_1, -1)$ 。

则前正相机交会角为:

$$\alpha=\arccos \frac{|\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}|}{|\mathbf{a}||\mathbf{b}|} \quad (6)$$

正后相机交会角为:

$$\beta=\arccos \frac{|\mathbf{b} \cdot \mathbf{c}|}{|\mathbf{b}||\mathbf{c}|} \quad (7)$$

## 2 试验验证及结果分析

### 2.1 试验过程

选取摄影情况良好的天绘一号卫星三线阵影像

数据进行相关试验。试验流程如下所示:

(1) 进行精密定轨, 获取卫星轨道信息, 提取特定摄影时刻  $T$  时的摄站中心坐标;

(2) 分别用卫星前视、正视、后视影像和相应位置的航片进行匹配, 并进行空三加密, 得到特定摄影时刻  $T$  对应的地面条带坐标;

(3) 利用前两步获取的摄站中心坐标和地面条带坐标, 根据最小二乘原理分别拟合出前视、正视、后视摄影平面;

(4) 根据拟合的摄影平面解算出相机交会角。

### 2.2 结果分析

根据 2.1 节所述流程进行试验, 分别采用摄影测量后方交会的方法, 和文中所述几何模型求解的方法, 计算得到三线阵 CCD 测绘相机交会角, 结果如表 1 所示。

表 1 相机交会角计算结果

Tab.1 Calculation results of camera intersection

angle			
	Photogrammetric resection result	Geometric model result	Difference/(")
$\alpha$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\Delta\alpha=0.44$
$\beta$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\Delta\beta=1.53$

从计算结果可以看出, 两种方法计算结果非常接近, 差值仅在 1" 的量级, 这表明采用几何模型法求解相机交会角可行, 计算结果可靠。

### 2.3 误差分析

从该模型计算过程和试验流程可以看出, 摄站中心坐标和地面控制点坐标的精度直接影响到相机交会角的精度。而摄站中心坐标是由精密定轨得到的, 精密定轨本身存在定轨误差; 地面控制点首先是由卫星影像数据与航片数据进行匹配, 存在匹配误差, 其次, 空三加密出来的控制点本身也存在误差, 这两点可以综合考虑为地面控制点精度。下面就定轨误差和地面控制点精度对该方法解算出的相机交会角的影响进行了计算分析。

#### 2.3.1 定轨误差对相机交会角的影响分析

通过编程分别计算分析了摄站坐标在  $x$  方向,  $y$  方向和  $z$  方向分别增大 0~10 m 时, 对相机交会角产生的影响, 如图 3 所示。图中纵坐标为采用后方交会

法求得的相机交会角减去采用几何模型法求得到的相机交会角的差值,可以间接反映出几何模型法解算出的相机交会角的变化情况。

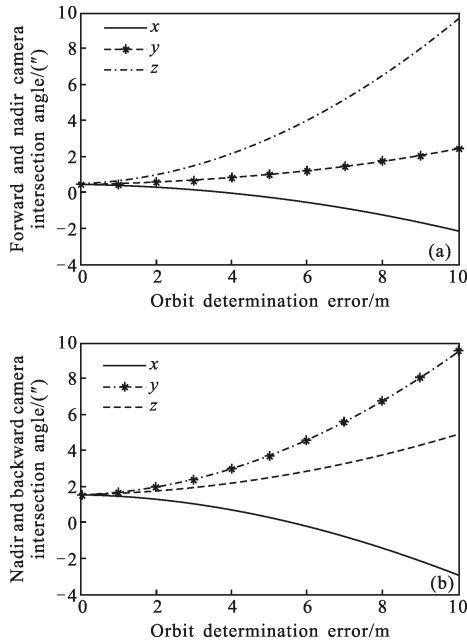


图 3 相机交会角差值随摄站坐标变化

Fig.3 Curves of camera intersection angle differences vs camera station's coordinates

从图 3 中可以看出:(1) 前正相机交会角和正后相机交会角的值都随着摄站中心坐标  $x$  的增大而增大,随摄站中心坐标  $y$  和  $z$  的增大而减小;(2) 前正相机交会角的值受摄站中心坐标  $z$  的影响最大,即  $z$  方向的定轨误差对前正相机交会角影响最大;(3) 正后相机交会角的值受摄站中心坐标  $y$  的影响最大,即  $y$  方向的定轨误差对正后相机交会角影响最大;(4) 随着定轨误差的增大,曲线斜率的绝对值增大,表明相机交会角随定轨误差的增大变化更加明显。

### 2.3.2 地面控制点精度对相机交会角的影响分析

一方面,考虑到在拟合摄影平面时采取的是最小二乘法原理,个别控制点坐标的改变对结果影响不会很大,另一方面,所采用试验场数据的航片经空三加密出来的地面控制点精度大概在 1~2 m 左右,而天绘卫星三线阵影像数据的分辨率为 5 m,考虑到影像与航片的匹配误差,这里在分析地面控制点精度对相机交会角的影响时,采取分别在各个摄影平面对应地面控制点坐标的  $x$  方向, $y$  方向和  $z$  方向增大 0~10 m 时,计算分析相机交会角的变化。

### 2.3.2.1 前视和正视摄影平面对应地面控制点坐标变化对前正相机交会角的影响分析

计算结果如图 4 所示。

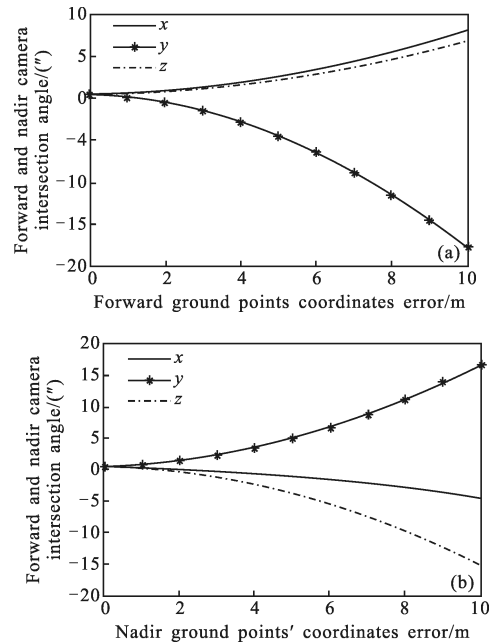


图 4 前正相机交会角差值随地面控制点坐标变化

Fig.4 Curves of forward and nadir camera intersection angle differences vs ground points' coordinates

从图 4 中可以看出:(1) 前视摄影平面对应的控制点中,坐标  $x$  和坐标  $z$  的变化对前正相机交会角的影响很接近;前正相机交会角随着坐标  $x$  和坐标  $z$  的增大而减小,随着坐标  $y$  的增大而增大;坐标  $y$  的变化对交会角影响远远大于坐标  $x$  和坐标  $z$ ;(2) 正视摄影平面对应的控制点中,前正相机交会角随着坐标  $x$  和坐标  $z$  的增大而增大,随着坐标  $y$  的增大而减小,坐标  $y$  和坐标  $z$  对交会角影响较大。

### 2.3.2.2 正视和后视摄影平面对应地面控制点坐标变化对正后相机交会角的影响分析

计算结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出:(1) 正视摄影平面对应的地面控制点中,正后相机交会角随着坐标  $x$  和坐标  $z$  的增大而减小,随着坐标  $y$  的增大而增大;坐标  $y$  和坐标  $z$  的变化对交会角的影响远远大于坐标  $x$  的变化对交会角的影响;(2) 后视摄影平面对应的地面控制点中,正后相机交会角随着坐标  $y$  的增大而减小,随着坐标  $z$  的增大而增大,随坐标  $x$  的变化较小;坐标  $z$  的变化对交会角的影响最大。(3) 通过与图 4 对比

发现, 正视摄影平面地面控制点的精度对前正相机交会角和正后相机交会角的影响相反。前正相机交会角随着坐标  $x$  和坐标  $z$  的增大而增大, 随着坐标  $y$  的增大而减小, 正后相机交会角随着坐标  $x$  和坐标  $z$  的增大而减小, 随着坐标  $y$  的增大而增大。

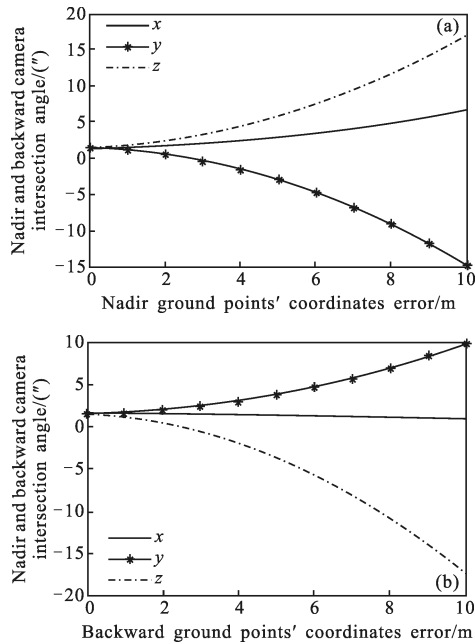


图 5 正后相机交会角差值随地面控制点坐标变化

Fig.5 Curves of nadir and backward camera intersection angle differences vs ground points' coordinates

### 3 结束语

文中提出的基于几何模型的相机交会角在轨标定的方法, 不同于目前大多采用的摄影测量方法, 理论简单易懂, 计算结果精度较高, 与摄影测量方法所得结果非常接近。另外, 通过分别在高分辨影像(或多光谱影像) 和三线阵正视影像的相同摄影时刻线上添加控制点, 并拟合出各自的摄影平面, 可计算得到高分辨相机和多光谱相机的离轴角, 这是文中下一步的研究工作。

#### 参考文献:

- [1] Wang Renxiang. Satellite Photogrammetric Principle for Three-Line-array CCD Imagery [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006: 2-10, 69-89. (in Chinese)
- [2] Yang Xiuce. Research on automatic measure technique for image points of LMCCD imagery [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [3] Takashi Hamazaki, Yuji Osawa. Key technology development for the advanced land observing satellite [C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, XXXIII(Part B1): 136-140.
- [4] Zhang Lei, Yang Jianfeng, Xue Bin, et al. Super resolution reconstruction of Chang'e-1 satellite CCD stereo camera images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 404-408. (in Chinese)
- [5] Lv Yong, Feng Qibo, Sun Shijun, et al. Feasibility analysis of on-orbit intersection angle monitoring for three-line-array mapping camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3390-3395. (in Chinese)
- [6] Han Xu, Ma Jun, Wang Zhongsu, et al. Calculation of change of space intersection angle for mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2862-2869. (in Chinese)
- [7] Zhang Dewen, Liu Baocheng, Wang Yue. Analysis of inquiry strategy based on 1A level image of Mapping Satellite-1 [C]//18th China Symposium on Remote Sensing, 2012: 42-46. (in Chinese)
- [8] Yang Junfeng, Zhang Xianrui. Tian Hui-1 Satellite data products and application [C]//Proceedings of the First Symposium on High Resolution Remote Sensing Data Processing and Applications, 2011: 306-309. (in Chinese)
- [9] Wang Zhi, Zhang Liping, Li Chaohui. Three-linear CCD camera imaging and error model [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(1): 95-100. (in Chinese)
- [10] Liu Jingguo, Li Jie, Hao Zhihang. Study on a geometric calibration method for three-linear-array CCD camera with sub-pixel accuracy [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(1): 36-39. (in Chinese)
- [11] Yue Liqing, Zhang Jiyong, Fu Ruimin, et al. Alignment method of axis angle and linear array parallelism for three-line array mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3): 35-40. (in Chinese)
- [12] Wu Guodong. Alignment method of CCD image plane for three-line array mapping camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(11): 2395-2398. (in Chinese)