

HJ1B 星 CCD 相机内方位元素的在轨标定方法

徐雨果^{1,2,3}, 刘团结^{1,2}, 尤红建^{1,2}, 董 磊^{1,2}, 刘方坚^{1,2}

(1. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为了获得内方位元素的在轨值,提高遥感影像的定位精度,利用线阵推扫传感器构象模型,提出了一种对 HJ1B-CCD 相机内方位元素进行在轨标定的方法。首先,选取地面控制点,建立地面控制点和相应像点的共线方程组;其次,建立误差方程,估算未知参数的初值;最后,利用狭义岭估计的方法解算误差方程,获得内方位元素和外方位元素值。实验证明,用该方法对 HJ1B-CCD 相机内方位元素进行在轨标定,具有较高的稳定性和精度。

关 键 词:在轨标定;内方位元素;线阵推扫;HJ1B;共线方程

中图分类号:TP 732;TP 706 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2011)03-0309-06

1 引 言

要实现高精度的几何定位,精确标定出遥感相机的主点、主距和畸变系数等内参数是一个首要条件。HJ1B-CCD 相机是多光谱成像的线阵推扫传感器,一般对线阵推扫传感器内方位元素的标定都是在实验室进行的,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^[1],在日本东京对 TLS 航空相机的标定^[2]。在国内,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的研究人员做了很多 CCD 线阵推扫相机实验室标定的工作,如刘波等^[3]在这方面做了不少研究。但由于卫星在发射和运行中受到了应力变化等因素的影响,相机内方位元素与实验室标定值相比已经发生变化,要实现高精度定位,有必要对其进行重新标定。针对 HJ1B-CCD 相机,本文提出了一种联合解算内外方位元素的方法实现在轨重新标定内方位元素。该方法需要地面控制点和像点建立共线方程组,由于未知参数在数量级上相差太大,最小二乘解已经不再是最佳估计,本文采用狭义岭估计的方法解算误差方程,提高了解的稳定性和精度。

2 内方位元素对定位的影响

2.1 内方位元素模型

理想的光学成像模型是小孔成像模型,认为物点、像点和光学中心在一条直线上,像主点在焦平面中心。但由于遥感相机光学系统存在加工和装配误差,不仅像主点会偏离焦平面中心,实际像点与理想像点间还存在光学畸变差,若不予考虑会导致定位误差,如图 1 所示。本文要解算的内方位元素有主点 (x_0, y_0) 、主距 f 和径向畸变系数 k 。其中径向畸变的数学模型是从面阵相机推广而来,本文仅取一项畸

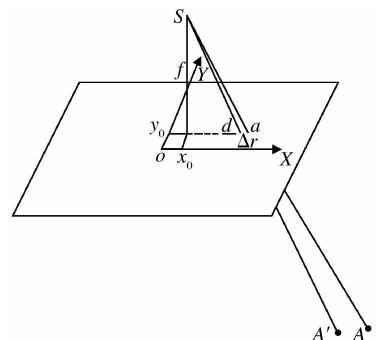


图 1 内方位元素模型

Fig. 1 Interior orientation model

收稿日期:2010-10-09;修订日期:2011-03-27

基金项目:国家自然科学基金项目(40871209)资助。

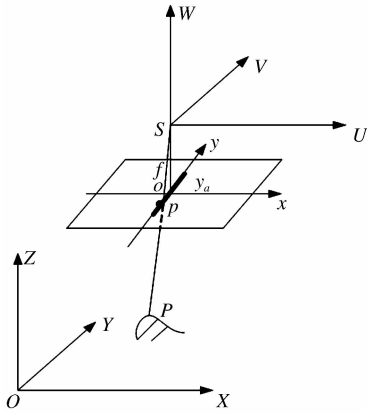
作者简介:徐雨果(1986—)男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事线阵推扫遥感影像的畸变校正研究。E-mail:xyg174@163.com。

通讯作者:刘团结(1969—)男,湖北荆州人,博士,副研究员,主要从事遥感图像处理研究。E-mail:tuanjieliu@sina.com。

变量： $\Delta r = k \cdot r^3$ ， r 是像点到主点的距离， Δr 是沿半径方向的畸变量。

2.2 坐标系的定义

进行共线方程解算涉及到一些坐标系的转换，如图 2 所示，本小节简要介绍这些坐标系。



2.2.1 像点的坐标系

(1) 图像坐标系。在图像坐标系中像素的坐标由它的行号 i 与列号 j 来标志，解算共线方程时需要把图像坐标与 CCD 探元序号联系起来，图像坐标要变换成像平面坐标。

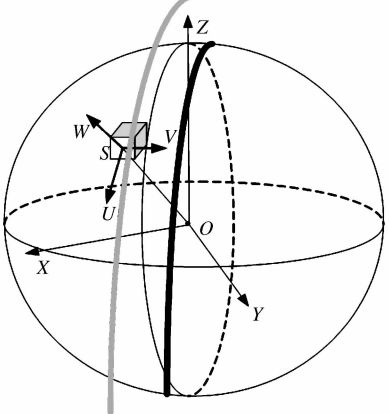


图 2 共线方程中的坐标系
Fig. 2 Coordinate systems in collinearity equation

(2) 像平面坐标系。像平面坐标系是右手直角坐标系，以焦平面中心为原点。以航线方向的框标连线作 x 轴，且取航摄飞行方向为正方向， y 轴与 x 轴垂直， y 轴的正方向按右手直角坐标系的规则确定，像点在像平面坐标系中的坐标为 (x, y) 。

(3) 像空间坐标系。像空系是以投影中心 S 为原点， U 轴与像平面坐标系中的 x 轴平行，指向传感器飞行方向， V 轴与像平面坐标系中的 Y 轴平行， W 轴由右手规则确定的空间直角坐标系。任一像点在像空系中的坐标为 $(x, y, -f)$ ，其中 (x, y) 就是像点的像平面坐标， f 是焦距。

2.2.2 地面点的坐标系

(1) 大地坐标系。大地坐标系是一种以大地经

纬度 (L, B) 和大地高程 (H) 来表示空间某点位置的一种椭球坐标系，大地经纬度坐标也称为地理坐标。本文在共线方程中使用的坐标是地心坐标，因此需要把地理坐标变换到地心坐标。

(2) 地心坐标系。地心坐标系原点在地球质心， Z 轴和地球某一自转平旋转轴重合并指向平北极， x 轴位于格林尼治平天文子面和平赤道面的交线， Y 轴和 Z 、 X 构成右手坐标系。

2.3 HJ1B-CCD 相机的共线方程模型

根据光学成像的几何关系^[4]，并且考虑到光学系统的径向畸变，建立线阵推扫遥感影像的共线方程：

$$\begin{cases} x'_i = x_i - x_0 + \Delta x_i = -f \frac{a_{11}(X_{Pi} - X_{Si}) + a_{21}(Y_{Pi} - Y_{Si}) + a_{31}(Z_{Pi} - Z_{Si})}{a_{13}(X_{Pi} - X_{Si}) + a_{23}(Y_{Pi} - Y_{Si}) + a_{33}(Z_{Pi} - Z_{Si})} = -f \frac{\bar{X}_i}{\bar{Z}_i} \\ y'_i = y_i - y_0 + \Delta y_i = -f \frac{a_{12}(X_{Pi} - X_{Si}) + a_{22}(Y_{Pi} - Y_{Si}) + a_{32}(Z_{Pi} - Z_{Si})}{a_{13}(X_{Pi} - X_{Si}) + a_{23}(Y_{Pi} - Y_{Si}) + a_{33}(Z_{Pi} - Z_{Si})} = -f \frac{\bar{Y}_i}{\bar{Z}_i} \end{cases} \quad (1)$$

其中： (x_i, y_i) 是某真实 CCD 探元在像平面坐标系中的坐标，即真实像点的坐标， (x'_i, y'_i) 是该探元的理想像点在像平面坐标系中的坐标， $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 分别是 x 和 y 方向的径向畸变量， (X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi}) 是该像点对应的地面点在地心坐标系中的坐标。 (X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si}) 是某次采样时光学投影中心在地心坐标系中的坐标， $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{32}, a_{33}$ 是像空间坐标

系相对于地心坐标系的旋转矩阵中的元素。
HJ1B-CCD 相机是多光谱线阵推扫相机，采用分光技术把入射光束分解到 4 片 CCD 阵列上，对红、绿、蓝和近红外 4 个波段分别成像，每片 CCD 阵列有效感光探元为 12 000 个，单波段成像的焦平面模型如图 3 所示。 (x_0, y_0) 是像平面的主点， (x_i, y_i) 是 CCD 线阵某探元在像平面坐标系中的坐标， x 方向是卫星的飞

行方向。像主点设计在焦平面中心,即 $x_i = 0, (x_0, y_0)$ 是小量, 所以有 $r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \approx |y_i|$, 对式(1) 进行简化如下:

$$\begin{cases} x'_i = x_i - x_0 + \Delta x_i \approx -x_0 \\ y'_i = y_i - y_0 + \Delta y_i \approx y_i - y_0 + k \cdot y_i^3 \end{cases} \quad (2)$$

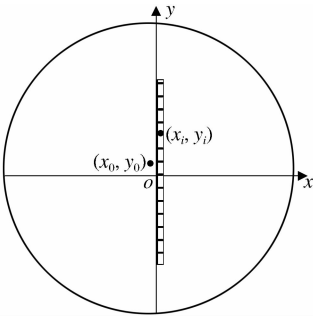


图 3 HJ1B-CCD 相机单波段线阵结构

Fig. 3 Sigal band line structure of HJ1B-CCD camera

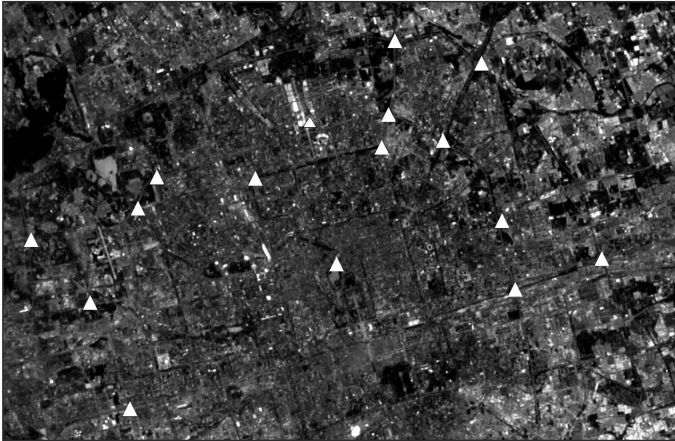


图 4 控制点分布图

Fig. 4 Ground control points distribution

3 s, 控制点地理坐标是通过 Google Earth 获取的。在短条带选取控制点的情况下, 近似认为卫星匀速直线飞行, 外方位元素模型为:

$$\begin{cases} \varphi_i = \varphi_0 \\ \omega_i = \omega_0 \\ \kappa_i = \kappa_0 \\ X_{si} = X_{s0} + i \cdot \dot{X}_s \\ Y_{si} = Y_{s0} + i \cdot \dot{Y}_s \\ Z_{si} = Z_{s0} + i \cdot \dot{Z}_s \end{cases} \quad (3)$$

其中: i 表示遥感图像的行号, $(\varphi_i, \omega_i, \kappa_i, X_{si}, Y_{si}, Z_{si})$ 表示第 i 扫描行的外方位元素, $(\varphi_0, \omega_0, \kappa_0, X_{s0}, Y_{s0},$

3 内方位元素的解算方法

3.1 地面控制点的选取

原始图像中记录的外方位元素不够准确, 因此本文需要同时解算出外方位元素。线阵推扫相机外方位元素随采样时刻而变化, 内外方位元素联合解算非常复杂, 且不易得到稳定结果, 本文做了简化处理。由于成像时卫星姿态比较平稳, 本文把控制点选在了短条带内, 近似认为控制点所在图像区卫星姿态不变化, 旋转矩阵元素为常数, 把三角方程转化为常系数方程, 消除了角度周期性带来的影响, 使解算结果更加稳定。

本文采用 HJ1B 星 A 相机 2009 年 6 月 28 日拍摄的北京地区波段 1 的遥感图像作为实验数据。控制点主要选在了北京城区, 分布情况如图 4 所示, 共有 16 个控制点, 约有 750 行图像, 成像时间约为

Z_{s0}) 表示第 0 行($i = 0$) 的外方位元素, $(\dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s)$ 是卫星位置的一阶变率。

3.2 误差方程的建立

需要同时解算的未知参数为:

$$U = [x_0 \ y_0 \ k \ f \ a_{11} \ a_{21} \ a_{31} \ a_{12} \ a_{22} \ a_{32} \ a_{13} \\ a_{23} \ a_{33} \ X_{s0} \ Y_{s0} \ Z_{s0} \ \dot{X}_s \ \dot{Y}_s \ \dot{Z}_s]^T$$

在解算过程中需对共线方程进行线性化, 先将式(1) 变换成:

$$\begin{aligned} F &= x'_i \cdot \bar{Z}_i + f \cdot \bar{X}_i = 0 \\ G &= y'_i \cdot \bar{Z}_i + f \cdot \bar{Y}_i = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

线性化后的公式为:

$$\begin{cases} v_x = A_1 dx_0 + A_2 dy_0 + A_3 dk + A_4 df + A_5 da_{11} + A_6 da_{21} + A_7 da_{31} + A_8 da_{12} + A_9 da_{22} + A_{10} da_{32} + \\ A_{11} da_{13} + A_{12} da_{23} + A_{13} da_{33} + A_{14} dX_{s0} + A_{15} dY_{s0} + A_{16} dZ_{s0} + A_{17} d\dot{X}_s + A_{18} d\dot{Y}_s + A_{19} d\dot{Z}_s - l_x \\ v_y = B_1 dx_0 + B_2 dy_0 + B_3 dk + B_4 df + B_5 da_{11} + B_6 da_{21} + B_7 da_{31} + B_8 da_{12} + B_9 da_{22} + B_{10} da_{32} + \\ B_{11} da_{13} + B_{12} da_{23} + B_{13} da_{33} + B_{14} dX_{s0} + B_{15} dY_{s0} + B_{16} dZ_{s0} + B_{17} d\dot{X}_s + B_{18} d\dot{Y}_s + B_{19} d\dot{Z}_s - l_y \end{cases} \quad (5)$$

其中: $dx_0, dy_0, dk, \dots, d\dot{X}_s, d\dot{Y}_s, d\dot{Z}_s$ 为各未知量的增量, A_x, B_y 为各增量的系数。

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\partial F}{\partial x_0} = -\bar{Z}_i & B_1 = \frac{\partial G}{\partial x_0} = 0 \\ A_2 = \frac{\partial F}{\partial y_0} = 0 & B_2 = \frac{\partial G}{\partial y_0} = -\bar{Z}_i \\ A_3 = \frac{\partial F}{\partial k} = 0 & B_3 = \frac{\partial G}{\partial k} = y_i^3 \cdot \bar{Z}_i \\ A_4 = \frac{\partial F}{\partial f} = \bar{X}_i & B_4 = \frac{\partial G}{\partial f} = \bar{Y}_i \\ \vdots & \vdots \\ L_x = 0 - F(U_{old}) & L_y = 0 - G(U_{old}) \end{cases}$$

每个控制点产生两个误差方程式, 将所有控制点的误差方程式联立起来, 构成一组方程, 写成矩阵形式为:

$$V = CX - L \quad (6)$$

其中: C 是各个控制点误差方程式的系数构成的矩阵, 称为设计矩阵, X 表示增量向量。

$$X = [dx_0 \ dy_0 \ dk \ df \ da_{11} \ da_{21} \ da_{31} \ da_{12} \ da_{22} \ da_{32} \ da_{13} \ da_{23} \ da_{33} \ dX_{s0} \ dY_{s0} \ dZ_{s0} \ d\dot{X}_s \ d\dot{Y}_s \ d\dot{Z}_s]^T,$$

L 是观测向量, $L = [L_{x1}, L_{y1}, L_{x2}, L_{y2} \dots]^T$ 。方程有 19 个未知数, 10 个以上的控制点可求解。

3.3 初值的估算

3.3.1 求第零扫描行外方位元素 (X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}) 的初值

设第零扫描行中心点的大地坐标为 (B, L, H) , 并设卫星按星下点成像模式成像, 卫星飞行高度为 h , 则卫星在大地坐标系中的坐标为 $(B, L, H + h)$, 将其转换到地心坐标系中为 (X_p, Y_p, Z_p) , 该值作为 (X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}) 的初值。

3.3.2 求旋转矩阵元素 $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{32}, a_{33}$ 的初值

要求旋转矩阵元素的初值, 可以先求出像空间坐标系在地心坐标系中的表示。在星下点成像模式下, W 轴的方向就是地心坐标系的原点 O 与像空间坐标系的原点 S 的连线方向, 并且指向外方向, 如图 1 所示。因此 W 轴的方向向量为 $\vec{l}_w = (X_p, Y_p, Z_p)$, 将这个方向向量归一化为 $\vec{W}^0 = (x_w, y_w, z_w)$ 。 U 轴与卫星飞行方向一致, 设 U 轴的单位方向向量为 $\vec{U}^0 = (x_u, y_u, z_u)$ 。 V 轴垂直于 WU 平面, V 轴的单位方向向量为 $\vec{V}^0 = (x_v, y_v, z_v)$, 可近似认为 V 的方向是卫星轨道平面的法向量。 \vec{V}^0 与 Z 轴的夹角就

是卫星的轨道倾角, 可得:

$$\begin{cases} \cos(\vec{V}^0, \vec{W}^0) = x_w \cdot x_v + y_w \cdot y_v + z_w \cdot z_v \\ \quad \quad \quad = 0 \\ \cos(\vec{V}^0, \vec{Z}^0) = \cos\theta = z_v \\ x_v^2 + y_v^2 + z_v^2 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

根据物理意义, 解这个方程即可得到 \vec{V}^0 。 \vec{U} 垂直于 \vec{V}^0 和 \vec{W}^0 , 同理可解出 \vec{U}^0 。令 $\vec{e}_1 = [1 \ 0 \ 0]$, $\vec{e}_2 = [0 \ 1 \ 0]^T$, $\vec{e}_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$, 根据坐标变化关系 $[\vec{U}^0 \ \vec{V}^0 \ \vec{W}^0] = A[\vec{e}_1 \ \vec{e}_2 \ \vec{e}_3]$ 可解出旋转矩阵中的各个元素值。

3.3.3 求位置一阶变率的初值

$(\dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s)$ 的初值可根据卫星轨道参数计算。卫星沿 \vec{U}^0 的飞行速度约为 33 m/行, 沿 \vec{V}^0 的速度为 0, 沿 \vec{W}^0 的速度为 0。若考虑地球自转的影响, 相当于卫星沿 \vec{V}^0 方向有个分速度 $\vec{V}^0 = -\vec{V}_{地}$, 由此可解出 $(\dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s)$ 的初值。

3.3.4 求内方位元素 (x_p, y_p, k_1, f) 的初值

内方位元素的初值可以选为相机的设计值 $(x_0, y_0, k, f) = (0, 0, 0, 141 \text{ mm})$ 。

3.4 误差方程的解算

对于误差方程式(6), 用最小二乘平差法, 建立法方程, 根据最小二乘平差原理, 可得法方程:

$$C^T PCX = C^T PL \quad (8)$$

其中: P 是权矩阵。

解法方程得:

$$X = (C^T PC)^{-1} C^T PL \quad (9)$$

在实际解算过程中, 发现法方程近似病态, 设计矩阵接近奇异, 存在复共线问题^[5], 内外方位元素的最小二乘解同真值有很大偏差, 因此需要采用特殊的数学方法处理。实验中采用狭义岭估计^[6] 的办法解决复共线问题, 即令:

$$X = (C^T PC + K * I)^{-1} C^T PL \quad (10)$$

4 实验结果及分析

根据上述原理, 在 Windows 环境下完成算法的 Matlab 实现, 考察方程解算结果的稳定性和准确性。实验表明, K 的取值会影响方程的收敛速度和解的稳定性, 表 1 是 K 取不同值时迭代 1 000 次后均方根误差值。本文采用均方根误差(RMS) 作为该实验方法精度的标志, 定义为:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left(x_i - x_0 + \Delta x_i + f \frac{\bar{X}_i}{Z_i} \right)^2 + \left(y_i - y_0 + \Delta y_i + f \frac{\bar{Y}_i}{Z_i} \right)^2 \right]} \quad (11)$$

表 1 K 取不同值时均方根误差的比较
Table 1 The results of RMS in different K value

K	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1 000
RMS/像元	6.3012	5.7483	5.4532	5.5439	4.3625	2.8625	4.9864

从表 1 可知当 $K=100$ 时,均方根误差最小,本文在实际解算中取 $K=100$ 。内方位元素的解算结果如表 2 所示,均方根误差收敛结果如图 5,图 6 是在此径向畸变系数下 CCD 阵列各探元产生的畸变量。

表 2 内方位元素解算结果

Table 2 The results of interior orientation

x_0 /像元	y_0 /像元	k	f /mm	RMS/像元
-4.7917	-0.1521	-0.0006603	141	1.7160

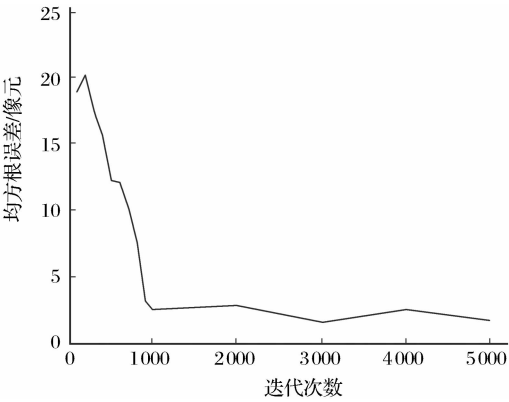


图 5 均方根误差收敛结果

Fig. 5 The convergence result of RMS

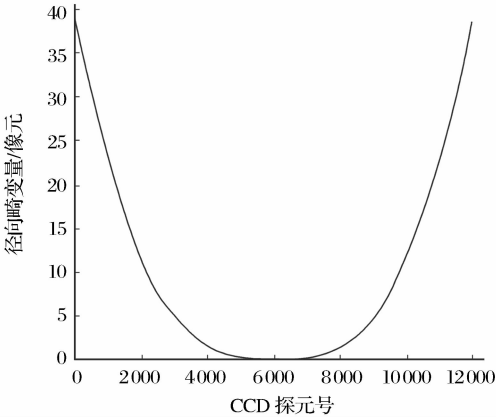


图 6 CCD 阵列各探元径向畸变量

Fig. 6 The radial distortion in CCD line

通过实验可知,位置参数收敛很快,姿态参数收敛较慢,均方根误差总体收敛,但约有 1~2 个像元的残留,径向畸变系数收敛的比较稳定。由图 6 可知线阵中心没有发生径向畸变,探元离线阵中心越远,畸变量越大,最大径向畸变为 39 个像元,畸变率

达到了 0.65%,若不考虑径向畸变最大将会产生 1.2 km 的定位误差。

均方根最后还约有 1~2 个像元的残留误差,主要原因有以下几个方面:① 为了简化计算过程,对共线方程模型做了近似,对卫星轨道进行了线性模拟,带来了模型误差;② 由于 HJ1B-CCD 影像分辨率低,控制点难以选择,导致控制点数量有限,分布不太理想,平均选点误差约有 1 个像元;③ Google Earth 在北京城区的平均定位精度约为 20 m,影响了控制点测量精度,带来了将近 1 个像元的测量误差。

5 结 语

本文把径向畸变系数加入到线阵推扫遥感相机内方位元素中,修正了共线方程模型,提出了通过联合解算内外方位元素的方法对 HJ1B-CCD 相机内方位元素进行在轨标定。实验中利用狭义岭估计的方法,解决了设计阵复共线问题,提高了解的稳定性和精度。实验证明,通过共线方程联合解算遥感相机的内外方位元素,能够实现对 HJ1B-CCD 相机内方位元素的在轨标定,该方法可以推广到其他线阵推扫遥感相机的在轨标定中。

参考文献(References):

[1] Ohlhof T, Kornus W. Geometric Calibration of Digital Three-line CCD Cameras[C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Italy, 1994, 30: 71-81.

[2] 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.

[3] Liu Bo, Jia Jiqiang, Ding Yalin. Geometric Calibration with Angle Measure for CCD Aerial Photogrammetric Camera in Laboratory[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(3): 298-301. [刘波,贾继强,丁亚林. 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.]

[4] Sun Jiabing. Remote Sensing Principles and Applications[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. [孙家柄. 遥感原理与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.]

[5] Chen Xilei, Wang Songgui. Modern Regression Analysis[M]. Hefei: Anhui Education Press, 1987. [陈希雷, 王松桂. 近代回归分析[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1987.]

[6] You Yangsheng, Wang Xinzhou, Liu Xing. Direct Solution to

Generalized Ridge Estimate[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(2): 175-178. [游扬声, 王新洲, 刘星. 广义岭估计的直接解法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(2): 175-178.]

On-Orbit Calibration of Interior Orientation for HJ1B-CCD Camera

XU Yu-guo^{1,2,3}, LIU Tuan-jie^{1,2}, YOU Hong-jian^{1,2},
DONG Lei^{1,2}, LIU Fang-jian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information ProceSSION and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to acquire the on-orbit value of interior orientation and improve the orientation precision of remote sensing image, a method for the on-orbit calibration of HJ1B-CCD camera interior orientation was studied with linear array push-broom sensor imaging model in this paper. Firstly, the ground control points are selected and colinearity equations are constructed between ground control points and relevant image points. Secondly, the error equations based on colinearity equations are built and the initial value of unknown parameters are estimated. Finally, the error equations are solved by special ridge estimation to acquire the interior and exterior orientation. The results showed that this method could calibrate the HJ1B-CCD camera interior orientation on-orbit with good stability and precision.

Key words: Calibration on-orbit; Interior orientation; Push-broom; HJ1B; Colinearity equation