



论 文

基于角度不变的线阵推扫式 CCD 相机几何畸变在轨检校方法

郝雪涛*, 徐建艳, 王海燕, 雷玉飞

中国资源卫星应用中心, 北京 100094

* 通信作者. E-mail: hxt@cresda.com

收稿日期: 2011-06-07; 接受日期: 2011-07-28

民用航天预先研究 —— 在轨自主卫星遥感应用产品质量及服务质量评价关键技术课题资助项目

摘要 对航天遥感相机进行在轨检校, 是提高卫星产品质量, 扩大产品应用效果的重要技术内容. 文中研究了一种基于角度不变的线阵推扫式 CCD 相机几何畸变在轨检校方法. 该方法利用相机外方元素对于相机视向量夹角角度影响比较小的原理, 根据地面控制点和一级产品图像, 求解相机视向量夹角, 从中提取相机光学部件的畸变模型参数, 从而实现相机内外方元素解耦. 相机畸变模型采用一维 3 阶多项式, 对焦距和主点等引起的低阶误差能够很好地吸收. 该方法用在 HJ-1A/B 卫星的宽幅盖 CCD 相机几何畸变校正上, 检校误差残留在 2—6 个像元, 和参考数据精度相似, 表明取得了很好的校正效果.

关键词 遥感 CCD 相机 几何畸变 在轨检校

1 引言

随着遥感卫星空间分辨率的不断提高, 遥感影像的内部几何精度成为一项重要的考察指标. 线阵推扫式光学遥感相机是一种主要的遥感卫星载荷, 影响其图像产品内部几何精度的误差主要来自卫星位置和姿态数据, 即外方位元素; 和光学相机主点、主距和畸变, 即内方位元素; 另外还有大气和地形高度等. 其中, 内方位元素是影响遥感图像内部几何畸变的主要因素.

对于线阵推扫式光学 CCD(charge coupled device) 相机, 地面处理过程中采用严格成像模型方法进行几何校正, 生产得到带有地理信息的遥感影像产品. 20 世纪 70 年代以来, 随着 Landsat 系列卫星和 SPOT 系列卫星数据广泛使用, 严格成像模型方法成为了遥感行业领域内的产品预处理的标准方法. 2000 年后, 随着 IKONOS 卫星数据的广泛使用, Dial 提出的对于高分辨率光学遥感影像采用 RPC 模型进行几何校正的方法得到了行业内用户普遍的认可. 但是对于卫星数据处理中心, 在大规模自动化的几何预处理过程中, 仍然采用的是严格成像方法, 并依据严格成像方法来计算 RPC 参数, 进而向用户发布该参数, 方便用户的使用.

基于严格成像模型的几何校正遥感影像, 其几何精度问题属于摄影测量学范畴. Weng^[1] 对光学相机的畸变及校正精度的评价进行了很好的总结. Tsai^[2] 通过研究通用的面阵相机及镜头的校准技术,

提出一种基于机器视觉的相机校准方法, 并详细论述了方法步骤, 该方法获得了广泛应用. Joaquim 等^[3]对多种相机校正方法进行了很好的对比分析. 对于相机的几何模型参数的检校, 主要工作内容是对外方位元素和内方位元素的解算, 并解决内外方位元素耦合问题. 但是, 以上摄影测量领域的检校方法, 如何扩展到解决线阵推扫式遥感相机的几何参数检校问题, 需要获得更多的研究.

本文首先分析了光学畸变模型各参数的阶次, 更好地理解焦距和主点等对于畸变的影响^[4,5]. 然后以卫星平台参数为基础, 研究了姿态误差对于相机视向量间角度的影响, 进而提出了一种基于角度信息的推扫式光学相机几何畸变在轨检校方法. 最后以 HJ-1A/B 卫星遥感数据为样本, 进行了实验分析^[6,7].

2 相机成像和畸变模型分析

2.1 线阵推扫式相机严格成像模型

严格成像模型指的是从相机坐标系开始, 像元视向量经过到平台坐标系、轨道坐标系、地球惯性坐标系和地球固定坐标系的顺序转换过程, 最后得到视向量和地球求交后的经纬度坐标. 如图 1 所示, 相机采用前向成像模型, 相机坐标系下, X 为飞行方向, Y 为线阵排列方向, Z 为星下点成像方向, O_1 为坐标系原点, O_1 到成像面中心 O 的距离为焦距 f , O_2 为地心.

某视向量 O_1P 可定义为

$$\boldsymbol{\nu} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} [x \quad y \quad f]^T, \quad (1)$$

其中, x 和 y 表示在成像面的坐标.

设从相机坐标系到卫星平台坐标系的转换矩阵为 $\mathbf{M}_1$, 平台坐标系到导航坐标系的转换矩阵为 $\mathbf{M}_2$, 导航坐标系到地球惯性坐标系的转换矩阵为 $\mathbf{M}_3$, 地球惯性坐标系到地球固定坐标系的转换矩阵为 $\mathbf{M}_4$, 则严格成像模型公式为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}_{O_2P} - \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_{O_2O_1} = a \mathbf{M}_4 \mathbf{M}_3 \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \boldsymbol{\nu}, \quad (2)$$

其中, a 为比例因子.

2.2 光学镜头畸变模型

由于光学部件设计和加工工艺水平限制, 实际成像过程并不能像严格成像模型的理想透视成像那样保持线性变换, 镜头总是存在着一定的非线性畸变. 首先, 成像点在靶面坐标上的畸变可表示为

$$\begin{aligned} x' &= x + \delta_x(x, y), \\ y' &= y + \delta_y(x, y), \end{aligned} \quad (3)$$

这里 x' , y' 为实际测量坐标, x , y 为理想坐标, $\delta_x(x, y)$ 和 $\delta_y(x, y)$ 为在 x 和 y 方向的畸变值. 通常的焦平面畸变有径向畸变、偏心畸变以及薄棱镜畸变等, 它们将会使得成像点坐标发生径向和切向的偏

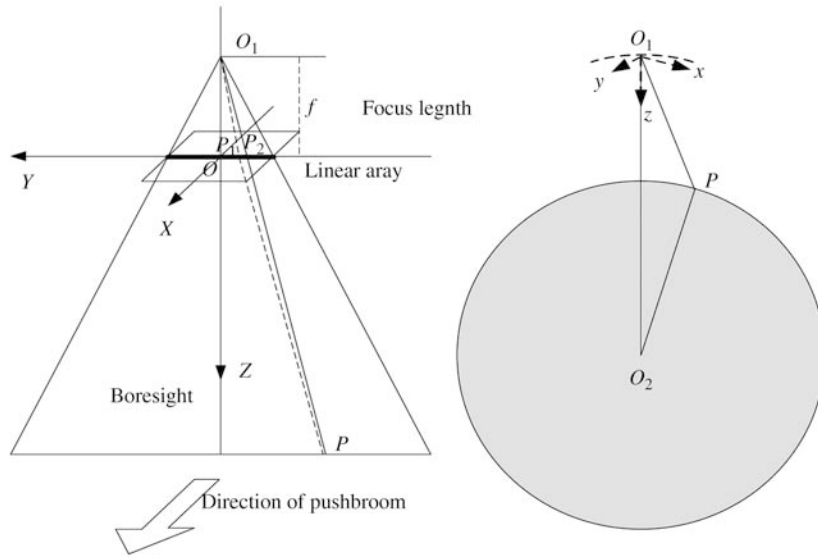


图 1 线阵推扫式相机成像模型示意图

Figure 1 Imaging model of push-broom CCD-line camera

差. 径向畸变是以镜头中心为中心点, 沿着径向发生作用. 畸变系数为负值, 产生收缩作用; 畸变系数为正值, 发生伸展作用. 径向畸变的模型公式为

$$\begin{aligned}\delta_x &= k_1 x r^2 + k_2 x r^4 + k_3 x r^6 + \dots, \\ \delta_y &= k_1 y r^2 + k_2 y r^4 + k_3 y r^6 + \dots, \\ r^2 &= x^2 + y^2.\end{aligned}\quad (4)$$

在实际应用中, 径向畸变占畸变的主要部分, 且多数时候仅采用一阶或两阶的径向畸变模型.

2.3 畸变误差分解

相机内方位元素包括焦距、主点和畸变模型系数. 内方位元素的阶次特性反映了参数发生变化时, 其对应偏差的几何特性. 对参数阶次特性的分析将有助于选用合适的校准方法和模型来进行参数校准. 这里采用 10 参数的 3 阶 2 维多项式对内方位元素偏差进行拟合分析, 可以得到各个参数的阶次特性. 拟合公式为

$$\begin{aligned}dx_i &= C_1 + C_2 x_i + C_3 y_i + C_4 x_i^2 + C_5 x_i y_i + C_6 y_i^2 + C_7 x_i^3 + C_8 x_i^2 y_i + C_9 x_i y_i^2 + C_{10} y_i^3, \\ dy_i &= D_1 + D_2 x_i + D_3 y_i + D_4 x_i^2 + D_5 x_i y_i + D_6 y_i^2 + D_7 x_i^3 + D_8 x_i^2 y_i + D_9 x_i y_i^2 + D_{10} y_i^3,\end{aligned}\quad (5)$$

这里, dx , dy 为焦平面坐标系下理想值和测量值之间的在 x 和 y 方向上的像素偏差, C_n , D_n 为其对应的拟合系数.

基于的原理是: 在没有噪声的影响时, 各个参数偏差引起的像素误差在用多项式拟合过程中, 会在多项式拟合系数的某些相关项上表现突出, 而不相关的项上则接近 0, 由此可以得到该参数的阶次特性. 经过仿真分析, 主点偏差为 0 阶偏差, 焦距偏差为 1 阶偏差, 焦平面倾斜为 2 阶偏差, 而一阶径向畸变则需要 3 阶模型才可以拟合. 如表 1 所示, ‘O’ 表示了各个参数影响最为显著的阶次项.

表 1 校准参数的阶次特性

Table 1 Relation between rank characteristic and the calibration parameter

	X^0	Y^0	X^1	Y^1	X^2	X^1Y^1	Y^2	X^3	X^2Y^1	X^1Y^2	Y^3
principal point	O	O									
focus length		O	O								
oblique target		O	O	O	O	O					
Radial distortion		O	O				O	O	O	O	

3 遥感相机畸变检校方法

3.1 角度不变原理

线阵推扫式成像相机工作方式见图 2. 相机推扫过程中, 由于卫星轨道位置和姿态方向的变化, 使得相机视向量处于变化过程中, 传统的内外方元素统一建模的方法很容易将以上外方位元素引入到解算过程中, 从而内外方元素耦合起来, 不宜获得精确的相机光学畸变参数. 但是, 通过观察相机成像过程可以发现, 虽然每个视向量指向都在发生变化, 但是同一时刻, 线阵推扫成像的不同像元所构成的向量之间夹角却没有发生变化. 而光学相机的畸变主要是以径向畸变为主, 向量之间的夹角同时包含了该畸变信息. 因此通过地面控制点提取向量之间的夹角信息, 则能够获得畸变模型参数, 实现内外方元素解耦.

3.2 畸变控制点数据提取

数据准备工作包括两个方面, 首先在遥感图像的 1 级产品上选择控制点, 获得控制点的行列号信息. 控制点选取应在道路建筑地物较丰富的平原地区遥感图像上, 控制点分布在一个横向的条带上, 时间间隔尽量小, 如图 3 所示. 控制点个数在 20—40 之间即可以满足要求.

其次, 在参考的正射影像和高程模型上获得以上控制点的同名点经纬度坐标和高度值.

3.3 畸变模型

根据前面对光学畸变误差的分解, 本文提出建立一个 3 阶畸变误差, 包含了主点、焦距、线阵安装倾斜和径向畸变的因素.

根据图 1 中地面某控制点 P , 向量 OP 与地球相交于 P 点, OP 与焦平面相交于 P_2 点. 由于光学部件设计与加工缺陷的存在, 视向量 O_1P 在焦平面的实际成像位置为 P_1 点, 设 P_2 点的 Y 坐标为 y_2 , P_1 点的 Y 坐标为 y_1 , 则得出 y_2 与 y_1 的关系式:

$$y_2 = c_0 + c_1y_1 + c_2y_1^2 + c_3y_1^3. \tag{6}$$

其模型参数 c_{0-3} , 需要进一步求解. 依据此模型可以建立 CCD 线阵标称坐标, 对应 y_1 ; 并建立畸变模型修正坐标, 对应 y_2 .

3.4 算法流程

畸变模型参数 c_{0-3} 提取过程见图 4, 主要包括两个部分, 一个是从 1 级遥感图像得到的信息计算

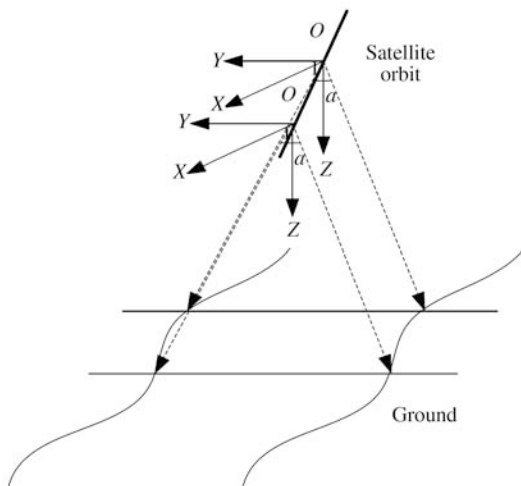


图 2 角度不变示意图

Figure 2 Angle invariability sketch map

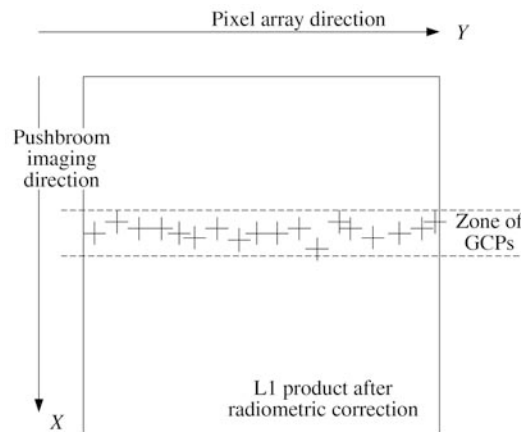


图 3 控制点数据提取

Figure 3 Extraction of ground control point

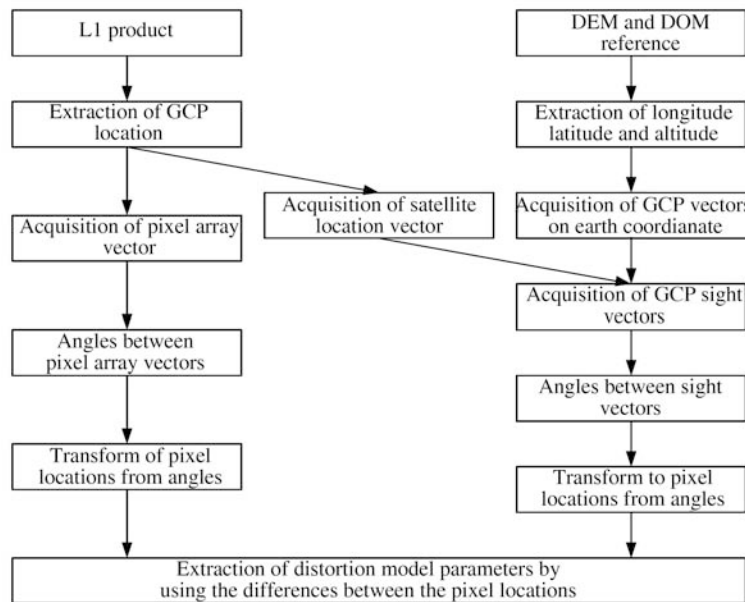


图 4 畸变参数计算过程

Figure 4 Work flow of distortion parameter calculation progress

CCD 线阵上像元的标称坐标, 一个是通过正射参考影像和高程数据得到的信息计算 CCD 线阵上像元的畸变模型修正坐标, 然后利用两者之间的差异来计算畸变模型参数. 具体步骤如下:

- 1) 从 1 级遥感图像上获得控制点行号, 根据行号可以推算卫星扫描时间, 然后利用最小二乘法拟合并对卫星位置坐标数据插值, 得到该控制点时刻的卫星位置坐标向量.
- 2) 从 1 级遥感图像上获得控制点列号, 列号表示控制点对应的标称线阵像元, 结合焦距可以得到该控制点的线阵向量.

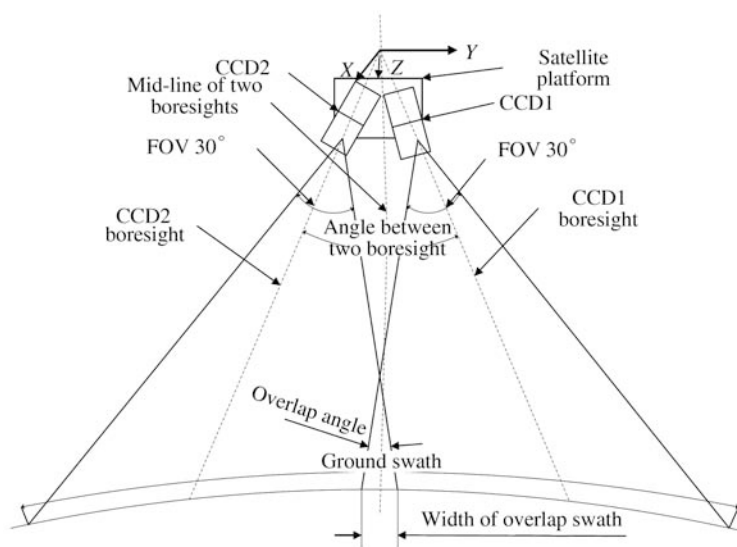


图 5 HJ-B 卫星相机成像示意图

Figure 5 HJ-B satellite camera imaging sketch map

3) 从正射参考影像和高程数据得到控制点的经纬度和高度数据, 并转换到地球固定坐标系, 得到控制点坐标向量.

4) 在地球固定坐标系下, 控制点坐标向量减去卫星位置坐标向量, 得到控制点视向量.

5) 理想情况下, 相机坐标系下的线阵向量和地球固定坐标系下的视向量为同一向量, 但是由于畸变使得两组向量之间存在误差; 该误差通过分析其向量间夹角可以提取获得. 以最接近中心的控制点视向量为参考, 忽略其位置畸变, 计算所有其他向量和该视向量之间的夹角. 并记该控制点视向量对应线阵像元和主点像元直接的夹角为初始夹角.

6) 将所获得的夹角加上初始夹角, 利用夹角和焦距的三角关系, 计算得到一组线阵像元坐标 y_2 .

7) 结合标称的线阵像元坐标 y_1 , 代入畸变模型, 通过最小二乘法优化计算获得畸变模型参数.

当精度要求比较高时, 可以用卫星辅助数据中的姿态角速度对控制点视向量进行角度修正, 进而得到更高精度的视向量夹角信息.

4 实验及分析

4.1 实验过程

本文以我国环境减灾小卫星星座 1B 卫星的数据为参考, 载荷由 CCD1 和 CCD2 两台相机交叉拼接而成, 每台相机设计幅宽 360 km, 视场角 30°, 如图 5 所示. 试验各抽取 CCD1 和 CCD2 一景图, CCD1 是 2011 年 1 月 18 日一景遥感影像, 景中心纬度 38.4°、经度 116.1°; CCD2 是 2009 年 8 月 29 日一景遥感影像, 景中心纬度 33.0°、经度 118.9°. 进行试验计算. 相机 CCD 像元分辨率 30 m. 影像参考图选择 landsat 的 ETM 正射影像, 高程数据为 STRM90.

如图 6 和 7 所示为 CCD1 和 CCD2 相机畸变拟合前后散点图, 由图可知拟合前畸变误差非常明显, 其中 ‘☆’ 表示控制点畸变误差坐标, ‘+’ 表示控制点误差拟合修正坐标. 图 8 和 9 所示为 CCD1 和 CCD2 相机畸变拟合后残差, 其中 CCD1 用了 23 个控制点, 残差均方根大约在 0.0419 mm,

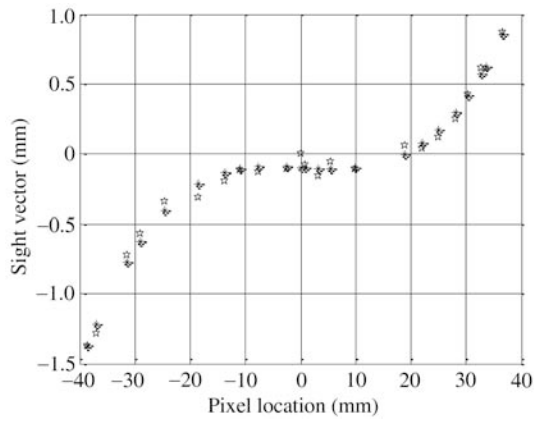


图 6 CCD1 拟合前后控制点数据

Figure 6 Position of CCD1 control point before and after fitting

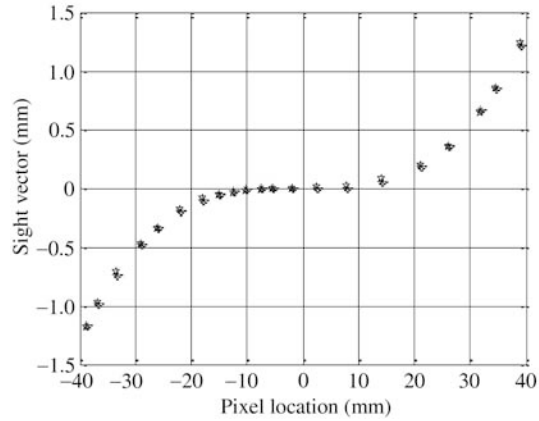


图 7 CCD2 拟合前后控制点数据

Figure 7 Position of CCD2 control point before and after fitting

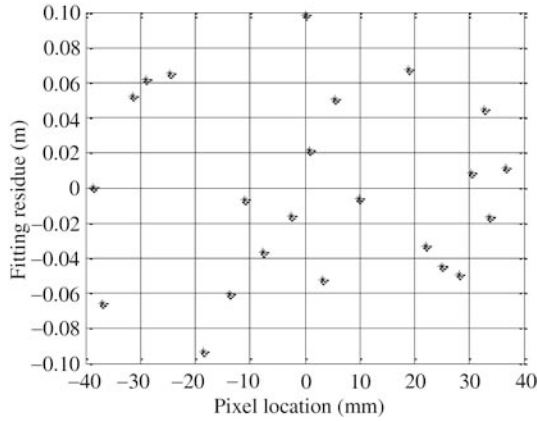


图 8 CCD1 拟合后校准残留

Figure 8 Residual error of CCD1 control point after fitting

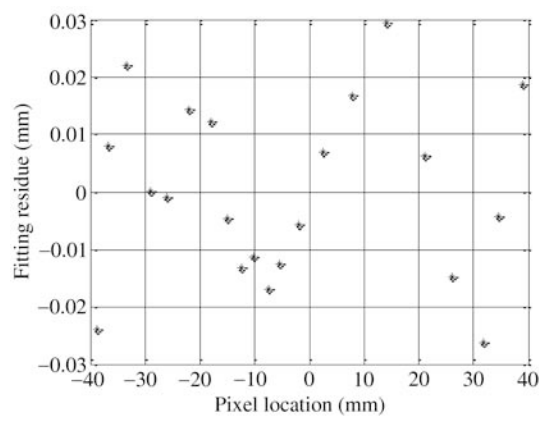


图 9 CCD2 拟合后校准残留

Figure 9 Residual error of CCD2 control point after fitting

表 2 不同焦距的畸变参数计算

Table 2 Calculation of distortion parameter for different focus length

No.	Focal length (mm)	C0	C1	C2	C3	residual error (mm)
1.	140.8	0.00095899	0.99776	1.7785E-5	2.0774E-5	0.015083
2.	140.9	0.0023983	0.99847	1.7874E-5	2.0789E-5	0.015094
3.	141.0	0.0038375	0.99918	1.7964E-5	2.0804E-5	0.015104
4.	141.1	0.0052768	0.99989	1.8053E-5	2.0819E-5	0.015115
5.	141.2	0.006716	1.0006	1.8142E-5	2.0833E-5	0.015126

等于 6.4 个像元; CCD2 用 21 个控制点, 残差大约在 0.015 mm, 等于 2.3 个像元. 残差数据分布比较均匀, 说明系统误差基本消除, 达到了预期精度.

为了进一步分析畸变模型的适应性, 对 CCD1 相机分别选择了 5 个焦距值, 得到 5 组测试结果, 见表 2. 残差说明结果已经稳定, 本方法采用的 3 阶模型, 具有相当的柔韧性, 对于不同的焦距差异,

均能予以吸收.

4.2 结果分析

从结果可以看出, 本方法有几个方面的优点, 一是基于相对角度误差受外方元素误差影响小的原理, 从视向量之间的相对角度关系中提取了内方元素的模型参数, 实现了内外方元素误差解耦; 二是该方法通过分析光学畸变性质, 提出采用 3 阶畸变模型, 该模型具有相当的柔韧性, 对于不同的焦距误差均能予以吸收, 并通过模型参数平衡能够达到总体模型的高精度.

5 结论

本文提出了一种基于角度不变的线阵推扫式 CCD 相机几何畸变在轨检校方法, 其中通过分析 CCD 相机光学畸变, 建立了 3 阶线性畸变模型; 然后利用角度不变这一原理, 对 CCD 畸变模型参数进行了解算. 在选择控制点时, 选取沿像元排列方向均匀分布的控制点, 并且控制点的选择区域为沿 X 推扫方向的较窄区域, 并且越窄越好, 目的是使得时间引起的姿态误差达到最小. 文中采用的是 30 m 分辨率的遥感影像和参考数据, 为了进一步改进提高, 该方法将在后续更高空间分辨率的卫星测试和应用.

参考文献

- 1 Weng J. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Trans Pattern Anal*, 1992, 14: 965–980
- 2 Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses. *IEEE J Robotot Autom*, 1987, RA-3: 323–344
- 3 Joaquim S, Xavier A, Joan B. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern Recogn*, 2002, 35: 1617–1635
- 4 Agapov I A, Kashkin V B, Khleborpros R G. Identification of random fields of points. *Signal Process-Image*, 1998, 13: 21–43
- 5 Guenko G A. Geometric accuracy of Ikonos: zoom in. *IEEE Trans Geosci Remote*, 2004, 42: 209–215
- 6 Yuan X X, Yu J P. Calibration of constant angular error for high resolution remotely sensed imagery. *ACTA Geod Cartogr Sin*, 2008, 37: 36–41
- 7 Zhu X Y, Zhang G, Tang X M, et al. Research and application of CBERS02B image geometric exterior calibration. *Geogr Geo-Inf Sci*, 2009, 25: 17–19

An angle-based method of on-orbit geometric calibration for the pushbroom camera

HAO XueTao*, XU JianYan, WANG HaiYan & LEI YuFei

China Centre for Resources Satellite Data & Application, Beijing 100094, China

*E-mail: hxt@cresda.com

Abstract Calibration of the elements of interior orientation is important for improving the geometric precision

of remote sensing cameras. Here, we propose an angle-based method of on-orbit geometric calibration for the pushbroom remote sensing camera. Based on the principle that the exterior parameters' errors are the lesser influencing factors on the angles between the camera's viewing vectors, the errors of the inner optic geometric distortion are modeled by fitting a using a third-order polynomial model. The angles between the camera's viewing vectors are calculated by acquiring ground control points (GCPs) from the referencing map and digital elevation model. By adjusting the focus length and the parameters of the polynomial model, suitable inner precision for processed CCD imagery from the HJ-1 satellite can be obtained. A comparison of corrected to uncorrected GCP positions yielded average residual errors of 2-6 pixels, which was appropriate for their precision.

Keywords remote sensing, CCD camera, geometric distortion, on-orbit calibration