

环境星宽覆盖特征 CCD 影像几何定位及误差分析

黄青青¹ 赵鸿志² 杨 健¹

1 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京,100101

2 航天东方红卫星有限公司,北京,100094

摘 要:2008 年 9 月发射的中国环境与灾害监测预报小卫星星座(简称 HJ 星座)A、B 星配置的宽覆盖载荷,可广泛应用于生态环境和灾害的大范围动态监测和快速重访。针对传统的物理定位模型在 CCD 相机宽覆盖成像时难以达到较好的精度,尤其是在 CCD 线阵方向误差明显的问题,在考虑 CCD 相机畸变模型的情况下,提出一种基于一般多项式畸变模型的改进定位模型对影像进行几何定位。实验证明,影像在 CCD 线阵方向的误差能得到明显改善,该定位方法对于 HJ-1 卫星 CCD 影像几何定位精度的提高以及推广国产宽覆盖卫星影像的应用具有较大的意义。

关键词:宽覆盖;HJ-1 卫星;几何定位;误差分析

中图分类号:P236

文献标志码:A

遥感技术作为获取环境信息的强有力手段之一,在大范围地表监测时具有其他手段无可比拟的优越性。中国环境与灾害监测预报小卫星星座中的环境一号 A、B 小卫星(以下简称 HJ-1 卫星)配置了两台具有 30 m 地面分辨率、360 km 幅宽的影像获取能力 CCD 相机,且两台相机各自倾斜约 15°安装,以形成约 710 km 的覆盖宽度^[1],可应用于干旱监测、土地利用监测和农作物产量预测等^[2]。星上传感器在获取地表信息的过程中受到多种因素的影响,存在一定的几何变形。目前,关于几何定位的方法主要分为经验模型和物理模型两大类^[3-4],利用大量地面控制点(GCP)解算传感器模型参数,然后利用模型参数对影像进行几何变换实现对影像的纠正^[5-7]。宽覆盖 CCD 相机具有复杂的畸变特征,尤其在卫星姿态稳定度不高(设计指标≤0.01°)且相机以较大倾角安装的情况下^[1],采用上述方法对影像进行几何定位将产生较大的误差。因此,本文在对基本实验误差进行详细分析的基础上,提出一种顾及 CCD 相机畸变模型的几何定位方法,以改善影像的定位精度。

1 基本定位方法

1.1 算法模型

HJ-1 星所搭载的线阵推扫式 CCD 相机,其整景影像为多中心投影,影像的变形是各扫描行变形的综合结果,故可以通过对各扫描行进行纠正,达到对整景影像纠正的目的。假设沿飞行方向为 x 轴,沿 CCD 线阵方向为 y 轴,以像平面中心为原点建立像平面坐标系,对应每条扫描线上的像点坐标为 $(0, y)$,考虑相机焦距 f 以及倾斜安装角 θ ,结合传感器成像时的位置、姿态参数,确定 HJ-1 星 CCD 相机的基本定位模型^[5-6]:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_s(t) \\ Y_s(t) \\ Z_s(t) \end{pmatrix} + m \begin{pmatrix} a_1(t) & a_2(t) & a_3(t) \\ b_1(t) & b_2(t) & b_3(t) \\ c_1(t) & c_2(t) & c_3(t) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, X 、 Y 、 Z 为对应像点地物在物方空间坐标系中的坐标; $X_s(t)$ 、 $Y_s(t)$ 、 $Z_s(t)$ 为获取该地物点时的传感器位置; m 为缩放系数; $a_i(t)$ 、 $b_i(t)$ 、 $c_i(t)$ ($i=1,2,3$) 为成像时刻的卫星姿态(pitch(t), roll

收稿日期:2013-07-09

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41001273)。

第一作者:黄青青,博士,副教授,研究方向为遥感图像处理方法及应用。E-mail:huangqq@radi.ac.cn

通讯作者:赵鸿志,硕士。E-mail:zhaohzh@126.com

(t), $\text{yaw}(t)$)组成的 9 个方向余弦。

上述定位模型中,传感器位置($X_s(t)$, $Y_s(t)$, $Z_s(t)$)、卫星的姿态($\text{pitch}(t)$, $\text{roll}(t)$, $\text{yaw}(t)$)均为待求参数,是随时间变化的量,一般根据一定数量的 GCP 采用最小二乘区域网平差的方法进行解算^[8-10]。对一景影像上各扫描行而言,必须解求该行对应的传感器位置和姿态参数,才能实现对整景影像的定位。考虑到 HJ-1 星运行姿态稳定,运行轨迹得到严格控制,因此各外方位元素是随时间变化的函数,根据经验轨道模型选用三次多项式进行拟合。对于姿态数据,一般选择二次多项式即可,但 HJ-1 星姿态稳定度偏低,所以也可选用三次多项式进行拟合。将所有拟合参数作为待求的未知数,利用一定数量的 GCP 采用最小二乘的方法进行解求,从而确定各扫描行的外方位参数,最后利用求得的外方位参数进行影像的定位^[5-7, 11]。

1.2 基础实验

以 HJ-1-A 星 CCD1 相机获取的我国山东及江苏地区辐射校正后的 1 级影像产品为实验数据进行基本定位模型的实验。该地区影像缩略图如图 1 所示,涵盖海洋、城市、丘陵、山地等复杂地形地貌,高程变化范围从 0 到 1 486 m,具有一定的代表性。

由于 HJ-1 星 CCD 相机幅宽较大,分辨率和卫星姿态稳定度不高,所以必须选择大量分布均匀的足够精度的控制点和检查点对该影像进行定位研究。选择该地区的经正射纠正后的 15 m 分辨率的 ETM+ 数据作为平面参考数据源,人工量测了 41 个分布良好的平面控制点,并在待纠正影像上量测对应的连接点,具体如图 2(a)所示;量测了 119 个平面检查点,在待纠正影像上量测对应的连接点,具体如图 2(b)所示。由于影像右侧主要为海域,所以在海域部分没有量测控制点和检查点。此外,以该地区 90 m 采样间隔的 SRTM 数据作为高程参考数据源,将控制点的平面坐标和高程坐标用于影像定位实验,得到控制点和检查点的残差统计结果如图 3 所示。

经统计,41 个控制点在 CCD 线阵方向的中误差为 29.8 个像元,最大误差为 65.2 像元;在飞行方向的中误差为 1.7 个像元,最大误差为 3.7 像元。119 个检查点在 CCD 线阵方向的中误差为 33.8 像元,最大误差为 79.2 像元;在飞行方向的中误差为 1.7 像元,最大误差为 5.5 像元,见表 1。

当增加控制点的个数时,误差的大小和分布特征基本上没有变化。上述结果表明,图像在 CCD 线阵方向的误差明显,并且在有足够数量的

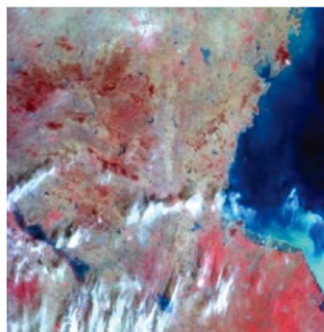
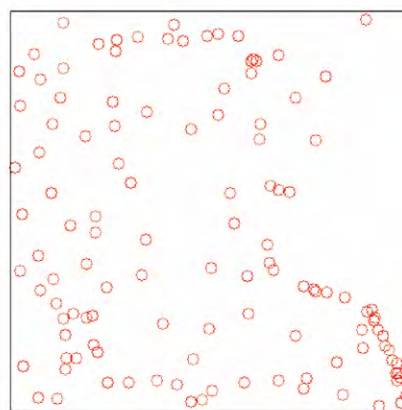


图 1 HJ-1-A 山东、江苏影像图

Fig. 1 HJ-1-A Image of Shandong and Jiangsu



(a) 控制点分布



(b) 检查点分布

图 2 影像上量测的控制点和检查点分布图

Fig. 2 Distribution Diagrams of GCPs and Checkpoints

控制点的情况下,利用基本定位模型难以有效配置该方向的误差。从图 3(a)、3(b)也可以明显发现,误差基本都体现在 CCD 线阵方向。

表 1 基本定位模型控制点和检查点残差统计/像元
Tab. 1 Residuals of GCPs and Checkpoints for Basic Model/pixel

点类别	误差			
	CCD 线阵方向		飞行方向	
	最大误差	中误差	最大误差	中误差
控制点	65.2	29.8	3.7	1.7
检查点	79.2	33.8	5.5	1.7

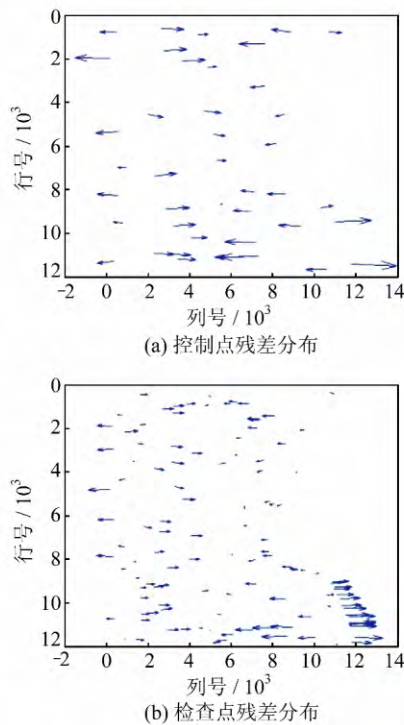


图 3 控制点和检查点残差分布示意图

Fig. 3 Distribution Diagrams of GCPs' and Checkpoints' Residuals

1.3 数据分析

CCD 线阵方向误差相对飞行方向误差十分突出。由于 HJ-1 星 CCD 相机各探测元在每次中心投影中的相对位置关系稳定不变,并且卫星姿态运行稳定(由图像判定),由此可以推断在 CCD 线阵方向的残差必然含有一些特有的误差因素。

针对 CCD 线阵方向误差的分布特点,对控制点和检查点在 CCD 线阵方向的残差相对探测元位置的残差分布进行分析,并统计其随探测元位置的变化趋势,结果分别如图 4、图 5 所示(图中趋势线由 3 次多项式拟合形成)。残差分布及对应的变化趋势表明,控制点和检查点在 CCD 线阵方向的误差相对探测元位置的变化趋势基本一致,随探测元位置的不同而残差量不同。视场中心残差较小,视场边缘残差较大,此特征与相机光学系统畸变的特征一致。这与 HJ-1 星 CCD 相机属于宽覆盖相机有关,相机视场越大(覆盖越宽)畸变越明显,尤其是边缘视场的畸变更大。所以,控制点在靠近边缘视场处有约 70 像元的残差,而检查点在边缘视场有约 80 像元的残差。

因此,对 1 级产品,由于只经过辐射校正,未对相机畸变进行校正,导致利用基本定位模型时,即使在大量控制点的情况下,也难以在 CCD 线阵方向消除由于光学系统畸变引起的误差,必须开

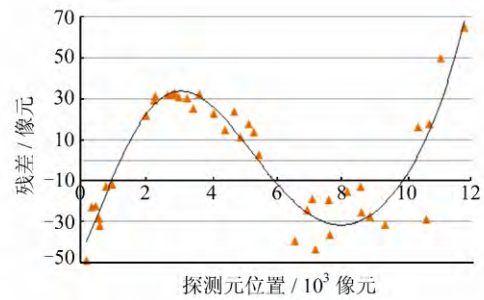


图 4 控制点残差在 CCD 线阵方向随位置变化趋势

Fig. 4 Trend of GCPs' Residuals

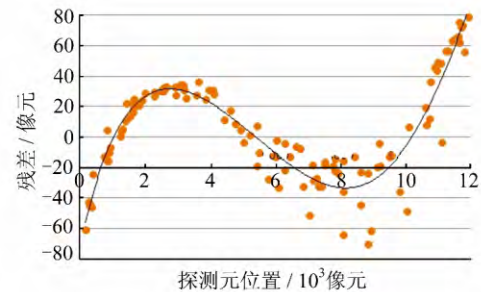


图 5 检查点残差在 CCD 线阵方向随位置变化趋势

Fig. 5 Trend of Checkpoints' Residuals

展基于光学系统畸变的几何定位研究。

2 基于畸变模型的定位方法

根据前述误差分布的对称性特点,其与光学系统径向畸变特性较一致,考虑传统的光学系统径向畸变的一般表达式^[8]:

$$\begin{cases} \Delta x = -x(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \Delta y = -y(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \quad (2)$$

式中, (x, y) 为像点坐标; $\Delta x, \Delta y$ 为像点坐标改正数; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 是以像主点为极点的向径; k_0, k_1, k_2 为光学系统畸变改正系数。

对于 HJ-1 星 CCD 相机,理论上只需要考虑光学系统在线阵方向的径向畸变。然而实际的实验数据表明,径向畸变不是所有误差的全部,而且也难以直接获得 HJ-1 卫星 CCD 相机实验室标定的光学系统径向畸变系数。此外,卫星在轨运行时受卫星姿态稳定度、空间热稳定性等综合因素的影响,光学系统的畸变变得十分复杂,也不能直接利用径向畸变模型去表示光学系统的真实畸变。因此,顾及 CCD 相机的成像特征,采用一般多项式模型来表达 CCD 相机的在轨畸变特征^[12]:

$$\Delta y = k_0 + k_1 y + k_2 y^2 + k_3 y^3 + \cdots \quad (3)$$

式(3)中, Δy 为线阵方向像点坐标改正数; $k_0, k_1, k_2, k_3, \cdots$ 为待求解的光学系统畸变改正系

数; y 为线阵方向像点坐标。

3 定位实验与分析

在考虑光学系统畸变的情况下,利用同样的控制点对影像进行定位处理,得到控制点和检查点在 CCD 线阵方向残差分布分别如图 6、图 7 所示,在 CCD 线阵方向误差不再出现明显的变化规律。

经统计,在三次畸变模型下,41 个控制点在 CCD 线阵方向的中误差为 11.5 像元,最大误差为 39.2 像元;119 个检查点在 CCD 线阵方向的中误差为 12.3 像元,最大误差为 40.8 像元。在 6 次畸变模型下,误差分布和统计结果与 3 次畸变模型相比基本没有变化,具体如表 2 所示。该结果表明,在一定阶次的畸变模型后再增加畸变模型的阶次,对提升定位精度没有太大的贡献,对 HJ-1 卫星 CCD 相机来说三次畸变模型已足够。

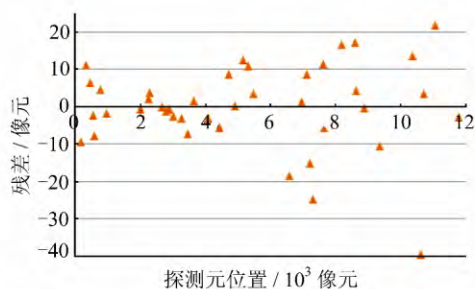


图 6 本文定位方法的控制点残差分布情况
Fig. 6 GCPs' Residual of Proposed Method

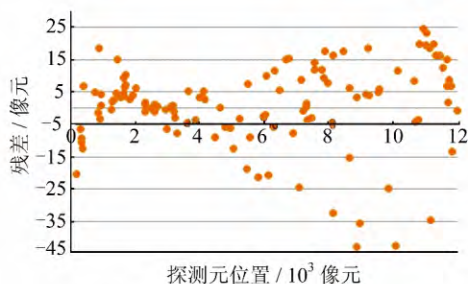


图 7 本文定位方法的检查点残差分布情况
Fig. 7 Checkpoints' Residual of Proposed Method

表 2 基于畸变模型控制点和检查点残差统计/像元
Tab. 2 Residuals of GCPs and Checkpoints for Distortion Model/pixel

点类别	CCD 线阵方向			
	3 次畸变模型		6 次畸变模型	
	最大误差	中误差	最大误差	中误差
控制点	39.2	11.5	39.5	11.3
检查点	40.8	12.3	42.7	12.8

由此可见,在考虑畸变模型后,CCD 线阵方

向的精度得到大量提高,但图像整体精度仍然偏低。尤其是控制点和检查点残差,起初比较分散逐渐接近 0;然后在后半部分控制点和检查点残差又逐渐分散,极个别点残差仍然在 40 像元左右;这说明定位处理后还有部分误差没有得到有效消除。通过深入分析发现,这主要是由于 CCD 相机大角度倾斜安装且有效视场较大,出现相机中心视场外侧到边缘视场因投影变形与相机畸变叠加影响程度不一致引起的,对于畸变小的视场点最终的残差较小,而对于本身畸变较大的视场,则出现残差放大的现象。

4 结 语

对 HJ-1 卫星宽覆盖的 CCD 相机影像几何定位处理时,必须根据相机的畸变特征进行针对性的研究分析。本文对此进行了详细的误差分析,提出了基于畸变模型的改进定位方法。实验表明,CCD 线阵方向的定位精度明显得到提高。但无论采用 3 次畸变模型还是更高次的畸变模型,对 HJ-1A 星 CCD1 相机都有约 11 个像元的误差,这表明选用 3 次畸变模型处理影像定位已经足够。而对于考虑了畸变因素的仍然存在较大的残差的问题,则需要继续研究该误差特征形成的原因,同时顾及 CCD 宽覆盖的引入的地球曲率变化对定位模型的影响,从而实现对 HJ-1 星宽覆盖 CCD 相机影像的高精度几何定位。

参 考 文 献

- [1] Shen Zhong. Descriptions of HJ-1 A&B Satellite's Payload and Application[R]. Report of DFH Satellite Co., Ltd., 2008(沈中. 环境一号 A、B 卫星有效载荷及应用介绍[R]. 航天东方红卫星有限公司报告, 2008)
- [2] Liang Dong, Guan Qingsong, Huang Wenjiang, et al. Remote Sensing Inversion of Leaf Area Index Based on Support Vector Machine Regression in Winter Wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2013, 29(07): 117-123(梁栋, 管青松, 黄文江, 等. 基于支持向量机回归的冬小麦叶面积指数遥感反演[J]. 农业工程学报, 2013, 29(07): 117-123)
- [3] Review T T. Paper: Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(10): 1 893-1 924
- [4] Hu Anwen, Zhang Zuxun. Discussion on Strict Geometric Model Based on Affine Transformation for

- Remote Sensing Image with High Resolution[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006,31(2): 104-107(胡安文, 张祖勋. 对高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型的讨论[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006,31(2):104-107)
- [5] Sun Jiabing. Principles and Applications of Remote Sensing [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)
- [6] Zhang Guo. Rectification for High Resolution Remote Sensing Image Under Lack of Ground Control Points[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005(张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005)
- [7] Zhang Jianqing, Pan Li, Wang Shugen, et al. Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003(张剑清, 潘励, 王树根, 等. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003)
- [8] Zhang Yongsheng, Gong Danchao, Liu Jun, et al. Applications of High Resolution Remote Sensing Satellite: Imaging Model, Processing Algorithms and Application Technology [M]. Beijing: Science Press, 2004 (张永生, 巩丹超, 刘军, 等. 高分辨率遥感卫星应用: 成像模型、处理算法及应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004)
- [9] Zhu Shulong, Shi Wenzhong, Zhang Yan. Precision Comparison of Several Algorithms for Approximate Rectification of Linear Array Push-broom Imagery [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(3): 220-226(朱述龙, 史文中, 张艳. 线阵推扫式影像近似几何校正算法的精度比较[J]. 遥感学报, 2004, 8(3):220-226)
- [10] Yuan Xiuxiao, Wang Taoyang. Block Adjustment for CBERS-02B Satellite Images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 2: 310-324(袁修孝, 汪韬阳. CBERS-02B 卫星遥感影像的区域网平差[J]. 遥感学报, 2012, 2:310-324)
- [11] RP V, Rupert M, Pablo D, et al. In-flight Geometric Calibration and Orientation of ALOS/PRISM Imagery with a Generic Sensor Model[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2011, 77(5):531-538
- [12] Pan Li, He Xiao. Rectification Method of Linear CCD Image from HJ-1A/1B Satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 631-636(潘励, 何潇. 环境减灾卫星 CCD 影像精纠正方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(6):631-636)

Geometric Rectification and Error Analysis for HJ-1 CCD Image With Wide Coverage Feature

HUANG Qingqing¹ ZHAO Hongzhi² YANG Jian²

¹ Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

² DFH Satellite Co. Ltd., Beijing, 100094, China

Abstract: Chinese small satellite constellation (abbreviated HJ constellation) is special for environment and disaster monitoring and forecasting. The satellites HJ-1 A/B have the feature of wide coverage, which can be widely used in the ecological environment and disaster monitoring. The traditional positioning model can't get ideal accuracy because of the CCD feature of wide coverage. It has significant error in CCD linear array direction. The reason is that the error factors changing with the field of view are not taken into count. Therefore, camera distortion model of CCD camera is considered and improved distortion model based on polynomial is used for image positioning in this thesis. The experimental results demonstrate the proposed algorithm improves the RMSE in CCD linear array direction is obviously reduced. The improved method has great significance to improve the positioning accuracy of HJ-1 CCD image and promote the use of domestic wide coverage satellite images.

Key words: wide coverage; HJ-1 satellite; geometric rectification; error analysis

First author: HUANG Qingqing, PhD, associate professor, specializes in remote sensing process. E-mail: huangqq@radi.ac.cn

Corresponding author: ZHAO Hongzhi, master. E-mail: zhaohzh@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41001273.