

利用视线向量的资源三号卫星影像 严格几何处理模型

闫利¹ 姜芸¹ 王军²

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430072)

(2 黑龙江测绘地理信息局,哈尔滨市测绘路 32 号,150081)

摘要:根据资源三号立体测绘卫星三线阵传感器的成像原理,利用卫星影像的视线角等状态构建资源三号卫星影像的严格几何处理模型。经验证发现,因资源三号卫星视线角及相机安置等卫星状态获取存在误差,在无控状态下直接利用卫星姿态数据和严格几何处理模型进行定位精度较差。为有效消除卫星轨道位置、姿态角元素等存在的固定系统误差,引入视线向量修正模型进行修正,修正后精度提升明显,平坦区域仅采用 3 个地面控制点在 X 和 Y 方向的定位精度即可优于 3 m。

关键词:资源三号卫星;严格几何处理模型;视线向量;精度

中图分类号:P237.3; TP751

资源三号测绘卫星(简称为 ZY-3)作为国内第一颗真正意义上的测图与资源相结合的民用航天测绘卫星,其成功应用将大大改变传统测绘技术和手段不能满足我国信息化建设需求的现状。目前,卫星影像无控制点或少控制点的目标定位是衡量高分辨率卫星影像测图能力的关键技术指标^[1]。为了有效地使用资源三号卫星影像,必须建立几何处理模型,建立严格几何处理模型时必须考虑遥感成像过程中造成影像变形的各种物理因素^[2]。

我国对卫星几何建模方面的研究起步较晚,特别是针对三线阵高分辨率立体测绘卫星几何建模的研究更是缺乏。文献[3-5]分别对贝叶斯模型和四元数几何定位模型进行了研究,但是这两模型未涉及传感器位置描述问题;文献[1,6]分别对 ALOS 卫星的 PRISM 传感器构建了严格几何处理模型,特别是文献[1]采用卫星影像的辅助数据文件构建了无需地面点的严格几何处理模型,具有很强的借鉴意义。文献[7]针对 SPOT-5 卫星提出了视线向量修正精化卫星外方位元素的方法^[7]。

因资源三号测绘卫星的相关状态信息未完全公开,无法获取关键元数据(如相机安置矩阵等),

其几何处理模型的建立与验证具有重要的参考价值。本文借鉴其他卫星几何处理模型的研究成果,研究利用影像视线角等状态数据构建资源三号卫星视线向量严格几何处理模型并进行视线向量修正的方法和定位精度。

1 ZY-3 成像过程与建模

资源三号测绘卫星共搭载 4 台相机,其中 3 台相机构成三线阵立体相机,完成立体测绘功能,多光谱相机包含红、绿、蓝和红外 4 个谱段^[8]。

1.1 像元扫描时间的确定

假设影像的中心行号为 l_0 ,扫描时间为 t_0 , Δt 为每行扫描时间即采样间隔,则任一扫描行 l 的像元所对应的摄影时间可内插为:

$$t = t_0 + \Delta t \times (l - l_0) \quad (1)$$

式中, l_0 、 t_0 、 Δt 参数均可从资源三号的辅助数据中获取。

1.2 视线向量的确定

资源三号卫星的视线角未考虑相机与本体之间的安置矩阵,其视线向量坐标转换过程是由像点在卫星平台坐标系向 J2000 转换,然后再由 J2000 向 WGS-84 换算。

收稿日期:2013-10-27。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40871172)。

1.2.1 像元在相机坐标系中的视线向量

资源三号卫星视线角描述的是像元摄影光线在相机坐标系下的方向向量。资源三号卫星的三线阵相机采用半反半透棱镜拼接方式,把多片 CCD 拼接成一条扫描线,可通过查询辅助信息文件获取像点行列号对应的 CCD 视线角 ψ_x 和 ψ_y 。通过分析可知,资源三号卫星的视线角变化均匀,短周期内未出现明显跳变现象,设 CCD 线阵上每个像元在相机坐标系的指向角为 $(\psi_x(p), \psi_y(p))$,则任意像元在相机坐标系中的视线向量为:

$$U_{CCD} = [-dx \quad dy \quad -1]^T / K \quad (2)$$

其中, $K = 1/\sqrt{1+dx^2+dy^2}$; p 为像元对应的列号; $dx = \tan(\psi_y(p))$, $dy = \tan(\psi_x(p))$, 即:

$$U_{CCD} = \begin{bmatrix} -\tan(\psi_y)_p \\ \tan(\psi_x)_p \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2.2 像元在本地坐标系中的视线向量

计算本体坐标系中的视线向量需要利用相机安置矩阵 R_{camera}^{body} 进行转换:

$$R_{camera}^{body} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & -\sin r \\ 0 & \sin r & \cos r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos p & 0 & -\sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin p & 0 & \cos p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos y & -\sin y & 0 \\ \sin y & \cos y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, r, p, y 为本体坐标系与相机坐标系之间在 X, Y, Z 方向上的夹角。则任一像元的摄影光线在本体坐标系中的视线向量 U_{star} 为:

$$U_{star} = R_{camera}^{body} U_{CCD} \quad (5)$$

1.2.3 像元在 CIS 坐标系中的视线向量

资源三号卫星姿态敏感器测定的是卫星姿态敏感器到 J2000 坐标系的指向, GPS 测定的是 GPS 相位中心的位置。资源三号辅助数据文件提供了卫星姿态四元数信息,四元数描述的是传感器在 J2000 惯性参考坐标系下的姿态。像元由本体坐标系向 J2000 坐标系转换的旋转矩阵 R_{Star}^{J2000} [9] 为:

$$R_{Star}^{J2000} = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, q_0, q_1, q_2, q_3 为任意时刻 t 的四元数,因卫星姿态变化较小,可通过线性内插确定。则任一

像元的摄影光线在 J2000 坐标系中的视线向量 U_{J2000} 可由下式计算:

$$U_{J2000} = R_{Star}^{J2000} R_{camera}^{body} U_{CCD} \quad (7)$$

1.2.4 像元在地面坐标系的视线向量

获取像元在地面固定参考系下的视线向量,需要一个旋转矩阵:

$$R_{J2000}^{WGS84} = P(t)R(t)W(t) \quad (8)$$

式中, $P(t)$ 为岁差和章动矩阵; $R(t)$ 为地球自转矩阵; $W(t)$ 为极移矩阵。则像元在地面坐标系的视线向量为:

$$U_Q = R_{J2000}^{WGS84} R_{Star}^{J2000} R_{camera}^{body} U_{CCD} \quad (9)$$

1.2.5 像点对应地面点高程的解算

假设像点对应地面点坐标为 (X, Y, Z) , 地面点成像时刻卫星的摄站位置坐标为 (X_v, Y_v, Z_v) , m 为比例因子,则有:

$$\begin{aligned} X &= X_v + m \times (U_Q)_x \\ Y &= Y_v + m \times (U_Q)_y \\ Z &= Z_v + m \times (U_Q)_z \end{aligned} \quad (10)$$

假设地球为椭球,则地球上任一点均满足地球椭球方程,假设 a 为地球长半轴, b 为短半轴,可得到地面点解算方程:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{X_i^2}{A^2} + \frac{Y_i^2}{B^2} + \frac{Z_i^2}{B^2} \right] m + 2 \left[\frac{X_v X_i}{A^2} + \frac{Y_v Y_i}{B^2} + \frac{Z_v Z_i}{B^2} \right] m \\ & + \left[\frac{X_v^2}{A^2} + \frac{Y_v^2}{B^2} + \frac{Z_v^2}{B^2} \right] = 1 \end{aligned} \quad (11)$$

求解算出比例因子 m , 之后代入式(10)即可解算出地面点坐标。

1.3 资源三号影像的严格成像模型

综上所述,因 GPS 相位中心在卫星本体坐标系中的三个偏移量与相机节点在卫星本体坐标系中的三维坐标对地面定位的影响一致,可将 GPS 偏心与镜头偏心合并;又因投影中心与卫星质心的差距和 GPS 相位中心的偏移对最终定位精度影响较小,通常可忽略卫星质心的差距和 GPS 相位中心的偏移。则根据 ZY-3 卫星成像过程中获取的各类观测数据,以传感器为中心,其单相机的严密几何处理模型建立并简化为^[10]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} + m R_{J2000}^{WGS84} R_{Star}^{J2000} R_{camera}^{body} \begin{bmatrix} -\tan(\psi_y) \\ \tan(\psi_x) \\ -1 \end{bmatrix} \times f \quad (12)$$

其中, R_{camera}^{body} 为相机坐标系到本体坐标系的转换矩

阵; R_{Star}^{J2000} 为星敏本体到 J2000 坐标系的转换矩阵;
 R_{J2000}^{WGS84} 为 J2000 到 WGS-84 坐标系的转换矩阵;
 (ψ_x, ψ_y) 为每个探元 CCD 在相机坐标系下的指向角;
 $[X_{GPS} \ Y_{GPS} \ Z_{GPS}]^T$ 为 GPS 测量的卫星的位置。

2 基于视线向量的修正算法

本文将视线向量修正引入到资源三号卫星几何定位中,采用线性视线向量修正模型对卫星影像视线角进行修正,并分析其对资源三号测绘卫星影像系统误差和定位精度的影响程度。

由式(12),令 $Q = R_{J2000}^{WGS-84} R_{Star}^{J2000} R_{camers}^{body}$, 根据实际中存在的误差,由共线方程得视线向量修正模型为:

$$\begin{aligned}
 f_1 &\equiv \tan^{-1} \\
 &\left[\frac{a_{11}(X - X_P) + a_{12}(Y - Y_P) + a_{13}(Z - Z_P)}{c_{11}(X - X_P) + c_{12}(Y - Y_P) + c_{13}(Z - Z_P)} \right] - \\
 \psi_y &= \psi_{cy} - \psi_y \\
 f_2 &\equiv \tan^{-1} \\
 &\left[\frac{b_{11}(X - X_P) + b_{12}(Y - Y_P) + b_{13}(Z - Z_P)}{c_{11}(X - X_P) + c_{12}(Y - Y_P) + c_{13}(Z - Z_P)} \right] + \\
 \psi_x &= -\psi_{cx} + \psi_x
 \end{aligned} \tag{13}$$

其中, ψ_{cx} 、 ψ_{cy} 是由姿态测量设备记录的卫星位置和真实地面点所形成的视线向量; f_1 、 f_2 为控制点计算的视线向量与影像辅助数据给出的视线向量的残差量。

假设 ψ_E 为视线向量误差, $\psi_c = \psi + \psi_E$, 则视线向量精化模型如下所示^[11]。

$$\begin{cases} f_1 \cdot K + \psi_{Ey} \cdot K = f_1 \cdot K + g_1 = 0 \\ f_2 \cdot K + \psi_{Ex} \cdot K = f_2 \cdot K + g_2 = 0 \end{cases} \tag{14}$$

其中, K 表示像点 (i, j) 对应的地面点与卫星间的距离; g_1 、 g_2 为视线向量误差修正函数。

f_1 、 f_2 包含卫星的位置、速度、姿态和视线角的误差, $f_1 K$ 和 $f_2 K$ 可近似认为是因卫星位置和卫星姿态测量、卫星平台稳定性以及内插算法精度等因素引起的视线角误差而产生的点位误差, 可通过视线向量改正值有效地减少残差或消除视线向量系统误差。

本文采用线性视线向量修正模型对卫星影像视线角进行修正, 令 $g_1 = a_0 + b_0 \cdot i + c_0 \cdot j$, $g_2 = a_1 + b_1 \cdot i + c_1 \cdot j$ 。其中, a_0 、 b_0 、 c_0 、 a_1 、 b_1 、 c_1 为视线向量误差修正函数参数, 可通过视线向量校正来确定。

3 实验与分析

为对资源三号测绘卫星影像严格几何处理模型进行验证, 利用国内某地区编号分别为 109、110、111 的三景经传感器校正的正视影像产品进行实验。其中, 影像 109 中心偏左为小范围城区, 其他区域为平原, 有河流、湖泊、耕地等丰富要素, 控制点 21 个; 影像 110 北部较为平坦, 南部为山区, 控制点数为 17; 影像 111 大部分为山区, 左下部有一大型水库, 控制点 20 个。三景影像的控制点为均匀分布的明显地物点(道路交叉点、田角等), 采用的控制点和检查资料来源于 1:10 000 地形图和野外实测点, 将其中少数 GPS 点作为地面控制点, 其余作为检查点。图 1 为影像 110 上的控制点分布图。

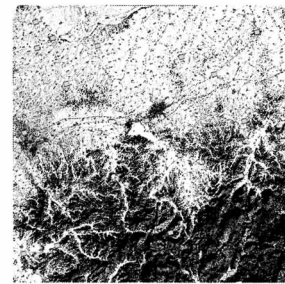


图 1 控制点在影像 110 上的分布示意图

Fig. 1 Distribution of Ground Control Points(GCPs)in 110 Imagery

3.1 系统误差分析

首先利用影像 110 数据文件, 根据 ZY-3 严格几何处理模型对 ZY-3 影像进行直接定位实验, 并利用检查点进行分析。本文的平均残差为平均绝对残差。

图 2 给出了影像 110 直接定位的残差分布图, 其中, 矢量的长度和残差大小成正比。从图 2 和表 1 中可以看出, 直接定位计算得到的定位点残差分布具有明显的方向性和数量级, 且在平均绝对残差上下的有限范围内浮动, 这说明存在固定系统误差。通过分析严格几何处理模型构建过程可知, 系统误差的主要来源为相机安置误差、CCD 视线角及姿态角等姿态角常差与测量误差

表 1 影像 110 定位精度分析/m

Tab. 1 Direct Location Accuracy of 110 Imagery/m				
统计项	最大残差	最小残差	平均残差	RMSE
X	65.308	28.326	52.238	52.948
Y	20.141	2.351	11.179	12.602
Z	94.202	70.048	83.228	83.597

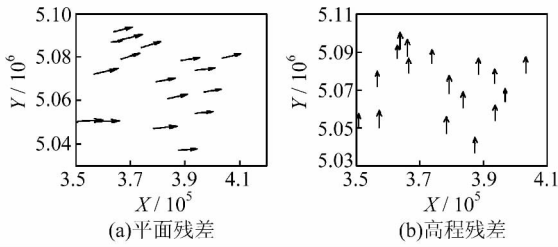


图2 影像110的检查点残差分布图

Fig. 2 Distribution of Residuals of 110 Imagery Check Points

等。为消除误差影响,本文采用线性视线向量修正函数进行修正。

3.2 模型修正后的定位精度分析

采用线性视线向量修正函数修正后的模型对影像110进行定位分析,表2和图3给出了采用3个控制点进行修正后的误差统计情况和残差分布。

从表2和图3中可以看出,影像定位的系统误差大幅度降低,严格几何处理模型的定位精度明显提高,X和Y方向的定位精度优于3m。

为进一步验证模型的正确性,对影像109、

表2 修正后影像110定位精度分析/m

Tab. 2 Direct Location Accuracy of 110 Imagery After Correction/m

统计项	最大残差	最小残差	平均残差	RMSE
X	3.979	0.387	1.550	2.348
Y	4.608	0.792	1.592	2.276
Z	2.670	0.220	0.889	1.264
平面误差	3.270			

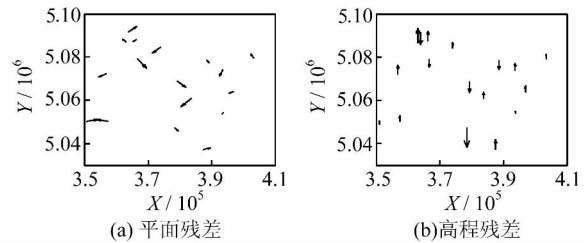


图3 修正后影像110的检查点残差分布图

Fig. 3 Distribution of Residuals of 110 Imagery Check Points After Correction

111进行定位实验,影像109量测了21个控制点作为检查点,影像111量测了20个控制点作为检查点。误差统计情况和残差分布如表3和图4所示。

表3 修正后影像109和111定位精度分析/m

Tab. 3 Direct Location Accuracy of 109 and 111 Imagery After Correction/m

统计项	影像109				影像111			
	最大残差	最小残差	平均残差	RMSE	最大残差	最小残差	平均残差	RMSE
X	4.682	0.402	1.846	2.153	4.452	1.036	2.271	2.471
Y	3.730	0.459	1.806	2.066	6.656	1.640	2.778	3.044
Z	4.530	0.450	1.949	2.200	4.870	0.780	2.255	2.600
平面误差	2.984				3.921			

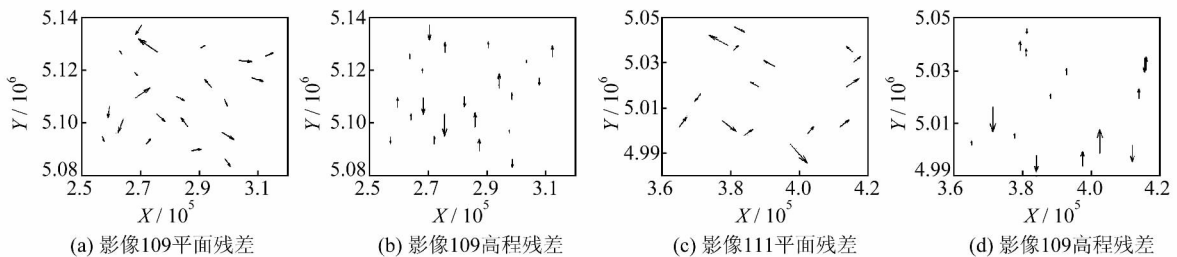


图4 修正后影像109和111的检查点残差分布图

Fig. 4 Distribution of Residuals of 109 and 111 Imagery Check Points After Correction

从表3和图4中可知,影像109的X和Y方向的定位精度优于3m,影像111的定位精度在X方向上优于4m,Y方向上优于5m。实验结果表明,采用此模型对资源三号卫星影像的定位精度较高,可有效消除系统误差的影响。

4 结语

本文采用资源三号卫星影像的视线角等状态构建视线向量,建立了资源三号卫星影像的严格几何处理模型,提出利用线性视线向量修正模型对资源三号卫星影像视线角进行修正,以有效消除因相机安置误差、CCD视线角及姿态角等姿态

角常差与测量误差等因素引起的系统误差影响。利用某地区编号分别为 109、110、111 的三景影像进行实验验证,采用 3 个控制点求解修正参数,取得了较好效果,达到资源三号卫星标称的几何定位精度。因资源三号的应用服务刚刚起步,有关三线阵测绘卫星的严格几何处理模型还需要更深入的优化和完善。

参 考 文 献

- [1] 范大昭,刘楚斌,王涛,等. ALOS 卫星 PRISM 影像严格几何处理模型的构建与验证[J]. 测绘学报, 2011, 40(5): 569-574
- [2] 刘微微,盛庆红,姬亭,等. 高分辨率卫星遥感影像严格几何定位模型发展综述[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 677-681
- [3] Luo X B, Liu Q, Liu Q H. Exterior Orientation Elements' Bayesian Estimation Model Under Insufficient Ground Control Points[C]. The 18th International Conference on Geoinformatics, Beijing, 2010
- [4] 龚辉. 基于四元数的线阵 CCD 影像定位技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2008
- [5] 江刚武,姜挺,王勇,等. 基于单位四元数的无初值依赖空间后方交会[J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 169-175
- [6] Schneider M, Lehner M, Müller R, et al. Stereo-Evaluation of ALOS/PRISM Data on ESA-AO Test Sites: First DLR Results[C]. ALOS PI Symposium, Greece, 2008
- [7] Jung H S, Kim S W, Won J S. Line-of-Sight Vector Adjustment Model for Geopositioning of SPOT-5 Stereo Images[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(11): 1 267-1 276
- [8] “资源三号”卫星成功拍摄高精度立体影像[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(1): 封二
- [9] 汤志强. 航天线阵 CCD 传感器严格几何处理模型的分析与验证[D]. 郑州:信息工程大学, 2011
- [10] 唐新明,张过,祝小勇,等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. 测绘学报, 2012, 41(2): 191-198
- [11] Weser T, Rottensteiner F, Willneff J, et al. An Improved Pushbroom Scanner Model for Precise Georeferencing of ALOS PRISM Imagery[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37 (B1): 739-744

第一作者简介:闫利,教授,博士生导师。现从事摄影测量、遥感图像处理和三维激光成像扫描测量技术的研究。
E-mail: liyan@sgg.whu.edu.cn

Building of Rigorous Geometric Processing Model Based on Line-of-Sight Vector of ZY-3 Imagery

YAN Li¹ JIANG Yun¹ WANG Jun²

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Heilongjiang Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, 32 Cehui Road, Harbin 150081, China)

Abstract: A rigorous geometric processing model for ZY-3 satellite images based on image-forming principles for three-line array sensors equipped in ZY-3 was built using satellite state data such as the line-of-sight angle. The validation results show that positional accuracy was not good when satellite state data and a rigorous geometric processing model was directly applied without processing. This was caused by errors created when obtaining satellite state data such as the line-of-sight angle and sensor position. In order to decrease original system errors in satellite orbital position and attitude angles, a modified model based on the line-of-sight vector was introduced to modify these system errors. After the processing, positional accuracy in flat areas was more precise than 3 meters even when only 3 control points were included in x - y directions.

Key words: ZY-3 satellite; rigorous geometric processing model; line-of-sight vector; accuracy

About the first author: YAN Li, professor, Ph D supervisor. His main research interests include photogrammetry and remote sensing image processing and 3D laser imaging radar.

E-mail: liyan@sgg.whu.edu.cn