

利用视线向量修正进行 SPOT-5
影像高精度立体定位

胡文元¹

(1 山西省工程测绘院,太原市鱼池街 9 号,030002)

摘 要:介绍了 SPOT-5 卫星影像的严格几何处理模型及视线向量修正的原理,推导了基于视线向量修正的多像光束法平差模型。对 SPOT-5 影像进行实验,验证了影像系统误差的存在。将视线向量修正法的定位精度与轨道姿态误差直接修正法的定位结果进行对比,结果表明,视线向量修正法仅采用 5 个控制点就可以获得轨道姿态误差直接修正法采用 10 个控制点的定位精度。

关键词:SPOT-5 影像;视线向量修正;几何定位

中图法分类号:P236

SPOT-5 卫星载有高性能的测轨定姿系统,可以提供精确的卫星轨道星历和传感器姿态参数,利用基于共线条件的严格几何模型能够实现 SPOT-5 影像无控制点直接对地定位^[1]。然而,SPOT-5 卫星测轨定姿系统误差的存在导致了其无控制点条件下立体定位的精度很有限。如何快速有效地剔除轨道姿态测量值误差,是提高 SPOT-5 定位精度的一项关键措施。

视线向量修正是 Jung 提出的一种利用少量控制点精化卫星外方位元素的方法,其基本原理是将卫星的系统误差归结到对成像光线的影响^[2,3]。本文推导出了基于视线向量修正的多像光束法平差模型,实验结果表明,视线向量修正法仅采用 5 个控制点就可以获得轨道姿态误差直接修正法采用 10 个控制点的定位精度。

1 基于 SPOT-5 严格几何模型的对地目标定位

精确的成像几何模型是获取高精度几何信息的先决条件之一。SPOT-5 影像辅助文件提供了以一定频率采样的卫星轨道位置和姿态角测量值、CCD 像元的视线角(ϕ_{OY} 和 ϕ_{OX})等信息,经过一系列坐标变换可以得到 SPOT-5 影像的类共线方程^[4,5],如式(1)所示:

$$\left\{\begin{aligned}&\frac{r_{11}(X-X_{P_i})+r_{12}(Y-Y_{P_i})+r_{13}(Z-Z_{P_i})}{r_{31}(X-X_{P_i})+r_{32}(Y-Y_{P_i})+r_{33}(Z-Z_{P_i})}\\&= \tan\phi_{OY}\\&\frac{r_{21}(X-X_{P_i})+r_{22}(Y-Y_{P_i})+r_{23}(Z-Z_{P_i})}{r_{31}(X-X_{P_i})+r_{32}(Y-Y_{P_i})+r_{33}(Z-Z_{P_i})}\\&= -\tan\phi_{OX}\end{aligned}\right.\tag{1}$$

式中, ϕ_{OY} 和 ϕ_{OX} 表示该像元(i,j)在卫星本体坐标系内的视线方向; $(r_{11},r_{12},\cdots,r_{33})$ 表示由卫星轨道位置(X_{P_i},Y_{P_i},Z_{P_i})和姿态角(roll,pitch,yaw)表示的旋转矩阵各分量,其具体表达式详见文献[4];(X,Y,Z)为待定点在地心直角坐标系下的空间坐标。

由于星上搭载的轨道和姿态测量记录设备的采样频率远低于每条扫描行的成像频率,因此,要精确地测量记录每一扫描行的外方位元素是不可能的。为此,可根据影像辅助文件所提供的卫星轨道和姿态测量值,采用三次样条函数内插出每一扫描行的外方位元素^[6]。由于卫星测轨定姿误差的影响,采用三次样条函数内插的每一扫描行的轨道位置和姿态偏离卫星成像时真实状态,因此,需要采用地面控制点修正星测的外方位元素值,每扫描行影像的轨道姿态误差修正模型如式(2)所示:

$$\begin{cases} X_{P_i} = X_{P_i}^{\text{obs}} + c_{x,0} + c_{x,1} \cdot t \\ Y_{P_i} = Y_{P_i}^{\text{obs}} + c_{y,0} + c_{y,1} \cdot t \\ Z_{P_i} = Z_{P_i}^{\text{obs}} + c_{z,0} + c_{z,1} \cdot t \\ \text{roll}_i = \text{roll}_{P_i}^{\text{obs}} + e_{r,0} + e_{r,1} \cdot t \\ \text{pitch}_i = \text{pitch}_{P_i}^{\text{obs}} + e_{p,0} + e_{p,1} \cdot t \\ \text{yaw}_i = \text{yaw}_{P_i}^{\text{obs}} + e_{y,0} + e_{y,1} \cdot t \end{cases} \quad (2)$$

式中, $c_{x,0}, c_{x,1}, \dots, e_{y,1}, e_{y,2}$ 是卫星轨道和姿态误差改正项系数。采用这种轨道姿态误差直接修正法进行影像定位时, 首先根据卫星星历记录的轨道姿态测量值采用三次样条函数内插出各扫描行的外方位元素初始值, 然后利用地面控制点采用光束法平差解算定向参数及待定点坐标, 该方法可称为轨道姿态误差直接修正法。

2 基于视线向量修正的对地目标定位

对类共线方程式(1)左右两边同时取反正切函数, 则可得到式(3):

$$\begin{cases} f_1 = \tan^{-1} \left[\frac{r_{11}(X - X_{P_i}) + r_{12}(Y - Y_{P_i}) + r_{13}(Z - Z_{P_i})}{r_{31}(X - X_{P_i}) + r_{32}(Y - Y_{P_i}) + r_{33}(Z - Z_{P_i})} \right] - \phi_{OY} \\ f_2 = \tan^{-1} \left[\frac{r_{21}(X - X_{P_i}) + r_{22}(Y - Y_{P_i}) + r_{23}(Z - Z_{P_i})}{r_{31}(X - X_{P_i}) + r_{32}(Y - Y_{P_i}) + r_{33}(Z - Z_{P_i})} \right] + \phi_{OX} \end{cases} \quad (3)$$

理想条件下, 卫星轨道和姿态测量值、星历中记录的视线向量 $[\phi_{OY} \quad \phi_{OX}]$ 严格准确, 则 $f_1 \equiv f_2 \equiv 0$ 。但是在实际卫星传感器成像过程中, 卫星轨道位置和姿态的测量不可避免地存在误差, 而且卫星位置和姿态的采样频率低于卫星影像扫描的采样间隔, 故每行影像的外方位线元素(卫星位置)和角元素(卫星姿态)需内插确定。同时, 影像辅助数据中给出的 CCD 单元的视线角根据传感器 CCD 的物理安置位置计算得到, 而物理器件在高空中不可避免会出现变形, 造成误差。因此, 卫星位置和卫星姿态测量的不确定性、卫星平台的不稳定性以及内插方法的精度都将导致 f_1 和 f_2 不等于 0。

令 k_{ij} 表示像点 (i, j) 对应的地面点与卫星间的距离, 则 $k_{ij} f_1$ 和 $k_{ij} f_2$ 则可近似为卫星定轨和测姿等系统误差引起的地面上沿轨方向和垂直轨道方向的误差大小。通常, 对 SPOT-5 系统误差的

修正是从类共线方程的左边入手, 即直接对星测的轨道和姿态角进行修正来使 $f_1 = f_2 = 0$; 而视线向量修正则从类共线方程的右边入手, 即通过对视线向量 (ϕ_X, ϕ_Y) 修正来消除卫星测轨定姿误差的影响。采用 Hyung-Sup Jung 所提出的一次项修正模型, 则基于视线向量精化的类共线方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} \frac{r_{11}(X - X_{P_i}) + r_{12}(Y - Y_{P_i}) + r_{13}(Z - Z_{P_i})}{r_{31}(X - X_{P_i}) + r_{32}(Y - Y_{P_i}) + r_{33}(Z - Z_{P_i})} \\ = \tan \left(\phi_{OY} - \left(\frac{a_0 + b_0 \cdot i + c_0 \cdot j}{k_{ij}} \right) \right) \\ \frac{r_{21}(X - X_{P_i}) + r_{22}(Y - Y_{P_i}) + r_{23}(Z - Z_{P_i})}{r_{31}(X - X_{P_i}) + r_{32}(Y - Y_{P_i}) + r_{33}(Z - Z_{P_i})} \\ = -\tan \left(\phi_{OX} + \left(\frac{a_1 + b_1 \cdot i + c_1 \cdot j}{k_{ij}} \right) \right) \end{cases} \quad (4)$$

类似于有偏补偿 RPC 模型光束法平差, 视线向量修正模型也可用于 SPOT-5 多张影像的整体光束法平差, 其误差方程如式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}_{mm} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X} & \frac{\partial F_1}{\partial Y} & \frac{\partial F_1}{\partial Z} & 1 & i & j & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial F_2}{\partial X} & \frac{\partial F_2}{\partial Y} & \frac{\partial F_2}{\partial Z} & 0 & 0 & 0 & 1 & i & j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dX_n \\ dY_n \\ dZ_n \\ a_{0m} \\ b_{0m} \\ c_{0m} \\ a_{1m} \\ b_{1m} \\ c_{1m} \end{bmatrix} + k_m \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}_{mm} \quad (5)$$

式中, v_1, v_2 是残差; dX_n, dY_n, dZ_n 是地面点坐标近似值的改正数; $a_{0m}, b_{0m}, \dots, c_{1m}$ 为第 m 张影像的视线向量修正函数系数。令

$$\begin{aligned} h_1 &= r_{11}(X - X_P) + r_{12}(Y - Y_P) + r_{13}(Z - Z_P) \\ h_2 &= r_{21}(X - X_P) + r_{22}(Y - Y_P) + r_{23}(Z - Z_P) \\ h_3 &= r_{31}(X - X_P) + r_{32}(Y - Y_P) + r_{33}(Z - Z_P) \end{aligned}$$

则: $\frac{\partial F_1}{\partial X} = k \cdot \left\{ \frac{r_{11} \cdot h_3 - r_{31} \cdot h_1}{h_1^2 + h_3^2} \right\}; \frac{\partial F_1}{\partial Y} = k \cdot \left\{ \frac{r_{12} \cdot h_3 - r_{32} \cdot h_1}{h_1^2 + h_3^2} \right\}; \frac{\partial F_1}{\partial Z} = k \cdot \left\{ \frac{r_{13} \cdot h_3 - r_{33} \cdot h_1}{h_1^2 + h_3^2} \right\};$

$$\frac{\partial F_2}{\partial X} = k \cdot \left\{ \frac{r_{21} \cdot h_3 - r_{31} \cdot h_2}{h_2^2 + h_3^2} \right\}; \frac{\partial F_2}{\partial Y} = k \cdot \left\{ \frac{r_{22} \cdot h_3 - r_{32} \cdot h_2}{h_2^2 + h_3^2} \right\}; \frac{\partial F_2}{\partial Z} = k \cdot \left\{ \frac{r_{23} \cdot h_3 - r_{33} \cdot h_2}{h_2^2 + h_3^2} \right\}.$$

3 实验及分析

本文采用 3 景 SPOT-5 影像(影像 A~C),这 3 景影像构成异轨复合立体像对,其空间分辨率为 5 m。在这 3 个立体覆盖区分别野外实测了 20 个均匀分布的明显地物点(道路交叉点、房角点、田角),将其中少数 GPS 点作为地面控制点,其余作为检查点。

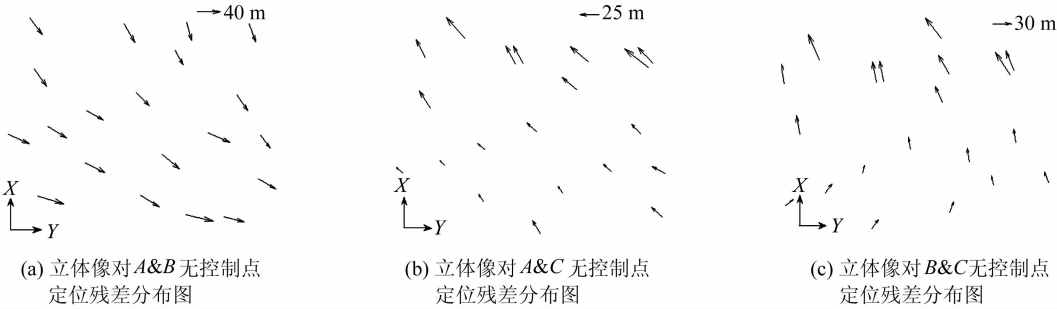


图 1 SPOT-5 影像无控制点定位的残差分布图
Fig. 1 Residuals of SPOT-5 Images Georeference Without Control Points

尺度残差 $k_{ij}f_1$ 和 $k_{ij}f_2$ 则可近似为卫星定轨和测姿等系统误差引起的地面上沿轨方向和垂直轨道

3.1 SPOT-5 系统误差分析

为了有效地利用视线向量修正模型进行定位,有必要对 SPOT-5 影像的系统误差进行分析。

图 1 给出了这 3 个立体像对无控制点定位的残差分布图,其中矢量的长度与残差向量的大小成正比。由图 1 可以看出,SPOT-5 影像无控制点定位的残差分布具有明显的方向性和数量级,说明了 SPOT-5 影像中系统误差的存在。

方向的误差大小。表 1 为采用 5 个控制点对视线向量修正后的 kf'_1 、 kf'_2 误差和未修正前的残差对比。

表 1 采用 5 个控制点对视线向量修正后的误差和未修正前的残差对比
Tab. 1 Comparison of Errors Before Line-of-sight Correction and Residuals After Correction in Case of 5 Control Points

影像	未修正前的 kf_1 误差/m				未修正前的 kf_2 误差/m			
	最小值	最大值	均值	MSE	最小值	最大值	均值	MSE
影像 A	1.915 8	28.784 6	-13.742 5	16.918 2	13.883 7	50.270 4	-32.370 6	33.865 5
影像 B	1.802 8	34.873 8	-6.587 2	16.962 4	30.451 3	70.526 1	-54.960 1	55.676 5
影像 C	2.199 9	34.842 7	12.859 1	17.522 7	1.985 2	19.018 2	2.432 1	9.229 5

影像	修正后的 kf'_1 误差/m				修正后的 kf'_2 误差/m			
	最小值	最大值	均值	MSE	最小值	最大值	均值	MSE
影像 A	0.682 6	8.667 7	-3.265 3	5.252 9	0.258 7	6.885 7	0.085 2	3.784 4
影像 B	0.157 4	9.785 3	-1.105 2	5.284 1	0.632 4	12.993 6	-0.636 5	4.371 4
影像 C	0.241 5	10.552 2	-2.326 6	4.935 5	0.254 8	5.133 1	0.159 7	2.800 0

由表 1 可以看出,通过对视线向量采用一次线性函数修正,仅采用 5 个控制点就可以将原始影像的视线向量误差造成的尺度残差大幅度降低,其中, kf_1 误差减小为未修正前尺度残差的 3~4 倍, kf_2 残差最大可减少为未修正前的 13 倍。因此,沿轨方向的尺度残差 kf_2 对视线向量修正更为敏感。

3.2 视线向量修正与轨道姿态误差直接修正的定位结果对比

表 2 给出了 SPOT-5 影像的无控制点定位、视线向量修正定位以及卫星轨道姿态误差直接修正定位的精度对比。其中,视线向量修正采用了 5 个控制点,轨道姿态直接修正采用了 10 个控制

点。由表 2 可以看出,在无控制点的情况下,3 个立体像对的总体定位精度分别为 37.439 m、46.529 m 和 60.007 m。采用 5 个控制点对视线向量进行修正,可以将这 3 个立体像对的总体精度分别提高到 7.792 m、8.821 8 m、7.652 1 m,尤其是高程方向的精度提高得更为迅速。同时还可以看出,视线向量修正在较少的控制点条件下达到了和轨道姿态误差直接修正法精度相当的定位结果。因此,视线向量修正法可以很好地消除 SPOT-5 影像测轨定姿系统误差的影响,提高 SPOT-5 影像的立体定位精度。

3.3 控制点个数对视线向量修正定位精度的影响

为了得到基于视线向量修正的立体定位模型

与控制点个数之间的关系,分别采用 3~11 个控制点对影像 A 和影像 B 立体像对进行定位实验。

图 2 表示了地面控制点个数对基于视线向量修正的定位精度的影响。

表 2 SPOT-5 影像的各种模型定位精度对比/m

Tab. 2 Comparison of Positioning Precision of Different Models for SPOT-5 Images/m

立体像对	无控制点定位结果			视线向量修正法定位结果			轨道姿态误差直接修正定位结果		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
A&B	25.883	26.638	22.182	4.047 5	5.843 4	3.191 5	4.672 4	5.654 5	4.061 0
B&C	28.377	12.082	34.839	4.234 3	5.367 0	5.575 9	4.627 8	5.076 5	5.645 5
A&C	19.051	15.565	54.733	4.394 4	3.106 9	5.439 7	4.093 5	4.681 2	5.162 4

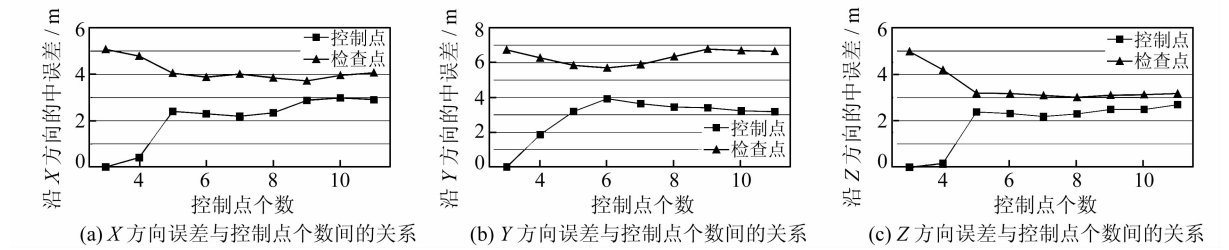


图 2 控制点个数对视线向量修正立体定位精度的影响

Fig. 2 RMS of Check Points According to Number of Ground Control Points

由图 2 可以看出,当控制点个数由 3 个增加到 5 个时,各个方向的定位精度急剧下降;当控制点个数大于 6 个时,其定位精度则变得相对稳定。这些结果表明,采用 5~6 个控制点可以使基于视线向量修正的立体定位模型达到比较高的定位精度;当控制点个数多于 5~6 个时,其定位精度的提高则变得不是很明显。

4 结 语

本文采用视线向量修正对 SPOT-5 影像进行立体定位,该方法通过视线向量修正来消除卫星测轨定姿的系统误差影响。实验证明了 SPOT-5 系统误差的存在,通过视线向量修正立体定位与轨道姿态误差直接修正法定位结果的精度对比,可以看出视线向量修正法仅采用 5 个控制点就可以获得轨道姿态误差直接修正法采用 10 个控制点的定位精度。当控制点个数大于 5~6 个时,视线向量修正定位精度的提高不是很明显。

参 考 文 献

[1] Poli D. Orientation of Satellite and Airborne Image-

ry from Multi-line Pushbroom Sensors with a Rigorous Sensor Model[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 35 (B1): 130-135

[2] 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 and Remote Sensing, 2007, 73(11):1 267-1 276

[3] Jung H S, Kim S W, Won J S. The Simple Method of Geometric Reconstruction for SPOT Images[J]. International Symposium on Remote Sensing, Jeju, Korea, 2004

[4] Poli D, Zhang L, Gruen A. SPOT-5/HRS Stereo Images Orientation and Automated DSM Generation [C]. ISPRS, Istranbul, Turkey, 2004

[5] 范萌. 基于 SPOT-5 影像无控制点空间定位技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2008

[6] 袁修孝,张过. 缺少控制点的卫星遥感对地目标定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2003,28(5): 505-509

作者简介:胡文元,高级工程师,主要从事基础测绘生产与管理工
作。
E-mail:sxsgcchy@yahoo.com.cn

Geopositioning of SPOT-5 Stereo Images Based on
Line-of-Sight Calibration

HU Wenyuan¹

(1 Institute of Shanxi Surveying and Mapping, 9 Yuchi Street, Taiyuan 030002, China)

Abstract: The rigorous geometric model of SPOT-5 images is introduced firstly, and a new geopositioning method based on line-of-sight rectification is proposed. Then, we deduce the bundle adjustment of line-of-sight calibration. Test results using SPOT-5 images show that using a little GCPs the systematic error can be reduced effectively after adjusting the look angles, and the object positioning accuracy can be improved. Comparative experiment shows that line-of-sight rectification can provide similar position accuracy in case of 5 control points, with direct correcting of orbit and attitude error in case of 10 control points.

Key words: SPOT-5 image; line-of-sight rectification; stereo positioning

About the author: HU Wenyuan, senior engineer. His main research interests are production and management of foundational surveying and mapping.

E-mail: sxsgcchy@yahoo.com.cn

.....

(上接第 707 页)

ration, and design a set of navigation and positioning data processing systems. For the characteristics of two-dimensional exploration, we use the integral model to simulate the shape of the cable to calculate the detection point coordinates. Under the premise of without loss of accuracy, this method simplifies the calculation process and improves the calculating speed. The main components of this method include gross errors detection and the repair for DGPS data and compass data, data epoching, curves adjustment and detecting node calculation. Compared with some abroad mature deep-sea exploration and navigation data post-processing software, the calculation accuracy of this method meets the demand of deep-sea exploration work.

Key words: two-dimensional deep-sea exploration;integral model;node of detection

About the first author: ZHOU Bo, postgraduate, majors in GPS data processing and Web application of geodesy and geomatics.

E-mail: zb_sgg@qq.com