

文章编号:1671-8860(2006)11-0941-04

文献标志码:A

# SPOT 5 HRS 立体影像无(稀少)控制绝对定位技术研究

张永军<sup>1</sup> 张勇<sup>1</sup>

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路129号,430079)

**摘要:**研究了 SPOT 5 卫星 HRS 立体影像的成像原理,构建了无需地面控制点的直接对地绝对定位模型。实验表明,无控制绝对定位结果存在不同程度的系统误差;利用任意位置的 1 个地面控制点消除系统误差后即可获得较好的平面和高程定位精度;利用 1 个地面控制点外推 580 km 进行绝对定位时,平面定位精度仍优于 20 m,高程定位精度约 10 m,说明卫星轨道本身具有较好的稳定性,显示了本模型具有良好的应用前景。

**关键词:**SPOT 5 HRS;立体像对;直接对地定位;外推定位

**中图分类号:**P231.5; P237.3

随着电子和遥感技术的快速发展,利用线阵 CCD 传感器获取遥感影像的卫星越来越多,如 SPOT、IKONOS、QuickBird 以及国内的资源卫星等,相关影像的正射纠正和对地定位成为近年来的研究热点<sup>[1-8]</sup>。SPOT 5 卫星影像垂直于轨道方向的分辨率为 10 m,沿轨道方向的地面分辨率为 5 m<sup>[9]</sup>,立体像对的基高比为 0.84,可以获得较好的高程精度,为快速提取大范围三维地形信息提供了可能。

SPOT 5 卫星升空之后,与 HRS 立体影像相关的研究也同步展开<sup>[9-12]</sup>。立体影像生成 DEM 精度的研究结论表明:有足够控制点时,SPOT 5 立体像对生成的 DEM 在平坦地区高程精度可达 5 m,高差较大的地区可达 15 m,平面精度则均优于 20 m;没有任何地面控制点时,SPOT 5 立体像对的绝对定位精度约为 50 m。本文主要讨论基于轨道参数的 SPOT 5 HRS 像对无(稀少)控制绝对定位方法及其实验结果。

## 1 卫星星历参数的内插

SPOT 5 卫星的时间确定精度优于 100 μm,由此所产生的地面误差小于 1 m。任一扫描行 y

的像元所对应的摄影时刻 t 为:

$$t = t_c + t_e \times (y - y_c) \quad (1)$$

式中,  $t_c$  为中央扫描行的摄影时刻;  $y_c$  为中央扫描行的 y 坐标;  $t_e$  为每行的扫描时间,均可从卫星的辅助数据中获得。

辅助数据中提供每隔 30 s 的卫星位置和速度,则任意时刻的卫星位置和速度均可通过拉格朗日插值法获得。任意扫描行所对应的时刻 t 可由式(1)计算,此时需计算 P(t) 时刻对应的卫星位置  $\vec{P}(t)$  和速度  $\vec{V}(t)$ 。从星历中选择 t 时刻前的 4 个星历数据 ( $t_1, t_2, t_3$  和  $t_4$ ) 和 t 时刻后的 4 个星历数据 ( $t_5, t_6, t_7$  和  $t_8$ ), 则 t 时刻的卫星位置和速度可以通过拉格朗日插值获得:

$$\vec{P}(t) = \sum_{j=1}^8 \frac{\vec{P}(t_j) \times \prod_{i=1, i \neq j}^8 (t - t_i)}{\prod_{i=1, i \neq j}^8 (t_j - t_i)} \quad (2a)$$

$$\vec{V}(t) = \sum_{j=1}^8 \frac{\vec{V}(t_j) \times \prod_{i=1, i \neq j}^8 (t - t_i)}{\prod_{i=1, i \neq j}^8 (t_j - t_i)} \quad (2b)$$

其中,  $\vec{P}(t_j)$  和  $\vec{V}(t_j)$  分别是星历数据中卫星的位

收稿日期:2006-07-12。

项目来源:国家 973 计划资助项目(2006CB701302)。

置和速度;  $t_j$  是相应的时刻。

卫星辅助数据中每隔一定时间给出相应的倾角、滚角和偏角。由于卫星的姿态变化较小,因而对于任意时刻  $t$ , 相应的 3 个姿态角  $a_p(t)$ 、 $a_r(t)$ 、 $a_y(t)$  可通过简单的线性内插确定。

## 2 视线方向确定

### 2.1 导航参考坐标系内的视线方向

导航参考坐标系原点在仪器的重心, 3 个坐标轴由飞行器姿态控制系统定义, 目的是较容易地确定和控制卫星的姿态。对于任意一个扫描行  $l$ , 第  $p$  列的影像是由一个确定的 CCD 像元获得的, 该 CCD 像元在导航参考坐标系  $O_1 - X_1 Y_1 Z_1$  内的视线方向由  $x$  和  $y$  两个角度确定, 其中  $x$  为沿轨道方向的侧视角,  $y$  为垂直于轨道方向的侧视角。SPOT 5 卫星辅助数据给出每个 CCD 像元的  $x$  和  $y$  值, 则  $p$  对应的侧视角为:

$$x = \begin{cases} x \\ y \end{cases}_p \quad (3a)$$

$$y = \begin{cases} x \\ y \end{cases}_p \quad (3b)$$

如果特征点是子像素级精度, 两个角度可由相邻两个 CCD 像元的  $x$  和  $y$  内插确定, 则任意像素的视线方向  $\vec{u}_1$  可由下式计算:

$$\vec{u}_1 = \begin{pmatrix} -\tan(y) \\ +\tan(x) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4a)$$

$$\vec{u}_1 = \frac{\vec{u}_1}{\|\vec{u}_1\|} \quad (4b)$$

### 2.2 轨道坐标系内的视线方向

轨道坐标系  $O_2 - X_2 Y_2 Z_2$  也建立在卫星上, 坐标系原点为卫星的质心  $O_2$ ,  $Z_2$  轴通过地球质心到卫星质心的向量经归一化确定,  $X_2$  轴是卫星瞬时速度与  $Z_2$  轴的归一化叉积,  $Y_2$  轴则由  $Z_2$  轴和  $X_2$  轴的叉积定义:

$$\vec{Z}_2 = \frac{\vec{P}(t)}{\|\vec{P}(t)\|} \quad (5a)$$

$$\vec{X}_2 = \frac{\vec{V}(t)}{\|\vec{V}(t)\|} \times \vec{Z}_2 \quad (5b)$$

$$\vec{Y}_2 = \vec{Z}_2 \times \vec{X}_2 \quad (5c)$$

其中,  $\vec{P}(t)$  和  $\vec{V}(t)$  是经拉格朗日内插得到的卫星位置和速度, 视线方向  $\vec{u}_2$  可通过下式计算:

$$\vec{u}_2 = \frac{\vec{u}_1}{\|\vec{u}_1\|} \quad (6a)$$

$$\vec{u}_2 = M_p \cdot M_r \cdot M_y \cdot \vec{u}_1 \quad (6b)$$

其中,  $\vec{u}_1$  是导航参考坐标系内的视线方向;  $M_p$ 、 $M_r$  和  $M_y$  是由  $t$  时刻的 3 个旋转角  $a_p(t)$ 、 $a_r(t)$

和  $a_y(t)$  构成的旋转矩阵。

### 2.3 确定地球坐标系内的视线方向

卫星的位置和速度都是在 ITRF 参考框架下表达的, 而 ITRF 与 WGS 84 参考椭球之间的最大偏差一般小于 1 m, 实际应用中可以忽略二者的差别, 直接使用 WGS 84 代替 ITRF。轨道坐标系下的坐标可通过下式转换到地球坐标系中:

$$\vec{u}_S = \begin{bmatrix} (X_2)_x & (Y_2)_x & (Z_2)_x \\ (X_2)_y & (Y_2)_y & (Z_2)_y \\ (X_2)_z & (Y_2)_z & (Z_2)_z \end{bmatrix} \cdot \vec{u}_2 \quad (7)$$

其中,  $\vec{u}_S$  是轨道坐标系下的视线方向;  $\vec{u}_2$  是地球坐标系下的视线方向;  $X_2$ 、 $Y_2$  和  $Z_2$  为轨道坐标系的 3 个坐标轴, 其值可由式 (5) 计算得到。

### 2.4 双像确定地面坐标

§2.3 计算出了任意像素所对应的卫星位置和视线的方向, 也即确定了一条从卫星质心指向地球的射线。如果能够获得一个像对的两张影像(如 HRS 立体像对)的同名像点, 则可确定两条从不同卫星位置同时指向地面某点的射线, 这两条射线的交点(交点的求定与摄影测量中的前方交会原理完全相同)就是地面点。此时无需任何地面信息即可获得 WGS 84 坐标系下的地心空间直角坐标, 从而实现无地面控制点的自动绝对定位。

## 3 无(稀少)控制定位实验与分析

利用国内某地区的 SPOT 5 HRS 立体影像进行了无控制绝对定位实验。该地区高程在 400 m 到 1 400 m 之间, 中部较为平坦, 南北为山区。图 1 是该地区的一个立体像对。

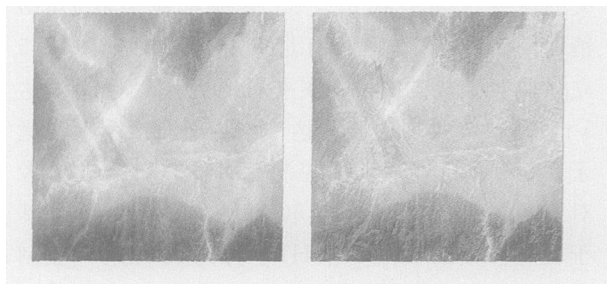


图 1 SPOT 5 HRS 立体影像

Fig. 1 SPOT 5 HRS Stereo Imagery

为了评价 SPOT 5 无(稀少)控制绝对定位方法所能达到的精度, 在实验区共量测了 18 个地面点, 部分由 GPS 定位测量获得, 其余从已有地形图量测。地面控制点的总体精度约 2 m, 在立体影像上的对应像点由人工量测得到。利用本文所研究的无控制绝对定位方法计算地面坐标, 并与

已知的地面坐标进行比较,误差统计见表 1,其中  $X$  为南北方向; $Y$  为东西方向; $H$  为相对于 WGS 84 椭球的大地高。由表 1 可以看出,计算坐标和已知坐标间存在明显的系统误差, $X$ (南北)方向超过 60 m,东西方向则几乎没有系统误差,高程方向的系统误差也小于 10 m。

表 1 已知地面点的精度统计/m

Tab. 1 Direct Georeferencing Without Ground Control Point (GCP)

统计项目	$X$	$Y$	$H$
中误差	68.3	13.5	8.7
平均值	- 64.4	2.0	- 6.2

加入一个地面控制点即可很好地消除系统误差。由表 2 可知,平面位置的绝对精度优于 20 m,高程精度则约为 7 m。

表 2 加入一个控制点后的精度统计/m

Tab. 2 Georeferencing with One GCP

统计项目	$X$	$Y$	$H$
中误差	10.5	14.2	6.7
平均值	- 2.3	4.4	2.5

另外,还利用两个境外地区的数据进行了实验,其中一个实验区位于南半球,该地区地形平坦,高程在 10 m 到 70 m 之间;另一个实验区位于北半球,高程在 450 m 到 750 m 之间。每个测区都有 45 个坐标已知的地面点,表 3 列出了上述两个测区的无控制定位结果与已知坐标间差值的误差统计数据。

表 3 境外南、北半球实验区精度统计/m

Tab. 3 Direct Georeferencing of Southern Hemisphere and Northern Hemisphere

	统计项目	$X$	$Y$	$H$
南半球	中误差	28.6	23.0	8.9
	平均值	28.1	- 21.9	- 6.6
北半球	中误差	13.3	11.2	76.6
	平均值	- 8.8	7.4	- 75.4

由表 3 可以看出,计算坐标和已知坐标间也存在较为明显的系统误差。第一测区的系统误差平面方向约 35 m,高程方向约 6 m;而第二测区的系统误差平面方向约 12 m,高程方向则达 70 余 m。高程误差较大的原因有待进一步分析。与国内实验区的结果类似,加入一个地面控制点后,同样可以有效地消除系统误差的影响,获得 12 m 左右的平面精度和 10 m 以内的高程精度。

综合 3 个实验区的测试结果可以看出,SPOT 5 HRS 无控制绝对定位结果存在不同程度的系统误差。加入一个地面控制点即可有效地

消除系统误差的影响,此时平面方向的绝对定位精度优于 20 m,高程方向优于 10 m。

## 4 少量控制点外推实验

为了进一步评价 SPOT 5 HRS 影像稀少控制时大范围对地定位潜力,利用国内某实验区约 580 km 的立体影像和 71 个地面控制点进行了基于少量控制点的外推定位实验。将从南到北选定的 6 个均匀分布的地面控制点按其地理位置编号为 1~6。采用不同位置的一个地面控制点进行外推定位的实验结果如表 4 所示。由表 4 可见,无控制对地定位的平面精度约 55 m,高程精度约 15 m,而加入任意位置的一个地面控制点后,均可获得相当好的对地定位精度,平面和高程方向分别优于 20 m 和 10 m,而且整个测区的绝对定位精度与控制点位置基本无关。

表 4 一个地面控制点的外推定位精度统计/m

Tab. 4 Extrapolative Positioning with One GCP

定向位置	中误差			平均值		
	$X$	$Y$	$H$	$X$	$Y$	$H$
无	29.2	45.1	16.2	16.3	- 43.6	- 7.1
1	14.4	12.9	9.3	- 2.4	- 6.3	- 3.8
2	15.1	12.1	9.0	- 4.8	- 4.1	- 2.2
5	14.4	12.8	10.6	- 1.9	- 5.9	- 6.0
6	15.3	13.4	9.9	- 5.7	- 7.3	- 5.1

表 5 所示为利用 2~6 个地面控制点时的外推定位精度统计。采用不同位置的多个地面控制点进行外推定位与任意位置的单个控制点进行外推定位相比并未显著提高定位的精度,说明卫星轨道本身具有较好的稳定性,因而只需一个控制点即可进行外推定位。

表 5 多个地面控制点的外推定位精度统计/m

Tab. 5 Extrapolative Positioning with Multiple GCPs

定向位置	检查点	中误差			平均值		
		$X$	$Y$	$H$	$X$	$Y$	$H$
1,2	69	15.1	12.1	9.0	- 4.7	- 4.2	- 2.2
2,5	69	14.7	12.4	9.6	- 3.3	- 5.1	- 4.1
5,6	69	14.4	12.8	10.6	- 2.1	- 6.0	- 5.9
6,1	69	14.7	13.1	9.6	- 4.1	- 6.8	- 4.5
1,2,5	68	14.7	12.5	8.6	- 3.3	- 5.1	- 4.1
1,3,6	68	14.3	11.4	8.3	- 1.0	- 0.2	- 3.1
1,5,6	68	14.4	12.9	9.6	- 2.1	- 6.1	- 5.9
1,2,5,6	67	14.7	12.5	9.6	- 3.4	- 2.2	- 2.1
1,3,5,6	67	14.4	11.8	8.9	- 1.6	- 1.2	- 2.5
1-6	65	14.5	11.9	7.2	- 1.5	- 2.7	- 3.3

## 5 结 语

本文建立了 SPOT 5 卫星 HRS 立体像对的直接对地定位模型。利用国内外 3 个地区的立体

像对进行的实验结果表明,无控制对地绝对定位的结果具有明显的系统误差。只需加入一个控制点,则平面和高程精度迅速提高到 20 m 和 10 m 以内。

采用一个控制点外推 580 km 时,平面定位精度仍优于 20 m,高程定位精度约 10 m,增加控制点的数量对改善定位精度的效果并不明显。

### 参 考 文 献

- [1] 张剑清,张祖勋. 高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27 (6): 555-559
- [2] Tao C V, Hu Y. 3D Reconstruction Methods Based on the Rational Function Model[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002, 68 (7): 705-714
- [3] 林宗坚. 遥感影像无(稀少)地面控制点纠正技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19 (4): 64-65
- [4] 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
- [5] 张永军,张剑清. 异轨遥感立体像对外方位元素的求解算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28 (5): 521-524
- [6] 刘军. 高分辨率卫星 CCD 立体影像定位技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2003
- [7] 朱述龙,史文中,张艳,等. 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
- [8] 袁修孝,张过,吴春华. 缺少控制点的卫星遥感影像外推定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30 (7): 575-579
- [9] Riazanoff S. SPOT Satellite Geometry Handbook [M]. Toulouse: Spot Image, 2002
- [10] Michalis P, Dowman I. A Rigorous Model and DEM Generation for SPOT5 HRS[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 35 (B1): 410-415
- [11] Fraser C, Dare P M, Yamakawa T. Digital Surfacing Modelling from SPOT 5 HRS Imagery Using the Affine Projective Model[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 35 (B1): 385-388
- [12] Jacobsen K. DEM Generation by SPOT HRS[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 35 (B1): 439-444

第一作者简介:张永军,博士,副教授。主要从事数字摄影测量与遥感、计算机视觉和多源数据融合方面的研究。

E-mail: yongjun\_zhang@hotmail.com

## Direct Georeferencing of SPOT 5 HRS Imagery Without (or with a Few) Ground Control Point

ZHANG Yongjun<sup>1</sup> ZHANG Yong<sup>1</sup>

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The photographic principle of SPOT 5 HRS is discussed in detail. By a series of coordinate system transforming, the rigorous orbit model of direct geo-referencing without ground control point is established. Experimental results of three datasets show that there are systematic errors existed. Once a ground control point is introduced, the result is improved tremendously. Results of 580 km test dataset with one ground control point are still better than 20 m for the planar position and about 10m for the altitude. It shows that the orbit itself is very stable. The HRS imagery has promising potential for various applications.

**Key words:** SPOT 5 HRS; stereo imagery; direct georeferencing; extrapolative positioning

**About the first author:** ZHANG Yongjun, Ph. D., associate professor. He is mainly engaged in the research of digital photogrammetry, remote sensing, computer vision and data integration.

E-mail: yongjun\_zhang@hotmail.com