

# 多源遥感影像“复合式”立体定位的研究

邢 帅<sup>1,2</sup> 徐 青<sup>2</sup> 何 钰<sup>2</sup> 蓝朝桢<sup>2</sup>

(1 河南理工大学矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室,焦作市世纪大道 2001 号,454003)  
(2 信息工程大学测绘学院,郑州市陇海中路 66 号,450052)

**摘 要:**尝试将 IKONOS、SPOT 卫星影像与机载 SAR 影像联立构成多种组合的“立体像对”,以有理函数模型、行中心投影的共线方程以及 F. Leberl 公式为基础,利用若干地面控制点对影像分别进行外定向,然后由 3 种不同的传感器模型分别建立了 3 种复合式立体定位公式。在已知一组同名像点的情况下,可解算出相应地面点的大地坐标。实验结果表明,将具有一定重叠范围的多源遥感影像构成立体像对进行复合式定位是切实可行的,且在一定控制和交会条件下其定位精度与传统立体像对相当。

**关键词:**“复合式”立体定位;有理函数模型;线阵 CCD;F. Leberl 公式;空间前方交会

**中图法分类号:**P237.3; TP751

长期以来,在传统的摄影测量中,立体观察与量测都是在由同一类型传感器获取的两张影像上进行的。但事实上,根据立体像对的定义,决定两张像片是否构成立体像对的充要条件是“在不同摄站摄取”和“具有一定影像重叠”,与影像是否由同一传感器获取并无关系。早在 1970 年,Moore 就首先提出了将 SAR 影像与光学影像联合进行立体测图的思想。近年来,国外研究机构进行了一系列有关多源遥感影像复合式立体定位的实验<sup>[1-5]</sup>。

目前,国内尚没有关于复合式立体定位技术的研究成果见于相关文献。本文在有理函数模型、行中心投影的共线方程和 F. Leberl 改进公式的基础上,定义了复合式立体定位模型的表达式,并利用一组由多源遥感影像以及地面控制点组成的实验数据进行了复合式定位实验,验证了复合式立体定位技术的可行性,并证明在一定条件下其定位精度与传统立体像对相当。

## 1 3 种遥感影像的构像模型

### 1.1 有理函数模型

IKONOS 影像的有理多项式(rational poly-

nomial camera, RPC)模型的定义为<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} l = \frac{\text{Num}_L(U, V, W)}{\text{Den}_L(U, V, W)} \\ s = \frac{\text{Num}_S(U, V, W)}{\text{Den}_S(U, V, W)} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\text{Num}_L(U, V, W)$ 、 $\text{Den}_L(U, V, W)$ 、 $\text{Num}_S(U, V, W)$ 、 $\text{Den}_S(U, V, W)$  为三次多项式;  $(U, V, W)$  是经标准化的地面点空间坐标(纬度  $\phi$ 、经度  $\lambda$  和高程  $h$ );  $(s, l)$  是经标准化的像点坐标  $(S, L)$ 。

### 1.2 行中心投影的共线方程

SPOT 卫星影像是由线性阵列传感器沿飞行方向推扫而成的。每一扫描行图像与被摄物体之间具有严格的中心投影关系,每一扫描行都具有各自的外方位元素。在垂直摄影的情况下,第  $i$  行上的构像模型可表示为该行的共线方程<sup>[7]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} x_i = & \\ & -f \frac{a_1(X - X_{s_i}) + b_1(Y - Y_{s_i}) + c_1(Z - Z_{s_i})}{a_3(X - X_{s_i}) + b_3(Y - Y_{s_i}) + c_3(Z - Z_{s_i})} \\ 0 = & \\ & -f \frac{a_2(X - X_{s_i}) + b_2(Y - Y_{s_i}) + c_2(Z - Z_{s_i})}{a_3(X - X_{s_i}) + b_3(Y - Y_{s_i}) + c_3(Z - Z_{s_i})} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,  $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$  是由第  $i$  扫描行的外方

位扫描角元素  $\varphi_i, \omega_i, \kappa_i$  确定的旋转矩阵元素。

### 1.3 F. Leberl 公式

SAR 影像的严格构像模型为 F. Leberl 公式, 该模型是根据雷达成像的距离条件和多普勒条件来表示雷达图像上像点与相应地面点间的几何关系<sup>[8]</sup>。

以斜距图像为例, 其距离条件公式为:

$$(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 = (y_s M_y + D_{s_0})^2 \quad (3)$$

式中,  $D_{s_0}$  为扫描延迟;  $y_s$  为地面点  $P$  在斜距显示图像上的距离向像坐标;  $M_y$  为斜距显示图像的距离向像元分辨率;  $(X, Y, Z)$  为地面点  $P$  的物方空间坐标;  $(X_s, Y_s, Z_s)$  为天线中心瞬时位置  $s$  的物方空间坐标 (是飞行时间  $T$  的多项式函数)。

SAR 图像的多普勒条件公式为:

$$X_v(X - X_s) + Y_v(Y - Y_s) + Z_v(Z - Z_s) = -\frac{\lambda R_s}{2} f_{DC} \quad (4)$$

式中,  $R_s$  为地面点  $P$  的斜距;  $\lambda$  为雷达波长;  $f_{DC}$  为多普勒频率。

## 2 复合式立体定位模型的建立

复合式立体定位模型的建立包括两个步骤:

- ① 利用两张像片上的控制点, 根据后方交会分别对它们进行外定向;
- ② 根据两幅影像对应的构像模型建立空间前方交会模型。

### 2.1 单幅影像的外定向

#### 2.1.1 IKONOS

IKONOS 影像的定向参数可直接应用 RPC 参数。在 RPC 文件中, 共包含有 90 个数据项, 前 10 项是坐标标准化平移参数和比例参数, 后 80 项分别是多项式  $\text{Num}_L(U, V, W)$ 、 $\text{Den}_L(U, V, W)$ 、 $\text{Num}_S(U, V, W)$  和  $\text{Den}_S(U, V, W)$  的系数。

#### 2.1.2 SPOT

由于 SPOT 卫星影像是一种动态扫描图像, 每一扫描行的外方位元素互不相同, 但又存在着一定的联系, 使得在利用行中心投影的共线方程进行定向计算的过程中出现法方程病态的情况。本文选择文献[9]算法对 SPOT 卫星影像进行外定向。

#### 2.1.3 SAR

在雷达波束与载体飞行轨道严格垂直时, F. Leberl 公式中的  $f_{DC}$  近似为零。但在实际观测过程中雷达波束与飞行方向很难保持严格的垂直关系, 此时  $f_{DC}$  不再保持为零, 而是一个与时间成线性关系的变量。由于  $y_s$  与时间也是线性关系, 因

此  $f_{DC}$  也可以表示为一个由  $y_s$  构成的  $n$  次多项式<sup>[10]</sup>, 则式(4)变为:

$$X_v(X - X_s) + Y_v(Y - Y_s) + Z_v(Z - Z_s) = a_0 + a_1 y_s + a_2 y_s^2 + a_3 y_s^3 + a_4 y_s^4 \quad (5)$$

此时, 定向参数将增加一组多项式改正参数  $a_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ )。

### 2.2 立体定位模型

立体定位就是已知两张像片上同一目标点的像坐标  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ , 确定其大地坐标  $(X, Y, Z)$ 。

根据式(1)~(5)可以交叉构建复合式立体定位模型公式, 然后将同名目标点的像坐标作为已知值代入公式, 联立 4 个方程即可求解出对应地面点的大地坐标  $(X, Y, Z)$ 。

复合式立体定位模型为 (矩阵形式):

$$\mathbf{V} = (\mathbf{D}\mathbf{\Delta} - \mathbf{L}), \text{ 权 } \mathbf{P} \quad (6)$$

式中, 残差  $\mathbf{V} = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T$ ; 系数阵  $\mathbf{D} =$

$$[D_1 \ D_2 \ D_3 \ D_4]^T = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{23} & d_{33} \\ d_{41} & d_{24} & d_{43} \end{bmatrix}; \text{ 大地坐}$$

标改正量  $\mathbf{\Delta} = [dX \ dY \ dZ]^T$ ; 常数向量  $\mathbf{L} = [l_1$

$l_2 \quad l_3 \quad l_4]^T$ ; 权 矩 阵  $\mathbf{P} =$

$$\begin{bmatrix} p_{x_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{y_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{x_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{y_2} \end{bmatrix}。 \text{ 将式(6)法化后得到:}$$

$$\mathbf{\Delta} = (\mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{D})^{-1} \cdot \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (7)$$

给定初值 (通常为 0) 后, 迭代计算大地坐标  $(X, Y, Z)$  的增量  $(dX, dY, dZ)$ , 最后得到  $(X, Y, Z)$ 。

式(6)中  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{L}$  的各项参数的计算形式根据像片的不同而变化。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验数据

选择山东省泰安市的一幅 IKONOS 卫星影像、两幅 SPOT4 卫星影像和一幅机载 SAR 影像进行实验, 其具体参数见表 1。

表 1 实验影像的参数统计

Tab. 1 Statistics of Tested Images

影像	获取时间	入射角/(°)	分辨率/m	投影方式
IKONOS	2004-04-28	0.04	1.0	行中心投影
SPOT4(1)	2006-03-16	25.8	10.0	行中心投影
SPOT4(2)	2007-04-04	1.2	10.0	行中心投影
Airborne SAR	2005-09-30	45	方位向 1.1 距离向 1.25	斜距投影

图 1 显示了 4 幅影像的覆盖区域,其中 SPOT4 卫星影像分辨率最低,覆盖面积最大。IKONOS 与 SAR 影像均在 SPOT4 影像范围内,4 幅影像的 4 度重叠区域主要包括泰安市区以及泰山山区,根据地形图显示,该地区最大高差为 1 400 m。4 幅影像共用一组检查点,检查点从该地区 1 : 10 000 地形图上人工采集得到,图 1 中用三角形标示出了 28 个地面检查点的分布情况。检查点在 3 幅影像的公共重叠区域内保持均匀分布,以保证精度检查结果的可靠性。

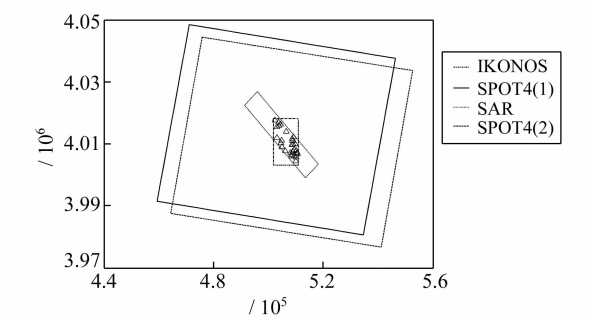


图 1 实验影像对应区域及检查点分布示意图  
Fig. 1 Distribution of Test Images and Check Points

3.2 定向

两幅 SPOT4 卫星影像和机载 SAR 影像的外定向是通过各自的控制点完成的,控制点是从该地区 1 : 10 000 地形图上人工采集得到的。由于 IKONOS 影像携带有 RPC 参数,因此无需利用控制点进行外定向,但其 RPC 参数是 WGS84 坐标系下的参数,本文从地形图上采集的控制点坐标均采用 1980 年西安坐标系,因此将 IKONOS 影像携带的 RPC 参数转换至 1980 年西安坐标系,并利用 8 个控制点检查了转换后 RPC 参数的精度情况。4 幅影像外定向精度的统计见表 2。

表 4 “复合式”立体像对的相关参数

Tab. 4 Statistics of Attribute Parameters of Combined Stereoscopic Pairs				
“复合式”像对	像片重叠度/%	交会角/(°)	基线长度/m	基高比
SPOT4(1)&SPOT-4(2)	90	32.18	498 785.53	0.60 / 0.62
SPOT4(1)&SAR	100	83.58	931 598.58	0.58 / 77.47
SPOT4(2)&SAR	100	72.29	823 908.88	0.04 / 6.01
SPOT4(1)&IKONOS	100	29.98	483 763.86	0.58 / 0.68
SPOT4(2)&IKONOS	100	2.26	151 874.26	0.04 / 0.05
IKONOS&SAR	50	72.45	675 051.69	0.03 / 3.16

对复合式立体定位的精度分析可以分为平面精度和高程精度两个方面。

3.3.1 平面精度

由表 3 可以看出,就平面精度而言,SPOT4 (1)&IKONOS 和 SPOT4 (2) & IKONOS 两个像对最高,SPOT4 (1)&SPOT4 (2)次之,SPOT4

表 2 实验影像的定向精度统计

Tab. 2 Statistics of Orientation Accuracies of Tested Images			
影像	控制点数	中误差/像素	
		列	行
IKONOS	8	0.08	0.02
SPOT4 (1)	27	0.95	0.51
SPOT4(2)	72	0.93	1.13
Airborne SAR	47	5.11	7.19

从表 2 可以看出,转换后的 RPC 参数精度依然很高,在 0.1 个像素以内,两幅 SPOT4 影像的定向精度也均在 1 个像素左右,机载 SAR 影像由于平台稳定性的原因定向精度稍差,但与实际情况相符。

3.3 实验结果与分析

4 幅影像两两组合一共可以组成 6 个立体像对,它们的定位结果见表 3。另外,根据影像的定向参数计算出了各个立体像对的相关参数,结果见表 4。此外,图 2 还显示了 4 颗卫星的空间位置关系和对地观测情况,其中 IKONOS 影像为近似垂直摄影,而机载 SAR 影像因为距地面高度仅为 6 km,与 IKONOS 影像的 680 km 以及 SPOT 影像的 830 km 相比非常小,因此图上显示其非常接近地面。

表 3 “复合式”立体定位精度检查统计结果/m

Tab. 3 Statistics of RMS Values of Stereo Location/m				
“复合式”像对	RMS_X	RMS_Y	RMS_XY	RMS_Z
SPOT4(1)&SPOT4(2)	9.33	13.65	16.53	15.03
SPOT4(1)&SAR	11.02	14.36	18.10	14.03
SPOT4(2)&SAR	9.54	14.56	17.41	15.20
SPOT4(1)&IKONOS	8.08	9.25	12.28	11.24
SPOT4(2)&IKONOS	10.84	9.40	14.35	31.17
IKONOS&SAR	18.05	9.19	20.25	23.71

(1) &SAR、SPOT4 (2) &SAR 和 IKONOS & SAR 最低。显然,仅由光学影像构成的立体像对平面精度较好,而且影像分辨率越高,精度就越好。尽管 SAR 影像的分辨率很高,但其仍然导致了平面定位精度的下降。其中较突出的是 IKONOS&SAR 像对,两幅影像分辨率都很高,

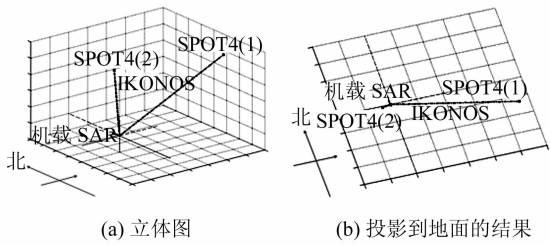


图 2 实验影像对应传感器的空间位置关系示意图  
Fig. 2 Positions of Sensors Corresponding to Test Images

但得到的平面定位精度却最低,显然这不光是因为 SAR 影像的存在。由于 IKONOS 影像非常接近垂直摄影,而飞机的飞行高度较卫星而言是很小的,因此两幅影像的像底点接近重合,造成交会情况的恶化。这些结果说明,对于复合式立体定位,平面精度主要与光学影像有关,且受其空间分辨率的影响非常明显。

3.3.2 高程精度

表 3 中的高程精度则并没有表现出很强的规律性,高程精度最高的像对是 SPOT4 (1) & IKONOS,最低的像对是 SPOT4 (2) & IKONOS,它们都是由光学影像构成的,SPOT4 (1) & SPOT4 (2)、SPOT4 (1)&SAR、SPOT4 (2) & SAR、IKONOS&SAR 的精度处于中间,其中前 3 个像对的精度比较接近,IKONOS&SAR 像对的精度略低一些。单独从表 3 来分析高程精度的规律有一定难度,需要结合表 4 作进一步的分析。表 4 中列出了各个像对的重叠度、交会角、基线长度和基高比。其中基高比为两个数值,这是由于实验影像的平台飞行高度差异较大,因此无法按照传统方法计算基高比。表中的两个数值中,前者表示基线水平分量与立体像对中最小飞行高度的比值,后者表示基线水平分量与最大飞行高度的比值。从表 4 可以看出,SPOT4 (1)&SPOT4 (2)、SPOT4 (1) & IKONOS 和 SPOT4 (2) & IKONOS 3 个像对的两个基高比值比较接近,说明其平台的飞行高度比较接近,此时交会条件与传统情况接近,因此高程精度可以按照传统思路来分析。由于这 3 个像对中都不含有 SAR 影像,因此交会角和基高比的大小是决定交会精度的主要因素,显然此时交会角和基高比较大的 SPOT4 (1)&SPOT4 (2)和 SPOT4 (1) & IKONOS 精度较好,而交会角和基高很小的 SPOT4 (2)&IKONOS 精度较差。同时,由于影像分辨率决定了像点的量测精度,影像分辨率越高则像点量测精度越高,因此 SPOT4 (1)&IKONOS 像

对的精度略优于 SPOT4 (1)&SPOT4 (2)像对。

而对于其他 3 个包含有 SAR 影像的立体像对,两个基高比值均存在着较大差异。由于是同一幅 SAR 影像,因此还是可以通过交会条件来分析其高程精度。SPOT4 (1) & SAR 像对的两个基高比值都比较大,因此精度最好,而 IKONOS&SAR 像对的两个基高比值都比较小,因此精度最差。但仔细观察可以发现,SPOT4 (2) & SAR 和 IKONOS&SAR 两个像对的两个基高比值相差都不大,它们的高程定位精度却差异较大。观察图 2(b)可以发现,IKONOS 影像基本上是垂直摄影,而 SPOT4 (2)影像则存在一定的倾斜,使得 SPOT4 (2) & SAR 像对的交会形状相对优于 IKONOS&SAR 像对,从而改善了 SPOT4 (2) & SAR 像对的高程定位精度。

对于两个基高比值接近与差异较大的两种情况,其高程定位结果并不具有可比性,因此无法进行比较分析。

4 结 语

1) 联立多源遥感影像构成复合式立体像对进行定位是可行的,并且在一定控制条件下,可以取得接近于传统立体像对的定位精度。

2) 影响复合式立体像对定位精度的因素与传统立体定位有所不同。复合式立体定位的平面精度主要受到光学影像成像几何条件的影响;高程精度则既受到 SAR 影像成像几何条件的影响,又受到交会角、基高比等交会条件的影响。

3) 同名像点的量测精度也会对复合式立体的精度产生影响。

在云层遮挡及大气污染等造成获取的光学影像质量下降以及 SAR 立体测图难以进行的情况下,利用不同传感器获取的影像构成复合式立体像对进行定位,来代替传统的立体定位技术,具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Raggam J, Almer A. Mathematical Aspects of Multi-Sensor Stereo Mapping [C]. IGARSS' 90, Greenbelt, Maryland, 1990  
[2] Raggam J, Almer A, Strobl D. A Combination of SAR and Optical Line Scanner Imagery for Stereoscopic Extraction of 3-D Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, 49 (4): 11-21  
[3] Renouard L, Perlant F. Geocoding SPOT Products

with ERS-1 Geometry[C]. The Second ERS-1, Space at the Service of the Environment, Hamburg, 1993

[4] Toutin T. Stereo-mapping with SPOT-P and ERS-1 SAR Images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(8):1 657-1 674

[5] Jordi I, Alain G. On the Possibility of Automatic Multisensor Image Registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(10): 2 104-2 120

[6] Grodecki J, Dial G. IKONOS Geometric Accuracy [C]. ISPRS Working Groups I/2, I/5 and I/7 on “High Resolution Mapping from Space 2001”, Hannover, 2001

[7] 燕琴,张祖勋,张剑清. 异轨遥感 CCD 影像外方位元素的解求[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(3):270-274

[8] 国超,朱彩英. 雷达摄影测量[M]. 北京:地震出版社, 2001:54-56

[9] 张艳,王涛,朱述龙,等. 岭-压缩组合估计在线阵推扫式影像外定向中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(10):893-896

[10] Chen P H, Dowman I J. A Weighted Least Squares Solution for Space Intersection of Spaceborne Stereo SAR Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2001, 39(2): 233-240

---

**第一作者简介:**邢帅, 博士, 讲师, 研究方向为数字摄影测量、遥感图像处理等。  
E-mail: xing972403@163.com

Combined Stereo Location Among Multi-sensor Remote Sensing Images

XING Shuai<sup>1,2</sup> XU Qing<sup>2</sup> HE Yu<sup>2</sup> LAN Chaozhen<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Mine Spatial Information Technologies of SBSM, Henan Polytechnic University, 2001 Century Avenue, Jiaozuo 454003, China)

(2 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** We described the geometric aspects and the mathematical treatment for stereoscopic image pair composed of IKONOS, SPOT4 satellite images and airborne SAR images. First, the rational function model of IKONOS imagery, collinearity equations with line central projection for SPOT4 imagery and F. Leberl model for SAR imagery as well as methods to simultaneously determine or refine individual parameters of these models were briefly reviewed. Firstly, a straight-forward single-step procedure was developed, which follows the philosophy of photogrammetric bundle adjustment techniques. Secondly, the combined stereo location model with multi-sensor remote sensing images was constructed from these geometry models. The stereo location is the procedure of determining the ground coordinates of a ground point from a pair of corresponding homologue points in the combined stereoscopic pair. Experimental results show that it is feasible to realize combined stereo location with multi-sensor images. The accuracy of combined stereo location is close to classical stereoscopic pairs in some conditions.

**Key words:** stereo location; rational function model; collinearity equations with line central projection; F. Lerbel; space intersection

---

**About the first author:** XING Shuai, Ph. D, majors in digital photogrammetry and remote sensing image processing.  
E-mail: xing972403@163.com