

高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型

张剑清¹ 张祖勋¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 介绍了高分辨率遥感影像方位参数求解的严格几何模型, 该模型采用了基于平行光投影的三步变换的方法。第一步是将三维空间经过相似变换缩小至影像空间, 再将其以平行光投影至一个水平面上(仿射变换), 最后将其变换至原始倾斜影像。同时对许多分辨率为 10m、3m 与 1m 的影像进行了试验, 结果验证了新模型的正确性。

关键词: 遥感影像; 高分辨率; 参数计算; 仿射变换; 严格几何模型

中图法分类号: TP751; P237. 3

经济与社会的迅速发展, 要求对各地区、国家乃至整个地球有适当的多分辨率、三维的表示, 其中数字地面模型(DEM)与 1m 分辨率、具有“地理参考的(georeferenced)”遥感影像是其基础。当前发展迅速、对地球信息获取最快、最有效的手段是“遥感技术”, 即通过各种航天传感器所摄取的影像获取地球的空间信息。1999 年 9 月, 获取商用 1m 分辨率遥感影像的卫星 IKONOS2 发射成功; 2001 年, 星下 0.62m 分辨率遥感影像卫星 QUICKBIRD 也发射成功; 而且, 一系列的高分辨率遥感影像卫星的发射计划正在执行之中。这就使得我们能够利用高分辨率的遥感影像, 以较低的成本、较短的周期获取这些基础空间信息。

要将所获取的遥感影像处理成具有“地理参考的”影像, 首先是影像方位参数的解算。有了影像的方位参数, 才能根据数字地面模型对其进行精纠正, 使其成为具有“地理参考”的影像, 这是遥感定量化的基础。然而, 由于遥感影像的摄影高度大、摄影视场角小, 其传统的影像方位参数之间存在很强的相关性, 它们的解算一直没有得到很好的解决。例如, 对 10m 分辨率的 SPOT 影像用 6 个方位参数加上 6 个变化率参数的较严格的解算方法, 常常很难得到合理的解。尽管很多研究者提出了很多克服相关性的方法, 如分组迭代、合并相关项等, 但在很多情况下还是得不到合理的解。而目前应用较多的是 Kratky^[1,2] 提出的有理多项式拟合法,

它是一种近似方法, 要想得到较好的结果, 需要应用较高次数的多项式, 因而需要的控制点较多。即使这样, 有时也得不到合理的解。

Okamoto^[3~6] 提出了一种基于仿射投影模型的方法, Susumu Hattori^[7] 与 Tetsu Ono^[8] 进一步研究与应用了该模型。在“小视场角内的中心投影近似于平行光投影”的假设下, 利用仿射模型求解方位参数, 可克服方位参数的相关性。它对于 10m 分辨率的 SPOT 影像用于较小比例尺地图、精度要求较低的情况是有效的, 但该方法依然是一种近似方法。更高分辨率的影像与 SPOT 影像还不尽相同, 它的视场角更小, 因而其方位参数之间的相关性必然更强。对用于较大比例尺地图、精度要求较高的 1m 左右分辨率的遥感影像, 这种近似方法能否达到要求还需要研究。因此, 寻求一种可克服相关性的高分辨率遥感影像方位参数解算的严格几何模型, 从根本上解决问题, 这对高分辨率遥感影像的应用是十分重要的。

1 平行光投影成像几何

如图 1 所示, $y_{0Y'}$ 为 CCD 线阵列的运动方向, CCD 线阵列通过的直线 $x_{0X'}$ 与主光线 Sx_0 组成的平面与地平面的交线为 X_0X' , 过 S 作 X_0X' 的垂线交 X_0X' 于 O 。坐标系 $O-XYZ$ 以 OX' 为 X 轴, OS 为 Z 轴, 过 O 与 CCD 线阵列运动方向

平行的直线为 Y 轴 (Y 轴可能不垂直于平面 $O-XZ$)。 O 点在大地坐标系 $Og-X_gY_gZ_g$ 中的坐标为 (X_o, Y_o, Z_o) , 则地面一点 P 在两个坐标系的坐标 (X, Y, Z) 与 (X_g, Y_g, Z_g) 间的关系为三维仿射变换:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_g - X_o \\ Y_g - Y_o \\ Z_g - Z_o \end{pmatrix} \quad (1)$$

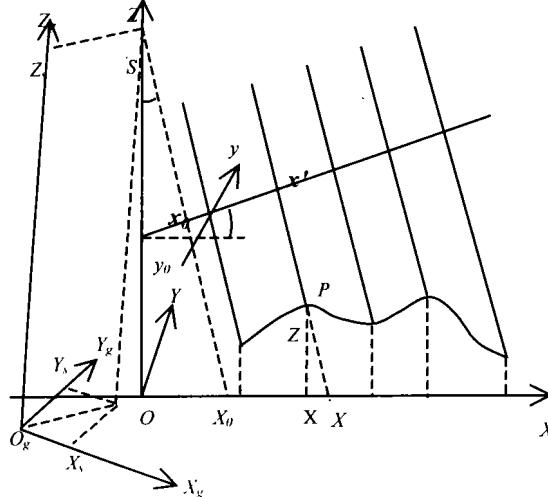


图 1 平行光投影成像几何

Fig. 1 Imaging Geometry of Parallel Ray Projection

若 Px' 平行于主光线 Sx_0 , 角 $x_0SO = \alpha$ (仿射变换矩阵中的元素 $r_{i,j}$ 与角 α 无关), 将地表剖面以与 Sx_0 平行的方向投影到像平面 $x'y'oy'$ 上, 则

$$x' - x_0 = (X_0 - X') \cos \alpha = (X + Z \sin \alpha - X') \cos \alpha \quad (2)$$

$$y' - y_0 = Y \quad (3)$$

将式(1)代入式(2)与式(3)得:

$$x' - x_0 = (r_{11}(X_g - X_o) + r_{12}(Y_g - Y_o) + r_{13}(Z_g - Z_o) + (r_{31}(X_g - X_o) + r_{32}(Y_g - Y_o) + r_{33}(Z_g - Z_o)) \sin \alpha - X' \cos \alpha \quad (4)$$

$$y' - y_0 = r_{21}(X_g - X_o) + r_{22}(Y_g - Y_o) + r_{23}(Z_g - Z_o) \quad (5)$$

$$\text{即 } x' = a_0' + a_1'X_g + a_2'Y_g + a_3'Z_g \quad (6)$$

$$y' = b_0' + b_1'X_g + b_2'Y_g + b_3'Z_g \quad (7)$$

式(5)与式(6)表明, 平行光投影成像是一个从三维到二维的仿射变换。

2 严格几何模型

2.1 像坐标 (x, y) 与空间坐标 (X_g, Y_g, Z_g) 的关系

在平面 XOZ 内过 x_0 作 OZ 的垂线交 OZ 于

O' , 令 $m = SO/SO'$, 以 S 为中心将实际模型缩小 m 倍(图 2), 设 x'', y'' 为缩小模型的平行投影影像坐标, 则

$$\begin{aligned} x'' - x_0 &= (x' - x_0)/m \\ y'' - y_0 &= (y' - y_0)/m = y - y_0 \\ z &= Z/m \end{aligned}$$

若 f 为焦距, α 为侧扫描偏角, x, y 为线阵列影像坐标, 由图 2 可得:

$$\frac{BC}{B'C'} = \frac{AB}{AB'} = \frac{SA}{SA'} \quad (8)$$

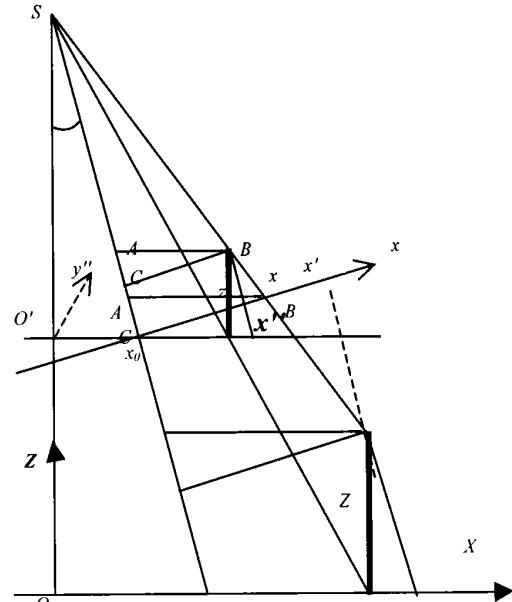


图 2 扫描遥感影像剖面

Fig. 2 Imaging Profile

$$\text{则 } \frac{x'' - x_0}{x - x_0} = \frac{f - \frac{Z}{\cos \alpha}}{f - (x - x_0) \tan \alpha} = \frac{f - \frac{Z}{m \cos \alpha}}{f - (x - x_0) \tan \alpha} \quad (9)$$

$$x' - x_0 = m \frac{f - \frac{Z}{m \cos \alpha}}{f - (x - x_0) \tan \alpha} (x - x_0) \quad (8)$$

$$y'' - y_0 = (y' - y_0)/m = y - y_0$$

$$y' - y_0 = m(y - y_0) \quad (9)$$

将式(4)与式(5)代入式(8)与式(9), 得:

$$\frac{f - \frac{Z_g}{m \cos \alpha}}{f - (x - x_0) \tan \alpha} (x - x_0) = a_0 + a_1 X_g + a_2 Y_g + a_3 Z_g \quad (10)$$

$$y - y_0 = b_0 + b_1 X_g + b_2 Y_g + b_3 Z_g \quad (11)$$

式(10)与式(11)即高分辨率遥感影像的像坐标 (x, y) 与空间坐标 (X_g, Y_g, Z_g) 之间的严格数学关系。

2.2 空间坐标 (X_g, Y_g, Z_g) 与左、右像坐标 (x_l, y_l) 、 (x_r, y_r) 的关系

$$a_{l_1}X_g + a_{l_2}Y_g + (a_{l_3} + \frac{x_l - x_{l_0}}{m \cos \alpha_l (f - (x_l - x_{l_0}) \tan \alpha_l)})Z_g = \frac{f(x_l - x_{l_0})}{f - (x_l - x_{l_0}) \tan \alpha_l} - a_{l_0} \quad (12)$$

$$b_{l_1}X_g + b_{l_2}Y_g + b_{l_3}Z_g = y_l - y_{l_0} - b_{l_0} \quad (13)$$

$$a_{r_1}X_g + a_{r_2}Y_g + (a_{r_3} + \frac{x_r - x_{r_0}}{m \cos \alpha_r (f - (x_r - x_{r_0}) \tan \alpha_r)})Z_g = \frac{f(x_r - x_{r_0})}{f - (x_r - x_{r_0}) \tan \alpha_r} - a_{r_0} \quad (14)$$

$$b_{r_1}X_g + b_{r_2}Y_g + b_{r_3}Z_g = y_r - y_{r_0} - b_{r_0} \quad (15)$$

式(12)~式(15)即高分辨率遥感影像空间坐标 (X_g, Y_g, Z_g) 与左、右像坐标 (x_l, y_l) 、 (x_r, y_r) 的严格数学关系。

3 计算策略

3.1 参数解算

由于式(10)中的 α 未知, 因而该方程是非线性的, 需要线性化迭代求解。

为了简明, 下文以 x 代替 $x - x_0$, y 代替 $y - y_0$, X 代替 X_g , Y 代替 Y_g , Z 代替 Z_g , 将式(10)线性化得到误差方程式:

$$da_0 + X_i da_1 + Y_i da_2 + Z_i da_3 + x_i = 0$$

$$\left[\frac{Z_i \sin \alpha}{m(f - x_i \tan \alpha) \cos^2 \alpha} - \frac{x_i(f - Z_i / (m \cos \alpha))}{(f - x_i \tan \alpha)^2 \cos^2 \alpha} \right] da + a_0 + X_i a_1 + Y_i a_2 + Z_i a_3 - \frac{f - \frac{Z_i}{m \cos \alpha}}{f - x \tan \alpha} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} a_{l_1} & a_{l_2} & a_{l_3} + \frac{x_l}{m \cos \alpha_l (f - x_l \tan \alpha_l)} \\ b_{l_1} & b_{l_2} & b_{l_3} \\ a_{r_1} & a_{r_2} & a_{r_3} + \frac{x_r}{m \cos \alpha_r (f - x_r \tan \alpha_r)} \\ b_{r_1} & b_{r_2} & b_{r_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{fx_l}{f - x_l \tan \alpha_l} - a_{l_0} \\ y_l - b_{l_0} \\ \frac{fx_r}{f - x_r \tan \alpha_r} - a_{r_0} \\ y_r - b_{r_0} \end{pmatrix} \quad (20)$$

或记为 $AX = L$, 其解为 $X = (A^T A)^{-1} A^T L$ 。

解法2 将式(13)代入式(12)、式(15)代入式(14)消去 Y , 得到关于 X 与 Z 的二元一次方程组, 解出 X 与 Z 。再将 X 与 Z 分别代入式(13)与式(15)解得 Y_1 与 Y_2 , 则

$$Y = (Y_1 + Y_2)/2$$

在此法中, 可用 $Y_1 - Y_2$ 评价解的质量。

y_l 、 (x_r, y_r) 的关系

令下标 l 代表左影像的元素, 下标 r 代表右影像的元素, 将左、右像坐标 (x_l, y_l) 、 (x_r, y_r) 代入式(10)与式(11), 可得4个线性方程:

$$a_{l_1}X_g + a_{l_2}Y_g + (a_{l_3} + \frac{x_l - x_{l_0}}{m \cos \alpha_l (f - (x_l - x_{l_0}) \tan \alpha_l)})Z_g = \frac{f(x_l - x_{l_0})}{f - (x_l - x_{l_0}) \tan \alpha_l} - a_{l_0} \quad (12)$$

$$b_{l_1}X_g + b_{l_2}Y_g + b_{l_3}Z_g = y_l - y_{l_0} - b_{l_0} \quad (13)$$

$$a_{r_1}X_g + a_{r_2}Y_g + (a_{r_3} + \frac{x_r - x_{r_0}}{m \cos \alpha_r (f - (x_r - x_{r_0}) \tan \alpha_r)})Z_g = \frac{f(x_r - x_{r_0})}{f - (x_r - x_{r_0}) \tan \alpha_r} - a_{r_0} \quad (14)$$

$$b_{r_1}X_g + b_{r_2}Y_g + b_{r_3}Z_g = y_r - y_{r_0} - b_{r_0} \quad (15)$$

利用5个以上的控制点及以上误差方程式(16), 未知数的初值均取为0, 迭代求解可得 α 与 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 。

由式(11)可得线性方程:

$$b_0 + Xb_1 + Yb_2 + Zb_3 - y_i = 0 \quad (17)$$

利用方程式(17), 不需迭代即可解得 b_0 、 b_1 、 b_3 。

3.2 由空间坐标 (X, Y, Z) 计算像坐标 (x, y)

在利用控制点解得 α 、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 之后, 可利用式

$$x = (a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z) \frac{f - x \tan \alpha}{f - \frac{Z}{m \cos \alpha}} \quad (18)$$

$$y = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z \quad (19)$$

由空间坐标 (X, Y, Z) 计算像坐标 (x, y) 。

3.3 由左、右像坐标 (x_l, y_l) 、 (x_r, y_r) 计算空间坐标 (X, Y, Z)

解法1 由式(12)~式(15)得线性方程组:

$$\begin{pmatrix} a_{l_1} & a_{l_2} & a_{l_3} + \frac{x_l}{m \cos \alpha_l (f - x_l \tan \alpha_l)} \\ b_{l_1} & b_{l_2} & b_{l_3} \\ a_{r_1} & a_{r_2} & a_{r_3} + \frac{x_r}{m \cos \alpha_r (f - x_r \tan \alpha_r)} \\ b_{r_1} & b_{r_2} & b_{r_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{fx_l}{f - x_l \tan \alpha_l} - a_{l_0} \\ y_l - b_{l_0} \\ \frac{fx_r}{f - x_r \tan \alpha_r} - a_{r_0} \\ y_r - b_{r_0} \end{pmatrix} \quad (20)$$

4 试验

利用10余对SPOT影像进行高分辨率遥感影像严格几何模型的试验, 其中包括一些用原来的方法得不到较好结果的像对。一些3m与1m分辨率遥感影像对(包括IKONOS像对)也用于了试验。表1是立体像对定向后控制点地面坐标的中误差。表2是由78个已知点的SPOT立体

影像定向后控制点与检查点的坐标中误差,其中最后一行是任选 10 个点作为控制点,其他 68 个点作为检查点的结果,它表明解是非常稳定的。除了表 1 与表 2 列出的试验外,还进行了其他的一些试验,所有的试验结果也都相当好。

本文介绍的几何模型理论上是严格的。除了 5 个以上的控制点外,它不需要传感器轨道的先验参数。大量的试验表明,基于该模型的高分辨率遥感影像方位参数计算是非常稳定的。这种严格几何模型完全解决了高分辨率遥感影像方位参数计算相关性的问题。

表 1 立体像对试验结果

Tab. 1 Experiment Results of Stereo Image Pairs

像素地面分辨率/m	点数	X-rms/m	Y-rms/m	Z-rms/m
10	21	14.091	13.980	4.760
10	12	7.340	5.084	5.843
10	78	9.081	12.212	5.247
10	9	13.904	14.742	8.676
10	9	10.283	14.632	3.519
10	5	0.999	3.624	0.436
10	5	0.032	0.171	0.086
3	15	4.912	7.138	0.798
1	12	0.742	0.804	0.985
1	6	0.317	0.367	0.808

表 2 有检查点的 SPOT 立体像对试验结果

Tab. 2 Experiment Results of SPOT Stereo Image

Pairs with Check Points			
点数	X-rms/m	Y-rms/m	Z-rms/m
控	67	9.401	11.745
制	49	9.537	10.898
点	30	9.456	10.148
	10	3.487	5.856
检	点数	X-rms/m	Y-rms/m
检	11	7.745	15.282
查	29	11.242	15.397
点	48	10.553	13.853
	68	11.749	15.553
		Z-rms/m	
		4.753	6.374
		7.111	6.072

致谢:感谢 SPACEIMAGE 的 Gene dial 提供的 IKONOS 数据与资料。

参 考 文 献

- 1 Kratky V. Rigorous Photogrammetric Processing of SPOT Images at CCM Canada. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1989a, 44, 53~71
- 2 Kratky V. Online Aspects of Stereophotogrammetric Processing of SPOT Images. PE & RS, 1989b, 55(3): 311~316
- 3 Okamoto A. Orientation and Construction of Models Part III: Mathematical Basis of the Orientation Problem of One-dimensional Central-Perspective Photographs. PE & RS, 1981, 47(12): 1739~1752
- 4 Okamoto A. Orientation Theory of CCD Line-scanner Images. International Archives of ISPRS, 1988, 27(B3): 609~617
- 5 Okamoto A, Akamatsu S. Orientation Theory for Satellite CCD Line Scanner Imagery of Mountainous Terrain. International Archives of ISPRS, 1992a, 29(B2): 205~209
- 6 Okamoto A, Akamatsu S. Orientation Theory for Satellite CCD Line Scanner Imagery of Hilly Terrain. International Archives of ISPRS, 1992b, 29(B2): 217~221
- 7 Susumu Hattori, Tetsu Ono, Clive Fraser, et al. Orientation of High-resolution Satellite Images Based on Affine Projection. International Archives of ISPRS 2000 Congress, 2000, 33(B3): 359~366
- 8 Tetsu Ono, Susumu Hattori, Hiroyuki Hasegawa, et al. Digital Mapping Using High Resolution Satellite Imagery Based on 2D Affine Projection Model. International Archives of ISPRS 2000 Congress 2000, 33(B3): 672~677

作者简介: 张剑清,教授,博士生导师。现主要从事摄影测量与遥感、计算机视觉的研究。代表成果: 摄影测量技术改造; 进口解析测图仪的改造; 全数字自动化测图理论与方法; 基于最优解理论的地名注记智能化和自动化; VirtuoZo 数字摄影测量系统等。已发表论文 100 余篇。出版专著《数字摄影测量学》。

E-mail: Jqzhang@supresoft.com.cn

Strict Geometric Model Based on Affine Transformation for Remote Sensing Image with High Resolution

ZHANG Jianqing¹ ZHANG Zuxun¹

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

Abstract: This paper proposes a strict geometric model of the calculation for the position and orientation parameters of the remote-sensing image with higher resolution. The method adopts three steps of transformations based on parallel ray projection. The first step is reducing the three

dimensional space to the image space by the similar transformation. Then, the small space is projected to the level plane, which passes the center of the image plane. Finally, the level image is transformed to the original declining image. Every step of the model is strict, and the map function of each transformation is the first order polynomials. The final calculation of the parameters is for the linear equations with good status. As a result, the problem of the relativity of image parameter calculation is solved completely. Some experiments are carried on for a lot of images with 10 m, 3 m and 1 m resolution. All of the results are quite perfect. Thus, the validity of the strict geometric model has been verified.

Key words: remote sensing image; high resolution; parameter calculation; affine transformation; strict geometric model

About the author: ZHANG Jianqing, professor, Ph. D supervisor. He is concentrated on the research and education in photogrammetry & remote sensing and computer vision. He has made unique contribution in the areas of reform of photogrammetric technology, reform of analytical plotter, theory and method of full digital automatic mapping, intelligence and automation of map name placement based on optimal solution theory, VirtuZo Digital Photogrammetry System, etc. He has published more than 100 papers and a book Digital Photogrammetry.

E-mail: Jqzhang@supresoft.com.cn

(上接第 554 页)

作者简介: 刘经南, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。现主要从事空间大地测量和地球动力学的研究。代表成果: 国家高精度

GPS 数据处理理论与方案; GPS 卫星定位处理综合软件; WADGPS 数据处理软件; 青藏高原地壳运动与形变的 GPS 研究等。
E-mail: jnliu@whu.edu.cn

Establishment of the CHAMP Wuhan and Application of CHAMP Mission

LIU Jingnan¹ LUO Jia²

(1 Presidential Secretariate, Wuhan University, Luojia Hill, Wuhan, China, 430072)

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

Abstract: The CHAMP Wuhan tracking station is based on the frame between Wuhan University and GFZ. It is the 12th Ground Tracking Station for CHAMP mission. The establishment of CHAMP Wuhan is introduced in this paper. Then the application of CHAMP mission are described in detail. Last, the differences between CHAMP Wuhan and IGS Wuhan are described.

Key words: CHAMP tracking station; gravity field; atmosphere; GPS occultation

About the author: LIU Jingnan, professor, Ph. D supervisor, member of the Chinese Academy of Engineering. His major research orientations include space geodesy and geodynamics. His typical achievements are the theory and scheme of high precision GPS data processing in China; the comprehensive software of GPS satellite positioning processing; the software of WADGPS data processing; the crustal movement and deformation of Qinghai-Tibet Plateau using GPS, etc.

E-mail: jnliu@whu.edu.cn