

对高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型的讨论

胡安文¹ 张祖勋^{1,2}

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

(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 根据 CCD 线阵列对地面扫描的实际情况, 修正得到高分辨率遥感影像方位参数求解的严格几何模型, 并进行了理论上的论证, 得出相应的计算公式。实验证明, 该模型理论上更为严密, 与原模型的实用效果基本一致。

关键词: 遥感影像; 高分辨率; 几何模型; CCD 线阵列; 修正

中图法分类号: P231.5

在对高分辨率影像的处理过程中, 一个重要的问题是影像方位参数的解算。传统的遥感影像方位参数之间存在很强的相关性, 其解算方法一直没有得到很好的解决。

国内一些学者在这个问题上进行了很多相关的研究, 并取得了一定的成果, 实现了对高分辨率遥感影像方位参数的解算。张剑清等提出了高分辨率遥感影像参数求解的严格几何模型^[1]。该模型在解决遥感影像参数求解上, 很好地克服了影像参数之间的相关性, 应用效果良好。高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型及相应的计算公式在解决实际问题很实用, 但在理论上还不是非常严密。该模型对 CCD 对地扫描过程中一个前(或后)向的倾角的处理不完全严格。

本文对高分辨率影像求解的严密过程进行了相应的讨论和修正, 得到了另一个更为严密的求解影像坐标的几何模型。

1 高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型中的问题

目前的高分辨率遥感影像依然是线阵列 CCD 推扫成像, 即在扫描方向是中心投影, 在飞行方向每条线上是近似平行光投影。高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型(下文称为原模型)首先将三维空间模型经过相似变换缩小至影像空间, 再将其以平行光投影至与过原始影

像中心的一个水平面上(仿射变换), 最后将其变换至原始倾斜影像。

CCD 线阵列对地面扫描时, 飞行过程中向前(或后)有一个前(或后)向倾角, 对两侧有一个侧向倾角。如图 1^[1]所示, 原模型中, $o'y'$ 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 S_{x_0} 组成的平面与地平面的交线为 X_0X' , 坐标系 $OXYZ$ 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 OZX)。 PX (也即是 Z) 垂直于 OX 轴, 但不一定垂直于地面, 即 Z 与 Z_g 不一定相等。主光轴与 OZ 的夹角为 α 它为实际扫描角, 包含有前(或后)向和侧向倾角的两个方向。原模型由式

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

推导

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

时, 忽略了 Z 与 Z_g 的不同, 直接用 Z_g 代替 Z 。而 Z 和 Z_g 理论上是不相等的, 除非扫描前(或后)向倾角为 0° , 这也是原模型在理论上不严密之处。

2 严格几何模型

要解决上述问题, 就需对原来成像原理图作

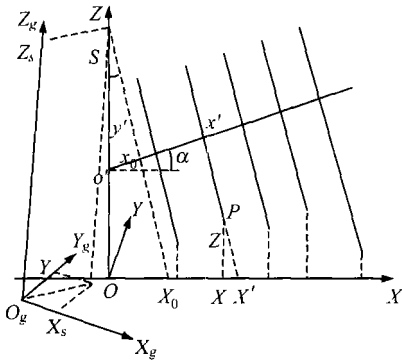


图 1 平行光投影成像几何^[1]

Fig. 1 Parallel Ray Projection Geometric Imaging^[1]

修改。如图 2 所示, 过 S 点作地面的垂线, 垂足为 O。S'O' 与面 SOX 的夹角 β 即为扫描前(或后)向倾角。过 P 点作地面垂线, 垂足为 P', PP' 与 PX' 的夹角也应为 β 。O 点在大地坐标系 $O_g-X_g Y_g Z_g$ 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, 而 $Z = Z_g / \cos \beta$ 。如果考虑到这个 β 的存在, 则可以使原模型在理论上更完善。更严格的几何模型如下。

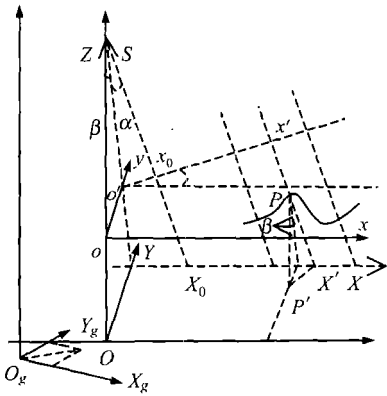


图 2 修正后的平行光投影成像几何

Fig. 2 Amended Parallel Ray Projection Geometric Imaging

2.1 像坐标与空间坐标的关系

高分辨率遥感影像的像坐标 (x, y) 与空间

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} + \frac{x_l}{m \cos \alpha \cos \beta (f - x_l \tan \alpha)} \\ b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ a_{r1} & a_{r2} & a_{r3} + \frac{x_r}{m \cos \alpha \cos \beta (f - x_r \tan \alpha)} \\ b_{r1} & b_{r2} & b_{r3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f x_l}{f - x_l \tan \alpha} - a_{10} \\ y_l - b_{10} \\ \frac{f x_r}{f - x_r \tan \alpha} - a_{r0} \\ y_r - b_{r0} \end{pmatrix} \quad (9)$$

记为 $AX = L$ 。则解为 $X = (A^T A)^{-1} A^T L$, 可得空间坐标。

2) 将式(4)代入式(3), 式(6)代入式(5), 消去 Y_g , 得到关于 X_g 与 Z_g 的二元一次方程组, 解

坐标 (X_g, Y_g, Z_g) 之间的严格数学关系为:

$$f - \frac{Z_g}{m \cos \alpha \cos \beta} (x - x_0) = f - (x - x_0) \tan \alpha \quad (1)$$

$$a_0 + a_1 X_g + a_2 Y_g + a_3 Z_g \quad (2)$$

2.2 空间坐标与像坐标的关系

将左、右像坐标 $(x_l, y_l), (x_r, y_r)$ 代入式(1)与式(2), 可得如下 4 个线性方程:

$$\begin{pmatrix} a_{11} X_g + a_{12} Y_g + \\ \left[a_{13} + \frac{x_l - x_{l0}}{m \cos \alpha \cos \beta (f - (x_l - x_{l0}) \tan \alpha)} \right] \cdot Z_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f \\ f - (x_l - x_{l0}) \tan \alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$b_{11} X_g + b_{12} Y_g + b_{13} Z_g = y_l - y_{l0} - b_{10} \quad (4)$$

$$a_{r1} X_g + a_{r2} Y_g + \begin{pmatrix} a_{r3} + \frac{x_r - x_{r0}}{m \cos \alpha \cos \beta (f - (x_r - x_{r0}) \tan \alpha)} \cdot Z_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f \\ f - (x_r - x_{r0}) \tan \alpha \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$b_{r1} X_g + b_{r2} Y_g + b_{r3} Z_g = y_r - y_{r0} - b_{r0} \quad (6)$$

3 计算公式

3.1 由空间坐标 (X_g, Y_g, Z_g) 计算像坐标 (x, y)

选取 5 个以上的控制点, 解方程可得 9 个参数 $\alpha, a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$, 代入下式可以计算像坐标:

$$x = \frac{f(a_0 + a_1 X_g + a_2 Y_g + a_3 Z_g)}{f - \frac{Z_g}{m \cos \alpha \cos \beta} + \tan \alpha (a_0 + a_1 X_g + a_2 Y_g + a_3 Z_g)} \quad (7)$$

$$y = b_0 + b_1 X_g + b_2 Y_g + b_3 Z_g \quad (8)$$

3.2 由像坐标 $(x_l, y_l), (x_r, y_r)$ 计算空间坐标

1) 由式(3)~ 式(6)得线性方程组:

出 X_g 与 Z_g 。再将 X_g 与 Z_g 分别代入式(4)与式(6), 解得 Y_{g1} 与 Y_{g2} , 则:

$$Y_g = (Y_{g1} + Y_{g2}) / 2$$

可用 $Y_{g1} - Y_{g2}$ 评价解的质量^[1]。

4 实验评价

修正后的高分辨率遥感影像严格几何模型考虑了扫描前(或后)向倾角 β 。理论上, β 是不可以忽略的,但在实际应用中 β 角对计算结果影响不大,完全可以忽略。以高分辨率遥感影像为例,取12个控制点,利用空间坐标和像坐标计算出9个参数,再用式(7)、式(8)计算像坐标,用式(9)计算

空间坐标。 β 分别取 0° 、 30° 、 40° ,比较修正的高分辨率遥感影像严格几何模型与原模型计算的控制点像坐标和空间坐标的残差及中误差,结果表明,修正后的模型在 $\beta=0^\circ$ 的情况下与原模型的像坐标及空间坐标残差一致。当 β 为 30° 、 40° 时,结果与原模型结果也基本一致,这说明原模型具有很强的实用性。表1、表2为IKONOS影像控制点坐标残差及中误差比较,表3、表4为多种遥感影像控制点坐标中误差比较。

表1 IKONOS影像控制点像坐标残差及中误差比较

Tab.1 Comparison of Residual Error and Residual Mean Error about Control Point's Imaging Coordinate of IKONOS Imaging

	x/像元				y/像元			
	原模型	0°	30°	40°	原模型	0°	30°	40°
左片	-1.401	-1.401	-1.404	-1.408	-0.313	-0.313	-0.313	-0.313
	0.991	0.991	0.989	0.987	-0.060	-0.060	-0.060	-0.060
	0.982	0.982	0.988	0.993	0.072	0.072	0.072	0.072
	-0.796	-0.796	-0.796	-0.797	0.330	0.330	0.330	0.330
	0.721	0.721	0.722	0.723	0.097	0.097	0.097	0.097
	0.122	0.122	0.128	0.133	1.140	1.140	1.140	1.140
中误差	-0.820	-0.820	-0.826	-0.831	-0.672	-0.672	-0.672	-0.672
	-0.378	-0.378	-0.379	-0.381	-0.192	-0.192	-0.192	-0.192

	0.918	0.918	0.921	0.923	0.441	0.441	0.441	0.441
	-2.096	-2.096	-2.099	-2.103	-0.862	-0.862	-0.862	-0.862
	1.551	1.551	1.549	1.547	-0.013	-0.013	-0.013	-0.013
右片	1.550	1.550	1.556	1.561	1.060	1.060	1.060	1.060
	-0.784	-0.784	-0.784	-0.785	1.273	1.273	1.273	1.273
	0.381	0.381	0.382	0.384	0.563	0.563	0.563	0.563
	-0.717	-0.717	-0.712	-0.707	1.222	1.222	1.222	1.222
	-0.590	-0.590	-0.595	-0.600	-0.734	-0.734	-0.734	-0.734
	0.503	0.503	0.502	0.500	0.012	0.012	0.012	0.012
中误差
	1.166	1.166	1.168	1.169	0.907	0.907	0.907	0.907

表2 IKONOS影像控制点空间坐标残差及中误差比较

Tab.2 Comparison of Residual Error and Residual Mean Error about Control Point's Space Coordinate of IKONOS Imaging

	X_g/m			Y_g/m			Z_g/m				
	原模型	0°	30°	原模型	0°	30°	原模型	0°	30°	40°	
0.946	0.946	0.947	0.948	1.000	1.000	1.002	1.005	-1.218	-1.218	-1.218	-1.218
-0.238	-0.238	-0.237	-0.236	-0.853	-0.853	-0.850	-0.848	0.976	0.976	0.976	0.976
0.328	0.328	0.327	0.326	-1.772	-1.772	-1.775	-1.779	-0.267	-0.267	-0.267	-0.267
-0.798	-0.798	-0.799	-0.801	-0.631	-0.631	-0.636	-0.640	1.002	1.002	1.002	1.002
-0.479	-0.479	-0.478	-0.478	1.029	1.029	1.029	1.030	0.034	0.034	0.034	0.033
1.007	1.007	1.009	1.010	0.922	0.922	0.927	0.931	-0.822	-0.822	-0.822	-0.822
-0.596	-0.596	-0.596	-0.597	-0.619	-0.619	-0.620	-0.621	-0.584	-0.584	-0.584	-0.584
-1.250	-1.250	-1.252	-1.254	0.152	0.152	0.147	0.142	-1.458	-1.458	-1.459	-1.459
...

5 结语

本文在高分辨率遥感影像基于仿射变换的严

格几何模型的基础上,对原模型进行讨论、修正,得到一个修正后的模型及相关计算公式。修正后的模型在理论上更为严密,在实际应用上与原模型一致。

表 3 多种遥感影像的控制点像坐标中误差比较

Tab. 3 Comparison of Residual Mean Error about Control Point's Imaging

Coordinate of Manifold Remote Sensing Imaging

影像	x_l /像元			y_l /像元			x_r /像元			y_r /像元		
	0°	30°	40°	0°	30°	40°	0°	30°	40°	0°	30°	40°
QuickBird	0.312	0.312	0.312	0.289	0.289	0.289	0.090	0.090	0.090	0.193	0.193	0.193
SPOT	0.267	0.270	0.273	0.446	0.446	0.446	0.405	0.408	0.411	0.263	0.263	0.263
IKONOS	0.488	0.487	0.486	0.356	0.356	0.356	0.215	0.214	0.213	0.184	0.184	0.184
CH*	0.484	0.487	0.491	1.088	1.088	1.088	0.515	0.518	0.521	1.176	1.176	1.176

表 4 多种遥感影像的控制点空间坐标中误差比较

Tab. 4 Comparison of Residual Mean Error about Control Point's Space Coordinate of

Manifold Remote Sensing Imaging

	X_g /m			Y_g /m			Z_g /m		
	0°	30°	40°	0°	30°	40°	0°	30°	40°
QuickBird	0.777	0.778	0.778	0.688	0.688	0.689	0.516	0.516	0.516
SPOT	3.507	3.478	3.451	3.530	3.526	3.523	1.596	1.596	1.596
IKONOS	0.320	0.320	0.319	0.434	0.433	0.432	0.531	0.531	0.531
CH*	2.025	2.042	2.061	3.230	3.231	3.233	0.831	0.832	0.834

注: CH 为国内某一卫星。

参 考 文 献

[1] Zhang Jianqing, Zhang Zuxun. Strict Geometric Model Based on Affine Transformation for Remote Sensing Image with High Resolution[C]. ISPRS-Commission III Symposium, Garz, 2002

[2] Kratky V. Rigorous Photogrammetric Processing of SPOT Images at CCM Canada[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1989(44): 53-71

[3] Kratky V. On-Line Aspects of Stereophotogrammetric Processing of SPOT Images[J]. PE & RS, 1989, 55(3): 311-316

[4] Okamoto A. Orientation and Construction of Mod-

els: Mathematical Basis of the Orientation Problem of One-Dimensional Central Perspective Photographs[J]. PE&RS, 1989, 47(12): 1739-1752

[5] Okamoto A. Orientation Theory of CCD Line-Scanner Images[C]. International Archives of ISPRS, Kyoto, 1988

[6] Okamoto A, Akamatsu S. Orientation Theory for Satellite CCD Line Scanner Imagery of Mountainous Terrain[C]. International Archives of ISPRS, Washington D C, 1992

第一作者简介: 胡安文, 硕士生。研究方向为数字摄影测量。
E-mail: Hh95032@163.com

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

H U Anwen¹ ZHANG Zuxun^{1,2}

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

(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper is based on "strict geometric model based on affine transformation for remote sensing image with high resolution", amending the strict geometric model of the calculation for the position and orientation parameters of the remote sensing image with high resolution. According to condition of CCD scanning Earth, amend and get a more exact geometric model, whose computation formula is inferred. Experiments demonstrate the new model is more strict and reliable, though it has the same effect as the original model.

Key words: remote sensing image; high resolution; geometric model; CCD scan; amend

About the first author: HU Anwen, postgraduate. His major study is digital photogrammetry and remote sensing.

E-mail: Hh95032@163.com