

异轨遥感 CCD 影像外方位元素的解求

燕 琴¹ 张祖勋² 张剑清²

(1 中国测绘科学研究院摄影测量与遥感研究所, 北京市海淀区北太平路 16 号, 100039)

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

摘要:在对异轨遥感 CCD 影像处理的基本模型基础上, 采用在物方空间坐标系中进行平差, 并对相关的参数进行部分分离-合并, 有效地控制了未知参数间的相关性。结合人工智能原理设计的分层全局最优的搜索控制算法不仅保证了算法的严密性, 而且简洁、实用。

关键词:异轨遥感影像; 分离-合并; 分层全局最优搜索控制策略

中图法分类号: TP751; P231.5

利用 CCD 推扫式影像仪在不同轨道上获取异轨遥感影像来实现立体观测是测绘界极其关注的问题, 该工作的成功实现会对开发遥感影像的应用产生极大影响。实现立体观测的第一个问题是外方位元素的解求。由于 CCD 影像的不同成像方式, 自从 1986 年第一颗 SPOT 卫星升空以来, 人们就对该问题进行了广泛的研究, 取得了丰硕的成果。现在可以构成立体观测的异轨遥感影像逐渐增多, 本文以 SPOT 影像为例, 针对外方位元素解求方面还存在的问题进一步寻求解决的方法。

1 基础理论模型

CCD 推扫式影像仪所获取的线阵列影像, 同一条线影像上的像点具有相同的外方位元素, 而不同线影像上的像点具有不同的外方位元素。但是从综合效应上讲, 每条线影像的构像仍然符合中心投影的几何关系, 满足共线方程。取航向的方向为影像的 y 轴方向, 沿线影像的方向为 x 方向建立像坐标系, 则对每一条线影像有 $y=0$, 对任意的第 i 条线影像, 有:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= -f \frac{a_{1i}(X - X_{si}) + b_{1i}(Y - Y_{si}) + c_{1i}(Z - Z_{si})}{a_{3i}(X - X_{si}) + b_{3i}(Y - Y_{si}) + c_{3i}(Z - Z_{si})} \\ 0 &= -f \frac{a_{2i}(X - X_{si}) + b_{2i}(Y - Y_{si}) + c_{2i}(Z - Z_{si})}{a_{3i}(X - X_{si}) + b_{3i}(Y - Y_{si}) + c_{3i}(Z - Z_{si})} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= \varphi_0 + c_\varphi \cdot y \\ \omega_i &= \omega_0 + c_\omega \cdot y \\ \kappa_i &= \kappa_0 + c_\kappa \cdot y \\ X_{si} &= X_{s0} + c_{X_s} \cdot y \\ Y_{si} &= Y_{s0} + c_{Y_s} \cdot y \\ Z_{si} &= Z_{s0} + c_{Z_s} \cdot y \end{aligned} \right\} \quad (2)$$
$$\left. \begin{aligned} V_1 &= A_1 X + B_1 Y + C_1 Z - L_1 \\ V_2 &= A_2 X + B_2 Y - L_2 \\ C_3 &= C_3 Z - L_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,

$$\begin{aligned} X &= [dX_{s0} \ dY_{s0} \ dZ_{s0} \ d\varphi_0 \ d\omega_0 \ d\kappa_0]^T \\ Y &= [dc_{X_s} \ dc_{Y_s} \ dc_{Z_s} \ dc_\varphi \ dc_\omega \ dc_\kappa]^T \\ Z &= [dX_1 \ dY_1 \ dZ_1 \ \wedge \ \wedge \ dX_i \ dY_i \ dZ_i]^T \end{aligned}$$

由式(1)和式(2), 可以建立平差的基本误差方程式(3)的第一式。

如果将地面控制点坐标作为带权观测值(式(3)的第三式), 并且再引入外方位元素的伪观测值方程(式(3)的第二式), 可得到目前应用最广泛的解求外方位元素的光束法平差模型。

2 光束法平差的改进模型

由于未知外方位元素中 X_s 与 φ , Y_s 与 ω 之间强相关, 严重影响了外方位元素的解求, 因此,

因此本文采用 12 个未知参数 ($X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}, \varphi_0, \omega_0, \kappa_0, c_{X_s}, c_{Y_s}, c_{Z_s}, c_\varphi, c_\omega, c_\kappa$) 建立在物方空间坐标系中平差的模型, 并从误差方程中未知参数系数存在的规律出发, 进一步对相关的未知参数进行部分分离-合并, 形成新的平差模型以有效地抑制未知外方位元素间的强相关, 保证外方位元素解的稳定性和准确性。

由共线方程^[1]:

$$X = X_s + (Z - Z_s)\overline{X}/\overline{Z}$$

$$Y = Y_s + (Z - Z_s)\overline{Y}/\overline{Z}$$

可得到未知外方位元素在误差方程中的系数为:

$$a_{11} = 1, \quad a_{21} = 0$$

$$a_{12} = 0, \quad a_{22} = 1$$

$$a_{13} = \overline{X}/\overline{Z}, \quad a_{23} = \overline{Y}/\overline{Z}$$

$$a_{14} = (Z_s - Z)(1 + \overline{X}^2/\overline{Z}^2)$$

$$a_{24} = (Z_s - Z)\overline{X}\overline{Y}/\overline{Z}^2$$

$$a_{15} = (Z_s - Z)(\sin\varphi(\overline{Y}/\overline{Z}) + \cos\varphi(\overline{X}\overline{Y}/\overline{Z}^2))$$

$$a_{25} = (Z_s - Z)[(x \sin\omega \sin\kappa - f \cos\omega)1/\overline{Z} + \cos\varphi(\overline{Y}^2/\overline{Z}^2)]$$

$$a_{16} = -(Z_s - Z)[a_2 x(1/\overline{Z}) - c_2 x(\overline{X}/\overline{Z}^2)]$$

$$a_{26} = -(Z_s - Z)[b_2 x(1/\overline{Z}) - c_2 x(\overline{Y}/\overline{Z}^2)]$$

式中, a_2, b_2, c_2 为外方位角元素 φ, ω, κ 的方向余弦, 其定义参见文献[1]。

显然, 上述系数存在着规律性, 可从“将相关的未知参数部分分离-合并”的思想出发, 改进上述未知外方位元素在误差方程中的系数, 有:

$$\begin{aligned} V_X &= a'_{11}dX'_{s0} + a'_{12}dY_{s0} + a'_{13}dZ_{s0} + \\ & a'_{14}d\varphi'_0 + a'_{15}d\omega'_0 + a'_{16}d\kappa'_0 + \\ & a'_{11}ydc'_{X_{s0}} + a'_{12}ydc'_{Y_{s0}} + a'_{13}ydc'_{Z_{s0}} + \\ & a'_{14}ydc'_{\varphi_0} + a'_{15}ydc'_{\omega_0} + a'_{16}ydc'_{\kappa_0} - \\ & a_{11}dX_i - a_{12}dY_i - a_{13}dZ_i - L_X \\ V_Y &= a'_{21}dX'_{s0} + a'_{22}dY_{s0} + a'_{23}dZ_{s0} + \\ & a'_{24}d\varphi'_0 + a'_{25}d\omega'_0 + a'_{26}d\kappa'_0 + \\ & a'_{21}ydc'_{X_{s0}} + a'_{22}ydc'_{Y_{s0}} + a'_{23}ydc'_{Z_{s0}} + \\ & a'_{24}ydc'_{\varphi_0} + a'_{25}ydc'_{\omega_0} + a'_{26}ydc'_{\kappa_0} - \\ & a_{21}dX_i - a_{22}dY_i - a_{23}dZ_i - L_Y \end{aligned} \quad (4)$$

式中,

$$\begin{aligned} dX'_s &= dX_{s0} + Hd\varphi_0 \\ dc'_{X_s} &= dc_{X_s} + Hdc_\varphi \\ d\varphi' &= Hd\varphi_0, \quad dc'_\varphi = Hdc_\varphi \\ d\omega' &= Hd\omega_0, \quad dc'_\omega = Hdc_\omega \\ d\kappa' &= Hd\kappa_0, \quad dc'_\kappa = Hdc_\kappa \\ a'_{11} &= 1, \quad a'_{21} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a'_{12} &= 0, \quad a'_{22} = 1 \\ a'_{13} &= -\overline{X}/\overline{Z}, \quad a'_{23} = -\overline{Y}/\overline{Z} \\ a'_{14} &= \overline{X}^2/\overline{Z}^2, \quad a'_{24} = \overline{X}\overline{Y}/\overline{Z}^2 \\ a'_{15} &= (\sin\varphi \frac{\overline{Y}}{\overline{Z}} + \cos\varphi \frac{\overline{X}\overline{Y}}{\overline{Z}^2}) \\ a'_{25} &= \frac{x \sin\omega \sin\kappa - f \cos\omega}{\overline{Z}} + \cos\varphi \frac{\overline{Y}^2}{\overline{Z}^2} \\ a'_{16} &= -\frac{a_2 x}{\overline{Z}} + \frac{c_2 x \overline{X}}{\overline{Z}^2} \\ a'_{26} &= -\frac{b_2 x}{\overline{Z}} + \frac{c_2 x \overline{Y}}{\overline{Z}^2} \end{aligned}$$

从而形成新的平差模型。

3 分层全局最优搜索控制算法

SPOT 卫星的动态性质决定了我们很难获得影像的准确外方位元素值, 因此本文结合人工智能(AI)方法, 根据搜索策略的要求进一步设计了分层全局最优搜索控制算法。

在 AI 中, 对搜索算法的评价有一定的准则, 一种最理想的情形是找到一种策略将某 AI 问题空间的非确定搜索变换为一般问题的确定计算。这些评价规则一般包括以下几方面:

- 1) 完备性。即只要问题有解, 在搜索策略的控制下就一定能找到这个(些)解。
- 2) 规则作用代价(RC)低。要求在搜索策略的引导下, 尽量避免无用搜索。
- 3) 控制开销(CC)小。要求搜索策略的实现简单, 选择/调度可用规则的计算量尽可能小。

在外方位元素的解求中, 已知卫星的理论高度 $H=822 \text{ km}$, HRV 的成像角最大为左、右 27° , 即 $-27^\circ < \varphi < +27^\circ$, 而 Z_s 的取值在 $\varphi = 27^\circ$ 时为最小(大约 800 km), 加上卫星摄动的影响, 有:

$$\begin{aligned} 780.0 \text{ km} &< Z_s < 840.0 \text{ km} \\ -30.0^\circ &< \varphi < +30.0^\circ \end{aligned}$$

由此可得到由二维参数确定的解空间(图 1), 以 $f(Z_s, \varphi)$ 作为解空间上的估价函数。根据对搜索算法的评价准则, 笔者选择的搜索规则为:

- 1) Z_s 和 φ 的取值作为已知值, 从而将 12 个外方位元素缩减为 10 个。
- 2) 地面控制点的点残差平方和最小:

$$f(Z_s, \varphi) = (V_{X_1}^2 + V_{Y_1}^2 + V_{Z_1}^2 + \dots + V_{X_n}^2 + V_{Y_n}^2 + V_{Z_n}^2) = \min$$
- 3) 分层搜索, 并且各层使用不同的分辨率, 由粗到细。笔者设计的多分辨率数据结构见表 1。

表 1 各层的数据分辨率

Tab.1 Resolution for Individual Layer

层	Z_s/km	$\varphi/(\circ)$
1	10.0	1.0
2	1.0	0.1
3	0.1	0.01
4	0.01	0.001
5	0.001	0.000

4) 范围控制搜索。搜索过程要分几个层次完成(图 2), 各层使用不同的分辨率, 并按照使估价函数 $f(Z_s, \varphi) = \min$ 的准则确定出该层的获选节点。对获选节点按上一层的 $\pm\Delta Z_s$ 和 $\pm\Delta\varphi$ 的限差决定该层搜索的控制范围, 采用该层的分辨率找到该层的获选节点。依此类推, 完成 5 层的操作, 并最终获得一组最优解。

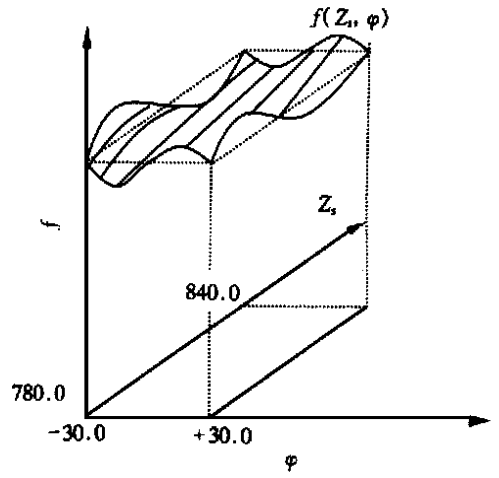


图 1 由 Z_s 和 φ 确定的二维解空间

Fig.1 Solve Space Defined by Z_s and φ

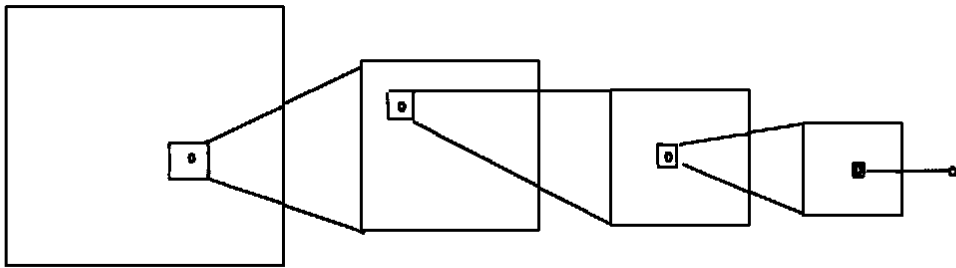


图 2 多分辨率分层范围控制

Fig.2 Multi-resolution and Scope Control on Each Layer

4 实验分析与结论

本文的实验资料为 3 个 SPOT 像对, 分别称为模型 1、模型 2 和模型 3。控制点由地形图上量取, 相应的像点坐标在 Virtuozo 数字摄影测量系统中获得。3 个模型的简略情况如表 2 所示。

表 2 3 个模型的简略情况

Tab.2 Brief Introduces to 3 Models

算例	模型 1	模型 2	模型 3
地形图比例尺	1:10 万	1:2.5 万	1:10 万
控制点数	17	73	27
像点数	291	83	319

应用光束法平差的改进模型和进一步应用分

层全局最优搜索控制算法对模型 1, 2, 3 分别选用不同数量的控制点的计算结果如表 3。

从表 3 可以发现:

1) 改进的平差模型更好地反映了影像的空间构像几何关系, 采用在物方空间坐标系中平差的策略和对未知参数部分分离-合并的思想, 可获得较满意的结果。但该模型有时计算结果也较差甚至较难收敛。

2) 分层全局最优的搜索算法具有最好的稳定性和完备性。它减少了未知参数的个数, 也去除了 X_s 与 φ 的相关性, 使非确定求解向确定计算接近。同时, 采用分层操作、多分辨率数据结构与范围控制, 极大地降低了搜索的组合数和计算量, 满足了搜索策略的要求。

表 3 计算结果
Tab.3 Calculating Results

模型	方法	控制点			检查点				
		点数	M_x	M_y	M_z	点数	M_x	M_y	M_z
1	2	5	0.661	2.205	2.954	12	21.610	31.504	24.036
		7	1.497	7.682	3.086	10	19.880	16.882	13.144
		9	6.909	11.452	7.597	8	14.622	12.420	12.100
	3	4	0.340	1.667	0.405	13	18.177	23.349	28.855
		5	1.107	1.774	2.168	12	16.695	26.760	15.238
		7	2.011	7.629	5.687	10	21.008	16.389	12.981
2	2	5	3.038	11.559	5.465	68	14.524	15.472	10.470
		7	6.871	10.111	5.843	66	11.447	15.837	10.188
		9	7.274	10.104	7.444	64	9.704	15.018	10.113
	3	4	0.579	2.028	0.993	69	22.252	14.703	8.061
		5	0.555	12.370	2.261	68	17.541	15.123	10.006
		7	6.313	10.981	5.266	66	15.193	15.292	10.586
3	2	5	1.149	6.674	0.940	22	27.730	21.359	12.695
		7	18.216	16.246	2.007	20	27.152	18.282	12.064
		9	16.580	16.961	4.250	18	28.820	17.722	11.268
	3	4	1.191	7.115	0.917	23	28.274	20.234	25.879
		5	1.197	6.784	3.647	22	27.841	20.904	16.080
		7	18.220	16.278	2.151	20	27.120	18.272	13.570

参 考 文 献

1 王之卓. 摄影测量原理. 北京: 测绘出版社, 1979
 2 田盛丰. 人工智能原理与应用. 北京: 北京理工大学出版社, 1993
 3 李德仁, 程家喻. SPOT 影像的光束法平差. 武汉测绘科技大学学报, 1988, 17(3): 162~170
 4 Konecny G, Lohmann P, Engel H, et al. Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments. Photogrammetry Engineering and Remote Sens-

ing, 1987, 53(9): 1 223~1 230
 5 Kratky V. Rigorous Photogrammetric Procession of SPOT Images at CCM Canada. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1989, 44: 53~71
 6 燕 琴. 异轨遥感影像的外方位元素解求: [硕士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 2000

作者简介: 燕 琴, 助理研究员。现主要从事摄影测量与遥感研究。主要成果: 遥感影像的几何处理; 利用高分辨率影像进行土地利用变化动态监测。
 E-mail: yanqin-99@263.net

Orientation of Remote Sensing Images Taken by CCD from Different Orbits

YAN Qin¹ ZHANG Zuxun² ZHANGJianqing²

(1 Photogrammetry and Remote Sensing Institute, Chinese Academy of Surveying and Mapping, 16 Beitaping Road, Haidian District, Beijing, China, 100039)

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

Abstract: We all know that the exterior elements of images, which are taken by CCD from different orbits, are difficult to obtain through ordinary bundle adjustment process because between the unknown exterior elements there is strong correlation which makes error equation badly ill. Some methods are provided to overcome the problem but they cannot bring satisfied results. Under the situation the paper gives other algorithms to successfully solve ill error equation and get the real exterior elements.

Firstly depending on the base principle for handling the images, an adjustment process in object coordinate system is designed and a separating—combining method is used in some correlate

elements to modify the base model in the bundle adjustment in order to reduce the strong correlation between the exterior elements. Therefore, more stable result is acquired in the calculation of the exterior elements of remote sensing images.

Another emphasize of the paper is designing a searching control solution based on the principles of AI, which separates the whole process into several layers with respective data resolution, and the global optimization is searched in each layer. It needs a fewer control points, removes the correlation between X_s and φ , maintains the RC and CC in a lower lever. The solution is a direct, simple and strict method.

The experiments, based on practice data, have proven that the algorithms, proposed in the paper, are correct and efficient.

Key words: remote sensing images from different orbits; separating-combining; control strategy for searching the best result in different layers

About the author: YAN Qin, assistant researcher. Her major interest in photogrammetry and remote sensing. Her typical work include geometric processing of remote sensing, dynamic monitor of land use change with high resolution images.

E mail: yanqin-99@263.net

(上接第 255 页)

search space, while a purely random search ignores information about the environment. In the proposed approach, feedback parameters are optimized components. The fitness function for genetic algorithm is formed by fuzzy entropy and fuzzy contrast. Then genetic algorithm is used to determine the "optimal" feedback parameters with the largest fitness function value. This paper also discusses the detail procedures of encoding, selection, crossover and mutation in the genetic algorithm.

Experiments are done on color aerial images. Based on the experimental results obtained in this study, the enhanced color images by the proposed approach are satisfied. This shows the feasibility of the proposed approach.

Key words: color image enhancement; saturation; lightness; genetic algorithm

About the author: PAN Li, associate professor, Ph. D candidate. Her research interests are digital photogrammetry and soft computing. Her chief achievements include fuzzy enhancement for aerial images etc.

E mail: zbzheng@wtusm.edu.cn