

利用模拟卫星摄影测量数据按 EFP 法光束法平差与直接前方交会计算高程的精度比较

王任享¹

(1 西安测绘研究所, 西安市雁塔路中段 1 号, 710054)

摘要: 首先对文献[2]中的 EFP 法光束法平差的数学模型作了必要的修改, 然后利用模拟数据按 EFP 法进行光束法平差。试验中, 按外方位元素不同的精度分别计算了光束法平差与直接前方交会高程精度, 并进行了比较分析。结果表明, 即使外方位元素达到很高的精度, 光束法平差依然必要。

关键词: 三线阵 CCD 影像; 光束法平差; 前方交会; 外方位元素

中图法分类号: P231.4; P236

卫星上越来越广泛地采用 CCD 线阵获取立体摄影测量的影像。卫星线阵传感器构建立体的方式, 除了人们熟知的 SPOT1~4 的单线阵、邻轨立体外, 还有 MOMS 的三线阵 CCD 像机、IKONOS 的单线阵同轨前后摆和 SPOT5 的两线阵同轨推扫等。其中三线阵 CCD 影像相对而言具有较强的几何条件。

另一方面, 航天摄影测量中, 外方位元素测定值的精度正不断提高, 摄站坐标的相对精度可达到 $\pm 1\text{m}$, 绝对精度可达到 $\pm 5\text{m}$, 角方位元素采用星相机测定, 精度可达到 $\pm 2'' \sim \pm 10''$ 。本文将在文献[2]的基础上对 EFP 法的数学模型作一修改, 并以数字模拟卫星摄影测量数据, 计算高程的精度。

1 EFP 法光束法空中三角测量的数学模型

假定将三线阵 CCD 影像按其真实的外方位元素进行投影, 便可建立以像元尺寸为分辨率的航线立体模型。理论上已知, 利用 CCD 影像自身不可能解求每一个取样周期的外方位元素。由于空间摄影卫星平台比较平稳, 外方位元素变化率不大, 允许采用适当大的间距(例如基线的 1/10 为间距)将航线模型进一步离散化, 近似地表达航线外方位元素模型, 从而可以采用 CCD 影像解算

进一步离散取样周期的外方位元素。EFP 法是以离散时刻, 即 EFP 时刻(定向片法称为定向片时刻)对已构建的立体模型以逆投影, 按经典的空中三角测量原理计算 EFP 时刻的像点坐标。任一个 EFP 时刻与其相距成基线整数倍的时刻均可构建一个空中三角锁, 如图 1 所示。

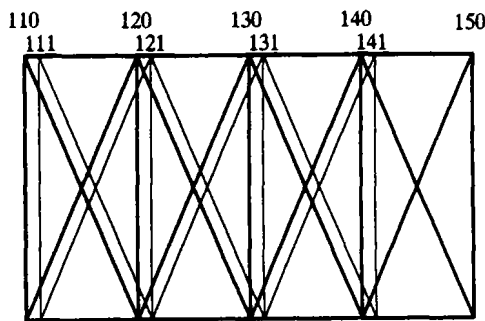


图 1 四条单位基线的空中三角锁

Fig. 1 The Arc Triangle of Four Single Baselines

但是, 实际上空中三角测量要求的 EFP 像点坐标只是三线阵 CCD 影像坐标(原始观测值)按近似外方位元素进行投影后, 再按 EFP 时刻的近似外方位元素进行逆投影的结果, 属于推导的观测值。由于逆投影时是利用与该 EFP 时刻尽可能接近的 CCD 影像投影坐标进行计算, 此二者在卫星摄影条件下时刻相距很小, 所以 EFP 像点坐标误差不大, 且在平差迭代中随着外方位元素的改正逼近而逼近, 逼近的收敛条件是地面点高

差相对于航高不大及姿态变化率不超过 10^{-3} ($^{\circ}$)/s, 这些条件在卫星摄影中均可满足。因而 EFP 法实质上是将三线阵 CCD 像坐标变换到 EFP 像坐标, 进而按经典的光束法平差数学模型为主进行光束法平差。本文对文献[2]中所列的数学模型作了必要的修改与补充。

1.1 前方交会

前方交会第 i 片、地面点 j 的改正数方程为:

$$\begin{pmatrix} V_{x_{ij}} \\ V_{y_{ij}} \end{pmatrix} = \mathbf{B}_{ij} \hat{\varrho} - \begin{pmatrix} l_{x_{ij}} \\ l_{y_{ij}} \end{pmatrix}, i = 0, \dots, n \quad (1)$$

式中, $V_{x_{ij}}, V_{y_{ij}}$ 为点坐标余差; \mathbf{B}_{ij} 为系数矩阵^[1]; $\hat{\varrho} = (\delta x_j, \delta y_j, \delta z_j)^T$, 地面点 j 坐标改正数; $l_{x_{ij}} = x_{ij} - x_{ij}, l_{y_{ij}} = y_{ij} - y_{ij}$; x_{ij}, y_{ij} 为 \mathbf{P}_i 代入共线方程计算值, 其中 $\mathbf{P}_i = (X_{s_i}, Y_{s_i}, Z_{s_i}, \varphi_i, \omega_i, \kappa_i)^T$, 外方位元素起始近似值或迭代逼近值。

1.2 后方交会及附加条件方程

1.2.1 后方交会

后方交会第 i 片、像点 j 的改正数方程为:

$$\begin{pmatrix} V_{x_{ij}} \\ V_{y_{ij}} \end{pmatrix} = \mathbf{A}_{ij} \hat{\varrho} - \begin{pmatrix} l_{x_{ij}} \\ l_{y_{ij}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其权为 $\mathbf{W}_1, i = 0, \dots, n$ 。式中, $\hat{\varrho} = (\delta X_j, \delta Y_j, \delta Z_j, \delta \varphi_i, \delta \omega_i, \delta \kappa_i)^T$ 为外方位元素改正数; \mathbf{A}_{ij} 为系数矩阵^[1]。

1.2.2 外方位元素连续(平滑)制约条件

在空间条件下, 外方位元素变化平稳, 同类外方位元素的二阶差分等零条件成立, 此条件可以将离散的各条空中三角锁联系为整体, 是 EFP 法中的重要条件。按同类元素相邻值的二阶差分为零, 给出:

$$V_k = \hat{q}_{k+1} - 2\hat{q}_k + \hat{q}_{k-1} \quad (3)$$

式中, $V_k = (V_{X_k}, V_{Y_k}, V_{Z_k}, V_{\varphi_k}, V_{\omega_k}, V_{\kappa_k})^T$; $l_k = P_{k+1} - 2P_k + P_{k-1}, k = 1, \dots, n-1$, 权为 $\mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3$ 。

式(2)、(3)生成法方程式系数阵为 6×6 、子矩阵的带宽为 12、维数为 $n \times n \times 6$ 的带状矩阵。

1.2.3 外方位元素量测值改正数方程式

改正数方程式为:

$$V_i = \hat{q}_i - l_i, i = 0, \dots, n, \text{ 权 } \mathbf{W}_4, \mathbf{W}_5 \quad (4)$$

式中, l_k 为外方位元素量测值; $l_k = P_i - P_i, P_i = (X_{S_j}, Y_{S_j}, Z_{S_j}, \varphi_i, \omega_i, \kappa_i)^T$ 。

考虑到后方交会像点改正数法方程式的主对角元素数值的大小、不同类方程间的性质以及试验的经验等因素, 给出权值: $\mathbf{W}_1 = 0.0001$, 对像点改正数方程; $\mathbf{W}_2 = 0.1$, 对摄站坐标; $\mathbf{W}_3 = 10$,

对角元素; $\mathbf{W}_4 = \frac{14 \times (\hat{\varrho}_p^2 + \hat{\alpha}^2) + 1}{(\hat{\varrho}_p + \hat{\alpha})^4 + 0.001}$, $\hat{\varrho}_p$ 为摄站坐标观测误差(单位为 m); $\mathbf{W}_5 = 0.001 \times \mathbf{W}_4$, $\hat{\alpha}$ 为角元素观测误差(单位为 $''$)。

2 平差数据的数学模拟

2.1 外方位元素数学模拟

严格模拟卫星飞行时的外方位元素是很困难的。本文依然利用文献[3]列出的数学模型, 并依飞行平稳条件设定的参数加以计算。

2.2 卫星摄影测量的基本参数

三线阵 CCD 像机参数: 正视像机与前、后视像机夹角 25.6° ; 正视像机焦距 $f_v = 500\text{mm}$; 像比例尺为 1:100 万; 前视像机焦距 $f_l = \frac{f_v}{\cos \alpha}$; 后视像机焦距 $f_r = \frac{f_v}{\cos \alpha}$; 摄影基线长约 250km; 航线宽 120km; 宽高比 $Y/H = 1/8$; 正视与前后视光线基高比 0.5; 前后视光线基高比 1.0; 卫星飞行高度为 500km; 运行周期约 90min, 地面高差 2 000 ~ 8 000m。生成旁向重叠 10% 的四条航线, 每条航线的起始 EFP 时刻角元素设定为 $\pm 0.5^{\circ}$, 模拟生成的外方位元素按 0.5s 为一组。摄站坐标变化率为 0.1m/s, 角元素变化率为 $10^{-3} (^{\circ})/s$ 。

3 试验计算

试验计算按前方交会与后方交会交替迭代进行, 无地面控制点参与。依外方位元素观测误差的不同, 分别计算光束法平差结果和直接前方交会结果。如表 1 和表 2 所示。表中, m_z 为高程综合误差, m_{z_3} 为三线交会区高程误差, m_{z_2} 为二线交会区高程误差, m_{φ} 为平差后 φ 角误差。

4 结 论

1) 光束法平差高程精度比直接前方交会有较大幅度的提高。

2) 摄站坐标误差为 $\pm 5\text{m}$ 、角元素误差为 $\pm 10''$ 、CCD 像元 10m, 或摄站坐标误差为 $\pm 5\text{m}$ 、角元素误差为 $\pm 2''$ 、CCD 像元 5m, 影像匹配误差为 0.3 像元, 光束法平差后高程的误差与像元相当。

3) 角方位元素观测误差达 $\pm 10''$, 光束法平差后, 角元素的误差可缩小到 $1.5'' \sim 2.5''$ 。

4) EFP 法平差, 基线数等于 3 的结果与其他基线数精度相当; 二线阵交会区的平差精度比三

表 1 四条航线平差结果统计表

Tab.1 Statistic Results of Adjustment of Four Strips

外方位元素误差		基线数		3				4				8				
线元素/m	角元素/s	像点误差/m	平差方法	m_z/m	m_{z3}/m	m_{z2}/m	m_{φ}/s	m_z/m	m_{z3}/m	m_{z2}/m	m_{φ}/s	m_z/m	m_{z3}/m	m_{z2}/m	m_{φ}/s	
0	0	0	前方交会	0	0	0		1	1	1		0	0	0		
			光束法	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
		±3	前方交会	6	4	7		6	5	6		5	5	6		
			光束法	6	4	7	0	6	5	6	0	5	5	6	0	
±1	±10	0	前方交会	66	27	79		61	37	78		50	36	79		
			光束法	7	6	8	2.3	7	7	7	2.0	6	6	6	0.9	
		±3	前方交会	66	27	80		61	37	79		50	36	80		
			光束法	10	8	11	2.4	10	9	10	2.1	9	8	10	2.0	
±1	±1	±0.5	前方交会	5	4	6		5	4	6		5	4	8		
			光束法	3	3	4	0.7	3	2	3	0.6	2	1	3	0.4	
		±3	前方交会	5	4	6		5	4	6		5	4	8		
			光束法	3	3	4	0.7	3	2	3	0.6	2	1	3	0.4	
±1	±2	±0.5	前方交会	8	6	9		7	6	8		7	6	10		
			光束法	7	5	8	0.7	7	6	8	0.8	6	5	8	0.6	
		0	前方交会	13	8	15		11	7	15		10	7	17		
			光束法	3	3	4	0.9	3	3	3	0.7	2	2	3	0.7	
		±0.5	前方交会	13	8	18		11	7	15		10	7	17		
			光束法	3	3	4	0.9	3	3	4	0.7	3	2	3	0.7	
		±1	±1	前方交会	13	8	16		11	8	15		11	8	17	
				光束法	4	4	5	0.9	4	4	4	0.7	3	3	4	0.7
±2	±2	前方交会	14	8	16		12	8	15		11	8	17			
		光束法	6	5	6	0.9	5	4	6	0.8	5	4	6	0.7		
±3	±3	前方交会	14	9	13		12	8	15		12	9	17			
		光束法	8	6	8	0.9	7	6	8	0.9	6	5	8	0.8		

注: 像点误差以物方比例尺表示。

表 2 四条航线平差结果统计表

Tab.2 Statistic Results of Adjustment of Four Strips

外方位元素误差		基线数		3				4				8				
线元素/m	角元素/s	像点误差/m	平差方法	m_z/m	m_{z3}/m	m_{z2}/m	m_{φ}/s	m_z/m	m_{z3}/m	m_{z2}/m	m_{φ}/s	m_z/m	m_{z3}/m	m_{z2}/m	m_{φ}/s	
±5	0	0	前方交会	13	6	15		12	7	17		9	7	15		
			光束法	5	3	6	1.0	5	4	7	0.9	4	3	5	1.1	
		±3	前方交会	14	7	17		13	8	17		9	7	14		
			光束法	9	6	7	0	6	5	6	0	5	5	6	0	
±1	±10	0	前方交会	66	27	79		61	37	78		50	36	79		
			光束法	7	6	8	2.3	7	7	7	2.0	6	6	6	0.9	
		±3	前方交会	66	27	80		61	37	79		50	36	80		
			光束法	10	8	11	2.4	10	9	10	2.1	9	8	10	2.0	
±5	±1	±0.5	前方交会	5	4	6		5	4	6		5	4	8		
			光束法	3	3	4	0.7	3	2	3	0.6	2	1	2	0.4	
		±3	前方交会	5	4	6		5	4	6		5	4	8		
			光束法	3	3	4	0.7	3	2	3	0.6	2	1	2	0.4	
±5	±2	±0.5	前方交会	8	6	9		7	6	8		7	6	10		
			光束法	7	5	8	0.7	7	6	8	0.8	6	5	8	0.6	
		0	前方交会	13	8	15		11	7	15		10	7	17		
			光束法	3	3	4	0.9	3	3	3	0.7	2	2	3	0.7	
		±0.5	前方交会	13	8	18		11	7	15		10	7	17		
			光束法	3	3	4	0.9	3	3	4	0.7	3	2	3	0.7	
		±1	±1	前方交会	13	8	16		11	8	15		11	8	17	
				光束法	4	4	5	0.9	4	4	4	0.7	3	3	4	0.7
±2	±2	前方交会	14	8	16		12	8	15		11	8	17			
		光束法	6	5	6	0.9	5	4	6	0.8	5	4	6	0.7		
±3	±3	前方交会	14	9	13		12	8	15		12	9	17			
		光束法	8	6	8	0.9	7	6	8	0.9	6	5	8	0.8		

线交会区大约低 1.4 的因子。

5) 摄站坐标误差 $\pm 1\text{m}$, 角元素误差 $\pm 2''$, CCD 像元 1m , 影像匹配精度 $0.3 \sim 0.5$ 像元, 光束法平差后, 高程精度可从直接前方交会的 $\pm 11\text{m}$ 提高到 $\pm 3\text{m}$ 。

综上所述, 在卫星摄影测量中, 即使外方位元素误差很小, 利用三线阵 CCD 影像, 按 EFP 法平差, 高程精度比直接前方交会都有较大提高, 但三线阵 CCD 相机比起单线阵或二线阵相机光学机械要复杂些, 同时增加了采集正视影像的数据量。

本文的试验结果是基于模拟数据以及外方位元素的误差属于正态分布给出的。

参 考 文 献

1 王之卓. 摄影测量原理. 北京: 测绘出版社, 1979

2 王任享. 利用卫星三线阵 CCD 影像进行光束法平差的数学模拟实验研究. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 304~309

3 Wu J. Triplet Evaluation of Stereopushbroom Scanner Data. XV ISPRS comm. III, the Congress Rio de Janeiro, 1984. 1 164~1 178

作者简介: 王任享, 研究员, 中国工程院院士。现主要从事航天摄影测量与遥感研究。代表成果: 卫星摄影测量; 三线阵 CCD 影像的摄影测量处理及计算机仿真软件; 影像匹配中的“断面引导逼近原理”; 选权迭代权函数的探讨; 粗差定位的二步迭代法; $QVV \cdot P$ 矩阵的数学分析与应用等。在国内外学术刊物及学术会议上发表论文 50 多篇。

E-mail: rxwang@pub.xaonline.com

Comparison of the Height Accuracy Obtained from EFP Bundle Adjustment and Forward Intersection Using Simulation Space Photogrammetric Data

WANG Renxiang¹

(1 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, 1 Middle Yanta Road, Xi'an, China, 710054)

Abstract: In this paper, the mathematic model of the EFP bundle adjustment in reference 2 is necessarily modified firstly, then the EFP bundle adjustment is processed using mathematic simulation data. In the experiment, according to the variant of the exterior orientation elements, the height accuracy of the bundle adjustment and only the forward intersection are calculated respectively and compared. The conclusion is that the exterior orientation elements have quite high accuracy, even though the bundle adjustment is necessary.

Key words: three-line array CCD image; bundle adjustment; forward intersection; exterior orientation element

About the author: WANG Renxiang, researcher, member of the Chinese Academy of Engineering. He is concentrated on the research of aerial photogrammetry and remote sensing. His major achievements include satellite photogrammetry; digital photogrammetry of tri-linear CCD imaging processing and computer simulation software; principle of "profile guided approach" on image matching; studies on weight function for the iterated weighted least squares; gross errors location by two step iterations method; application and mathematical analysis about $QVV \cdot P$ matrix, etc. His published papers in academic periodical and academic meeting are more than 50.

E-mail: rxwang@pub.xaonline.com