

EFP 全三线交会光束法平差

王任享^{1,2} 王建荣^{1,2} 胡 莘^{1,2}

1 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安, 710054

2 西安测绘研究所, 陕西 西安, 710054

摘要:短于两条基线的三线阵影像平差, 由于该平差系统几何条件较差, 不可能有严格的数学解。本文提出基于等效框幅像片(简称 EFP)的全航线三线交会的光束法平差。该平差方法采用特殊措施, 即将平差分为两个步骤:① 创造各种条件使法方程有解, 但并不顾及平差航线模型可能有较大的系统变形;② 将含有较大系统变形的航线模型数据与只含有较大偶然误差的航线模型初始值进行比较, 从中提取航线模型系统值并加以改正。最后通过模拟数据和实际影像数据进行试验, 取得了较好的结果。

关键词:卫星摄影测量; 全三线交会; 光束法平差; 上下视差

中图法分类号: P236

文献标志码: A

利用卫星影像进行光束法平差是提高摄影测量定位精度的有效途径。对于框幅影像, 可直接采用经典的光束法平差理论^[1], 但对于线阵推扫影像, 影像系动态摄影, 无论在理论上和方法上都有待发展, 目前大都采用定向片法^[2]和等效框幅像片法(简称 EFP)^[3]进行光束法平差。但这两种方法对航线两端的各一条基线范围内只能有两线交会, 基高比差, 高程精度要比三线交会低一倍, 会影响无地面控制点摄影测量定位的高程精度。

本文在 EFP 光束法平差基础上, 提出了一种新的光束法平差方案, 即 EFP 全三线交会光束法平差, 确切的含义应是全航线全三线交会光束法平差。这种平差方法尽管在理论上没有 EFP 光束法平差严格, 但也可以实现平差后能有效削弱外方位元素(简称 EO)角元素高频误差对平差结果的影响, 且航线模型又无系统变形和明显的上下视差。

1 EFP 全三线交会光束法平差的基本思路

在定向片法或 EFP 法光束法平差中, 只能计算图 1 中地面覆盖区 1-3 段内的外方位元素, 如果地面段只有两条基线(基线=前视或后视与正

视相机摄影中心的距离), 则地面点中只有点 B 有三线交会, 其余均为两线交会, 两线交会要比三线交会高程精度要低一倍。其实点 A 和点 C 也有三线可交会, 如果也列入三线交会, 则外方位平差计算要从 0 到 4, 其中 0-1 和 3-4 参数要从远离摄影地面段 1 个基线约 250 km 以外起算, 但这两段参数平差计算的几何条件极差。

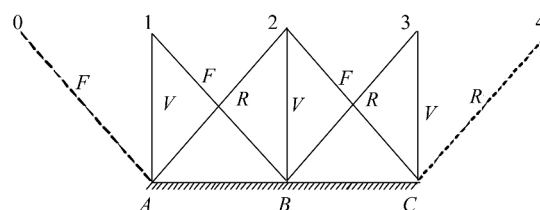


图 1 两条基线影像交会

Fig. 1 Intersection of the Two Baseline Image

实际上, 卫星对地球摄影, 由于云的影响, 大量存在很短的航线, 也需要计算图 2 中 0-5 的外方位元素。然而, 光束法平差中只有 0-1, 2-3, 4-5 段内有影像观测值, 其方程式组成的 Q_{xx} 矩阵正值分布如图 3 所示。从图 3 不难看出, 平差的几何条件非常差。在无地面控制点条件下, 对于短航线影像的光束法平差, 既要使平差后的航线立体模型没有大的系统误差, 又要使上下视差很小, 这一命题在学术实现难度很大。

本文提出的平差方法设计思路特殊之处是将

收稿日期: 2014-04-08

第一作者: 王任享, 教授, 中国工程院院士, 现主要从事卫星摄影测量的理论和应用研究。

通讯作者: 王建荣, 博士, 副研究员。E-mail: jianrongwang@sina.com

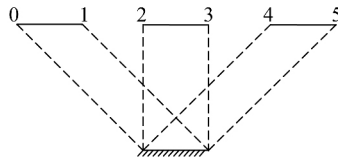
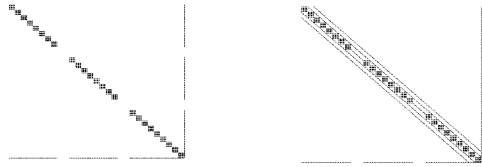


图2 任意段三线阵影像交会

Fig. 2 Intersection of the Random Length Three Linear Array Image



(a) 法方程非零元显示 (b) 法方程非零元显示(含EO连续条件)

图3 法方程非零元显示

Fig. 3 Showing the Nonzero Elements in Normal Equation

平差分为两个步骤:1)创造各种条件使三线阵影像光束法平差有解,达到建立“无上下视差”(在像点观测误差量级)立体模型,而对航线模型变形只作适当约束。本文将这一步骤称作“变形空三”;2)根据模型变形规律,建立系统变形改正的数学模型,并对含有系统误差的地面点坐标改正。其基本思路如图4所示。

2 EFP全三线交会光束法平差

2.1 数学模型

与EFP光束法平差类似,EFP全三线交会光束法平差仍采用后方交会与前方交会交替迭代的数学模型。

1) 前方交会

前方交会第*i*片,地面点*j*的改正数方程为:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{V}x_{ij} \\ \mathbf{V}y_{ij} \end{pmatrix} = \mathbf{B}_{ij} \boldsymbol{\delta}_j - \begin{pmatrix} lx_{ij} \\ ly_{ij} \end{pmatrix}, i = 0, \dots, n \quad (1)$$

式中, $\mathbf{V}x_{ij}$ 、 $\mathbf{V}y_{ij}$ 为像点坐标余差; \mathbf{B}_{ij} 为系数矩阵^[4]; $\boldsymbol{\delta}_j = (\delta X_j \ \delta Y_j \ \delta Z_j)^T$,为地面的坐标*j*改正数; $lx_{ij} = x_{ij} - \hat{x}_{ij}$, $ly_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$, \hat{x}_{ij} , \hat{y}_{ij} 为 $\hat{\mathbf{P}}_i$ 代入共线方程得到的计算值; $\hat{\mathbf{P}}_i = (\hat{X}_i \ \hat{Y}_i \ \hat{Z}_i \ \hat{\varphi}_i \ \hat{\omega}_i \ \hat{\kappa}_i)^T$,外方位元素起始近似值或迭代逼近值。

2) 后方交会

后方交会第*i*片,像点*j*的改正数方程为:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{V}x_{ij} \\ \mathbf{V}y_{ij} \end{pmatrix} = \mathbf{A}_{ij} \boldsymbol{\delta}_i - \begin{pmatrix} lx_{ij} \\ ly_{ij} \end{pmatrix}, i = 0, \dots, n \quad (2)$$

式中, $n = \text{基线数} \times 10 + 1$ 为航线像片数; $\boldsymbol{\delta}_i =$

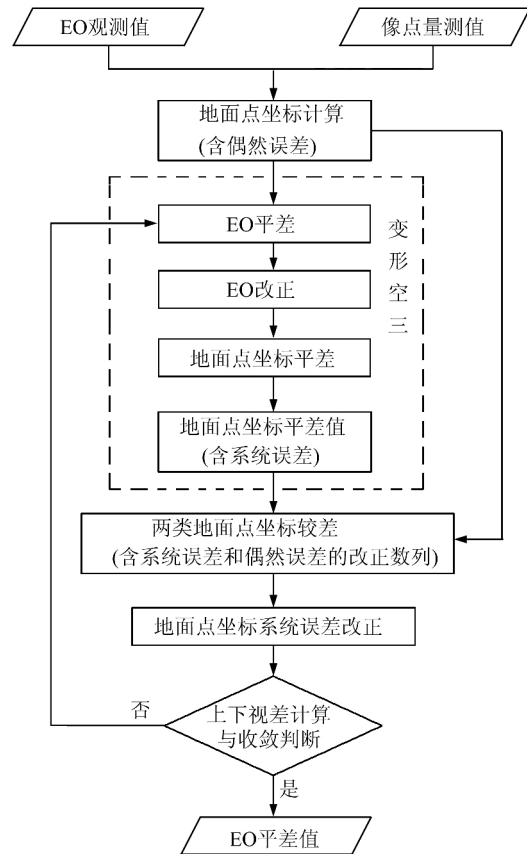


图4 EFP全三线交会光束法平差原理

Fig. 4 Principle of the EFP Bundle Adjustment of all Three Line Intersection

$(\delta X_{si} \ \delta Y_{si} \ \delta Z_{si} \ \delta \varphi_i \ \delta \omega_i \ \delta \kappa_i)^T$ 为外方位元素改正数; \mathbf{A}_{ij} 为系数矩阵^[4]。

3) 外方位元素连续(平滑)约束条件

根据EFP时刻的距离,一条基线的三线阵CCD影像可建立10条空中三角锁,各条三角锁是独立的,为了将离散各条空中三角锁联系为整体,提出同类外方位元素差分等零条件,对外方位线元素和角元素进行平滑处理。在实际影像处理中,线元素采用三阶差分为零、角元素采用二阶差分为零条件。第*k*张等效框幅相片角元素二阶差分误差方程如式(3),线元素三阶差分误差方程如式(4)。

$$\mathbf{V}_k = \boldsymbol{\delta}_{k+1} - 2\boldsymbol{\delta}_k + \boldsymbol{\delta}_{k-1} - \mathbf{l}_k, \quad k = 1, \dots, n-1 \quad \text{权 } P_1 \quad (3)$$

式中, $\mathbf{V}_k = (V\varphi_k \ V\omega_k \ V\kappa_k)^T$; $\boldsymbol{\delta}_k = (\delta\varphi_k \ \delta\omega_k \ \delta\kappa_k)^T$ 为角元素改正数; $\mathbf{l}_k = \hat{\mathbf{P}}_{k+1} - 2\hat{\mathbf{P}}_k + \hat{\mathbf{P}}_{k-1}$, $\hat{\mathbf{P}}_k$ 为外方位角元素平差值。

$$\mathbf{V}_k = \boldsymbol{\delta}_{k+2} - 3\boldsymbol{\delta}_{k+1} + 3\boldsymbol{\delta}_k - \boldsymbol{\delta}_{k-1} - \mathbf{l}_k, \quad k = 2, \dots, n-1 \quad \text{权 } P_2 \quad (4)$$

式中, $\mathbf{V}_k = (\mathbf{V}X_{sk} \ \mathbf{V}Y_{sk} \ \mathbf{V}Z_{sk})^T$; $\boldsymbol{\delta}_k = (\delta X_{sk} \ \delta Y_{sk} \ \delta Z_{sk})^T$ 为线元素改正数; $\mathbf{l}_k = \hat{\mathbf{P}}_{k+2}$

$-3\hat{P}_{k+1} + 3\hat{P}_k - \hat{P}_{k-1}$, \hat{P}_k 为外方位线元素平差值。

2.2 航线模型系统变形的改正

在 EFP 全三线交会光束法平差过程中, EO 平滑条件赋比较大的权, 而 EO 观测值赋相对小的权, 这样就使 EO 观测值偶然误差的作用大大被削弱, 并可以得到上下视差很小的航线模型。由于影像的几何条件很差, 平差得到的地面点坐标含有明显的系统误差, 但残余上下视差并不大(影像匹配误差量级)。这一系统误差特征与用 EO 观测值直接前方交会的地面点坐标初值有明显区别, 后者是偶然误差较大, 无系统误差, 这样就创造了利用两类误差特性的不同来进一步平差的条件。利用以往摄影测量观测值与附加外方位元素观测值平差处理的经验, 不难从这两类地面点坐标中剥离出系统误差, 进而对含有系统误差的地面点坐标改正。

2.3 上下视差计算与迭代收敛

在光束法平差中, 上下视差并不作为参与平差的项目, 只用于检测平差收敛的状况。在 EFP 全三线交会光束法平差过程中, 地面点系统误差消除后, 利用前方交会来计算上下视差, 可以发现平差值经系统误差改正后的地面点与 EO 平差值不匹配, 因此, 应将系统误差改正后的地面点再回代到光束法平差中。反复迭代, 直至上下视差不再减少为止。

3 试验分析

3.1 模拟试验

本文模拟出一套完整的无误差的外方位元素数据, 将该值作为真值参与后续的模拟计算, 外方位元素误差根据需要适当选择来参与实验研究。模拟计算时像点坐标误差为 0.3 像元, 卫星姿态稳定度为 1×10^{-3} (°/s), 正视相机与前、后视相机夹角 26° , 卫星飞行高度 500 km, 地面像元分辨率 5 m。

为了详细描述 EFP 全三线交会光束法平差过程中误差情况, 对外方位元素加入一定量级的随机误差, 在无地面控制点条件下进行 EFP 全三线交会光束法平差处理, 其变形改正误差统计如表 1, 高程误差变化如图 5~图 9 所示。

为了充分反映外方位元素误差和影像分辨率对定位精度的影响。针对不同影像分辨率, 对外方位元素赋予不同量值的误差, 进行 EFP 全三线交会光束法平差后, 统计其对定位精度的影响, 结果如表 2 所示。

表 1 EFP 全三线交会光束法平差过程中定位误差统计

Tab. 1 Statistics of Position Errors in Process of EFP Bundle Adjustment of all Three Line Intersection

m_x /m	m_y /m	m_z /m	mp_y /像元	平差过程
5.1	2.8	8.9	1.37	地面点初值误差
5.3	5.3	10.7	0.36	变形空三后地面点误差(第一步)
4.4	2.4	5.4		系统误差改正后地面点误差(第二步)
4.0	2.0	5.3	0.4	迭代 4 次后地面点误差

注: 线元素误差 3 m, 角元素误差 2", $Z_{初}/Z_{终} = 0.61$ 。

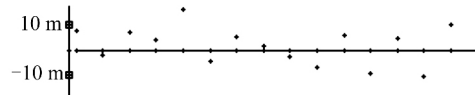


图 5 高程初值误差

Fig. 5 Initial Value Error of Elevation

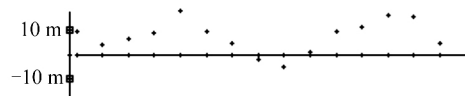


图 6 变形空三后高程误差

Fig. 6 Elevation Error After Deformation Aerial Triangulation

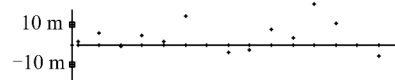


图 7 初值和变形空三后的高程误差较差

Fig. 7 Comparison of Elevation Error Between Initial Value and Deformation Aerial Triangulation

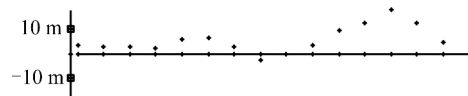


图 8 剥离出的高程系统误差

Fig. 8 Elevation of System Error by Stripped out

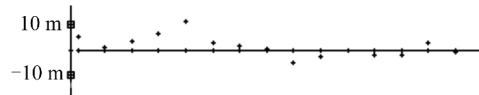


图 9 系统误差改正并迭代后高程误差

Fig. 9 Elevation Error After System Error Correction and Iterations

从表 1、表 2 和图 5~图 9 可以看出:

1) 在 EFP 全三线交会光束法平差过程中, 变形空三(第一步)后上下视差从 1.4 像素改善至 0.4 像素左右, 但定位误差反而变大, 从 8.9 m 增大到 10.7 m, 高程方向误差变化明显。

2) 系统误差改正后(第二步), 上下视差没有明显变化, 但定位精度提高幅度较大。

表2 模拟数据定位误差统计

Tab. 2 Statistics of Position Errors with Simulation Data

外方位元素误差		像元分辨率/m	m_x/m	m_y/m	m_z/m	mp_y /像元	$Z_{初}/Z_{终}$	
线元素/m	角元素/($''$)						初值	终值
3	2	5	5.1	2.8	8.7	1.37	初值	0.61
			4.0	2.0	5.3	0.41	终值	
1	1	2	2.3	1.2	3.9	1.53	初值	0.64
			1.8	0.9	2.5	0.43	终值	
1	1	1	2.3	1.2	3.8	2.95	初值	0.60
			1.8	0.9	2.3	0.48	终值	
1	0.6	0.6	1.5	0.8	2.5	3.28	初值	0.60
			1.1	0.5	1.5	0.61	终值	

注:平差航线长度 $0.8B(B=230\text{ km})$,约 184 km。

3) 经 EFP 全三线交会光束法反复迭代平差后,上下视差达到像点量测误差的量级,且定位精度有明显改善,其中高程方向可提高 0.6 因子。

3.2 实际卫星影像试验

实际卫星影像采用天绘一号 01 星 2010-10-

14 的摄影数据,影像长度约 250 km,影像分辨率 5 m。在无地面控制点条件下进行 EFP 全三线交会光束法平差,并利用全野外 GPS 测量点作为检查点,用于进行无地面控制点条件下的定位精度统计,其结果如表 3 所示。

表3 实际数据定位误差统计

Tab. 3 Statistics of Position Errors with Real Data

摄影时间	m_x/m	m_y/m	m_z/m	mp_y /像元	$Z_{初}/Z_{终}$	检查点数量
2010-10-14	15.1	12.1	10.0	3.99	初值	0.48
	9.6	10.6	4.8	0.55	终值	9

注:平差航线长度 250 km,角元素误差约 $2.2''$,分辨率 5 m。

从表 3 可以看出,EFP 全三线交会光束法平差能有效地削弱 EO 角元素高频误差对平差结果的影响,高程精度提高约 0.5 因子,同时上下视差保持在 0.5 像素左右。

4 结 语

EFP 全三线交会光束法平差,解决了全航线(包含航线两端各一条基线)均有三线交会的平差问题,能有效消除航线模型的系统变形,且航线模型无明显的上下视差。其原理和方法既适用于三线阵 CCD 影像平差的处理,又可用于二线阵影像平差处理中^[5]。EFP 全三线交会光束法平差已成功应用于天绘一号卫星影像处理,为实现无地面控制点条件下测制 1:5 万比例尺地形图的目标发挥了重要作用^[6]。

参 考 文 献

- [1] Wang Zhizhuo. Principle of Photogrammetry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1990 (王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京:测绘出版社, 1990)
- [2] Ebner H, Kornus W, Kornus T, et al. Orientation of MOMS-02/D2 and MOMS-2P/Priroda Imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote

Sensing, 1999, 54: 332-341

- [3] Wang Renxiang. Bundle Adjustment of Satellite Borne Three-Line Array CCD Image[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(4): 379-385 (王任享. 卫星三线阵 CCD 影像光束法平差研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(4): 379-385)
- [4] Wang Renxiang. Satellite Photogrammetric Principle for Three-line-array CCD Imagery[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006 (王任享. 三线阵 CCD 影像卫星摄影测量原理[M]. 北京:测绘出版社, 2006)
- [5] Wang Renxiang, Wang Jianrong. Technology of Bundle Adjustment Using Two-line-array CCD Satellite Image Combined Laser Ranging Data [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014, 31(1): 1-5 (王任享, 王建荣. 二线阵 CCD 卫星影像联合激光测距数据光束法平差技术[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(1): 1-5)
- [6] Wang Renxiang, Hu Xin, Wang Jianrong. Photogrammetry of Mapping Satellite-1 Without Ground Control Points[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 1-5 (王任享, 胡莘, 王建荣. 天绘一号无地面控制点摄影测量[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 1-5)

The EFP Bundle Adjustment of all Three Line Intersection

WANG Renxiang^{1,2} WANG Jianrong^{1,2} HU Xin^{1,2}

1 State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China

2 Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: Due to the poor geometric characteristics of the adjustment system, there will be no strict mathematical solution to the three linear array images shorter than two baselines. Therefore, the whole route adjustment of three intersection method based on the equivalent frame photo (EFP) is put forward in this paper. Special measures are taken in the method and the adjustment is divided into two steps. First step, various conditions are created for normal equation solution, while the obvious system deformation of adjustment course model is not taken into account. Second step, the comparison is made between the route model data containing larger system deformation and the initial value of route model containing larger accidental errors, and the system value of route model can be attracted and corrected. Finally, the tests using simulation data and real image data are conducted and good results are achieved.

Key words: satellite photogrammetry; all three line intersection; bundle adjustment; vertical parallax

First author: WANG Renxiang, professor, Academician of Chinese Academy of Engineering. His research interests include satellite photogrammetry methods and applications.

Corresponding author: WANG Jianrong, PhD, associate researcher. E-mail: jianrongwang@sina.com