

文章编号: 1671-8860(2003)04-0379-07

文献标识码: A

卫星三线阵 CCD 影像光束法平差研究

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:简单回顾了“定向片法”和“EFP法”计算外方位元素的原理,指出仅仅利用三线阵CCD影像及地面控制点的空中三角测量,不能实现单航线角隅各一个控制点的平差计算模型与实地的相似性(不计像点观测误差)。利用EFP法空中三角测量的原理,进一步分析了其原因,提出了在相邻EFP像片之间增设连接点,同时要求在航线首末基线范围内的连接点带地面坐标或连接点在其左、右EFP像片上的坐标之一是其真中心投影坐标。在其控制下,平差结果实现了包括基线数 $B=2$ 在内的单航线平差计算的模型基本与实地相似,并列出了在多种情况下利用计算机模拟数据进行平差精度统计的结果。最后就解决连接点真中心投影坐标获取问题,对三线阵CCD相机提出了附加要求,即在正视CCD线阵右侧附加两个1500像元×1500像元(或更小)的CCD面阵的构想方案。

关键词:三线阵CCD影像; 小CCD面阵; 空中三角测量

中图法分类号: P236; TP751; TP73

随着卫星摄影外方位元素量测技术的进步,摄站坐标精度可达到m级,角元素精度可达到 $2\sim4''$ 。一些商用摄影测量卫星,如IKonos等采用单线阵CCD相机、摇摆立体成像; SPOT 5卫星采用双线阵CCD相机获取立体影像。这种单线阵或双线阵CCD相机获取的立体影像构建地面模型时要完全依赖导航记录的外方位元素值。在角元素精度为 $2''$ 的情况下,影像匹配精度为0.3像元,对于诸如IKonos的1m分辨率影像,进行前方交会计算高程,其误差大约为 $\pm 12m$,远大于像元分辨率高程。在实际应用中,要由用户方在一个基线或更短的范围内提供适当的控制点,按多项式拟合平差,以提高精度。

摄影测量表明,框幅像片空中三角测量应用外方位元素观测值联合平差可以削弱外方位元素误差的影响。单线阵或双线阵CCD影像不能应用影像本身构建空中三角网平差,所以未能充分发挥外方位元素观测值精度的潜力。

三线阵CCD相机由前视、正视和后视3个线阵组成,其瞬间获取的三线阵影像在几何上等同于相同参数的框幅像片上的三条影像,这种结构的影像提供了利用影像本身构建空中三角测量网的可能性。再联合应用外方位元素平差,可以削弱外

位元素误差的影响,并可剔除粗差。在影像匹配精度为0.3像元时,立体高程精度优于像元分辨率高程^[1],在外方位元素观测值不含系统误差的情况下,立体摄影测量可以不依靠地面控制点。这样的空间摄影测量系统适合于全球性的摄影测量,特别是在地外星球如登月工程、火星探测等的立体摄影测量中有重要的价值。

三线阵CCD影像的空中三角测量的研究已有相当长的历史,德国已成功应用于MOMS-02/D2和MOMS-2P/PRIRODA。笔者也作过大量研究,但在仅仅利用三线阵CCD影像及地面控制点的空中三角测量方面,尚有不尽人意的地方,如在二线交会区及基线小于4时,平差精度太差,应舍去不用^[2,3]。

三线阵CCD影像空中三角测量实际上关系到两部分内容:①如何利用某一时刻(CCD相机推扫摄影周期数)周围的影像计算该时刻的外方位元素;②构成航线空中三角测量的方案。本文将对“定向片法”和“EFP法”的有关技术作简要介绍,然后对单航线、航线四角隅各一控制点(以下简称单航线,4控点)三线阵CCD影像空中三角测量存在的问题及解决途径作重点讨论。

1 三线阵 CCD 影像摄影时刻的外方位元素计算

三线阵 CCD 影像的三条线阵等价于一个相同参数的框幅像片上的 3 条影像, 提供了解算该时刻外方位元素的基础。但是一个像点只能提供两个观测方程, 而待解参数除了该时刻的 6 个外方位元素外, 每一个像点额外带入其地面坐标三个未知数。因此仅仅依靠此三条影像, 无法解算该时刻的 6 个外方位元素。但是是否可以仿照框幅像片那样, 采用立体像对的连续空中三角测量的方法加以解决? 遗憾的是, 三线阵相机瞬时时刻仅仅记录了三条影像, 由于飞行状态、地形起伏等因素的影响, 用于计算外方位元素的像点并不能都落在这三条线阵上, 解决的办法是将该瞬时邻近时刻获取的影像, 归算到该瞬时时刻的解算方程上。这一设想基本的出发点应是飞行器飞行状态平稳, 外方位元素的变化连续性较好, 空间摄影能保持此条件, 故本文的研究将限定在航天摄影测量。现有的研究遵循这一思路的有定向片法^[2]与 EFP 法两种归算方法。

定向片的归算方法是, 假定两个相邻定向片之间的像点相应的外方位元素可看作由此两定向片外方位元素(待求值)内插生成^[4]。EFP 法是将 EFP 像片时刻相近的像点坐标通过投影变换为 EFP 像片上的像点坐标, 然后以 EFP 像点坐标按共线方程组成未知数误差方程解算外方位元素^[5]。

以上两种归算方法分别在定向片法空中三角测量和 EFP 法空中三角测量中得到成功的应用。从理论上讲, 定向片的归算方法也可以引用到 EFP 法空中三角测量方案中, 为此, 将文献[4]中的公式作一定变换得:

$$W_a = \begin{cases} (t_i + OA - t_a)/OA, & t_a - t_i \geq 0 \\ (t_a - (t_i - OA))/OA, & \text{其他} \end{cases}$$

式中, t_i 为 EFP 像片时刻; t_a 为摄取像点 a 的时刻; $OA = B/D$, B 为航线基线数; D 为一条基线内规定的 EFP 像片数。在 EFP 法空中三角测量中, 取 $D=10$ 。

利用文献[5]提供的模拟数据进行平差计算, 以第二航线为例, 计算结果列于表 1。从统计误差看, 在基线数小于 4 时, EFP 法归算比定向片法归算更接近于真中心投影坐标的结果。基线数大于 4 时, 三者误差相当, 说明 EFP 法归算和定向片法归算都是可以接受的方案。

表 1 两种归算法平差与影像真中心投影坐标平差比较

Tab. 1 Comparison of Two Kinds of Evaluation Adjustment and Adjustment with Image

True Central Projection Coordinates

B	真中心投影坐标 /m			EFP 法归算 /m			定向片法归算 /m		
	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
2	4	3	13	5	3	12	6	4	21
3	3	4	8	4	3	11	7	3	17
4	3	3	7	5	3	9	6	4	11
5	3	4	7	3	3	7	4	3	8
10	3	5	6	3	4	7	3	5	6
19	3	3	6	3	3	6	4	4	6

注: 模拟数据基本参数见文献[5], $m_p = \pm 5\text{m}$ 为摄站坐标误差; $m_\varphi = \pm 10''$ 为角元素误差($m_\varphi, m_\omega, m_\kappa$ 相同); $m_1 = \pm 3\text{m}$ 为像点坐标误差(物方比例)。

2 利用三线阵 CCD 影像和地面控制点的空中三角测量方案

2.1 定向片法空中三角测量

定向片法是采用一定间距的像片作为待求外方位元素的定向片, 定向片之间的影像的外方位元素看作是其相邻定向片外方位元素的多项式(一次、三次)的插值, 以此减少航线的待求外方位组数。

假定相邻定向片间距为 OA , 基线为 B (正视

线阵对前视或后视线阵摄影中心的距离), 由文献[4]分析可知, 当 $B/OA=D$, D 为整数时, 各序列定向片可以构成空中三角锁, D 为一条航线中空中三角锁的个数。当三角锁中没有控制点和附加的坐标观测值时, 将出现法方程式系统奇异。为了解决稳定解的问题, 经过分析得出, 按 $B/OA=D+0.25$ 有稳定解, 且精度较高。这样要求航线长度应大于 3 条基线, 但同时破坏了定向片各序列可以构成框幅式空中三角锁的性能。利用模拟数据模拟 MOMS-02/b2 平差表明^[2], 单航线、4 控点平差即使只统计三线交会区(舍去二线交会区)

的点误差, 平差精度仍不好, 只有联合应用摄站坐标误差 $\pm 5\text{m}$ 、角元素误差 0.5mgrad 的观测值平差, 才能取得较好的结果。

2.2 EFP 法空中三角测量

EFP 法空中三角测量规定, 在一个基线范围内取 10 个等间距的待求外方位元素的 EFP 像片。考虑到法方程系统可能出现奇异, EFP 法空中三角测量采用了一个附加条件, 即对于卫星摄影中, 线外方位元素和角外方位元素都可接受的“同类外方位元素的二阶差分等零条件”, 并作为带权的条件参与光束法平差, 从而避免了航线空中三角测量未知数法方程系统奇异问题, 同时各 EFP 序列保持了框幅像片空中三角锁的性质。各三角锁含独立的地面模型, 但地面模型之间没有直接的联系条件, 这一性质便于探讨单航线平差的误差性质。笔者在文献[5]中初步讨论了单航线、4 控点平差精度不高的原因。

至今为止, 不管是定向片法还是 EFP 法空中三角测量的单航线、4 控点平差, 精度都不理想。笔者认为, 根本的原因是计算的地面模型与实地不相似(这里的相似是指观测值无误差情况下, 空中三角测量计算的地面模型应与实地相似)导致的。由于笔者没有掌握定向片法空中三角测量算法, 故以下仅对 EFP 法空中三角测量的光束法平差作进一步研究, 试图在依靠外方位元素观测值平差方案之外, 找到其他也能得到较好平差精度的途径。

3 EFP 法空中三角测量方案的扩展

3.1 EFP 法单航线空中三角测量误差特点

首先利用真外方位元素按 EFP 法空中三角单航线、4 控点平差方案计算误差, 作为平差精度的极限值列于表 2。此外, 还利用法方程式逆阵主对角元及像点观测值标准差计算内部精度列于表 3, 供判断平差精度时参考。

表 2 平差精度极限值/m

Tab. 2 Accuracy Limits

B	m_x	m_y	m_z	m_{z_3}	m_{z_2}
2	0	2	6	6	7
3	1	1	6	5	7
4	1	2	6	5	6
5	1	2	5	5	7
10	1	2	5	5	6
19	1	2	5	5	6

注: $m_p = m_\varphi = 0$, $m_1 = \pm 3\text{m}$, m_2 为二线交会点误差。

m_3 为三线交会点误差, 4 条航线综合统计。

表 3 内部精度/m

Tab. 3 Interior Accuracy

三线交会			二线交会		
m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
1.7	1.7	4.3	3.0	2.2	8.6

注 $\sigma_x = \sigma_0 \frac{H}{f} \sqrt{\rho_{xx}}$, ρ_{xx} 为法方程逆阵主元。

从表 3 数据可以看出, 二线交会区比三线交会区误差大一倍, 这反映了基高比条件的作用。但从平差精度极限值看, 二线交会区精度并不比三线交会区低太多。在二线交会区, 内部精度略低于平差极限精度。进一步根据不同基线数按 EFP 空中三角自由网平差计算, 并利用航线四角隅各一个控制点作绝对定向, 统计精度列于表 4。同时将表 4 中高程误差依基线数图解, 如图 1 所示。显然基线数小于 4 时, 高程误差特别大, 随着基线数增加, 高程精度不断提高, 整个误差趋势与文献[6]中的图 10 相似; $B=19$ 时, 高程误差大约是平差精度极限值的 1.8 倍。图 2 为高程误差, 可以看出整条航线内误差幅度变化并不大, 且二线交会区误差仅略大于三线交会区。这一点与文献[6]的图 11 不太一样, 后者二线交会区高程误差比较大, 实际应用时, 要舍去这部分数据。为什么基线数小的时候, 高程误差特别大呢? 这显然用基高比条件不一样是解释不通的。笔者将 $B=10$ 的第二航线高程误差表示于图 3, 从整条航线看, 高程误差呈明显的振荡变化, 与文献[7]中图 5 的误差变化不太一样。在平差迭代中, 笔者注意到监测 EFP 像坐标时, 其误差与像点观测误差相当, 因而可以认为各三角锁本身计算的地面模型与实地有较好的相似性。问题在于各三角锁地面模型之间不像框幅像片空中三角那样有连接点, 连接成一个整体。如果采取某种方式能将各三角锁的地面模型连接起来, 就有可能克服单航线平差计算地面模型与实地不相似的问题。

表 4 单航线平差结果统计/m

Tab. 4 Statistical Results of Single Strip Adjustment

B	m_x	m_y	m_z	m_{z_3}	m_{z_2}
2	25	9	96	14	98
3	9	7	23	22	25
4	11	9	17	16	17
5	9	4	13	13	14
6	9	9	14	14	15
7	7	5	15	14	15
8	9	4	17	16	17
9	7	5	12	11	12
10	5	7	11	11	12
12	6	4	12	11	13
15	6	4	10	9	13
19	5	11	9	9	10

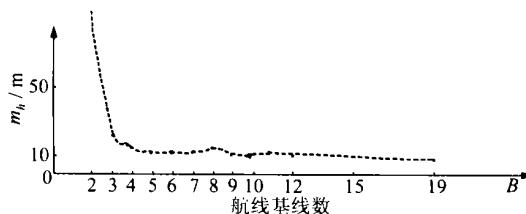
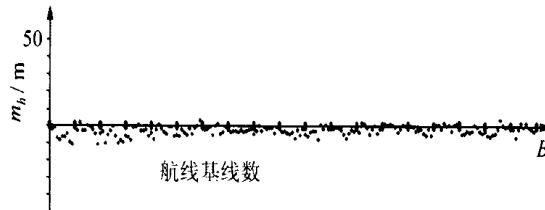
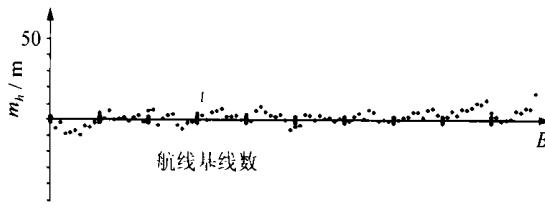


图 1 地面点高程误差(依航线长度标示)

Fig. 1 Height Error of Ground Point (s)

图 2 $B = 19$ 的第二航线高程误差
(按航线的基线数给出)Fig. 2 Height Error of the Second Strip, $B = 19$ 图 3 $B = 10$ 的第二航线高程误差Fig. 3 Height Error of the Second Strip, $B = 10$

3.2 空中三角锁间连接条件的建立

3.2.1 由三线阵 CCD 影像产生连接点

笔者试图在相邻 EFP 像片之间增设连接点, 将各三角锁连接起来。为区别起见, 将生成 EFP 像点用于构建三角锁的点称作定向点, 连接相邻三角锁的点称作连接点, 连接点的点号前加符号“T”以示与定向点区别。定向点、连接点在正视影像上的分布如图 4 所示。在 CCD 影像坐标观测中, 连接点作为独立观测值在生成 EFP 像点坐标时, 它也出现在相应的 EFP 像片上。以第 11 EFP 像片为例, 定向点、连接点的 EFP 像点分布

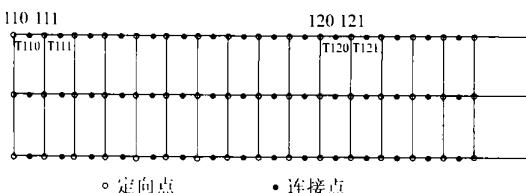


图 4 正射影像上选取的定向点、连接点

Fig. 4 Orientation Point (s) and Connected Point (s) Selected in Vertical Image

如图 5 所示。由于连接点的时刻离 EFP 像片时刻比定向点大, 故其 EFP 坐标精度也低一些。利

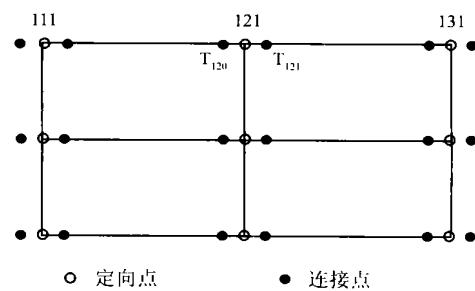


图 5 第 11 EFP 像片上生成的定向点、连接点

Fig. 5 Orientation Point (s) and Connected Point (s) in the 11th EFP Image

用连接点参与单航线空中三角测量平差精度列于表 5。从表 5 数据看, 这样增加连接点并没有从根本上改善精度。

表 5 连接点平差比较/m

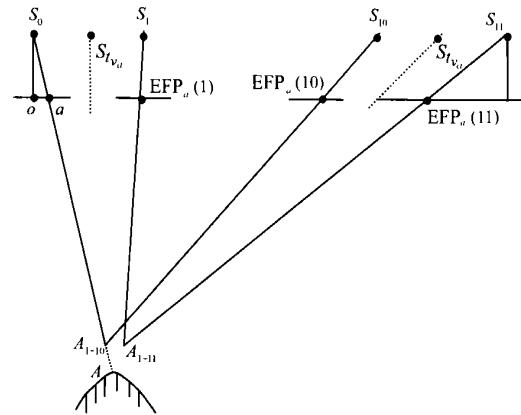
Tab. 5 Comparison of the Connected Points Adjustment

B	无连接点			有连接点		
	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
2	25	9	96	18	11	16
3	9	7	23	11	7	22
4	11	9	17	13	11	20
5	9	4	13	7	10	14
10	5	7	11	7	6	12

注: $m_1 = \pm 3\text{m}$; 航线四角隅各一个控制点; 4 条航线综合统计。

3.2.2 “连接点影像投影方向控制”原理

图 6 表示片号为 0, 10, … 三角锁与 1, 11, … 三角锁之间的一个连接点 A , 其 CCD 像点只有 t_{v_a} 和 t_{r_a} 两个时刻的观测值。虽然在计算中按 EFP 原理可以生成 4 条投影光线, 即 $\overline{S_0-a}$ 、 $\overline{S_{10}-EFP_a(10)}$ 、 $\overline{S_1-EFP_a(1)}$ 和 $\overline{S_{11}-EFP_a(11)}$, 但实际上与 0, 10, … 三角锁和 1, 11, … 三角锁并没有直接的观测值。因此以 4 条投影光线进行光束法平差计算所得的点 A 的

图 6 前方交会连接点 A Fig. 6 Connected Point A of Intersection

模型位置实质上是 t_{v_a} 和 t_{r_a} 观测值的交会点, 它与其左、右三角锁的计算模型没有直接联系, 也起不到将左、右三角锁计算模型联系起来的作用。

如果 0, 10, … 三角锁中有一条投影光线, 如 S_0-a 的方向由某种观测值提供, 使其在光束法平差迭代中始终指向该三角锁模型上的点 A。这里投影光线 S_0-a 和 $S_{10}-EFP_a(10)$ 属于左三角锁, 随着迭代 A_{1-10} 将趋近于左三角锁模型上的点 A, 而投影光线 $S_1-EFP_a(1)$ 和 $S_{11}-EFP_a(11)$ 属于右三角锁。在光束法平差中, 连接点 A 的上述 4 条投影光线构成的共线方程的误差方程式迭代解答的结果, 将是在最小二乘意义下确定的一个点, 这样就实现了两个三角锁计算模型的连接。从原理上讲, 只要在航线一端的一个基线范围内布设 10 个连接点,

且其观测值符合上述条件, 平差迭代结果便可以将整条航线的计算模型连接成一体。但为了提高精度, 采取航线上下边缘各设 10 个连接点, 并且在航线末端基线范围内作对称的布设。

3.2.3 引用连接点影像真中心投影坐标

如果连接点 A 在编号为 0 的 EFP 像片上的像点 a 是真中心投影坐标, 那么投影光线 S_0-a 的方向在平差迭代过程中始终指向左三角锁计算模型上的连接点 A, 这符合“连接点影像投影方向控制”原理。笔者在航线首末基线范围内分别布设 1 排、2 排和 3 排左像点坐标均为真中心投影的连接点。平差结果统计列于表 6。从表中数据可知, 取 2 排点比较适宜, 且包括 $B=2, 3$ 在内精度都较好, 基本上可认为平差计算模型与实地相似。

表 6 连接点影像投影方向控制平差结果统计 /m

Tab. 6 Statistical Results of Connected Point (s) Adjustment Controlled with Image Projected Direction

B	真中心投影像			连接点左像点中心投影坐标控制						连接点地面坐标控制									
	坐标			3 排点			2 排点			1 排点			2 排点			1 排点			
	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	
2	2	2	9	1	2	9	1	2	9	2	2	11	2	2	8	2	3	8	
3	2	2	10	2	2	9	2	2		9	2	2	9	2	2	8	2	3	8
4	3	2	9	4	2	10	4	2	11	5	3	12	2	2	7	2	3	7	
5	3	3	9	4	2	11	4	3	12	5	3	12	2	2	7	3	3	7	
10	3	4	10	3	3	10	3	3	10	4	3	10	4	4	7	4	5	7	

注: 航线四角隅各一个控制点, 连接点地面坐标误差为 $\pm 3m$, 像点坐标误差 $m_1 = \pm 3m$, 4 条航线平差结果综合统计。

3.2.4 引用连接点的地面坐标

如果将连接点的地面坐标引入平差 显然在地面坐标控制下, 所有有关该点的像点投影光线都强制地指向该连接点的位置, 自然完成航线计算模型的连接。按航线首末基线范围内设 2 排点(航线上下边缘)和 1 排点(航线轴上), 平差计算结果列于表 6。从表 6 数据可知, 1 排点布设已达到精度要求。同时还可以看出, 不同基线数的平差精度基本相当, 大约是平差精度极限值的 1.4 倍。

应该指出, 以上的结果是在姿态变化率为

$10^{-3} (\text{°}/\text{s})$ 前提下计算的, 引入“连接点影像投影方向控制”原理后, 基本上能达到计算模型与实地相似。但笔者认为, 没有理由得出卫星摄影测量中对姿态稳定性不作要求的结论。

3.2.5 外方位元素观测值、连接点、地面控制点联合平差精度比较

如前所述可以得出, 三线阵 CCD 影像空中三角测量除了应用外方位元素观测值联合平差外, 另有连接影像投影方向控制的平差也能取得好的成果。现将综合两类平差结果列于表 7。

表 7 外方位元素观测值、连接点联合平差

Tab. 7 Accuracy Comparison of Adjustment Associated with Observation of Exterior Orientation Elements and Connected Points

平差条件	外方位元素、连接点 /m						外方位元素, 连接点左像真中心投影坐标控制(2 排点) /m						外方位元素、连接点 /m						外方位元素, 连接点左像真中心投影坐标控制(2 排点) /m					
	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
2	5	4	15	7	5	22	3	7	10	4	10	9	2	2	9	3	3	11	2	2	8	2	4	8
3	5	5	10	5	5	13	2	5	7	3	8	8	2	2	7	2	2	8	2	2	7	2	4	7
4	4	3	8	4	3	9	2	4	7	2	6	7	2	2	6	2	2	7	2	3	6	2	3	6
5	3	3	8	4	3	9	2	4	7	5	5	10	2	2	6	2	2	7	2	2	6	2	3	6
10	3	3	6	3	2	7	3	3	6	3	4	7	2	2	6	2	2	6	2	2	6	2	2	6
有无控制点	有			无			有			无			有		无			有			无			
	$m_p = \pm 10''$												$m_p = \pm 2''$											

注: $m_p = \pm 5m$, $m_1 = \pm 3m$, 4 条航线平差结果综合统计。

从表 7 可以看出:

1) 利用航线四角隅各一地面控制点参与联合平差, $B \geq 3$ 的高程误差在 $0.7 \sim 1.0$ 像元分辨率高程内;

2) 利用外方位元素观测值、无地面控制点平差时, $B \geq 4$ 的高程精度在像元分辨率高程之内;

3) 利用外方位元素观测值及连接点左像真中心投影坐标控制平差, 不论有、无控制点, 其平差结果都相当, 且包括 $B = 2$ 在内, 高程误差都在像元分辨率高程之内;

4) 利用外方位元素观测值及连接点左像真中心投影坐标控制平差, 对于 $m_\varphi = \pm 10''$ 的结果能与 $m_\varphi = \pm 2''$ 仅利用外方位元素观测值平差相当。

以上所有平差计算均系像点量测误差为 $\pm 3m$, 相当于 0.3 像元。若像点量测精度提高, 平差的精度也将进一步改善。

4 三线阵 CCD 相机改进方案

连接点的一个影像真中心投影坐标可以通过改进 CCD 相机来获取。从表 6 可以看出, 连接点左像真中心投影坐标的设置, 1 排点、2 排点和 3 排点平差精度相当, 所以从原理上讲, 有 1 排点就可以了。为安全起见, 笔者采取在正视线阵上、下端右侧各安置一个小面阵 CCD, 如图 7 所示。

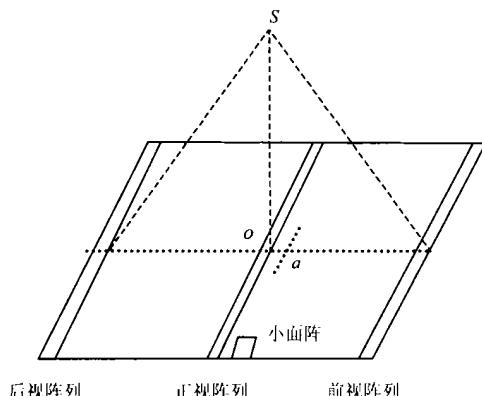


图 7 三线阵 CCD 阵列附加小 CCD 面阵

Fig. 7 Three-Line-Array Camera and
Mini-CCD Planar Array

设 $f = 500\text{mm}$, $\tan \alpha = 0.5$, 像元尺寸 = $10\mu\text{m}$, 则 CCD 面阵中心右偏距离 $oa = \{[(f \cdot \tan \alpha)/10]\} / \text{像元尺寸}$ ≈ 1250 像元; CCD 面阵宽度 $S = \{[(f \cdot \tan \alpha)/10]\} / \text{像元尺寸}\} \times 0.6 = 1500$ 像元。相机工程实施中可酌情选择 1024×1024 像素或 512×512 像素的 CCD 面阵。

改进后的三线阵 CCD 相机工作及摄影测量仍无大的变化, 只是在推扫摄影时, 每经过一个特定周期, 面阵获取影像一次, 特定周期为 $2oa = 2500$ 像元。

5 结语

1) 在全球性卫星摄影测量工程中, 由于云的关系, 三线阵 CCD 短航线影像出现概率较高。卫星摄影测量中一条基线长达 $200 \sim 300$ 多 km, 现有的平差要舍去二线交会区, 甚至 $B < 4$ 的航线也要舍去, 这将造成摄影数据的很大浪费。利用外方位元素观测值及连接点影像方向控制联合平差, 这种数据均可以利用, 在卫星摄影测量工程上有重要应用价值。

2) 连接点左像真中心投影坐标控制与外方位元素观测值联合平差, 可以进一步提高平差精度。另一方面, 如果外方位元素记录失败, 小面阵 CCD 可以起到补救作用。只要航线四角隅有控制点可以利用, 摄影测量处理仍然可以获得好的成果。在有少量地面控制点可利用(如为弥补云影“漏测区”)的摄影测量工程中有明显的效果。

3) 长航线三线阵 CCD 影像不管用哪一种方法平差, 精度都很高, 因此, 在月球及火星摄影测量中, 三线阵 CCD 相机是首选的传感器。

参 考 文 献

- 王任享. 利用模拟卫星摄影测量数据按 EFP 法光束平差与直接前方交会计算高程精度的比较. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 487~490
- Mueller E H, Zhang S L. Studies on Object Reconstruction from Space Using Three Line Scanner Imagery. ISPRS Com. III, Kyoto, 1988
- Hofmann O. Investigations of the Accuracy of the Digital Photogrammetry System DPS - a Rigorous Three Dimensional Compilation Process for Push Broom Imagery. ISPRS Congress Rio de Janeiro, 1984
- 张森林. 三行线阵扫描数据的平差方案及精度分析. 武汉测绘科技大学学报, 1988, 13(4)
- 王任享. 卫星摄影三线阵 CCD 影像的 EFP 法空中三角测量. 测绘科学, 2001, 26(4)
- Hofmann O. The Stereo-Push-Broom Scanner System DPS and Its Accuracy. ISPRS Inter Congress Symposium, Rovaniemi, 1986
- Ebner H, Muller F. Processing of Digital Three Line Imagery Using a Generalized Model for Combined Point Determination. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing Rovaniemi, 1986

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”; 选权迭代函数的探讨; 粗差定位的二步迭代法; $\mathbf{QV}^{\circ}\mathbf{P}$ 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

Bundle Adjustment of Satellite Borne Three-Line Array CCD Image

WANG Renxiang¹

(1 Xian Research Institute of Surveying and Mapping, 1 Middle Yanta Road, Xian, China 710054)

Abstract: The fundamentals of exterior orientation elements calculation by orientation images method and EFP (equivalent frame photo) method are reviewed briefly. And so far, none of aerial triangulation with three-line array CCD image and ground control points can pass through the similarity (no count of image observational error) between real model and the model estimated by single strip adjustment computed with the help of four control points at the corners of the strip is indicated. Based on the aerial triangulation by EFP method, the reason of the presented problem is studied deeply. The addition of connected point(s) between neighbor EFP is proposed, and meanwhile, the ground coordinates of connected points located in the first and last baselengths of the strip are given or either of connected point coordinates in the left or right EFP is true. With the alternative control, the adjustment results can almost make the model calculated by single strip adjustment similar with real model. And several final statistical results of adjustment using computer simulated data are listed.

Key words: three-line array CCD image; mini-CCD planar array; aerial triangulation

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 $\mathbf{QV}^{\circ}\mathbf{P}$ matrix, etc. His published papers in academic periodicals and academic meetings are more than 50.
E-mail: rxwang@pub.xaonline.com

(责任编辑: 洪伟)

《地球空间信息科学学报》被 CSA 收录

据中国高校学报研究会外事委员会提供的资料, 武汉大学主办的英文版期刊《地球空间信息科学学报》(Geo-spatial Information Science)自 2002 年起被美国《剑桥科学文摘》(CSA)收录。