

利用地面控制点进行卫星摄影 三线阵 CCD 相机的动态检测

王任享¹, 王建荣^{1,2}, 赵 斐¹, 刘 薇¹

(1. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 卫星发射及在轨飞行中, 环境变化会影响三线阵 CCD 相机的内方位元素。实际上使相机成为不符合摄影测量定义的相机, 导致由经典摄影测量原理推导的有关公式应用受到影响。因此, 将变化了的内方位元素规范为正视相机的 x 坐标为零的内方位元素系统, 而此系统的其他参数则作为 EFP 法反解内方位元素的待求参数, 并给出了计算数学模型及模拟计算结果。

[关键词] 摄影测量学; 内方位元素; 外方位元素; 等效框幅式相片(EFP)

[中图分类号] P237 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)02-0001-05

Dynamic Calibrating of Three Line Array CCD Camera in Satellite Photogrammetry Using Ground Control Point

WANG Ren xiang¹, WANG Jian rong^{1,2}, ZHAO Fei¹, LIU Wei¹

(1. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract The inner orientation elements of the three line array CCD camera are affected by the change of the circumstance during the satellite's launching and flying on the orbit. In fact, this makes the camera fall short of the camera defined by photogrammetry and causes the application of some formulations deduced by traditional photogrammetry to be affected. This paper standardizes inner orientation elements system from the changed inner orientation elements to inner orientation elements with x coordinate of the vertical camera equaling zero and considers the other parameters of this system as the parameters to be computed while calculating the inner orientation elements using EFP method with ground control points. Then the mathematics model and the calculating results with simulation data are given.

Key words: photogrammetry; inner orientation elements; exterior orientation elements; Equivalent Frame Photo (EFP)

0 引言

传输型卫星由于卫星发射的振动, 长时间飞行中温度的变化等都将影响三线阵 CCD 相机的内方位元素。在有地面控制点的卫星摄影测量中, 内方位元素影响的摄影测量误差大部分可以被应用地

面控制点处理时消除。但无地面控制点的卫星摄影测量中内方位元素变化须采用动态检测加以改正, 相机的动态检测是无地面控制点卫星摄影测量的至关重要的一个环节。笔者将对 LMCCD 相机的内方位元素检测加以研究。LMCCD 相机是由三线阵 CCD 相机与 4 个小面阵 CCD 混合配置而成^[1]。图 1a 中的小面阵固定在正视相机上, 其中

[收稿日期] 2005 09 15

[作者简介] 王任享(1933-), 男, 福建长乐人, 研究员, 中国工程院院士, 从事卫星摄影测量与遥感研究。

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

心与正视 CCD 线阵的关系按 EFP 法(等效框幅相片)规定设置。实验室标定中给出小面阵中心在正视相机坐标系的坐标,动态检定中不必重新测定。利用外方位元素观测值及地面点坐标反解内方位元素的 EFP 法空中三角测量与正解地面点的 EFP 法相似,航线定向点联接点选定如图 1b,等效框幅上的像点分布见图 1c。LMCCD 影像比三线阵 CCD 相机影像有更好的摄影测量性能,因而动态检测只要在两条基线(基线=前视或后视相机与正视相机摄影中心的距离)长的航线进行。

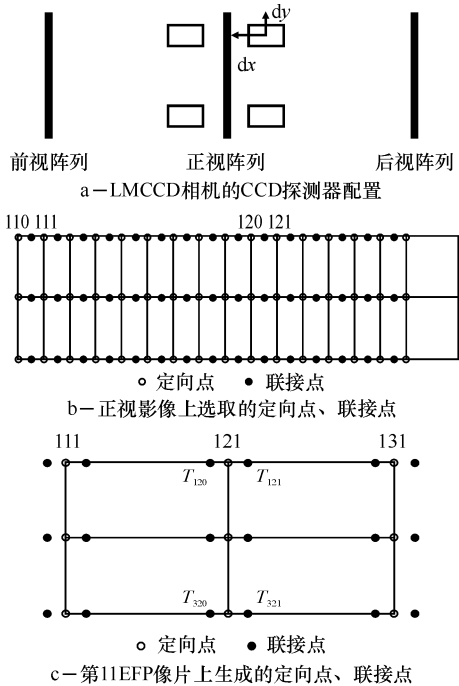


图 1 LMCCD 相机及定向点联接点的选取
Fig.1 LMCCD Camera and the Selection of Orientation Points and Connective Points

1 动态检测内方位元素的基本问题

EFP 法空中三角测量利用外方位元素(简称 EO)观测值就可以恢复立体模型与测定地面点坐标 X, Y, Z 。前提是内方位元素(以下简称 IO)是已知。很容易会联想到,如果 EO 观测值和大量的地面点坐标已知,是否就可以将 IO 当作待求未知数加以解算呢?答案是:如果相机内方位元素正确,那么空中三角测量的数学模型均适用,原则上可以解算。但如果相机内方位元素不正确,例如在轨飞行期间卫星仓内温度等变化影响,导致相机 IO 各项产生变化,那么此时的相机严格讲已不符合摄影

测量定义的相机,确切说已属于非测量相机,因而空中三角测量的许多公式包括 EFP 法所用到的公式已不完全适用,为了解决此问题,要对相机内方位元素规定加以研究。

1.1 摄影测量相机内方位元素的规定

此处所谓规定,实即定义,框幅式相机规定,镜头中心至像平面的垂直距离为主距 f ,其垂足为 o ,定义为框幅像片坐标的原点,框标联线交点作为原点的物理标志,加工中不可能做到框标联线交点与 o 完全重合,实验室中给出其在 o 为原点的坐标 x_0, y_0 ,因而 x_0, y_0, f 即为框幅相机内方位元素。三线阵 CCD 相机要复杂些,笔者给出 2 种模式:

1.1.1 模式 I

即使将 3 个 CCD 相机中心合成一点考虑,还由于加工中不可避免的公差,3 个 CCD 线阵也不能共面(但装调中保持空间平行),(图 2a), dl, dv, dr 分别为前视、正视和后视相机焦距; s 为镜头中心; o 为自准平行光管确定的主点。 $\alpha_l, \alpha_v, \alpha_r$ 分别为前、正、后视光轴与平行光管 so 方向的夹角。相机的内方位元素规定为

$$\left. \begin{aligned} Fl &= dl \cdot \cos \alpha_l = \text{前视相机主距} \\ xl &= Fl \cdot \tan \alpha_l = \text{前视相机框幅 } x \text{ 坐标} \\ Fv &= dv \cdot \cos \alpha_v = \text{正视相机主距} \\ xv &= Fv \cdot \tan \alpha_v = \text{正视相机框幅 } x \text{ 坐标} \\ Fr &= dr \cdot \cos \alpha_r = \text{后视相机主距} \\ xl &= Fl \cdot \tan \alpha_r = \text{后视相机框幅 } x \text{ 坐标} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

各相机主点 y 坐标为 $yccdol, yccdov, yccdor$ 。

通常标定时总是将平行光管光轴方向与正视相机光轴尽可能平行,因此 α_v 总是很小,但不一定为零。

1.1.2 模式 II

模式 II 在应用上更为方便(图 2b),作一个虚拟平面 II,它与正视相机主光轴相交的点作为虚拟像面 II 的像主点 o ,内方位元素规定为

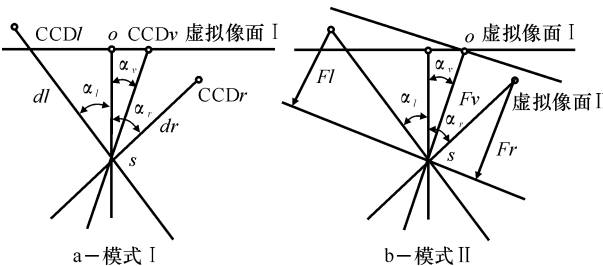


图 2 3 镜头三线阵相机模式

Fig. 2 Three line Arrays With Three Lens

$$\left. \begin{aligned} Fl &= dl \cdot \cos(\alpha_l + \alpha_v) \\ xl &= Fl \cdot \tan(\alpha_l + \alpha_v) \\ Fv &= dv \\ xv &= 0 \\ Fr &= dl \cdot \cos(\alpha_r - \alpha_v) \\ xr &= -Fr \cdot \tan(\alpha_r - \alpha_v) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

主点 y 坐标与模式 I 相同。

以上 2 种模式均可保持摄影反转光束不变。

1.1.3 2 种模式 IO 的换算关系

$$Fl = dl \cdot \cos \alpha_l \cdot \cos \alpha_v - dl \cdot \sin \alpha_l \cdot \sin \alpha_v$$

因 α_v 很小, 故 $\cos \alpha_v \doteq 1$, 用一个很小的值 ϵ 表示, 即令 $\sin \alpha_v = \epsilon$ 。

则

$$\left. \begin{aligned} Fl &= fl + \mathfrak{f}l, \\ \mathfrak{f}l &= -dl \cdot \sin \alpha_l \cdot \epsilon \\ Fr &= fr + \mathfrak{f}r, \mathfrak{f}r = -dr \cdot \sin \alpha_r \cdot \epsilon \\ Fv &= fv + \mathfrak{f}v, \mathfrak{f}v \doteq 0.5 \cdot \epsilon^2 \cdot dv \\ \text{同理 } xl &= fl \cdot \tan \alpha_l + \hat{\alpha}l, \hat{\alpha}l \cong \\ &fl \cdot \tan^2 \alpha_l \cdot \epsilon + \mathfrak{f}l \cdot \tan \alpha_l \\ xv &= 0 \\ xr &= -fr \cdot \tan \alpha_r + \hat{\alpha}r, \hat{\alpha}r = \\ &fr \cdot \tan^2 \alpha_r \cdot \epsilon - \mathfrak{f}r \cdot \tan \alpha_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(2)可用于实际换算, 而式(3)只作为理论分析, 从式(3)可知, 在 α_v 很小时, 模式 II 内方位元素可由模式 I 内方位元素加数值不大的改正数来表达, 这点对研究相机内方位元素动态检测很重要。

1.2 相机内方位元素发生变化后的规定

前面已经提过, 由于温度等变化, 相机的内方位元素值均有难予估测的变化, 此时相机已经不属于严格意义的摄影测量相机。这种情况下摄取的影像资料很难用于摄影测量相机定义的数学公式计算。因而利用 EO 观测值及地面点坐标也难于用 EFP 法空中三角测量解算变化的 IO 值。为了能够利用摄影测量已有的数学模型, 即 EFP 空中三角测量算法, 需要对变化了的内方位元素重新规定。笔者按模式 II 来规定, 令 $\alpha_v = 0$, 即 $xv = 0$, 而 Fl, Fv, Fr, xl, xr 当作都含有待解算改正数的内方位元素, 待解的改正数包含 IO 变化值及式(3)中的改正数项。重新定义后, 就可以用 EFP 法计算内方位元素的改正数, 这里重要的特点是重新规定后的内方位元素中已知 $\alpha_v = 0, xv = 0$ 。

1.3 相机内方位元素检定项目

按文献[2] 每一个相机应检定项目为: 主距, 主点 x 坐标、 y 坐标及线阵在像平面内的旋转角, 3 个相机共 12 项检定值。

fl, fv, fr 为在原已知主距值上求其改正数 $\mathfrak{f}l, \mathfrak{f}v, \mathfrak{f}r$ 。

xl, xv, xr 为在原已知值 $fl \cdot \tan \alpha_l, fv \cdot \tan \alpha_v(\alpha_v = 0)$ 、 $-fr \cdot \tan \alpha_r$ 基础上求其改正数 $\hat{\alpha}l, \hat{\alpha}v, \hat{\alpha}r$, 在 1.2 对相机变化后内方位元素规定之后, $\hat{\alpha}v$ 应等零, 这将成为计算方程式中增加为带权的虚拟方程参与共同平差。

主点 y 值改正数 $\mathfrak{y}l_{\text{ced}}, \mathfrak{y}v_{\text{ced}}, \mathfrak{y}r_{\text{ced}}$ 。

$\beta l, \beta v, \beta r$ 为前、正、后视线阵在像平面内旋角, 实验室装置中已调整为零, 检定只检测其变化量 $\beta l, \beta v, \beta r$, 其 βv 可以看相机在像平面内安置的旋角所融合, 因而 βv 也应为零, 同样将以带权虚拟方程参与平差。

2 EFP 法反求内方位元素改正数解算

利用 EFP 法^[3] 反求内方位元素的框图见图 3, 解算采用后方交会与前方交会交替迭代的方案。

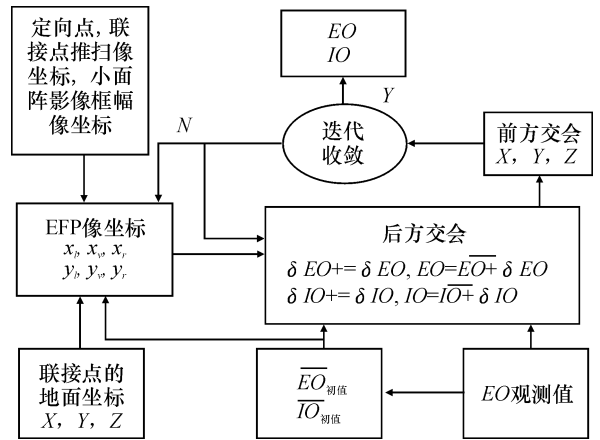


图 3 EPP 法反解内方位元素框图

Fig.3 Frame Figure of Calculating Inner Orientation Elements Using EFP Method

2.1 前方交会第 i 片, 地面点 j 的改正数方程

$$\begin{pmatrix} v_{xij} \\ v_{yij} \end{pmatrix} = B_{ij} \hat{\mathfrak{g}} - \begin{pmatrix} l_{xij} \\ l_{yij} \end{pmatrix} \quad i = 0, n \quad (4)$$

式中: i 为航线像片数; j 为地面点数; v_{xij}, v_{yij} 为像点坐标余差。

$$B_{ij} = \begin{pmatrix} -a_{111} & -a_{112} & -a_{113} \\ -a_{221} & -a_{222} & -a_{223} \end{pmatrix}_{ij} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{q}} = (\hat{x}_j \quad \hat{y}_j \quad \hat{z}_j)^T =$$

地面点 j 坐标改正数

$$l_{xij} = x_{ij} - \hat{x}_{ij} \quad l_{yij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$$

式中: \hat{x}_{ij} 、 \hat{y}_{ij} 为利用 P_i 代入共线方程的计算值。

$$P_i = (X_{Si} \quad Y_{Si} \quad Z_{Si} \quad \varphi_i \quad \omega_i \quad \kappa_i) =$$

外方位元素初值或迭代逼近值

2.2 后方交会数学模型

2.2.1 像点坐标改正数方程

由于增加内方位待解参数, 改正数方程式的系数编号按以下规定。

后方交会第 i 片, 像点 j 的改正数方程为

$$\begin{pmatrix} v_{x_{ij}} \\ v_{y_{ij}} \end{pmatrix} = A_{ij} \hat{\mathbf{q}} - \begin{pmatrix} l_{x_{ij}} \\ l_{y_{ij}} \end{pmatrix} \quad i = 0, \dots, n \quad (6)$$

式中: $A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \end{bmatrix}_{ij}$; $n =$ 基

线数 $\times 10 + 1$; n 为航线像片数。

$$A_{11} = (a_{111} \quad a_{112} \quad a_{113} \quad a_{114} \quad a_{115} \quad a_{116})$$

$$A_{12} = (a_{117} \quad a_{118} \quad a_{119})$$

$$A_{13} = (a_{120} \quad a_{121} \quad a_{122})$$

$$A_{14} = (a_{123} \quad a_{124} \quad a_{125})$$

$$A_{15} = (a_{126} \quad a_{127} \quad a_{128})$$

$$A_{21} = (a_{221} \quad a_{222} \quad a_{223} \quad a_{224} \quad a_{225} \quad a_{226})$$

$$A_{22} = (a_{227} \quad a_{228} \quad a_{229})$$

$$A_{23} = (a_{230} \quad a_{231} \quad a_{232})$$

$$A_{24} = (a_{233} \quad a_{234} \quad a_{235})$$

$$A_{25} = (a_{236} \quad a_{237} \quad a_{238})$$

$$\hat{\mathbf{q}} = (\hat{x}_i \quad \hat{y}_i \quad \hat{z}_i \quad \hat{\varphi}_i \quad \hat{\omega}_i \quad \hat{\kappa}_i)$$

$$\hat{\varphi}_l \quad \hat{\varphi}_v \quad \hat{\varphi}_r \quad \hat{\omega}_l \quad \hat{\omega}_v \quad \hat{\omega}_r$$

$$\hat{\kappa}_l \quad \hat{\kappa}_v \quad \hat{\kappa}_r \quad \beta_l \quad \beta_v \quad \beta_r)$$

式中: $\hat{\mathbf{q}}$ 为外方位元素及内方位元素改正数; $l_{x_{ij}}$ 、 $l_{y_{ij}}$ 为常数项。

在 EFP 法空中三角测量中, 像点 j 的框幅坐标是按 EFP 等效框幅生成原理将推扫坐标投影变换为 EFP 像坐标, 其主距与正视相机相同, 但数据中均含有其原本相机参数特征, 如图 1c 中 EFP 像片中央的三排点(定向点, 联接点)含有正视相机参数特征, 右三排点含前视相机特征, 左三排点含后视相机特征, 因此在生成方程式系数时要区别对待。由于处于迭代计算之中, 所以生成的 EFP 像坐标都处于不断做了内方位元素改正的数据, 方程式系数为^[4]: 令 $f = fv$

$$M = 1/4 [a(x - X_s) + b(y - Y_s) + c(z - Z_s)]$$

$$a_{111} = M(a_1 f + a_3 x)$$

$$a_{112} = M(b_1 f + b_3 x)$$

$$a_{113} = M(c_1 f + c_3 f)$$

$$a_{114} = y \sin \omega - [x/y(x \cos \kappa - y \sin \kappa) + f \cos \kappa] \cos \omega$$

$$a_{115} = -f \sin \kappa - x/f(x \sin \kappa + y \cos \kappa)$$

$$a_{116} = y$$

$$a_{221} = M(a_2 f + a_3 y)$$

$$a_{222} = M(b_2 f + b_3 y)$$

$$a_{223} = M(c_2 f + c_3 y)$$

$$a_{224} = -x \sin \omega - [x/y(x \cos \kappa - y \sin \kappa) - f \sin \kappa] \cos \omega$$

$$a_{225} = -f \cos \kappa - y/f(x \sin \kappa + y \cos \kappa)$$

$$a_{226} = -x$$

$$a_{117} = x/f, a_{120} = -1, a_{123} = 0, a_{126} = y, \text{对于右三排点}$$

$$a_{118} = x/f, a_{121} = -1, a_{124} = 0, a_{127} = y, \text{对于中央三排点}$$

$$a_{119} = x/f, a_{122} = -1, a_{125} = 0, a_{128} = y, \text{对于左三排点}$$

$$a_{227} = y/f, a_{230} = 0, a_{233} = -1, a_{236} = 0, \text{对于右三排点}$$

$$a_{228} = y/f, a_{231} = 0, a_{234} = -1, a_{237} = 0, \text{对于中央三排点}$$

$$a_{229} = y/f, a_{232} = 0, a_{235} = -1, a_{238} = 0, \text{对于左三排点}$$

(7)

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c_1 、 c_2 、 c_3 系角元素 φ 、 ω 、 κ 生成的方向余弦。

2.2.2 外方位元素平滑(连续)约束条件

$$v_k = \hat{\mathbf{q}}_{k+1} - 2\hat{\mathbf{q}}_k + \hat{\mathbf{q}}_{k-1} - l_k, k = 1, \dots, n-1$$

(8)

式中: $v_k = (vX_k \quad vY_k \quad vZ_k \quad v\varphi_k \quad v\omega_k \quad v\kappa_k)^T$;
 $l_k = p_{k+1} - 2p_k + p_{k-1}$ 。

2.2.3 外方位元素量测值改正数方程

$$v_l = \hat{\mathbf{q}} - l \quad l = 0, \dots, n$$

式中: $l = P_i - \hat{P}_i$, $P_i = (X_{Si} \quad Y_{Si} \quad Z_{Si} \quad \varphi_i \quad \omega_i \quad \kappa_i)^T$ 为外方位元素观测值。

2.2.4 两个内方位元素虚拟改正数方程

在 1.3 中已提到 $\hat{\alpha}_v$ 和 $\hat{\beta}_v$ 应增加等零的虚拟改正数方程, 法化时赋适当大的权值。

$$V\hat{\alpha}_v = \hat{\alpha}_v \quad V\hat{\beta}_v = \hat{\beta}_v$$

2.2.5 后方交会法方程式

航线后方交会的法方程式系数是由带宽为 6、边宽为 12 的带状加边矩阵。

未知数 = $6 \times (\text{基线数} \times 10 + 1) + 12$

一个三条基线的航线的法方程式非零元素图解如图 4 和图 5, 此图均由实际计算中生成的法方程式, 将非零元素用点表示。图 4 为没有外方位元素连续条件, 图 5 为带有外方位元素连续条件, 可

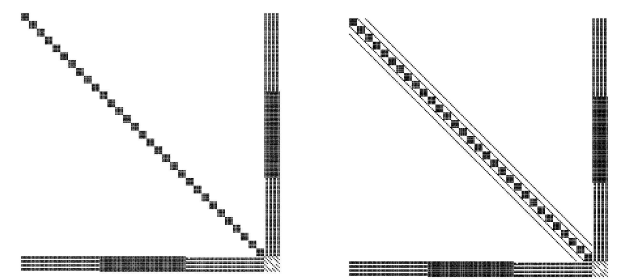


图 4 法方程
非零元显示

Fig. 4 Showing the
Nonzero Unit of
Normal Equation

图 5 法方程非零元
显示(含 EO 连续条件)

Fig. 5 Showing the Nonzero
Unit of Normal Equation
(Including Continuum Condition of EO)

以看出, 带有外方位元素后方程式强度有明显改善。

3 模拟计算实验

3.1 卫星摄影参数

三线阵 CCD 相机内方位元素 $f_l = 782.00$ mm, $f_v = 780.0$ mm, $f_r = 777.123$ mm; $\tan \alpha = 0.497$, $\tan \alpha_v = 0$, $\tan \alpha_r = -0.487$, $f_l \tan \alpha = 318.396$, $f_v \tan \alpha_v = 0$, $f_r \tan \alpha_r = -379.029$ 。

经过飞行变化后相机参数: $f_l = 782.077$ mm, $f_v = 780.049$ mm, $f_r = 777.073$ mm, $f_l \tan \alpha_l = 381.346$, $f_v \tan \alpha_v = 0$, $f_r \tan \alpha_r = -378.919$ 。CCD 像元: 0.0065 mm; 地面像元: 5 m; 飞行高度 600 km; 姿态稳定度 $10^{-3} (^{\circ})/s$; 摄站坐标变化率 0.1 m/s。

3.2 控制数据精度

外方位元素误差: 线元素 $m^0 = \pm 2$ m, 角元素 $m^{\varphi} = 3''$ 。

计算中仅联接点作为地面控制点参与平差, 平面坐标误差 $m_x = m_y = \pm 4$ m, 高程误差 $m_h = \pm 3$ m。

3.3 平差计算

考虑到变化的外方位元素再规定时, 对于 3 个 CCD 相机只有 α_l, α_r 是独立的量, α_v 可以设为 0, 因而 x 坐标只取 $\hat{\alpha}_l$ 和 $\hat{\alpha}_r$ 作为待求参数。这次实验计算, 不做 β 角的改正数计算, 这样待求参数只有 $\hat{g}_l, \hat{g}_v, \hat{g}_r, \hat{\alpha}_l, \hat{\alpha}_r, \hat{g}_l, \hat{g}_v, \hat{g}_r$ 8 个参数。生成模拟数据时, 对 EO 观测值, 地面点坐标及推扫像点坐标的中误差, 均作 4 次独立生成, 内方位元素改正数统计见表 1。

按各次计算的 IO 改正数计算内方位元素并按 EFP 法正算地面点坐标, 精度统计见表 2。

表 1 内方位元素改正数

Tab. 1 The Correction Data of Inner Orientation Elements

测次	m_h/m	$\hat{g}_l, \hat{g}_v, \hat{g}_r$ /μm	$\hat{\alpha}_l, \hat{\alpha}_r$ /μm	$\hat{g}_l, \hat{g}_v, \hat{g}_r$ /μm
1 测回	5.2	2 4 17	2 -9	2 -7 3
2 测回	5.2	18 25 24	7 -10	0 -1 4
3 测回	6.0	-18 -23 -35	-6 16	-5 2 8
4 测回	6.4	-6 -7 -17	-2 8	0 12 4
平均		-1 0 -3	0 1	-1 2 5

表 2 EFP 正算地面点精度

Tab. 2 The Error of Ground Points Calculated Using EFP

测次	4 控制点绝对定向			EO 观测值误差 $m_p = 2$ m, $m_{\varphi} = 3''$		
	m_x/m	m_y/m	m_z/m	m_x/m	m_y/m	m_z/m
1 测回	1.6	1.1	4.5	2.7	3.6	5.4
2 测回	1.8	1.2	9.7	2.9	3.6	5.0
3 测回	1.9	1.3	6.3	2.6	3.6	7.2
4 测回	0.9	1.2	3.5	2.8	3.6	5.2
平均	0.7	1.1	3.6	2.7	3.6	5.2
真 IO	0.5	1.1	3.6	2.2	4.2	4.8

4 计算结果

(1) 各测回计算的 IO 改正数差别颇大, 这主要因 EO 观测值和地面控制点误差所决定。多次测定取平均值, 有明显改善。在控制数据精度不可能提高的情况下, 应进行多次检测。

(2) 第 1~第 3 测回改正数值较大, 但用于计算的 IO 值作 EFP 正算, 地面点精度并不显著降低, 原因是主距与框幅 x 坐标改正数间在计算时有相关性, 对误差的贡献有互补性。

(3) 模拟实验表明, 动态检测可以有效地克服内方位元素变化对无地面控制点卫星摄影测量的影响, 进一步的研究应解决星地相机夹角变化及内方位元素变化统一检测问题。

[参 考 文 献]

[1] 王任享, 胡 莘, 杨俊峰, 等. 卫星摄影测量 LMCCD 相机的建议[J]. 测绘学报, 2004, 29(4): 10-12.

[2] Heipke C. The Evaluation of MEOSS Airborne 3 Line Scanner Imagery[J]. PERS, 1996, 62(3): 293-299.

[3] 王任享. 卫星三线阵 CCD 影像 EFP 法空中三角测量[J]. 测绘科学, 2001, 26(4): 1-5.

[4] 王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1979.

[5] 杨俊峰. 三线阵 CCD 相机动态检定的研究[D]. 郑州: 解放军测绘学院, 1985.