

文章编号:1671-8860(2007)11-1001-06

文献标志码:A

当代航空摄影测量加密的几种方法

袁修孝¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路129号,430079)

摘要:介绍了现行航空摄影测量加密的三种作业模式及其最基本的数学模型,利用自行研制的高精度航空摄影测量加密系统WuCAPS对带有POS数据的1:2500~1:60000各种摄影比例尺的覆盖多种地形的航摄影像实施加密,分析并比较了各种加密方法的加密精度。结果表明,三种加密方法均能满足我国现行航空摄影测量规范对航测生产的精度要求。并对如何选用合适的航空摄影测量加密方法对国家基础测绘、4D产品生产和基础地理信息的快速更新提出了建议。

关键词:航空摄影测量加密;GPS;定位定姿系统(POS);精度

中图法分类号:P231.4

航空摄影测量加密是一种利用航空遥感影像通过解析计算来确定地面目标点的空间位置及影像外方位元素的区域网平差。随着传感器技术、空间定位技术和计算机技术的发展,其理论和方法在不断改进,正朝着无需地面控制点的方向发展。事实上,航空摄影测量加密方法是伴随着计算机的进步而逐渐发展起来的。在20世纪50年代末,Schmid教授提出的光束法区域网平差将摄影测量加密方法发展到了理论最为严密的阶段。但限于当时影像获取技术和人工影像量测条件的限制,只有采用区域四周平均2条基线布设1个平高、中央平均4条基线布设1个高程地面控制点的密周边布点方案,才能获得最好的加密精度^[1],其对控制点的需求量是巨大的,位置是极其苛刻的(如图1(a)所示,b为摄影基线长度)。到了70年代,美国GPS出现以后,人们开始采用载波相位差分GPS动态定位技术来确定航空摄影瞬间摄站的空间位置(相当于影像的3个外方位线元素),利用其进行空中三角测量(简称GPS辅助空中三角测量)可使摄影测量加密的控制点减少到仅需在区域四角各布设1个平高点的水平(如图1(b)所示),从而引发了摄影测量一场小小的技术革命^[2]。随着GPS技术的改进和动态定位精度的提高,对于大区域、1:10000以小比例

尺山地、高山地及特别困难地区的地形测图,航空摄影测量加密可采用无地面控制的GPS辅助空中三角测量方法^[3],但对于带状区域、平坦地区及城区大比例尺的地形测图,GPS辅助空中三角测量的技术优势就大打折扣^[4]。进入90年代以后,美国、德国、加拿大等国家又开始研究用GPS/INS组合系统(通称POS系统)获取航空摄影曝光时刻影像的空间方位(即用GPS确定摄站的空间位置,用IMU惯性测量装置获取影像的姿态角),以直接用于航测内业的影像定向^[5]。已有试验表明,利用POS系统获取的影像外方位元素可直接用于数字正射影像图的制作,但利用其重建立体模型进行安置元素测图时,会产生很大的模型上下视差^[6],且高程难以满足大比例尺地形测图的精度要求,仍然需要施行带四角地面控制点的POS辅助空中三角测量^[7](如图1(c)所示)。



图1 光束法区域网平差地面控制方案

Fig. 1 Distribution of Ground Control Points in
Bundle Block Adjustment

收稿日期:2007-08-28。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40771176);国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0662);国家教育部长江学者和创新团队发展计划——创新团队资助项目(IRT0438)。

然而,在以3S技术为主要手段、以4D产品(DEM、DOM、DLG、DRG)生产为终极目标的数字摄影测量时代,如何充分发挥各种摄影测量加密方法的优势,精确获取影像的外方位元素,正确实施影像的定向,低成本、短周期地进行4D产品的大规模生产,并对相应数据库进行快速更新,是一个亟待解决的问题。本文试图从航空摄影测量加密原理出发,将现行的加密方法分为常规光束法区域网平差、GPS辅助光束法区域网平差和POS辅助光束法区域网平差三种作业模式,着重阐释各自的最基本数学模型,并通过试验比较它们的加密精度,分析各种加密方法的使用条件,探讨将它们用于4D产品生产的实用性。

1 航空摄影测量加密的基本数学模型

1.1 常规光束法区域网平差

光束法区域网平差是一种以像点坐标为观测值、单个影像光束为平差单元的摄影测量加密方法,在数字摄影测量工作站中被广泛采用。其理论基础为像点-投影中心-物点位于一条直线的中心投影共线条件方程^[1]:

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, x, y 为以像主点为原点的像平面坐标; f 为航摄仪主距; X, Y, Z 为物点的地面坐标; X_s, Y_s, Z_s 为影像的外方位线元素; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 为用影像外方位角元素表示的方向余弦。

以像点坐标为观测值, 物方坐标和影像外方位元素为待定参数, 在航摄仪内方位元素精确已知的情况下, 对式(1)线性化得误差方程式:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x = \frac{\partial x}{\partial X_s} \Delta X_s + \frac{\partial x}{\partial Y_s} \Delta Y_s + \frac{\partial x}{\partial Z_s} \Delta Z_s + \\ \quad \frac{\partial x}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial x}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial x}{\partial X} \Delta X + \\ \quad \frac{\partial x}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial x}{\partial Z} \Delta Z - (x - x^0) \\ \\ v_y = \frac{\partial y}{\partial X_s} \Delta X_s + \frac{\partial y}{\partial Y_s} \Delta Y_s + \frac{\partial y}{\partial Z_s} \Delta Z_s + \\ \quad \frac{\partial y}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial y}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial y}{\partial X} \Delta X + \\ \quad \frac{\partial y}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial y}{\partial Z} \Delta Z - (y - y^0) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, x^0, y^0 为由影像外方位元素和地面坐标近似值代入式(1)计算出的像点坐标值。

当区域网中量测了 n 个像点, 则可列出 n 组形如式(2)的误差方程。若量测的像点足够多时, 则可用最小二乘平差方法整体估计地面坐标和影像外方位元素的改正数, 从而得到加密点地面坐标和影像外方位元素的最或是值, 实现从二维影像反求三维物空间点坐标的目的。

1.2 GPS辅助光束法区域网平差

GPS辅助光束法区域网平差是在常规光束法区域网平差的基础上, 将由GPS获取的航摄仪曝光时刻摄站三维坐标作为带权观测值而参与的GPS数据与摄影测量观测值的联合平差。图2示意了机载GPS天线相位中心与航摄仪投影中心间的空间偏移向量 \vec{AS} 。

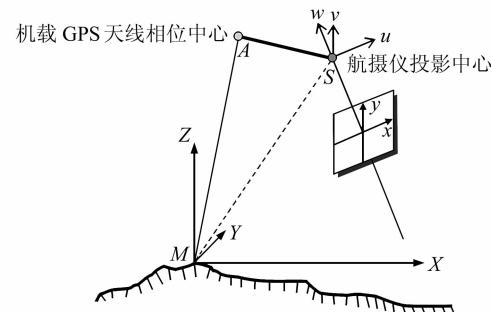


图2 带GPS航摄系统的空间偏移向量
Fig. 2 Spatial Offset Between Camera and GPS Antenna

设机载GPS天线相位中心 A 、航摄仪投影中心 S 在以 M 为原点的地面上坐标系 M -XYZ 中的坐标分别为 (X_A, Y_A, Z_A) 和 (X_S, Y_S, Z_S) , 若 A 点在理想像空间坐标系 S -uvw 中的坐标为 (u, v, w) , 则利用像片姿态角 φ, ω, κ 所构成的正交变换矩阵 R 可得到如下关系式^[4]:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + R \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)表达了GPS摄站坐标与航摄仪投影中心坐标之间的严格几何关系。为了能将GPS所测定的摄站坐标作为带权观测值引入到摄影测量区域网平差中, 必须对其线性化。以 X_A, Y_A, Z_A 为观测值, 影像外方位元素为待定参数, 并顾及GPS空间偏移分量 (u, v, w) 的测量误差, 在未知数近似值的邻域内对式(3)按泰勒级数展开至一次项, 便可得到GPS摄站坐标的误差方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{X_A} = \frac{\partial X_A}{\partial X_S} \Delta X_S + \frac{\partial X_A}{\partial Y_S} \Delta Y_S + \frac{\partial X_A}{\partial Z_S} \Delta Z_S + \frac{\partial X_A}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial X_A}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial X_A}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial X_A}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial X_A}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial X_A}{\partial w} \Delta w - \\ \quad (X_A - X_A^0) \\ v_{Y_A} = \frac{\partial Y_A}{\partial X_S} \Delta X_S + \frac{\partial Y_A}{\partial Y_S} \Delta Y_S + \frac{\partial Y_A}{\partial Z_S} \Delta Z_S + \frac{\partial Y_A}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial Y_A}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial Y_A}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial Y_A}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial Y_A}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial Y_A}{\partial w} \Delta w - \\ \quad (Y_A - Y_A^0) \\ v_{Z_A} = \frac{\partial Z_A}{\partial X_S} \Delta X_S + \frac{\partial Z_A}{\partial Y_S} \Delta Y_S + \frac{\partial Z_A}{\partial Z_S} \Delta Z_S + \frac{\partial Z_A}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial Z_A}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial Z_A}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial Z_A}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial Z_A}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial Z_A}{\partial w} \Delta w - \\ \quad (Z_A - Z_A^0) \end{array} \right. \quad (4)$$

式中, X_A^0, Y_A^0, Z_A^0 为由影像外方位元素近似值代入式(3)计算出的摄站坐标值。

比较式(2)与式(4)可以发现,两组方程中含有 6 个相同的未知数 $\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S, \Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa$, 据此可联立两组方程,以构成 GPS 辅助光束法区域网平差的基础方程。若参照像点坐标和 GPS 摄站坐标的量测精度,分别给予它们不同的权值,则可用最小二乘平差方法全区域整体求解物方坐标的最或是值,同时消除 GPS 摄站坐标的误差,以获得精确的影像外方位元素。

1.3 POS 辅助光束法区域网平差

POS 辅助光束法区域网平差是在 GPS 辅助光束法区域网平差的基础上,将由 IMU 测得的航摄仪姿态角作为带权观测值而参与的 POS 数据与摄影测量数据的联合平差。图 3 示意了带 IMU 的航空摄影系统。

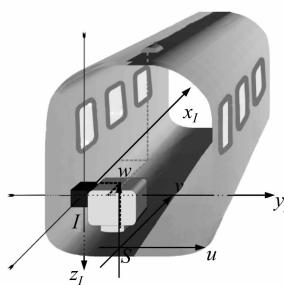


图 3 带 POS 的航空摄影系统

Fig. 3 POS-Supported Aerial Photographic System

由于设备安装上的原因,IMU 的本体坐标系 $I-x_Iy_Iz_I$ 的三个旋转轴不可能与航摄仪的三个旋转轴完全平行,相应轴系间存在着一定的夹角 $(\varphi_I, \omega_I, \kappa_I)$, 称之为视准轴误差^[8]。为讨论方便,图 3 中的 $I-x_Iy_Iz_I$ 坐标系可以看作是经绕理想像空间坐标系 $S-\mu\nu\omega$ 的 v, μ, ω 轴连续旋转 $\varphi_I, \omega_I, \kappa_I$ 后所在的位置。当由 IMU 测定的航摄仪空中姿态为 $\varphi', \omega', \kappa'$ 时,则由像片姿态角 φ, ω, κ 所构成的正交变换矩阵 R 可表示为:

$$R_{\text{IMU}} = R \cdot R_B^T \quad (5)$$

式中, $R_{\text{IMU}} = R_{\varphi'} R_{\omega'} R_{\kappa'}$; $R_B = R_{\varphi_I} R_{\omega_I} R_{\kappa_I}$ 。令

$$R \cdot R_B^T = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$$

则有:

$$\begin{cases} \varphi' = -\arctan(a_3/c_3) \\ \omega' = \arcsin(b_3) \\ \kappa' = \arctan(b_1/b_2) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表达了 IMU 测定的航摄仪姿态角 $\varphi', \omega', \kappa'$ 与影像外方位角元素 φ, ω, κ 之间的严格几何关系。为了能将 IMU 测定的航摄仪姿态角作为带权观测值引入摄影测量区域网平差中,必须对式(6)进行线性化。以 $\varphi', \omega', \kappa'$ 为观测值,影像外方位角元素为待定参数,在其近似值的邻域内对式(6)按泰勒级数展开至一次项,便可得到 IMU 测定的航摄仪姿态角的误差方程为:

$$\begin{cases} v_{\varphi'} = \frac{\partial \varphi'}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial \varphi'}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial \varphi'}{\partial \kappa} \Delta \kappa - (\varphi' - \varphi'^0) \\ v_{\omega'} = \frac{\partial \omega'}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial \omega'}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial \omega'}{\partial \kappa} \Delta \kappa - (\omega' - \omega'^0) \\ v_{\kappa'} = \frac{\partial \kappa'}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial \kappa'}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial \kappa'}{\partial \kappa} \Delta \kappa - (\kappa' - \kappa'^0) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\varphi'^0, \omega'^0, \kappa'^0$ 为由影像外方位元素近似值代入式(6)计算出的 IMU 航摄仪姿态角。

对比式(2)、式(4)和式(7)发现,三组方程中均含有相同的未知数 $\Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa$ 。同理可联立它们以构成 POS 辅助光束法区域网平差的基础方程。若参照像点坐标、POS 提供的影像外方位元素的测量精度,分别给予三类观测值不同的权重,则用最小二乘平差方法求解物方坐标最或是值的同时,可以消除 POS 系统测定的影像外方位元素的误差,从而获得精确的影像外方位元素。

2 试验及其结果分析

根据上述基本数学模型,笔者研发了高精度

航空摄影测量加密系统 WuCAPS,既可用于数字影像的自动量测,又可实现上述三种摄影测量加密。下面利用 WuCAPS 系统对来自不同类别地形的多种摄影比例尺航空影像进行处理,以试验三种加密方法所能达到的加密精度。

2.1 试验资料

表 1 给出了试验用的四组航摄像片的主要技术参数。所有航摄负片经扫描成 $21 \mu\text{m}$ 的数字影像后,分别在 WuCAPS 和 JX-4 数字摄影测量工作站上进行了自动转点量测,并人工立体量测了全部控制点的像平面坐标。利用 WuCAPS 实施连续法相对定向且剔除粗差后,统计出的像点坐标总体量测精度(中误差)均优于 $\pm 6.0 \mu\text{m}$ 。利用 POS 系统

自带的数据后处理软件 POSPac^[9] 进行 DGPS、IMU 观测值的联合数据处理,经坐标转换后得到了每张影像的 6 个外方位元素,是为 POS 系统测定的影像外方位元素。这里需要说明的是,试验未采用检校场进行 POS 系统检校和系统误差校正。

2.2 航空摄影测量加密精度

为了分析现行摄影测量加密方法所能达到的加密精度,这里分别进行图 1 所示的密周边布点光束法区域网平差(简称“常规”)、区域两端带构架航线的四角地面控制 GPS 辅助光束法区域网平差(简称“GPS”)和带四角地面控制点的 POS 辅助光束法区域网平差(简称“POS”),并评定了三种加密方法的理论精度。表 2 列出了具体的加密结果。

表 1 试验影像主要技术参数

Tab. 1 Technical Parameters of Images in Experimental Projects

	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4
航摄时间	2004-11	2005-01	2005-09	2005-10
航摄飞机	运-12	运-12	运-8	奖状-II
航摄仪	Leica RC-30	Leica RC-30	Leica RC-30	Leica RC-30
航摄飞行控制系统	Track Air	Track Air	CCNS 4	CCNS 4
机载定位定向系统	POS AV 510	POS AV 510	POS AV 510	POS AV 510
基准站 GPS 接收机	Ashtech	Trimble 5700	Trimble 5700	Trimble 5700
航摄胶片	Kodak 2444	Kodak 2044	Kodak 2402	Kodak 2402
航摄仪主距 /mm	153.84	303.64	154.06	153.53
像幅 /cm ²	23×23	23×23	23×23	23×23
摄影比例尺	1:2 500	1:3 000	1:32 000	1:60 000
航向重叠 /%	61	63	64	64
旁向重叠 /%	32	33	33	30
航线/条	9	10	9	4
构架航线/条	2	2	2	0
像片 /张	255	405	244	48
地面控制点/个	73	160	34	29
加密点 /个	3 675	6 975	3 008	716
区域范围/km ²	4×5	5×8	47×52	40×57
最大地形起伏/m	38.6(平地)	181.7(山地)	728.9(高山地)	105.6(丘陵地)
GPS 数据更新率/s	2	0.5	1	1
GPS 初始化/min	10	10	5	5
GPS 静态观测/min	5	5	5	5
GPS 偏心分量/m	0.303, -0.110, -2.029	0.303, -0.110, -2.002	-2.015, -0.030, 3.102	2.034, -0.520, 1.320
IMU 偏心分量/m	0.000, 0.200, -0.559	0.000, 0.200, -0.710	0.000, -0.201, 0.427	-0.006, -0.202, 0.430

表 2 光束法区域网平差精度

Tab. 2 Accuracy of Photogrammetric Point Determination by Three Kinds of Bundle Block Adjustments

影像	加密方法	控制点数		检查点数		检查点最大残差/m				实际精度/m				理论精度/m				
		σ_0 /μm	平面	高程	平面	高程	X	Y	平面	高程	X	Y	平面	高程	X	Y	平面	高程
试验 1	常规	5.7	23	39	49	33	0.18	0.14	0.198	-0.241	0.08	0.06	0.103	0.079	0.01	0.02	0.022	0.029
	GPS	6.9	4	4	67	67	0.26	0.23	0.232	0.237	0.08	0.08	0.119	0.105	0.04	0.04	0.058	0.061
	POS	6.3	4	4	67	67	-0.20	-0.33	0.212	-0.265	0.08	0.08	0.119	0.099	0.02	0.02	0.030	0.095
试验 2	常规	4.8	39	69	116	86	-0.20	0.17	0.205	-0.382	0.06	0.06	0.087	0.126	0.01	0.02	0.022	0.062
	GPS	6.6	4	4	151	150	-0.29	0.19	0.328	0.383	0.11	0.07	0.131	0.157	0.04	0.04	0.053	0.115
	POS	5.2	4	4	151	150	-0.29	0.25	0.338	0.502	0.11	0.07	0.129	0.178	0.02	0.03	0.035	0.189
试验 3	常规	6.4	20	25	14	9	-1.44	-0.98	1.738	0.892	0.67	0.47	0.818	0.639	0.27	0.28	0.391	0.678
	GPS	6.9	4	4	30	30	1.54	-2.54	2.637	-1.666	0.80	0.74	1.089	0.738	0.41	0.64	0.760	0.617
	POS	6.6	4	4	30	30	-1.36	1.49	1.648	1.593	0.68	0.83	1.068	0.913	0.25	0.76	0.802	0.879
试验 4	常规	5.9	15	19	10	14	3.13	-2.73	3.385	2.054	1.28	1.29	1.818	1.416	0.31	0.36	0.474	0.771
	GPS	6.4	4	4	25	25	4.02	4.68	4.893	-2.644	1.46	1.88	2.375	1.350	0.35	0.42	0.547	1.053
	POS	6.2	4	4	25	25	4.22	4.59	5.116	-2.653	1.52	1.86	2.402	1.320	0.33	0.41	0.523	1.015

注:① “实际精度”是由 n 个检查点的加密坐标与其野外测量坐标的较差 Δ_i ($i=X, Y, Z$) 求出的平均中误差,即 $\mu_i = \sqrt{\sum \Delta_i^2 / n}$; $\mu_{\text{平面}} = \sqrt{\mu_X^2 + \mu_Y^2}$; ② “理论精度”是根据误差传播定律由未知数协因数矩阵 Q_{XX} 计算得到的,即 $m_i = \sigma_0 \sqrt{Q_{ii}}$ ($i=X, Y, Z$); $m_{\text{平面}} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2}$ 。

由表 1 数据可知,试验 1、试验 2 影像可用于 1:500~1:2 000 比例尺 4D 产品的生产,试验 3 影像可用于 1:5 000~1:10 000 比例尺 4D 产品的生产,试验 4 影像可用于 1:50 000 比例尺 4D 产品的生产。根据我国现行航空摄影测量内业规范^[10-12],若按地形起伏划分,试验区 1、试验区 4、试验区 2 和试验区 3 分别属于平地、丘陵地、山地和高山地。分析表 2 的试验结果,可以得出如下结论。

1) 采用现行的三种摄影测量加密方法,加密点的精度均可满足所处地形相应比例尺 4D 产品生产对航测内业加密的精度要求。尽管在试验 2 的 POS 辅助光束法区域网平差中,有 4 个高程检查点残差超出规范规定的限差,占了 150 个高程检查点的 2.7%,但是经修测是完全有可能达到摄影测量加密精度要求的。这说明本文所述的任何一种加密方法在 4D 产品的生产中都是可用的。

2) 从理论精度分析,常规光束法区域网平差精度是最高的,带构架航线的 GPS 辅助光束法区域网平差(试验 1~3)与 POS 辅助光束法区域网平差相比,高程精度前者明显高于后者,而平面精度后者较前者好,且摄影比例尺越大,这种优势越明显。这是因为构架航线的使用大量增加了像点坐标的观测值,引入了相应的测量误差(σ_0 的变化证实了这一点),尤其是测图影像与构架影像摄影比例尺的不一致性,它们之间的转点误差较测图航线内同名像点的匹配误差要大得多。在大比例尺航空影像的加密中,各种量测误差都比较小,相对而言,这一误差便突显出来了。

3) 对于每一个试验区,比较密周边布点的光束法区域网平差、区域两端敷设构架航线的带四角地面控制 GPS 辅助光束法区域网平差与带四角地面控制点的 POS 辅助光束法区域网平差的实际精度,前者最好,这与理论分析结果相吻合;后两者没有实质性差异。究其原因是所有检查点均为明显地物点,且人工立体量测,存在一定的辨认误差,加之底片变形、扫描误差、POS 外方位元素误差等的影响,尽管平差过程中进行了一系列系统误差的补偿,加密结果仍然带有一定的误差,致使实际精度远低于理论精度,尤其是平面精度的差距还相当大,最终导致实际精度达不到理论精度,这是比较切合实际的。

4) 就地面控制而言,常规光束法区域网平差的精度主要取决于地面控制点的分布与间距,区域越大,所需的地面控制点越多;GPS 辅助光束

法区域网平差和 POS 辅助光束法区域网平差只需在区域网的四角布设 4 个平高地面控制点,且不随区域网的大小而变化。不过,区域网较大时,GPS 辅助光束法区域网平差需在区域两端敷设构架航线,以保证高程的加密精度。

3 结语

本文通过对不同地形的多种比例尺航空影像的加密试验,分析并比较了当代三种摄影测量加密方法所能达到的精度。结果表明,三种加密方法均能满足我国现行航空摄影测量规范对 4D 产品生产的要求。但是,在数字摄影测量时代,少用地面控制点不但可以减轻野外测量强度,缩短作业周期,而且可以提高航空摄影测量作业的自动化程度。总体看来,常规光束法区域网平差是一种精度最高、应用范围最广的摄影测量加密方法;GPS 辅助光束法区域网平差是一种实用且经济的方法,国家基础测绘中已经大规模使用;POS 辅助光束法区域网平差对影像获取有很高的要求,不仅设备昂贵,数据后处理复杂,而且加密精度相对于 GPS 辅助光束法区域网平差没有任何改善,大多数情况下精度还略逊一筹。就国家基础地理信息的获取而言,应综合考虑操作难度和作业效率,充分发挥各自的优势,因地制宜,采用最佳的摄影测量加密方案,以获取最大的经济效益。为此,笔者认为,在交通便利、地势平坦地区的大比例尺地形测图中,应以常规光束法区域网平差为主;在困难地区、无图区或者人员不能通达地区,4D 产品的生产应采用 GPS 辅助光束法区域网平差;正射影像图的制作、小范围的 4D 产品更新等可采用 POS 直接传感器定向方法。一般说来,POS 辅助光束法区域网平差是不宜多用的。不过,在城市大比例尺测图、机载激光雷达、数字航空摄影等领域,POS 系统有着广阔的应用前景。当务之急是要尽快完善 POS 系统与其他传感器的集成技术,加大应用试验力度,充分发挥多传感器集成航空遥感平台的作用,相关的研究正在深入进行中。

参 考 文 献

- [1] 李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1992
- [2] Ackermann F. Practical Experience with GPS-Supported Aerial Triangulation [J]. Photogrammetric Record, 1994, 16(84): 861-874

- [3] 袁修孝, 朱武, 武军鹏, 等. 无地面控制 GPS 辅助光束法区域网平差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(10):852-857
- [4] 袁修孝. GPS 辅助空中三角测量原理及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2001
- [5] Gruen A, Baer S. Aerial Mobile Mapping-Georeferencing Without GPS/INS [C]. The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, 2001
- [6] Heipke C, Jacobsen K, Wegmann H. The OEEPE Test on Integrated Sensor Orientation: Results of Phase I [C]. Photogrammetric Week 2001, Stuttgart, 2001
- [7] Greening T, Schickler W, Thorpe A. The Proper Use of Directly Observed Orientation Data: Aerial Trangulation is Not Obsolete [C]. 2000 ASPRS Annual Conference, Washington D C, 2000
- [8] 袁修孝, 杨芬, 赵青, 等. 机载 POS 系统视准轴误差检校[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(12):1 039-1 043
- [9] APPLANiX a Trimble Company. Applanix Product Outline POSPac TM Air[OL]. http://www.applanix.com/products/pospac_airborne_index.php, 2007
- [10] 国家技术监督局. 1:500、1:1 000、1:2 000 地形图航空摄影测量内业规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998
- [11] 国家技术监督局. 1:5 000、1:10 000 地形图航空摄影测量内业规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993
- [12] 国家技术监督局. 1:25 000、1:50 000、1:100 000 地形图航空摄影测量内业规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991

作者简介:袁修孝,教授,博士,博士生导师。主要从事航空航天摄影测量高精度对地目标定位理论与方法、高分辨率卫星遥感影像几何处理、影像变化检测与数据更新等的研究与教学工作。代表成果:GPS 辅助空中三角测量等。已出版专著 2 部,发表论文 70 余篇。

E-mail:yxxqhyw@public.wh.hb.cn

Modern Methodologies for Photogrammetric Point Determination

YUAN Xiuxiao¹

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

Abstract: Three kinds of operational methodologies and their mathematic models of modern aerial photogrammetric point determination are described. A combined bundle block adjustment system WuCAPS, which can make conventional bundle block adjustment, GPS-supported bundle block adjustment and POS-supported bundle block adjustment, is developed based on the basic mathematic models mentioned above. Real aerial photographs, at image scales from 1:2 500 to 1:60 000, with POS data taken over various topographies in China were processed by WuCAPS. The accuracies of photogrammetric point determination from three methodologies are compared and analyzed. The empirical results have verified that the coordinate accuracies of the photogrammetric points can meet the requirements of the specifications of topographic mapping. However, it is necessary for topographic mapping to adopt the most economical and the most operational methodology.

Key words: aerial photogrammetric point determination; global positioning system (GPS); position and orientation system (POS); accuracy

About the author: YUAN Xiuxiao, professor, Ph. D, Ph. D supervisor. He is concentrated on the research and education in high precision photogrammetric point determination, POS-supported aerial photogrammetry, geometric processing of high-resolution satellite imageries, and image change detection and data update, etc. He has published 2 monographs and more than 70 papers.

E-mail: yxxqhyw@public.wh.hb.cn