

IMU/ D GPS 辅助航空摄影测量中检校场布设方案研究

李学友¹,倪忠礼²

(1. 中国测绘科学研究院,北京 100039; 2. 大连宇翔测绘有限公司,辽宁 大连 116041)

摘 要:在 IMU/ D GPS 辅助航空摄影测量生产中,布设检校场的作用、检校场如何布设、飞行的频率以及飞行中的注意事项等一直是国内外众多学者专家积极讨论的内容。文中对检校场所起的作用进行了系统分析,提出了检校场的布设方案,并进行了大量的实测数据实验,探讨了上述问题。
关键词:检校场;偏心角;线元素分量漂移值;直接定向法;IMU/ D GPS 辅助空中三角测量法
中图分类号: P23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006 - 7949(2005)04 - 0014 - 05

Research on calibration field designing for
IMU/ D GPS supported photogrammetry

LI Xue-you¹, NI Zhong-li²

(1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China;
2. Dalian Yuxiang Mapping Co. Ltd., Dalian 116041, China)

Abstract :In the production of IMU/ D GPS supported photogrammetry , some issues photogrammetric professionals are mostly concerned about , such as : What is the purpose of a calibration field ? How to design it ? How often should calibration be performed ? And what are the requirement criteria for calibration ? Those questions are answered by analyzing the functions of a calibration field , presenting the design scheme of calibration field , and carrying out a lot of experiment about it .
Key words :calibration field ; misalignment angle ; position offset ; Direct Georeferencing (DG) ; Integrated Sensor Orientation (ISO) .

IMU/ D GPS 辅助航空摄影测量^[2]的核心是采用动态差分 GPS (即 D GPS) 技术和惯性测量装置 (即 IMU - Inertial Measurement Unit) 直接在航摄飞行中测定航摄仪的位置和姿态,并经严格的联合数据后处理(即卡尔曼滤波),获得高精度的航片外方位元素,从而实现无或极少地面控制的航片定向和测图。

由于 IMU/ D GPS 系统测定的位置和姿态是惯性坐标系下的直接测量数据即位置数据 (X , Y , Z) 以及姿态数据 (pitch , roll , yaw) ,而在实际摄影测量生产中需要采用的是摄影测量坐标系下的精确外方位元素位置数据 (X , Y , Z) 和姿态数据 (φ , ω , κ) 。为实现惯性坐标系到摄影测量坐标系下的转换,通用的做法是采用飞行检校场的方法来进行。

本文通过深入的理论分析,明确检校场飞行的重要性;结合国内外经验,介绍检校场的布设方法;

通过大量的生产实验对检校场的飞行频度、检校场飞行高度、IMU/ D GPS 辅助空三计算时是否需要每架次飞行检校场等问题作出系统分析和精度验证,总结和提出检校场布设及飞行结论和建议。

1 偏心角和线元素分量偏移值

IMU 一般与航摄仪紧密固联,安装时尽量保证各轴精确平行,IMU 与航摄仪各轴指向及姿态角度定义见图 1,其中上标 C 代表航摄仪,上标 I 代表 IMU。

实际上安装后总存在着 IMU 与航摄仪的各轴指向间有一个微小的角度差,即偏心角 (Misalignment angle),分解为 3 个方向的角度偏差,分别为 e_x , e_y , e_z ,见图 2。图 2 中 b * 系统为相机坐标系统,b 系统为 IMU 导航载体坐标系统。偏心角在实际应用中必须检定,并在各种转换中考虑进去该值,

收稿日期:2005 - 07 - 10
作者简介:李学友(1974 ~) ,男,副研究员,博士研究生。

尤其在直接地理定向等高精度应用中尤为重要。

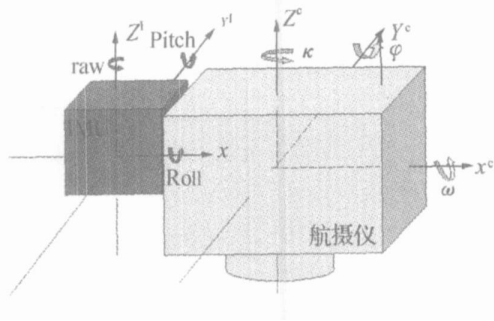


图 1 IMU 及航摄影仪各轴指向及姿态角示意图

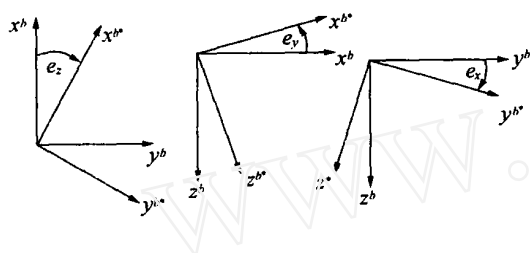


图 2 偏心角的含义示意图

2 线元素分量偏移值

外方位元素中角元素偏心角的含义容易理解,那么线元素分量偏移值是怎样产生的呢?这主要是由于地球曲率影响以及相机内方位元素中焦距的变化引起的。

2.1 地球曲率的影响

摄影测量区域网平差中采用的数学模型,是基于正交坐标系统的,是一个严格意义上的右手空间直角坐标系。而用于确定区域网绝对空间位置的控制点坐标往往是在国家统一左手坐标系(平面为高斯-克吕格投影坐标,高程为国家高程系统,且平面与高程分别位于两个参考面上。严格说这并不是真正的空间直角坐标系)给定的,这两个坐标系的不一致性主要是由地球曲率造成的。在传统的数据处理中,区域网平差数学模型中将会对地球曲率改正进行补偿。地球曲率改正一般有常规改正法和实用改正法两种方法^[3],前者适用于平差区域较小或者地形起伏不大地区,后者适用于高精度需求以及测区较大情况下使用。

在 GPS 辅助空中,由于 GPS 辅助光束法区域网平差的坐标系参考面位于摄站的平均平面上,此时,加密点到平差基准面的高差为平均摄影航高,如果航高为 4 800 m,这相当于在常规光束法平差中引入了 4 800 m 的高地形起伏^[4]。这一量级的地面高差势必带来显著的地球曲率不一致引起的系统误

差。这种情况下,区域网平差不但要对垂直分量(高程)引入误差改正,还应对平面位置引入由于高程误差所引起的平面位移改正^[3]。IMU/ DGPS 辅助航空摄影测量中同样存在上述地球曲率带来的线元素的位移。

2.2 摄影条件差别造成焦距变化的影响

通常每台航摄影仪出厂时都要测定一个标定的焦距,该焦距是在试验室的特定温度条件下测定的。在航摄飞行过程中,由于温度随着飞行高度变化(一般地,每升高 1 000 m,温度约降低 5 ℃),在冷空气中光学系统的变化是不可避免的。表 1 为 H. - K. Meier 对蔡司相机进行的不同飞行高度和操作条件下相机焦距变化的研究结果。

表 1 不同飞行高度和操作条件下相机焦距的变化^[1]

相机操作条件	在压力舱内有玻璃板与外界相隔的情况下	暴露在空气中,恒温 7 度时	暴露在空气中,温度随外界气温变化时
飞行高度	6 km 14 km	6 km 14 km	6 km 14 km
F = 153 mm	- 20 μm - 38 μm	- 36 μm - 58 μm	- 47 μm - 80 μm
F = 305 mm	+ 12 μm - 17 μm	- 33 μm - 28 μm	- 110 μm - 172 μm

由表 1 可以看出焦距变化取决于相机的类型、操作条件以及相机在同一温度条件下的时间,可以采用一个数学模型对焦距变化对精度的影响大小进行估算。

通常情况下,可以用如下的简单数学关系描述航空摄影测量(正交坐标系下)下地面坐标与影像坐标间的关系^[1]:

$$X = \frac{h}{f} \cdot x \quad Y = \frac{h}{f} \cdot y \quad Z = \frac{b \cdot f}{px} \tag{1}$$

式中, h 为摄影高度, f 为焦距, b 为投影中心距离,即基线长, px 为 x 视差, x, y 为影像坐标, h/f 为摄影比例尺。

在地面控制点绝对定向或者经典的光束法区域网平差中,平面控制点确定了比例,就是说焦距变化的误差在飞行高度上进行了补偿。在垂直分量方面,该基线长 b 也间接确定了比例,但是焦距的微小偏差将对高度 Z 起直接线性的影响。

例如,153 焦距的广角相机产生了 15 μm 的变化,在飞行高度为 1 000 m 的情况下将引起投影中心到基准面距离变化 100 mm,即 0.1 %。

3 检校场的作用

在 IMU/ DGPS 辅助航空摄影测量生产中,一般

采用两种方法,即“直接定向法”或也称“直接地理编码法”(简称 DG-Direct Georeferencing)和“IMU/DGPS 辅助空中三角测量法”或也称“联合传感器定向法”(简称 ISO-Integrated Sensor Orientation)。

直接定向法(DG)在航空摄影的同时获得 DGPS 数据和 IMU 姿态数据,通过事后 GPS 差分处理及姿态测量数据处理,获取摄影时刻航摄影精确位置坐标和姿态。为进而得到每张像片的高精度外方位元素,只有间接通过检校场获得角元素偏心角和线元素分量偏移值等来对它进行补偿。完整的系统检校信息应包含角元素偏心角,线元素分量偏移值以及实际的内方位元素。但实际的内方位元素中的焦距变化与线元素的垂直分量偏移值 100% 相关,无法进行测定。因此,实际生产中 DG 是用经过角元素偏心角和线元素分量偏移值补偿后的外方位元素和标定内方位元素推算地面点坐标的。也就是说该线元素的垂直分量偏移值除了包含地球曲率不一致引起的系统偏移外,还包含了由于摄影条件变化引起的焦距带来的垂直分量上的变化。因此,在系统检校时也应该考虑这一点,就是说在检校场照相之前,相机应在同一温度条件下有足够的时间,而且尽量与航摄区域的高度保持一致。

IMU/DGPS 辅助空中三角测量法是将基于 IMU/DGPS 技术直接获取的每张像片的外方位元素,作为带权观测值参与摄影测量区域网平差,获得更高精度的像片外方位元素成果。DG 和 ISO 方法的最大区别是没有经过平差。对于光束法区域网平差来说,一些小的误差(如焦距的变化,地球曲面的变化等)可以通过外定向来补偿。但是这不适于 DG 方法,如果航摄仪和 IMU 之间的角元素偏心角和线元素分量偏移值不是在同一摄影条件下(航高以及气温等)确定,则不能补偿上述误差(尤其是摄影条件差别带来的焦距的差异)。

因此,为确定姿态测量单元 IMU 与航摄仪之间的角度系统差(即偏心角)以及线元素分量偏移值,必须设立检校场。即在一个有足够数量精度较高控制点的试验区进行检校飞行,采用空三方法计算出每张像片的外方位元素,含投影中心的位置和姿态角(ϕ , ω)。然后通过 IMU/DGPS 测量获得的位置和姿态数据(ϕ , ω)进行计算来求得偏心角及线元素分量偏移值的最佳估计,然后对整个摄区范围加入偏心角系统差改正和线元素分量偏移值改正,得到无系统误差的外方位元素成果。这样只需在检校场范围内进行空三加密和外业控制测量,获得系统误差值的改正量,就可以实现在整个摄区

的无(或少)地面控制的航空摄影测量了。

4 检校场的布设方案

目前国际上主要从事 IMU/DGPS 系统设备生产的两家公司(德国 IGI 公司和加拿大 Applanix 公司)分别有不同的检校场布设方案。其中,德国 IGI 公司建议的检校场设计方案为:

- 1) 检校场应按照比例尺设置两条相邻的平行航线,每条航线 10 个像对;
- 2) 保证航向重叠和旁向重叠均为 60 %;
- 3) 在检校场的周边布设 6 个平高控制点,控制点点位距像片边缘约为像片宽的 20 %;
- 4) 航摄飞行高度与摄区高度相同。

5 生产实验及结果分析

由于 IMU/DGPS 辅助航空摄影测量技术在國內刚刚开展,在实际生产中存在如下疑问:是否需要每架次对检校场进行飞行? 检校场飞行高度(航摄比例尺)以及布设的位置对结果的影响?

为回答上述问题,在实践中给予验证,结合国家基础航摄项目——锡林浩特摄区 IMU/DGPS 辅助航空摄影测量试生产以及南京大比例尺摄区项目,进行了检校场布设方案设计与实验研究。实验中采用的 IMU/DGPS 系统是德国 IGI 公司的 AERO-control II d 系统,检校场布设方法也采用 IGI 公司推荐的方法。

5.1 偏心角及线元素分量偏移值变化规律实验

检校场空三测量解算采用四维(北京)公司开发的 PBBA 软件。IMU/DGPS 数据处理以及偏心角及线元素分量偏移值计算采用德国 IGI 公司开发的 AEROoffice 5.0 软件进行。

对锡林浩特摄区 7 个架次的 8 次检校飞行进行检校场空三计算,计算出每次检校飞行获得的偏心角值和线元素分量偏移值(见表 2)。

由表 2 可得出如下实验结论:

- 1) 不同架次飞行计算得到的偏心角差异较大:其中, Roll 角数值呈逐渐减小趋势,第一架次与最后一架次差值达到 0.236 9°; Pitch 角最大与最小值差 0.086 2°; Yaw 角最大与最小值差 0.193 3°;
- 2) 相同高度、不同架次飞行计算得到的线元素分量偏移值(尤其是高程方向)差异较大,变化范围从 - 2.359 到 1.088;
- 3) 在同一架次、不同高度飞行计算得到的偏心角差异较小: Roll 角差值 0.017 7°; Pitch 角差值 0.021 2°; Yaw 角差值 0.046 8°。表中两架次测角精

度印证了该差异是由测角精度引起的 ;

4) 在同一架次、不同高度飞行计算得到的线元素分量偏移值 (尤其是高程方向) 差异较大 , 达到 8. 068 m。

表 2 偏心角值和线元素分量偏移值计算结果

航摄日期	检校场	线元素分量		位置中	偏心角值	角度中误差
		偏移值 m	误差 m		deg	deg
20030925	正镶白旗	东	- 0. 538	0. 282	Roll 0. 724 5	Roll 0. 013 3
	1 32 000	北	1. 374	0. 838	Pitch0. 433 7	Pitch 0. 007 9
	检校场	高	- 1. 461	0. 595	Yaw 2. 091 7	Yaw 0. 004 9
20030928	锡林浩特	东	0. 240	0. 381	Roll 0. 737 6	Roll 0. 010 2
	1 32 000	北	1. 025	0. 524	Pitch0. 388 8	Pitch 0. 018 0
	检校场	高	- 2. 359	0. 255	Yaw 2. 128 3	Yaw 0. 002 6
20031001	正镶白旗	东	0. 680	0. 261	Roll 0. 719 7	Roll 0. 010 2
	1 32 000	北	0. 557	0. 609	Pitch0. 455 0	Pitch 0. 015 3
	检校场	高	- 0. 049	0. 174	Yaw 1. 952 7	Yaw 0. 002 8
20031003	正镶白旗	东	- 0. 080	0. 281	Roll 0. 654 6	Roll 0. 015 1
	1 32 000	北	2. 251	0. 918	Pitch0. 451 8	Pitch 0. 013 7
	检校区	高	0. 762	0. 809	Yaw 2. 034 9	Yaw 0. 005 5
20031004	正镶白旗	东	0. 601	0. 198	Roll 0. 628 7	Roll 0. 007 5
	1 32 000	北	0. 775	0. 407	Pitch0. 413 9	Pitch 0. 008 0
	检校区	高	1. 050	0. 280	Yaw 2. 071 6	Yaw 0. 004 1
20031015	苏尼特左旗	东	- 0. 440	0. 759	Roll 0. 607 4	Roll 0. 007 3
	1 50 000	北	0. 494	2. 548	Pitch0. 475 0	Pitch 0. 008 5
	检校区	高	9. 141	0. 718	Yaw 2. 100 2	Yaw 0. 003 5
20031022	苏尼特左旗	东	- 0. 141	0. 587	Roll 0. 487 6	Roll 0. 010 5
	1 50 000	北	0. 673	1. 445	Pitch0. 471 0	Pitch 0. 005 6
	检校区	高	9. 156	1. 153	Yaw 2. 146 0	Yaw 0. 002 9
	正镶白旗	东	0. 318	0. 189	Roll 0. 505 3	Roll 0. 009 2
	1 32 000	北	1. 060	0. 493	Pitch0. 449 8	Pitch 0. 017 6
	检校区	高	1. 088	0. 150	Yaw 2. 099 2	Yaw 0. 006 4

对 2004 年该摄区 10 架次的 11 次检校飞行进行检校场空三计算 , 计算出每次检校飞行获得的偏心角值和线元素分量偏移值 , 同样验证了上述实验结论。

5. 2 检校场飞行高度和布设位置实验

为获得同一架次内同一高度、不同位置的检校场得到的偏心角值和线元素分量偏移值对比情况 , 在 9 月 28 日的航摄范围内任取了两条航线作为检校场。每条航线选 15 张航片 , 在两条航线上共分布 15 个控制点。计算结果和 9 月 28 日正镶白旗 1 32 000 检校场结果比较见表 3。可以得出如下实验结论 :

表 3 同架次/ 同高度/ 不同位置检校场情况对比

飞行高 度 (m)	位置	高程分 量差 (m)	偏心角值			测角中误差		
			Roll	pitch	yaw	Roll	pitch	yaw
6 125	摄区	- 2. 823	0. 731 2	0. 479 5	0. 044 0	0. 003 8	0. 005 8	0. 007 1
6 125	距摄区 200 km	- 2. 992	0. 740 6	0. 450 3	0. 048 7	0. 008 3	0. 019 0	0. 006 5
	差值	0. 169	- 0. 009 4	0. 029 2	- 0. 004 7			

1) 在相同飞行高度 , 不同位置的检校场得到的偏心角值和线元素分量偏移值 (高程分量) 基本一致 , 即检校场可以设置在离摄区较远的地方 (本例中距离摄区 200 km) ;

2) 检校场可以用摄区中任取两条航线 (需足够数量的地面控制点) 来代替。

在不同飞行高度 , 不同位置检校场获得的偏心角值与高程分量偏移值的对比见表 4、表 5。

表 4 同架次/ 不同高度/ 不同位置检校场情况对比 (1)

飞行高 度 (m)	位置	高程分 量差 (m)	偏心角值			测角中误差		
			Roll	pitch	yaw	Roll	pitch	yaw
8 688	摄区	- 3. 495	0. 620 2	0. 482 5	0. 063 7	0. 005 3	0. 006 3	0. 007 3
6 125	距摄区 300 km	- 0. 912	0. 631 6	0. 474 7	0. 059 4	0. 009 4	0. 011 7	0. 003 5
	差值	- 2. 583	- 0. 011 4	0. 007 8	0. 004 3			

在 10 月 4 日选用常规航线计算的结果与正镶白旗 1 32 000 检校场计算结果为表 4。10 月 22 日 , 在同一架次飞行中 , 先后对苏尼特左旗检校场 (位于摄区) 以及正镶白旗检校场 (距离摄区 300 km 左右) 进行了航摄飞行 , 两个检校场计算得出的结果对比见表 5。

表 5 同架次/ 不同高度/ 不同位置检校场情况对比 (2)

飞行高 度 (m)	位置	高程分 量差 (m)	偏心角值			测角中误差		
			Roll	pitch	yaw	Roll	pitch	yaw
8 688	摄区	- 2. 218	0. 509 9	0. 510 8	0. 078 9	0. 014 5	0. 014 5	0. 004 9
6 125	距摄区 300 km	- 1. 344	0. 488 8	0. 485 8	0. 072 8	0. 013 2	0. 024 4	0. 013 7
	差值	- 0. 874	0. 021 1	0. 025	0. 006 1			

由表 4、表 5 中可以得出如下实验结论 :

1) 在不同飞行高度 , 不同位置的检校场得到的偏心角值基本一致 , 但线元素分量偏移值 (高程分量) 有明显差别 (两次实验中分别为 - 2. 583 和 - 0. 874) ;

2) 检校场可以设置在离摄区较远的地方 (两例

中距离摄区 300 km) ;

3) 在 DG 应用中, 检校场飞行需与摄区同高度飞行。

5.3 IMU/DGPS 辅助空三计算是否需要每架次飞行检校场

从表 2 可以看出, 9 月 25 日与 10 月 22 日之间时间间隔最长, 偏心角差距比较大(其中 Roll 差值达到 0.219 2°)。分别应用 9 月 25 日与 10 月 22 日两个架次的偏心角值与线元素分量偏移值对 9 月 25 日架次 IMU/DGPS 直接获取的外方位元素进行改正, 并进行 IMU/DGPS 辅助空三计算(采用 4 个地面控制点), 得到其余各检查点的精度变化最大相差 10 cm。可以得出如下实验结论: 采用 IMU/DGPS 辅助空三方法(加少量控制点)只需飞行一次检校场, 其余架次可采用同样的检校数据代入解算, 即不必每架次均飞行检校场。

2005 年 3~9 月, 在南京进行了大比例尺 IMU/DGPS 辅助航空摄影测量制图项目。航摄比例尺为 1:5 000, 成图比例尺为 1:1 000。南京摄区总计飞行了 9 个架次。其中对设计的检校场飞行了 3 个架次。实际生产中每相邻 3 架次用同一套检校成果进行检校计算。经检校计算的外方位元素成果直接用于 IMU/DGPS 辅助空三计算, 每个加密分区采用 4 个平高点进行空三加密, 加密及测图精度完全满足规范要求。

南京摄区的实例同样验证了: 当采用 IMU/DGPS 辅助空中三角测量方法进行测图时(只需少量地面控制点), 无需每架次飞行检校场。如果飞行周期较长, 为验证 IMU 与相机间连接关系是否发生了大的变动, 可在航摄开始阶段、结束阶段各飞行一个架次, 或者在中间阶段加飞一个架次。如果摄

区飞行中间对机载系统进行了重新安装, 则安装后首架次应进行一次检校场飞行。

6 结论及建议

通过本文的研究和实验结果可以看出:

1) 检校场检校计算的主要作用是计算出偏心角和线元素分量偏移值;

2) 在不同高度飞行时, 偏心角的偏差值没有明显差异, 线元素分量偏移值差异很大;

3) 采用直接定向法时, 必须每架次飞行检校场, 检校场必须与摄区同高度;

4) 采用 IMU/DGPS 辅助空三时, 由于基于少量几个地面控制点(一般 4 个)进行加密后, 可消除角度系统误差和线元素分量偏移值带来的影响, 不必每架次飞行检校场;

5) 检校场可以设置在离摄区较远的地方(200~300 km), 也可以用摄区中任取两条航线(需足够数量的地面控制点, 一般 6 个)来代替。

参考文献

- [1] Jacobsen, Karsten and Wegmann, Helge, Dependencies and problems of direct sensor orientation[A]. C. Heipke, K. Jacobsen and H. Wegmann (Eds.), OEEPE Official Publication No. 43[C], 2002:73 - 84.
- [2] 李学友. IMU/DGPS 辅助航空摄影测量综述[J]. 测绘科学, 2005(5): 7 - 27.
- [3] 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.
- [4] 袁修孝. GPS 辅助空中三角测量及其质量控制[D]. 武汉: 武汉大学, 1999.

[责任编辑: 张德福]

《测绘工程》变更为双月刊的公告

经主办单位同意、主管部门批准, 《测绘工程》自 2006 年起将由目前的季刊变更为双月刊。变更后的《测绘工程》办刊宗旨不变, 服务对象不变, 出版质量和标准不变。该刊每双月 25 日出版, A4 开本、80 页, 每期定价 8.00 元, 全年 48.00 元。本刊是中国科技论文、统计源刊源期刊。竭诚欢迎广大作者、读者踊跃投稿。

联系电话: 0451 - 88028906

电子信箱: chgc @vip. 0451. com

联系人: 王 黎 张德福

《测绘工程》编辑部