

# 机载 POS 系统用于航空遥感直接对地目标定位的精度分析

袁修孝<sup>1</sup> 傅建红<sup>1</sup> 左正立<sup>2</sup> 孙红星<sup>1</sup>

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)  
(2 中国科学院遥感应用研究所, 北京市朝阳区大屯路 3 号, 100101)

**摘要:** 利用实际航摄资料评价了 WGS 84 和国家 80 坐标系下机载 POS(position and orientation system) 系统直接对地目标定位的精度, 分析了不同大地水准面拟合方法对高程精度的影响, 检校了 POS 系统的视准轴误差, 讨论了检校场的检校结果。试验表明, 基于 POS 系统的航空遥感直接对地目标定位至少需要利用带有 1 个平高地面控制点的检校场对 POS 系统进行检校才能消除系统误差; 在 WGS84 坐标系中, 可以获得较高的定位精度, 而转换到国家 80 坐标系下, 必须对高程进行大地水准面拟合改正。

**关键词:** POS 系统; 目标定位; 高程拟合; 精度

**中图法分类号:** P231.2; P237.9

20 世纪 90 年代后使用的 GPS 辅助空中三角测量技术, 可大量减少用于摄影测量区域网平差所需的地面控制点<sup>[1]</sup>, 21 世纪初出现的机载 POS 系统集差分 GPS 定位技术和惯性导航 (INS) 技术于一体, 可用于直接获取航摄像片的 6 个外方位元素, 因此备受摄影测量工作者的关注<sup>[2-4]</sup>。如果利用 POS 系统获取的像片外方位元素精度能够满足摄影测量的要求, 就可直接用于影像的定向, 并进行对地目标定位, 则传统的“航空摄影-野外像片控制联测-摄影测量加密-内业测图”的作业模式就可以改变, 航测成图周期将大大缩短, 地球空间信息的获取以及 4D 产品的生产与更新就会十分方便。为此, 本文以加拿大 Applanix 公司的 POS AV 510 系统为例, 通过对获取的一组实际航摄资料进行处理, 分析了机载 POS 系统在 WGS 84 坐标系和国家 80 坐标系下直接对地目标定位的精度。

## 1 基于 POS 系统的航空遥感直接对地目标定位

POS 系统用于航空遥感对地目标定位有两

种方式: ① 集成传感器定向, 它是考虑到 POS 系统所获取的像片外方位元素含有较大的系统误差, 将其作为带权观测值引入光束法区域网平差, 以整体解求影像的定向参数和目标点的空间坐标, 亦称为 POS 辅助空中三角测量; ② 直接传感器定向, 它是在利用检校场进行 POS 辅助空中三角测量、精确解求 POS 系统误差改正参数的基础上, 对所获取的像片外方位元素进行系统误差补偿, 以获得高精度的像片外方位元素, 再利用立体像对上同名像点的像平面坐标, 按空间前方交会方法<sup>[5]</sup>计算出相应地面点的物方空间坐标, 实现直接对地目标定位。

## 2 试验及分析

### 2.1 试验资料

本文对 2004 年 11 月获取的某地区一组 1:2 500 的航摄像片进行了直接对地目标定位试验, 像片为利用带机载 POS 系统的 153.84 mm 主距的 Lecia RG 30 航摄仪成像于 Kodak 2444 胶片上所形成。试验区域为最大地形起伏为 38.60 m 的平坦地区, 覆盖有正常重叠度的 9 条航线, 共 255 张

像片。航空摄影前,在航摄仪上加装了 POS AV 510 系统,在国产运-12 飞机的顶部安装了 Novtal 双频航空 GPS 天线,测得 GPS 偏心分量为(0.303 m, -0.110 m, -2.029 m), IMU 偏心分量为(0.000 m, 0.200 m, -0.559 m)。航空摄影时,飞机上采用 POS 系统内置的 GPS 接收机,测区内两个基准站上各安置一台 Astech 双频 GPS 接收机,数据更新率均设置为 2 s。飞机起飞前,进行了 10 min 的初始化;飞机着陆后,进行了 5 min 的静态观测。

航摄负片经扫描成  $21\ \mu\text{m}$  的数字影像后,在自行研制的 POS 辅助光束法区域网平差系统 WuCAPS<sup>[6]</sup> 上自动转点量测了 3 634 个加密点,并人工立体量测了全部地面控制点,经带粗差剔除的模型相对定向后,统计出的像点坐标的总体量测精度优于  $6.0\ \mu\text{m}$ 。利用 POS 系统自带的数据库后处理软件 POSpac 对原始观测数据进行处理,得到每张像片的 6 个外方位元素。为分析 POS 系统直接对地目标定位的精度,试验区内平均每隔 3 条基线施测了 1 个平高地面控制点,全

区共布设 72 个像控点。根据这些地面控制点,按照常规加密周边布点方案(区域周边每隔 3 条基线布设 1 个平高控制点,区域内部每隔 7 条基线布设 1 个高程控制点)实施光束法区域网平差,亦获得全部像片的 6 个外方位元素和加密点的地面坐标,外方位元素的理论精度估计为  $m_{x_s} = 0.192\ \text{m}$ ,  $m_{y_s} = 0.240\ \text{m}$ ,  $m_{z_s} = 0.067\ \text{m}$ ,  $m_{\varphi} = 0.026'$ ,  $m_{\omega} = 0.031'$ ,  $m_{\kappa} = 0.021'$ , 利用 26 个平面、42 个高程检查点评定的加密点实际精度为  $\mu_{xy} = 0.085\ \text{m}$ ,  $\mu_z = 0.074\ \text{m}$ 。这一加密结果满足了我国规范对于 1:500 比例尺平地地形测图航测内业加密检查点坐标不符值平面不大于 0.25 m、高程不大于 0.30 m 的精度要求<sup>[7]</sup>。

## 2.2 WGS 84 坐标系下的直接对地目标定位

由于 POS 系统直接提供的像片外方位元素是基于 WGS 84 坐标系的<sup>[8]</sup>,因此,利用其进行直接对地目标定位可获得目标点在 WGS 84 坐标系中的三维坐标。表 1 列出了试验区所有地面控制点在单模型上的前方交会结果与外业测量坐标的较差,检校场大小为  $3 \times 7$  的区域。

表 1 WGS 84 坐标系下的直接对地目标定位结果

Tab. 1 Accuracy of Direct Georeferencing in WGS 84 Coordinate System

检校情况	检查点数	最大残差/m		最小残差/m		中误差/m	
		平面	高程	平面	高程	平面	高程
未检校	201	7.817	-15.457	1.448	-11.599	5.086	14.142
带 1 个控制点的检校	201	0.838	0.432	0.250	0.001	0.494	0.125
带 2 个控制点的检校	201	0.724	0.429	0.111	-0.001	0.363	0.126
带 3 个控制点的检校	201	0.666	0.412	0.043	0.000	0.291	0.122
带 4 个控制点的检校	201	0.588	0.417	0.013	0.000	0.238	0.122

注:中误差为交会点较差的均方根误差。

从表 1 数据可以看出,利用 POS 系统测定的未经检校的像片外方位元素进行直接对地目标定位的精度很低,且带有明显的系统误差。其原因主要是惯性测量装置 IMU 与航摄仪之间存在视准轴误差、IMU 定姿累积漂移误差以及 GPS、IMU 与航摄仪之间的时间不同步<sup>[4]</sup>等引起的误差。为消除这些系统误差的影响,必须对 POS 系统进行严格检校。本文在试验区中选择了不同大小的检校场,并在区域四角布设了地面控制点,使用 POS 系统自带的检校软件 POSCal 经采用不同的检校方案获得了表 2 所示的检校结果。表 2 中,  $T_x, T_y, T_z$  为 POS 系统的视准轴误差;  $D_x, D_y, D_z$  为 POS 系统定义坐标系纳入到地面控制点坐标系下的平移误差。

分析表 2 数据可知,检校场愈大,控制点愈多,检校结果愈好。但当检校场为  $3 \times 7$  的区域,且在区域对角布设 2 个平高地面控制点时,检校

结果趋于稳定。比较表 1 的结果可以看出,当在区域角隅设置 1 个平高地面控制点进行 POS 系统检校后,系统误差得到了很好的补偿,直接对地目标定位精度明显改善,平面精度提高了 90.3%,高程精度提高了 99.1%;随着检校场中控制点的增加,直接对地目标定位结果的平面精度缓慢提高。当检校场四角布设 4 个平高地面控制点时,平面精度比利用 1 个控制点时提高了 51.8%,但高程精度基本不变,这说明高程误差已完全消除。

## 2.3 国家 80 坐标系下的直接对地目标定位

国家基础地理信息的获取一般要求参考于 1980 西安坐标系,即平面采用高斯-克吕格投影,高程为相对于以青岛黄海验潮站为原点所确定的大地水准面正常高。因此,需要把 POS 系统获取的 WGS 84 坐标系下的像片外方位元素转换到国家 80 坐标系中。一般说来,不同参考基准之间的严格坐标变换以空间直角坐标为桥梁,通过利用

表 2 不同检校场的检校结果

Tab. 2 Calibration Results of Different Calibration Blocks

检校场大小	POS 系统误差参数						控制点数
	$T_x / (')$	$T_y / (')$	$T_z / (')$	$D_x / m$	$D_y / m$	$D_z / m$	
2 × 7	- 8. 814	2. 220	72. 768	1. 580	- 1. 025	14. 514	4
	- 8. 883	2. 214	72. 886	1. 385	- 1. 001	14. 549	3
	- 8. 710	2. 191	72. 965	1. 342	- 1. 032	14. 478	2
2 × 12	- 8. 849	2. 184	72. 942	0. 989	- 1. 025	14. 557	1
	- 8. 849	2. 184	72. 942				0
	- 8. 899	2. 285	72. 877	1. 394	- 0. 960	14. 448	4
3 × 7	- 8. 891	2. 288	72. 894	1. 408	- 0. 942	14. 442	3
	- 8. 887	2. 282	72. 802	1. 542	- 0. 892	14. 449	2
	- 8. 850	2. 268	72. 852	1. 381	- 0. 926	14. 637	1
3 × 12	- 8. 850	2. 268	72. 852				0
	- 8. 690	2. 264	72. 680	0. 653	- 0. 946	14. 531	4
	- 8. 697	2. 248	72. 734	0. 544	- 0. 900	14. 551	3
4 × 7	- 8. 558	2. 214	72. 474	0. 531	- 0. 983	14. 625	2
	- 8. 563	2. 191	72. 772	- 0. 108	- 1. 048	14. 518	1
	- 8. 563	2. 191	72. 772				0
4 × 12	- 8. 747	2. 309	72. 768	0. 625	- 0. 890	14. 450	4
	- 8. 713	2. 294	72. 736	0. 714	- 0. 908	14. 488	3
	- 8. 710	2. 294	72. 796	0. 505	- 0. 892	14. 447	2
4 × 12	- 8. 649	2. 260	72. 766	0. 632	- 1. 018	14. 680	1
	- 8. 649	2. 260	72. 766				0
	- 8. 626	2. 323	72. 646	0. 779	- 0. 915	14. 448	4
4 × 12	- 8. 690	2. 329	72. 562	0. 843	- 0. 920	14. 418	3
	- 8. 536	2. 325	72. 567	0. 576	- 0. 875	14. 520	2
	- 8. 590	2. 316	72. 816	0. 189	- 0. 739	14. 500	1
4 × 12	- 8. 590	2. 316	72. 816				0
	- 8. 724	2. 378	72. 723	0. 785	- 0. 918	14. 410	4
	- 8. 728	2. 364	72. 729	0. 746	- 0. 896	14. 359	3
4 × 12	- 8. 665	2. 379	72. 701	0. 790	- 0. 898	14. 457	2
	- 8. 676	2. 375	72. 788	0. 562	- 1. 020	14. 477	1
	- 8. 676	2. 375	72. 788				0

注:  $i \times j$  为  $i$  条航线、每条航线  $j$  张像片的一个区域。

布尔莎公式<sup>[8]</sup>解算两坐标系之间的 7 个变换参数来实现<sup>[9]</sup>。由于从大地坐标到地心空间直角坐标之间的转换需要相对于参考椭球面的大地高, 从 GPS 提供的相对于 WGS 84 参考椭球基准面的大地坐标( $B, L, H$ )可计算 WGS 84 坐标系下的地心空间直角坐标, 而国家 80 坐标为投影后的平面直角坐标和大地水准面高, 所以对平面坐标要按高斯投影反算公式<sup>[8]</sup>进行转换, 高程则按  $H = h + \xi$  转换为大地高,  $H$  为相对于参考椭球的大地高;  $h$  为大地水准面正常高;  $\xi$  为高程异常。

对一般用户而言, 要获得每个点上的高程异常值是困难的, 为获取高精度的像片外方位元素, 本文采用 EGM96 全球重力场模型<sup>[10]</sup>来拟合高程异常。首先用该模型拟合四角控制点的大地高, 然后用拟合的大地高计算国家 80 坐标系下的参心空间直角坐标, 最后按照布尔莎公式计算 WGS 84 坐标系与国家 80 坐标系之间的转换参

数。利用所求得转换参数输入 POSpac 软件, 可计算出国家 80 坐标系下的像片外方位元素, 但高程是相对于国家 80 参考椭球的大地高, 还必须将其转换为正常高。表 3 列出了用 EGM96 模型拟合后的外方位元素进行直接对地目标定位的结果。比较表 1 与表 3 的结果可以发现, 在 WGS 84 坐标系和国家 80 坐标系下的直接对地目标定位的平面精度基本一致, 高程精度后者明显下降。这是由于不同坐标系之间的转换要求控制点上有相对于各自参考基准面的大地高, 而控制点在国家 80 坐标系下的高程为正常高。

表 3 国家 80 坐标系下的对地目标定位结果

Tab. 3 Accuracy of Direct Georeferencing in 80' Geodetic Coordinate System

高程拟合方法	检查点数	最大残差/m		最小残差/m		中误差/m	
		平面	高程	平面	高程	平面	高程
EGM96 模型	198	0. 663	1. 089	0. 055	0. 002	0. 287	0. 444
一次曲面	198	0. 539	- 0. 456	0. 032	0. 000	0. 198	0. 136
二次曲面	198	0. 539	- 0. 452	0. 033	0. 000	0. 159	0. 120

分析检查点的残差分布图可发现, 采用 EGM96 全球重力场模型拟合的高程存在一个与航带相关的系统误差。现有研究表明, 在局部地区, 地球重力场模型计算的大地水准面和重力异常值与真实值之间存在明显的偏差, 当采用 GPS 水准数据消除系统偏差后, 大地水准面精度可得到显著的提高<sup>[11]</sup>。为改善国家 80 坐标系下直接对地目标定位的高程精度, 本文将 GPS 高程利用水准测量数据进行如式 (1) 的大地水准面拟合:

$$\xi = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY + a_4X^2 + a_5Y^2 + \dots \quad (1)$$

式中,  $X, Y$  为待求点的平面坐标。

这里用式 (1) 的数学曲面拟合试验区内的 高程异常值, 取前 3 项, 则为一次曲面拟合; 取前 5 项, 则为二次曲面拟合, 表 3 为拟合后的像片外方位元素实施对地目标定位的结果。将其与用 EGM96 模型拟合的结果比较发现, 采用一次曲面拟合时, 目标点的高程精度提高了 69. 4%, 平面精度也有了明显的改善, 提高了 31. 0%。由于试验区比较小且很平坦, 大地水准面变化不大, 一次曲面与二次曲面拟合的结果没有太大的差别。在地形复杂或者区域较大时, 采用分区高程拟合方法, 可提高高程拟合精度<sup>[12]</sup>。

### 3 结 语

经过严格检校的 POS 系统, 在 WGS 84 坐标

系下可以提供较高精度的像片外方位元素,用其进行直接对地目标定位可以获得较好的定位精度。如果需要获取在国家统一坐标系或地方局部坐标系中的地理信息,需要对像片外方位元素高程进行大地水准面拟合,根据测区的具体情况,选择合适的拟合方法。

致谢:本次试验得到了辽宁经纬测绘科技有限公司和中飞通用航空公司的大力协助,武汉大学的谢酬硕士、季顺平博士生、黑龙江测绘局的初铁男工程师等参加了部分试验,在此一并致谢!

### 参 考 文 献

- [1] 袁修孝,朱武,武军邴,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
- [2] Mostafa M R. Camera/IMU Bore-sight Calibration: New Advances and Performance Analysis[C]. The ASPRS Annual Meeting, Washington D C, 2002
- [3] Jacobsen K. Calibration Aspects in Direct Georeferencing of Frame Imagery[C]. Pecora 15/ Land Satellite Information, Denver, USA, 2002
- [4] 郭大海,吴立新,王建超,等.机载POS系统对地定位方法初探[J].国土资源遥感,2004,60(2):26-31

- [5] 李德仁,郑肇葆.解析摄影测量学[M].北京:测绘出版社,1992
- [6] 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
- [7] 国家技术监督局. 1:500, 1:1000地形图航空摄影测量内业规范[M].北京:中国标准出版社,1993
- [8] 孔祥元,郭际明,刘宗泉.大地测量学基础[M].武汉:武汉大学出版社,2001
- [9] 袁修孝,傅迎春,张过,等.多级空间信息网格间的平面坐标变换精度分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2005,30(2):110-114
- [10] 王锋堂.地球重力场模型(EGM96)三维可视化[D].北京:首都师范大学,2004
- [11] 曾元武,杨沾吉,张天纪. EGM96, WDM94 和 GPM-98CR 高阶地球重力场模型表示深圳局部重力场的比较与评价[J].测绘学报,2002,31(4):289-291
- [12] 高伟,徐绍铨. GPS 高程分区拟合转换正常高的研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2004,29(10):908-911

第一作者简介:袁修孝,博士,教授,博士生导师。主要从事航空航天遥感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等研究与教学工作。

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

## Accuracy Analysis of Direct Georeferencing by Airborne Position and Orientation System in Aerial Photogrammetry

YUAN Xiuxiao<sup>1</sup> FU Jianhong<sup>1</sup> ZUO Zhengli<sup>2</sup> SUN Hongxing<sup>1</sup>

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

(2 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 3 Datun Road, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The accuracy of direct georeferencing by airborne position and orientation system (POS) in WGS 84 coordinate system and in 80 Xi'an geodetic coordinate system is appraised, the height accuracy by using different geoid simulate methods is analyzed, the bore-sight angle errors of POS system are calibrated and the calibration results in different test fields are discussed. The empirical results have verified that direct georeferencing of aerial photogrammetry based on POS system requires a calibration field with at least 1 XYZ ground control point to eliminate system errors. The accuracy of direct georeferencing is very good in WGS 84 coordinate system. However, it is necessary for getting accurate 3D coordinates of the photogrammetric points to correct height by using geoid simulate in 80' geodetic coordinate system.

**Key words:** POS; object positioning; height fitting; accuracy

**About the first author:** YUAN Xiuxiao, Ph. D, professor, Ph. D supervisor. He is concentrated on the research and education in remote sensing (RS), global positioning system (GPS) and their integration.

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