

文章编号:1671-8860(2011)07-0776-04

文献标志码:A

# ADS40 线阵影像空中三角测量 数据处理与精度分析方法

耿 迅<sup>1</sup> 徐水平<sup>1</sup> 龚志辉<sup>2</sup> 袁 军<sup>1</sup>

(1 西安测绘信息技术总站,西安市西影路36号,710054)

(2 信息工程大学测绘学院,郑州市陇海中路66号,450052)

**摘要:**讨论了线阵影像空三数据处理中的自动连接点匹配、粗差剔除、方差分量估计、GPS/IMU 观测值权值设置、坐标转换等问题,归纳了 ADS40 空三精度分析方法及相应技术指标。通过实际生产项目对机载线阵影像的空三精度进行了分析,获得了满意的空三精度。

**关键词:**三线阵传感器;ADS40;空中三角测量;精度分析

**中图法分类号:**P231.4; P237.3

GPS 辅助航空摄影测量不仅在理论上取得了丰富的研究成果,而且也已经成功应用于测绘生产实践,极大地提高了航测生产效率。20世纪 80 年代,Ackermann 开始利用 GPS 数据进行区域网平差的理论研究;李德仁等对 GPS 辅助空中三角测量的原理与应用进行了系统研究<sup>[1]</sup>;惯导设备与 GPS 系统搭配可提供传感器位置、姿态信息,广泛应用于机载 LiDAR、数码相机等领域。近年来,数码航摄相机逐渐取代传统胶片式相机应用于测绘生产,并形成以 ADS40 为代表的线阵数码相机和以 UCD、DMC、SWDC 为代表的面阵数码相机。文献[2-5]论述了 ADS40 线阵影像的平差模型、成图精度。

ADS40 线阵影像空中三角测量基于自检校光束法平差,同时顾及 GPS、IMU 与相机的几何关系,平差观测值包括 GPS 摄站坐标、IMU 角度值、像点坐标、控制点坐标、偏心分量、偏心角等。ADS40 的一条航带影像通常由几十万条扫描线组成,显然,直接利用光束法平差不可能解算出每一条扫描线的外方位元素。因此,ADS40 线阵影像在空三过程中引入了定向片(orientation fixes)的概念,即每隔一定时间间隔选取一张定向片,先平差求解定向片的外方位元素,然后再内插出每一条扫描线的外方位元素<sup>[6]</sup>。

## 1 空三数据处理与精度分析方法

### 1.1 空三流程

ADS40 线阵影像空三数据处理步骤如下。

1) 数据准备,包括测区基本信息、航线设计参数、飞行情况、影像质量、控制点分布、坐标转换、相机文件、GPS/IMU 数据解算、 $L_0$  级影像生成等。

2) 在 ADS40 后处理软件 GPro 中进行自动点匹配,即 APM (automatic point measurement) 运算。

3) 导入工程,进行初步平差,观察连接点匹配情况,确定连接点数量是否满足平差要求。否则,重新设置匹配策略进行连接点匹配。

4) 剔除粗差并合理设定各个观测值权值,直至平差迭代收敛且各项分析指标符合预期要求,然后写入定向文件,生成新的外方位元素数据。

5) 使用空三更新后的外方位元素数据生成  $L_1$  级影像,量测检查点,统计分析空三精度。

### 1.2 线阵影像空三数据处理关键技术

#### 1) APM 连接点匹配

空三需要大量连接点参与平差,自动连接点匹配可在 GPro 软件中完成,一般使用前、后视全色波段加上绿色下视波段进行匹配(不同 ADS40

相机波段数量与配置方式可能不同)。应该根据地形、纹理等特征设置相应的匹配策略,以便生成足够的连接点用于空三平差。GPro 中可使用  $L_0$  级或者  $L_1$  级影像进行匹配,从目前国内用户的使用情况来看,使用未经纠正的  $L_0$  级影像进行匹配效果较好。在设置工程时输入的测区最低、最高高程尽量接近于实际地形范围,否则会影响匹配效果。

### 2) 粗差剔除

由于受地形、地物、影像质量、匹配算法等因素的影响,自动匹配的连接点不可能完全正确,这是粗差的一大来源;另外,手工量测的控制点也可能存在粗差。最小二乘平差方法估计出的参数易受粗差的影响,抗干扰能力较差。测绘人员过去往往只重视精度指标,这是不全面的,如果观测值中含有粗差,平差结果会出现虚假的高精度,然而这样的结果却是不可靠的,对不可靠的结果讨论其精度显然是没有意义的<sup>[7]</sup>。ADS40 空三软件采用稳健估计理论剔除粗差,对于平差过程中发现的可能是粗差的观测值,在下次平差时给以不同的权值,并观察其对平差结果的影响,以此来发现和定位粗差。考虑到粗差剔除算法的适应性,一般先手工剔除残差值过大的观测值,再进行平差。

### 3) GPS 漂移误差

由于动态 GPS 在使用时会随时间产生线性变化的系统误差,即漂移系统误差,若平差后发现 GPS 残差值随航带具有明显的方向性或者随时间有明显变化时,则考虑加入 GPS 漂移系统误差改正模型,该模型如下<sup>[1,8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} + (t - t_0) \cdot \begin{bmatrix} b_X \\ b_Y \\ b_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 4) 方差分量估计自动确定权值

在一定条件下,观测值的方差分量也可以在平差过程中连同未知数一起求解,称为方差分量估计。ADS40 空三的方差分量估计功能,主要用来在平差过程中自动调整 GPS 与 IMU 观测值的权值。通过迭代平差计算,方差分量估计功能一般可以较好地自动确定权值大小,但在高原、戈壁等困难地区,方差分量估计自动定权功能的效果较差。

### 5) 空三坐标系与坐标转换

ADS40 空三平差的摄影测量坐标系是 LSR 坐标系,即局部空间直角坐标系(local space rectangular, LSR),通常在测区内部选择一个锚点(anchor point),将地心空间直角坐标系转换至以

该锚点为原点的切面直角坐标系(LSR 坐标系)。ADS40 后期成图需要先解决不同坐标基准的变换问题,平面一般采用 7 参数模型进行转换,高程使用高程异常模型进行转换<sup>[9]</sup>。目前,高精度高分辨率的大地水准面精化工作已经在全国各省市陆续展开,有条件的可直接应用相关成果<sup>[10]</sup>。

## 1.3 线阵影像空三精度分析指标与方法

ADS40 空三结果要达到平差后无系统性误差,观测值中的粗差已经剔除,残差服从正态分布,各观测值合理赋权。空三数据处理时需要分析其相应指标,以确定空三成果质量,这主要有单位权中误差  $\sigma_0$ 、GPS/IMU 残差值及权值、方差分量、控制点权值、检查点中误差等。

### 1) 单位权中误差 $\sigma_0$

$\sigma_0$  值的计算公式为:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i p_i e_i}{r}} \quad (2)$$

式中,  $e_i$  是观测值之残差值;  $p_i$  是权值;  $r$  是平差系统多余观测数。 $\sigma_0$  一般以像点坐标量测精度作为测度,即平差时像点坐标权值设为 1, $\sigma_0$  是空三平差的一个关键指标,它受多种因素的影响,如地形、纹理、匹配算法、连接点数量、POS 数据解算、各观测值权值设置等。对于 ADS40 相机系统来说, $\sigma_0$  值一般应该在  $2 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ ,即  $1/3 \sim 1/2$  个像素(ADS40 像素大小为  $6.5 \mu\text{m}$ )。 $\sigma_0$  反映了 ADS40 空三平差的整体精度,是空三平差首先要分析的一个指标。

### 2) 权值设定

观测值  $L_i$  的权可定义为  $P_i = \sigma_0^2 / \sigma_i^2$ 。 $\sigma_0$  是单位权中误差; $\sigma_i$  是各观测值的中误差。由于  $\sigma_0$  通常以像点坐标量测精度作为测度,当观测值是像点坐标时,即  $\sigma_i = \sigma_0$ ,像点坐标观测值的权为 1。ADS40 空三平差中,除像点坐标观测值以外,还含有控制点坐标、GPS 坐标、IMU 角度等观测值。由于各观测值之间精度各异,因此,合理设定各观测值的权值是保证平差质量的一个重要因素。

### 3) 地面控制点权值

由于使用机载 GPS/IMU 设备辅助航空摄影,ADS40 空三对地面控制点数量的要求大大降低了,通常只需要测区四角的 4 个地面控制点即可获得满意的空三精度,此时地面控制点主要起坐标基准控制作用。光束法平差时地面控制点作为带权观测值参与平差,其权值通常根据经验依成图精度要求设定,也可将控制点精度设置为  $0.1 \sim 0.3$  个 GSD(地面采样间隔),据此换算成权值,

如成图比例尺为 1:5 000, GSD 大小为 30 cm, 其精度可设置为  $\pm 3 \text{ cm} \sim \pm 10 \text{ cm}$ 。地面控制点精度越高, 则中误差值越小, 权值越大, 平差时控制点坐标修正幅度越小, 此时地面控制点起到了较好的坐标基准定义作用, 即坐标基准比较固定; 相反, 如果地面控制点精度越低, 则中误差值越大, 权值越小, 平差时控制点坐标修正幅度越大, 此时地面控制点不能很好地起到定义坐标基准的作用, 坐标基准会受到 GPS 与 IMU 观测值的影响, 即坐标基准是浮动的。应该注意的是控制点精度不能设置得过低, 否则不能合理地反映其精度, 也不能起到坐标基准定义的作用。

#### 4) GPS/IMU 观测值权值

GPS/IMU 数据解算后, GPS 与 IMU 观测值均有其中误差值, 据此可以设置其参与联合平差时的初始权值。联合平差时, 使用验后方差分量估计方法可以对初始权值进行调整, 迭代收敛时, 各观测值的权比例会变得比较合理<sup>[11]</sup>。ORIMA 空三软件中使用方差分量 (variance component) 比例因子来表示权值估计效果, 该值反映的是验后权与先验权的一种函数关系, 当其值在 0.8~1.2 之间时说明验后方差分量可以较好地估计出权值。联合平差后, GPS/IMU 观测值的中误差应该符合其先验精度。ADS40 相机配置的 GPS/IMU 系统均有相应的先验精度, 如 IPAS10 设备标称的后处理精度为: GPS 坐标值为 5 cm~30 cm; IMU 角度值为 Roll(侧滚角)0.005°, Pitch(俯仰角)0.005°, Heading(偏航角)0.008°。

#### 5) 空三最终精度评定

一般使用检查点中误差值作为评定空三成果精度的依据。由于目前国内通常使用  $L_0$  级影像进行空三平差, 平差后需要利用新的外方位元素数据生成  $L_1$  级影像。在立体环境下, 加载同一航线两个不同角度的  $L_1$  级影像, 量测检查点坐标, 与其已知坐标进行对比, 计算中误差并作为最终空三成果的精度报告。一般来说, ADS40 可获得优于一个像素的空三精度。

#### 6) 空三精度分析指标

综上所述, ADS40 空三精度分析主要指标如下: ① 单位权中误差  $\sigma_0$  达到经验值: 约  $2 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ ; ② GPS、IMU 观测值之中误差值符合设备先验精度; ③ 粗差剔除完毕, 各观测值的残差值服从正态分布, 无明显的系统性误差; ④ 验后方差分量估计合理定权, GPS 与 IMU 观测值方差分量比例因子在 0.8~1.2 之间; ⑤ 检查点精度符合预期结果, 约在 0.5~1 个像素。

## 2 试验结果与分析

测区采用 ADS40 数码相机航摄, GSD 为 25 cm, 成图比例尺为 1:5 000, 测区范围约 600 km<sup>2</sup>, 航线 13 条, 测区布设一个地面 GPS 基站与机载 GPS 进行同步观测, 基线距离小于 50 km, 布设控制点 27 个, 控制点同时为 WGS84 与西安 80 两套坐标系。GPS/IMU 数据解算结果良好: 可用卫星数为 8 颗, PDOP 值 < 2.5, Lat/Long 精度为 1.8 cm, Height 精度为 2.1 cm, IMU 解算精度为 (0.003°, 0.003°, 0.015°)。使用 4 个含两套坐标系的控制点(重合点)平差解算平面坐标转换 7 参数, 用其他控制点进行精度验证, 平面坐标转换精度约 2 cm; 采用二次曲面模型拟合高程异常进行高程转换, 精度优于 1 cm。定义测区坐标转换参数并导入 LPS 工程中。测区四角 4 个控制点参与空三平差, 比较差分 GPS(DGPS)与精密单点定位方案(PPP)的空三精度如表 1 所示。

表 1 ADS40 线阵影像空三精度

Tab. 1 Results of Aerial Triangulation for ADS40

Linear Array Images

GPS/IMU 解算方 法	$\sigma_0 /$ $\mu\text{m}$	GPS 天 线中心 精度/m	GPS 方差 分量比例 因子	IMU 方差 分量比例 因子	检查点 中误差/ m
DGPS	2.1	±0.024	0.898	0.956	±0.26
		±0.033	1.014	0.970	±0.24
		±0.046	1.006	1.002	±0.32
PPP	2.0	±0.029	0.811	0.977	±0.28
		±0.051	1.007	0.990	±0.25
		±0.064	1.027	1.001	±0.26

对试验结果分析如下:

1) 七参数平面坐标转换与拟合高程异常进行高程转换均取得了 cm 级的精度, 高精度的坐标转换可保证联合平差时不会引入系统误差, 这是获取高质量空三结果的前提。

2) 空三平差结果的各项指标均符合预期, 误差服从随机分布, 无明显系统误差。GPS 天线中心的精度符合动态 GPS 的测量精度, 达到 cm 级; IMU 角度值平差精度在 Roll、Pitch 方向与标称精度相符, 在 Heading 方向稍差。使用验后方差分量估计方法, 逐步对 GPS 与 IMU 权值进行验后权修正, 方差分量比例因子在 1 附近, 迭代收敛情况较好, 各观测值权值设定比较合理。

3) 单位权中误差  $\sigma_0$  约为 1/3 像素, 表明整体平差结果较好, 占平差观测值大部分的连接点影像匹配效果较好, 精度较高。

4) 差分 GPS 与精密单点定位方法获得的空三精度基本相同, 均接近 1 个像素。

理论上来说, ADS40 可以获得 1/3 甚至 1/4 个像素大小的空三精度, 即与影像匹配精度相当<sup>[12]</sup>, 但是航空摄影测量涉及多个工序, 飞行操作是否符合规程、基站观测精度好坏、摄影质量、地形条件、连接点数量与分布、控制点量测与判读误差、数据处理人员经验丰富程度等因素均会影响空三成果质量, 空三精度通常都会略低于理论值, 但是一般应该在 1 个像素左右。

## 参 考 文 献

- [1] 袁修孝. GPS 辅助空中三角测量原理与应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2001: 29-40
- [2] 刘军. GPS/IMU 辅助机载线阵 CCD 影像定位技术研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2007
- [3] 赵双明, 李德仁. ADS40 机载数字传感器平差数学模型及其试验 [J]. 测绘学报, 2006, 35(4): 342-346
- [4] 李德仁, 赵双明, 陆宇红. 机载三线阵传感器影像区域网联合平差 [J]. 测绘学报, 2007, 36(3): 245-250
- [5] Hu W Y, Yang G Y, Yuan H. Application and Accuracy Evaluation of Leica ADS40 for Large Scale Mapping [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing China, 2008, 37(B1): 605-609
- [6] Hinsken L, Miller S, Tempelman U, et al. Triangulation of LH Systems' ADS40 Imagery Using ORIMA GPS/IMU [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2002, 34(3A): 156-162
- [7] 徐青, 吴寿虎, 朱述龙, 等. 近代摄影测量 [M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 21-35
- [8] Ackermann F, Schade H. Application of GPS for Aerial Triangulation [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1993, 59(11): 1 625-1 632
- [9] 耿迅, 杨天克, 缪剑. 机载三线阵传感器航空摄影测量的坐标转换方法研究 [J]. 测绘科学, 2010, 35(4): 65-67
- [10] 陈俊勇, 李建成, 宁津生, 等. 中国新一代高精度高分辨率大地水准面的研究和实施 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(4): 283-299
- [11] 袁修孝. GPS 辅助光束法平差中观测值的自动定权 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(2): 115-118
- [12] Cramer M. The ADS40 Vaihingen/Enz Geometric Performance Test [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(6): 363-374

**第一作者简介:** 耿迅, 硕士, 助理工程师, 主要从事数字摄影测量领域的研究。

E-mail: gengxun\_rs@gmail.com

## The Data Processing and Accuracy Analysis Method of Aerial Triangulation for ADS40 Linear Array Images

GENG Xun<sup>1</sup> XU Shuiping<sup>1</sup> GONG Zhihui<sup>2</sup> YUAN Jun<sup>1</sup>

(1) Xi'an Information Division of Surveying and Mapping, 36 Xiying Road, Xi'an 710054, China)

(2) Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Aerial triangulation is the core process in aerial photogrammetry which determines the accuracy of 4D products. The data processing procedure and accuracy analysis method of aerial triangulation for ADS40 linear array images are different from that of frame images. The basic principle of aerial triangulation for three line scanner images is introduced firstly. The automatic tie point matching, blunder detection, variance component estimation, datum transformation and the weight of GPS/IMU observations in the combined adjustment are discussed. The accuracy analysis method of aerial triangulation for ADS40 linear array images is concluded. Experimental results show that using the data processing method concluded in this paper we acquired a satisfactory result.

**Key words:** three line scanner; ADS40; aerial triangulation; accuracy analysis