

DOI:10.13203/j.whugis20170075



文章编号:1671-8860(2019)02-0246-08

无人直升机面阵影像高精度对地定位

薛武^{1,2} 张永生¹ 王涛¹ 于英¹ 曹彬才¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 航天工程大学,北京,101416

摘要:为提高无人机对地定位精度,必须对系统进行几何标定与补偿。首先进行了直接地理定位实验,检验系统在不经任何标定时直接地理定位精度;然后进行了自由网光束法平差实验,以验证无地面控制点时系统的定位精度;最后进行了POS辅助自检校光束法平差,对内方位元素变化、相机畸变、IMU安置角进行标定和补偿,并验证了系统误差补偿后的直接地理定位精度。实验结果表明,未经几何标定的无人直升机直接地理定位的精度可满足应急条件下测绘保障要求;少量地面控制点的辅助下定位精度远优于1:500比例尺地形图测图的要求,可用于常规测绘生产;系统误差补偿后,直接地理定位精度有明显提升:平面精度提高46.37%,高程精度提高62.49%;系统误差标定和补偿方法正确、有效,无人直升机具有很好的测绘应用前景。

关键词:无人直升机;对地定位;系统误差;标定;补偿

中图分类号:P231

文献标志码:A

随着无人机技术的快速发展与应用,利用无人机平台进行遥感测绘成为摄影测量与遥感的研究热点和重要发展方向^[1-3]。国内外学者纷纷利用各型无人机平台,包括固定翼无人机、无人直升机、多旋翼无人机等开展实验。搭载的传感器有可见光相机、多光谱相机、激光雷达等,其中以可见光数码相机最为常见,研究内容主要是对无人机摄影测量进行精度验证与工程应用实验,结果表明无人机摄影测量技术难度大,要想达到与传统航测飞机媲美的精度,有很多问题亟待解决,但无人机的应用前景是光明的^[4-8]。

目前,中小型固定翼无人机的应用最为广泛,武汉大学利用固定翼无人机、无人直升机、飞艇等低空遥感平台进行了航空摄影测量实验和深入的研究,成功解决了很多工程和技术难题,并研制了多种无人机航测系统和后处理软件。在小区域测绘(如新农村建设,通常面积小于10 km²)、工程测量、灾害应急救援中取得了很多成功的应用案例,但是受平台的载荷量、稳定性、续航时间,以及相机的分辨率、几何量测性能等因素的影响,无人机航测的精度达不到预期要求,特别是在大比例尺测图中还存在较多差距。

为了解决无人机应用中遇到的上述问题,信

息工程大学地理空间信息学院在对已有国产无人机平台进行考核与改进的基础上,设计研发了无人直升机测绘系统,如图1所示。系统主要由无人



图1 无人直升机

Fig. 1 Unmanned Helicopter

直升机、Phase One iXA180 面阵 CCD 相机、POS AV310 组合导航系统、VS-3 对地观测光电吊舱等组成,POS 系统定位测姿的精度如表 1 所示。该系统具有载荷大(80 kg)、续航能力强(超过 6 h)、抗风能力强、定位精度高等优点。特别是无人直升机具有起降方便,不依赖于机场,可以空中悬停,可绕飞、倒飞等优点。这是固定翼无人机所不具备的,在抢险救灾、反恐维稳等应急条件下具有明显的优势。

尽管搭载了测量级的 POS 设备和 CCD 相

收稿日期:2017-05-17

项目资助:国家自然科学基金(41501482);军事测绘导航工程军队重点实验室开放基金;国防科技创新特区项目。

第一作者:薛武,博士,主要研究方向为无人机摄影测量与计算机视觉。xuewu_81@126.com

机,系统理论上具有较高的地理定位精度,但受系统误差的影响,例如相机畸变、传感器安置误差等,定位精度尚有提高的空间。特别是用于大比

例尺 1 : 500 测图时,精度要求较高,因此有必要研究无人直升机高精度对地定位技术。

表 1 POS AV310 性能参数

Tab. 1 Parameters of POS AV310

精度		POS AV 设备			
		310 SPS	310 RTX3	310 RTX PostProcessed4	310 SmartBase PostProcessed4
定位精度/m	平面	1.5	<0.1	<0.1	<0.05
	高程	3	<0.2	<0.2	<0.1
测速精度/m · s ⁻¹		0.05	0.05	0.010	0.010
横滚 & 俯仰精度/(°)		0.03	0.02	0.015	0.015
航向精度/(°)		0.10	0.08	0.035	0.035

1 无人直升机高精度对地定位

1.1 直接地理定位基本原理及主要误差源

无人直升机面阵影像的成像模型即共线条件方程为:

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = - \\ f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \\ y - y_0 + \Delta y = - \\ f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, x, y 为像点坐标观测值; x_0, y_0 为像主点坐标; f 为相机主距; $\Delta x, \Delta y$ 为相机畸变; $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$ 为相机旋转矩阵的各构成元素; X_S, Y_S, Z_S 为相机外方位线元素; X, Y, Z 为像点对应的物方坐标。相机的内方位元素可以根据出厂检定值得到,外方位元素可由 POS 提供的观测值经过必要的坐标转换以及系统误差改正后提供。利用相机内方位元素和 POS 数据可以进行直接地理定位,直接地理定位的原理即多片空间前方交会,模型为:

$$\begin{cases} l_1 X + l_2 Y + l_3 Z - l_x = 0 \\ l_4 X + l_5 Y + l_6 Z - l_y = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $l_1 \sim l_6$ 表示误差方程系数矩阵相应的元素; l_x, l_y 表示像点观测值,具体推导可以参考文献[9]。

从无人机对地定位的基本原理中可以看出,影响其定位精度的误差源主要有相机内方位元素误差、相机畸变和外方位元素的误差,下面分别予以介绍。

数字航测相机出厂时厂家均会提供相机内方位元素和畸变参数的标定值,但是由于安装拆卸、长途搬运、空中震颤等因素的影响,实际使用中还需要定期对相机进行标定,否则会引入比较明显

的系统误差。数字相机的畸变主要包括径向畸变、偏心畸变、CCD 器件表面不平整、CCD 器件内变形等,常用的相机的畸变模型主要有 Ebner 模型、Brown 物理模型和 Bauer 模型,各模型参数具体含义见文献[10]。

机载 POS 设备输出的位置姿态数据并不等同于影像的外方位元素,必须进行必要的转换,角元素和线元素的转换是分开进行的。根据外方位元素的定义,物方坐标系 m 依次绕 X - Y - Z 连动旋转 ω, φ, κ 角,三轴的指向与像空间坐标系 c 重合,相对应的旋转矩阵为 R_c^m 。同时,物方坐标系 m 经过地心直角坐标系 E 、局部水平坐标系 n 、IMU 载体坐标系 b 之后,也可旋转到与相机坐标系 c 相一致,因此外方位角元素的转换式为:

$$R_c^m(\omega, \varphi, \kappa) = R_E^n(B, L) R_n^b(\Psi, \Theta, \Phi) R_b^c(e_x, e_y, e_z) \quad (3)$$

外方位线元素 (X_S, Y_S, Z_S) 的计算除了考虑上述坐标系的旋转之外,还需考虑 IMU 几何中心相对于相机透视中心的空间偏移量,即所谓的偏心矢量 (x_l, y_l, z_l),计算公式为:

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = R_E^n \begin{bmatrix} X_{IMU} \\ Y_{IMU} \\ Z_{IMU} \end{bmatrix}^E + R_n^b R_b^c(\Psi, \Theta, \Phi) \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix}^b \quad (4)$$

式中, $X_{IMU}, Y_{IMU}, Z_{IMU}$ 为 IMU 中心的地心直角坐标。

综上所述,影像外方位元素的误差既包含 POS 本身的测量误差,也包含 POS 安置误差。其中 POS 测量误差由 POS 的硬件水平决定,可以看作偶然误差,难以通过数据后处理手段提高 POS 的测量精度;而 POS 安置误差则属于系统误差,可以通过几何标定予以补偿。POS 安置误差主要包括 IMU 几何中心偏心分量 (x_l, y_l, z_l) 和 IMU 安置角 (e_x, e_y, e_z)。由于 IMU 几何中心的偏心分量可以通过地面以 cm 级精度测量得到,

对定位精度的影响可以不再考虑,而 IMU 安置角无法直接测量,且对定位精度的影响比较大,必须通过标定的方式予以补偿^[11-14]。

1.2 系统误差标定及补偿

直接地理定位的优点是简单快速,但精度受限于相机检校、POS 设备以及集成安装的精度,通常引入少量地面控制点参与区域网平差以提高定位精度,同时对系统误差进行标定。POS 测量获得的位置姿态数据含有一定的系统误差和转换误差,一般作为带权观测值引入到区域网平差中,即 POS 辅助空中三角测量^[15]。POS 辅助自检校光束法区域网平差的数学模型表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_x = \mathbf{B}x + \mathbf{A}t + \mathbf{C}s - \mathbf{l}_x, \mathbf{E} \\ \mathbf{V}_c = \mathbf{E}_c x - \mathbf{l}_s, \mathbf{P}_c \\ \mathbf{V}_s = \mathbf{E}_s s - \mathbf{l}_s, \mathbf{P}_s \\ \mathbf{V}_g = \mathbf{A}_g t + \mathbf{R}r + \mathbf{G}g - \mathbf{l}_g, \mathbf{P}_g \\ \mathbf{V}_i = \mathbf{A}_i t + \mathbf{I}i - \mathbf{l}_i, \mathbf{P}_i \end{cases} \quad (5)$$

式中, \mathbf{V}_x 、 \mathbf{V}_c 、 \mathbf{V}_s 、 \mathbf{V}_g 、 \mathbf{V}_i 分别为像点坐标、地面点坐标、自检校参数、GPS 摄站坐标和 IMU 像片姿态角观测值的改正数向量。

IMU 安置角的标定可以将其作为附加参数在光束法平差的同时求解,即“一步法”;或者在空三结束后进行标定,即“两步法”^[16]。“两步法”即利用自检校后得到的影像的外方位元素和 POS 数据,根据欧拉角严格模型,IMU 姿态角 (α, β, γ) 是外方位角元素和 IMU 偏心角的函数。按照泰勒级数展开到一次项对 IMU 安置角进行标定^[15]。POS 辅助自检校光束法平差结束之后,可以得到相机内方位元素、畸变参数的更新值,以及 POS 安置误差的标定值,利用这些值更新相机内

外方位元素进行更新,可以弥补主要的系统误差对定位精度的影响,实现高精度对地定位^[17-18]。

2 无人直升机高精度对地定位实验

为了对无人直升机遥感测绘系统进行系统化的测试考核,全面客观地评价系统的性能和潜力,在嵩山遥感定标场开展了综合实验。

2.1 实验数据介绍

2015年10月12日-13日,无人直升机遥感测绘系统在嵩山遥感定标场开展了飞行实验。嵩山遥感定标场是由信息工程大学、武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室与中国资源卫星应用中心合作建设的航空航天遥感定标场。其中,航空几何定标场占地约 64 km²,分级布设了 214 个永久性高精度控制点,用于各种机载传感器的定标^[19-20],如图 2 所示。所采用的实验数据就是在航空几何定标场航摄获取,测区地形以丘陵为主,飞行时天气晴朗、有 3 到 4 级微风,适宜航空摄影。飞行区域的面积约 25 km²,航摄基本情况如表 2 所示,航线分布示意图如图 3 所示,实验的主要过程如图 4 所示。

表 2 嵩山定标场飞行情况

Tab. 2 The Flight Condition in Songshan Calibration Field

项目	参数
飞行时间	2015-10-13
航摄区域	航空几何定标场(5 km×5 km)
飞行高度/m	500
地面分辨率/m	0.05
航向重叠/%	80
旁向重叠/%	50



图 2 遥感定标场控制点分布图
Fig. 2 Control Points Distribution of Sensing Calibration Field

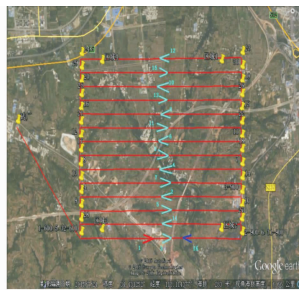


图 3 航空几何定标场航迹示意图
Fig. 3 The Track Schematic in Geometric Calibration Field

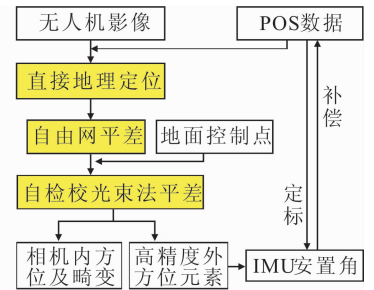


图 4 数据处理流程
Fig. 4 The Data Process Flow

2.2 直接地理定位

为了验证系统在不需要任何几何检校时的定位精度,进行了直接地理定位实验。利用卡尔曼滤波处理后的 POS 数据和相机出厂时提供的检校参数,进行影像直接地理定位。需要说明的是,

航空几何定标场内共 214 个人工标志点,但在本次飞行覆盖范围内有部分点风化损坏、难以辨识,另有部分点被农作物等覆盖,经人工甄别,共有 21 个点可以正常使用(见图 5)。直接地理定位实验中,将 21 个易于辨识的地面控制点作为检查点

(图中用○表示)。

按照最小二乘原理计算检查点的物方坐标及误差,检查点残差中误差(RMS)在 x 、 y 、 z 方向分别为 0.444 3、0.920 4、2.733 7 m,残差分布如图 6 所示,可见直接地理定位的精度不能满足 1 : 500 比例尺地形图测制要求。从图 6 看出残差具有一定的系统性,原因在于当前的直接定位精度是系统未经任何检校下得出的,说明系统误差对于直接地理定位有严重的影响,是主要的误差来源,后续部分对主要误差源进行逐一分析与补偿。

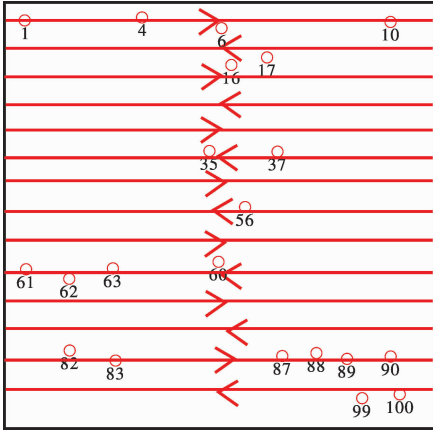


图 5 地面检查点分布图

Fig. 5 The Distribution of Check Points

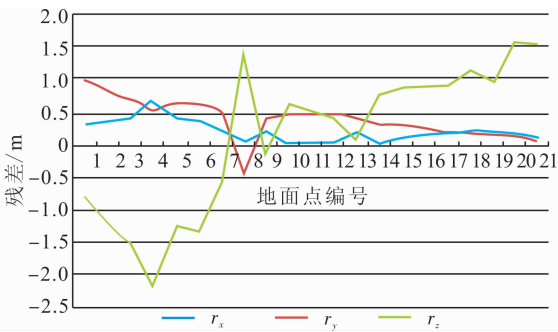


图 6 直接地理定位检查点物方残差

Fig. 6 The RMS of Check Points of Direct Georeferencing

2.3 自由网光束法平差

在没有地面控制点参与平差的情况下可以通过自由网平差提高定位精度。利用 POS 数据,恢复出影像航摄时的相对位置关系,提取影像连接点,进行自由网平差,利用检查点验证平差精度。测区内 21 个检查点物方残差中误差在 x 、 y 、 z 方向分别为 0.319 1、0.862 4、0.877 3 m。误差分布如图 7 所示。

从图 7 可以看出,无地面控制点的情况下,定位精度略有提高,但是检查点残差仍然具有一定的系统性。原因主要有:

1) 相机内方位元素及畸变参数是在 2013 年 10 月 10 日出厂时标定得到的,时间跨度较大,考

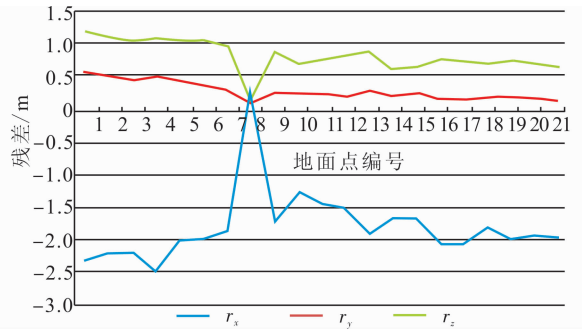


图 7 自由网平差检查点物方残差

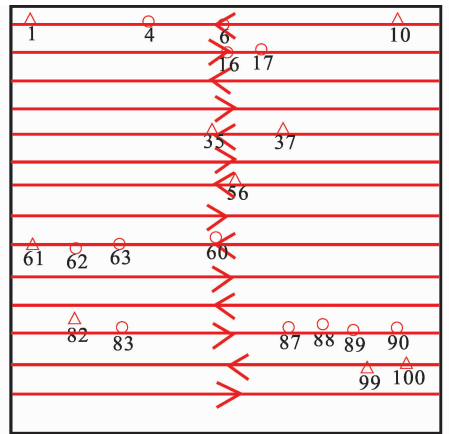
Fig. 7 The RMS of Check Points of Free Net Adjustment

虑到相机经过多次搬运,实验过程中多次组装拆卸,对相机的几何量测性能影响比较严重,特别是拆卸对于相机主距影响较大,主距的变化对于高程定位精度影响比较明显;

2) 多传感器集成时,IMU 视准轴和相机坐标轴尽可能做到一致,但难免存在偏差,导致 POS 数据与真实摄影姿态参数存在系统性误差,对光线交会有不可忽略的影响,从而影响无人机对地定位精度。

2.4 POS 辅助自检校光束法区域网平差

为了克服系统误差对定位精度的影响,平差过程中利用 9 个地面控制点、12 个地面检查点,如图 8 所示。



△ 地面控制点 ○ 地面检查点

图 8 控制点、检查点分布示意图

Fig. 8 The Distribution of Control Points and Check Points

自检校光束法区域网平差附加参数模型选择带 3 个附加参数的 Bauer 模型、带 12 个附加参数的 Ebner 模型和带 21 个附加参数的 Brown 物理模型 3 种经典的系统误差模型进行对比分析。利用 3 种附加参数模型进行平差后,分别统计检查点的物方残差中误差如表 3 所示,不同系统误差模型下检查点残差如图 9-12 所示,不同模型自检校更新后的相机内方位元素如表 4 所示。

表3 检查点物方残差中误差/m

Tab. 3 The RMS of Check Points/m

模型	x	y	z
无附加参数	0.030 4	0.073 6	0.138 3
Bauer 模型	0.038 6	0.056 1	0.083 0
Ebner 模型	0.031 0	0.049 3	0.086 5
Brown 模型	0.030 7	0.049 0	0.087 4

表4 相机内方位元素/mm

Tab. 4 The Interior Orientation Elements/mm

模型	f	x_p	y_p
出厂标定值	55.501 9	0.026 0	0.224 6
Bauer 模型	55.278 4	-0.032 9	0.169 2
Ebner 模型	55.275 3	-0.031 3	0.169 4
Brown 模型	55.272 3	-0.023 7	0.157 0

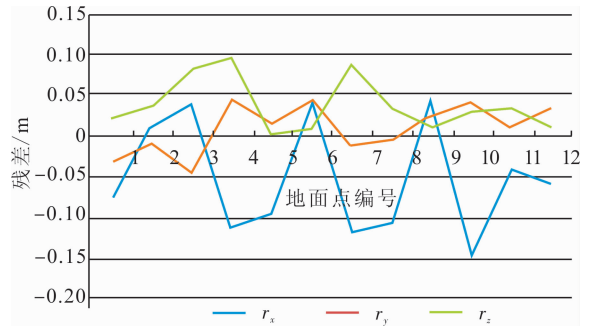


图12 Brown模型检查点物方残差

Fig. 12 The Object Residuals of Brown Model

出以下结论:

1)与自由网空三结果相比,适当引入少量控制点能够显著提高定位精度,主要的原因在于通过引入控制点进行自检校光束法平差基本补偿了对地定位过程中的系统误差;

2)通过自检校光束法区域网平差,定位精度有了进一步提高,特别是在高程方向,提高更为显著,原因在于相机内方位元素的变化尤其是主距的变化主要影响高程方向的定位精度,通过自检校更新相机内方位元素,弥补了高程方向的系统误差;

3)采用不同附加参数模型进行自检校光束法平差得到结果的精度基本相当,相机内方位元素的更新值也十分接近,说明3种经典模型对于Phase相机均具有适用性,能够有效补偿相机内方位元素的变化和相机畸变;

4)在引入少量控制点后,无人机直升机遥感测绘系统的几何定位精度为:平面优于0.07 m,高程优于0.09 m。参考原国家测绘地理信息局颁布的针对无人机摄影测量的《低空数字航空摄影测量内业规范》和针对传统航测的《数字航空摄影测量空中三角测量规范》中1:500地形图精度要求^[21-22],该定位精度远优于规范要求,系统可以应用于1:500地形图测制,实现了设计目标。

2.5 系统误差补偿后直接地理定位

IMU安置角对于直接地理定位精度的影响较大,必须予以标定和补偿。利用自检校后得到的影像的外方位元素和POS数据,根据欧拉角严格模型,对IMU安置角进行标定,结果在 x 、 y 、 z 方向上的安置角中误差分别为 $-4.191 0'$ 、 $0.822 6'$ 、 $19.444 8'$,从标定结果来看,IMU和相机之间的安置角中误差比较大,特别是 z 轴之间达到了 $19'$,必须予以补偿。

利用安置角标定结果对POS数据进行补偿,自检校结果更新相机内方位元素和畸变参数,进行直接地理定位以验证其精度,结果在 x 、 y 、 z 方

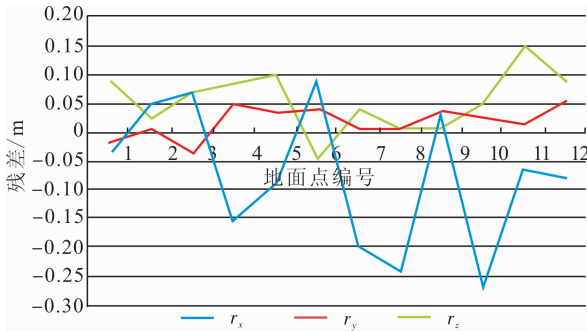


图9 无附加参数光束法平差检查点物方残差

Fig. 9 The Object Residuals of Check Points in no Additional Parameters Bundle Adjustment

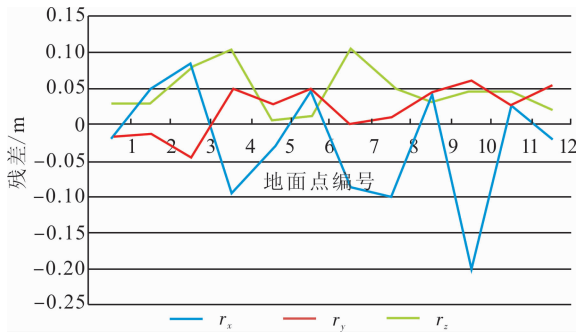


图10 Bauer模型检查点物方残差

Fig. 10 The Object Residuals of Bauer Model

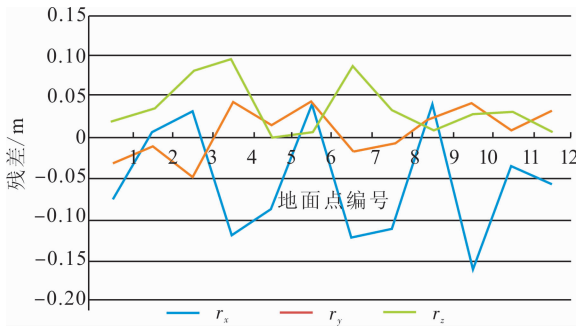


图11 Ebner模型检查点物方残差

Fig. 11 The Object Side Residuals of Ebner Model

分析自检校光束法区域网平差的结果可以得

向上的物方残差中误差分别为 0.292 4、0.463 5、1.025 3 m。可见系统误差补偿后,直接地理定位精度有明显提高:平面精度提高 46.37%,高程精度提高 62.49%,并且高于系统检校前自由网平差的精度,说明系统误差标定及补偿方法的正确性、有效性。系统误差补偿后,无人直升机遥感测绘系统实现了高精度直接地理定位,可快速提供地理信息产品,在应急测绘中发挥重要作用。

2.6 实验结论

基于嵩山定标场开展了无人直升机高精度对地定位实验,包括直接地理定位、自由网平差、POS 辅助自检校平差和系统误差补偿后直接地理定位,主要结论如下:

1)在没有地面控制点的情况下,无人直升机能达到较高的定位精度,可以满足应急测图的需求,在自然灾害发生时提供快速测绘保障服务。

2)在少量地面控制点的参与下,无人直升机的定位精度远优于 1:500 测图规范的要求,可用于大比例尺测图。

3)无人直升机搭载的相机在飞行前要进行检校,特别是经常拆卸镜头的情况下,主距变化比较明显,对定位精度的影响较大。

4)IMU 安置角对于直接地理定位的影响比较明显,必须通过检校场飞行予以标定,在后续的作业中予以补偿。

5)经过相机内方位元素、相机畸变、IMU 安置角的标定和补偿后,系统的直接地理定位精度有明显的提升,高于系统检校前自由网平差的精度,可用于高精度目标定位。

3 结语

针对目前小型固定翼无人机存在的起降不方便、续航能力差、测绘精度低的问题,本文设计实现了基于大型无人直升机平台的遥感测绘系统。通过在中国嵩山遥感定标场进行基地化的测试考核,开展系列精度验证测试,对系统的定位精度进行了验证,并对影响定位精度的主要系统误差进行了标定与补偿。通过开展直接地理定位实验、自由网光束法平差实验、POS 辅助自检校光束法平差实验以及系统误差补偿后的直接地理定位实验,对系统的综合性能和定位精度进行了全面的考核。实验结果表明,受系统误差的影响,不经过任何检校的情况下,系统直接地理定位精度与期望有一定差距;在少量地面控制点的参与下,系统定位精度远优于 1:500 测图的精度要求;系统误

差补偿后直接地理定位精度有明显提高:平面精度提高 46.37%,高程精度提高 62.49%。实验结果说明本文的系统误差补偿效果十分明显,大大提高了系统定位精度,无人直升机系统具有很好的应用前景,可以进一步推广应用到测绘生产任务中。

参 考 文 献

- [1] Zhang Yongsheng. The Conception and Architecture of Live-Service for Geospatial Information[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(1): 1-4(张永生. 现场直播式地理空间信息服务的构思与体系[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 1-4)
- [2] Yu Ying. Research on Key Technologies of UAV Dynamic Photogrammetry[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2014(于英. 无人机动态摄影测量若干关键技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2014)
- [3] Xue Wu. The Calibration of UAV Video Geo-Information and Live Processing Technology[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2014(薛武. 无人机视频地理信息定标与直播处理方法[D]. 郑州:信息工程大学, 2014)
- [4] Remondino F, Barazzetti L, Nex F, et al. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling-Current Status and Future Perspectives [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011, 38(1): C22
- [5] Barazzetti L, Remondino F, Scaioni M, et al. Fully Automatic UAV Image-based Sensor Orientation [C]. Proceedings of the 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, Alberta, Canada, 2010
- [6] Eisenbeiß H. UAV Photogrammetry [M]. Zurich: ETH, 2009
- [7] Guo Fusheng. 3D Reconstruction from UAV Images [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2013(郭复胜. 无人机图像的三维重建方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013)
- [8] Li Jinpeng, Jiang Ting, Xiao Da. On Diagram-based Three-dimensional Reconstruction of UAV Image[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1 501-1 509(李劲澎, 姜挺, 肖达. 基于关系图的无人机影像三维重建[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1 501-1 509)
- [9] Wang Zhizhuo. The Principle of Photogrammetry Continuation [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007(王之卓. 摄影测量原理续编[M]. 武汉:

武汉大学出版社,2007)

- [10] Li Deren, Yuan Xiuxiao. Error Processing and Reliability Theory[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2012(李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2012)
- [11] Liu Jun, Guo Changhai, Zhang Li, et al. The Self-calibration of POS Systematic Errors for Airborne Line Array Sensor[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2013, 30(5): 489-493(刘军, 郭长海, 张莉, 等. 机载线阵 CCD 相机的 POS 系统误差自检校[J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(5): 489-493)
- [12] Li Xueyou. IMU/DGPS-supported Photogrammetry - Theory, Approaches and Practice[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2005(李学友. IMU/DGPS 辅助航空摄影测量原理、方法与实践[D]. 郑州: 信息工程大学, 2005)
- [13] Liu Jun, Wang Donghong, Zhang Yongsheng, et al. IMU/DGPS Supported ADS40 Imagery Direct Georeferencing and Its Error Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(11): 138-141(刘军, 王冬红, 张永生, 等. IMU/DGPS 辅助 ADS40 影像直接定位及其精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(11): 138-141)
- [14] Wang Donghong. A Study on the Mathematic Model and Algorithm of the Geometric Calibration of Airborne Digital Sensor[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011(王冬红. 机载数字传感器几何标定的模型与算法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2011)
- [15] Geng Zexun, Zhang Baoming, Fan Dazhao. Digital Photogrammetry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2010(耿则勋, 张保明, 范大昭. 数字摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 2010)
- [16] Liu Jun, Wang Donghong, Wu Yang, et al. Two-step Calibration of IMU Bore-sight Misalignment Angles[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(2): 33-36(刘军, 王冬红, 伍洋, 等. IMU 视轴偏心角的两步法检校[J]. 海洋测绘, 2015, 35(2): 33-36)
- [17] Yuan Xiuxiao. A New Method for Computation of the Position and Attitude Error [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(8): 925-926(袁修孝. 一种补偿 POS 定位测姿系统误差的新方法[J]. 自然科学进展, 2008, 18(8): 925-926)
- [18] Yuan Xiuxiao, Yang Fen, Zhao Qing, et al. Bore-sight Misalignment Calibration of Integrated DGPS/IMU System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(12): 1039-1043(袁修孝, 杨芬, 赵青, 等. 机载 POS 系统视轴误差检校[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(12): 1039-1043)
- [19] Xu Miaozhong, Yin Su, Li Zhentao. Aerial Geomatic Calibration Building Technology Research[C]. Aisa GIS 2010 International Conference, Taiwan, China, 2010(许妙忠, 尹粟, 李振涛. 航空几何定标场建设技术研究[C]. 2010 年亚洲 GIS 国际会议, 中国, 台湾, 2010)
- [20] Zhang Yongsheng. Design and Implementation of Songshan Test Field for High Resolution Remote Sensing and Mapping [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 29(2): 79-82(张永生. 高分辨率遥感测绘嵩山实验场的设计与实现——兼论航空航天遥感定位精度与可靠性的基地化验证方法[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(2): 79-82)
- [21] CHZ 3003-2010. Specifications for Office Operation of Low-altitude Digital Aero-photogrammetry [S]. NASG, 2010(CHZ 3003-2010. 低空数字航空摄影测量内业规范[S]. 国家测绘地理信息局, 2010)
- [22] GBT 23236-2009. Specifications for Aerotriangulation of Digital Aero-photogrammetry [S]. NASG, 2009(GBT 23236-2009. 数字航空摄影测量空中三角测量规范[S]. 国家测绘地理信息局, 2009)

High Precision Positioning of Unmanned Helicopter with Area Array Images

XUE Wu^{1,2} ZHANG Yongsheng¹ WANG Tao¹ YU Ying¹ CAO Bincai¹

1 College of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract: To improve the accuracy of unmanned helicopter, geometry calibration is compulsory. Direct geo-reference experiment is first carried out to verify system's accuracy without any calibration; and

then the free network bundle adjustment experiment is undertaken to verify the positioning accuracy of the system without ground control points; finally, a self calibration bundle adjustment is undertaken to calibrate and compensate the camera distortion, interior elements changes, IMU alignment angle. Experimental results show that the unmanned helicopter has high positioning accuracy. The accuracy of direct geo-reference can meet the requirements of emergency mapping, and can be aided by a few ground control points, the positioning accuracy is much better than that of 1 : 500 mapping requirements, which can be used for conventional surveying and mapping production. After system error compensation, the direct geo-reference accuracy has improved significantly: the planar accuracy has improved by 46.37% and the height accuracy has improved by 62.49%. The flight test of Songshan calibration field shows that the method of calibration and compensation is correct and effective, and the unmanned helicopter has a good prospect for surveying and mapping applications.

Key words: unmanned helicopter; positioning on the earth; system error; calibration; compensation

First author: XUE Wu, PhD, specializes in UAV photogrammetry and computer vision. E-mail: xuewu_81@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41501482; the Foundation of Military Key Laboratory of Surveying, Mapping and Navigation Engineering; the National Defense Science and Technology Innovation Zone Project.

(上接第 245 页)

Present-day Crustal Deformation in Arc-Continent Collision Zone of the Southeastern Eurasia Plate

WU Xiaolong^{1,2} YANG Zhiqiang² GONG Yun¹

1 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2 School of Geology and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Based on the systematic collection of the GPS observations in China; Fujian, China; Taiwan and Philippine; Luzon, this paper obtains the current crustal horizontal velocity field of the arc-continent collision zone. Targeting the specific areas whose super-long span is more than 1 000 km, this paper builds the least squares collocation model on the basis of ellipsoidal coordinates, uniformly calculating current GPS strain distribution of this collision zone. The results show that china; Taiwan province has the strongest crustal deformation, followed by Philippine; Luzon and China; Fujian regions respectively. The Philippine sea plate at the east Taiwan, China collides intensively with the Eurasia plate, and the collision is severely consumed through the central mountain's uplifting, the thrust napping and the tectonic escaping. The overall deformation characteristics is closely related to the structural variation of the Philippine sea plate. While the relative deformation in Luzon region is mainly involved with the relative sliding of the Philippine fault.

Keywords: arc-continent collision zone; Eurasia plate; the Philippine sea plate; GPS strain field; the Luzon arc volcanic

First author: WU Xiaolong, PhD, lecturer, specializes in the crustal deformation monitoring and analysis based on geodetic surveying technologies. E-mail: xlong_wu@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 51674195; the PhD Startup Foundation of Xi'an University of Science and Technology, No. 2016QDJ049.