

固定翼无人机航空摄影测量精度探讨

程 崇 木¹, 张 俊 华¹, 孙 炜¹, 唐 建 林², 高 宇³

(1. 湖北省水利水电勘测设计院, 湖北 武汉 430064; 2. 湖南省地质测绘院, 湖南 长沙 421001; 3. 武汉海地测绘科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:固定翼无人机航空测量系统在进行地形测量时,存在着测量误差。这些误差主要来源于仪器误差、人为误差、气候等外界因素影响产生的误差。针对仪器误差、人为误差,探讨了误差修正方法。主要通过建立数学模型、调整固定摄像机的位置和提高操作人员的技术水平来修正误差。以实际航空摄影测量图片进行了试验性误差分析。经过误差修正的图片精度满足国家相应大比例尺成图的精度要求。

关 键 词:无人机; CCD; 航空摄影测绘; 畸变差; 基线

中图分类号: P231

文献标志码: A

随着固定翼无人机航空摄影系统的应用与推广,采用固定翼无人机航空摄影系统获取高分辨率航空影像变得日益广泛。固定翼无人机航空摄影测量系统采用的传感器是由工业级 CCD 改装的相机。这种相机为非测量相机,较之传统的测绘航空摄影传感器,存在着光学畸变差和 CCD 阵面非正交性所产生的误差。这就要求在利用固定翼航空摄影系统进行航空摄影测绘前,必须对传感器进行可测量化处理。另外,由于 CCD 阵面为非正方形,其摄影机的放置方式也影响实际航空摄影的基线长度,由此带来的观测误差将影响到最终产品的精度。本文试图对影响固定翼无人机航空摄影系统最终产品质量的主要因素进行分析,并提出解决思路。

1 摄影系统误差来源

武汉海地测绘科技有限公司的固定翼无人机摄影测量系统经过 3 a 的研制,最终应用于实际工作中。结合该系统研究与生产实践,总结其主要误差来源为以下 3 个方面。

(1) 仪器误差。由于仪器设计、制作不完善,或经检验校正还存在残余误差。这部分误差主要包括传感器量化过程带来的系统误差。

(2) 人为误差。由于人感官鉴别能力的限制、技术水平的高低和工作态度的好坏带来的误差,像控识别引起的误差,空三及内业数据采集产生的人为误差。

(3) 气候等外界因素影响产生的误差。这部分误差主要由天气状况对飞行器飞行姿态和成像质量影响引起的。

由于气候等外界因素具有不确定性,本文着重分析讨论上述 3 个主要误差来源的第 1 项和第 2 项。其中仪器误差(传感器)对最终产品的精度影响最大,它决定着最终测绘产品精度是否能达到国家相应技术规范要求。

2 传感器仪器误差分析

由于固定翼无人机的载重及体积的原因,在系统研制时无法搭载常规的航摄仪进行测绘航空摄影,目前选用的是中幅面 CCD 作为传感器的感光单元,经过加固和电路改装以后,成为具有稳定内方位元素的数码相机。由于感光单元的非正方形因子和非正交性以及畸变差的存在,加固改装后的相机获取的数码影像(立体像对)存在各种畸变差。畸变差的存在使测量成果无法满足精度要求。其主要是由物理镜头引起的,可以建立畸变差数字纠正模型,得到各畸变系

数,然后对影像进行纠正,从而获取可测量的影像。

在像坐标系下,畸变差改正公式为:

$$\begin{cases} \Delta x = (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] + \\ 2p_2(x - x_0)(y - y_0) + \alpha(x - x_0) + \beta(y - y_0) \\ \Delta y = (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_2[r^2 + 2(y - y_0)^2] + \\ 2p_1(x - x_0)(y - y_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, x, y 为像点坐标; $\Delta x, \Delta y$ 为像点改正值; x_0, y_0 为像主点; $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$; k_1, k_2 为径向畸变系数; p_1, p_2 为切向畸变系数; α 为像素的非正方形比例因子; β 为 CCD 阵列排列非正交性的畸变系数。

由此,引入畸变差后的共线方程,通过共线方程式可解算畸变差参数:

$$\begin{cases} x - x_0 - \Delta x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 - \Delta y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, X, Y, Z 为相机的空间坐标; X_s, Y_s, Z_s 为相机的外方位元素的线元素; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ 为矩阵旋转系数。

同时,可以通过构建共线方程来解算加固改装后的相机内方位元素:

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (3)$$

由此,可以获取相机可量测化的所有误差因素的参数,固定翼无人机航空摄影获取影像后,通过修正,得到的重采样数码影像即可以满足摄影测量的要求。

可以通过实例观察这些误差对测量造成的精度影响,图 1 是原始影像与可量化影像的叠加图。

从叠加影像的中心到边缘,分别截取 3 块影像,直观地观察畸变差等对成像的影响。

从图 1 和图 2 可以直观地看出,加固改装后的 CCD 相机存在着很大的误差(仪器误差)。本例影像航高 500 m,地面实际分辨率 8 cm,从光轴中心到影像边缘这种误差逐步加大,到边缘部分最大为 30 个像素左右,平面误差 2 ~ 3 m。很显然,仪器误差是航空摄影测绘所不能接受的,必须通过标定,对这种误差进行处理和消除,将其限定在一定范围内,以满足航空摄影测绘的要求。

万方数据



图 1 原始影像与可量化影像的叠加

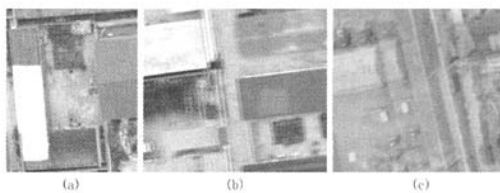


图 2 从影像中心到边缘裁取的影像

3 内业数据采集测量误差分析

固定翼无人机航空摄影系统采用的 CCD 阵面为矩形阵面。这与传统正方形幅面有所不同。这样,在航空摄影时,CCD 阵面的放置方向将会影响摄影测量内业成图的量测交会角的大小,从而影响像坐标测量精度。

以武汉海地测绘科技有限公司研制的固定翼无人机航空摄影系统所搭载的传感器来分析,其 CCD 阵面像素为 $8\,984 \times 6\,732$ (行 $\times$ 列) 像素数,象元尺寸为 $6\,\mu\text{m}$,鉴定焦距为 $46.213\,2\,\text{mm}$,按航向 60% 的重叠度进行航空摄影,则像方基线长度(图 3)为:

$$b = (1 - 60\%) \times L_x$$

式中, L_x 为航向像片幅面宽度。

那么,像点交会角为:

$$\theta = \arctan(b/f)$$

式中, f 见图 3。以 δ 表示作业员在航向方向测量的左右视差误差,一般按象元尺寸的 $1/3$ 来估算,那么由于作业员测量误差产生的平面误差为:

$$\Delta x = m \times \delta$$

式中, m 为航摄比例尺分母。

高程误差为:

$$\Delta h = \Delta x / \tan \theta$$

根据以上公式,可估算 $1\,500\,\text{m}$ 航高时,该固定翼无人机航空摄影系统所能达到的平面和高程测量精度。

(1) CCD 阵面长边垂直于航线方向。在这种相

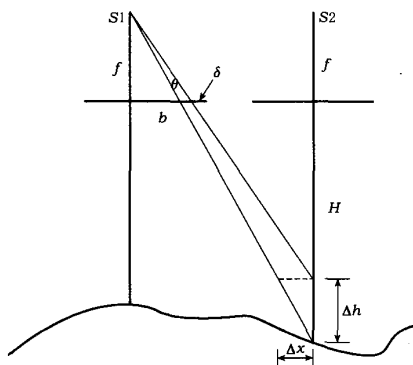


图3 立体观测误差示意

机放置模式下, CCD 阵面的长边垂直于飞行方向, 则:

$$b = 0.4 \times 673.2 \times 0.006 \text{ mm} = 16.1568 \text{ mm}$$

$$\theta = \arctan(b/f) = \arctan(16.1568/46) = 19.35^\circ$$

$$m = 32600$$

$$\Delta x = m \times \delta = 32600 \times 0.006/3 = 0.065 \text{ m}$$

$$\Delta h = \Delta x / \tan \theta = 0.065 / \tan 19.35 = 0.185 \text{ m}$$

(2) CCD 阵面短边垂直于航线方向。在这种相机放置模式下, CCD 阵面的短边垂直于飞行方向, 则:

$$b = 0.4 \times 8984 \times 0.006 \text{ mm} = 21.5616 \text{ mm}$$

$$\theta = \arctan(b/f) = \arctan(21.5616/46) = 25.11^\circ$$

$$m = 32600$$

$$\Delta x = m \times \delta = 32600 \times 0.006/3 = 0.065 \text{ m}$$

$$\Delta h = \Delta x / \tan \theta = 0.065 / \tan (25.11) = 0.139 \text{ m}$$

由上述计算结果可以看出, 利用固定翼无人机进行航空摄影测绘, 平面测量精度与摄影比例尺分母有关。按照国际上惯例, 可以根据成图比例尺, 确定地面实际分辨率, 从而根据鉴定焦距, 确定摄影比例尺分母和航高, 以满足平面精度的需要。另外, 在确定地面实

际分辨率后, 相机摄影时的放置方式将影响内业高程数据采集的精度。显然, 相机 CCD 阵面短边垂直于航线方向放置有利于提高航测内业高程数据采集的精度。

4 实际应用

2009 年 9 月, 笔者利用该系统在武汉市麦山镇进行了 1:1 000 航测成图试验。本次试验设计航高为 430 m, 共获取覆盖测区航片 41 张, 地面控制按照平面航向 2 条基线, 高程全野外的方式布设。内业工作采用可测量化处理后的航片采集数据。2010 年 4 月, 湖北省质量检查站对该试验数据进行了数学精度检测, 检测结果见表 1。

表1 图幅精度统计

图幅号	平面点位		平面间距		高程		说明
	中误差	限差	中误差	限差	中误差	限差	
3370.00~500.75	0.19	0.60	0.14	0.40	190	200	平地
3370.25~500.75	0.16	0.60	0.14	0.40	80	150	建城区
3370.50~500.75	0.22	0.60	0.10	0.40	100	150	建城区

表 1 的精度分析表明, 通过对无人机航空摄影系统相机主要误差进行处理, 其产品精度可以达到国家相应大比例尺成图精度要求。

5 结论

利用固定翼无人机搭载经过改装处理后的中幅面 CCD 相机进行测绘航空摄影, 首先必须对相机部分的 CCD 阵面的非正交性、非正方形因子以及物镜组的径向和切向畸变差等误差进行改正, 将误差限定在一定范围内。同时, 为了获得较好的测量精度, 实际生产中应注意选择相机放置的方式, 以改善和提高航测内业数据测量精度。

(编辑: 常汉生)

Discussion on survey accuracy of aerial photography by fixed - wing unmanned craft

CHENG Chongmu¹, ZHANG Junhua¹, SUN Wei¹, TANG Jianlin², GAO Yu³

(1. Hubei Institute of Water Conversation and Hydroelectric Engineering Exploration and Design, Wuhan 430064, China; 2. Institute of Geological Surveying and Mapping of Hunan Province, Changsha 421001, China; 3. Wuhan Hidi Digital Surveying and Mapping Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: The measurement errors exist in topographic survey by fixed - wing unmanned aircraft, which mainly come from instrumental and artificial errors, climate change. In the light of the error sources, the error correction methods are analyzed. The errors can be corrected through setting up mathematical correction model, adjusting the location of device and improving the technical skill of operators. An analysis on tentative error correction is conducted through a practical case. The accuracy of corrected maps can meet the requirements of large - scale topographic mapping.

Key words: unmanned aircraft; CCD; aerial photography; distorted error; base line