

顾及地图投影变形的免像控摄影测量方法*

段晨汐 李博勋

(山东科技大学测绘与空间信息学院 青岛 266590)

摘要: 无地面控制点的无人机摄影测量可以有效提高生产效率,降低生产成本,在人无法到达的地区展现出很大的优势,但是该方法也存在的一系列问题。一是通过在任检校的方法无法获取准确的相机参数,不准确的相机主距会严重影响目标点的高程。二是在地图投影坐标系下进行测绘任务时,投影变形和地球曲率对高程精度也有影响。因此,本文通过分析高程误差产生的具体原因,实现了在带有架构航线的地心坐标系中相机的自校准,然后,在不带架构航线的地图投影坐标系中获得影像的外方位元素,最后,对地图投影变形和地球曲率引起的高程误差进行了校正。实验结果表明,两组数据的高程均方根误差分别从 0.298 m 和 0.374 m 降低到了 0.075 m 和 0.080 m,高程精度均优于 0.1 m,因此本文的方法可以在无地面控制点的地图投影坐标系内实现精确的地图绘制。

关键词: 高程改正;地图投影坐标系;无人机摄影测量;免像控;构架航线

中图分类号: P232 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.2

Photogrammetry without ground control points in the map projection frame

Duan Chenxi Li Boxun

(College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicle photogrammetry without ground control points can effectively improve production efficiency and reduce production costs. This method shows great advantages in areas inaccessible to people. However, there are a number of problems with this method. One of the main problems is that the accurate camera parameters cannot be obtained through the on-the-job calibration method. Inaccurate camera principal distance can seriously affect the object point elevation. The other one is that the projection deformation and earth curvature also have impacts on the elevation accuracy, when the mapping task is carried out in the map projection frame. Therefore, this article analyzes the specific causes of elevation errors and realizes the camera self-calibration in a geocentric frame with control strips. Then, the exterior orientation elements of the images are calculated in the map projection frame without control strips. Finally, the elevation errors caused by map projection deformation and earth curvature are corrected. The experimental results show that the elevation RMSE of the two data sets decreased from 0.298 m and 0.374 m to 0.075 m and 0.080 m, respectively. Elevation accuracy are less than 0.1 m. Therefore, the method in this paper can achieve accurate mapping in a map projection coordinate system without ground control points.

Keywords: elevation correction; map projection frame; UAV photogrammetry; without ground control points; control strips

0 引言

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)摄影测量具有成本低、高效率、灵活性强等特点,已广泛应用于基础测绘、紧急救援、国土资源调查、智慧城市等领域^[1]。传统的无人机摄影测量一般需要配合全站仪、载波相位差分技术(real-time kinematic, RTK)等设备采集一定数量的地面控

制点(ground control points, GCPs),这些控制点可以使摄影测量结果与控制点所在坐标系相连接,同时也能够提高空中三角测量的精度。但是,对于山地、森林、盆地和地形十分复杂的地区,测量人员难以进入,布设地面控制点也十分困难^[2]。

不过随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)动态定位技术和惯性导航系统

收稿日期:2022-08-15

* 基金项目:国家自然科学基金(42171439)项目资助

(inertial navigation system, INS)的发展,利用无人机内惯性测量组件通过测量其相对惯性空间的角速度和加速度获得高精度飞行位置姿态(position and orientation system, POS)数据^[3],能够实现少量 GCPs 和无 GCPs 的摄影测量。但是不布设地面控制点进行摄影测量存在许多问题,其一是使用在任检校的方法无法确定准确的相机参数,而相机的主距与目标点的高程有很强的相关性,因此相机的主距会对目标点的高程产生严重影响;其二是高精度 POS 数据虽然可以替代无地面控制点进行空中三角测量,但前提是需要在地心或局部水平坐标系下进行光束法平差,以避免地图投影变形和地球曲率的影响,但是通常摄影测量获得的 4D 产品结果一般是在地图投影坐标系内的,两者存在矛盾。

无人机摄影测量数据处理方法多样,主要分为间接地理参考法(indirect georeferencing, IG)、直接地理参考法(direct georeferencing, DG)和 GNSS 支持的空中三角测量法(gnss-supported aerial triangulation, GAT)。Guntel 等^[4]和 Sanz-Ablanedo 等^[5]对间接地理参考法做了详细介绍,在少量 GCPs 或无 GCPs 的情况下,相机自校准十分重要,控制点的数量和分布情况会大大影响数据结果。Zhang 等^[6-7]提出了一种在地图投影坐标系下对航空图像的直接地理参考方法,有效的提高了地理参考精度,但是此方法的残差不能完全忽略,且没有考虑角度畸变的影响。CHOI 等^[8]利用传统的航空三角剖分结合 GNSS/IMU 数据实现了图像序列的实时地理参考。徐诚等^[9]分析了影响无人机测量误差的多种因素并建立了误差改正模型,结合无人机 GNSS/IMU 数据实现目标的精确定位。但是以上方法精度与无人机飞行高度有极大的相关性,并且 GNSS/IMU 的精度也会对最终结果产生不可忽略的影响。在无地面控制点的情况下,能够实现复杂地区无人机影像中物体的体积估计。Mizinski 等^[10]在无地面控制点的情况下利用无人机影像估计了积雪深度。He 等^[11]提出了一种在动态环境中无地面控制点的矩形驳船装载量估计。同时, Li 等^[12]利用免像控无人机摄影测量获得了极地海冰精细尺度表面特征。但是以上方法均会受到地图投影变形和地球曲率等影响,导致地图制图精度降低,从而影响最终结果。

因此,为了实现无地面控制点下的精确制图,文章分析了构架航线在相机校准中的重要作用,实现了地心坐标系下相机主距的校准,然后在没有构架航线的地图投影坐标系下,对影像外方位元素进行校准,最后完成了地图投影变形和地球曲率的误差改正。

1 构架航线下的相机校准

本文主要研究垂直摄影下获得正射影像的情况,无人机在同一飞行高度采集数据,如图 1(a)所示,假如研究区布设了一定数量的地面控制点,通常情况下可以通过光束法平差获得准确的 DEM;但是如果如果没有地面控制点,仅依

靠机载 GNSS 系统辅助空三,目标点的高程很大程度上会受到相机主距的影响^[13]。如图 1(c),已知图像的内外方位元素,通过式(1)可以计算出目标点的坐标。

$$X_c = \frac{Bx_1}{d}; Y_c = \frac{By_1}{d}; Z_c = D = \frac{Bf}{d} \quad (1)$$

式中: B 是摄影基线, d 是视差值, f 是主距, (x_1, y_1) 是像点坐标, (X_c, Y_c, Z_c) 是目标点 P 在图像 I_1 所在空间坐标系中的坐标。

由式(1)中可以看出目标点的高程 Z_c 和相机主距 f 是线性相关的,而目标点的平面坐标 (X_c, Y_c) 和相机主距 f 无关。此时,仅依靠 GNSS 辅助的相机自校准不能获得准确的相机主距。因此,构架航线是有必要的,如图 1(b)所示,构架航线要与原航线垂直,且位于研究区域两端,飞行高度要高于原航线飞行高度。已知图像的内外方位元素,目标点的坐标可以用式(2)计算。式中, (x_3, y_3) 是目标点 P 在图像 I_3 上的像点坐标, D_3 是目标点 P 在图像 I_3 中的深度值。分析式(2)可以得到,构架航线后目标点的高程 Z_c 和相机主距 f 相互独立。

$$X_c = \frac{Bx_1}{d}; Y_c = \frac{By_1}{d}; Z_c = D = \frac{D_3x_3}{x_1} \quad (2)$$

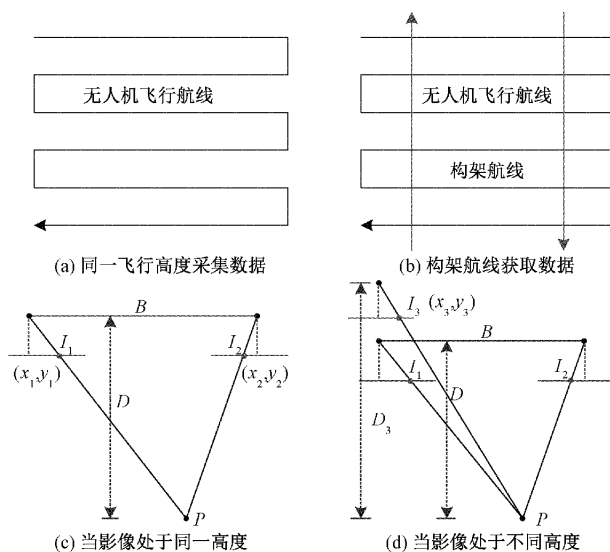


图 1 无人机航线和目标点与主距关系示意图

因此,在无地面控制点进行摄影测量时,使用 GNSS 辅助空三进行相机自校准需要构架航线来保证精度。但是在地图投影坐标系下,构架航线会受到地图投影变形的影响,反而会降低目标点的精度。在地心坐标系下,如图 2(a),不同高度的对应像点可以相交于一点;在地图投影坐标系下,如图 2(b),由于地图投影变形导致平面比例尺发生变化,而高程比例尺不变,不同高度的对应像点无法在一点上相交。使用空间前方交会计算目标点坐标时,在同一高度下得到的目标点是高于实际位置的,但是平面坐标保持不变,如图 2(b)中的 P_{12} 和 P_{34} ;在不同高度下得到的目标点坐标能够得到精确的高度,但是平面坐标却存在明显偏差,

如图 2(b)中的 P_{13} 和 P_{24} 。因此,为了避免地球曲率和地图投影变形对相机标定的影响,需要在地心坐标系或局部水平坐标系中标定相机参数。

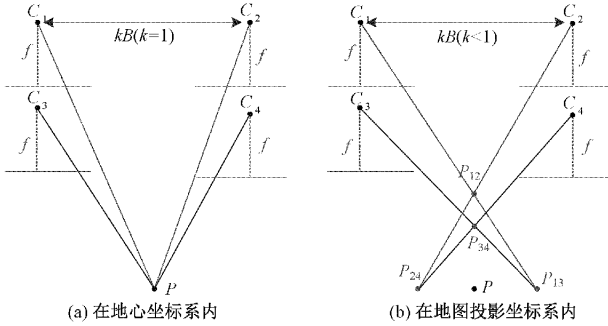


图 2 构架航线在地图投影坐标系下空间前方交会示意图

2 顾及长度变形和地球曲率的目标点坐标改正

地球表面通常被看成是一个球面或者椭球面,如果将其完整的平铺在一个平面上,需要借助数学方法,最常使用的投影方法是高斯克吕格投影和通用墨卡托投影(universal transverse Mercator projection system, UTM)^[14]。但是这两种投影方式会造成图像长度和面积变形^[15],同时当研究区范围较大时,地球曲率也会对测量结果造成显著影响^[16]。因此,对投影变形和地球曲率的改正是十分必要的。

2.1 长度变形的影响

在地图投影坐标系下,地图投影长度变形主要表现在水平面上,而高程没有变形,此时水平方向和垂直方向的比例尺不一致。不过地心坐标系和局部水平坐标系中不存在此问题。要实现在地图投影坐标系下无地面控制点摄影测量的精确制图,就必须对地图投影的长度变形进行改正。地图投影变形主要体现在摄影基线长度的变化,从式(1)中可以看出当基线变短时,目标点的高度将高于真实值,反之将低于真实值。不过用于制图的航空图像是垂直成像,深度值 D 和视差值 d 是保持不变的,而主距 f 和基线 B 成反比。因此,可以通过改变主距来确保目标点高程的准确性,如式(3)所示。

$$f' = \frac{f}{k} \quad (3)$$

式中: k 是地图投影畸变系数, f' 是改正后的主距。

改正主距确实可以有效的消除地图投影变形的影响,但是地图投影变形不均匀,当映射面积较大时,对所有图像使用主距值又会影响映射精度。本文提出了另一种方法来改正目标点的高程,如式(4)所示。

$$D = \frac{D'}{k} \quad (4)$$

式中: D' 是空间前方交会得到的深度值, D 是改正后的深度值。

2.2 地球曲率的影响

使用无人机进行摄影测量过程中,像平面和水平面是保持平行的,但地球的水准面和地形图的基准面不一致,因此,目标点的坐标与真实坐标之间会发生偏移。这种偏移一是会导致物方点的坐标发生偏移,二是会影响摄影基线的长度。不过第 1 种情况在无人机图像中影响不大,可以忽略,重要的是第 2 种情况,摄影基线的长度会直接影响目标点的高程。如图 3(a)中是一对在地心坐标系下的像片,将其转化到地图投影坐标系中,摄影基线变短,如图 3(b),此时得到的目标点高程大于真实值。因此,在无地面控制点摄影测量的情况下,空三解算的目标点高程会存在误差,需要消除地球曲率的影响。式(5)为地球曲率改正式,改正值与地面高程和相对飞行高度有关。

$$D = \frac{R + Z_G}{R} D' \quad (5)$$

式中: Z_G 为目标点的真实高程, R 为地球半径。

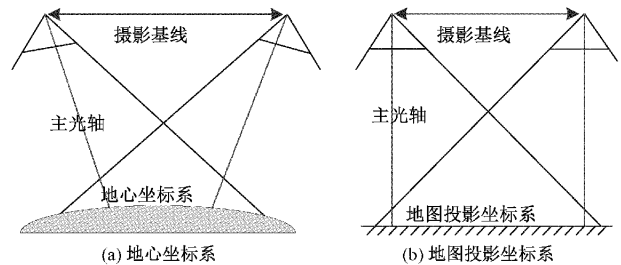


图 3 地球曲率对高程的影响

结合前面几节分别对相机校准、投影变形和地球曲率的改正分析,可以得到由空间前方交会计算出的目标点高程计算式(6)。

$$Z = H_s - \frac{kR}{R + Z_G} (H_s - Z_G) \quad (6)$$

然后得到改正后物方点高程计算式(7)。

$$Z_G = \frac{RZ - (1 - k)RH_s}{H_s + kR - Z} \quad (7)$$

式中: Z 是空间前方交会得到的物方点高程, Z_G 是改正后的高程, H_s 是飞行航线的高度。

3 实验分析

3.1 理论分析

本文根据影响精度的因素和对精度影响的程度,已经推导出物方点高程改正前后的计算公式。定义高程方向上的误差为改正后的高程值减去由空间前方交会得到的高程值,得到式(8)为高程误差公式。

$$Z_{error} = \left(1 - \frac{kR}{R + Z_G}\right) (H_s - Z_G) \quad (8)$$

式中: $(H_s - Z_G)$ 为摄影中心的相对高程。从这个公式里可以得到以下结论:

1) 高程误差与相对高程线性相关,相对高程越大,高程

误差越大;

2) 高程误差与投影变形系数呈正相关,畸变越大(1-k的绝对值越大),高程误差越大;

3) 高程误差与地面高程存在线性关系,地面高程越高,

高程误差越大。

为了更直观的看出不同地面高程和不同相对高程对高程误差的影响,相关误差分析如表1。表中地图投影畸变系数为0.9996,假定其位于UTM投影区的中央子午线上。

表1 不同地面高程和不同相对高程对高程误差的影响

| 高程误差/m | 相对飞行高度/m | | | | | | |
|--------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 200 | 500 | 1 000 | 1 500 | 2 000 | 3 000 | 4 000 |
| 0 | 0.08 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 1.6 |
| 500 | 0.096 | 0.239 | 0.479 | 0.718 | 0.957 | 1.436 | 1.914 |
| 1 000 | 0.111 | 0.279 | 0.557 | 0.836 | 1.114 | 1.671 | 2.228 |
| 1 500 | 0.127 | 0.318 | 0.636 | 0.954 | 1.271 | 1.907 | 2.542 |
| 地表高程/m | 2 000 | 0.143 | 0.357 | 0.714 | 1.071 | 1.428 | 2.856 |
| | 2 500 | 0.159 | 0.396 | 0.793 | 1.189 | 1.585 | 3.170 |
| | 3 000 | 0.174 | 0.436 | 0.871 | 1.307 | 1.742 | 3.484 |
| | 3 500 | 0.190 | 0.475 | 0.950 | 1.425 | 1.900 | 3.798 |
| | 4 000 | 0.206 | 0.514 | 1.028 | 1.543 | 2.057 | 4.112 |

从表1中可以看出,当相对飞行高度为200m时,随着地表高程从0~4 000m,高程误差从0.08m增加到了0.206m,高程误差与地表高程是呈正相关的。当地表高程为1 000m时,随着无人机相对飞行高度从200m到达4 000m,高程误差从0.111m增大到了2.228m。以上误差的大幅度增长情况,尤其是在无地面控制点进行摄影测量时,是绝对不能忽略的,它会直接影响大比例尺测图精度,因此高程误差的改正是十分有必要的。

3.2 实际飞行结果分析

为了验证文中算法的有效性,实地获取了两组飞行数据。数据处理分为4个步骤。首先,在带有架构航线的地心坐标系中,采用自检校方法对相机参数进行标定,确定相机主距。其次,固定相机参数,在地图投影坐标系中通过空中三角测量获取图像外方位元素。第三,当图像内方向元素已知时,利用空间前方交会得到像点对应的目标点坐标。最后,利用本文提出的方法对目标点的高程值进行校正。

1) 飞行数据1的实验结果

第一组数据采集系统由全帧型数码相机和高精度动态差分全球定位系统(global positioning system, GPS)组成。该相机拍摄的图像大小为8 192×5 460,像素大小为4.4 μm。当相对飞行高度为500m时,图像的地面分辨率约为5cm。数据的航向重叠度和旁向重叠度分别约为80%和60%,实验区有11条普通飞行航线、2条构架航线和255幅图像。试验区位于山东省泰安市,地形特征为丘陵地带。实验区地面高程约250m,地面起伏高度约30m,实验区有61个均匀分布的检查点。这些检查点用GPS-RTK测量,精度约为2~3cm。实验区采用中央子午线为117°E的WGS84椭球和UTM投影。

改正前目标点在X、Y和Z方向上的均方根误差(root

mean squared error, RMSE)分别为0.067、0.038和0.298m,如表2所示。图4中的绿线显示了改正前每个检查点的误差值。校正后,X、Y和Z方向上目标点的RMSE分别为0.067、0.038和0.075m,如表2所示。图4中的红线显示了改正后每个检查点的误差值。由表2可以看出,目标点在X和Y方向上的均方根误差在改正前后均保持不变,而Z方向上的均方根误差存在明显的降低。从图4中可以看出,每个检查点的高程误差在经过本文算法的改正之后,都有着明显且稳定的降低。因此,本文方法可以有效地提高地表高程精度。

表2 改正前后物方点在X、Y、Z方向上的均方根误差

| 数据 | 均方根误差/m | | |
|-----|---------|-------|-------|
| | x | y | z |
| 改正前 | 0.067 | 0.038 | 0.298 |
| 改正后 | 0.067 | 0.038 | 0.075 |

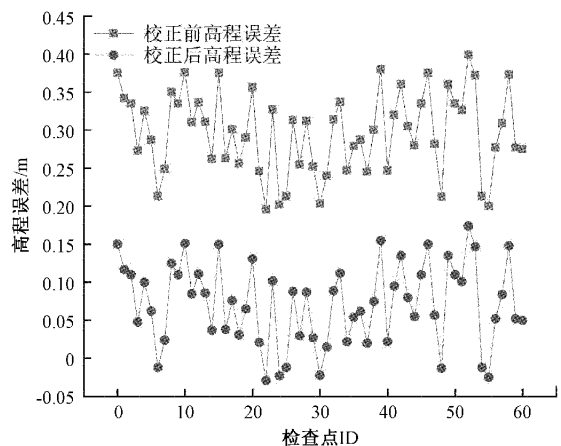


图4 改正前后每个检查点的高程误差对比

2) 飞行数据 2 的实验结果

第二组数据采集系统由大幅画数码相机和高精度动态差分 GPS 组成。相机垂直向下拍摄,获得的图像大小为 $10\ 328 \times 7\ 760$, 像素大小为 $5.2\ \mu\text{m}$ 。当相对飞行高度为 500 m 时,图像的地面分辨率约为 5 cm。数据的航向重叠度和旁向重叠度分别约为 70% 和 50%,实验区包含 5 条普通飞行航线、2 条构架航线和 86 幅图像。实验区位于内蒙古腾格里镇,地形平坦,能够与第一组数据进行区分。实验区地面高程约 1 200 m,均匀分布了 34 个检查点,检查点坐标由 GPS-RTK 测量,精度约为 2~3 cm。实验区采用中央子午线为 105°E 的 WGS84 椭球和 UTM 投影。

改正前目标点在 X、Y 和 Z 方向上的 RMSE 分别为 0.079、0.058 和 0.374 m,改正后目标点在 X、Y 和 Z 方向上的 RMSE 分别为 0.079、0.058 和 0.080 m,如表 3 所示。图 5 中方块线表示改正前每个检查点的误差值,圆点线表示改正后每个检查点的误差值。由表 3 可以看出,物方点在 X、Y 方向上的 RMSE 在改正前后保持不变,而在 Z 方向上的 RMSE 减小了 0.294 m。由图 5 可以看出改正后每个检查点的高程误差都有着明显且稳定的降低。因此,该组实验能够进一步说明本文方法可以有效地提高地表高程精度。

表 3 改正前后物方点在 X、Y、Z 方向上的均方根误差

| 数据 | 均方根误差/m | | |
|-----|---------|-------|-------|
| | x | y | z |
| 改正前 | 0.079 | 0.058 | 0.374 |
| 改正后 | 0.079 | 0.058 | 0.080 |

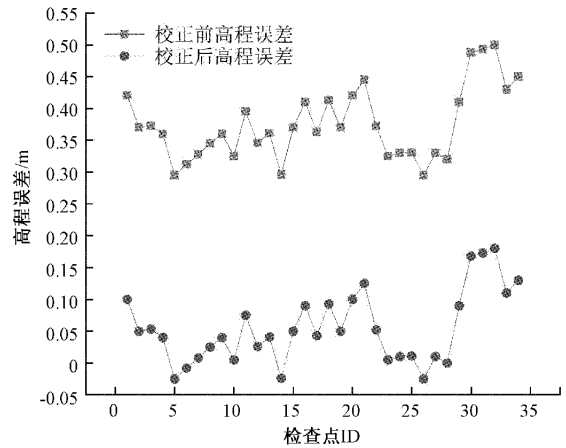


图 5 改正前后每个检查点的高程误差对比

3.3 不同表面高程模拟实验

由式(8)可以看出,高程误差与地面高程呈正相关。为了验证这一结论,改变了地球椭球半径,实现对不同地表高程的模拟。以飞行数据 1 为例子,利用 PROJ4 库实现了椭球半径的变化和 UTM 地图投影。地表真实高程为 250 m,模拟高程分别为 1 250、2 250、3 250 和 4 250 m。相对飞行高度均为 500 m。图 6(a)和表 4 显示了不同地面高度下未改正的目标点高程误差。可以得出结论,高程误差随地面高度增加而增加。图 6(b)和表 4 表示的是使用本文方法改正后的目标点高程误差。当地面高程为 4 250 m 时,未改正的高程均方根误差为 0.615 m,改正后的高程均方根误差为 0.090 m。在不同地面高程下,未改正的地面高程误差不同,但改正后基本相同。这表明本文提出的方法是有效的。

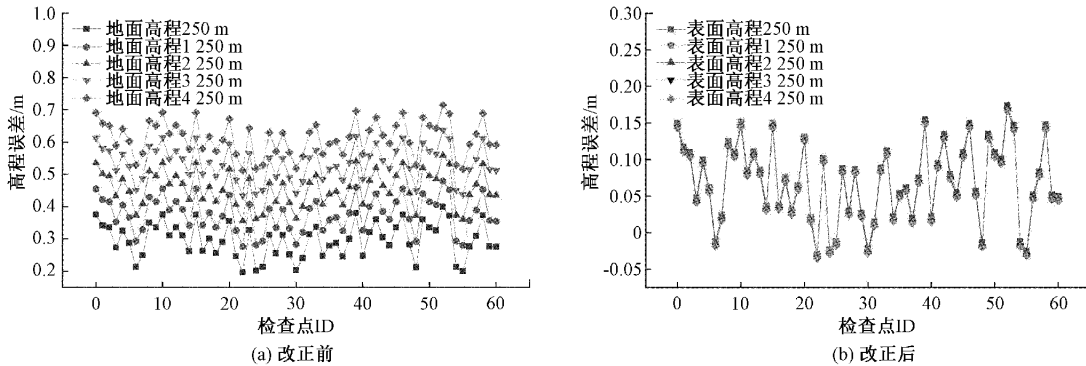


图 6 不同地面高度下的目标点高程误差

表 4 改正前后目标点在不同表面高程下 X、Y、Z 的均方根误差

| 地面高程/m | 未改正的均方根误差/m | | | 改正后的均方根误差/m | | |
|--------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| | x | y | z | x | y | z |
| 250 | 0.081 | 0.056 | 0.302 | 0.081 | 0.056 | 0.089 |
| 1 250 | 0.078 | 0.057 | 0.381 | 0.078 | 0.057 | 0.089 |
| 2 250 | 0.079 | 0.056 | 0.460 | 0.079 | 0.056 | 0.090 |
| 3 250 | 0.078 | 0.057 | 0.537 | 0.078 | 0.057 | 0.090 |
| 4 250 | 0.077 | 0.057 | 0.615 | 0.077 | 0.057 | 0.090 |

3.4 相机检校对比实验

相机检校的目的是获取相机参数和光学畸变参数,恢复每张影像光束的形状^[17]。常见的相机检校方法有三维检校场检校和自检校法,三维检校场方法要求有大量的控制点,整个过程要求严格且操作繁琐^[18]。而本文实验中均采用的是在地心坐标系下自检校相机参数。针对两种方法的差异性,分别使用两种方法得到了检查点误差对比,如表5所示。在飞行数据1中,使用三维检校场获得的相机参数计算出的检查点误差在X、Y、Z方向上分别为0.092、0.083、0.158 m。使用自检校获得的相机参数计算得到的检查点误差在X、Y、Z方向上分别为0.067、0.038和0.075 m。飞行数据2中同样能够得到使用自检校相机参数计算的检查点精度更高的结果。但是这种情况并不代表三维检校场的相机参数不准确,而是因为相对于传统的摄影测量,使用无人机搭载传感器获得的测量数据系统误差更明显。

表5 三维检校场和自检校方法检查点均方根误差比较

| 飞行数据 | 相机检校 | X/m | Y/m | Z/m |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 飞行数据1的 | 三维检校场 | 0.092 | 0.083 | 0.158 |
| | RMSE | | | |
| 飞行数据2的 | 自检校 | 0.067 | 0.038 | 0.075 |
| | RMSE | | | |
| 飞行数据1的 | 三维检校场 | 0.096 | 0.066 | 0.122 |
| | RMSE | | | |
| 飞行数据2的 | 自检校 | 0.079 | 0.058 | 0.080 |
| | RMSE | | | |

影响相机参数变化的主要原因可能是因为相机校准时的拍摄环境和实际成像条件不一致,如外界气压、温度发生变化,相机结构不稳定、高频振动等影响。另一方面相机检校时也带有其他系统误差,如大气折光。因此,文章选择在地心坐标系下进行相机自检校,能够有效地提高地图投影精度。

4 结 论

本文在地图投影坐标系中实现了无地面控制点的摄影测量精确制图。根据理论分析,实际实验和模拟实验的结果能够得到以下结论:1)在没有地面控制点的情况下,摄像机校准需要构架航线。构架航线能够提供足够的几何信息来确定相机主距,从而获得准确的地球表面高程;2)由于受到地图投影变形的影响,不同高度的同名像点不能相交于一点,因此构架航线不参与地图投影坐标系下外方位元素的计算;3)地图投影坐标系中,目标点的高程误差主要受长度变形、地球曲率、相对飞行高度和地面高程的影响,提出高程校正方法可以有效地提高精度。实验中使用的数据图像分辨率约为5 cm,改正前,高程的均方根误差为0.298 m,改正后,均方根误差为0.075 m,高程精度优于0.1 m。实验结果表明,研究的方法可以在无地面控制点的地图投影坐标系内实现精确的地图绘制。

参考文献

- [1] 余忠迪,李辉,巴芳,等.基于消费者级无人机的城市三维建模[J].国土资源遥感,2018,30(2):67-72.
- [2] 陈姣.无人机航摄系统测绘大比例尺地形图应用研究[D].昆明:昆明理工大学,2013.
- [3] 刘春,刘滔,张海燕,等.小波变换法在姿态解算中的应用[J].电子测量与仪器学报,2021,35(1):183-190.
- [4] GUNTEL A, KARABORK H, KARASAKA L. Accuracy analysis of control point distribution for different terrain types on photogrammetric block[J]. Tehnički Vjesnik, 2018, 25(1): 66-74.
- [5] SANZ-ABLANEDO E, CHANDLER J, RODRÍGUEZ-PÉREZ J, et al. Accuracy of unmanned aerial vehicle(UAV) and SFM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used [J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1606-1625.
- [6] ZHANG Y, SHEN X. Direct georeferencing of airborne LiDAR data in national coordinates[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 84(10):43-51.
- [7] ZHANG Y, SHEN X. Approximate correction of length distortion for direct georeferencing in map projection frame [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(6):1419-1423.
- [8] CHOI K, LEE I. A sequential aerial triangulation algorithm for real-time georeferencing of image sequences acquired by an airborne multi-sensor system[J]. Remote Sensing, 2012, 5(1): 57-82.
- [9] 徐诚,黄大庆.无人机光电侦测平台目标定位误差分析[J].仪器仪表学报,2013,34(10):2265-2270.
- [10] MIZINSKI B, NIEDZIELSKI T. Fully-automated estimation of snow depth in near real time with the use of unmanned aerial vehicles without utilizing ground control points [J]. Cold Regions Science & Technology, 2017, 138(6): 63-72.
- [11] HE H, CHEN T, ZENG H, et al. Ground control point-free unmanned aerial vehicle-based photogrammetry for volume estimation of stockpiles carried on barges [J]. Sensors, 2019, 19(16): 3534-3555.
- [12] LI T, ZHANG B, CHENG X, et al. Resolving fine-scale surface features on polar sea ice: A first assessment of UAS photogrammetry without ground control[J]. Remote Sensing, 2019, 11(7): 784-807.
- [13] 郑冬,冯鹏,龙邹荣,等.面向多因素工况下的相机标定精度综述[J].国外电子测量技术,2020,39(8):109-116.

- [14] 焦晨晨, 李松林, 张晓平, 等. 高斯投影变形优化[J]. 测绘科学, 2022, 47(2): 39-46, 94.
- [15] 叶彤, 黄毅, 焦晨晨, 等. 墨卡托投影最佳基准纬线确定方法[J]. 海洋测绘, 2021, 41(1): 41-46.
- [16] 袁修孝, 张雪萍, 付建红. 高斯-克吕格投影坐标系下 POS 角元素的转换方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(3): 338-344.
- [17] 于龙龙, 李艳文, 栾英宝, 等. 基于二维平面靶标的线结构光标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 124-131.
- [18] 景冬, 余志鹏, 卢秀山, 等. 室内三维相机检校场温度改正阈值研究[J]. 测绘工程, 2020, 29(4): 55-59.

作者简介

段晨汐, 硕士, 主要研究方向为无人机摄影测量与图像处理, 城市建筑物三维重建, 计算机视觉等。

E-mail: chenxi_sdust@163.com