

复杂地形条件下无人机仿地航摄及三维数值建模方法

张雨舟 李华

1. 贵州省水利水电勘测设计研究院有限公司; 2. 贵州省水利水电勘测设计研究院有限公司

摘要:山区复杂地形的三维模型及地质特征信息的快速获取一直存在困难。近年来,消费级无人机在地质调查中被广泛应用,但在复杂地形中的航飞方法和三维数值建模方法有待探讨。本文提供一种基于仿地飞行技术的倾斜摄影航线规划和航飞参数计算方法,同时阐述正射影像、DEM和三维模型快速生成方法和步骤,最后以某山区复杂地形为例,通过与常规航摄对比,对仿地航摄建立的三维模型的分辨率进行对比分析,结果表明:仿地航摄能有效提升三维模型的地面分辨率,能快速为高位地质灾害的现状特征分析、数值模拟分析、应急救援分析等提供基础数据。

关键词:无人机;复杂地形;仿地飞行;三维数值模型

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.07.096

引言

随着无人机技术的迅猛发展,逐渐小型化、智能化和民用化,应用领域也从以军事为主的用途逐渐过渡到民用领域。地质工作者发现,消费级无人机在地质调查中具有明显的优势(姚林林等,2020)。采用“空-天-地”手段,对地质灾害频发的西南山区潜在灾害隐患进行早期识别与监测预警逐渐为业界认可(陆会燕等,2019;许强等,2019),其中无人机的低空遥感技术在地质灾害隐患点的调查定性识别中发挥重要作用(郭晨等,2020),但如何使用无人机的倾斜摄影实现地质灾害体多维度地质信息提取一直是地质工程领域的关注热点。

仿地飞行(terrain following flight)技术是无人机根据地形的起伏自动调整航飞高度,使得航线与地面近与平行的技术。仿地飞行技术成为现阶段解决复杂地形条件下无人机获取高质量遥感影像关键技术,但由于消费级无人机仿地飞行技术应用领域不同,仿地飞行模块无法自动优化生成三维倾斜摄影航线规划,如大疆Phantom 4 RTK产品等,因此,基于仿地飞行的航线规划方式和航飞参数确定等优化问题仍有待进一步探讨,以便保证高质量影像的前提下快速进行三维倾斜摄影,以建立高分辨率三维模型,为地质灾害的运动学特征和成灾机制进行数值模拟分析提供基础数据。

一、无人机航摄平台及定位系统

随着无人机的快速发展和专门的数据处理软件的出现,带实时差分RTK消费级无人机越来越普遍。行业级无人机定位系统通常有实时差分定位(RTK)和后差分处理(PPK)。其中,大疆无人机RTK模块往往是通过图传系统将飞行器数据传至遥控器,而遥控器通过4G移动数据网络GPRS连接至千寻或地方CORS来实现实时差分,如Phantom 4 RTK的精度水平约1cm,垂直约1.5cm;而在网络信号不佳时,可配合UBase等测绘产品基站进行PPK模式。此时,无人机设置为GPS模式进行作业,相当于移动站,临时架设GNSS基站进行静态采集,此时无人

机接收机和设在地面基站接收机同步而连续地观测并采集卫星信号。航拍完成后,进行后差分处理即可得到高精度的位置和姿态信息。

二、无人机仿地航摄方法

(一)仿地飞行倾斜摄影方法

1. 仿地飞行前期准备

仿地飞行能保证目标航摄区域内影像的地物分辨率不因相对高程升高而降低,以提高空中三角测量及其三维模型质量,且能提高无人机航飞的安全。大疆Phantom 4 RTK执行仿地飞行时,需将目标区的30m分辨率的数字高程模型DEM(或数字表面模型DSM)和范围TFW文件导入遥控器,以此作为飞控系统高程参考来调整飞行器的航飞高度。其中,DEM数据文件通常从Google高程数据中下载。需要注意的是,DEM必须为无人机导航系统能识别的高程网格TIF格式文件,其中坐标系为WGS84经纬度地理坐标。

2. 仿地倾斜摄影的方法

五向飞行是常规的三维倾斜摄影方法,仿地五向飞行是复杂地形条件下的三维倾斜摄影方法。由于消费级无人机地面站的仿地飞行模式下无法实现五向飞行的自动航线规划,同时,五向飞行的五架次航线耗费大量的时间。因此,本文将4个倾斜摄影航线改为2个倾斜摄影航线形成“井”字,即每次航线包括往返2个方向(图1a)。

仿地五向飞行的航线规划步骤为:①将下载好的DEM导入遥控器,采用仿地飞行模块在DEM范围内规划垂直摄影(正射),设置相对航飞高度 h 、航向重叠率 O_h 、旁向重叠率 O_s 、相机倾斜角度 β 和仿地精度等进行正射航飞;②垂直航摄结束后,在正射范围为手动调整外扩一定倾斜摄影范围(图1b),其外扩距离 d 为:

$$d = \frac{1}{\tan \alpha + \tan \beta} \times h \quad (1)$$

式中, h 为航飞高度, α 为斜摄外扩区坡度, β 相机倾斜角度,通常为 45° 或 60° 。

③倾斜摄影范围调整后,设置相机云台倾斜角度 β ,设置与垂直摄影相同的航飞高度 h 、航向重叠率 O_h 和仿地精度等参数,但此时需要注意,倾斜摄影旁向重叠率与正射旁向重叠率 O_s 不同。由于无人机需要在一条航线上完成往返两个方向的倾斜航摄,因此,在倾斜影像的旁向重叠区中,同向重叠区面积 S_i 小于异向重叠区 S_r (图1c),两者关系为:

$$S_i = 2S_r - 1 \quad (2)$$

为保证三维倾斜摄影影像的质量,需要倾斜摄影和垂直摄影影像的旁向重叠率(旁向重叠区占全影像区的比例)一致,即倾斜摄影的旁向重叠率 O_s' 需要在垂直摄影旁向重叠率 O_s 基础上适当提高,由式(2)可转换得两者关系为:

$$o_s' = \frac{1}{2}(o_s + 1) \quad (3)$$

式中， o_s' 倾斜摄影旁向重叠率； o_s 为垂直摄影旁向重叠率。

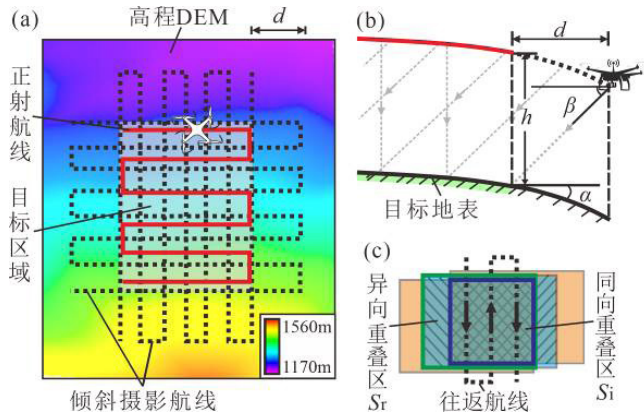


图1 仿地航倾斜摄影航线规划及参数计算示意图

a-航线规划；b-倾斜摄影外扩距离；c-影像旁向重叠区

(二) 斜面飞行倾斜摄影方法

斜面飞行可认为是一种特殊的仿地飞行技术。斜面飞行的规划航线步骤为：①无人机现场先试飞，将云台相机垂直于目标地质体斜面底端点A、B和顶中点C点进行定点，此时无人机记录下a、b和c的坐标，以此作为航飞参考平面（图2）；②调整c点向a和b点的外扩距离，以保证航摄包括目标区域，选垂直目标面拍摄方式，调整其他航飞参数进行规划。

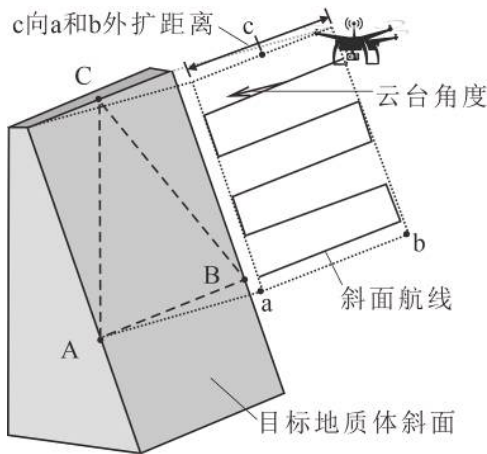


图2 斜面飞行航线规划方法示意图

三、三维实景模型建立

(一) 三维建模精度控制

(1) 像控点布设与控制。为了提高三维模型的精度，航飞前通常选择均匀布设3个以上的像控点，利用RTK记录下各地面标志物的三维模型坐标，以便校正三维模型精度。

(2) 相机内参和畸变参数获取。摄影测量过程中，影像会受到相机光学镜头的畸变与机械误差引起畸

变，对空三建模影响大（徐辛超等，2017；朱晓康等，2019），需要在建模前输入相机内参（包括像主点坐标 C_x 和 C_y 等）和畸变参数（包括径向参数 R_1 和 R_2 和切向参数 T_1 、 T_2 和 T_3 ）。建模时可通过建模软件相机库或从照片EXIF中提取。

(3) 影像POS数据处理。POS数据是航拍影像中差分GPS定位和惯性测量IMU组合的位置与姿态测量系统（Position and Orientation System），当无人机采用RTK差分飞行时，其POS数据将储存于影文件EXIF信息中（或其他文件单独存储中），无需处理；而采用PPK时，需要将原POS数据、基站GNSS文件、无人机移动站bin文件和拍照点MRK文件等进行PPK解算，以获得高精度POS固定解。

(二) 三维实景建模步骤

无人机航摄获取目标区域地质体的遥感影像后，可借助Pix4D、Photoscan和Context Capture等软件进行三维实景模型的建立。不同软件有各自优缺点（杨文府等，2020），其中，Pix4D生产正射影像DOM、数字表面模型DSM和地形等高线等二维图件最为快速，而ContextCapture生成实景三维模型精度高。三维建模的基本步骤如下：

(1) 影像、POS和相机内参和畸变参数信息导入。导入影像后，软件将自动识别从照片EXIF信息中导入RTK差分的POS数据，或将PPK解算后的POS数据文件单独导入；在影像中或相机库加载相机内参和畸变参数。

(2) 提交空三处理和二维影像生成。此过程原理是根据不同二维影像同一特征点进行匹配，基于光束法区域平行的空中三角测量技术建立三维稀疏点云模型。将所有影像数据提交空三角处理重新计算（质量较好的POS的可只平差调整）即可生成稀疏点云模型，并将同坐标系下的像控点导入对齐照片地面标志物与像控点进行重新平差优化；点云模型生成后，即可生成DOM（正射影像图）、DSM（数字表面模型）等二维数据。

(3) 生成三维实景点云模型或网格模型。在空三处理后，选择空间参考系，以稀疏点云为控制点进行空三加密，生成密集点云，即生成三维点云模型；或基于稀疏点云，生成大量的三角白底网格模型，并将照片影像纹理映射到三维白底网格上，建立实景三维模型；该步骤通常分成多个瓦片分别处理，以确保计算机正常进行，同时也可采用多台计算机进行网络集群处理；处理完成后需合并瓦片或通过索引打开各瓦片目录。

四、三维地质建模方法

(一) 三维地形模型

在生成稀疏点云模型后，可直接生成高分辨率的正射影像图和数字表面模型DSM，同时，可通过点云分类初步进行自动化植被与房屋建筑等的过滤，将其处理为数字高程模型DEM，然后设置采样间隔和等高距等生成等高线DLG图。将含高程值的等高线DXF文件导入Rhino软件，设置采样间隔对等高线进行重采样处理生成点集，通过Mesh Patch命令生成三角网格地面模型，导出为ASCII码的stl文件或txt等文件，即可导入PFC^{3D}和RroPro^{3D}等数值模拟软件。

(二) 三维地质模型

在Rhino软件中生成三角网格地面模型的基础上进

行布帘生成曲面(图3a),通过模型边界裁剪曲面,向下挤出曲线创建模型侧壁,并将曲面组合,在组合底面加盖形成封闭多重曲面(图3b);此外,为了方便数值分析中不同的岩土材料选取不同本构模型或力学参数赋值不同,将多个含有断层或地层界线等地质界面的剖面导入模型,通过曲面放样的方法分别建立不同地质界面,再通过该地质界面曲面切割多重曲面地质体模型,生成三维地质模型(图3c);借助Rhino中的Griddle插件设置单元大小,划分有限单元网格生成有限元三维地质模型(图3d),将其导出为FLAC^{3D}、PFC^{3D}等文件格式。

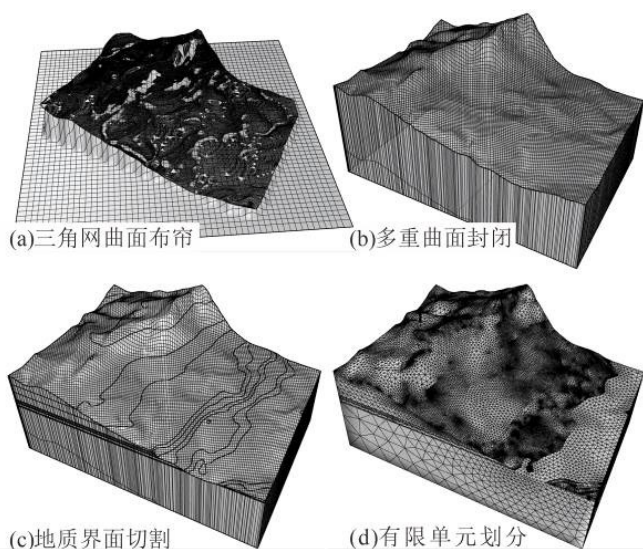


图5 三维地质数值模型建立流程

五、模型分辨率分析

地面分辨率(Ground Resolution)是衡量遥感影像有差别地区分开两个相邻地物最小距离的能力(杨润书等,2013);而数字航空摄影中影像分辨率通常指地面采样间隔(Ground Sample Distance, GSD),是一个像素所代表的地面大小来表示,地面采样间隔越小,地面分辨率越高(乔瑞亭等,2008)。地面采样间隔GSD与航飞高度h等参数有关,即:

$$GSD = h \times \frac{a}{f} = La \quad (4)$$

式中: f为物镜焦距, a为像元尺寸, L为摄影比例尺分母。

同一相机的物镜焦距f和像素尺寸a是固定不变的,航飞高度h和地面采样间隔GSD呈正比,与地面分辨率呈正比,即地面采样间隔越小,地物分辨率越高,三维实景模型质量越好,同时,摄影比例尺分母L越小,比例尺越大,影像数据精度越高。

以某西南山区的滑坡为例,分别采用常规飞行航摄和仿地飞行航摄建立三维地形模型,其地面采样间隔空间分布如图4所示。由图4可以发现,目标区域内,常规航摄的地面分辨率下降35倍以上,而仿地航摄三维模型地面分辨率变化较小,最大分辨率下降不超过3倍,仿地航摄明显优于常规的航摄。

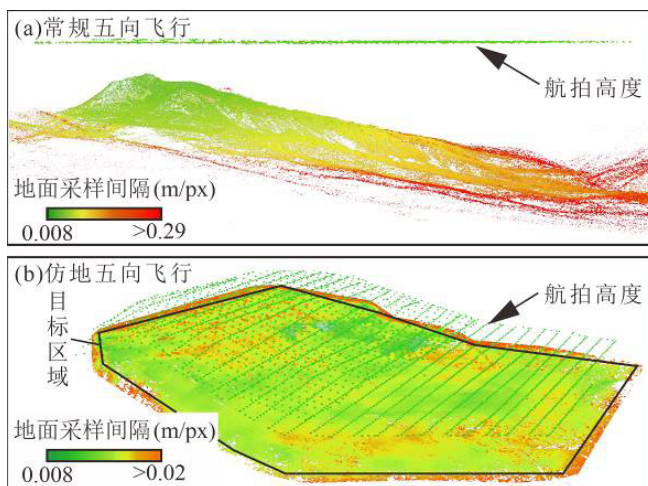


图4 常规与仿地航摄地面分辨率对比图

六、结论

基于消费级无人机的仿地飞行技术,本文提供采用DEM为参考的仿地飞行和斜面飞行的航摄规划方法,给出了倾斜摄影外扩距离和旁向重叠率等航飞参数的估算公式。通过分析表明,仿地飞行在地形起伏较大的山区有较大优势,仿地航摄能有效提升三维模型的地面分辨率,能快速为高位地质灾害的现状特征分析、数值模拟分析、应急救援分析等提供基础数据。

参考文献

[1] 郭晨, 许强, 董秀军, 等. 无人机在重大地质灾害应急调查中的应用[J]. 测绘通报, 2020. (10): 6-11.

[2] 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与InSAR结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019. 44 (9): 1342-1354.

[3] 乔瑞亭, 孙和利, 李欣. 摄影与空中摄影学[M]. 武汉: 武汉大学出版社. 2008.

[4] 徐辛超, 徐爱功, 马力, 等. 镜头畸变参数对航测像点量测精度的影响[J]. 测绘通报, 2017. (4): 30-34.

[5] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019. 44 (07): 957-966.

[6] 杨润书, 马燕燕, 殷海舟. 低空无人机航摄系统地面分辨率与航高的关系研究[J]. 地矿测绘, 2013. 20(3): 1-2.

[7] 杨文府, 王冠杰, 李国锋, 等. 针对无人机倾斜摄影数据的不同处理软件空三加密[J]. 测绘通报, 2020. (8): 96-100.

[8] 姚林林, 钟果, 李青春, 等. 基于无人机遥感信息的地质解译方法及在地质调查中的综合应用研究[J]. 工程地质学报, 2020. 28 (5): 1099-1105.

[9] 朱晓康, 魏景帅. 1:500免像控无人机航测技术应用研究[J]. 地理空间信息, 2019. 17 (2): 22-26.

作者简介: 张雨舟(1992.1.15-), 男, 汉族, 重庆市, 大学本科, 助理工程师, 研究方向: 大坝安全监测, 无人机测绘。