引文格式：李亚男, 涂道勇, 刘志隆. 无人机载激光扫描技术在高原测图中的应用[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 80-82. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.08.020

无人机载激光扫描技术在高原测图中的应用

李亚男[1]，涂道勇[1]，刘志隆[1]
（1. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司，福建 福州 350003）

摘　要：为了解决高原地形复杂地区，作业环境恶劣导致的无人机载激光扫描（LiDAR）测绘作业安全风险大、效率低的实际问题，研究了在高原地区利用无人机载LiDAR技术开展大比例尺测图的关键技术流程和实施要点，提供了利用三维激光点云直接绘制地形图的可行方法，从而改进了高原区机载激光扫描数据采集方法，提高了激光点云在大比例尺测图中的利用效率，为高原地区风电场项目大比例尺地形图测绘提供了安全、高效、实用的作业方案，并通过具体工程实践验证了该方法的有效性。

关键词：无人机；激光雷达；高原；测图
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0080-03

Application of UAV Airborne LiDAR in Plateau Mapping

LI Yanan[1], TU Daoyong[1], LIU Zhilong[1]
(1. Power China Fujian Electric Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: High safety risks and low efficiency come with UAVlaser scanning (LiDAR) surveying and mapping due to complex plateau terrain and poor working environment. To solve the problems, we studied the key technical process and implementation points of large-scale mapping by using UAVLiDAR technology in plateau areasand provided a feasible method of directly drawing topographic map using 3D laser point cloud. Thus, we improved LiDAR data acquisition method in plateau areas and enhanced the utilization efficiency of laser point cloud in large-scale mapping, providing a safe, efficient and practical operation scheme for large-scale topographic mapping of wind farm projects in plateau areas. Finally, weverified the effectiveness of this method by specific engineering practice.

Key words: UAV, LiDAR, plateau, mapping

近年来，无人机载激光扫描技术的应用，可以作为解决该问题的有效手段。然而受高海拔、缺氧、严寒、电磁辐射复杂等条件的影响，常规作业方法风险较大、效率低[1-4]。

因此充分利用采集的激光点云及配套的影像，高效绘制大比例尺地形图成为发挥机载激光雷达效率的重点。本文结合具体工作实践，开展了无人机载激光扫描技术在高原地区数据采集和大比例尺测图的应用研究，可为类似工程项目提供经济、高效、实用的技术方案[5-6]。

1　无人机载激光扫描技术介绍

无人机载激光扫描系统是以无人机作为测量平台，搭载激光扫描测距系统、惯性测量单元（IMU）和机载全球导航卫星系统（GNSS），通过主动向目标地表发射激光脉冲，获取地表的三维点云，还能提供一定的光谱信息[7]，同时，激光具有一定的植被穿透能力，通过对点云进行分类，可以获取地面点、植被点、建筑物点等，获取高精度地形地貌信息，减少植被覆盖对精确表达地形地貌的影响，基于激光雷达技术能有效克服植被的影响[8]，因此在空间地理信息多种领域得到广泛应用。

2　高原地区三维激光点云数据采集及处理方法

2.1　作业流程

无人机载激光扫描数据采集的安全性和数据应用的高效性，作为影响高原高山地区作业的重要因素，两者相互影响，主要表现在，提高点云数据应用效率，从而降低数据采集作业过程的作业难度，也就是在一定程度上降低了无人机激光扫描的作业风险，因此提高激光点云数据的应用效率，使之成为重点工作。利用激光点云开展大比例尺测图的技术流程如图1所示。

2.2　前期准备

1）收资和踏勘。由于高原山区气温较低，气候

收稿日期：2022-04-02；修回日期：2022-07-15。
项目来源：福建省科技发展计划资助项目（2019H01010204）。
第一作者简介：李亚男（1989—），硕士研究生，工程师，主要从事电力工程中摄影测量与遥感应用研究，E-mail：984040685@qq.com。

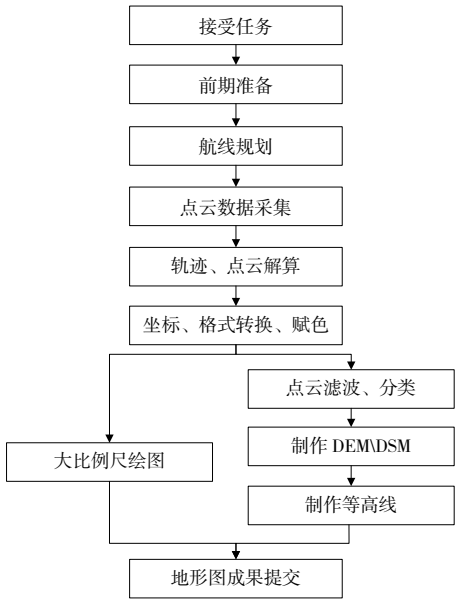


图1　技术流程图

不稳定，在开展无人机载激光扫描作业之前，需要对测区进行实地踏勘，向当地居民咨询测区的基本情况及风俗习惯等。明确测区的覆盖物，如植被、积雪、杂草等情况，根据实地情况进行测区划分，明确数据采集顺序，例如：有积雪的区域后飞，无积雪先飞；容易起雾的山间选择中午或下午飞行等。同时了解测区的交通情况，估算所需的作业人员及辅助人员数量。

2）仪器设备准备。在作业前，应对无人机设备具有充分的了解，应选择具有高原桨的无人机，配备多组电池，并保持电量能够满足持续作业，必要时还需配置备用无人机。

3）试验飞行。高原山区通常空气稀薄、温度较低，无人机的实际续航时间会显著低于标称时间，需要对于典型区域开展局部飞行试验，明确飞机的实际续航时间、飞行里程、卫星信号情况等，为航测作业区块划分和规划航线提供参考。

4）其他准备。在高原高山地区进行外业作业，要配齐配全所需劳保用品，准备防寒、防暑、防治蚊虫叮咬、抗高原反应药物、氧气瓶等的物料用品等，以及充足的食物、饮用水等。作业人员应保证充足的睡眠、良好的体魄，以应对恶劣的环境。

2.3　航线规划

为保证测图的需求，并尽量减少影像的冗余，在采集激光点云时，采用以点云密度优先的原则，结合实际续航时间和天气情况，合理降低影像的重叠度，保证点云密度和重叠度均匀，确保飞机安全飞行。如需采集数字正射影像（DOM），则采用无人机搭载正射模块单独采集。

对于高差较大的测区，为保证点云密度，应采用仿地飞行模式，提前收集测区粗略数字高程模型（DEM）或数字表面模型（DSM），作为高程依据开展航线设计。

同时，为了减少无人机上升和下降耗电量和时间，最大程度增加有效飞行时间，减少风险，应将起飞和降落点尽量选在测区内的较高海拔区域。

2.4　采集过程监控

在采集数据过程中，做好实时监测，电池电量、卫星信号等准备，遇到突发状况和天气变化等情况，应及时返航，保证仪器设备和数据安全。

2.5　数据解算及质量检查

数据采集完成后，应及时进行点云解算及质检：检查质量，覆盖情况，密度，解算轨迹，与实测点对比检验数据精度，是否有分层，错乱等情况。对采集的影像进行处理，并检查成果质量。对于不满足质量要求的数据，应及时进行补飞或重飞。解算完成的点云及影像，应转换坐标系和格式，为后续点云分类和成果制作提供相应格式的数据。

2.6　点云滤波及分类滤波

对激光点云进行滤波和分类，是制作DEM的必要工作。通过对点云中的粗差点进行剔除，并对点云中不同类型的点进行自动和手工分类，得到相应类型的点，制作对应的成果。比如，利用分类得到的地面点，制作DEM、生成等高线、采集高程点等，为大比例尺测图提供高程数据；利用分类得到的电力塔、通信塔、植被点、建筑物点等，可以得到这些地物的高程，为风电场设计提供参考依据。

2.7　DOM制作

利用DEM或DSM对影像进行自动微分纠正，生成单片数字正射影像，并匀光、匀色处理。然后对单片数字正射影像进行拼接、裁切和镶嵌线检查，生成数字正射影像。如有需要，还可生成分幅后的DOM。如果正射和激光点云分开采集，可以按照常规正射影像制作方法单独处理。

3　三维激光点云大比例尺测图方法

本地形图绘制中，利用三维激光地形地基成图软件开展大比例尺测图工作。使用采集的影像数据，给激光点云进行赋色后，直接在三维点云上识别地形、地物并绘图。在地物判读中，充分发挥激光点云具有三维空间信息和光谱信息的优势，提高判读效率，还

可以参考正射影像进行地物识别，辅助绘图。该制图方法可以降低外业采集点云时对影像的要求，减少了外业的工作难度和工作量，又可以充分获取空间三维信息，实现快速绘制大比例尺地形图的效果。

4 工程应用实例

在四川某风电场大比例尺测图项目中，测区位于海拔3 500 km以上，气候严寒、空气稀薄，最大高差500 m，采用大疆M300RTK无人机，经过试验一组电池的有效航程为7 km，采取仿地飞行模式，共飞行19个架次，航高约130 m，采集激光点云面积约15 km^2，点云密度约为110点/m^2，采集67个检查点用于精度分析。

4.1 精度分析

通过图上地物点与对应实测地物点的坐标进行比较，平面较差如表1所示，高程较差如表2所示。由对比结果可知，检查点的平面中误差为±0.058 m，高程中误差为±0.032 m，满足1∶500地形图精度要求。

表1 平面较差对比/m

点号	图上地物点坐标		实测地物点坐标		方向较差		
	X	*Y*	*X*	*Y*	*dx*	*dy*	*ds*
1	*** 542.215	* *** 435.868	*** 542.196	* *** 435.901	0.019	−0.033	0.038
2	*** 238.454	* *** 283.782	*** 238.437	* *** 283.771	0.017	0.011	0.020
3	*** 966.242	* *** 938.919	*** 966.252	* *** 938.924	−0.010	−0.005	0.011
4	*** 397.854	* *** 343.418	*** 397.874	* *** 343.408	−0.020	0.010	0.022
…	…	…	…	…	…	…	…
66	*** 301.899	* *** 151.249	*** 301.913	* *** 3151.236	−0.014	0.013	0.019
67	*** 581.644	* *** 513.851	*** 581.627	* *** 513.866	0.017	−0.015	0.023

表2 高程较差对比/m

点号	实测高程值	DEM高程值	$\triangle H$
1	3 587.41	3 587.39	0.02
2	3 693.27	3 693.45	−0.18
3	3 695.44	3 695.48	−0.04
4	3 483.17	3 483.07	0.10
…	…	…	…
66	3 626.94	3 626.72	0.22
67	3 528.36	3 528.15	0.21

4.2 效率分析

与传统高原地区大比例尺测图方法对比，本项目组统计了项目测图整体耗时，统计结果如表3所示。可见，相对传统作业方法，本文提出的作业方法，整体作业效率提升了20%以上，节约了内外业成本，同时降低了可能存在的作业风险。

表3 项目耗时统计表

类 型	飞行架次/次	飞行总时间/min	数据处理及测图总时间/d
传统方法	27	767	15
本文方法	19	614	11
节约情况	8	153	4
节约效率/%	29	19.9	26.7

5 总 结

本文介绍了在高原地区开展风电场大比例尺测量成图的方法，提出了高原地区开展无人机激光扫描的注意事项，同时，在航线设计环节进行优化，采用以点云密度优先的原则，进行仿地飞行设计，并以激光点云作为绘制大比例尺地形图的依据，直接绘制地形图，从而提高地形图绘制效率，降低外业数据采集风险，为同类工程项目提供了具体实施方案。通过精度、效率分析以及工程实践检查，本文提出的作业方法安全、可行、高效。

参考文献

[1] 朱金凤. 风电助力可再生能源高质量发展[J]. 电气时代，2019,38(11):3

[2] 常强，陈潇，刘祥刚，等. 贵州山区风电勘察浅谈[J]. 风能，2020,10(9):54-56

[3] 张明杰. 高寒山地战场环境对无人机系统运用的影响及对策[J]. 甘肃科技，2021,37(20):72-74

[4] 冯威. 高寒高海拔复杂艰险山区无人机勘察技术应用[J]. 铁道工程学报，2019,36(8):9-13

[5] 赵海强，陈小燕. 新型测绘技术在大比例尺测图中的应用[J]. 地理空间信息，2022,20(1):82-84

[6] 国家测绘局. 低空数字航空摄影测量外业规范:CH/Z3004-2010[S]. 北京:测绘出版社，2010

[7] 李亚男，王骏，涂道勇. 一种高效的机载LiDAR点云分类方法研究[J]. 电力勘测设计，2018(5):36-40

[8] 杜世回. 高原极复杂山区无人机激光雷达技术应用研究[J]. 铁道工程学报，2021,38(2):13-18