

# 机载激光雷达技术在高速公路横断面测量中的应用

高波<sup>1</sup>, 纵瑾<sup>2</sup>, 李涛<sup>3</sup>

(1. 山东鲁邦地理信息工程有限公司, 山东 济南 250102; 2. 山东数维空间测绘技术有限公司, 山东 济南 250102; 3. 山东省国土测绘院, 山东 济南 250100)

**摘要:** 机载激光雷达凭借独有的装备、技术、精度、数据优势, 在高速公路横断面测量具有传统测绘无可比拟的优势。本文结合具体工程案例, 通过对关键技术的研究和应用, 实现地面点云高程中误差优于±10cm精度要求, 并能显著提升线路测量工作效率。

**关键词:** 无人机; 激光雷达; 点云; 横断面; 公路测量

## Application of Airborne LiDAR Technology in Highway Cross Section Survey

GAO Bo<sup>1</sup>, ZONG Jin<sup>2</sup>, LI Tao<sup>3</sup>

(1. Shandong Lubang Geographic Information Engineering Co., Ltd., Jinan 250102, China; 2. Shandong Digital Space Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Jinan 250102, China; 3. Shandong Institute of Land and Resources Surveying and Mapping, Jinan 250100, China)

**Abstract:** With its unique equipment, technology, accuracy and data advantages, airborne LiDAR has incomparable advantages in cross section survey of expressway compared with traditional surveying and mapping. In this paper, combined with specific engineering cases, through the research and application of key technologies, the mean square error of ground point cloud elevation is better than  $\pm 10\text{cm}$ , and can significantly improve the working efficiency of line survey.

**Key words:** UAV; LiDAR; Point cloud; Cross section; Highway survey

### 1 概述

机载激光雷达技术是近几年快速发展起来的一门新技术, 它集成了激光测距技术、GNSS全球导航卫星系统、惯性导航技术, 能快速获取地面高精度的三维地面模型, 已经逐步发展成为一种全新的对地观测技术<sup>[1]</sup>。机载激光雷达凭借GNSS、IMU以及激光和高分辨率相机等的高度集成, 能快速、准确地获取高精度地面三维坐标, 平面高程精度达到厘米级<sup>[2]</sup>。同时, 机载激光雷达以其智能化、轻便化、高精度、全天候等诸多优势特点, 正

被越来越多的用户所接受, 应用领域和应用场景也在不断扩展中。

公路横断面测量就是测定与公路中线正交方向上地形的起伏情况, 用于挡墙、路基(包括排水、用地)、土石方工程量的计算和防护工程设计, 传统测绘方式是采用水准仪、全站仪、RTK等仪器设备获取断面线地形变换点平面位置和高程。本文以董梁高速公路机载激光雷达航测为例, 通过设备选用、点云数据获取与处理、应用效果评价等环节进行剖析测绘新技术在公路横断面测量中的应用。

**基金项目:** 无

**作者简介:** 高波 (1983年生), 男, 山东科技大学, 高级工程师, 主要研究方向工程测量、地理信息。E-mail: 283984708@qq.com

## 2 飞马D20工业级多旋翼无人机装备技术优势

D20是飞马机器人全新研发的大载重、长航时、多功能、高精度、高效率无人机系统。D20为大载重多旋翼无人机系统，最大有效负载6kg，搭载1kg有效负载时，其续航时间达到80分钟，有效控制半径50km。配备FPV摄像头、长距毫米波雷达、前/下视觉传感器，实现高精度避障及定高功能。支持航测模块、倾斜模块、遥感模块、视频模块、激光雷达模块等<sup>[3]</sup>。

D20配高精度差分GNSS板卡，标配网络RTK/PPK及其融合解算服务，支持高精度POS辅助空中三角测量，具备无控制点的1:500大比例尺成图能力；通过无人机管家，支持基于精准三维地形，满足各种应用需求的智能航线与联合航线规划，具备精准地形跟随飞行与三维实时飞行监控能力；支持GPS融合解算、控制点量测、空三解算、一键成图、一键导出立体测图、高精度组合导航轨迹解算、点云处理与分类等功能。本文所述案例采用D20搭载DV-LiDAR10激光雷达模块，设备标称最大测程1500m，测距精度±5mm@100m，回波数量7次，回波强度8bits。

## 3 工程实施

### 3.1 工程概况

董梁高速公路是山东省“九纵五横一环七连”高速公路网的重要通道。东起青岛港董家口港区，西至梁山与河南省台前县交界处（见图1，董家口—梁山线路走向示意图）。董梁高速公路全线，采取分段的形式进行建设。目前工程部分路段已经建成通车，部分路段在建，部分路段还处于规划中，其中沂南至新泰段线路定测于2022年8月启动。董梁高速公路（沂南至新泰段）自东向西途径山东省临沂市沂南县、蒙阴县和山东省泰安市新泰市，主线67km，比较线23km。测区位于东经117°47'27"~118°41'33"，北纬35°37'50"~35°48'10"之间。线路途经鲁中地区泰沂山脉，地势高差起伏较大。

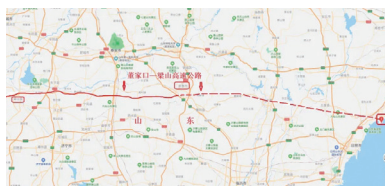


图1 董家口—梁山高速公路走向示意图

### 3.2 任务要求

采用飞马D20无人机搭载DV-LiDAR10激光雷达模块，获取拟建高速公路设计中心线左右两侧各250m带宽范围内机载雷达点云数据。参照CH/T8024-2011《机载激光雷达数据获取技术规范》相关要求以及设计单位特殊要求，其中，点云密度大于16点/m<sup>2</sup>；高程精度：经分类的点云数据高程中误差不大于0.1米，困难地区（大面积植被覆盖、乱掘地、采沙场、地面坡度在6°以上等）的中误差可相应放宽0.5倍。

### 3.3 坐标基准

平面坐标系：2000国家大地坐标系；

高程基准：1985国家高程基准。

### 3.4 技术路线

首先，采用机载雷达技术获取测区范围内原始点云数据<sup>[4]</sup>；然后，通过内业数据预处理、点云数据滤波、异常点滤波、地物分类提取等四个关键环节，获得地面点点云；接着，通过外业检测点或者大比例尺地形图特征点，计算点云精度；最后，在精度合格情况下，通过横断面处理软件进行道路任意断面提取、绘制断面图。

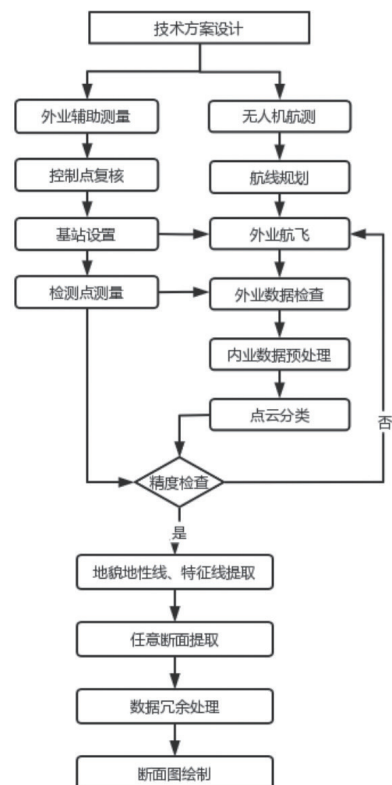


图2 技术路线流程图

### 3.5 航线规划及其飞行参数设置

航线规划需要综合考虑预期高程精度、点云密度、无人机起降场地、立交桥及支线不规则飞行范围、敏感点及高大建筑物避让、山区仿地飞行耗电高等特点，在保证安全的基础上，参考经验数值，山区3~4km/架次、平原5~7km/架次，共规划22架次。航线规划及飞行参数设置见表1、图3。

表1 飞行参数设置

相对航高	激光脉冲	旁向重叠度	最大测距	点云密度
m	kHz	%	m	pts/m <sup>2</sup>
260	200	55	750	95

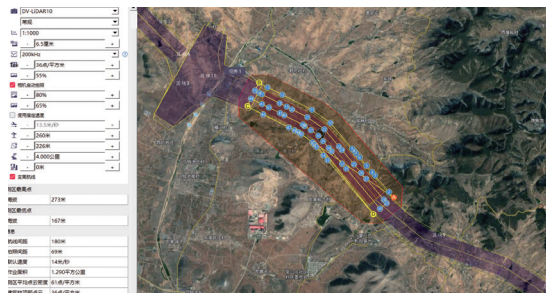


图3 航线规划

### 3.6 点云数据处理

#### 3.6.1 数据预处理

对原始数据进行解码，获取GNSS数据、IMU数据和激光测距数据等。将同一架次的飞行记录数据、GNSS数据、地面基站观测数据、IMU数据、基站控制点数据和激光数据等进行整理，数据格式转换<sup>[5]</sup>。

#### 3.6.2 点云数据解算

联合POS数据和激光测距数据，附加系统校核数据，进行点云数据解算，生成三维点云；点云数据格式采用LAS格式；将点云数据坐标系统、高程系统转换。

#### 3.6.3 点云精度检查

(1) 数据检查：同架次航带间、不同架次航带间接边误差满足要求，点云数据覆盖范围满足要求；

(2) 点云密度：平均55点/m<sup>2</sup>，无数据覆盖漏洞；

(3) 分区段检核，共分两段进行检核，采用外业实测高程点来对点云数据的精度进行检查。第一段约40km，共检核2085点，高程中误差

±0.082m；第二段约30km，共检核1048点，高程中误差±0.077m。

#### 3.6.4 点云滤波分类

获取最终点云数据前需要将点云中的地面点与非地面点分离，点云分类流程见图4。

##### (1) 噪声点滤除

将明显高于地面的点和明显低于地面的点，以及移动地物点定义为噪声点，在进行地面点分类之前，应首先将此类点分离出来。

##### (2) 点云自动分类

利用基于反射强度、回波次数、地物形状等的算法或算法组合，对点云数据自动分类。



图4 点云分类流程图

#### 3.6.5 提取地面点云

基于初始地表面，设置地面坡度阈值进行迭代运算，直至找到合适的地面。对于高程突变的区域，调整参数或算法。重新进行小面积的自动分类；采用人工编辑的方法，对分类错误的点重新进行分类<sup>[6]</sup>。

## 4 应用效果及关键技术处理

### 4.1 应用效果

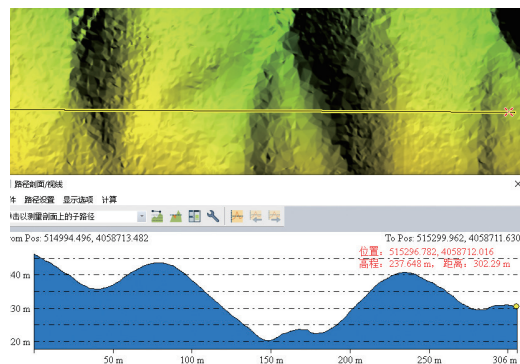


图5 丘陵、山区DEM模型剖面效果图

(1) 通过专用软件在DEM模型上剖切任意断面,对地形变换比较平缓的丘陵、山区效果较好,可以非常直观、逼真地反映出断面形态(见图5)。

(2) 道路典型特征剖面效果形态良好(见图6),通过与人工实测断面对比,可以满足高速公路定测阶段断面设计精度要求。

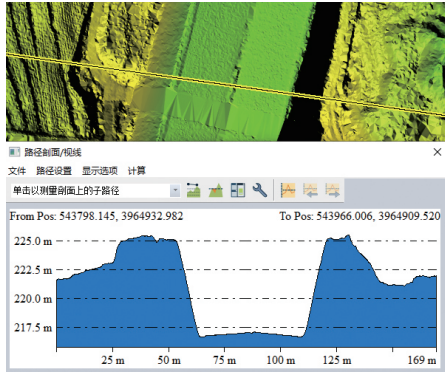


图6 道路典型特征断面DEM模型剖面效果图

存在问题和不足:受地物遮挡、植被密集处地面点云数量不足(见图7);具有明显特征的人工地貌,比如人工陡坡、既有高速公路路肩、路堑、人工沟渠等特征位置,通过DEM模型剖切断面线效果欠佳,特征线棱角不分明(见图8)。

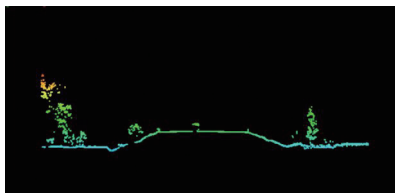


图7 植被密集区域点云剖面示意图

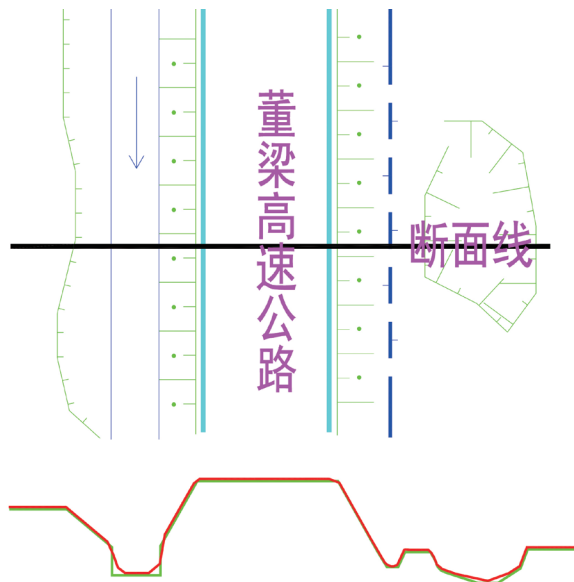


图8 DEM剖面与标准横断面叠加对比效果

## 4.2 关键技术问题处理措施

针对应用效果中存在的不足,通过外业实测、优化作业流程、人机交互等措施,在不断优化完善、经验分析的基础上,总结如下:

(1) 采用高精度、多次回波、大功率机载激光雷达装备,设备性能直接决定着精度和场景适用性;另外航线规划至关重要,本案例通过超低空飞行、增加旁向重叠度等措施,有效增加地物扫描角度和点云密度,有利于精细DEM模型制作并提高横断面剖切效果;

(2) DEM构建TIN时,充分考虑具有方向性的人工构筑物、河流水系岸线、沟坎坡顶线与坡底线、道路边线及沟渠等特征线,尽量保持DEM模型数据内插合理;

(3) 断面线与地貌特征线相交处保留断面点(地形变换点),内业参考高分辨率影像、数字高程模型和地面点云数据解析交点三维坐标,确保断面图形态合理;

(4) 部分位置由于植被或者建筑物密集导致地面点云稀少带来的断面剖切不合理现象,需要结合外业实测进行优化完善。

## 5 总结

机载雷达技术在公路定测阶段取代传统断面测绘,极大提高了工作效率<sup>[7]</sup>、降低了劳动强度,数据获取与处理手段发生了根本性变革。尽管应用中还存在缺陷或者不足,部分工作还离不开人工辅助或者采用传统测绘手段补充完善,但是机载雷达技术凭借着装备快速迭代优势、全天候作业优势以及海量点云独有的数据优势,该生产方式正在被越来越多的用户接受和认可<sup>[8]</sup>。

断面法是基于传统测绘点对点模式的一种成果展现形式,也是目前交通、水利行业设计、施工阶段重要的测绘成果之一<sup>[9]</sup>。相较于方格网法,传统断面方式并不能发挥海量点云数据优势,这还有待技术规范、行业标准的更新和支持,同时还需对新技术应用不足和关键技术问题进行更深入研究。本文对交通、水利等类似业务的开展具有重要参考价值,可以借鉴使用。

## 参考文献:

- [1] 李平苍.机载激光雷达技术在铁路横断面测绘中的应用[J].铁道勘察,2013,39(05):3-6. DOI:10.19630/j.cnki.tdkc.2013.05.002.

- [2] 刘怀彬,姜韶,阳清.机载激光雷达在公路纵横断面测量中的应用[J].测绘,2019,42(04):184-187.
- [3] 林志东.机载激光雷达在公路勘测设计中的应用[J].福建交通科技,2020(05):81-83.
- [4] 王君杰,孙健,王雁昕.机载激光雷达在密林山区测绘中的应用[J].北京测绘,2022,36(04):436-440. DOI:10.19580/j.cnki.1007-3000.2022.04.011.
- [5] 朱雪峰.基于机载激光雷达测量技术的铁路勘测方法[J].测绘通报,2015(12):125-126.
- [6] 奚歌,张福坤,颜培胜,杨智翔.基于miniLiDAR的山地大比例尺地形图测绘应用研究[J].水利规划与设计,2018(02):177-181.
- [7] 赵艳萍.机载激光雷达高精度数字高程模型在沟道断面测量中的应用研究[J].经纬天地,2016(06):42-45.
- [8] 陈璞然.机载激光雷达(LiDAR)测量技术在公路勘测设计中的应用[J].黑龙江科技信息,2016(02):124-125.
- [9] 余飞,余绍淮,陈楚江.机载激光雷达测量技术在高速公路勘察设计中的应用研究[J].中外公路,2016,36(02):335-338. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2016.02.0076.