

# 高精度直升机机载 LiDAR 在高速公路改扩建勘测中的应用可行性研究

郑伟安

(山东省国土测绘院, 山东 济南 250102)

**摘要:**机载 LiDAR 在公路勘测方面的用途日益广泛。该文对直升机机载 LiDAR 在高速公路改扩建中的应用技术路线可行性进行了研究论证,从地面控制测量、点云数据获取、点云数据处理、成果应用等多个方面进行了阐述,通过分析 LiDAR 点云数据在 5 种不同地面控制点布设方案校正下的点云数据精度,论证了利用地面控制点对直升机机载 LiDAR 点云数据进行平面和高程校正的可行性。

**关键词:**直升机机载 LiDAR;高速公路改扩建勘测;地面控制点;精度改正

**中图分类号:**P258      **文献标识码:**B

**引文格式:**郑伟安.高精度直升机机载 LiDAR 在高速公路改扩建勘测中的应用可行性研究[J].山东国土资源,2018,34(8):80-84.ZHENG Wei'an. Study on Feasibility for Application in Freeway Reconstruction and Extension Surveying by Using High-accuracy Helicopter LiDAR[J].Shandong Land and Resources,2018,34(8):80-84.

## 0 引言

近年来,社会经济的快速发展对交通运输能力的需求不断增长,大批高速公路的新建、改扩建是“十三五”期间交通部门的一项重要工作<sup>[1]</sup>。高速公路改扩建勘测是高速公路改扩建施工设计的基础,旨在对现有高速公路实施现状测量,获取满足高速公路改扩建测量工作对现有道路的高精度三维信息。

传统的测量手段劳动强度大,生产周期长,成果精度低,需要大量人员现场作业,受场地影响较大,而 LiDAR 作为一种主动式对地观测系统,集成激光测距技术、计算机技术、惯性测量单元(IMU)/DGPS 差分定位技术于一体,可直接获取高精度三维地表地形数据,具有自动化程度高、受天气影响小、数据生产周期短、精度高、非接触等特点,为获取高时空分辨率地球空间信息提供了一种全新的技术手段<sup>[2-6]</sup>,弥补了传统技术手段的不足<sup>[7]</sup>。

测绘工作者对 LiDAR 在道路勘测方面的应用进行了多项探索。魏国忠等<sup>[8]</sup>利用车载移动测量

系统进行了公路勘测点云精度可行性分析,黄华平等<sup>[9]</sup>对利用机载 LiDAR 在铁路勘测中的应用进行了研究。直升机因其起飞场地限制小、低空低速等优点,通过直升机机载 LiDAR 运用正确的技术方法可获取符合高速公路改扩建要求的点云密度和精度。

该文以京藏高速公路改扩建工程为背景,阐述了基于直升机机载 LiDAR 设备开展 LiDAR 点云数据获取、处理及多元数据成果应用的整个技术流程,并对 5 种不同地面控制点布设方案下的点云精度改正进行了可行性分析。

## 1 总体技术路线

使用直升机机载 LiDAR 系统,按照设定的最佳飞行高度和速度,获取高精度、高密度的机载 LiDAR 测量原始数据成果,由地面基站数据和 POS 数据进行差分解算,得到飞机飞行轨迹线数据,将轨迹线文件、激光测距数据和系统数据进行联合解算,生成原始点云数据。高速公路改扩建所需点云数据平面位置中误差要求优于 5 cm,高程中误差要求优于

收稿日期:2017-12-27;修订日期:2018-03-17;编辑:曹丽丽

作者简介:郑伟安(1980—),男,山东临邑人,工程师,主要从事航空摄影测量、数据入库等工作;E-mail:1748822484@qq.com

2 cm。原始点云经过坐标基准转换后<sup>[10]</sup>,根据地面控制点的坐标及高程,进行平面坐标改正和高程拟合改正,得到满足高速公路改扩建精度要求的超高精度的直升机机载 LiDAR 点云数据,在此基础上进行处理制作生成数字高程模型、数字地面模型、数字线划图、实景三维数据、道路边线、纵横断面数据、构造物工点图等,总体技术路线如图 1 所示。

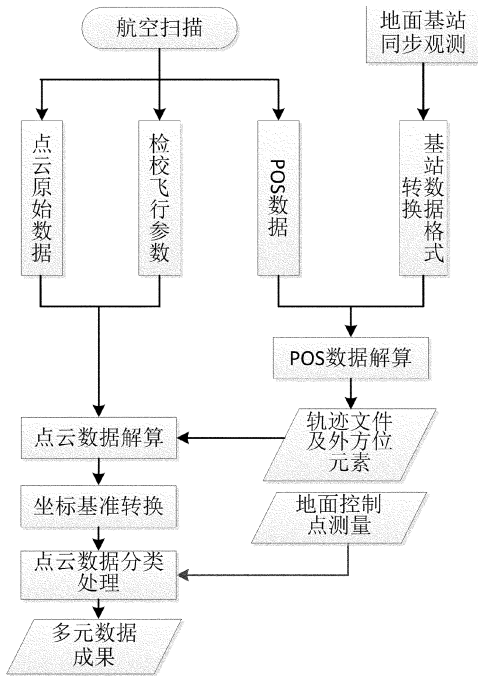


图 1 LiDAR 点云获取与处理技术路线图

## 2 地面控制测量

LiDAR 点云数据平面和高程精度较高,但仍不能满足高速公路改扩建的精度需要。需要通过地面控制点对 LiDAR 点云数据进行平面坐标改正和高程拟合改正,使其达到需要的精度指标。

### 2.1 地面控制点布设

点云数据获取前应在高速公路应急车道均匀交叉布设地面控制点。为充验证不同地面控制点布设方案下点云坐标精度改正的可行性,控制点布设间距为 200 m。考虑到地面控制点易辨识,便于喷涂、测量工作量小等要求,采用了三角靶标进行了地面控制点布设,靶标形状为对三角形,规格尺寸为 1.5 m×1.5 m,距路肩边缘线不小于 50 cm,测量位置为对三角中心点。

### 2.2 地面控制点测量

使用 Trimble 5800 GPS 采用 GPS-RTK 技术获

取地面控制点的平面坐标和大地高,每点均测量 2 次,取其平均值作为最终结果。2 次测量成果平面校差不大于 3 cm,相邻基准站间应联测 1~2 个公共点进行检核,检核点校差平面位置不大于 3 cm。地面控制点高程按照四等水准测量方法及要求采集,水准路线布设成附合水准路线,困难地区布设支线,支线要求采用往返观测。

## 3 数据获取

基于 Bell 206 直升飞机平台,搭载 Optech Orion H300 型号机载 LiDAR 设备开展 LiDAR 点云数据获取工作。

### 3.1 航线敷设

#### 3.1.1 设计要求

航线沿高速路中线分段敷设,考虑到 IMU 累计误差的影响,每段飞行时间不超过 15 min<sup>[10]</sup>。根据高速路弯曲度,每段航线宜分为首尾相接的小段,小段长度为 50~100 m 为宜,小段之间的夹角不宜超过 15°。点云坐标改正程序算法要求每个分段包含的控制点数量不宜少于 4 个,相邻分段重叠 1 km,且公共控制点不少于 1 个。

#### 3.1.2 设计参数

为了准确提取高速路三维信息,点云数据获取原则是在保证点云精度的前提下尽量提高点云密度。点云精度与航高成正比,公式如下:

$$d_{xy} = \frac{1}{\rho} \times H \quad (1)$$

式中: $d_{xy}$ 为点云平面中误差(标称精度); $\rho$ 为比例系数; $H$ 为相对航高。以 Orion H300 型机载 LiDAR 为例, $\rho$ 值为 5 500,航高约 275 m 时,点云平面中误差小于 5 cm,符合技术指标要求。

### 3.2 基站布设

基站 GPS 接收机的性能应与机载 GPS 接收机性能匹配,使用具有带抑径板或抑径圈的 GPS 信号接收天线的高精度测量型双频 GPS 接收机,最小采样间隔不大于 1 s;基站 GPS 接收机沿道路两侧布设,摄区内任意位置与最近基站间的距离不大于 5 km<sup>[10]</sup>;基站设置后,按照 GPS C 级点的要求与周边已有的高等级控制点进行同步观测,精确计算站址三维坐标。

### 3.3 安置角误差的测定

安置角误差是 IMU 系统与激光扫描仪的角度安置差<sup>[10]</sup>,是机载 LiDAR 系统中最大的系统误差,检校飞行的目的是为了求出 LiDAR 与航摄仪的安置角误差,进而联合 POS 数据求出点云脚点位置和相片的外方位元素。安置角误差采用重叠航带法测定。原理是先在重叠航带之间自动提取连接面,并获得连接面的重心坐标,以重心坐标作为不同航带的连接点。然后根据连接面重心坐标之间的差异和激光脚点的观测方程建立误差方程。最后利用最小二乘原理,求解安置角误差的最优估计值<sup>[11]</sup>。检校场选择摄区附近有“人”字型房顶的厂房或居民区,检校飞行方案采用“十”字形对飞,参数与路面点云获取参数相同。

### 3.4 飞行实施

#### 3.4.1 飞行准备

机载 LiDAR 和 GPS 天线安装后,采用全站仪测定 GPS 天线相位中心至 LiDAR 量测参考点的偏心分量,3 次量测误差要求不大于 5 cm 时,取平均值作为最终结果;飞行时,可见卫星数应大于 6 颗,PDOP 因子应小于 3;飞机在进入跑道前,在开阔地区进行少量动态滑行,以便设备初始化,并在 IMU/DGPS 惯导系统开始记录后停止滑行,进行 5 min 的静态 GPS 观测。

#### 3.4.2 飞行要求

为避免 IMU 误差积累,进入测区前,飞机应先平飞 3~5 min,再做“8”字飞行,飞行结束后,应先做“8”字飞行,再平飞 3~5 min<sup>[11]</sup>;在一条航线内航高变化不超过相对航高的 5%~10%,实际航高变化不超过设计航高的 5%~10%,在一条航线内,飞机上升、下降速率不大于 10 m/s。

## 4 数据处理

### 4.1 数据预处理

首先基于 POS 数据与地面基站数据,采用单基站紧密耦合算法求出飞行轨迹线文件,然后对激光测距数据联合轨迹线数据,附加检校数据,进行联合解算,得出 WGS-84 坐标系下的原始点云数据,接着采用布尔沙模型将激光点云由 WGS-84 坐标系转换至工程坐标系,最后按照规定的投影方式和

中央子午线,将其投影至平面坐标系<sup>[12]</sup>。

### 4.2 点云精度改正

前期通过 GPS-RTK 和水准测量方式,精确获取了地点控制点的平面坐标和高程信息,目的是为了使用地点控制点的平面坐标和高程,对预处理后的 LiDAR 点云数据进行精度改正。

#### 4.2.1 平面坐标改正

基于点云强度信息,对布设的地面控制点靶标进行判读,采用分段仿射变换方法对预处理后的点云平面坐标进行改正,校正公式如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

式中: $(X, Y)^T$  为校正后点云平面坐标; $(x_0, y_0)^T$  为校正前点云平面坐标; $a, b, c, d, dx, dy$  为仿射变换参数。

#### 4.2.2 高程拟合改正

采用解析内插法将点云高程的大地高转换至正常高。首先根据控制点的大地高和正常高值,求出控制点处的点云高程异常值,再根据控制点的平面坐标和高程异常值,然后采用三次样条函数,拟合出沿高速公路中线方向的高程异常分布曲线,通过内插的方式求出相应位置的点云高程异常,进而求出点云正常高<sup>[13-14]</sup>。

设每段点云有  $n$  个控制点,高程异常值  $f(x_i)$  和控制点平面坐标  $x_i$  在区间  $[x_i, x_{i+1}]$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ) 上有 3 次样条函数关系:

$$f(x) = f(x_i) + (x - x_i)f(x_i, x_{i+1}) + (x - x_i)(x - x_{i+1})f(x, x_i, x_{i+1}) \quad (3)$$

式中: $x$  为点云平面坐标; $f(x_i, x_{i+1})$  为一阶差商; $f(x, x_i, x_{i+1})$  为二阶差商。

### 4.3 点云分类

经过预处理和坐标转换的点云还存在大量的非地面点,需要经过噪声点滤除、自动分类、人工编辑分类 3 个操作步骤<sup>[12-13, 15]</sup>,对点云数据进行分类处理,得到符合技术要求的 LiDAR 点云数据。

(1) 噪声点滤除。采用高程比较算法去除噪声。将一个或一组点与周边一定范围内的点进行比较,若明显低于或超过一定的阈值,则将该点或该组点判断为噪声点,然后作滤除处理。

(2) 自动分类。即粗分类,采用 Terrasolid 软件,首先使用提取地面点云算法,从较低的激光点中

提取初始地表面;然后基于初始地表面,设置地面坡度阈值进行迭代运算,直至找到合理的地面;接着利用去除高程异常点算法,将导致地形陡升的激光点从地面点云中去除,将导致地形陡降的激光点云数据从其他层中重分类为地面点云,保证获取完整连续的地面;最后基于反射强度、回波次数、地物形状等算法或算法组合,对激光点云数据进行自动分类<sup>[15-17]</sup>。

(3)人工编辑分类。对自动分类后点云参照粗略正射影像进行手动精细分类。主要包括对高程突变的区域调整参数和算法重新进行小面积的精细分类、采用人工编辑的方式对分类错误的点进行重分类<sup>[17]</sup>。

## 5 精度分析与成果应用

### 5.1 精度分析

高速公路改扩建对点云数据的高程精度要求较高,因此该文对使用不同地面控制点布设方案精度改正后的点云数据平面和高程精度都进行对比分析。

#### 5.1.1 平面中误差

在高速路两侧应急车道均匀交叉布设地面控制点 272 个,点间距为 200 m。为了验证地面控制点布设方案经济性和可行性,分别按间距为 400 m~4 km 的 5 种控制点布设方案对点云进行坐标改正,未用于坐标精度改正的控制点用于检核改正后的点云平面坐标。不同控制点布设方案改正后的点云平面中误差及平面粗差率如表 1 所示。

表 1 点云平面中误差及粗差率统计

控制点间距(m)	400	1000	2000	3000	4000
平面中误差(cm)	3.4	4.0	4.1	4.2	5.0
平面粗差率(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

#### 5.1.2 高程中误差

采用 400 m~4 km 的 5 种控制点布设方案对点云数据进行高程拟合改正。为保证高程检测精度,沿高速两侧应急车道采集了 2 062 个高程检测点,点间距为 20 m,用于高程精度检测,拟合后的点云高程中误差如表 2 所示。

由上述分析可见,采用 5 种控制点布设方案进行点云平面改正和高程拟合,均能满足项目设计的要求,考虑到高速公路改扩建对精度的特殊要求及其他一些不确定性因素,地面控制点间距在 2~3 km

时较为经济合理,对于丘陵、山地、高山地等地形区域,由于高程异常变化较大,可适当缩短地面控制点间距。

表 2 点云高程中误差及粗差率统计

控制点间距(m)	400	1000	2000	3000	4000
高程中误差(cm)	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8
高程粗差率(%)	0.5	2.7	2.8	4.3	4.8

### 5.2 成果应用

对机载 LiDAR 获取的高精度、高密度点云数据进行加工处理,形成丰富的多元数据成果,满足高速公路改扩建施工设计的需要。多元数据成果包括:数字高程模型、数字表面模型(DSM)、等高线及高程点成果、实景三维等。

数字高程模型是高速公路设计中最重要数据,是进行高速公路地形分析、坡度分析的基础。利用处理完成的高精度的点云数据,使用 ArcGis、Global Mapper、航天远景、JX4、EPS、Geoway、CASS、TerraSolid 等软件<sup>[18-19]</sup>,可进行高程自动提取及高程注记点提取。利用同一空间基准下的点云数据、数字表面模型(DSM)、数字高程模型和数字正射影像,将这些数据进行叠合处理,可获取公路可量测的实景三维成果数据<sup>[19-20]</sup>,为设计人员提供了直观丰富的数据信息。

构造物工点是高速公路改扩建中重要的测量任务之一,其中桥梁伸缩缝的测量是桥梁设计的基础,精度要求高,施测难度较大。基于机载 LiDAR 数据的点云强度信息,能够精确辨识伸缩缝的位置,提取出桥梁伸缩缝的三维空间信息。

断面数据是实施高速公路改扩建设计重要数据。基于机载 LiDAR 获取的高密度、高精度的点云数据可以任意提取道路断面数据,为高速公路提供精细化、全方位的三维数据基础,帮助设计人员更加准确的计算路基填挖方工程量、道路坡度及改扩建道路拼宽数据。

即有道路的边线是设计人员进行道路曲线设计和中线拟合的关键数据,基于路面高精度 LiDAR 点云数据,根据点云强度信息及路缘石和沥青交界处的高差,采用基于 k-d 树的邻域搜索算法,自动提取道路两侧以及中央隔离带两侧硬路肩边界特征线数据,可为高速公路改扩建设计提供可靠的边线成果。

## 6 结语

结合京藏高速公路改扩建勘察设计工程,论证了直升机机载 LiDAR 在高速公路改扩建中应用技术路线的可行性。形成一套基于直升机机载 LiDAR 测量系统进行高速公路建设工程测量工作的完整、高效、安全的解决方案,可有效减少高速公路新建、改扩建工程测量工作量,显著提升工作效率,尤其是机载 LiDAR 具有非接触测量特点,可大大降低安全隐患,保障了测绘作业人员的人身安全,适于公路、铁路、河流、山川等较为危险、人员不适合进入或难以进入的作业区域,受到了广大业主单位和测绘单位青睐,具有广阔的应用前景和发展潜力。

## 参考文献:

- [1] 高艳珍,黄子航,杨培培.我国高速公路改扩建的必要性分析[J].交通纵横,2009(11):80-82.
- [2] 张金盈,胡小庆,张广庆.机载 LiDAR 点云更新 1:1 万 DEM 关键技术探讨[J].山东国土资源,2014,30(10):66.
- [3] 祝燕.机载 LiDAR 数据在铁路断面测绘中的应用研究[J].铁道勘察,2016(1):29-30.
- [4] 赵云昌,丁莹莹,高照根,等.基于机载 LiDAR 的地貌数据快速更新方案研究[J].山东国土资源,2014,30(12):70-73.
- [5] 杜国庆,史照良,龚越新,等.LiDAR 技术在江苏沿海滩涂测绘中的应用[J].城市勘测,2007:23.
- [6] 黄文元,党建军,黄爱华.我国公路改扩建工程勘测方法对比分

- 析[J].公路,2011(3):84-86.
- [7] 张拥军,刘建明,高照根,等.基于车载点云数据的实景可量测技术研究[J].山东国土资源,2017,33(4):72-75.
- [8] 魏国忠,侯飞,张衡,等.高速公路勘测中车载激光点云高精度校正可行性分析[J].测绘通报,2016(8):20-24.
- [9] 黄华平,李永树.机载激光雷达测量技术在铁路勘测中的应用[J].测绘,2010,33(5):216-218.
- [10] 林先秀.机载 LiDAR 检校场布设及检校技术探讨[J].测绘通报,2014(3):84.
- [11] CH/T8024-2011.机载激光雷达数据获取技术规范[M].北京:测绘出版社,2011:1-20.
- [12] CH/T8023-2011.机载激光雷达数据处理技术规范[M].北京:测绘出版社,2011:1-30.
- [13] CH/T3014-2014.数字表面模型机载激光雷达测量技术规程[M].北京:测绘出版社,2014:1-25.
- [14] 杨颖,朱磊,张省,等.直升机载 LiDAR 测量技术在高速公路改扩建勘测中的应用[J].地理信息世界,2015(5):104-107.
- [15] 张伟伟,高长成.利用机载 LiDAR 点云数据制作高精度 DEM 及 DSM 的方法[J].地矿测绘,2017(3):35-37.
- [16] 王铁军,陈云,袁如金.基于 LiDAR 数据的 DEM 和矢量自动提取探讨[J].测绘与空间地理信息,2009(1):29-31.
- [17] 徐晓臣,谢津平.机载激光雷达技术在乌龙山抽水蓄能电站工程测量中的应用[J].水利水电技术,2017(10):139.
- [18] 宋新龙,田耀永,吕宝奇.LiDAR 全地貌曲线与 DLG 自动融合研究[J].城市勘测,2012(1):52.
- [19] 曹殿才,秦德风,李慧杰.采用趋势面 LiDAR 点云数据等高线生成方法[J].测绘与空间地理信息,2016(12):26-30.
- [20] 徐贤青.基于 LiDAR 技术的快速三维漫游实现[J].黑龙江科技信息,2014(13):98-99.

## Study on Feasibility for Application in Freeway Reconstruction and Extension Surveying by Using High-accuracy Helicopter LiDAR

ZHENG Wei'an

(Shandong Mapping and Surveying Institute of Land and Resources, Shandong Jinan 250102, China)

**Abstract:** Airborne LiDAR has been widely used in highway survey. In this paper, the feasibility of the application of the helicopter LiDAR in the reconstruction and extension of the highway has been studied. Ground control measurement, point cloud data acquisition, point cloud data processing and the application of results have been introduced. By analyzing the accuracy of point cloud data under the correction of 5 different ground control points, the LiDAR point cloud data have been analyzed, and the ground control has been demonstrated. Feasibility of plane point and elevation correction for airborne LiDAR point cloud data based on system points have been verified.

**Key words:** Helicopter LiDAR; exploration of reconstruction and extension of highway; ground control points; precision correction