

工程测绘中激光雷达测绘技术运用分析

文 / 陆东义 广州湾区规划勘测设计院有限公司

摘要：本文针对工程测绘中激光雷达测绘技术的运用展开深入探讨，采用案例分析法，结合实际工程测绘情况以及激光雷达技术在测绘中的表现，从激光雷达测绘技术与工程精度的关系入手，进一步分析了影响测绘效果的主要因素。重点论述了基于激光雷达技术的测绘策略及其实际应用方法，包括激光雷达选型、现场数据采集、点云数据处理、测量误差校验、三维模型建立等，并通过实例验证，证明了本文提出的激光雷达测绘技术的有效性以及可行性。此次研究结果不仅能够为实际工程测绘提供实践指导，同时也能够为相关测绘技术和设备的开发和设计提供参考。

关键词：工程测绘；激光雷达；测绘技术；运用分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.116

引言

工程测绘中应用激光雷达测绘技术是提升测绘精度的重要方法，是现代工程测量的中坚力量，更是实现精准工程设计的主阵地。在加速推进工程技术现代化的新时期，激光雷达测绘技术应当承担起提高数据准确性、的使命，以创新引领技术发展，不断提升测绘能力。本文将从激光雷达选型、现场数据采集、点云数据处理、测量误差校验、三维模型建立五个方面，探讨推动激光雷达测绘技术在工程测绘领域高质量应用的路径。

一、工程概况

本项目为现代化办公楼建设项目，整体建筑设计主要包括5栋办公楼，建筑高度为5至10层不等。项目用地面积约2.32万m²，总建筑面积5.69万m²。各楼均配备地下室，地下室底板厚0.4m，标高0.3m，地下室面积1.37万m²。主体结构设计中采用0.15m厚垫层，承台深度在1.2-1.7m之间。为保证工程精度与质量，施工测量阶段引入激光雷达技术，用于建筑定位、控制测量等。

二、工程测绘中激光雷达测绘技术运用

(一) 激光雷达选型

该项目在实施激光雷达测绘前，根据工程实际情况制定了具体测绘方案，包括测量目标、作业区域、精度要求等参数。基于基础要素，合理设定仪器参数配置，包括扫描速率、角度范围、测距能力等技术指标。对于面积超过1000m²的大型区域，应优先考虑高速率、远距离的设备配置；在小规模区域作业时，需测量精度作为设备选型的主要参考标准。通过实地考察与多方案对比研究，该项目选取了GEMINI型机载激光雷达系统应用于工程建设项目，该设备采用对线式扫描技术，运行频段为33-167kHz，测绘时按照Z字型航线轨迹完成数据采集工作。

设空间中存在方向矢量v，矢量S沿该方向延伸。矢量S的起始端点A具有空间坐标(X₁, Y₁, Z₁)，终点P的位置可通过实测数据推导。通过激光测距系统获取的距离值d等同于矢量S的模长L，据式(1)-(3)可确定终点P的空间坐标(X₂, Y₂, Z₂)：

$$X_2 = X_1 + d \cos(\alpha) \cos(\beta) \quad (1)$$

$$Y_2 = Y_1 + d \cos(\alpha) \sin(\beta) \quad (2)$$

$$Z_2 = Z_1 + d \sin(\alpha) \quad (3)$$

式(1)-(3)中，α表示矢量S与水平面的夹角，β表示矢量S在水平平面上的投影与X轴形成的夹角，d表示S矢量模长的测距值，参数均由激光扫描仪的传感装置与GPS系统获取，实际测绘作业需根据环境特征调整仪器的姿态。

实际测绘过程中，将激光扫描系统与GPS定位技术联合应用，由于扫描角度与测距存在误差，该项目采用的机载激光设备能够实现动态姿态校准，优化测量轴向精度，保证数据采集质量。实施参数方面，激光发射频率采用50kHz，点云采样间隔为2m，影像地面解析度22cm。在确定激光雷达系统配置后，制定了针对性的测绘实施方案，采用3架次无人机搭载激光雷达设备展开作业，将目标区域划分为4个测区，规划了61条航线轨迹，最大限度保障测绘数据的全面性。

(二) 现场数据采集

该项目的核心测绘工作是建筑关键点位的定位、确定施工参数。采用地基激光扫描系统结合倾斜影像采集方案，实现了从微观到宏观的全方位数据获取。该方法能够保证测绘成果的精密性，提升了空间信息的完整性。通施工现场建立统一的空间坐标系统和规范化的测量标准，使获取的数据能够切实应用于工程建设。在该项目开展建筑工程激光雷达测绘前，依据测绘精确度标准设置测控点，确定了三维空间坐标，构建现场测量控制网络，激光雷达扫描数据采集过程中，基于工程测控网络规划现场考察路线制定测绘方案，对现场管控状况与测绘视线可达性进行核验，重点确认激光雷达扫描点位准确性。在施工现场内配置测量导线后，启动激光雷达采集实时数据，所获信息直接传输至工程管控中枢进行分析，最终形成专业测绘成果报告。

该项目的激光雷达可设置两种扫描模式：重复扫描(FOV：水平70°，垂直3°)，非重复扫描(FOV：水平70°，垂直75°)。飞行参数设置中，规划航线手动

绘制或导入 kml；选择对应的机型、相机型号；进行负载设置，回波模式需要根据扫描场景进行选择，建议选择五回波，回波数少会导致点云稀疏；扫描模式设置为非重复扫描；正射 GSD 是 rgb 影像的分辨率，点云密度是理论上获取的点云密度，真实的点云密度还受到扫描场景以及环境的影响。打开惯导标定，高级设置中点云重叠率默认为 20%，可适当调高。重叠率要根据精度需求设定，非重复扫描模式设置在 40%~60%，其他参数默认。为保证激光雷达测绘在工程测量中的应用效果，该项目将航向与旁向的扫描重叠率均设定为 85%，最优相对航高应按式 (4) 计算：

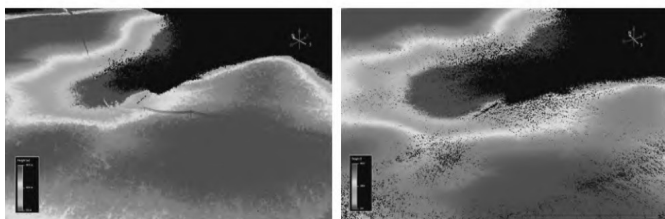
$$\frac{H}{f} = \frac{GSD}{\alpha} \quad (4)$$

式 (4) 中，H 表示相对航高 (m)，GSD 表示地面分辨率，f 表示摄影机焦距，p 表示像元尺寸。

(三) 点云数据处理

该项目的点云数据是通过激光雷达采集的大量空间点的集合，每个点都包含三维坐标 (X, Y, Z)、颜色、反射强度等信息，能够真实还原目标物体的三维形态，经激光雷达采集后的原始点云数据被存放在了数据包里 (pcap)，原始点云数据的接收主要是通过 UDP (用户数据报协议) 的形式向网络发送数据，每帧的数据长度固定为 1248 字节，字节包括前 42 字节的前数据包标识、12 组数据包、4 字节时间戳和最后两字节雷达型号参数，随后对点云数据进行降噪、拼接处理。

该项目感知层面的流程中，点云数据主要是用于 3D 目标检测，即系统需要识别检测出感知区域内的障碍物，采取避障等措施。数据预处理去噪中，去除扫描过程中产生的噪声点 (如飞点、离群点)；配准将多站扫描数据统一到同一坐标系下，采用了 ICP (迭代最近点) 算法；滤波分离地面点与非地面点，提取目标物体点云。利用机器学习算法对点云进行分类 (如建筑物、植被、道路)，对分类结果进行人工修正，将点云数据按目标物体分割，便于后续建模。地面数据提取是点云数据处理的关键环节，该过程通过分割算法、平面拟合技术、插值方法，将地表点云从非地表数据中分离，为构建 DTM、DEM、地形分析模型提供数据，保证了地形特征的准确表达 (如图 1 所示) [1]。



(a) 分类前效果 (b) 分类后效果

图 1 点云自动分类前后效果

将自动分类好的地面点建模 (DEM)，观察模型进行人工干预。如果出现不合理的三角网，将未分离出的点进行手动分至地面点，直到无不合理的三角格网出现。可对高程突变的区域，调整参数或算法，重新进行小面积的自动分类。在精分类后的地面点模型上，分离出等高线关键点，利用软件自动生成等高线，可设置最小面积、光滑以及等高距等参数，将小的自行圈将以去除，生成项目所需比例尺的等高线。将等高线导出后，再将模型关键点导出成 ENZ 格式，利用 CASS 软件编辑等高线及高程点，即完成地形图的高程要素采集。利用正射影像 (DOM) 结合地面点模型 (DEM)，绘制地物要素：管线、水系、房子、道路、坎、地类界等。植被种类的填充可结合影像与点云的断面图，通过树高、形态等，判断树的大致种类，结合外业调绘成果完成地形图 (DLG) 的制作。

(四) 测量误差校验

在该项目中，激光雷达扫描数据会受环境和设备的影响，导致测绘数据在俯仰向上出现偏差，对完成的激光雷达数据进行了俯仰误差评估。该技术发射与接收激光信号获取目标区域的空间信息，但测量精度易受仪器性能和外部条件影响，产生垂直方向的测量误差。根据该项目的实践分析表明，俯仰偏差主要发生在航线垂直投影区域。当倾角为 0 时，激光角点导航路线保持稳定无偏移特性。为规避俯仰误差，应在航线正投影处设定目标点，使航线与目标点夹角保持 90°。在该项目中测算校正俯仰误差应按式 (5) 计算：

$$\Delta p_{\text{俯仰}} = \arctan(D/2H) \quad (5)$$

式 (5) 中，D 表示航线目标间距，H 表示实际飞行高度。

在该项目的测量中，激光雷达扫描作业易受多种不确定因素干扰，导致横滚误差产生。该误差会直接影响工程测绘结果的精确性，为确保测量品质，该项目采取了系统性校验措施，全方位标定测量仪器，通过标准参考体系量化横滚误差参数，依据定量分析结果进行针对性优化，提升了测绘数据的准确度。在实际操作中，先对工程外部关键控制节点展开了系统测量，与标准坐标数据进行比对分析，计算出工程的实际误差值。基于该项目现场具体状况，实施多种测量与反复校验方法，控制了横滚误差产生，针对可能引发横滚误差的各类因素实施了针对性优化。在激光雷达测绘作业中，要科学规划飞行路线、分析双向扫描数据。针对该项目的规则建筑区域，依据建筑朝向设置航线，并将激光扫描角设为 4° 进行数据采集，评估扫描偏差验证点云密度，往返扫描数据的偏离值应按式 (6) 计算：

$$\Delta p_{\text{横滚}} = \arctan(D_1 + D_2/2H) \quad (6)$$

式 (6) 中，D₁ 表示航线 1 的目标间距，D₂ 表示航线 2 的目标间距，H 表示实际飞行高度。在该项目激光扫描测绘过程中，距离测定误差也是亟待攻克的关键技术难点。从细致角度分析，该误差主要体现为规律性系统误

差特征，将系统性测距误差用 Δd 表示，可建立相应数学模型式(7)：

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \Delta P_{测距} \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin\theta_i \\ \cos\theta_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中， e_x 、 e_y 、 e_z 表示三维空间各轴向的位置参数， θ_i 表示激光雷达扫描作业时的瞬时角度。研究表明，在实际工程应用中，测距误差主要对高程方向造成影响，对飞行器(无人机)的水平运动轨迹影响较小。通过实测分析，在10cm测距精度条件下的误差分布如表1所示^[2]。

表1 10厘米测距条件下的e误差

角度 (θ_i)	e_x	e_y	e_z
15°	0	0.025	0.096
0°	0	0	0.100
-15°	0	0.025	0.096

(五) 三维模型建立

该项目中经初始化处理的三维点云数据进行了区域分解，采用了区域生长法结合平面识别技术的分割策略，分析空间点之间的几何特征和属性关联性实现聚类，提取如地表、建筑立面等平面构件，复合算法保证了点群划分准确，通过实验验证，该方法能将原始点云切分为多个独立、具有实际意义的子集。基于点云数据的三维表面重构技术，采用Poisson重建方法通过数学方程求解，实现了从离散点到连续曲面的转换^[3]。该方法在处理复杂地貌时优势较大，适用于山地和河谷等地形的建模。通过构建偏微分方程组并进行数值计算，能够生成高精度的3D曲面模型，保持了地形细节的真实性，又能保证表面的光滑连续性。

该项目的三维建模过程中，进行了纹理贴图技术处理。该技术将高分辨率摄像设备采集的真实场景图像映射至3D模型表面，提升了可视化效果的真实感。系统将采集的图像数据与空间模型配准，借助UV坐标实现色彩信息的映射，使工程场景(如道路表面、桥体构件、隧道内衬等)的细节特征能够逼真呈现^[4]。为了实现不同扫描获取模型融合，该项目采用了ICP迭代最近点算法进行配准处理，先通过人工选取特征控制点完成粗配准，随后利用迭代优化原理，最小化点云间距离偏差实现精确对齐，采用分步配准策略保证了点云拼接的准确度，满足了工程测绘的精度要求。

该项目将整理后的点云资料导入到了3D建模环境中，依据现场区域特征进行合理划分。该项目主题为5座办公楼的独立造型构建，故建模时通过逐一完成各建筑单元的精细化建模，随后融入整体场景，形成初步的

综合模型。在此基础上，借助点云数据对模型精度较低处实施优化调整，重点完成管线连接、表面质感等细部处理工作^[5]。最后对建模成果进行检验，将模型文件与配套贴图统一归档，完成坐标核实等验证工作。

(六) 测绘结果分析

在该项目中，采用搭载激光雷达系统的无人机对目标工程进行测绘。测区划分为4个子区域，通过设计61条航线完成3次飞行任务，运用激光扫描技术，成功获取了工程现场的空间数据，对其高程与平面精度进行了量化分析，具体参数如表2所示。

表2 建筑工程项目的高程、平面精度

指标	裸露硬质地形高程精度 (m)	一般地形高程精度 (m)	平面精度 (m)
检查点数	220	938	24
误差均值	+0.056	-0.013	0.451
中误差	0.068	0.321	0.065
标准偏差	0.068	0.330	0.268

对比该项目的测量数据与工程设计标准，平面位置允许误差为0.06m，高程允许误差为0.66m，表明该项目的工程测绘精度完全达到规范要求，证实了激光雷达技术在建筑测绘领域的应用优势。

结语

本文针对工程测绘中激光雷达测绘技术的运用展开探讨，以实际工程测绘项目为例进行分析，在明确激光雷达技术对提升测绘精度和效率的重要性后，进一步分析了在测绘过程中存在的主要问题。在此基础上，通过对高精度激光雷达设备的应用、优化复杂环境下的数据采集方法、采用先进的数据处理技术等构建了相应的测绘技术体系，证明了基于激光雷达技术的测绘方案有效性。最后，通过实例验证，证明了本文提出的激光雷达测绘技术能够优化工程测绘项目的准确性，切实提高了测绘工作的效率。基于上述分析，本文撰写取得了良好的研究成果，具有指导实际工程测绘的作用。

参考文献

- [1] 唐毅. 激光雷达测绘技术在矿山工程测绘中的有效运用探究[J]. 世界有色金属, 2024, (18): 172-174.
- [2] 李钦. 建筑工程测绘中的激光雷达测绘技术[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (06): 181-183.
- [3] 张军伟, 闫宏昌. 激光雷达测绘技术在工程测绘中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2024, (10): 12-15.
- [4] 杨磊. 激光雷达测绘技术在矿山工程测绘中的应用研究[J]. 世界有色金属, 2023, (22): 38-40.
- [5] 王培臣. 基于卫星导航和激光雷达融合的工程测绘应用[J]. 中国宽带, 2023, 19(06): 57-59.