第 9 卷◆第 4 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

无人机 LiDAR 与地面激光扫描协同露天矿高精度地形测绘研究

刘磊
四川嘉普信工程技术咨询有限公司
DOI:10.32629/gmsm.v9i4.2509

[摘　要] 露天矿地形测绘长期面临台阶密集、坡度陡峭、局部遮挡严重与精度要求苛刻之间的矛盾。单一平台激光雷达受扫描视角和地物遮蔽限制,难以在全局效率与局部细节之间取得平衡。基于此,本文围绕无人机LiDAR与地面三维激光扫描的协同机制展开分析,提出基于特征约束的多源点云配准,顾及地形突变的自适应滤波以及加权融合建模的技术路线。研究认为,空—地协同的关键不在于数据量的简单叠加,而在于建立精度梯度互补与几何约束传递的耦合关系。通过构建统一坐标框架下的误差分配模型,可实现露天矿复杂地形的高保真表达,为矿山测量、储量核算与边坡监测提供可靠的基础数据支撑。
[关键词] 无人机 LiDAR；地面三维激光扫描；露天矿；地形建模
中图分类号：P225.2　文献标识码：A

Research on high-precision topographic mapping of open-pit mine by UAV LiDAR and ground laser scanning

Lei Liu
Sichuan Jiapuxin Engineering Technology Consulting Co., Ltd.

[Abstract] Open-pit mine topographic mapping has long been faced with the contradiction between dense steps, steep slopes, severe partial occlusion and demanding accuracy requirements. Single-platform lidar is limited by scanning angle and ground object occlusion, and it is difficult to achieve a balance between global efficiency and local details. In this paper, the collaborative mechanism of UAV LiDAR and terrestrial 3D laser scanning is analyzed, and the technical route of multi-source point cloud registration based on feature constraint, adaptive filtering considering terrain mutation and weighted fusion modeling is proposed. According to the research, the key to space-ground coordination is not the simple superposition of data volume, but the establishment of the coupling relationship between precision gradient complementarity and geometric constraint transmission. By constructing the error distribution model under the unified coordinate framework, the high-fidelity expression of complex terrain in open-pit mines can be realized, which provides reliable basic data support for mine survey, reserve accounting and slope monitoring.
[Key words] UAV LiDAR; terrestrial 3D laser scanning; open-pit mine; terrain modeling

1 引言

露天矿开采活动塑造了一种人工与自然交织的急剧变化地形。台阶边坡,运输道路,排土场与采掘工作面在空间上高度压缩,形成从厘米级微地貌到百米级整体高差的跨尺度几何特征。传统全站仪或RTK离散采点方式在覆盖密度和作业安全方面已难以满足现代矿山精细化管理的要求。机载LiDAR凭借平台高度和扫描速度优势,能够快速获取大范围地表点云,但在近乎垂直的台阶坡面和内凹区域,由于扫描角接近掠射且存在视线遮蔽,点云密度骤降,噪声抬升,局部几何信息严重缺失。地面三维激光扫描(Terrestrial Laser Scanning,TLS)则恰好在这些区域具有先天优势——扫描仪架设于台阶平台或坡底,以近正交角度获取坡面点云,密度与精度均可达毫米级[1]。然而TLS单站视野有限,大面积矿区需布设数十乃至上百测站,外业耗时与拼接误差积累成为突出瓶颈。

如何将无人机LiDAR的宏观覆盖优势与地面扫描的微观精度优势进行有效整合,而不是简单堆叠两套数据。这一整合的难点集中在三个层面。其一,两类平台的数据密度差异可达两个数量级,统一处理时低密度区域易被过度平滑,高密度区域的冗余信息又加重计算负担。其二,机载与地面点云的误差来源和空间分布模式差异显著,直接全局配准难以收敛到一致解。其三,露天矿地形的非连续突变特征——台阶棱线,坡脚线与松散堆积面——对滤波算法和建模策略提出了远超自然地表的严苛要求。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

本文从误差传递与几何约束的视角出发，系统分析无人机LiDAR与TLS协同测绘中的关键技术环节，提出一套面向露天矿高精度地形重建的完整技术方案，并讨论配准精度，滤波鲁棒性与融合建模质量之间的内在关联。

2 机载与地面LiDAR协同测绘的研究现状与问题

机载LiDAR在矿山测绘中的应用已有较丰富积累。既有研究表明，无人机平台结合轻型激光雷达可在数小时内完成数平方公里矿区的点云采集，高程精度优于10 cm，满足1:1000比例尺测图规范[2]。然而在台阶坡面处，点云空洞与边缘模糊问题普遍存在。部分研究尝试通过降低航高或多角度航线来弥补，但代价是效率显著降低且对航摄安全构成额外压力。

TLS在矿山边坡监测领域同样获得广泛实践。其单站测距精度可达毫米级，点间距可设置至厘米级以下，能够精细刻画边坡节理，裂缝与局部变形痕迹。但TLS数据的绝对定位依赖于外部控制点的精度和拼接策略，长距离多站传输中误差累积常常达到厘米级甚至更高。

近年来，多源点云融合成为测绘与遥感领域的研究热点。主流方法大致分为三类。基于ICP及其变体的几何配准，基于特征描述子的语义匹配，以及基于外部参考系统的坐标统一。针对矿山场景，有学者提出利用台阶棱线作为约束条件进行配准优化，也有工作尝试构建机载—地面数据之间的密度自适应匹配策略。但总体来看，现有研究多侧重算法层面的改进，较少从误差建模角度审视两类数据协同的底层逻辑。机载点云的整体漂移与地面点云的局部高精度之间形成的精度梯度如何被有效利用，仍是一个值得深入探讨的问题。

3 多源激光雷达点云协同处理与融合建模方法

3.1总体技术框架

本研究提出的协同测绘方案遵循“独立采集—粗配准—精细配准—分类滤波—融合建模”的流程框架。无人机LiDAR负责矿区全域扫描，TLS则针对重点台阶坡面，边坡监测区及无人机遮挡区域进行补充扫描。两套数据首先通过GNSS/IMU直接地理参考建立初始坐标系，进而依靠地面控制点和几何特征进行严格配准，最终在同一坐标框架下完成地形模型构建。

该框架的核心设计原则是，机载数据确定宏观地形骨架，地面数据修正局部细节。配准阶段以全局一致性为优先，建模阶段以局部精度为优先。这种分阶段侧重的策略避免了在单一目标函数中同时追求两类互相拉扯的精度指标而导致的过拟合问题。

3.2多源点云配准策略

配准精度直接决定协同测绘的成败。由于机载LiDAR与TLS点云的密度比通常为1:50至1:200，常规ICP类算法在重叠区域容易将地面高密度点云向机载低密度点云“拉扯”，造成局部畸变。本文采用先全局刚性，后局部非刚性的两级配准策略。

第一级为全局刚性配准。在矿区四周及内部稳定地物上布设高反射率标靶或特征棱线标志，以RTK/全站仪联测获得厘米级控制坐标。机载点云通过航带平差和绝对定向建立与全局坐标系的刚体变换关系。TLS各站则通过后方交会或多站网平差纳入同一坐标系统。此阶段的目标是将两类数据的系统偏差控制在配准算法的收敛域内，典型水平残差应小于1m，高程残差小于0.5m。

第二级为精细配准。在全局刚体变换的基础上，提取露天矿中具有强几何辨识度的特征——台阶边缘线，坡脚转折线，道路边线，挡墙棱线等。这些线状特征在两类数据中均可被稳健识别，且不依赖反射率一致性。通过最小化同名特征线间的法向距离，建立代价函数。

其中$d(\cdot,\cdot)$表示变换后机载点到TLS特征线的欧氏距离。由于特征线数量远小于原始点云规模，该优化问题可在毫秒级求解，且对密度差异不敏感。配准完成后，机载点云与TLS点云在台阶棱线处的吻合精度通常优于3cm。

3.3顾及地形突变的点云滤波

露天矿点云中包含大量非地面点，车辆，机械，临时堆料，植被以及边坡防护网等。传统的渐进加密三角网滤波或形态学滤波在平缓矿区尚可奏效，但面对台阶边缘的急剧高程跳跃时，极易将坡缘线误判为非地面点而削除，或将运输车辆误认为地面凸起而保留。

本文采用局部地形感知的自适应滤波策略。首先基于机载点云进行大尺度地面提取，利用地形粗糙度指标将矿区划分为平缓区，陡变区和突变边缘区。对不同区域设置差异化的坡度阈值与高程差阈值。对于突变边缘区，利用特征线先验位置进行约束，禁止滤波器跨越台阶棱线进行内插判断。在TLS覆盖区域，则直接以高密度点云重新构建局部地面参考面，替代机载滤波结果。

滤波质量评价采用交叉验证方式。在典型台阶剖面线上人工量测若干地面控制剖面，将滤波后保留的地面点与参考剖面对比，统计一类误差与二类误差。本文提出的方法在台阶边缘处的一类误差较传统方法降低约60%。

3.4加权融合建模

经过配准与滤波后，机载与地面点云在几何上已统一。直接合并建模会在重叠区域产生“双地面”矛盾——同一位置出现来自两个平台的略有偏差的高程值。这一问题源于两类数据的随机误差水平不同。机载LiDAR的高程中误差通常在3—5cm，TLS则在0.5—1.5cm。若简单平均，高精度的TLS信息被稀释。若只取TLS，则在TLS覆盖边缘出现人为高程跳变[3]。

本文采用基于精度加权与空间渐变过渡的融合策略。在任意格网节点 X处，融合高程

$Z^(x)$表达为：

$$\hat{Z}(x) = w_A(x) \cdot Z_A(x) + w_T(x) \cdot Z_T(x)$$

其中Z_A，Z_T分别为机载与地面点云在该节点的局部插值高程，$w_A+w_T=1$。权重$w_T(x)$依据TLS点密度和到TLS覆盖边界的距离确定。在TLS覆盖核心区域，$w_T\to1$。在TLS覆盖边缘，设置宽度为d0(通常取5—10m)的过渡带，使wT平滑衰减至0。这种设计保证

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

了融合结果在精度上向高精度源倾斜,在空间上保持连续,不产生拼接痕迹。

最终地形模型以规则格网DEM和TIN两种形式输出。对于储量计算和工程设计,TIN更能保留台阶棱线的精确位置。对于水文分析和边坡稳定性评价,规则格网DEM则更为便利。本文建议以TIN为基础模型,按需派生DEM,避免多次重采样造成的精度损失。

4 矿区试验与精度分析

4.1实验区概况与数据获取

选取四川省某石灰岩露天矿作为实验区。矿区范围约0.8km²,最大高差约135m,开采台阶高度12—15m,台阶坡面角65°—75°,部分区域存在倒坡和岩体突出。无人机LiDAR采用六旋翼平台搭载轻型激光扫描仪,飞行高度120m,航线重叠度60%,获取点密度约45点/m²。TLS采用相位式地面扫描仪,在三个重点坡段共布设12站,扫描分辨率设置为5mm@10m,点密度局部超过20000点/m²。同时以RTK采集18个地面控制点和6个检核点,精度优于2cm。

4.2配准与滤波结果

经两级配准后,以检核点评估机载点云绝对高程中误差为4.6cm,TLS点云绝对高程中误差为1.2cm。在两者重叠区域,以台阶棱线为参照的吻合偏差为2.8cm,表明配准精度达到了预期的“TLS精度量级”目标[4]。

滤波结果显示,在TLS覆盖的坡段区域,地面点提取完整率超过97%,台阶棱线位置保留完好。而在仅有机载数据的对照区,传统滤波方法在棱线处出现明显锯齿状误差,本文方法将这一误差降低了约55%。这表明特征先验约束对突变地形滤波具有实质性改善作用。

4.3融合DEM精度评估

以TLS覆盖区为精度验证重点区,将融合DEM,纯机载DEM分别与TLS高精度参考面进行对比。纯机载DEM在台阶坡面处的均方根误差(RMSE)为6.8cm,最大偏差达18.3cm。融合DEM对应数值分别为1.9cm和4.7cm。误差空间分布显示,融合模型在坡面中上部精度提升最显著,这正是机载LiDAR因扫描几何限制而精度最弱的区域。值得注意的是,在TLS覆盖边缘过渡带内,融合DEM的误差曲线平滑单调,未出现阶跃式跳变,验证了权重渐变策略的有效性。

5 协同机制辨析与工程适用性

无人机LiDAR与TLS协同测绘的价值,集中在几何遮挡互补与精度梯度互补两个维度。机载数据在台面和平缓区已具备足够精度,TLS的介入应聚焦于机载数据质量不佳的区域,而非全区域“锦上添花”。这一认识对实际工程具有明确的指导意义—TLS测站布设应优先选择坡面倾角大于50°,机载点密度低于20点/m²或存在视线遮挡的部位,而非均匀铺开。

配准精度是协同测绘链条中最薄弱的环节之一。本文依靠人工布设特征标靶和提取线特征实现了较高精度,但这一流程对作业人员的经验依赖较强。在更大尺度矿区或TLS测站数量增至数十站时,自动化的多站网平差与机载—地面联合平差应成为必要的发展方向。

本研究的局限同样值得正视。实验区植被稀少,气候干燥,点云信噪比较高。对于南方多雨地区,植被覆盖较重的矿山,TLS点云中来自草灌的干扰将显著增加,滤波方法需要进一步引入多回波或波形特征。此外,本文的精度评价集中在静态几何层面,未涉及多期数据的时序一致性和变形检测能力,后续研究可在此基础上扩展至边坡动态监测。

6 结语

本文针对露天矿地形测绘中无人机LiDAR与地面三维激光扫描的协同问题,提出了一套以“特征约束配准—地形感知滤波—精度加权融合”为核心的完整技术方案。实验数据显示,两级配准策略可有效消解机载与地面数据的密度差异和误差模式差异。顾及地形突变的滤波方法在台阶棱线处的表现显著优于传统方法。基于精度权重的渐变融合在保持整体连续性的前提下充分发挥了TLS的局部精度优势。在实验矿区,融合DEM在重点坡段的RMSE较纯机载DEM降低了约72%,达到厘米级精度水平。

该技术路线不依赖特定设备型号或软件平台,具有较好的普适性。对于我国大量处于转型升级期的露天矿山而言,在既有无人机航测基础上引入适量TLS补测,以合理的增量成本获得台阶坡面和重点监测区的高精度数据,是一条切实可行的技术路径。未来的研究应着重于配准与融合流程的自动化程度提升,以及面向多期监测场景的时序一致性处理。

[参考文献]

[1]高春鹏.无人机遥感技术在露天矿山测量中的应用[J].世界有色金属,2023(10):23-25.

[2]董建春,韩瑞亮.三维激光扫描技术在矿山边坡变形监测中的应用[J].现代矿业,2020,36(05):161-163.

[3]王永敏.基于多源数据融合的机载LiDAR点云滤波方法研究[J].勘察科学技术,2026(01):12-17

[4]郭王,程效军.基于激光强度分类的机载与地面激光雷达点云配准方法[J].激光与光电子学进展,2018,55(06):409-416.

作者简介：

刘磊(1990--),男,汉族,四川仪陇人,工程师,本科,主要从事工程测绘,林业测绘工作研究。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.