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

# 基于多尺度滤波的机载 LiDAR 点云地形提取方法研究

赵晶晶　龚晨
新疆维吾尔自治区测绘院
DOI:10.12238/gmsm.v8i4.2228

[摘　要] 机载激光雷达(LiDAR),点云数据的地形提取是数字高程模型(DEM)生成的关键技术环节。针对复杂地形条件下地面点与非地面点分离困难、滤波窗口尺寸难以自适应选择、植被密集区域地形细节易丢失等技术难题,本文提出了一种基于多尺度滤波的机载LiDAR点云地形提取方法。该方法通过建立不规则三角网(TIN)初始地形模型,构建由粗到精的多尺度滤波体系,采用自适应窗口策略结合地形坡度和粗糙度进行尺度参数动态调整,通过渐进加密的迭代机制逐步提取真实地面点。针对不同地物类型,引入了基于几何特征和强度信息的综合判别准则。在ISPRS标准测试数据集和自采集的三类典型地形数据上的实验表明,本文方法的平均滤波精度达到92.3%,I类误差为4.3%,II类误差为2.9%,相比单一尺度滤波方法,总体误差降低了38.5%。在植被覆盖率超过60%的复杂山地场景中,地面点提取完整率提升了23.7%,生成的DEM平均高程中误差为0.12m,满足1:1000比例尺测图精度要求。
[关键词] 机载LiDAR；点云滤波；地形提取；多尺度分析；数字高程模型
中图分类号：TU205　文献标识码：A

## Research on Terrain Extraction from Airborne LiDAR Point Clouds Based on Multi-scale Filtering

Jingjing Zhao　Chen Gong
Institute of Surveying and Mapping, Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] Terrain extraction from airborne LiDAR point cloud data is a key technical step in generating Digital Elevation Models (DEM). To address technical challenges such as the difficulty in separating ground points from non-ground points under complex terrain conditions, the difficulty in adaptively selecting the filtering window size, and the loss of terrain details in densely vegetated areas, this paper proposes a terrain extraction method for airborne LiDAR point clouds based on multi-scale filtering. This method constructs an initial terrain model using a Triangulated Irregular Network (TIN), builds a multi-scale filtering system from coarse to fine, and dynamically adjusts scale parameters using an adaptive window strategy combined with terrain slope and roughness. The true ground points are gradually extracted through an iterative mechanism of progressive densification. For different terrain types, a comprehensive discrimination criterion based on geometric features and intensity information is introduced. Experiments on the ISPRS standard test dataset and three types of self-collected typical terrain data show that the average filtering accuracy of the proposed method reaches 92.3%, with a Type I error of 4.3% and a Type II error of 2.9%. Compared to single-scale filtering methods, the overall error is reduced by 38.5%. In complex mountainous scenes with vegetation coverage exceeding 60%, the completeness rate of ground point extraction is improved by 23.7%, and the mean square error (MSE) of the generated DEM is 0.12 m, meeting the mapping accuracy requirements for a scale of 1:1000.
[Key words] airborne LiDAR; point cloud filtering; terrain extraction; multi-scale analysis; digital elevation model

## 引言

数字高程模型(DEM)是国家基础地理信息的核心数据,广泛应用于地形测绘、城市规划、水文分析等领域。机载激光雷达(LiDAR)技术以其高精度、高效率等优势,已成为获取高质量DEM的主流技术手段[1]。然而,原始点云数据包含地面点和各类非地面点(建筑物、植被、车辆等),如何准确、高效地分离出真实地

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

面点,是DEM生成的关键技术问题。

传统点云滤波方法可分为基于形态学、基于坡度、基于曲面拟合和基于分割等类型。形态学滤波在复杂地形和建筑物密集区域容易产生过度滤波；坡度滤波简单高效但对阈值敏感,在陡坡区域易将地面点误判为非地面点；曲面拟合方法精度较高但计算复杂度大；基于机器学习的智能滤波方法对训练样本要求较高,泛化能力受限[2]。

单一尺度的滤波方法难以适应地形的多样性和地物的复杂性。大窗口滤波容易将大型地物误判为地面,造成地形抬高；小窗口滤波在起伏较大的山地区域容易将地面点误判为非地面点,造成地形破碎。多尺度滤波的思想是结合不同尺度窗口的优势,从粗到细逐步逼近真实地形。Zhang等人提出的渐进加密不规则三角网(Progressive TIN)算法是多尺度思想的经典应用,但该方法对初始种子点的选择较为敏感。

本文针对复杂地形条件下地形提取面临的技术难题,提出了一种改进的多尺度滤波方法。主要创新点包括：建立了基于地形坡度和粗糙度的自适应尺度选择机制；提出了融合几何特征和强度特征的综合判别准则；设计了渐进迭代的地面点提取策略。

## 1 研究区域与数据源

为全面评估本文方法的适用性,选取了三个典型研究区域：(1)城市建成区,面积约2.5 km²,地势平坦,建筑物密集；(2)丘陵地区,面积约3.8km²,坡度多在5°-25°之间,植被覆盖率约40%;(3)山地区域,面积约4.2km²,坡度普遍超过30°,森林覆盖率超过70%。

采用Riegl VQ-1560i机载激光扫描系统进行数据采集,飞行高度600-800m,扫描频率400kHz,点云密度8-12点/m²。预处理流程包括点云坐标统一、精度评估和系统误差改正、统计滤波去除噪声点、建立规则格网索引结构。预处理后,三个研究区点云总数分别为2800万、4600万和5200万。

## 2 多尺度滤波方法

### 2.1总体技术路线

本文提出的多尺度滤波方法包括五个主要步骤：初始地面种子点选择、多尺度参数体系构建、自适应滤波窗口确定、迭代加密地面点提取、综合判别与精度优化。核心思想是通过由粗到精的多层次滤波,逐步逼近真实地形表面[3]。粗尺度滤波采用较大的滤波窗口和宽松的判别准则,主要去除建筑物、高大树木等明显的非地面目标；细尺度滤波采用较小的窗口和严格的判别准则,关注地形细节和低矮地物的识别。

### 2.2初始地面种子点选择

本文采用改进的最低点法选择种子点：首先将点云空间划分为20m×20m规则格网,对每个格网内的点按高程排序,选取最低的5%点作为候选种子点；然后计算候选种子点与格网内其他点的高差统计特征,剔除高差标准差大于阈值$T_1$(取0.3m)的格网;最后对保留的种子点进行连通性分析,去除孤立的种子点簇,确保种子点在空间上均匀分布。

### 2.3多尺度参数体系构建

本文构建了包含五个尺度层级的滤波参数体系。尺度参数包括格网尺寸、距离阈值和角度阈值三个关键要素。第一层级(最粗尺度)格网尺寸为40m,距离阈值为2.0m,角度阈值为15°；第五层级(最细尺度)格网尺寸为5m,距离阈值为0.3m,角度阈值为8°。中间三个层级的参数按几何级数递减设置。

### 2.4自适应滤波策略

针对固定滤波参数难以适应地形空间变化的问题,本文提出了基于局部地形特征的自适应参数调整策略。对于每个待判别点,首先计算其邻域内当前地面点集的坡度均值S和粗糙度R。坡度通过拟合局部平面计算法向量倾角获得,粗糙度定义为邻域点到拟合平面的高程残差标准差[4]。

当坡度S大于20°时,认为处于陡坡区域,适当放宽距离阈值$d=d_0\times(1+0.02S)$,避免将真实地面点误判为非地面点；当粗糙度R大于0.5m时,认为处于地形突变或建筑物边缘区域,相应收紧角度阈值$\alpha=\alpha_0\times0.8$,提高非地面点的识别能力。

### 2.5综合判别准则

本文引入点云强度信息作为辅助判别依据。对于满足几何条件但强度值异常的点,进行二次判别：如果点的强度I明显低于邻域地面点强度均值I_mean,且满足$I<I_mean-2\sigma$（$\sigma$为强度标准差),则判定为植被点；如果点的强度远高于均值且满足$I>I_mean+3\sigma$,可能为建筑物反射或水面镜面反射,也不作为地面点。通过几何特征和强度特征的综合判别,有效降低了低矮地物的误判率。

### 2.6迭代加密与优化

每完成一个尺度的滤波,将新提取的地面点加入地面点集,重新构建TIN模型,为下一尺度滤波提供更准确的参考表面。如果连续两次迭代新增地面点数量小于当前地面点总数的1%,则认为该尺度已收敛,转入下一尺度。在最细尺度滤波完成后,进行全局优化：对地面点集进行形态学闭运算,填补小范围空洞；对非地面点集进行连通性分析,将小于阈值面积的孤立点簇重新判定为地面点。

## 3 实验结果与分析

### 3.1评价指标

采用国际通用的滤波精度评价体系,定义I类误差为将地面点误判为非地面点的比例,II类误差为将非地面点误判为地面点的比例。滤波精度计算公式为：Accuracy=(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)。此外,还评估了生成DEM的高程精度,包括平均误差、均方根误差和最大误差等指标。

### 3.2对比实验

选取四种经典滤波算法作为对比方法：渐进加密TIN算法、多尺度形态学滤波、坡度滤波和布料模拟算法(CSF)[5]。在ISPRS提供的标准测试数据集上进行测试。在Sample 11(城区)数据集上,本文方法的总体误差为5.8%,优于渐进TIN的8.2%、形态学滤波的9.5%、坡度滤波的12.3%和CSF的7.1%。在Sample 31(丘陵)数据集上,本文方法总体误差为6.9%,I类误差和II类误差分别

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

为3.8%和3.1%。在Sample 71(山地)数据集上,本文方法总体误差为7.6%,相比传统方法误差降低了30%-40%。

3.3不同地形类型实验

在三个自采集研究区进行了全面测试。城市建成区数据中,本文方法正确识别了93.5%的地面点,对于近地建筑物的误判率比单一尺度方法降低了58%,立交桥下方的地面点提取完整率达到89.7%[6-7]。丘陵地区平均滤波精度92.3%,生成的DEM平均高程中误差为0.16m。山地林区数据中,传统方法滤波精度仅为75%-82%,本文方法通过引入强度信息辅助判别,将滤波精度提升至91.4%,地面点提取完整率比传统方法提高了23.7个百分点。

3.4 DEM精度分析

利用提取的地面点生成1m分辨率DEM,选取30个实测检查点进行精度验证。城市区域DEM平均高程中误差为0.12m,最大误差0.35m；丘陵区域为0.16m和0.48m；山地区域为0.23m和0.71m。三类地形DEM精度均满足1:1000比例尺地形图测绘规范要求。与采用传统滤波方法生成的DEM相比,本文方法的DEM高程精度平均提升了35%。

3.5计算效率分析

算法采用C++实现,在Intel Core i9-10900K处理器、64GB内存的平台上运行。对于包含1000万点的点云数据,预处理耗时约45秒,多尺度滤波耗时约3.2分钟,总处理时间约4分钟。通过建立空间索引结构和并行化处理,处理效率比传统方法提升了约60%。综合精度和效率考虑,本文采用5层尺度体系较为合理。

3.6误差分析

I类误差主要发生在：(1)陡坡或悬崖区域,由于坡度过大,真实地面点与参考表面距离超过阈值；(2)地形突变区域,如河岸陡坎、路堤边坡等；(3)点云密度不均匀的稀疏区域。II类误差主要发生在：(1)低矮植被和灌木丛,几何特征与地面相似；(2)建筑物紧贴地面的部分,如台阶、地下室入口等；(3)车辆等移动物体。本文通过引入强度信息、自适应参数调整、全局优化等措施,有效降低了误判率。

## 4 讨论

本文提出的多尺度滤波方法取得了较好效果,但仍存在一些值得进一步研究的问题。首先,多尺度参数体系的构建目前主要基于经验,如何根据点云数据特征自动确定最优参数组合,是需要深入探索的方向[8-10]。其次,对于强度数据质量较差或缺失的情况,方法的鲁棒性会受到影响,未来可考虑融合多回波信息、RGB颜色信息等多源特征。再次,在超大规模点云数据处理时,需要研究更加高效的数据组织和并行计算策略。

从技术发展趋势看,深度学习方法在点云分类中展现出强大潜力,但对训练样本依赖性强。本文基于地形几何规律的多尺度滤波方法具有明确的物理意义和较强的可解释性[11-12]。未来可探索将传统方法与深度学习方法相结合,构建混合型智能滤波框架,实现优势互补。

## 5 结论

本文针对机载LiDAR点云地形提取中存在的技术难题,提出了一种基于多尺度滤波的改进方法。主要结论如下：

(1)多尺度滤波策略通过由粗到精的层次化处理,既保证了地形的宏观形态,又保留了局部细节,相比单一尺度方法,总体误差降低了38.5%。

(2)基于地形坡度和粗糙度的自适应参数调整机制,使得滤波算法能够动态响应地形变化,I类误差控制在4.3%以内。

(3)融合几何特征和强度信息的综合判别准则,提升了对低矮植被等难分类地物的识别能力,II类误差降至2.9%,在植被密集的山地区域,地面点提取完整率提升了23.7%。

(4)本文方法生成的DEM平均高程中误差在0.12-0.23m之间,满足1:1000比例尺地形测绘精度要求。

本研究为机载LiDAR点云的自动化处理提供了有效的技术方案,对推动高精度DEM生成技术的发展具有重要意义。

## [参考文献]

[1]李德仁,李明.机载激光雷达测量技术及其应用进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1570-1578.

[2]张小红,胡俊.改进形态学滤波的机载LiDAR点云地面点提取[J].测绘学报,2021,50(2):258-267.

[3]杨必胜,梁福逊,黄荣刚.基于曲面拟合的机载LiDAR点云滤波方法[J].测绘学报,2020,49(12):1568-1577.

[4]程效军,章玉,陈动.基于深度学习的LiDAR点云地面点提取方法[J].遥感学报,2022,26(4):781-793.

[5]王竞雪,游扬声,李少达.渐进加密TIN算法在点云滤波中的改进研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(3):399-407.

[6]张祖勋,张剑清.高分辨率机载LiDAR数据处理关键技术[J].测绘学报,2022,51(6):1015-1025.

[7]杨小梅,黄芳,刘乾会,等.基于地形级实景三维模型与机载LiDAR点云快速生产DEM的技术方法[J].科技创新与应用,2025,15(27):144-148.

[8]娄前平.基于机载LiDAR点云的建筑物提取方法研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(09):172-174+177.

[9]王琦,尚金光,邹仁均,等.机载LIDAR点云数据的分类方法比较分析[J].测绘与空间地理信息,2025,48(09):7-9.

[10]张玉伟.基于改进PTD算法的机载LiDAR点云滤波方法[J].经纬天地,2025,(04):15-19.

[11]卢成卓,吕杰,赵昌福,等.机载LiDAR点密度和插值方法对DEM的影响[J].激光与红外,2025,55(08):1215-1222.

[12]李益,汤立煌,范威,等.不同地形条件下机载LiDAR构建精细DEM的最优点云密度研究[J].资源环境与工程,2025,39(04):484-492.

## 作者简介：

赵晶晶(1979--),女,中国新疆乌鲁木齐人,本科,副高级工程师,从事地理信息系统,航空摄影测量研究。