

# 机载激光雷达单木分割进展与展望

王佳迪

上海旻悦勘察设计有限公司

**摘要:**近年来,激光雷达技术快速发展,利用机载激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)数据可以测量森林结构,为森林资源调查提供新的技术路径。单木分割技术作为森林资源调查关键技术之一,可提供单木尺度信息。本文采用二维和三维单木分割方法阐述了单木分割技术国内外研究现状,并分析了单木分割的研究难点和发展趋势。

**关键词:**单木分割;机载激光雷达;冠层高度模型;分水岭分割算法

**DOI:** 10.65976/3078-8145.2026.01.018

## 引言

森林作为陆地生态系统的核心构成单元,在推动“碳达峰、碳中和”双碳目标落地实施的过程中,发挥着基础性与关键性的支撑作用。精准高效获取森林资源数据,是推进生态文明建设的重要基础,对贯彻“守住自然生态安全边界”的重要指示<sup>[1]</sup>具有深远意义。作为森林生态系统的基础构成单元,单木的空间结构形态、生物物理属性及化学组分特征的精准提取,既是实现森林蓄积量与生物量精细化测算、树种快速精准识别的关键前提,又是科学构建树木生长动态模型的核心支撑依据。因此,单木分割技术是森林资源调查与精准管理作业的核心关键技术。

近年来,主动式遥感技术发展迅速,其中机载激光雷达(LiDAR)技术凭借其技术优势,在地形测绘及各类相关应用领域得到了广泛应用。该技术能够获取森林的大规模高分辨率三维点云数据,对森林资源研究具有重要价值。在森林资源调查领域,机载激光雷达(LiDAR)可以系统性地采集森林群落的结构参数,并动态追踪森林群体的演变过程,实现对森林资源的科学化管<sup>[2]</sup>。激光雷达点云数据反演模型与森林资源基础图件进行匹配运算,并且融合各类遥感影像、数字表面模型(DSM)及数字高程模型(DEM)等多源数据信息可反演计算出森林生物量、蓄积量、冠层高度、冠层覆盖度和冠层密度等森林参数。这一技术不仅降低了实地调查过程中的人力投入成本,而且提高了森林资源调查的作业效率,为森林资源动态监测工作开展提供了技术支持。

此外,相较于传统遥感技术,激光雷达(LiDAR)具备林冠穿透能力,能够获取数字高程模型(DEM)、数字表面模型(DSM)及林冠三维结构信息。基于机

载激光雷达(ALS)获取的三维点云数据进行单木分割研究,对林业实际生产作业具有重要意义。

## 1 单木分割方法

单木分割技术发展初期,相关研究普遍采用的技术方法为先利用激光雷达点云数据生成冠层高度模型(CHM),再识别CHM中的局部最高点并将其作为单木树冠潜在顶点,最后基于这些顶点从冠层高度模型中分离提取单木轮廓特征。随着该领域研究的深入与技术迭代升级,近年来相关研究方法逐渐转向直接对原始激光雷达点云数据集进行单木分割。目前,基于机载激光雷达点云数据实现单木分割的技术体系可划分为两大类:一是通过构建CHM模型进行分割的间接方法,二是对归一化后的激光雷达点云数据进行分割的直接方法。

### 1.1 基于CHM的单木分割方法

基于冠层高度模型(CHM)的单木分割方法,其核心技术源于图像分割领域的相关技术,其中包括局部极大值检测、模板匹配、区域生长及分水岭分割等经典算法。在单木分割研究中,一般认为树冠顶端反射的激光点是单木冠层的最高位置。在实际应用中,基于树顶一般是局部高程极值这一特性,通过设置固定规格或自适应调整的分析窗口实现对单木树冠顶点空间位置的识别。李响等<sup>[3]</sup>采用动态窗口局部极值检测方法,在针叶林密林场景中实现了对单木位置的自动提取,最终达成85%的识别精度。

在分水岭算法的应用中,冠层高度模型(CHM)通常被反转来模拟地形中的集水盆地,从局部最低点开始注入水,随着水位逐步上升至流域边界后形成分水岭边界。实验评估表明,该算法在针叶林环境中表现出优异的分割能力,但在冠层密度高、结构重叠的

**作者简介:**王佳迪(1998—),女,硕士研究生,助理工程师,研究方向为工程测量与地理信息。

落叶林场景中,易出现树冠合并现象,导致欠分割问题。鉴于树木高度与冠幅通常存在稳定相关性,Chen 等<sup>[4]</sup>提出标记控制的分水岭分割方法,用于疏林草原的单木识别。该方法基于冠层最大值模型(CMM)使用可变窗口搜索局部极值来定位树冠的位置,可变窗口的尺寸由冠幅与树高回归曲线预期区间的下限确定。陈日强等<sup>[5]</sup>采用标记控制分水岭分割算法提取单株果树冠层信息,最终实现 86.35% 的检测精度与 95.03% 的提取准确度。

### 1.2 基于 LiDAR 点云的单木分割方法

近年来,机载激光雷达技术快速发展,显著提升了点云数据采集的密度与精度。在此背景下,相关研究日益倾向于直接利用三维点云数据开展单木分割。与基于二维图像的分割方法相比,此类算法充分挖掘并利用完整点云的三维信息进行分析,不仅有效提高了冠层顶层单木的检测精度,更增强了冠层次层单木检测的实际可行性。就研究现状而言,基于点云的单木分割方法可大致划分为三类:传统分割方法、基于机器学习的分割方法和基于深度学习的分割方法。

传统点云单木分割方法通常依赖人工交互操作或预先设定的固定规则进行分割作业。此类方法虽具备良好的直观性与可操作性,但分割效果受多重因素限制,机载激光雷达点云数据的质量、森林类型差异、林分密度、冠层覆盖度及树种形态特征等因素,均会对最终分割精度产生影响。

基于机器学习的单木分割方法一般分为监督和非监督聚类算法,通过学习树木点云的结构和空间分布特征实现单木的分割。当前基于点云的机器学习分割方法主要有 K-means 算法、DBSCAN 算法、Meanshift 算法、基于相对间距判别聚类和谱聚类等方法。

基于深度学习的分割方法,主要是运用深度神经网络,以面向分割任务的卷积神经网络(CNN)为代表,通过大规模的标注样本的训练学习,完成对点云的自动编码。Wang 等人<sup>[6]</sup>将 Faster R-CNN 算法引入橡胶林点云的单木分割研究,取得了较好的实验结果。

## 2 存在的问题

基于 CHM 的单木分割方法和基于 LiDAR 点云的单木分割方法均有明显缺陷,其中二维方法大多只关注冠层表面信息而忽略林下木;三维方法对参数变化敏感且单木分割效率低。

### 2.1 基于 CHM 进行单木分割所存在的问题

基于 CHM 的单木分割方法主要存在一些局限:其一,三维信息丢失问题,在对原始点云进行空间插值和栅格化处理的过程中,一些原始信息会被平滑掉,

导致分割精度降低;其二,分辨率限制,单木分割结果直接受栅格分辨率的影响<sup>[7]</sup>。

针对上述所总结的基于冠层高度模型(CHM)方法的局限性,此方法虽对高大树木下面的低矮树木识别不佳,容易出现过分割或欠分割情况,但是对于冠层顶部特征明显的情况,如针叶林数据,这些二维单木分割方法表现较好。

### 2.2 基于三维点云进行单木分割所存在的问题

基于三维点云的分割方法是直接处理原始点云数据,相比于二维方法,这类方法利用原始点云的完整信息,避免了在生成冠层高度模型(CHM)过程中的信息损失情况。三维单木分割方法在实际应用中也存在一定限制:一是需要一定的先验知识与预设假设;二是计算效率不高;三是存在数据不规则的问题;四是对参数较为敏感<sup>[8]</sup>。因此,在结构复杂的森林场景中,该类方法可能也无法达到预期的分割效果。

## 3 单木分割发展趋势

经过上述对各种单木分割方法的分析与讨论,后续可以研究更为先进的深度学习算法,提取单木结构特征中的局部特征和全局特征,运用卷积神经网络开展单木分割工作。实验表明,深度学习方法相较于传统分割方法具备更高的精度与鲁棒性<sup>[9]</sup>,因此拥有重要的技术研发潜力和实际应用价值,能够为复杂林分数据的单木分割问题提供更优化的解决方案。

单木分割研究也可以集成多源遥感数据与机载激光雷达点云数据来提升分割结果质量,如高分辨率航拍影像、多光谱数据及红外热成像数据可提供补充信息,能够更清晰地划分植被与背景<sup>[10]</sup>。对多源数据集进行协同处理,能够在各类应用场景中有效提升单木分割的精度。

## 5 结论

基于冠层高度模型(CHM)的二维单木分割方法在结构相对简单的森林场景中能够有效识别冠层优势树种,凭借其操作便捷、计算高效的特点具备一定的工程应用价值。基于点云的三维单木分割方法在较为规则的林分场景中同样存在应用价值。但在处理结构复杂的林分数据时,这些方法的分割性能会显著下降,需要通过改进算法或者是对多技术进行融合的方式来提升其对复杂场景的适配能力。未来研究中,可将机器学习、深度学习等先进技术与现有分割方法相结合,进一步提升单木分割的精度与鲁棒性,从而为复杂林区森林资源的精准调查工作提供可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 蔡宣健. 基于机载点云与光谱数据融合的高郁闭度单木分割精度提升研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2025.
- [2] 李增元, 刘清旺, 庞勇. 激光雷达森林参数反演研究进展 [J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1138-1150.
- [3] 李响, 甄贞, 赵颖慧. 基于局域最大值法单木位置探测的适宜模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 27-33.
- [4] Chen Q, Baldocchi D, Gong P, et al. Isolating Individual Trees in a Savanna Woodland using Small Footprint LIDAR data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006, 72(8): 923-932.
- [5] 陈日强, 李长春, 杨贵军, 等. 无人机机载激光雷达提取果树单木树冠信息 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 50-59.
- [6] Wang J, Chen X, Cao L, et al. Individual Rubber Tree Segmentation Based on Ground-Based LiDAR Data and Faster R-CNN of Deep Learning [J]. MDPI AG, 2019(9): 793.
- [7] 王佳迪. 机载激光雷达树木点云单木分割研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2024.
- [8] Anandakumar M, Ramiya A, Rama R, et al. Individual tree detection from airborne laser scanning data based on supervoxels and local convexity [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2019(15): 2352-9385.
- [9] 王小虎. 基于机载激光雷达数据的森林单木分割方法研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- [10] 刘玉婵. 联合机载与地基激光雷达点云单木分割与结构参数估测研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2025.