引文格式：罗建新,寇媛,王军军,等. 利用点云数据自动提取树木参数与仿真重建[J]. 地理空间信息, 2025, 23(5): 29-32. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.05.006

利用点云数据自动提取树木参数与仿真重建

罗建新[1,2]，寇　媛[1,2*]，王军军[1,2]，刘华光[1,2]
（1. 湖南省第一测绘院，湖南 长沙 410114；2. 实景三维建设与应用技术湖南省工程研究中心，湖南 长沙 410114）

摘　要：针对树木参数自动提取困难和单木分割误差大的问题，以树木点云为数据源，提出了一种基于CHM等高线优化的单木分割方法和树木参数估测全自动提取方法。首先通过点云滤波获取森林DEM、DTM数据，并进行差值计算获取森林CHM；再对CHM进行滑动窗口分析，提取树冠顶点集合进行单木分割，并针对欠分割问题设计了基于密度等高线的分割优化方法；然后针对分割结果设计了树木形态结构参数（树冠体积、胸径）自动提取方法；最后进行树木仿真。结果表明，该方法提取的单木点云数据更加精确，有利于提高树木参数计算的精确度。通过实验区采集的行道树实现了道路两侧树木1∶1仿真，为城市环境下的数字孪生树木仿真、森林参数量估算提供了一种解决方法。

关键词：激光点云数据；单木分割；CHM；树木参数；仿真
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）05-0029-04

Automatic Extraction and Simulation Reconstruction of Tree Parameters Based on Point Cloud Data

LUO Jianxin[1,2], KOU Yuan[1,2], WANG Junjun[1,2], LIU Huaguang[1,2]
(1. The First Surveying and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha 410114, China;
2. Hunan Engineering Research Center for Realistic 3D Construction and Application Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the difficulty in tree parameter automatic extraction and large errors in single tree segmentation, we proposed a single tree segmentation method and a fully automatic extraction method for tree parameter estimation based on CHM contour optimization. Firstly, we obtained the forest DEM and DTM data through point cloud filtering, and obtained the forest CHM by subtracting DEM and DTM. Then, we performed sliding window analysis on CHM to extract the crown vertex set for single tree segmentation, and designed a segmentation optimization method based on density contours to address the under-segmentation problem. Finally, we designed an automatic extraction method for tree morphological structure parameters (crown volume, diameter at breast height) based on the segmentation results, and used these parameters to conduct tree simulation. Experimental results show that the proposed method makes the extracted single tree point cloud data more accurate, which is conducive to improving the accuracy of tree parameter calculation. Through street trees collected in the experimental area, we realized 1∶1 simulation of trees on both sides of road, providing an effective solution for digital twin tree simulation and forest parameter estimation in urban environment.

Key words: LiDAR point cloud data, single tree segmentation, CHM, tree parameter, simulation

树木作为森林资源的重要组成部分，是事关人类可持续发展的重要环境指标，其数量、长势、高度、树种类型等参数是衡量树木资源、有效监测树木耗碳量的重要指标，是掌握森林资源的重要信息。单木分割是指从成片树木中分离出各种独立树木，是林业森林参数调查中国内外研究的热点[1]。恰当的单木分割能有效提取每棵树木的树高、树木冠幅直径、树冠高度、树木主干胸径等参数。由于树木成片分布、范围大，要高效提取单木参数，必须能获取树木的多维度信息。三维激光扫描技术的精度高、点云密集，能更高效准确地测量大面积森林树木的高度和空间结构，从而被广泛应用于估测森林参数。现阶段的数字孪生城市基底也要求真实的树木模型，因此基于三维激光扫描技术的单木分割提取与树木仿真在森林参数提取与城市树木仿真方面具有重要的研究意义。

现有基于激光点云的单木分割方法主要分为以冠

项目来源：湖南省自然资源厅2022年重大科技研究资助项目（湘自资科[2022]3号）；2024年度湖南省自然科学基金项目部门联合基金资助项目（2024JJ8327）。
第一作者简介：罗建新（1970—），本科，高级工程师，主要从事新型基础测绘、实景三维应用研究、时空大数据建设等工作，E-mail：luojianxin@xcyy.net.cn。
通信作者：寇媛（1991—），硕士研究生，工程师，主要从事测绘地理信息系统创新研发工作，E-mail：331799118@qq.com。

层高度模型（CHM）为基础的单木分割的算法和直接基于激光点云的单木分割算法[2]，前者需对数字表面模型（DSM）[3-6]和数字地面模型（DTM）进行差值处理，分离出树木点云。CHM包含了从树底到树顶所有树木的冠层点云[7]，对树木点云进行分析，获取局部最大值来检测树木冠层高的最大值，从而找到树木顶端，对顶端进行局部聚类分割，得到单棵树木[8-9]。由于树木点云数据周围通常存在其他地物点云，CHM的局部最大值树顶检测方法将受到噪声干扰，导致在复杂场景中分割不准确。Jing等[10]利用标签控制的分水岭分割算法进行优化，以提高分割精度。基于点云三维信息的单木分割方法是直接利用树木的几何信息进行约束，从而直接在点云中提取出每棵树木的点云信息进行单木分割[11-14]。总的来说，准确的单树分割有利于准确提取树木参数。本文首先利用三维激光扫描技术获取长株潭城市道路两侧的树木点云数据，并改进了单木分割算法，获取了更准确的单木点云；然后自动计算树冠体积、胸径等参数；最后将单木参数信息结合树木骨干用于生成更真实的树木仿真模型，实现城市场景的树木仿真。

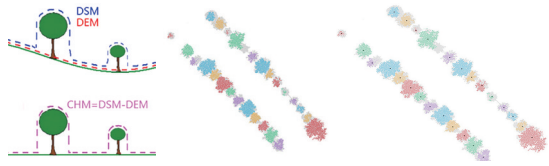
1 主要技术路线

本文的主要技术路线为：①对初始点云场景进行网格化，通过滤除网格内极值点间的点云获取点云DEM和DTM，并对二者进行差值处理，获取森林CHM；②通过移动窗口检测局部极值点，获取单木初分割结果；③根据单木密度的分布等高线特征优化单木初始分割结果，解决可能存在的单木欠分割或过分割问题，获取高精度单木分割结果；④分别利用检测极值点、最小二乘圆拟合法和凸包法计算单木树高、胸径和冠幅面积等信息[15-17]；⑤构建单木骨架模型，并识别树木主/支干，完成单木三维仿真模型的构建。

2 研究方法

2.1 单木分割提取

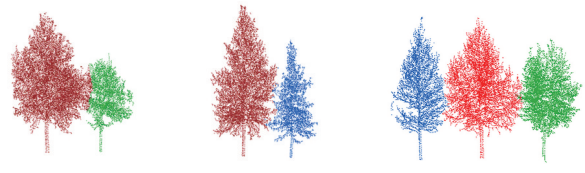
由于基于激光雷达获取的树木点云在树木不同高度处的分布密度不同，因此利用CHM可有效分离单木（图1a）。本文对初始点云数据进行网格化，并为每个网格提取的最高点云赋值，空白网格进行插值处理，进而生成DSM。DTM则首先利用滤波算法分离出地面点云数据，再进行网格化处理，并提取各网格的最低、最高点进行网格赋值，空白网格进行插值处理。由于每棵树的生长状态不同，其树冠大小、树高各不相同。相较于树冠，树顶是整棵树木的最高点，更便于树木位置的定位。因此，需要进一步在CHM中搜索局部最大值获取树顶点。如图1b所示，提取局部树顶点首先需要构建局部搜索窗口，在CHM中遍历所有网格，检测得到搜索窗口每移动一个网格对应的窗口最大高程，这些高程点构成候选树顶点集合。候选树顶点集合中依然可能存在不正确的树顶点，需进行区域生长处理，剔除错误点，获取真实的树顶点集合（图1c）。



a CHM示意图　b 局部树顶点提取结果　c 区域生长聚类处理结果

图1 局部极值点处理结果图

通过上述方法分割树木的结果会存在多棵树木分割不准确而被归属到同一棵树的问题，直接降低了树木分割的精度，且将影响后续树木参数提取的准确度。为进一步提高分割精度，本文提出利用等高线分层进行密度统计区分欠分割的方法。在欠分割的情况下，多棵树木在不同高度的分层结果中会存在多个明显的密度聚集区，通过俯视投影得到树木二维图。由于树干周围形成了较茂密的枝叶，通过激光雷达反射获取点云时，中间树干区域点云密度较大，且向树木外边缘逐渐降低。根据树木高度设置一定的等高距，按照不同的高度对初始分割结果进行分层，再由下向上逐层从顶部往底部进行垂直投影，得到不同的以树干为圆心的点云环，即分层等高线。单棵树木所有投影层的等高线中心会重合。若为多棵树木且存在欠分割情况，在树木较高处的等高线层，从顶部投影的密度点云则会分散为中心不同的点云簇，其等高线呈葫芦状而不是圆环状。依据该原理，即可对树木欠分割情况进行优化，进一步对不同等高线轮廓进行分层分割，从而确定最有效的分割界限，提高单木分割精度。图2a中两棵树的分割结果存在明显偏差，右侧小树的部分点云被分割到左侧大树中，效果不佳，采用本文方法对两棵或3棵共存的树进行处理，结果见图2b、2c，分割效果明显得到提升。



a 欠分割示意图　b 两棵树木　c 3棵树木

图2 分割结果示意图

2.2 单木参数提取

基于点云数据的单木参数主要包括树高、胸径和

树冠面积。在单木准确分割的前提下，树高通常为单木点云数据的最高点与最低点之差。获取研究区域内每棵树木高度后，可计算其算数平均数，获取林分平均高。胸径是指距离树根1.3 m处树干的直径。通常截取1.25~1.35 m区间内的点云数据作为估算胸径的初始点云数据（图3），采用最小二乘圆拟合法，通过使实际轮廓各点到拟合理想圆上对应点的各线段长度的平方和最小，获取最终的拟合胸径。

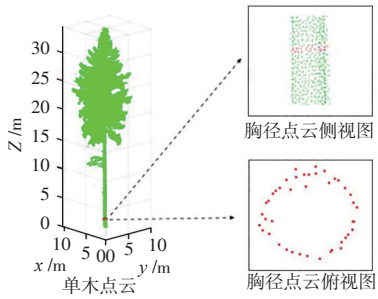


图3　胸径点云数据分析

假设圆心坐标为 (a, b)，半径为 r，则半径平方差的和为：

$$\sum\delta^2=\sum\left[X_i^2+Y_i^2+AX+BY+C\right]^2 \tag{1}$$

式中，$A=-2a$，$B=-2b$，$C=a^2+b^2-r^2$。

$\sum\delta^2$ 最小时，拟合圆的效果最好，则分别对 A、B、C 求偏导，并令偏导等于零以获取极值点，从而获得最小的半径平方差的和。当所输入的点云数据与实际胸径位置吻合度较高时，拟合圆效果较好（图4）。

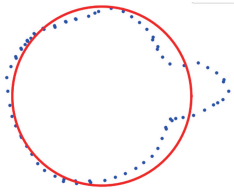


图4　最小二乘圆拟合法效果

树冠作为树木的主要组成部分，是衡量树木长势的重要指标，通常用冠幅表示。冠幅通常是指树冠在东西和南北两个方向宽度的平均值。考虑到获取的树冠点云可能存在残缺或不规则的情况，本文将单木点云数据投影至二维平面上，再由二维平面的离散点数据计算单木的二维凸多边形即凸包。依次连接凸包上的凸点，并计算凸点间的距离，通过筛选凸点间的最大距离获得单木冠幅。本文采用凸包法构建平面离散点云数据集的最小凸多边形。

首先按照优先 X 坐标的原则查找获取凸包的两个对角点；再连接两个对角点，并将点云集划分为两个子点云集；然后从子集中筛选距对角凸包连线最远的点作为新的凸包点，迭代上述过程，直至没有新的凸包点出现，获取二维平面的凸包顶点集合；最后计算最大间距值的成对凸包点即可获取单木冠幅面积（图5），计算公式为：

$$P=\max\left(\sqrt{\left(x_j-x_i\right)^2+\left(y_j-y_i\right)^2}\right) \tag{2}$$

式中，P 为最终单木冠幅直径。

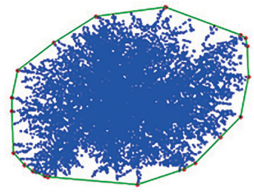


图5　冠幅凸包法示意图

2.3　仿真模拟应用

为准确获取单树的拓扑结构，首先提取树木骨架作为单树仿真重建的数据基础，再识别分支骨架，然后基于骨架点生成树干表面点云数据和纹理，最后利用仿真技术[18-19]，在游戏引擎中模拟植被，根据算法生成的三维符号点以及植被类型、树高、树种等信息，实现植被的仿真模拟。

2.4　实验与分析

本文以长株潭城市群生态绿心地带为实验区，根据已收集的基础测绘、三调数据提取边界内激光点云数据（图6），利用多源数据提取点云中植被、行道树和独立树的空间位置、树高、树径、树冠面积等指标，结果见表1，其平均树高为2.91 m。将提取结果与部分树木的真实测量值进行对比，结果表明本文方法的测量结果总体较好。

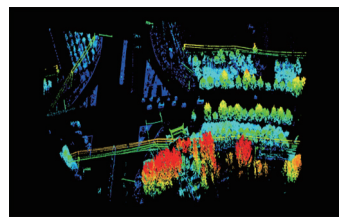


图6　采集的激光点云源数据

基于已提取的激光点云数据，利用点云特征信息提取算法得到林业坐标、树高、树径、树冠面积等指标；根据已有指标反向推算林业矢量一张图，并对单木进行仿真重建，结果见图7；通过仿真模拟算法实现林业矢量一张图的三维模拟化，效果见图8。

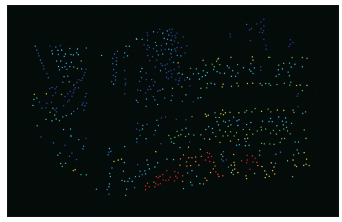


图7　树干提取结果



图8　城市级实景三维植被处理后效果图

本文将二维符号化技术应用于三维符号化仿真

表1 单树参数提取结果

序号	坐标/m	树高/m	树径/m	树冠面积/m²
1	(49.02, 708.28)	2.79 *+0.05*	0.70 *+0.01*	0.38 *+0.02*
2	(91.54, 768.42)	3.18 *−0.07*	0.59 *+0.09*	0.27 *+0.07*
3	(74.56, 766.07)	3.03 *−0.03*	0.08 *+0.57*	0.01 *+0.24*
4	(83.35, 746.21)	2.76 *+0.06*	1.50 *−0.06*	1.77 *−0.03*
5	(70.61, 767.73)	3.24 *−0.10*	1.30 *−0.03*	1.33 *−0.05*
6	(76.48, 739.47)	4.15 *−0.04*	2.60 *−0.11*	5.31 *−0.13*
	...	...	...	...
49	(72.53, 676.56)	5.11 *−0.06*	3.69 *−0.09*	10.68 *−1.35*
50	(27.12, 672.69)	3.81 *+0.02*	1.50 *+0.04*	1.77 *+0.05*
51	(24.68, 709.35)	3.41 *+0.05*	2.62 *−0.10*	5.40 *+0.07*
52	(34.77, 703.68)	2.89 *+0.01*	2.06 *+0.03*	3.34 *+0.02*
53	(90.41, 656.1)	2.49 *+0.08*	1.62 *+0.04*	2.05 *+0.08*
54	(63.09, 640.49)	3.66 *−0.05*	1.67 *−0.05*	2.21 *+0.07*
55	(37.43, 702.44)	7.97 *−0.21*	3.87 *−0.08*	11.78 *−0.13*

注：斜体数值表示与真值的差值。

中，经验证可替代部分三维精编工序，大幅提高生产效率。该方法可实现点云与虚拟仿真的结合，将其用于地理场景与实体生产，既保留了可量测性，又具备观赏性，有助于作业员采用自动化手段，在较好的硬件设备支持下完成实景三维场景中植被的快速替换与美化，大幅减少了人工作业时间成本；通过计算点云多项指标，实现了独立树的自动化提取，点云密度越大，提取精度越高。

3 结 语

本文利用地面激光扫描技术获取树木的三维点云数据，并研究了点云预处理、单木分割和参数提取3个关键环节，提出了单木分割优化算法和参数识别算法。在长株潭城市群进行数据采集实验算法验证，树木仿真效果真实可靠，说明该方法能有效应用于数字孪生城市基底的树木场景仿真建设，还有利于森林相关参数的提取研究。虽然CHM构建结果与单木分割结果验证了本文方法的有效性，但未考虑树木过分割问题，在以后的研究中，可考虑优化滤波方法对CHM模型进行改进，进一步提高分割精度。

参考文献

[1] 杨秋丽. 机载LiDAR单木分割方法对比及其影响因素分析[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2018

[2] 惠振阳,李娜,程朋根,等. 基于连通性标记优化的地基LiDAR点云单木分割方法[J]. 中国激光,2023,50(6):155-163

[3] 潘斌,蔡志刚,刘微微,等. 机载激光雷达点云的城市建筑物直线特征提取方法[J]. 测绘工程,2022,31(5):16-23

[4] 温玉维,邓长勇,曾德培,等. 基于相对密度聚类的激光点云电力线提取方法[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(8):262-264

[5] 丁竹娴,周立军,樊江川,等. 基于深度学习与激光点云的橡胶林枝干重建及参数反演[J]. 农业工程学报,2022,38(8):187-199

[6] 王博. 无人机影像点云与地面激光点云配准的三维建模方法[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(8):216-219

[7] 赫红科. 基于机载激光雷达的森林参数反演研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2019

[8] 张鹏,马庆勋,吕杰,等. 机器学习算法在森林地上生物量估算中的应用[J]. 测绘通报,2021(12):28-32

[9] 周烨,刘云波,郑丽波,等. 多平台点云数据的单木参数提取精度分析[J]. 测绘通报,2022(7):168-172

[10] Jing L,Hu B,Li J,et al. Automated Delineation of Individual Tree Crowns from LiDAR Data by Multi-scale Analysis and Segmentation[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,2012,78(12):1 275-1 284

[11] 廖晓和. 基于车载点云数据的树木提取与分析[J]. 测绘通报,2020(11):163-166

[12] Ayrey E, Fraver S, Kershaw J A, et al. Layer Stacking: A Novel Algorithm for Individual Forest Tree Segmentation from LiDAR Point Clouds[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2017,43(1):16-27

[13] Ferraz A, Bretar F, Jacquemoud S, et al. 3D Mapping of a Multi-layered Mediterranean Forest Using ALS Data[J]. Remote Sensing of Environment,2012,121:210-223

[14] Huo L, Zhang X. Individual Tree Information Extraction and Accuracy Evaluation Based on Borne LiDAR Point Cloud by Multilayer Clustering Method[J]. Scientia Silvae Sinicae,2021,57(1):85-94

[15] 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):1 138-1 150

[16] 刘清旺. 机载激光雷达森林参数估测方法研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2009

[17] 刘鲁霞,庞勇,李增元. 基于地基激光雷达的亚热带森林单木胸径与树高提取[J]. 林业科学,2016,52(2):26-37

[18] 周志刚. 车载激光扫描技术在道路三维实景模型制作中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(8):189-192

[19] 黎志生,陈瑛. 三维仿真地图的地理空间信息数据构建技术研究[J]. 地理空间信息,2020,18(7):30-33