

基于无人机载激光雷达点云数据的人工侧柏林单木分割研究

李远航^{1,2}, 笪志祥³, 闫焱琛^{4*}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003;
3. 天津市水务局, 天津 300074; 4. 天津市地质工程勘测设计院有限公司, 天津 300191)

摘要: 可持续的森林经营管理模式有助于实现生态文明建设的高质量发展, 人工林单木分割结果的获取是森林经营管理的关键。目前无人机载激光雷达技术为单木位置的精准定位和树冠的精确划分提供了应用空间。利用冠层高度模型(CHM)检测和提取单木数量和树冠、树高等信息, 评估和分析空间分辨率和点云密度对单木分割和树冠提取结果的影响和精度, 该方法可准确分割人工侧柏林和提取树冠信息, 总体上单木分割精确率均 $>75\%$, 树冠轮廓提取精确率均 $>65\%$, 实测数据与提取数据的回归决定系数均 >0.6 。适当的空间分辨率有助于提高单木分割精度, 当分辨率为 0.3 m 时单木分割和树冠提取结果均为最优。同时研究发现随着点云密度的降低, 单木数量的识别精度值随之下降。当点云密度为 100% 时, F 为 89% , 当点云密度为 10% 时, 其 F 降低至 73% 。基于CHM模型可以较好实现人工林的单木精确分割, 对林木出现的树冠重叠、覆盖、偏移等现象均有一定的辨别能力; 同时分析了空间分辨率和点云密度对单木分割和树冠提取结果的影响并评估了精确性, 识别了单木分割时关键参数的最优选择。

关键词: 无人机激光雷达; 单木分割; 结构参数信息; 空间分辨率; 点云密度

中图分类号: S791.38 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2023)06-0171-09

Artificial *Platycladus orientalis* (L.) Franco Single Wood Segmentation Based on UAV-based Lidar Point Cloud Data

LI Yuan-hang^{1,2}, DA Zhi-xiang³, YAN Ye-chen^{4*}

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (Under Construction), Zhengzhou 450003, Henan, China;
3. Tianjin Water Affairs Bureau., Tianjin 300074, China; 4. Tianjin Geo-Engineering Institute of Investigation & Surveying Design Co., Ltd., Tianjin 300191, China)

Abstract: Sustainable forest management mode is helpful to realize the high quality development of ecological civilization construction. The key of forest management is to obtain the result of single tree division of plantation. At present, UAV-based LiDAR technology provides application space for the precise location of individual trees and the precise division of tree crowns. In this study, canopy height model (CHM) was used to detect and extract information about the number of individual trees, crown and tree height, and to evaluate and analyze the influence and accuracy of spatial resolution and point cloud density on the results of individual tree segmentation and crown extraction. The results showed that this method could accurately segmented *P. orientalis* plantation and extract the crown information. Overall, the accuracy rate of single tree segmentation was higher than 75% , the accuracy rate of tree crown contour extraction was higher than 65% , and the regression determination coefficients of measured data and extracted data were higher than

收稿日期: 2023-02-28 修回日期: 2023-04-25

基金项目: 天津市水务重点科技项目(KY2023-02)。

第一作者: 李远航, 博士, 工程师。研究方向: 林业工程。Email: liyuanhang@yrec.cn

* 通信作者: 闫焱琛, 硕士, 工程师。研究方向: 生态修复。Email: 1432228278@qq.com

0.6. Appropriate spatial resolution was helpful to improve the accuracy of single tree segmentation. When the resolution was 0.3 m, the results of single tree segmentation and tree crown extraction were optimal. With the decrease of point cloud density, the recognition accuracy of the number of individual trees decreased. When the point cloud density was 100%, the F value was 89%, and when the point cloud density was 10%, the F value decreased to 73%. The CHM model could be used to accurately segment individual trees in the plantation, and could distinguish the overlapping, covering and deviation of tree crowns. Moreover, the effects of spatial resolution and point cloud density on the results of single tree segmentation and crown extraction were analyzed and the accuracy was evaluated, and the optimal selection of key parameters in single tree segmentation was identified.

Key words: Unmanned aerial vehicle lidar; Single wood division; Structural parameter information; Spatial resolution; Point cloud density

森林是陆地生态建设的重要载体,其内在的植被—水碳耦合和反馈机制,不仅通过与大气进行水分和能量交换,对气候产生重要影响,同时可以促进水源涵养和水土流失控制^[1],而且在“碳中和”进程中可以通过森林碳汇等方式有效地消耗 CO₂^[2]。当前,我国人工林经营管理已从追求短期经济效益的粗放管理转变为多种生态服务功能、经济、社会效益相结合以及可持续发展模式,因此全面加强森林资源的经营和管理,有助于提升生态服务功能和效益,抑制全球变暖进程,从而实现生态文明建设的高质量发展。森林资源调查是森林经营管理的重要组成部分和前提,其关键在于对森林结构参数的精确获取和对森林发展情况、趋势的全面考究^[3-4]。然而传统的人工野外调查方式具有工作强度大,耗时长,效率低等问题,在面临较大规模的林业调查需求时,工作人员难以保证其精确性;同时传统的无人机拍摄易受天气、光照和地形影响,其拍摄的遥感影像存在着反演和解译结果精确性低等问题^[5]。因此提高森林结构参数反演精度和效率,对准确获取森林资源信息和预测森林未来发展情况具有重要意义。

无人机载激光雷达(UAV-LiDAR)作为一种新式的三维点云获取设备,具有成本低、效率高以及能够快速获取高精度点云数据的优点,并且在快速精准地获取林木三维结构、提取和反演森林参数等方面有着巨大优势。基于 UAV-LiDAR 点云图像的单木分割是单木结构信息提取和参数估测的前提,如估测单木数量、树高、冠幅等,也为后续的森林生物量反演以及森林三维模型构建提供有力支撑^[6-7]。目前,基于机载 LiDAR 点云数据实现单木分割主要有 2 种思路:其一为基于点云栅格—冠层高度模型(canopy height model, CHM)进行单木分割。于海洋等^[8]评估了分水岭分割、邻域增长和特征点决策树以及基于点云的聚类分割算法等 4 种算法的分割精度,验证了分水岭算法分割单木精确性和适应

性最好。陈日强等^[9]利用标记控制分水岭分割算法检测和提取果树单木树冠信息,其检测精度和提取准确率分别达到了 86.35% 和 95.03%。其二是利用聚类算法对归一化后的 LiDAR 点云之间的空间结构关系和属性信息进行聚类分析进而直接进行单木分割^[10]。Vega 等^[11]提出了一种多尺度动态点云分割新方法,通过确定最优树顶位置点作为评价标准进行树冠聚类,正确分割率达 82%。刘浩然等^[6]设计改进了 K-means 算法和基于相对间距的阈值分割算法,并评估其应用在人工林的单木分割精度。然而受限于聚类方法所需输入参数较多且复杂,难以大规模推广,相关研究引入了深度机器学习的方法进行模型训练。如 Wang 等^[12]利用快速回归卷积神经网络(faster R-CNN)对橡胶林点云数据进行单木分割,并取得了良好效果。陈鑫鑫^[3]采用深度学习框架点云神经网络模型(point net)实现单株树冠分割。但基于深度机器学习的分割方法需要构建以大量实测数据为基础的训练模型,违背了机载激光雷达技术进行单木分割时效率高、成本低的初衷,因此不具备普适性。

通过检索文献发现多数研究的单木分割精度受 CHM 分辨率限制,难以区分低矮植物;同时处理高分辨率数据时会出现大量过度分割现象,对于高密度林分的树冠边界识别精度不高。目前,前人研究中针对不同空间分辨率下的单木结构检测与信息提取的定量分析研究较少。基于此,本研究采用基于标记控制分水岭分割算法的 CHM 模型实现单木分割的方法,探讨提取人工侧柏林单木结构信息的可能性和科学性,主要目的为:1)基于点云数据生成的 CHM 模型,使用标记控制分水岭分割算法实现单木结构信息的检测与提取;2)基于 CHM 模型对不同空间分辨率的单木结构信息进行精度评价和敏感度分析;3)对不同点云密度的单木分割结果进行影响分析,为基于 CHM 模型的单木结构信息提取最

优空间分辨率选择提供参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于天津市蓟州区罗庄子镇,117°21′14″E,40°6′49″N,属暖温带半湿润季风型大陆性气候,

四季分明,年平均气温 11.5℃,年平均降雨量 678.6 mm,全年平均相对湿度 60%,年平均风速 2.2 m·s⁻¹。常年主导风向东南风,由于燕山山脉的屏障作用,加之沟谷幽深,山高坡大,故风力较缓、较弱;无霜期 195 d。区域土壤以潮土为主,主要乔木树种为侧柏(图 1)。

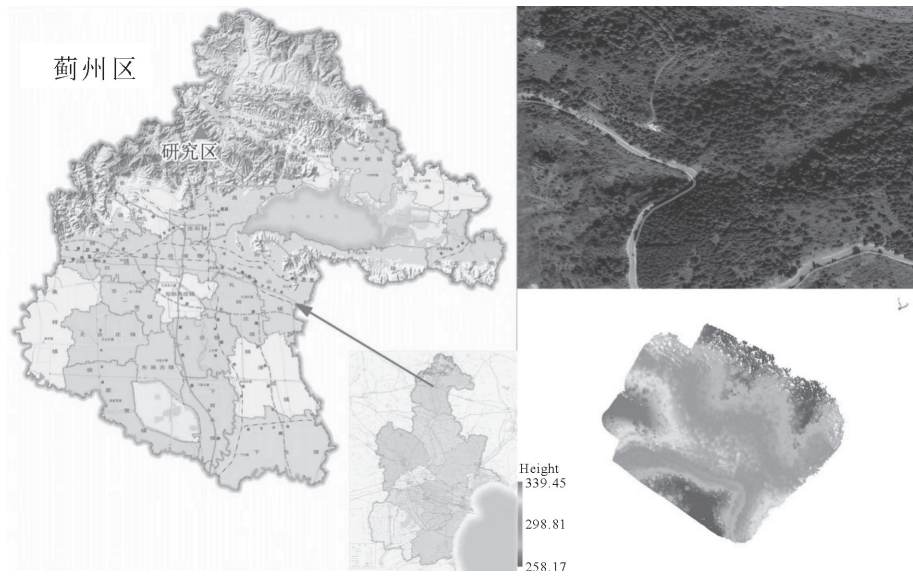


图 1 研究区概况图及采集点云数据
Fig. 1 Overview of the study area and collected point cloud data

1.2 数据获取

本研究采用的是经纬 M300RTK 无人机搭载禅思 LI 雷达镜头开展研究工作,主要包括研究区勘察、像控点布设及测量、航线规划及机载激光雷达系统测绘、室内数据处理分析等环节,具体设备参数如表 1。通过前期收集资料及实地踏勘后,对样地中的树木数量、树高及冠幅等信息进行测定,其中样地中共有树木 97 株。之后进行航线规划,对测区进行了机载雷达测量,数据采集时间为 2022 年 8 月 10 日,天气状况良好,飞行高度 80 m,激光旁向重叠率 50%,作业速度 8 m·s⁻¹,平均点密度为 981.31 点·m⁻²。

表 1 LiDAR 参数
Table 1 LiDAR parameters

参数类型	参数值
型号	禅思 L1
尺寸/mm	152×110×169
质量/kg	930±10
平面精度/cm	10
高程精度/cm	5
航向精度/(°)	0.08
俯仰精度/(°)	0.025
分辨率/ppi	1 280×960
回波数	3

1.3 数据处理

1.3.1 预处理 本次研究主要利用大疆智图(DJI Terra)软件进行航测数据处理生成数字正射影像(digital orthophoto map,DOM)及完成点云数据预处理,对机载激光雷达航摄获取的点云数据进行解算,并进行各航带数据的拼接工作,最后导出三维可视化激光点云数据^[13-15];将预处理后的点云数据加载到 LiDAR360 UAV(Green Valley Co.,中国)软件中进行处理,其中包括点云裁剪、重采样、点云去除噪点(图 2A)、滤波(图 2B)、点云归一化(图 2C)及图像增强(图 2D)等。为了验证不同点云密度对点云聚类分割的影响,首先对点云数据进行密度重分类,即从原始密度 100%分别抽稀到 50%、20%和 10%。点云去噪采用基于高斯去噪的方式将点云中的偏离点进行剔除,减小数字高程模型(DEM)制作过程中因噪点产生的影响。基于简单的物理过程模拟的地面滤波方法(CSF)采用地面滤波处理进行地面点的提取,将点云中地面点与非地面点分离。点云归一化是为了消除地形起伏对 DEM 值的影响,从而提高后续点云分割和回归分析的准确性。

1.3.2 CHM 模型生成 采用的是改进的渐进加密三角网滤波算法^[16](improved progressive TIN densification,IPTD)对点云中的地面点和非地面点

进行自动分类,通过种子点生成一个稀疏的三角网,然后通过迭代处理逐层加密,直至将所有地面点分类完毕。由于 LiDAR 扫描的点云密度较大,难以对地面点进行识别,因此采用基于中位地面点和分离低点的地形分类方式进行平滑处理。数字高程模型(DEM)是通过有限的地形高程数据实现对地面地形的数字化模拟,是通过不规则三角网插值的方

法进行模型生成。数字地表模型(digital surface model, DSM)反映了地表建筑物、桥梁和树木等高度的地面高程模型,是采用反距离权重插值算法生成的。冠层高度模型(CHM)是表示地表包括建筑物、树木和杂草等物体高度的高度模型,通过数字表面模型与数字高程模型的差值得到。

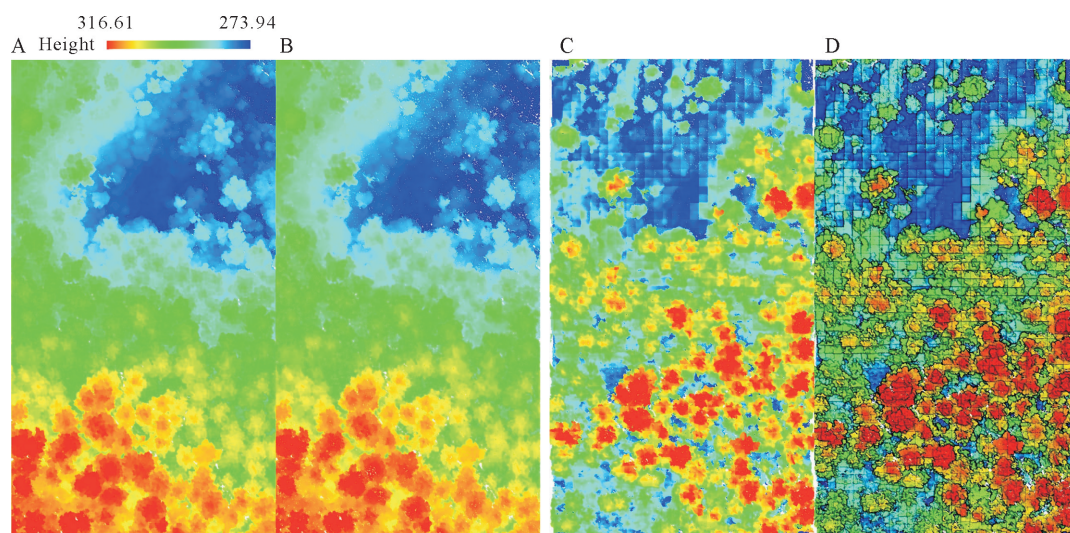


图 2 经过预处理的图像

Fig. 2 The pictures after pre-process

1.3.3 基于标记控制分水岭分割算法的单木分割

本研究主要采用基于标记控制分水岭分割算法^[17] (marked-controlled watershed segmentation, MCWS)进行 CHM 单木分割,这是一种基于拓扑理论的数字形态分割算法,其基本理论是将 CHM 的高点处视为山峰,低点处视为山谷,如果用水填充,不同山谷的水将开始汇合。为了避免这种情况,在水汇合的地方建立屏障,即不同的树冠边界,这些屏障将决定分割的结果。为了能够精确识别低矮植物冠层特征,提高高密度下林木分割的精确度,并且为了防止过分割,采用不同空间分辨率(0.1、0.3、0.5 和 1.0 m)来进行林木冠层分割,从而获取单木位置、树高、冠幅直径、冠幅面积和树木边界。同时为了减少 CHM 图像中产生的“孔洞”或“空值”,采用反距离权重插值(inverse distance weight, IDW)对“孔洞”进行平滑化填充处理,并对 CHM 图像进行增强效果处理,便于分离不同单木树冠^[18]。

1.4 精度分析

1.4.1 林木位置和数量分析 采用 3 个指标对实测林木与基于高分辨率正射影像与激光雷达点云三维形态目视解译数据之间的空间和数量关系进行衡量,主要通过以下公式开展精度分析。

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p} \times 100\% \quad (1)$$

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_N} \times 100\% \quad (2)$$

$$F = \frac{2 \times P \times R}{P + R} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P 代表单木分割精确率,表示正确检测单木数量占整个检测结果的比例; R 代表单木分割查全率,表示正确检测单木数量占真实树顶数量的比例; F 代表错分和漏分的总精度,是精确率和查全率的综合结果; T_p 是被正确分割的单木数量; F_p 是被错误分割的单木数量; F_N 是被遗漏的单木数量。

1.4.2 树冠提取分析 通过对比实测林木与目视解译数据之间的空间和数量关系,来评估两者空间匹配精度。按照前人研究^[9]所得,一般将两者识别精度分成 6 类^[9],分别为优识别(P_r),实测林木树冠和提取树冠的重叠面积超过两者自身面积的 50%;良识别(G_r),即实测林木树冠和提取树冠的重叠面积仅超过某一者面积的 50%;遗漏(M_i),即实测林木树冠和提取树冠的重叠面积低于 50%;合并(M_e),即实测林木树冠覆盖多个提取树冠,且至少 2 个提取树冠与实测树冠的重叠面积均超过提取树冠面积的 50%;分解(S_p),实测林木树冠覆盖多个提取树冠,且至少 2 个实测树冠与提取树冠的重叠面积均超过实测树冠面积的 50%;错误识别(W_r),树冠被错误提取,即 F_p 。

基于以上定义,通过准确率($A_R, \%$)、欠分割误差($O_E, \%$)和过分割误差($C_E, \%$)总体评价树冠提取精度,其计算公式如下

$$A_R = \frac{N_{Pm} + N_{Gm}}{N} \times 100\% \tag{4}$$

$$O_E = \frac{N_{Mi} + N_{Me}}{N} \times 100\% \tag{5}$$

$$C_E = \frac{N_{Sp} + N_{Wr}}{N} \times 100\% \tag{6}$$

式中: N_{Pm} 、 N_{Gm} 、 N_{Mi} 、 N_{Me} 、 N_{Sp} 、 N_{Wr} 分别为优识别、良识别、遗漏、合并、分解和错误识别下树冠的数量, N 为以上所有识别树冠的总和。

1.4.3 林木树高和冠幅精度分析 为了评估单木

分割后各林木结构特征的准确率,采用线性回归的方式对实测林木和参考林木进行验证,选用决定系数(coefficient of determination, R^2)和均方根误差(root mean square error, RMSE)分别评价实测林木和参考林木之间的相关性和误差。

2 结果与分析

2.1 数字高度模型(CHM)的生成

由图 3 可知,经过实地林分调查,本研究设置最低树高为 1 m 作为区分人工侧柏林树冠和低矮杂草、土壤的高度阈值,筛选树冠高度信息,剔除非树冠像素信息,从而生成冠层高度模型。

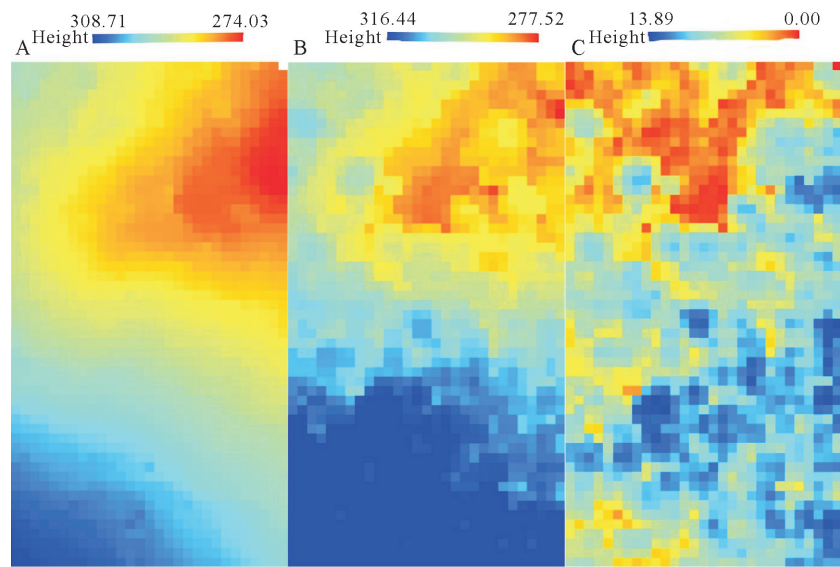


图 3 数字地形模型(A)、数字表面模型(B)和数字高度模型(C)

Fig. 3 Digital Elevation Model (A), Digital Surface Model (B) and Digital Height Model (C)

2.2 不同空间分辨率单木分割及精度检验

本研究通过选取空间分辨率为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 、 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 、 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 和 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 分析不同空间分辨率的 CHM 信息,分别绘制了单木分割结果(图 4a、图 4b、图 4c、图 4d)、效果(图 4e、图 4f、图 4g、图 4h)及精度分析图(图 5)。 P 均超过了 0.75,其中 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 空间分辨率下的精确率最高,其次为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 分辨率。 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 分辨率的 F 仅低于 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 分辨率。 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 分辨率下的单木分割 P 、 R 、 F 均最低,出现了部分单木未被检测的现象,遗漏分割现象较明显。

2.3 树冠提取及精度分析

通过将不同空间分辨率下的提取树冠和实际树冠进行轮廓叠加分析发现,两者在轮廓边缘上不能完全重叠(图 6、表 2),其树冠提取准确率随空间分辨率的增大呈现出先增高后降低的趋势,当空间分

辨率为 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 时,准确率达到最高。欠分割误差随空间分辨率的增大而逐渐增高,分辨率为 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 时欠分割误差最大为 23%,过分割误差则呈现相反的趋势,分辨率为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 时过分割误差最大为 24%。

表 2 不同空间分辨率下提取树冠与实际树冠的精度分析

Table 2 Precision analysis of extracted crown and referenced crown under different spatial resolutions

匹配结果及精度	空间分辨率/m			
	0.1	0.3	0.5	1.0
优识别 P_r	43	51	40	16
良识别 G_r	28	19	13	6
遗漏 M_i	3	3	8	2
合并 M_e	5	6	6	6
分解 S_p	3	6	3	1
错误识别 W_r	22	8	7	3
准确率 $A_R(\%)$	68	75	69	65
欠分割误差 $O_E(\%)$	8	9	18	23
过分割误差 $C_E(\%)$	24	14	13	12

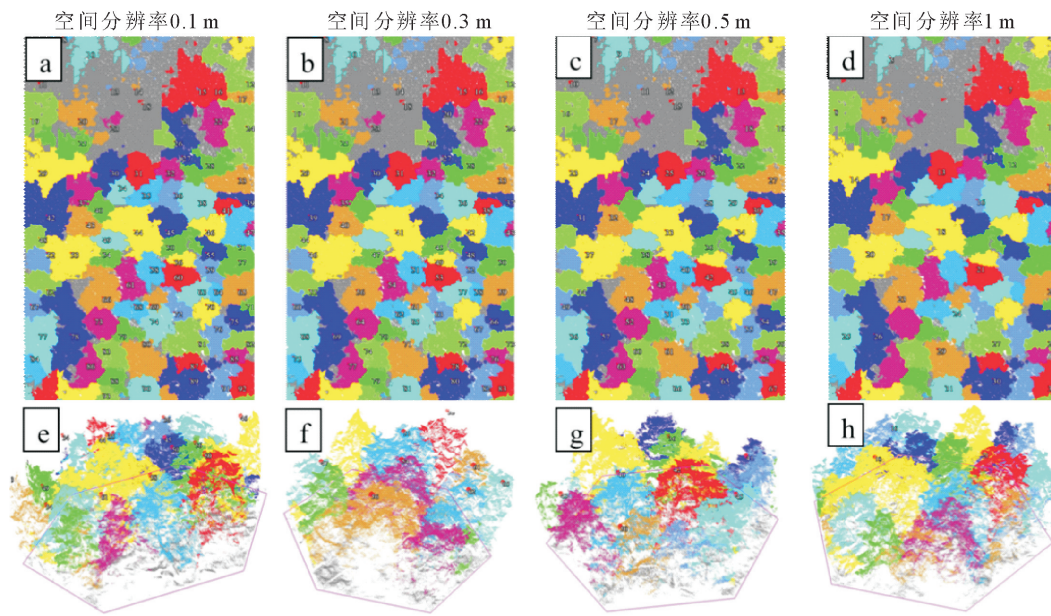


图4 不同空间分辨率下的单木分割效果

Fig. 4 Single tree segmentation effects under different spatial resolutions

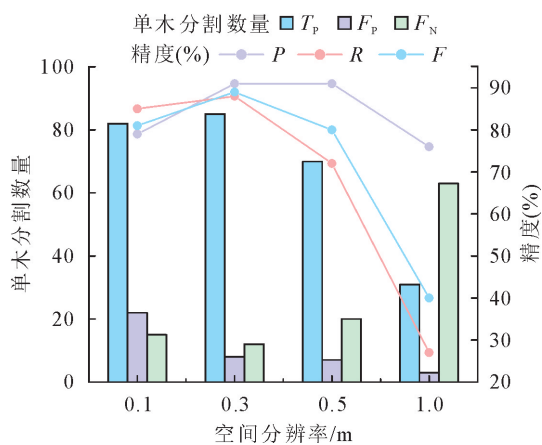


图5 不同空间分辨率下的单木分割精度分析

Fig. 5 Single tree segmentation precision analysis under different spatial resolutions

为了验证基于CHM方法提取树冠和树高信息的精确性,本研究对实测数据集和提取数据集进行线性拟合分析,结果如图7所示。其拟合结果 R^2 均 >0.6 ,随空间分辨率增大呈现先增高后降低的趋势,表现为 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 空间分辨率下的 R^2 最高为 0.8189 和 0.8371 , $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 分辨率下的 R^2 最低为 0.6179 和 0.6886 。同时RMSE呈相反趋势,表现为 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 空间分辨率下的RMSE最低为 3.8475 和 3.6915 , $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 分辨率下的RMSE最高为 4.8246 和 5.1576 。

2.4 点云密度对单木分割结果影响分析

为了验证点云密度对单木分割效果的影响,将点云数据从原始密度 100% (图8a、图8e)分别抽稀到 50% (图8b、图8f)、 20% (图8c、图8g)和 10%

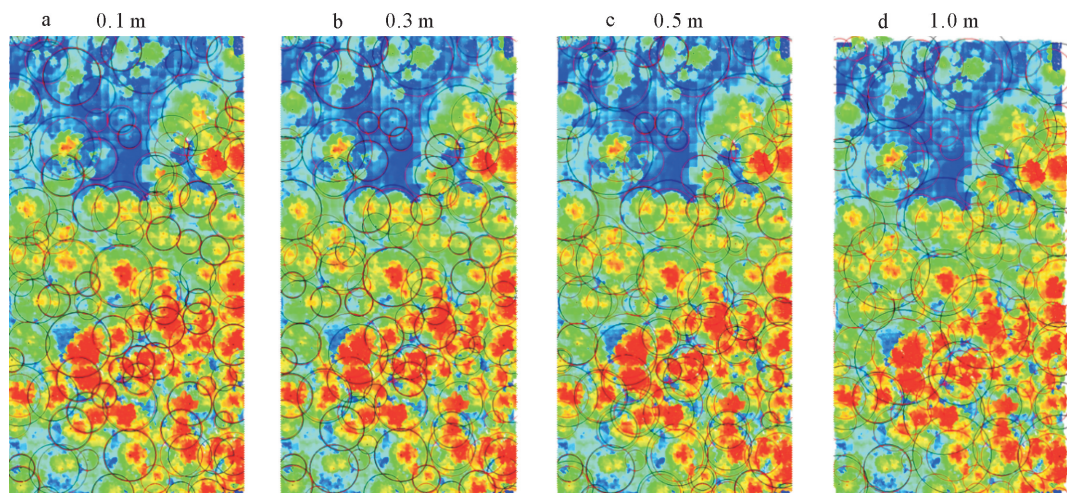


图6 不同空间分辨率下提取树冠与实际树冠的轮廓叠加

Fig. 6 Contours of the extracted crown and the actual crown be superposed under different spatial resolutions

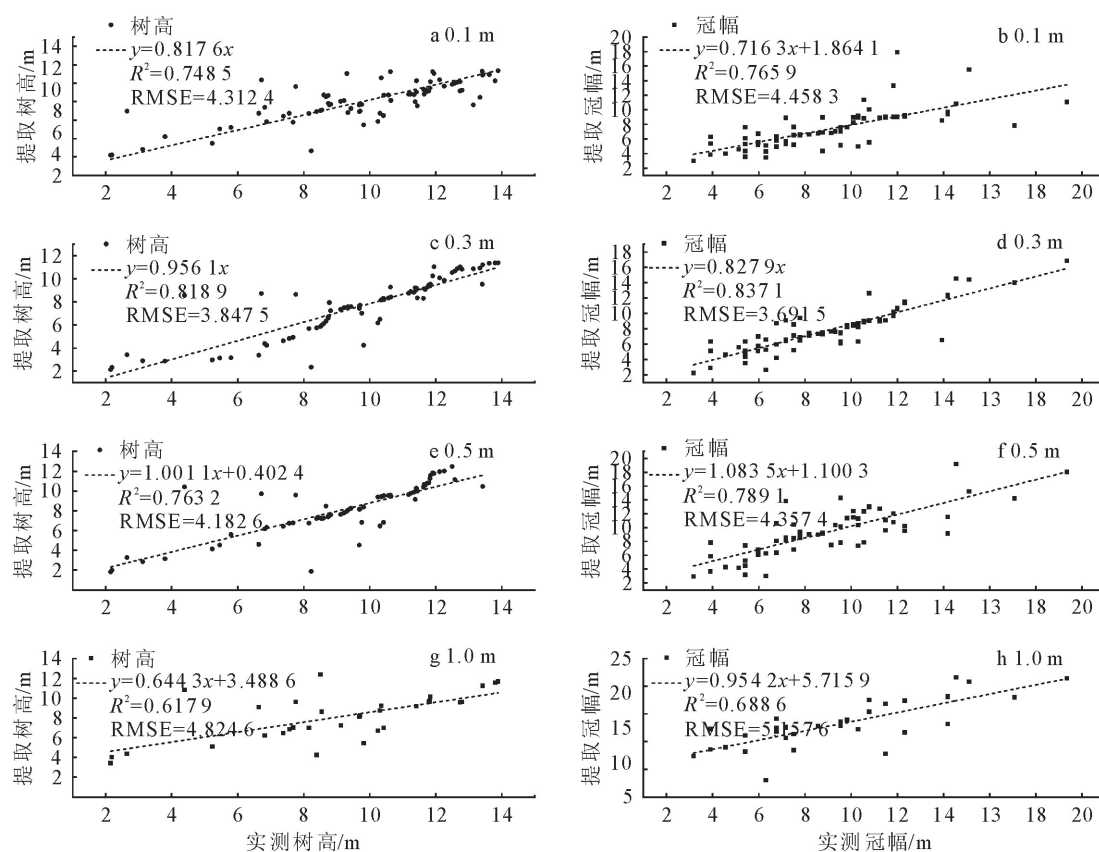


图7 提取数据集与实测数据集的线性拟合结果

Fig. 7 Linear fitting results of the extracted dataset and the actual dataset

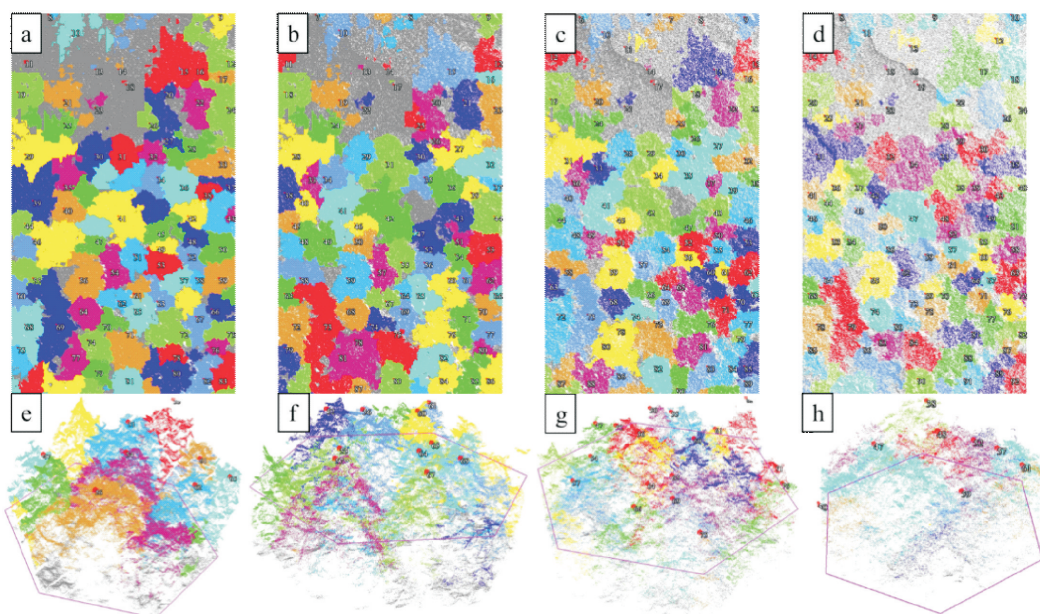


图8 不同点云密度下的单木分割结果

Fig. 8 Single tree segmentation results under different point cloud density

(图 8d、图 8h), 本研究将处理目标的空间分辨率设置为 $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 。由表 3 可以发现, 随着点云密度的降低, 单木数量的识别精度不断降低, 精度值随之下降, 其最高值为 100% 的点云密度, 其正确识别的树为 85 株, F 为 89%, 精度最低的识别结果为 10% 点

云密度, 正确识别的单木下降至 62 株, 其 F 为 73%。同时漏分和错分的单木的数量则呈增加趋势, 当点云密度为 100% 时, 其漏分和错分的单木数量分别为 12 株和 8 株, 当点云密度为 10% 时, 其漏分和错分的单木数量最高分别为 35 株和 10 株。

表 3 不同点云密度下单木分割结果的精度分析

Table 3 The precision analysis of single tree segmentation results under different point cloud density

点云密度(%)	T_p	F_p	F_N	P	R	F
100	85	8	12	91%	88%	89%
50	74	8	22	90%	76%	82%
20	68	9	29	88%	70%	78%
10	62	10	35	86%	64%	73%

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究探索了使用无人机载激光雷达技术获取单木分割信息的科学性与可行性,分析了空间分辨率和点云密度对单木分割和树冠提取结果的影响并评估了精确性。

1)基于无人机载激光雷达技术生成冠层高度模型可以准确分割人工侧柏林和提取树冠信息,总体上单木分割精确率均 $>75\%$,重叠严重或矮小的林木难以被检测到;树冠轮廓提取精确率均 $>65\%$,树冠之间的重叠、交叉会增加单木分割的难度;通过对实测树冠直径、树高与提取数据的回归分析,其决定系数均 >0.6 ,均方根误差均 <5.2 。

2)选择合适的空间分辨率有助于提高单木分割精度,当分辨率为 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 时单木分割和树冠提取结果均为最优。其中单木分割精确率为 91% ,树冠提取精确率为 75% ,回归分析的决定系数为 0.8189 和 0.8371 ,均方根误差为 3.8475 和 3.6915 。随着空间分辨率降低,单木分割精度和树冠提取精度均出现下降,出现欠分割现象;随着空间分辨率增大,单木分割数量甚至高于真实的林木数量,导致单木和树冠出现被多次分割的过分割现象。

3)单木检测与树冠提取的结果还受到点云密度的影响。本研究发现随着点云密度的降低,单木数量的识别精度不断降低,精度值随之下降,同时漏分和错分的单木的数量则呈增加趋势。当点云密度为 100% 时,其正确识别的树为 85 株, F 值为 89% ,当点云密度为 10% 时,正确识别的单木下降至 62 株,其 F 值为 73% 。

3.2 讨论

3.2.1 空间分辨率对单木分割结果影响分析 随着林业调查对测量精度要求的不断提高,推动了无人机激光雷达技术的更新发展。在应用于不同场景、不同尺度下的林业数据采集时,可调节的空间分辨率有助于更高的图像精度和细节识别。本研究通过分析空间分辨率 $0.1\text{ m}\times 0.1\text{ m}$ 、 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 、 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 和 $1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 下的CHM信息

和树冠提取信息发现,空间分辨率为 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 时,单木分割和树冠提取精度最高,该现象与陈日强等^[9]、Yin等^[19]提取果树单木树冠信息的结果一致。当空间分辨率过小时,单木分割精度和树冠提取精度均出现下降,原因可能是CHM处理过于平滑,图像细节难以有效识别,局部最高点模糊,导致遗漏分割的树冠信息增多,出现欠分割现象。当空间分辨率过大时,CHM信息存在过度处理的可能,导致冠层高度表面出现很多与真实冠层高度不相符的凹凸坑^[20-22],单木分割数量甚至高于真实的林木数量,在图像细节被扩大的同时,图像噪声进一步被放大,导致单木和树冠出现被多次分割的过分割现象。

3.2.2 点云密度对单木分割结果影响分析 树冠边界的确定不仅受到空间分辨率的影响,还受到点云密度的影响,树冠之间的重叠、交叉使得树冠边界变得模糊,同样增加单木分割的难度^[23-24]。通过对不同点云密度下的分割结果进行分析发现,单木分割精度随着点云密度的减少总体呈下降趋势,由 89% 下降到 73% ,点云密度越小,错分漏分现象越明显,于海洋等^[6]通过设置不同的点云密度验证点云分割结果的差异性表明了随着点云密度的降低,样地中被正确识别的单木数量逐步降低。由于人工林分种植有较高的郁闭度和林分密度,且株行距较小,同时缺乏相应的抚育管理措施,各个林木的树冠往往重叠严重,导致难以明确地区分树冠边界。点云密度过小时,图像细节识别能力较低,难以准确区分密集林木的树冠边界,容易将重叠部分划分为同一个林木,导致错分漏分现象严重,单木分割准确率也会降低。

参考文献:

- [1] HAN C, CHEN N, ZHANG C K, *et al.* Sap flow and responses to meteorological about the *Larix principis-rupprechtii* plantation in Gansu Xinlong mountain, Northwestern China[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 451: 117519.
- [2] HARPER A B, POWELL T, COX P M, *et al.* Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2938.
- [3] 陈鑫鑫. 基于深度学习的面向机载激光点云的单木分割算法研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2021.
- [4] 宋昊昕, 尤号田, 刘遥, 等. 基于深度学习的无人机多光谱图像柑橘树冠分割[J]. 森林工程, 2023, 39(3): 140-149. SONG H X, YOU H T, LIU Y, *et al.* Deep learning-based segmentation of Citrus tree canopy from UAV multispectral images[J]. Forest Engineering, 2023, 39(3): 140-149. (in Chinese)
- [5] 黄志鑫. 基于背包 LiDAR 点云数据的林木胸径与树高提取[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- [6] 刘浩然, 范伟伟, 徐永胜, 等. 基于无人机激光雷达点云数据的单木分割研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(1):

- 45-53.
- [7] 张翔,刘洋,玉山,等.基于无人机激光雷达和多光谱数据的森林树高提取方法研究[J].森林工程,2023,39(1):29-36.
ZHANG X,LIU Y,YU S,*et al.* Research on extraction method of forest tree height based on unmanned aerial vehicle LiDAR and multispectral data[J]. Forest Engineering, 2023, 39(1):29-36. (in Chinese)
- [8] 于海洋,冯思伟,申洋洋,等.无人机载激光雷达人工林单木分割算法研究[J].激光与红外,2022,52(5):757-762.
YU H Y,FENG S W,SHEN Y Y,*et al.* Research on single tree segmentation algorithm of UAV-based LiDAR plantation [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(5):757-762. (in Chinese)
- [9] 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.
CHEN R Q,LI C C,YANG G J,*et al.* Extraction of crown information from individual fruit tree by UAV LiDAR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22):50-59. (in Chinese)
- [10] 李平昊,申鑫,代劲松,等.机载激光雷达人工林单木分割方法比较和精度分析[J].林业科学,2018,54(12):127-136.
LI P H,SHEN X,DAI J S,*et al.* Comparisons and accuracy assessments of LiDAR-based tree segmentation approaches in planted forests[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(12):127-136. (in Chinese)
- [11] VEGA C, HAMROUNI A, EL MOKHTAN S, *et al.* PTrees: A point-based approach to forest tree extraction from LiDAR data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 33:98-108.
- [12] WANG X H, ZHANG Y Z, XU M M. A multi-threshold segmentation for tree-level parameter extraction in a deciduous forest using small-footprint airborne LiDAR data[J]. Remote Sensing, 2019, 11(18):2109.
- [13] ANGIULLI F, BASTA S, PIZZUTI C. Distance-based detection and prediction of outliers[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 18(2):145-160.
- [14] ANGIULLI F, BASTA S, LODI S, *et al.* Distributed strategies for mining outliers in large data sets[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2012, 25(7):1520-1532.
- [15] ZHEN Z, LIN D Q, LIAN J Z. Trends in automatic individual tree crown detection and delineation—evolution of LiDAR data[J]. Remote Sensing, 2016, 8(4):333.
- [16] ZHAO X Q, GUO Q H, SU Y, *et al.* Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 117:79-91.
- [17] BARNES C, BALZTER H, BARRETT K, *et al.* Individual tree crown delineation from airborne laser scanning for diseased larch forest stands[J/OL]. Remote Sensing, 2017, 9(3):231.
- [18] 王鑫运,黄杨,邢艳秋,等.基于无人机高密度 LiDAR 点云的人工针叶林单木分割算法[J].中南林业科技大学学报,2022,42(8):66-77.
WANG X Y, HUANG Y, XING Y Q, *et al.* The single tree segmentation of UAV high-density LiDAR point cloud data based on coniferous plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2022, 42(8):66-77. (in Chinese)
- [19] YIN D M, WANG L E. Individual mangrove tree measurement using UAV-based LiDAR data: possibilities and challenges[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 223:34-49.
- [20] 郭昱杉,刘庆生,刘高焕,等.基于标记控制分水岭分割方法的高分辨率遥感影像单木树冠提取[J].地球信息科学学报,2016,18(9):1259-1266.
GUO Y S, LIU Q S, LIU G H, *et al.* Extraction of single tree crown from high resolution remote sensing image based on marker-controlled watershed segmentation [J]. Journal of Geoinformation Science, 2016, 18(9):1259-1266. (in Chinese)
- [21] 全迎,李明泽,甄贞,等.运用无人机激光雷达数据提取落叶松树冠特征因子及树冠轮廓模拟[J].东北林业大学学报,2019,47(11):52-58.
QUAN Y, LI M Z, ZHEN Z, *et al.* Extraction of characteristic factors of Larch crown and simulation of crown contour using UAV Lidar data [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(11):52-58. (in Chinese)
- [22] LI W K, GUO Q H, JAKUBOWSKI M K, *et al.* A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2012, 78(1):75-84.
- [23] 骆钰波,黄洪宇,唐丽玉,等.基于地面激光雷达点云数据的森林树高、胸径自动提取与三维重建[J].遥感技术与应用,2019,34(2):243-252.
LUO Y B, HUANG H Y, TANG L Y, *et al.* Automatic extraction and 3D reconstruction of forest tree height and DBH based on ground Lidar point cloud data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(2):243-252. (in Chinese)
- [24] 霍达,邢艳秋,田昕,等.基于机载 LiDAR 的四次多项式拟合法估测单木冠幅[J].西北林学院学报,2015,30(3):164-169.
HUO D, XING Y Q, TIAN X, *et al.* Quadric polynomial fitting method for estimating single wood crown amplitude based on airborne LiDAR [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(3):164-169. (in Chinese)