

联合空地LiDAR的红树林单木生长参数提取方法

张菁锐^{1,2}, 任广波¹, 吴培强^{1*}, 张程飞^{1,3}, 刘善伟², 马毅^{1,2}

1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580;

3. 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590

摘要: 红树林是生长于热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落, 是重要碳汇生态系统。激光雷达 (Light Detection And Ranging, LiDAR) 是获取林木三维结构参数进行生物量估算的重要技术手段。针对仅利用机载LiDAR难以完整描述出红树林三维结构的问题, 本文以广东湛江英罗港和广西茅尾海红树林保护区为研究区, 利用无人机载和手持式LiDAR获取的点云数据, 提出了一种红树冠层下部约束聚类分割方法, 实现了对木榄、红海榄、桐花树等不同类型红树的单木分割以及树高、冠幅的提取, 并与传统单木分割算法进行了对比分析。结果表明: 联合空地LiDAR数据, 本文提出的单木分割算法在不同类型红树单木分割中均取得了最高的单木检出率, 较传统的冠层高度模型分割法提升了13.4%~26.7%。有效提高了红树树高的提取精度, 三种红树树高参数提取值与实测值之间的R²提高了1.8%~42.2%, RMSE减少了3.4%~55.3%。红树冠幅分割结果存在提取值偏小的规律, 将能够表征红树冠层交叠密集程度的点云密度变量作为修正因子, 经修正, RMSE降低14.52%~53.33%。

关键词: 遥感, 红树林, 激光雷达, Hough变换, 点云聚类算法, 单木分割, 三维结构参数, 树冠偏冠性

中图分类号: TP79

引用格式: 张菁锐, 任广波, 吴培强, 张程飞, 刘善伟, 马毅. XXXX. 联合空地LiDAR的红树林单木生长参数提取方法. 遥感学报, XX(XX): 1-14

ZHANG Jingrui, REN Guangbo, WU Peiqiang, ZHANG Chengfei, LIU Shanwei, MA Yi. XXXX. Extraction method of mangrove single tree growth parameters based on combinational Airborne-Ground LiDAR. National Remote Sensing Bulletin, DOI: 10.11834/jrs.20233148]

1 引言

红树林是生长在热带、亚热带海陆生态系统交错带的木本群落 (Lin等, 2001), 受周期性潮水浸淹, 兼具海陆生态系统的特征, 在海陆碳循环中具有重要作用 (Li等, 2014), 能够净化海水、保护海洋生物多样性, 同时更是强大的防护林, 能够促淤造陆, 防风消浪, 作为最具特色的湿地生态系统, 也是开展科学研究、生态教育的重要场所, 具有很高的生态服务价值 (Han等, 1998; Li等, 2005)。由于红树林生境土壤受海水浸淹处于积水缺氧状态, 分解速率慢, 因此红树林能有效地存储碳 (Su等, 2020), 是世界广泛共

识的重要碳汇生态系统 (Thorsten等, 2006; Lin等, 1990), 在减缓气候变化中具有重要作用。但受人类开发活动的影响, 红树林生存环境不断恶化, 面积锐减 (Pan等, 2021; Wu等, 2013), 红树林一旦消失, 近海生态系统碳储也将锐减, 因此红树林保护与碳储量量化监测研究迫在眉睫, 聚焦遥感技术驱动红树林蓝碳潜力估算研究, 是实现我国双碳目标的积极举措, 而地上生物量正是衡量生态系统碳储量和碳汇能力的重要评估因子 (Zhu等, 2011)。

红树林地上生物量估算需获取精准的单木胸径、树高等林分生长参数。目前针对红树林结构参数的获取主要依托于现场测量, 而现场工作往

收稿日期: XXXX-XX-XX; 预印本: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号:20225YFC3105100); 自然资源卫星遥感业务支持服务体系(编号:12116800000190033); 中国高分辨率对地观测专项资助项目(编号:41-Y30F07-9001-20/22)

第一作者简介: 张菁锐, 研究方向为红树林遥感监测研究。E-mail: zhangjr0216@163.com

通信作者简介: 吴培强, 研究方向为红树林遥感监测研究。E-mail: wu1416@163.com

往受环境条件影响,存在成本高、效率低且难以顾及全局。遥感技术成为红树林监测的有效手段(Wang等,2019),为准确实现区域分布的红树林地上生物量估算提供了数据和技术支撑,对红树林生态系统的保护修复和国家双碳战略的落实具有重要意义。相较于传统的被动光学遥感监测(Taureau等,2019; Xu等,2022; Lei等,2022; Hu等,2022),激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)技术能更准确获取单木三维结构参数,逐渐成为林业遥感研究中的重要技术手段,但对于冠层交叠、根系错乱的复杂红树林生境,如何提高点云分割精度成为当前的研究难点。

激光扫描技术一般分为航空激光扫描(Airborne Laser Scanning, ALS)和地面激光扫描(Terrestrial Laser Scanning, TLS)。ALS能够提供精细的林木冠层信息,基于冠层高度模型(Canopy Height Model, CHM)的单木分割是目前应用最为广泛的机载LiDAR点云分割方法,主要通过检索局部最大值确定树冠顶点,再基于树冠顶点进行聚类(Hyyppä等,2001; Popescu等,2003; Lei等,2022; Zhao等,2016)。但由于不同树种之间生长形态不同,有研究利用树梢和树干的互补性,结合树干探测提高树冠点检测精度(Mongus等,2015),而在红树林的相关研究应用中,ALS无法探测到树干点云,因此有学者提出了单木分层分区距离判别聚类分割方法(Wu等,2022),一定程度上提高了单木分割精度。由于红树林群落生长密集、冠层交错严重,机载LiDAR难以实现高精度的单木分割,而TLS能够精准的获取到中下层树冠和树干点信息,从而提高林木单木分割的精度。有研究表明基于地基LiDAR完整的高质量树干点云,可以通过判断树干周围点云的归属进行单木分割(Shendryk等,2016; Burt等,2019),在此基础上,有学者通过对树干和树冠分别分割后进行匹配,实现行道树完整单木的分割提取(Li等,2022);而对于复杂结构的林木群落,有研究提出基于体素进行单木分割,降低了复杂森林结构带来的不确定性(Fan等,2022)。但面对红树林群落复杂的生长形态,仅利用TLS获取的林下点云无法实现陆地森林植被中的高精度单木分割效果,因此如何结合空地LiDAR数据进行精确单木分割成为LiDAR技术在红树林应用中亟待推进的研究内容。

因此,本文以广东湛江英罗港和广西钦州茅尾海红树林自然保护区为研究区,通过无人机载LiDAR获取冠层顶端信息,联合手持式LiDAR冠层下部信息对单木分割进行约束,分别使用无人机载点云和融合点云数据进行单木分割并提取参数,对比现场实测数据,从分割和提取精度来验证空地LiDAR数据联合的红树单木分割方法的优劣,探究激光雷达在海岸带生态保护系统中的适用性,为红树林生物量估算及碳汇能力评估提供了技术和数据支撑。

2 研究区与数据源

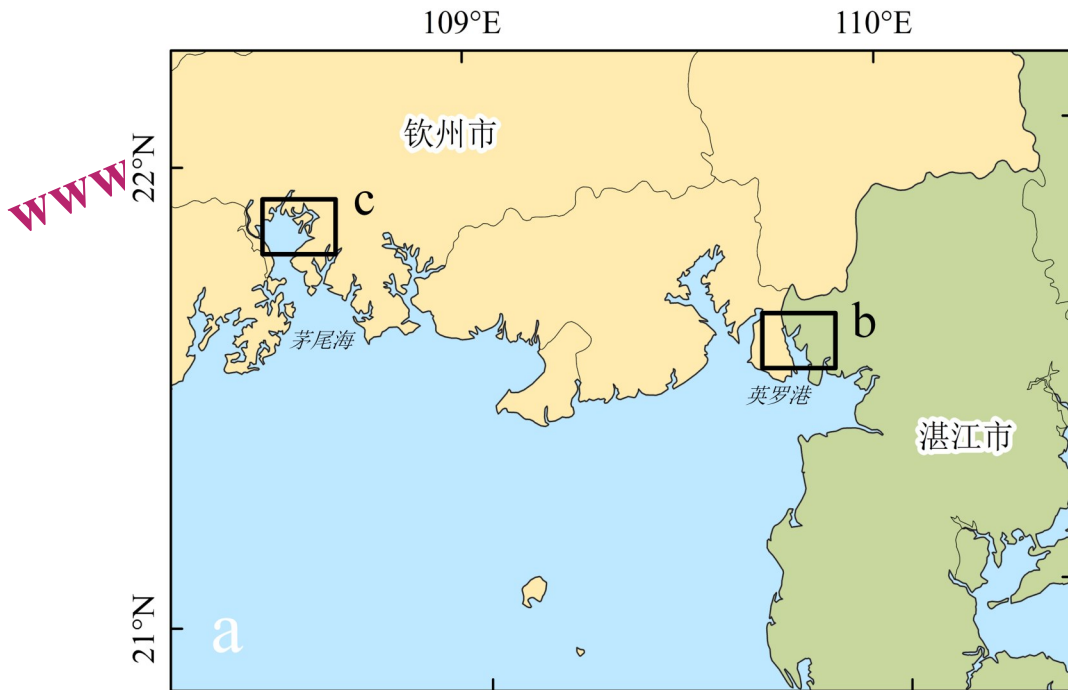
2.1 研究区概况

研究区1位于我国广东省湛江市西北部的英罗港(109°45′-109°48′E, 21°29′-21°36′N)(图1b),英罗港区域日照充足,年平均气温23.4℃,年平均降水量为1500-1700mm,盐度约30-33.1‰,主要优势种包括木榄、红海榄和无瓣海桑等;研究区2位于我国广西壮族自治区钦州湾北部的茅尾海(108°28′-108°37′E, 21°46′-21°54′N)(图1c),年平均气温为22.1℃,年均降水量为2170.9mm,盐度约17-20‰,其优势物种为桐花树。两个区域均属于亚热带季风型海洋性气候,适宜的气候和海水盐度为红树林的生长创造了必要的环境条件。近年来我国建立了各级红树林保护地52个,研究区选为广西茅尾海保护区内唯一优势种桐花树的分布区以及广东英罗港保护区内具有较大面积和单木生物量的优势种红海榄和木榄的分布区,所选研究区代表我国典型红树单木结构的成熟红树人工林。

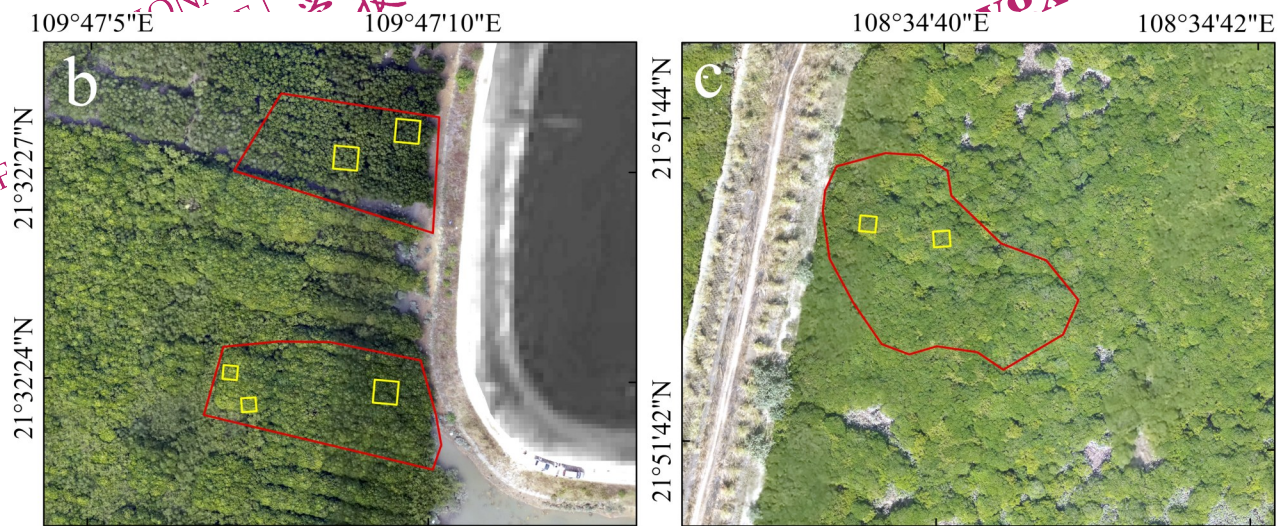
2.2 数据与处理

2.2.1 LiDAR数据

本文分别于2020年12月7日和2021年11月4日低潮时获取研究区内的ALS数据和TLS数据。其中,ALS数据采集使用无人机搭载蜂鸟Genius激光雷达系统,提供了高精度高密度的激光雷达点云数据,实验飞行高度为60m左右,研究区样地点云数据密度10pts·m⁻²以上;TLS数据采用的是GeoSLAM ZEB-HORIZON手持式激光扫描仪,设备测距精度小于3cm。激光雷达数据详细参数见表1。



(a) 英罗港和茅尾海地理位置;
 (a) Location of Yingluo Bay and Maowei Sea;



□ 现场样方 □ 手持式LiDAR范围

(b)研究区1, 英罗港(c)研究区2, 茅尾海
 (b)Study area 1, Yingluo Bay(c)Study area 2, Maowei Sea

图1 研究区地理位置

Fig 1 Geographical location of the study area

手持式和无人机载 LiDAR 数据在采集过程中, 容易受到低空飞行器 (如鸟类) 和多路径误差影响而存在一些噪点, 需要经过滤波算法去除高低位粗差噪点 (Qiu 等, 2021)。去噪后需根据地面点对数据进行点云归一化处理以消除地形起伏对单木分割产生的影响。由于数据采集方式不同,

两种点云数据之间存在一定的定位误差, 为了消除数据间的几何偏差, 使两种数据与实际研究区在地理空间坐标系中对应, 采用同名像点将两种 LiDAR 数据进行配准。两个研究区内点云配准时的同名点 z 坐标误差小于 0.015m, 平面误差小于 0.14m, 总误差均小于 0.17m (表 2)。

表1 激光雷达系统参数

Table 1 The parameters of LiDAR system

类型	手持式激光雷达	无人机载激光雷达
激光波长	905nm	905nm
最大测距	30m	200m
采样频率	43.2kHz	320kHz
扫描视角	270°*360°	360°*30°

2.2.2 现场数据

研究区的现场样本采集工作于2021年11月开展，样地点位布设于信号良好位置，保证经纬度测量时达到固定解。现场调查站点分布如图1所示。根据行业标准结合现场调查中不同红树生长密度和状态，同时考虑到数据的分辨率，将现场调查样方设置为3m×3m、5m×5m两种尺度大小，共布设7个样方，树种主要包括桐花树、木榄、红

海榄。其中由于红海榄根系分叉多且发散，采用5m×5m的样方进行数据采集；桐花树和木榄测量3m×3m大小样方能够代表区域内红树的形态。对每个样方内的红树进行每木检尺，获取树高、胸径、基径、冠幅等三维结构参数（表3）以及站点的经纬度位置、红树类型、现场照片等信息。

表2 激光雷达数据配准误差(m)

Table 2 LiDAR data registration error (m)

研究区	同名像点	Dx	Dy	Dz	误差
广西	P1	0.098	0.137	0.003	0.169
	P2	-0.076	-0.001	0.001	0.076
	P3	-0.022	-0.136	-0.004	0.138
广东	P1	0.102	0.004	0.015	0.104
	P2	-0.094	0.021	-0.015	0.098
	P3	-0.008	-0.025	-0.001	0.027

表3 研究区红树林现场调查信息

Table 3 Field survey information on mangroves in the study area

树种	样方数	样方内株数/株	统计量	样方内红树林现场调查信息				
				植株数/株	胸径/cm	基径/cm	树高/m	冠幅/m
木榄	3	33	min	9	2.64	3.41	3.35	1.1*1.2
			mean	11	5.16	12.1	5	1.75*2.12
			max	15	8.28	27.22	6	2.57*3.15
红海榄	2	18	min	8	3.18	6.05	3.37	1*1.5
			mean	9	5.66	11.1	4.27	1.99*2.41
			max	10	13.82	15	5.1	2.49*3.07
桐花树	2	24	min	12	2.23	3.18	3.2	0.75*0.8
			mean	12	5.27	9	3.5	1.16*1.44
			max	12	10.5	16.87	4	2.2*3

3 研究方法

3.1 基于冠层下部约束单木分割方法

本文利用LiDAR360的CHM分割算法对红树林进行了单木分割，分割过程中阈值的选择和林木类型对树冠顶点的确定均产生影响，存在单木欠分割和过分割的情况。针对其局限性，本文提出了基于冠层下部约束单木分割法（图2）。

红树单木树干提取与相对位置确定如图3所示，基于手持式LiDAR数据，根据林木胸径、基径测量高度及现场不同种红树生长状态，通过阈值法选取合适的范围对红树树干点云进行提取（图3-a），图3以木榄为例，按0.1的阈值将树干

点云从0.2~1.3m处进行分层提取，选取0.3~0.4m部分（图3-b、c），通过Hough变换拟合红树树干截取部分直径从而确定单木数量和相对位置（图3d、e）。由于红海榄根系向下分叉，枝叶向上分叉的结构特点，在树干点云中选取沿根部形状向上至无分叉部分（高程约0.8~0.9m处）进行拟合；桐花树枝干分叉处高程较低，因此分层阈值选取0.2~0.3m。对于无人机载LiDAR点云，采用LiDAR360软件中的CHM生成种子点算法获取冠层高点信息。

基于两种点云数据获取的较为准确的红树冠层高点、株数和相对位置信息，本文提出基于冠层下部信息对种子点进行约束，在样地内相对准

确的单木株数限制下,通过分析红树单木相对位置点和大量冠层高点之间的相对关系确定单木树冠顶点,生成种子点进行单木聚类分割。如图4所示,左图为融合点云正视图,右图为相同位置的点云俯视图,图中红色圆点A-E为基于手持式LiDAR点云提取树干后拟合获得的红树单木相对位置点,蓝色圆点a-k为利用机载LiDAR点云基于CHM获取的冠层高点,在基于CHM生成种子点过程中,增大范围阈值,无差别地获取大量冠层高点。以图示小区域内A树为例,从俯视图中可以看出A树范围内存在不止一个冠层高点,约束过程从单木位置点A开始,以A点为中心,分别计算每一个冠层高点(a, b, c...)与A点之间竖直方向和水平方向上的欧氏距离(图4中的暗红色虚线所示),若距离最小,则该点被认为是与单木位置点A最相近的冠层高点,即树A的树冠最高点,在分割中能够更好聚类拟合所有应属于树A的点云;同理遍历所有单木位置点(B, C, D...),基于位置点对所有冠层高点的选择进行约束,未被选择的冠层高点点和冗余点将被删除,仅保留每株单木最相近的树冠顶点作为单木分割种子点。欧氏距离(Euclidean Distance)是最常用到的距离计算公式,用于衡量多维空间中各个点之间的绝对距离,n维空间中数据点x, y之间的欧氏距离公式如下:

$$D(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

式中 x_i 、 y_i 是数据点n维坐标。

最后根据所获取的种子点进行聚类分割。无人机载LiDAR点云通常使用区域生长算法进行单木分割(Li等, 2013)。该算法先取种子点为树的顶点,从顶点向下开始进行区域增长,间距超过阈值的点从目标树中剔除,按此方法从高到低对树木进行分割。而本文分割试验中使用的融合点云密度高,因此采用密度噪声空间聚类算法(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)作为单木聚类分割算法,DBSCAN通过搜索每个数据点的邻域,如果点p的邻域包含多于阈值的点,则以p为核心创建一个簇,然后迭代聚集从核心p直接密度可达的对象,当没有新的点添加到任何簇时,迭代过程结束。

聚类分割后提取单木三维结构特征参数,对于每株单木点云,取其最大的nDSM值为树高;基于单木点云树冠边缘线计算单木冠幅。

3.2 精度评价

本文从单木分割精度和参数提取精度两个方面对单木分割进行精度评价(Zhu等, 2022)。单木分割精度评价指标为检出率R(%),表示正确分割的单木占实测单木总数的比例;参数提取精度评价指标为均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和决定系数 R^2 ,通过比较分割结果提取的参数 X_i 和实测参数 x_i 之间的偏差和拟合程度进行精度评价。计算公式如下:

$$R = \frac{n_{match}}{n_{actual}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n_{match}} \sum_{i=1}^n |X_i - x_i| \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{match}} (x_i - \bar{x}_i)(X_i - \bar{X}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_{match}} (x_i - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{match}} (X_i - \bar{X}_i)^2}} \quad (5)$$

式中 n_{match} 为分割单木正确的株数; n_{actual} 为实测单木总数; \bar{x}_i 为实测单木参数的平均值; \bar{X}_i 为提取单木参数的平均值。

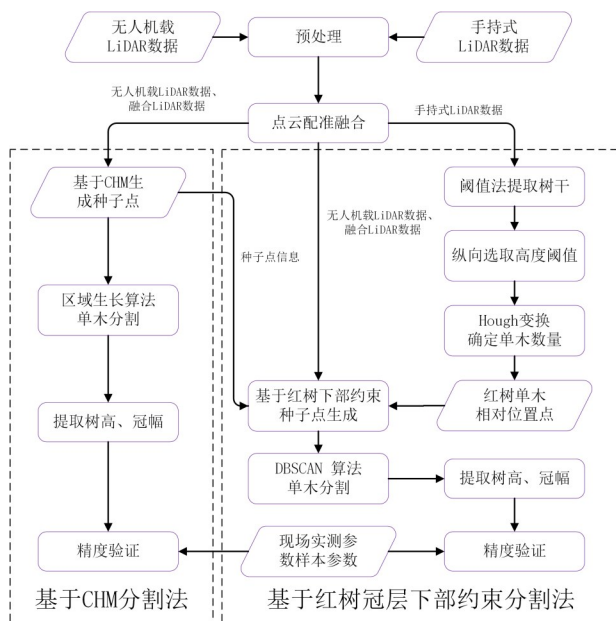
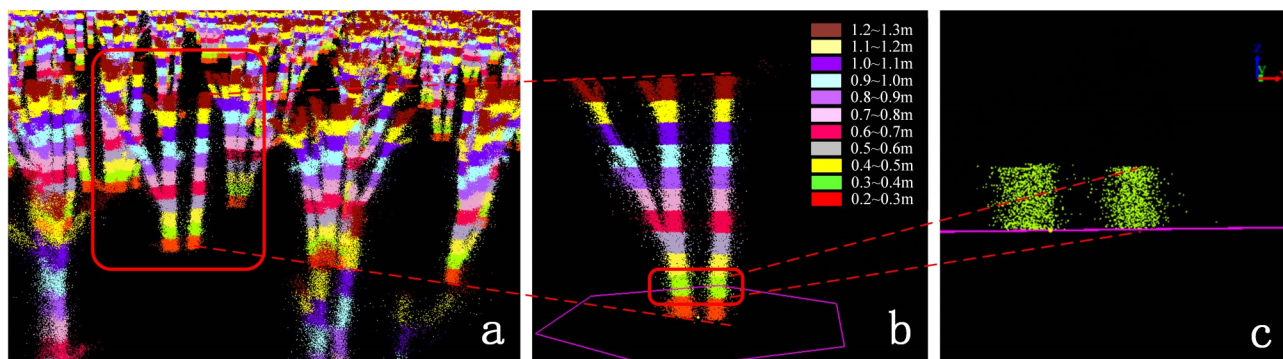
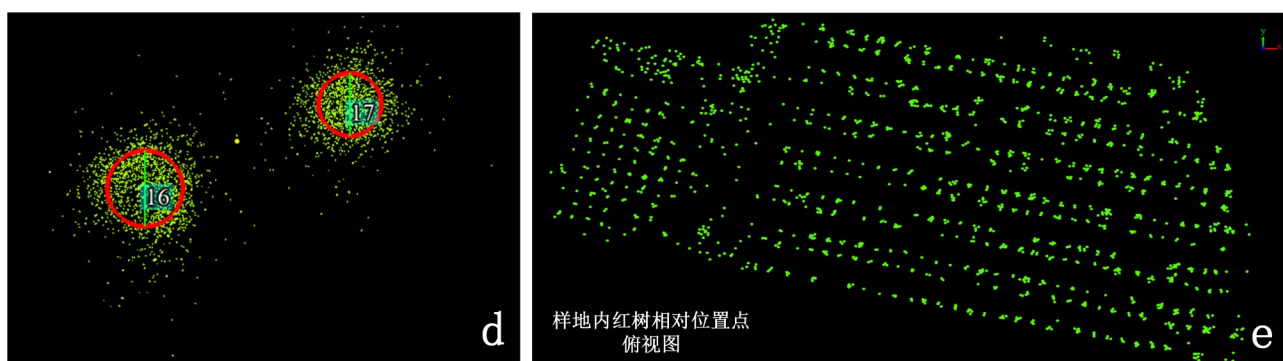


图2 单木分割试验流程

Fig 2 Single wood segmentation test process



(a)Trunk extraction(b)Schematic diagram of trunk layering (single)(c)Hierarchical point cloud extraction
 (a)树干提取(b)树干分层示意图(单木)(c)分层点云提取



(d)Fit the location point(e)The relative position point of the mangrove within the plot
 (d)拟合位置点(e)样地内红树相对位置点

图3 红树单木枝干提取及相对位置点确定

Fig 3 Single wood stem extraction of mangrove and relative position point determination

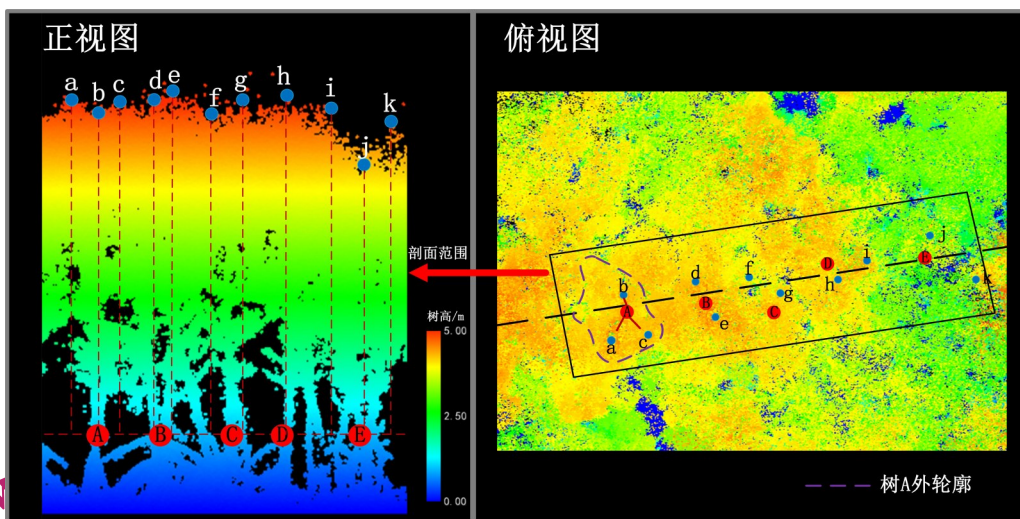


图4 基于冠层下部约束算法原理

Fig 4 The principle of algorithm based on lower canopy constraint

4 结果与分析

4.1 单木分割结果与分析

根据采集的LiDAR点云数据，选取分布较为

规律整齐且单株特征明显的木榄、根系交错复杂的红海榄以及成簇分布的桐花树等三种生长结构特征较为典型的红树类型开展单木结构分割方法研究，并与传统的基于CHM单木分割法的分割结

果进行对比分析(表4)。

7块样地实测三种红树单木共75株,其中木榄33株,红海榄18株,桐花树24株。如表4所示,使用无人机载LiDAR点云基于CHM对红树进行单木分割仅检出正确的红树单木共27株,总体检出率为36%,其中除了红海榄单木检出率为66.7%,其他红树单木检出率均未达到30%,主要因为研究区红海榄单株冠层顶端形状特征明显,无人机载LiDAR能够准确探测到树冠细节。由此可以看出无人机载LiDAR点云对冠层起伏较小、林下结构复杂的红树分割不占优势;而融合手持式LiDAR点云能够对缺失的信息进行补充。由表4可知,使用融合点云的CHM总体检出率提升了9.3%,共检出红树34株,其中三种红树检出率比仅使用无人机载LiDAR点云提升了4.2%~15.2%,但桐花树由于成簇生长且枝干密集,单株与单株之间距离较小,分割过程较其他红树种类复杂,因此单木检出仍存在一定的难度。

表4 单木检出率

红树种类	分割方法	基于CHM分割		基于冠层下部约束分割	
		机载点云	融合点云	机载点云	融合点云
木榄	检出数	9株	14株	15株	20株
	漏检数	24株	19株	18株	13株
	检出率	27.3%	42.4%	45.5%	60.6%
红海榄	检出数	12株	13株	14株	15株
	漏检数	6株	5株	4株	3株
	检出率	66.7%	72.2%	77.8%	83.3%
桐花树	检出数	6株	7株	8株	12株
	漏检数	18株	17株	16株	12株
	检出率	25%	29.2%	33.3%	50%
总体	检出数	27株	34株	37株	47株
	漏检数	48株	41株	38株	28株
	检出率	36%	45.3%	49.3%	62.7%

注:加粗部分为基于冠层下部约束对融合点云进行分割后的单木检出精度。

利用本文提出的红树冠层下部约束对融合点云进行单木分割时精度最高,总检出率达62.7%,共检出正确单木47株,其中三种红树检出率均达到50%以上,较其他三种实验方案的单木检出率有明显大幅提升。通过分析发现,本文提出的红树冠层下部约束无论应用于无人机载点云还是融

合点云,均能显著提高单木检出率,主要因为红树林复杂的林下条件和冠层密度,导致无人机载LiDAR穿透冠层的点云数量较少;而红树林根系交错,枝干倾斜的生长特点导致仅依靠无人机载LiDAR点云获取CHM进行单木分割局限性较大,冠层顶部高点信息冗余,仅能正确分割出较高且冠层特征明显的优势木;而提出的基于手持式LiDAR获取红树冠层下部信息约束聚类分割法通过大量丰富的林下枝干位置信息,能够准确获取样地内红树单株之间相对位置及株数,使用其对无人机载LiDAR点云冠层信息进行约束时,能够较准确分离出无人机载LiDAR点云CHM中的次高点冗余,提高红树单木检出率。

基于分割结果,可提取整个研究区的红树单木树高、冠幅等生长参数,图5所示为分割后单木的冠幅矢量和树高。其中基于约束对红树林融合点云单木分割直观结果如图6所示。

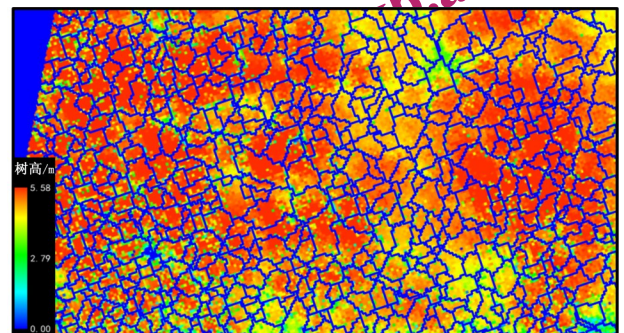


图5 单木冠幅和树高

Fig 5 Single wood crown width and height

4.2 树高提取结果与分析

对4.1中分割正确的红树单木进行树高参数提取,由红树林树高提取精度(表5、图7)可知,基于融合点云分割比单一机载点云分割出的单木树高提取精度高,在基于冠层下部约束进行单木分割时,融合点云比机载点云树高提取精度 R^2 提升了0.222~0.3372, RMSE降低了0.01~0.2515m。总体来看,仅使用无人机载LiDAR点云基于CHM进行分割后提取树高的精度较差,主要原因是在采集无人机载LiDAR点云时,受中下密集冠层遮挡,获取到的地面点较少,由于红树的生物特性与其他林系不同,林下支柱根在地面上交错,部分反射接收到的点云被误认为是地面点,因此导致树高值不准确;融合点云数据通过融入具有丰

富准确林下地表情况信息的手持式 LiDAR 点云数据, 对地面点进行补充, 分割后的三类红树树高提取值的精度均有明显提升, R^2 均达到 0.55 以上。提取结果中桐花树树高提取值的 R^2 和 RMSE 略低于其他红树, 主要由于桐花树的树高较低, 呈簇状分布且冠层起伏较小, 导致桐花树单株之间树高差异小, 因此树高提取值与实测值的拟合程度差但 RMSE 小。

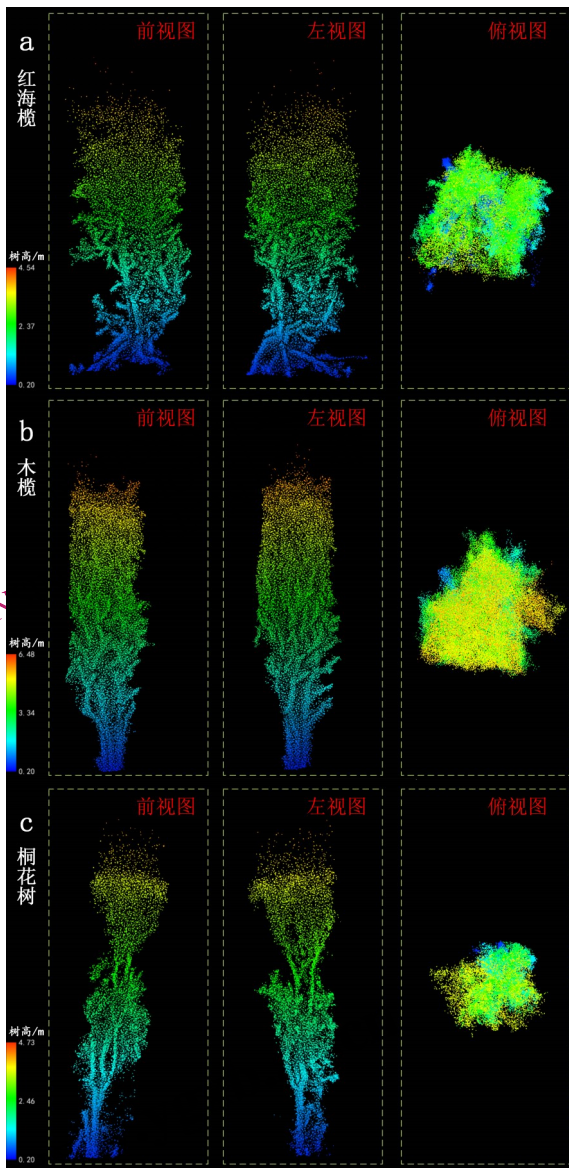


图6 单木效果图

Fig 6 Renderings of single wood divisions

从树高提取值与实测值的拟合程度和均方根误差来看, 基于本文提出的冠层下部约束对融合点云分割出的红树单木树高提取效果最好, 三种红树树高提取值 R^2 均大于 0.6, RMSE 小于 0.22m。

对两种点云数据进行分割时, 本文提出的基于冠层下部约束分割法较传统的 CHM 分割法而言, R^2 最高提升了 0.1, 主要因为传统的 CHM 分割法是基于植被的冠层高度按一定密度阈值获取最高点作为单木树冠顶点, 但受所选择阈值的限制, 普遍存在将树冠次高点划分为另一株单木的树冠顶点和无法识别发育完全的矮树树冠顶点等现象。本文提出的基于冠层下部约束分割法通过手持式 LiDAR 点云提取冠层下枝干相对位置和样地内株数信息, 通过分析枝干相对位置点和冠层最高点之间的相对关系和利用样地内相对准确的单木株数对树冠顶点个数的约束, 有效提高了红树单木分割和树高提取精度。

4.3 冠幅提取结果与分析

冠幅是指树木整个的宽度, 即树木南北和东西方向宽度的平均值, 通常用来表示整个树木的规格, 是衡量树木长势的参考标准。本文对分割正确的红树单木直接提取其冠幅大小, 三种红树的冠幅散点图如图 9 中黑色圆点所示, 可以看出红树单木分割后的冠幅提取误差较大。经过分析发现, 点云进行单木分割后提取的冠幅参数具有比实测值偏小的规律, 主要原因是红树林群落密度比其他森林群落大, 红树间冠层相互穿插交叠, 存在严重的遮挡现象, 而点云分割算法是基于拓扑原理的数学形态分割, 无法通过算法将树冠交叠处不同株所属点云分离。另一方面, 由于红树林的林分密度大, 受光照不均及树之间的挤压作用, 导致相邻红树间存在树冠偏冠性 (Geng 等, 2018)。

有研究表明, 单木分割提取的冠幅误差与生长密度之间具有一定相关性 (Geng 等, 2018; Huo 等, 2015)。本文选取各类红树单木 50% 作为训练集, 将 LiDAR 点云数据从低到高切片, 提取每层回波数的比例就是相应的密度变量 (Density Metric), 分析两者相关性并进行线性拟合 (图 8), 结果表明冠幅提取误差与点云密度变量存在显著相关性, 呈现密度越高误差逐渐增大的趋势。因此, 基于线性拟合模型构建出不同种红树冠幅提取值误差修正式, 用于修正单木提取的冠幅值。

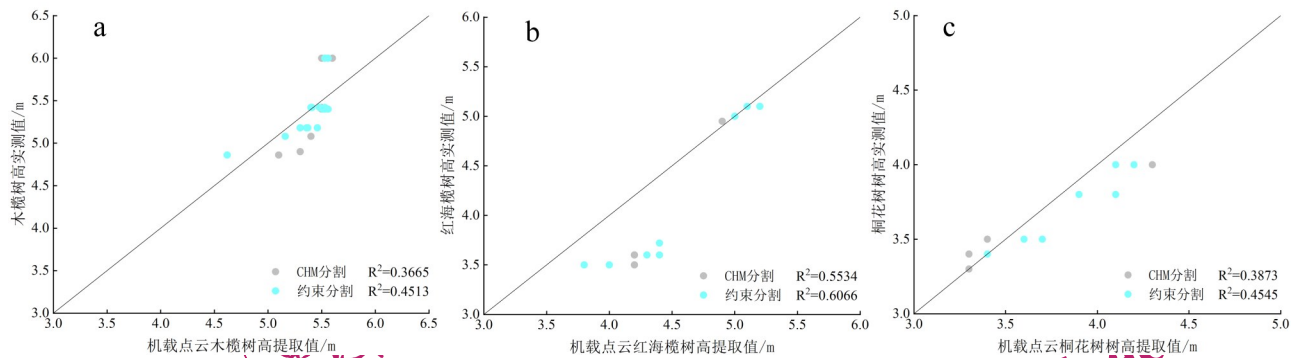
$$\text{木榄: } CD_{\text{correct}} = CD_{\text{extract}} \pm (16.887X - 1.3115)$$

$$\text{红海榄: } CD_{\text{correct}} = CD_{\text{extract}} \pm (3.6283X + 0.0444)$$

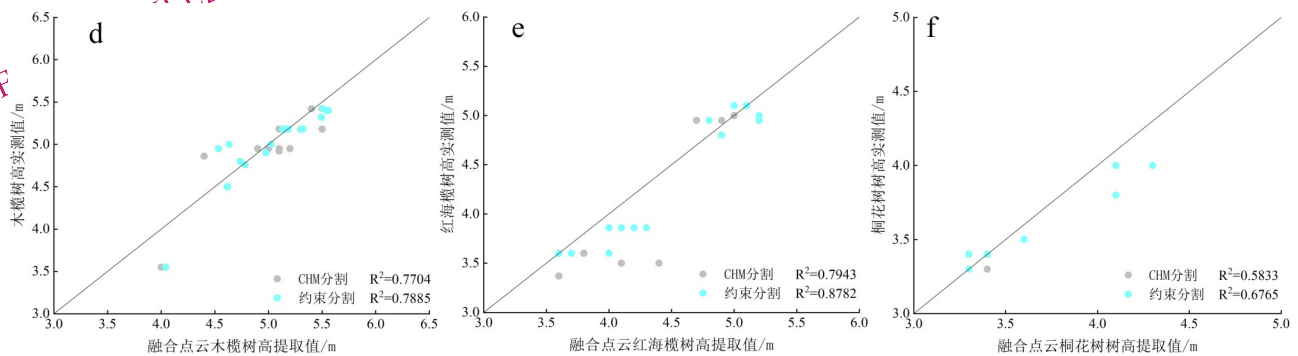
表 5 树高提取精度
Table 5 Tree height extraction accuracy

分割方法	数据	R ²			RMSE/m		
		木榄	红海榄	桐花树	木榄	红海榄	桐花树
基于CHM分割	机载点云	0.3665	0.5534	0.3873	0.6957	0.4903	0.2198
	融合点云	0.7704	0.7943	0.5833	0.2198	0.3406	0.1690
基于冠层下部约束分割	机载点云	0.4513	0.6066	0.4545	0.2177	0.4707	0.1732
	融合点云	0.7885	0.8782	0.6765	0.1934	0.2192	0.1633

注: 加粗部分为基于冠层下部约束对融合点云进行分割后的树高参数提取精度。



(a)机载点云木榄提取结果(b)机载点云红海榄提取结果(c)机载点云桐花树提取结果;
(a)ALS *Bruguiera gymnorrhiza* Extraction Result (b)ALS *Rhizophora stylosa* Extraction Result (c)ALS *Aegiceras corniculatum* Extraction Results;



(d)融合点云木榄提取结果(e)融合点云红海榄提取结果(f)融合点云桐花树提取结果
(d)Fusion Data *Bruguiera gymnorrhiza* Extraction Results (e)Fusion Data *Rhizophora stylosa* Extraction Results (f)Fusion Data *Aegiceras corniculatum* Extraction Results

图 7 树高提取值精度

Fig 7 Tree height extraction accuracy

桐花树: $CD_{correct} = CD_{extract} \pm (0.6927X + 0.0212)$

式中, $CD_{correct}$ 为修正后的冠幅提取值, $CD_{extract}$ 为原始冠幅提取值, X 为红树单木点云密度变量。

基于修正式对验证集内不同红树冠幅提取值进行修正, 修正精度如表 6、图 9 所示, 修正后不同类型红树单木提取的冠幅值误差明显降低, 均方根误差均小于 0.5, 各红树类型精度提升率达到

45% 以上。在冠幅提取过程中, 木榄的误差最大, 达到了 0.6957m, 主要是因为研究区的木榄冠层属于典型的密集交错, 且树高比较均匀, 冠层之间遮挡现象比其他种类红树更为明显, 分割后的单木在冠幅交错区点云缺失严重, 导致较多冠幅提取值偏小。木榄在修正后误差降低最多, RMSE 降低了 0.3148m, 精度提升率达到了 45.25%; 而红海榄的误差提升率最高, 达到了 53.33%。由图 9 可知,

修正式在不同种红树中均得到了较好的应用，经过修正后的冠幅提取值与冠幅实测值更为接近。

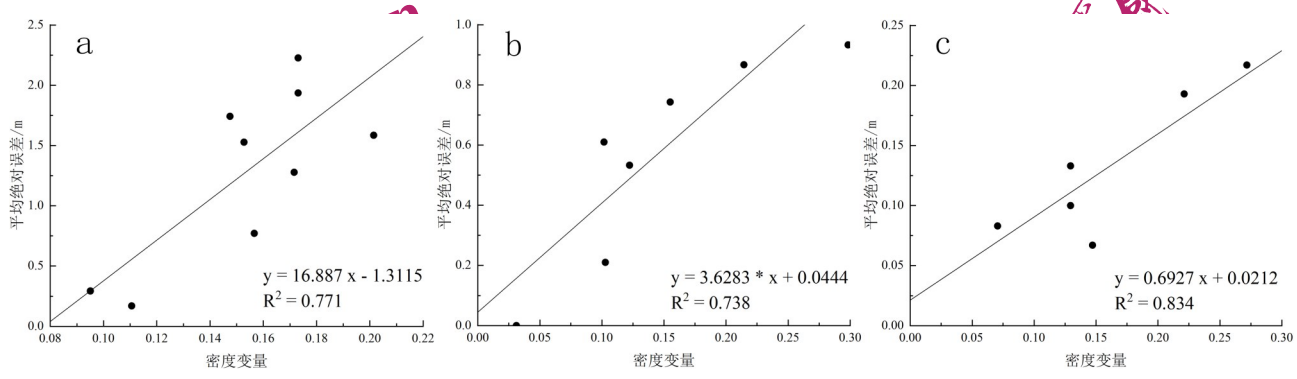


图8 红树冠幅提取值平均绝对误差与密度变量的相关性分析
 Fig 8 Correlation analysis between mean absolute error of mangrove canopy extraction and density variable
 (a)木榄; (b)红海榄; (c)桐花树
 (a) Bruguiera gymnorrhiza; (b) Rhizophora stylosa; (c) Aegiceras corniculatum

表6 单木冠幅提取值修正效果

Table 6 Correction effect of single tree crown extraction

误差修正前后	木榄	红海榄	桐花树
修正前RMSE(m)	0.6957	0.4851	0.1290
修正后RMAE(m)	0.3809	0.2264	0.0700
精度提升率(%)	45.25	53.33	45.74

NATIONAL REMOTE SENSING BULLETIN
 遥感学报

www.ygxb.ac.cn

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL REMOTE SENSING BULLETIN
 遥感学报

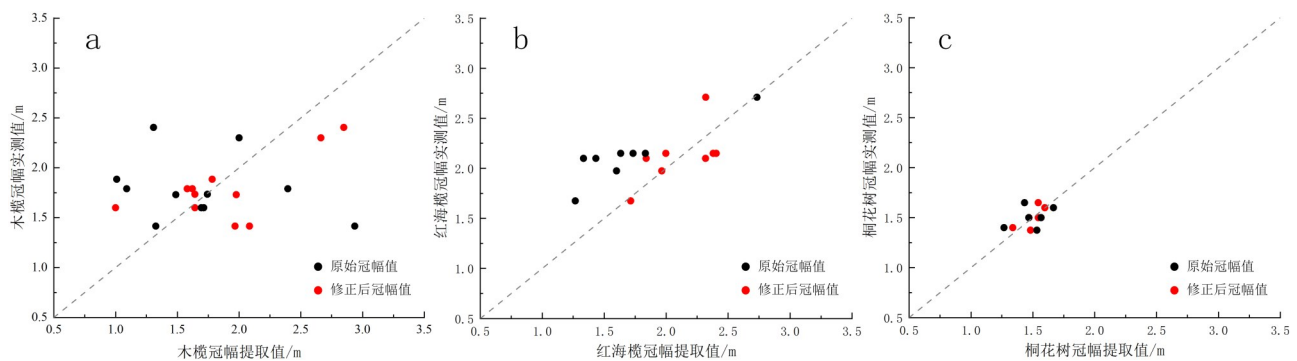


图9 不同种类红树冠幅修正后散点图

Fig 9 Scatter plots of different mangrove canopies after correction

(a)木榄; (b)红海榄; (c)桐花树

(a) *Bruguiera gymnorrhiza*; (b) *Rhizophora stylosa*; (c) *Aegiceras corniculatum*

5 讨论

受现场数据采集条件的限制, 本文所使用的无人机载和手持式激光雷达点云数据分别于2020年12月和2021年11月采集获取, 现场调查于2021年11月开展, 2022年11月补充获取了木榄和红海榄的样方数据各一数据, 采集时间最大跨度为2年。但由于研究区位于北部湾沿岸, 这里盐度约20~23‰, 缺少淡水补充, 高盐环境下红树生长速度比其他地方更慢一些 (Deng等, 2022), 而且由于样地内红树已经是成熟稳定状态的红树, 年生长量很小。有研究表明, 沿海深水裸滩年变化约1~2cm (Cheng等, 2016), 但研究区自然保护区的红树林多生长于沿岸养殖塘, 滩涂高程年变化几乎可以忽略不计。但后续数据采集时仍需注意尽量采集同一时期的红树林数据。

不同密度的无人机载 LiDAR 点云所获取的高度、强度等变量有差异, 密度更高的无人机载 LiDAR 点云能够获取更丰富的红树冠层信息和更准确的树高、冠幅数据, 一定程度上能提升红树林单木分割精度, 本研究使用的无人机点云密度较低, 融合点云的红树林冠层上部信息有限, 在后续研究中可考虑使用不同密度的无人机载 LiDAR 与手持式 LiDAR 点云进行数据融合, 量化讨论密度对分割精度的影响, 获取更精确的红树林三维结构参数。由于红树林生态系统的结构特殊, 生长密集, 样地复杂程度高, 导致单木分割检出率和参数提取精度都无法达到陆地植被的高精度; 同时 LiDAR 采集过程较为困难, 数据量仅能用于单木和样地尺度研究, LiDAR 技术如何更

好应用于红树林生态系统的相关研究中, 仍需不断探索发现。

6 结论

本文通过联合空地 LiDAR 点云, 提出红树冠层下部约束聚类分割方法, 并进行单木分割精度和参数提取精度评价。得出以下结论:

(1) 本文提出的基于红树冠层下部约束的单木分割方法能够较准确地识别出红树单木, 该约束分割法在不同种红树单木分割研究中均能够较准确去除最高点冗余, 提升红树单木检出率。应用于融合点云数据的总单木检出率最高, 能够提升13.4%~26.7%, 最高达到62.7%。

(2) 联合使用手持式和无人机载 LiDAR 可以比单一 LiDAR 观测模式数据获取的树高、冠幅等结构信息更精确、更全面, 能够更好地应用于红树林生态系统三维结构研究和生物量参数获取等方面。空地 LiDAR 点云数据融合后, 对基于冠层下部约束的分割结果进行树高提取, 不同红树的树高提取精度较单一数据相比均有提升, R^2 提高了1.8%~42.2%, RMSE 减少了34%~55.3%。

(3) 基于单木分割结果, 红树单木冠幅的提取值普遍偏小, 通过提取点云数据的特征参数并与提取值平均绝对误差进行相关性分析发现, 表征红树冠层交叠密集程度的密度变量与平均绝对误差的线性相关性最强, 基于此对冠幅提取值进行修正后 RMSE 降低了45.25%~53.33%。

参考文献 (References)

Burt A, Disney M and Calders K. 2019. Extracting individual trees

- from lidar point clouds using Treeseq. *Methods in Ecology and Evolution*, 10,438-445 [DOI:10.1111/2041-210X.13121]
- Cheng J L. 2016. Study on mangrove afforestation technology on deep-water mudflat Shuidong Harbor. Southwest University (成家隆). 2016. 水东湾深水裸滩红树林造林技术研究. 西南大学
- Deng J W, Fan Y C, Zhang Q, Tao J, Zhang Y L and Huang S G. 2022. Application of airborne LiDAR in the estimation of the mean height of mangrove stand. *Remote Sensing for Natural Resources*, 34(3): 129-137 (邓静雯, 田义超, 张强, 陶进, 张亚丽, 黄升光. 2022. 机载LiDAR在红树林林分平均高估算中的应用. 自然资源遥感, 34(03): 129-137 [DOI:10.6046/zrzyyg.2021237])
- Fan G, Xu Z, Wang J, Nan L, Xiao H, Xin Z and Chen F. 2022. Plot-level reconstruction of 3D tree models for aboveground biomass estimation. *Ecological Indicators*, 142, 109211 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109211]
- Geng L, Li M Z, Fan W Y and Wang B. 2018. Individual tree structure parameters and effective crown of the stand extraction base on airborne LiDAR data. *Forestry Science*, 54(07): 62-72 (耿林, 李明泽, 范文义, 王斌. 2018. 基于机载LiDAR的单木结构参数及林分有效冠的提取. 林业科学, 54(07): 62-72 [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20180707])
- Han W D and Gao X M. 1998. Strategy of the mangroves conservation in Zhanjiang. *Guangdong Forestry Technology*, 1998(03): 18-22 (韩维栋, 高秀梅. 1998. 湛江红树林的保护策略. 广东林业科技, 1998(03): 18-22)
- Hu Y B, Ren G B, Ma Y, Yang J F, Wang J B, An J B, Liang J, Ma Y Q and Song X K. 2022. Coastal wetland hyperspectral classification under the collaborative of subspace partition and infinite probabilistic latent graph ranking. *Sci China Tech Sci*, 65:
- Huo D. 2015. Study on inversion of forest parameters based on airborne LiDAR. Northeast Forestry University (霍达. 2015. 基于机载LiDAR反演森林参数的研究. 东北林业大学)
- Hyyppa J, Kelle O, Lehtikoinen M and Inkinen M. 2001. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(5),969-975 [DOI:10.1109/36.921414]
- Lei L, Yin T, Chai G, Li Y, Wang Y, Jia X and Zhang X. 2022. A novel algorithm of individual tree crowns segmentation considering three-dimensional canopy attributes using UAV oblique photos. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112,102892 [DOI:10.1016/j.jag.2022.102893]
- Lei P. 2022. Research on individual tree structure parameter estimation of mangrove based on UAV LiDAR. Guilin University of Technology (雷鹏. 2022. 基于无人机激光雷达的红树林单木结构参数估测研究. 桂林理工大学 [DOI:10.27050/d.cnki.gglgc.2022.000284])
- Li J, Cheng X and Xiao Z. 2022. A branch-trunk-constrained hierarchical clustering method for street trees individual extraction from mobile laser scanning point clouds. *Measurement*, 189: 110440 [DOI:10.1016/j.measurement.2021.110440]
- Li N, Chen P M and Qin C X. 2014. Study on the relationship among growth factors and biomass of common mangroves in Guangdong province. *Guangdong Agricultural Science*, 41(09): 63-68 (李娜, 陈丕茂, 秦传新. 2014. 广东省常见红树植物生长因子之间的关系及生物量研究. 广东农业科学, 41(09): 63-68 [DOI:10.16768/j.issn.1004-874x.2014.09.0440])
- Li W, Guo Q, Jakubowski M K and Kelly M. 2012. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78(1),75-84 [DOI: 10.14358/PERS.78.1.75]
- Li X J, Jing Y X, Chen G Z and Ren Y L. 2005. Advances on polluted ecology and purification effect of mangrove wetland system. *Wetland Science*, 2005(04): 315-320 (李晓菊, 靖元孝, 陈桂珠, 任延丽. 2005. 红树林湿地系统污染生态及其净化效果的研究概况. 湿地科学, 2005(04): 315-320 [DOI:10.13248/j.cnki.wetlandsci.2005.04.012])
- Lin P. 2001. A review on the mangrove research in China. *Journal of Xiamen University (Natural Science Edition)*, 2001(02): 592-603 (林鹏. 2001. 中国红树林研究进展. 厦门大学学报(自然科学版), 2001(02): 592-603)
- Lin P, Lu C Y, Wang G L and Chen H X. 1990. Biomass and productivity of *Bruguiera Sexangula* mangrove forest in Hailian Island, China. *Journal of Xiamen University (Natural Science Edition)*, 29(2): 209-213 (林鹏, 卢昌义, 王恭礼, 陈焕雄. 1990. 海莲红树林的生物量和生产力. 厦门大学学报(自然科学版), 29(2): 209-213)
- Mongus D and Zalik B. 2015. An efficient approach to 3D single tree-crown delineation in LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 219-233 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.08.004]
- Pan L H, Shi X F, Fan H Q, Li B, Tao Y C, Song C, Su Z N and Tan X R. 2021. Analysis of Mangrove Mortality Due to Rapid Kaolinite Deposition Caused by Reclamation in Tieshan Bay, Guangxi. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 37 (03): 270-278 (潘良浩, 史小芳, 范航清, 李斌, 陶艳成, 宋超, 苏治南, 谭星儒. 2021. 广西铁山港围填海导致的高岭土快速沉积致红树林死亡原因分析. 广西科学院学报, 37(03): 270-278 [DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20210928.012])
- Popescu S C, Wynne R H and Nelson R F. 2003. Estimating plot-level tree heights with LiDAR: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37,71-95 [DOI:10.1016/S0168-1699(02)00121-7]
- Qiu Q, Zhang W G, Wang L, Cao S S and Sun W. 2021. Estimation of single wood factors of *Picea schrenkiana* var. *tianshanica* Forest Based on Backpack LiDAR. *Forestry Resource Management*, 2021(02): 99-109 (邱琴, 张文革, 王蕾, 曹姗姗, 孙伟. 2021. 基于背包式激光雷达的天山云杉林单木因子估测. 林业资源管理, 2021(02): 99-109 [DOI:10.13466/j.cnki.lyzygl.2021.02.014])
- Shendryk I, Broich M, Tulbure M G and Alexandrov S V. 2016. Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest. *Remote Sensing of Environment*, 173, 69-83 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.008]

- Su Z N, Qiu G L, Fan H Q and Fang C. 2020. Seagrass beds store less carbon but support more macrobenthos than mangrove forests. *Marine Environmental Research*, 162 [DOI: 10.1016/j.marenvres.2020.105162]
- Taureau F, Robin M, Poisy C, Fromard F, Imbert D and Debaine F. 2019. Mapping the mangrove forest canopy using spectral unmixing of very high spatial resolution satellite images. *Remote Sensing*, 11(3): 367. [DOI:10.3390/rs11030367]
- Thorsten D, Norbert H, Gerhard K and Rubén J. 2006. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(1): 72-76. [DOI: 10.1029/2005GB002570]
- Wang L, Jia M M, Yin D M and Tian J Y. 2019. A review of remote sensing for mangrove forests: 1956 – 2018. *Remote Sensing of Environment*, 231. [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111223]
- Wu P Q, Ren G B, Zhang C F, Wang H, Liu S W and Ma Y. 2022. Fine identification and biomass estimation of mangroves based on UAV multispectral and LiDAR. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(06): 1169-1181 (吴培强, 任广波, 张程飞, 王浩, 刘善伟, 马毅. 2022. 无人机多光谱和LiDAR的红树林精细识别与生物量估算. 遥感学报, 26(06): 1169-1181 [DOI: 10.11834/jrs.0221484])
- Wu P Q, Zhang J, Ma Y and Li X M. 2013. Remote sensing monitoring and analysis of the changes of mangrove resources in China in the past 20 years. *Advances in marine science*, 31(3): 406-414 (吴培强, 张杰, 马毅, 李晓敏. 2013. 近20a来我国红树林资源变化遥感监测与分析. 海洋科学进展, 31(3): 406-414)
- Xu W M, Yang H, Li Z H, Cheng J P, Lin H T and Yang G J. 2022. Single tree segmentation in close-planting orchard using UAV digital image. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 47(11): 1906-1916 (徐伟明, 杨浩, 李振洪, 程金鹏, 林哈特, 杨贵军. 2022. 利用无人机数码影像进行密植型果园单木分割. 武汉大学学报(信息科学版), 47(11): 1906-1916 [DOI:10.13203/j.whugis.20220024])
- Zhao X, Guo Q, Su Y and Xue B. 2016. Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117,79-91 [DOI:10.1016/j.isprsjprs.2016.03.016]
-)(J F, Liu Q W, Cui X M and Zhang W B. 2022. Extraction of individual tree parameters by combining terrestrial and UAV LiDAR. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(14): 51-58 (朱俊峰, 刘清旺, 崔希民, 张文博. 2022. 地基与无人机激光雷达结合提取单木参数. 农业工程学报, 38(14): 51-58 [DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2022.14.007])
- Zhu K F, Liao B W and Zhang J E. 2011. Studies on the biomass of mangrove plantation of *Sonneratia apetala* and *Bruguiera gymnorhiza* in the wetland of Nansha in Guangzhou city. *Forestry Science Research*, 24(04): 531-536 (朱可峰, 廖兵文, 章家恩. 2011. 广州市南沙红树植物无瓣海桑、木榄人工林生物量的研究. 林业科学研究, 24(04): 531-536 [DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2011.04.016])

Extraction method of mangrove single tree growth parameters based on combinational Airborne-Ground LiDAR

ZHANG Jingrui^{1,2}, REN Guangbo¹, WU Peiqiang^{1*}, ZHANG Chengfei^{1,3}, LIU Shanwei², MA Yi^{1,2}

1. The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

2. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: Objective Mangrove is a woody plant community growing in the tropical and subtropical coastal intertidal zone and an important carbon sink ecosystem. Light Detection And Ranging (LiDAR) is an important technical mean for obtaining 3D structural parameters of forest trees for biomass estimation. Aiming at the problem that it is difficult to fully describe the 3D structure of mangroves using only airborne LiDAR, the research on the method of mangrove single tree segmentation and parameter extraction based on combinational Airborne-Ground LiDAR helps to explore the applicability of LiDAR in the protection of coastal ecosystems, and provides technical and data support for mangrove biomass estimation and carbon sink capacity assessment. Method This article takes the mangrove nature reserve in Yingluo Port, Zhanjiang, Guangdong and Maowei Sea, Guangxi as the research areas. Propose a clustering segmentation method constrained by the lower part of the mangrove canopy based on point cloud data obtained from UAV and handheld LiDAR. Through the registration of two kinds of data, the positioning error is eliminated. The single tree trunk point cloud obtained by handheld LiDAR was extracted by threshold method. Point cloud fitting was carried out by Hough transformation to extract the relative position information of single tree. Using this information, the crown vertex generated by airborne LiDAR point cloud is constrained, thus improving the segmentation accuracy of single wood. Implemented single tree segmentation and extraction of tree height and crown width for different types of mangroves, and compared them with traditional single tree segmentation algorithms. Result Combined with Airborne-Ground LiDAR, the total detection rate of single tree has increased by 13.4%~26.7% compared to the segmentation method based on the CHM. The accuracy of single tree segmentation of fusion point cloud was the highest, with a total detection rate of 62.7%, and a total of 47 correct single trees were detected,

among which the detection rate of three kinds of mangroves was more than 50%. The R^2 between the extracted and measured values of mangrove height parameters increased by 1.8%~42.2%, and the RMSE decreased by 3.4%~55.3%. Based on the segmentation results, it is found that the extracted values of mangrove canopy are generally small. By extracting the point cloud density variable that can represent the density of mangrove canopy overlap and evaluating its linear correlation with the mean absolute error of the extracted values, a crown error correction formula is proposed, and the RMSE after correction is reduced by 45.25%~53.33%. Conclusion The results show that combined with Airborne-Ground LiDAR data, the single tree segmentation algorithm proposed in this paper has the highest single tree detection rate. The segmentation method can remove the highest point redundancy more accurately, and effectively improve the extraction accuracy of mangrove tree height, crown width and other 3D spatial structure parameters. The extraction value of mangrove crown width is generally small, and the fitting analysis of density variables and errors can effectively correct the crown width of mangrove. The combined use of handheld and airborne LiDAR data can obtain more accurate and comprehensive structural information such as tree height and crown width than single data, and can be better applied to the study of mangrove ecosystem 3D structure and biomass parameter acquisition.

Key words: remote sensing, mangrove, LiDAR, Hough transformation, point cloud clustering algorithm, 3D structure parameter, single tree segmentation, crown slant

Supported by Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 20225YFC3105100); Natural resources satellite remote sensing service support service system(12116800000190033); China High Resolution Earth Observation Special Funding Project(41-Y30F07-9001-20/22)

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感
学报

www.ygxb.ac.cn

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感
学报