

亚热带森林多平台激光雷达点云数据集 ——以广西高峰林场主要树种为例

蔡尚书^{1,2}, 孔丹^{1,2}, 斯林^{1,2}, 张珂殊³, 刘清旺^{1,2}, 张庆军⁴,
李振⁵, 齐志勇^{1,2}, 孙华⁶, 庞勇^{1,2}

1. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091;
2. 国家林业和草原局 林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091;
3. 北科天绘激光技术有限公司, 合肥 230051;
4. 武汉大学 测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430070;
5. 广西壮族自治区林业勘测设计院, 南宁 530011;
6. 中南林业科技大学 林业遥感信息工程研究中心, 长沙 410004

摘要: 共享多平台激光雷达点云数据对于开展森林生态以及激光雷达算法研究具有重要意义。为此, 中国林业科学研究院资源信息研究所发布了亚热带林区的有人机、无人机和地基多平台激光雷达森林样地点云及地面调查基准数据集。数据集在中国广西壮族自治区国有高峰林场获取, 包括桉树、杉木和马尾松3个树种, 共25块样地。地面调查数据包括样地位置、树木位置、胸径、树高、枝下高和冠幅。该数据集可用于剖析不同平台激光雷达表征森林三维结构信息的特点, 评估点云配准、单木分割等点云处理算法性能, 分析森林结构参数提取的适用性, 为区域、样地和单木尺度森林研究提供重要参考。此外, 本研究发展了一种基于地基激光雷达点云的地面调查方法。该方法根据树干点云标记树木位置, 并基于树木位置图进行每木检尺, 记录树木参数, 避免了实地单木定位和标记步骤, 提高了作业效率, 为林业地面调查提供一种新思路。

关键词: 亚热带林区, 激光雷达, 有人机, 无人机, 地基, 多平台, 森林样地, 点云, 基准数据集, 地面调查

中图分类号: P237/P2

引用格式: 蔡尚书, 孔丹, 斯林, 张珂殊, 刘清旺, 张庆军, 李振, 齐志勇, 孙华, 庞勇. 2025. 亚热带森林多平台激光雷达点云数据集——以广西高峰林场主要树种为例. 遥感学报, 29(10): 2905-2915

Cai S S, Kong D, Si L, Zhang K S, Liu Q W, Zhang Q J, Li Z, Qi Z Y, Sun H and Pang Y. 2025. Multiplatform laser scanning point clouds of subtropical forests: A case study of major tree species in Gaofeng Forest Farm, Guangxi. National Remote Sensing Bulletin, 29(10): 2905-2915 [DOI: 10.11834/jrs.20244172]

1 引言

激光雷达通过发射激光脉冲, 测量脉冲往返时间确定目标位置, 实现三维场景信息获取, 具有高精度、可穿透和全天候作业等优势。作为高精度、高效率的三维遥感技术, 激光雷达正在革新传统林业调查方法, 成为当前林业研究的热点(李增元等, 2015)。

机载和地面激光雷达能够获取精确、高分辨率样地森林三维结构信息。基于这些信息能够估

计林分、单木和枝干尺度结构参数(Pfeifer等, 2004; 庞勇等, 2005; Cai等, 2024)。机载激光雷达安装在直升机或者无人机上, 在数十米至数百米空中, 俯视观测森林三维结构, 点云分辨率和精度为厘米或分米级, 对树冠上部刻画完整度高于树冠下部, 适用于树高、树冠覆盖度等参数估计。地面激光雷达安装在三脚架或地面移动平台上, 在数米至数十米范围内, 侧视收集森林三维结构信息, 点云分辨率和精度为毫米或厘米级, 能够刻画树干、树枝等精细结构, 但在密集林区,

收稿日期: 2024-05-15; 预印本: 2024-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42301510); 国家重点研发计划(编号: 2020YFE0200800)

第一作者简介: 蔡尚书, 研究方向为激光雷达林业应用。E-mail: caishangshu@ifrit.ac.cn

通信作者简介: 庞勇, 研究方向为激光雷达遥感。E-mail: pangy@ifrit.ac.cn

往往无法完整刻画树冠上部结构,适用于胸径、枝干体积等参数估计(Liang等, 2022; Weise等, 2022)。

共享机载和地面激光雷达点云,以及配套实地森林调查数据,为研究人员提供数据基准,不仅可促进不同平台激光雷达在森林结构刻画上的理解,而且可加速自动化数据处理算法的研发,推动激光雷达技术在林业领域的应用(Kölle等, 2021; Lin等, 2022; Han等, 2024)。2021年SilviLaser会议上,主办方发布了首套机载和地面激光雷达点云开源数据集,该数据集在奥地利维也纳8块温带森林样地收集(Chen等, 2023)。之后,Weiser等(2022)发布了德国巴登—符腾堡州11块温带森林样地的机载和地面激光雷达点云。目前,尚未发布亚热带森林的多平台激光雷达点云基准数据。相比温带森林,亚热带森林具有更复杂的林木结构。发布亚热带森林激光雷达基准数据集,对理解不同平台激光雷达刻画亚热带森林结构能力,以及推动数据处理算法研究具有重要价值(Cao等, 2016)。

为此,本研究以广西壮族自治区国有高峰林场桉树、杉木和马尾松的25个样地作为研究对象,采用标准化样地布设与多平台激光雷达联合观测的方法,构建亚热带森林的有人机激光雷达ALS(Airborne Laser Scanning)、无人机激光雷达ULS(Unmanned-Aerial-Vehicle Laser Scanning)和地基激光雷达TLS(Terrestrial Laser Scanning)点云数据集。同时,本研究发展了一种基于地基激光雷达点云的地面调查方法,以期为林业地面调查提供一种新思路。

2 数据采集与处理

2.1 研究区概括

研究区位于广西壮族自治区国有高峰林场($22^{\circ}49'N$ — $23^{\circ}15'N$, $108^{\circ}08'E$ — $108^{\circ}53'E$),该林场呈东西方向带状分布,长和宽约80 km和50 km,森林覆盖率达87%,森林蓄积量超过570万 m^3 。该区域属亚热带季风气候,年均气温 $21.6^{\circ}C$,年均降水量1300.6 mm,年均蒸发量1643.4 mm,年均相对湿度79%,年均日照时间1827 h。地貌为丘陵,地势西北高东南低,海拔150—400 m,坡度 5° — 30° 。土壤以赤红壤为主,质地为中壤土至轻

粘,土层以中和厚为主,保水保肥效果良好(于永辉等, 2024)。

2.2 样地设置

高峰林场以人工林,树种以桉树、杉木和马尾松为主。本研究选择的样地形状为矩形,朝向正北,尺寸为20 m $\times$ 30 m,南北长东西宽。共包括25块样地,桉树、杉木和马尾松分别为10块、10块和5块,具体地理位置详见图1。样地坐标由实时动态测量技术RTK(Real Time Kinematic)获取,坐标系为WGS-84,投影方式为通用墨卡托UTM(Universal Transverse Mercator)投影。在样地四角设置靶桩,并使用玻璃绳标记样地边界,每木检尺时,便于区分样地内、外林木。

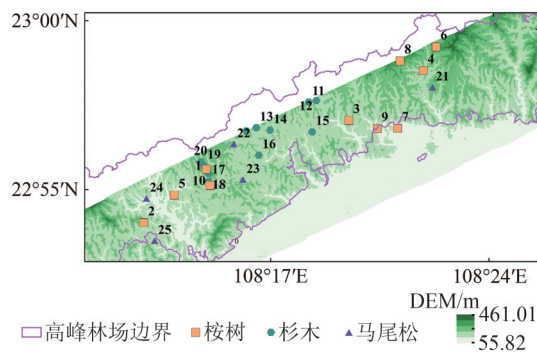


图1 研究区25个桉树、杉木和马尾松样地的分布图

Fig. 1 Distribution map of 25 *Eucalyptus*, *Cunninghamia lanceolata*, and *Pinus massoniana* sample plots in the study area

2.3 点云采集

采集数据包括ALS、ULS和TLS点云,具体采集方法如图2所示。ALS点云于2022年12月6日至12日获取,ULS和TLS点云于2022年10月15日至11月4日获取。

2.3.1 ALS

ALS点云由CAF-LiCHy(Chinese Academy of Forestry's LiDAR, CCD and Hyperspectral airborne observation system)系统中的全波形激光扫描仪LMS-Q680i获取,其基本参数如表1所示(Pang等, 2016)。数据采集时,平均相对航高950 m,旁向重叠率75.16%,飞行速度6 m/s,扫描频率240 kHz。

数据采集后,依次解算位姿系统POS(Position and Orientation System)和激光扫描仪数据,获取激光雷达点云。POS数据解算旨在获取激光扫描仪作业时的位置信息,包括全球导航卫星系统GNSS

(Global Navigation Satellite System) 基站解算和飞行位姿解算。使用国际 GNSS 服务 IGS(International GNSS Service) 星历文件解算基站单点星历, 解算后基站 GNSS 观测卫星数量>8 颗, 位置精度因子<4。结合 POS 预处理输出的定位数据及基站数据, 差分处理 POS 定位数据, 提取稳定的高精度 POS 定位文件。

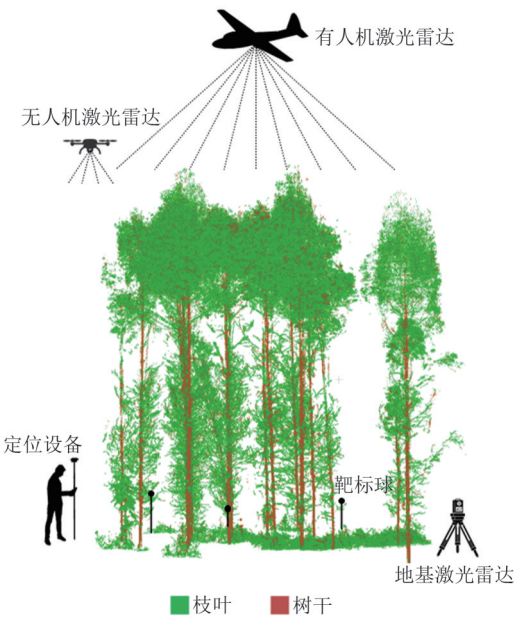


图2 ALS、ULS 和 TLS 作业和地面调查示意图
Fig. 2 Overview of ALS, ULS, and TLS operations and forest field inventory

表1 有人机激光雷达基本参数(Pang 等, 2016)
Table 1 Airborne Laser Scanning (ALS) parameters (Pang et al., 2016)

参数	数值
激光波长/nm	1550
脉冲宽度/ns	3.5
采样间隔/ns	1
测量距离/m	30—3000
测距精度(准确度)/mm	20
测角分辨率/(°)	0.001
强度量化值/bit	8
脉冲重复频率/kHz	80—400
有效测量频率/kHz	最高 266
扫描方式	平行线扫描
扫描视场角/(°)	±30
激光束发散角/mrad	≤0.5
数字化波形处理方式	全波形

基于 POS 定位文件, 使用 RIEGL 软件系统 RiPROCESS 解算激光扫描仪数据。激光扫描仪数

据解算旨在获取具有地理编码的高精度点云数据, 包括波形分解及定向、地理编码、检校、重解算、点云输出等步骤 (庞勇 等, 2021)。使用波形分解功能分离扫描仪记录的地物回波信号, 提取扫描仪坐标系回波点, 生成激光扫描仪点云数据。结合 POS 信息, 对回波点地理位置编码, 生成具有地理空间信息的点云数据。地理编码投影坐标系为 WGS-84, UTM 投影坐标系。生成点云数据后, 分别进行航偏角检校和航带匹配, 以提高点云精度。航偏角检校基于多向交叉重复飞行的低航高观测地物点, 经最小二乘运算逐步迭代, 消除航带间航偏角引起的误差; 航偏角检校后, 基于长航带位移点云匹配航带, 消除航带间空间位置误差, 点云航带间误差<0.25 m。对点云数据, 使用 lastools 软件裁剪 10 m 缓冲区的样地点云。

2.3.2 ULS

25 块样地的 ULS 数据由北科天绘 GENIUS 16 系统采集, 该系统的基本参数如表 2 所示。飞行高度相对地面约 100 m, 航带重叠率为 50%, 航带间距为 70 m, 飞行速度为 6 m/s, 扫描频率为 320 kHz。

表2 无人机激光雷达基本参数
Table 2 Unmanned-Aerial-Vehicle Laser Scanning (ULS) parameters

参数	数值
最大测距	200 m@20% 反射率, 250 m@60% 反射率
扫描点频	320000 点/s
视场角	360°×30°
精度	高程: 10 cm, 水平: 10—15 cm

基于 ULS 位姿和基站数据, 使用 PosPac 软件后差分生成飞行轨迹文件, 并利用飞行轨迹文件, 对点云地理位置编码, 生成并导出具有地理空间信息的点云数据。地理编码投影坐标系为 WGS-84, UTM 投影坐标系。对点云数据, 使用 lastools 软件裁剪 10 m 缓冲区的样地点云。

2.3.3 TLS

25 块样地的 TLS 数据由 Leica RTC 360、Trimble TX8 和 FARO Focus3D X330 三维激光扫描仪获取, 3 款扫描仪的基本参数如表 3 所示。采用多站扫描模式采集数据, 在样地中心和样地四角布站, 并根据样地树木分布情况, 在两站之间加密布站, 尽可能完整地扫描样地树木。每块样地布设 8—12

站。Trimble TX8在中心站扫描模式为最高密度级，其他站为中等密度级；Leica RTC 360在所有站均设置为最高密度级；FARO Focus3D X330在所有站

扫描分辨率设置为1/4。在中心站和其他站之间布设靶标球，中心站与其他站共视靶标球 ≥ 4 个，每块样地靶标球 ≥ 10 个。

表3 地基激光雷达基本参数

Table 3 Terrestrial Laser Scanning (TLS) parameters

参数	Leica	Trimble	FARO
激光等级	1	1	1
波长/nm	1550	1500	1550
扫描速率/(点/s)	2000000	1000000	976000
视场角/(°)	水平:360 垂直:300	水平:360 垂直:317	水平:360 垂直:305
分辨率	3级可调设置: 3 mm@10 m、 6 mm@10 m、 12 mm@10 m	3级可调设置: 22.6 mm@30 m、 11.3 mm@30 m、 5.7 mm@30 m	水平:0.009° 垂直:0.009°
扫描距离/m	0.5—130	0.6—120	0.6—330
测距精度/mm	1	<2	± 2

对 Leica RTC 360、Trimble TX8 和 FARO Focus3D X330 获取的各站点云，分别使用软件 Cyclone、Trimble RealWorks 和 FARO SCENE 配准点云，获得样地 TLS 点云，点云配准误差 <2.5 cm。在软件 CloudCompare 中目视识别角桩，根据角桩位置使用“Segment”功能裁剪样地点云。基于 TLS 点云和 RTK 测量的样地四角坐标，使用“Registration”功能，转换 TLS 点云转换至 WGS-84 坐标系，完成 TLS 点云地理编码。

2.4 地面调查

2022年10月15日—11月4日实施地面调查。实地调查的数据包括树木位置、胸径、树高、枝下高和冠幅。树木位置采用 TLS 和 RTK 两种技术获取；胸径使用胸径尺测量；树高和枝下高使用激光测距仪测量；冠幅采用皮尺测量。各参数获取的过程如下所述。

(1) 树木位置。树木位置定义为树干与地面的交点，是点云处理算法（如单木分割）验证的基准。本研究采用两种方法确定树木位置。

方法一：TLS 树木定位。该方法基于 TLS 点云，使用 CloudCompare 软件确定树木位置。使用“Segment”功能，手动去除树冠点云，在剩余点云中，目视识别树干点，并在树干点上使用“Point list picking”功能确定树木位置。图3为基于 TLS 点云制作的单木位置图。实际森林调查过程中，

操作人员在 TLS 中心站位置，基于树木定位示意图的中心，通过识别周围树木之间的位置关系，实现树木定位示意图与实际树木位置的匹配，进而测量树木参数。

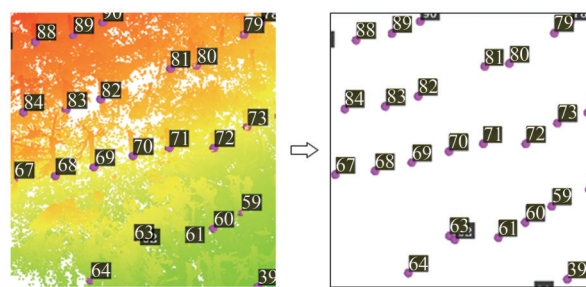


图3 TLS树木定位示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tree positioning with TLS

方法二：RTK 树木定位。该方法基于基准站和 RTK 之间的相位差，获取树木位置。首先，开通 RTK 与基准站通讯，用于获取基准站载波相位信息，通过载波相位差分技术确定 RTK 位置。然后，在树木基部放置 RTK，获得固定解后，记录每棵树的位置信息。

(2) 胸径。利用单木位置图进行胸径调查。首先，现场确定每棵树木的位置。然后，在胸高 1.3 m 处使用胸径尺测量树干直径。对于山坡上的树木，站在上坡位置进行测量。若胸高位置处有树节，测量上下 10 cm 左右位置处的直径，取平均值作为

胸径。最后，记录胸径 ≥ 5.0 cm的单木胸径信息。

(3) 树高及枝下高。树高是树干基部至主干梢顶的高度差。其常结合树种和胸径信息，利用异速生长方程，推算无法直接测量的参数，例如蓄积量、生物量和碳储量。使用激光测高仪测量树高。首先，调查员在待测树木附近探测能够同时观察到树木基部和树梢的位置；然后，测距仪分别指向树木基部、水平和树梢，并发射脉冲，记录测距仪至树木基部和树梢的距离，以及两条脉冲与水平线的夹角；最后，基于距离和夹角测量值，使用三角函数计算树高。

枝下高是树干基部至首个活枝的高度差。其能够描述树冠垂直结构以及树冠尺寸，是森林调查和研究的重要指标。使用与树高测量相同的设备和步骤，林业调查员测量枝下高。与树高测量仅有的区别是测距仪指向由树梢调整至首枝位置。

(4) 冠幅。冠幅定义为树木在南北和东西方向宽度的平均值，是评估树木生长和健康状况的重要指标。首先，林业调查员使用罗盘仪确定南北和东西方向。然后，沿着两个方向，目视识别

树冠边缘。最后，使用皮尺测量南北和东西方向宽度，计算两个方向的平均值，进而确定冠幅。

3 数据集

该数据集由点云数据和实测参数构成，可通过国家林业和草原科学数据中心网站 <https://www.forestdata.cn/dataDetail.html?id=249a518a-7266-431b-926e-784ff8a640c9>[2024-05-15]下载使用。

3.1 点云数据

ALS、ULS 和 TLS 数据分辨率如表 4 所示。对于 ALS 点云，平均点密度和平均水平点间距为 17.71 点/m² 和 0.24 m。ALS 点云能够完整地描述桉树和马尾松的树冠三维轮廓，以及杉木的树冠上半部分轮廓，但无法刻画 3 个树种的树干结构，详见图 4 (a)。对于 ULS 点云，平均点密度和平均水平点间距为 908.96 点/m² 和 0.03 m。ULS 点云能够完整、精细地刻画所有树种的树冠三维轮廓，以及桉树和马尾松的树干垂直结构，但无法描述树冠内部的树枝结构，详见图 4 (b)。

表 4 ALS、ULS 和 TLS 点云分辨率
Table 4 ALS, ULS and TLS point cloud resolution

树种	ALS		ULS		TLS	
	点密度/(点/m ²)	平均水平点间距/m	点密度/(点/m ²)	平均水平点间距/m	点密度/(点/m ²)	点间距/m
桉树	18.28	0.23	1064.17	0.03	115236.67	0.003
杉木	17.94	0.24	807.73	0.04	191080.67	0.002
马尾松	16.24	0.25	832.07	0.03	222085	0.002
平均	17.71	0.24	908.96	0.03	169098.41	0.002

对于 TLS 点云，平均点密度和平均水平点间距为 169098.41 点/m² 和 0.002 m。TLS 点云能够精细描述所有树种的树干和部分树枝的三维结构，对杉木的树冠上半部分结构描述不足，详见图 4 (c)。

ALS、ULS 和 TLS 点云按照 las 格式存储，文件名根据样地命名，每个平台的数据由独立文件夹归纳。

3.2 实测参数

各样地树木参数统计结果，如表 5 所示。所有样地树木参数统计结果显示，平均树木密度为 1454 株/hm² (± 649 株/hm²)，平均胸径为 14.5 cm (± 4.58 cm)，平均树高为 13 m (± 3.1 m)，平均枝

下高为 7.14 m (± 2.22 m)，平均冠幅为 3.71 m (± 1.07 m)。

桉树样地的平均树木密度为 1327 株/hm² (± 533 株/hm²)，平均胸径为 11.59 cm (± 1.84 cm)，平均树高为 14.18 m (± 2.48 m)，平均枝下高为 8.4 m (± 2.13 m)，平均冠幅为 3.74 m (± 0.99 m)。

杉木样地的平均树木密度为 1710 株/hm² (± 691 株/hm²)，平均胸径为 15.25 cm (± 2.77 cm)，平均树高为 12.49 m (± 2.37 m)，平均枝下高为 5.91 m (± 1.25 m)，平均冠幅为 3.37 m (± 0.92 m)。

马尾松样地的平均树木密度为 1197 株/hm² (± 593 株/hm²)，平均胸径为 18.81 cm (± 6.79 cm)，平均树高为 11.65 m (± 4.42 m)，平均枝下高为 7.08 m (± 2.49 m)，平均冠幅为 4.34 m (± 1.19 m)。

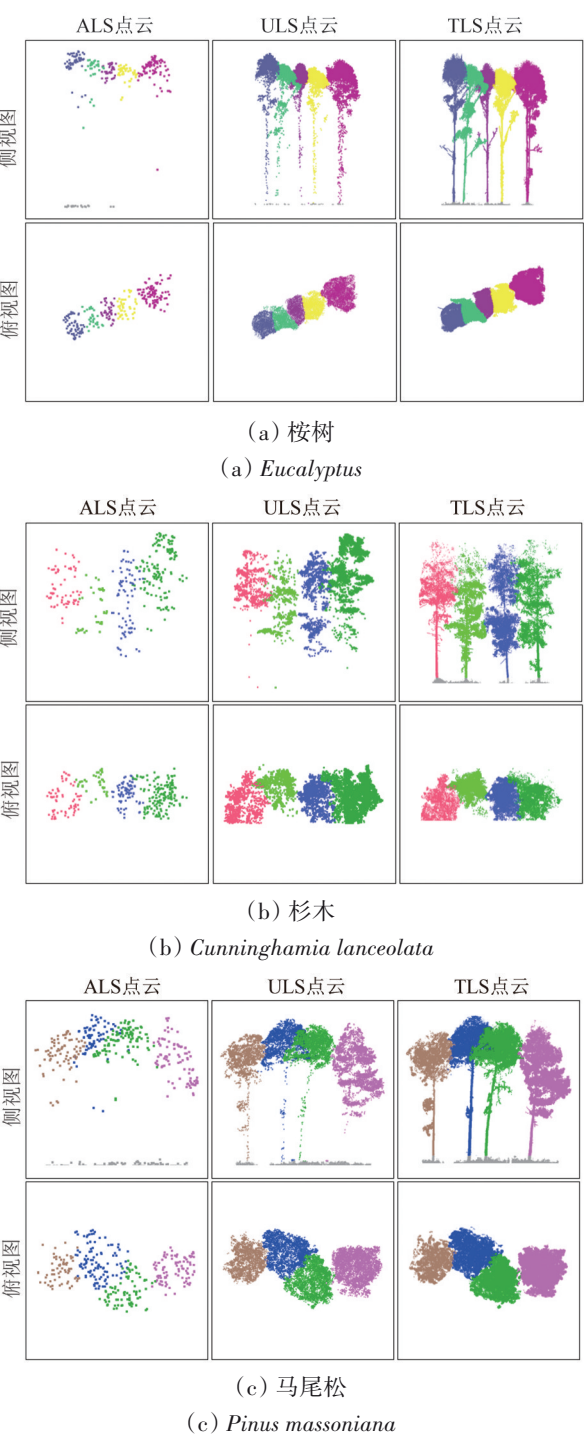


图4 ALS、ULS和TLS记录的桉树、杉木和马尾松三维结构
Fig. 4 ALS, ULS, and TLS recorded three-dimensional structure of *Eucalyptus*, *Cunninghamia lanceolata*, and *Pinus massoniana*

每木检尺数据使用Excel表整理，包括单木序号、树种、胸径、树高、枝下高、冠幅，文件名根据样地命名。

表5 各样地树木参数统计结果
Table 5 Statistical results of tree parameters in all plots

样地编号	树种	树木数量/ (株/hm ²)	胸径/ cm	树高/ m	枝下高/ m	冠幅/ m
1	桉树	1183	11.1	9.91	5.64	4.03
2		1167	16.43	20.12	13.33	4.71
3		2500	9.49	12.35	8.97	3.87
4		1200	11.8	14.68	9.26	5.06
5		783	10.99	14.09	10.08	5.02
6		1400	11.43	14.9	7.44	2.73
7		1717	9.6	12.57	7.83	2.46
8		1117	11.46	14.93	7.09	2.82
9		1733	11.05	14.77	8.53	2.46
10		467	12.58	13.49	5.83	4.19
11	杉木	850	16.78	13.69	7.18	5.06
12		1233	17.3	13.83	7.74	5.02
13		2533	11.89	10.14	5.41	2.67
14		2017	12.76	11	5.82	2.69
15		3283	9.93	6.92	2.79	2.49
16		1267	17.94	14.95	5.84	3.38
17		1417	17.69	13.18	5.53	3.88
18		1567	15.39	12.75	6.46	2.85
19		1200	18.44	15.1	6.13	2.89
20		1733	14.39	13.33	6.15	2.72
21	马尾松	1900	15.63	9.05	6.02	3.15
22		1533	14.57	10.49	7.18	3.94
23		1550	11.4	6.15	4.06	3.18
24		667	21.9	13.45	6.53	5.32
25		333	30.56	19.13	11.61	6.12

4 数据集应用潜力示例

本研究提供的多平台激光雷达点云能够支持森林多尺度参数的估计研究。点云处理的主要步骤包括点云融合、点云预处理、以及林分、单木、枝干尺度参数提取，如图5所示。以下介绍各步骤样例方法处理结果。

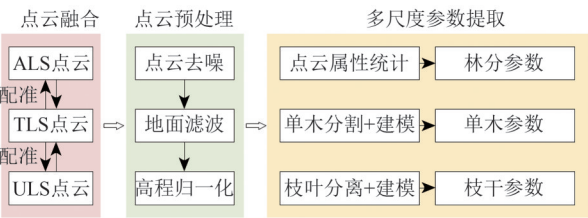


图5 森林多尺度参数提取流程
Fig. 5 Workflow for multi-scale forest parameter extraction

4.1 点云融合

由于观测视角、高度差异，机载和地面激光雷达点云分别侧重描述森林上层和下层三维结构。ALS和ULS在空中由上往下观测森林，能够完整、准确地记录树冠上部三维结构信息，但在树冠下部信息获取上存在局限；相反，TLS由地面往上观测森林，能够精细刻画树冠下部三维结构，但树冠上部三维结构的完整性受到限制。因此，融合两种平台的点云获取完整森林三维结构信息，是提升森林结构参数提取精度的重要前提。

机载和地基激光雷达点云分别使用地理坐标系和局部坐标系表示，通过转换地基激光雷达点云至地理坐标系，实现两个平台点云的融合。使用分层点聚类算法配准机载和地基激光雷达点云。该算法使用分层聚类方法进行机载和地基点云树木制图，然后计算每个聚类点的快速点特征直方图，匹配聚类点并计算两平台点云变换矩阵，最后基于最佳矩阵进行精匹配（Chen等，2024）。图6展示了ULS和TLS点云融合结果，TLS和ULS点云分别由黑色点和红色点表示。

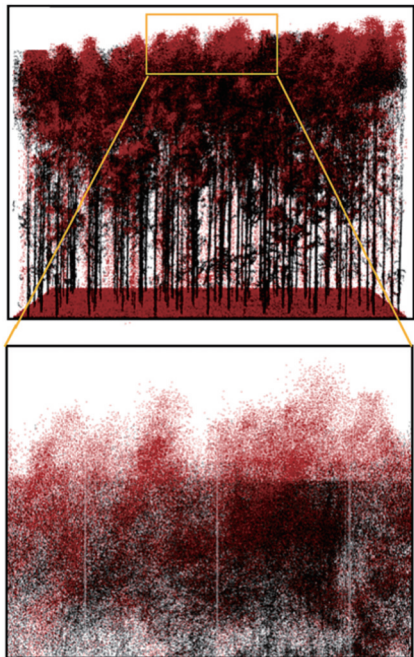


图6 ULS和TLS点云融合结果(Chen等,2024)
Fig. 6 Fusion result of ULS and TLS point clouds
(Chen et al., 2024)

4.2 点云预处理

由于激光发射频率不稳定、接收器灵敏度不均匀，空气温度、湿度对激光脉冲的干扰，导致

点云中存在噪声，这往往影响后续森林结构参数提取精度，例如高值噪声可能导致树高高估。噪声点云与正常点云之间空间连通性较弱，表现为离散点或离散点簇形式。本研究使用CloudCompare软件的“Clean”功能识别并滤除噪声。

地面滤波，即分割点云为地面点和植被点，是消除地形效应，正确提取森林结构参数（如树高）的必要步骤（Zhang等，2016）。我们使用一种多分辨率层次布料模拟滤波算法分割地面点和植被点。该算法使用数学形态学算法选择地面种子点，然后基于种子点采用多尺度布料模拟法构建参考地形，最后基于点与参考地形之间的高差区分地面点和植被点（蔡尚书和庞勇，2024）。图7（a）展示了地面滤波结果，橘黄色点和绿色点分别表示地面点和植被点。地面滤波后，通过点云高程归一化消除植被点中的地形信息。使用CloudCompare软件的“Distances”和“Set SF as coordinate(s)”功能，实现点云高程归一化。图7（b）为点云高程归一化结果。

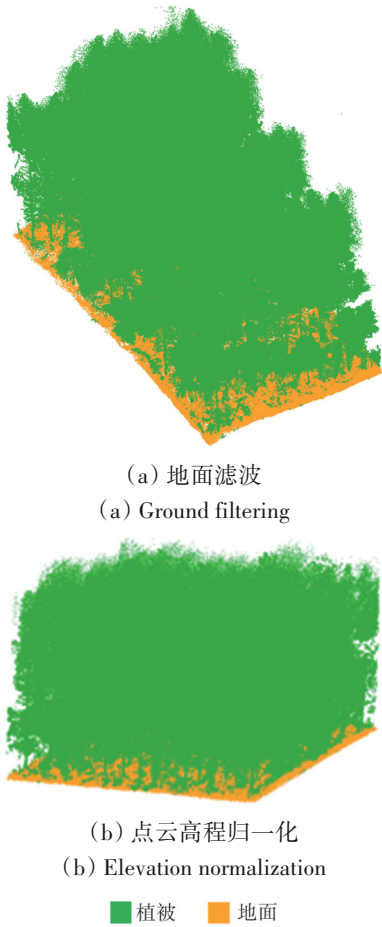


图7 地面滤波和点云高程归一化结果
Fig. 7 Results of ground filtering and elevation normalization

4.3 参数提取

4.3.1 林分参数

林分参数用于描述整个区域的森林属性，如树冠覆盖度、叶面积指数。基于高程归一化点云，使用 CloudCompare 中的“Projection”和“Export coordinate(s) to SF (s)”功能，对点云栅格化，并基于高程提取树冠像素，统计树冠像素占总像素比例，获得树冠覆盖度 (Ma 等, 2017)。图 8 展示了树冠像素分布情况和树冠覆盖度计算结果，树冠像素被渲染为绿色，其他像素被渲染为灰色。

4.3.2 单木参数

单木参数用于描述单株木的属性，如树高、胸径、树冠投影面积。单木分割，即点云实例

分割获取单木点云，是提取单木参数的前提。通常基于树顶或树干特征，检测单株木。使用 CloudCompare 软件中的“TreeIso”功能，分割点云，获取单木点云 (Xi 和 Hopkinson, 2022)。图 9 (a) 展示了单木分割结果，同一株树木的点云呈现为相同颜色。

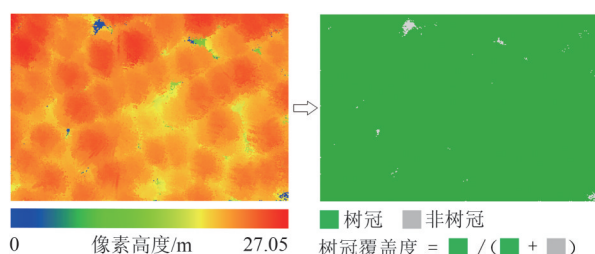


图 8 树冠覆盖度计算示意图

Fig. 8 Schematic diagram of canopy cover estimation

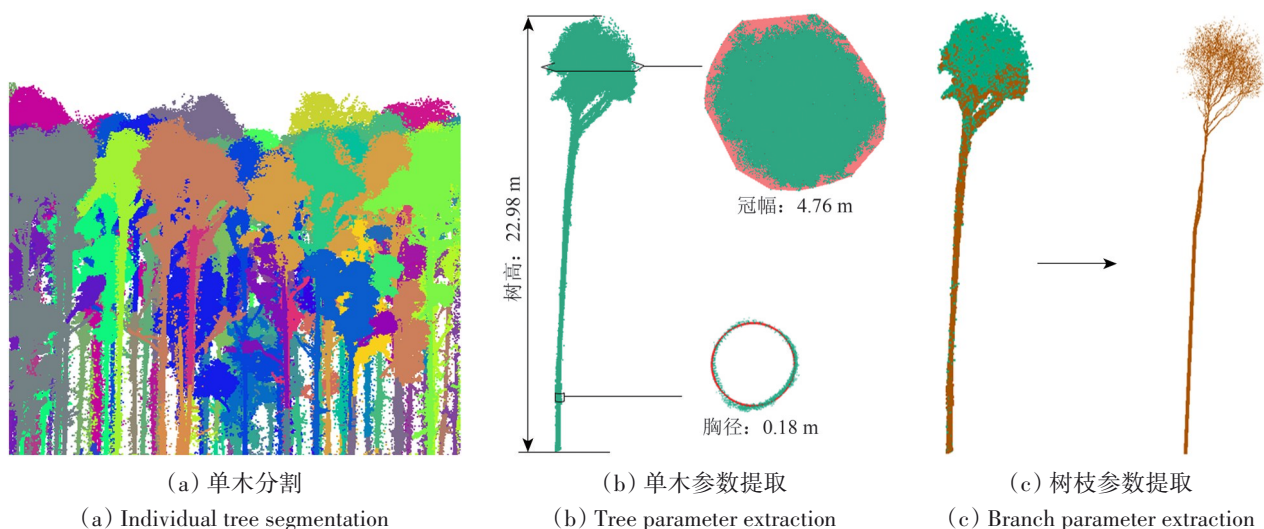


图 9 单木和枝干参数提取示意图

Fig. 9 Schematic diagram of tree and stem parameter extraction

使用 CloudCompare 软件中的“Point picking”功能识别单木点云的最高点和最低点，计算两端点高程差获得树高值 (图 9 (b))。使用 CloudCompare 软件中的“Cross section”功能，在 1.3 m 位置提取树干点云切片，对切片点云使用“Fit-Circle”功能建模树干，并计算胸径 (图 9 (b))。使用 CloudCompare 软件中的“Cross section”功能切片树冠点云，对切片点云使用“Fit-2D polygon (facet)”功能建模树冠，并计算冠幅 (图 9 (b))。基于树冠点云，计算 LBI (Light Detection and Ranging biomass index)，制图单木和样地尺度森林生物量 (Du 等, 2023) (图 10)。

4.3.3 枝干参数

枝干参数用于描述树干和树枝的属性，如树干和各级树枝的体积。枝叶分离，即分割单木点云为枝干点和树叶点，是枝干参数提取的基础。可基于局部枝干呈线状，提取枝干点 (Wang 等, 2018)。使用 CloudCompare 软件中的“Compute geometric features”功能计算点云的线特征，并通过阈值法提取枝干点。图 9 (c) 为点云枝叶分离结果，棕色点为枝干点，绿色点为树叶点。对枝干点，使用 AdQSM 开源软件，重建枝干结构，并提取树干以及各级树枝的结构参数，例如体积 (Fan 等, 2020) (图 9 (c))。

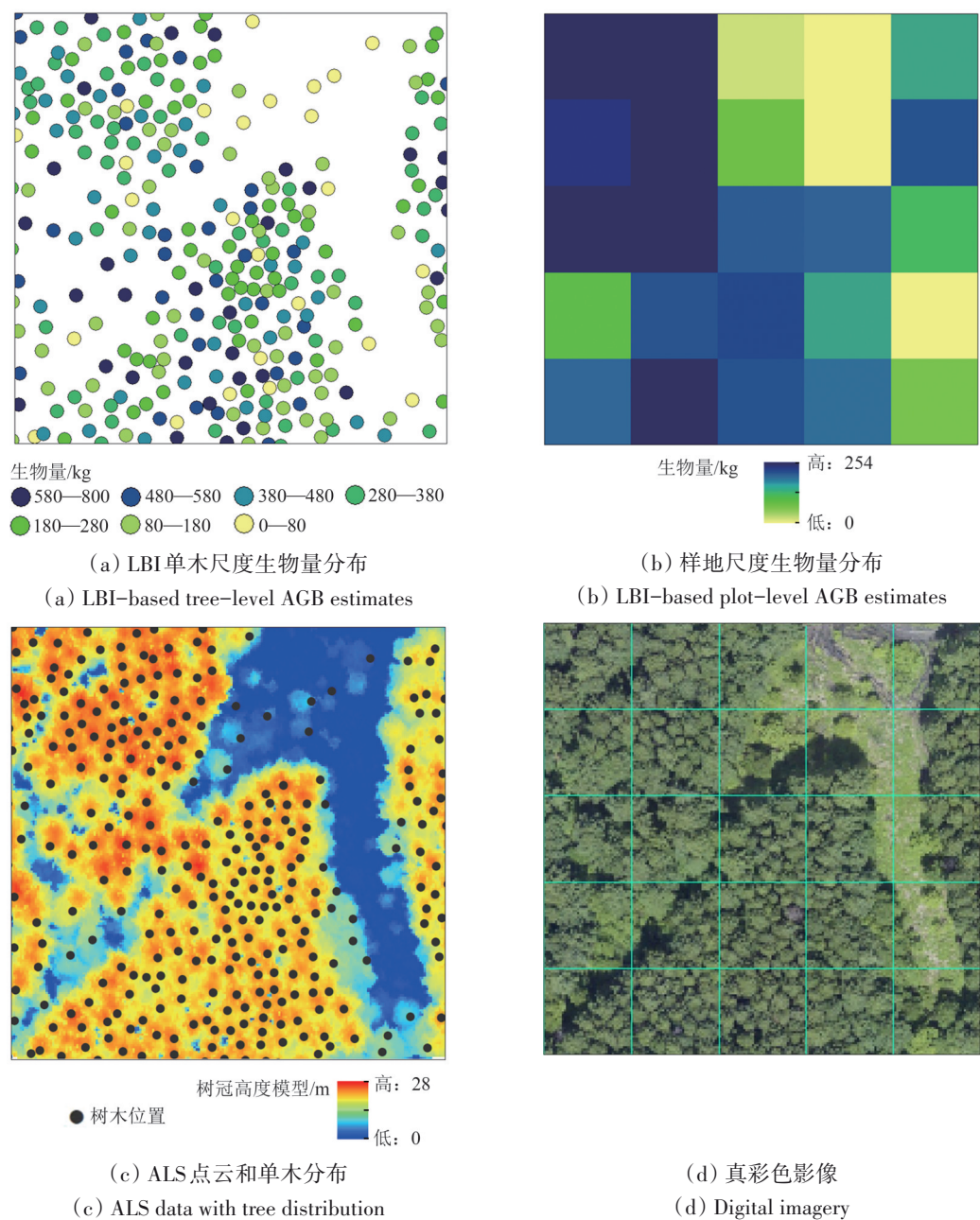


图10 基于LBI的单木和样地尺度森林生物量制图(Du等,2023)

Fig. 10 Biomass mapping at tree- and plot-level based on LBI (Du et al., 2023)

5 结 论

为推动激光雷达遥感林业应用的发展,本研究构建了有人机、无人机和地基多平台亚热带森林样地点云以及配套的地面森林调查数据集。该数据集提供不同分辨率和不同视角下的森林地理参考点云,以及单木位置、胸径、树高、枝下高和冠幅地面调查结果,在多尺度林业研究中具有重要价值。同时,该数据集能够解决研究机构数据重复收集的资源浪费,提高研究效率,并有助

于加强研究的科学标准、可重复性和可信度,推动研究机构之间的交流与合作。

参考文献(References)

- Cai S S and Pang Y. 2024. Multi-resolution hierarchical cloth simulation filtering for airborne LiDAR data in forested areas. Remote Sensing Information, 39(1): 26-34 (蔡尚书, 庞勇. 2024. 林区机载LiDAR点云的多分辨率层次布料模拟滤波. 遥感信息, 39(1): 26-34) [DOI: 10.20091/j.cnki.1000-3177.2024.01.004]
- Cai S S, Zhang W M, Zhang S H, Yu S S and Liang X L. 2024. Branch

- architecture quantification of large-scale coniferous forest plots using UAV-LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 306: 114121 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114121]
- Cao L, Coops N C, Innes J L, Dai J S, Ruan H H and She G H. 2016. Tree species classification in subtropical forests using small-footprint full-waveform LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 49: 39-51 [DOI: 10.1016/j.jag.2016.01.007]
- Chen J H, Zhao D, Zheng Z J, Xu C, Pang Y and Zeng Y. 2024. A clustering-based automatic registration of UAV and terrestrial LiDAR forest point clouds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 217: 108648 [DOI: 10.1016/j.compag.2024.108648]
- Chen Y C, Hollaus M, Bronne G and Pfeifer N. 2023. Characterization of SilviLaser 2021 Benchmark Data Set
- Du L M, Pang Y, Wang Q, Huang C Q, Bai Y, Chen D S, Lu W and Kong D. 2023. A LiDAR biomass index-based approach for tree- and plot-level biomass mapping over forest farms using 3D point clouds. *Remote Sensing of Environment*, 290: 113543 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113543]
- Fan G P, Nan L L, Dong Y Q, Su X H and Chen F X. 2020. AdQSM: a new method for estimating above-ground biomass from TLS point clouds. *Remote Sensing*, 12(18): 3089 [DOI: 10.3390/rs12183089]
- Han X, Liu C, Zhou Y Z, Tan K, Dong Z and Yang B S. 2024. WHU-Urban3D: an urban scene LiDAR point cloud dataset for semantic instance segmentation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 209: 500-513 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.02.007]
- Kölle M, Laupheimer D, Schmohl S, Haala N, Rottensteiner F, Wegner J D and Ledoux H. 2021. The Hessigheim 3D (H3D) benchmark on semantic segmentation of high-resolution 3D point clouds and textured meshes from UAV LiDAR and Multi-View-Stereo. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1: 100001 [DOI: 10.1016/j.ophoto.2021.100001]
- Li Z Y, Pang Y, Liu Q W, et al. 2015. *Inversion Techniques and Methods of Forest Parameters with LiDAR*. Beijing: Science Press (李增元, 庞勇, 刘清旺, 等. 2015. 激光雷达森林参数反演技术与方法. 北京: 科学出版社)
- Liang X L, Kukko A, Balenović I, Saarinen N, Junttila S, Kankare V, Holopainen M, Mokroš M, Surový P, Kaartinen H, Jurjević L, Honkavaara E, Näsä R, Liu J B, Hollaus M, Tian J J, Yu, X W, Pan J, Cai S S, Virtanen J P, Wang Y S and Hyypä J. 2022. Close-range remote sensing of forests: the state of the art, challenges, and opportunities for systems and data acquisitions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 10(3): 32-71 [DOI: 10.1109/MGRS.2022.3168135]
- Lin Y C, Shao J Y, Shin S Y, Saka Z, Joseph M, Manish R, Fei S L and Habib A. 2022. Comparative analysis of multi-platform, multi-resolution, multi-temporal LiDAR data for forest inventory. *Remote Sensing*, 14(3): 649 [DOI: 10.3390/rs14030649]
- Ma Q, Su Y J and Guo Q H. 2017. Comparison of canopy cover estimations from airborne LiDAR, aerial imagery, and satellite imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(9): 4225-4236 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2711482]
- Pang Y, Li Z Y, Chen E X and Sun G Q. 2005. Lidar remote sensing technology and its application in forestry. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(3): 129-136 (庞勇, 李增元, 陈尔学, 孙国清. 2005. 激光雷达技术及其在林业上的应用. 林业科学, 41(3): 129-136) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2005.03.022]
- Pang Y, Li Z Y, Ju H B, Lu H, Jia W, Si L, Guo Y, Liu Q W, Li S M, Liu L X, Xie B B, Tan B X and Dian Y Y. 2016. LiCHy: the CAF's LiDAR, CCD and hyperspectral integrated airborne observation system. *Remote Sensing*, 8(5): 398 [DOI: 10.3390/rs8050398]
- Pang Y, Liang X J, Jia W, Si L, Yan G J and Shi J C. 2021. The comprehensive airborne remote sensing experiment in Saihanba forest farm. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(4): 904-917 (庞勇, 梁晓军, 英文, 斯林, 阎广建, 施建成. 2021. 塞罕坝林场机载综合遥感试验. 遥感学报, 25(4): 904-917) [DOI: 10.11834/jrs.20210222]
- Pfeifer N, Gorte B and Winterhalder D. 2004. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. *Proceedings of 20th ISPRS Congress*. 35: 114-119
- Wang D, Brunner J, Ma Z Y, Lu H, Hollaus M, Pang Y and Pfeifer N. 2018. Separating tree photosynthetic and non-photosynthetic components from point cloud data using dynamic segment merging. *Forests*, 9(5): 252 [DOI: 10.3390/f9050252]
- Weiser H, Schäfer J, Winiwarter L, Krašovec N, Fassnacht F E and Höfle B. 2022. Individual tree point clouds and tree measurements from multi-platform laser scanning in German forests. *Earth System Science Data*, 14(7): 2989-3012 [DOI: 10.5194/essd-14-2989-2022]
- Xi Z X and Hopkinson C. 2022. 3D Graph-based individual-tree isolation (Treeiso) from terrestrial laser scanning point clouds. *Remote Sensing*, 14(23): 6116 [DOI: 10.3390/rs14236116]
- Yu Y H, Zhu B, Lin J Y, Zhou Q F and Wang H. 2024. Floristic characteristics and plant compositions of Guangxi State-owned Gaofeng forest farm. *Guangxi Forestry Science*, 53 (4): 481-487 (于永辉, 朱兵, 林建勇, 周奇丰, 王合. 2024. 广西国有高峰林场植物组成和区系特征. 广西林业科学, 53 (4): 481-487) [DOI: 10.19692/j.issn.1006-1126.20240410]
- Zhang W M, Qi J B, Wan P, Wang H T, Xie D H, Wang X Y and Yan G J. 2016. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6): 501 [DOI: 10.3390/rs8060501]

Multiplatform laser scanning point clouds of subtropical forests : A case study of major tree species in Gaofeng Forest Farm , Guangxi

CAI Shangshu^{1,2}, KONG Dan^{1,2}, SI Lin^{1,2}, ZHANG Keshu³, LIU Qingwang^{1,2}, ZHANG Qingjun⁴,
LI Zhen⁵, QI Zhiyong^{1,2}, SUN Hua⁶, PANG Yong^{1,2}

1. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China;

3. SureStar Technology Co. Ltd. Hefei 230051, China;

4. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430070, China;

5. Guangxi Forest Inventory & Planning Institute, Nanning 530011, China;

6. Research Center of Forestry Remote Sensing & Information Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Sharing multiplatform laser scanning point clouds of forests is of great significance for laser scanning research and applications in forestry. To this end, the Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry has constructed a multiplatform laser scanning point cloud dataset for forest plots in subtropical regions, featuring airborne laser scanning, unmanned-aerial-vehicle laser scanning, and Terrestrial Laser Scanning (TLS) point clouds, along with forest inventory data. Data was collected at Gaofeng Forest Farm in Guangxi, China, covering 25 plots with three tree species: *Eucalyptus*, *Cunninghamia lanceolata*, and *Pinus massoniana*. The field forest inventory data include plot locations, tree positions, diameter at breast height, tree height, height to the first live branch, and crown width. The dataset enables the analysis of forest three-dimensional structural information captured by laser scanners from various platforms, evaluating automated processing algorithms like point cloud registration and tree segmentation. It provides important references for forest research at the regional, plot, and tree levels. Additionally, this study developed a field inventory method guided by TLS data. This method utilizes tree stem point clouds to mark tree positions and measures individual trees according to tree maps, improving operational efficiency.

Key words: subtropical forest, laser scanning, airborne, unmanned-aerial-vehicle, terrestrial, multi-platform, forest plot, point cloud, reference dataset, field forest inventory

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42301510); National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFE0200800)