

手持激光 达在“森林遥感光谱样地”外业质 检查中的 应用与研究

于家强^{1*} 刘微¹

(1.内蒙古风天林草调查咨询责任有限公司 内蒙古自治区 牙克石 022150;)

摘要:【目的】本研究的核心目标在于验证手持激光雷达(LiDAR)技术在森林光谱样地的质量检查中的应用效果,并探讨其在提升森林调查精度方面的潜力。森林资源的精确调查对于理解森林现状、分布和生态变化至关重要。特别是在大兴安岭这一中国林业的重要支柱区域,采用先进技术以提高林业调查的效率和准确性显得尤为迫切。【方法】在内蒙古大兴安岭林区实施的《自然资源光谱信息研究暨其在调查监测中的创新应用项目》框架下,我们设计并布设了172块森林光谱样地,以精确获取不同林型的遥感光谱信息。项目外业质量检查中使用了SLAM100激光雷达扫描仪,沿样地边界及内部进行扫描,收集点云数据。数据采集之后,通过重采样、去噪、地面点分类和高程归一化等一系列预处理步骤,提取了单木胸径信息。进一步结合大兴安岭地区的一元材积表,对比分析了两种不同数据源的胸径数据和蓄积量。【结果】研究结果揭示,激光雷达点云分析得到的胸径平均值与现地调查结果具有极高的一致性,偏差为2.34%,且相关性指数达到了0.98。在树高测量方面,尽管两组数据间相关性指数为-0.04,表明缺乏相关性,但激光雷达技术在树高数据质量检查方面显示出优越性,均方根误差(RMSE)为3.87米。蓄积量分析中,激光雷达预测的蓄积量与现地调查结果相比,偏差为5.56%,且相关性指数为0.97,显示了良好的相关性。【结论】本研究成功证明了手持激光雷达技术在森林光谱样地外业质量检查中的有效性,尤其在提升树高测量精度方面表现突出。研究不仅提升了外业质量管理水平,而且培养了能够适应新技术的基础人才。展望未来,我们计划普及激光雷达点云建模方法,进一步提升调查精度,并探索无人机、智能软件、虚拟现实(VR)技术以及人工智能大模型等新兴技术的应用,以推动林业资源管理向自动化、智能化发展。

关键词:手持激光雷达;森林调查;光谱;质量管理;相关性分析

中图分类号 Q958.15; S154.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488(2024)-0001

-12

The application and research of handheld LiDAR in the field quality inspection of "forest spectral plots

Jia-Qiang Yu^{1*} Wei Liu¹

(1.Inner Mongolia Fengtian Forest and Grassland Survey Consulting Company Limited 022150 Yakeshi, Inner Mongolia Autonomous Region, China;)

Abstract: 【Objective】The core objective of this study is to validate the application effectiveness of handheld LiDAR technology in the quality inspection of forest spectral plots and to explore its potential to enhance the precision of forest surveys. Accurate forest resource surveys are crucial for understanding the current status, distribution, and ecological changes of forests. Particularly in the Greater Khingan Range, an important pillar of China's forestry, the adoption of advanced technology to improve the efficiency and accuracy of forestry surveys is particularly urgent. 【Method】Under the framework of the "Natural Resource Spectral Information Research and Its Innovative Application in Survey Monitoring Project" implemented in the Inner Mongolia Greater Khingan Range forest area, we designed and set up 172 forest spectral plots to accurately acquire spectral information of different forest types. The SLAM100 LiDAR scanner was used in the field quality inspection of the project, scanning along the boundaries and interiors of the plots to collect point cloud data. After data collection, a series of preprocessing steps including resampling, denoising, ground point classification, and elevation normalization were

conducted to extract individual tree diameter at breast height information. Further, combined with the monomeric volume table of the Greater Khingan Range area, we compared and analyzed the diameter at breast height data and stock volume from two different data sources. 【Result】 The study results reveal that the average diameter at breast height obtained from LiDAR point cloud analysis is highly consistent with the results of on-site surveys, with a deviation of 2.34%, and a correlation index reaching 0.98. In terms of tree height measurement, although the correlation index between the two sets of data is -0.04, indicating a lack of correlation, LiDAR technology has shown superiority in the quality check of tree height data, with a root mean square error (RMSE) of 3.87 meters. In the stock volume analysis, the deviation between the predicted stock volume by LiDAR and the on-site survey results is 5.56%, and the correlation index is 0.97, showing a good correlation. 【Conclusion】 This study successfully proves the effectiveness of handheld LiDAR technology in the field quality inspection of forest spectral plots, especially in improving the accuracy of tree height measurement. The research has not only improved the level of field quality management but also cultivated basic talents who can adapt to new technologies. Looking forward, we plan to popularize LiDAR point cloud modeling methods to further enhance survey accuracy and explore the application of emerging technologies such as unmanned aerial vehicles, intelligent software, virtual reality (VR) technology, and artificial intelligence large models, to promote the development of forestry resource management towards automation and intelligence.

Key words: Handheld LiDAR; Forest Survey; Spectral; Quality Management; Correlation Analysis .

大兴安岭重点国有林区，作为我国五大国有林区之一，占据着我国最北部的广袤土地，以其辽阔的面积和现代化管理，成为我国林业的重要支柱（韩广武等，2000）。大兴安岭的森林资源不仅是重要的国家储备资源以及北方生态屏障，同时也是全球碳储量的关键主要组成部分（蒋有绪等，1995；王效科等，2021；毛子军等，2022）。森林资源调查是获取森林现状的重要途径（孟宪宇等，2009；闫宏伟等，2011），对于全面掌握大兴安岭森林的资源状况、分布以及生态环境的动态变化具有至关重要的作用。然而，林业人才的短缺和不合理的年龄结构导致了林区调查人员数量的不足，调查员平均年龄偏大为地面调查带来了不小的挑战。面对森林资源管理和可持续利用的严峻要求，我们迫切需要采用更先进的技术手段和科学方法，以确保调查数据的准确性和全面性。

为了响应这一需求，我们已成功申请并启动了《内蒙古大兴安岭自然资源光谱信息研究暨其在调查监测中的创新应用项目》。该项目旨在将地物光谱信息技术应用于林业调查监测，以显著提升林业调查监测工作的智能化与自动化水平。在项目实施过程中，我们精心设计并布设了 172 块森林光谱样地，以确保不同林型光谱信息的精确采集。为了确保外业工作的高质量执行，我公司技术质量管理部特别组建了外业质量检查小组，负责对森林光谱样地进行严格的质量检查，并随机抽取一块样地开展质量检查工作。

对于传统的林业人工现地调查，林冠信息、树高、样木位置等参数的精度通常只能达到米级别。我们正在探索使用厘米级别精度的激光雷达技术对这些米级别参数进行质量检查的可能性，以期通过高精度技术对低精度数据进行质量控制，从而提升公司的外业质量管理水平，为林业产业的现代化和智慧化贡献力量。

1 研究区概况

大兴安岭，这条气势磅礴的山脉，以其东北至西南的走向，纵贯林区南北，展现出东北低、西南高的地形特点，主要由山地和丘陵构成。大兴安岭不仅是自然景观的分界线，也是额尔古纳河与嫩江水系的天然分水岭。根据《中国植被》的分布区域划分，该林区分为寒温带针叶林区域和温带草原区域。林区内以兴安落叶松、白桦、樟子松、山杨等优势树种为主导的乔木林占据主导地位，森林覆盖率达 78.

39%，覆盖面积达到 837.02 万公顷（韩广武等，2000）。该区域地物类型丰富，为构建类型丰富、种类齐全的自然资源地物光谱库提供了理想条件。

1.1 地理位置

乌拉旗汉森工公司位于大兴安岭西坡中部，坐落于内蒙古呼伦贝尔市境内，跨越牙克石市和鄂伦春自治旗（49°14′04″—49°58′30″N，121°12′25″—122°50′43″E）。公司东侧与诺敏森林经营所相邻，东南和南面与北大河林业局接壤，西侧与免渡河林业局和牙克石市牧原镇交界，北侧与库都尔森工公司相接。乌拉旗汉森工公司的经营面积为 576006 公顷，森林覆盖率达到 85.14%。

1.2 地形地貌

大兴安岭主脉自东北向西南横贯乌拉旗汉，以山脉为界，南部地区位于讷门河两岸，包括温库吐、二根河、讷门、西日特气等 4 个林场；北部地区则位于大雁河两岸，包括库口、煤田、五十九、莫拐、乌拉旗汉、佰拉图、乌力克气、门德力、克里河、兴安里、牧羊等 11 个林场。岭东地势自西北向东南倾斜，岭西地势自东北向西南倾斜，整个区域被群山环抱，以中低山为主，海拔一般在 600-1000 米左右，最高点为 1406 米，最低点为 515 米，平均坡度约为 15°。

1.3 气候条件

乌拉旗汉森工公司所在地属于寒温带大陆性季风气候区，冬季受冷空气影响，气候寒冷干燥；夏季则受季风和暖湿气流的影响，气候温暖湿润。根据《内蒙古呼伦贝尔市气象资料》（1996—2009 年）记录，年平均气温为 -0.8℃，一月平均气温为 -25.8℃，七月平均气温为 18.7℃。极端最高温度和最低温度分别为 37.4℃和 -45.4℃。年平均日照时数为 2800.3 小时，年相对湿度为 65.9%，年蒸发量为 1039.3mm。岭东地区年降水量为 406.5mm，岭西地区为 372.2mm，大部分降水集中在 7 月和 8 月，占全年总降水量的 51.7%。早霜期从 9 月初开始，晚霜期至翌年 5 月末结束，年平均无霜期为 99 天左右。风向随季节变化，夏季以东风和东北风为主，春秋季节以西风和南风为主，冬季则以西北风为主，年平均风速为 1.9m/s。

1.4 水文条件

该区域内有三大主要河流：库都尔河、大雁河和讷门河。库都尔河作为海拉尔河上游最大的一级支流，属于额尔古纳水系，发源于大兴安岭青格勒图山西麓；大雁河也属于额尔古纳河水系，发源于兴安里林场，与库都尔河在乌拉旗汉林场汇合后注入海拉尔河；讷门河（又称北大河）属于嫩江水系，发源于西日特气林场，是毕拉河上游的一级支流。此外，还有大莫拐河、小莫拐河、大门德力河、玻力金岗河、克里河、大牧羊河、小牧羊河等几十条支流，共同构成了该地区丰富的水文网络。

2 研究方法

2.1 森林光谱样地设置

在 2022 年 7 月至 10 月期间，乌拉旗汉地区成功实施了一项全面的林地样方采集工作，共收集了 172 个林地样方数据，样地分布概况见图 1。所有样方的尺寸严格遵循《光谱项目技术准则》，统一设定为 1000 平方米，即 20 米乘以 50 米的长方形样方。每个样方进一步被划分为 10 个 100 平方米的小样格，每个样格尺寸为 10 米乘以 10 米，以便于进行更为细致的调查工作，样地基本概况见图 2。在每个样格内，调查团队依照以下步骤进行详尽的调查：调查团队在每个样格内首先使用卷尺测量树干在 1.3 米处的胸径，以计算基底面积。对于胸径 5 厘米及以上的树木，进行唯一编号和标记。在灌木层的样格调查中，团队记录了灌木植被的优势种类、层高和覆盖面积等基本信息。对灌木进行唯一编号和标记，并采集了灌木的基径、株高和冠幅等数据。草本层的样方调查同样细致，团队收集了草本植被的优势种类、层高和覆盖面积等关键信息，确保了对林地生态系统中不同层次生物多样性的全面了解。通过这一系列的标准化操作，我们不仅确保了数据的准确性和可比性，而且为森林资源的管理和生态研究提供了宝贵的基础数据。

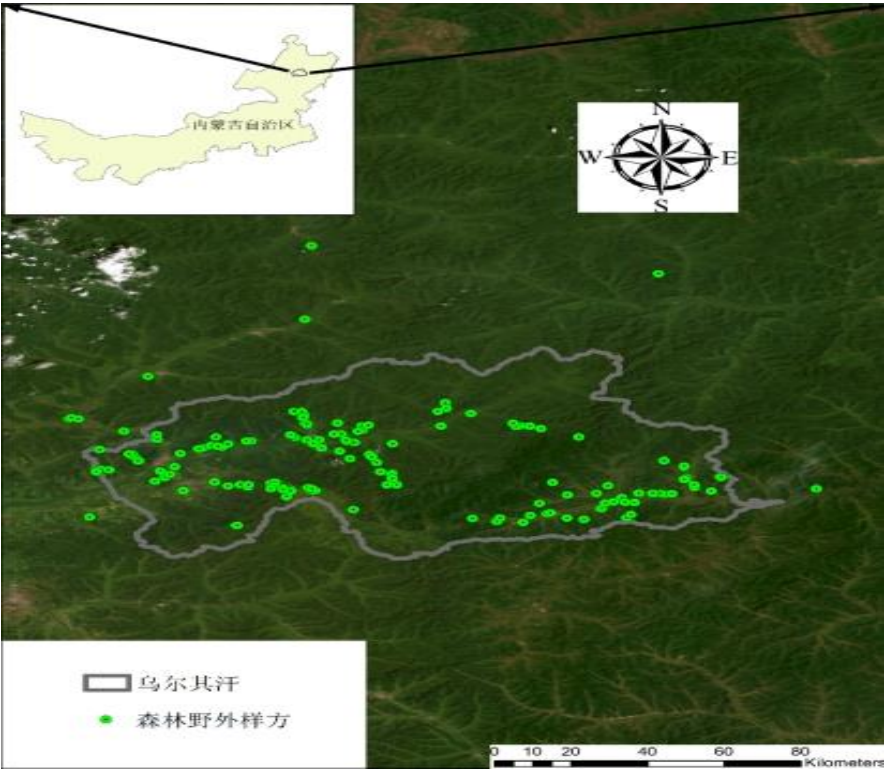


图 1 森林光谱样地分布图
Fig. 1 Forest Spectral Plot Distribution Map

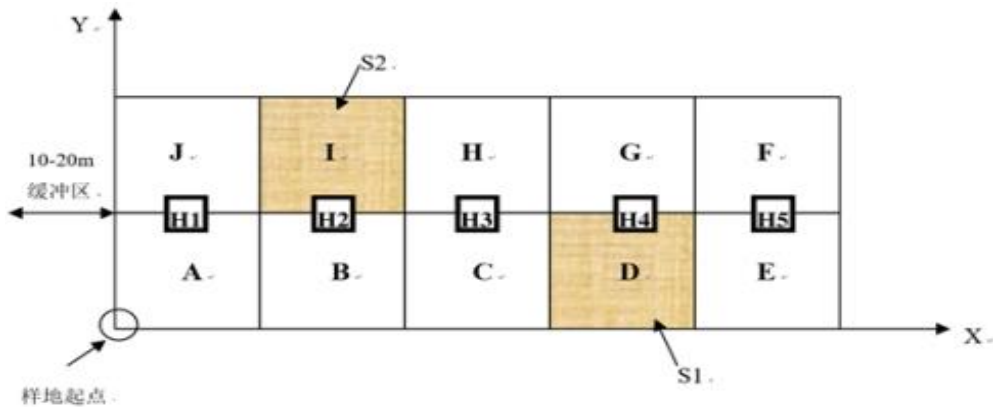


图 2 森林光谱样地示意图
Fig.2 Schematic Diagram of Forest Spectral Sampling Plots

2.2 研究方法

2.2.1 现场数据获取 我们采用了 SLAM100 激光雷达扫描仪，首先，我们选择样地的一个角点作为起始点，启动激光雷达设备。随后，沿着样地的边界行进，完成三条边的扫描工作。为了在后续处理点云数据时便于裁剪样地，我们也可以选择沿四条边完整走一圈。如果遇到林木茂密或地形复杂的情况，使得沿边界行进变得困难，我们只需确保到达样地的其余三个角点即可。通过这样的轨迹，我们能够准确界定样地点云数据的覆盖范围。在完成边界的扫描后，我们采取 S 形的行进路线，逐步向下移动，直至回到起始点，完成整个数据采集过程。这种采集策略不仅提高了数据的质量，还为后续的数据处理和分析提供了极大的便利，从而确保了林业调查的高效性和准确性。

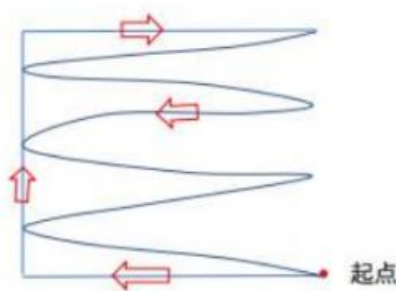


图3 数据采集示意图

Fig. 3 Data Collection Schematic Diagram

2.2.2 点云数据获取与预处理 我们以科学严谨的方法对样地边界进行初步的四边形扫描。随后，操作员携带设备进入样地内部，依据样地的地形特征（如坡度变化、林下植被分布等）执行详细的点云数据采集。在样地内部，操作员以均匀而缓慢的步伐进行行走，确保点云数据的连续性和完整性。在林木密集区域，为了获得树干点云的完整信息，我们实施了多次重叠扫描策略。每块样地的扫描时间控制在 5 至 8 分钟，以确保在有限的时间内收集到高质量的雷达回波数据。数据采集完成后，我们使用设备附带的软件工具对原始雷达数据进行解压和初步处理，生成标准的 las 格式点云数据，并记录操作员在样地内的行走路径。随后，我们将这些点云数据和路径信息导入 Lidar360 专业软件平台，按照样地边界路径对点云数据执行精确裁剪，以提取出用于后续分析的样地点云数据集。

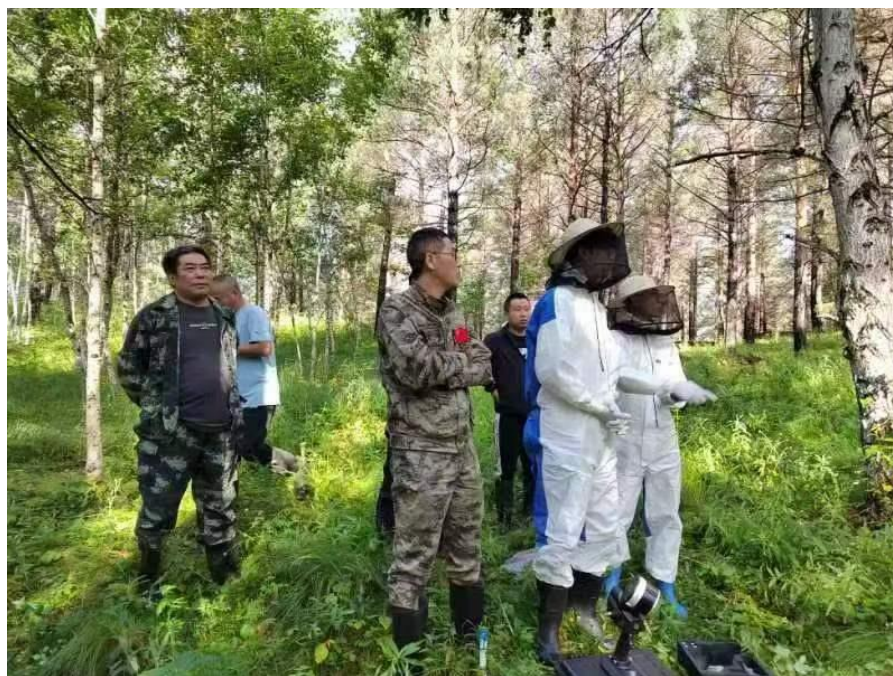


图4 采集森林光谱样地激光雷达数据

Fig. 4 Collecting LiDAR Data for Forest Spectral Sampling Plots"

2.2.3 单木分割和估测胸径（单木分割方法和胸径拟合方法选取） 在本研究中，我们对预处理后的样地点云数据执行了一系列处理步骤，以提取单木胸径信息。数据处理的具体流程详见图 5。

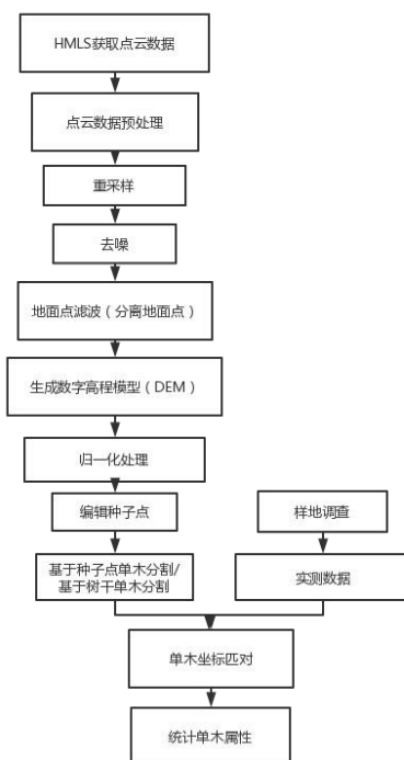


图5 数据处理流程图

Fig. 5 Data Processing Flowchart

首先，我们对点云数据进行了重采样处理，采用选择性采样率方法，去除那些法向量特征相同且缺乏纹理信息的点云数据，优化了点云的空间分布（吴晓庆等，2017）。为了进一步改善数据质量，我们采用了高斯滤波器进行去噪处理，通过设定合适的领域点个数和标准误差倍数，有效去除了噪点（Vatandaşlar 等，2021）。接下来，我们对处理后的点云数据进行了地面点分类。利用布料模拟滤波算法（CSF）分离地面点和高程点。CSF 算法的基本原理是模拟一块布料覆盖在点云的最高点上，将布料模拟点与雷达点投影在水平面上，通过计算两者之间的距离，并将距离小于特定阈值的点标记为地面点，大于阈值的点则标记为非地面点（Vatandaşlar 等，2021）。完成地面点分离后，我们根据这些地面点进行了高程归一化处理，生成了数字高程模型（DEM），为后续数据处理奠定了基础（Zeybek 等，2021）。在第二步中，我们在距离地面 3 米以下截取点云数据，创建了一个高度为 3 米的点云切片。对这些切片进行单独去噪处理，有效去除了树冠枝条对单木胸径提取的影响，从而提高了胸径拟合的精度（Liu, G 等，2018）。随后，我们对点云数据执行了种子点编辑操作，截取 1.25 米至 1.35 米高度范围内的点云，获取了胸径处的点云切面。通过最小二乘法椭圆拟合，我们成功提取了对应单木的胸径信息。在此过程中，我们将胸径处的点云位置与样地实测单木位置进行了投影匹配，确保了根据高光谱激光雷达（HMLS）获取的单木胸径数据与实测数据的一致性，为后续分析做好了准备。最后，我们将实测的单木位置图与点云切面调整至同一方位，实现了点云单木数据与实测单木数据的精确匹配。这一系列精细的处理步骤不仅提高了单木胸径提取的准确性，而且为林业资源评估和管理提供了可靠的数据支持。

2.2.4 平均胸径和林分蓄积量数据 用激光雷达数据获取到单木的胸径后，获取平均胸径的同时将两种不同数据源的胸径数据结合大兴安岭林区的一元材积表，从而得到林分蓄积量，对两种平均胸径和蓄积量的数值进行 K-S 正态分布检验后再进行数据统计分析。

2.2.4 算法与公式

Deviation 即为偏差，表示预测值与真实值的偏差大小，结合此次分析，Deviation 应为激光雷达数值

减去现地调查数值的绝对值比上现地调查数值所得的结果，详见公式 1：

$$\text{Deviation} = \frac{|\text{现地调查值}-\text{激光雷达预测值}|}{\text{现地调查值}} \times 100\%$$

(公式 1)

相关性指数表示一元多项式回归方程拟合度的高低，或者说表示一元多项式回归方程估测的可靠程度的高低。相关系数是一种描述性统计量，它指的是一个变量与另一个变量的变化的对应程度，详见公式 2：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 (y - \bar{y})^2}}$$

(公式 2)

公式中： r —— 相关性指数； x —— 激光雷达预测值； $\bar{x}$ —— 激光雷达预测平均值； y —— 现地调查值； $\bar{y}$ —— 现地调查平均值； n —— 样本个数。

均方根差(root mean square error，缩写 RMSE)，也称为方均根偏移，是一种常用的测量数值之间差异的量度。作为一种常用的测量数值之间差异的量度，均方根差的数值常为模型预测的量或是被观察到的估计量。均方根偏移代表预测的值和观察到的值之差的样本标准差，当这些差值是以资料样本来估计时，他们通常被称为残差；当这些差值不以样本来计算时，通常被称为预测误差。均方根偏移主要用来聚集预测误差的大小，通常是在不同的数据组下，以一个量值来表现其预测的能力，详见公式 3：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}}$$

(公式 3)

公式中： p_i —— 第 i 个现地调查值； o_i —— 第 i 个激光雷达预测值； n —— 样本个数。 i —— n 个样本中的第 i 个数值。

3 结果与分析

3.1 数据分析

质量检查样地位于乌尔旗汉林业局，乌尔旗汉林场，5 林班，39 小班，样地西南脚桩坐标为 49°36′18.829″，121°25′58.259″，样地为樟子松纯林，现地调查时间为 2022.7.17，调查员为曾建民、杨帅、潘刚。将激光雷达点云分析数据与现地调查数据对比分析，详见表 1。

表 1 数据分析对比表

Tab. 1 Data Analysis Comparison Table

单 木 序 号 Serial number of a sin gle tree	现地调查测 量胸径值 Tree D BH measurement results obtained by manual work / cm	激光雷达 测量胸径值 Tr ee DBH meas urement results obtained by l idare/cm	现地调查测 量树高值 Tree h eight measureme nt results obtaine d by manual wo rk / m	激光雷达 测量树高值 tT ree height me asurement resu lts obtained b y lidar / m	现地调查得 出的蓄积量 Tree Volume measurem ent results obtaine d by manual wor k/ m ³	激光雷达调 查得出的蓄积量 Tree Volume mea surement results obtained by lidar / m ³
1	46.0	44.3	25.1	21.2	1.6767	1.5189
2	43.0	43.9	23.2	20.7	1.5189	1.5189
3	42.8	42.7	18.4	23.6	1.3689	1.3689
4	42.7	42.2	24.4	19.4	1.3689	1.3689
5	42.3	42.0	23.8	20.4	1.3689	1.3689

6	41.5	40.8	24.0	21.5	1.3689	1.2269
7	41.1	40.7	24.6	23.6	1.3689	1.2269
8	40.8	40.0	24.6	23.2	1.2269	1.2269
9	40.7	39.8	24.4	22.9	1.2269	1.2269
10	40.0	39.3	18.4	20.9	1.2269	1.2269
11	39.3	39.1	23.8	22.3	1.2269	1.2269
12	38.2	38.1	22.8	18.3	1.0928	1.0928
13	37.4	37.8	25.3	21.0	1.0928	1.0928
14	37.0	37.7	24.1	16.0	1.0928	1.0928
15	36.0	35.9	12.0	20.5	0.9665	0.9665
16	35.6	33.8	24.5	17.2	0.9665	0.8482
17	35.1	33.5	23.4	21.5	0.9665	0.8482
18	34.7	33.1	24.8	20.8	0.8482	0.8482
19	34.2	31.2	19.8	22.2	0.8482	0.7378
20	33.7	30.8	23.0	21.3	0.8482	0.6354
21	33.0	30.7	19.7	23.2	0.8482	0.6354
22	32.7	30.6	24.5	22.9	0.7378	0.6354
23	31.8	30.5	23.7	22.8	0.7378	0.6354
24	31.0	30.4	23.6	22.0	0.7378	0.6354
25	30.2	30.3	16.9	20.8	0.6354	0.6354
26	29.8	28.5	23.9	20.4	0.6354	0.5408
27	28.9	27.9	19.1	20.4	0.5408	0.5408
28	27.5	27.5	17.8	20.6	0.5408	0.5408

3.2 分析结果

胸径分析：通过精确分析，我们发现现地调查得到的胸径平均值为 36.7cm，而利用激光点云技术得出的胸径平均值为 35.8cm。两组数据之间的偏差为 2.34%，表明激光雷达技术在胸径测量上具有极高的准确性。如图 6 所示，两组胸径数据的相关性指数高达 0.98，证实了它们之间存在强正相关关系。此外，均方根差（RMSE）为 1.3cm，进一步证实了数据结果的优越性。

树高分析：在树高测量方面，现地调查得到的平均树高为 22.3m，而激光雷达预测的平均树高为 21.1m，偏差为 5.13%。然而，两组树高数据的相关性指数为-0.04，如图 7 所示，表明它们之间缺乏相关性。这一结果可能暗示现地测量在树高方面存在较大的误差，且误差方向不固定（即误差既有正值也有负值）。尽管如此，均方根差（RMSE）为 3.87m，说明激光雷达技术在检查树高数据质量方面仍是一种有效的方法。

蓄积量分析：在蓄积量数据的对比分析中，通过现地调查胸径数据计算得到的蓄积量平均值为 1.0387 21429m³，而激光雷达预测胸径数据得出的蓄积量平均值为 0.97m³，偏差为 5.56%。如图 8 所示，两组蓄积量数据的相关性指数为 0.97，显示了它们之间良好的相关性。均方根差（RMSE）为 0.09m³，由于蓄积量数据是基于胸径数据并结合《一元材积表》计算得出，因此其趋势与胸径数据保持一致。

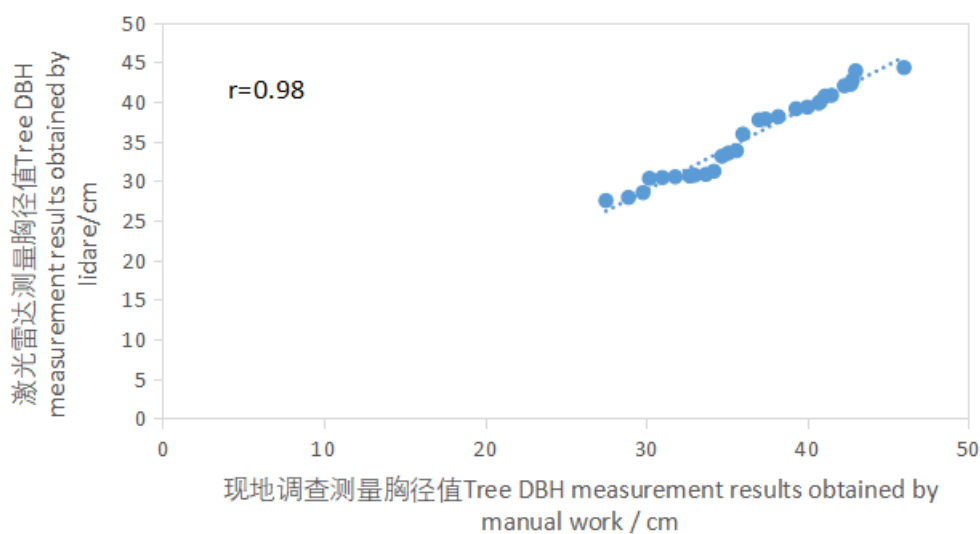


图6 胸径相关性分析图
Fig.6 Tree Diameter at Breast Height (DBH) Correlation Analysis Chart

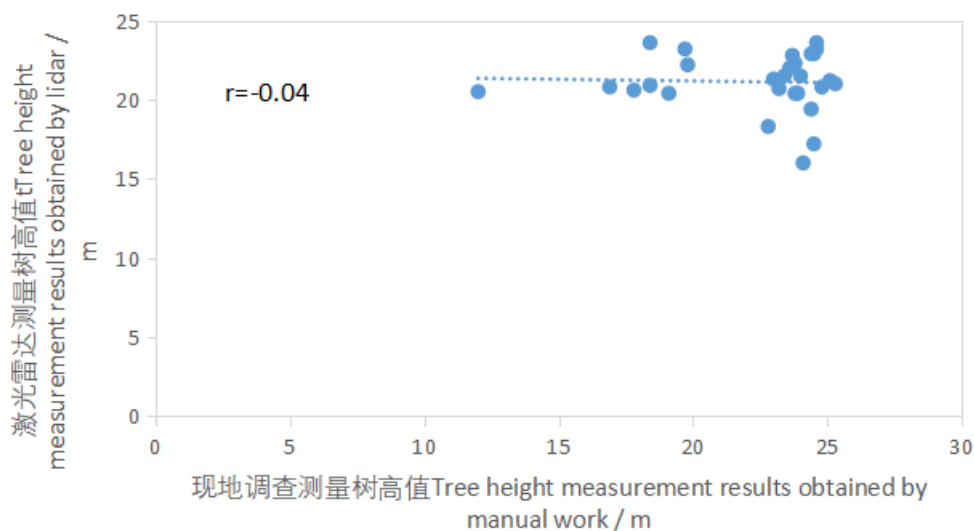


图7 树高相关性分析图
Fig.7 Tree Height Correlation Analysis Chart

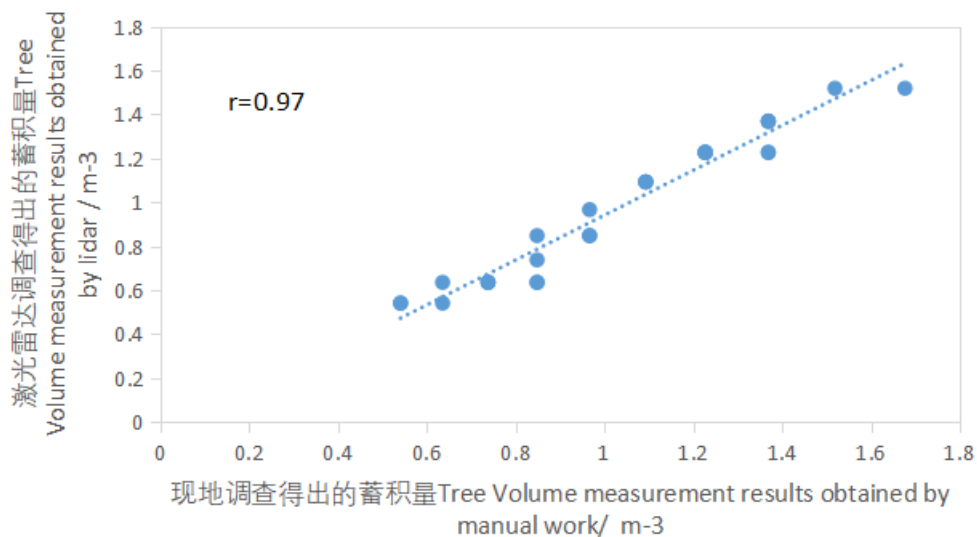


图8 蓄积量相关性分析图
Fig.8 Individual Tree Volume Correlation Analysis Chart

4 讨论

本研究成功地将激光雷达技术应用于“森林光谱样地”的质量检查中,这一创新方法特别在提升树高测量精度方面显示出巨大潜力。激光雷达技术以其厘米级的精度,为获取精确的树木位置和树冠信息提供了强有力的支持,这对于光谱信息的精确采集至关重要。

通过本次研究,我们不仅提高了外业质量管理水平,而且为我院培养了能够适应新技术的基础人才。这些人才的培养,将为我院未来的技术革新和质量管理工作提供坚实的基础。

鉴于激光雷达技术在本次研究中表现出的高效性和准确性,我们认为,未来可以考虑引入激光点云建模的方法,进一步提升森林光谱样地调查的精度。激光点云建模能够提供更为详细的森林三维结构信息,有助于深化对森林生态系统的认识和分析。此外,随着科技的不断进步,我院也将积极探索和尝试引入其他新兴技术,如无人机、智能软件、虚拟现实(VR)技术以及人工智能大模型等,以增强我院在林业资源调查和管理中的技术实力。这些技术的融合与应用,将极大地推动我院相关业务的质检工作向自动化、智能化发展,为林业资源的精确管理和可持续利用提供更为强大的技术支持。

总之,本研究的成果不仅在学术上具有重要意义,更为我公司质量管理提供了新的思路和工具。未来,我们将继续致力于技术创新和人才培养,不断推动林业资源管理向更高水平发展。

参 考 文 献

- 韩广武,王恩光,2000 内蒙古大兴安岭林管局志[M].呼伦贝尔;内蒙古文化出版社.
- 蒋有绪.1995.世界森林生态系统结构与功能的研究综述 [J]. 林业科学研究,(3):314-321.
- 王效科,冯宗炜,欧阳志云.2001,中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报.(01): 13-16.
- 毛子军.2002,森林生态系统碳平衡估测方法及其研究进展[J].植物生态学报, (06):731-738.
- 孟宪宇.测树学,2009.[M].北京;中国林业出版社.
- 闫宏伟,黄国胜,曾伟生,聂祥永,高显连.2011,全国森林资源一体化监测体系建设的思考[J].林业资源管理,(06): 6-11+26.
- 吴晓庆,黄玉清.2017,基于移动最小二乘法的点云平滑及重采样[J].微型机与应用,36(11): 47-49+53.
- Vatandaşlar,C,& Zeybek,M.2021,Extraction of forest inventory parameters using handheld mobile laser scanning;A case study from Trabzon,Turkey.[J]. Measurement,177,109328.
- Zeybek,M.,& Vatandaşlar,C.2021,An Automated Approach for Extracting Forest Inventory Data from Individual Trees Using a Handheld Mobile Laser Scanner.[J].Croatian Journal of Forest Engineering,42(3),515-528.
- Liu,G.,Wang,J.,Dong,P.,Chen,Y.,& Liu,Z,2018,Estimating Individual Tree Height and Diameter at Breast Height (DBH) from Terrestrial Laser Scanning (TLS) Data at Plot Level.[J].Forests,9(7),398.