北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

移动式激光雷达在人工林样地调查中的路径规划方法

关天蒴 王春博 王蔚 闫飞 范永祥

Path planning method of mobile lidar in plantation sample plot survey

Guan Tianshuo, Wang Chunbo, Wang Wei, Yan Fei, Fan Yongxiang

引用本文:
关天蒴, 王春博, 王蔚, 闫飞, 范永祥. 移动式激光雷达在人工林样地调查中的路径规划方法[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5):154–162. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220273
Guan Tianshuo, Wang Chunbo, Wang Wei, Yan Fei, Fan Yongxiang. Path planning method of mobile lidar in plantation sample plot survey[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5):154–162. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220273

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220273

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于无人机激光雷达的人工林碳储量线性与非线性估测模型比较
Comparison in linear and nonlinear estimation models of carbon storage of plantations based on UAV LiDAR
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 9–16. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200417

基于16线阵TLS数据的单木识别及林分断面积估测研究
Individual tree detection and stand basal area estimation based on 16 linear array TLS data
北京林业大学学报, 2018, 40(8): 23–32. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180016

应用遥感技术评价森林健康的路径和方法
Pathway and method of forest health assessment using remote sensing technology
北京林业大学学报, 2021, 43(9): 1–13. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210107

基于近邻几何特征的TLS林分点云分类研究
TLS point cloud classification of forest based on nearby geometric features
北京林业大学学报, 2019, 41(6): 138–146. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180308

森林地上生物量遥感估算方法
Estimation of forest aboveground biomass by remote sensing
北京林业大学学报, 2021, 43(8): 137–148. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200166

倾斜摄影测量技术提取落叶松人工林地形信息
Extraction of topographic information of larch plantation by oblique photogrammetry
北京林业大学学报, 2019, 41(8): 1–12. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190126

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220273

移动式激光雷达在人工林样地调查中的路径规划方法

关天蒴[1] 王春博[2] 王 蔚[1] 闫 飞[1,3] 范永祥[4]
（1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室，北京 100083；2. 河北省煤田地质局物测地质队，河北 邢台 054000；
3. 西藏农牧学院，西藏 林芝 860000；4. 季华实验室，广东 佛山 528000）

摘要:【目的】林业调查规划对林业的可持续发展至关重要。在利用移动式激光雷达实现森林样地建图与量测过程中，全局一致性地图的准确性与扫描轨迹有着密切联系。因此，对样地观测路径进行合理规划尤为必要。**【方法】**本研究主要通过结合即时定位与地图创建（SLAM）技术，利用手持式激光雷达对样地进行扫描，根据 SLAM 技术应用的相关研究并结合林业样地特点规划出 3 种手持移动式激光雷达在样地内扫描路径方案并利用 LeGO-LOAM 算法实现点云地图构建，分析比较各路径建图效果及拟合量测的立木胸径、位置的精度差异。**【结果】**逐行式路径 1 拟合的样地立木胸径估计值偏差为 2.18 cm，相对偏差为 7.74%，均方根误差为 2.74 cm，精度高于其他两种路径；在立木位置拟合精度方面，逐行式路径 1 与多环式路径 3 整体拟合效果较好，路径 1 精度略优于路径 3，x 轴估计值均方根误差（RMSE）为 0.077 m，y 轴估计值均方根误差在 0.157 m，最大误差方向的协方差值为 0.124 m，小于其他两路径。**【结论】**在使用 32 线激光雷达进行数据采集并基于 LeGO-LOAM 算法对森林样地进行点云建图进而实现单木因子进行拟合量测中，近似于航空摄影测量航线的路径方案的逐行式的路径 1 整体建图效果、量测精度相对优于其他路径，为地面移动式激光雷达外业数据采集提供一种合理的路径方案参考。

关键词：林业调查；激光雷达；SLAM 技术；精度验证
中图分类号：S758.7 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)05−0154−09
引文格式：关天蒴，王春博，王蔚，等. 移动式激光雷达在人工林样地调查中的路径规划方法［J］. 北京林业大学学报，2024，46(5)：154−162. Guan Tianshuo, Wang Chunbo, Wang Wei, et al. Path planning method of mobile lidar in plantation sample plot survey［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 154−162.

Path planning method of mobile lidar in plantation sample plot survey

Guan Tianshuo[1] Wang Chunbo[2] Wang Wei[1] Yan Fei[1,3] Fan Yongxiang[4]
(1. Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Geophysical Survey Team of Hebei Province Coal Geological Bureau, Xingtai 054000, Hebei, China;
3. Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, Xizang, China;
4. Jihua Laboratory, Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: ［**Objective**］Forestry survey planning is important for the sustainable development of forestry. When using mobile lidar to do forest sample plot mapping and measurement, the accuracy of the global consistency map is closely related to the scanning trajectory. Therefore, the rational planning of sample plot observation path is of great significance. ［**Method**］In this study, the forest sample plots were scanned by the handheld lidar with the use of simultaneous localization and mapping (SLAM). Based on the researches in the application of SLAM technology and the characteristics of forest sample land, three handheld mobile lidar scanning path plans in the sample plots were proposed. And the point cloud map was constructed

收稿日期: 2022−07−07 **修回日期:** 2023−12−06
基金项目: 西藏自治区科技计划项目（XZ202301YD0043C），北京林业大学 2021 年大学生创新训练项目（S202110022009）。
第一作者: 关天蒴。主要研究方向：3S 技术集成与应用。Email: gts0406@163.com 地址：100083 北京市海淀区北京林业大学林学院。
责任作者: 闫飞，副教授。主要研究方向：精准林业、测绘与 3S 集成。Email: yanfei522@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

through LeGO-LOAM algorithm. Thus, the three paths were compared and analyzed in terms of mapping effects, the accuracy of diameter of standing wood chest and the accuracy of its position (curve fitting data). [**Result**] The estimated diameter of the prototype stumpage chest diameter fitted by the progressive path 1 had a deviation of 2.18 cm, a relative deviation of 7.74%, and a root mean square error (RMSE) of 2.74 cm, and its accuracy was higher than the other two paths; path 1 fitted the rib diameter of the substation boundary standing wood and the internal standing wood better than path 2 and path 3; in terms of the standing wood position fitting accuracy, path 1 and path 3 had a better overall fitting effect, and the accuracy of path 1 was slightly better than path 3, with an *x*-axis estimated root mean square error (RMSE) of 0.077 m, a *y*-axis estimation root mean square error of 0.157 m, and a covariance difference of the maximum error direction of 0.124 m, all of which were smaller than the other two paths. [**Conclusion**] When collecting data through 32-line lidar, with the use of point cloud mapping of the forest-like land and the LeGO-LOAM algorithm, to achieve the fit measurement of the single wood factor, the overall mapping effect and the measurement accuracy of the aerial photogrammetry route like path plan (Path 1) are relatively better than the other paths. Based on this path plan, the mapping and measurement accuracy can be further improved by increasing the ground identification point and increasing the distance between the scanning path boundary and the sample point boundary. This can provide a reasonable path plan design for ground mobile lidar field data acquisition.

Key words: forestry survey; LiDAR; SLAM technology; accuracy verification

林业调查规划工作关系到林业可持续发展，为了更好的实现林业作用，保障森林健康发展，实现林业调查的智能化信息化十分重要[1]。在传统林业调查中，调查数据的收集往往依赖于人工采集，费时费力。三维激光扫描技术又称地面激光扫描技术是一种能够采集目标物体表面的三维坐标和反射强度等数据并最终以点云形式表达在计算机上的技术[2]。三维激光雷达系统作为一种迅速发展起来的三维场景信息获取技术，可以根据搭载平台的不同主要分为机载式、车载式、地基式、地面移动式。不同搭载平台的激光雷达系统在量测尺度及效果上具有差异化特点，因此被广泛应用于各种不同的森林结构参数提取研究[3−4]。陶江玥等[5]利用机载雷达及高光谱数据实现森林样地内树种识别功能。北京林业大学冯仲科教授团队首次将地面三维激光扫描技术应用到我国林业资源调查中，并对该技术在林业中的应用进行了一系列的研究[6−8]。但在实际应用中，由于一般的地基式激光雷达体积庞大、扫描角度受限以及树木相互遮挡现象往往会影响激光雷达探头的扫描效率，进而影响测量工作的整体进程，同时此类雷达系统存在设备能量高，射程远，数据噪声严重，后期处理复杂等问题，进而给林下作业造成一定的局限。地面移动式激光雷达包括背包式、手持式等系统，具有安装方便、易操作、便携的特点，能适应林木稠密、地形复杂的环境[9]。此外，搭载即时定位与地图创建（simultaneous localization and mapping，SLAM）算法[10−11]的移动式激光雷达可实现在全球卫星导航系统（global navigation satellite system，GNSS）信号弱的林下环境中构建样地点云数据，进而完成单木因子的量测工作，减少人工调查工作量，提高林业调查效率和准确度[12]。范伟伟等[13]利用手持激光雷达设备方便快速地获取较大面积的森林数据并与传统人工林业调查方法及地基式雷达量测精度效率对比，结果显示，手持激光雷达设备具有较高的扫描效率与胸径估测精度，拟合均方根误差可控制在1.6 cm，为森林结构的研究提供了新视角。蔡硕、陈东鹏等[14−16]利用背包式激光雷达在算法上提出树干表面节点胸径提取算法，优化了森林样地调查胸径提取工作，胸径拟合均方根误差在 1.75 ~ 6.15 cm，相比传统地基式激光雷达下降了 28.15%。范永祥等[16−18]利用激光及视觉 SLAM 技术并通过改进的森林 LOAM 算法结合高线束激光雷达的实现单木因子量测。通过移动式激光雷达结合激光 SLAM 算法构建全局一致性地图，在观测过程及后端优化中，会存在很多对数据造成干扰的噪声，同时根据 SLAM 系统后端优化依赖于回环检测的信息，所以全局一致性地图的准确性与扫描轨迹有着密切联系，在数据采集时需要制定合理的路径规划，才能够获取得到质量最优的点云数据。

本研究将利用手持式激光雷达进行多种路径扫描获取点云数据并实现样地建图及单木因子提取，将各个路径点云数据从建图效果及效率、胸径及位置拟合精度这几个方面进行对比分析，并在样地内结合样地概况及回环检测及后端优化原理的要求规

划出最优扫描观测路径。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本项目选择北京市东升八家郊野公园(40°01′N, 116°20′E)作为研究区域，公园位于海淀区东升乡八家地区，样地位置如图 1 所示。公园占地面积 101.45 hm^2，园区内栽植了大量的耐旱花灌木以及地被植物，保留了原有的梨园。调整乔灌花木 2.17 万株，新栽常绿和落叶乔木 14 种 1.81 万株、花灌木 34.1 万株、地被 40.27 万 m^2。研究样地位于公园东区，样地内地形平整且为人工杨树林，树种为山杨(*Populus davidiana*)，林下灌木较少便于数据采集处理，选取大小为 32 m × 32 m。

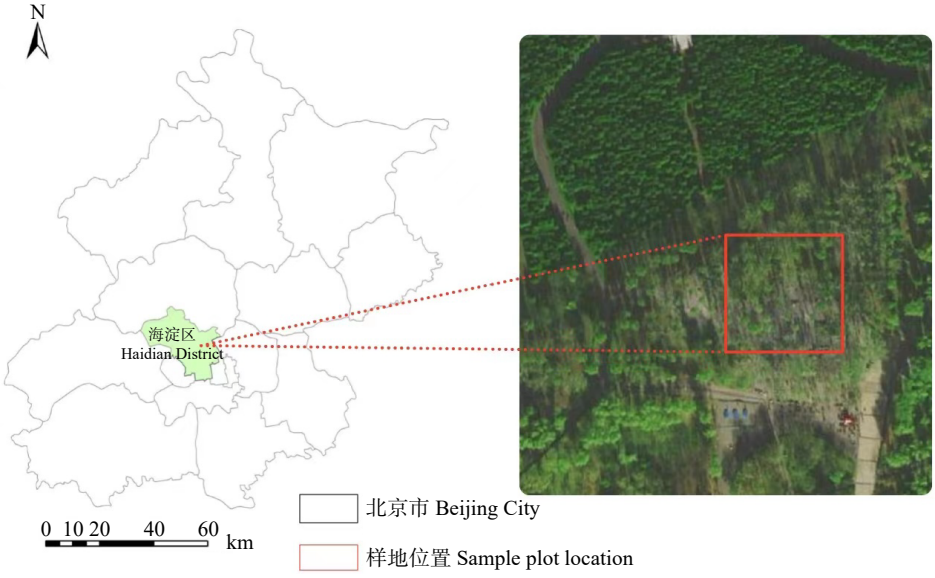


图 1 样地位置图

Fig. 1 Sample plot location map

1.2 路线规划

在使用激光雷达进行观测的过程中，应选择合适的观测路径并对部分立木间隔地、均衡地、合理地重新观测，这是因为传感器运动过程中识别能够当前场景是否曾经到达过，如果能够识别到当前场景，就会将此刻生成的地图与刚刚生成的地图做匹配，进而对地图进行优化显著地减小累积误差[19]。因此为降低算法建图时存在的累计误差，为提高回环检测次数，减少位姿漂移，路线设计均以样地中心为扫描起点及终点。

为保证样地内所有树木均被完整扫描以构建点云模型，扫描路径应尽可能遍及样地内各区域，同时路径范围应大于样地范围以确保位于边界的树木能够完整构建。综合以上需求并结合现阶段研究中常见的激光雷达扫描路径，共设计以下 3 种不同方式的路径方案，具体路线如图 2 所示。

(1)逐行式。这是一种近似于航空摄影测量航线的路径方案，也是现阶段各类研究中较常见的扫描方案。从样地中心出发沿西北方向沿对角线行进至样地西北角后开始逐行前进，行间距大致控制在 6 m，最后抵达样地东南角后沿对角线重回样地起点(图 2a)。

(2)逐环式。从样地中心出发沿西北方向行进至二分之一处，向正东方向开始进行环状路线前进，完成一圈后继续沿对角线向西北方向前进至西北角后，继续向东进行环状路线前进，完成第二圈后回到样地西北角，再沿对角线重新返回起点(图 2b)。

(3)多环式。从样地中心出发，分别沿 8 个方向进行椭圆型环状行进，每走完一个环形回到起始点后再向下一个环形前进(图 2c)。

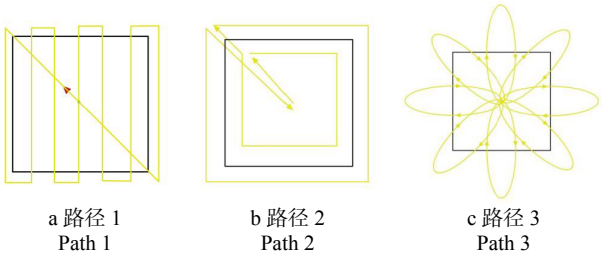


图 2 样地扫描路线图

Fig. 2 Sample plot scanning route map

1.3 数据采集与处理

1.3.1 数据采集

本项目采用 32 线激光雷达 VLP-32C 获取点云数据，测试距离可达到 200 m，水平视角 360°，垂直可视角 40°，最小分辨率 0.33°，出点速度为 600 000

点/s,初始设置雷达频率为 10 Hz。为方便实验人员量测,激光雷达加装手持杆以提高传感器高度减少遮挡。此外,本研究还需使用户外移动电源为激光雷达提供电量保证。为比较各个路径数据精度,需利用全站仪及胸径尺记录样地单木的位置及胸径数据的实测值。为方便手持并减少遮挡,为其加装了手持柄,为判断激光雷达竖直状态,在激光雷达顶端安装了万向水准器,改装后设备如图 3 所示。



a 移动式激光雷达设备组成
Composition of mobile LiDAR equipment

b 扫描过程
Scanning process

图 3　数据采集

Fig. 3　Data acquisition

在研究区内选取 32 m × 32 m 的正方形人工林样地,采集前需确定样地中心点并放置激光雷达反射标志,为保证雷达记录点云数据坐标与真实坐标匹配,便于比较位置精度,雷达在起始第一帧数据应保证水平且 y 轴指向正北方向,按照规划路径行进,行进过程保持步速稳定,匀速前进,每种路径记录两次减少误差,待所有路径记录完毕后,检查数据是否记录完整。雷达数据采集完成后,利用全站仪、胸径尺记录样地实测数据,在图纸中绘图记录立木位置图,将全站仪架设在样地中心点,沿样地中心正北方向与样地边界的交点作为第一个后视观测点,记录样地内树木位置坐标,利用胸径尺量测记录胸径数据,全部记录完毕后,完成研究的数据采集工作。

1.3.2　LeGO LOAM 建图与单木因子量测

本研究利用激光 SLAM 中的 LeGO-LOAM 算法实现点云建图工作,LeGO-LOAM 全称为轻量级及地面优化激光雷达测距与建图,是一种针对线、面特征匹配的激光雷达测距与地图构建算法,适用于具有可变地形的复杂环境[20−21]。算法首先分割出地面点云,将 $P_t = \{p_1, p_2, \cdots, p_n\}$ 视为 t 时刻扫描得到的点云投影到距离图像,像素值 r_i 表示该点到传感器的距离值,对距离图像的柱状评价即可视为地面估计,从而实现地面提取,同时对剩下的点云进行聚类,滤除数量较少的点云簇实现噪声去除,分割后的点云通过计算曲率值的方法进行边缘点和面点特征提取,为了从各个方向均匀地提取特征,我们将距离图像水平分割成几个相等的子图像,设 S 为距离图像同一行连续 10 个点集合,p_i 两边分布相同个数点,计算曲率值遵循以下公式。

$$c = \frac{1}{\|S\| \times \|r_i\|} \times \left\| \sum_{j \in S, j \neq i} \left(r_j - r_i\right) \right\| \tag{1}$$

式中:c 为曲率值,S 为距离图像同一行连续 10 个点集合,r 为该点到传感器的距离值。

计算子图中每一行的点的曲率值,对曲率值进行排序分类,根据设置的分类阈值 c_{th},$c > c_{\text{th}}$ 的为边缘点,$c < c_{\text{th}}$ 的为平面点,实现边缘点和平面点的提取,再通过对边缘点和平面点进行帧与帧的特征匹配获取相邻帧的位姿变化信息,进而将当前帧点云匹配至全局地图中,LeGO-LOAM 系统总览如图 4 所示。

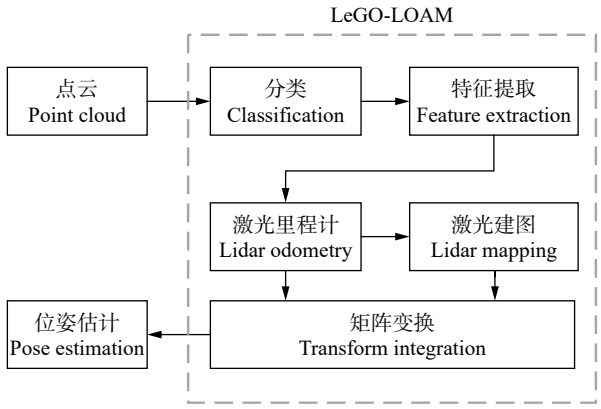


图 4　LeGO-LOAM 系统总览

Fig. 4　System overview of LeGO-LOAM

本文研究数据处理过程主要在 LeGO-LOAM 框架内,并结合本试验需求对算法进行修改补充。在 LeGO-LOAM 框架内,利用 pcl 及 libLAS 库函数增添读写点云,点云格式转换操作,同时可实现在函数内设置下采样精度,设置合适的下采样尺寸,并将导出的点云数据转换为 las 格式文件,将点云数据利用 LiDAR360 软件进行去噪、地面点提取、归一化、坐标转换等预处理操作并实现单木因子的拟合量测。

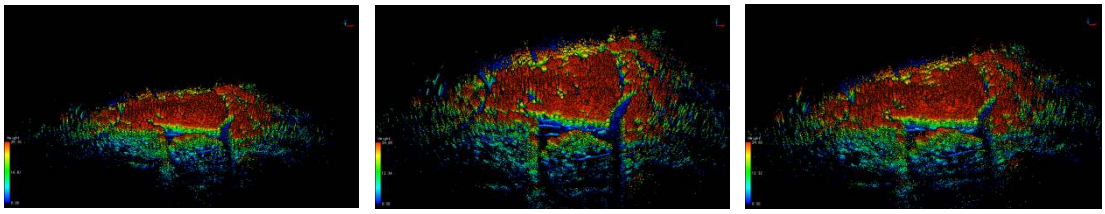
2　结果与分析

在实现点云建图及单木因子提取工作后发现,3 种扫描路径在实际扫描中时间效率及算法配准效率会存在着一定差异,同时 3 种路径扫描数据提取的单木结构参数精度也不尽相同,各路径建图效果及效率,胸径及位置精度对比分析如下。

2.1　建图效果及效率对比

2.1.1　建图效果对比

3 种路径经过 LeGO-LOAM 算法建图整体效果如下图 5 所示,整体建图效果较好,3 种路径均能够完整地构建出样地环境点云图,但建图细节上



a 路径 1 整体建图效果
Overall mapping effect of path 1

b 路径 2 整体建图效果
Overall mapping effect of path 2

c 路径 3 整体建图效果
Overall mapping effect of path 3

图 5 LeGO LOAM 点云建图

Fig. 5 Point cloud mapping of LeGO LOAM

会存在一定差异，其中路径 1 点云总数平均值为 3 321 665，特征点云个数平均值为 175 401，路径 2 点云总数平均值为 3 014 421，特征点云个数平均值为 155 045，路径 3 点云总数平均值为 3 468 485，特征点云个数平均值为 192 174，观察路径 3 点云总个数最多，数据量最大且特征点个数最多。观察图 6，比较 3 组路径在样地内部相同位置的建图效果差异图像，路径 3 样地内部构建立木的周围存在明显噪声点，甚至有立木在建图时会有存在重影的问题，其他路径建图样地内部未出现明显噪声。通过图 7 3 种路径在单木尺度的拟合效果可观察到，同一棵立木路径 1 拟合效果最佳，圆柱特征明显，噪声点少。因此，建图效果方面，路径 1 效果最优。

2.1.2 时间效率对比

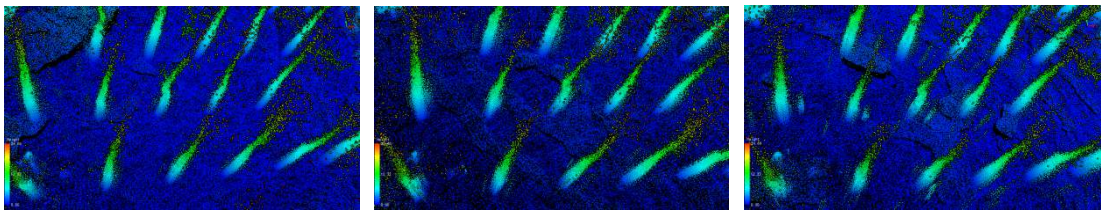
3 种路径在实测过程真实行进路径如下图 8，在行进中路线整体控制效果较好。3 种路径的时间效率如下表 1 所示，配准时间主要考虑的是录制的点云数据在 LeGO LOAM 算法运行实现点云建图的时间，整体上与扫描时间成正比，其中路径 2 效率略高于其他路径。考虑到现场测量的时间与实验样地林木密度和量测员作业的熟练程度有较大关系，因此在时间效率方面，3 种路径整体扫描速度与配准时间没有明显差别，均明显高于地基雷达及人工量测效率。

2.2 胸径精度对比

本研究将采用各路径拟合数据的偏差（bias，B_{IAS}）、均方根误差（root mean squared error，R_{MSE}）、相对偏差（relative bias，B_{rel}）对胸径估计值精度进行评估（其中 R_{MSE} 也用于立木位置精度评估），其计算公式[18]如下所示。

$$B_{IAS}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_{ir})}{n} \tag{2}$$

$$B_{rel}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i/x_{ir}-1)}{n}\times 100\% \tag{3}$$



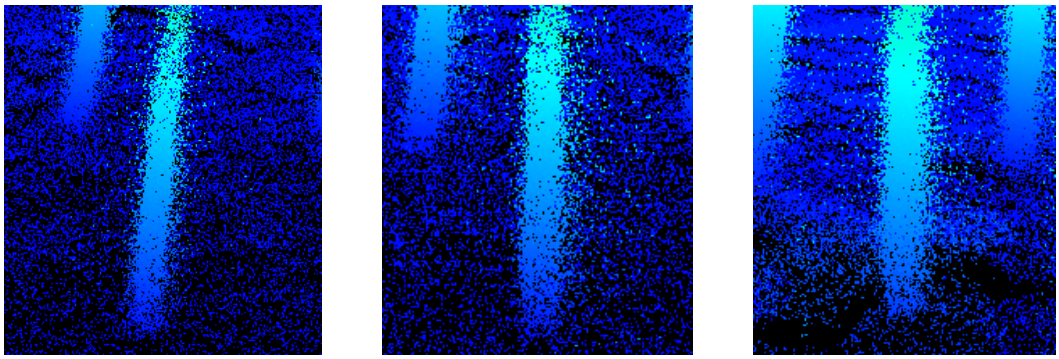
a 路径 1 样地内部效果
Internal effect of sample plot in path 1

b 路径 2 样地内部效果
Internal effect of sample plot in path 2

c 路径 3 样地内部效果
Internal effect of sample plot in path 3

图 6 样地内部效果

Fig. 6 Internal effects of sample plots



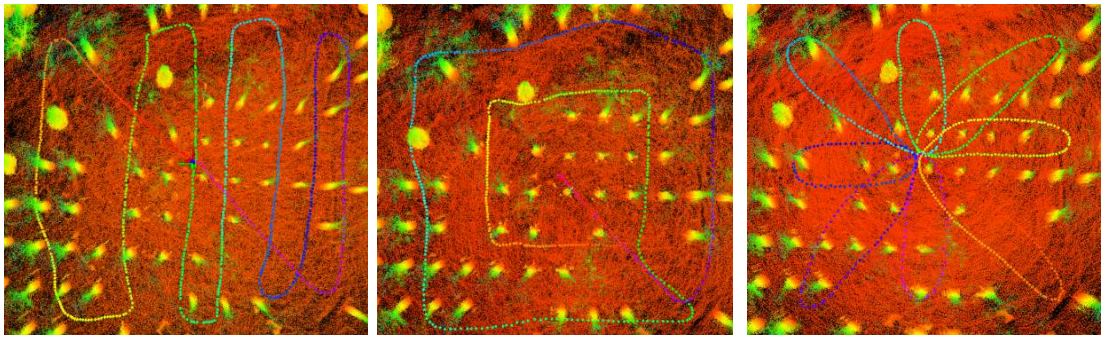
a 路径 1 单木建图效果
Individual wood mapping effect in path 1

b 路径 2 单木建图效果
Individual wood mapping effect in path 2

c 路径 3 单木建图效果
Individual wood mapping effect in path 3

图 7 单木建图效果

Fig. 7 Individual wood mapping effect



a 路径 1 实测路线
Measured route of path 1

b 路径 2 实测路线
Measured route of path 2

c 路径 3 实测路线
Measured route of path 3

图 8　实测路线图

Fig. 8　Measured route map

$$R_{\mathrm{MSE}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_{ir})^2}{n}} \tag{4}$$

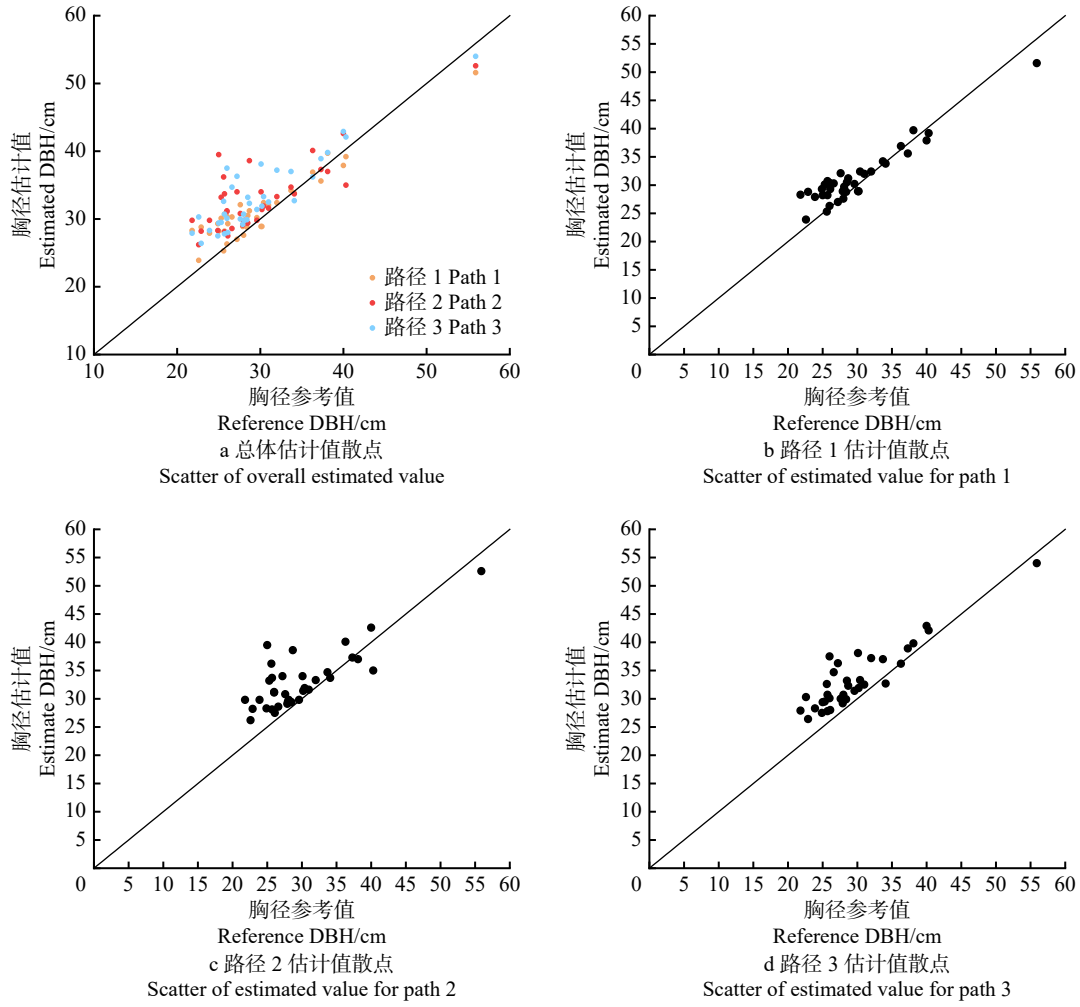
式中：x_i 为测量值，x_{ir} 为相应于测量值 x_i 的参考值，n 为测量值的总数。

研究中各路径误差如下表 2，由数据可知，各路径拟合出来的胸径整体偏差在 2.18～3.14 cm，相对偏差在 7.74%～10.73%，均方根误差在 2.74～4.12 cm，由图 9 可直观看出，参考值与估计值对均落在中线附近，胸径估计值可靠性强。路径拟合出的胸径精

表 1　各路径时间效率

Tab. 1　Time efficiency for each path

路径 Path	扫描时间 Scanning time/s	扫描速度 Scanning speed/(m^2·min^{-1})	配准时间 Registration time/s
1	316	194.4	350
2	280	219.4	300
3	330	186.2	349



a 总体估计值散点
Scatter of overall estimated value

b 路径 1 估计值散点
Scatter of estimated value for path 1

c 路径 2 估计值散点
Scatter of estimated value for path 2

d 路径 3 估计值散点
Scatter of estimated value for path 3

图 9　胸径估计值散点图

Fig. 9　Scatter plot of estimated DBH

度存在一定差异，路径 1 拟合的样地内完整地 36 棵树的胸径在绝对误差、相对误差、均方根误差在数值上明显优于路径 2 与路径 3，路径 2 与路径 3 相对偏差大致相同，但路径 2 的胸径绝对误差与均方根误差优于路径 3，且由散点图观察到路径 1 相对其他路径更贴近中线，说明路径 1 相较于其他路径具有拟合精度高，相对偏差小、离散程度低，具体如下图。因此，在胸径拟合方面，综合比较胸径拟合的偏差、均方根误差及散点分布等参数，路径 1 相对于其他路径具有较高精度及相关性。

表 2　各路径立木胸径拟合精度

Tab. 2　Fitting accuracy of DBH of standing trees in each path

路径 Path	B_{IAS}/cm	B_{rel}/%	R_{MSE}/cm
1	2.18	7.74	2.74
2	2.86	10.36	3.72
3	3.13	10.73	4.12

注：B_{IAS}为偏差；B_{rel}为相对偏差；R_{MSE}为均方根误差。Notes: B_{IAS} is the bias; B_{rel} is the relative bias; R_{MSE} is root mean squared error.

2.3　位置精度对比

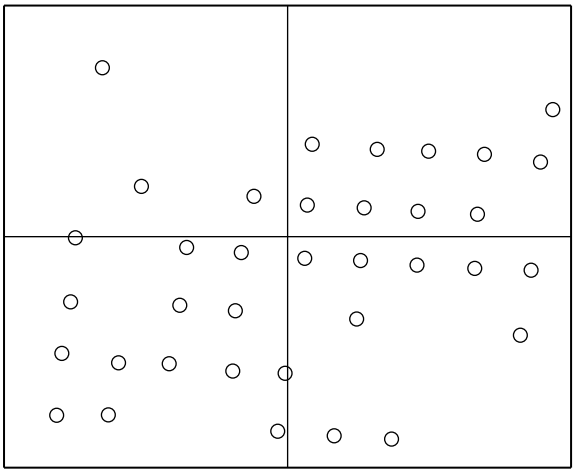
样地立木位置实测数据如图 10 所示，各路径拟合散点误差本文采用由立木位置误差统计获取的均值向量 $\boldsymbol{\mu}$ 及二维协方差阵 $\boldsymbol{S}$ 对立木位置估计值精度进行评价[8]，其定义为

$$\boldsymbol{\mu}=\begin{bmatrix}\mu_x\\ \mu_y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_{ir})}{n}\\ \dfrac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-y_{ir})}{n}\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{S}=\sum_{i=1}^{n}\begin{bmatrix}x_i-x_{ir}-\mu_x\\ y_i-y_{ir}-\mu_y\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_i-x_{ir}-\mu_x\\ y_i-y_{ir}-\mu_y\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中：(x_i, y_i)为立木位置估计值；(x_{ir}, y_{ir})为参考值；n 为立木总数。此外，协方差阵 $\boldsymbol{S}$ 的最大特征值可表示为

$$\sigma_{max}=\sqrt{\max(\mathrm{eigenvalues}(\boldsymbol{S}))} \tag{7}$$



○ 实测位置 Actual measurement position

图 10　样地立木实测位置图

Fig. 10　Actual location map of standing trees in sample plots

式中：max()为求取最大值，eigenvalues()为矩阵 $\boldsymbol{S}$ 所有特征值。

该值为立木位置最大变异性方向的标准差，用其评价立木位置精度。

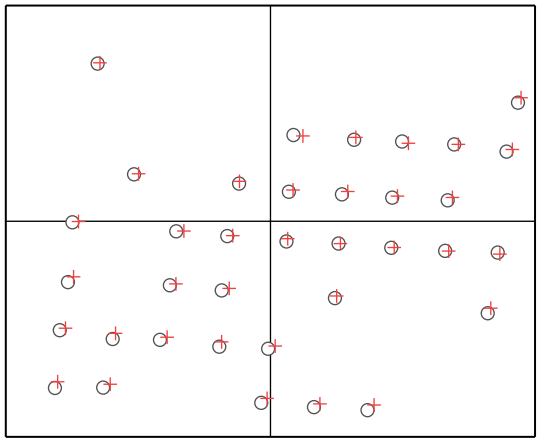
本次研究获取立木位置数据精度如下表 3 所示，x 轴估计值平均误差在−0.183 ~ 0.022 m，路经 1 误差最小为 0.022 m，y 轴估计值平均误差−0.112 ~ 0.036 m，路径 3 平均误差最小为 0.036 m，解算所得 x、y 两轴协方差值接近于 0，说明估计值两轴间无明显相关性，3 种路径均方根误差(RMSE)在 x 轴估计值误差在 0.077 ~ 0.238 m，y 轴估计值误差在 0.157 ~ 0.232 m，其中路径 1 的 x 轴均方根误差最小，y 轴估计值均方根误差路径 1 与路径 3 数值接近，路径 3 略低于路径 1，最大误差方向的协方差值为 0.124 ~ 0.203 m，其中路径 1 数值最小为 0.124 m，精度最高。3 种路径拟合效果如下图 11，可观察到路径 1、路径 3 整体拟合效果较好，图 12 可观察到路径 1 与其他两种路径相比偏差相对较小且整体误差分布更均匀。路径 2 的两轴估计值误差均比较大，拟合效果不如其他路径，主要原因可能是路径 1 和路径 3 的回环检测点明显多于路径 2，能够后更好地进行全局一致性估计。因此，在位置精度方面，综合比较两轴均方根误差、最大变异性方向的标准差等参数，

表 3　各路径位置拟合精度

Tab. 3　Fitting accuracy of each path position

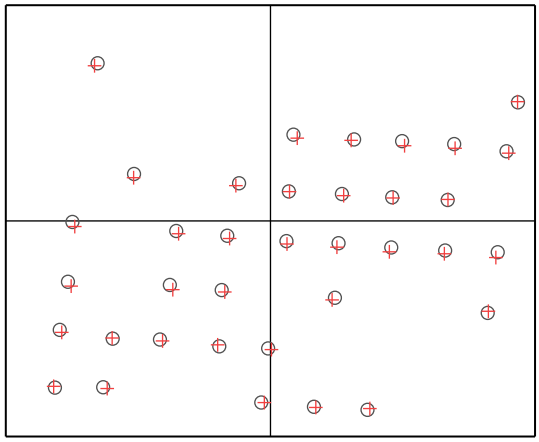
路径 Path	μ_x/m	μ_y/m	σ_x/m	σ_y/m	ρ_{xy}	σ_{max}/m	RMSE$_x$/m	RMSE$_y$/m
1	0.022	−0.098	0.074	0.123	−0.002	0.124	0.077	0.157
2	−0.183	−0.112	0.152	0.203	0.001	0.203	0.238	0.232
3	−0.095	0.036	0.143	0.177	−0.005	0.182	0.171	0.181

注：μ_x, μ_y为立木位置x, y轴偏差；σ_x, σ_y为立木位置 x, y 轴方向标准差；ρ_{xy}为立木位置x, y轴方向协方差。Notes: μ_x, μ_y is the bias of the position of standing trees in x, y directions; σ_x, σ_y is the standard deviation of the position of standing trees in x, y directions; ρ_{xy} is the covariance of the position of standing trees in x, y directions.



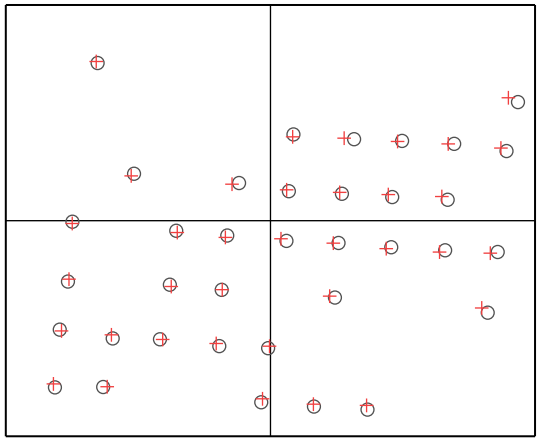
○ 实测位置 Actual measurement position
+ 拟合位置 Fitting location

a 路径 1 效果图
Effect drawing of path 1



○ 实测位置 Actual measurement position
+ 拟合位置 Fitting location

b 路径 2 效果图
Effect drawing of path 2



○ 实测位置 Actual measurement position
+ 拟合位置 Fitting location

c 路径 3 效果图
Effect drawing of path 3

图 11　各路径位置效果

Fig. 11　Location effects for each path

路径 1 与路径 3 整体拟合效果明显优于路径 2，路径 1 精度高于路径 3。

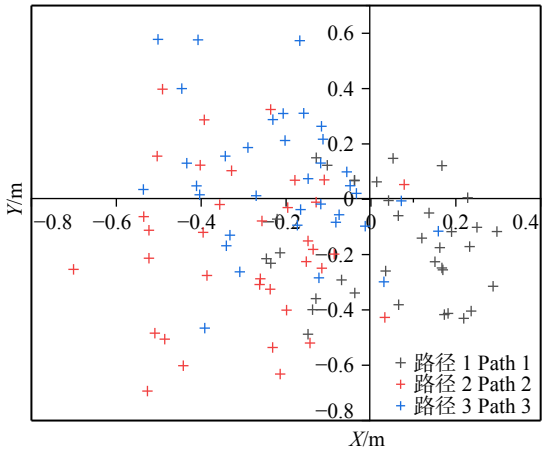


图 12　各路径位置误差散点图

Fig. 12　Scatter plot of position error for each path

3　结　　论

本研究将激光 SLAM 技术应用到林业调查工作中，选取在 SLAM 领域较先进的开源 LeGO-LOAM 算法，并在此框架基础上，结合森林样地特点及胸径拟合需求，对算法进行改进处理，调整下采样参数及点云输出格式；据传统航空摄影测量航线设计及 SLAM 技术应用的相关研究并结合林业样地特点规划出 3 种手持移动式激光雷达在样地内扫描路径方案并利用算法实现点云地图构建，在使用 32 线激光雷达进行数据采集并基于 LeGO-LOAM 算法对林业样地进行点云建图并利用 LiDAR360 软件实现单木的胸径、位置参数的拟合。通过分析得到以下结论。

（1）3 种路径利用算法均能够实现样地环境点云地图的构建，整体建图效果及效率较好在实际操作过程中，利用 3 种路径采集数据所需的时间远少于人工量测方法及地基式激光雷达获取数据的时间。3 种路径整体运行时间相差不大，逐环式路径 2 在数据获取及算法运行过程用时相对较短、效率略高于其他路径。

（2）通过比较 3 种路径拟合的样地立木位置与实测位置之间的 x 轴偏差、y 轴偏差，协方差，两轴均方根误差等参数，并观察拟合与实测位置图像，可观察到逐行式路径 1 与多环式路径 3 整体效果较好，路径 1 解算的各组误差值略低于路径 3，效果最佳。

（3）比较各路径拟合的胸径数据与实测数据的偏差、相对偏差，均方根误差，样地各路径拟合出来的胸径整体偏差在 2.18 ~ 3.14 cm，相对偏差在 7.74% ~ 10.73%，均方根误差在 2.74 ~ 4.12 cm，其中逐行式路径 1 胸径拟合误差最小，相对偏差与均方根误差均优于路径 2 与路径 3。

（4）综合比较 3 种路径各方面参数，近似于航空摄影测量航线的路径方案的逐行式路径整体建图

效果、量测精度相对优于其他路径，可为后续利用点云数据在计算机中实现林业样地的环境地图建模与单木因子量测提供等相关研究提供路径设计参考。

参 考 文 献

[1] 闫飞. 森林资源调查技术与方法研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Yan F. Research of technology and method of forest resouce inventory[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[2] 徐诗宇, 施拥军, 冯晟斐. 基于三维激光点云的城市绿化树种材积及树干碳储量无损精确测算 [J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(6): 1062−1069.
Xu S Y, Shi Y J, Feng S F. Nondestructive and accurate measurement of volume and stem carbon storage for urban greening tree species based on terrestrial laser scanning point cloud[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(6): 1062−1069.

[3] 郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 等. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望 [J]. 科学通报, 2014, 59(6): 459−478.
Guo Q H, Liu J, Tao S L, et al. Current status and prospect of the application of lidar in forest ecosystem monitoring and simulation[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(6): 459−478.

[4] Leeuwen M V, Nieuwenhuis M. Retrieval of forest structural parameters using LIDAR remote sensing[J]. European Journal of Forest Research, 2010, 129(4): 749−770.

[5] 陶江玥, 刘丽娟, 庞勇，等. 基于机载激光雷达和高光谱数据的树种识别方法 [J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(2): 314−323.
Tao J Y, Liu L J, Pang Y, et al. Automatic identification of tree species based on airborne LiDAR and hyperspectral data[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(2): 314−323.

[6] 韩光瞬, 冯仲科, 刘永霞，等. 三维激光扫描系统测树原理及精度分析 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 187−191.
Han G S, Feng Z K, Liu Y X, et al. Forest measurement principles and precision analysis of three-dimensional laser scanning system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(2): 187−191.

[7] 冯仲科, 罗旭. 基于三维激光扫描成像系统的树冠生物量研究 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 52−56.
Feng Z K , Luo X. An estimation of tree canopy biomass based on 3D laser scanning imaging system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2): 52−56.

[8] 蔡硕. 基于地基激光雷达和背包式激光雷达林木胸径提取 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
Cai S. Extraction of tree diameter at breast height based on terrestrial laser scanning and backpack baser scanning[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

[9] Tang J, Chen Y, Kukko A, et al. SLAM-aided stem mapping for forest inventory with small-footprint mobile LiDAR[J]. Forests, 2015, 6(12): 4588−4606.

[10] Shan T, Englot B, Meyers D, et al. Lio-sam: tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). New York: IEEE, 2020: 5135−5142.

[11] Zhang J, Singh S. LOAM: lidar odometry and mapping in real-time[C]. Robotics: Science and Systems, 2014: 109−111.

[12] Shao J, Zhang W, Mellado N, et al. SLAM-aided forest plot mapping combining terrestrial and mobile laser scanning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 163: 214−230.

[13] 范伟伟, 刘浩然, 徐永胜, 等. 基于地基激光雷达和手持式移动激光雷达的单木结构参数提取精度对比 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(8): 63−74.
Fan W W, Liu H R, Xu Y S, et al. Comparison of extraction precision of individual tree structure parameters based on terrestrial laser scanning and hand-held mobile laser scanning[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(8): 63−74.

[14] 陈东鹏. 林业背包式激光雷达多传感器集成系统及数据融合的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
Chen D P. Study on forest backpack LiDAR multi-sensor integration system and data fusion[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

[15] 蔡硕, 邢艳秋, 端木嘉龙. 背包式激光雷达滤除低强度点云提取林木胸径 [J]. 森林工程, 2021, 37(5): 12−19.
Cai S, Xing Y Q, Duanmu J L. Extraction of DBH from filtering out low intensity point cloud by backpack laser scanning[J]. Forest Engineering, 2021, 37(5): 12−19.

[16] 范永祥. 便携式 RGB-D SLAM 测树系统关键技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Fan Y X. Research on key technologies of portable RGB-D SLAM tree measurement system[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[17] 范永祥, 冯仲科, 陈盼盼, 等. 基于 RGB D SLAM 手机的森林样地调查系统研究 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 226−234.
Fan Y X, Feng Z K, Chen P P, et al. Research on forest plot survey system based on RGB D SLAM mobile phone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 226−234.

[18] 范永祥, 冯仲科, 申朝永, 等. 基于改进 LOAM 的森林样地调查系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 291−300.
Fan Y X, Feng Z K, Shen C Y, et al. Design and experiment of forest plot survey system based on improved LOAM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 291−300.

[19] 刘威. 应用于移动机器人视觉 SLAM 的地点识别研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
Liu W. Researh on place recognition of visual SLAM for mobile robot[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019.

[20] Shan T, Englot B. Lego-loam: lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain[C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). New York: IEEE, 2018: 4758−4765.

[21] Kim G, Choi S, Kim A. Scan context++: structural place recognition robust to rotation and lateral variations in urban environments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 38(3): 1856−1874.

（责任编辑 范 娟
责任编委 冯仲科）