

基于移动 LiDAR 点云的树木三维重建*

翟晓晓, 邵杰^{*}, 张吴明, 靳双娜

(北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院, 北京 100875)

摘要:【目的】树木三维结构的描述是进行农林生态研究的重要科学基础, 而移动激光雷达的使用将有利于快速、高效的农林树木三维结构重建。【方法】文章利用同时定位与构图技术实现基于移动激光雷达点云的农林样地树木三维重建, 并以地基激光雷达数据为参考, 验证三维重建精度, 同时对比树木胸径, 分析移动激光雷达在农林树木三维重建中的有效性和可行性。【结果】同时定位与构图技术可实现移动激光雷达点云的树木三维重建, 其中, 水平方向重建精度为 0.038 m, 垂直方向重建精度为 0.017 m; 以地基激光雷达数据拟合出的树干胸径为真实值, 移动激光雷达点云拟合出的树干胸径为观测值, 两者的相关系数为 0.715 6, 均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 分别为 0.011、0.01 m。【结论】移动激光雷达可实现农林树木三维结构快速重建, 且基于重建结果可实现树干胸径准确提取。因此, 移动激光雷达对提高农林树木测量效率具有积极作用。

关键字: 移动激光雷达; 同时定位与构图; 树木; 三维重建

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20190509

0 引言

作为农林树木调查的关键, 树木三维结构的变化对林木自身的光合作用、蒸腾作用, 以及地表生物量和林分生态环境等具有一定影响, 并且在物质交换和能量传递过程中发挥重要作用^[1-2]。农林树木三维结构的准确描述是农林生态学研究的重要科学基础, 也是提出科学有效的农林经营与管理策略的迫切需求^[3]。因此, 准确、完整地获取树木三维结构信息是农林生态研究、监测和评价要解决的重要问题。

以航空测量和卫星遥感为代表的遥感技术为农林调查提供了丰富的影像信息, 能够获取大区域内树木生长因子和生态、环境信息, 然而光学遥感技术获取三维结构参数的能力有限, 仅能反演水平结构信息, 难以获取垂直维度的信息^[4-5]。激光雷达 (Light Detection and Range, LiDAR) 是 20 世纪 60 年代发展起来的一项技术, 激光脉冲也因具备一定的穿透力和抗干扰性, 使其在获取树木垂直结构信息方面有着光学遥感无法比拟的优势。作为一种主动遥感技术, 激光雷达遥感技术也被广泛地应用于林木资源调查^[6-7]。由于能够获取周围空间大量 mm 级精度的三维点云, 地基激光雷达在近十几年

收稿日期: 2019-09-30

第一作者简介: 翟晓晓 (1991—), 硕士研究生。研究方向: 激光遥感。Email: 861315457@qq.com

* 通信作者简介: 邵杰 (1988—), 博士研究生。研究方向: 三维信息获取与应用。Email: shaojie@mail.bnu.edu.cn

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41671414, 41971380, 41331171, 41171265); 国家重点研发计划 (2016YFB0501404)

2019年10月

来已经被越来越多地应用于农林调查当中^[8]。然而,树木之间的遮挡使地基激光雷达在农林环境中的扫描范围受限,往往需要设置多站扫描来代替单站扫描获取详细的树冠下层垂直结构信息^[9]。一般情况下,多站扫描需要进行预扫描准备,如扫描站点、人工靶标以及辅助设施的布设^[10],降低了地基激光雷达的工作效率。移动激光雷达扫描仪可降低遮挡带来的影响,且因其快速、高效的数据采集特点逐渐被应用到农林调查当中。在快速构建林木三维结果的同时保证数据质量和精度,是移动激光雷达系统在林木调查应用中需要面对的问题。为此,文章利用同时定位与构图(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)技术实现基于移动LiDAR点云的农林样地树木三维快速重建。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处河北省承德市塞罕坝国家机械林场,如图1所示。该区域属于典型的半干旱半湿润寒温性大陆季风气候,年均气温 -1.3°C ,年均降水量460.3 mm,平均海拔在1 010~1 939.9 m。土壤类型以山地棕壤、灰色森林土和风沙土为主,处于森林—草原交错地带,植被类型多种多样,分别为落叶针叶林、长绿针叶林、针阔混交林、阔叶林、灌丛、草原与草甸和沼泽及人生群落。

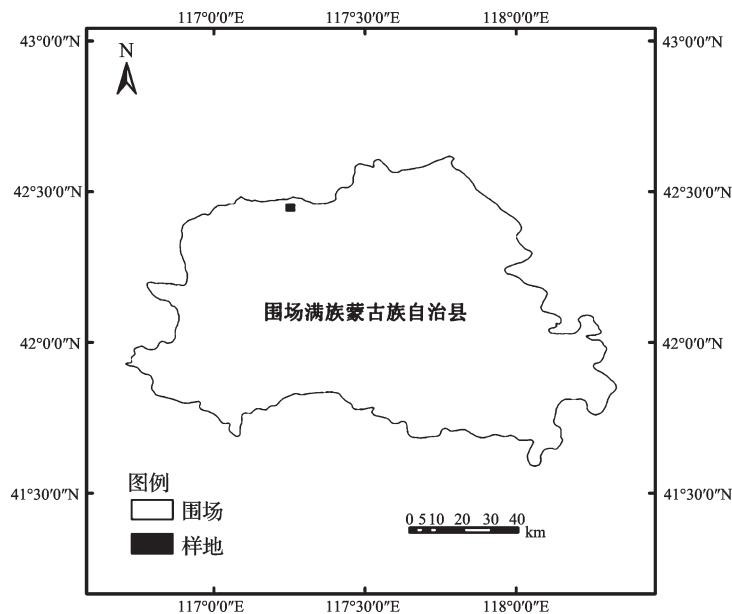


图1 研究区位置

Fig.1 Study area

1.2 数据获取

试验利用Velodyne VLP-16激光雷达扫描仪,该扫描仪共16通道,测量范围在100 m左右,测量精度为 $\pm 3\text{ cm}$,支持两次回波。垂直测量角度范围为 30° ($-15^{\circ}\sim+15^{\circ}$),垂直

方向角度分辨率为 2° ；水平方向测量角度范围为 360° ，水平角度分辨率为 $0.1\sim 0.4^\circ$ ；激光波长为 905 nm ，安全等级为 1 级人眼安全级别，激光雷达的扫描频率被设置为 10 Hz 。试验选取一块 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$ 大小的样地，样地树木种类为落叶松，通过交叉穿越的移动方式共获取 1 900 帧移动激光点云数据。此外，试验还获取了多站地基激光雷达数据，以验证移动激光雷达重建样地树木三维结构的精度。

1.3 研究方法

SLAM 是在没有环境先验信息的情况下，构建环境模型，并估算传感器自身运动。该文基于图优化 SLAM 方法进行了样地树木三维结构重建，即实现 1 900 帧移动激光点云数据的拼接，主要涉及两方面内容^[11]：激光里程计和全局优化，又称为前端和后端。其中，激光里程计用来反映相邻点云间的变换关系，包括平移和旋转；全局优化用于消除连续点云拼接所带来的累积误差^[12]。SLAM 技术实现过程包括特征选取、特征匹配、位姿估计以及全局优化 4 个步骤。

(1) 特征选取：选用点特征进行传感器运动估计。首先，根据传感器特点，基于垂直分辨率对所获点云进行分层处理；按照水平扫描范围，将每层点云集均匀划分为若干个子点云集；基于各点深度及其邻近点的深度计算该点深度变化率，取各子点云中深度变化率最大或最小的点作为关键点特征。

(2) 特征匹配：针对当前帧点云中的关键点，利用 kdtree 搜索各关键点在上一帧点云中的最邻近点，并将其作为关键点的初始对应点。为了降低初始对应点对误差，首先借助迭代最邻近算法进行相邻帧点云的匹配。

(3) 位姿估计：构建对应点对间的变换关系，利用最小二乘法最小化对应点对间的欧式空间距离，从而计算出两帧点云间的变换。

(4) 全局优化：采用一种基于累积地图的优化方法实现所有 LiDAR 点云的全局优化。以第一帧 LiDAR 点云作为基准，按上述步骤计算第二帧点云与第一帧点云间的变换，并将其转换到基准坐标系下与第一帧点云融合，生成累积地图，同时将该累积地图作为新的基准；以此类推，将后续移动 LiDAR 点云分别与累积地图进行拼接。

基于以上步骤，不仅可以估算出每一帧点云在基准坐标系中的位姿，还可以基于位姿信息将所有点云转换到基准坐标系下，实现样地构图，即为同时定位和构图。

2 结果与分析

2.1 树木重建结果及精度

基于 SLAM 方法对采集到的 1 900 帧移动 LiDAR 点云进行拼接，实现样地树木三维结构重建，结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出，基于 SLAM 技术可以实现移动 LiDAR 点云的样地树木三维结构重建，且样地中的单木可以被准确重建，无明显偏差。为了对重建结果进行定量评估，该文以树干位置偏差评估重建结果在水平方向上的精度，以树枝位置偏差评估重建结果在垂直方向上的精度。首先，通过手动方式将移动 LiDAR 点云重建的结果与地基激光点云

2019年10月



图2 树木重建结果

Fig.2 Trees reconstruction results

数据进行拼接；然后，取离地面 1.3 m 处树干点云拟合出的中心作为树干位置，计算移动激光点云和地基激光点云得到的对应中心点水平距离；同时，分别从两组数据中的树枝上提取一定量的同名特征点，并计算所提同名点对之间的垂直距离。精度统计如表 1 所示。

表 1 树木重建结果精度

Table 1 The accuracy of trees reconstruction results

精度	平均绝对误差 (m)	标准偏差 (m)	最大绝对偏差 (m)
水平方向	0.038	0.007 4	0.051
垂直方向	0.017	0.012 3	0.042

从表 1 可知，该样地树木三维重建结果在水平方向上的平均绝对误差为 0.038 m，最大绝对偏差为 0.051 m，显示了 cm 级别的水平精度，其中标准偏差为 0.007 4 m，表明所选树干位置偏差值具有一定的稳定性。另外，垂直方向上的平均绝对误差为 0.017 m，最大绝对误差为 0.042 m，相对于水平精度，垂直方向显示出了更高的精度。需要注意的是，在实际操作中，手动拼接结果也会为精度统计引入一定的随机误差。

2.2 树木结构参数分析

树干结构参数反演是激光雷达在树木测量中的重要应用，为了评估移动激光雷达数据在树木测量应用中的有效性，该文从重建结果中进行了树干胸径的拟合，并与从地基激光雷达点云中拟合出的树干胸径进行对比，利用一元线性回归分析判断两者间的相关性，结果如图 3 所示。其中，获取树干 1.3 m 处的点云数据，并投影到二维平面，利用最小二乘法进行圆拟合，将得到的直径作为树干胸径。

试验共选取了 17 棵树用于树干胸径的相关分析。分析结果显示，观测值和真实值间的决定系数为 0.546 9 (图 3a)，均方根误差 (RMSE) 为 1.48 cm，平均绝对误差 (MAE) 为 1.29 cm。由于获取样地边缘树木点云的不完整，一些单木的胸径观测值与真实值之间存在相对较大的差异，因此，该文舍弃观测值大于或小于真实值 8% 的树干，并重新进行树干胸径观测值与真实值间的相关性分析 (共 3 棵树木被舍弃)，其中，决定系数增加到 0.715 6 (图 3b)，均方根误差和平均绝对误差分别降低到 1.12 和 1.01 cm。总体而言，基于移动 LiDAR 点云的树干胸径拟合精度可达到 1 cm 左右，具有较高的可靠性。

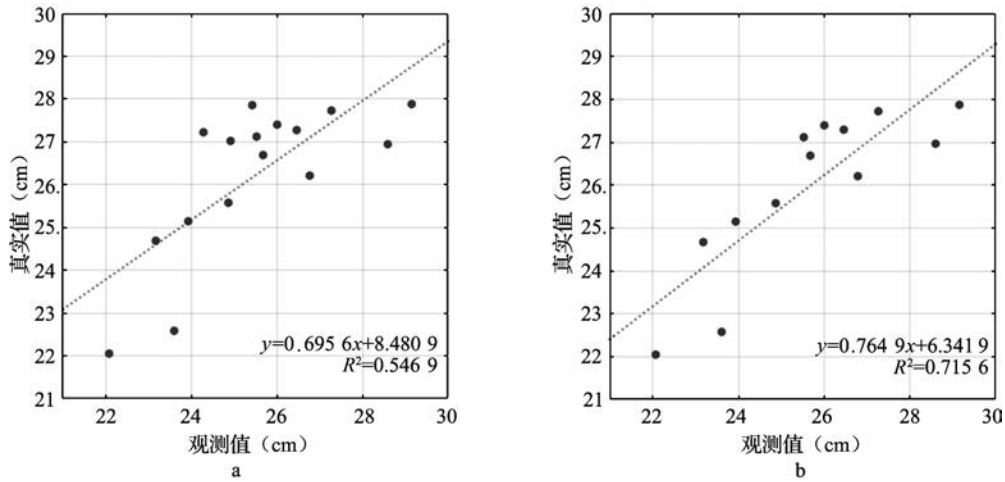


图 3 树干胸径对比, 将移动激光点云拟合出的树干胸径作为观测值, 地基激光点云拟合处的树干胸径作为真实值: a. 为试验选取的所有树干胸径对比; b. 为舍弃较大偏差后的树干胸径对比

Fig.3 Comparison of trunk diameters at breast height

3 结论

基于激光雷达技术的树木三维结构重建对精准农林调查具有重要意义, 高效率的树木三维重建是现代果园精准管理、森林树木调查的技术基础。为了实现高效快速的农林树木三维重建, 该文基于移动 LiDAR 点云, 借助图优化 SLAM 方法实现了样地级树木三维重建。以高精度的地基 LiDAR 数据作为参考, 试验结果显示了该方法对农林树木三维结构重建的可行性, 且树干胸径的对比也表明了移动 LiDAR 点云数据在农林树木测量中的有效性。尽管该文实现了移动 LiDAR 点云的树木三维重建, 但由于单个激光扫描仪垂直视场角的限制, 试验获取的点云数据多局限于树干部分, 难以获取到完整的冠层结构信息。因此, 联合多个激光扫描仪的树木三维重建将是接下来工作的重点。

参考文献

- [1] Rosell J., Lilorens J., Sanz R., et al. Obtaining the tree-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LiDAR scanning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149 (9): 1505~1515.
- [2] 范一峰, 黄兴召. 树木三维结构重建研究进展. *林业机械与木工设备*, 2013, 41 (2): 26~28.
- [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. *科学通报*, 2014 (59): 35~53.
- [4] 何祺胜, 陈尔学, 曹春香, 等. 基于 LiDAR 数据的森林参数反演方法研究. *地球科学进展*, 2009 (7): 748~755.
- [5] 马利群, 李爱农. 激光雷达在森林垂直结构参数估算中的应用. *世界林业研究*, 2011, 24 (1): 41~45.
- [6] Jaakkola A., Hyypää J., Kukko A., et al. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010 (65): 514~522.
- [7] Gao L., Coops N. C., Innes J. L., et al. Tree species classification in subtropical forests using small-footprint full-waveform lidar data. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2016 (49): 39~51.
- [8] Newnham G. J., Armston J. D., Calders K., et al. Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. *Current Forestry Reports*, 2015, 1 (4): 239~251.
- [9] Lovell J. L., Haverd V., Jupp D. L. B., et al. The canopy semi-analytic P_{gap} and radiative transfer (CanSPART) model: Validation using ground based lidar. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012 (158): 1~12.

2019年10月

- [10] Zhang W. M., Chen Y. M., Wang H. T., et al. Efficient registration of terrestrial LiDAR scans using a coarse-to-fine strategy for forestry applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016 (225): 8~23.
- [11] Dissanayake M. W. M. G., Newman P., Clark S., et al. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17 (3): 229~241.
- [12] Shao J., Zhang W. M., Mellado N., et al. Automated markerless registration of point clouds from TLS and structured light scanner for heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, 2019 (35): 16~24.

Three-dimensional reconstruction of trees using mobile laser scanning point clouds

Zhai Xiaoxiao, Shao Jie^{*}, Zhang Wuming, Jin Shuangna

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [**Purpose**] The description of three-dimensional (3D) structure of trees is an important scientific basis for forestry and agricultural ecology research, and the use of mobile laser scanning can be conducive to the rapid, and efficient reconstruction of 3D structure of trees. [**Method**] This paper achieves 3D reconstruction of trees of mobile LiDAR point clouds by using simultaneous localization and mapping (SLAM) technique. To evaluate the feasibility and effectiveness of mobile LiDAR in 3D reconstruction of trees, the terrestrial LiDAR data are regarded as reference to verify the accuracy of reconstruction and analyze the fitted diameter at breast height (DBH) . [**Result**] The SLAM technique can achieve trees reconstruction of mobile LiDAR data, of which the horizontal accuracy is approximately 0.038 m and the vertical accuracy is approximately 0.017 m. Meanwhile, the fitted DBH from mobile LiDAR data is regarded as observation, and the fitted DBH from terrestrial LiDAR data is regarded as truth-value. The correlation coefficient value between the observation and the truth-value is 0.715 6, the root mean square error (RMSE) and the mean absolute error are approximately 0.011 and 0.01 m, respectively. [**Conclusion**] Mobile LiDAR can be used for rapid reconstruction of 3D structure of trees, and accurate DBH also can be obtained based on the reconstruction results. Therefore, mobile LiDAR is significant for improving the efficiency of trees measurements.

Key words: mobile laser scanning; simultaneous localization and mapping; tree; three-dimensional reconstruction