

从三维激光点云中快速统计树木信息的方法

肖杨¹, 胡少兴¹, 肖深¹, 张爱武²

¹北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

²首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100037

摘要 树木位置分布及胸径(DBH)是研究森林生态、管理林区的重要指标。激光雷达在获取树木相关数据方面有巨大潜力,因此,提出用手持移动激光雷达获取的三维点云快速统计树木信息的方法。手持移动激光雷达可近距离采集树木信息,获取更详细的单木立面信息。针对上述点云特点,提出分层聚类的点云处理方法,按不同高度对点云切片,形成一组切片截面图,再仅对切片截面图聚类;根据聚类结果使用随机抽样一致性算法拟合出圆,对比一组切片截面图的拟合结果,完成树木点云提取。这种先取样再计算的方法大大提高了运算速度。实验证明该方法树干提取准确率达 94.4%,DBH 计算平均误差 3.4 cm。本文方法可快速统计树木相关信息。

关键词 遥感; 激光雷达; 树木分布信息; 聚类; 移动激光; 胸径

中图分类号 TP752.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0510007

A Fast Statistical Method of Tree Information from 3D Laser Point Clouds

Xiao Yang¹, Hu Shaoxing¹, Xiao Shen¹, Zhang Aiwu²

¹School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

²Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100037, China

Abstract Location distribution and diameter at breast height (DBH) of trees are important indicators for studying forest ecology and managing forest areas. Lidar have great potential for obtaining tree-related data. Therefore, a fast statistics method of tree information from three-dimensional laser point clouds obtained by hand-held mobile laser is proposed. The hand-held mobile laser can collect the tree information from close distance and obtain the detailed information of a single tree facade. In view of the characteristics of the above point cloud, a method based on hierarchical clustering is proposed. A group of cross-section slices of point cloud are formed at different heights, and the segmentation process of each slice is performed by cluster analysis. We use random sample consensus algorithm to fit the circle according to the result of segmentation and complete the tree point cloud extraction by comparing the fitting results of a set of slice sections. This method of sampling and recalculating greatly improves the processing speed. The results show that the accuracy of trunk extraction is 94.4%, the average calculation error of DBH is 3.4 cm. The proposed method can quickly statistic tree information.

Key words remote sensing; laser radar; tree distribution; cluster; mobile laser; diameter at breast height

OCIS codes 280.3640; 120.0280; 140.3460

1 引 言

森林生态调查一直是遥感领域非常感兴趣的热

门课题之一。光学遥感技术用航空照片与卫星影像代替了一些传统的低效调查方法^[1]。尽管光学遥感测量范围大、效率高,但是光学遥感技术在获取森林

收稿日期: 2017-12-19; 收到修改稿日期: 2018-01-10

基金项目: 北京市自然科学基金(4162034)、青海省科技计划项目(2016-NK-138)

作者简介: 肖杨(1993—),男,硕士研究生,主要从事三维激光扫描、计算机视觉等方面的研究。

E-mail: littsheep0206@163.com

导师简介: 胡少兴(1972—),男,博士,副教授,主要从事三维激光扫描、计算机视觉等方面的研究。

E-mail: husx@buaa.edu.cn

三维结构参数上能力有限,不能用于获取单木位置、树高、胸径(DBH)等信息,而激光雷达可以提供更高精度的三维结构信息。

近年来,激光雷达技术在林业上的应用越来越广泛,并发展成为森林调查的一种重要手段^[2-6]。其中,Moradi等^[7]使用机载激光雷达数据进行了多株树木轮廓提取,刘清旺等^[8]利用机载激光雷达数据提取了单株树木的树高和树冠。机载激光雷达的测量范围大,但获取的信息不够详细,对单木信息的测量准确度较低。除了机载激光扫描之外,地面激光扫描也被广泛应用于三维重建、环境检测和文物保护等领域,是目前获取三维空间数据的主要手段之一^[9]。Brolly等^[10-11]38个扫描位置的数据提取了多株树木的树干分布情况,并使用12个扫描位置所获得的点云数据计算了各株树木的胸径。相比于机载激光,固定地面激光所获取的林木数据密度更大,但要扩大采集范围往往需要设置多个采样点并根据全球定位系统(GPS)数据人工配准,增加了人力物力成本,效率较低。随着同步定位与地图创建技术的发展,移动激光雷达扫描开始应用于测绘领域^[12]。Li等^[13]使用汽车搭载激光雷达与GPS/惯性测量单元(IMU)获取城区街道两旁的树木点云数据,从中提取了树干与树冠等信息,此种方法虽然提高了采集效率,但对使用环境有限制,不能应用于林区测量。

本文以Velodyne 16线激光雷达为主要传感器组成手持移动数据获取系统,在移动的过程中完成环境的三维重建,且不依赖GPS。与机载激光雷达相比,手持移动激光雷达可近距离采集树木信息,获取更详细的单木立面信息;与固定地面激光雷达相比,手持移动激光雷达更灵活,不需要人工布设多个扫描位置,可自由穿梭于树林间,大大提高数据采集效率。基于移动激光雷达获取数据的特点,采用分层聚类方法从中提取乔木树干点云,并估计各株树木的位置和胸径,实现大范围树木信息的快速统计。

2 数据采集

数据采集系统主要以Velodyne 16线激光雷达为主。该激光雷达垂直视角为 30° ,水平视角为 360° ,最大测量距离为100 m,测量误差为 ± 3 cm,频率为10 Hz。相比于单线激光雷达,多线激光雷达可大幅扩大扫描范围以获取更详细的环境信息,但增加了数据量和算法复杂度。实验环境为北京航空航天大学绿园,如图1所示,绿园位于北京市海淀区北京航空航天大学内,占地面积约为 18720 m^2 ,

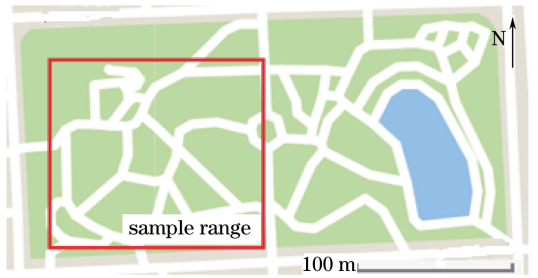


图1 北京航空航天大学绿园

Fig. 1 Green garden of Beihang University
实验获取数据范围为图1的红框所示,其大小约为 $120\text{ m} \times 120\text{ m}$ 。

基于激光测程与建图(LOAM)^[14]方法实现了同步定位与地图创建,LOAM是一种在激光雷达移动过程中实时创建周围环境三维点云图的方法,能够将相对误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。LOAM算法将复杂的同步定位与地图创建过程分为两个步骤:1)在点云中提取特征点,根据相邻时刻所获取点云之间特征点的关系判断激光雷达的位姿变化;2)在这一位姿变化的基础上使用迭代最近点(ICP)算法对点云进行配准。每当激光雷达扫描一周时都做上述处理,最终可以获得行进过程中周围环境的三维点云图。由于算法的处理是在相邻帧点云的基础上进行的,点云的位置必然相近,不会出现由初始位置相差过大导致的配准点云陷入局部极小值的问题^[15]。

3 数据处理方法

采用分层聚类方法,根据不同高度进行分层,并交叉对比,最终提取树干特征。相比于直接对全部点云进行圆柱拟合的方法,该方法在保证精度的基础上大大减少了运算量,进而提高了运算速度。

首先对所获取的点云按不同高度切片,形成切片截面图,对切片截面图进行欧氏距离聚类;然后对每一聚类使用随机抽样一致性(RANSAC)算法进行圆检测得到符合条件的点云类;最后将不同切片的处理结果交叉对比,若满足条件即认为是树木。算法流程如图2所示。

3.1 基于欧氏距离的生长聚类

将点云集合分成由类似的对象组成的多个类的过程被称为点云聚类。由聚类所产生的簇是一组点云数据的集合,同一簇中的点彼此之间有相似特征。由于获得的三维点云数据量巨大,本文采用分层聚类,并在不同高程对点云取样之后再行聚类。由于不能提前确定类的数量,所以不能使用K均值(K-means)等聚类方法,而基于欧氏距离的生长聚

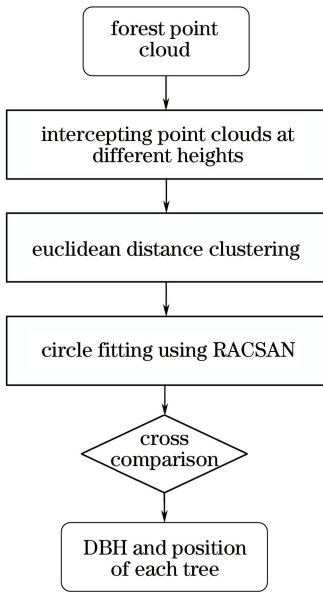


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow

类方法则不受此限制,该方法不需要提前确定目标的个数,而且对图3(a)中有明显分块的点云具有

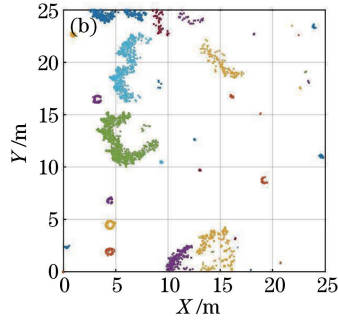
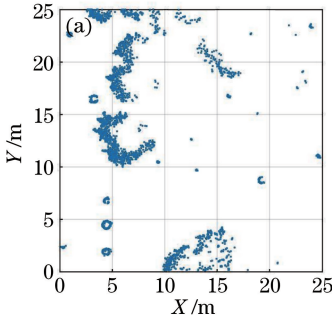


图 3 截面点云图。(a)聚类前;(b)聚类后

Fig. 3 Cross section of point cloud. (a) Before clustering; (b) after clustering

3.2 点云拟合

树干的横截面近似圆形,所以完成聚类后,分别对每一点集进行拟合判断是否近似圆形。圆拟合使用 RANSAC 算法,其优点是能稳健地估计模型参数,不受局外点影响,对树林这种干扰繁多的环境适应性良好。拟合过程如下:

1) 随机从对象点集中选取三个点 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) , 设圆心位置为 (a, b) , 半径为 R , 则所选取的三个点可以确定一个圆:

$$(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 = R^2, \quad (2)$$

式中 $i=1, 2, 3$, 展开得:

$$2xa + 2yb + (R^2 - a^2 - b^2) = x^2 + y^2, \quad (3)$$

分别代入三个坐标可得线性方程组 $\mathbf{AX}=\mathbf{B}$, 其中:

较好的适应性。但该方法需要预先设定聚类距离的阈值,在树林环境中各树木之间都有一定距离,如果阈值设定过,大聚类会产生错误;如果阈值设定过小,聚类后点云类的个数将增加会为后续处理增加不必要的复杂度,因此选定 0.5 m 作为该环境的聚类距离阈值。算法流程如下:

1) 构建 K 维树,设全部点云点集为 S 。

2) 选择点集中任意一点 i ,通过 K 维树找到所有到 i 距离小于 0.5 m 的点记为 j ,归类为点集 Q , Q 作为一类点云,其中 X_i 与 X_j 分别为点 i 与点 j 的坐标。

$$Q = \{j \mid |X_i - X_j| < 0.5\}. \quad (1)$$

3) 在 Q 中选择另一点,重复步骤 2)更新 Q ,直到 Q 再也没有新点加入。

4) 在 S 中选择未被聚类的一点,重复步骤 2)和 3)直到所有点都被聚类,完成聚类过程。

图 3(a)为原始截面点云图,图 3(b)为经过上述步骤聚类的结果,截面点云经过聚类后被分为 44 个类。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 1 \\ 2x_3 & 2y_3 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ R^2 - a^2 - b^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

因为点云中所有点坐标都大于 0,矩阵 \mathbf{A} 的逆必定存在,所以可以根据三个点求得圆心的位置与半径,即

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}. \quad (7)$$

2) 对步骤 1)中拟合的圆进行评价,评价方法是

点集中所有点到圆的距离平方的平均值,即

$$S = \frac{1}{n} \sum_{k \in Q} [(x_k - a)^2 + (y_k - b)^2 - R^2], \quad (8)$$

式中 Q 为拟合目标类的点集, n 为点集 Q 中点的个数, x_k, y_k 为 k 点坐标。

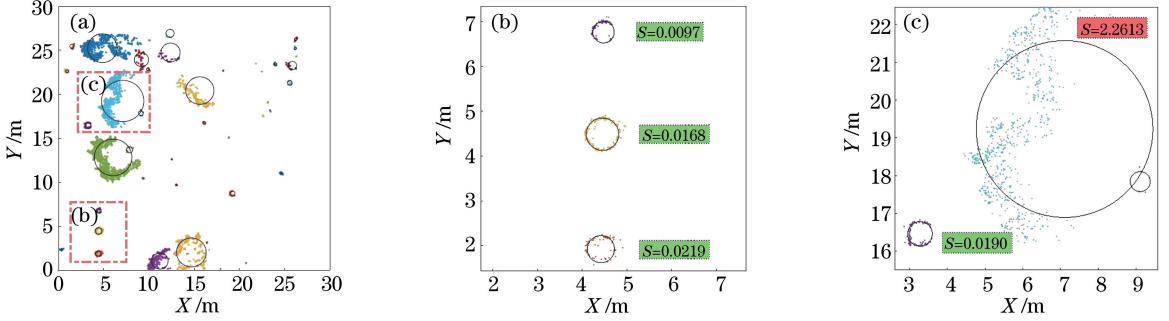


图 4 点云圆拟合结果
Fig. 4 Results of circle fitting

3.3 交叉对比

由于树林环境复杂多变,单一高度切片截面点云的拟合结果并不能有效判断树木的真实位置,本文提出交叉对比的方法来提高树木提取的准确度。获得各切片截面图的拟合结果之后,需要对比不同截面中圆心距离最小的两个圆之间的关系,根据树木生长特点,满足以下三个条件就认为该处存在树木:

- 1) 由于树木近似垂直于地面,所以相邻截面中两圆不能距离太远,要求圆心距离小于半径和。
- 2) 低处截面半径大于高处截面半径。
- 3) 低处截面半径小于高处截面半径的两倍。

$$\begin{cases} \sqrt{(x_l - x_h)^2 + (y_l - y_h)^2} < R_l + R_h \\ R_l > R_h \\ R_l < 2R_h \end{cases}, \quad (9)$$

式中 x_l, y_l, R_l 为较低处拟合结果的位置与半径, x_h, y_h, R_h 为较高处拟合结果的位置与半径,部分符合上述条件的拟合结果如图 5 所示。

4 实验与结果

使用数据采集系统获取了北航绿园部分地区的数据,取其中 30 m×30 m 的点云为研究对象,该采样范围内包括 14 棵乔木,如图 6 所示。由于胸径是离地 1.3 m 处的直径,首先取高度 $z = (1.3 \pm 0.05)$ m 的点云作为切片 1,切片 2 随层高变化。如表 1 所示,当层高为 0.1 m 和 0.2 m 时,发生了明显错误,估计数量超过了实际数量,这是由于两层间隔过小,交叉对比没有有效地排除干扰;而当间隔过大

3) 多次重复步骤 1)、2),选择 S 值最小的结果作为拟合最终结果,如图 4 所示。

4) 判断 S 是否小于设定阈值(本文设定阈值为 0.05),若 S 小于阈值,则认为该点集近似为圆,保留该点集以进行下一步处理。

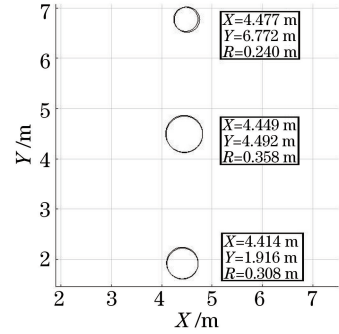


图 5 符合对比条件的拟合结果
Fig. 5 Fitting results of matching condition

时,部分树木倾斜度较大,导致该树木点云不符合交叉对比的规则,提取效果下降。选取层高为 0.3 m 的第 5 组参数,即切片 2 为 $z = (1 \pm 0.05)$ m 处的点云,在此基础上增加切片截面的数量并没有对实验结果产生明显影响。最终提取结果如图 7 所示,提取正确率为 92.8%,遗漏的一棵是因为四周遮挡物过多,点云残缺不全。

表 1 交叉对比分析

Table 1 Analysis of cross contrast

Group	Section 1 / m	Section 2 / m	Section distance / m	Number of trees
1	1.3	1.6	0.3	13
2	1.3	1.4	0.1	20
3	1.3	1.2	0.1	18
4	1.3	1.1	0.2	15
5	1.3	1.0	0.3	13
6	1.3	0.8	0.5	13
7	1.3	0.6	0.7	13
8	1.3	0.4	0.9	11

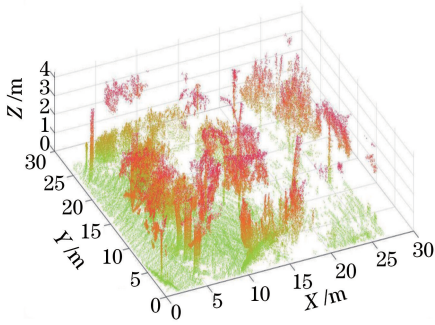


图 6 原始点云

Fig. 6 Original point cloud

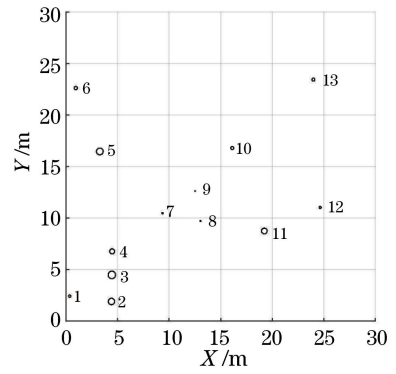


图 8 树木位置与胸径示意图

Fig. 8 Schematic of tree location and DBH

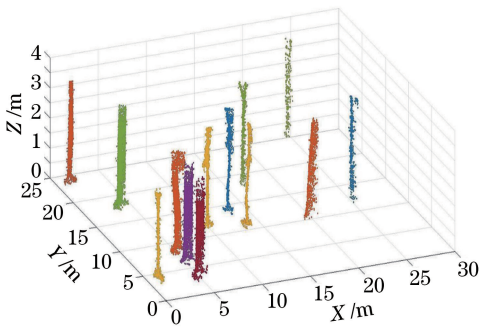


图 7 处理后点云

Fig. 7 Processed point cloud

采样区域树木位置与胸径示意图如图 8 所示,表 2 中列出了各树木的相对位置、使用激光雷达测量的胸径、实际测量的胸径以及激光雷达测量的绝对误差与相对误差,平均绝对误差为 3.4 cm。将树木按照胸径的大小分类来看,树木 1、7、8、9 的胸径在 0.1~0.2 m 之间,平均相对误差为 38.2%,平均绝对误差为 6.7 cm;树木 12、13 的胸径在 0.2~

0.3 m 之间,平均相对误差为 6.8%,平均绝对误差为 1.9 cm;而采样范围内其他树木的胸径都大于 0.3 m,平均相对误差为 4.3%,平均绝对误差为 2.0 cm。由此可见,激光所测量胸径的绝对误差与相对误差都随着被测对象的胸径增大而减小,具体变化趋势如图 9 所示。经分析,此种情况是由于激光雷达的分辨率导致的,在水平方向上,激光雷达获得的数据点都存在一定距离,并且激光雷达距离被测物体越远,数据点之间的距离越大。对于单棵树木来说,胸径越小,被采集到的数据越少,形状描述越不精确,拟合误差越大。

文献[5]中使用机载激光雷达获取树木信息,测量范围更大,但树木数量的统计和单木参数的测量精度都远不及本文方法。文献[6]中使用地面激光与 B 样条曲线成功测量了单木结构参数,虽然精度更高,但是一次测量只能处理一棵树木,测量其他树木需要重新操作部署,效率较低。

表 2 测量结果

Table 2 Measurement result

Tree	x / m	y / m	Laser estimated DBH / m	Actual measured DBH / m	Absolute error / m	Relative error / %
1	0.3524	2.4320	0.224	0.187	0.037	19.8
2	4.4130	1.9165	0.615	0.590	0.025	4.2
3	4.4510	4.4867	0.725	0.742	0.017	2.3
4	4.4772	6.7731	0.478	0.497	0.019	3.8
5	3.2801	16.4614	0.654	0.662	0.008	1.2
6	0.9541	22.6060	0.313	0.340	0.027	7.9
7	9.3603	10.4821	0.123	0.174	0.051	29.0
8	13.0395	9.7228	0.095	0.156	0.061	39.2
9	12.5228	12.6198	0.065	0.185	0.120	64.9
10	16.1268	16.7897	0.286	0.309	0.023	7.4
11	19.2367	8.7498	0.549	0.568	0.019	3.4
12	24.6582	11.0337	0.199	0.229	0.030	13.1
13	23.9972	23.4266	0.280	0.276	0.004	1.5

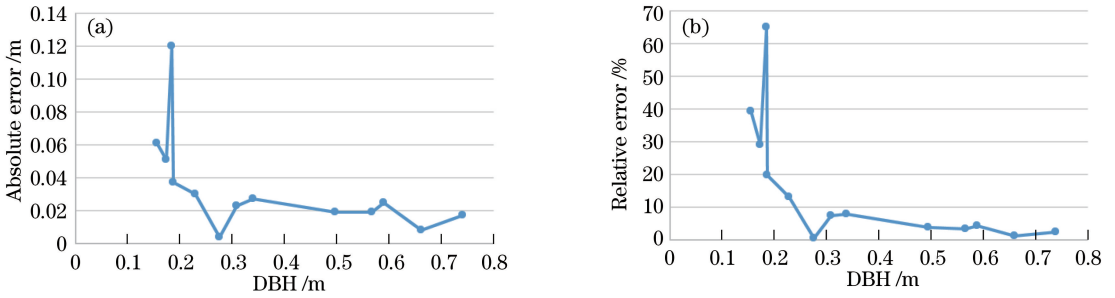


图 9 误差分布。(a)绝对误差;(b)相对误差

Fig. 9 Error distribution. (a) Absolute error; (b) relative error

最终使用本文获得的参数对获取的全部数据进行处理,成功提取 151 棵乔木,实际统计该范围中有 160 棵乔木,提取成功率为 94.4%,处理结果如图 10 所示。

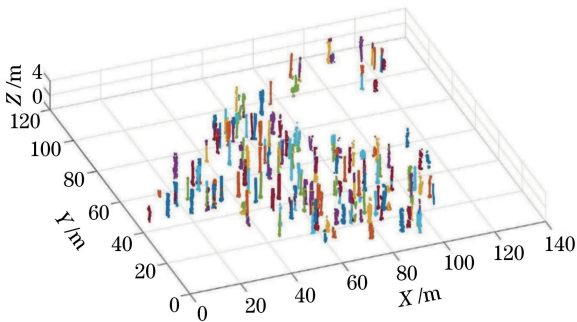


图 10 绿园树木统计结果

Fig. 10 Green garden trees statistics

5 结 论

使用移动激光通过同步定位与地图创建方法获取了点云数据。实验环境中包含多种植被干扰。通过在不同高度取样、欧氏距离对点云聚类以及 RANSAC 算法进行圆拟合判断树木可能的位置,最后针对树木生长分布特点提出了相应判断规则,将不同高度的处理结果按照规则交叉对比确定树木准确位置。这种先取样再计算的方法不仅保证了精度,同时还大大提高了运算速度。

使用该方法成功提取了选取环境中的乔木树干,计算树干的位置和胸径,提取正确率为 94.4%。当胸径大于 0.2 m 时,绝对误差不大于 3 cm,平均绝对误差为 1.9 cm。实验结果证明移动激光扫描有获取树木参数的能力,是森林生态调查的有效手段之一,本文提出的方法可快速统计树木相关信息。数据分析显示,当被测量树木胸径过小时,该方法的计算误差较大,未来将进一步研究提高小树木环境下的测量精度的方法。

参 考 文 献

- [1] Monnier F, Vallet B, Soheilian B. Trees detection from laser point clouds acquired in dense urban areas by a mobile mapping system[J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Annals), 2012, 25: 245-250.
- [2] Hyypä J, Kelle O, Lehtikainen M, et al. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3D tree height models produced by laser scanners[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(5): 969-975.
- [3] Persson A. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2002, 68(9): 925-932.
- [4] Reitberger J, Schnörr C I, Krzystek P, et al. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(6): 561-574.
- [5] Vega C, Hamrouni A, Mokhtari S E I, et al. PTrees: A point-based approach to forest tree extraction from lidar data[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2014, 33: 98-108.
- [6] Liu L X, Pang Y, Li Z Y, et al. Retrieving structural parameters of individual tree through terrestrial laser scanning data[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(2): 365-377.
- [7] 刘鲁霞, 庞勇, 李增元, 等. 用地基激光雷达提取单木结构参数——以白皮松为例[J]. 遥感学报, 2014, 18(2): 365-377.
- [8] Moradi A, Satari M, Momeni M. Individual tree of urban forest extraction from very high density LIDAR data [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, 41: 337-343.
- [9] Liu Q W, Li Z Y, Chen E X, et al. Extracting height and crown of individual tree using airborne

- LIDAR data [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(6): 83-89.
- 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 83-89.
- [9] Li Q, Cheng X J, Tian R, *et al.* Correction and normalization of multi-scan terrestrial three-dimensional laser scanning intensity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 122802.
- 李泉, 程效军, 田芮, 等. 多站地面三维激光扫描强度数据纠正与归一化[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 122802.
- [10] Brolly G, Kiraly G, Czimber K. Mapping forest regeneration from terrestrial laser scans [J]. Acta Silvatica & Lignaria Hungarica, 2013, 9(1): 135-146.
- [11] Brolly G, Kiraly G. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning[J]. Acta Silvatica & Lignaria Hungarica, 2009, 5(2): 119-130.
- [12] Hu S X, Chen C P, Zhang A W. Application of SLAM in vehicle-borne mobile mapping system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(11): 1108012.
- 胡少兴, 陈春朋, 张爱武. 同步定位及地图创建算法在车载移动测绘系统中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108012.
- [13] Li L, Li D L, Zhu H H, *et al.* A dual growing method for the automatic extraction of individual trees from mobile laser scanning data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 120: 37-52.
- [14] Zhang J, Singh S. Low-drift and real-time lidar odometry and mapping [J]. Autonomous Robots, 2014, 41(2): 401-416.
- [15] Zhang Z, Xu H L, Yin H. A fast point cloud registration algorithm based on key point selection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121002.
- 张哲, 许宏丽, 尹辉. 一种基于关键点选择的快速点云配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121002.