

## 基于三维激光点云的树木胸径自动提取方法

王 祺<sup>1</sup>, 胡 洪<sup>1\*</sup>, 吴艳兰<sup>1\*</sup>, 许邦鑫<sup>2</sup>, 王 浩<sup>3</sup>, 薛兴盛<sup>1</sup>

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601; 2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 合肥 230601; 3. 滨州市技师学院, 滨州 256500)

**摘 要:** 胸径是评价林木生长状况的重要参数之一。针对接触式人工测量自动化程度低和基于点云的现有算法提取树木胸径精度不高的问题, 提出一种基于点云数据的自动准确获取树木胸径的新方法。该方法以树木点云数据为基础, 运用蚁群算法和  $B$  样条曲线拟合技术, 实现树木胸径的自动准确提取。对实验区树木测量计算, 结果表明, 利用该方法提取树木胸径的均方根误差为  $\pm 0.19$  cm, 平均绝对误差为 0.15 cm, 相对于基于点云的传统算法提取精度分别提高了 50% 和 60.7%。该方法基于高精度点云数据, 实现了树木胸径的无损自动提取, 在精准林业领域具有推广价值。

**关键词:** 胸径; 三维激光扫描; 点云数据; 蚁群算法; 曲线拟合

中图分类号: S758.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2017)02-0283-06

### Automatic extraction method for tree diameter at breast height measurement based on 3D point cloud

WANG Qi<sup>1</sup>, HU Hong<sup>1</sup>, WU Yanlan<sup>1</sup>, XU Bangxin<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>3</sup>, XUE Xingsheng<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601;

2. Anhui Electric Power Design Institute, China Energy Engineering Group, Hefei 230601;

3. Binzhou Technician College, Binzhou 256500)

**Abstract:** The diameter at breast height (DBH) is one of the important parameters to evaluate the growth of forest trees. In view of the low degree of automation of contact-type artificial field measurement, and the low accuracy of existing algorithms based on point cloud, a new method using 3D laser scanning technology to automatically measure tree DBH was proposed. Based on tree point cloud data, using ant colony algorithm and spline curve fitting technique, the DBH was measured by programming automatically. Sample trees in the experimental area were measured and calculated, and the results showed that the root-mean-square error of the algorithm for the extraction of tree diameter was  $\pm 0.19$  cm, and the average-absolute error was 0.15 cm, which were improved by 50% and 60.7%, respectively compared with the traditional algorithm based on point cloud. Based on high-precision point cloud data, this method can achieve the automatic extraction of tree diameter at breast height and showed potential to be popularized in the field of precision forestry.

**Key words:** diameter at breast height of tree; 3D laser scanning; point cloud data; ant colony algorithm; curve fitting

距离根颈 1.3 m 处的树木直径称为胸径, 它是评价林木生长状况的重要参数之一<sup>[1-3]</sup>。在森林资源连续清查中, 测量胸径的主要方式是使用围尺和直径卷尺等仪器进行接触式的人工实地测量。此方式应用范围较广泛, 但存在操作复杂、效率低下和受

外界环境因素影响大等缺点, 不能满足现代精准林业和林业信息化的发展要求<sup>[4]</sup>。

近年来兴起的三维激光扫描技术可以快速准确获取物体三维点云坐标, 使树木胸径高精度快速自动测量成为可能<sup>[5-6]</sup>。部分学者借鉴数字图像处理的

收稿日期: 2016-11-04

基金项目: 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室开放基金资助项目(LED2014B02), 安徽省智慧城市与地理国情监测重点实验室开放基金(2016-K-01Y)和安徽大学研究生学术创新研究扶持与强化项目(yqh100252)共同资助。

作者简介: 王 祺, 硕士研究生。E-mail: wqahu312@163.com

\* 通信作者: 胡 洪, 博士, 讲师。E-mail: huhong@ahu.edu.cn; 吴艳兰, 博士, 教授。E-mail: wylmq@sina.com

方法，截取胸高处的点云数据生成对应的二维栅格图像，以 Hough 变换或者改进的 Hough 变换方法在图像中检测圆，从而确定树木位置和胸径<sup>[7-9]</sup>。由于矢量数据转化为栅格数据时会损失部分精度<sup>[10-11]</sup>，有研究直接以矢量数据为数据源，在 Geomagic 中通过旋转、平移、改变视角等手动操作选取 1.3 m 高度处的两点，运用软件求算距离的功能得到胸径<sup>[12-13]</sup>；倪文俭等人通过对胸高处截面点云做圆回归分析，确定树木胸径<sup>[14]</sup>；为提高效率，刘伟乐等人提取树木胸高处的截面，利用数据库技术直接提取平面坐标轴 X、Y 方向上的直径，取其平均值作为胸径<sup>[15]</sup>。总的来说，基于三维激光扫描技术的树木胸径提取已经取得了一定进展<sup>[16]</sup>，但由于缺少准确高效且鲁棒性好的点云处理方法，使得该技术在胸径提取与分析方面受到了制约。因此，本研究在前人研究的基础上，提出一种利用矢量点云数据自动准确获取树木胸径的新方法。该方法以树木点云为数据源，运用蚁群算法和 B 样条曲线拟合技术，实现树木胸径的无损准确自动提取。

### 1 材料与方法

#### 1.1 数据获取

研究区域位于安徽省合肥市经济开发区内，点云数据采集平台为 Leica P40 地面三维激光扫描仪。根据树木自身特点和周围环境，选取 9 棵相互无遮挡的树木，编号后进行实地扫描，扫描范围设置为水平方向 360°，垂直方向 270°，扫描分辨率为精细扫描。每株目标树设置 3 个测站扫描完成，站点的设置尽量呈等边三角形。目标树周围设置 3 个公共标靶，公共标靶的位置选在各个扫描测站都能扫描到的无遮挡区域。对于树木比较密集的扫描区域，在架设仪器的地方拍摄待测树木的照片，为后期树木点云数据处理提供参考。扫描结束后，利用围尺等测量工具多次实地测量树木胸径，以此来确定其真实值。

#### 1.2 研究方法

本研究以三维激光扫描技术获取的树木点云为数据源，经过预处理操作，运用蚁群算法和 B 样条曲线拟合技术，实现树木胸径的无损自动准确提取，胸径提取流程如图 1 所示。

**1.2.1 数据预处理** 数据预处理的目的是将树木的原始点云转化为 txt 格式，以便于后期编程处理。具体步骤包括点云导入、坐标匹配、单木点云去噪、数据导出和 Z=1.3 m 处点云提取等，其中数据导入、坐标匹配、点云去噪以及数据导出过程利用 Cyclone

软件完成，单层点云提取利用 MATLAB 软件实现。坐标匹配利用 3 个公共标靶，将每个测站所获得的点云数据合并并在统一坐标系下，人工剔除背景噪声数据后，得到单株树木点云数据（见图 2）。将坐标原点设置在树木根部，树木主干平行于 Z 轴，以 txt 格式导出单株树木点云数据的坐标值。将树木点云坐标数据存放于坐标值数组中，提取其中 Z=1.3 m 处的点云数据作为胸高处点云数据（图 3）。

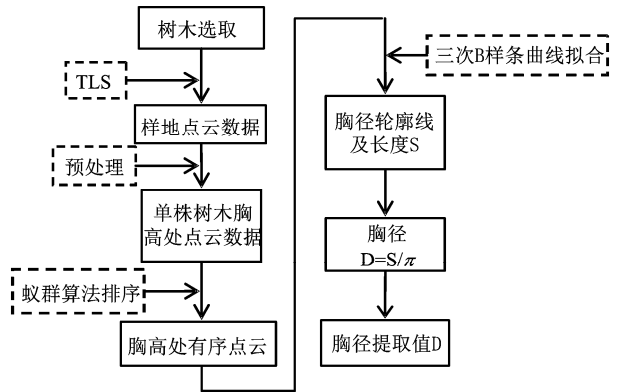


图 1 胸径提取流程

Figure 1 Extraction process of diameter at breast height



图 2 单株树木点云

Figure 2 Point cloud of single tree

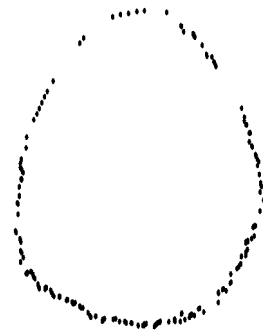


图 3 Z=1.3 m 处的点云数据

Figure 3 Point cloud at Z=1.3 m

#### 1.2.2 基于蚁群算法的点云排序 点云排序的实质

是一个离散组合优化问题, 近年来兴起的蚁群算法非常适合在组合优化问题上进行多点非确定性搜索, 因此可以用蚁群算法来解决点云排序问题。设  $C=\{c_0, c_1, \dots, c_n\}$  是树木在  $Z=1.3$  m 高度处截面点的集合,  $n$  为胸高截面内点的个数,  $L=\{L_{c_i c_j} | c_i, c_j \in C\}$  是集合  $C$  中的点两两连接的集合,  $D_{i,j}$  是  $L_{c_i c_j}$  的欧式距离  $d_{c_i c_j}$  所组成的矩阵。  $p_{i,j}^k(t)$  表示在  $t$  时刻由点  $i$  到点  $j$  的概率:

$$p_{i,j}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha [\eta_{i,j}(t)]^\beta}{\sum_{j \in \text{可选点}} [\tau_{i,j}(t)]^\alpha [\eta_{i,j}(t)]^\beta}, & j \in \text{未经过的点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $\alpha$  为信息启发因子,  $\beta$  为期望启发式因子。  $\tau_{i,j}(t)$  为  $t$  时刻点  $i$  到点  $j$  路径上的信息量, 初始时刻各条路径上的信息量相等,  $\tau_{i,j}(0)=0$ 。  $\eta_{i,j}$  为启发信息, 本研究取  $\eta_{i,j}=1/d_{c_i c_j}$ , 其中,  $d_{c_i c_j}$  表示点  $c_i$  与点  $c_j$  之间的距离。为避免对同一个点的重复访问, 为每只蚂蚁建立一个集合  $T$ , 用于记录该路径中经过的点。该集合随着寻优过程做动态调整,  $\tau_{i,j}(t)$  随着时间的推移会逐渐变化, 其调整公式为:

$$\tau_{i,j}(t+\Delta t) = (1-\rho)\tau_{i,j}(t) + \Delta\tau_{i,j}(t) \quad (2)$$

式 (2) 中,  $\rho$  为信息挥发系数, 根据前人经验, 为防止信息素无限累积, 本研究取  $\rho=0.5$ 。  $\Delta\tau_{i,j}$  为信息素的增量, 表示  $\Delta t$  时间段内, 在路径  $c_i c_j$  上留下的信息量。信息量计算方法根据计算模型而定, 本研究采用 *ant-cycle* 模型:

$$\Delta\tau_{ij}^A = \begin{cases} Q/L, & \text{蚂蚁经过 } ij \\ 0, & \text{蚂蚁不经过 } ij \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中,  $Q$  为常数, 表示信息素强度, 一般取  $Q=100$ ,  $L$  为本次循环中所走的路径长度。

**1.2.3 基于三次 B 样条曲线的轮廓线拟合与胸径计算** 经过排序, 点云数据在内存中的存储顺序与其在空间上的位置关系相一致。设经过点云排序得到的胸高处点云为  $\{r_0(x_0, y_0), r_1(x_1, y_1), \dots, r_i(x_i, y_i), \dots, r_n(x_n, y_n)\}$ , 其中  $i$  和  $n$  皆为点的序号, 该集合共有  $n+1$  个点, 将其作为控制点, 进行三次 B 样条拟合的矩阵形式为:

$$R(t) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_i \\ r_{i+1} \\ r_{i+2} \\ r_{i+3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $0 \leq i \leq n-3$ ,  $0 \leq t \leq 1$ 。根据式 (4), 可得胸高处截面中  $x$ 、 $y$  的两个参数方程。

以经过排序的截面点云为控制点, 利用式 (5) 进行 B 样条曲线位置点的计算。计算完毕后, 用线

段依次连接各点, 生成拟合曲线。将各线段长度相加, 得到样条曲线的长度  $S$ , 根据文献[15], 利用公式  $D=S/\pi$  得胸径。

$$\begin{cases} x = \left(-\frac{1}{6}t^3 + \frac{1}{2}t^2 - \frac{1}{2}t + \frac{1}{6}\right)x_i + \left(\frac{1}{2}t^3 - t^2 + \frac{2}{3}\right)x_{i+1} + \\ \quad \left(-\frac{1}{2}t^3 + \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}t + \frac{1}{6}\right)x_{i+2} + \frac{1}{6}t^3 x_{i+3} \\ x = \left(-\frac{1}{6}t^3 + \frac{1}{2}t^2 - \frac{1}{2}t + \frac{1}{6}\right)y_i + \left(\frac{1}{2}t^3 - t^2 + \frac{2}{3}\right)y_{i+1} + \\ \quad \left(-\frac{1}{2}t^3 + \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}t + \frac{1}{6}\right)y_{i+2} + \frac{1}{6}t^3 y_{i+3} \end{cases} \quad (5)$$

## 2 结果与分析

本研究方法是以树木点云为数据源, 利用蚁群算法和三次 B 样条曲线拟合技术, 编程实现胸径的自动准确提取。同时为了验证方法的可靠性, 采用实地测量法、基于点云的传统算法和本研究方法分别提取 9 棵树木的胸径进行比较分析, 研究技术路线见图 4。

基于点云的传统算法以点云数据为基础, 经过数据预处理, 得到单木胸高处单层点云数据, 取出该层点云坐标在  $X$  轴方向上的最大值  $X_{\max}$  和最小值  $X_{\min}$ , 相减得到  $D_x$ , 采用同样的方法得到  $Y$  轴方向上的差值  $D_y$ , 取二者的平均值作为所求胸径; 实地测量方法以围尺为测量工具, 对胸径进行接触式测量, 最后取多次测量的平均值作为实际测量的胸径值。

### 2.1 蚁群算法排序结果与分析

利用地面三维激光扫描仪获取树木点云, 经过预处理操作, 得到树木 1.3 m 高度处单层点云。此时点云数据之间的关系是杂乱无章的, 点云连线如图 5-A 所示。利用式 (1)、(2) 和 (3) 对点云进行排序处理, 排序后点云连线如图 5-B 所示。

点云排序模型中  $\alpha$  和  $\beta$  的取值不同, 得到的排序结果也不尽相同。  $\alpha$  的大小表明每个点上信息量影响的大小,  $\alpha$  越大, 选择以前经过的路线的可能性越大, 但过大会陷入局部最优解;  $\beta$  的大小表明启发式影响的大小, 其值越大, 选择距离近的点的可能性越大, 但过大会使路径选择随机性减弱, 容易陷入局部最优。受篇幅限制, 同时为保证结果的可靠性和随机性, 分别选取树木 1、5 和 9 这 3 棵树木的结果作分析。如表 1 所示, 长度  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  分别是树木 1、5 和 9 在对应参数取值下运行蚁群算法排序模型 1 000 次, 所得胸高处周长的平均值。

对于参数  $\alpha$ , 从表 1 中可知, 当  $\beta$  的取值一定

时,  $\alpha=1$  所得长度值是最小的, 说明解的质量好, 故将  $\alpha$  设置为 1。对于参数  $\beta$ , 根据公式 1 可知,  $\beta$  的取值越大, 计算量越大, 计算时间也就越长,

故在能获得满意解的情况下, 取较小值, 根据表 1 可知, 取  $\beta=5$ 。所以在本实验中, 最优参数组合为  $\alpha=1$ 、 $\beta=5$ , 该结论与文献[17]所得结论一致。

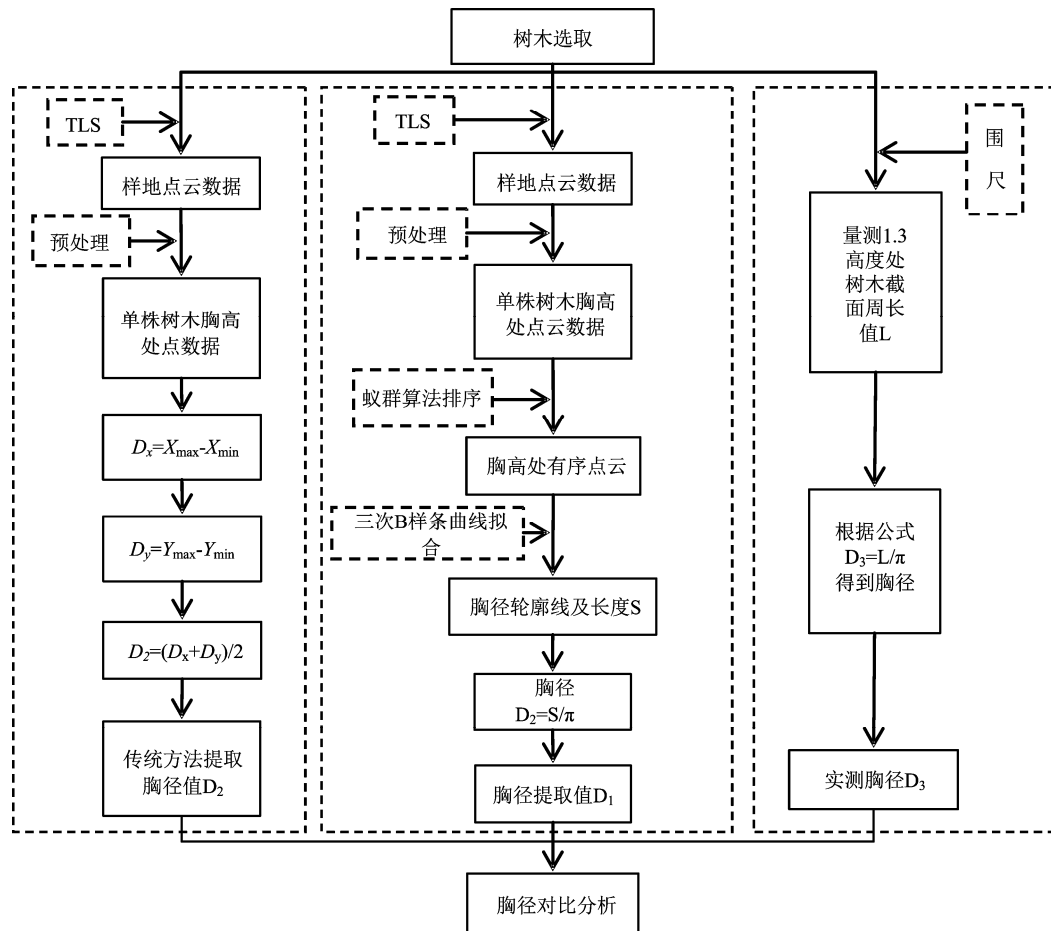
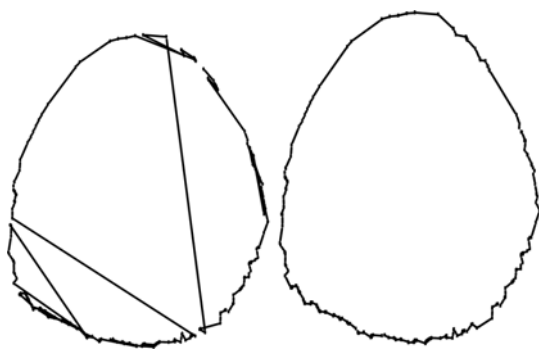


图 4 研究技术路线  
Figure 4 Research technical route



A. 排序前点云连线; B. 排序后点云连线  
A. Point cloud connection before sorting;  
B. Point cloud connection after sorting  
图 5 排序前后点云连线

Figure 5 Point cloud connection before and after sorting

### 2.2 胸径精度验证与分析

为验证本研究方法的精度, 以实地测量法获得的胸径值为真实值, 采用本研究方法和基于点云的

传统算法分别提取 9 棵树木的胸径进行比较分析。实地测量、本研究方法和基于点云数据的传统方法提取的胸径结果如表 2 所示。

实地测量得到的胸径值在 26.50~29.83 cm 之间, 均值为 28.54 cm。基于点云数据的传统算法提取的胸径值在 26.11~29.40 cm 之间, 均值为 28.29 cm, 测量误差最大值为-0.45 cm, 最大相对误差 1.5%。本研究方法提取的胸径在 26.83~30.16 cm 之间, 均值为 28.67 cm, 测量误差最大值为 0.33 cm, 最大相对误差 1.2%。《国家森林资源连续清查技术规定》<sup>[18]</sup>要求对于胸径大于 20 cm 的树木, 胸径测量误差小于 1.5%。基于点云的传统方法提取胸径的最大相对误差为 1.5%, 本研究方法提取的胸径测量最大误差为 1.2%, 均符合该规定的要求, 但本研究方法的测量最大相对误差更小, 精度更高。在测量均方根误差和平均绝对误差方面, 本研究方法相对于基

于点云数据的传统算法,精度也有一定程度的提高。基于点云数据的传统算法的均方根误差 ( $RMSE$ ) 为  $\pm 0.38$  cm, 测量平均绝对误差为 0.38 cm, 本研究方法的均方根误差 ( $RMSE$ ) 为  $\pm 0.19$  cm, 测量平均绝对误差为 0.15 cm, 在这两方面, 本研究方法相对于基于点云数据的传统算法精度分别提高了

50%和 60.7%, 这是因为基于点云数据的传统算法没有充分利用点云数据信息, 仅利用截面 4 个点的坐标数据提取平面坐标轴方向上的最大值与最小值, 取其平均值作为胸径, 而本研究算法考虑树木曲率变化, 充分利用截面点云数据, 使测量精度有所提高。

表 1 点云排序模型实验结果

Table 1 Test results of point cloud ranking model

参数 $\beta$ Parameter $\beta$	参数 $\alpha$ Parameter $\alpha$	长度 $S_1$ Length $S_1$	长度 $S_2$ Length $S_2$	长度 $S_3$ Length $S_3$
0.00	0.00	3 739.04	3 469.13	3 045.24
	1.00	3 604.62	3 336.48	2 994.37
	2.00	3 627.18	3 433.67	3 119.44
	5.00	3 789.40	3 579.06	3 121.19
1.00	0.00	1 081.04	924.46	958.94
	1.00	121.47	113.88	93.33
	2.00	149.58	126.87	179.17
	5.00	210.65	239.38	214.80
5.00	0.00	102.09	109.74	97.91
	1.00	95.36	95.76	91.05
	2.00	95.50	96.62	91.22
	5.00	98.07	99.29	92.38
10.00	0.00	95.58	97.12	91.55
	1.00	95.42	96.26	91.16
	2.00	95.58	96.63	91.33
	5.00	95.59	96.88	91.62
15.00	0.00	95.58	97.12	91.55
	1.00	95.50	96.38	91.27
	2.00	95.59	96.70	91.38
	5.00	95.59	96.88	91.63
20.00	0.00	95.58	97.12	91.55
	1.00	95.57	96.59	91.38
	2.00	95.60	96.88	91.50
	5.00	95.60	96.90	91.62

表 2 胸径精度验证

Table 2 Accuracy validation of diameter at breast height

树木 Tree	样地实测值 Measured value	本研究算法提取值 Value in this study	误差 Error	基于点云的传统算法提取值 Value in traditional method based on point cloud	误差 Error
1	29.39	29.42	0.03	29.04	-0.35
2	29.83	30.16	0.33	29.40	-0.43
3	28.53	28.50	-0.03	28.87	0.34
4	26.50	26.83	0.33	26.11	-0.39
5	29.83	29.94	0.11	29.38	-0.45
6	29.23	29.43	0.20	28.80	-0.43
7	28.68	28.63	-0.05	28.90	0.22
8	27.18	27.26	0.08	26.80	-0.38
9	27.72	27.90	0.18	27.30	-0.42
$RMSE$			$\pm 0.19$		$\pm 0.38$

### 3 结论

本研究针对接触式人工测量自动化程度低、基于点云的现有算法提取树木胸径精度不高的问题,提出一种利用三维激光扫描技术自动准确获取树木胸径的方法。以三维激光扫描技术获取的树木点云为数据源,运用蚁群算法和三次  $B$  样条曲线拟合技术,编程实现树木胸径的无损准确自动提取;同时为验证该方法的可靠性,采用实地测量法、基于点云数据的传统算法和本研究方法分别提取 9 棵树木的胸径进行比较分析,得出以下结论:

(1) 本研究方法以点云数据为数据源,利用数学模型和计算机编程技术实现了单木胸径的自动提取,节省了人力,一定程度上提高了自动化程度。

(2) 蚁群算法是一种来自大自然的随机搜索寻优的方法,其参数  $\alpha$  和  $\beta$  的选取非常关键,本研究对上述参数的选取进行了实验,实验结果表明,当  $\alpha=1$ ,  $\beta=5$  时取得最优解。

(3) 通过对实验区内树木的实验可知,本研究方法提取胸径的最大相对误差为 1.2%,符合《国家森林资源连续清查技术规定》中对于胸径精度的要求。本研究方法提取胸径的均方根误差为  $\pm 0.19$  cm,平均绝对误差为 0.15 cm,在测量均方根误差和平均绝对误差方面,本研究方法相对于传统提取算法精度分别提高了 50%和 60.7%,具有一定的应用价值。

需要指出的是,本研究利用蚁群算法和三次  $B$  样条曲线拟合技术对相互无遮挡的树木进行了实验,胸径提取效果较好,下一步将利用该方法对复杂环境中树木相互遮挡的情况进行实验。另外,现阶段地面三维激光扫描仪设备昂贵,但随着生产力水平的提高和点云数据处理算法的发展,三维激光扫描技术在林业上会有大范围的推广。

**致谢:** 感谢中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司在数据采集过程中给予的帮助,感谢基于地面激光扫描三维虚拟现实场景再现方法研究及应用项目为本论文提供的支持。

### 参考文献:

[1] 冯仲科,赵春江,聂玉藻,等. 精准林业[M]. 北京:中国林业出版社,2002: 10-30.

- [2] 黄庆丰,蔡训标,余德锋. 巢湖市低丘毛竹林直径结构与生产力研究[J]. 安徽农业大学学报, 2003, 30(1): 92-94.
- [3] 李亚东,冯仲科,李长青. USB 摄像头双目视觉胸径测量实证研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(8): 1-5.
- [4] 徐伟恒,冯仲科,苏志芳,等. 一种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 465-471.
- [5] OLOFSSON K, HOLMGREN J, OLSSON H. Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the RANSAC algorithm[J]. Remote Sens, 2014, 6(5): 4323-4344.
- [6] HACKENBERG J, WASENBERG M, SPIECKER H, et al. Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density[J]. Forests, 2015, 6(4): 1274-1300.
- [7] 李丹,庞勇,岳彩荣,等. 基于 TLS 数据的单木胸径和树高提取研究[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(4): 79-86.
- [8] 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.
- [9] 尚任,习晓环,王成,等. 利用地面激光扫描数据提取单木结构参数[J]. 测绘科学, 2015, 40(9): 78-81.
- [10] 陈建军,周成虎,程维明. GIS 中面状要素矢量栅格化的面积误差分析[J]. 测绘学报, 2007, 36(3): 344-350.
- [11] 白燕,廖顺宝,孙九林. 栅格化属性精度损失的评估方法及其尺度效应分析-以四川省 1:25 万土地覆被数据为例[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 709-717.
- [12] 田金苓,王佳,易正晖,等. 基于地面激光扫描数据的单木特征因子提取与分析[J]. 测绘科学, 2012, 37(5): 179-181.
- [13] 唐雪海. 北京市城六区三维绿量估算与分析研究 [D]. 北京林业大学, 2011.
- [14] 倪文俭,过志峰,孙国清,等. 基于地基激光雷达数据的单木结构参数提取研究[J]. 高技术通讯, 2010,20(2): 191-198.
- [15] 刘伟乐,林辉,孙华,等. 基于地面三维激光扫描技术的林木胸径提取算法分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(11): 111-115.
- [16] 刘鲁霞,庞勇,李增元. 基于地基激光雷达的亚热带森林单木胸径与树高提取 [J]. 林业科学, 2016, 52(2):26-37.
- [17] 叶志伟,郑肇葆. 蚁群算法中参数  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho$  设置的研究-以 TSP 问题为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(7): 597-601.
- [18] 国家林业局.国家森林资源连续清查技术规定(2014)[R]. 北京: 中国标准出版社,2014.