

**引用格式:**Luo Yubo, Huang Hongyu, Tang Liyu, et al. Tree Height and Diameter Extraction with 3D Reconstruction in a Forest based on TLS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(2): 243-252. [骆钰波, 黄洪宇, 唐丽玉, 等. 基于地面激光雷达点云数据的森林树高、胸径自动提取与三维重建[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(2): 243-252.]  
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2019.2.0243

# 基于地面激光雷达点云数据的森林树高、胸径自动提取与三维重建

骆钰波, 黄洪宇, 唐丽玉, 陈崇成, 张 浩

(福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室,  
地理空间信息技术国家地方联合工程研究中心,福建 福州 350108)

**摘要:**针对亚热带环境条件下森林树高、胸径自动化提取精度较低、单木形态模拟较为困难的问题,提出基于地面激光雷达点云数据提取森林树高、胸径及重建森林场景三维模型的方法。首先采用变尺度地面点识别法获取地面点并构建DEM。然后根据树木主干点云主方向相似度及轴向分布密度分割主干与其他植物器官点云。接着以主干点云为基础,采用迭代最小二乘拟合圆柱的方法自动提取树木位置、胸径;构建点云的八叉树结构,利用体素的空间邻接性实现点云分割,自动提取树高。最后,结合单株植物建模技术,以树根节点为纽带构建样地尺度上的森林场景三维模型。实验结果显示,胸径估测 $R^2$ 为0.996,平均相对误差为2.09%,RMSE为0.66 cm;树高估测 $R^2$ 为0.972,平均相对误差为2.16%,RMSE为0.92 m;所重建的森林场景三维模型可表达森林样地的真实形态。

**关 键 词:**地面激光雷达;树高;胸径;点云分割;三维重建

**中图分类号:**TN958.58; TP391.9; S757   **文献标志码:**A   **文章编号:**1004-0323(2019)02-0243-10

## 1 引 言

胸径、树高是反映森林植被生长状况的基本测树因子,是决定森林空间结构的重要组成部分,是估算其他诸如树木材积、地上生物量、基地面积等森林测度的基础<sup>[1]</sup>。利用三维激光雷达技术高精度位置表达、高密度目标表征能力,与精准林业结合,应用于森林参数的定量测量与反演,在近10 a已经有了成功的先例<sup>[2]</sup>。其中地面激光扫描(Terrestrial Laser Scanning, TLS)技术具有穿透性,能够探测林下空间结构及地形,其点云数据可用于提取森林结构参数和数字地面模型。

从TLS点云中获取地面点的主要思路是过滤

植被的数据,目前有较多的相关算法。Douillard等<sup>[3]</sup>在点云分割的方法总结中列举了三大主要地面点识别模型:基于栅格地图的地面分割、基于面拟合的地面分割<sup>[4]</sup>以及基于地形网格的地面分割<sup>[5]</sup>。针对重叠冠层进行TLS单木点云分割是研究难点,常采用空间体素化来优化点云数据的分割<sup>[6]</sup>,研究对象基本为稀疏林分、人工种植区等简单生长关系的树群,很难解决天然森林环境下TLS单木点云分割的问题<sup>[6,7]</sup>。树木主干点云识别是森林结构参数提取的基础,通过分析点云空间分布的几何特征来识别不同目标已经成为点云分割的常用方法。Liang等<sup>[8]</sup>根据点云法方向分布判断主干,在此基础上,Xia等<sup>[9]</sup>在多尺度下通过分析几何特征变化趋势来

识别不同目标。由于植被物体(如主干、枝干、草、灌木、叶子等)形态不规则且多变又交错分布,从植被点云中识别不同目标仍具有很大的挑战性。

从树木 TLS 点云中提取胸径可以达到较高精度,主要方法有二维曲线拟合(如圆拟合<sup>[10]</sup>、椭圆拟合<sup>[11]</sup>、自由曲线拟合<sup>[12]</sup>),Hough 变换圆检测<sup>[11,13]</sup>、Ransac 圆检测及圆柱拟合<sup>[14]</sup>等。将点云水平层根据轴向投影至平面进行二维曲线拟合是提取胸径的方法之一<sup>[10]</sup>。该方法存在两个问题,一是采用所有点云参与运算的曲线拟合方法并不适合数据中存在噪声的情况;二是水平层轴向与半径没有一起计算带来的精度损失。采用二维 Hough 变换、Ransac、最小中值法等鲁棒检测方法可避免噪声的影响,但容易出现非树干点云误检为树干的情况;采用圆柱拟合代替圆可解决三维降到二维计算造成的精度损失问题,但是同样会受到噪声影响。基于以上分析,需对单一的拟合方法进行加工处理。刘鲁霞等<sup>[13]</sup>通过内圆检测提高 Hough 变换识别树干点云的准确性,但是在树干呈不规则形状时,提取精度较差。Cabo 等<sup>[15-16]</sup>采用迭代圆拟合提取胸径大小,可滤除基于距离分布的噪声,但是很难滤除紧贴着树干表面的噪声,这些噪声来源于点云配准误差、树干出现分叉或者树干表面上过于粗糙等情况。Liang 等<sup>[14]</sup>采用圆柱拟合提取胸径,根据 M 估计减小噪声的影响,在树木出现分叉情况时,通过设定拟合初值来控制拟合过程以保证来自于主干的点可以得到更大的权值。

基于 TLS 点云的树高测定方法提取精度较低,误差可达几米且往往被低估。单木树高难以准确计算的主要原因是树冠相连或被其他树木的树冠遮挡,因此,容易准确获取相对稀疏样地内单木树高。单木树高定义为单木中心一定影响范围内最高点与最低点的高度差。根据该定义,首先最关键的问题是确定点与单木的归属关系。通过判定点云量或体元量在垂直方向上的连续性以确定树顶点的方法只能反映点云数量的变化,不能准确地对不同层次的树木进行分类,因此该方法对树高的提取精度不高<sup>[11,13,15-16]</sup>。其次单木影响范围的大小也会对树高提取产生影响。很多研究根据胸径大小确定影响半径<sup>[11,13,17]</sup>,该方法没有考虑较近树木可能存在的茂密冠层对于单木的遮挡;与之相反,Cabo 等<sup>[15-16]</sup>将影响区域定义为根据树木中心生成的泰森多边形,却忽略了单木差异性所带来的影响。

从大量离散三维点云中模拟树木形态,重建单

木模型已经取得了一些成果。其中较难建模的是枝端以及细叶。王向玉等<sup>[18]</sup>提出基于点云密度进行树叶重建。Livny 等<sup>[19]</sup>以 Lobe 的形式表示枝端,然后在库中搜索枝叶模板,生成 Lobe 内的三维结构。唐丽玉等<sup>[20]</sup>集成树木枝叶自动分割等多种算法,提高了树木三维自动重建的精度。黄洪宇等<sup>[21]</sup>概述了从树木激光点云数据中构建树木三维模型的原理和方法。

目前关于地面激光雷达点云数据的研究对象大多植被稀疏、林分结构简单、地形平坦。本文以福建省福州市亚热带山区森林为研究样地,着重针对噪点、低矮冠层点云、树木分叉及树木之间交错生长、树木分层等情况,开展森林树高与胸径的自动提取,并在此基础上重建样地尺度的森林场景三维模型。

## 2 研究区概况及数据获取

研究区位于福建省福州市晋安区国家森林公园(119°18' E, 26°09' N),如图 1 所示。采集样地为朝北的一处山坡,主要树种为木荷、贝壳杉。数据采集时间为夏天枝叶茂盛时期。样地长和宽均为 10 m,郁闭度约为 97%,地面平均坡度为 23°。样地共有树木 27 株,树木之间平均水平距离为 1.6 m。研究样地树木参数的具体情况如表 1 所示。

表 1 样地树木情况调查表

Table 1 The measured field data at the plot

	平均值	标准差	极差
胸径/cm	10.9	7.3	28.4
树高/m	9.41	5.51	19.74
枝下高/m	3.47	2.19	7.49

点云数据采集设备为 Riegl VZ-400 地面激光扫描仪。扫描方案采用基于人工标靶拼接的多站扫描模式,设站位置如图 1 黄色三角所示,分别以竖直模式和水平模式进行扫描,扫描角分辨率率为 0.08°。多站拼接精度控制在 0.005 m。点云平均间距约为 0.02 m(取值为样地点云间距的中位数)。使用卷尺实地测量样地内每棵树胸径,使用标准伸缩测高杆测量每棵树的树高与枝下高。点云数据采集与实地测量数据在同一时间段内完成。

## 3 研究方法

样地树高、胸径提取和三维重建的流程如图 2 所示。采用变尺度方法<sup>[22]</sup>分割样地点云,获得地面点和植被点,利用反距离加权对地面点内插生成

DEM，并采用高斯滤波法进行优化。计算植被点主方向，根据主干点云主方向相似度及轴向分布密度区分主干与其他植物器官。以主干点云为基础，采用迭代最小二乘法对单木主干点云水平层进行圆柱拟合，求得胸径及单木位置；根据多层圆柱平均轴向构造单木圆柱型影响区域，对影响区域内的

点集构造八叉树，根据体素的空间邻接性对点集进行分割，求解与单木主干包围盒的最大交集确定树顶点并提取树高。最后，利用基于点云的单株植物建模方法，建立单树三维模型，根据单木位置，将三维树木模型“种植”在地形模型上，重建逼真的森林场景三维模型。

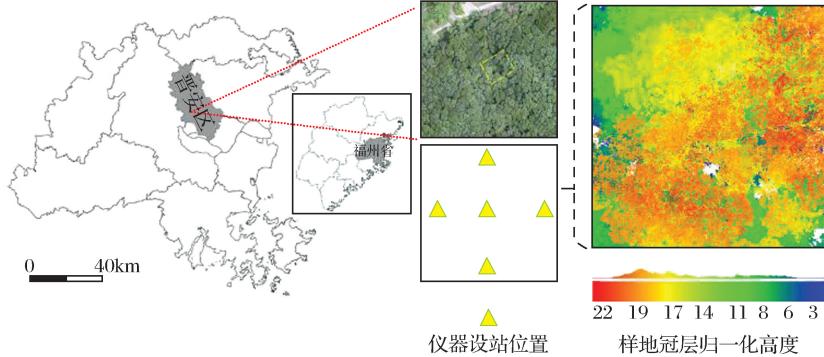


图1 研究区域及扫描站点位置示意图

Fig.1 Map of research area and scanner location

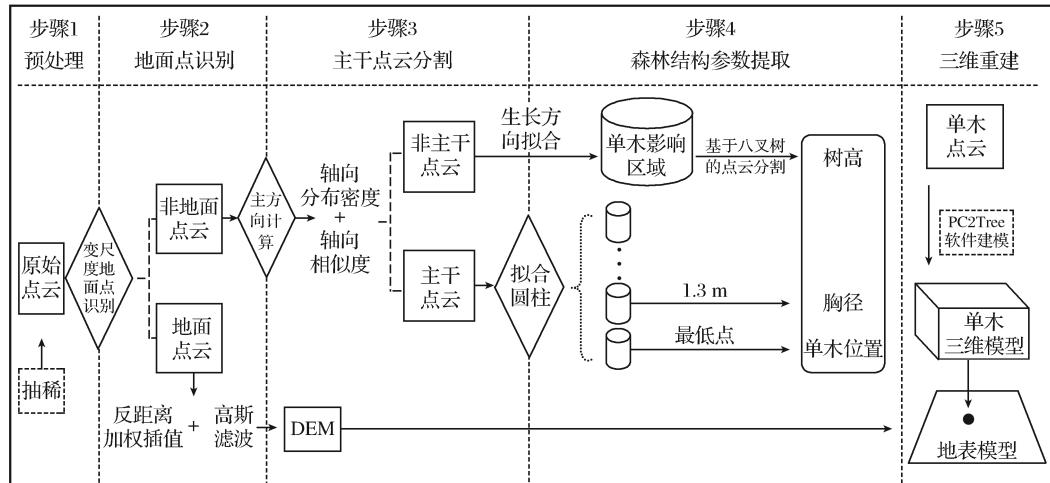


图2 基于TLS点云的森林结构参数提取(树高与胸径)及三维重建方法流程图

Fig.2 Flow chart of structure parameters extraction (TH, DBH) and 3D reconstruction at plot based on TLS

### 3.1 数字高程模型构建

为增加算法效率，对原有变尺度方法进行改进，只在最后一次迭代中绘制地形三角网，并将移动最小二乘拟合二次曲面过滤非地面点方法<sup>[5]</sup>加入到算法中。

具体计算过程如下：

步骤(1): 将原始点云投影到XY平面，以格网大小 $\Omega_1$ 剖分点云数据。

步骤(2): 提取每个网格内的最低点 $P_0$ ，设定高差阈值 $\Phi_1$ ，截取网格内各点与 $P_0$ 高差小于 $\Phi_1$ 的点，其余点则摒弃，所有网格内保留的点构成点集 $S_1$ 。

步骤(3): 根据点集 $S_1$ ，以格网大小 $\Omega_2$  ( $\Omega_1 > \Omega_2$ )、阈值 $\Phi_2$  ( $\Phi_1 > \Phi_2$ ) 重复步骤1~2进行运算。

步骤(4): 最后一次迭代中，根据网格最低点 $P$ ，利用移动最小二乘拟合二次曲面，以相应的阈值 $\Phi$ 截取离二次曲面距离小于 $\Phi$ 的点，得到初始地面点。

步骤(5): 以最后一次迭代所获取网格内最低点作为地形点，以IDW插值构建DEM并通过高斯滤波进行优化，通过DEM绘制地形三角网过滤非地面点获得最终地面点。

本研究样地通过5个站点的扫描，数据比较完整，可设 $\Omega_1 = 2$  m；其地形呈梯田状，设 $\Phi_1 = 2$  m，以

防止地面点被剔除。整个过程迭代执行 3 次,每次循环  $\Omega$  和  $\Phi$  值各减小一半,如图 3 所示。

### 3.2 主干点云分割

原始点云经过地面点滤波之后,包含主干点云等其他目标点云。主干点云分布呈圆柱状,其点的主方向趋于一致;叶子点云(小叶植物)主方向杂乱

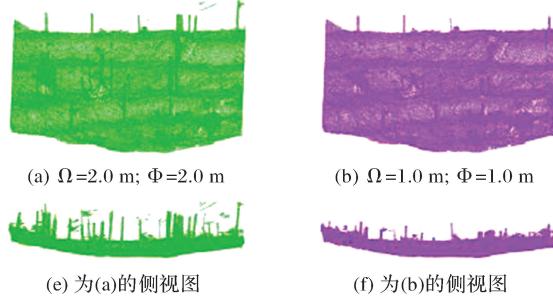


图 3 三次迭代获取地面点结果

Fig.3 Extracted ground point in three iterations

步骤(2):将圆柱内点集投影至轴线,计算点集的轴向分布密度及点集内主方向与中心点主方向之间的夹角,判定该点是否属于主干点。若点集轴向分布均匀,则该圆柱体内点云主方向与中心点主方向夹角小于一定阈值的点即为主干点。

步骤(3):以新加入的主干点为中心点,重复步骤(2)~(3),至遍历完所有的植被点云。

步骤(4):使用聚类方法对候选主干点进行分组。

本文单位圆柱体高度选取 10 倍的点云平均密度,半径选取 2 倍的点云平均密度,角度阈值选取 20 度。样地主干点云分割结果如图 4 所示。

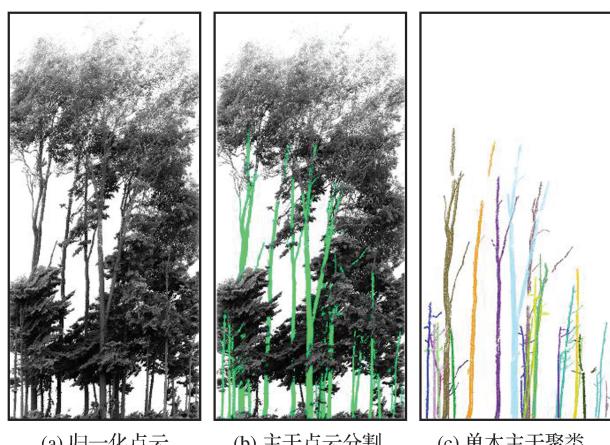


图 4 树木主干分割示意图

Fig.4 Schematic of trunk segmentation

### 3.3 森林结构参数提取

基于主干点云数据,采用圆柱拟合提取胸径,以避免主干点云水平层轴向与半径没有一起计算而造

成的精度损失;采用迭代加权最小二乘减小噪声影响;设计一种从下而上依次拟合水平层圆柱的方式,找出拟合错误的圆柱并删除;利用多层圆柱拟合平均轴向得到树木生长方向以提取单木树高。

步骤(1):选取植被点云中一点为中心点,以该点主方向为轴向构建一定高度的圆柱体。

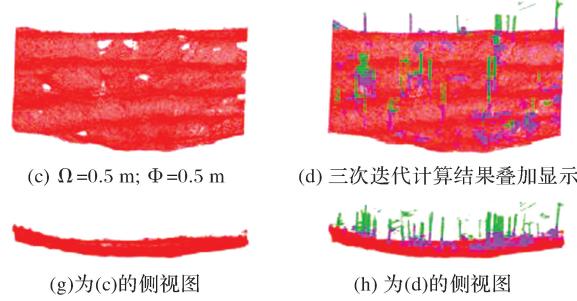


图 5 正圆柱体参数化

Fig.5 Parameterization of right circular cylinder

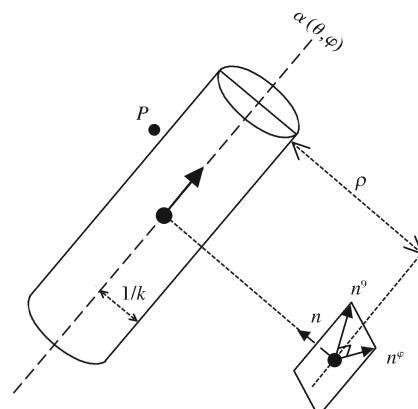
成的精度损失;采用迭代加权最小二乘减小噪声影响;设计一种从下而上依次拟合水平层圆柱的方式,找出拟合错误的圆柱并删除;利用多层圆柱拟合平均轴向得到树木生长方向以提取单木树高。

#### 3.3.1 圆柱拟合

三维仿射空间  $R^3$  中的正圆柱体,定义为位于给定直线固定距离处点的集合,如公式(1)所示:

$$d(s, p) = \left| (p - (\rho + \frac{1}{k})n) \times a \right| - \frac{1}{k} \quad (1)$$

其中: $p = (x, y, z)^T$  为空间中一点,  $d$  代表点  $p$  至圆柱表面的距离。轴向  $a$  和法向  $n$  以球面坐标表示,如图 5 所示。



$(\theta, \phi)$  给出圆柱在球坐标系下的轴向;  $(n, n\theta, n\varphi)$  构成正交基与法向  $n$  一同给出圆柱的方位;  $\rho$  为圆柱距原点的最近距离;  $k$  为圆柱半径倒数,以确定圆柱的大小)

图 5 正圆柱体参数化

Fig.5 Parameterization of right circular cylinder

采用 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法求解如公式(2)所示目标函数,即可解决三维空间中圆柱拟合问题。Lukács 等<sup>[24]</sup>给出了圆柱轴向及法向的具体参数化方法。

$$\min \sum_i d^2(s, p_i) \quad (2)$$

现实激光雷达数据的采集往往伴随着噪声,这些噪声依附在树干表面难以剔除;近邻的细小枝叶点也会对圆柱拟合产生影响。本文采用迭代加权最小二乘,通过给予观测值不同权重以减小粗差值对圆柱拟合的影响。由 Tukey's Biweight 目标函数计算观测值权重<sup>[25]</sup>,如公式(3)所示。

$$w(x) = \begin{cases} [1 - (x/c)^2]^2, & \text{if } |x| \leq c \\ 0, & \text{if } |x| > c \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中  $c$  是一个调整因子并且设为 4.685 1, 对于标准正态分布大约 95% 的效率。 $x = V/s$ ,  $V$  代表观测值的残差,  $s$  是对残差  $V$  未知标准偏差  $\sigma$  的估计。根据标准化残差大小赋予相对应观测值(点三维坐标)下次迭代的权重,迭代最小二乘如公式(4)所示。

$$\min \sum_i w(r_i^{(k-1)}) r_i^{-2} (s, p_i) \quad (4)$$

其中: $w(r_i^{(k-1)})$  应在每次迭代后重新计算,以便在下一次迭代中使用。Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法稳健性依赖于初值的选取,本文圆柱参数初值通过高斯映射法获取:采用二次曲面拟合实现单位法向量的计算,根据理想圆柱侧面点的法向与圆柱轴向垂直这一原理,运用线性最小二乘拟合法向得到圆柱初始轴向,根据轴向将点云投影至过原点平面,通过 Ransac 检测二维圆,以二维圆半径

确定初始圆柱半径( $1/k$ ),以二维圆圆心至原点的距离为初始  $\rho$  值。

### 3.3.2 胸径提取

本文以固定厚度  $t$ ,将单木主干点云切割成一系列垂直分布的水平层,从下往上以上述拟合圆柱的方法依次计算每一水平层圆柱参数。删除因树木分叉、低矮冠层点云造成错误圆柱拟合层。同时通过多层圆柱拟合得到树木生长方向。具体算法过程如下:

步骤(1):从最低水平层开始计算圆柱参数,拟合骨架点,骨架点方向为该拟合圆柱轴向,骨架点半径为该圆柱半径。

步骤(2):计算上层圆柱参数并拟合骨架点;连接上层骨架点与下层骨架点成骨架线,骨架线的方向为从下层骨架点指向上层骨架点。

步骤(3):计算上层骨架点方向与骨架线夹角  $k_1$ ;计算下层骨架点方向与骨架线夹角  $k_2$ ;判定  $k_1$  与  $k_2$  是否都小于给定角度阈值,若是,则上层骨架点加入树木主干骨架点。若不是,跳过该层。

步骤(4):重复步骤(2)~(3),至遍历完所有的单木点云水平层。

由于树木主干存在弯曲生长、主干曲线变化快的情况,因此点云切片厚度  $t$  的取值不宜过大;同时单一水平层拟合圆柱需要足够多的点云量,因此厚度  $t$  的取值又不宜过小。经实验分析,将点云切片厚度  $t$  取值为 0.2 m。同时将轴向角度阈值  $k_1$  与  $k_2$  设为 15°。上述算法保证了圆柱轴向的连续性及无偏性。

图 6(c)红色物体即为随着主干垂直分布的拟

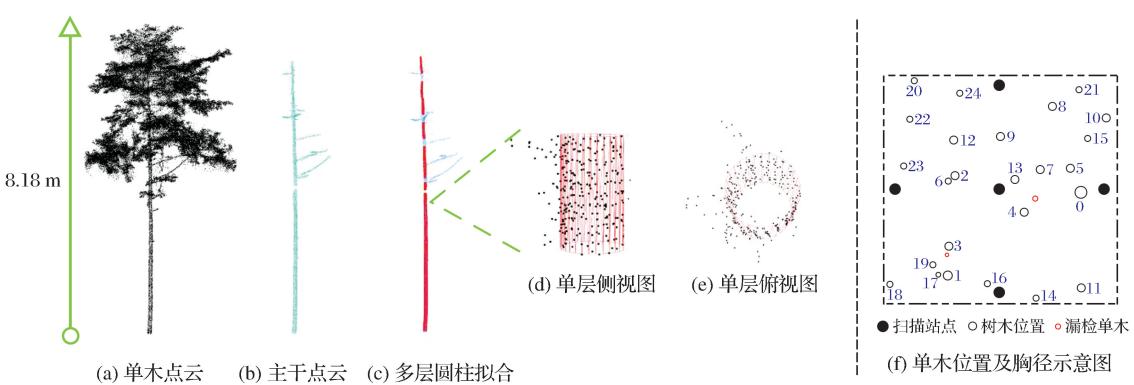


图 6 多层圆柱拟合示意图

Fig.6 Multi-layer cylinder fit

合圆柱,由于树木分叉等导致拟合错误的情况,圆柱被自动删除,如图 6(c)的蓝色点云。距地表 1.2~

1.4 m 处的拟合圆柱,其直径作为该树木胸径;若位于该水平层的拟合圆柱被删除,则通过上下两层圆

柱的直径平均值加以代替。位于最低点的圆柱，其中心作为初始单木位置，并将初始位置垂直下移至地表表面作为最终单木位置。样地内单木位置和胸径示意图，如图 6(f)所示，空心圆半径表示胸径大小，实心圆表示地面激光雷达测站位置。

### 3.3.3 树高提取

森林中单木之间生长结构复杂，存在上层木及下层木。不同层次树木影响区域也不同。将影响区域定义为以树木生长方向为轴向、一定半径大小的圆柱体。以上述多层圆柱轴向平均值作为树木生长方向，半径根据单木主干的胸径大小及与邻近主干的高度差确定。如公式(5)所示。

$$\begin{cases} h_1 - h_2 > 2u & t_1 \text{ 上层木} & R = d + 2 \times r_2 \\ h_1 - h_2 < -2u & t_1 \text{ 下层木} & R = 4 \times r_1 \\ \text{else} & t_1, t_2 \text{ 等高} & R = 0.5 \times d \end{cases} \quad (5)$$

其中： $d$  为两相邻单木  $t_1, t_2$  的水平距离，分割出的主干点云高分别为  $h_1, h_2$ ，胸径分别为  $r_1, r_2$ 。 $u$  为尺度因子，本文中  $u$  设为 1。 $R$  为确定的圆柱体半径。

如何确定点与单木的归属关系是提取树高的关键问题。上层木与下层木之间一般情况下会有大于平均点云密度的空隙。对点集构建八叉树，利用体素的空间邻接性实现点云分割，通过求解分割后点云包围盒与主干点云包围盒最大交集判定区域内属于单木的真实点云，从而提取树高。

实际情况中仍然存在细碎点云分布在上层木一侧与下层木顶端之间，通过基于密度分布检测的滤波器剔除上层木与下层木之间的稀疏点云，制造上层木与下层木之间的空隙以便进行点云分割。具体的树高提取方法如下：

步骤(1)：以生长方向为轴向， $R$  为半径构造单木圆柱型影响区域， $R$  由近邻单木之间的距离以及单木胸径确定。

步骤(2)：单木主干点云以及被包含在影响范围内的非主干点云作为估算树高的点集。

步骤(3)：针对该点集，若单木为下层木，首先进行滤波处理。对滤波后的点集构造八叉树，通过体素的空间邻接性实现点云分割，与主干包围盒具有最大交集的认为是属于单木的点云；确定该类最高点，最高点与根节点在 Z 方向上的差值即为树高。

本实验中体素大小选取 5 倍的点云平均间距。图 7 为单木圆柱型影响区域内基于八叉树结构的点云分割示意图。不同颜色的点云和体素代表分割结果。图 7(d)蓝色透明方框为主干点云包围盒，红色

方框即为根据包围盒最大交集求解得到属于该单木的点云。

### 3.4 场景三维重建

结合上述分割出的点云，采用 PC2Tree-基于点云的参数化单树建模工具建立单株树木的三维模型<sup>[20,26]</sup>，根据树木分布位置，“种植”在地形模型上，重建逼真的森林场景三维模型。场景三维建模方法集成于 PC2Tree 系统中。

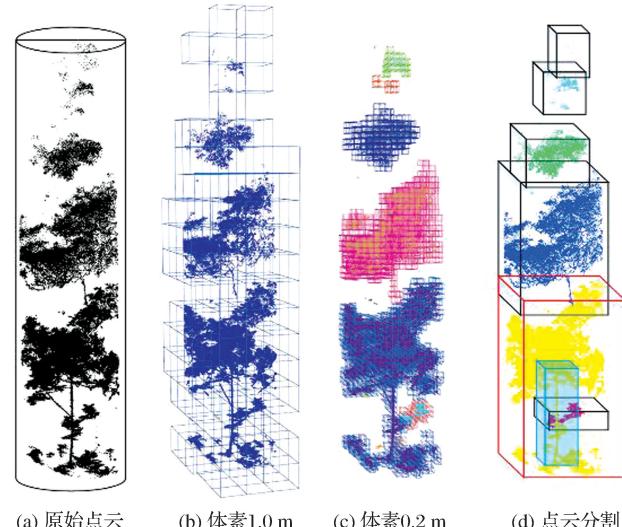


图 7 基于八叉树的点云分割

Fig.7 Point cloud segmentation based on octree

#### 3.4.1 单木及地形三维重建

研究样地位于亚热带山区，生长结构较为复杂，利用现有方法无法全自动从森林点云中分割出单木点云。现阶段通过上述单木影响区域内基于八叉树点云分割结果，结合手动裁剪，提取出完整的单木点云，将每一单木点云输入 PC2Tree 软件中进行建模并保存为.pctm 格式文件，如图 8(a)所示。通过数字高程模型生成地面三角网，采集地形纹理并映射至三角面片构建地形景观，如图 8(b)所示。

#### 3.4.2 森林场景三维重建

利用单株树木位置这一纽带，将单株树木模型依次加载至地形模型表面上。重建基于样地尺度的森林场景三维模型，如图 8(c)所示。本文算法下单木位置精度为 4 cm，满足场景重建要求。单木位置的精度分析采用以下方式：手动裁剪单木根部点云并剔除噪点，利用圆柱拟合提取正确根节点，并计算与上述算法所提取根节点的水平偏差。由于杂草、灌木丛的影响，不利于近地表面主干薄层的提取，而在本文样地坡度较大情况之下，近地表面主干的快速垂直生长状况与倾斜山坡相结合，造成提取的主干位置与真实树木根节点有所偏差，如图 10(a) 所示。

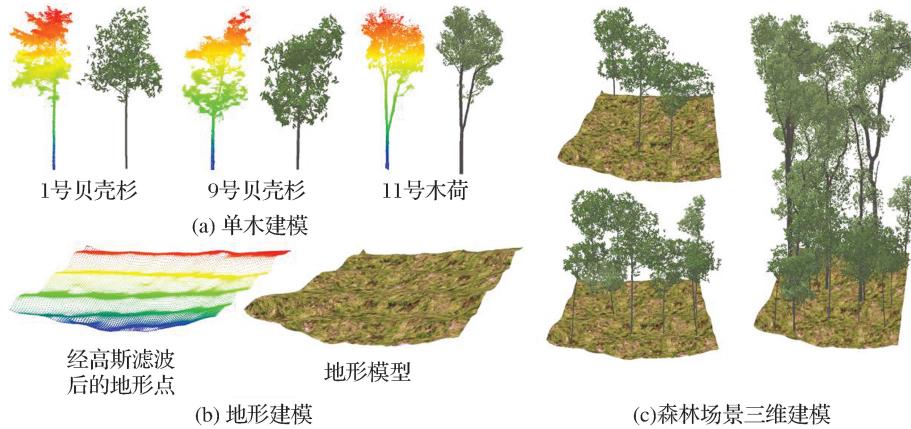


图 8 森林场景三维建模示意图

Fig.8 Schematic diagram 3D modeling of forest scenes

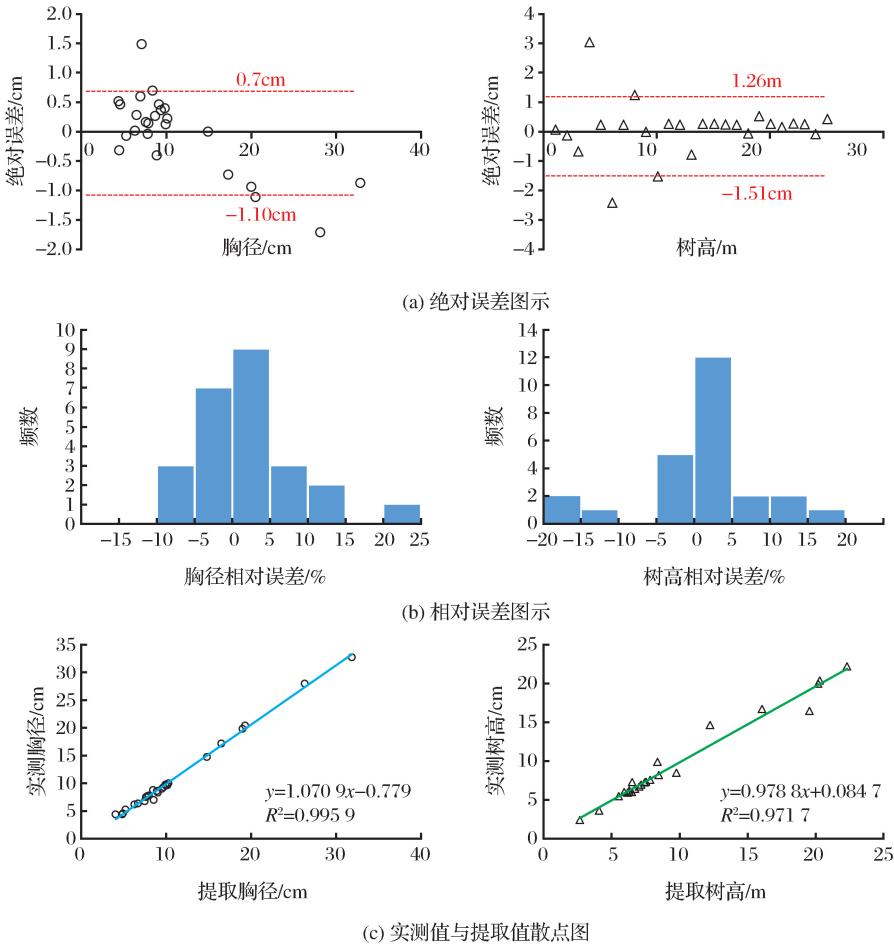


图 9 单木树高、胸径提取精度分析图

Fig.9 Accuracy analysis diagram of tree structure parameters error

## 4 结果与分析

样地的真实树高采用标准伸缩杆测量,存在一定误差。标准伸缩杆可测最大值为 20 m,但是经过点云数据查看,最大值可达 22 m;同时从下往上查

看树顶点存在人为误差。因此本研究在单木点云自动分割后,结合手动精细分割,将真实树高值定义为单木点云最高点与最低点在 Z 方向的差值。本文胸径提取值与实测值相比,决定系数为 0.996,平均相对误差为 2.09%;绝对误差绝对值最小为 0,最大

为 1.71 cm, RMSE 为 0.66 cm; 90% 以上的树木, 其胸径绝对误差控制在 0.7~1.1 cm 以内; 树高提取值与实测值相比, 决定系数为 0.972, 平均相对误差为 2.16%; 绝对误差绝对值最小为 0, 最大为 3.06 m, RMSE 为 0.92 m; 90% 以上的树木, 其树高绝对误差控制在 1.26~1.51 m 以内。本文算法对胸径、树高提取精度较高, 具体精度分析如图 9 所示。

样地共有树木 27 棵, 自动检测到 25 棵, 漏检 2 棵, 不存在过检情况。漏检原因是被漏检的单木主干较细, 且周围长有杂草, 扫描数据不规则, 如图 10(b)。胸径小于 10 cm 的胸径反演精度相对较低。经分析得出, 较细的枝干点云分布相对不规则, 用于圆柱拟合的点云数较少, 易受噪声影响, 但水平层在合理的轴向范围内, 没被算法剔除, 因此相对误差较大, 如图 10(c)。树高误差来源为单木与邻近上层木非常靠近, 导致滤波器无法滤出足够的空隙, 如图 10(d)。木荷的树高提取精度略低于贝壳杉, 决定系数为 0.928, 如图 11 所示。其原因为木荷平均高度较高, 受视角限制及上层结构遮挡导致冠层点云相对稀疏。因此, 基于八叉树剖分的树高提取方法无法连接顶层体素部分。而增大体素分辨率则会导致上层木与下层木无法区分。

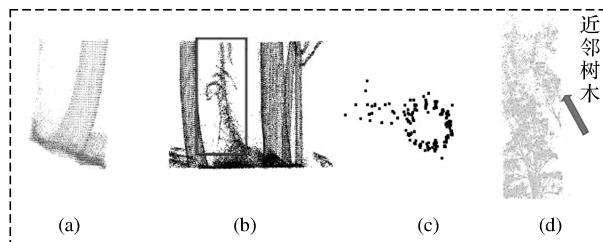


图 10 样地点云数据分析

Fig.10 Point cloud analysis of the plot

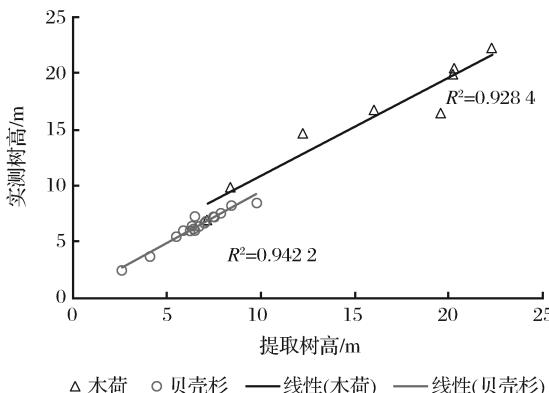


图 11 不同树种树高精度分析图

Fig.11 Accuracy analysis diagram of tree height about different tree species

根据以上结果与分析得出以下总结:

(1) 胸径和树高的精度受测量手段的影响, 实测枝干周长误差一般在 ±0.005 m, 用标准伸缩杆实测树高误差有时高达数米。本文通过量取单木点云包围盒的方式定义实测树高值。

(2) 胸径误差主要来源于拟合圆柱时的点云分布状况, 较细的枝干点云分布相对不规则。因此, 胸径较大时单木胸径提取精度较高。

(3) 树高误差主要来源于树木冠层之间的交错; 样地单木的平均轴向与 Z 正轴夹角达到 5°, 在树高 10 m 的情况下, 5° 的夹角可以达到 1 m 的水平距离; 样地内单木平均水平距离为 1.6 m 左右, 容易导致树木冠层重叠, 不仅影响算法有效性, 还影响实测值的量取。

(4) 在单株点云出现断层或者是由于森林顶部结构遮挡与测距能力限制从而造成冠层点云极为稀疏的情况, 不利于本文算法树高的提取。因此实验在多站模式下结合水平视角与垂直视角进行扫描, 最大化程度地减少了稀疏冠层点云对于本文算法树高提取的影响。

## 5 结语

提出了一套从地面点识别、数字高程模型构建、主干分割、树高与胸径提取到森林场景三维重建的解决方案。基于迭代最小二乘拟合圆柱法提取胸径, 可以减小噪声的影响; 设计自下而上依次拟合圆柱的方式可以避免树木分叉、低矮冠层点云对胸径提取的影响; 通过体素的空间邻接性判定单木影响区域内点与树木的归属关系, 从而确定树高, 可以避免上层木对树高提取的影响; 将单木模型根据其空间位置加载至地形模型上, 可重建样地尺度内基于地面激光雷达点云数据的森林三维场景。

在多站模式下结合水平视角与垂直视角扫描进行实验, 弥补了视线遮挡带来的点云分布不规则、树木细节不完整、冠层点云较为稀疏的缺点。后续将研究单站模式下, 地面点识别、数字高程模型构建以及参数精确提取的研究。冠层结构对于激光的遮挡, 使得 TLS 所获得的树木顶部点云不完整, 在未来将会结合机载激光雷达点云和摄影测量影像匹配点云, 展开如何在高郁闭度森林下实现数据的自动融合。

## 参考文献 (References):

- [1] Newnham G J, Armston J D, Calders K, et al. Terrestrial La-

- ser Scanning for Plot-scale Forest Measurement[J]. Current Forestry Reports, 2015, 1(4): 239-251.
- [2] Li Wenjuan, Zhao Chuanyan, Bie Qiang, et al. Retrieval of the Forest Structural Parameters Using Airborne LiDAR Data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30 (5): 917-924. [李文娟, 赵传燕, 别强, 等. 基于机载激光雷达数据的森林结构参数反演[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 917-924.]
- [3] Douillard B, Underwood J, Kuntz N, et al. On the Segmentation of 3D LiDAR Point Clouds[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, 2011.
- [4] Song B, Zheng N S, Dong W L, et al. Reconstructing DEM Using TLS Point Cloud Data and NURBS Surface[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(9): 3165-3172.
- [5] Liu C, Li J, Zhang S, et al. A Point Clouds Filtering Algorithm based on Grid Partition and Moving Least Squares[J]. Procedia Engineering, 2012, 28: 476-482.
- [6] Zhong L S, Cheng L, Xu H, et al. Segmentation of Individual Trees from TLS and MLS Data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(2): 774-787.
- [7] Paris C, Kelbe D, Aardt J V, et al. A Novel Automatic Method for the Fusion of ALS and TLS LiDAR Data for Robust Assessment of Tree Crown Structure[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2017, 55(7): 3679-3693.
- [8] Xia S B, Wang C, Pan F F, et al. Detecting Stems in Dense and Homogeneous Forest Using Single-Scan TLS [J]. Forest, 2015, 6(11): 3923-3945.
- [9] Xia S B, Wang C, Pan F F, et al. Detecting Stems in Dense and Homogeneous Forest Using Single-Scan TLS [J]. Forest, 2015, 6(11): 3923-3945.
- [10] Ni Wenjian, Guo Zhipeng, Sun Guoqing, et al. Research on Extraction of Tree Structure Parameters from Terrestrial Laser Data[J]. Chinese High Technology Letters, 2010, 20(2): 191-198. [倪文健, 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.]
- [11] Li Dan, Pang Yong, Yue Cairong, et al. Extraction of Individual Tree DBH and Height based on Terrestrial Laser Scanner Data[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(4): 79-86. [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.]
- [12] Pfeifer N, Winterhalder D. Modelling of Tree Cross Section from Terrestrial Laser Scanning Data with Free-form Curves [J]. Proceedings of ISPRS Workshop Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, 2004: 76-81.
- [13] Liu Luxia, Pang Yong, Li Zengyuan. Individual Tree DBH and Height Estimation Using Terrestrial Laser Scanning(TLS) in a Subtropical Forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(2): 26-37. [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.]
- [14] Liang X L, Litkey P, Hyppa J, et al. Automatic Stem Mapping Using Single-Scan Terrestrial Laser Scanning[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(2): 661-670.
- [15] Cabo C, Ordóñez C, López-Sánchez C A, et al. Automatic Dendrometry: Tree Detection, Tree Height and Diameter Estimation using Terrestrial Laser Scanning[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 69: 164-174.
- [16] Cabo C, Pozo S D, Rodriguez-González P. Comparing Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Wearable Laser Scanning (WLS) for Individual Tree Modeling at Plot Level[J]. Remote Sensing, 2018, 10(4): 1-16.
- [17] Srinivasan S, Popescu S, Eriksson M, et al. Terrestrial Laser Scanning as an Effective Tool to Retrieve Tree Level Height, Crown Width, and Stem Diameter[J]. Remote Sensing, 2015, 7(2): 1877-1896.
- [18] Wang Xiangyu, Xie Donghui, Wang Yan, et al. 3D Reconstruction of a Single Tree from Terrestrial Laser Scanner Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(3): 455-460. [王向玉, 谢东辉, 汪艳, 等. 基于地面激光雷达点云数据的单木三维重建[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(3): 455-460.]
- [19] Livny Y, Pirk S, Cheng Z, et al. Texture-lobes for Tree Modeling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 1-10.
- [20] Tang Liyu, Zhang Hao, Huang Hongyu, et al. Improved Method for 3D Reconstruction of Tree Model based on Point Cloud Data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 186-194. [唐丽玉, 张浩, 黄洪宇, 等. 基于点云数据的树木三维重建方法改进[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 186-194.]
- [21] Huang Hongyu, Chen Chongchen, Zou Jie, et al. Tree Geometrical 3D Modeling from Terrestrial Laser Scanned Point Clouds: A Review[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(4): 123-130. [黄洪宇, 陈崇成, 邹杰, 等. 基于地面激光雷达点云数据的单木三维建模综述[J]. 林业科学, 2013, 49(4): 123-130.]
- [22] Huang Hongyu, Chen Chongchen, Zou Jie, et al. Tree Geometrical 3D Modeling from Terrestrial Laser Scanned Point Clouds: A Review[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(4): 123-130. [黄洪宇, 陈崇成, 邹杰, 等. 基于地面激光雷达点云数据的单木三维建模综述[J]. 林业科学, 2013, 49(4): 123-130.]
- [23] Dai Mingrui, Zhang Xiaopeng, Li Hongjun. Tree Reconstruction based on Range Image with Strong Noise[J]. Chinese Journal of Stereology & Image Analysis, 2010, 15(2): 109-114. [代明睿, 张晓鹏, 李红军. 基于高噪声深度图像的树木模型重建[J]. 中国体视学与图像分析, 2010, 15(2): 109-114.]
- [24] Lukács G, Martin R, Marshall D. Faithful Least-Squares Fitting of Spheres, Cylinders, Cones and Tori for Reliable Segmentation[C]// Proceedings of The European Conference on Computer Vision, Berlin, 1998.

- [25] Zhang Z. Parameter Estimation Techniques: A Tutorial with Application to Conic Fitting [J]. Water Research, 1997, 39(15):3686-3696.
- [26] Wang Xiaohui. Three Dimensional Geometrical Modeling of Individual Tree from Terrestrial LiDAR Scanner Point Cloud [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014. [王晓辉. 基于地面激光雷达点云的单树三维几何建模研究[D]. 福州: 福州大学, 2014.]

## Tree Height and Diameter Extraction with 3D Reconstruction in a Forest based on TLS

Luo Yubo, Huang Hongyu, Tang Liyu, Chen Chongcheng, Zhang Hao

(1. Key Laboratory of Spatial Mining and Information Sharing of Ministry of Education,  
Spatial Information Research Centre of Fujian, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In view of the low accuracy of Tree Height (TH) and Diameter at Breast Height (DBH) estimation, as well as the difficulty of individual tree modeling in dense forest, a method to extract forest structure parameters (TH and DBH) and reconstruct a Three-Dimensional (3D) model of forest in subtropical environment based on TLS point cloud data is proposed. The first step is to apply a multi-scale method to extract the ground points for the generation of Digital Elevation Model (DEM). Secondly, using similarity of principal direction between neighboring points and distribution density of points, trunk and other plant organs are separated. Next the trunk points are processed to automatically estimate the tree position and DBH by iterative least squares cylinder fitting; the tree height is automatically estimated by using the octree segmentation. Finally, by combining with the technology of individual tree modeling, a plot-scale 3D forest scene has been reconstructed by planting individual tree model on the terrain model iteratively. The results showed that the correlation coefficient of DBH is  $R^2 = 0.996$ , and the average relative error was 2.09%, RMSE was 0.66 cm; the correlation coefficient of tree height is  $R^2 = 0.972$ , and the average relative error was 2.16% with RMSE of 0.92 m. The plot-scale reconstructed 3D model of the forest can express the true shape of forest.

**Key words:** Terrestrial laser scanner; Tree height; Diameter at Breast Height (DBH); Point cloud segmentation; 3D reconstruction