

基于单站地面激光雷达数据的自适应胸径估计方法

步国超 汪沛

北京林业大学理学院, 北京 100083

摘要 为了自动化地、准确地从单站地面激光雷达(TLS)数据中提取一定范围内的树木胸径,提出一种基于点云切片的圆形-椭圆自适应胸径(DBH)估计方法。对林地点云数据在胸高位置进行切片,然后对胸高切片点云进行聚类,利用圆形-椭圆自适应拟合方法对聚类结果进行树干点判别,符合圆形分布的树干点集直接用于计算树木胸径,符合椭圆分布的树干点集进行胸高位置校正之后再行胸径计算。利用 TLS 在北京市东升郊野公园的人工柳树林进行样地点云数据采集,验证圆形-椭圆自适应胸径估计方法,并与单纯圆形拟合方法对比。结果显示,在扫描距离为 26 m 的样地范围内,树木胸径估计均方根误差为 1.1 cm,在扫描距离为 56 m 的样地范围内,树木胸径估计均方根误差为 1.99 cm,判别为椭圆分布的树木胸径估计结果平均误差比单纯圆形拟合结果降低 4.7%。该方法可以快速有效地进行自适应胸径估计。

关键词 遥感; 地面激光雷达; 胸径估计; 点云; 自适应方法; 林业清查

中图分类号 TP701 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.082803

Adaptive Estimation Method for Diameter at Breast Height Based on Terrestrial Laser Scanning

Bu Guochao Wang Pei

College of Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract In order to automatically and accurately extract the diameter at breast height (DBH) of trees within a certain range from the single-station terrestrial laser scanning (TLS), an adaptive circle-ellipse fitting DBH estimation method is proposed based on the point cloud slice. The forestry point cloud data at breast height is sliced, the point cloud of the slice is clustered, and the proposed method is used to distinguish whether they are trunk points. DBH of the trunk point is calculated directly when the point conforms to the circular distribution, while DBH of the trunk point is calculated after breast height position correction when the point conforms to the elliptic distribution. The artificial willows data acquired in Beijing Dongsheng Country Park is used to verify the proposed method and compare it with the simple circular fitting method. The results show that the root mean square error of estimated DBH is 1.1 cm when the scanning distance is within 26 m, and it is 1.99 cm when the scanning distance is within 56 m. For the trees regarded as elliptic distribution, the mean error of DBH estimation results is 4.7% lower than that of the circular fitting results. The DBH can be detected quickly and efficiently with the proposed method.

Key words remote sensing; terrestrial laser radar; estimation of diameter at breast height; point cloud; adaptive method; forest inventory

OCIS codes 280.3640; 280.3420; 280.5600

收稿日期: 2016-03-01; **收到修改稿日期:** 2016-04-30; **网络出版日期:** 2016-07-25

基金项目: 北京市自然科学基金青年基金(6164037)、北京林业大学优秀青年教师科技支持专项计划(YX2015-08)、北京林业大学青年教师科学研究中长期项目(2015ZCQ-LY-02)

作者简介: 步国超(1992—),男,硕士研究生,主要从事地面激光雷达数据处理方面的研究。

E-mail: buguochao@bjfu.edu.cn

导师简介: 汪沛(1981—),男,博士,副教授,主要从事激光雷达数据处理方面的研究。

E-mail: wangpei@bjfu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

随着地面激光雷达(TLS)技术在诸多领域的应用与发展^[1-3],越来越多的研究者将其应用于森林资源调查与树木结构参数提取等方面。TLS可以快速获取被测对象高精度、高密度的表面三维数据,实现对森林树木结构数据的快速获取和对森林树木结构参数的高精度测量与估计,克服了传统森林资源调查手段耗费大量人力与时间的缺点。

自动化准确获取树木的胸径(DBH)、树高等结构参数是 TLS 应用在林业清查上的研究热点。估计一定区域内的树木胸径,首先需要对单株树木点云进行自动化检测分割,然后根据单株树木点云进行胸径估计。

2003年,Simonse等^[4]采用 TLS 技术扫描森林树木,基于扫描数据采用霍夫变换和圆形拟合的方法获取树木胸径。2004年,Hopkinson等^[5]采用 TLS 技术分别扫描松树和枫树,获取了树高、DBH等森林调查参数。2008年,Maas等^[6]采用 TLS 技术扫描树木,并根据扫描数据测量树木的胸径。2009年,Brolly等^[7-9]使用 TLS 技术扫描森林树木,并测量了树木胸径。2010年倪文检等^[10]通过 TLS 数据测量单木结构。2012年,李丹等^[11-12]采用 TLS 数据进行树木胸径和高度提取的研究。2011年,Antonarakis等^[13]采用 TLS 数据通过圆形拟合的方法估计森林树木 DBH。2012年,Moskal等^[14]采用 TLS 数据估计森林树木 DBH、树高等森林调查参数。2013年Yang等^[15]采用全波形 TLS 获取森林树木的结构参数;Liang等^[16-17]通过配准多站点扫描提高树木结构参数的估计精度。2014年,Kelbe等^[18]提出了利用低成本 TLS 进行树干模型重建的方法。刘鲁霞等^[19]以白皮松为例阐述了利用 TLS 进行单木结构提取的方法。Olofsson等^[20]利用随机采样一致性的方法进行树高与树木胸径提取。

上述文献中基于 TLS 的森林树木胸径估计方法主要分为两大类:1)点云切片圆形估计法。该方法从切片点云中检测树木位置并计算胸径,避免了对三维点云数据的大量计算,但由于切片点云缺失了整体林木点云数据所包含的树木结构的丰富性,所以无法很好地检测到局部被遮挡的树木,并且当树木生长倾斜时,此类方法对树木胸径的计算会产生较大误差。2)根据三维空间点云分布估计胸径。该方法主要利用树干点的空间分布规律进行检测,可以较好地克服点云切片圆形估计法在树木遮挡或者倾斜的情况下无法很好地检测树木并准确估计胸径的缺点,但是一般情况下林木点云数据规模巨大,若对所有数据点进行大规模的向量求解计算量很大,且非常耗时。

TLS 技术可以通过单站点扫描或多站点扫描的方式获取同一区域内的林木激光点云数据。单站数据可以获取森林树木在单一视角下可视部分的激光点云数据。多站数据则可以通过多站扫描获取多视角数据,并通过数据配准与融合增加激光点云数据的覆盖范围,以提高树木检测概率与胸径估计精度,但是数据配准与融合的精度与复杂度等因素使得多站点扫描技术的应用受到限制。

基于上述研究背景,本文提出了一种基于胸径高度处点云切片进行胸径估计的方法,该方法通过对单站林木点云数据进行胸高切片、聚类以及圆形-椭圆形自适应方法的胸径估计,一定程度上避免了一般点云切片方法的缺点。该方法主要分为三个步骤:1)在距离最低点 1.3 m(胸高位置)处截取 1 cm 厚的切片点云;2)根据扫描精度对胸高切片点云进行聚类;3)利用圆形-椭圆形自适应拟合方法进行胸径估计。通过采集北京市东升郊野公园内的早柳样地数据对该方法进行了验证。

2 实验数据获取与处理

2.1 数据获取

数据采集区域位于北京市东升郊野公园内的林地。选择一块矩形实验样地,样地内的主要树种为旱柳,共 79 株。样地内树木相对位置如图 1(a)所示,其中原点为地面激光雷达所处位置,样地中树木与激光雷达的最近距离为 16.4 m,最远距离为 56.7 m。

数据采集使用的设备是 VZ-400 型地面激光雷达(RIEGL 公司,奥地利)。这款设备可以实现高速、高分辨率和高精度的三维测量,具有长距和高速两种测距模式。在长距模式下,测量距离最远可达 600 m,最高有效测量速率可达 $4.2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$;在高速模式下,测量距离最远可达 350 m,最高有效测量速率可达 $1.22 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。

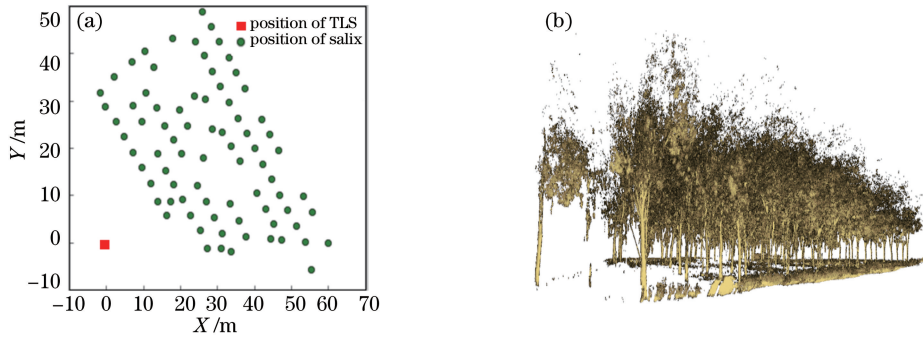


图 1 (a) 样地林木定位图; (b) 样地点云数据

Fig. 1 (a) Stem location in the plot; (b) point cloud data of plot

考虑到多站拼接时引入的配准误差,以及真实林区复杂环境下多站点位置布设的难度,实验中仅讨论基于单站 TLS 数据树木胸径的估计方法。实验中采用 VZ-400 地面激光雷达对实验区域进行扫描。在正式扫描前,先用 VZ-400 进行全景预扫描,约耗时 8 s,获得扫描点 963614 个。在全景预扫描结果中选取要精确扫描的范围,进行正式扫描。正式扫描采用高速模式,方位角范围为 $30^{\circ}\sim 150^{\circ}$,俯仰角范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,角度步进值为 0.020° ,耗时 236 s,共获得扫描点 90023001 个,获取的数据文件约 5.7 GB。

2.2 数据预处理

RIEGL VZ-400 型地面激光雷达扫描范围较大,所以原始扫描数据包含了大量非样地数据,包括民房、道路、其他林地等。首先利用 RiscanPro 软件对原始扫描数据进行手动截取,得到图 1(b)所示样地点云数据,其中包括 7459908 个数据点,数据文件共 479 MB。每个数据点包含三维空间坐标、反射强度值、深度值、扫描方向角、扫描俯仰角等信息。

3 胸径估计方法

基于 TLS 数据的自适应胸径估计方法流程如图 2 所示。首先在胸径高度上对 TLS 获得的单站林木点云数据进行切片,对切片点云进行聚类,然后利用圆形-椭圆自适应拟合方法判别聚类结果每个簇中的点云分布

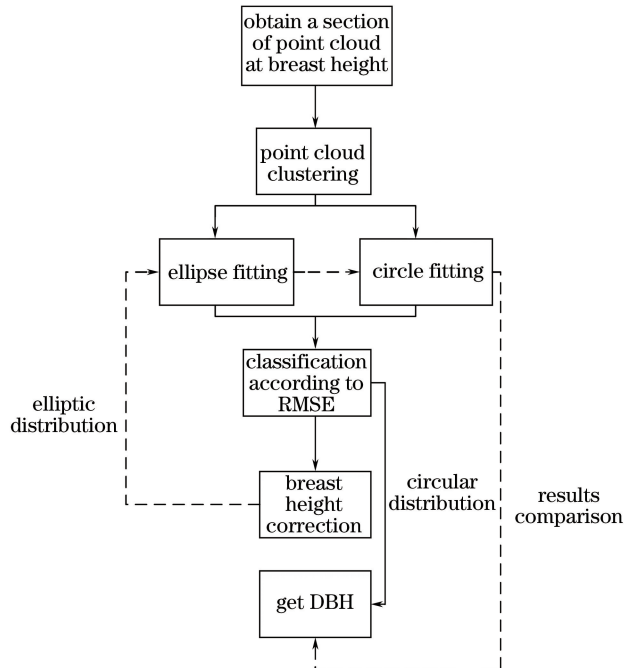


图 2 胸径估计方法流程图

Fig. 2 Flow chart of DBH estimation algorithm

符合圆形分布还是符合椭圆分布。若判别结果符合圆形分布,利用圆形拟合的直径作为树木胸径;若判别结果符合椭圆分布,则需修正胸高,之后再进行一次圆形-椭圆自适应拟合,根据判别结果计算胸径。

3.1 二维切片点云的获取

将 TLS 得到的样地林木点云数据记作 M ,将高度 h 处截取的切片点云数据记作 S_h ,则有

$$S_h = \{p_i \mid p_i \in M, |z_{p_i} - z_{\min}| < \epsilon/2\}, \quad (1)$$

式中 p_i 为激光点云数据中的数据点, z_{p_i} 为该数据点的高度, z_{\min} 代表样地林木点云数据中最低点的高度, ϵ 代表切片厚度,取 $\epsilon = 2 \text{ cm}$ 。

从样地数据中截取胸高位置(距最低点 1.3 m)的点云切片,从而得到胸高切片点云数据集合 $S_{1.3}$ 。

3.2 点云聚类

由于得到的切片点云数据中包含了树干、枝叶以及杂草等,故需对切片点云数据进行聚类,分离不同物体的点云数据。如果根据三维空间坐标参数进行聚类,聚类需要的距离阈值会由于不同林地树木密度的不同而产生较大变化,所以需要事先对样地进行一定的测量分析,难以实现较好的自动化树木检测。而 TLS 获得数据的角分辨率是固定的,同一物体上两点的空间间距随着深度的变化而变化,与林地树木密度关系较小,因此本文方法利用数据点的扫描方向角 θ 与深度值 L 两个属性进行聚类。

对于 S 中的两点 p_i 与 p_j ,若 p_i 与 p_j 为属于同一物体的点,需满足以下条件:

- 1) 若 p_i 与 p_k 为属于同一物体的点, p_k 与 p_j 为属于同一物体的点,则 p_i 与 p_j 为属于同一物体的点;
- 2) 两个点的扫描方向角相邻,即 $\theta_j = \theta_i + \tau$,若 $|L_j - L_i| < g$,则 p_i 与 p_j 为属于同一物体的点;
- 3) 两个点的扫描方向角相同,即 $\theta_j = \theta_i$,若 $|L_j - L_i| < e$,则 p_i 与 p_j 为属于同一物体的点。

其中 τ 为扫描角分辨率。 g 为同一物体上相邻扫描角度的两点之间深度值的最大间距,与距离、扫描精度以及物体的几何形状有关。 e 为同一物体上相同扫描角度的两点之间深度值的最大间距,与物体的几何形状和切片厚度有关。胸高切片点云中包含了树干、枝叶等点云数据,其中树干点的分布具有明显的几何特征,即呈现圆弧状分布。而枝叶的分布较为散乱。由于本文方法主要依靠树干点来检测单木位置并估计胸径,所以假设物体为圆弧形来确定 g 与 e 的值。

根据图 3(a)所示几何关系,可以得出在同一扫描角度的两点 p_i 与 p_j 的深度值间距满足:

$$|L_j - L_i| < \frac{\epsilon}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

式中 α 为物体的倾斜角度, $L_i \gg \epsilon$,因此 $|L_j - L_i|$ 接近于 $\epsilon/\cos \alpha$ 。一般情况下树木生长的倾斜角度不会过大, α 取值为 $\pi/4$,因此

$$e = \frac{\epsilon}{\cos \alpha} = \sqrt{2}\epsilon. \quad (3)$$

如图 3(b)所示, S 为 TLS 位置, τ 为扫描角度精度, p_A 和 p_B 为扫描得到的圆弧上相邻的两个数据点, p_A 点为切点,不难看出 $\theta_B = \theta_A + \tau$ 。对于圆弧上其他的相邻点 p_i 与 p_j 有

$$|L_j - L_i| < |L_A - L_B|. \quad (4)$$

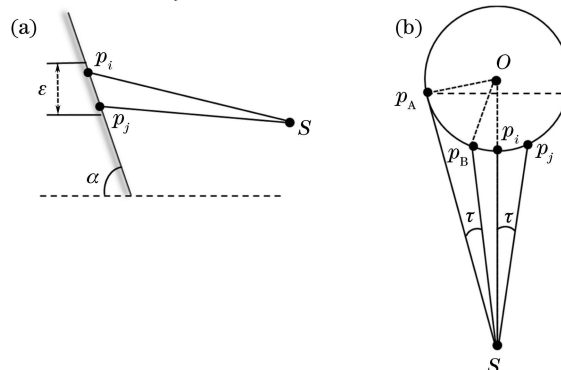


图 3 扫描几何关系图。(a) 纵向扫描; (b) 横向扫描

Fig. 3 Schematic of scanning geometry. (a) Vertical scanning; (b) horizontal scanning

根据几何关系可以计算得到 A、B 两点的深度值间距为

$$f(L_A) = |L_A - L_B| = L_A - \sqrt{L_A^2 + R^2 \cos^2 \beta} + \sqrt{R^2 \cos^2 \beta - L_A^2 \sin^2 \beta}, \quad (5)$$

$$\beta = \arctan(R/L_A) - \tau, \quad (6)$$

可以看出, $|L_A - L_B|$ 随着 R 的增加而增大, 本文方法中取 R 的最大值为 1 m。

对于扫描方向角相邻的两个点来说, 高度的差距对深度值间距也有影响, 所以有

$$|L_j - L_i| < f(L_i) + e, \quad (7)$$

因此

$$g = f(L_i) + e. \quad (8)$$

根据上述方法对 $S_{1,3}$ 进行聚类, 得到每层切片的聚类结果集合 $C_k = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_k\}$, 其中 c_i 表示聚类结果的一个簇, 是属于同一物体的数据点的集合。

3.3 胸径估计

测树学指出树干有以下特点: 一株树自下而上, 由于干根部扩张靠近基部的横断面多呈不规则形状, 从面积对比结果看, 横断面形状总体近似为圆形^[21]。二维切片点云中的树干点呈圆弧分布, 同时当树倾斜时, 可以认为扫描所得的树干点在一个圆柱体的斜切面上, 近似于椭圆分布, 因此采用圆形拟合与椭圆拟合判别树干点。但是当点集内包含点的数量过少时, 可能出现拟合结果较好而点集内的点并非树干点的现象, 故先排除规模较小的点集。若包含点的数量小于等于 t , 则认为该点集内的点为非树干点。簇 c_i 中点的个数 n 满足:

$$n = 2\arctan(R/L_A) / \tau \geq t, \quad (9)$$

可以看出 n 随着 R 的减小而减小。令 R 的最小取值为 0.05 m, 则

$$t = 2\arctan(0.05/L_A) / \tau. \quad (10)$$

采用 Lemon 提出的最小二乘圆形拟合方法对每组点云进行圆形拟合^[22], 该方法的目的是求得一组 a 、 b 、 R 使得下式的值最小, 即

$$f(a, b, R) = \sum_{i=0}^n (\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R)^2, \quad (11)$$

式中 x_i 、 y_i 为待拟合数据的坐标, a 、 b 为拟合圆的圆心坐标, R 为拟合圆的半径。利用 Levenberg-Marquardt 方法求解 a 、 b 、 R 的值。

采用基于几何方法的最小二乘椭圆拟合方法对每组点云数据进行椭圆拟合^[23], 目的是求得一组参数 x 、 y 、 a 、 b 、 θ_e 使得椭圆到各个数据点的距离平方和最小。描述椭圆的椭圆参数方程为

$$\begin{cases} x_e = a \cos \Phi \cos \theta_e - b \sin \Phi \sin \theta_e + x \\ y_e = a \cos \Phi \sin \theta_e + b \sin \Phi \cos \theta_e + y \end{cases}, \quad (12)$$

式中 x 、 y 为拟合椭圆的中心坐标, a 、 b 分别为拟合椭圆的长轴与短轴, θ_e 为椭圆长轴与 x 轴形成的夹角。利用 Levenberg-Marquardt 方法求解 x 、 y 、 a 、 b 、 θ_e 的值。

得到拟合结果之后, 对每个簇的圆形拟合结果与椭圆拟合结果分别计算均方根误差 (RMSE), 从而判断点云是否符合圆形分布或椭圆分布的树干点云, 亦或是呈现随机分布的其他点云。

均方根误差定义为

$$W = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}, \quad (13)$$

式中 W 为 RMSE 的值, d_i 为数据点与拟合值的偏差, 即数据点到拟合曲线的距离, n 为簇中数据点数量。

对圆形拟合结果与椭圆拟合结果分别求得圆形拟合均方根误差 W_C 与椭圆拟合均方根误差 W_E :

1) 若 $W_C > \varphi$ 且 $W_E > \varphi$ (φ 为均方根误差阈值), 则说明该簇中包含的点不符合圆形分布和椭圆分布, 不是树干上的点, 其所在位置不存在树木;

2) 若 $W_C < \varphi$ 且 $W_E < \varphi$, 则说明该簇中包含的点符合圆形分布或者椭圆分布, 是树干上的点, 其所在位置存在树木。若还满足 $W_C > W_E$, 说明点的空间分布更符合圆形分布, 否则更符合椭圆分布;

3) 若 $W_C < \varphi$ 且 $W_E > \varphi$, 则说明该簇中包含的点符合圆形分布, 是树干上的点, 其所在位置存在树木;

4) 若 $W_C > \varphi$ 且 $W_E < \varphi$, 则说明该簇中包含的点符合椭圆分布, 是树干上的点, 其所在位置存在树木。

同时, 在较大范围内进行测量时, 较远处的树木会产生遮挡问题, 使得部分树干点云缺失。而椭圆拟合结果与数据相关性很大, 因此对于部分缺失点云数据, 椭圆拟合容易产生过拟合, 从而使结果偏差较大。圆形拟合较为稳定, 在点云缺失不是非常严重的情况下, 拟合结果不会产生巨大的偏差。在本文方法中, 若椭圆拟合结果与圆形拟合结果差值大于最小检测直径 1.5 cm, 且有 $W_C < \varphi$, 则认为树干点云符合圆形分布。如果两者结果偏差较小, 则利用上述均方根误差进行判别分类。均方根误差阈值 φ 取值为 3.5 mm。

对判定为树干点的点云集合进行胸径估计。如果点云集合中点的分布符合圆形分布, 根据以上分析, 说明该树干为垂直生长, 通过圆形拟合得到的直径即为估计胸径值。如果点云集合中点的分布符合椭圆分布, 则说明树干存在一定的倾斜。如图 4 所示, AB 、 EF 为椭圆拟合得到的椭圆长轴与短轴, 不难看出其短轴长与圆柱体直径相等, 即 $EF = AC$, 并且可以得到圆柱的倾斜角度 α 满足

$$\sin \alpha = \frac{AC}{AB} = \frac{EF}{AB} \quad (14)$$

当树木存在倾斜时, 胸高位置的确定方法如图 5 所示, 本文方法选取的胸高为垂直方向高度, 会对估计结果造成误差。当点云集合内的点判别为椭圆分布时, 则对该树木重新截取胸高切片点云, 截取高度根据胸高与树木倾斜的关系进行校正。校正后的截取高度为

$$h_{\text{correction}} = 1.3 \sin \alpha \quad (15)$$

重新截取胸高切片点云之后, 对其进行圆形拟合与椭圆形拟合进行点云分布判别。若点云分布判别为圆形分布, 则胸径为圆形拟合所得直径长度。若点云分布符合椭圆分布, 根据图 4 所示几何关系, 胸径为椭圆拟合所得短轴长度。

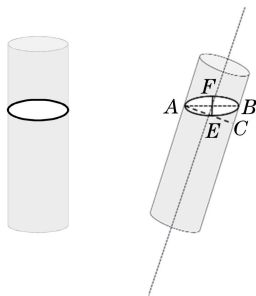


图 4 树干倾斜与胸径估计的几何关系

Fig. 4 Geometric relationship between leaning tree and estimated DBH

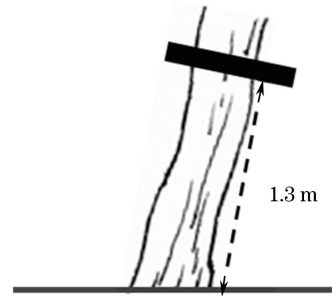


图 5 胸高位置的确定

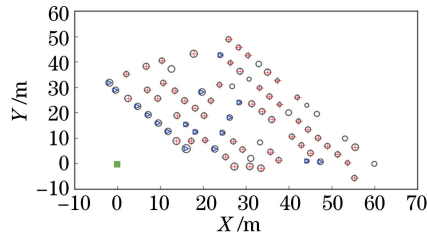
Fig. 5 Location of breast height

4 分析与讨论

利用从北京市东升郊野公园采集的样地数据验证所提出的方法。图 6 是样地树木的检测与点云分布判别结果。样地内共有旱柳 79 株, 利用提出方法正确检出数量为 68 株, 漏检数量为 11 株, 从图 6 可以看出, 漏检的树木多分布于距激光雷达较远位置或树木较为稠密的位置, 这是由于这些位置的树木容易存在较严重的遮挡问题, 只有少部分树干和枝叶点云得以保留, 在胸径高度没有点云或只保留极少量的点云, 从而造成了漏检。在正确检出的 68 株树木中, 判别为圆形分布的有 51 株, 判别为椭圆分布的有 17 株。样地点云中 11 株树木因为遮挡等问题无法检出, 也无法进行胸径估计, 所以利用检测出的 68 株树木的手工测量数据与实验结果进行比较。图 7 为胸径估计结果的线性回归结果, 均方根误差值为 1.99 cm。

表 1 为 17 株被判别为符合椭圆分布树木的人工测量结果、圆形-椭圆自适应胸径估计方法结果和单纯圆形拟合结果。其中 1, 3, 5, 6, 7, 14, 15, 26, 34, 51 号树木的自适应方法胸径估计结果的相对误差均低于单纯圆形拟合方法的结果, 前者平均相对误差为 4.04%, 后者平均相对误差为 8.74%。圆形-椭圆自适应方法结果的平均相对误差比单纯圆形拟合方法降低了 4.7%。两种方法得到的 2 号树结果相对误差非常接近。

9,18,36,42,49,50 这 6 株树单纯圆形拟合结果更优,其中 36,42,49,50 号树木距地面激光雷达较远,距离均大于 30 m,当距离增大时树木点云密度降低,同时遮蔽情况增加,这些都会影响椭圆拟合精度。50 号树在胸径高度的点云由于树木遮挡存在较明显的点云缺失。根据实验结果可以看出,相对于单纯圆形拟合方法,在 30 m 范围内,本文方法在胸径估计精度上有较明显地提高。



'o' represents the salix position in the experimental area, whose size represents DBH;
'+' represents the salix position where DBH point cloud transect conforms to the circular distribution;
'△' represents the salix position where DBH point cloud transect conforms to the elliptical distribution;
'□' represents the scanning position of terrestrial laser scanner

图 6 树木检测结果与林木定位图

Fig. 6 Tree detection results and forest location

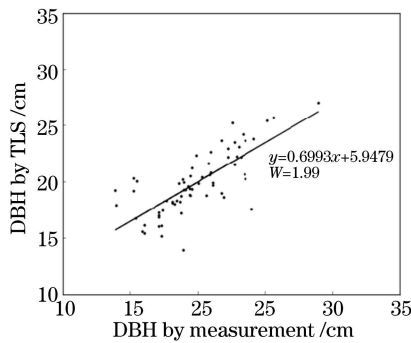


图 7 胸径估计线性回归结果

Fig. 7 Linear regression result for DBH estimation

表 1 部分树木胸径不同方法估计结果

Table 1 DBH estimation results of partial trees obtained by different methods

Tree No.	DBH reference /cm	Adaptive method estimation /cm	Relative error /%	Circular fitting estimation /cm	Relative error /%
1	23.55	20.22	14.16	19.23	18.38
2	22.76	23.48	3.17	22.11	2.84
3	23.55	23.62	0.28	22.24	5.60
5	22.92	22.20	3.13	21.97	4.15
6	23.49	20.62	12.22	20.35	13.36
7	22.76	21.50	5.53	20.48	10.03
9	28.97	27.02	6.72	28.04	3.20
14	17.19	17.00	1.10	15.59	9.30
15	17.19	17.26	0.41	16.01	6.84
18	23.24	22.16	4.63	23.14	0.41
26	18.14	18.08	0.35	17.06	5.98
34	24.19	23.78	1.70	23.18	4.18
36	19.48	20.48	5.13	19.03	2.34
42	17.19	16.02	6.80	17.46	1.58
49	21.01	22.62	7.67	22.09	5.13
50	15.44	16.72	8.30	15.59	0.98
51	18.30	18.02	1.55	16.54	9.61

图 8 为不同距离范围内圆形-椭圆自适应方法与单纯圆形拟合方法胸径估计结果的均方根误差。从整体趋势可以看出,随着距离的增大,两种方法的均方根误差逐渐增大,圆形-椭圆自适应方法的均方根误差低于单纯圆形拟合方法,在 26 m 范围内圆形-椭圆自适应方法的均方根误差为 1.1 cm,圆形拟合方法均方根误差为 1.32 cm。而在 56 m 范围内,圆形-椭圆自适应方法的均方根误差为 1.99 cm,圆形拟合方法的均方根误差为 2.05 cm。

图 9 为不同距离范围内树干切片点云中数据点的平均数量。可以看出,随着扫描距离的增大,树干切片点云中的点云数量呈现总体减小的趋势,反映了树木点云的密度随着扫描距离的增大而减小。与图 8 对比可以看出,胸径估计误差与树木点云密度成反比,且点云规模在较近距离范围内下降较快,而胸径估计误差在较近距离范围内增加得比较平缓,这说明在保证一定点云规模的情况下,胸径估计结果可以达到一定的精度。当点云数量减少到只有几十时,胸径估计误差上升比较明显,说明点云密度较低对胸径估计误差的影响较大。

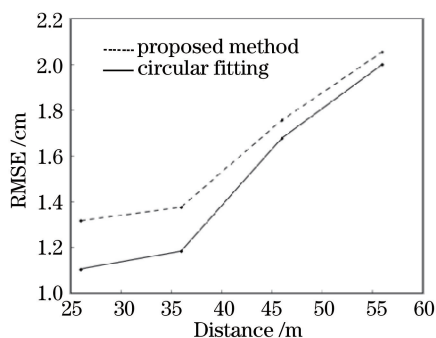


图 8 均方根误差随距离的变化

Fig. 8 Variation of RMSE with distance

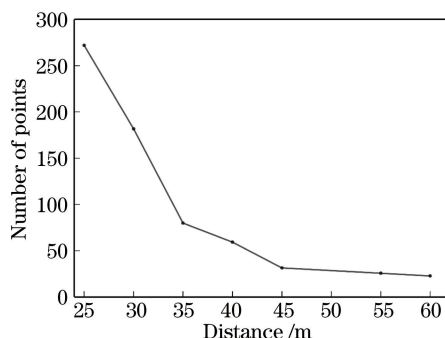


图 9 树干切片点云数量随距离的变化

Fig. 9 Variation of number of point cloud on tree section with distance

从以上结果可以看出,在较近范围内圆形-椭圆自适应方法优势比较明显,随着距离的增加,两种方法的均方根误差逐渐接近。这是由于在近距离范围内,点云密度较高且遮挡不严重,椭圆拟合可以得到精度较高的结果,自适应胸径估计方法可以得到更接近人工测量值的结果。当距离较远时,树木点云密度的降低造成椭圆拟合的精度下降,使得自适应方法的拟合结果与圆形拟合结果一致,但对于个别树木也可能产生自适应方法的结果比圆形拟合结果差的情况,导致距离较远时自适应方法与单纯圆形拟合方法逐渐接近。

5 结 论

圆形-椭圆自适应方法利用林地点云数据的胸高切片点云,对一定范围内的树木进行自动化胸径估计,避免了计算与分析大规模的全区域点云数据,可以快速准确地从大规模样地点云数据中估计树木胸径。

利用涵盖 79 株柳树的样地点云数据检验提出的圆形-椭圆自适应胸径估计方法。结果表明,该方法可以较自动化地检测树木位置并进行胸径估计,在 26 m 范围内均方根误差为 1.1 cm,在 56 m 范围内均方根误差在 2 cm 内。相对于单纯圆形拟合方法,误差降低了 4.7%。说明该方法的效率和精度较为理想。

本文方法研究的主要区域是环境较为简单、干扰事物较少的人工林区域,适用于地表植被较为低矮、地势相对一致的林地。而对于一些地表植被茂密、地势起伏较大、环境极为复杂的自然林区,还需要进一步研究。

参 考 文 献

- Lu Weixin, Wan Youchuan, He Peipei, *et al.* Extracting and plane segmenting buildings from large scene point cloud[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0914004.
卢维欣, 万幼川, 何培培, 等. 大场景内建筑物点云提取及平面分割算法[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0914004.
- Wang Guo, Sha Congshu, Wang Jian. Study on segmentation of building facade considering local point cloud density[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 061001.
王 果, 沙从术, 王 健. 考虑局部点云密度的建筑立面自适应分割方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6):

061001.

- 3 He Peipei, Wan Youchuan, Yang Wei, *et al.* Automatic registration of urban laser point cloud with aerial image data based on straight-lines[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0528001.
何培培, 万幼川, 杨威, 等. 基于线特征的城区激光点云与影像自动配准[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0528001.
- 4 Simonse M, Aschoff T, Spiecker H, *et al.* Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning[C]. *Proceedings of the Scan Laser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*, 2003: 252-258.
- 5 Hopkinson C, Chasmer L, Young-Pow C, *et al.* Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(3): 573-583.
- 6 Maas H G, Bienert A, Scheller S, *et al.* Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(5): 1579-1593.
- 7 Brolly G, Király G. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning[J]. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2009, 5: 119-130.
- 8 Liang X L, Litkey P, Hyypä J, *et al.* Automatic stem location mapping using TLS for plot-wise forest inventory[C]. *Proceedings of the Silvi Laser*, 2009: 314-323.
- 9 Tansey K, Selmes N, Anstee A, *et al.* Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(19): 5195-5209.
- 10 Ni Wenjian, Guo Zhifeng, Sun Guoqing, *et al.* Research on extraction of tree structure parameters from terrestrial laser scanner data[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2010, 20(2): 191-198.
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.
- 11 Li Dan, Pang Yong, Yue Cairong. A review of TLS application in forest parameters retrieving[J]. *World Forestry Research*, 2012, 25(6): 34-39.
李丹, 庞勇, 岳彩荣. 地基激光雷达在森林参数反演中的应用[J]. *世界林业研究*, 2012, 25(6): 34-39.
- 12 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.
- 13 Antonarakis A S. Evaluating forest biometrics obtained from ground lidar in complex riparian forests[J]. *Remote Sensing Letters*, 2011, 2(1): 61-70.
- 14 Moskal L M, Zheng G. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(1): 1-20.
- 15 Yang X Y, Strahler A H, Schaaf C B, *et al.* Three-dimensional forest reconstruction and structural parameter retrievals using a terrestrial full-waveform lidar instrument[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 135: 36-51.
- 16 Liang X L, Litkey P, Hyypä 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.
- 17 Liang X L, Kankare V, Yu X W, *et al.* Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(3): 1739-1748.
- 18 Kelbe D, Romanczyk P, van Aardt J, *et al.* Reconstruction of 3D tree stem models from low-cost terrestrial laser scanner data[C]. *SPIE*, 2013, 8731: 873106.
- 19 Liu Luxia, Pang Yong, Li Zengyuan, *et al.* Retrieving structural parameters of individual tree through terrestrial laser scanning data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(2): 365-377.
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.
- 20 Olofsson K, Holmgren J, Olsson H. Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the RANSAC algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(5): 4323-4344.
- 21 Meng Xianyu. *Forest mensuration*[M]. Beijing: China Forestry Publishing, 2006.
孟宪宇. *测树学*[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- 22 Chernov N, Lesort C. Least squares fitting of circles[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2005, 23(3): 239-252.
- 23 Xia Jing. *A comparative study of ellipses fitting method*[D]. Guangzhou: Jinan University, 2007.
夏菁. *椭圆拟合方法的比较研究*[D]. 广州: 暨南大学, 2007.