

基于毛竹冠层 LiDAR 点云密度测算其蓄积量

苏德添¹, 伍琳琳¹, 章范怡¹, 徐文兵^{1,2*}

¹浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 杭州 311300;

²同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

摘要 毛竹林资源具有高效固碳能力,对全球碳平衡的贡献和碳交易的经济效益使其受到社会广泛关注。由于毛竹林冠层结构复杂和郁闭度高,传统测量手段无法精确测算其蓄积量。基于此,利用三维激光扫描仪获得毛竹冠层的 LiDAR 点云数据,尝试通过点云密度来估算其蓄积量。研究表明:毛竹冠层蓄积量与其竹竿、竹枝的点云密度之间存在一定的数学模型;通过样本检验,毛竹冠层内部竹竿与枝条的模型精度分别可达 95.53% 和 91.36%。

关键词 测量; LiDAR; 点云密度; 毛竹; 蓄积量

中图分类号 P232

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0404001

Estimation of Accumulation Amount of *Phyllostachys Pubescens* Based on LiDAR Point Cloud Density of Canopy

Su Detian¹, Wu Linlin¹, Zhang Fanyi¹, Xu Wenbing^{1,2*}

¹School of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou, Zhejiang 311300, China;

²College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract Bamboo resources have efficient carbon-sequestration capabilities, and their economic contributions to global carbon balance and carbon trading have attracted widespread attention. However, because of the complexity and the high canopy density of bamboo canopy structure, traditional measurement methods cannot be used to precisely measure the accumulation amount. Therefore, LiDAR point cloud data of *Phyllostachys pubescens* canopy are obtained using three-dimensional laser scanner to estimate the accumulation amount by the point cloud density. Experimental results show that a mathematical relation exists between the accumulation amount of the bamboo canopy and the point cloud density of bamboo poles and branches. In a sample test, the model accuracy of the accumulation amount of the bamboo pole and branches in the canopy reached 95.53% and 91.36%, respectively.

Key words measurement; LiDAR; point cloud density; bamboo; accumulation amount

OCIS codes 120.0280; 280.3640; 140.3460; 100.6890

1 引 言

LiDAR, 又称激光雷达或三维激光扫描技术,是一种非接触式高速激光遥感技术,可用于获得目标的三维坐标信息,因此 LiDAR 常用于森林植被的三维结构信息提取。林木蓄积量是指森林中存在的各种活立木的材积总量,是评价一地区林业经营经济效益的重要指标^[1]。2018 年的全球气候变化

大会“中国角”上,有中国学者指出,竹林是世界上非常特殊的森林类型,在我国森林碳汇中具有独特地位,其拥有强大的固碳能力,具有良好的经济和生态价值,在促进乡村经济发展和减缓气候变化中发挥着重要作用。毛竹是我国南方的一种特有植物,具有生长快、周期短、产量高、用途广、固碳能力强^[2]等诸多优点。

树木冠层生物量的研究主要集中在计算树冠的

收稿日期: 2019-09-27; 修回日期: 2019-10-26; 录用日期: 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(41671449)、浙江省公益技术研究项目(LGN18C160004)、浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(319-2060380107)

* E-mail: xuwb97@163.com

体积,并将其转化为树木冠层的蓄积量来计量生物量。计算单株树木冠层体积的传统方法是外业实地调查,实地采集目标树种的胸径、冠径和冠高等样本数据,并建立相应树种的回归模型,依照每棵树的形态特征,为每个树冠匹配适宜的立体几何图形,根据图形的几何规律选择适当的计算公式^[3]。传统的计测手段普遍存在着操作手段复杂、数据精度不高、破坏性强、自动化程度较低等缺点,最重要的是无法及时获得大尺度范围区域内的树木信息^[4]。20世纪60年代末,美国等发达国家开始研究三维激光扫描仪,用于对地观测系统和快速获取特定目标的三维模型,目前已经形成了规模化的产业^[5]。三维激光扫描技术因具有精度高、人机交互、速度快、操作简单等优点被引入到林业资源调查领域,是未来林业数字化测量的主要技术^[6]。

国内外学者利用 LiDAR 技术开展立木蓄积量的研究,且取得一定进展。徐婷^[7]通过建立 Landsat8/OLI 数据和 LiDAR 数据的多元逐步回归模型,得出了森林生物量的估测模型,认为结合 LiDAR 数据和高光谱数据建立的综合模型对生物量的估测效果最好、精度最高^[8-9]。Hudak 等^[10]研究了美国俄勒冈州松树森林的光学遥感数据和 LiDAR 波形数据,并利用三种时空经验统计模型及其不同组合对二者进行融合,制作出了高精度的森林冠顶高度图,实现了区域尺度的生物量估算^[11]。为了同时获取区域尺度森林的水平和垂直结构信息,估算森林生物量,黄克标等^[12]结合机载 LiDAR 数据和地球科学激光测高系统 (GLAS) 数据,利用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 植被产品 (MOD44B) 和土地覆盖数据对云南省森林生物量进行了精确估算,完成了生物量专题图制作。通过植被冠层来测算整体蓄积量的研究不太普遍,赵晓^[13]利用卫星遥感影像数据和毛竹林外业调查资料,采用地统计相关原理,对毛竹林叶面积指数 (LAI) 和冠层郁闭度 (CC) 两个冠层参数进行了估算,并借助地理信息系统 (GIS) 空间分析模块,分析了它们与碳储量的相关性,从而对毛竹林碳储量对其冠层参数的空间响应进行了探讨。本文拟采用地籍三维激光扫描技术采集毛竹林的冠层点云数据,研究其生物量精确测算方法,探讨利用卫星遥感影像数据或机载 LiDAR 精确估算毛竹林碳储量的抽样技术。

国内外多是利用星载或机载 LiDAR 技术对森林蓄积量和生物量进行研究,且取得了较大成就,但关于毛竹林生物量的研究相对较少,尤其是高精度、

自动化程度高的抽样技术。测算毛竹冠层蓄积量的难点在于冠层形状的不规则性。虽然毛竹冠层存在较大的空隙,但冠层结构形状复杂,由毛竹冠层模型难以准确计算毛竹冠层蓄积量,并且如何有效地获取毛竹的点云数据并模型化是个不小的挑战^[14]。鉴于使用三维激光扫描技术获取的数目点云数据量大,且难以模型化^[15],为了避免其他因素的干扰,在室内获取样本毛竹冠层点云数据,探讨毛竹冠层蓄积量与点云密度之间的关系,旨在寻找一种新的途径来测算毛竹冠层蓄积量,并将其作为星载或机载 LiDAR 测算大尺度毛竹林蓄积量的抽样技术,用于实现毛竹林蓄积量测量的规模化、高效化和高精度。

2 研究区域和仪器设备

实验研究区域为学校实验基地,位于浙江省杭州市临安区 (E118°51'~E119°52', N29°56'~N30°23'),地处浙江省西北部。该区域属亚热带季风气候,年均气温 16.4℃,年降水量 1500.0~1628.6 mm,年日照时数 1847.3 h,全年无霜期 237 d;海拔 60~120 m,属低山丘陵,森林覆盖率为 76.5%,主要树种为毛竹,土壤为微酸性红土壤。实验样地内,主要有 1~4 年生的毛竹,平均胸径 8.7 cm,立竹密度 2000~5300 株/hm²,林下少灌木、多杂草^[16]。

试验仪器为地面三维激光扫描仪 (ScanStation C05, Leica),该仪器为双扫描窗口设计,采用紧凑型脉冲式绿色激光 (波长 532 nm),安全等级为 3R 级,扫描视场角范围为 360°×270°,扫描速率为 50000 s⁻¹^[17],标称精度为 100 m 以内的扫描标准偏差小于 4 mm。试验系统主要由扫描仪、控制器 (计算机) 和电源供应系统三部分组成^[18]。针对 Leica 三维激光扫描仪的特点和功能,Leica 公司专门开发了一款处理软件 Cyclone,具备多功能模块^[19]。

3 研究技术路线

本研究先在选定的实验毛竹样地中选择并砍伐样本毛竹,再在室内分段扫描样本毛竹得到点云数据,然后对点云数据进行拼接、去噪等数据处理,最后利用 SPSS 软件进行关系拟合分析,得出结论。具体技术路线如图 1 所示。

4 数据采集与预处理

毛竹冠层的点云数据采集就是使用三维激光扫描仪对毛竹进行扫描,并获取毛竹冠层表面海量离

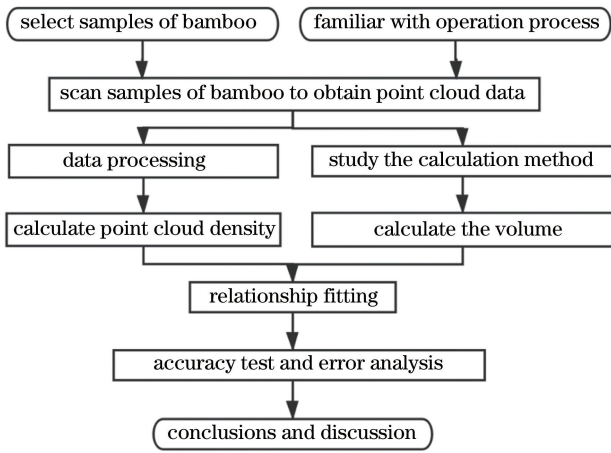


图 1 试验技术路线图

Fig. 1 Technology road map of test

散点云的过程。在林业调查中,树木的点云数据采集主要包括以下几个步骤:踏勘试验场地、标靶布设、分站扫描、控制标靶中心的获取^[15]。

为了避免实验过程中三维激光扫描的单株毛竹的点云数据受外界环境的影响,提高实验数据的准确性,将整株毛竹砍伐后运回实验室,在室内进行三维激光扫描。受到室内高度限制,将毛竹锯成长度大致相同的 5 段,分别进行扫描。在实验室中间,利用细绳从三个方向固定毛竹,使其保持竖直;在扫描目标周边布设三个扫描仪站点,任意两个站点与目标连线的夹角为 120°左右,保证扫描无死角;室内布设三个以上标靶,保证点云数据的拼接精度。实验布设如图 2 所示。



图 2 室内扫描单株毛竹冠层

Fig. 2 Indoor scanning of single bamboo canopy

受到多种因素的影响,原始点云数据存在大量的噪声点。噪声点不仅浪费计算机的内存空间,还会影响毛竹的三维模型建模^[20]。根据三维激光扫描仪的扫描原理,在扫描精度和角度都一定的情况

下,不同物体的表面纹理和粗糙程度各有不同,使得不同物体对于激光的反射和吸收能力各不相同^[21]。

在大量点云数据中会存在噪声点,并且噪声密度越大,其对点云数据总体质量的影响越大,需采取合适的算法加以剔除。陈世超等^[22]提出一种激光扫描数据的密集噪声剔除算法,同时国内外学者在点云去噪方面也开展了大量研究,把噪声点分为三类^[23]:第一类为偏离主体点云较远的点,一般为空气中稀疏的离散点或者孤立的小而密集的点;第二类为距离点云主体较近或与有效点云混在一起的噪点;第三类为大范围的密集噪声。

将实验获取的点云数据导入 Leica 的 Cyclone 软件中,毛竹冠层的主体部分整体呈橙红色。离枝条较远部分存在少量蓝色和绿色的点(第一类噪声点),采用统计滤波、半径滤波、格网去噪和基于点密度去噪等算法进行滤波;在各枝条、竹竿之间存在的较多的黄色点云(第二类噪声点),使得毛竹冠层形状变得模糊不清,使用运动稳健主成分分析(MRPCA)算法^[24],基于偏微分方程的曲面逼近算法^[25]和双边滤波算法及其改进后的算法^[26],进行噪声点剔除;对于枝叶间的密集黄色点云(第三类噪声点),先使用 Cyclone 的 Limtbox 进行局部放大,再使用 Fence 功能圈选噪点进行手工去噪。竹冠去噪前后的对比图如图 3 所示。

5 点云密度与蓄积量关系分析

5.1 点云数量与密度统计

点云密度即单位体积内点的数量。本试验根据实际情况,选取 3 cm×3 cm×3 cm 的立方体作为目标区间,在 Leica 的 Cyclone 软件中导出该范围内.pts 格式的点云数据统计文档。在点云数据预处理中,通过多次实验和数据的观察与分析,发现毛竹冠层点云的强度值范围为 -1700~-1000,因此可将远离这个强度值范围的噪声点去除。若有部分点的回波强度与参考范围相差较大,即可判断为去噪过程中遗漏的噪点,可用 Excel 的筛选功能对噪点进行筛选并删除,得到较准确的毛竹冠层点云数量。根据点云数量计算点云密度:点云密度=点云数量/毛竹冠层体积。

5.2 毛竹枝条蓄积量的数学模型

5.2.1 研究思路

要研究点云密度与毛竹冠层蓄积量的转换关系,首先要准确测量样本毛竹的蓄积量。但是,目前毛竹冠层蓄积量的研究方法较少,没有可直接借

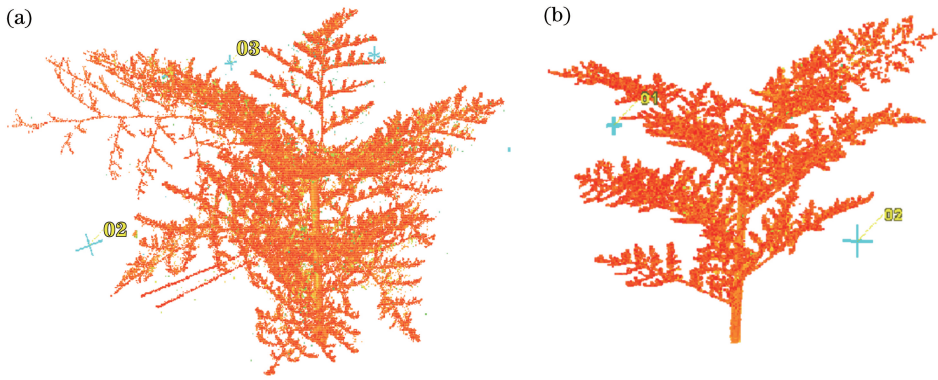


图 3 竹冠去噪前后对比图。(a)去噪前;(b)去噪后

Fig. 3 Comparison of bamboo crown before and after denoising. (a) Before denoising; (b) after denoising

鉴的参考资料。研究蓄积量的目的是为了计算其生物量,目前常用的树木冠层生物量研究方法主要有:1)收集大量被研究树种的冠高、冠径、冠幅等样本数据,并建立相应的回归模型,例如冠高-体积模型^[3];2)依据树冠的点云数据构建模型,通过制作模型切片来分析模型的几何规律,从中找到能用规则几何模型表达冠层体积的方法。但是这些方法都不适用于毛竹冠层蓄积量的测量。一方面,毛竹冠层结构复杂多样,其蓄积量的研究存在困难,没有查询到关于毛竹冠层蓄积量的估算方法,同时受到现有实验条件的限制无法构造能够直接用于计算蓄积量的规则几何模型。另一方面,传统的建模方式是将树冠看作一个由外缘廓线围成的实心体,而毛竹冠层的枝条较细,并且枝条间存在较大空隙,这种与其他树种不同的特性使得常规建模方法无法适用于毛竹冠层蓄积量的计算。还有一方面,传统的冠径、冠高测算方法太笼统,得出的数据不够精确,会影响最终的实验结果,而且过去研究的树冠体积与树木冠层的蓄积量并不是一个概念,不能直接拿来参考。为了更好地得到点云密度和冠层蓄积量的关系,必须得到准确的冠层蓄积量计算方法。

毛竹侧枝条比较细,在 Cyclone 软件上对其进行观察,根据扫描结果判断其形状为由点云构成的实心线状物,点云的数量可用于描述竹枝的体积,两者呈正相关。利用三维激光扫描技术即可获取目标物体的表面信息,毛竹冠层最粗的主干部分的扫描结果是一个由点云均匀分布而成的圆柱体的侧面,其内部是空心的,即点云的数量与竹竿的侧面积呈正相关。根据这种特性,在探索点云密度与蓄积量的关系时将竹竿与枝条部分分离,分别研究两部分的点云密度和蓄积量的关系。

5.2.2 毛竹冠层枝条蓄积量计算方法

经观察,毛竹冠层的侧枝从底部到顶部是由粗到细变化,形状近似为底面半径均匀递减的圆锥体,但是这种从粗到细的渐变关系在一定范围内不是特别明显。因此可选取合适的长度将毛竹枝条分成多个长度区间,在每个长度区间内,将该段竹枝近似为一个圆柱体,整根毛竹的侧枝被简化成由多个圆柱体堆叠而成的几何体。本文通过实验确定各区间范围内枝条长度与蓄积量的关系,从而构建长度-蓄积量的回归模型。

经测算和比对,毛竹枝条在 30 cm 范围内的粗细变化较均匀,可以近似为圆柱体。实验样本最长的竹枝未超过 210 cm,以 30 cm 为区间,将 0 cm 到 210 cm 长度分成 7 个区间,每个长度区间内选取 5 个以上样本,通过排水法获取所有样本枝条在不同区间的体积并分段记录,实际测量 137 个样本,其中 36 个样本的数据如表 1 所示。

由于毛竹枝条的每段近似成圆柱体,在 SPSS 上选择一元线性回归作为数学模型,长度为自变量,以体积为因变量,得出各分段函数,具体表达式为

$$V_1 = 0.02l_1 - 0.085 \quad (0 < l_1 < 30), \quad (1)$$

$$V_2 = 0.05(l_2 - 30) + 0.396 \quad (30 < l_2 < 60), \quad (2)$$

$$V_3 = 0.13(l_3 - 60) + 1.778 \quad (60 < l_3 < 90), \quad (3)$$

$$V_4 = 0.24(l_4 - 90) + 5.12 \quad (90 < l_4 < 120), \quad (4)$$

$$V_5 = 0.431(l_5 - 120) + 12.041 \quad (120 < l_5 < 150), \quad (5)$$

$$V_6 = 0.56(l_6 - 150) + 23.692 \quad (150 < l_6 < 180), \quad (6)$$

$$V_7 = 0.528(l_7 - 180) + 40.273 \quad (180 < l_7 < 210), \quad (7)$$

式中: $V_i (i=1, 2, \dots, 7)$ 为毛竹枝条的体积, 单位为 cm^3 ; $l_i (i=1, 2, \dots, 7)$ 为枝条长度, 单位为 cm 。经

检验, 每段一元线性回归方程的显著性水平均小于 0.05, 相关性较强, 数学模型合理。

表 1 毛竹枝条实测体积

Table 1 Measured volume of bamboo branches

Number	Length /cm	Volume / cm^3	Number	Length /cm	Volume / cm^3	Number	Length /cm	Volume / cm^3
1	7.8	0.10	13	60.0	1.86	25	138.0	20.25
2	14.8	0.20	14	69.0	3.20	26	144.0	22.65
3	15.5	0.20	15	77.0	4.55	27	135.0	17.25
4	18.3	0.25	16	81.0	4.65	28	164.5	28.76
5	22.5	0.40	17	87.0	5.53	29	172.0	35.25
6	29.7	0.50	18	95.7	6.51	30	175.2	39.35
7	36.5	0.70	19	96.5	6.43	31	176.0	39.35
8	37.0	1.25	20	105.0	9.10	32	157.0	27.95
9	45.1	1.18	21	108.0	8.40	33	194.0	45.10
10	51.0	1.52	22	117.0	12.50	34	183.0	39.70
11	52.3	1.61	23	123.0	14.45	35	198.0	42.67
12	54.5	1.74	24	133.0	17.50	36	187.0	39.35

5.3 冠层内竹竿蓄积量的数学模型

本文的毛竹冠层包括竹枝和冠层内部的竹竿。因此, 毛竹冠层蓄积量可按竹枝部分和竹竿部分分别测算。对于竹枝部分, 使用 Cyclone 软件对毛竹冠层样本的所有侧枝进行长度测量并记录统计, 如图 4 所示, 再根据枝条长度和其蓄积量的数学模型分别计算得出毛竹冠层样本竹枝的蓄积量。

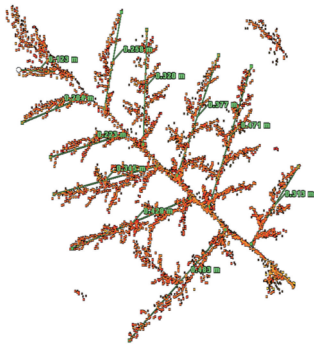


图 4 Cyclone 量测的枝条长度

Fig. 4 Shoots length measured by Cyclone

毛竹冠层竹竿部分的横截面为较为规则的圆形, 可以将其看成是均匀的圆锥体。在 Cyclone 软件上去除枝条部分的点云数据, 测量样本的长度, 分别记录每段竹竿的高度 h 。使用 Cyclone 的 Slice 功能制作最低枝条处竹竿横截面的切片, 测量切片的半径 R 。根据

$$V_z = \frac{1}{3} \pi R^3, \quad (8)$$

求出各组竹竿的蓄积量 V_z 。式中: V_z 为各竹竿蓄积量; R 为切片半径; h 为每段竹竿高度。

5.4 毛竹冠层蓄积量与点云密度的关系

通过各段毛竹冠层的 .pts 数据统计每个样本的点云数量。为了获得视场范围内枝条的所有点云数据, 先在 Cyclone 软件上使用 Fence 工具筛选出竹竿部分的点云, 统计竹竿部分的点云数量, 其中 4 个样本的数据如表 2 所示。再将原来整个冠层的点云数量与竹竿点云数量作差值, 得到所有枝条部分的点云数量, 如表 3 所示, 这 4 个样本数据的散点图如图 5 所示。

表 2 样本竹竿的表面积与点云密度

Table 2 Surface area and point cloud density of sample bamboo poles

Number	Surface area / cm^2	Number of point clouds	Point cloud bulk density / cm^{-3}	Point cloud areal density / cm^{-2}
Bamboo pole 1	3653.39	27317	0.00101174	7.477
Bamboo pole 2	2449.22	19795	0.000733148	8.082
Bamboo pole 3	1915.41	14519	0.000537741	7.580
Bamboo pole 4	1602.34	11783	0.000436407	7.353
Average				7.631

表 3 竹冠枝条点云密度与体积

Table 3 Point cloud density and volume of bamboo crown branches

Number	Number of point clouds	Point cloud density /cm ⁻³	Volume /cm ³
Bamboo crown branch 1	273659	0.0101355	231.5070
Bamboo crown branch 2	524001	0.0194074	736.8833
Bamboo crown branch 3	421903	0.0156260	635.0164
Bamboo crown branch 4	378124	0.0140046	411.2008

将枝条部分点云密度与其蓄积量进行拟合,结果显示二者呈线性相关,拟合结果如图 6 所示,关系方程式为

$$V_t = 57020.774\rho_2 - 339.879, \quad (9)$$

式中: V_t 为枝条的总体积; ρ_2 为枝条点云密度。

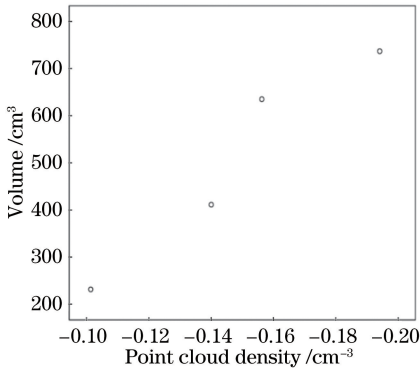


图 5 枝条部分体积-点云密度的散点图

Fig. 5 Scatter diagram of volume-point cloud density of branches

同时,竹竿部分的点云数量跟竹竿的表面积关系密切,筛选并统计出竹竿部分的点云数量,研究点云的数量与表面积之间的关系。由竹竿表面积和体积公式可以得到竹竿表面积 S 、体积 V 、半径 R 存在以下关系: $V=RS/2$ 。点云数量 P 、体积 V 、切面半径 R 三者之间的关系为 $V=RP/15.262$ 。根据三者关系求出各样本竹竿的单位面积点云的数量,如表 2 所示,其平均值为 7.631 cm^{-2} 。

表 4 5 号样本枝条蓄积量的计算误差

Table 4 Calculation error of branch volume of 5th sample

Number	Number of point clouds	Point cloud density /cm ⁻³	Volume /cm ³	Calculated volume /cm ³	Absolute error /cm ³	Relative error /%
Bamboo crown branch 5	468193	0.0173405	597.243	648.890	51.647	8.64

表 5 5 号样本竹竿蓄积量的计算误差

Table 5 Calculation error of bamboo pole volume of 5th sample

Number	Number of point clouds	Point cloud density /cm ⁻³	Radius /cm	Volume /cm ³	Calculated volume /cm ³	Absolute error /cm ³	Relative error /%
Bamboo pole 5	13573	0.000503704	1.87	1740.920	1663.052	77.868	4.47

由表 4 和表 5 可知,枝条蓄积量和竹竿蓄积量的计算精度分别达到了 91.36% 与 95.53%,即利用

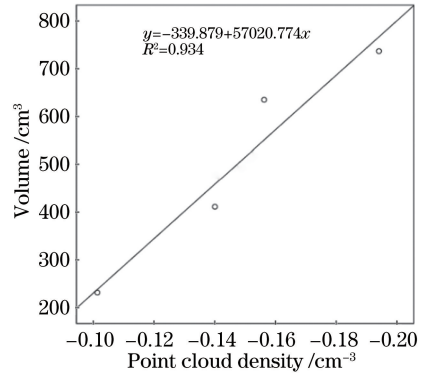


图 6 枝条部分体积-点云密度拟合关系图

Fig. 6 Fitting relationship between volume and point cloud density of branches

点云密度即单位体积内点云的数量,则竹竿体积与相关参数的关系式为

$$V_g = \frac{R\rho_1 v}{15.262}, \quad (10)$$

式中: V_g 为竹竿体积; R 为切片半径; v 为统计所选范围内的竹竿体积; ρ_1 为竹竿的点云密度。

毛竹冠层的蓄积量是由内部竹竿蓄积量和枝条蓄积量构成,则总的蓄积量与其点云密度的关系为 $V=R\rho_1 v/15.262+57020.774\rho_2-339.879$ 。

5.5 毛竹冠层蓄积量的模型检验

选取检验样本按 5.3 和 5.4 节的方法,计算检验样本冠层的枝条与竹竿蓄积量。其中 5 号样本的计算值与实测值如表 4、表 5 所示。

所提算法可实现复杂的毛竹冠层蓄积量较高精度的估算。

根据本研究的实验原理,此次实验的主要误差来源于点云数量的统计,主要有以下两种:

1) 扫描过程中毛竹自身枝条的遮挡,导致竹竿表面部分点云缺失,产生点云空洞。

2) 点云数据人工去噪环节,去噪不够精细,部分样本仍有大量噪点存在。竹竿与枝条点云分离时,删除了过多或过少的点云。

6 结 论

本文通过在室内使用三维激光扫描技术对毛竹冠层进行扫描,获取了毛竹冠层的点云数据,将毛竹冠层分为枝条和竹竿两部分,分别进行蓄积量计算。在数据分析和处理中分别对两部分的点云密度和蓄积量的关系进行探讨。得出以下结论:三维激光扫描技术以海量离散点云的方式来快速、精准地记录目标物体的三维信息,优于传统的调查方式且对毛竹破坏性小。实测枝条的长度与体积,以实测值进行一元线性回归,得到了枝条的体积与长度的分段函数式;通过点云分离和切片,量取毛竹冠层内竹竿的高度和切面半径,计算得到竹竿部分的体积。分别分析枝条蓄积量、冠层内竹竿蓄积量与点云密度之间的关系,综合得到毛竹冠层与其点云密度的关系式。目前,试验还处在实验室阶段,得到的数学模型还不够成熟,但提供了一种思路和方法,有待于下一步野外试验,进一步探讨研究并得到准确且普适性的数学模型。

参 考 文 献

- [1] Tang Y. Volume measurement of live standing tree based on 3D laser scanning technology [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
唐艺. 基于三维激光扫描技术的活立木材积测量方法 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [2] Zhou G M, Jiang P K. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachy pubescens* forest [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(6): 20-24.
周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布 [J]. *林业科学*, 2004, 40(6): 20-24.
- [3] Lim C. Estimation of urban tree crown volume based on object-oriented approach and LIDAR data [D]. Enschede: International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 2007.
- [4] Xu W H, Feng Z K, Su Z F, et al. An automatic extraction algorithm for individual tree crown projection area and volume based on 3D point cloud

data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(2): 465-471.

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] Li B R. Research on the application of three-dimension terrestrial laser scanning in ancient architecture mapping [D]. Xi'an: Changan University, 2012: 2-5.
李宝瑞. 地面三维激光扫描技术在古建筑测绘中的应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012: 2-5.
- [6] Wu C F, Lu H M, Guo X R, et al. Introduction of the method of measuring the standing tree volume by using the three-dimensional laser scanning system [J]. *Forest Engineering*, 2009, 25(3): 71-72, 76.
吴春峰, 陆怀民, 郭秀荣, 等. 利用三维激光扫描系统测量立木材积的方法 [J]. *森林工程*, 2009, 25(3): 71-72, 76.
- [7] Xu T. Forest biomass estimation based on LiDAR and OLI multispectral data and its application [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
徐婷. 基于 LiDAR 和 OLI 多光谱数据的森林生物量估算方法及应用 [D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- [8] Luo S Z, Wang C, Xi X H, et al. Fusion of airborne LiDAR data and hyperspectral imagery for aboveground and belowground forest biomass estimation [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 378-387.
- [9] Laurin G V, Chen Q, Lindsell J A, et al. Above ground biomass estimation in an African tropical forest with lidar and hyperspectral data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 89: 49-58.
- [10] Hudak A T, Lefsky M A, Cohen W B, et al. Integration of lidar and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2/3): 397-416.
- [11] Dong L X, Wu B F, Guo Z H. Estimation of forest canopy height by integrating multisensor data [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7471: 74710H.
- [12] Huang K B, Pang Y, Shu Q T, et al. Aboveground forest biomass estimation using ICESat GLAS in Yunnan, China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(1): 165-179.
黄克标, 庞勇, 舒清态, 等. 基于 ICESat GLAS 的云南省森林地上生物量反演 [J]. *遥感学报*, 2013, 17(1): 165-179.
- [13] Zhao X. Spatial response of canopy parameters to carbon storage of moso bamboo forest [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2014.

- 赵晓. 毛竹林碳储量对冠层参数的响应分析与评价[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [14] Huang H Y, Chen C C, Zou J, 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.
- [15] Shi Y T, Cheng X J, Jia D F. Applications of 3D laser scanning based tree model to forestry [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(3): 40-42, 52.
石银涛, 程效军, 贾东峰. 三维激光扫描树木模型在林业中的应用[J]. *测绘通报*, 2012(3): 40-42, 52.
- [16] Cai Y, Xu W B, Liang D, et al. Distinguishing *Phyllostachys edulis* age based on laser scanning intensity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0110003.
蔡越, 徐文兵, 梁丹, 等. 基于激光回波强度判别毛竹年龄[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0110003.
- [17] Liu C, Chen H Y, Wu H B. Data processing and feature extraction of laser 3D remote sensing [M]. Beijing: Science Press, 2009.
刘春, 陈华云, 吴杭彬. 激光三维遥感的数据处理与特征提取[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] Xu J J, Yu M H, Zheng Y B. Overview of the application of ground 3D laser scanner [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008(12): 31-34.
徐进军, 余明辉, 郑炎兵. 地面三维激光扫描仪应用综述[J]. *工程勘察*, 2008(12): 31-34.
- [19] Wang J. 3D mapping technology of underground structures[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
王静. 地下建筑物三维测绘技术的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- [20] Liu C, Zhang Y L, Wu H B. Accuracy evaluation of 3D laser range scanner based on field calibration[J]. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(11): 56-60, 66.
刘春, 张蕴灵, 吴杭彬. 地面三维激光扫描仪的检校与精度评估[J]. *工程勘察*, 2009, 37(11): 56-60, 66.
- [21] Xia G F, Hu C M, Cao B Z, et al. Study on the influence of laser incident angle on the reflection intensity of the point cloud[J]. *Laser Journal*, 2016, 37(4): 11-13.
夏国芳, 胡春梅, 曹毕铮, 等. 激光入射角度对点云反射强度的影响研究[J]. *激光杂志*, 2016, 37(4): 11-13.
- [22] Chen S C, Dai H Y, Wang C, et al. Method for filtering dense noise from laser scanning data [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(6): 062801.
陈世超, 戴华阳, 王成, 等. 激光扫描数据的密集噪声剔除方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(6): 062801.
- [23] Han X F, Jin J S, Wang M J, et al. A review of algorithms for filtering the 3D point cloud[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2017, 57: 103-112.
- [24] Mattei E, Castrodad A. Point cloud denoising via moving RPCA [J]. *Computer Graphics Forum*, 2017, 36(8): 123-137.
- [25] Xiao C X, Miao Y W, Liu S, et al. A dynamic balanced flow for filtering point-sampled geometry [J]. *The Visual Computer*, 2006, 22(3): 210-219.
- [26] Fleishman S, Drori I, Cohen-Or D. Bilateral mesh denoising[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 950-953.