

基于点云数据的毛竹笋蓄积量-生物量模型研究

郑阳龙¹, 徐文兵^{1,2,3*}

¹浙江农林大学省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300;

²同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

³浙江同创空间技术有限公司, 浙江 杭州 311300

摘要 毛竹笋生长与毛竹产量及固碳能力有密切的关系, 研究毛竹笋蓄积量与生物量之间的关系, 探讨毛竹笋生物量变化规律, 有利于了解毛竹笋的生长特性。利用地面 LiDAR 技术获取毛竹笋三维点云数据, 进而构建毛竹笋三维模型, 并计算其体积, 尝试建立毛竹笋蓄积量转换为生物量的数学模型。试验结果表明: 对于利用毛竹笋三维模型计算的体积与利用 Simalian 公式计算的体积, 两者相关性高; 通过样本检验发现, 毛竹笋蓄积量与生物量的转换模型精度达到 84.24%。以上研究表明, 地面 LiDAR 可以为毛竹笋生物量的快速测算提供体积参数。

关键词 遥感; 毛竹笋; 地面三维激光扫描; 蓄积量; 生物量

中图分类号 P232

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.212803

Volume-Biomass Conversation Model of Moso Bamboo Shoots Based on Point Cloud Data

Zheng Yanglong¹, Xu Wenbing^{1,2,3*}

¹State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Hangzhou, Zhejiang, 311300, China;

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

³Zhejiang Tongchuang Space Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311300, China

Abstract The growth of moso bamboo shoots is closely related to the yield and carbon sequestration ability of moso bamboo. The studies on the relationship between volume and biomass as well as the changing rule are beneficial to our understanding of the growth characteristics of moso bamboo shoots. Three-dimensional point cloud data of moso bamboo shoots are first obtained by the ground LiDAR technology. Then, the three-dimensional model of moso bamboo shoot is constructed and its volume is calculated. A mathematical model is finally established to convert the volume of moso bamboo shoot into its biomass. The test results show that there exists a high correlation between the volume calculated from the three-dimensional model and that computed by the Simalian's formula. Through the sample test, the accuracy of the conversion model between volume and biomass of moso bamboo shoot reaches 84.24%. The above studies show that the ground LiDAR can provide volume parameters for the rapid biomass measurement of moso bamboo shoot.

Key words remote sensing; moso bamboo shoots; three dimensional terrestrial laser scanning; volume; biomass

OCIS codes 280.3640; 140.3460; 100.6890

1 引言

随着激光雷达、遥感和全球卫星定位系统的快速发展, 新型测绘技术在“精准林业”中的应用受到越来越多的关注^[1]。目前, 国内外学者利用地面三

维激光扫描(TLS, terrestrial laser scanning)技术, 在林业、文物保护和矿区等一系列应用场景中展开了广泛的研究。传统林业调查方法存在作业周期长、工作效率低及数据单一等问题。随着信息技术的快速发展, 新型技术设备在现代林业生产实践中

收稿日期: 2020-02-28; 修回日期: 2020-03-05; 录用日期: 2020-03-06

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)

* E-mail: xuwb97@163.com

得到了广泛应用,其中地面三维激光扫描仪可以快速获取目标物体表面的三维坐标和反射率信息^[2-5],通过修补三维点云的漏洞^[6]并建模,可获取高精度三维模型。

20世纪60年代末,欧美发达国家开始研制三维激光扫描仪,快速获取海量点云数据的技术得到高速发展。地面三维激光扫描技术在林业应用中多用于提取树干骨架^[7-8]、估测森林生物量^[9]、预测林分蓄积量^[10]和提取测树因子^[11]等。赵芳等^[12]利用地面三维激光扫描技术获取胸径、树高和冠幅等测树因子,运用回归法建立立木材积模型以及材积表。蔡越^[13]利用地面三维激光扫描仪,结合毛竹年龄,建立了单株毛竹地上生物量估测的数学模型。Popescu等^[14]利用机载激光雷达获取林木冠层的结构和属性信息,结合多光谱遥感影像,建立了样地生物量估测的数学模型。Weiss等^[2,15]利用三维激光技术获取树木点云,并提取胸径和树高,通过求积公式或三维建模得到材积。徐诗宇等^[16]利用三维激光点云,实现了城市绿化树种材积及树干碳储量。虽然地面三维激光扫描技术在林业中得到了应用,但是关于其在毛竹方面的研究鲜有报道。

毛竹(moso bamboo)是我国南方重要的竹种,具有生态、环保和经济等重要价值。毛竹属于禾本科,生长周期较短,从出笋到成竹需要50~60天,目前学者利用传统测量方法观测毛竹笋高度随时间变化的生长状况,揭示毛竹生长规律^[17-18]。这段时间是毛竹固碳的爆发期,其间毛竹笋的生长状况直接关系到成竹质量^[19],研究毛竹笋蓄积量与生物量关系有利于正确估算毛竹在生长阶段的生物量和碳储量变化情况。本文利用地面三维激光扫描技术获取毛竹笋三维点云数据,研究毛竹笋三维模型体积与通过求积公式计算得到的体积之间的相互关系并分析了它们各自的精度,分析毛竹笋鲜生物量与干生物量之间的变化关系,探讨林木蓄积量与生物量转

换模型^[20-21]在毛竹笋中的应用,验证林木蓄积量-生物量转换模型的可移植性,为研究毛竹笋生物量在生长周期中的变化规律提供转换参数。

2 研究区概况、仪器设备与研究方法

2.1 试验区域与仪器设备

试验区域位于浙江省杭州市临安区小铜山实验基地(119°40'E,30°15'N)。该区域属亚热带季风气候区,光照充足,年日照数为1847.3 h,年平均气温为16.4℃,全年无霜期为237天,年降水量为1500.0~1628.6 mm;海拔60~120 m,属低山丘陵地形,森林覆盖率为76.5%,主要树种为毛竹,土壤为微酸性红土壤,林下少灌木。

试验采用Leica ScanStation C05地面三维激光扫描仪,采用紧凑型脉冲式绿色激光,设置参数为波长532 nm、视场角范围为360°×270°、扫描速率50000 dot/s^[22],100 m内扫描标准偏差小于4 mm。仪器具有全视场角、图形化触摸屏显示和电池热插拔等特点,并含有强大的专业点云数据处理软件Cyclone软件,可以对点云数据进行多功能处理。

2.2 技术路线

实地选取不同生长阶段共135棵毛竹笋作为样本(部分样地如图1所示),利用地面三维激光扫描仪采集毛竹笋三维点云数据,建模并计算体积。间隔8天,每次砍伐4~7棵毛竹笋,共砍伐35棵样本带回实验室,利用游标卡尺和卷尺分别测量直径和高度,根据求积式计算毛竹笋体积;称量样本鲜重后晾干,再在恒温85℃的烘箱中烘干至恒重,称量干重,计算样品的含水率,将整株毛竹笋的鲜质量换算成干质量(即生物量)。在数据处理中,分析两种方法所得的毛竹笋体积的相关性;根据点云计算的毛竹笋蓄积量与实测毛竹笋的生物量,借鉴林木蓄积量与生物量转换模型,计算毛竹笋蓄积量和生物量的转换数学模型,并评价精度。



图1 扫描区域局部图。(a)区域1;(b)区域2

Fig. 1 Partial scanning areas. (a) Area 1; (b) area 2

2.3 点云数据处理

三维激光扫描系统主要由扫描装置、内置计算机以及电源供应系统组成,采用非接触式激光测量,利用激光测距原理,记录被测物体表面密集的点的三维坐标(X, Y, Z)和反射率等信息,点云三维建模后可获得目标物体的长度、面积和体积等几何信息。毛竹笋抽枝展叶前的结构相对简单,易于获取其完整的三维激光点云数据,没有枝叶的干扰,便于建立其真实的三维模型。将样本三维点云数据导入 Cyclone 软件,利用 Cyclone 软件对样本点云数据进行预处理,分割并导出毛竹笋点云数据,如图 2 所示。

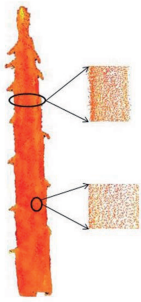


图 2 毛竹笋的点云数据

Fig. 2 Point cloud of moso bamboo shoot

利用三维点云数据计算体积的常用方法大致有四类:模型重建法^[23]、凸包算法^[24]、投影法^[25]和切片法^[26]。其中,模型重建法先利用点云数据建立不规则三角网,再通过构建物理模型计算体积,该算法受点云密度和不规则三角网格数量的影响,需要对产生的孔洞进行修补。凸包算法先用凸包模型模拟不规则物体,再把模型切片并累加计算体积,该算法适用于凸体模型,非凸体模型的体积计算精度较低。投影法利用三角形剖分点云数据进行投影,构建关于投影点与对应点的五面体,通过累加五面体来计算体积,但该算法容易产生孔洞。切片法沿某一坐标轴线进行切片,计算切片上下表面的面积,之后沿平行于该坐标轴的方向重复切片,累加计算总体积,该算法受切片厚度的影响,体积计算精度与效率成反比。

谢安全等^[27]采用 Geomagic、Cyclone、HD_3LS_SCENE 和 CASS 软件分别计算土堆体积,经对比分析,发现 Geomagic 软件安装简单,运行速度快,计算精度高,优势最为明显。虽然 Geomagic 软件的操作较为繁琐,但是可以利用点云数据建立完整的高精度的毛竹笋模型,便于研究人员实时判断模型的正确性,有利于获取毛竹笋的高精度几何参数。

本试验将单株毛竹笋的点云数据导入 Geomagic Studio 2012 软件中,由于点云数据庞杂

且存在噪声点,采用减少噪声、统一采样和删除体外孤点等功能;选择“封装”模块生成曲面模型(由许多细小的三角面片组成);为得到符合毛竹笋曲面特征的模型,选择“松弛”模块,通过目视解译,调节平滑级别为 4、强度为 1 和曲率优先为 1;封装后生成的曲面模型存在破损漏洞,选择多边形选项中基于曲率的“填充单个孔”功能,逐一修补漏洞,形成完整的毛竹笋三维模型,如图 3 所示;构建毛竹笋三维模型的闭合体后,选择分析选项中的“体积计算”功能计算体积。

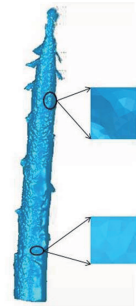


图 3 毛竹笋的三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of moso bamboo shoot

3 点云模型测算毛竹笋蓄积量的精度分析

蓄积量(V)是指一定面积内森林活立木的材积总量,是衡量森林生产能力以及生态环境优劣的重要指标^[12],如何科学、高效以及准确地获得蓄积量一直是研究热点。树干是非规则几何体,但绝大部分接近抛物体,世界各国均采用中央断面或平均断面区分求积式计算伐倒木体积^[28]。为提高材积测算精度,根据树干形状变化的特点,将树干分成若干等长的区分段,使各区分段树干接近正几何体,分别计算各分段材积,再把各分段材积相加即为全树干材积,其中区分段一般以不少于 5 个为宜。毛竹笋是非规则几何体,可近似看作圆锥体,借鉴林木蓄积量计算方法,本文采用平均断面区分求积式:

$$V = \left[\frac{1}{2}(g_0 + g_n) + \sum_{i=1}^{n-1} g_i \right] l + \frac{1}{3} g_n l', \quad (1)$$

式中: V 为蓄积量; g_0 为竹笋底断面面积; g_n 为梢头笋底断面面积; $g_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ 为各区分段之间的断面面积; l 为区分段长度; l' 为梢头笋长度; i 为区分段的编号; n 为区分段个数,本文中 $n=7$ 。

为了毛竹笋体积测量的结果更准确,将毛竹笋样本伐倒后,用卷尺测量毛竹笋高度,之后将毛竹笋均分成 7 段,量取各分段长度及其上下直径。由于毛竹笋水平方向呈椭圆状,利用游标卡尺量取其

长轴与短轴,将长轴和短轴相加除以2得到直径,计算断面积,采用平均断面区分求积式(Simalian's formula)解算其蓄积量并作为参考数据。

毛竹笋生长时,笋壳鼓起容易造成形变,从而影响 TLS 准确获取毛竹笋体积。为了评估笋壳变化对 TLS 测定的体积的影响,利用林木蓄积计算的体积评价 TLS 的精度,采用标准误差 E_{RMSE} 和平均相对误差 K 来评价两种方法之间的误差。

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i'=1}^{35} (y_{i'} - \hat{y}_{i'})^2}{35}}, \quad (2)$$

$$K = \frac{|y_{i'} - \hat{y}_{i'}|}{y_{i'}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $y_{i'}$ ($i' = 1, 2, \dots, 35$) 是利用平均区分断面求积式计算的体积; $\hat{y}_{i'}$ ($i' = 1, 2, \dots, 35$) 是三维模型计算的体积; i' 为毛竹笋样本的编号。

利用点云数据和常规测量方法分别计算毛竹笋样本的体积,并进行对比分析,得到回归方程 $y = 1.0431x - 0.0005$, 决定系数 $R^2 = 0.9919$, 回归系数为 1.0431, 如图 4 所示, 可见两组数据具有很强的相关性。同时, 两种方法计算的体积的标准误差 E_{RMSE} 为 0.001226 m^3 , 平均相对误差 K 为 4.32%, 说明 TLS 计算的体积精度高, 这证明了三维激光点云求积法的可靠性。

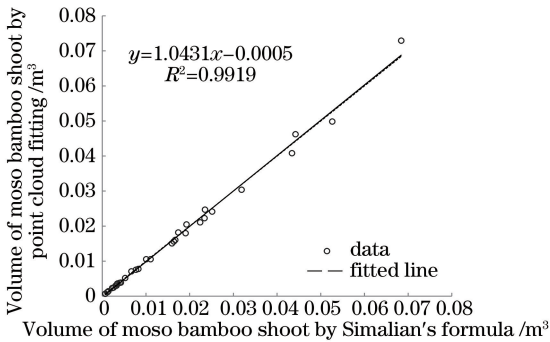


图 4 两种方法解算的毛竹笋蓄积量的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of two calculative methods for volume of moso bamboo shoot

4 毛竹笋生长过程中含水率的变化

毛竹笋出土后,会在较短时间(约 40 d)内完成横向和纵向生长,随后主要是内部物质和材质的变化,其粗度、高度和碳储量变化不大^[18]。一年生毛竹的固碳量在最初生长的 6 个月内完成了全年固碳量的 88.8% 以上,一年生以上的毛竹新增固碳量不足 10%^[29]。

在试验中,每间隔 8 天砍伐 4~7 棵毛竹笋样本,测其鲜重和干重。如图 5 所示,当毛竹笋鲜重 $\leq 5 \text{ kg}$ 时,含水率(质量分数)在 90% 左右,且呈上升趋势;当鲜重增加至 25~30 kg 时,含水率逐步下降至 82% 左右。在毛竹笋生长期间,其生物量的绝对量和相对量都在增加,鲜重达到 5 kg 后,生物量在鲜重中的占比增大并快速累积。

通过称量整株毛竹笋并取样烘干,得到毛竹笋鲜重和干重(生物量),其关系可拟合为数学模型,即

$$W = 0.1044W_f^{1.1055}, \quad (4)$$

式中: W 为干重; W_f 为鲜重。(4) 式的决定系数 $R^2 = 0.9814$, 可较好地解释毛竹笋鲜重与干重的变化关系。由于毛竹笋样本鲜重最大值为 25 kg, 因此 $0 \leq W_f \leq 25 \text{ kg}$ 。

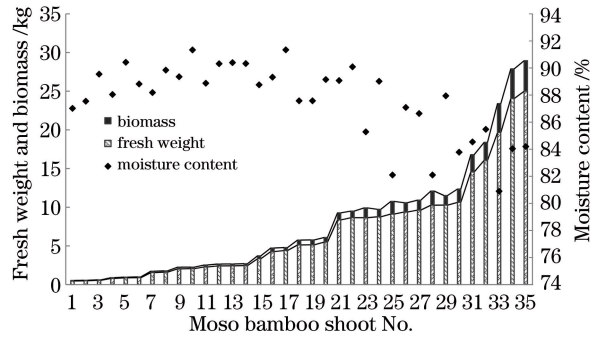


图 5 鲜重和生物量的变化

Fig. 5 Changes of fresh weight and biomass

5 毛竹笋蓄积量-生物量转换模型

5.1 单株毛竹笋的蓄积量与生物量

根据毛竹笋的点云数据构建三维模型,并计算其蓄积量。将不同时期伐倒的毛竹笋样本进行称量、取样和烘干,得到单株毛竹笋生物量,其中 35 棵毛竹笋样本的蓄积量和生物量如表 1 所示。

5.2 毛竹笋蓄积量-生物量转换模型的建立

参考测定乔木生长量的相对生长法^[30],选择一种蓄积量与生物量满足植物生长机理的关系模型。选择 30 棵毛竹笋的生物量值 W 与其点云数据测算的毛竹笋蓄积量 V , 结合王仲锋^[31] 和方精云等^[32] 给出的蓄积量与生物量转换关系模型,利用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 回归分析并拟合参数,得到毛竹笋蓄积量与生物量转换模型:

$$W_1 = aV_1, \quad (5)$$

$$W_2 = a + bV_2, \quad (6)$$

$$W_3 = cV_3^d, \quad (7)$$

表1 毛竹笋样本的蓄积量和生物量

Table 1 Volume and biomass of moso bamboo shoot sample

No.	Volume /m ³	Biomass /kg	No.	Volume / m ³	Biomass /kg	No.	Volume / m ³	Biomass /kg
1	0.007785	0.636	13	0.003627	0.237	25	0.018204	0.962
2	0.020480	1.723	14	0.021090	1.837	26	0.040821	3.753
3	0.003893	0.233	15	0.003555	0.254	27	0.015629	0.857
4	0.003797	0.234	16	0.001173	0.095	28	0.024701	1.239
5	0.024154	1.287	17	0.046217	2.250	29	0.017993	1.632
6	0.003001	0.217	18	0.010551	0.638	30	0.002474	0.183
7	0.000693	0.061	19	0.010565	0.596	31	0.030389	2.333
8	0.000724	0.058	20	0.001154	0.083	32	0.007548	0.456
9	0.000706	0.061	21	0.022276	1.211	33	0.007102	0.381
10	0.001409	0.100	22	0.015084	1.272	34	0.016068	0.913
11	0.002324	0.163	23	0.049856	3.838	35	0.072932	3.950
12	0.005206	0.375	24	0.003010	0.179			

式中: W_1 、 W_2 、 W_3 为生物量; a 、 b 、 c 、 d 为模型参数; V_1 、 V_2 、 V_3 为蓄积量。利用决定系数检验模型的拟合效果:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^p (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^p (y_k - \bar{y})^2}, \quad (8)$$

式中: y_k ($k = 1, 2, \dots, p$) 为样本实测值; \hat{y}_k ($k = 1, 2, \dots, p$) 为模型计算值; \bar{y} 为实测值的平均值; k 为

样本编号; p 为样本数, 本文 $p = 30$ 。

经计算, 得到三个转换模型的参数值和决定系数 (R^2), 如表 2 所示。因此, 以蓄积量 V 为变量的三个模型分别为: $W_1 = 69.104V_1$, $W_2 = 69.438V_2 - 0.0091$ 和 $W_3 = 55.058V_3^{0.9549}$ 。决定系数 R^2 均在 0.90 以上, 说明拟合结果优良, 其中, 转换模型 $W_3 = 55.058V_3^{0.9549}$ 的 $R^2 = 0.98$ 为最大, 拟合效果最好。

表2 蓄积量-生物量转换模型的参数和相关系数

Table 2 Parameters of volume-biomass conversion model and corresponding coefficients

Model formula	a	b	c	d	R^2
$W_1 = aV_1$	69.104				0.90
$W_2 = a + bV_2$	-0.0091	69.438			0.90
$W_3 = cV_3^d$			55.058	0.9549	0.98

5.3 毛竹笋蓄积量-生物量转换模型的精度检验

选取 5 棵毛竹笋作为检验样本, 检验三个毛竹笋蓄积量-生物量转换模型的精度, 毛竹笋生物量的计算值与实测值如表 3 所示。采用绝对误差 (S) 和相对误差 (K) 来表征转换模型的绝对误差和精确度。绝对误差计算公式为

$$S = |y_j - \hat{y}_j|, \quad (9)$$

式中: S 为绝对误差; y_j ($j = 1, 2, \dots, 5$) 为检验样本实测值; \hat{y}_j ($j = 1, 2, \dots, 5$) 为计算值; j 为样本编号。

由表 3 可知, 三个转换模型的计算精度分别为 78.88%、78.92% 和 84.24%, 其中 $W_3 = 55.058V_3^{0.9549}$ 的精度最高 (84.24%)。因此, 利用 $W_3 = 55.058V_3^{0.9549}$ 模型, 基于毛竹笋蓄积量可实现对毛竹笋生物量较高精度的估算。

本次试验的误差主要来源于点云数据的获取及三维建模构建。

1) 获取毛竹笋点云数据时, 毛竹笋之间相互遮挡且测站分布不均匀, 因此毛竹笋表面点云分布不均匀, 产生点云空洞。

2) 多站点扫描点云数据时, 由于地表泥土松软, 转动标靶时标靶容易下陷, 因此点云数据无法完美拼接, 造成误差。

3) 在构建三维模型过程中, 进行较大面积孔洞的修补时, 生成的形状与实际外形不相符。

6 讨 论

利用 Geomagic 软件处理点云数据, 可得到符合实物的三维模型, 该模型便于学者正确计算体积。在毛竹笋的生长过程中, 笋壳鼓起容易造成形变, 影响 TLS 测算毛竹笋蓄积量的精度。对比分析 TLS 测算的体积与求积式计算的体积, TLS 测算的体积的标准误差和相对误差较小, 表明 TLS 测算的体积可以用于毛竹笋模型的建模。

表3 毛竹笋生物量的计算值与实测值

Table 3 Calculated and measured values of biomass of moso bamboo shoot

Model	No.	Volume /m ³	Biomass /kg	Calculated value /kg	Absolute error /kg	Relative error /%
$W_1 = 69.104V_1$	1	0.007102	0.381	0.491	0.110	28.74
	2	0.007548	0.456	0.522	0.066	14.46
	3	0.016068	0.913	1.110	0.198	21.66
	4	0.030389	2.333	2.100	0.233	9.98
	5	0.072932	3.950	5.040	1.090	27.60
$W_2 = 69.438V_2 - 0.0091$	1	0.007102	0.381	0.484	0.103	26.98
	2	0.007548	0.456	0.515	0.059	13.02
	3	0.016068	0.913	1.107	0.194	21.25
	4	0.030389	2.333	2.101	0.232	9.93
	5	0.072932	3.950	5.055	1.105	27.99
$W_3 = 55.058V_3^{0.9549}$	1	0.007102	0.381	0.489	0.108	28.22
	2	0.007548	0.456	0.518	0.062	13.68
	3	0.016068	0.913	1.066	0.153	16.78
	4	0.030389	2.333	1.959	0.374	16.03
	5	0.072932	3.950	4.519	0.569	14.41

分析不同生长阶段的毛竹笋鲜重和干重,其生物量占比在不同生长阶段呈现相对高-低-高的情况。在生长初期和末期阶段,生物量占比相对较高,含水率相对较低;在生长中期阶段,生物量占比相对较低,含水率相对较高,与毛竹笋不同生长阶段的慢-快-慢的生长速率情况相符^[18]。

不同区域和物种的林木蓄积量-生物量转换模型的差别较大。本文得到的模型 $W_3 = 55.058V_3^{0.9549}$ 的精度最高,这与王仲锋等^[21]的模型研究结果一致。本文建立了毛竹笋蓄积量-生物量转换模型,为进一步估算区域内的毛竹笋生物量和生产力提供了技术支持。但是,针对其他区域的毛竹笋,还需要均衡采样,系统地建立生物量与不同变量之间的完整模型,以实现两者之间的精确转换。因此,下一步研究工作是扩大研究区域,深入研究毛竹笋生物量和不同变量之间的转换精度及误差,进行量化分析,探讨模型适用的范围及其计算精度,提高建模环节的精确度。

7 结 论

利用地面 LiDAR 技术监测了毛竹笋的生长过程与生物量动态变化规律,探索了估测毛竹林生物量的新途径。利用地面三维激光扫描仪获取了毛竹笋点云数据,通过 Cyclone 软件对三维点云数据进行了预处理,并输出单株毛竹笋的点云数据。利用 Geomagic Studio 2012 软件处理单株毛竹笋的点云数据,建立了毛竹笋的三维模型,并计算了体积。利

用游标卡尺和卷尺分别测量了毛竹笋的分段直径和长度,根据平均断面区分求积式计算了体积。对比分析两种方法计算的体积,发现 TLS 测算毛竹笋蓄积量的精度较高,证明了地面三维扫描技术获取毛竹笋体积的可靠性。称量毛竹笋的鲜重并取样烘干,得到毛竹笋鲜重与干重的数学模型 $W = 0.1044W_i^{1.1055}$ 。计算三个蓄积量-生物量转换模型的转换精度,发现转换模型 $W_3 = 55.058V_3^{0.9549}$ 的精度最高,为 84.24%。所提方法为研究毛竹笋生物量的变化规律提供了新的思路,促进了林木生物量模型方面的研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Weiss J. Application and statistical analysis of terrestrial laser scanning and forest growth simulations to determine selected characteristics of Douglas-Fir stands [J]. Folia Forestalia Polonica, 2009, 51(2): 123-127.
- [3] 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.
- [4] Li Y, Tong G F, Yang J C, et al. 3D point cloud scene data acquisition and its key technologies for scene understanding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 040002.
李勇, 佟国峰, 杨景超, 等. 三维点云场景数据获取及其场景理解关键技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 040002.
- [5] Chen X Y, Yun T, Xue L F, et al. Classification of tree species based on LiDAR point cloud data [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 122801.
陈向宇, 云挺, 薛联凤, 等. 基于激光雷达点云数据的树种分类[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 122801.
- [6] Zeng L L, Gai S Y, Da F P, et al. Hole filling algorithm of three-dimensional point cloud based on structure from motion[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0610002.
曾露露, 盖绍彦, 达飞鹏, 等. 基于从运动中恢复结构的三维点云孔洞修补算法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0610002.
- [7] 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.
- [8] Li R H, Chen Y N, Gan X Z, et al. Tree-skeleton generation method by thinning voxels of point cloud [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 192802.
栗荣豪, 陈益楠, 甘小正, 等. 点云体素细化生成树木骨架的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 192802.
- [9] Cao L, She G H, Dai J S, et al. Status and prospects of the LiDAR-based forest biomass estimation [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2013, 37(3): 163-169.
曹林, 余光辉, 代劲松, 等. 激光雷达技术估测森林生物量的研究现状及展望[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 163-169.
- [10] Feng Z K, Yang B G, Luo X, et al. Predicting stand volume with LIDAR technology [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(S2): 45-51.
冯仲科, 杨伯钢, 罗旭, 等. 应用 LIDAR 技术预测林分蓄积量[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(S2): 45-51.
- [11] Xiao Y, Hu S X, Xiao S, et al. A fast statistical method of tree information from 3D laser point clouds [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510007.
肖杨, 胡少兴, 肖深, 等. 从三维激光点云中快速统计树木信息的方法[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510007.
- [12] Zhao F, Wei X H, Gao X, et al. Research on establish single trees volume model by 3D laser scanning system [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 2013, 44(2): 231-238.
赵芳, 韦雪花, 高祥, 等. 三维激光扫描系统在建立单株立木材积模型中的研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2013, 44(2): 231-238.
- [13] Cai Y. Study on the method of estimating aboveground biomass of phyllostachys eudlis based on terrestrial LiDAR [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2018: 34-40.
蔡越. 基于地面 LiDAR 的单株毛竹地上生物量测算方法研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018: 34-40.
- [14] Popescu S C, Wynne R H, Nelson R. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2003, 29(5): 564-577.
- [15] Wezyk P, Koziol K, Glista M, et al. Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forest inventory first results from the polish forests [J]. ISPRS Workshop on Laser Scanning and Silvilaser, 2007, 36(3): 424-429.
- [16] Xu S Y, Shi Y J, Feng S F. Nondestructive and accurate measurement of volume and stem carbon storage for urban greening tree species based on terrestrial laser scanning point cloud [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(6): 1062-1069.
徐诗宇, 施拥军, 冯晟斐. 基于三维激光点云的城市绿化树种材积及树干碳储量无损精确测算[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(6): 1062-1069.
- [17] Yen T. Culm height development, biomass accumulation and carbon storage in an initial growth stage for a fast-growing moso bamboo (Phyllostachy pubescens)[J]. Botanical Studies, 2016, 57(1): 10.
- [18] Shi Y J, Liu E B, Zhou G M, et al. Bamboo shoot growth model based on the stochastic process and its

- application[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(9): 89-93.
- 施拥军, 刘恩斌, 周国模, 等. 基于随机过程的毛竹笋期生长模型构建及应用[J]. *林业科学*, 2013, 49(9): 89-93.
- [19] Jiang Z H. *Bamboo and rattan in the world* [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2002: 153.
- 江泽慧. 世界竹藤[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002: 153.
- [20] Wang X Y, Xu H L, Pan C D, et al. Study on the model of relation between volume and biomass of single populus euphratica[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(5): 175-179.
- 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 胡杨单株蓄积量与生物量关系模型研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(5): 175-179.
- [21] Wang Z F, Feng Z K. On CVD model transforming forestry volume into biomass[J]. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 2006, 7(3): 265-268.
- 王仲锋, 冯仲科. 森林蓄积量与生物量转换的 CVD 模型研究[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2006, 7(3): 265-268.
- [22] Liu C, Zhang Y L, Wu H B. Accuracy evaluation of 3D laser range scanner based on field calibration[J]. *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.
- [23] Zhang X Q, Zhu G, Hou M L, et al. Volume calculation of surface irregular cultural relic based on tetrahedron[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011(10): 50-52.
- 张小青, 朱光, 侯妙乐, 等. 基于四面体的不规则表面文物体积计算[J]. *测绘通报*, 2011(10): 50-52.
- [24] Xu Z, Xu H L. Fast algorithm of computing volume based on convex hull[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(21): 177-179.
- 徐志, 许宏丽. 一种基于凸包近似的快速体积计算方法[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(21): 177-179.
- [25] Wang T Y, Luo Z Q, Huang J J, et al. Application of triangle projection volume algorithm in goaf[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(2): 127-131.
- 王婷玉, 罗周全, 黄俊杰, 等. 采空区三角形投影体积算法及其应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(2): 127-131.
- [26] Zhang J X, Cheng X J, Cheng X L. Application of three-dimensional laser scanning technology in measurement of ship displacement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1204003.
- 张吉星, 程效军, 程小龙. 三维激光扫描技术在船舶排水量计量中的应用[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1204003.
- [27] Xie H Q, Chen Y H, Cao S, et al. Comparison test of multiple method for volume based on point cloud data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(11): 99-102.
- 谢宏全, 陈艳红, 曹朔, 等. 利用激光点云数据的多方法求取体积的对比试验[J]. *测绘通报*, 2018(11): 99-102.
- [28] Zhang P L. The relation between accuracy of the appropriate formulas and the stem form of felled trees [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1988, 24(1): 84-88.
- 章平澜. 树干材积误差的性质及其变化范围与近似求积式及干形之间的关系[J]. *林业科学*, 1988, 24(1): 84-88.
- [29] 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.
- [30] Feng Z W, Wang X K, Wu G J. *Biomass and productivity of forest ecosystems in China* [M]. Beijing: Beijing Science Press, 1999: 18-24.
- 冯宗炜, 王效科, 吴刚军. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 18-24.
- [31] Wang Z F. *On the forest biomass's modeling and precision analysis* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006: 25-32.
- 王仲锋. 森林生物量建模与精度分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2006: 25-32.
- [32] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(4): 497-508.
- 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, 16(4): 497-508.