

# 基于激光回波强度判别毛竹年龄

蔡越<sup>1</sup>, 徐文兵<sup>1,2</sup>, 梁丹<sup>1</sup>, 邓懋懋<sup>1</sup>, 李翀<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>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 临安 311300;

<sup>2</sup>同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

<sup>3</sup>北京林业大学林学院, 北京 100083

**摘要** 激光回波强度为点云数据的一种属性信息,是目标对发射激光光束后向散射回波的光功率,可以反映目标物体的表面特性。毛竹表面特征由其生理生长特性决定,通过分析激光回波强度信息,构建不同年龄竹秆的节间与激光回波强度的关系模型,比较不同年龄毛竹拟合激光回波强度与实测激光回波强度的均方根误差,以此判别毛竹的年龄,并验证分析模型精度。结果表明:不同年龄和不同节间毛竹竹秆激光回波强度差异性显著,节间内激光回波强度的差异性不明显;该方法判别年龄的准确率达到 92.5%,地面三维激光扫描技术可为快速测算毛竹生物量提供竹龄参数。

**关键词** 遥感; 毛竹年龄判别; 多项式模型; 激光强度; 地面三维激光扫描; 生物量

中图分类号 P232

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0110003

## Distinguishing *Phyllostachys edulis* Age Based on Laser Scanning Intensity

Cai Yue<sup>1</sup>, Xu Wenbing<sup>1,2</sup>, Liang Dan<sup>1</sup>, Deng Susu<sup>1</sup>, Li Chong<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China;

<sup>2</sup>College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

<sup>3</sup>College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract** The laser scanning intensity is an attribute of point cloud. It is the optical power of echo from laser to target and can reflect the surface properties of the target. The surface properties of *Phyllostachys edulis* depend on its physiological growth characteristics. We analyze the information of laser scanning intensity of *Phyllostachys edulis*, model the relationship between trunk No. and laser scanning intensity for *Phyllostachys edulis* with different ages, compare the root mean square error between the fitting and measured laser scanning intensity so as to distinguish the bamboo age and verify accuracy of the constructed model. The results show that there is significant difference in laser intensity of bamboos with different ages and in different trunks, while the difference is not significant in laser intensity of bamboos in the same trunk. The distinguishing accuracy over 92.5% is realized. The polynomial model can efficiently distinguish *Phyllostachys edulis* age, which is helpful for estimating its biomass by three-dimensional terrestrial laser scanning.

**Key words** remote sensing; distinguishing of *Phyllostachys edulis* age; polynomial model; laser intensity; three-dimensional terrestrial laser scanning; biomass

**OCIS codes** 280.3640; 140.3460; 100.6890; 120.5800

收稿日期: 2017-08-29; 收到修改稿日期: 2017-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(41671449,41401528)、浙江省公益技术研究项目(LGN18C160004)、浙江省教育厅一般项目(Y201636125)

作者简介: 蔡越(1992—),女,硕士研究生,主要从事三维激光扫描技术与三维建模等方面的研究。

E-mail: 371927896@qq.com

导师简介: 徐文兵(1978—),男,硕士,副教授,主要从事三维激光扫描技术在林业测量中的应用等方面的研究。

E-mail: xuwb97@163.com(通信联系人)

# 1 引言

地面三维激光扫描技术是近年来新兴的一门技术,被誉为“继全球定位系统(GPS)以来测绘领域的又一次技术革命”<sup>[1]</sup>。地面三维激光扫描可以快速地对被观测物体进行非接触式测量以获得大量目标物三维坐标信息,即点云数据<sup>[2]</sup>。点云数据不仅包含三维坐标,还记录目标的后向散射回波强度,即激光强度<sup>[3]</sup>。与传统的测量相比,地面三维激光扫描技术具有非接触性、快速性和主动性的特点<sup>[4]</sup>,被广泛应用在地形测量、文物保护、地址灾害监测与形变监测等领域,初步应用于林业资源调查、林分结构研究以及单木三维模型构建等方面。

传统森林资源调查方法存在作业周期长、工作效率低、劳动强度大、数据单一等问题,而地面三维激光扫描技术获取测树因子速度更快、精度更高,且不会损害林木,有利于保护生态环境<sup>[5]</sup>。目前,国内外学者在林业中应用地面三维激光扫描技术的研究主要包括3个方面。1)测树因子的获取。吴春峰等<sup>[6]</sup>、冯仲科等<sup>[7-9]</sup>、Jakob<sup>[10]</sup>和Wezyk等<sup>[11]</sup>利用地面三维激光扫描技术获取林木树高和胸径,他们利用测树因子通过求积公式或模型得到木材材积,并与实测伐倒木材积进行比较,两者相关系数可达0.90甚至更高,从而可预测测区的蓄积量。2)林分结构的研究。林分结构是林分特征的重要内容,是影响林木生长和森林碳汇功能的主要因素<sup>[12]</sup>。由于地面三维激光扫描技术获取的点云数据数量庞大,信息量大而复杂,获取精确的结构参数存在一定难度,所以这方面的研究较少。Moorthy等<sup>[13]</sup>利用地面三维激光扫描仪获取林隙指数、叶面积指数等信息,与传统方法获取的数据相关性都在0.95以上。3)单木三维模型的构建及生物量估算。利用地面三维激光扫描技术获取点云数据进行林木三维建模,一种为人工或半自动化法,从点云数据中提取相关数据导入已有的树木建模软件中构建模型<sup>[14-15]</sup>;另一种是直接利用地面三维激光扫描仪获取的点云数据建模,通过算法对数据进行处理,提取林木形态的特征信息,从而实现三维模型构建<sup>[16-18]</sup>。目前国内外利用地面三维激光扫描技术估算生物量的研究很少,且绝大多数是利用小型机载激光雷达(LiDAR)获取林木的冠层结构和属性信息,结合多光谱影像,构建模型估测样地生物量<sup>[19-21]</sup>。虽然地面激光扫描技术在林业中已得到初步的应用,但是主要是利用点云数据中的三维坐标信息,利用目标

后向散射回波强度的研究较少,应用于毛竹方面的研究更是鲜见报道。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)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<sup>[22]</sup>等诸多优点。毛竹属于禾木科,它的木质部没有传统意义上的年轮可查定年龄,这与双子叶植物或裸子叶植物不同<sup>[23]</sup>。正确地查定毛竹年龄,不仅对毛竹的栽培管理、采伐利用、科学研究等有重大意义<sup>[24]</sup>,对毛竹生物量的测算也必不可少<sup>[25]</sup>。目前毛竹年龄的判断有龄痕法和竹秆皮色法,都依靠人为经验判断,需要消耗大量的人力和时间,准确性难以评价。本文研究点云数据中激光回波强度与不同年龄毛竹竹秆表面特征的相互关系,利用地面三维激光扫描仪获取样地毛竹的点云数据,提取毛竹竹秆的激光强度信息进行分析、建模、验证,以识别毛竹年龄,为快速、精确测算毛竹生物量提供竹龄参数。

## 2 研究区概况

研究区位于浙江省临安市浙江农林大学平山实验基地(119°40'E,30°15'N)。该区域属亚热带季风气候,年均气温16.4℃,年降水量1500.0~1628.6mm,年日照时数1847.3h,全年无霜期237d;海拔60~120m,低山丘陵,森林覆盖率76.5%,主要树种为毛竹,土壤为微酸性红壤。实验样地内,主要有1~4年生的毛竹,平均胸径8.7cm,立竹密度2000~5300株/hm<sup>2</sup>,林下少灌木、多杂草。

## 3 研究方法

### 3.1 样地设置与数据获取

实验仪器为Leica ScanStation C05地面三维激光扫描仪,仪器采用紧凑型脉冲式绿色激光,波长532nm,视场角范围360°×270°,扫描速率50000point/s<sup>[26]</sup>,标称精度为100m以内扫描标准偏差小于4mm。

实验场地由4个10m×10m的样地构成。扫描前需设置3个目标标靶与5个测站,测站与目标标靶的位置如图1所示。

数据采集:标记并编号样地内胸径大于5cm的毛竹,人工每木调查并记录每株毛竹的年龄、竹高、胸径;利用扫描仪高分辨率模式在测站分别进行全景扫描,获取点云数据,将扫描数据导入计算机。

### 3.2 点云数据处理

利用Leica Cyclone软件对点云数据进行预处理

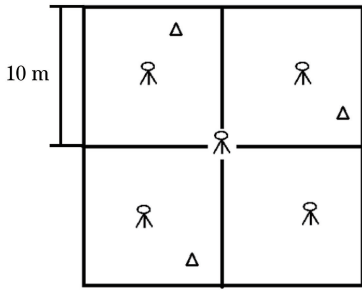


图 1 实验场地示意图

Fig. 1 Schematic of experimental site

理,包括点云数据的拼接和去噪。

竹秆点云数据的提取:1)根据每木调查时记录的毛竹年龄,使用软件中的 Fence 功能分别框选 1~4 年生的毛竹各 5 棵,剔除强干扰点,且实验只针对竹秆部位的点云数据进行分析,竹枝和竹叶的点云忽略不计;2)由于整根竹秆的点云数据量大且不易分析,且毛竹以节间为生长单位,实验选取每株毛竹第 1~10 节间中间部位的点云数据,每段节间按上、中、下部位各截取 1 次以减小实验误差(图 2);3)利用 Export 功能,将选取的点云数据以标准格式“.PTX 格式”导出,即可查看各方框内的点云数量和激光强度信息。

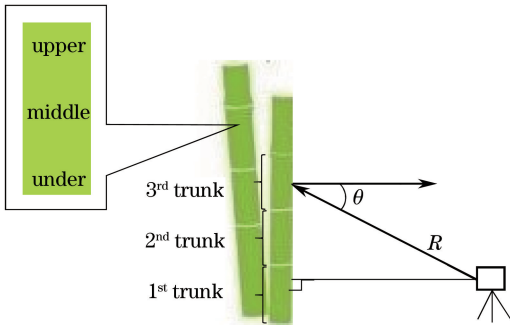


图 2 扫描时几何关系示意图

Fig. 2 Schematic of geometrical relationship at scanning

激光强度信息会受扫描距离、扫描入射角、扫描目标表面特性、扫描仪内部机制、扫描环境<sup>[27-31]</sup>等多种因素的影响,因此研究如何消除这些影响因素是应用点云强度信息的重要工作。实验在同一实验样地,且用同一台 Leica 三维激光扫描仪在同一天内完成数据采集,因此不考虑扫描仪内部机制和扫描环境对激光强度造成的影响;利用基于多项式的激光强度改正模型<sup>[32]</sup>对扫描距离和扫描入射角效应进行改正,从而消除两者的影响。

基于多项式的激光强度改正模型为

$$I_s = I + \sum_{i=1}^n K_i \times (P_s^i - P^i), \quad (1)$$

$$P = \frac{\cos \theta}{R^2}, \quad (2)$$

式中  $I$  为仪器原始记录激光强度值; $K_i$  ( $i=0,1,2, \dots, n$ ) 为多项式系数; $n$  为多项式阶数,对于不同的扫描仪, $n$  取值不同; $P$  为变量,取决于决定扫描几何形状的入射角  $\theta$  及测距值  $R$ ,  $P_s$  为入射角与测距值都在标准状态下的值; $I_s$  为改正后的强度值。由此发现经过多项式模型改正之后的激光强度值  $I_s$  与入射角和测距值都无关,只与扫描目标即毛竹表面特性有关。

激光强度改正过程如下。

1) 多项式阶数  $n$  的确定。根据实验选取的所有实测扫描数据,选取不同  $n$  值的多项式模型,计算拟合误差和程序运行时间,如图 3 所示。实验有 5 万多个点云数据,且该改正模型复杂度不高,噪声干扰小,可以避免过拟合情况的出现。由图 3 可知,随着  $n$  值的增加,拟合误差减小,而运行时间增加,当  $n=4$  时,拟合误差趋于稳定。兼顾运行时间和拟合精度,实验多项式阶数  $n$  取值为 4。

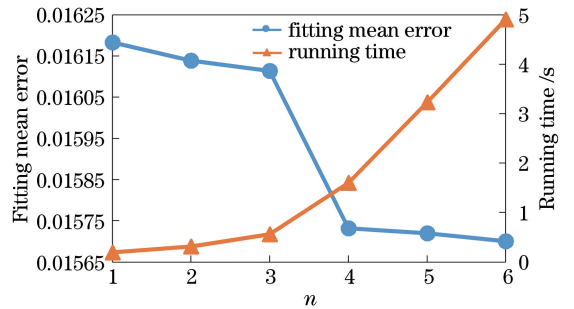


图 3 拟合误差和运行时间随多项式阶数的变化

Fig. 3 Fitting error and running time as a function of the polynomial order

2) 模型系数  $K$  的确定。根据实验选取的所有实测扫描数据,利用最小二乘平差法,得到模型系数  $K$  分别为  $K_1 = -0.17763452$ ,  $K_2 = 0.648256124$ ,  $K_3 = -0.887632814$ ,  $K_4 = 0.38538642$ 。实验标准距离值为 2.905,标准入射角为  $0^\circ$ ,由(2)式可得  $P_s = 0.118$ 。

3) 改正结果。以 1 年生毛竹竹秆为例,表 1 列出了 1 年生毛竹竹秆 1~10 节间的原始激光强度及改正后激光强度的平均值和标准差(STD)及  $R$ 、 $\cos \theta$  和  $P_s$  的分布情况。由表中数据可知改正后激光强度标准差都减小,其他 3 个年龄竹秆的情况类似,且改正后不同年龄竹秆的激光强度得到了很好的区分,基本不存在重叠(图 5),说明此改正方法能有效地去除由测距值及入射角引起的强度偏差。

表 1 1 年生竹秆改正前后激光强度

Table 1 Original and corrected intensity of 1-year bamboo

Trunk		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mean	Original	0.19550	0.20057	0.20004	0.20082	0.19290	0.19367	0.18817	0.18959	0.18539	0.18744
	Corrected	0.20029	0.20051	0.20041	0.20377	0.19545	0.19410	0.18857	0.18963	0.18488	0.18549
STD	Original	0.00751	0.01009	0.00433	0.00970	0.00773	0.01273	0.00943	0.01427	0.00918	0.01255
	Corrected	0.00409	0.00600	0.00241	0.00626	0.00311	0.01117	0.00713	0.01200	0.00723	0.01120
R /m	Min	0.98312	0.91759	0.90735	0.91809	1.00426	1.14075	1.32969	1.57238	1.59021	2.12243
	Max	3.84223	3.83117	3.82360	3.81774	3.82995	3.84632	3.87853	3.91175	3.96568	4.02894
cos θ	Min	0.93120	0.95788	0.99776	0.97301	0.88408	0.77073	0.65525	0.54901	0.50898	0.41366
	Max	0.99349	0.99695	0.99920	1.00000	0.99965	0.99624	0.98982	0.98261	0.97320	0.96050
P <sub>s</sub> /m <sup>-2</sup>	Min	0.06730	0.06792	0.06835	0.06861	0.06815	0.06734	0.06580	0.06422	0.06188	0.05917
	Max	0.96345	1.13766	1.21193	1.15437	0.87660	0.59227	0.37060	0.22206	0.20128	0.09183

### 3.3 数据统计分析

利用 Excel 2013 软件计算均值和标准差公式分析不同年龄竹秆的激光强度,计算公式为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m}, \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_m - \bar{x})^2}{m}}, \quad (4)$$

式中  $\bar{x}$  为激光强度平均值;  $x_m$  为各激光强度值;  $s$  为激光强度标准差。

利用 SPSS19.0 的多因素方差分析法,分析不同年龄、不同节间对激光强度影响的显著性,分析节间间和节间内及其交互作用对激光强度影响的显著性。

利用 MATLAB2010 计算多项式改正模型的拟合误差及模型系数  $K$ ,并根据改正模型对原始激光强度进行距离和入射角的改正,最后用回归分析拟合得到 4 种不同年龄竹秆的节间与激光强度的关系模型,并判别毛竹年龄和验证模型的可行性。

## 4 结果与分析

### 4.1 不同年龄竹秆激光强度差异分析

对不同年龄竹秆激光强度进行多因素方差分析,结果表明(表 2)年龄和节间激光强度差异都极显著( $p < 0.01$ ,  $p$  为显著性概率),说明不同年龄和不同节间激光强度差异都很大,且两者交互作用不明显。表 2 中  $d_f$  表示统计变量的自由度;  $F$  表示方差分析统计量;  $P$  表示概率值。

### 4.2 不同年龄竹秆激光强度变化规律

如图 4(a)所示,1 年生竹秆激光强度在第 4 节间的值最大,为 0.206066,随后呈显著减小趋势,在

表 2 不同年龄竹秆激光强度显著性分析

Table 2 Significance analysis of laser intensity in trunks with different ages

Source	Sum of squares of type III	$d_f$	Mean square	$F$	$p$
Age	0.008	3	0.003	34.265	0
Trunk	0.003	9	0	4.123	0
Age × Trunk	0.001	27	0	0.640	0.914
Error	0.013	160	0		
Total	8.225	200			

第 10 节间的值最小,为 0.182769。激光强度从小到大的位置顺序为下部、中部、上部。对节间间和节间内激光强度进行双因素方差分析,结果表明(表 3)1 年生竹秆节间间激光强度差异极显著( $p < 0.01$ ),节间内激光强度差异显著( $p < 0.05$ ),两者交互效应不明显。两两比较结果表明[图 4(a)],1~4 节间与第 9、10 节间激光强度差异极显著( $p < 0.01$ ),说明毛竹底部节间与上部节间激光强度差异很大。而节间内仅有第 2 和第 3 节间上部和下部激光强度差异显著,说明每段节间内激光强度差异不大。

如图 4(b)所示,2 年生竹秆第 1~10 节间激光强度呈现先增大后减小的趋势,在第 1 节间的值最小,为 0.189378,第 5 节间达到最大,为 0.209715。节间内激光强度符合下部、中部、上部逐渐增大的特点。由表 3 可知,2 年生竹秆节间间和节间内激光强度差异都是极显著( $p < 0.01$ ),两者交互效应不明显。两两比较结果表明[图 4(b)],第 1、2、10 节间与第 4~8 节间激光强度差异极显著( $p < 0.01$ ),说明毛竹中部节间与上、下部竹秆激光强度差异很大。而节间内仅有第 1 和第 5 节上部和下部激光强度差异显著,说明每段节间内激光强度差异不大。

表3 不同年龄竹秆节间与节间内激光强度显著性分析

Table 3 Significance analysis of laser intensity in trunks and between trunks with different ages

Source	1-year		2-year		3-year		4-year	
	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>f</i>	<i>p</i>
Between-trunks	8.701	<0.001	9.098	<0.001	4.608	<0.001	1.283	0.253
In-trunks	4.680	0.011	8.216	<0.001	1.095	0.338	0.380	0.685
Between-trunks×in-trunks	0.169	1.000	0.122	1.000	0.070	1.000	0.160	1.000

与1年生竹秆激光强度变化趋势相似[图4(c)],3年生竹秆激光强度在第4节间的值最大,为0.20979,之后逐渐减小,在第10节间的值最小,为0.191929。节间内激光强度也符合下部、中部、上部逐渐增大的特点。由表3可知,3年生竹秆节间间激光强度差异极显著( $p < 0.01$ ),节间内激光强度差异不显著,两者交互效应不明显。由图4(c)可知,第1~6节间与第9、10节间激光强度差异极显著( $p < 0.01$ ),说明毛竹底部、接近中部节间与上部节间激光强度差异很大。而每段节间内的上、中、下部激光强度差异都不显著,说明节间内激光强度差异不大。

如图4(d)所示,4年生竹秆激光强度变化较为平缓,同样也在第4节间时最大,为0.216089,在第10节间时最小,为0.202101。有6段节间内的激光强度符合下部、中部、上部逐渐增大的特点。由表3可知,4年生竹秆节间间激光强度差异不显著,节间内激光强度差异不显著,两者交互效应不明显。由

图4(d)可知,只有第2节间与第10节间激光强度差异极显著( $p < 0.01$ )。每段节间内的上、中、下部激光强度差异都不显著,说明节间内激光强度差异不大。

### 4.3 不同年龄竹秆激光强度模型拟合

经多项式模型改正后的不同年龄竹秆激光强度的关系如图5所示,4年生竹秆的激光强度(0.210~0.215)、3年生竹秆的激光强度(0.208~0.198)、2年生竹秆的激光强度(0.192~0.204)、1年生竹秆的激光强度(0.185~0.202)逐年下降。因此改正后的激光强度能很好地区分不同年龄的竹秆。利用多项式模型对不同年龄竹秆的激光强度分别进行拟合,得到拟合模型参数及相关系数 $r^2$ 。由表4可知,不同年龄竹秆节间与激光强度的拟合模型分别为: $y_1 = -0.0001x^2 - 0.0008x + 0.2026, r^2 = 0.928$ ;  $y_2 = -0.0006x^2 + 0.0061x + 0.187, r^2 = 0.9655$ ;  $y_3 = -0.0003x^2 + 0.0019x + 0.2056, r^2 = 0.9892$ ;  $y_4 = -0.0001x^2 + 0.0002x + 0.2153, r^2 = 0.9577$ 。其中

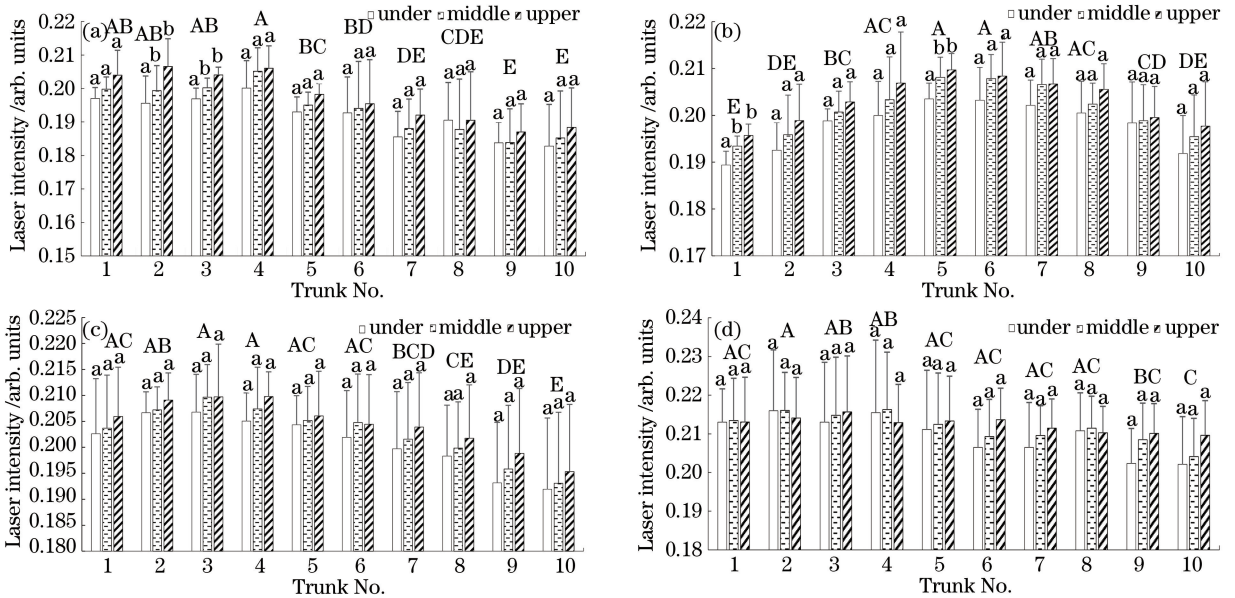


图4 不同年龄竹秆的激光强度[图中大写字母表示节间间差异显著性( $p < 0.05$ ),小写字母表示节间内差异显著性( $p < 0.05$ )]。(a) 1年生竹秆;(b) 2年生竹秆;(c) 3年生竹秆;(d) 4年生竹秆

Fig. 4 Laser intensity of trunks with different ages (data followed by different capital letters represents difference less than 0.05 significance level between trunks, lowercase letters represent difference less than 0.05 significance level in trunks).

(a) 1-year old trunks; (b) 2-year old trunks; (c) 3-year old trunks; (d) 4-year old trunks

$y_1, y_2, y_3$  和  $y_4$  分别为 1~4 年生竹秆的拟合激光强度值,  $x$  为竹秆的节间数,  $r$  为相关系数。  $r^2$  均在 0.9 以上, 说明拟合结果优良。

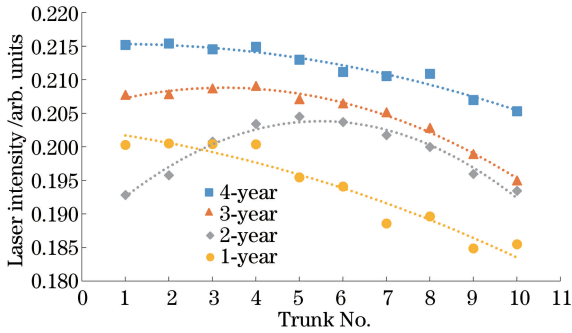


图 5 不同年龄竹秆的激光强度关系

Fig. 5 Relationship between laser intensity and trunks with different ages

表 4 不同年龄竹秆激光强度拟合模型参数和相关系数  
Table 4 Parameters and  $r^2$  for fitting laser intensity of trunks with different ages

Parameter and $r^2$	1-year	2-year	3-year	4-year
$K_0$	-0.0001	-0.0006	-0.0003	-0.0001
$K_1$	-0.0080	0.0061	0.0019	0.0002
$K_2$	0.2026	0.1870	0.2056	0.2153
$r^2$	0.9280	0.9655	0.9892	0.9577

#### 4.4 毛竹年龄的判别和验证

判别: 根据 4.3 竹秆节间的激光强度拟合模型可得每一节间的拟合激光强度值  $y_a$  及对应的实测激光强度值  $y_b$ , 求得  $y_a$  拟合激光强度与实测激光强度的均方根误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{10} (y_a - y_b)^2}{n}} \quad (5)$$

将任一棵毛竹竹秆的激光强度值代入 4.3 节中的 4 个模型, 得到  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ , 比较  $\sigma_i$  值, 当  $\sigma_i$  最小时, 说明该拟合结果最接近真实结果, 符合对应年龄的毛竹竹秆激光强度规律, 则判定该毛竹年龄为  $i$ 。

验证: 实验另选取 1 年生、2 年生、3 年生、4 年生毛竹各 10 棵, 根据 (5) 式进行判别验证, 结果见表 5。由表 5 可知, 毛竹年龄判别的准确率达到 92.5%。

## 5 讨 论

1) 激光强度进行地物分类的可行性。研究中首先对毛竹竹秆的原始激光强度进行改正, 使改正后的激光强度仅包含目标变量的属性信息, 即毛竹的表面特征, 如毛竹的表面颜色、表面粗糙度等, 并利用不同年龄毛竹的激光强度构建具体名称模型,

表 5 毛竹年龄判别验证结果

Table 5 Results of distinguishing bamboo age

Age	Number of measured bamboos	Number of accurately distinguished bamboos	Accuracy /%
1	10	9	90
2	10	8	80
3	10	10	100
4	10	10	100

从而达到辨别毛竹年龄的目的。这种利用激光强度进行地物分类的结果, 与 Song 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。不同年龄竹秆间的激光强度差异显著, 而同一竹秆内激光强度差异不显著, 该结果与樊丽等<sup>[34]</sup>对林下环境进行点云分割时的发现是一致的, 即不同物体间的激光强度值相差较大, 但单个物体不同部位激光强度值相近。利用激光强度信息结合高度信息以及高度变化信息等点云几何信息对道路、树木、房屋等进行分类, 或是利用激光强度信息得到伪反射图像对图像进行植被分类, 结果都表明结合激光强度信息可以实现地物分类<sup>[35]</sup>。

2) 激光强度反映了毛竹生长的特性。比较不同年龄竹秆的激光强度发现, 1 年生竹秆激光强度、2 年生竹秆激光强度、3 年生竹秆激光强度、4 年生竹秆激光强度逐渐增大。随着年龄的增加, 竹材表面纤维素相对含量增加, 含水量逐渐降低, 使毛竹表面颜色逐渐变暗加深, 颜色变化越来越明显<sup>[36]</sup>。激光强度受目标物表面颜色影响较大, 且绿色目标物的激光强度大于其他颜色目标物<sup>[37]</sup>, 而同一种色系的目标物, 激光强度随着颜色深度的增加而增大, 说明毛竹的激光反射特性类似于其他植物。李翀等<sup>[38]</sup>的研究表明 1 年生毛竹与 3 年生和 5 年生老竹的胸襟、株数、碳储量的相关性高于 2 年生和 4 年生老竹。Song 等<sup>[33]</sup>研究发现在新竹爆发式生长过程中, 老竹通过竹鞭向新竹输送大量的非结构性碳水化合物, 还发现 2 年生竹秆激光强度随高度增加呈先增加后减小的趋势, 其原因可能是实验时间为 2017 年 4 月, 正是新竹爆发式生长期, 2 年生毛竹由上至下向新竹输送大量非结构性碳水化合物, 在 2 年生竹秆底部积累了大量非结构性碳水化合物, 使得 2 年生底部竹秆表面的激光强度减小。除 2 年生竹秆以外, 其他年龄的竹秆激光强度随高度增加都呈下降趋势, 与崔敏等<sup>[39]</sup>的研究结果一致, 即竹壁的厚度和竹材基本密度一般从竹秆基部到梢部逐渐减小, 因此竹秆基部的颜色深于梢部。不同年龄竹

秆节间内的激光强度符合下部、中部、上部不断增大的特点。贺新强等<sup>[40]</sup>认为毛竹的生长主要以节间为生长单位,节间生长是靠分生组织经过细胞分裂、分化、伸长加大和老化成熟来实现的,在同一节间,分生组织位于节间基部,则节间基部是细胞分裂最旺盛的部位,是最嫩、颜色较浅的部位,而节间上部则是较老、颜色较深的部位。可见,毛竹表面特性影响激光强度大小,为激光强度变化反映毛竹的生长特性提供可能。

3) 激光强度进行地物分类的精度。构建的4个年龄竹秆节间与激光强度的模型相关系数都在0.9以上,且毛竹年龄判别准确率高达92.5%,表明竹秆激光强度可以区分毛竹年龄。程小龙等<sup>[41]</sup>在基于激光强度对建筑立面进行分类时,精度也高达96.74%,与黄磊等<sup>[42]</sup>得出的结论一致,说明基于激光强度信息进行地物分类有较高的分类精度。

## 6 结 论

通过分析不同年龄竹秆的激光强度,得出如下结论:1)不同年龄的竹秆激光强度差异很大,不同节间的激光强度差异很大,但是节间内的激光强度差异不明显;2)1年生、3年生、4年生竹秆激光强度变化呈逐渐减小的趋势,在新竹爆发式生长期,2年生竹秆激光强度呈先增大后减小的趋势;3)不同年龄竹秆,除1年生和2年生竹秆的激光强度有部分重叠外,其他都不存在重叠;4)通过构建不同年龄竹秆节间与激光强度的模型,并比较拟合结果与实测激光强度的均方根误差,可准确判别毛竹年龄。

该研究基于不同年龄竹秆激光强度存在的差异,构建不同年龄竹秆激光强度模型,比较拟合激光强度与实测激光强度的均方根误差,由此判别毛竹的年龄,为高效、快速、准确判别毛竹年龄提供了新思路、新方法,为快速、准确测算毛竹生物量提供竹龄参数。不同区域的毛竹存在差异性,各个因素对模型的影响有待于进一步探讨,通过本文实验方法对模型参数进行改进和优化,有助于研究构建适用于不同区域毛竹的竹秆激光强度与年龄的关系模型。

## 参 考 文 献

[1] Wang F, Lin H, Li C H. Application of terrestrial 3D laser scanning technology in urban surveying[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(5): 47-49. 王峰, 林鸿, 李长辉. 地面三维激光扫描技术在城市

测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2012(5): 47-49.

- [2] 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.
- [3] Tan K, Cheng X J, Zhang J X. Correction for incidence angle and distance effects on TLS intensity data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(2): 224-228. 谭凯, 程效军, 张吉星. TLS强度数据的入射角及距离效应改正方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(2): 224-228.
- [4] Cai R B. Registration of range images and planar regions extraction from TLS point cloud [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. 蔡润彬. 地面激光扫描数据后处理若干关键技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [5] Zhao Y, Yu X X, Xin Z B, *et al.* Application and outlook of terrestrial 3D laser scanning technology in forestry[J]. World Forestry Research, 2010, 23(4): 42-45. 赵阳, 余新晓, 信忠保, 等. 地面三维激光扫描技术在林业中的应用和展望[J]. 世界林业研究, 2010, 23(4): 42-45.
- [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): 71-76. 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): 71-76.
- [7] Luo X, Feng Z K, Deng X R, *et al.* Application of 3D laser scanning imaging system in forest measuring [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2): 83-87. 罗旭, 冯仲科, 邓向瑞, 等. 三维激光扫描成像系统在森林计测中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 83-87.
- [8] Feng Z K, Luo X, Ma Q Y, *et al.* An estimation of tree canopy biomass based on 3D laser scanning imaging system [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Suppl.2): 52-56. 冯仲科, 罗旭, 马钦彦, 等. 基于三维激光扫描成像系统的树冠生物量研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊2): 52-56.
- [9] Deng X R, Feng Z K, Ma Q Y, *et al.* Application of 3D laser scanning system in measuring standing volume[J]. Journal of Beijing Forestry University,

- 2007, 29(Suppl.2): 74-77.
- 邓向瑞, 冯仲科, 马钦彦, 等. 三维激光扫描系统在立木材积测定中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊2): 74-77.
- [10] Jakob W. 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.
- [11] Wezyk P, Koziol K, Glista M. *et al.* Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forests[J]. *ISPRS Workshop on Laser Scanning and Silvilaser*, 2007, 36(3): 424-429.
- [12] Fan Y Q, Zhou G M, Shi Y J, *et al.* Effects of terrain on stand structure and vegetation carbon storage of *Phyllostachys edulis* forest [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(11): 177-182.
- 范叶青, 周国模, 施拥军, 等. 地形条件对毛竹林分结构和植被碳储量的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 177-182.
- [13] Moorthy I, John R M, Hu B X, *et al.* Retrieving crown leaf area index from an individual tree using ground-based lidardata [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, 34(3): 320-332.
- [14] Pfeifer N, Gorte B, Winterhalder D. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data [C]//*Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey*, 2004, 35: 114-119.
- [15] Teobaldelli M, Puig A D, Zenone T, *et al.* Building a topological and geometrical model of poplar tree using portableon-ground scanning LIDAR [J]. *Functional Plant Biology*, 2008, 35(10): 1080-1090.
- [16] Wang J, Zhou G M. 3D reconstruction of tree stems based on laser scanning of standing [J]. *Microcomputer Information*, 2009, 25(8-3): 228-230.
- 王剑, 周国民. 基于激光扫描仪的树干三维重建方法研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(8-3): 228-230.
- [17] Gorte B, Pfeifer N. Structuring laser-scanned trees using 3D mathematical morphology[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 35(B5): 929-933.
- [18] Cote J F, Widlowski J L, Fournier R A, *et al.* The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial LiDAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 1067-1078.
- [19] 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.
- [20] Li W, Niu Z, Wang C, *et al.* Forest above-ground biomass estimation at plot and tree levels using airborne LiDAR data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(4): 669-679.
- 李旺, 牛铮, 王成, 等. 机载 LiDAR 数据估算样地和单木尺度森林地上生物量[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 669-679.
- [21] Popescu S C, Wynne R H, Nelson R F. 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.
- [22] Zhou G M, Jiang P K. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachys pubescens* forest[J]. *Scientia Silvae Siniace*, 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.
- [23] Wu W N, Wan T. Progress of dating methods of tree age[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2003, 7: 152-155.
- 吴翰宁, 万涛. 浅谈树木年龄测定方法的研究进展[J]. 绿色科技, 2013, 7: 152-155.
- [24] Yang C F. Research of identifying of bamboo's age [J]. *Scientia Silvae Siniace*, 1965, 10(2): 193-196.
- 杨赐福. 鉴定毛竹年龄的研究[J]. 林业科学, 1965, 10(2): 193-196.
- [25] Zhou G M, Liu E B, Shi Y J, *et al.* Accurate estimation for moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) biomass in Zhejiang province based on the lowest scale technique[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(1): 1-5.
- 周国模, 刘恩斌, 施拥军, 等. 基于最小尺度的浙江省毛竹生物量精确估算[J]. 林业科学, 2011, 47(1): 1-5.
- [26] Liu C, Zhang Y L, Wu H B. Accuracy evaluation of 3D laser range scanner based on field calibration[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2009(11): 56-66.
- 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(11): 56-66.
- [27] Kukko A, Kaasalainen S, Litkey P. Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(7): 986-992.
- [28] Pesci A, Teza G. Effects of surface irregularities on



- intensity data from laser scanning: An experimental approach[J]. *Annals of Geophysics*, 2008, 51(5/6): 839-848.
- [29] Wang J J, Liu J D. Analysis and sorting of impacts of measurement errors on positioning accuracy of laser point cloud obtained from airborne laser scanning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0414001.  
王建军, 刘吉东. 影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素分析及其影响大小排序[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0414001.
- [30] Fang W, Huang X F, Zhang F, *et al.* Mural image rectification based on correction of laser point cloud intensity [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(5): 541-547.  
方伟, 黄先锋, 张帆, 等. 依据点云强度校正的壁画纠正[J]. *测绘学报*, 2015, 44(5): 541-547.
- [31] Anttila K, Hakala T, Kaasalainen S, *et al.* Calibrating laser scanner data from snow surfaces: Correction of intensity effects [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 121: 52-59.
- [32] Tan K, Cheng X J. TLS laser intensity correction based on polynomial model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0314002.  
谭凯, 程效军. 基于多项式模型的 TLS 激光强度值改正[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0314002.
- [33] Song J H, Han S H, Yu K Y, *et al.* Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data [J]. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, 34(3/B): 259-262.
- [34] Fan L, Liu J H, Huang Q Q. Point cloud segmentation algorithm based on feature fusion used for understory environments [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 38(5): 133-138.  
樊丽, 刘晋浩, 黄青青. 基于特征融合的林下环境点云分割[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 38(5): 133-138.
- [35] Coren F, Sterzai P. Radiometric correction in laser scanning [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(15): 3097-3104.
- [36] Hou L Y, Zhao R J, Ren H Q. *et al.* Analysis of surface color and wettability and chemical composition of different age *Phyllostachys pubescens* [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2012, 36(2): 159-162.  
侯玲艳, 赵荣军, 任海青, 等. 不同竹龄毛竹材表面颜色、润湿性及化学成分分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(2): 159-162.
- [37] Cai Y, Xu W B, Liang D, *et al.* The research on accuracy impacts of point cloud obtained from terrestrial three-dimensional (3D) laser scanning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 092801.  
蔡越, 徐文兵, 梁丹, 等. 不同因素影响地面三维激光扫描点云精度的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 092801.
- [38] Li C, Zhou G M, Shi Y J, *et al.* Effects of old bamboo forests and relevant management measures on growth of new bamboo forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2243-2254.  
李翀, 周国模, 施拥军, 等. 毛竹林老林水平和经营措施对新竹发育质量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(8): 2243-2254.
- [39] Cui M, Yin Y F, Jiang X M, *et al.* Variation analysis of physical characteristics in *Phyllostachys pubescens* stem at different growth ages [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2010, 30(4): 338-343.  
崔敏, 殷亚方, 姜笑梅, 等. 不同竹龄毛竹材物理性质的差异分析[J]. *福建林学院学报*, 2010, 30(4): 338-343.
- [40] He X Q, Wang Y Q, Hu Y X, *et al.* Ultrastructural study of secondary wall formation in the stem fiber of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(10): 1003-1008.  
贺新强, 王幼群, 胡玉熹, 等. 毛竹茎纤维次生壁形成过程的超微结构观察[J]. *植物学报*, 2000, 42(10): 1003-1008.
- [41] Cheng X L, Cheng X J, Guo W, *et al.* Point cloud classification and features extraction of building facades with the corrected laser intensity value [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(9): 1432-1437.  
程小龙, 程效军, 郭王, 等. 基于激光强度的建筑立面点云分类及信息提取[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(9): 1432-1437.
- [42] Huang L, Lu X S, Liang Y. Building facade extraction and classification using laser scanning intensity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(2): 195-198.  
黄磊, 卢秀山, 梁勇. 基于激光扫描回光强度的建筑物立面信息提取与分类[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(2): 195-198.