

# 基于无人机机载激光雷达的桉树蓄积量估测技术研究\*

周宇飞 王振师 钟映霞 吴泽鹏  
魏书精 李强 李小川

(广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

**摘要** 桉树 *Eucalyptus* spp. 人工林蓄积调查是林业生产经营的重要工作, 无人机机载激光雷达能够自动获取大面积桉树人工林的激光点云数据, 为计算桉树蓄积量提供新的方法。研究通过试验样地实际数据, 建立了桉树树高 ( $X$ ) 与胸径 ( $Y$ ) 的回归模型:  $Y = 3.6116e^{0.0674X}$ , 并结合激光雷达软件获取的株数、树高估算样地总蓄积量。比较激光雷达测量与实地测量结果发现, 激光雷达测量的株数比实测株数少 27.09%, 平均树高高 8.67%, 平均胸径大 8.25%, 总蓄积量小 22.68%。因此, 对于大尺度获取桉树成熟林的总蓄积量  $V$ , 可以使用  $V = V_0 / (1 - 22.68\%)$  对激光雷达测量的总蓄积量  $V_0$  进行修正。

**关键词** 无人机; 激光雷达; 桉树; 蓄积量

中图分类号: S758.4 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 02-0007-05

## Estimation Technology of *Eucalyptus* Stock Volume on UAV-based LiDAR

ZHOU Yufei WANG Zhenshi ZHONG Yingxia WU Zepeng  
WEI Shujing LI Qiang LI Xiaochuan

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

**Abstract** Stock survey of *Eucalyptus* accumulation is an important task of forestry production and management. UAV-based LiDAR can automatically obtain laser-point cloud data of large-area *Eucalyptus* plantations, providing a new method for calculating extensive *Eucalyptus* stock-volume. This study established a regression model to calculate DBH through actual measuring at a test plot:  $Y = 3.6116e^{0.0674X}$  ( $X$ : tree height,  $Y$ : DBH). Combining with the number of plants and tree height obtained by the lidar software to estimate the total volume of the plot. Comparing the results of LiDAR measurements with field measurements, it is found that the number of trees obtained via LiDAR would be 27.09% less than the actual one, the average tree height would be 8.67% higher, and the stock-volume would be 22.68% lower. The total stock-volume ( $V$ ) of extensive and mature *Eucalyptus* forests can be obtained by modified calculation based on the one measured via LiDAR ( $V_0$ ):  $V = V_0 / (1 - 22.68\%)$ .

**Key words** UAV; LiDAR; *Eucalyptus*; stock-volume

\* 基金项目: 广东省林业科技创新计划项目 (2018KJCX003、2019KJCX011)。

第一作者: 周宇飞 (1980—), 男, 高级工程师, 主要从事森林防火及林业信息化技术研究, E-mail: ttzyftt@163.com。

通信作者: 王振师 (1962—), 男, (教授级) 高级工程师, 主要从事森林防火技术研究, E-mail: wshenshi@163.com。

桉树 *Eucalyptus* spp. 作为世界著名的速生树种，凭借其适应性强、用途广泛、速生高产等特点，是华南地区人工速生林的优选树种<sup>[1-2]</sup>。桉树人工林蓄积调查是林业生产经营的重要工作<sup>[2]</sup>。通常的蓄积调查方法包括机械角规样地调查法、标准样地调查法、全林每木检尺法以及样圆调查法等<sup>[3]</sup>，这些传统的蓄积量调查方法均需要耗费大量人工，且数据质量难以保障。无人机可以获取较大面积林地的林木几何参数，在林业应用中具有成本低、效率高等优势<sup>[4-5]</sup>。无人机机载激光雷达测树技术是近年迅速发展起来的遥感应用技术<sup>[6]</sup>，机载激光雷达可以自动获取较大面积林地的激光点云数据，经过专业软件处理后可得到株数、单木树高及冠幅等结构信息的客观数据，为胸径和蓄积的计算提供基础，从而作为桉树人工林蓄积量估测的依据<sup>[6-9]</sup>。

国外随着无人机机载激光雷达应用的成熟，已经在估算蓄积量<sup>[10]</sup>、生物量<sup>[11]</sup>、树木高度<sup>[12-13]</sup>等多方面得到了应用。利用无人机机载激光雷达估测林木的蓄积量已经成为林业经营管理应用的趋势。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于广东省肇庆市大南山林场，位于北纬 23°21'15" 至 23°21'32"，东经 112°45'26" 至 112°45'44" 之间，总面积约 17.5 hm<sup>2</sup>。该试验区属亚热带季风气候，年平均气温 21.3℃。极端最高气温 38.5℃，极端最低气温 -1.2℃，最低气温多出现在 1 月或 2 月份，年平均降雨量约 1 803.6 mm，年均日照 1 702.3 h，年均雷暴日 89 d。林地海拔 50~200 m，坡度 10~30°。土壤为砖红壤，土层厚 0.5~1.2 m，适合桉树生长。详细测量的试验样地位于有道路等标志分割的一处独立林班，面积 0.81 hm<sup>2</sup>，是尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* 人工林，林龄约 6 a

的成熟林，种植株行距 2.5 m × 3 m，林木长势良好，无明显风折风倒木、病木和死木。



图 1 试验区和样地位置卫星影像

Fig.1 Satellite imagery of test area and plot location

### 1.2 激光雷达点云数据的获取

无人机上搭载 RIEGL VUX-1 机载激光雷达系统，于 2019 年 3 月 18 日对调查区域进行机载激光雷达数据采集，最终获得 las 数据格式的 point cloud 数据。无人机搭载激光系统的飞行技术性能见表 1。

### 1.3 试验区调查及蓄积量计算

无人机激光雷达测量完成后，于 2019 年 7—8 月对试验样地内的林分进行采伐，详细记录试验样地内所有桉树单木的胸径、树高、株数。采伐前使用胸径尺测量单株胸径，并在伐倒后使用皮尺量取树高。

单木蓄积量采用广东省桉树类二元立木材积表的计算公式<sup>[8]</sup>：

$$V=8.714 19 \times 10^{-5} D^{1.948 01} H^{0.749 29} \dots\dots\dots(1)$$

式 (1) 中  $V$  为单木蓄积量、 $D$  为单木胸径、 $H$  为单木树高。

### 1.4 激光雷达数据处理及蓄积量计算

使用 LiDAR360 软件处理激光雷达点云数据。首先将采集获取的激光雷达点云原始数据进行裁剪、去噪、地面点自动分类形成数字高程模型

表 1 RIEGL VUX-1 机载激光雷达系统技术性能

Table 1 Technical performance of airborne LiDAR system RIEGL VUX-1

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
飞行高度 /m Flying height	180	旁向重叠 /%Lateral overlap	60
飞行速度 / ( m · s <sup>-1</sup> ) Flying speed	6	点云密度 / ( pts · m <sup>-2</sup> ) Point density	24
视场角 Field angle	90°	发射频率 /khz Transmit frequency	200
扫描带宽 /m Scan bandwidth	180	垂直分辨率 /cm Vertical resolution	0.7

表 2 实测树高和胸径的统计分析

Table 2 Statistical analysis of measured tree height and DBH

指标 Index	平均值 Average	最大值 Max	最小值 Min	标准差 Standard deviation	相关系数 Correlation coefficient
树高 /m Height	20.13	27.0	6.9	4.93	0.943 2
胸径 /cm DBH	14.80	26.1	4.3	4.42	

表 3 实测胸径和各模型反演胸径的欧氏距离

Table 3 The euclidean distance between the measured DBH and inverted DBH of various models

线性函数 Linear function	二次函数 Quadratic function	幂函数 Power function	指数函数 Exponential function
32.536 85	26.997 50	32.752 07	26.818 67

(Digital elevation model, DEM) 等操作; 然后利用生成的 DEM 对点云数据进行归一化处理, 削弱地形起伏的影响; 最后使用 LiDAR360 软件的单木分割功能自动进行单木分割。

单木分割功能可以自动获得测量区域内的林木株数, 以及每株林木的树高、冠幅等<sup>[14-16]</sup>。由于激光雷达软件处理无法获取单木的胸径数据, 故可利用样地调查所获取的单木数据建立胸径对树高的回归模型, 并利用该模型为激光雷达测量的单木胸径进行赋值, 单木的蓄积也可以利用式 (1) 的方法计算, 由此估测整个试验样地的蓄积量。

## 2 结果与分析

### 2.1 实地调查结果

经调查, 该试验样地内桉树共有 491 株, 单木胸径和树高的测量值如表 2 所示, 所有单木按胸径和树高的分布如图 2 所示。

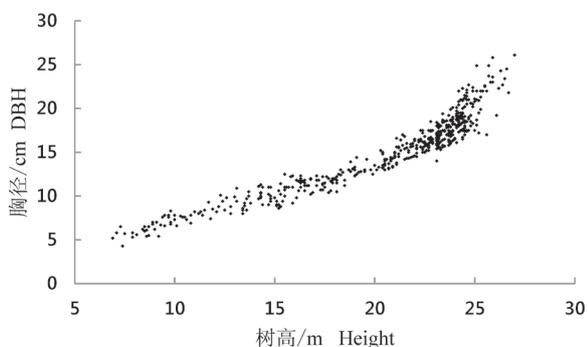


图 2 实测桉树单木树高和胸径分布

Fig.2 Measured data distribution of eucalyptus' single-tree height and DBH

由于所有单木的胸径和树高之间的相关系数  $r$  值为 0.943 2, 因此, 这些树木的胸径与树高之间呈强相关关系。利用树高, 采用常用的线性函数、二次函数、幂函数和指数函数分别对单木的胸径进行回归, 以选择最合适的胸径对树高的回归模型, 这些模型的表示如下所示:

$$Y = 0.8459X - 2.229 \dots \dots \dots (2)$$

$$Y = 0.0357X^2 - 0.4187X + 7.9048 \dots \dots \dots (3)$$

$$Y = 0.5518X^{1.0922} \dots \dots \dots (4)$$

$$Y = 3.6116e^{0.0674X} \dots \dots \dots (5)$$

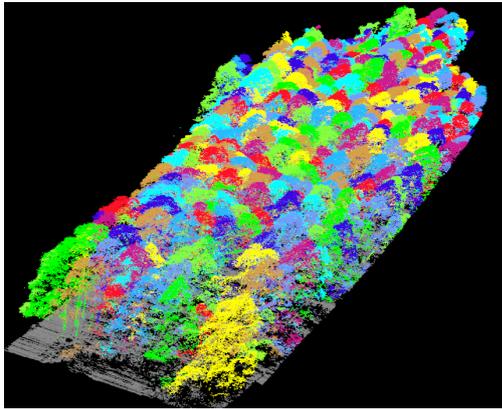
其中, 式 (2) 为线性函数, 式 (3) 为二次函数, 式 (4) 为幂函数, 式 (5) 为指数函数。这些式中,  $X$  是树高,  $Y$  为胸径。通过实测树高, 利用各个模型反演胸径, 再与实测胸径进行对比, 以判断最为适合的回归模型。对于相同数目的两组数组, 可以采用欧氏距离来判断反演胸径和实测胸径之间的相似性。欧氏距离越小, 则两组数组之间的相似性越高。各模型反演获得的胸径和实测胸径欧氏距离见表 3。

由此可见, 采用指数函数建立的回归模型, 即式 (5) 来表示样地内桉树林树高与胸径的关系最为合适。

利用式 (1) 计算桉树单株的材积并求和, 可得到该试验样地内桉树总蓄积量为  $90.485 \text{ m}^3$ 。

### 2.2 激光雷达点云数据的调查结果

激光雷达点云数据处理后的单木分割如图 3 所示。



注：不同颜色代表单木分割后的不同植株。  
 Note: different colors represent different plants after a single-tree segmentation.

图3 激光雷达点云数据的单木分割  
 Fig.3 Tree partitioning diagram of LiDAR point-cloud data

通过 Lidar360 软件处理后得到试验样地内桉树株数共有 358 株，激光雷达自动获取的单木树高及通过式 (5) 回归获得的单木胸径如表 4 所示。

利用式 (1) 计算桉树单株的材积并求和，可得到激光雷达测量的该试验样地的桉树总蓄积量为 73.757 m<sup>3</sup>。

### 2.3 两种方法调查结果比较

激光雷达测量值与实际测量值的差异见表 5。

总体看来，激光雷达测量的株数比实际株数偏少 27.09%，平均树高偏高 8.67%，平均胸径偏大 8.25%，蓄积量偏小 22.68%。究其原因，是由于 LiDAR360 采用的是基于种子点的单木分割算法，在无人为干预的情况下，点云数据经单木分割后所获取的林木数量，是基于种子点的冠层顶部的峰值数量，而低于林分主冠层的林木，受上层树冠的覆盖和包涵，通常会被忽略，因此激光雷达获取的总株数偏少。

由于激光雷达数据忽略低于主冠层的林木属于普遍现象，导致最后的总蓄积量比实测偏少。在大面积桉树成熟林的蓄积计算中，可以用 22.68% 的偏差对激光雷达测量的总蓄积量进行修正。其总蓄积量可表达为：

$$V = V_0 / (1 - 22.68\%) \dots\dots\dots (6)$$

其中  $V$  为总蓄积量， $V_0$  为激光雷达测量的总蓄积量。

## 3 结论与讨论

3.1 随着机载激光雷达技术在森林资源调查中的应用，将改变传统的森林调查模式，是提高调查数据准确性和调查效率的重要手段。机载激光雷达经过处理，可自动获取较大范围桉树人工林的株数、树高、冠幅等信息，利用桉树树高与胸径的强相关性可建立二者之间的回归模型，即

表 4 激光雷达获取的树高和胸径的统计分析  
 Table 4 Statistical analysis of tree height and DBH obtained by LiDAR

指标 Index	平均值 Average	最大值 Max	最小值 Min	标准差 Standard deviation
树高 /m Height	22.04	25.84	14.10	2.24
胸径 /cm DBH	16.13	20.61	9.34	2.19

表 5 激光雷达测量值与实际测量值的差异比较  
 Table 5 Difference comparison between the value obtained via LiDAR and field measured value

项目 Item	株数 Number	平均树高 /m Average height	平均胸径 /cm Average DBH	蓄积量 /m <sup>3</sup> Accumulate
激光雷达测量 LiDAR measurement	358	22.04	16.13	73.757
实际测量 Field measurement	491	20.13	14.80	90.485
差异值 Difference	133	1.91	1.33	16.728
误差占比 /% Error ratio	27.09	8.67	8.25	22.68

利用式(5)间接获取胸径,获得了株数、树高和胸径,就可估算测量区域的桉树蓄积量。

在无人为干预处理激光雷达点云单木分割的情况下,比较实地测量与激光雷达测量数据,激光雷达测量的株数比实际株数偏少27.09%,平均树高偏高8.67%,平均胸径偏大8.25%,总蓄积量偏小22.68%。这主要是由于在桉树成熟林中,受上层树冠的阻挡,激光雷达点云的单木分割算法难以将低于主冠层的林木纳入计算。由于不计算低于主冠层林木在激光雷达单木分割算法中属于普遍现象,桉树成熟林的总蓄积量可以采用式(6)的方法来对激光雷达测量的总蓄积量进行修正获得。

3.2 由于受郁闭度和地面灌草植被覆盖的影响,激光雷达点云难以直接打到地面,故激光雷达获取的树高较实际树高要低。本次试验区实测最高树木为27.0 m,而激光雷达测得的最高树高为25.84 m,其高差相差约1.1 m,这与其它研究发现的LiDAR技术测量树高比实际树高低0.3~3.0 m相符<sup>[17]</sup>。由于本次试验难以将激光雷达获取的单株林木与试验区的单株林木一一对应,需进一步研究激光雷达树高测量误差的原因。

此外,由于机载激光雷达测量无法准确获取单株林木的胸径,胸径是通过对试验区实际测量树高与胸径建立的回归模型,再与激光雷达测量的树高回归计算得出,仅能代表该试验区的树高与胸径关系,今后可进一步扩大测试区域,调整该回归模型使之更具普适性。

### 参考文献

- [1] 黄晖.我国营造桉树人工林的现状与发展对策[J].广西热带农业,2004(6): 42-43.
- [2] 谢耀坚.中国桉树人工林可持续经营战略初探[J].世界林业研究,2003(5): 59-64.
- [3] 张爱艳,龙玉.桉树人工林林木蓄积量调查方法对比分析[J].华东科技(学术版),2015(12): 119.
- [4] 徐誉远,胡爽,王本洋.无人机遥感在我国森林资源监测中的应用动态[J].林业与环境科学,2017,33(1): 97-101.
- [5] 钟映霞,周宇飞,陈世清,等.基于无人机遥感的森林火烧迹地面积调查应用[J].林业与环境科学,2019,35(2): 89-94.
- [6] 庞勇,李增元,陈尔学,等.激光雷达技术及其在林业上的应用[J].林业科学,2005(3): 129-136.
- [7] 柳祥来.机载激光雷达技术在森林资源调查中的应用[J].绿色科技,2019(15): 244-245.
- [8] 阮兰君,杨燕琼.遥感在森林生物量监测的应用[J].林业与环境科学,2016,32(2): 94-98.
- [9] 广东省林业局,广东省林业调查规划院.广东省森林资源调查常用数表[Z].广州,2009.
- [10] PULITI S, BREIDENBACH J, ASTRUP R. Estimation of forest growing stock volume with UAV laser scanning data: can it be done without field data?[J]. Remote Sensing, 2020, 12(8): 1245.
- [11] JAYATHUNGA S, OWARI T, TSUYUKI S. The use of fixed-wing UAV photogrammetry with LiDAR DTM to estimate merchantable volume and carbon stock in living biomass over a mixed conifer-broadleaf forest[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73: 767-777.
- [12] KRAUSE S, SANDERS T, MUND J, et al. UAV-based photogrammetric tree height measurement for intensive forest monitoring[J]. Remote Sensing, 2019; 11(7): 758.
- [13] MORSDORF F, ECK C, ZGRAGGEN C, et al. UAV-based LiDAR acquisition for the derivation of high-resolution forest and ground information[J]. The Leading Edge, 2017, 36(7): 566-570.
- [14] 郝红科.基于机载激光雷达的森林参数反演研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [15] 王濮.基于机载LiDAR的森林单木识别研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2018.
- [16] 刘学含.基于机载激光雷达的单木分割算法研究及系统开发[D].成都:电子科技大学,2020.
- [17] 吴娇娇,张亚红,杨凯博,等.机载激光雷达在林业中的应用[J].安徽农业科学,2016,44(35): 209-212.