

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.039

# 基于三维激光扫描的树木三维绿量测定\*

王佳 杨慧乔 冯仲科

(北京林业大学测绘与3S技术中心,北京100083)

**摘要:**利用三维激光扫描仪获取单株树木的点云数据,通过点云数据的处理提取测树因子,将树冠分割为多个不规则的台体,对每个台体的体积加和,近似为树冠体积。同时将绿视率引入三维绿量的计算中,以树冠不同视角绿视率加权平均和与树冠体积相乘计算树木三维绿量。实验选取了6个树种、共13棵树的点云数据,以树冠体积和绿视率2种方法计算三维绿量,结果表明:单纯以树冠体积计算平均三维绿量,针叶树大于阔叶树;而通过绿视率计算,阔叶树绿视率为55.41%,平均三维绿量为253.02 m<sup>3</sup>,而针叶树绿视率为30.75%,平均三维绿量为146.75 m<sup>3</sup>,不论是绿视率或者三维绿量,阔叶树均大于针叶树,与传统方法相比更符合树木的实际情况。

**关键词:**树木三维绿量 三维激光扫描 树冠体积 绿视率

中图分类号: S758 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)08-0229-05

## Tridimensional Green Biomass Measurement for Trees Using 3-D Laser Scanning

Wang Jia Yang Huiqiao Feng Zhongke

(Institute of GIS, RS & GPS, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A method applying 3-D laser scanning to estimate tridimensional green biomass of individual trees was proposed. For each objective tree, some tree parameters were obtained such as height, diameter at breast and crown width of an individual tree from cloud points, which were gotten from 3-D laser scanning. Then, through dividing crown into a plurality of irregular bodies, the volume of crown was regarded as the summation of volume of each body. Finally, the product of tridimensional green biomass and weighted average green looking rate from different perspectives and volume of tree crown was obtained. The method was tested on 13 trees, 6 species, and the results showed that the average tridimensional green biomass of broadleaf trees was 253.02 m<sup>3</sup> and 146.75 m<sup>3</sup> for coniferous trees. It was obvious that the average tridimensional green biomass of broadleaf trees was bigger than coniferous ones, which was contrary to results from traditional method.

**Key words:** Tridimensional green biomass of trees 3-D laser scanning Crown volume Green looking rate

### 引言

“绿量”最早是作为量化植被的生态效应而提出的,从生态学的能量转换和植物茎叶的生理功能出发,叶片越多,冠幅越大,植株进行光合作用的几率越大,相关的生态效应相对要高。三维绿量最早是作为城市园林绿化水平而提出的,称为“绿化三

维量”,指绿色植物茎叶所占据的空间体积,以 m<sup>3</sup> 来计算<sup>[1~2]</sup>。发展到后期则从二维的叶面积指数与三维的三维绿量2个方面来研究植被绿量。从量测方法而言,叶面积指数获取有2种方法:直接收获法和瞬间拍摄法。直接收获法具有破坏性,无法广泛执行;瞬间拍摄法指用鱼镜头拍摄植被垂直投影的影像,再由软件推估叶面积指数。而三维绿量的量

收稿日期:2012-08-11 修回日期:2012-09-19

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH34B01)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110014120002)

作者简介:王佳,副教授,主要从事林业装备工程研究,E-mail:wangjia2002\_0@163.com

通讯作者:冯仲科,教授,博士生导师,主要从事精准林业研究,E-mail:fengzhongke@126.com

测主要是将树冠模拟成球面体进行估算,此法在后期的研究较多。从量测方法上,为了大面积测定三维绿量,国内外研究大多采用航空遥感技术<sup>[3~6]</sup>。目前有3种方法测定三维绿量:平面量模拟立体量<sup>[7]</sup>、立体量推算立体量<sup>[8]</sup>与平面量推算平面量<sup>[9]</sup>。平面量模拟立体量是基于从航空二维平面的树冠影像,通过冠幅估测冠高,再推导出树冠体积;立体量推算立体量是由相邻两航片的左右视差确定植被高度,在航片上测出该植被的面积,再根据一定的计算经验公式计算三维绿量;平面量推算平面量是由树冠影像直接推导二维的叶面积指数,此法已简化了测定过程,所得结果已不是三维绿量。

从目前国内外对于绿量的研究可见,不管从二维还是三维的角度量测绿量都有一定局限性,二维的叶面积指数忽略了叶片空间结构且不利于大面积测量,三维的绿量将树冠模拟成几何体,但几何体内叶片所占空间密度被忽略,两种局限性都因受量测手段的限制。近年来,随着测量技术的不断更新,精确测量树冠体积的方法也不断出现,已有学者将三维激光扫描系统引入林业测树研究中,获得了高精度的树木枝干叶参数<sup>[10~12]</sup>。本文提出用三维激光扫描系统测定树木的三维绿量,在计算植被的体积时引入绿视率<sup>[13]</sup>作为叶片所占空间几何体的密度研究绿量,旨在提高单木三维绿量模型估计的精度。

## 1 实验设计与方法

树木三维绿量的测定实质上是树冠体积的测定,其根本出发点是树冠越大,叶面积越大,生态效益相对越好。然而树冠千差万别,有很多空隙,不像树干有一个稳定的实体外形。具有大致相同树冠体积的两棵树,叶片空间密度不同,若以体积统计计算三维绿量就会造成结果的不准确。本实验设计以三维激光扫描系统测定树冠体积为基础,并在各个扫描角度形成的二维图像上计算树冠的绿视率,由绿视率加权平均和乘以树冠体积得到树木三维绿量。最后对比以树冠体积和绿视率计算三维绿量2种方法的不同。

### 1.1 树木点云数据获取

采用 CyraX2500 型三维激光扫描仪<sup>[14]</sup>,在甘肃省小陇山林业局党川林场研究区内对不同树种、不同径阶的立木进行扫描。实验中严格控制在 1.5 ~ 50 m 范围内对单株样木进行扫描(至少 2 个测站);垂直方向夹角最大 40°,水平方向最大夹角 40°,三角基座 360°水平旋转;扫描分辨率垂直方向点与点间设为 0.5 mm,水平方向点与点间设为 10 mm。

内业处理具体处理流程<sup>[15]</sup>为:①坐标配准。实

验中采用同名点配对方式,强制约束各测站的数据于同一仪器坐标系统下。②三维建模。通过软件提供的坐标匹配功能将各测站测得的点云数据“拼合”为一个完整测量目标的点云模型。利用自动分段处理功能、抽取功能和 TIN 模型构造等功能,将测量目标的细部模型化,并最终完成整个测量目标的建模,生成树木点云数据,如图 1 所示。③应用处理。模型可以生成断面图、投影图、等值线图,根据具体应用需要可以将点云数据通过数据接口以 AutoCAD 和 MicroStation 格式输出<sup>[16]</sup>。此外,也可以对模型进行渲染以得到模型的晕渲图。通过对模型的量测,可以获得胸径、树高、树干任意处直径、树干体积、树冠的冠长、冠幅、体积、表面积等。

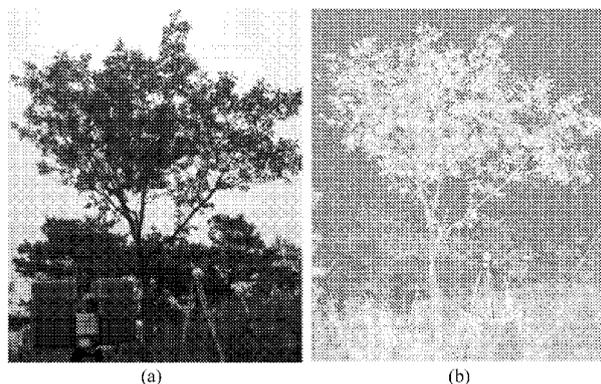


图1 树木图像与点云数据

Fig. 1 Picture and cloud point of trees

(a) 树木照片 (b) 树木点云数据

### 1.2 树冠体积估测方法

三维激光扫描成像系统可以获取树木的点云数据,但由于树冠之间存在许多空隙,激光束可能穿透树冠或在树冠内进行反射,所以得到的点云数据并不是完全反映树冠外层的空间特征。

构建树冠的实体三维模型估测体积的方法是把单木的整个树冠看成是由单个小的圆台组成的立体,通过对树冠部分点数据进行量测,求出每个小圆台的体积,其中最顶端的近似为一个圆锥体计算体积,然后对它们求和,算出整个树冠在空间所占有的体积,如图 2 所示。计算公式为

$$V = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n (S_{i-1} + S_i + \sqrt{S_{i-1}S_i})h_i + \frac{1}{3}S_n h_{n+1} \quad (1)$$

式中  $V$ ——树冠体积  $n$ ——分段数

$S_i$ ——任意树冠横断面积

$h_i$ ——任意段圆台高度

但是上述以圆台体积之和估测树冠体积的方法中,把每个树冠的横断面看作是圆形或椭圆形,而实际的树冠断面并非如此,结果是估测的树冠断面面积大于实际面积。对于树冠面积的计算,当区分的段

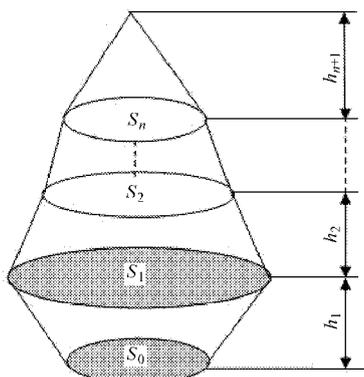


图 2 一般树冠测量方法示意图

Fig. 2 Measurement methods of common crown values

数无穷大时,树冠断面可以看成由头尾 2 个三角形和多个梯形构成,树冠断面面积为三角形和所有梯形面积之和,如图 3 所示,公式为

$$S_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (L_{i-1} + L_i) J_i \quad (2)$$

式中  $L_i$ ——第  $i$  段截取的边长

$J_i$ ——第  $i$  段距离

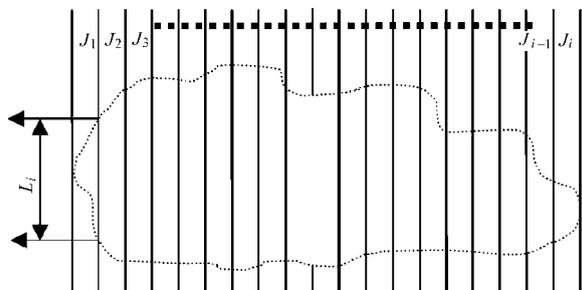


图 3 树冠横截面面积测算方法

Fig. 3 Measurement of crown cross-sectional area

此方法会将三维绿量计算得比实际值要大。如图 4 所示,可见图 4b 的体积肯定大于图 4a 的体积。

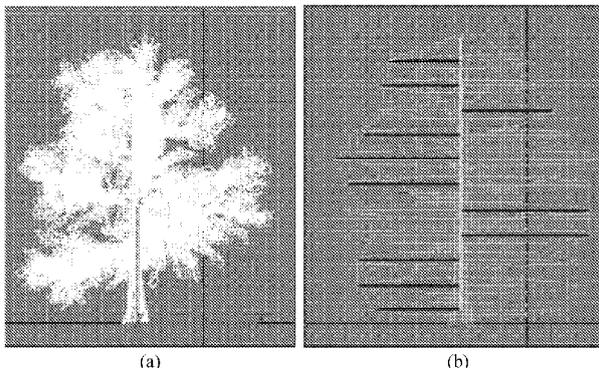


图 4 树冠形状对比示意图

Fig. 4 Comparison of crown shapes

(a) 实际树冠形状 (b) 圆台分段模拟树冠形状

### 1.3 绿视率计算树木三维绿量

绿视率是指在人的视野里绿色所占的比率,从视觉感官上反映了人们对绿色的感受。它是借助照

片来判断的绿化空间构成比率,其定义为

$$P_i = \frac{S_C}{S_T} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $P_i$ ——绿视率  $S_T$ ——视野总面积

$S_C$ ——视野中绿色所占面积

在本研究中,通过三维激光扫描获取的点云数据,通过不同的视角可以得到树木的不同视图,以冠高和冠幅构建矩形,矩形面积为式(2)中的总面积,计算每一个矩形内树叶投影所占的面积之比为该视图的绿视率。进而通过加权平均和的方式计算所有视图的绿视率之和,即为总绿视率,再与估算树冠体积相乘,计算树木的三维绿量,计算公式为

$$G = V \sum_{i=1}^n W_i P_i \quad (4)$$

式中  $G$ ——三维绿量

$W_i$ ——第  $i$  个视图权重

由于每个视图冠高是一定的,所以权重为冠幅之比。

## 2 实验结果与分析

实验数据为 6 个树种共 13 棵树的三维激光扫描的点云数据,其中油松和华山松为针叶树种,辽东栎、锐刺栎、麻凉子和白桦为阔叶树种。通过以上分析,计算每棵树三维模型的前视图和侧视图叶片所占面积的百分比,即绿视率(图 5)。通过式(4)计算三维绿量如表 1 所示。

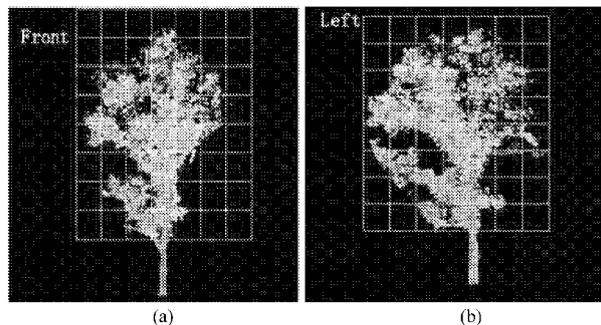


图 5 辽东栎 32 号树前视图和侧视图

Fig. 5 Forward-looking, side view of

East-Liaoning oak No. 32

(a) 前视图 (b) 侧视图

从表 1 可以看出,所计算的三维绿量将比树冠体积要小,主要原因是因为引入了前视图与侧视图的绿视率。实质是以计算树冠体积的圆台范围为界,计算叶片所占的密度。从以上数据得出,树冠的体积并不是接近模拟树冠圆台,所以引入绿视率计算三维绿量比树冠体积更为准确地反映植被空间体积量。

通过计算阔叶树与针叶树的绿视率以及三维绿

量,得出阔叶树的平均绿视率为 55.41%,平均三维绿量为 253.02 m<sup>3</sup>,针叶树绿视率为 30.75%,平均三维绿量为 146.75 m<sup>3</sup>;而如果按照以树冠体积的方式计算得出的平均三维绿量,阔叶树为 450.29 m<sup>3</sup>,针叶树为 465.19 m<sup>3</sup>。从上述数据可以分析得出阔叶树绿视率比针叶树要大,三维绿量相应也比针叶树大。从绿量的含义而言,表征植被进行生理光合作用能力的强弱,阔叶树的光合作用能力普遍比针

叶树强,绿量理应较大,而若以树冠体积直接代替三维绿量,计算的结果针叶树的三维绿量大于阔叶树,有悖于绿量的含义。

虽然本文提出引入绿视率的定义计算三维绿量,使计算结果有别于树冠体积,更符合绿量的含义。但即使引入了绿视率,其实也并非能真正的表征植被光合作用能力,因为此生理过程还与植被的健康状况、植被的环境等因素相关,有待进一步研究验证。

表 1 三维激光扫描树冠体积与三维绿量计算结果对比

Tab. 1 Calculated results comparison of crown volume by 3-D laser scanning and tridimensional green biomass

树种	冠高/ m	前视图 冠幅/m	侧视图 冠幅/m	前视图 绿视率/%	侧视图 绿视率/%	总绿 视率/%	树冠体积/ m <sup>3</sup>	三维绿量/ m <sup>3</sup>
辽东栎 32	11.61	7.96	7.01	54.87	43.52	49.56	614.69	304.61
锐刺栎 32	17.10	10.42	8.41	54.83	64.81	59.29	1 361.28	807.07
锐刺栎 38	13.46	5.83	4.65	56.52	51.56	54.32	219.51	119.24
锐刺栎 40	10.65	9.78	4.66	57.35	53.79	56.20	388.90	218.57
白桦 14	17.18	3.89	3.37	53.28	57.51	55.24	75.51	41.71
麻凉子 16	13.00	6.75	3.97	57.29	58.62	57.78	299.22	172.89
麻凉子 14	10.48	6.82	4.79	51.47	61.20	55.48	192.90	107.03
油松 18	13.68	8.90	5.76	28.36	29.14	28.67	1 089.70	312.38
油松 32	10.71	8.15	5.40	36.23	35.68	36.01	319.81	115.17
油松 36	8.73	5.12	3.86	26.49	24.28	25.54	72.77	18.59
油松 40	8.86	3.32	3.07	28.12	28.69	28.39	38.24	10.86
华山松 40	13.51	8.82	7.81	30.27	29.17	29.75	555.20	165.19
华山松 36	14.47	9.81	7.62	37.34	34.53	36.11	715.42	258.35

### 3 结论

(1)目前测定三维绿量的体积计算时,常用的分段模拟圆台体的方法会造成模拟体积远大于树冠实际体积,本研究采用了分段不规则形状断面面积模拟圆台体方法求体积,更能真实反映树冠实际形状,计算体积也更符合真实情况。

(2)常用的三维绿量计算均用树冠体积代替,而没有考虑到树冠之间的空隙,本研究在计算三维绿量时引入绿视率的概念,通过三维激光扫描点云数据提取树木不同视角下的绿视率,进而以求加权

平均和的方式计算树冠在空间中的实际体积。实验结果表明:如果单纯以树冠体积计算平均三维绿量,针叶树为 465.19 m<sup>3</sup>,阔叶树 450.29 m<sup>3</sup>,这明显与常识相悖,而通过绿视率计算,阔叶树绿视率为 55.41%,计算平均三维绿量为 253.02 m<sup>3</sup>,而针叶树为 30.75%,绿量为 146.75 m<sup>3</sup>,与传统方法相比更符合树木的实际情况。

(3)本文利用三维激光扫描技术提取树木点云数据,同时利用前视图和侧视图绿视率来计算树木的三维绿量,初步验证了在计算树木三维绿量时引入绿视率方法的可行性。

### 参 考 文 献

- 1 周坚华,孙天纵. 三维绿色生物量的遥感模式研究与绿化环境效益估算[J]. 环境遥感,1995,10(3):162~174.  
Zhou Jianhua, Sun Tianzong. Study on remote sensing model of three-dimensional green biomass and the estimation of environmental benefits of greenery[J]. Journal of Remote Sensing, 1995,10(3):162~174. (in Chinese)
- 2 刘立民,刘明. 绿量——城市绿化评估的新概念[J]. 中国园林,2000(5):32~34.
- 3 Atila Gul, Abdullah Gezer, Brian Kane. Multi-criteria analysis for locating new urban forests: an example from Isparta, Turkey [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2006,5(2): 57~71.
- 4 Jim C Y, Wendy Y C. Ecosystem services and valuation of urban forests in China[J]. Cities,2009,26(4): 187~194.
- 5 Hecht R, Meinel G, Buchroithner M F. Estimation of urban green volume based on single-pulse LiDAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2008,46(11): 3 832~3 840.
- 6 Meinel G, Hecht R. Determination of urban vegetation volume on the basis of laser scan data at non-leaf aerial flight times [C]// Proc. of NATSCAN Conference on Laser-scanners for Forest and Landscape Assessment, 2004.

- 7 周坚华. 城市绿量测算模式及信息系统[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 14~23.  
Zhou Jianhua. Theory and practice on database of three-dimensional vegetation quantity [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(1): 14~23. (in Chinese)
- 8 刘常富, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳城市森林三维绿量测算[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(3): 32~37.  
Liu Changfu, He Xingyuan, Chen Wei, et al. Tridimensional green biomass measures of Shenyang urban forests [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(3): 32~37. (in Chinese)
- 9 刘常富, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳城市森林绿量测算[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1208~1212.  
Liu Changfu, He Xingyuan, Chen wei, et al. Estimation of Shenyang urban forest green biomass [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1208~1212. (in Chinese)
- 10 罗旭. 基于三维激光扫描测绘系统的森林计测学研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.  
Luo Xu. Study on measuring of forest based on 3D laser scanning measurement system [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006. (in Chinese)
- 11 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.  
Feng Zhongke, Luo Xu, Ma Qinyan, et al. The study of tree crown based on 3D laser scanning imaging system [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Supp. 2): 52~56. (in Chinese)
- 12 熊妮娜, 王佳, 冯仲科, 等. 一种基于三维激光扫描系统测量树冠体积方法的研究——以油松为例[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊2): 74~77.  
Xiong Nina, Wang Jia, Feng Zhongke, et al. A research on the method of measuring the tree crown volume based on the three dimension laser scanning & mapping system—taking *Pinus tabulaeformis* as a case [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Supp. 2): 74~77. (in Chinese)
- 13 金福宇, 曹立科, 周大鹏, 等. 城市绿量研究进展[J]. 现代园林, 2006(5): 10~11.
- 14 郑德华, 雷伟刚. 地面三维激光影像扫描测量技术[J]. 铁路勘察, 2003, 29(2): 26~28.  
Zheng Dehua, Lei Weigang. The technique of land 3D laser scanning and imaging surveying [J]. Railway Investization and Surveying, 2003, 29(2): 26~28. (in Chinese)
- 15 范海英, 杨伦, 邢志辉, 等. Cyra 三维激光扫描系统的工程应用研究[J]. 矿山测量, 2004(3): 16~18.
- 16 张远智, 胡广洋, 刘玉彤, 等. 基于工程应用的3维激光扫描系统[J]. 测绘通报, 2002, 12(1): 34~36.  
Zhang Yuanzhi, Hu Guangyang, Liu Yutong, et al. Application of 3D laser scanning system in engineering projection [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2002, 12(1): 34~36. (in Chinese)