

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.047

基于立方体格网法的树冠体积计算与预估模型建立*

樊仲谋¹ 冯仲科¹ 郑君² 樊江川³ 闫飞¹ 邱梓轩¹

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 国家测绘工程技术研究中心, 北京 100039;
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 以北京地区 10 种常见乔木为研究对象, 通过三维激光扫描仪获取其点云数据, 利用树冠表面三角网配合立方体格网法计算其树冠体积, 与点云中提取所得的林木因子分析建立树冠体积和胸径、树高、平均冠幅、冠高的预估方程, 并检验其精度。以银杏为研究目标进行了实验, 结果表明: 银杏的树冠体积与胸径、树高、平均冠幅、冠高均显著相关, 通过分析选取了银杏树冠体积的三因子(胸径、平均冠幅、冠高)最优模型, 并对模型进行了检验, 检验结果表明, 模型拟合效果较好, 预估精度达到 90.5%, 可以使用该模型进行银杏的体积估算; 同时对所选其他树种进行三因子模型拟合, 模型检验结果表明, 三因子模型均能够较好地对该树种的树冠体积进行估测。

关键词: 树冠体积 预估模型 立方体格网法 三维激光扫描仪 精度评价

中图分类号: S718 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0320-08

Tree Crown Volume Calculation and Prediction Model Establishment Using Cubic Lattice Method

Fan Zhongmou¹ Feng Zhongke¹ Zheng Jun² Fan Jiangchuan³ Yan Fei¹ Qiu Zixuan¹

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China

3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: This article chooses ten kinds of common trees in Beijing as the research objects. A 3D laser scanner was used to get the point cloud data of target trees. The tree crown volume was calculated by using the combined method of cubic lattice method and canopy surface triangulation. The tree factors from point cloud data and the calculated tree crown volume were analyzed to establish the estimation equations of tree crown volume, breast diameter, tree height, average crown height and average crown width. The accuracies of these equations were verified. Taking ginkgo as research object, the test results showed that the tree crown volume of ginkgo was significantly correlated to the breast diameter, tree height, average crown width and crown height. Finally, a three-factor (breast diameter, average crown width, crown height) model was selected and verified on tree crown volume prediction of ginkgo. The results showed that the model had a good fitting accuracy of 90.5%. The three-factor model was also employed on other species of trees and the results showed it could be used on the prediction of other tree crown volumes.

Key words: Crown volume Prediction model Cubic lattice method 3D laser scanner Accuracy evaluation

引言

树冠是树木占据空间位置的地上主体, 是树木

吸收二氧化碳、放出氧气、制造有机物质的重要场所, 是树木呼吸、蒸发、生长、发育等生理机能活动的重要部位, 是森林计测学中的重要因子^[1-2]。用来

收稿日期: 2014-10-27 修回日期: 2014-12-15

* 国家自然科学基金资助项目(41371001)

作者简介: 樊仲谋, 博士生, 主要从事森林计测、摄影测量与林业遥感研究, E-mail: 676211585@qq.com

通讯作者: 冯仲科, 教授, 博士生导师, 主要从事森林计测学和精准林业研究, E-mail: fengzhongke@126.com

衡量树冠大小的指标一般包括冠幅、树冠半径及树冠断面积等绝对因子,也有树冠体积这样的复合因子^[3-5]。树冠绝对因子并不能综合地反映树冠落叶、截获光辐射等信息,而相关研究表明,树冠体积等复合因子不仅与林木生长、林木健康有密切关系,而且能够用其构建竞争指标(生长空间竞争指数、生长空间指数等),从而能够进一步分析林分的空间结构并进行优化调整^[6-7]。其中绝对因子的测量方法一般包括过去的围尺、轮尺、测高仪、测距仪器、目估以及现在的经纬仪、全站仪等^[8],而对于复合因子树冠体积来说,国内外相关的测量方法研究并不多,常见的有几何体法、平均断面求积法、树冠轮廓模型法以及近些年来三维激光扫描法等^[9]。

三维激光扫描仪可以高效率、高精度的获取物体表面的三维点云数据^[10],已经有多名科技工作者针对使用三维激光扫描仪提取树冠体积的方法,进行了研究和改进。熊妮娜等^[11]将树冠视为多个圆柱体和一个顶部的圆锥体,利用三维激光扫描仪计算圆柱体体积与圆锥体体积累加计算树冠体积。徐伟恒等^[12]的研究则指出,每一个圆柱的底面积不是单纯的标准圆而是一个不规则面,并提供了不规则面投影计算的方法。韦雪花等^[13]认为树冠不是实心体,内部还有许多空隙,所以利用边长0.2 m的体元套合点云数据,从而通过体元累积的方法来计算分层的台柱体体积,但是该方法并没有考虑到树冠内部因为遮挡形成的伪空隙,且对于树冠边缘部位的体积计算结果偏大。

本文以三维激光扫描仪为工具,以北京地区主要高校、森林公园、周边山区的典型树种为研究对象,利用点云数据测量其冠幅、胸径、树高、冠高等因子,并提出一种利用边长为1 cm的空间立方体与树冠点云建立的三角格网的空间关系计算体积的方法,以该方法计算的树冠体积数据作为真值,建立树冠体积预估模型,并对建立的模型精度进行评价。

1 数据和方法

1.1 数据采集

本研究的主要外业数据采集集中在北京市各大高校、森林公园和周边山区县,使用地面三维激光扫描仪 FARO Photon 120 针对主要树种进行点云扫描采集,主要参数见表1。扫描过程使用配套的参考球和标靶纸辅助完成,为了获得目标树的全部点云,在目标树周围均匀设立3个扫描站,3个公共参考球的设置位置要考虑到具体地形,在保证球体无遮挡,且在3个扫描站都能扫描到公共参考球的前提下进行。在目标树扫描过程中,如果参考球的位置

发生变动,则需要从第1站开始,重新进行扫描。试验按照不同径阶分布共扫描单木744株。从试验数据中选取了雪松、银杏等10个不同树种、树冠形状具有代表性的样木实测数据作为数据源,进行单木因子和树冠体积的提取并建立树冠体积预估模型。

表1 FARO Photon 120 产品参数

Tab.1 Product parameters of FARO Photon 120

参数	数值
测距范围/m	0.6 ~ 120
视野范围/(°)	300(垂直) × 360(水平)
测量速度/(点·s ⁻¹)	976 000
测距误差/mm	±2
数据存储型式	SD, SDHCTM, SDXCTM

在进行各目标树扫描前,对目标树进行每木检尺并记录,使用胸径尺测量胸径,使用测高仪测量第一枝下高和树高,使用卷尺测量南北冠幅和东西冠幅。

1.2 技术路线

本研究的技术路线如图1所示。根据研究目标选取目标树,对目标树分别进行每木检尺和三维激光扫描仪点云测量,每木检尺主要包括胸径、第一枝下高、树高、南北冠幅和东西冠幅的测量,三维激光扫描仪的内业处理包括数据预处理和后处理两部分,预处理包括数据配准、去噪和压缩,其中配准是利用3个参考椭球将3组扫描数据合成一个完整的目标树点云数据;去噪是去除合成后点云里的离散噪声点和点云内部的混合噪声点;压缩是通过压缩算法压缩点云数据,减少冗余数据,从而优化处理时间。

配准、去噪和压缩是在 FARO Scene 和 Microstation v8 软件中完成的,点云分形、胸径、树高、冠幅、冠高和树冠体积的立方体格网法体积计算则是以 C# 为编程语言在 Microsoft Visual Studio 2008 的开发环境中编程实现的。

1.3 数据处理

数据处理主要包括对经过预处理后的点云数据进行分形、单木因子提取和体积计算。考虑到总数据量的问题,不可能单独对每一株目标树的点云进行人工判读,所以需要利用分形算法对目标点云进行批量分形处理,将树冠点云与树干点云分离;单木因子提取是指对分形后的点云进行处理,提取高精度的胸径、树高、冠幅、冠高信息;体积计算是建立一个整体的三角格网来反映树冠的轮廓,使用边长为1 cm的小立方体去遍历该三角网,通过立方体与三角网的空间关系求解树冠体积。

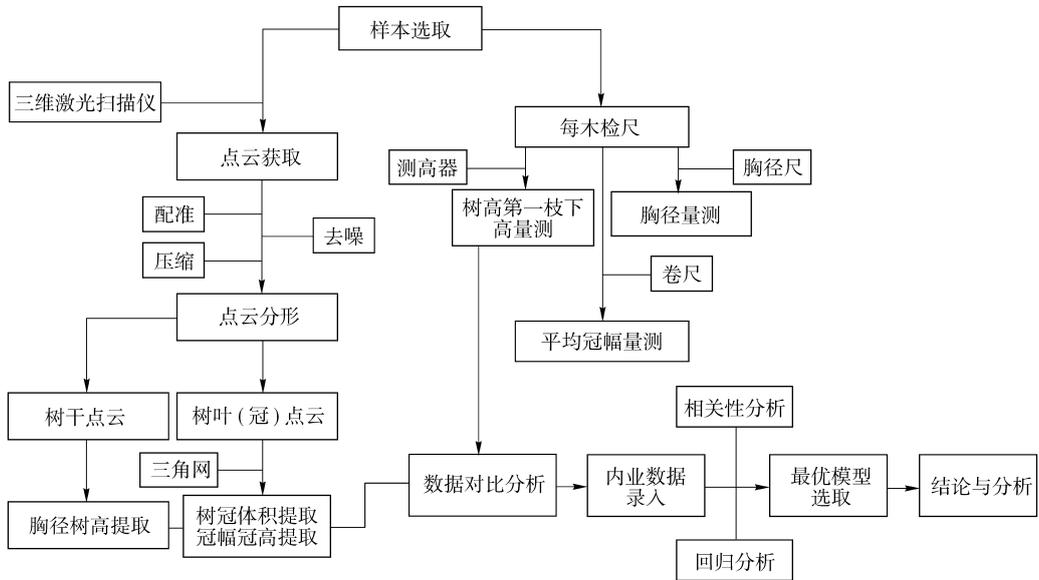


图1 技术路线

Fig. 1 Overview of methodology

1.3.1 分形处理

分形处理是将经过预处理的点云数据视为一个整体,基于树干和树叶的特征利用分形理论进行处理^[14]。按照树木生长特点,枝干一般为柱状体,而树干和树枝的弯曲较大,只有枝干的横切面才能认为是圆形,阔叶树的叶片大多都是扁平状,在树木中会存在弯曲度大的树叶;针叶树中叶片的模型都为针尖状。文中的分形处理就是采用这一规则进行提取。

在分形处理的时候,将经过预处理的所有点云数据看作一个立方体,对该立方体进行八叉树理论^[15-17]分割直到终止;对每个分割后的小立方体中以点云数据为三角形顶点建立三角格网,计算每个三角形的法向量并求其相邻两三角形的法向量夹角;当法向量夹角大于阈值时证明这段点云数据为平面数据,将该立方体中的点云数据记录为树叶;如果法向量夹角小于阈值时证明这段点云数据构成一个弧度,此时遍历其上一代立方体和下一代立方体,如果这些立方体中同样存在弧度信息且能一直迭代下去,则记录这段点云数据为枝干数据,若在其下一代数据中没有弧度信息则认为此段有弧度信息的数据为弯曲度较大的树叶,仍然记录为树叶。

1.3.2 单木因子提取

对分形后的树干点云和树冠点云进行处理,提取单木因子。通过获取树冠点云坐标在 X 、 Y 、 Z 方向上的最大值和最小值 X_{\max} 、 X_{\min} 、 Y_{\max} 、 Y_{\min} 、 Z_{\max} 、 Z_{\min} ,树干点云在 Z 方向上的最小值 Z_0 ,从中计算冠高 $C_H = Z_{\max} - Z_{\min}$,平均冠幅 $C_L = (Y_{\max} - Y_{\min} + X_{\max} - X_{\min})/2$,树高 $H = Z_{\max} - Z_0$ 。

如图2所示,胸径的提取是对所有树干点云中 $Z = Z_0 + 1.3$ 的点集 Q 进行坐标拟合,求解拟合的圆形半径 R 。

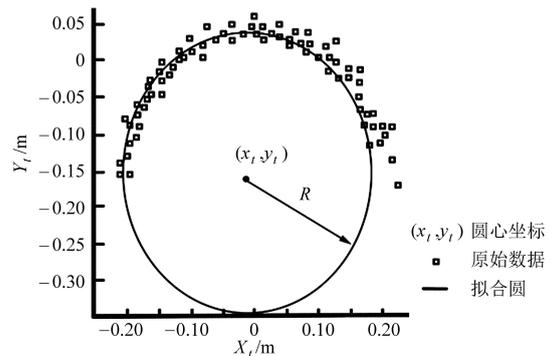


图2 1.3 m处的点云拟合圆形示意图

Fig. 2 Point cloud fitting schematic at 1.3 m

设 (x_i, y_i) 为拟合的圆心坐标, R 为半径,则有方程 $f(X, Y)$

$$X^2 + Y^2 - 2x_i X - 2y_i Y + x_i^2 + y_i^2 = R^2 \quad (1)$$

按照最小二乘原理需要投影点与拟合曲线上点的距离和为最小值,差值和计算公式为

$$Q(a, b, c) = \sum \delta^2 =$$

$$\sum (X_i^2 + Y_i^2 - 2x_i X_i - 2y_i Y_i + x_i^2 + y_i^2 - R^2)^2 \quad (2)$$

求解 x_i, y_i, R ,使差值和最小的一组 R 即为拟合的胸径。

使用传统外业调查获得的因子与点云中提取的因子进行对比分析,分析的结果显示,胸径的绝对偏差最大值为0.17 cm,平均偏差为0.11 cm;树高的绝对偏差最大值为2.73 m,平均绝对偏差为0.82 m;平均冠幅的最大绝对偏差是0.85 m,平均绝对偏差为0.43 m;冠高的绝对偏差最大值是2.07 m,平均绝对

偏差是 0.66 m。胸径的偏差均满足胸径的调查精度要求 ± 0.2 cm, 树高、冠幅、平均冠幅的偏差是由外业调查技术的限制引起的。所以应当使用三维激光扫描仪的点云数据中提取的单木因子进行预估模型建立。

1.3.3 树冠体积提取

对分形后的树冠点云使用凸闭包建立表面三角格网用以模拟树冠轮廓^[18], 考虑到树冠表面复杂和不规则情况, 对于生成的不规则三角网, 采用立方体网格法来遍历整个不规则三角网求解其内部体积。如图 3 所示, 按照高程 1 cm 对树冠模型做分段处理; 在被分段后的三角网树冠模型中, 使用边长为 1 cm 的小正方体去求解体积, 用计数 n 表示该分段的体积; 当小立方体 8 个顶点均处于三角网内部时, 即小立方体被三角网完全包围, 此时计数 1 (如图中第 1 层编号 55 的立方体)、部分处于三角网内部时计数 0.5 (65 号立方体)、在三角网外部时, 计数 0 (22 号立方体), 遍历所有的小立方体后的总计数 n 即为该树冠分段的体积; 将各个分段的体积累加便可得到最终的树冠体积。

如图 3 所示, 第 1 分段体积 $V_1 = 3.5 \text{ cm}^3$, 第 2 分段体积 $V_2 = 4.5 \text{ cm}^3$, 第 3 分段体积 $V_3 = 7.5 \text{ cm}^3$,

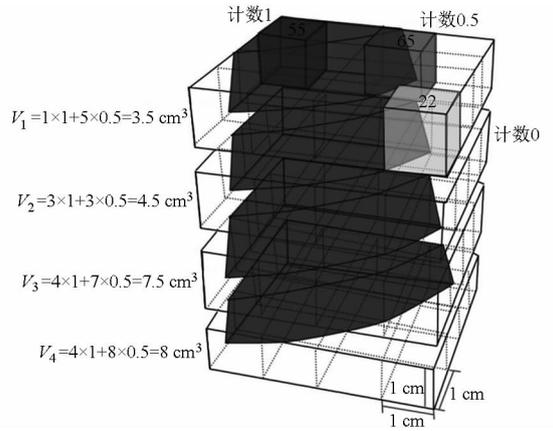


图 3 立方体网格法求体积示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cubic lattice method

第 4 分段体积为 $V_4 = 8.0 \text{ cm}^3$, 最终可得图中模型的体积为 $V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 23.5 \text{ cm}^3$ 。

由于树冠体积的真值无法获取, 所以采用几何体模型计算部分树木的体积与文中结果对比, 表 2 为通过点云提取的树冠体积和几何体法计算的树冠体积的对比。可以看出, 两种方法的平均误差达到了 27%, 而且没有任何规律, 这是因为树冠是一个不规则的整体, 以几何体模拟树冠的体积只能进行粗略地描述, 并不能准确地反映树冠的真实体积。

表 2 本文方法与几何体法体积对比

Tab. 2 Comparison between cubic lattice method and geometry method

编号	点云提取体积/m ³	几何体法体积/m ³	相对误差/%	编号	点云提取体积/m ³	几何体法体积/m ³	相对误差/%
1	3.361	5.265	36.2	11	57.761	71.265	18.9
2	4.146	3.588	15.6	12	61.772	44.417	39.0
3	15.717	27.462	42.8	13	66.324	42.667	55.4
4	28.941	41.430	30.1	14	76.043	103.147	37.1
5	30.193	40.853	26.1	15	82.265	69.641	18.1
6	49.371	34.741	29.6	16	93.753	122.210	22.3
7	63.953	49.952	26.6	17	112.751	127.813	11.8
8	38.253	47.823	25.0	18	207.201	159.206	30.1
9	43.470	52.948	12.8	19	399.851	354.128	12.9
10	54.234	43.166	25.6	20	828.878	668.631	23.9

采用的几何体模型是圆锥体模, 即

$$V_i = \pi C_L^2 C_H / 12 \quad (3)$$

相对误差的计算公式为

$$\delta = \frac{|V_i - V|}{V} \times 100\% \quad (4)$$

2 预估模型拟合与精度分析

2.1 树冠体积与选取变量的关系

对外业观测的点云数据按照上述方法进行处理, 最终获得数据的树种与数量见表 3, 考虑到篇幅问题, 本文仅介绍对银杏的具体模型研究过程, 其余树种只给出最终分析的模型结果。

根据计算得到的银杏数据, 将树冠体积 V 、胸径 D 、树高 H 、冠高 C_H 、平均冠幅 C_L 等变量进行相关分析, 结果见表 4, 分析可发现树冠体积与林木变量均显著相关, 对于银杏来说, 与平均冠幅的相关性最大, 与树高的相关性最小。

以林木变量为横轴, 树冠体积为纵轴建立散点图, 可见树冠体积与林木变量之间均呈强烈的幂指数函数关系, 如图 4 所示。

2.2 模型选取

为了充分利用样本信息, 使模型的预估误差最小, 本文用全部样本进行建模^[19]。考虑到树冠体积与林木变量的关系, 选取异速生长方程对树冠体积

表3 参与建模的树种与样本数量

Tab.3 Number of modeling species and sample

树种	拉丁文	平均树冠体积/m ³	最大树冠体积/m ³	最小树冠体积/m ³	样本数量
银杏	<i>Ginkgo biloba</i>	76.560	828.878	1.199	103
柳树	<i>Salix matsud</i>	175.527	997.207	20.119	62
杨树	<i>Populus</i>	133.597	691.443	5.072	79
栎树	<i>Koelreuteria paniculata</i>	63.603	359.492	2.344	61
梧桐(1、2、3球)	<i>Firmiana simplex</i> (L.)W.F.Wight	113.693	406.917	29.337	75
刺槐	<i>Robinia pseudoacacia</i>	214.440	1361.126	24.351	68
白皮松	<i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl	34.626	122.605	8.535	61
雪松	<i>Cedrus deodar</i>	101.145	565.243	10.606	62
油松	<i>Pinus tabulaeformis</i>	42.294	638.424	2.789	68
圆柏	<i>Sabina chinensis</i> Ant	12.094	39.092	1.965	83

表4 银杏树冠体积与林木变量的相关性

Tab.4 Correlation between canopy volume and other morphological variables for ginkgo

林木因子	与树冠体积的相关系数
胸径 D	0.878
树高 H	0.765
冠高 C_H	0.784
平均冠幅 C_L	0.881

进行拟合^[20-22],选用的变量包括胸径、树高、冠高、平均冠幅,采用的统计分析软件是1stOpt以及SPSS 20.0,选取的评价指标包括回归系数(R^2)和剩余标准差(RSME)。考虑到森林中林木变量的获取难度选择备选模型,对备选模型的精度,使用估计值的标准差(SSE)、总相对误差(TRE)、平均系统误差(MSE)、平均预估误差(MPE)和平均百分标准误差(MPSE)进行评价。异速生长方程的一般式为

$$V = n_1 x_1^{n_2} x_2^{n_3} \cdots x_i^{n_i} \quad (5)$$

式中 x_1, x_2, \cdots, x_i ——林木因子

n_1, n_2, \cdots, n_i ——待估参数

2.3 树冠体积拟合模型

以不同林木因子为变量的银杏树冠体积模型建立结果如表5所示,可以清楚地看出,在单因子模型(模型1~4)中,胸径和平均冠幅对树冠体积的解释能力都很高,达到了89%以上;在增加了林木因子的双变量模型(模型5~8)中,对于银杏来说,胸径树高和平均冠幅、冠高这两组模型的相关系数更加优秀;在三因子模型(模型9~11)中,模型10即胸径、冠高、平均冠幅模型对树冠体积的相关性最大($R^2 = 0.947$),而对于模型12即四变量模型来说,与其他模型相比,其 R^2 最大,但是并没有非常显著地提升模型精度($R^2 = 0.949$)。综上所述,在同时考虑到森林常规调查中胸径测量简单而且精度高、

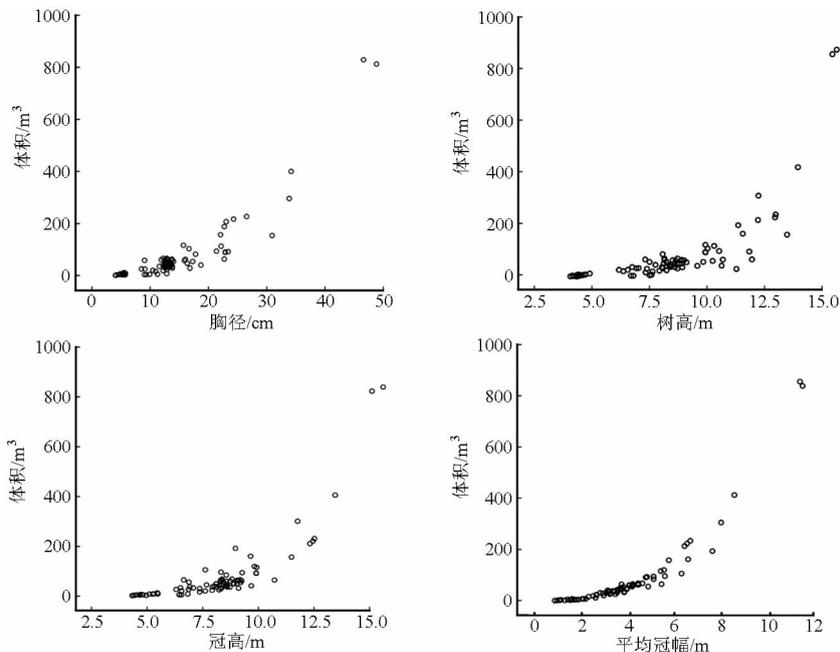


图4 树冠体积与林木变量的关系

Fig.4 Schematic diagram of relationships between ginkgo's canopy volume and other morphological variables

表 5 银杏树冠体积模型拟合结果
Tab.5 Modeling fitting results of ginkgo

备选 模型编号	变量	参数估计					相关指标	
		n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	R^2	RSME
1	D	0.073	2.408				0.891	30.163
2	C_L	0.919	2.833				0.902	18.332
3	H	0.060	3.150				0.719	55.729
4	C_H	0.059	3.666				0.817	39.182
5	D, H	0.015	1.950	1.210			0.910	29.721
6	C_H, C_L	0.779	0.587	2.251			0.931	12.074
7	D, C_L	0.582	0.726	1.844			0.903	18.247
8	D, C_H	0.110	1.520	1.179			0.889	20.112
9	D, H, C_L	0.401	0.187	0.624	2.138		0.914	10.860
10	D, C_H, C_L	0.492	0.519	0.545	1.663		0.947	9.073
11	D, H, C_H	0.105	1.309	-0.332	1.867		0.928	17.329
12	D, H, C_H, C_L	0.501	0.057	0.212	0.580	2.112	0.949	7.914

平均冠幅和树高测量较为繁琐且误差较大、以及模型精度的情况,选择模型 2、模型 6、模型 10 作为预估银杏树冠体积的备选模型。

2.4 模型精度评价

对模型 2、模型 6、模型 10 的精度,采用的评价指标包括估计值的标准差 (SSE)、总相对误差 (TRE)、平均系统误差 (MSE)、平均预估误差 (MPE) 和平均百分标准误差 (MPSE),计算式分别为

$$S_{SE} = \sqrt{\sum (y_i - \hat{y}_i) / (n - p)} \quad (6)$$

$$T_{RE} = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{\sum \hat{y}_i} \times 100\% \quad (7)$$

$$M_{SE} = n \sum (y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i \times 100\% \quad (8)$$

$$M_{PE} = \sqrt{nt_\alpha} (S_{EE} / \bar{y}) \times 100\% \quad (9)$$

$$M_{PSE} = \frac{\sum | (y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i |}{n} \times 100\% \quad (10)$$

式中 \hat{y}_i ——树冠体积模型拟合值
 y_i ——树冠体积点云提取值
 \bar{y} ——树冠体积平均值
 n ——样本单元数 p ——参数个数
 t_α ——置信水平为 α 时的 t 值

以上指标中,SSE 反映了模型的拟合优度,TRE 和 MSE 反映了拟合效果,MPE 反映的是平均树冠体积估计量的精度,MPSE 反映了单木树冠体积的估计值的精度。

检验结果如表 6 所示,可以看出,在 3 个备选模型中,模型 10 的各项指标都为最优,TRE 和 MSE 都控制在 $\pm 5\%$ 以内,表明模型拟合良好,MPE 在 9.5% 左右,说明该模型对树冠体积的预估精度在

90.5% 左右,MPSE 则表明了单木树冠体积估计误差的平均水平,约为 18.8%。模型 2 的 MPE 和 MPSE 表示该模型对银杏树冠体积的预估精度在 82% 左右,对单株银杏树冠体积估计的平均误差为 28%,所以,在实际应用中,考虑效率和外业成本的情况下可以采用模型 2 进行粗略的估计,而为了获取更加精确的拟合值,应当选取模型 10。

表 6 银杏树冠体积模型评价结果
Tab.6 Modeling test results of ginkgo

模型编号	SSE/m ³	TRE/%	MSE/%	MPE/%	MPSE/%
2	43.631	8.376	6.778	18.742	28.842
6	39.033	5.515	-5.871	12.071	22.892
10	33.965	-4.555	4.727	9.573	18.831

2.5 其余树种树冠体积预估模型结果及分析

同样选取三因子模型 ($DC_H C_L$ 模型) 对其余 9 种树种进行拟合,拟合的结果见表 7。对建立的模型进行精度评价,评价指标结果见表 8,可以看出, $DC_H C_L$ 三因子模型的评价指标都能满足评价要求, TRE 和 MSE 均控制在 $\pm 7\%$ 以内,部分树种如梧桐、雪松、油松和圆柏, TRE 和 MSE 的值在 $\pm 1\%$ 以内。除栎树以外,其他表中树种的 MPE 值均不超过 10%,表明三因子模型对于表中除栎树外树种的树冠体积估计的平均误差均小于 10%,对于栎树的树冠体积估计的平均误差为 11%。最大的 MPSE 为栎树的 19.291%,意味着三因子模型对表中单木树冠体积估计误差的平均值均小于 20%。以上评价指标的结果表明,对于北京地区的表中所列主要树种,可以使用 $DC_H C_L$ 三因子树冠体积预估模型预估其树冠体积,即

$$V = aD^b C_H^c C_L^d = 0.492D^{0.519} C_H^{0.545} C_L^{1.663} \quad (11)$$

表7 柳树等9种树树冠体积拟合模型
Tab.7 Modeling fitting results of other species

树种	变量	参数				相关指标	
		n_1	n_2	n_3	n_4	R^2	RSME
柳树	D, C_H, C_L	0.270	-0.760	1.737	1.637	0.959	13.992
杨树	D, C_H, C_L	0.407	0.490	1.087	1.088	0.941	22.75
栎树	D, C_H, C_L	0.548	0.367	1.046	1.338	0.946	12.172
梧桐	D, C_H, C_L	0.390	0.169	1.078	1.801	0.955	12.632
刺槐	D, C_H, C_L	0.552	0.279	1.253	1.462	0.947	39.77
白皮松	D, C_H, C_L	0.382	0.268	0.885	1.819	0.986	2.904
雪松	D, C_H, C_L	0.152	0.358	0.987	1.697	0.901	7.27
油松	D, C_H, C_L	0.324	0.218	0.834	1.653	0.961	9.299
圆柏	D, C_H, C_L	0.102	0.303	0.798	2.018	0.943	6.703

表8 柳树等9种树树冠体积模型评价结果

Tab.8 Modeling test results of other species

树种	SSE/m ³	TRE/%	MSE/%	MPE/%	MPSE/%
柳树	41.064	3.346	5.107	6.359	18.420
杨树	55.631	-2.512	-3.618	9.901	18.861
栎树	36.696	-2.480	-4.666	11.005	19.291
梧桐	28.844	0.596	0.217	1.401	8.649
刺槐	26.171	1.318	3.870	3.193	11.730
白皮松	3.456	-0.521	-1.835	3.056	7.545
雪松	12.641	0.960	3.557	3.826	9.865
油松	3.630	-0.869	-5.388	2.428	13.604
圆柏	7.708	0.962	6.258	4.142	18.658

3 结论

(1) 通过对北京地区常见树种使用三维激光扫描仪进行点云获取,脱离人工分离树冠点云的操作,使用分形算法自动分离树冠点云和树干点云,从点云中提取高精度的单木因子,并建立树冠点云表面三角网配合立方体格网计算其树冠体积,为计算树冠体积提出了一种可供选择的方法。

(2) 以从点云中提取的银杏树冠体积作为真值,点云中提取的单木因子作为变量,对其进行的建模研究可知,银杏树冠体积与胸径、树高、冠高和平均冠幅均显著相关,与平均冠幅的相关性最大。异速生长方程可以很好地拟合银杏树冠体积的预估方程,最优方程为胸径、冠高和平均冠幅的三因子模型 $V = 0.492D^{0.519}C_H^{0.545}C_L^{1.663}$ 。所建模型的精度评价说明模型具有较高的估测精度,可用于进行银杏树冠体积的估测。

(3) 可将胸径、平均冠幅、冠高三因子模型视为银杏树冠体积估测的最优模型。对文中其他树种建立预估模型并分析了模型的精度,结果证明三因子模型对文中其他树种的树冠体积拟合效果都较好,可以使用三因子模型对其进行树冠体积估测。

(4) 目前立方体格网法的不足主要体现在树冠点云内部的无效容积仍然无法消除,在未来的研究中考虑将树冠表面和树冠内部点云分离,针对位置采用不同的方法来计算树冠体积。

参 考 文 献

- 1 郑治刚,李怀玉,廖雅萍. 树冠空间体积的计算方法[J]. 林业资源管理,1986(1): 36-40.
- 2 卢昌泰,李吉跃,康强,等. 马尾松胸径与根径和冠径的关系研究[J]. 北京林业大学学报,2008,30(1):58-63.
Lu Changtai, Li Jiyue, Kang Qiang. Relationship between DBH and ground diameter as well as crown diameter of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Beijing Forestry University,2008,30(1):58-63. (in Chinese)
- 3 卢军,李凤日,张会儒,等. 帽儿山天然次生林主要树种冠长率模型[J]. 林业科学,2011,47(6):70-76.
Lu Jun, Li Fengri, Zhang Huiru, et al. A crown ratio model for dominant species in secondary forests in Mao'er mountain [J]. Scientia Silvae Sinicae,2011,47(6):70-76. (in Chinese)
- 4 吴明钦,孙玉军,郭孝玉,等. 长白落叶松树冠体积和表面积模型[J]. 东北林业大学学报,2014,42(5):1-5.
Wu Mingqin, Sun Yujun, Guo Xiaoyu, et al. Predictive models of crown volume and crown surface area for *Korean larch* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014,42(5):1-5. (in Chinese)
- 5 焦有权,冯仲科,赵礼曦,等. PSO嵌入SVM算法的活立木材积预报研究[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(1):175-179.
Jiao Youquan, Feng Zhongke, Zhao Lixi, et al. Research on living tree volume forecast based on PSO embedding SVM [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014,34(1):175-179. (in Chinese)
- 6 Akbari H. Shade trees reduce building energy and CO₂ emissions from power plants [J]. Environmental Pollution, 2002, 116(Supp.):119-126.
- 7 Laubhann D, Eckmullner O, Sterba H. Applicability of non-destructive substitutes for leaf area in different stands of Norway spruce

- (*Picea abies* L. Karst.) focusing on traditional forest crown measures[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(9): 1498 - 1506.
- 8 俞龙, 黄健, 赵祚喜, 等. 丘陵山地果树冠层体积激光测量方法与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 224 - 228.
Yu Long, Huang Jian, Zhao Zuoxi, et al. Laser measurement and experiment of hilly fruit tree canopy volume[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 224 - 228. (in Chinese)
- 9 巩垠熙, 何诚, 冯仲科, 等. 基于改进 Delaunay 算法的树冠三维重构单木因子提取[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 192 - 199.
Gong Yinxi, He Cheng, Feng Zhongke, et al. Amended Delaunay algorithm for single tree factor extraction using 3-D crown modeling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 192 - 199. (in Chinese)
- 10 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与展望[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(4): 41 - 45.
Zhao Yang, Yu Xinxiao, Xin Zhongbao, et al. Application and outlook of terrestrial 3D laser scanning technology in forestry[J]. *World Forestry Research*, 2010, 23(4): 41 - 45. (in Chinese)
- 11 熊妮娜, 王佳, 罗旭, 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): 61 - 65.
Xiong Ni'na, Wang Jia, Luo Xu, et al. Measuring tree crown volume based on three dimension laser scanning and mapping system-taking *Pinus tabulaeformis* as a case [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29 (Supp. 2): 61 - 65. (in Chinese)
- 12 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.
Xu Weiheng, Feng Zhongke, Su Zhifang, 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. (in Chinese)
- 13 韦雪花, 王卫国, 郑君, 等. 基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 235 - 240.
Wei Xuehua, Wang Yongguo, Zheng Jun, et al. Tree crown volume calculation based on 3-D laser scanning point clouds data [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 235 - 240. (in Chinese)
- 14 熊宇虹, 温志渝, 张流强, 等. 分形理论在光谱识别中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(4): 772 - 774.
Xiong Yuhong, Wen Zhiyu, Zhang Liuqiang, et al. Application of fractal theory to spectral signal recognition[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(4): 772 - 774. (in Chinese)
- 15 王泉德. 任意三角网格模型体积的快速精确计算方法[J]. *计算机工程与应用*, 2009(18): 32 - 34, 58.
Wang Quande. Fast and accurate volume calculation method for arbitrary triangular meshes [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009(18): 32 - 34, 58. (in Chinese)
- 16 邵正伟, 席平. 基于八叉树编码的点云数据精简方法[J]. *工程图学学报*, 2010, 31(4): 73 - 76.
Shao Zhengwei, Xi Ping. Data reduction for point cloud using octree coding[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2010, 31(4): 73 - 76. (in Chinese)
- 17 周波, 陈银刚, 顾泽元. 基于八叉树网格的点云数据精简方法研究[J]. *现代制造工程*, 2008(3): 64 - 67.
Zhou Bo, Chen Yin'gang, Gu Zeyuan. Data point reduction on octree cube algorithm [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2008(3): 64 - 67. (in Chinese)
- 18 武晓波, 王世新, 肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. *测绘学报*, 1999, 28(1): 20 - 38.
Wu Xiaobo, Wang Shixin, Xiao Chunsheng. A new study of Delaunay triangulation creation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(1): 20 - 38. (in Chinese)
- 19 曾伟生, 唐守正. 立木生物量方程的优度评价和精度分析[J]. *林业科学*, 2011, 47(11): 106 - 113.
Zeng Weisheng, Tang Shouzheng. Goodness evaluation and precision analysis of tree biomass equations [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(11): 106 - 113. (in Chinese)
- 20 Nowak D J, Noble M H, Sisinni S M, et al. People and trees: assessing the US urban forest resource [J]. *Journal of Forestry*, 2001, 99(3): 37 - 42.
- 21 Jakob Weis. Application and statistical analysis of terrestrial laser scanning and forest growth simulations to determine selected characteristics of Douglas-Fir stands [J]. *Folia Forestalia Polonica: Series A*, 2009, 51(2): 123 - 137.
- 22 陆霞梅, 周长芳, 安树青, 等. 植物的表型可塑性、异速生长及其入侵能力[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1438 - 1444.
Lu Xiamei, Zhou Changfang, An Shuqing, et al. Phenotypic plasticity, allometry and invasiveness of plants [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1438 - 1444. (in Chinese)