

基于三维激光点云数据的树冠体积估算研究

刘芳¹ 冯仲科¹ 杨立岩¹ 徐伟恒² 黄晓东¹ 冯海英¹

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 西南林业大学计算机与信息学院, 昆明 650224)

摘要: 树冠体积是预估树木生物量的重要参数之一。为了实现对树木冠体体积无损高精度量测, 随机抽取了6个树种、共计30棵树木的三维激光点云数据作为数据源, 对树冠体积的求算方法进行研究。首先, 对三维激光点云数据进行匹配、拼接、去噪及压缩等处理, 提取冠体点云数据; 其次, 提取每一棵样木树冠的边缘特征点; 最后, 应用不规则三角网 TIN 的原理算法计算冠体体积。本文所提取的边缘特征点能够最大限度地维持树冠冠体的整体不变形, 还能够继续去除部分冗余数据, 缩短了不规则三角网 TIN 的构建时间, 提高了计算效率; 此外, 树种包含有针叶树和阔叶树, 在冠形上既有针叶树所特有的冠体体态特征, 又有阔叶树的冠体体态特征, 其研究结果具有一定的代表性。本文采用的方法与已有文献计算结果对比表明: 均方根误差为 0.832, 平均绝对误差为 0.49, 平均相对误差为 1.75%, 可看出二者之间差异较小; 同时在 30 个样木中随机抽取 5 个样木的人工测量结果与本研究相比较, 取得的精度相对较好。采用本研所得结果精度较高, 能够满足生产需求。

关键词: 树冠体积; 三维激光点云; 边缘特征点; 不规则三角网

中图分类号: S758.1; TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0328-07

Estimation of Tree Crown Volume Based on 3D Laser Point Clouds Data

Liu Fang¹ Feng Zhongke¹ Yang Liyan¹ Xu Weiheng² Huang Xiaodong¹ Feng Haiying¹

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

2. Computer and Information Institute, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: The tree crown volume is one of the important parameters to estimate the biomass. In order to make an accurate measurement of the tree crown volume with non-destruction, this paper took 3D laser point cloud data, which were used as a data source, to calculate volumes of sample trees. The 3D laser point cloud data were randomly selected by six species, totally 30 trees. First of all, this paper extracted the point cloud data of tree crown volume from all points after matching, mosaic, denoising and compression etc. Secondly, it extracted the edge feature points from the tree crown through the programming algorithm. Finally, the crown volume was calculated by using the principle of irregular triangle net (TIN). In this paper, the edge feature points, extracted from the programming algorithm, can maintain the whole body of the crown. The algorithm can further remove the redundant data, shorten the construction time of TIN and improve the calculation efficiency. In addition, tree species also have certain representativeness. Because they included conifer and broadleaf trees, so the crowns not only have the crown body posture characteristic of conifers, but also have crown body posture characteristic of broadleaf trees. The results were as follows: the RMSE was 0.832, the average absolute error was 0.49, and the average relative error was 1.75%. Comparing with the artificial measurement results by selecting five sample trees randomly, the precision was relatively good. It can be seen that there are few gaps between the two results, of which the accuracy can meet the requirements of production.

Key words: tree crown volume; 3D laser point cloud data; edge feature points; irregular triangle net

收稿日期: 2015-12-20 修回日期: 2016-01-28

基金项目: 科技北京百名领军人才培养工程项目(Z131105000513003)和北京林业大学青年教师科学研究中长期项目(2015ZCQ-LX-01)

作者简介: 刘芳(1986—),女,博士生,主要从事森林计测、林业遥感与林业信息化研究,E-mail: fang1986927@126.com

通信作者: 冯仲科(1962—),男,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

引言

树冠体积、表面积是树木生物量计算中非常重要的参数,冠体的大小是预估树木生长量的基本依据之一^[1]。近年来,三维激光扫描技术在林业精准测树的应用上越来越受到人们的关注,其中用于无损立木树冠体积、表面积的测量与传统的方法相比较,极大地减少了木材的损耗和人力物力的投资,有效提高了立木精测树高、胸径及冠幅等林木因子的效率和精度。然而,经三维激光扫描树木后获得的点云数据量极大,可达到上百万个三维坐标点,给后期的数据处理带来很大的难度,因此,快速处理数据、精确构建体积模型、获取树冠冠体体积成为了研究者突破的难点。近年来,基于三维激光点云数据计算冠体体积的应用研究取得了较大进展^[1-7]。从三维激光扫描数据中快速处理数据、提取有用信息、提高工作效率是研究者们共同探索和追求的目标。本文在诸多软件格式兼容并可以进行互操作的前提下,拟采用 GIS 领域的 ArcGIS 软件来处理 FARO Scene 处理后的点云数据,即采用三维激光点云数据,通过提取树冠边缘特征点,借助 GIS 软件中 3D 空间分析功能的表面积体积计算原理——不规则三角网 (Triangulated irregular network, TIN) 计算树冠冠体体积。

TIN 能够定量研究地形的空间变化特征,它能够精确记录空间三维定位信息,且是各种地学分析、工程设计和辅助决策的重要基础性数据。目前,不规则三角网 TIN 已在 DEM 数据更新精化、水文分析、地学分析等领域有广泛应用^[8-13],但将三维激光点云数据作为数据源,应用 ArcGIS 软件的 TIN 模型算法来算树冠体的报道很少,且其他方法大都需要考虑树木冠体外形,或者把树木冠体当成实心体,并采用整体或分段的规则几何体进行模拟,然后计算体积。相比较而言,TIN 算法更具有构网快速、操作简单的优点。

为此,本研究提出利用 FARO Scene、Visual Studio 2010、ArcGIS 等软件,首先提取冠体边缘特征点,然后在 ArcGIS 软件中应用 TIN 模型算法快速提取树冠冠体体积,最后将计算结果与文献[14]方法进行精度验证与对比。

1 技术路线与数据获取

1.1 研究技术路线

本研究首先根据研究目标选取样木;然后利用测树枪^[15]的树高测量方法量测第一枝丫高;再采用三维激光扫描仪扫描样木,生成三维激光点云数据,进行数据处理,包括点云数据预处理和后处理 2 个

步骤;最后提取树冠体边缘点云数据,基于 TIN 不规则三角网的生成原理实现树冠冠体体积计算,将计算结果与文献[14]方法得出的计算结果进行精度验证。技术路线如图 1 所示。

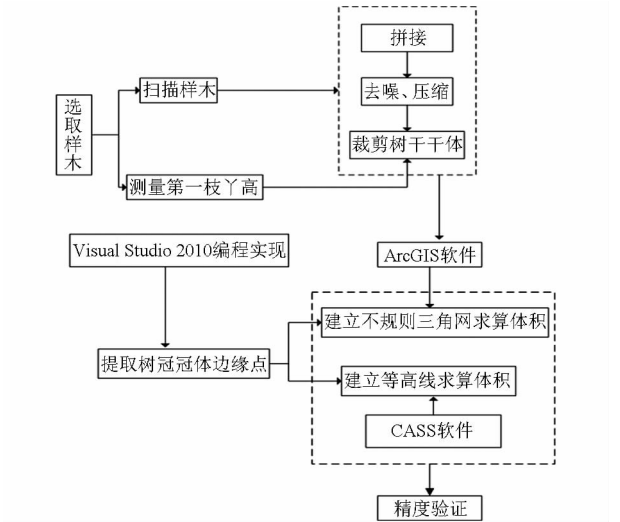


图 1 技术路线图
Fig. 1 Overview of methodology

1.2 数据采集

本文以北京地区主要高校、鹫峰森林公园、周边山区的树木为研究对象,利用三维激光扫描仪扫描样木,获取树木点云数据,随机选取白皮松、雪松、臭椿、侧柏、圆柏及银杏 6 个树种 30 棵样木作为试验样木树种(表 1)。

表 1 试验树种
Tab.1 Tree species

中文名	拉丁名	缩写
侧柏	<i>Platycladus orientalis</i>	Po
圆柏	<i>Sabina chinensis</i>	Sc
白皮松	<i>Pinus bungeana</i>	Pb
雪松	<i>Cedrus deodara</i>	Cd
臭椿	<i>Ailanthus altissima</i>	Aa
银杏	<i>Ginkgo biloba</i>	Gb

本研究使用 FARO LS880 型地面三维激光扫描仪(北京咏归科技有限公司)扫描样木。首先,设置三维激光扫描仪参数:扫描区域为水平方向 360°,垂直方向 155°(-90°~65°),水平分辨率 0.009°,垂直分辨率 0.009°,运用配套的参考球和标靶纸对样木进行扫描。其次,根据样木的相关地形对观测站进行设置,通常设为 3 站,站站之间的夹角为 120°(具体应根据样木实际的长势和地形来设置)。最后,放置好参考球后开始扫描,扫描过程中必须完成样木各测站点的扫描后,才能移动参考球,否则需重新扫描,扫描站点结果如图 2 所示。其中标靶纸只是作为参照物,对扫描的影响不大。与此同时,在

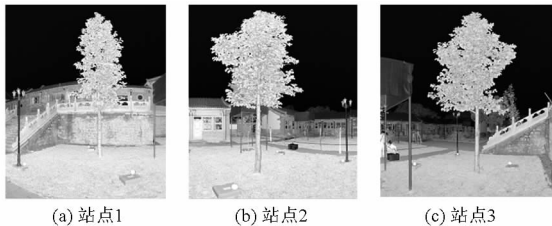


图2 三维激光扫描仪扫描站点结果

Fig.2 Stations scanned by 3D laser scanner

扫描前量测样木第一枝丫高的高度,并做好记录。

1.3 三维激光点云数据处理

三维激光点云数据处理主要包括点云数据预处理和后处理 2 个步骤。预处理过程借助 FARO Scene 软件实现。首先,将点云数据进行匹配与拼接处理:在 FARO Scene 软件中导入 3 个站点的数据,根据 3 个参考球的位置进行匹配,将所有扫描点数据拼接在一起,形成三维立体图像;其次,去除非样木的噪声点,删除合成后点云里的离散噪声点和点云内部的混合噪声点,保留样木的所有点数据;由于树冠冠体外形是树木的第一枝丫高以上的部分,因此,通过外业记录的第一枝丫高的高度,去除第一枝丫高以下干体所有点,最终得到每棵样木的树冠冠体。后处理过程主要是通过压缩、抽稀等算法减少冗余数据,将数据保存为 .xyz 格式的文件并导出。由于点云数据点与点之间的位置是相对的,且分布于三维空间的不同象限之中,为了便于后续冠体边缘特征点的读取,因此,将所有三维点数据在原来位置的基础上分别朝着 X 轴、Y 轴和 Z 轴正方向平移 20 个单位,使所有点都处于第 1 象限的空间范围之内,使数值保证大于零。

2 研究方法

2.1 树冠边缘点云提取算法原理

树冠结构主要是指树冠冠层中的枝条数量、分枝特性、叶面积及其分布以及冠长、冠表面积、冠体体积等因子在空间上的分布^[16-17]。因此,树冠冠体的构成不包含树干干体及冠体的内部点,而是一个可看成是通过提取冠体边缘点数据构建的类似包体的通透外部构造体。然而,在 FARO Scene 软件中拼接等处理后的点数据中仍然有内部点的存在,因此要将这些点数据去掉,同时由于每一个样木的冠体点云数据也都达到了几十万甚至上百万个,数据量大,冗余点较多,造成点云构网时间较长,同时构网算法的差异也导致同一目标物体点云拟合不一致的结果,大大降低了效率。提取树冠边缘特征点、减少噪声点的存在、加快冠体构网速度是提高效率的一种有效方法。目前最常见的散乱点云数据保留边

界特征完好性的研究有:LEE 等^[13]对点云进行空间栅格细分,在每个栅格上选择 1 个特征点。殷金祥等^[18]利用数据点周围以 R 为半径的球进行测量,得到测量球内的临近点数量作为该数据点面密度,以面密度确定曲面凹凸弯曲程度,进而确定点的简化距离阈值和精简数据点集。张丽艳等^[19]提出基于 3 种原则的简化算法,即按简化后的个数、点云密度以及删除一点后引起的法向偏差进行简化^[20]。为了提高效率,且保证树冠边缘特征的完好性,避免冠体失真,本文采用提取特征边缘点的算法,运算流程如图 3 所示。

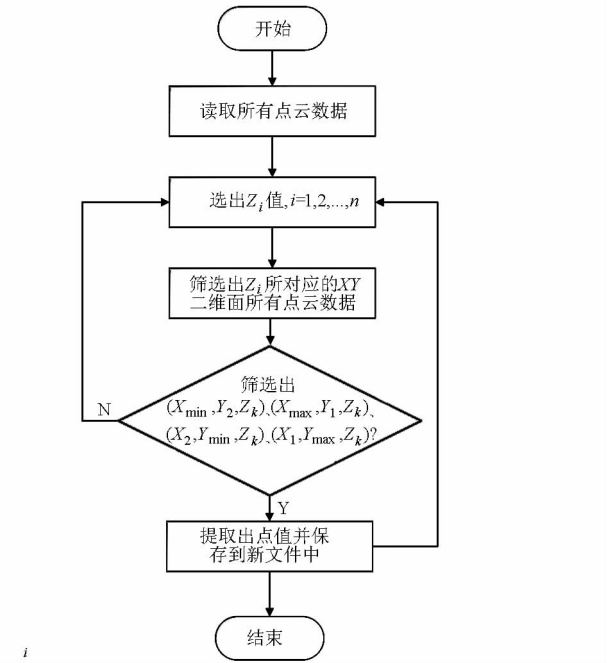


图3 二维平面内特征点提取流程图

Fig.3 Flow chart of feature points extracted in 2D plane

基本思路:点云数据是具有空间坐标信息的点 (X_i, Y_i, Z_i) 的集合体,对于每一个 Z 值有且仅有一个 XY 二维平面与之对应,在每一个 Z 值所对应的 XY 二维平面上提取该平面边缘上的点值 $(X_{\max}, Y_1, Z_k)$ 、 $(X_{\min}, Y_2, Z_k)$ 、 $(X_1, Y_{\max}, Z_k)$ 、 $(X_2, Y_{\min}, Z_k)$,为了保持每一个 XY 平面的基本形状不发生大的变化,本文通过 Visual Studio 2010 软件采用 C#语言编程算法来实现边缘特征点提取。

具体步骤:首先,以 Z 轴上的值为基准,通过 Visual Studio 2010 软件编写算法,筛选出每一个 Z 值所在的 XY 平面内的点 $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 、 $Y_{\min}$ 分别所对应的空间坐标点 $A(X_{\min}, Y_2, Z_k)$ 、 $B(X_{\max}, Y_1, Z_k)$ 、 $C(X_2, Y_{\min}, Z_k)$ 、 $D(X_1, Y_{\max}, Z_k)$,如图 4 所示,由于每一个最大值或最小值所对应的坐标有可能会存在多个点存在,因此,坐标点的个数大于等于 4 个,当程序运行过程中同一个点重复出现时,只保留一个;其次,在第 1 次提取出 $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 、 $Y_{\min}$ 所对应的边

缘点坐标值结束后,再次进行第 2 次程序运算,再一次提取出在同一平面内的边缘坐标点,得到另一组新的边缘坐标值。通过多次试验可知,每一棵样本木循环筛选 2 次所得的结果在冠体的外形特征基本上保持得比较好,通过此方法再次去除部分冗余的三维点云数据,加快了在 ArcGIS 软件中的不规则三角网 TIN 的构建,缩短了软件中的运算速度。这一算法是在保证冠体高度不变的前提下,使用每一个 Z 值所在的 XY 平面的边缘特征值 $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 、 $Y_{\min}$ 来控制这个面的范围,所以每一个相邻的面之间构造的三角网能够包含冠体的完整外部特征,且避免了冠体内部点参与构网的可能性,得到的是一个通透的外部构造体。

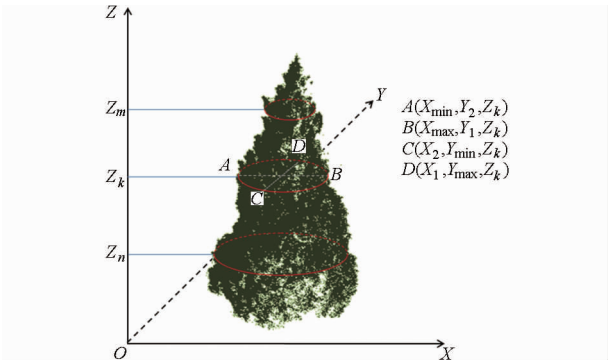


图 4 二维平面内特征点提取

Fig. 4 Feature points extracted in 2D plane

2.2 不规则三角网 TIN 的构建原理

树冠冠体构建是采用不规则三角网 TIN 构建原理实现的。不规则三角网又称为曲面数据结构,是利用随机分布的离散点数据建立连续覆盖整个研究区域且互不交叉、互不重叠的不规则三角形网络,其三角面的每一个节点都有坐标 X 、 Y 和高程值 Z 的信息^[21]。在所有可能的三角网模型算法中,狄洛尼 (Delaunay) 三角网法是最常用于离散点拟合树冠表面积的计算,其计算效率优于基于等高线的方法,同时与规则网格相比又减少了数据冗余^[8-9]。在 ArcGIS 软件中采用了约束性 Delaunay 三角测量,也就是除了沿隔断线的位置,其他地方都遵守 Delaunay 准则。Delaunay 三角形遵守平面图形的欧拉定理,其由对应的 Voronoi 多边形共边的点构成^[22]。三角网的生长算法^[23-26]主要是:首先在离散点集中找出相距最短的 2 个点,将它们连接成为一条 Delaunay 边,然后按 Delaunay 三角网的判别法则寻找以该线段为边的 Delaunay 三角形的第 3 顶点,依次循环处理所有新生成的 Delaunay 边,直到最终 Delaunay 三角网构建完成,构造过程如图 5 所示。其基本要求有 3 点:①TIN 是唯一的,无论从区域何处开始构建,最终都将得到一致的结果。②力

求最佳的三角形几何形状,每个三角形尽量接近等边形状。③ 保证最邻近的点构成三角形,即三角形的边长之和最小。

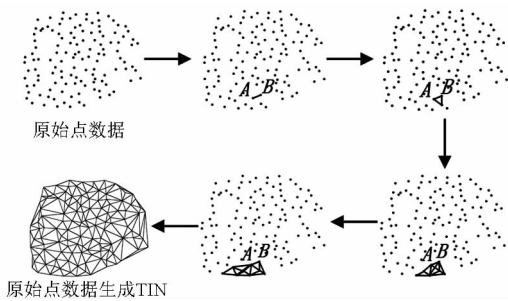


图 5 不规则三角网 TIN 的生成过程

Fig. 5 Generative process of triangulated irregular network

本文采用 ArcGIS 软件通过不规则三角网 TIN 的原理方法实现冠体提取,具有操作简单、效率高、适用性强的特点。通过将提取的每一棵样本木冠体边缘点数据导入 ArcGIS 软件中,通过 ArcToolbox 中的 3D 分析功能模块建立 TIN 模型,然后对软件操作直接实现树冠体积的计算。操作步骤如下:首先在 ArcGIS 软件中打开创建 TIN 的功能模块,其次导入单棵样本木点云数据,最后点击确定方可生成二维平面 TIN 图层,在 ArcScene 中可看到生成冠体的三维效果,如图 6 所示。

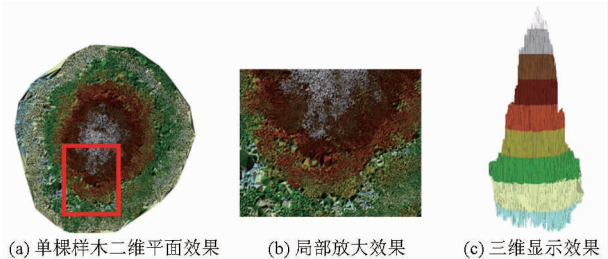


图 6 ArcGIS 软件中 TIN 图层效果

Fig. 6 TIN layer effects in ArcGIS calculating volume

3 结果与分析

本研究采用文献[14]的方法计算每一棵样本木的冠体体积,且将该结果作为真值与研究方法所得的结果进行精度验证。该方法是在不用伐倒立木的情况下,通过免棱镜激光全站仪获取树冠三维空间坐标,以此绘制树冠的等高线,运用等高线建立树冠的数字高程模型计算出树冠的体积,大大提高了工作效率,降低了劳动强度,尤其是避免了由于传统的树木体积获取过程中,需要砍伐大量的树木以获取区分断面直径、对森林造成损伤大的现象,具有广阔的市场前景,通过构建数字高程模型量测树冠的体积,在文献[14]中验证其精度达到了 96.852%,因此,将文献[14]方法所得结果作为参考值来验证本文的研究方法是可行的。30 棵样本木的冠体体积计

算结果如表 2 所示。

表 2 树冠体积的测量值与参考值比较
Tab.2 Crown volume comparison between measured values and reference values

编号	树种缩写	测量值/ m ³	参考值/ m ³	绝对误差/ m ³	相对误差/ %
1	Po	27.819	27.632	0.19	0.68
2	Po	28.480	28.275	0.21	0.73
3	Po	7.962	7.955	0.01	0.09
4	Po	51.558	51.295	0.26	0.51
5	Po	10.223	10.164	0.06	0.58
6	Sc	19.444	19.343	0.10	0.52
7	Sc	17.216	18.095	-0.88	4.86
8	Sc	14.642	14.660	-0.02	0.12
9	Sc	21.965	24.948	-2.98	11.96
10	Sc	5.559	5.596	-0.04	0.66
11	Sc	3.770	3.806	-0.04	0.94
12	Pb	71.629	70.938	0.69	0.97
13	Pb	9.056	9.038	0.02	0.20
14	Pb	10.022	9.976	0.05	0.46
15	Pb	10.208	10.051	0.16	1.56
16	Pb	26.976	26.869	0.11	0.40
17	Pb	9.255	9.285	-0.03	0.33
18	Pb	8.299	8.293	0.01	0.07
19	Cd	51.795	51.628	0.17	0.32
20	Cd	29.262	27.750	1.51	5.45
21	Cd	38.399	37.970	0.43	1.13
22	Cd	79.910	78.324	1.59	2.03
23	Aa	92.373	91.326	1.05	1.15
24	Aa	44.370	44.014	0.36	0.81
25	Aa	6.612	6.562	0.05	0.77
26	Aa	45.988	44.227	1.76	3.98
27	Gb	17.396	16.651	0.74	4.47
28	Gb	17.516	17.137	0.38	2.21
29	Gb	18.791	18.447	0.34	1.87
30	Gb	18.771	18.265	0.51	2.77
平均值				0.49	1.75

基于三维激光点云数据在 ArcGIS 软件中自动求算的树冠体积(A_v)作为测量值,通过文献[14]方法得到的树冠体积(C_v)作为参考值,采用测量值与参考值的均方根误差(RMSE)、绝对误差(V_a)、相对误差(m)、平均绝对误差($\bar{V}_a$)、平均相对误差($\bar{m}$)等指标对结果进行评价。其中,2 个结果间的 RMSE 越小,说明测量值精度越高;绝对误差 V_a 、相对误差 m 、平均绝对误差 $\bar{V}_a$ 及平均相对误差 $\bar{m}$ 用来衡量 2 个值之间的偏差。各指标计算公式为

$$V_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{vi} - A_{vi})^2}$$
 (1)

$$V_a = A_v - C_v$$
 (2)

$$m = \frac{|V_a|}{C_v} \times 100\%$$
 (3)

$$\bar{V}_a = \frac{\sum_{i=1}^n V_{ai}}{n}$$
 (4)

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$$
 (5)

式中 n ——样本数量

由表 2 可知,30 棵样本木中,测量值与参考值的均方根误差 RMSE 为 0.832;测量值与参考值的绝对误差 V_a 最大值为 -2.98 m^3 ,最小值为 0.01 m^3 ;相对误差 m 最大值为 11.96%,最小值为 0.07%; $\bar{V}_a$ 为 0.49 m^3 , $\bar{m}$ 为 1.75%,且由图 7 可明显看出测量值与参考值曲线几乎完全吻合。

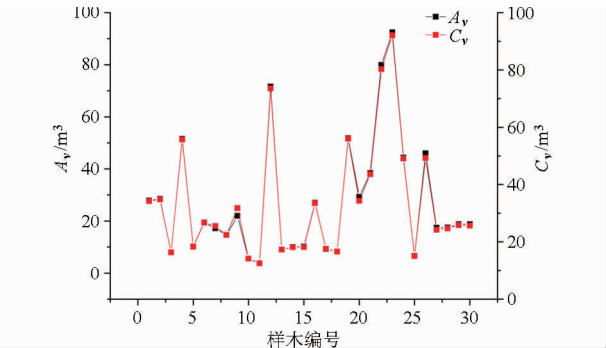


图 7 测量值 A_v 与参考值 C_v 统计曲线

Fig.7 Comparison of measured value A_v and reference value C_v

为了对研究精度的进一步验证,本文还将 A_v 与传统的人工测量所计算出的体积 M_v 进行对比。在 30 棵样本木中随机选取 5 个树种共 5 棵样本木的每木检尺值,包括树高、第一枝丫高、南北冠幅、东西冠幅 4 个参数,并通过相关几何体算法求出体积,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,在随机抽取的 5 棵样本木中,测量值与人工测量值的均方根误差 RMSE 为 3.337,绝对误差 V_a 最大值为 4.38 m^3 ,最小值为 1.65 m^3 ;相对误差 m 最大值为 19.38%,最小值为 10.12%, $\bar{V}_a$ 为 2.86 m^3 , $\bar{m}$ 为 15.08%,与外业人工实测差异不大,能够满足林业生产需要。

4 结束语

通过提取树冠冠体边缘点云数据,在最大限度地维持树冠冠体整体不变形的情况下,再次去除了部分冗余数据,缩短了 TIN 的构建,提高了计算效率。在 ArcGIS 软件中生成的结果与参考值对比可看出,均方根误差 RMSE 为 0.832,平均绝对误差 $\bar{V}_a$ 为 0.49 m^3 ,平均相对误差 $\bar{m}$ 为 1.75%,可看出二者之间差异较小,与人工量测值结果相比也有较高

表 3 测量值与人工测量值树冠体积比较

Tab.3 Crown volume comparison between measured values and artificial measured values

树种	树高/m	第一枝丫高/m	东西冠幅/m	南北冠幅/m	平均冠幅/m	人工测量值/m ³	测量值/m ³	绝对误差/m ³	相对误差/%
侧柏	4.51	1.33	2.73	3.69	3.21	8.570	10.223	1.65	19.29
臭椿	5.80	2.00	4.17	4.83	4.50	40.291	44.370	4.08	10.12
圆柏	10.99	0.35	2.10	2.20	2.15	12.876	14.642	1.77	13.71
雪松	4.94	0.41	5.64	5.07	5.36	34.015	38.399	4.38	12.89
白皮松	3.95	0.45	2.86	2.34	2.61	12.431	10.022	-2.41	-19.38
平均值								2.86	15.08

精度。采用本研 究所得结果精度较高,能够满足生 产需求。本研 究随机选取 30 棵样木,6 个树种,包 括针叶树和阔叶树,在冠形上既有针叶树所特有的 冠体体态特征,也有阔叶树的冠体体态特征,从某种 程度上说具有一定的共性。和传统的树木测量方式 相比,在精度上不仅满足生产需求,而且避免因使用 伐倒木测量的方法导致木材的大量损失,同时采用 计算机技术及数学、地学模型来求算冠体体积,在实 际生产活动上极大地节省了人力、物力及财力等,降 低了生产成本,提高了生产效率。

参 考 文 献

1 谢鸿宇,赵耀龙,杨木壮,等. 基于地面 LiDAR 的树冠体积和表面积测量方法研究[J]. 中南林业科技大学学报,2015, 35(4): 1-6,13.
XIE Hongyu, ZHAO Yaolong, YANG Muzhuang, et al. Measurement and calculation methods of volume and surface area of tree crown based on terrestrial 3D laser scanning system[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015,35 (4): 1-6,13. (in Chinese)

2 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)

3 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. 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)

4 何诚,冯仲科,袁进军,等. 基于数字高程模型的树木三维体积测量[J]. 农业工程学报, 2012,28(8): 195-199.
HE Cheng, FENG Zhongke, YUAN Jinjun, et al. Three-dimensional volume measurement of trees based on digital elevation model [J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(8): 195-199. (in Chinese)

5 巩根熙,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)

6 樊仲谋,冯仲科,郑君,等. 基于立方体网格法的树冠体积计算与预估模型建立[J]. 农业机械学报, 2015,46(3): 320-327.
FAN Zhongmou, FENG Zhongke, ZHENG Jun, et al. Tree crown volume calculation and prediction model establishment using cubic lattice method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(3): 320-327. (in Chinese)

7 韦雪花,王永国,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)

8 刘建军,赵文豪,蒯希,等. 一种基于 TIN 的地形特征点生成方法[J]. 地理信息世界, 2015,22(1): 91-94.
LIU Jianjun, ZHAO Wenhao, KUAI Xi, et al. A terrain feature points generation method based on TIN[J]. Geomatics World, 2015,22(1): 91-94. (in Chinese)

9 黄俊华,刘家兴,曾宇怀. GIS 支持下的 TIN 表面模型体积的计算[J]. 现代农业装备, 2010(4): 47-51.
HUANG Junhua, LIU Jiaxing, ZENG Yuhuai. Application of calculating earthwork volume with TIN surface model[J]. Mondem Agricultural Equipments, 2010(4): 47-51. (in Chinese)

10 陈南祥,李丹丹,李耀辉,等. 基于 TIN 模型的土方量计算方法研究及应用[J]. 安徽农业科学, 2013,41(26): 10870-10873.
CHEN Nanxiang, LI Dandan, LI Yaohui, et al. Research and application for the calculating method of the earthwork volume based on TIN model[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013,41(26): 10870-10873. (in Chinese)

- 11 陈朝霞,吴向南,朱记伟,等. 基于 ArcGIS 的土地开发整理挖填土方量计算研究及应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(2): 63–65,68.
CHEN Zhaoxia, WU Xiangnan, ZHU Jiwei, et al. Research and application of the excavation and backfilling earthwork calculation at land development and consolidation based on ArcGIS[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2015, 38(2): 63–65,68. (in Chinese)
- 12 赵秉东. 土石方计算软件在 CAD 下的设计与开发[J]. 地理空间信息, 2005, 3(1): 59–61.
ZHAO Bingdong. Design and development of earthwork calculating software under CAD[J]. Geospaatial Information, 2005, 3(1): 59–61. (in Chinese)
- 13 LEE K H, WOO H, SUK T. Point data reduction using 3D grids[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18(3): 201–210.
- 14 冯仲科. 一种基于高程等值线法量测树冠体积的方法:中国, 201110164615.4[P]. 2011–06–14.
- 15 冯仲科, 黄晓东, 刘芳. 森林调查装备与信息化技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 257–265.
FENG Zhongke, HUANG Xiaodong, LIU Fang. Forest survey equipment and development of information technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 257–265. (in Chinese)
- 16 廖彩霞. 树冠表面积及体积的预估[J]. 科技信息, 2010(16): 100–101.
LIAO Caixia. Prediction of crown surface area and volume[J]. Scientific and Technological Information, 2010(16): 100–101. (in Chinese)
- 17 廖彩霞, 李凤日. 樟子松人工林树冠表面积及体积预估模型的研究[J]. 植物研究, 2007, 27(4): 478–483.
LIAO Caixia, LI Fengri. The predicting models of crown surface area and crown volume for mongolian pine plantation[J]. Bulletin of Botanical Research, 2007, 27(4): 478–483. (in Chinese)
- 18 殷金祥, 陈关龙. 一种基于面密度概念的数据简化方法[J]. 现代制造工程, 2003(8): 39–40.
YIN Jinxiang, CHEN Guanlong. A method of reducing sampled points based on surface density[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2003(8): 39–40. (in Chinese)
- 19 张丽艳, 周儒荣, 蔡炜斌, 等. 海量测量数据简化技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(11): 1019–1023.
ZHANG Liyan, ZHOU Rurong, CAI Weibin, et al. Research on cloud data simplification[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2001, 13(11): 1019–1023. (in Chinese)
- 20 赵伟玲, 谢雪冬, 程俊廷. 保留边界特征的点云简化算法[J]. 黑龙江科技学院学报, 2013, 23(1): 83–88.
ZHAO Weiling, XIE Xuedong, CHENG Junting. Research on point cloud simplification with boundary features reservation[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2013, 23(1): 83–88. (in Chinese)
- 21 ESRI 中国(北京)有限公司. ArcGIS 三维分析使用手册[M]. 北京: ESRI 中国(北京)有限公司, 2002.
- 22 陈健飞. 地理信息系统导论[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2006.
- 23 俞亚磊. GIS 中 Delaunay 三角网与 Voronoi 图的相关问题研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2013.
YU Yalei. Research on the problems related to Delaunay triangulation and Voronoi diagram in GIS[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2013. (in Chinese)
- 24 刘学军, 龚健雅. 约束数据域的 Delaunay 三角剖分与修改算法[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 82–88.
LIU Xuejun, GONG Jianya. Delaunay triangulation of constrained data set[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 82–88. (in Chinese)
- 25 MARCVAN K, MAARTEN L, RODRIGO I S. Optimization for first order Delaunay triangulations[J]. Computational Geometry, 2010, 43(4): 377–394.
- 26 朱庆, 陈楚江. 不规则三角网的快速建立及其动态更新[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(3): 18–21.
ZHU Qing, CHEN Chujiang. Quick generation of TIN and its dynamic updating[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1998, 23(3): 18–21. (in Chinese)