

基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法^{*}

韦雪花¹ 王永国² 郑君¹ 王萌¹ 冯仲科¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 北京市测绘设计研究院, 北京 100038)

摘要: 针对树冠形状不规则, 树冠体积难以测量和计算的问题, 提出一种基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法——体元模拟法, 即以固定大小的体元模拟不规则的树冠形状。首先将树冠沿树高方向以 k 为步长进行等距离分段, 把每一段树冠的点投影到垂直于树高方向的平面上, 再对该平面划分成大小为 $k \times k$ 的像元, 根据投影到各个像元内点的数量, 判断该像元的有效性, 统计有效像元的数量 T , 则树冠体积为 T 个 $k \times k \times k$ 的体元之和。经试验, 当体元边长等于冠径的 $1/10$ 时, 计算的树冠体积达到稳定。该算法对于任何树种不用考虑树冠的形状, 减少了人为判别导致的差异, 适用于三维激光扫描树木树冠体积的计算。

关键词: 树冠体积 体元模拟法 三维激光扫描 点云

中图分类号: TN249; S758.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0235-06

Tree Crown Volume Calculation Based on 3-D Laser Scanning Point Clouds Data

Wei Xuehua¹ Wang Yongguo² Zheng Jun¹ Wang Meng¹ Feng Zhongke¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Institute of Surveying and Mapping, Beijing 100038, China)

Abstract: The tree crown volume is difficult to measure and calculate because of its irregular shape. A calculating method of tree crown volume, named voxel simulation method, was presented based on 3-D laser scanning point clouds data. The main idea of this method was to use a certain size of voxel to estimate tree crown. Firstly, tree crown was cut into segments with a k step-length along tree height. For each segments, all the points were projected to a plane that perpendicular to tree height. Subsequently, the plane was divided into pixels with size of $k \times k$. The effectiveness of each pixel depend on whether there were points projected in it. Then the effective pixels were counted and recorded as T . Finally, formula $T \times k \times k \times k$ was used to calculate the tree crown volume. When the k was equal to a tenth of crown diameter, the calculated crown volume was tending to stability. This algorithm did not need to consider the crown shapes of different tree species, which could reduce human's subjective factor influence. It could be used to calculate tree crown volume based on 3-D laser scanning technology.

Key words: Tree crown volume Voxel simulation method 3-D laser scanning Point clouds

引言

树冠是树木的重要组成部分, 是树木进行光合作用的主要场所。树冠的大小、树叶的数量和叶面

积大小, 是直接影响树木接收阳光、吸收二氧化碳、生成氧气及制造有机物质的重要因子。传统的森林资源调查, 林分的出材量及其经济价值是人们最关心的内容, 主要通过测量胸径、树高等林分生长因子

来推算林分蓄积量,而树冠因为其经济价值低、难以利用,在测量过程中往往被忽略。随着森林经营理念的改变,森林的生态效益及社会效益逐渐被重视。特别是对于城市森林,人们除了注重城市绿化的环境美化效果之外,还开始关注城市森林的滞尘、消减噪声、净化大气、娱乐休憩等生态功能及社会效益,而树木的生态功能作用大小与树体结构、叶表面特征、枝叶密度^[1]、树冠体积等参数直接相关,传统的森林调查方法和手段显然无法获取这些参数,难以满足现代城市森林发展的需要。

三维激光扫描技术是一种全自动高精度的立体扫描技术,又称为实景复制技术^[2]。它采用非接触高速激光测量方式进行数据采集,以大量离散的三维点云来表达扫描的研究对象,并通过相关的软件处理,进行坐标系转换和目标识别提取,拟合扫描对象的真实面貌。在林业调查中,对树木的三维扫描,相当于把树木无损地搬回室内进行研究。本文拟通过三维激光扫描技术对北京市常见绿化树种进行抽样调查,并设计基于点云数据的树冠体积算法,为城市森林生态效益的精确定量研究提供一个有效途径。

1 研究方法

1.1 数据采集及处理

本次外业数据采集是在系统抽样和典型随机抽样基础上,选择北京林业大学校园、清华大学校园、北沙滩桥南、鹭峰森林公园、大屯路东北苑公园、朝阳公园等高校及公共活动绿地,运用 FARO LS880 型地面三维激光扫描仪对常见绿化树种进行扫描。具体扫描过程如下:按径阶分布及立木生长状况,选择与周边立木树冠无交叉、重叠的具代表性的样木,先以传统林业调查方法测量树木的胸径、冠幅,用全站仪测量树高。然后,在树干胸高处朝南或朝北方向贴标靶纸,在样木周围无遮挡的地方均匀放置 3 个参考球,选择能同时见到 3 个参考球的均匀分布的 3 个位置进行架站,理想的测站位置间隔角度为 120°(以待扫描树为参考),安装上三维激光扫描仪并连接好相关设备,对扫描范围、扫描分辨率等参数进行设置之后,就可进行树木扫描。本研究设置扫描区域为水平方向 360°,垂直方向 155°,扫描分辨率每一圆周 10 000 点,每株样木需从不同角度扫描至少 3 次,完整扫描一株样木需 10 min 左右,扫描场景如图 1 所示。

将三维激光扫描数据导入计算机中,通过其配套软件 FARO Scene,对点云数据进行加载、套准、过滤、剔除、导出等内业处理过程。本研究主要研究树

木的树冠体积,因此,除了树冠之外,其余部分都为冗余点云,每株样木的最终处理结果为剔除主干之后的树冠点云数据,以 *.xyz 格式导出,并更改为 *.txt 格式存储。

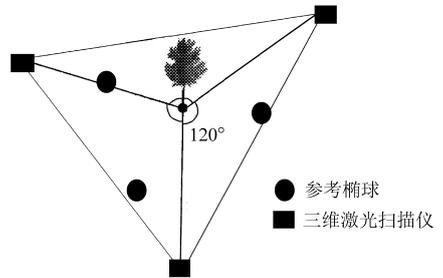


图1 三维激光扫描外业测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3-D laser scanning technology used in field survey

1.2 单木树冠体积的计算

三维激光扫描是近几年才兴起的一门新技术,目前在林业上应用研究的热点包括:用于森林资源调查的可行性^[3],拟合树干构建树木骨架^[4],计算材积、生物量^[5],树木三维可视化模拟^[6-7]等,而对于树冠的体积算法研究相对较少。树冠体积的计算,其难点在于树冠形状的不规则性。传统的计算单木树冠体积的方法,通常需要外业调查,实地采集主要树种的胸径、树高、冠径、冠高、树冠形态等样本数据,建立不同树种的回归模型,如冠径-冠高模型^[8]等,然后根据树冠的形态特征,为每棵树选配适当的立体几何图形^[9-10],再选择对应的公式计算体积。三维激光扫描技术,它相当于把树木实景“复制”到室内研究,可以随时获取树木的三维信息。因此,基于三维扫描点云的树冠体积的计算,较传统方法有了较大改进。熊妮娜^[11]和黄健等^[12]分别研究油松和果树的树冠体积,把三维激光扫描的点云树冠分段,区分成多个圆台和圆锥,分别计算体积后再累加得树冠体积。唐雪海^[13]认为每段树冠的截面并不是一个标准的圆,而是一个不规则面,把每段的树冠截面再分段计算后累加作为树冠的截面积。刘红伟^[14]则直接在 CAD 软件中参考点云数据构建三维拓扑框,建立起树冠三维几何体来计算出树冠体积。这些方法存在以下共同点:都需要考虑树木形状,或者找出树冠边缘特征点,把树冠当一个实体,整体或分段用规则几何体模拟,然后选配对公式计算体积。然而,树冠不是由它的外缘廓线围起来的实心体,其内部还有很多空隙,不能用一个或多个实心的规则几何体来描述。

在总结前人研究成果的基础上,本文提出一个基于点云数据的任意不规则树冠体积的计算方法,为方便下文引用,将此方法命名为“体元模拟法”。

其核心思想是,用无数个小立方体去模拟树冠形状,树冠由无限个大小为 $k \times k \times k$ 的体元堆积构成,计算有效体元个数之和即为树冠体积,如图 2a 所示。此算法的优点在于不需要考虑树冠形状,仅需要判断体元的大小及有效性,有效体元为树冠体积部分,无效体元为树冠之外或树冠内部空隙部分。此算法的实现,需要把三维点云分段投影到垂直于树高方向的平面上转换为二维点,相当于把立体的树冠平面化处理来进行体积计算^[15]。具体流程如下:

(1) 把树冠点云数据沿树高方向(Z 轴)以 k 为步长进行等距离分割,得到 n 个树冠分段,如图 2b 所示。当 k 无穷小, n 无穷大时,树冠体积可以认为是由 n 段底面积为 S_z 、高为 k 的不规则柱体组成,如图 2c 所示。

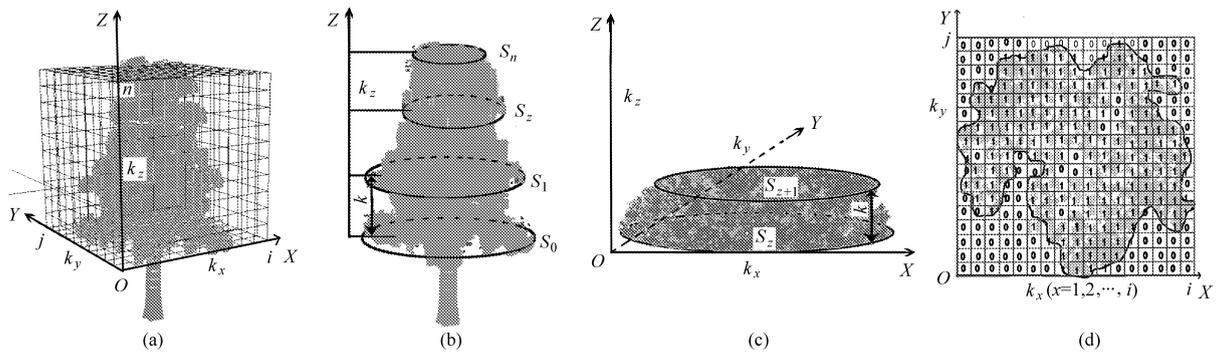


图 2 体元模拟法计算树冠体积原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of voxel simulation method in tree crown volume calculation

(a) 以 $k \times k \times k$ 大小的体元模拟树冠 (b) 将树冠以 k 步长等距离分割 (c) 分段求算体积 (d) 分析断面像元的有效性

以上算法以 C# 语言编程实现。计算时将树冠点云的 *.txt 格式文件导入到 SQL 数据库中,在软件界面中输入体元边长大小 k ,即可运算得到树冠体积及冠高、冠径因子。

1.3 树冠体积的体元大小确定

体元法模拟树冠,其体积计算的精度与体元边长的大小密切相关。图 3a、3b 所示为体元大小分别设置为 0.4 m 和 0.2 m 时,对一株冠高为 3.8 m,冠径为 1.4 m 的圆柏树冠模拟的效果。显然,体元边长越小,对树冠的模拟效果就越好。但是,如果体元边长过小,计算时间就很长,而体元边长过大时,对树冠形状的模拟就很粗放。而传统的规则几何体法计算树冠体积,对不规则树冠的模拟则更粗放,缺乏灵活性,如图 3c 所示。

为了寻找模拟树冠的最合适的体元大小,本文以 45 株圆柏为例,计算不同体元大小情况下的树冠体积进行分析。设置体元大小 k 为 0.1、0.2、...、1.0 m 的情况下,计算每株圆柏树冠体积 V_k ($k = 0.1, 0.2, \dots, 1.0$),构建比值指标 $r = K/k$ (即冠径与

(2) 计算每一段树冠横截面的面积 S_z 。将每一段树冠的点云数据,投影到垂直于树高方向的 XY 平面上,同样,沿相互垂直的 X 、 Y 轴方向以 k 为步长进行等距离分割,生成 $i \times j$ 个像元。根据此段树冠投影到每个像元内的点,逐个像元进行判断,像元内包含有树冠投影的点云时为有效像元,记为 1,反之,像元内没有包含点云数据时,记为 0,统计有效像元的数目为 T_z ,有效像元个数与单位像元面积的乘积即是树冠横截面面积,如图 2d 所示。树冠横截面 S_z 的计算公式为

$$S_z = kkT_z \quad (z = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

则树冠体积 V 的计算公式为

$$V = S_1k + S_2k + \dots + S_nk =$$

$$kkk(T_1 + T_2 + \dots + T_n) = k^3 \sum_{z=1}^n T_z \quad (2)$$

体元边长比), K 为冠径。分析比值 r 和 V_k 的变化趋势,如图 4 所示。可见, r 与 V_k 呈幂函数关系, r 越大, V_k 越小,当 r 约为 5 时,曲线有一个拐点,随后, V_k 值变化趋于缓和,当 $r = 10$ 时, V_k 几乎不再变化。所以,当 $K/k > 5$,即体元的边长 $k \leq K/5$ 时,对树冠体积的模拟效果已达良好,边长 $k \leq K/10$ 时,计算的树冠体积已趋于稳定。本研究选用的 45 株圆柏冠径范围是 1.36 ~ 3.61 m 之间,平均冠径为 2.39 m,根据 $k \leq K/10$ 计算,选择树冠体积计算的体元边长为 $k = 0.2$ m。经过试验,一台 CPU 为 3.40 GHz,内存为 4.0 GB 的台式计算机,计算一株圆柏的树冠体积所需时间为 1 ~ 5 min,运算时间与每株树的树冠大小及点云数量有关。

2 数据分析及结果

2.1 树冠因子的提取及精度分析

为了检验三维激光扫描技术测量树冠因子的精度及可靠性,本研究对 45 株圆柏,通过编程自动获取树冠点云数据 X 、 Y 、 Z 方向上的最大值和最小值:

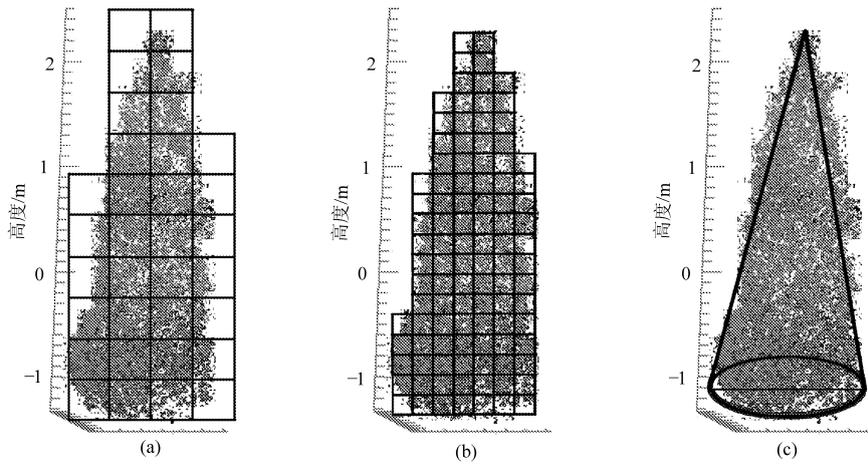


图3 不同体元大小与圆锥体对圆柏树冠模拟效果示意图

Fig.3 Effects of different voxel size and cone on tree crown simulation

(a) 体元边长 $k=0.4$ m (b) 体元边长 $k=0.2$ m (c) 规则图形(圆锥体)

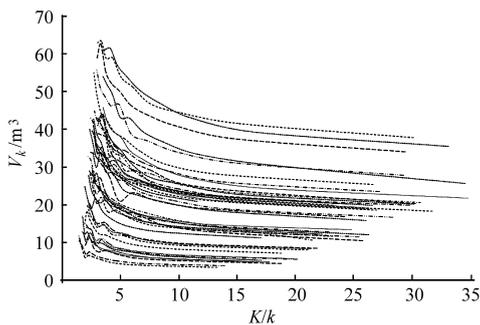


图4 体元模拟法计算的树冠体积 V_k 随 K/k 的变化趋势图

Fig.4 Tendency of tree crown volume V_k changed with K/k ratio with voxel simulated method

X_{\max} 、 X_{\min} 、 Y_{\max} 、 Y_{\min} 、 Z_{\max} 、 Z_{\min} 。则三维激光扫描的树冠冠高为 $h = Z_{\max} - Z_{\min}$ ，冠径为 $K = (Y_{\max} - Y_{\min} + X_{\max} - X_{\min})/2$ 。与外业传统方法测量的冠径、冠高相比，根据公式 $\delta = (\theta - \hat{\theta})/\theta \times 100\%$ (δ 为相对误差， θ 为实测值， $\hat{\theta}$ 为扫描值)，计算相对误差来分析点云数据获取树冠参数的精度。由表1的计算结果可见，45株圆柏冠高的平均相对误差为8.9%，冠径平均相对误差为9.5%，可见，三维激光扫描的树冠因子与外业的实测值相差不大。

2.2 体元模拟法与传统的规则几何体方法计算树冠体积比较

由于树冠体积的真值无法获取，而体元模拟法的体元边长越小，其计算出的树冠体积越稳定，可以认为，体元越小，对树冠的模拟越精细，计算出来的树冠体积越接近真值。同时应用传统的规则几何体法和体元模拟法计算45株圆柏的树冠体积，以体元模拟法计算结果为真值，计算两种方法获取树冠体积的相对误差。

用圆锥体模拟圆柏树冠体积的计算公式为

$$v_t = \pi x_t^2 y_t / 12 \quad (t = 1, 2, \dots, 45) \quad (3)$$

式中 x_t ——第 t 株圆柏冠径，m

y_t ——第 t 株圆柏冠高，m

x_t 、 y_t 均为树冠点云扫描值。

树冠体积相对误差计算公式

$$\Delta E_t = \frac{|v_t - V_t|}{V_t} \times 100\% \quad (4)$$

式中 ΔE_t ——第 t 株圆柏树冠体积计算相对误差

V_t ——第 t 株圆柏体元模拟法计算的树冠体积

树冠体积平均误差计算公式

$$\bar{\Delta E} = \frac{\sum_{t=1}^{45} \Delta E_t}{45} \quad (5)$$

式中 $\bar{\Delta E}$ ——45株圆柏树冠体积的平均相对误差

计算结果如表1所示，传统方法相比体元模拟法计算的45株圆柏的树冠体积，平均相对误差达44.75%，其中，第28号圆柏树冠体积相对误差最小，为20.4%，第21号相对误差最大，为58.5%。原因是树冠本身是不规则的，而人为地以圆锥体模拟圆柏树冠，只能对树冠进行粗略描述，圆柏的树冠越接近标准的圆锥体，其体积计算精度越高，与体元法计算的结果相对误差就越小。

3 讨论

由于本文只研究单株树木的树冠体积，需要人工手动剔除非树冠的点云数据。而新一代三维激光扫描仪可以直接进行彩色扫描，点云数据加上色彩信息之后，可方便地进行点云分类，从而实现树冠的自动提取，再应用体元模拟法，编程实现批量的树冠体积计算，提高点云数据处理及计算效率。理论上对于单株树冠和对多株树木或整个林分的树冠，甚至包括灌木、草本，都可以同样计算体积，进而可实现快速提取城市森林树冠体积。所以，基于三维激

表1 三维激光扫描技术及体元模拟法获取冠高、冠径和树冠体积计算精度分析

Tab.1 Accuracy analysis of tree crown height, diameter and volume with 3-D laser scanning technology and voxel simulation method

树木 编号 <i>t</i>	实测值/m		扫描值/m		体积计算值/m ³		相对误差/%		
	冠高	冠径	冠高	冠径	圆锥体法	体元模拟法	冠高	冠径	体积
1	8.46	1.64	7.432	1.706	5.66	11.25	12.2	4.0	49.6
2	7.71	2.18	7.340	2.147	8.86	15.44	4.8	1.5	42.6
3	4.23	1.40	3.830	1.391	1.94	4.47	9.5	0.8	56.6
4	4.08	1.36	3.670	1.329	1.70	4.05	10.0	2.0	58.1
5	7.30	2.31	6.073	2.630	11.00	21.24	16.8	13.9	48.2
6	10.64	2.15	8.299	2.319	11.69	22.36	22.0	7.9	47.7
7	8.66	2.30	7.287	2.423	11.20	19.07	15.9	5.3	41.3
8	10.37	2.03	8.345	2.651	15.35	32.38	19.5	30.9	52.6
9	8.56	2.02	7.045	1.982	7.25	14.72	17.7	1.9	50.8
10	8.44	2.85	7.937	3.184	21.07	27.99	6.0	11.7	24.7
11	8.94	2.49	7.919	2.756	15.74	27.37	11.4	10.7	42.5
12	6.05	2.76	6.591	2.661	12.22	22.24	8.9	3.4	45.1
13	3.98	2.30	4.559	2.109	5.31	9.23	14.5	8.4	42.5
14	4.36	1.96	4.617	2.137	5.52	9.60	5.9	9.3	42.5
15	4.26	2.00	4.305	2.185	5.38	9.65	1.1	9.3	44.2
16	3.46	1.90	3.496	1.984	3.60	6.78	1.0	4.7	46.9
17	3.16	2.01	3.328	2.014	3.53	6.57	5.3	0.5	46.2
18	5.97	2.09	4.560	1.883	4.23	8.35	23.6	9.9	49.3
19	5.01	2.56	5.711	2.982	13.30	22.02	14.0	16.7	39.6
20	5.19	2.47	5.352	3.032	12.88	23.71	3.1	23.0	45.7
21	4.51	1.99	4.465	2.228	5.80	13.97	1.0	12.0	58.5
22	5.97	2.16	5.765	2.548	9.80	13.28	3.4	17.9	26.2
23	5.58	3.03	6.007	3.787	22.55	32.06	7.6	25.1	29.7
24	5.15	2.88	5.142	3.074	12.72	23.10	0.2	6.9	44.9
25	5.18	2.49	5.377	2.698	10.25	20.91	3.8	8.6	51.0
26	7.82	2.18	7.433	2.311	10.39	20.90	5.0	6.0	50.3
27	6.14	2.02	5.662	2.287	7.75	14.74	7.8	13.5	47.4
28	5.99	2.68	6.119	3.483	19.43	24.39	2.1	30.2	20.4
29	6.08	2.74	6.247	2.837	13.16	18.94	2.7	3.7	30.5
30	6.65	2.48	6.429	2.723	12.48	26.18	3.3	9.8	52.3
31	6.39	2.41	7.300	2.628	13.20	21.83	14.2	9.2	39.5
32	3.45	1.60	4.133	1.710	3.16	6.55	19.7	7.0	51.7
33	3.25	1.78	3.481	1.776	2.87	5.80	7.1	0.0	50.5
34	4.22	2.35	5.083	2.482	8.20	14.94	20.5	5.8	45.1
35	4.34	2.58	4.797	2.319	6.76	13.53	10.5	10.1	50.1
36	3.49	1.60	3.762	1.642	2.66	5.85	7.8	3.0	54.6
37	7.30	2.45	7.947	2.945	18.04	37.58	8.9	20.4	52.0
38	7.14	2.91	7.997	2.929	17.96	31.16	12.0	0.7	42.4
39	9.79	3.49	10.027	3.587	33.77	52.58	2.4	2.8	35.8
40	11.09	3.44	11.425	3.382	34.21	71.41	3.0	1.7	52.1
41	9.82	3.39	8.982	3.312	25.80	39.33	8.5	2.3	34.4
42	10.50	3.61	9.448	3.106	23.87	42.94	10.0	14.0	44.4
43	9.29	3.02	8.678	3.015	20.66	41.59	6.6	0.2	50.3
44	8.78	2.30	8.700	2.667	16.20	28.22	0.9	16.0	42.6
45	9.97	3.10	9.095	2.385	13.55	22.78	8.8	23.1	40.5
平均	6.59	2.39	6.38	2.52	12.06	21.40	8.9	9.5	44.8

光扫描点云数据的体元模拟法,可作为树冠体积计算的一个有效方法进行推广应用,为城市森林生态效益的定量估算提供依据,在城市绿化监测与评价中具有广阔的应用前景。

4 结论

(1) 三维激光扫描技术获取的树冠参数能达到较高的精度。通过分析45株圆柏树冠的冠高、冠径

的三维激光扫描值与外业实测值,其平均相对误差分别为8.9%、9.5%,因此,三维激光扫描技术获取的树冠参数与外业实测差异不大,能获取较高精度的冠径、冠高数据。

(2) 与传统的树冠体积计算方法比较,本文提出的体元模拟法,计算结果更为准确和客观。通过45株圆柏树冠体积计算试验,结果表明当树冠冠径与体元边长的比值($r = K/k$)等于10时,体元模拟

法计算的树冠体积已趋向于稳定。本文以 0.2 m 边长的体元计算 45 株圆柏的树冠体积,其结果与传统的规则几何体法的平均相对误差达 44.75%。传统方法计算树冠体积,由于人为选择规则几何体对树冠形状模拟的粗放,以及把树冠内部的空隙当实心

处理,使得体积计算结果存在较大的误差。而体元模拟法,对于任何不规则的树冠,只需考虑体元大小及其有效性,无需考虑树冠形状,不用人为选择公式匹配计算,最大程度地减少了人为主观因素的影响。

参 考 文 献

- 张新献,古润泽,陈自新,等.北京城市居住区绿地的滞尘效益[J].北京林业大学学报,1997,19(4):12~17.
Zhang Xinxian, Gu Runze, Chen Zixin, et al. Dust removal by green areas in the residential quarters of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1997,19(4):12~17. (in Chinese)
- 张立富,吕东方,袁明,等.3D激光扫描技术及其在森林测绘中的应用研究[J].林业机械与木工设备,2011,39(8):30~35.
Zhang Lifu, Lü Dongfang, Yuan Ming, et al. Research on 3D laser scanning technology and its application in forestry survey[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2011,39(8):30~35. (in Chinese)
- Maas H G, Bienert A, Scheller S, et al. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data[J]. International Journal of Remote Sensing-3D Remote Sensing in Forestry,2008,29(5):1579~1593.
- Bucksch A, Lindenbergh R. CAMPINO—a skeletonization method for point cloud processing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2008,63(1):115~127.
- Seidel D, Beyer F, Hertel D, et al. 3D-laser scanning: a non-destructive method for studying above-ground biomass and growth of juvenile trees[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(10):1305~1311.
- Nguyen T T,刘修国,王红平,等.基于激光扫描技术的三维模型重建[J].激光与光电子学进展,2011(8):081201-1~6.
Nguyen T T, Liu Xiuguo, Wang Hongping, et al. 3D model reconstruction based on laser scanning technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011(8):081201-1~6. (in Chinese)
- Omasa K, Hosoi F, Uenishi T M, et al. Three-dimensional modeling of an urban park and trees by combined airborne and portable on-ground scanning LIDAR remote sensing[J]. Environmental Modeling and Assessment,2008,13(4):473~481.
- 周一凡,周坚华.绿量快速测算模式[J].生态学报,2006,26(12):4204~4211.
Zhou Yifan, Zhou Jianhua. Fast method to detect and calculate LVV[J]. Acta Ecologica Sinica,2006,26(12):4204~4211. (in Chinese)
- 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)
- Lim C. Estimation of urban tree crown volume based on object-oriented approach and LIDAR data [D]. Enschede: International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 2007.
- 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)
- 黄健,赵祚喜,俞龙,等.激光测量果树冠层体积方法与试验研究[C]//中国农业工程学会2011年学术年会论文集,重庆,2011.
Huang Jian, Zhao Zuoxi, Yu Long, et al. Laser measurement method of fruit tree canopy volume and experimental research [C] //Proceedings of Annual Academic Conference of Chinese Society of Agricultural Engineering, Chongqing,2011. (in Chinese)
- 唐雪海.北京市城六区三维绿量估算与分析研究[D].北京:北京林业大学,2010.
Tang Xuehai. Estimation and analysis of tridimensional green biomass of central six districts of Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University,2010. (in Chinese)
- 刘红伟.基于TLiDAR点云数据建立三维树木模型[D].北京:北京林业大学,2011.
Liu Hongwei. The reconstruction of three-dimensional tree models from terrestrial LiDAR [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- 罗德安,宋晓华,廖丽琼,等.基于切片技术的激光点云粗差探测[J].测绘通报,2011(5):1~4.
Luo Dean, Song Xiaohua, Liao Liqiong, et al. Point cloud outlier detection based on slice technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2011(5):1~4. (in Chinese)