

基于数字高程模型的树木三维体积测量

何 诚¹, 冯仲科^{1*}, 袁进军², 王 佳¹, 董志海^{1,3}, 巩垠熙¹

(1. 北京林业大学测绘与 3S 技术中心, 北京 100083; 2. 清华大学公共安全研究院, 北京 100084;
3. 北京市测绘设计研究院, 北京 100038)

摘 要: 为了实现对树木高精度无损的三维体积测量, 该文以三维激光扫描系统采集树木点云数据为依据, 并运用数字化测绘成图软件对树木的点云数据建立数字高程模型, 通过立体三角网的建立, 利用成图软件的土方计算功能计算出树木的体积, 并详细介绍了系统的计算原理。本文以试验区选定的 20 棵树为研究对象, 采用该系统对 20 棵不同高度和体积的油松进行了 10 次重复试验, 并将测量结果与人工测量结果进行了对比分析, 试验结果表明与人工测量结果相一致, (标准误差 $\delta_x=3.54$, 绝对误差限 $\Delta=7.002$, 相对误差限 $E\%=3.15\%$, 精度可达 96.852%,) 能够运用于树木体积的测量。

关键词: 树木, 三维, 体积测量, 数字高程模型, 精度分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.08.030

中图分类号: S24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-08-0195-05

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 195-199.
(in Chinese with English abstract)

0 引言

多年来, 林业上求解树木体积时, 多是采用传统的方法, 即是砍伐大量的立木作为样木, 利用伐倒木区分求积式计算材积; 这种方法对森林造成的损伤大; 在实践中用到立木等长区分求积法、累高法等立木区分求积法和望高法测定立木材积, 虽然避免了森林的损伤, 但是限于测量仪器环境与精度的局限, 而且工作量非常大, 不利于绿量数据库的建立和数据的存储、管理应用和统一。

Zaman 等^[1-10]应用地面三维激光扫描系统进行样木数据的采集, 并通过二维 Hough 变化法进行测树因子的数据提取, 测算大都通过叶面积指数等方法或根据树种的冠形方程来获得, 基本上属于半自动化模式, 所需要的一些原始数据如树高和树冠直径、第一活枝高度及树种等必须通过遥感影像的判读和外业的实地采集获取, 工作量大、过程繁琐, 无法与计算机模拟的速度相比。

为了实现对树木高精度无损三维体积测量, 并以计算机的模拟计算代替复杂的人工立体量测, 本文提出基于数字高程模型的树木三维体积测量的新方法。该方法采用三维激光扫描系统获取立木的三维空间点阵数据,

建立立木的三维模型, 利用数字化测绘数据采集系统的数字高程模型对三维激光扫描模型进行处理, 计算出树木体积, 克服了现有技术存在的不足^[11-12]。

1 材料与方法

1.1 试验平台

点云数据采集平台的建立: 采用 FARO LS880 地面三维激光扫描仪(北京咏归科技有限公司), 并对扫描仪参数进行设置: 扫描的区域为水平方向 360°, 垂直方向 155°(-90°至 65°), 垂直分辨率: 0.009°, 水平分辨率: 0.009°, 运用配套的参考球和标靶纸对树木进行扫描。首先根据待测树木的相关地形对测站进行设置, 通常情况下单棵树木的扫描需要 3 站来完成, 理论上 3 站构成等边三角形, 相邻两边的夹角为 120°(具体应根据待扫描树实际的长势和地形来设置)。对参考球摆设的要求为: 保证每 2 站之间至少有 3 个公共参考球, 同时要使上述设定好的 3 站都能扫描到公共参考球, 且球体不能有遮挡, 不要摆放于同一条直线上。最后将标靶纸方向朝北贴在离地面 1.3 m 左右的树干上, 如图 1 所示。参考球放置好后开始扫描, 扫描过程中必须完成待测树木所有测站后, 才能移动标靶球, 否则需重新扫描。其中标靶纸只是担任着参照物的作用, 对扫描的影响不大。大量实验证明, 每完成一株立木所有扫描需 10 min 左右。

扫描注意事项如下: 1) 下雨等湿度大于 80%时禁止使用, 否则液体进入仪器内, 会导致着火和电击等严重损害; 2) 在实地操作中, 森林林木之间比较密集, 相互之间的树枝、树叶等遮挡比较严重, 因此单木扫描时尽量选择林木稀疏地带, 同时每次在架设仪器的地方拍摄待测树木的照片, 为后期处理点云树木起到参照作用。

收稿日期: 2011-09-15 修订日期: 2012-03-14

基金项目: 国家 863 项目(2009AA12Z327, 2008AA121305-4); 北京市自然科学基金(09D0297); 国家科技支撑计划项目(2012BAH34B01); 高等学校博士点专项科研基金(20110014120002); 国家自然科学基金(30872038)
作者简介: 何 诚(1985-), 男, 安徽马鞍山人, 博士生, 主要研究方向: 测绘与 3S 技术应用。北京 北京林业大学 111#, 100083。

Email: hech_eng@163.com

*通信作者: 冯仲科(1963-), 男, 甘肃灵台人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 精准林业, 林业 3S 技术应用。北京 北京林业大学 111#, 100083。Email: fengzhongke@126.com

点云数据处理平台的建立:采用基于 CAD 成图软件二次开发的 CASS 软件的 DTM 土方计算功能,将采集树木的点云数据在 CASS 中展开,建立立体三角网,构建树木的三维轮廓图像,并计算树木的体积。



图 1 三维激光扫描仪扫描时的测站照

Fig.1 Station photo scanned by three-dimensional laser scanner

1.2 树木三维体积计算

传统树木体积的计算方法^[13-16]:将树冠以冠幅与冠高为参数模拟成规则几何体计算体积,人为采集树木特征因子根据每一种模拟的几何体对应着不同的体积计算公式来求解树木体积,具体如表 1 所示。

表 1 不同树冠形状体积计算公式

Table 1 Volume formula for different crown shape

树冠形状	计算公式
卵形 OV	$V = \frac{\pi x^2 y}{6}$
圆锥形 CO	$V = \frac{\pi x^2 y}{12}$
球形 SP	$V = \frac{\pi x^2 y}{6}$
半球形 SS	$V = \frac{\pi x^2 y}{6}$
球扇 SF	$V = \frac{\pi(2y^3 - y^2\sqrt{4y^2 - x^2})}{3}$
球缺形 AS	$V = \frac{\pi(3xy^2 - 2y^3)}{6}$
圆柱形 RC	$V = \frac{\pi x^2 y}{4}$

注: x 为冠幅, m; y 为冠高, m; V 为体积, m^3 。

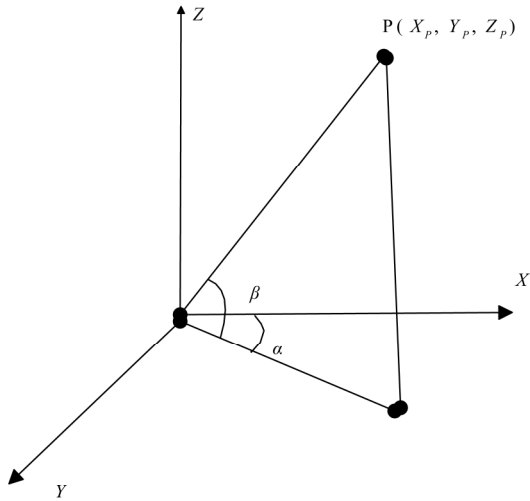
本试验采用的数字高程模型的树木三维体积测量方法,同传统方法相比^[17-18],首先在数据采集精度上更精准,在测量树木的过程中,传统方法要求树木胸径精确到 mm,树高测量精度至 cm,并且要求其相对误差(测量误差与其相应的观测值之比)不超过 5%,人为因素在采集数据当中占了主导。将人为测量的数据和三维激光扫描的数据进行比较如表 2 所示,树高相对误差((扫描值-实测值)/实测值×100%)最大的 20 号样木为 6.57%,20 棵树的平均相对误差为 2.05%;胸径相对误差最大的 10 号样木为 5.53%,20 棵树的平均相对误差为 1.34%;冠幅相对误差最大的 20 号样木为 12.64%,20 棵树的平均相对误差为 4.17%。

表 2 立木实测值和扫描值比较结果表

Table 2 Comparison of the measured value and scanning value of trees

序号	扫描值			人为测量值			相对误差		
	树高/m	胸径/cm	冠幅/m	树高/m	胸径/cm	冠幅/m	树高/%	胸径/%	冠幅/%
1	12.37	26.77	8.14	12.86	26.42	7.95	3.81	1.31	2.39
2	12.52	26.62	7.64	12.49	26.42	7.85	0.23	0.76	2.68
3	17.15	52.20	12.18	17.10	52.11	12.50	0.29	0.18	2.56
4	15.26	57.41	8.62	14.85	57.48	8.05	2.76	0.13	7.08
5	15.98	30.55	9.76	16.62	30.61	9.85	3.85	0.18	0.91
6	14.97	30.92	8.48	15.20	30.88	8.80	1.51	0.14	3.64
7	5.67	9.20	3.82	5.52	9.14	3.60	2.72	0.66	6.11
8	7.10	12.60	5.90	7.26	12.58	5.60	2.20	0.16	5.36
9	13.12	51.60	7.20	13.05	51.57	7.65	0.54	0.07	5.88
10	12.98	21.35	7.61	13.05	22.60	7.35	0.53	5.53	3.60
11	11.24	22.52	7.47	11.15	22.92	7.50	0.83	1.74	0.47
12	15.20	43.40	8.72	14.95	43.29	8.40	1.67	0.25	3.81
13	13.52	49.90	11.45	13.16	49.97	10.90	2.77	0.14	5.07
14	7.92	21.83	7.58	7.84	22.92	7.05	0.99	4.76	7.45
15	10.55	26.10	7.80	10.39	25.46	7.65	1.58	2.50	1.96
16	10.75	25.82	7.64	10.71	26.42	7.91	0.36	2.28	3.44
17	9.82	30.71	10.60	9.53	30.56	10.00	3.04	0.50	6.00
18	10.40	27.20	8.37	10.63	27.06	8.40	2.16	0.53	0.36
19	8.94	20.00	7.64	8.72	19.60	7.80	2.52	2.05	2.05
20	6.93	14.53	5.69	6.50	14.96	5.05	6.57	2.88	12.64

利用三维激光扫描仪自带的软件通过坐标匹配，将立木的不同点云图“拼合”在同一坐标系下，经过数据预处理、抽取等功能的实现，最终建立起立木的三维模型并保存为数字化测绘数据采集系统可以识别的 dxf 格式；利用数字化测绘数据采集系统打开三维激光扫描点云图，建立独立坐标系统并提取高程，原理如图 2 所示。



注： X_p 为 P 点横坐标值； Y_p 为 P 点纵坐标值； Z_p 为 P 点高程值； α 为 P 点投影到 (X, Y) 平面上与 X 轴夹角； β 为 P 点与 (X, Y) 平面夹角。

图 2 扫描点坐标计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of scanning point coordinate calculation

将提取出来的高程保存在 dat 格式的文本中，并将其数据导入数字化测绘数据采集系统中，根据需要设计站高程间距并展高程点建立数字高程模型如图 3 所示，建立立体三角网，用复合线画出所要计算体积的区域，一定要闭合，尽量不要拟合（因为拟合过的曲线在进行体积计算时会用折线迭代，影响计算结果的精度），利用数字化测绘数据采集系统的 DTM 法土方计算功能计算出点云体积。

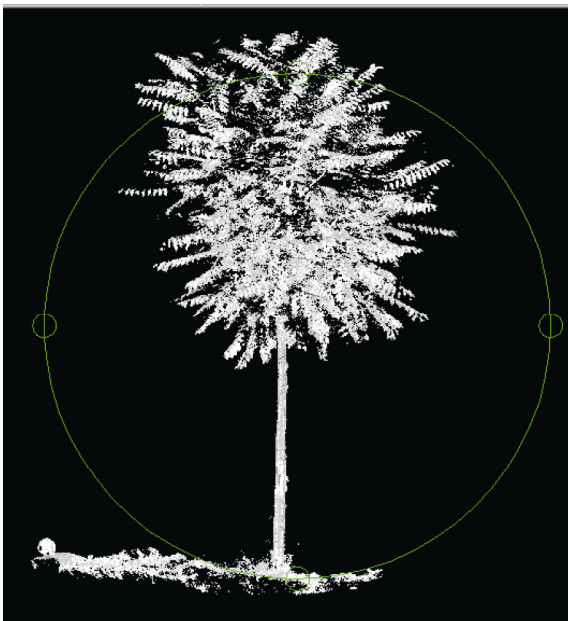


图 3 三维点云图

Fig.3 Three-dimensional point cloud

软件计算树木体积的原理如下^[19]：将由相同高度采集的树冠表面的点用圆滑曲线连接起来，形成等高线，首先在建立好的等高线上绘制方格网，方格边长为图上 2 cm，这就将树冠的等高线分成若干份，用线性内插法求出各方格顶点的高程，并注记在相应顶点的右上方，将设计高程记为 0，其中角点体积计算公式：树冠高度 $h \times 1/4$ 方格面积；边点体积计算公式：树冠高度 $h \times 2/4$ 方格面积；拐点体积计算公式：树冠高度 $h \times 3/4$ 方格面积；中心点体积计算公式：树冠高度 $h \times 1$ 方格面积；树冠的体积为各方格网的体积和。

2 结果与分析

用 CASS 的 DTM 求三维点云体积法对 20 棵树体积进行求解，从表 2 试验树木中使用随机抽样法选取（2、3、5、7、8、12、13、15、18、19 号树）10 个样点作为验证数据，通过实测值与推算值进行检验，其检验公式如下：

样点三维绿量实测与估算值精度检验^[20-21]

1) 用公式 $S = \sqrt{\frac{\sum(TGB_s - TGB_g)^2}{n-2}}$ 求剩余标准差。

式中， S 为剩余标准差； TGB_s 为样地实测三维绿量值； TGB_g 为样地推算三维绿量值； n 为参与精度检验的样地数量。

2) 用公式 $\delta_x = \frac{S}{\sqrt{n}}$ 求算标准误差。式中， δ_x 为标准

误差。

3) 用公式 $\Delta = \delta_x t_{n-2}^\alpha$ 求可靠性为 95% 和 99% 时的绝对误差。式中， Δ 为绝对误差，由 t 值分布表查得（ $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ ）。

4) 用公式 $E = \frac{\Delta}{\bar{X}}$ 求可靠性为 95% 和 99% 时的绝对误差限。式中， E 为相对误差； \bar{X} 为 TGB_g 的平均值， $\bar{X} = \frac{\sum TGB_g}{n}$ 。

5) 用公式 $C=100\%-E$ 求精度（ C ）。检验结果如下

表 3 DTM 法三维绿量测算精度检验结果

Table 3 Data analysis of three-dimensional volume measurement based on DTM

	置信水平	
	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
样木数量 n	10	
实测值合计 Σ	772.292	
TGB_s 平均 \bar{X}	77.229	
推算值 合计 Σ	666.993	
TGB_g 平均 \bar{X}	66.699	
$\Sigma(TGB_s TGB_g)$	105.299	
$\Sigma(TGB_s TGB_g)^2$	36959.247	
标准差 S	35.456	
标准误差 δ_x	3.536	
t_{n-2}^α	1.980	2.617
绝对误差限 Δ	7.001	9.254
相对误差限 E/%	3.149	4.162
精度 C/%	96.851	95.838

注：10 棵树分别为：2、3、5、7、8、12、13、15、18、19 号树。

由表 3 可知, 在 0.05 和 0.01 置信度下样木的三维绿量测算精度分别为 96.85%、95.84%, 精度均达到了 95% 以上, 现经检验, 数字高程模型法求的三维绿量测算精度可以满足要求。将数字高程模型法求得树木体积与近真实值进行比较, 得出数字高程模型法测得体积与近真实值的差值的精度为 96.852%, 完全满足树木体积求算的精度要求。数字高程模型法测树木体积相对以往基于三维激光扫描求算体积有了很大的改进, 以往基于三维激光扫描求算体积, 通过点云数据建立树木三维模型, 并对模型进行量测, 从而获得胸径、树高、树干任意处直径、树干体积、树冠的冠长、冠幅、体积、表面积等许多数值, 通过数值因子来建立体积求算模型, 该方法操作麻烦, 耗时较长, 且对操作人员的熟悉软件的程度要求很大。

3 结论与讨论

本文提出了一种利用建立数字高程模型求解树木体积的方法, 该方法解决了传统利用伐倒木区分求积式计算材积的难题, 即以砍伐大量的立木作为样木, 带来的对森林造成的损伤大, 局限于测量仪器环境与精度, 而且工作量非常大, 不利于绿量数据库的建立和数据的存储、管理、应用和统一。

1) 基于数字高程模型的树木三维体积测量的新的测树方法以计算机的模拟计算代替复杂的人工立体量测, 同时, 在精度上比常规方法提高了 20 倍, 避免了因城市绿化植物树体高大, 使用人工皮尺测量相对误差较大的弊病。

2) 以 20 棵树木为试验对象, 采用相关分析方法对基于数字高程模型的树木三维体积测量方法和人工结果进行比较分析, 结果表明与人工测量结果相一致, (标准误差 $\delta_x=3.54$, 绝对误差限 $\Delta=7.002$, 相对误差限 $E/\%=3.15\%$, 精度可达 96.852%,)。

3) 基于数字高程模型的树木三维体积测量法采用的是三维激光扫描仪采集的点云数据, 精度虽然高, 但由于仪器设备的费用高, 目前只能局限于林业科研研究中, 推广普及到林业及其他行业, 这一部分有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] Zaman Q U, Schumann A W, Hostler H K. Estimation of citrus fruit yield using ultrasonically-sensed tree size[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(1): 39—44.
- [2] 郭浩, 戈振扬, 蒋海波, 等. 基于体着色的植物构型三维重建和可视化模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 195—200. Guo Hao, Ge Zhenyang, Jiang Haibo, et al. Three dimensional reconstruction and visual modeling of plant architecture based on voxel coloring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 195—200. (in Chinese with English abstract)
- [3] Schumann A W, Zaman Q U. Software development for real-time mapping of ultrasonic tree canopy size[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 47(1): 25—40.
- [4] Akira Kato, L Monika Moskal, Peter Schiess, et al. Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6): 1148—1162.
- [5] 魏学礼, 肖伯祥, 郭新宇, 等. 三维激光扫描技术在植物扫描中的应用分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20): 373—377. Wei Xueli, Xiao Boxiang, Guo Xinyu, et al. Analysis of applications of 3D laser scan technology in plant scanning[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(20): 373—377. (in Chinese with English abstract)
- [6] Danson F M, Hetherington D. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning[J]. Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 157—160.
- [7] 钱建国, 赵军武, 唐为刚. 三维激光扫描仪获取的数据处理与应用研究[J]. 矿山测量, 2009, 6(14): 44—46. Qian Jianguo, Zhao Junwu, Tang Weigang. The processing and application of data obtained from three-dimensional laser scanner[J]. Mine Surveying, 2009, 6(14): 44—46. (in Chinese with English abstract)
- [8] Balsari P, Doruchowski G, Marucco P, et al. A system for adjusting the spray application to the target characteristics[J]. Agricultural Engineering International, 2008, 10: 1682—1130.
- [9] Zaman Q U, Salyani M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume[J]. Transaction of the ASAE, 2004, 20(2): 173—178.
- [10] Zaman Q U, Schumann A W, Miller W M. Variable rate nitrogen application in florida citrus based on ultrasonically sensed tree size[J]. Transaction of the ASAE, 2005, 21(3): 331—335.
- [11] 王万章, 洪添胜, 陆永超, 等. 基于超声波传感器和 DGPS 的果树冠径检测[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 158—161. Wang Wanzhang, Hong Tiansheng, Lu Yongchao, et al. Performance of tree canopy diameter measurement based on ultrasonic sensor and DGPS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(8): 158—161. (in Chinese with English abstract)
- [12] Whitney J D, Tumbo S D, Miller W M, et al. Comparison between ultrasonic and manual measurements of citrus tree canopies[C]// ASAE, 2002, ASAE Paper No. 0210512.
- [13] 胡鑫, 刁俊通, 金焯. 反向工程中散乱点云数据得自动分割与曲面重构[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(1): 62—65. Hu Xin, Xi Juntong, Jin Ye. Segmentation and surface reconstruction of scattered data in reverse engineering[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2004, 38(1): 62—65. (in Chinese with English abstract)
- [14] Zaman Q U, Schumann A W, Hostler H K. Quantifying sources of error in ultrasonic measurements of citrus orchards[J]. Transaction of the ASAE, 2007, 23(4): 449—453.

- [15] Michio Kise, Qin Zhang. Dual stereovision application for 3D field mapping and vehicle guidance[C]// ASAE annual International Meeting, Tampa, Florida, 2005, 7, paper number: 051140, 1-13.
- [16] 孟志军, 付卫强, 刘卉, 等. 面向土地精细平整的车载三维地形测量系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 255-258.
Meng Zhijun, Fu Weiqiang, Liu Hui, et al. Design and implementation of 3D topographic surveying system in vehicle for field precision leveling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(Supp.2): 255-259. (in Chinese with English abstract)
- [17] 周会成, 陈吉红, 黄声华, 等. 用三维点云计算活塞腔得体积[J]. 现代测量与实验室管理, 2003, 2(6): 16-18.
Zhou Huichen, Cheng Jihong, Huang Shenghua, et al. Measuring piston cavity volume using 3-D scattered data[J]. Advanced Measurement and Laboratory Management, 2003, 2(6): 16-18. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张伟, 胡国清, 吴碧金. 关于点云数据分层的探索[J]. 矿山机械, 2008, 36(18): 26-29.
Zhang Wei, Hu Guoqing, Wu Bijin. Research on cloud data delamination[J]. Mining and Processing Equipment, 2008, 36(18): 26-29. (in Chinese with English abstract)
- [19] 冯仲科, 赵英琨, 邓向瑞, 等. 三维前方交会法测量树高及其精度分析[J]. 北京林业大学学报, 2007, S(2): 36-39.
Feng Zhongke, Zhao Yingkun, Deng Xiangrui, et al. Measurement and precision analysis of tree height by 3D forward intersection[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, S(2): 36-39. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郎晓哲, 刘刚, 谢幸福, 等. 机载式农田三维地形测量系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊 1): 69-72.
Lang Xiaozhe, Liu Gang, Xie Xingfu, et al. Tractor-mounted field 3-D topography surveying system[J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(Supp.1): 69-72. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李松, 张建瓴, 可欣荣, 等. 果树三维外形轮廓的仿真与重建[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(1): 94-98.
Li Song, Zhang Jianling, Ke Xinrong, et al. Simulation and reestablishment of the fruit-tree's three-Dimensional profile surface[J]. Journal of South China Agricultural University, 2009, 30(1): 94-98. (in Chinese with English abstract)

Three-dimensional volume measurement of trees based on digital elevation model

He Cheng¹, Feng Zhongke^{1*}, Yuan Jinjun², Wang Jia¹, Dong Zhihai^{1,3}, Gong Yinxi¹

(1. Mapping and 3S Technology Center, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Public Safety Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Beijing Institute of Surveying and Mapping, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to measure three-dimensional volume of trees with non-destruction and high accuracy, a digital elevation model was built in this paper through digital mapping software based on the trees point cloud data measured by three-dimensional laser scanning system. After building the triangulation, the volume of trees would be calculated through the earthwork calculation function of mapping software and the calculation principle of system was described in detail. 20 pines with different height and volume selected from experimental area were taken as research objects to measure with ten repeated tests by the proposed system, and then measured results were compared with manual measurement. It was concluded that experimental results had good agreement with manual measurement results (standard error was 3.54, absolute error was 7.002, relative error was 3.15%, and accuracy was up to 96.852%), so this system can be used in volume measurement of trees.

Key words: trees, three-dimensional, volume measurement, digital elevation model, accuracy analysis