

# 三维激光技术无损测量林分结构因子适用性研究

赵 阳 余新晓

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘要** 随着计算机可视化技术与激光技术的不断发展,我国“数字化林业”建设进程不断向前推进。三维(3D)激光扫描作为一种可以快速获取目标三维点云数据的新兴测绘技术,已在林业勘查规划、林分结构研究以及单木模型三维重建等方面得到了初步应用。为了探究该技术在森林测树应用中的测量精度,通过将野外三维激光扫描林分结构因子数据与传统经典测树学方法所得实验数据进行对比发现:基于三维激光扫描数据构建的测树因子模型精度较高,其中,扫描胸径平均误差 $-0.16\%$ ,扫描树高平均误差 $-0.35\%$ ,扫描胸高断面面积误差为 $-0.11\%$ ,误差均满足林业测树精度要求。说明三维激光扫描技术在古树保护、森林资源调查规划、森林采伐等林业应用领域具有较强的可适用性与应用前景。

**关键词** 测量;点云数据;模型;误差来源

中图分类号 TN24; S758.7 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.071201

## Applicability of 3D Laser Technology in Noninvasive Measurement of Stand Structure in Forestry

Zhao Yang Yu Xinxiao

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract** With the continuous development of computer visualization technology and laser technology, “Digital Forestry” in China is being moved forward steadily. As a new mapping technology, three-dimensional (3D) laser scanning can quickly obtain the 3D model of the target, and therefore it has been initially applied in the survey of forest resources, study on the stand structure and 3D reconstruction of single tree. To explore the accuracy of the technique in forest mensuration, the measurement accuracy of 3D laser scanning technology is analyzed through the experiments in forestry and the factors which affect the scanning accuracy are summarized. The results show that the model constructed by the scanning data has a higher precision; the average error of scanning diameter at breast height (DBH) is  $-0.16\%$ , the average error of scanning tree height is  $-0.35\%$ , and the average error of scanning basal area is  $-0.11\%$ . The errors meet the precision requirements of forestry completely. The technology has the adaptability and application prospects in the field of conservation of old and rare trees, forest resource inventory and forest cutting.

**Key words** measurement; point cloud data; model; error source

**OCIS codes** 120.0280; 280.3420; 100.6890

## 1 引 言

占有地球60%以上生物量的森林,素有“地球之肺”之称,其作为陆地生态系统的主体,在生物圈中扮演着十分重要的角色。它不仅为人类生产生活提供大量物质资源,而且还在气候调节、水源涵养、防风固沙、阻滞吸附PM2.5等方面发挥着不可替代的作用。森林资源的健康与否、数量的增减变化都势必会影响到生物圈中各种生物的生存和发展。为此,加强森林资源健康监测、定期开展森林资源清查以及及时为林业发展决策

收稿日期: 2013-03-01; 收到修改稿日期: 2013-04-11; 网络出版日期: 2013-06-04

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2011BAD38B05)、国家自然科学基金(41171028)、国家林业公益性行业科研专项(201104005)

作者简介: 赵 阳(1986—),男,博士研究生,主要从事森林生态和流域生态水文等方面的研究。

E-mail: zhaoyang1224@163.com

导师简介: 余新晓(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事森林生态和水土保持等方面的研究。

E-mail: yuxinxiao125@126.com(通信联系人)

提供依据十分必要,但在监测、清查过程中如何做到精准、快速、高效则是一个难点。

三维(3D)激光扫描技术作为继全站仪、电子角规等精准林业测树方法之后的又一新方法<sup>[1-4]</sup>,已在古树保护、林业资源调查、林分结构研究以及单木模型三维重建等方面得到初步应用。Weiβ<sup>[5]</sup>研究表明:采用多站式扫描对林分蓄积量进行估测,结果平均偏低4%(13 m<sup>3</sup>/ha)<sup>[5]</sup>;Wezyk等<sup>[6-8]</sup>认为采用三维激光扫描技术获取测树因子与传统测树技术相比,作业周期短,且工作效率更高,属无损测量,利于保护生态环境,在林业研究领域具有广泛应用前景。然而,就如何进一步提高其测量精度以及如何克服该技术在林业研究应用领域中的局限性并未完全可知,影响扫描精度的因素则缺乏系统分析。因此,本研究以三维激光扫描数据为基础,通过与传统测树方法实测数据进行对比分析,就该技术的扫描精度及其影响因素进行深入讨论,旨在客观评价三维激光技术在林业应用中的优缺点,为数字林业发展提供参考。

## 2 三维激光扫描技术简介

三维激光扫描技术主要采用非接触高速激光测量方法,以点云形式获取目标物体三维表面的阵列式几何图形数据。与传统测绘技术单点获取方式相比,该技术能够快速、高效、准确地获取目标完整的点云数据,基于扫描对象海量点云数据可快速重构目标三维模型,进而实现对目标整体结构及形态特性的真实描述<sup>[9-10]</sup>。

### 2.1 三维激光扫描技术扫描测量原理

三维激光扫描技术主要依托由激光扫描仪、计算机、电源供应系统、角架和系统软件组成的三维激光扫描仪器完成。此外,仪器本身又包括激光测距系统和激光扫描系统,同时也集成了 CCD 数码相机和仪器内部控制与校正系统等<sup>[9]</sup>。其三维测量原理具体描述为:仪器自身发射激光束到旋转式镜头中心,镜头通过快速而有序的旋转将激光依次扫过被测区域,一旦接触到物体,光束立刻被反射回扫描仪,根据光束的飞行时间可计算出被测物体与扫描仪器之间的距离。与此同时,仪器通过内置角度测量系统来量测每一激光束的水平角与竖直角,进而获得每一个扫描点在扫描仪所定义坐标系内的 X、Y、Z 坐标值<sup>[10]</sup>。测量原理如图 1 所示。

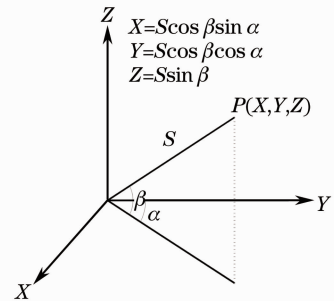


图 1 三维测量原理图

Fig. 1 Principle of three-dimensional laser scanning

### 2.2 三维激光扫描野外测树流程

#### 2.2.1 野外数据采集

首先,根据扫描目标的位置、大小形态以及所要获取的目标属性对测站进行设计,其中包括扫描仪架设位置选择、控制点布设以及扫描获取点云数据三个方面。

#### 2.2.2 坐标纠正及三维建模

扫描所得点云数据需要进行坐标纠正处理。坐标纠正有配对、全局、绝对三种方式<sup>[11]</sup>,通常采用配对方式进行坐标纠正。坐标配准后,应用扫描系统配备的软件对点云数据进行拼接、去噪、提取目标等一系列处理,建成目标的三维点云模型。

#### 2.2.3 树木结构参数提取

将建成的目标三维点云模型导入逆向工程软件<sup>[12]</sup>来完成对树高、冠幅、胸高断面积、叶面积以及冠形等测树因子的提取(图 2)。

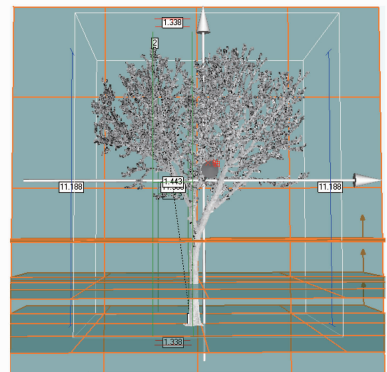


图 2 测量单木树高、直径以及胸高断面积示意图

Fig. 2 Measurement of tree height, diameter and basal area

## 3 研究区概况及研究方法

### 3.1 研究区概况

研究区位于北京市鹫峰实验林场,东经 116°28',北纬 39°34'。区内地形复杂,一般土层厚度 40 cm 左

右。该区属温带大陆季风气候,冬寒夏热,年均降雨量 630 mm。区内植被多为二十世纪五六十年代营造的人工林,主要乔木树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)等。

表 1 每木检尺数据与扫描数据对比表

Table 1 Comparison of data from standing by scanning and by conventional measurements

Species	No.	Data of individual timber			Scanner Data			Deviation percentage		
		Height / m	DBH / cm	Basal area / m <sup>2</sup>	Height / m	DBH / cm	Basal area / m <sup>2</sup>	Height / %	DBH / %	Basal area / %
<i>Ginkgo biloba</i>	1	7.06	13.22	0.0137	7.14	13.03	0.0135	1.1	-1.4	-1.5
	2	7.46	13.91	0.0152	7.64	13.85	0.0148	2.4	-0.4	-2.6
	3	7.56	12.41	0.0121	7.75	12.55	0.0120	2.5	1.1	-0.8
	4	7.27	10.24	0.0081	7.32	10.35	0.0085	0.7	1.07	4.9
	5	15.86	37.10	0.1081	15.72	36.82	0.1061	-0.9	-0.8	-1.9
<i>Pinus tabulaeformis</i>	1	5.02	13.10	0.0135	5.31	13.40	0.0140	5.8	2.3	3.7
	2	8.93	48.97	0.1883	9.11	47.45	0.1867	2.0	-3.1	-0.8
	3	4.56	21.19	0.0353	4.41	21.15	0.0350	-3.3	-0.2	-0.8
	4	13.75	28.51	0.0638	13.82	28.85	0.0652	0.5	1.2	2.2
	5	3.92	15.19	0.0181	3.85	15.06	0.0177	-1.8	-0.9	-2.2
<i>Robinia pseudoacacia</i>	1	12.96	20.05	0.0316	13.31	20.05	0.0312	2.7	0	-1.3
	2	11.48	25.66	0.0517	11.18	25.75	0.0523	-2.6	0.4	1.2
	3	9.00	19.74	0.0306	9.16	20.47	0.0301	1.8	3.7	-1.6
	4	15.55	29.56	0.0686	15.80	29.31	0.0674	1.6	-0.8	-1.7
	5	14.52	30.56	0.0733	14.83	30.42	0.0725	2.1	-0.5	-1.1
<i>Sophora japonica</i>	1	12.07	31.83	0.0796	12.34	32.39	0.0804	2.2	1.8	1.0
	2	11.74	30.24	0.0718	11.44	29.79	0.0695	-2.6	-1.5	-3.2
	3	10.00	26.55	0.0554	9.92	26.36	0.0546	-0.8	-0.7	-1.4
	4	8.72	18.10	0.0257	8.82	18.00	0.0251	1.1	-0.6	-2.3
	5	8.81	19.74	0.0306	8.53	19.75	0.0305	-3.2	0.1	-0.3
<i>Eucommia ulmoides</i>	1	7.76	12.27	0.0118	7.66	12.55	0.0114	-1.3	2.3	-3.4
	2	8.06	9.13	0.0066	7.92	9.00	0.0065	-1.4	-3.5	-1.5
	3	7.85	9.45	0.0070	8.01	9.65	0.0073	2.0	2.1	4.3
	4	9.51	14.64	0.0168	9.94	14.85	0.0172	2.5	1.4	2.4
	5	9.65	11.48	0.0104	9.52	11.42	0.0102	-1.3	-0.5	-1.9
<i>Acer truncatum</i>	1	7.63	23.13	0.0420	7.51	23.33	0.0427	-1.6	0.9	1.7
	2	6.98	14.32	0.0161	6.90	14.15	0.0157	-1.1	-1.2	-2.5
	3	7.25	13.24	0.0138	7.54	13.05	0.0133	-4.0	-1.4	-3.6
	4	6.24	10.38	0.0085	6.33	10.45	0.0085	1.4	0.7	0
	5	7.00	8.58	0.0058	6.86	8.43	0.0057	-1.7	-4.0	-1.7
<i>Ailanthus altissima</i>	1	9.55	22.28	0.0390	9.93	22.10	0.0388	3.9	-0.8	-0.5
	2	9.65	21.92	0.0377	9.40	21.60	0.0367	-2.6	-1.5	-2.7
	3	14.60	31.83	0.0796	14.70	31.93	0.0765	0.7	0.3	-3.9
	4	12.00	22.78	0.0408	12.02	22.94	0.0413	0.2	0.7	1.2
	5	8.66	20.33	0.0325	8.73	20.38	0.0326	0.8	0.2	0.3
<i>Quercus aliena</i>	1	13.94	23.49	0.0433	13.28	22.85	0.0417	-4.7	-2.7	-3.7
	2	10.04	17.03	0.0228	9.88	17.2	0.0230	-1.6	1.0	0.9
	3	10.54	28.90	0.0656	10.17	28.61	0.0641	-3.5	-1.0	-2.3
	4	7.36	21.01	0.0347	7.21	20.90	0.0345	-2.0	-0.5	-0.6
	5	5.52	14.36	0.0162	5.31	14.20	0.0157	-3.8	-1.1	-3.1

### 3.2 研究方法

数据来源于 2010 年 7~8 月鹭峰实验林场野外测树实验,该实验通过采用三维激光扫描与传统测树法

两种方法来获取基本测树因子。其间共调查固定标准地 12 块,主要乔木树种 8 个,扫描单木 240 株。从 8 个扫描树种中各随机抽取样木 20 株,共计 160 株。取树高、胸径(DBH)以及胸高断面面积 3 个测树因子作为精度研究参数,对 160 株单木立木扫描数据和每木检尺数据进行相关关系分析并构建测树因子模型,通过指标检验来检验模型精度进而得出扫描数据的精度。由于版面有限,故仅列出前 5 株扫描数据与每木检尺数据,如表 1 所示。

## 4 结果与分析

### 4.1 模型构建

以扫描数据为自变量  $x$ ,实测数据为因变量  $y$ ,分别对胸径、树高以及胸高断面面积画出散点图,如图 3~5 所示。由散点图可知,二者之间线性关系明显。故进行线性回归拟合,得到以下回归方程。

树高模拟线性回归方程为

$$y = -0.085 + 1.01x, \quad (1)$$

相关系数  $R^2 = 0.996$ ,样本数  $n = 100$ ,  $p < 0.001$ ;

胸径模拟线性回归方程为

$$y = 0.317 + 0.982x, \quad (2)$$

$R^2 = 0.999$ ;  $n = 100$ ,  $p < 0.001$ ;

胸高断面面积模拟方程为

$$y = -3.138 \times 10^{-5} + 1.01x, \quad (3)$$

$R^2 = 0.999$ ,  $n = 100$ ,  $p < 0.001$ 。

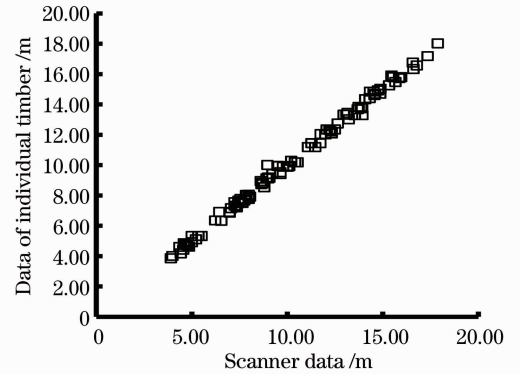


图 3 树高散点图

Fig. 3 Scattered plots of height

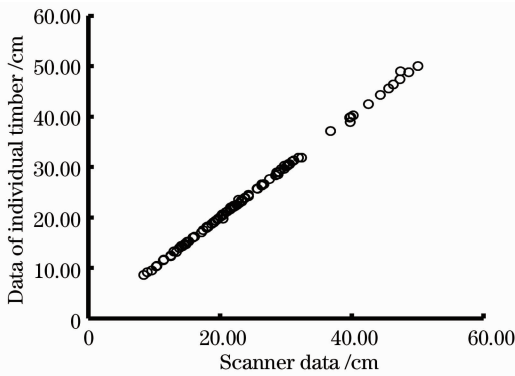


图 4 胸径散点图

Fig. 4 Scattered plots of diameter

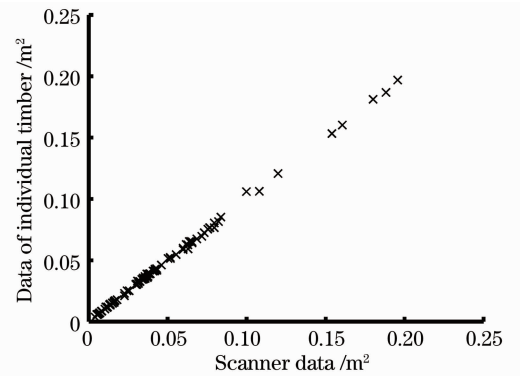


图 5 胸高断面面积散点图

Fig. 5 Scattered plots of basal area

### 4.2 模型检验

将 8 个扫描树种中剩余的扫描数据代入模型公式得到树高、胸径和胸高断面面积的理论值,把理论值与实测值进行比较来检验模型精度,数据对比结果见表 2,检验结果见表 3。其中,检验指标如下。

设传统测树学方法测定值为  $y_i$ ,理论值为  $y'_i$ ,则有相对误差  $d_r$  为

$$d_{ri} = (y'_i - y_i) / y_i \times 100\%; \quad (4)$$

相对误差平均值  $d_{r_{av}}$  为

$$d_{r_{av}} = \sum d_{ri} / n \times 100\%; \quad (5)$$

相对误差绝对值平均值为

$$|d_{r_{av}}| = \sum |d_{ri}| / n \times 100\%; \quad (6)$$

相对误差标准差  $S_{rd}$  为

$$S_{rd} = \sqrt{[\sum d_{ri} - (\sum d_{ri})^2]/(n-1)}. \quad (7)$$

表 2 模型检验数据表

Table 2 Comparison of model data

Species	No.	Data of individual timber			Scanner Data			Deviation percentage		
		Height / m	DBH / cm	Basal area / m <sup>2</sup>	Height / m	DBH / cm	Basal area / m <sup>2</sup>	Height / m	DBH / cm	Basal area / m <sup>2</sup>
<i>Ginkgo biloba</i>	1	12.37	29.77	0.0694	12.41	29.55	0.0701	12.56	29.81	0.0698
	2	6.62	8.95	0.0060	6.60	9.11	0.0060	6.46	8.92	0.0062
	3	8.77	8.85	0.0061	8.77	9.01	0.0061	8.46	8.92	0.0062
	4	15.40	36.2	0.0951	15.47	35.87	0.096	15.86	35.1	0.0968
	5	17.67	43.25	0.1476	17.76	42.79	0.1490	18.06	43.53	0.1488
<i>Pinus tabulaeformis</i>	1	5.21	13.59	0.0135	5.18	13.66	0.0136	5.20	13.23	0.0137
	2	4.42	18.52	0.0264	4.38	18.50	0.0266	4.36	18.46	0.0268
	3	8.44	25.67	0.0518	8.44	25.52	0.0523	8.56	25.78	0.0522
	4	9.02	28.11	0.0611	9.03	27.92	0.0617	8.86	28.03	0.0617
	5	10.54	32.81	0.0835	10.56	32.54	0.0843	10.86	32.64	0.0837
<i>Robinia pseudoacacia</i>	1	11.36	21.14	0.0361	11.39	21.08	0.0364	11.26	21.13	0.0351
	2	12.52	26.62	0.0553	12.56	26.46	0.0558	12.86	26.42	0.0548
	3	7.19	13.93	0.0151	7.18	14.00	0.0152	7.16	14.01	0.0154
	4	6.06	10.68	0.0095	6.04	10.80	0.0096	6.26	10.97	0.0095
	5	11.24	20.52	0.0327	11.27	20.47	0.0330	11.15	20.92	0.0344
<i>Sophora japonica</i>	1	12.98	21.35	0.0359	13.02	21.28	0.0362	13.05	21.6	0.0366
	2	11.64	26.15	0.0521	11.67	26.00	0.0526	11.95	25.89	0.0526
	3	6.93	13.53	0.0142	6.91	13.60	0.0143	7.10	13.66	0.0147
	4	13.52	49.90	0.1944	13.57	49.32	0.1960	13.36	49.98	0.1962
	5	11.64	26.15	0.0529	11.67	26.00	0.0534	11.35	25.99	0.0531
<i>Diospyros kaki</i>	1	10.87	25.78	0.0511	10.89	25.63	0.0516	10.37	25.73	0.0520
	2	10.32	17.88	0.0242	10.34	17.88	0.0244	10.07	17.69	0.0246
	3	7.68	13.32	0.0145	7.67	13.40	0.0146	7.37	13.34	0.0140
	4	10.06	20.25	0.0321	10.08	20.20	0.0324	10.17	20.26	0.0322
	5	8.55	18.56	0.0263	8.55	18.54	0.0265	8.87	18.34	0.0264
<i>Sabina chinensis</i>	1	6.15	13.55	0.0141	6.13	13.62	0.0142	6.36	13.6	0.0145
	2	4.55	11.48	0.0101	4.51	11.59	0.0102	4.76	11.5	0.0104
	3	8.73	17.24	0.0235	8.73	17.25	0.0237	8.96	17.51	0.0241
	4	7.84	20.29	0.0322	7.83	20.24	0.0325	7.96	20.49	0.0330
	5	5.54	15.05	0.0179	5.51	15.10	0.0180	5.66	15.32	0.0184
<i>Ailanthus altissima</i>	1	5.51	11.28	0.0100	5.48	11.39	0.0101	5.36	11.46	0.0103
	2	9.54	24.92	0.0480	9.55	24.79	0.0485	9.25	24.83	0.0484
	3	7.04	27.16	0.0571	7.03	26.99	0.0576	7.16	27.09	0.0576
	4	5.51	10.28	0.0087	5.48	10.41	0.0088	5.16	10.41	0.0085
	5	5.35	7.71	0.0049	5.32	7.89	0.0049	5.60	7.83	0.0048
<i>Quercus aliena</i>	1	3.33	5.79	0.0028	3.28	6.00	0.0028	3.20	5.74	0.0026
	2	5.07	10.47	0.0085	5.04	10.60	0.0086	5.11	10.5	0.0087
	3	6.66	11.06	0.0092	6.64	11.18	0.0093	6.52	10.99	0.0095
	4	7.02	12.45	0.0114	7.01	12.54	0.0115	6.82	12.32	0.0119
	5	6.89	15.62	0.0192	6.87	15.66	0.0194	7.02	15.66	0.0193

表3 模型检验结果表  
Table 3 Results of model test

Test index	Tree height model	DBH model	Basal area model
Mean value of individual timber	8.66 m	19.64 cm	0.037488 m <sup>2</sup>
Mean value of theoretical data	8.63 m	19.61 cm	0.037445 m <sup>2</sup>
Relative error of theoretical value /%	-0.35	-0.16	-0.11
Mean value of the relative error /%	-0.33	0.13	-0.20
Mean value of the absolute of relative error /%	2.43	1.01	1.60
Standard deviation of the relative error /%	1.92	1.11	1.84

### 4.3 误差来源分析

鉴于该技术发展时间较短,理论研究尚未成熟,诸多扫描及数据处理技术问题亟待解决,加之树木作为一个特殊的不规则几何体,环境和人为因素等均会对其测量精度造成影响,测量误差在所难免。根据目前已有的研究结果<sup>[13-15]</sup>,总结出影响地面三维激光扫描仪测量精度的因素主要有以下5个方面。

#### 1) 测距及扫描角误差影响。

测距对扫描精度的影响主要表现在:当三维激光扫描仪与目标距离较远时,扫描仪自身固有的测角误差会随距离增大而增大,导致扫描点位精度降低;距离近时,测距系统对时间延迟或相位变化的测量精度不够,导致仪器测距精度不高。在点云数据预处理过程中,扫描仪距目标的距离是否在点云配准误差最小值对应的距离会对数据精度产生重要影响。扫描角对测量精度的影响来自水平角和垂直角两方面,该误差主要由扫描仪镜头的镜面平面角误差、扫描仪转动时的微小震动、仪器电机转动不均匀等因素引起。

#### 2) 环境条件。

鉴于扫描仪大多采用主动式扫描(即发射激光),扫描仪配备的激光传感系统对耀眼的阳光和目标反射光的分辨能力较差,这样容易导致仪器读取的数据有误。此外,由于扫描仪工作目标为近距离静态物体,而且激光传感器的工作距离会随着能见度的降低而降低,故大风、大雾天气对扫描精度影响较大。

#### 3) 边缘效应。

所谓边缘效应,是指由于仪器发射的激光光斑具有一定大小,当激光光谱射到不同目标的交界处时,光斑的一部分位于测量目标内,另一部分在相邻的目标外,这就会造成类似全球定位系统(GPS)多路径效应的结果,从而使测量结果产生系统性偏差。

#### 4) 人为影响。

数据处理及扫描过程中人为影响不可忽略。例如:控制点位置选择需要人为判别,判别偏差会引起点云数据拼接误差;在树木因子提取过程中,树基及树梢等位置的判读要由人眼进行,判读过程中由于视线偏斜而导致的测量错误会对测量精度造成直接影响。

#### 5) 其他影响因素。

以胸高断面积为例,由表1知,胸高断面积扫描值较实测值普遍偏低。这主要是因为树干表面纹理的存在,树干横断面曲线并非规则的圆形曲线,而是不规则的封闭曲线,三维激光扫描设备可对树干表面纹理进行精细扫描,所以得到的树干断面曲线会更加符合实际。然而,在传统测树过程中,由于受仪器设备限制,得到的仅是理想状态下规则的近似圆形的面积,面积偏大在所难免,精度难以保证。

## 5 结 论

1) 根据表3,胸径平均误差为-0.16%,树高平均误差为-0.35%,胸高断面积误差为-0.11%,从误差数值来看,三项误差均满足精准林业测树精度要求,证实了三维激光扫描技术在林业测树领域的适用性。其中,胸高断面积误差最小,表明基于三维激光扫描技术测算林分蓄积量效果更佳。

2) 对测站进行合理布点是获取高精度扫描数据的前提条件。每个扫描仪器均对应一个测距精度较高的最佳范围,测距是否在最佳范围内会对点云配准精度产生重要影响<sup>[7]</sup>。经过实地扫描测量试验,扫描仪器(以FARO LLS120为例)最佳测距应为扫描客体高度的1.8~2.0倍。

3) 三维激光扫描技术作为新的非接触式测量手段在获取高精度立木测量数据的同时,不会对林木造成任何损害,有利于保护生态环境。但其工作目标多为近距离静态物体,扫描动态物体有一定局限性。考虑到林业野外调查中,大风等恶劣天气时有发生,为避免树木摇摆给仪器带来的扫描误差,建议大风天气不要使用扫描仪对立木进行扫描。此外,由于系统所用激光传感器对耀眼的阳光和目标反射光的分辨能力较差,容易导致读取的数据有误,因此建议多云天气或夜晚进行扫描,效果更佳。

### 参 考 文 献

- 1 Xu Zhiqin, Sun Changku, Tao Li, et al. Study on color three-dimensional laser scanning measuring method[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(8): 1008—1012.  
许智钦, 孙长库, 陶立, 等. 彩色三维激光扫描测量方法的研究[J]. 光学学报, 2003, 23(8): 1008—1012.
- 2 Nguyen Tien Thanh, Liu Xiuguo, Wang Hongping, et al. 3D model reconstruction based on laser scanning technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081201.  
Nguyen Tien Thanh, 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, 48(8): 081201.
- 3 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi, et al. Study on airborne scanning lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2584—2589.  
王建宇, 洪光烈, 卜弘毅, 等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2584—2589.
- 4 Xu Zhiqin, Sun Changku, Zheng Yizhong. Structure parameters' optimization design of the color 3D laser scanning measurement system [J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(9): 839—842.  
许智钦, 孙长库, 郑义忠. 彩色三维激光扫描系统结构参数的优化设计[J]. 中国激光, 2003, 30(9): 839—842.
- 5 J. Weiß. Application and statistical analysis of terrestrial laser scanning and forest growth simulations to determine selected characteristics of Douglas-Fir stands [J]. Folia Forestalia Polonica A, 2009, 51 (2): 123—137.
- 6 P. Wezyk, K. Koziol. Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory, first results from the polish forests [C]. IAPRS, 2007, 3: 424—429.
- 7 K. Tansey, N. Selmes. Estimating tree and stand variables in a Corsican pine woodland from terrestrial laser scanner data [J]. International J Remot Sensing, 2009, 30(19): 5195—5209.
- 8 N. Pfeifer, B. Gorte, D. Winterhalder. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data[C]. Proceedings of the 20th ISPRS Congress: Geo-Imagery Bridging Continents, 2004. 114—119.
- 9 Xu Jinjun, Zhang Minwei. Status and development of terrestrial laser scanner[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007, 52(1): 47—50.  
徐进军, 张民伟. 地面三维激光扫描仪: 现状与发展[J]. 测绘通报, 2007, 52(1): 47—50.
- 10 Zhao Yang, Yu Xinxiao. Application and outlook of terrestrial 3D laser scanning technology in forestry [J]. World Forestry Research, 2010, 23(4): 41—45.  
赵阳, 余新晓. 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.
- 11 Zhang Yuanzhi, Hu Guangyang. Application of 3D laser scanning system in engineering projection[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2002, 47(1): 34—36.  
张远智, 胡广洋. 基于工程应用的三维激光扫描系统[J]. 测绘通报, 2002, 47(1): 34—36.
- 12 Fu Wei, Zhang Hai. Reverse engineering design based on Geomagic Studio software [J]. Tool Engineering, 2007, 41(11): 54—57.  
付伟, 张海. 基于 Geomagic Studio 软件的逆向工程设计[J]. 工具技术, 2007, 41(11): 54—57.
- 13 Luo Dean, Liao Liqiong. Analysis on accuracy influential factors of terrestrial laser scanners [J]. Railway Investigation and Surveying, 2007, 33(4): 5—8.  
罗德安, 廖丽琼. 地面激光扫描仪的精度影响因素分析[J]. 铁道勘察, 2007, 33(4): 5—8.
- 14 Liu Jia. Error Analysis and Camera Calibration of the Panoramic 3D Laser Scanning System [D]. Beijing: Capital Normal University, 2009.  
刘佳. 三维激光全景扫描系统误差分析及相机标定[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- 15 Zheng Dehua, Shen Yunzhong. 3D laser scanner and its effect factor analysis of surveying error [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14(2): 32—34.  
郑德华, 沈云中. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析[J]. 测绘工程, 2005, 14(2): 32—34.