

激光摄影测树仪设计与试验

杨立岩¹ 冯仲科¹ 范光鹏¹ 吴发云²

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: 针对传统测量胸径、树高和林分空间结构参数的非智能化、非集成化、效率低等不足,以摄影测量学、测树学、图像处理技术和传感器技术原理为理论基础,设计了激光摄影测树仪。该仪器由 CCD 镜头、激光器、光源笔、PDA 和云台组成,测量时获取方位角、倾角及图像等参数,通过在 Android Studio 2.2 开发平台下利用 Java 语言进行编译的 3 个模块化程序,实现胸径、树高和林分结构参数测量功能。对 21 株立木进行胸径、树高测量,对 1 块样地内 15 株中心树进行林分空间结构参数测量试验,并与传统测量方法进行对比,结果表明:胸径测量相对误差绝对值的平均值为 2.55%,树高测量相对误差绝对值的平均值为 2.82%,角尺度与大小比数测量相对误差绝对值的平均值分别为 2.50% 和 2.86%,混交度测量与传统测量法测量结果相同,能够满足林业调查的精度要求。

关键词: 激光摄影测树仪; 摄影测量; 树高; 胸径; 林分空间结构; 安卓系统

中图分类号: S758.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0211-08

Design and Experiment of Laser Photogrammetric Instrument for Measuring Forest

YANG Liyan¹ FENG Zhongke¹ FAN Guangpeng¹ WU Fayun²

(1. Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. Academy of Forestry Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: To solve the shortcomings of non-intelligent, non-integrated and low efficiency of traditional method for measuring diameter at breast height (DBH), tree height and forest stand spatial structure parameters, a laser photogrammetric instrument for measuring forest based on the principle of photogrammetry, image processing technology, sensor technology and forest measurement was designed. The instrument was composed of CCD sensor, laser, LED flashlight, self-developed PDA and shell. There were three modular procedures which were compiled in the Java language and developed in Android Studio 2.2 systems development environment. The three modules were DBH measurement, tree height measurement and forest stand spatial structure parameters measurement. These three functions were achieved by obtaining parameters such as dip angle, azimuth and image information. The experiment of measuring DBH, tree height with 21 trees as samples and measuring forest stand spatial structure parameters with 15 reference trees in a plot as samples. Compared with the traditional measurement method, the mean absolute value of the relative error of DBH measurement was 2.55%, the tree height was 2.82%, the uniform angle index was 2.50%, the dominance was 2.86% and the measurement of the mingling was consistent with the traditional measurement method. The measurement accuracy of the instrument can meet the requirements of forestry survey. The method of using the laser photogrammetric instrument for measuring forest to measure the forest stand spatial structure parameters can be done which only required one person. Compared with the traditional measurement method, this method saved a half of labor and 31% of the working time. The instrument had a good prospect in the field of forestry basic investigation and forest stand spatial structure.

Key words: laser photogrammetric instrument for measuring forest; photogrammetry; tree height; diameter at breast height; forest stand spatial structure; Android system

收稿日期: 2017-09-24 修回日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371001)和北京市自然科学基金重点项目(6161001)

作者简介: 杨立岩(1989—),男,博士生,主要从事摄影测量与工程测绘、林业装备与信息化研究,E-mail: yangliyan369@163.com

通信作者: 冯仲科(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事精准林业、测绘与 3S 技术集成研究,E-mail: fengzhongke@126.com

0 引言

根颈以上 1.3 m 处的直径称为胸高直径,简称为胸径^[1]。树干的根颈处或地面至主干梢顶的长度称为树高。胸径与树高的测量是评价立地质量与林木生长状况的重要依据。测定直径的工具种类很多,常用的有轮尺、直径卷尺和钩尺等^[2]。树高一般用测高器测定,测高器种类繁多,其测高原理均比较简单,如布鲁莱斯测高器、超声波测高器^[3-5]。林分空间结构是反映林分内林木空间位置的重要特征,是林木的分布格局及属性在空间上排列方式的直观反映^[6-10]。目前林分空间结构参数主要有角尺度、大小比和混交度^[11-15]。在计算角尺度时,需测量中心树与 4 株最邻近树的相对位置,常用方法主要有判角器直接判读以及全站仪测量每棵树坐标进行计算,两种方法分别存在人工判读误差大和全站仪昂贵、笨重的问题。由于林地地形的不确定性,使得测量人员无法到达某些地块或者无法现场开展人工测量。为了克服这些不利因素的影响,非接触式的测量方式愈发受到重视。

随着信息智能化时代来临,利用更加集成化、智能化、精准化的林业调查观测装备成为了森林资源调查的主流^[16]。冯仲科等^[17-21]研发了 3D 电子角规、测树电子经纬仪、测树全站仪、远程摄影超站仪、测树超站仪等设备,可对胸径、树高进行测量。黄晓东等^[22]研制了多功能便携式微型超站仪,可测量胸径和树高。侯鑫新等^[23]提出了一种基于单电荷耦合器件图像传感器 CCD 相机与经纬仪相结合的胸径测量方法。赵芳等^[24]利用全站仪实现树高、材积的测量,并对其精度进行验证分析。邱梓轩等^[25]研制了森林智能测绘记算器,可以对胸径、树高进行测量。徐伟恒等^[26-27]研制了多功能电子测树枪,实现树高测量、任意高度处直径测量、林分空间结构参数测量等。近年来,国内研制的仪器已基本解决了设备功能单一、便携性差等问题,但仍存在精度较差、效率低、设备成本较高等问题。

针对上述情况,本研究针对林业调查重要基础因子与林分空间结构参数测定的实际需求,利用 CCD 摄像头、倾角传感器、电子罗盘、激光笔等,基于摄影测量学原理和测树学原理,由安卓系统嵌入自动解算胸径、树高、林分空间结构参数等程序,设计一种林分空间结构参数一站式摄影测树仪器——激光摄影测树仪,实现胸径测量、树高测量、角尺度测量、大小比测量、混交度测量等功能。

1 激光摄影测树仪构成

1.1 硬件构成

激光摄影测树仪的硬件包括 CCD 镜头、光源笔、激光器以及精准林业北京市重点实验室自主研发制造的掌上 PDA 和云台,见图 1。CCD 镜头选用伸缩式定焦光学镜头,背照式 CMOS (Exmor R CMOS)传感器,6 组 7 片(4 片非球面镜片,其中含 AA 镜片)的镜头结构,F1.8 ~ F4.9 最大光圈,LED 补光灯,Micro SD/Micro SDHC 存储卡,NP-BN/NP-BN1 锂电池,200 张续航能力。激光器采用优质亚克力克镜片组成的光学透镜,5 mW 功率管芯,优质亚克力镜片可以投射一束可视激光束。掌上 PDA 由 CPU、GPU、RAM、ROM、陀螺仪、重力传感器、WiFi 芯片、电子罗盘、GNSS 芯片、彩色触控显示屏、电源等高度集成并设计铝合金外壳,仪器硬件总体框架见图 2。



图 1 激光摄影测树仪

Fig.1 Photo of laser photogrammetric instrument

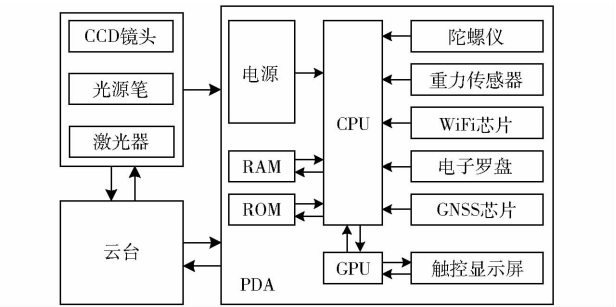


图 2 硬件总体框架

Fig.2 Framework of hardware

掌上 PDA 模块中选用高通骁龙 617 处理器 (MSM8952),八核 A53,1.5 GHz 核心频率,用于解释指令和处理数据;GPU 选用 Adreno 530,处理位数 64 位,用于处理获取图像信息;RAM 选用双通道 LPDDR4X,容量 2 GB,最高频率 1 866 MHz;ROM 选用 C8051F410 片内闪存设计,16 GB,速度级别 Class

10,最高传输速度 80 MB/s;5.5 英寸显示屏幕,分辨率 1 920 像素×1 080 像素,像素密度 401PPI。陀螺仪与电子罗盘采用三轴陀螺仪传感器 L3G4200D 和三轴磁场传感器 LSM303DLH 用于测量仪器的磁方位角;重力传感器采用三轴加速度传感器 LIS331DLH,用于测量设备倾斜角,WiFi 芯片采用双频 MT6625,支持 802.11a/b/g/n 无线协议,用于连接 CCD 镜头,控制拍摄及传输图像;GNSS 芯片采用了支持 GPS 和北斗双星定位系统模块 L218,用于标定样地位置。光源笔采用变焦广角微型电筒,LED 灯,18650 锂电池,用于昏暗情况下光源供给,提高树木边缘辨识度。

1.2 软件设计

PDA 内嵌软件在 Android Studio 2.2 开发环境下利用 Java 语言编译,采用模块化结构设计,分别为胸径测量模块、树高测量模块和林分空间结构参数测量模块。图 3a 为软件主程序流程图,用户根据实际的测量工作要求,选择进入不同的功能模块。图 3b~3d 为 3 个主要测量模块的程序流程图。测量结果数据均通过 SQLite 数据库进行读写操作,可通过 USB 接口传输。

1.3 主要功能参数

激光摄影测树仪包括胸径测量、树高测量、林分空间结构参数测量 3 项功能,其中林分结构参数测量集成了角尺度测量、大小比数测量和混交度测量

的功能。激光器激光等级为 II 级,激光波长 532 nm,功率 100 mW,光斑直径小于等于 10 mm,室内外兼用,可选择在连续激光和脉冲激光之间切换,可微调照射角度;倾角测量范围为 $-75^{\circ} \sim 75^{\circ}$,测量精度为 0.3° ;方位角测量范围为 $0 \sim 360^{\circ}$,测量精度为 1° 。操作系统为 Android 5.0.2,CPU 为 1.8 GHz 八核处理器,储存 16 GB ROM,内存 2 GB RAM。GNSS 芯片支持 GPS 和 BDS 双星定位,同时支持 LBS(基站定位)和 AGPS(辅助定位)功能,内嵌 EPOTM 技术和秒定技术,实现快速定位。单点定位精度为 2 m,SBAS 精度小于 1 m。PDA 尺寸为 $150.7\text{ mm} \times 75.3\text{ mm} \times 8.2\text{ mm}$,电源容量为 $3\,140\text{ mA}\cdot\text{h}$,可连续工作时间 8 h。CCD 感光度为 ISO 160~6400,WiFi 无线传输支持 802.11b/g/n,有效像素 2 020 万,曝光补偿 $\pm 3\text{ EV}$ ($1/3\text{ EV}$ 步长),最高图像分辨率 $5\,472\text{ 像素} \times 3\,648\text{ 像素}$,支持实时取景,用于获取图像信息,其电池连续工作时间为 5 h。云台尺寸为 $160\text{ mm} \times 78\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 。可变焦光源笔支持散光和强光,功率为 $3 \sim 10\text{ W}$,射程 200 m 以上,持续照射时间 2 h 以上。

2 激光摄影测树仪测量原理

2.1 激光摄影测树仪检校

激光摄影测树仪在测量时主要存在两种系统误差,分别为 CCD 镜头光学畸变误差和 CCD 主光轴

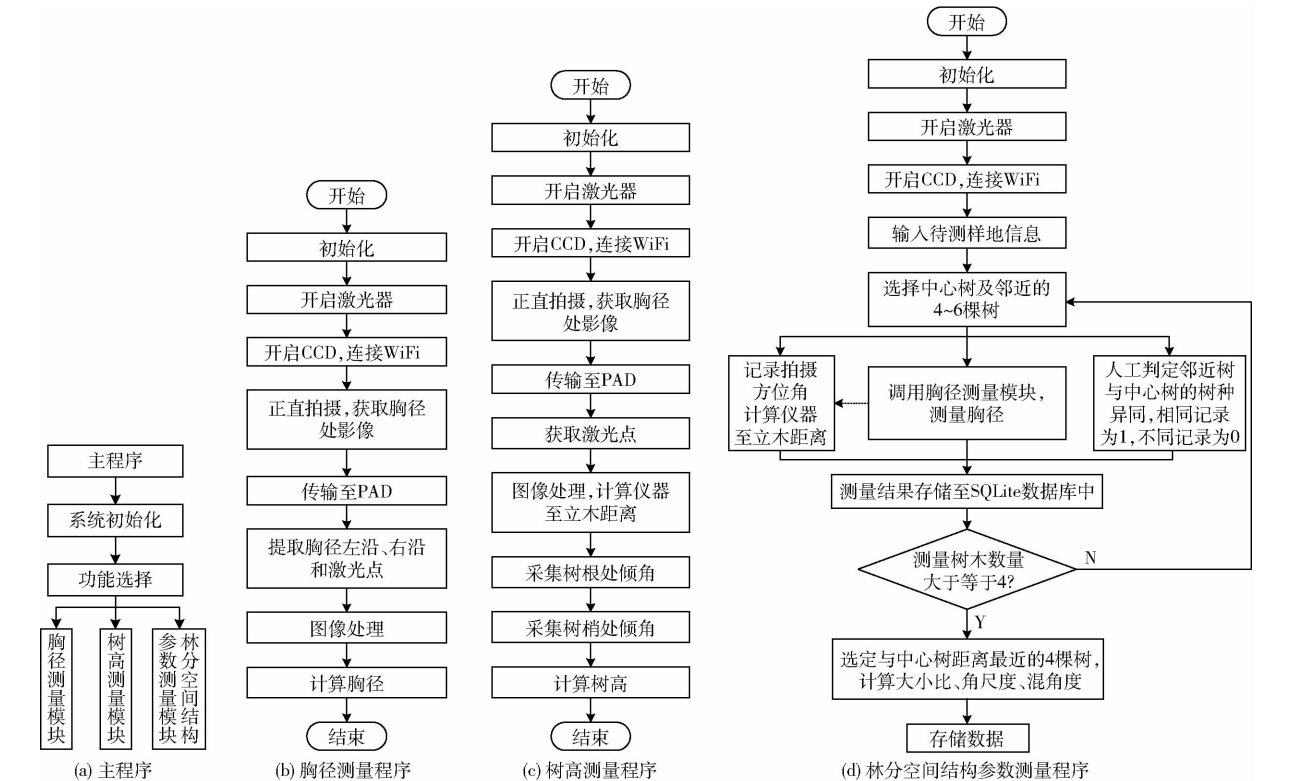


图 3 主程序和 3 个功能模块流程图

Fig. 3 Flow charts of main system and three function modules

与激光器主光轴偏移误差,为了提高测量精度,需将两种系统误差进行消除或减弱^[16]。

采用直接线性变换(DLT)模型求解 CCD 镜头的内方位元素和畸变参数,具体检校方法见文献[28]。为了减弱 CCD 主光轴与激光器主光轴的偏移误差,制作 60 cm × 100 cm 的棋盘格检校板,方格大小为 10 cm × 10 cm,打开 CCD 镜头和激光器,并在实时影像画面中生成以像主点为中心的十字正交线,首先左右微调激光器,使激光点与十字线的竖线重合。安置好激光摄影测树仪,将检校板依次放置在距离仪器 3 m 和 10 m 左右的位置 N 点和 F 点拍摄像片,并依次读取像片中激光点的像方坐标,激光器主光轴与 CCD 主光轴夹角 φ 计算式为

$$\begin{cases} \tan\varphi = \frac{m_N\sqrt{u_N^2+v_N^2}-m_F\sqrt{u_F^2+v_F^2}}{L_F-L_N} \\ \frac{L}{f} = \frac{D_{ab}}{\sqrt{(u_b-u_a)^2+(v_b-v_a)^2}} = m \end{cases} \quad (1)$$

式中 $m_N、m_F$ ——近点和远点拍摄的像片比例系数
 $(u_N,v_N)、(u_F,v_F)$ ——激光点在近点和远点拍摄的像方坐标

$L_N、L_F$ ——激光点在近点和远点拍摄时镜头至检校板距离

L ——CCD 镜头至检校板距离

f ——CCD 镜头焦距

D_{ab} ——在棋盘格中任意选择的 a 点与 b 点距离

$(u_a,v_a)、(u_b,v_b)$ ——影像中 a 点与 b 点的像方坐标

m ——像片比例系数

若 φ 为“+”,则向上微调激光器;反之,向下微调激光器。经过多次调整,使 φ 接近 0,即激光器主光轴平行于 CCD 主光轴,完成检校。以最后一次检校的 CCD 主光轴与激光器主光轴的距离 K 作为仪器常数,与 CCD 检校参数一起嵌入软件端。 K 的计算式为

$$K = \frac{1}{2}(m_N\sqrt{u_N^2+v_N^2}+m_F\sqrt{u_F^2+v_F^2}) \quad (2)$$

2.2 胸径测量

由图像中激光点至像主点的像方距离与对应的物方距离 K ,可解算像片比例系数 m ,提取像片中胸径左侧和右侧的像方坐标并计算胸径的像方距离,根据单幅像片摄影测量原理,计算得到立木胸径。

$$\begin{cases} D = m\sqrt{(u_R-u_L)^2+(v_R-v_L)^2} \\ m = \frac{K}{\sqrt{u_l^2+v_l^2}} \end{cases} \quad (3)$$

式中 D ——胸径
 $(u_L,v_L)、(u_R,v_R)$ ——胸径左侧和右侧的像方坐标
 (u_l,v_l) ——激光点的像方坐标

图 4 为激光摄影测树仪胸径测量界面。



图 4 胸径测量界面

Fig.4 Interface of DBH measurement

2.3 树高测量

树高测量主要利用单幅像片摄影测量原理和三角函数原理进行测算,树高测量方法见图 5。同胸径测量方法类似,获取像片比例系数 m ,根据 CCD 焦距 f 和像片拍摄时倾角 θ ,计算摄影中心至单木的平距 d ,获取仪器瞄准树根时倾角 α 和瞄准树顶时倾角 β ,计算得到立木树高 H 。

$$H = d(\tan\beta - \tan\alpha) \quad (4)$$

其中

$$d = mf\cos\theta$$

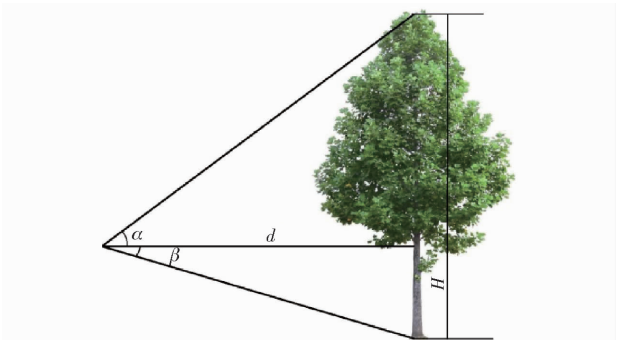


图 5 树高测量原理图

Fig.5 Principle diagram of tree height measurement

图 6 为树高测量界面。

2.4 林分空间结构参数测量

林分空间结构参数反映了林木之间的竞争程度、大小差异和水平分布格局等。其中,角尺度反映



图 6 树高测量界面

Fig. 6 Interface of tree height measurement

参数取值	0	0.25	0.50	0.75	1.00
混交度 (○●代表两个树种)	 零度混交	 弱度混交	 中度混交	 强度混交	 极强度混交
大小比数 (●●●代表不同大小)	 优势	 亚优势	 中庸	 劣势	 绝对劣势
角尺度 (α :相邻木夹角; α_0 :标准角)	 $\alpha \geq \alpha_0$ 绝对均匀	 $\alpha < \alpha_0$ 均匀	 $\alpha < \alpha_0$ 随机	 $\alpha > \alpha_0$ 不均匀	 $\alpha < \alpha_0$ 团状

图 7 混交度、大小比数和角尺度示意图

Fig. 7 Sketch of mingling, dominance and uniform angle indexes

似,按顺时针顺序依次测量邻近树 $T_i(i=1,2,3,4)$,同时,人工判读邻近树与中心树是否为同一树种。仪器根据以上获取参数可自动计算角尺度、大小比数和混交度并将结果显示在屏幕上,同时保存到 SQLite 数据库中方便随时查看和导出,图 8 为角尺度测量原理。

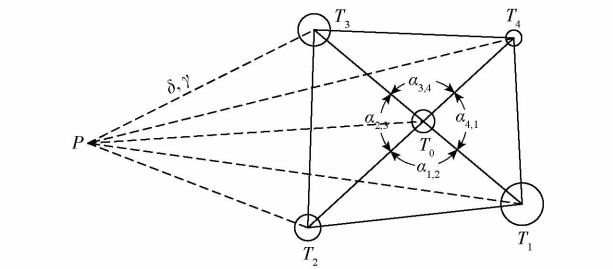


图 8 角尺度测量原理图

Fig. 8 Uniform angle index measuring principle

中心树与 4 株邻近树的坐标计算式为

$$\begin{cases} x_i = X_p + (m_i f \cos \delta_i + D_i / 2) \cos \gamma_i \\ y_i = Y_p + (m_i f \cos \delta_i + D_i / 2) \sin \gamma_i \end{cases}$$

$(i=0,1,2,3,4)$

(5)

式中 (x_i, y_i) ——第 i 株树木的平面坐标

了林分树木分布的均匀程度,大小比数反映了树木生长分布的优势度,混交度反映了不同树种间空间隔离程度^[29]。混交度、大小比数、角尺度的对应取值意义见图 7。

激光摄影测树仪可一站式测量林分空间结构参数,仪器内部可以自动计算并保存角尺度、大小比数和混交度的值。在具体测量时,确定待测量中心树和最邻近的 4 棵树,将激光器瞄准中心树 T_0 拍摄像片,根据胸径测量原理自动解算胸径 D ,并通过仪器获取倾角 δ 和方位角 γ ;与测量中心树 T_0 的方法类

- (X_p, Y_p) ——安置仪器点 P 的坐标
- m_i ——测量第 i 株树时的像片比例系数
- δ_i ——第 i 株树木的倾角
- γ_i ——第 i 株树木的方位角
- D_i ——第 i 株树木的胸径

根据中心树与邻近树的坐标得到第 i 株树与第 $i+1$ 株树的夹角,计算式为

$$\begin{cases} S_{0,i} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \\ S_{0,i+1} = \sqrt{(x_{i+1} - x_0)^2 + (y_{i+1} - y_0)^2} \\ S_{i,i+1} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \\ \alpha_i = \arccos \frac{S_{0,i}^2 + S_{0,i+1}^2 - S_{i,i+1}^2}{2S_{0,i}S_{0,i+1}} \\ \alpha_4 = 360 - \sum_{i=1}^3 \alpha_i \end{cases}$$

$(i=1,2,3)$

(6)

式中 S ——各树之间的平距
 α_i ——第 i 株树与第 $i+1$ 株树的夹角
角尺度计算式为

$$W = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 z_i$$

(7)

其中

$$z_i = \begin{cases} 1 & (\alpha_i < 72^\circ) \\ 0 & (\alpha_i \geq 72^\circ) \end{cases}$$

$(i = 1, 2, 3, 4)$

(8)

大小比数计算式为

$$U = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_i$$

(9)

其中

$$k_i = \begin{cases} 0 & (\text{第 } i \text{ 株邻近木胸径小于中心树}) \\ 1 & (\text{第 } i \text{ 株邻近木胸径大于等于中心树}) \end{cases}$$

$(i = 1, 2, 3, 4)$

(10)

混交度计算式为

$$M = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 v_i$$

(11)

其中

$$v_i = \begin{cases} 0 & (\text{第 } i \text{ 株邻近木与中心树为同树种}) \\ 1 & (\text{第 } i \text{ 株邻近木与中心树为不同树种}) \end{cases}$$

$(i = 1, 2, 3, 4)$

(12)

3 试验结果与分析

3.1 胸径树高测量试验

为了验证激光摄影测树仪的胸径、树高测量功能和测量精度,在北京海淀区北安河乡鹫峰国家森林公园进行了试验,选取不同立地条件下的林区树木对仪器测量功能展开试验,选择 21 株树作为测量样本,其中包含杨树、油松、刺槐等 7 种树木。以胸径尺测量的胸径作为胸径真值,以全站仪测量的树高作为树高真值,将激光摄影测树仪测量的胸径和树高与真值进行比较。经计算,胸径和树高相对误差绝对值的平均值分别为 2.55% 和 2.82%,测量结果见表 1。

3.2 林分空间结构参数测量试验

为了验证激光摄影测树仪的林分空间结构参数测量功能和测量精度,在北京海淀区北安河乡鹫峰国家森林公园内选择了 1 块样地进行试验。在样地内选择 15 株中心树,1 名操作者用激光摄影测树仪测量法对选择的中心树进行测量,2 名操作者使用传统测量法复测。在使用传统测量法时,角尺度测量使用判角器进行直接判读,大小比数测量使用胸径尺进行逐一测量并判读,混交度测量使用直接判读法,判读结果均用纸质记录。将两种方法测量结果进行对比,如表 2 所示,结果表明角尺度与大小比数测量相对误差绝对值的平均值分别为 2.50% 和 2.86%,混交度测量结果相同,即 3 个林分空间结构参数测量相对误差绝对值的平均值均不超过 3%,能够满足测量精度要求。

表 1 胸径与树高测量结果						
Tab. 1 Result of DBH and tree height measurements						
树种	胸径尺 测量胸 径/cm	激光摄影 测树仪测 量胸径/ cm	胸径相 对误差 绝对 值/%	全站仪 测量树 高/m	激光摄 影测树 仪测量 树高/m	树高相 对误差 绝对 值/%
杨树	18.6	19.1	2.69	22.6	23.2	2.65
杨树	29.5	29.1	1.36	30.5	29.8	2.30
杨树	13.4	13.7	2.24	17.9	18.3	2.23
油松	17.7	17.4	1.69	9.1	8.8	3.30
油松	21.5	20.9	2.79	14.2	14.8	4.23
油松	28.4	28.9	1.76	12.1	11.7	3.31
刺槐	16.3	15.7	3.68	8.2	8.5	3.66
刺槐	17.1	17.6	2.92	7.6	7.9	3.95
刺槐	16.8	16.4	2.38	8.3	8.0	3.61
栎树	22.1	22.6	2.26	10.5	10.8	2.86
栎树	19.7	19.3	2.03	9.8	9.9	1.02
栎树	18.5	19.1	3.24	11.3	11.5	1.77
元宝枫	15.2	15.6	2.63	8.5	8.3	2.35
元宝枫	13.1	13.4	2.29	7.8	7.5	3.85
元宝枫	15.3	14.9	2.61	9.4	9.6	2.13
侧柏	12.1	12.4	2.48	6.8	7.0	2.94
侧柏	10.3	10.8	4.85	7.5	7.2	4.00
侧柏	12.6	13.0	3.17	7.3	7.5	2.74
构树	20.4	20.1	1.47	8.2	8.4	2.44
构树	15.6	16.2	3.85	7.4	7.3	1.35
构树	17.3	17.5	1.16	7.6	7.8	2.63
平均值	17.69	17.80	2.55	11.08	11.13	2.82

表 2 林分空间结构参数测量结果						
Tab. 2 Result of forest stand spatial structure measurement						
观测点 序号	激光摄影测树仪观测法			传统测量法		
	角尺度	大小比数	混交度	角尺度	大小比数	混交度
1	0.50	0.50	0.25	0.50	0.50	0.25
2	0.75	0.50	0.25	0.75	0.50	0.25
3	0.75	0.75	0	0.75	0.75	0
4	0.50	0.50	0.25	0.50	0.50	0.25
5	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00	0.50
6	1.00	0.50	0.25	0.75	0.50	0.25
7	0.75	0.50	0.25	0.75	0.50	0.25
8	0.50	0.75	0.25	0.50	0.75	0.25
9	0.50	0.50	0	0.50	0.25	0
10	0.75	1.00	0	0.75	1.00	0
11	0.75	0.50	0.25	0.75	0.50	0.25
12	0.50	0.50	0.25	0.50	0.50	0.25
13	0.25	0.50	0.25	0.50	0.50	0.25
14	1.00	0.25	0.50	1.00	0.25	0.50
15	0.75	0.50	0	1.00	0.50	0
平均值	0.67	0.58	0.22	0.65	0.57	0.22
相对误差绝对值/%				2.50	2.86	0

4 结论

(1)设计了一种由 CCD 镜头、激光器、光源笔、PDA 和云台组成的激光摄影测树仪。根据摄影测量学原理、测树学原理,利用图像处理技术和 Java 开发技术,实现了胸径测量、树高测量和林分空间结构参数测量 3 项功能,其中林分空间结构参数测量功能实现了角尺度、大小比数和混交度的一站式测量。经在北京海淀区北安河乡鹫峰国家森林公园内开展的激光摄影测树仪功能和精度验证,结果表明:胸径测量相对误差绝对值的平均值为 2.55%,树高测量相对误差绝对值的平均值

为 2.82%,角尺度测量相对误差绝对值的平均值为 2.50%,大小比数测量相对误差绝对值的平均值为 2.86%,混交度测量结果与传统测量方法相同,能够满足林业调查的精度要求。

(2)研制的激光摄影测树仪实现了无纸化自动测量,可对数据进行存储和导出,减少了内业处理工作量,且成本造价较低。另外,该仪器在作业时为零接触测量,可见即可测。与激光测距类型的仪器相比,避免了激光测距仪在测量时,树皮的不平整造成返回信号弱或返回信号有偏差等问题。因此,该仪器在林业基础调查和林分空间结构参数测量相关领域具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 孟宪宇. 测树学[M]. 3 版. 北京:中国林业出版社, 2008.
- 2 孙秀荣,荣成库. 伐倒木的测定方法探讨[J]. 产业与科技论坛, 2011, 10(21): 76.
- 3 徐伟恒,冯仲科,苏志芳,等. 手持式数字化多功能电子测树枪的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 90-99.
XU Weiheng, FENG Zhongke, SU Zhifang, et al. Development and experiment of handheld digitalized and multi-functional forest measurement gun[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 90-99. (in Chinese)
- 4 周克瑜. 基于 Android 的智能测树系统研究与实现[D]. 杭州:浙江农林大学, 2015.
- 5 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, 29(增刊 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, 29(Supp. 2): 36-39. (in Chinese)
- 6 惠刚盈. 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 1-8.
HUI Gangying. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighborhood trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 1-8. (in Chinese)
- 7 胡艳波,惠刚盈. 基于相邻木关系的林木密集程度表达方式研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(9): 1-8.
HU Yanbo, HUI Gangying. How to describe the crowding degree of trees based on the relationship of neighboring trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(9): 1-8. (in Chinese)
- 8 龚直文,亢新刚,顾丽,等. 天然林林分结构研究方法综述[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(3): 434-443.
GONG Zhiwen, KANG Xin'gang, GU Li, et al. Research methods on natural forest stand structure: a review[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(3): 434-443. (in Chinese)
- 9 蒋娴,张怀清,贺姗姗,等. 林分可视化模拟系统的设计[J]. 林业科学研究, 2009, 22(4): 597-602.
JIANG Xian, ZHANG Huaiqing, HE Shanshan, et al. A study on design of stand visual simulation system[J]. Forest Research, 2009, 22(4): 597-602. (in Chinese)
- 10 徐海. 天然红松阔叶林经营可视化研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2007.
- 11 惠刚盈, GADOW K V, 胡艳波. 林分空间结构参数角尺度的标准角选择[J]. 林业科学研究, 2004, 17(6): 687-692.
HUI Gangying, GADOW K V, HU Yanbo. The optimum standard angle of the uniform angle index[J]. Forest Research, 2004, 17(6): 687-692. (in Chinese)
- 12 廖彩霞,吴瑶,衣得萍,等. 林分空间结构的研究[J]. 林业科技情报, 2007, 39(2): 40-41.
LIAO Caixia, WU Yao, YI Deping, et al. Study of forest stand spatial structure[J]. Forestry Science and Technology Information, 2007, 39(2): 40-41. (in Chinese)
- 13 张会儒,武纪成,杨洪波,等. 长白落叶松-云杉-冷杉混交林林分空间结构分析[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(3): 319-325.
ZHANG Huiru, WU Jicheng, YANG Hongbo, et al. Spatial structure of mixed larch-spruce-fir stands[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(3): 319-325. (in Chinese)
- 14 龚直文,亢新刚,顾丽,等. 长白山云冷杉针阔混交林演替过程空间格局变化[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(1): 44-46.
GONG Zhiwen, KANG Xingang, GU Li, et al. Spatial pattern dynamics of forest succession in spruce-fir mixed stand in Changbai Mountain, northeast China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(1): 44-46. (in Chinese)
- 15 HUI Gangying, ZHAO Xiuhai, ZHAO Zhonghua, et al. Evaluating tree species spatial diversity based on neighborhood relationships[J]. Forest Science, 2011, 57(4): 292-300.
- 16 黄晓东,冯仲科. 基于数码相机的样木胸径获取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 266-272. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?lag=1&file_no=20150939f&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.039.

- HUANG Xiaodong, FENG Zhongke. Obtainment of sample tree's DBH based on digital camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 266–272. (in Chinese)
- 17 冯仲科, 杨立岩. 一种定角测距树径测量方法:103471551[P]. 2017-02-15.
- 18 HE Cheng, HONG Xiafang, LIU Kezhen, et al. An improved technique for non-destructive measurement of the stem volume of standing wood[J]. Southern Forests, 2016, 78(1): 53–60.
- 19 高祥, 冯仲科, 王智超, 等. 基于电子经纬仪立木无损精测技术的干形指数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 299–305. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150142&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.042.
- GAO Xiang, FENG Zhongke, WANG Zhichao, et al. Study on stem form index based on non-destructive precision measurement through electronic theodolite[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 299–305. (in Chinese)
- 20 曹忠, 巩奕成, 冯仲科, 等. 电子经纬仪测量立木材积误差分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 292–298. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150141&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.041.
- CAO Zhong, GONG Yicheng, FENG Zhongke, et al. Error analysis on standing tree volume measurement by using electronic theodolites[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 292–298. (in Chinese)
- 21 王智超, 冯仲科, 闫飞, 等. 全站仪测树的内外业一体化方法研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(6): 134–138.
- WANG Zhichao, FENG Zhongke, YAN Fei, et al. Integrated indoor and field forest measurement by using total station[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(6): 134–138. (in Chinese)
- 22 黄晓东, 冯仲科, 解明星, 等. 自动测量胸径和树高便携设备的研制与测量精度分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 92–99.
- HUANG Xiaodong, FENG Zhongke, JIE Mingxing, et al. Developing and accuracy analysis of portable device for automatically measuring diameter at breast height and tree height[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 92–99. (in Chinese)
- 23 侯鑫新, 谭月胜, 钱桦, 等. 一种基于单 CCD 与经纬仪的树木胸径测量方法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(4): 1225–1228.
- HOU Xinxin, TAN Yuesheng, QIAN Hua, et al. DBH measurement method based on tree images taken by single-CCD camera mounted on theodolite[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(4): 1225–1228. (in Chinese)
- 24 赵芳, 冯仲科, 高祥, 等. 树冠遮挡条件下全站仪测量树高及材积方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 182–190.
- ZHAO Fang, FENG Zhongke, GAO Xiang, et al. Measure method of tree height and volume using total station under canopy cover condition[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 182–190. (in Chinese)
- 25 邱梓轩, 冯仲科, 蒋君志伟, 等. 森林智能测绘记数器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 179–187. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170522&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.022.
- QIU Zixuan, FENG Zhongke, JIANG Junzhiwei, et al. Design and experiment of forest intelligent surveying and mapping instrument[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 179–187. (in Chinese)
- 26 徐伟恒. 手持式超站测树仪研制及功能测试研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- 27 冯仲科, 徐伟恒, 杨立岩. 利用手持式超站测树仪测量林分空间结构参数[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 213–217.
- FENG Zhongke, XU Weiheng, YANG Liyan. Forest stand spatial structure measurement method using handheld tree measurement smart station[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 213–217. (in Chinese)
- 28 杨军. 非量测数码相机检校方法的研究[J]. 测绘科学, 2009, 34(增刊1): 89–91.
- YANG Jun. Research method of non-survey digital camera calibration[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(Supp.1): 89–91. (in Chinese)
- 29 LI Yuanfa, HUI Gangying, ZHAO Zhonghua, et al. The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural[J]. Journal of Vegetation Science, 2012, 23(6): 1180–1190.