

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.022

森林智能测绘记算器设计与试验

邱梓轩 冯仲科 蒋君志伟 范永祥
(北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 森林调查主要包括单木胸径、单木树高、单木材积、林分平均胸径、林分平均高、林分密度、林分蓄积量等。以摄影测量学原理、图像处理技术原理、测树学原理为理论基础,设计了森林智能测绘记算器,由自主研发的 PDA 模块、EDM 模块和云台组成,测量时获取倾角、方位角、距离及图像信息等参数,通过在 Android Studio 2.1 开发环境下集成并利用 Java 语言进行汇编的 4 个模块化程序,能够实现树高测量、胸径测量、三元材积解算、3D 角规样地测量、基本测量等 5 项功能。通过试验验证,树高测量精度达 97.13%,胸径测量精度达 97.08%,材积测量精度达 94.52%,林分平均高测量精度达 98.09%,林分平均胸径测量精度达 98.05%,林分密度测量精度达 96.59%,林分蓄积量测量精度达 95.72%,符合国家森林资源连续清查的精度要求,可以在林业调查中推广使用。

关键词: 森林调查; 测绘记算器; 安卓系统; 树高; 胸径; 林分参数

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0179-09

Design and Experiment of Forest Intelligent Surveying and Mapping Instrument

QIU Zixuan FENG Zhongke JIANG Junzhiwei FAN Yongxiang
(Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Forest resources inventory includes individual tree DBH (diameter at breast height), individual tree height, individual tree volume, stand average DBH, stand average height, stand density and stand volume. The theoretical basis was based upon the principle of photogrammetry, image-processing technology and forest measurement, and the forest intelligent dendrometer was developed which was composed of the self-developed R&D PDA module, EDM module and rotational station. There were four modular procedures which were compiled in the Java language and developed in Android Studio 2.1 systems development environment, and five measuring functions, such as tree height, DBH, three-element volume calculation, 3D angle gauge plot and basic measurement, and they were implemented by getting dip angle, azimuth, distance, image information and other parameters. Validated by experiments, the measuring accuracy of tree height was as high as 97.13%, DBH was 97.08%, volume was 94.52%, stand average height was 98.09%, stand average DBH was 98.05%, stand density was 96.59%, and stand volume measurement accuracy was 95.72%. Thus the equipment was in line with the accuracy requirement of national forest inventory (NFI), which can be promoted to be used in the forestry inventory.

Key words: forest resources inventory; surveying and mapping instrument; Android system; tree height; diameter at breast height; stand parameters

引言

树木的直接测定因子及其派生因子统称为基本测树因子,例如:树干直径、树高等,另外,在直接测

定因子基础上会派生一些测树因子,例如:树干横截面积、树干材积等^[1]。森林观测内容主要包括单木胸径、单木树高、林分平均胸径、林分平均高、林分蓄积量、林分密度等^[2]。由于林中地形复杂多变且林

收稿日期: 2016-08-08 修回日期: 2016-09-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(41371001)
作者简介: 邱梓轩(1991—),男,博士生,主要从事林业装备信息化研究,E-mail: baronq@foxmail.com
通信作者: 冯仲科(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事林业装备信息化研究,E-mail: fengzhongke@126.com

分环境阴暗潮湿,森林资源调查面临许多问题,为测量装备的使用带来了新的挑战,因此研制一系列便于在森林中使用的地面测量仪器对林业生产实践工作具有现实意义^[3]。

随着信息化、智能化技术的快速发展,利用更加集成化、智能化、精准化的森林植被观测装备成为森林资源调查的主流^[4]。各类测树仪器的进步都伴随着科学技术的发展和测树原理的改进及完善过程^[5]。林业调查主要用皮尺测量水平距或者斜距,皮尺测量精度不高且效率低下,激光测距仪^[6-13]很好地解决了这一难题,例如:纽康激光测距仪、尼康激光测距仪^[14]。传统的测树仪器功能单一,只包含测高、测径、测距等,国内外逐步生产了一批多功能测树仪器,例如:巴爾斯特勞测树仪、光学测树仪、电子角规测树仪、森林罗盘仪^[15]。北京林业大学利用全站仪结合 PC-E500 型电子手簿对树冠进行精准监测,并利用三维激光扫描仪对单木进行了精准测量,进而模拟冠形、提取树冠体积和表面积,以精确计算单木的森林生物量^[16]。冯仲科等研发了 3D 电子角规,利用测树电子经纬仪^[17-21]、测树全站仪^[22-24]、测树超站仪^[25-26]进行森林计测,并对其精度进行了分析。黄晓东等^[27]研制了可测量胸径和树高的多功能便携式微型超站仪,实现树高、胸径自动测量。徐伟恒等^[28]研制了手持式数字化多功能电子测树枪,实现了树高测量、任意处直径测量等。目前,国内研制的仪器虽然解决了功能单一、便携性差、操作复杂等问题,但是,仍然存在系统落后、成本昂贵、精度较差等问题。

随着智能手机和平板电脑性能的提升,以及其内置传感器功能的完善,结合图像处理技术和摄影测量学,为森林计测向智能化、精准化、便携化发展提供了新方向。针对上述情况,本研究结合森林计测实际需求,利用激光测距传感器、倾角传感器、电子罗盘、CCD 镜头,基于测树学原理及摄影测量学原理,由安卓系统内嵌程序自动解算出树高、胸径、材积以及林分参数,将各元器件精集成,形成快速、便携、智能的森林调查仪器——森林智能测绘记算器,实现树高测量、胸径测量、三元材积解算、遮挡条件下树高测量、角规样地测量等功能。

1 森林智能测绘记算器构成

1.1 硬件结构

森林智能测绘记算器的硬件组成包括 PDA (Personal digital assistant) 模块 (FAM⁵-PDA 型,精准林业北京市重点实验室,中国)、EDM (Electronic distance measurement) 模块 (PD510S 型,南方测绘仪

器有限公司,中国)和自主研发云台,如图 1 所示。PDA 模块是将 CPU (Central processing unit)、RAM (Random access memory)、ROM (Read only memory image)、GPU (Graphics processing unit)、触控显示屏、CCD 镜头、重力传感器、陀螺仪、GPS (Global positioning system) 芯片、蓝牙芯片、WiFi 芯片、电源等高度集成,并根据人体工程学设计铝合金外壳,将 2 个部件高密度、高可靠地集成于云台,并分别可拆卸、充电、更换,方便操作,如图 2 所示。



图 1 森林智能测绘记算器
Fig. 1 Schematic of forest intelligent dendrometer

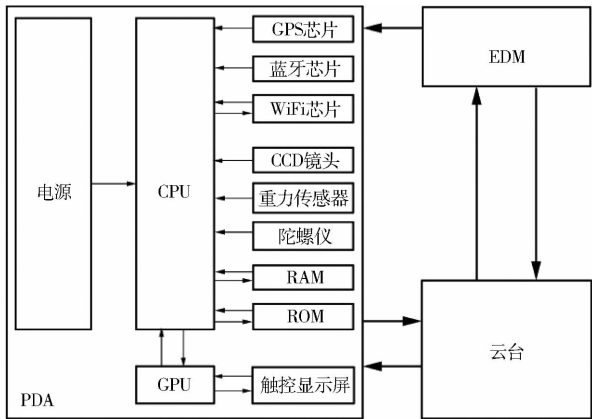


图 2 硬件总体框架
Fig. 2 Framework of hardware

PDA 模块中的 CPU 选用联发科 Helio P10 型处理器,频率 1.8 GHz (大四核),核心数 8 核,用于解释指令和处理数据;GPU 选用 Mali-T860 型,处理位数 64 位,用于处理获取图像信息;RAM 选用 LPDDR3 内存架构,容量 2 GB,最高频率 2 133 MHz;ROM 选用 C8051F410 片内闪存设计,16 GB,最高持续速度 80 m/s,速度级别 Class 10;CCD 镜头选用定焦光学镜头,定焦 4 mm,1 300 万像素,LED 补光灯,光圈 f/2.2,用于获取图像信息;重力传感器采用三轴加速传感器 LIS331DLH,用于测量测绘记算器和测点间的倾斜角;陀螺仪采用集成电路芯片 GY-26,用于测量测绘记算器到测点的磁方位角;GPS 芯片用于接收 GPS 信号,蓝牙芯片用于接收 EDM 模块所测得的数据,WiFi 芯片用于传输图像信息及连

接网络;电源采用集成电路 TPS61020,用于向各器件供电。

1.2 软件设计

在 Android Studio 2.1 开发环境下集成,利用 Java 语言进行汇编实现,将数据存储在轻型 SQLite 数据库中,PDA 使用基于 Linux 核心的安卓系统平台。软件采用模块化结构设计,有树高测量模块、胸径测量模块、三元材积解算模块、3D 角规样地测量模块,最终汇总为森林调查软件。

图 3a 为森林调查软件主程序流程图,主程序主要包括初始化界面以及功能选择界面,用户可以通过选择进入不同功能模块。图 3b~3e 为 4 项功能模块的程序流程图,树高、胸径、材积、林分平均高、林分平均胸径、林分密度、林分蓄积量等主要测量参数以及图像信息、倾角、斜距、磁方位角、角规系数等辅助测量参数均能实时显示,获取的数据会以文件形式保存在内存中,可通过 micro USB 导出。

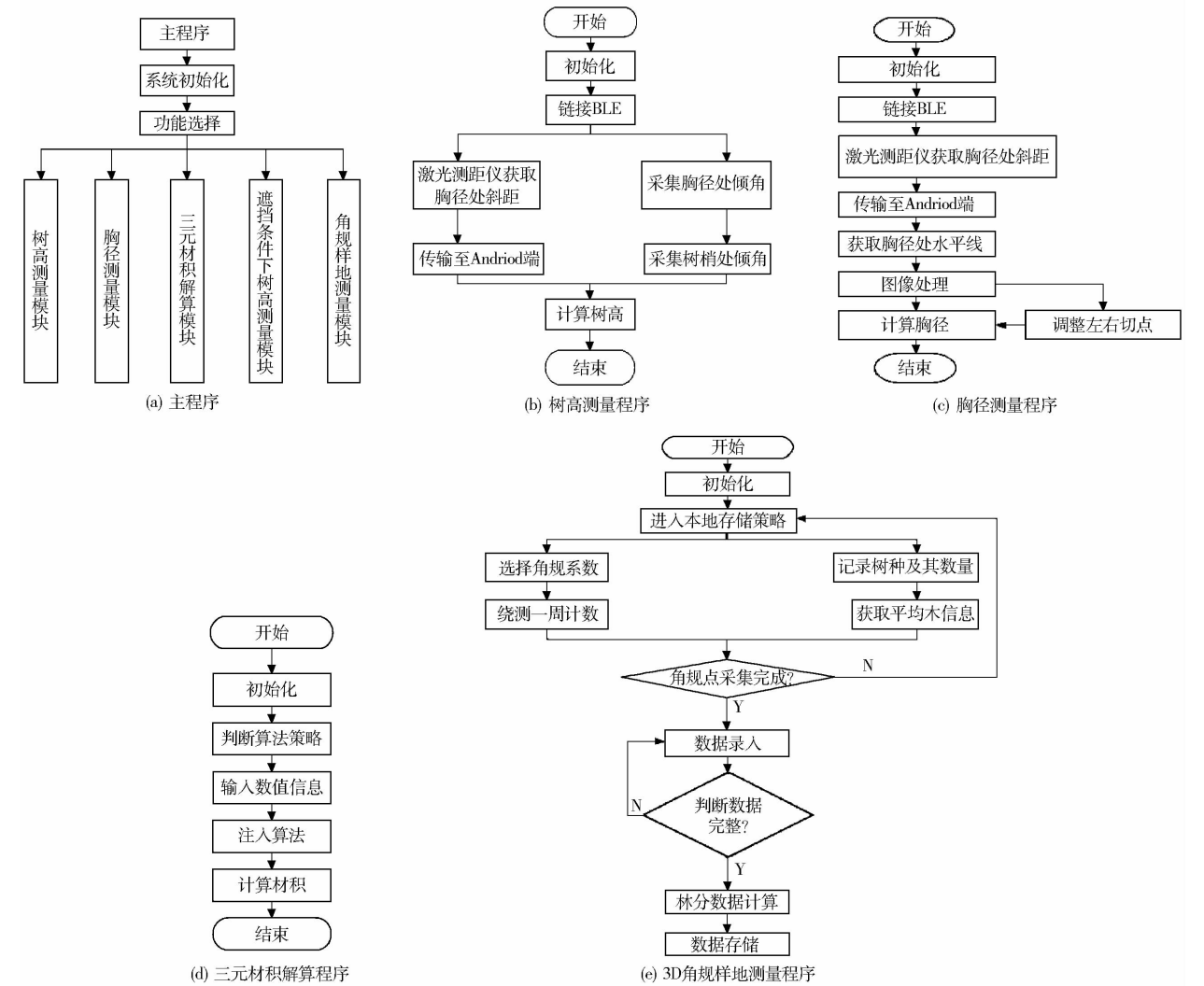


图 3 主程序和 4 个功能模块流程图

Fig.3 Flow chart of main program and 4 function modules

1.3 功能参数

森林智能测绘记算器的功能包括树高测量、胸径测量、三元材积解算、3D 角规样地测量、基本测量 5 项功能。距离测量,在使用觇板条件下,测量距离范围为 0.1~200 m,测量精度为 ± 1.5 mm,最小显示单位为 0.1 mm,激光等级为 II 级,激光类型为 635 nm,功率小于 1 mW;倾角测量范围为 $-75^{\circ} \sim 75^{\circ}$,测量精度为 1° 。方位角测量范围为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$,测量精度为 1° 。操作系统为 Android 4.2.2,CPU 为

1.8 GHz 八核处理器,内存 2 G RAM,储存 16 G ROM。GNSS 指标,接收机为 GPS L1、L2,GLONASS L1、L2,BDS B1、B2(B3 可选),支持 SBAS、CORS 等多种差分改正,单点定位为 2 m,SBAS 精度小于 1 m,外部源差分小于 0.1 m(CEP),后精度差分 $2\text{ cm} + 1 \times 10^{-4}\text{ cm}$ 。PDA 尺寸为 $153.6\text{ mm} \times 75.5\text{ mm} \times 8.2\text{ mm}$,其电池连续工作时间为 8 h,EDM 尺寸为 $137\text{ mm} \times 52\text{ mm} \times 28\text{ mm}$,其电池连续工作时间为 5 h,云台尺寸为 $160\text{ mm} \times 78\text{ mm} \times$

150 mm,测绘记算器的工作环境温度为 - 20 ~ 50℃。

2 森林智能测绘记算器测量原理

2.1 树高测量

树高测量具体步骤为:①确定合适测点位置 A 点,保证测点和立木之间无遮挡且距离尽量等于树高 H (图 4)。②对准树木根径处点 B ,点击测距键进行测量,点击屏幕左上角“0.000”进行距离更新,点击“确定”测得斜距 L_1 和倾角 α_1 。③点击屏幕“下一步”,对准树梢顶点 C ,再点击“完成”,测得倾角 α_2 后,计算出树高

$$H = \frac{L_1 \sin \alpha_2}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \alpha_2 \right)}$$

$(\alpha_1, \alpha_2 \in (-90^\circ \sim 90^\circ))$ (1)

式中 L_1 ——测站点到树根的斜距,m
 α_1 ——对准树根时的倾角,(°)
 α_2 ——对准树梢时的倾角,(°)

树高 H 能自动显示和储存,点击“结果”可以查看,图 5 为树高测量界面。

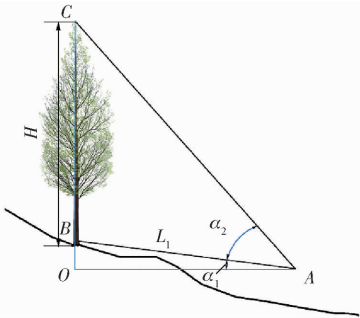


图 4 树高测量原理图

Fig. 4 Principle diagram of tree height measurement



图 5 树高测量界面

Fig. 5 Interface of tree height measurement

图 4 中测站点 A 在根径下方,测得的 α_1 为正值,若测站点 A 在根径上方,测得的 α_1 为负值,同理,测站点 A 在树梢上方,测得的 α_2 为负值,若测站点 A 在树梢下方,测得的 α_2 为正值,所以,无论哪种情况,均可用式(1)进行计算。

2.2 胸径测量

胸径测量的具体步骤为:①将屏幕中十字丝对准立木树干中心,点击测距键进行测量,点击屏幕左上角“0.000”进行距离 L 更新,再点击红色按钮确认,图 6 为胸径测量界面示意图。②调整“+”“-”使边界线卡在待测立木树干两侧,计算出胸径 D ,胸径 D 能自动显示和储存,点击“结果”可以查看,图 7 为胸径测量结果界面。



图 6 胸径测量界面

Fig. 6 Interface of DBH measurement



图 7 胸径测量结果界面

Fig. 7 Interface of DBH measuring result

胸径测量时,可以通过测绘记算器测出测站点到胸径距离 L ,测绘记算器的 CCD 镜头定焦焦距为 f ,如图 8 所示,通过 CCD 镜头成像原理解算获得胸径 D 。

$$D = \frac{NL}{f}$$
 (2)

式中 N ——测绘记算器屏幕内所测图像像素值,像素

2.3 三元材积解算

三元材积解算具体步骤为:①选择视野良好的测点 A ,架设测绘记算器,然后对胸径处作标记,观测胸径记为 d_1 ,树高 $h_1 = 1.3$ m。②目测选择树高约 2/3 处,观测此处直径记为 d_2 ,此处树高记为 h_2 。③观测整棵树树高记为 H ,如图 9 所示,为胸径测量界面。

三元材积解算原理示意图如图 10 所示。对地径处到胸径处树木材积视为圆柱体,这段树木材积的计算式为

$$V_1 = \frac{1}{4} \pi d_1^2 h_1 \times 10^{-4}$$
 (3)

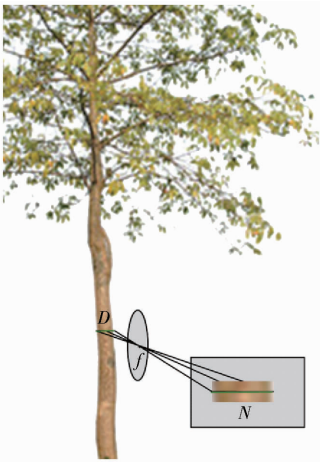


图 8 CCD 镜头成像原理示意图
Fig. 8 Principle of CCD-based imaging

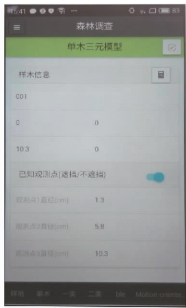


图 9 三元材积解算界面
Fig. 9 Interface of three-element volume calculation

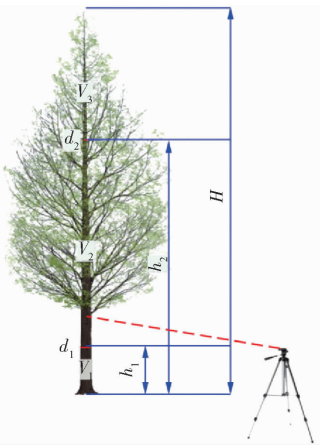


图 10 三元材积解算原理示意图
Fig. 10 Principle of three-element volume calculation

式中 V_1 ——地径处到胸径处材积, m^3
胸径处到 d_2 处树木材积, 可根据台柱体体积的计算方法获得

$$V_2 = \frac{1}{12} \pi (d_2^2 + d_1^2 + d_2 d_1) (h_2 - h_1) \times 10^{-4} \quad (4)$$

式中 d_2 ——测绘记算器所测树高约 2/3 处胸径, cm
 h_2 ——测绘记算器所测树的 2/3 处树高, m
 V_2 ——胸径处到 d_2 处树木材积, m^3

对 d_2 到树梢处树木材积, 可根据圆锥体计算方法获得

$$V_3 = \frac{1}{12} \pi d_2^2 (H - h_2) \times 10^{-4} \quad (5)$$

式中 H ——测绘记算器所测立木整体树高, m
 V_3 —— d_2 到树梢处树木材积, m^3
而立木的整体材积, 由 3 段材积相加得到

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (6)$$

式中 V ——测绘记算器计算得出的立木整体材积, m^3

2.4 3D 角规样地测量

3D 角规样地测量具体步骤是:①在样地中选取样点, 以此样点为角规放置点。②利用测绘记算器 (3D 角规样地观测功能) 进行绕测, 按照角规计数原则进行计数。③测量并记录角规点到计数木距离 L_i 、计数木方位角 T_{oi} 、计数木树高 H_i 、胸径 D_i 、树种, 图 11 为 3D 角规样地测量界面。



图 11 3D 角规样地测量界面
Fig. 11 Interface of 3D angle gauge plot measurement

3D 角规具体使用步骤为:①进行角规样地观测时, 点击屏幕“—”或“+”, 可以选择 3 种角规系数, 即 0.5、1、2, 屏幕右上角显示所选角规系数。②每当观测到符合角规计数原则的立木, 点击“查看”, 使用胸径测量功能和树高测量功能, 进行数木胸径和树高测量, 分别点击“距离”和“方位角”, 获得此时立木的距离和方位角。

测绘记算器中 3D 角规的主要工作原理, 可以表示为

$$M = \begin{cases} \frac{0.71}{50} f & (F_g = 0.5) \\ \frac{1}{50} f & (F_g = 1) \\ \frac{1.41}{50} f & (F_g = 2) \end{cases} \quad (7)$$

式中 F_g ——角规系数
 M ——测绘记算器屏幕内两条竖线 (电子角规片) 长度, 像素

利用测绘记算器的 3D 角规样地测量功能, 可获取林分平均高度、林分平均胸径、林分密度、林分蓄积量。

(1)林分平均高度 $\overline{H}$ (m)

利用格罗森堡公式

$$Y = F_g \sum_{j=1}^Z \frac{y_j}{g_j} \tag{8}$$

式中 Y ——所调查林分的每公顷调查量
 y_j ——第 j 株计数木的调查量
 g_j ——第 j 株计数木的断面积, m^2
 Z ——计数木株数

可获得林分平均高度为

$$\overline{H} = \frac{\sum_{i=1}^k H_i \frac{\pi}{4} D_i^2}{\sum_{i=1}^k \frac{\pi}{4} D_i^2} \tag{9}$$

式中 D_i ——第 i 株树的胸径, cm
 H_i ——第 i 株树的树高, m
 k ——计数木株数

(2)林分平均胸径 $\overline{D}$ (cm)

林分平均胸径计算公式为

$$\overline{D} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^2} \tag{10}$$

式中 n ——计数木株数

(3)林分密度 N_g (株/hm²)

林分密度计算公式为

$$N_g = F_g \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{g_i} \tag{11}$$

式中 g_i ——第 i 径阶的断面积, m^2
 n_i ——第 i 径阶计数木株数

(4)林分蓄积量 T (m³/hm²)

林分蓄积量计算公式为

$$T = f_1 F_g n \overline{H} \times 10^4 \tag{12}$$

式中 f_1 ——导出形数(按六大区域分类,其中又分为针叶树种、阔叶树种、混交林3类)

2.5 基本测量

放置测绘记算器且架设云台后,对准目标点,可以测量测站点 A 到目标点 C 的距离 L 、倾角、方位角。

3 结果与分析

3.1 树高测量试验

为验证测绘记算器的树高测量功能及测量精度,在北京西山鹫峰林场展开试验。在林区选取立地条件不同样地对测绘记算器的树高测量功能进行试验,树种包含栓皮栎、油松、槲栎、臭椿、侧柏、山杏等,选用南方测绘 DT-02 型电子经纬仪(标称测角精度 $\pm 2''$)和测绘记算器进行树高测量试验,在 2 个方向不同观测点对每棵树进行 2 次观测。以 DT-

02 型电子经纬仪所测数据为真值与测绘记算器测量数据进行比较,相对误差为

$$\overline{E}_H = \frac{|\overline{H}_A - \overline{H}_E|}{\overline{H}_E} \times 100\% \tag{13}$$

式中 $\overline{H}_A$ ——测绘记算器测量树高的平均值, m
 $\overline{H}_E$ ——电子经纬仪或胸径尺测量树高的平均值, m

表 1 所示为测绘记算器树高测量相对误差,在 20 组测量中,相对误差范围为 1.11% ~ 4.82%,符合森林一类调查要求。

表 1 测绘记算器树高测量相对误差
Tab.1 Relative error of tree height measurement

测量树种	经纬仪测量的	测绘记算器测量的	相对误差/ %
	平均树高/m	平均树高/m	
栓皮栎	11.0	11.3	2.73
栓皮栎	9.5	9.2	3.16
栓皮栎	11.5	11.3	1.74
栓皮栎	10.0	10.3	3.00
油松	4.5	4.6	2.22
油松	5.5	5.4	1.82
油松	4.3	4.5	4.65
油松	4.2	4.3	2.38
槲栎	8.3	8.7	4.82
臭椿	8.2	8.1	1.22
臭椿	8.9	8.6	3.37
臭椿	8.0	8.3	3.75
臭椿	9.0	9.1	1.11
侧柏	5.5	5.7	3.64
油松	8.0	8.3	3.75
油松	8.0	7.8	2.50
山杏	4.3	4.2	2.33
臭椿	7.3	7.1	2.74
油松	5.0	4.8	4.00
油松	8.0	7.8	2.50
平均值	7.5	7.5	2.87

3.2 胸径测量试验

为验证测绘记算器的胸径测量功能及测量精度,在北京西山鹫峰林场展开试验。在林区取立地条件不同样地对测绘记算器的胸径测量功能进行试验,树种包含栓皮栎、油松、槲栎、臭椿、侧柏、山杏等,利用胸径尺和测绘记算器进行胸径测量试验,在 2 个方向不同观测点对每棵树进行 2 次观测。以胸径尺每木检尺所测数据为真值和测绘记算器测量数据进行比较,同理利用式(13)进行计算,表 2 所示为测绘记算器胸径测量相对误差,在 20 组测量中,相对误差范围为 0.82% ~ 5.00%,符合森林一类调查要求。

表 2 测绘记算器胸径测量相对误差

Tab.2 Relative error of DBH measurement

测量树种	胸径尺测量的	测绘记算器测量的	相对误差/
	平均胸径/m	平均胸径/m	%
栓皮栎	19.5	20.1	3.08
栓皮栎	10.7	10.4	2.80
栓皮栎	17.9	18.3	2.23
栓皮栎	15.7	16.2	3.18
油松	12.5	13.1	4.80
油松	11.7	12.2	4.27
油松	6.0	6.3	5.00
油松	10.5	10.7	1.90
槲栎	20.7	21.0	1.45
臭椿	9.6	9.4	2.08
臭椿	14.3	14.6	2.10
臭椿	8.5	8.2	3.53
臭椿	14.0	14.3	2.14
侧柏	7.3	7.5	2.74
油松	24.5	24.7	0.82
油松	19	19.6	3.16
山杏	6.9	7.2	4.35
臭椿	7.2	6.9	4.17
油松	9.0	9.3	3.33
油松	15.7	15.9	1.27
平均值	13.1	13.3	2.92

3.3 三元材积解算试验

为验证测绘记算器三元材积解算功能及测量精度,在北京西山鹫峰林场展开试验。在林区取立地条件不同样地对测绘记算器的三元材积解算功能进行试验,树种包含油松、栓皮栎、山桃、槲树等,利用南方测绘 DT-02 型电子经纬仪(标称测角精度±2")和测绘记算器进行三元材积解算试验,在2个方向不同观测点对每棵树进行2次观测。以DT-02型电子经纬仪所测的数据为真值与测绘记算器所测的数据进行比较,利用式(13)进行计算,表3所示为测绘记算器三元材积解算相对误差,在20组测量中,相对误差范围为1.01%~9.27%,符合森林一类调查要求。

3.4 3D角规样地测量试验

为验证测绘记算器的3D角规样地测量功能及测量精度,在北京西山鹫峰林场及周边选取15块样地,根据要求从中筛选出10块样地做研究使用,样地间距保证在0.5 km以上,样地主要树种为刺槐和油松,分布均匀,生长状况良好。在样地内,让不同观测人员进行3D角规样地测量试验,根据林分疏密度、林木分布状况、林分平均直径以及通视条件,调整选取角规系数。

表 3 测绘记算器三元材积解算相对误差

Tab.3 Relative error of three-element volume

测量树种	calculation		
	经纬仪测量的	测绘记算器测量的	相对误差/
	平均材积/m ³	平均材积/m ³	%
油松	0.067 4	0.062 4	7.42
油松	0.149 6	0.152 6	2.01
油松	0.092 4	0.089 4	3.25
油松	0.198 6	0.200 6	1.01
油松	0.095 3	0.097 4	2.20
栓皮栎	0.019 5	0.020 3	4.10
栓皮栎	0.010 7	0.011 4	6.54
栓皮栎	0.017 6	0.018 3	3.98
山桃	0.028 4	0.026 7	5.99
山桃	0.019 9	0.018 7	6.03
山桃	0.023 9	0.025 6	7.11
山桃	0.013 0	0.012 3	5.38
槲树	0.115 1	0.123 3	7.12
槲树	0.064 5	0.061 0	5.43
栓皮栎	0.027 1	0.029 1	7.38
槲树	0.044 8	0.048 3	7.81
栓皮栎	0.022 9	0.022 2	3.06
栓皮栎	0.055 0	0.049 9	9.27
油松	0.045 8	0.048 8	6.55
栓皮栎	0.027 9	0.030 1	7.89
平均值	0.056 9	0.057 4	5.48

3D角规样地测量试验是将测绘记算器测量的林分平均高度、林分平均胸径、林分密度、林分蓄积量与标准样地(20 m×20 m)每木检尺测量林分参数作比较,以标准样地每木检尺测量值作为真实值。从表4~7可以看出,在10组样地测量中,林分平均高度相对误差范围为0.31%~5.70%,林分平均胸径相对误差范围为0.15%~4.77%,林分密度相对误差范围为3.12%~5.01%,林分蓄积量相对误差范围为0.79%~9.51%,均符合森林一类调查要求。

3.5 基本测量试验

在距离测量方面,在距离测站点1 m处设置1个测点以后,按距离上一个测点每隔2 m处设置1个测点,做好标记,先用全站仪测量距离,再用测绘记算器测量距离,经过多次测量,将两组数据进行比较,测量偏差范围为-5~4 mm,平均偏差为2.34 mm;在倾角测量方面,倾角测量范围为-75°~75°,以10°为间隔,做好标记,分别用全站仪和测绘记算器进行测量,测量偏差在-1°~1°之间,平均偏差为49'23";在方位角测量方面,将测绘记算器固定在水平度盘上,从0°开始,每隔10°旋转测绘记算器,记录测绘记算器方位角度数,测量偏差在-1°~1°之间,平均偏差为43'35"。在倾角测量和方

表 4 3D 角规样地测量林分平均高度相对误差

Tab.4 Relative error of stand average high of 3D angle gauge plot measurement

样地 序号	树木 数量	测绘记录器的 林分平均 高度/m	每木检尺的 林分平均 高度/m	相对 误差/%
1	10	9.17	9.40	2.45
2	15	8.77	8.83	0.69
4	18	11.49	12.18	5.70
5	19	11.30	11.25	0.42
7	19	10.84	10.81	0.31
8	19	10.47	10.22	2.48
10	13	9.64	9.31	3.55
11	15	9.40	9.50	0.98
12	10	9.24	9.43	2.02
14	15	10.31	10.25	0.51
平均值	15	10.06	10.12	1.91

表 5 3D 角规样地测量林分平均胸径相对误差

Tab.5 Relative error of stand average DBH of 3D angle gauge plot measurement

样地 序号	树木 数量	测绘记录器的林 分平均胸径/m	每木检尺的林分 平均胸径/m	相对 误差/%
1	10	12.2	12.5	2.44
2	15	11.4	11.3	0.97
4	18	12.1	12.2	0.94
5	19	14.7	14.2	3.35
7	19	15.6	15.3	1.87
8	19	15.8	15.4	2.67
10	13	14.1	14.3	1.43
11	15	16.5	16.4	0.93
12	10	15.2	15.2	0.15
14	15	13.8	13.2	4.77
平均值	15	14.2	14.0	1.95

位角测量方面,受到仪器内部空间限制,并没有达到理想精度,但相对目前林业调查装备来说,精度较高,智能且数字化,方便携带,可以达到森林调查要求。

4 结束语

设计的森林智能测绘记录器由 PDA 模块、EDM 模块和云台高密度集成于一体,基于摄影测量学原理、图像处理技术原理、测树学原理,由内嵌树高测量模块、胸径测量模块、三元材积解算模块、3D 角规

表 6 3D 角规样地测量林分密度相对误差

Tab.6 Relative error of stand density of 3D angle gauge plot measurement

样地 序号	树木 数量	测绘记录器的林分 密度/(株·hm ⁻²)	标准样地的林分 密度/(株·hm ⁻²)	相对 误差/%
1	10	2154	2058	4.66
2	15	1801	1718	4.83
4	18	1801	1859	3.12
5	19	1380	1331	3.68
7	19	3150	3021	4.27
8	19	2419	2331	3.78
10	13	1363	1298	5.01
11	15	891	863	3.24
12	10	640	620	3.23
14	15	1323	1266	4.50
平均值	15	1692	1637	3.41

表 7 3D 角规样地测量林分蓄积量相对误差

Tab.7 Relative error of stand volume of 3D angle gauge plot measurement

样地 序号	树木 数量	测绘记录器的 林分蓄积量/ (m ³ ·hm ⁻²)	标准样地的 林分蓄积量/ (m ³ ·hm ⁻²)	相对 误差/%
1	10	63.92	70.15	8.88
2	15	89.45	87.60	2.11
4	18	140.64	141.77	0.79
5	19	145.99	142.35	2.56
7	19	140.05	154.77	9.51
8	19	135.27	130.62	3.56
10	13	85.22	83.41	2.17
11	15	95.88	97.94	2.10
12	10	62.83	60.11	4.53
14	15	105.16	98.66	6.59
平均值	15	106.41	106.74	4.28

样地测量模块等模块化程序,实现树高测量、胸径测量、三元材积解算、3D 角规样地测量、基本测量 5 大功能。详细阐述了树高测量、胸径测量、三元材积解算、3D 角规样地测量、基本测量等功能的原理和作业方式,并通过实际野外试验验证,得到树高测量精度达 97.13%,胸径测量精度达 97.08%,材积测量精度达 94.52%,林分平均高度测量精度达 98.09%,林分平均胸径测量精度达 98.05%,林分密度测量精度达 96.59%,林分蓄积量测量精度达 95.72%,符合国家森林资源连续清查中的精度要求,该装备可以在林业调查中推广使用。

参 考 文 献

1 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2006:10-11.

2 冯仲科. 森林观测仪器技术与方法[M]. 北京:中国林业出版社,2015:2-3.

3 冯仲科,赵春江,聂玉藻,等. 精准林业[M]. 北京:中国林业出版社,2001:3-4.

4 聂玉藻,马小军,冯仲科,等. 精准林业技术的设计与实践[J]. 北京林业大学学报,2002,24(3):89-93.

NIE Yuzao, MA Xiaojun, FENG Zhongke, et al. Design and practice in the system of precision forestry[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002,24(3):89-93. (in Chinese)

5 刘发林,吕勇,曾思齐. 森林测树仪器使用现状与研究展望[J]. 林业资源管理,2011(1):96-99.

LIU Falin, LÜ Yong, ZENG Siqi. Status and prospects of forest measurement instruments[J]. Forest Resources Management,

- 2011(1):96-99. (in Chinese)
- 6 高学海,徐科军,张瀚,等. 基于单目视觉和激光测距仪的位姿测量算法[J]. 仪器仪表学报,2007,28(8):1479-1485. GAO Xuehai, XU Kejun, ZHANG Han, et al. Position-pose measurement algorithm based on single camera and laser range-finder[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007,28(8):1479-1485. (in Chinese)
- 7 周德亮,张兴敢. 一种脉冲-相位式激光测距仪的设计[J]. 电子测量技术,2009(5):21-24. ZHOU Deliang, ZHANG Xinggan. Design of pulse phase shift laser range finder[J]. Electronic Measurement Technology,2009(5):21-24. (in Chinese)
- 8 林盈侃,郭颖,黄庚华,等. 激光测距仪距离模拟源技术与精度分析[J]. 红外与激光工程,2009,38(6):1089-1093. LIN Yingkan, GUO Ying, HUANG Genghua, et al. Distance source of laser range finder and its precision analysis[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009,38(6):1089-1093. (in Chinese)
- 9 董洪舟,杨若夫,敖明武,等. 大量程激光测距仪精度检测系统[J]. 光电工程,2013(4):24-30. DONG Hongzhou, YANG Ruofu, AO Mingwu, et al. Detection system of ranging precision for laser range-finder[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013(4):24-30. (in Chinese)
- 10 雷艳敏,朱齐丹,仲训昱,等. 基于激光测距仪的障碍物检测的仿真研究[J]. 计算机工程与设计,2012(2):718-723. LEI Yanmin, ZHU Qidan, ZHONG Xunyu, et al. Study on obstacle detection based on laser range finder[J]. Computer Engineering and Design, 2012(2):718-723. (in Chinese)
- 11 张维,周冰,沈学举,等. 精确校正激光测距仪三光轴平行的理论计算方法研究[J]. 光学精密工程,2002,10(6):650-654. ZHANG Chu, ZHOU Bing, SHEN Xueju, et al. Study of the calculation method for accurately adjusting laser-range-finder's three-optic-axes to parallel to each other[J]. Optics and Precision Engineering, 2002,10(6):650-654. (in Chinese)
- 12 PICCOLI B, D'ORSO M, ZAMBELLI P L, et al. Observation distance and blinking rate measurement during on-site investigation: new electronic equipment[J]. Ergonomics,2001,44(6):668-676.
- 13 BERNARD C J, RAMESH D, GLORIA W, et al. Robot metrology using two kinds of measurement equipment[J]. Journal of Intelligent Manufacturing,1997,8(2):137-146.
- 14 DONG J,KAUFMANN R K,MYNENI R B, et al. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass:carbon pools,sources,and sinks[J]. Remote Sensing of Environment,2003,84(3):393-410.
- 15 闫飞. 森林资源调查技术与方法研究[D]. 北京:北京林业大学,2014. YAN Fei. Research of technology and method of forest resource inventory[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2014. (in Chinese)
- 16 樊仲谋,冯仲科,郑君,等. 基于立方体格网法的树冠体积计算与预估模型建立[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):320-327. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150347&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.047. FAN Zhongmou, FENG Zhongke, ZHENG Jun, et al. Tree crown volume calculation and prediction model establishment using cubic lattice method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):320-327. (in Chinese)
- 17 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?file_no=20150141&flag=1. 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)
- 18 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涉指数研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):299-305. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150142&flag=1. 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)
- 19 曹忠,冯仲科,徐伟恒,等. 电子经纬仪无损立木材积测量方法及精度分析[J]. 中南林业科技大学学报,2015(4):7-13. CAO Zhong, FENG Zhongke, XU Weiheng, et al. Standing tree volume nondestructive measurement methods and precision analysis based on electronic theodolite[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015(4):7-13. (in Chinese)
- 20 何诚,张思玉,冯仲科. 一种电子经纬仪立木材积精准测算方法[J]. 测绘通报,2014(6):116-119. HE Cheng, ZHANG Siyu, FENG Zhongke. A fine estimation of standing tree volume based on electronic theodolite[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(6):116-119. (in Chinese)
- 21 孙梦莹,冯仲科,闫飞,等. 电子经纬仪自动精测立木材积原理与应用[J]. 林业资源管理,2013(5):80-84. SUN Mengying, FENG Zhongke, YAN Fei, et al. Principle and application of automatic accurate measurement of stem volume by using electronic theodolite[J]. Forest Resources Management, 2013(5):80-84. (in Chinese)
- 22 冯仲科,姚山. 全站仪量测树高方法:中国,101021416[P].2007-08-22.
- 23 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/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):257-265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150938&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.038. FENG Zhongke, HUANG Xiaodong, LIU Fang. Forest survey equipment and development of information technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(9):257-265. (in Chinese)
- 24 冯仲科,景海涛,周科亮,等. 全站仪测算材积的原理及精度分析[J]. 北京林业大学学报,2003,25(3):60-63. FENG Zhongke, JING Haitao, ZHOU Kelang, et al. Principle and precision evaluation of stem volume surveying by total station[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003,25(3):60-63. (in Chinese)
- 25 冯仲科,马超,赵保卫,等. 视频超站仪及森林计测方法:中国,1670474[P].2005-09-21.
- 26 冯仲科,王佳. 一种测树型超站仪及其使用方法:中国,102466476A[P].2012-05-23.
- 27 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, XIE 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)
- 28 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)