

望远摄影测树仪设计与试验

邱梓轩 冯仲科 卢婧 孙仁杰

(北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 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,设计望远摄影测树仪,该仪器由 PDA 模块、远程 EDM 模块、长焦 CCD 镜头模块和云台组成,测量时获取倾角、方位角、远程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 语言进行汇编实现树高测量、胸径测量、微样地林分测量等功能。通过试验验证,树高测量精度达 93.32%,胸径测量精度达 96.49%,林分平均高度测量精度达 94.47%,林分平均胸径测量精度达 91.68%,林分密度测量精度达 86.04%,林分蓄积量测量精度达 82.64%,解决了不可到达点观测难度高、看得见测不到等问题。

关键词: 望远摄影测树仪; 森林调查; 安卓开发; 设计; 试验

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0202-06

Design and Experiment of Forest Telescope Intelligent Dendrometer

QIU Zixuan FENG Zhongke LU Jing SUN Renjie

(Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the principle of photogrammetry, image-processing technology and forest measurement, the forest telescope intelligent dendrometer composed of PDA module, remote EDM module, telephoto lens CCD and rotational station was developed to obtain the parameters such as inclination angle, azimuth angle, remote distance and image information. By using Java language and developing in Android Studio 2.1 systems development environment, the functions such as tree height measuring module, DBH measuring module, micro-sample plot measuring and basic measurement can be achieved. Verified by experiments, the measuring accuracy of tree height was as high as 93.32%, DBH was as high as 96.49%, stand average height was as high as 94.47%, stand average DBH was as high as 91.68%, stand density was as high as 86.04%, and that of stand volume measurement was 82.64%. It showed that the equipment can solve problems such as observation difficulties of non-arrival points and measurement difficulties of visible factors. Therefore, it can be used and promoted in the forestry inventory in the future.

Key words: forest telescope intelligent dendrometer; forest-survey; Android development; design; experiment

引言

随着森林资源调查数据的精准化要求越来越高^[1],对单木和林分的量化信息需求日益增长^[2],由此,形成了更多的林业数据获取和分析的方法,产生了更多的森林精准经营相关的仪器^[3]。

3S 技术作为林业监测手段和方法,主要优势在

其多元性、信息时效性以及成果共享性^[4];遥感和无人机等技术作为林业影像数据获取方式,主要优势在其对森林资源影响数据实时动态获取^[5-7];"互联网+"的创新和应用,促进了全球森林资源监测技术水平的提高。但是,目前森林资源调查依然面临着以下几方面问题:①仪器设备和技术手段相对落后,市场上仪器价格昂贵且功能单一,遥感和无人

机等技术仅能为小班区划提供辅助信息^[8-9]。②部分山区,由于调查难度大且不可到达的原因,森林资源信息未能进行调查数据及时更新^[10-11]。③森林资源调查过程中,外业调查劳动强度大且效率低下,内业处理数据多且费时费力^[12]。

樊仲谋等^[13]利用全站仪结合电子手薄测量树冠面积,结合三维激光扫描仪对单木进行量测及模拟,获得单木的材积;文献^[14-17]研发了 3D 电子角规,进行林分调查,利用测树经纬仪、测树全站仪、测树超站仪进行单木量测,并对精度进行分析。黄晓东等^[18]研制可量测胸径和树高的多功能便携式微型超站仪,实现树高、胸径的自动测量。徐伟恒等^[19]研制了手持式数字化多功能电子测树枪,实现了树高测量、林分调查、样地标定等功能。邱梓轩等^[20]研制了便携式智能森林测绘记算器,利用 PDA、EDM、云台以及安卓系统,具有树高测量、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,实现了内外业一体化。近些年,随着便携式测树产品的不断创新,已经基本解决了上述问题,但是,仍然面临着沟壑、峭壁、陡坡等地势险峻而难以调查、看得见而测不着等问题。

本文对森林调查进行需求分析,将远程激光测距传感器、倾角传感器、电子罗盘、长焦 CCD 镜头精密集成,基于测树学原理、图像处理技术^[21]及摄影测量学原理,由安卓系统内嵌程序自动结算出单木树高、胸径及林分参数,形成便携智能、非接触测量的森林调查仪器——望远摄影测树仪,以期能够实现远距离(2 000 m 内)远程树高测量、远程胸径测量、微样地(6~9 棵树)林分测量等功能。

1 望远摄影测树仪构成

1.1 硬件结构

望远摄影测树仪的硬件包括 PDA 模块(FAM⁵-PDA 型,精准林业北京市重点实验室制造,中国)、远程 EDM 模块(FAM⁵-EDM 型,精准林业北京市重点实验室制造,中国)、长焦镜头(焦距 126 mm)和自主研发云台,如图 1 所示。PDA 模块是将 CPU、RAM、ROM、GPU、触控显示屏、重力传感器、陀螺仪、GPS 芯片、蓝牙芯片、WiFi 芯片、电源等高度集成并设计铝合金外壳,将 3 个部件高精度集成于云台,并分别可拆卸、充电、更换,方便操作,如图 2 所示。

PDA 模块中的 CPU 选用联发科 Helio P10 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,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

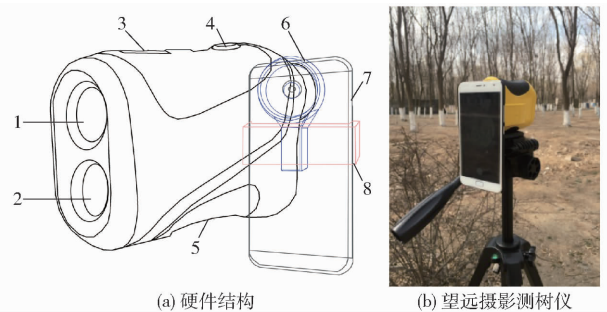


图 1 望远摄影测树仪

Fig. 1 Forest telescope intelligent dendrometer

1. 望远镜部件
2. 激光测距部件
3. 望远镜调节键
4. 激光测距调节键
5. 1/4 英制螺纹孔
6. 镜头连接件
7. 自主研发平板
8. 平板紧固件

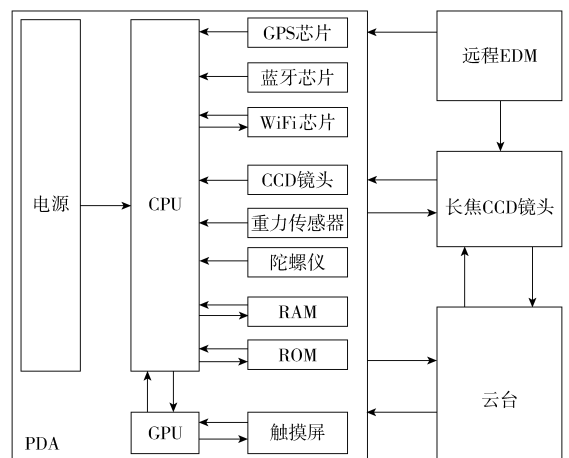


图 2 硬件总体框架

Fig. 2 Framework of hardware

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 镜头选用长焦定焦光学镜头,定焦 126 mm,1 300 万像素,用于获取图像信息;重力传感器采用三轴加速传感器 LIS331DLH,用于测量望远摄影测树仪和测点间的倾斜角;陀螺仪采用集成电路芯片 GY-26,用于测量望远摄影测树仪到测点的磁方位角;GPS 芯片用于接收 GPS 信号,蓝牙芯片用于接受远程 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,将数据存储到轻型的 SQLite 数据库中,PDA 使用基于 Linux 核心的 Android 安卓系统平台。软件部分采用模块化结构设计,对应相应功能,有树高测量模块、胸径测量模块、微样地林分测量模块、基本测量模块,最终汇总为森林调查软件。如图 3a 所示,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,用户可以通过选择进入不同功能模块。如图3b~3d所示,为3项功能模块的程序流程图,树高、胸径、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,可以用micro USB导出。

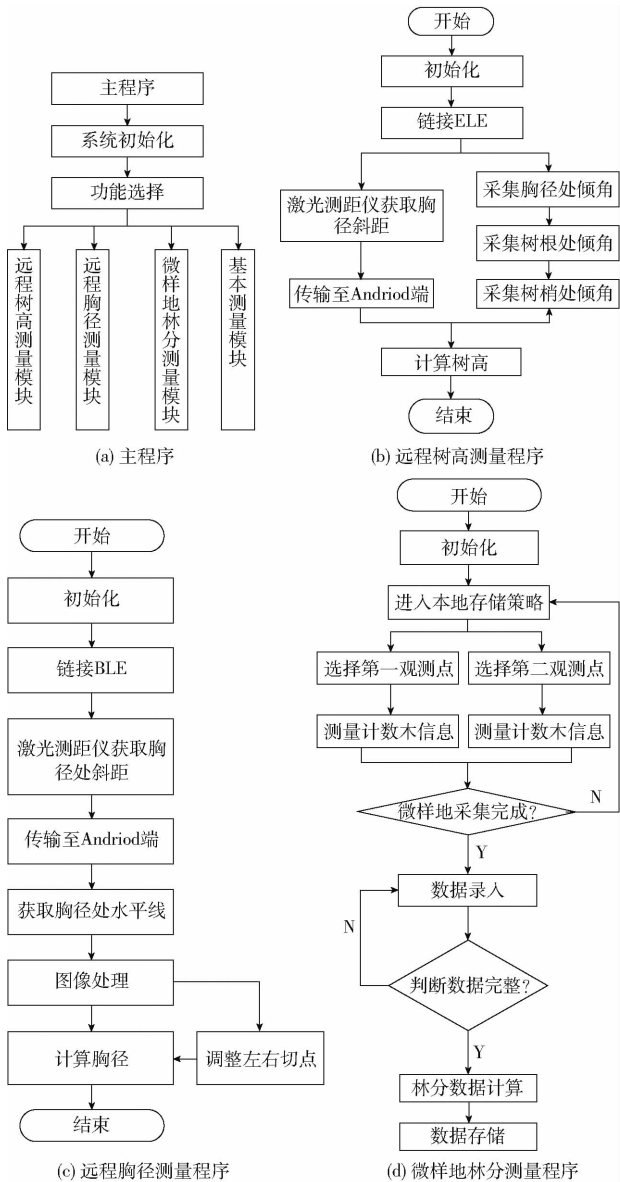


图3 主程序和3个功能模块流程图

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

1.3 功能参数

望远摄影测树仪功能包括远程树高测量、远程胸径测量、微样地林分测量、基本测量4项功能。距离测量,在使用规板条件下,测量距离范围为5~2000 m,测量精度为 ± 0.3 m(400 m以内)/ ± 1 m(400 m以上),最小显示单位为0.1 mm;倾角测量范围为 $-55^\circ \sim 55^\circ$,测量精度为 2° 。方位角测量范围为 $0 \sim 360^\circ$,测量精度为 2° 。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4 m, SBAS精度小于2 m,外部源差分小于0.1 m(CEP)。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12 h,EDM尺寸为 $125 \text{ mm} \times 77 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$,其电池连续工作时间为5 h,望远摄影测树仪的工作环境温度为 $-20 \sim 50^\circ\text{C}$ 。

2 测量原理

2.1 远程树高测量

树高测量原理比较简单,主要为相似三角形和三角函数2种^[1]。本仪器利用三角函数原理,树高测量方法如图4所示。调整测点位置A,确保测点和目标木之间无明显遮挡,将仪器对准树木根径处点B,测得斜距 L_1 和天顶距 α_1 ;瞄准树梢顶点C,测得天顶距 α_2 ,计算树高为

$$H = \frac{L_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin \alpha_2}$$

$$(\alpha_1, \alpha_2 \in (0^\circ \sim 180^\circ))$$

(1)

式中 H ——立木高度, m

L_1 ——测站点到树根的斜距, m

α_1 ——对准树根时的天顶距, ($^\circ$)

α_2 ——对准树梢时的天顶距, ($^\circ$)

树高能实时显示并自动存储。

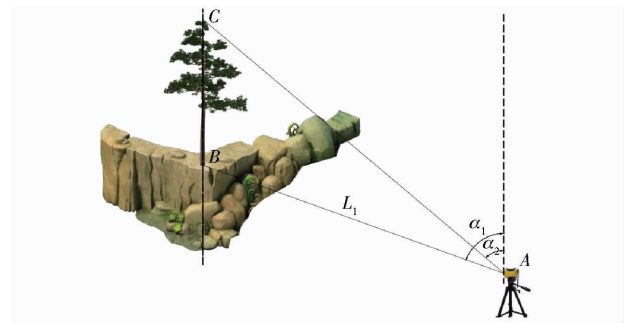


图4 远程树高测量原理图

Fig. 4 Principle diagram of tree height telemetering

2.2 远程胸径测量

胸径测量工具种类繁多,常用的有轮尺、直径卷尺、钩尺等^[1]。本仪器属于非接触式测量,测量结果为轮尺测量结果,胸径测量方法如图5所示。将仪器屏幕中十字丝瞄准树干根径处点B,测得斜距 L_1 和天顶距 α_1 ;不断调整仪器倾角,当树高为1.3 m左右时,即确定此处为胸径,测得站点到胸径距离 L ;已检校CCD定焦镜头焦距为 f ,将屏幕中十字丝瞄准树干中心,获取树干影像信息,根据CCD镜头成像原理为

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

式中 N ——屏幕内所测图像像素数
测得胸径 D , 胸径能自动显示和储存。

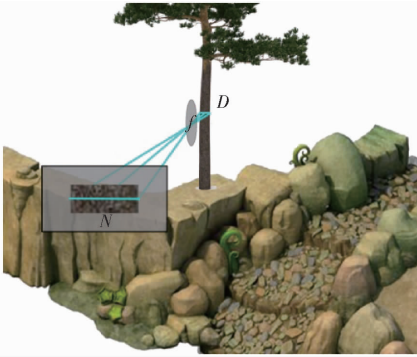


图 5 CCD 镜头成像原理示意图

Fig. 5 Principle sketch of CCD-based imaging

2.3 微样地林分测量

微样地调查方法同角规样地调查一样属于点抽样方法, 充分考虑林木生长发育过程中对营养利用和生态空间分布的特点, 将林分模拟成中心木及邻近木构成的微圆样地, 它比正方形、长方形样地更接近于实际情况。

微样地林分测量样本数量为 6~9 棵, 在不可到达区域内确定一棵中心木, 再在有利地势确定和中心木之间保持通视的 2 个观测点, 要尽量保证能够观测到中心木及邻近木信息。利用本仪器测量并记录立木树种、立木距离 L_i 、立木方位角 α_i 、立木的树高 H_i 、胸径 D_i , 自动解算林分平均胸径、林分平均高、林分密度、林分蓄积量等信息, 并随着测量信息在屏幕上实时更新, 测量结束可储存并导出, 如图 6 为微样地林分测量界面, 其主要原理如下:

(1) 林分平均高测量采用条件平均高估算方



图 6 微样地林分测量界面

Fig. 6 Interface of micro-sample plot measurement

法, 在林分中选测 6~9 棵与林分平均直径相近的“平均木”的树高, 以其算术平均数作为林分平均高, 因此, 林分平均高 \bar{H} (m) 的计算公式为

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (3)$$

式中 H_i ——第 i 棵树的树高, m

n ——立木株数, 棵

(2) 林分平均胸径测量以立木位置权重计算, 即距中心木最远立木权重为 0.5, 其余 5~8 棵立木权重为 1, 再采用林木算术平均胸径估算, 因此, 林分平均胸径 \bar{D} (cm) 的计算公式为

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i - 0.5D_k}{n - 0.5} \quad (4)$$

式中 D_i ——第 i 棵树的胸径, cm

k ——距中心木最远的立木编号

D_k ——距中心木最远立木的胸径, cm

(3) 林分密度测量由株数和样圆面积之比计算, 总株数由位置权重计算, 样圆以中心木到最远邻近木距离为半径, 因此, 林分密度 N_d (株/公顷) 的计算公式为

$$N_d = \frac{n - 0.5}{\pi L_k^2} \times 10^4 \quad (5)$$

式中 L_k ——中心木到第 k 棵立木的距离, m

(4) 林分蓄积量以改进后的平均实验形数法计算, 胸高断面以位置权重计算, 因此, 林分蓄积量 M (m^3/hm^2) 的计算公式为

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n f_j D_i^2 - 0.5 f_j D_k^2}{4R_k^2} \bar{H} \times 10^4 \quad (6)$$

式中 f_j ——导出形数^[21] (按六大区域分类, 又分为针叶树种、阔叶树种、混交林 3 类)

R_k ——中心木到最远立木的距离, m

3 结果与分析

3.1 远程树高和胸径测量试验

为验证望远摄影测树仪的树高和胸径测量功能及测量精度, 在试验基地林地展开试验。在林区选取立地条件不同样地对望远摄影测树仪的树高测量功能和胸径测量功能进行试验, 选用南方测绘 NTS-382R6 型全站仪进行树高测量试验, 在两个方向不同观测点对每棵树进行 2 次观测, 选用胸径尺进行胸径测量试验。以 NTS-382R6 型全站仪和胸径尺所测数据为基准值与望远摄影测树仪测量数据进行比较, 计算相对误差为

$$\bar{E} = \frac{|\bar{N}_A - \bar{N}_E|}{\bar{N}_E} \times 100\% \quad (7)$$

式中 \bar{N}_A ——望远摄影测树仪测量数据平均值, m
 \bar{N}_E ——全站仪或胸径尺测量数据平均值, m
 \bar{E} ——相对误差, %

如表1所示,为树高和胸径测量相对误差,在50组测量试验数据中,树高相对误差范围集中在1.50%~9.13%之间,胸径相对误差范围集中在1.59%~6.61%之间,基本符合林业调查精度要求。

表1 树高和胸径测量相对误差

Tab.1 Relative error of tree height and DBH measurements

编号	树号	树种	距离/m	实测 树高/m	实测 胸径/cm	参考 树高/m	参考 胸径/cm	胸径相对 误差/%	树高相对 误差/%
1	2011	白蜡	157.03	15.3	60.9	16.2	67.8	10.19	5.31
2	2013	白蜡	105.05	16.7	42.9	16.3	45	4.62	2.52
3	2014	白蜡	114.53	17.5	57.6	17.9	57.5	0.24	2.03
4	1050	槐树	232.03	14.0	23.3	13.5	22.1	5.61	3.85
5	1047	槐树	227.01	14.4	8.7	14.1	9.3	6.13	2.41
6	1046	槐树	227.93	12.3	22.2	13.7	22.6	1.59	10.43
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
44	1083	槐树	213.66	14.6	16.7	13.7	16.77	0.66	6.88
45	1093	槐树	217.26	10.6	18.0	12.1	17.83	1.18	12.45
46	1090	槐树	221.60	12.8	19.0	13	18.4	3.15	1.70
47	1085	槐树	216.60	13.4	19.7	13.9	18.49	6.27	3.76
48	1053	槐树	228.63	14.1	16.3	13.1	16.39	0.37	7.76
49	1051	槐树	223.71	15.2	20.7	13.7	21.39	3.18	10.92
50	1054	槐树	224.54	14.5	18.6	13.2	20.28	8.38	9.63
平均值								3.51	6.68

3.2 微样地林分测量试验

为验证望远摄影测树仪的微样地林分测量功能及测量精度,在试验基地林地选取10块样地,样地间距保持0.5 km距离,样地主要树种为槐树和杨树,分布均匀,生长状况良好。其中,1053样地测量株数为6棵,1081、1048、1079、1093样地测量株数为7棵,1149、1062、1046样地测量株数为8棵,1032、253样地测量株数为9棵。

微样地测量试验是将望远摄影测树仪测量的林

分平均高度、林分平均胸径、林分密度、林分蓄积量与标准圆形样地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基准值。从表2可以看出,在10组样地测量中,林分平均高度平均相对误差为5.53%,林分平均胸径平均相对误差为8.32%,林分密度平均相对误差为13.96%,林分蓄积量平均相对误差为17.36%,微样地林分测量每块样地仅包含6~9棵树,因此,相对角规样地测量来说精度偏低,但是,属于非接触式测量方

表2 微样地林分测量相对误差

Tab.2 Relative error of micro-sample ground measurement

编号	样地 编号	实测林 分平均 高度/m	实测林 分平均 胸径/ cm	实测林分 密度/ (株·hm ⁻²)	实测林分 蓄积量/ (m ³ ·hm ⁻²)	参考林 分平均 高度/m	参考林 分平均 胸径/ cm	参考林分 密度/ (株·hm ⁻²)	参考林分 蓄积量/ (m ³ ·hm ⁻²)	林分平 均高度相 对误差/ %	林分平 均胸径 相对误 差/%	林分密度 相对 误差/%	林分蓄积 量相对 误差/%
1	1081	11.9	16.4	1264	143.08	12.0	15.1	1415	166.09	0.82	8.27	10.69	13.85
2	1149	10.5	12.9	1966	134.68	11.7	14.0	1641	160.31	9.83	7.72	19.80	15.99
3	1062	12.0	15.6	708	73.40	13.4	16.8	608	93.61	10.22	6.82	16.39	21.59
4	1032	11.8	14.7	2632	243.69	12.9	16.3	2212	359.23	9.10	9.33	19.01	32.16
5	1048	13.4	17.6	711	104.05	12.7	15.9	658	88.16	4.84	10.56	8.04	18.03
6	253	12.8	19.9	1705	340.05	13.5	22.6	1429	404.23	5.20	11.92	19.32	15.88
7	1046	13.2	17.0	1019	138.94	13.8	17.7	873	154.94	4.63	3.79	16.74	10.33
8	1079	12.0	16.5	2651	306.74	12.3	15.5	2606	323.31	2.78	6.75	1.72	5.12
9	1093	11.7	13.5	1206	98.26	12.3	15.3	1091	131.80	4.69	11.53	10.51	25.45
10	1053	12.8	15.5	764	83.37	13.2	16.6	651	98.36	3.23	6.49	17.41	15.24
平均值										5.53	8.32	13.96	17.36

式,解决了不可到达点观测难度高、看得见测不到等问题。

4 结束语

设计了一种望远摄影测树仪。望远摄影测树仪由 PDA 模块、远程 EDM 模块、长焦 CCD 镜头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,由内嵌远程树高测量模块、远程胸径测量模块、微样地林分测量模块、基

本测量模块模块化程序,实现树高测量、胸径测量、微样地林分测量等功能。详细阐述了树高测量、胸径测量、微样地林分测量等基本功能的原理和作业方式,并通过实际外业试验验证,得到树高测量精度达 93.32%,胸径测量精度达 96.49%,林分平均高度测量精度达 94.47%,林分平均胸径测量精度达 91.68%,林分密度测量精度达 86.04%,林分蓄积量测量精度达 82.64%,解决了不可到达点观测难度高、看得见测不到等问题。

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 ALLAN A L. A simple control system for the photogrammetric survey of a tree[J]. Survey Review, 1998, 34(268): 373-378.
- 5 ANDERSEN H E, MCGAUGHEY R J, CARSON W W, et al. A comparison of forest canopy models derived from LIDAR and INSAR data in a Pacific Northwest conifer forest [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 34: 211-217.
- 6 BANSKOTA A, WYNNE R H, JOHNSON P, et al. Synergistic use of very high-frequency radar and discrete-return lidar for estimating biomass in temperate hardwood and mixed forests[J]. Annals of Forest Science, 2011, 68(2): 347-356.
- 7 BORTOLOTT Z J, WYNNE R H. Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: an individual tree-based approach that incorporates training data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2005, 59(6): 342-360.
- 8 MUUKKONEN P, HEISKANEN J. Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99(4): 434-447.
- 9 POPESCU S, WYNNE R H. Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(5): 589-604.
- 10 BROWN S, LUGO A E. Above ground biomass estimates for tropical moist forests of Brazilian Amazon[J]. Intereiencia, 1992, 17: 8-18.
- 11 MORALES R M, MIURA T, IDOL T, et al. An assessment of Hawaiian dry forest condition with fine resolution remote sensing [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2524-2532.
- 12 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.
- 13 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)
- 14 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)
- 15 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,2015,35(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, 35(4):7-13. (in Chinese)
- 16 冯仲科,姚山. 全站仪量测树高方法:中国,101021416[P]. 2007-08-22.
- 17 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)
- 18 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)

- csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150939&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.039.
- HUANG Xiaodong, FENG Zhongke. Study on obtaining sampling tree's DBH in the plot based on plain ordinary digital camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 266 - 272. (in Chinese)
- 10 樊仲谋, 冯仲科, 李亚东, 等. 基于双目相机的森林样地调查方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 293 - 299. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150542&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.042.
- FAN Zhongmou, FENG Zhongke, LI Yadong, et al. Investigation method of forestry plot based on binocular stereo camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 293 - 299. (in Chinese)
- 11 郟广平. 高分辨率遥感影像的森林结构参数反演[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
- QIE Guangping. The research on forestry structural factor by high-resolution remote sensing image [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011. (in Chinese)
- 12 LOUIS D, DANIEL H. Modelling day-to-day stem diameter variation and annual growth of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) from daily climate [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262: 863 - 872.
- 13 赵芳. 测树因子遥感获取方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- ZHAO Fang. Research of measuring trees factor method by remote sensing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese)
- 14 MUSTAFA Y T, SALIH T K, OBEYED M H. Estimating of diameter at breast height for scattered *Pinus brutia* ten. trees using remote sensing techniques, in Zawita Sub-District, Duhok, Kurdistan Region-Iraq [J]. Journal of Duhok University, 2016, 19(1): 311 - 318.
- 15 刘鲁霞, 庞勇, 李增元. 基于地基激光雷达的亚热带森林单木胸径与树高提取[J]. 林业科学, 2016, 52(2): 26 - 37.
- LIU Luxia, PANG Yong, LI Zengyuan. Individual tree DBH and height estimation using terrestrial laser scanning (TLS) in a subtropical forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(2): 26 - 37. (in Chinese)
- 16 LOVELL J L, JUPP D L B, NEWNHAM G J, et al. Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed viewpoint[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(1): 46 - 55.
- 17 KONG Jianlei, DING Xiaokang, LIU Jinhan, et al. New hybrid algorithms for estimating tree stem diameters at breast height using a two dimensional terrestrial laser scanner [J]. Sensors, 2015, 15(7): 15661 - 15683.
- 18 周克瑜, 汪云珍, 李记, 等. 基于 Android 平台的测树系统研究与实现[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(4): 95 - 100.
- ZHOU Keyu, WANG Yunzhen, LI Ji, et al. A study of tree measurement systems based on Android platform [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2016, 40(4): 95 - 100. (in Chinese)
- 19 卫权岗, 马建红, 吴非洋, 等. 使用手机进行 ENA - 13 码的识别及应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2011(16): 107 - 109, 115.
- WEI Quangang, MA Jianhong, WU Feiyang, et al. Identification and application of using mobile phone ENA - 13 code [J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2011(16): 107 - 109, 115. (in Chinese)
- 20 车怡. 基于图像处理技术的条形码识别系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- CHE Yi. Research on the bar code recognition system based on the image processing [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014. (in Chinese)
- 21 欧洲商品编码. 维基百科(wikipedia.org). 欧洲商品编码, 2010.
- 22 姜亮. 基于 Android 平台的条形码识别系统[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- JIANG Liang. Barcode recognition system based on Android[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 207 页)
- 19 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)
- 20 邱梓轩, 冯仲科, 蒋君志伟, 等. 森林智能测绘记算器的研制与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 179 - 187. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170522&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.022.
- QIU Zixuan, FENG Zhongke, JIANG Junzhiwei, et al. Development 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)
- 21 程文生, 冯仲科, 于景鑫. 中国主要树种通用二元材积模型与推导形数模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 245 - 252. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170331&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.031.
- CHENG Wensheng, FENG Zhongke, YU Jingxin. Development of generic standard volume model and derived form factor model for major tree species in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 245 - 252. (in Chinese)