

便携式森林资源调查仪研制与试验

程文生¹,冯仲科^{1*},黄晓东²

(1. 北京林业大学 精准林业北京市重点实验室,北京 100083;2. 北京联合大学 应用文理学院,北京 100083)

摘 要:以数字图像处理技术、摄影测量技术、测树学为理论基础,研制可用于森林资源调查的多功能调查仪。该仪器主要由 Cortex-M3 中央处理芯片、激光测距模块、倾角传感器、蓝牙模块、LED 彩屏、CCD 镜头等电子元件组成,测量时获取距离、倾角、图像等信息,并使用 C 语言在 Keil uVision4 开发平台下构建一套集单木测胸径、单木测树高、单木测材积、圆形样地观测 4 个主要功能模块于一体的软件系统嵌入到测树仪中。结果表明,单木测量功能的平均精度高达 96.98%,方差为 0.023 3,其中单木因子测量中的胸径测量精度高达 97.85%,树高测量精度高达 97.46%,材积测量精度高达 95.64%;圆形样地观测功能林分参数获取,林分平均胸径测量精度高达 97.92%,林分平均高测量精度高达 97.97%,株数密度测量精度高达 96.54%,蓄积量测量精度高达 95.79%,符合国家森林资源二类调查中的精度要求,该仪器可在林业调查工作中进行推广和应用。

关键词:森林资源调查;仪器;胸径;树高;林分参数

中图分类号:S758.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)05-0156-07

Development and Experiment of Portable Instrument for Forest Resources Inventory

CHENG Wen-sheng¹,FENG Zhong-ke^{1*},HUANG Xiao-dong²

(1. Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. College of Applied Arts and Sciences, Beijing Union University, Beijing 100083, China)

Abstract: The contents of forest resource survey include the investigations on the forest, woods, animals and plants that growth in the forest area as well as its environmental conditions for the object of forestry survey. Due to the complex conditions of the forest site and the difficulty of the work of the staff, many problems exist in forestry investigation. In order to solve the problems, a portable instrument for forest resources inventory was developed that based on the theory of digital image processing, photogrammetry and tree measurement. The instrument was mainly composed of a Cortex-M3 central processing chip, laser ranging module, tilt sensor, bluetooth module, LED color screen, CCD lens and other electronic components. It could get the distance, angle, photo and other information when it measured the trees. Using C language in Keil uVision4 development platform to construct a set of embedded software system, tree DBH, tree height, single tree volume, circular sample plots could be measured. Through the test, the measurement accuracy of single tree DBH function factor was as high as 97.85%, tree height measurement accuracy was as high as 97.46%, volume measurement accuracy was up to 95.64%; stand average diameter at breast height measuring accuracy was as high as 97.92%, stand average height measurement accuracy was up to 97.97%, the number density measurement accuracy was up to 96.54%, volume measurement accuracy was up to 95.79%. The instrument could not only measure the single wood factor and the stand parameter ac-

收稿日期:2017-12-04 修回日期:2018-02-26
基金项目:国家自然科学基金(41371001,U1710123);青年教师科学研究中长期项目(2015ZCQ-LX-01)。
作者简介:程文生,男,在读硕士,研究方向:林业 3S 技术开发与应用。E-mail:wenshengcheng@bjfu.edu.cn
* 通信作者:冯仲科,男,教授,博士生导师,研究方向:精准林业、测绘与 3S 技术集成。E-mail:fengzhongke@163.com

curately, but also reduce the consumption of human and material resources. The instrument could be widely used in the investigation of forest resources.

Key words: forest resources inventory; instrument; DBH; tree height; forest parameters

森林资源调查是以林地、林木、生长在林区范围内的动植物及其环境条件为对象的林业调查。树木的直接测定因子和派生因子统称为基本测树因子,直接测定因子主要包括立木胸径和树高,派生因子有立木材积、树干横截面积等^[1]。树木的直接测定因子和由其派生的其他因子的测定是森林资源外业调查的重要组成部分,在现代的森林资源调查工作中,测定胸径、树高、材积、林分平均胸径、林分平均高、林分密度^[2]、林分蓄积量等是森林观测的主要内容。由于林区立地条件复杂,工作人员作业难度较大,林业调查工作面临着诸多问题,因此研发一种便携式、智能化的调查装备具有提高外业调查人员的工作效率、减轻劳动强度等现实意义^[3]。

随着科技的快速发展和信息化时代的来临,国内外各种森林资源调查工具不断涌现。例如国外生产的用于胸径测量的卡尺、Biltmore 测仗、测径尺,巴尔和斯特劳德光学测树仪等,用于树高测量的布鲁莱斯测高器、阿布尼水准仪、克里斯屯测高器等^[4-5],用于多因子测量点的巴尔斯-特劳测树仪、比特里希林分速测镜等^[6]。这些进口仪器普遍功能单一、价格昂贵,为了满足森林资源调查仪器的大量需求,我国也越来越重视这方面的研究,研制了许多森林计测装备。冯仲科^[7-8]等研发了用于角规测量的 3D 电子角规,用于测树高、测胸径的测树全站仪^[9-11]、测树型超站仪^[12-13],用于无损立木材积测量的电子经仪^[14-18]等系列装备,并对其测量精度进行了研究^[19-20]。徐伟恒^[21]等研制了手持式数字化多功能电子测树枪,实现了任意处树干直径的测量和树高测量以及部分林分结构参数的获取。黄晓东^[22]等研制了一种可自动获取胸径树高的便携式测树超站仪。邱梓轩^[23]等研制了一种基于 Android 的森林智能手机测绘记算器,能够实现树高测量、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。目前,国内最新研制的森林资源调查设备虽然解决了功能单一、便携性差等问题,但仍然存在造价成本过高、操作复杂、林区仪器架设难度大等问题。这对森林资源调查新仪器的研制指明了方向,因此研发一种集立木胸径、树高^[24-27]、材积等单木因子^[28-29]测量和林分参数测定的多功能、现代化、智能化装备成为必然发展趋势。

本研究结合森林资源外业调查的实际需求,以数字图像处理技术、摄影测量技术、测树学为理论基

础,利用 Cortex-M3 中央处理芯片、激光测距模块、倾角传感器、蓝牙模块、LED 彩屏、CCD 镜头等电子元件进行硬件集成并向其中嵌入自主开发的集单木测胸径、单木测树高、单木测材积、圆形样地观测 4 个主要功能模块于一体的测树软件系统,从而能设计并实现一种便携式森林资源调查仪。

1 调查仪构成

1.1 仪器硬件设计

便携式森林资源调查仪的硬件组成包括 Cortex-M3 中央处理芯片、激光测距模块、倾角传感器、蓝牙模块、LED 彩屏、CCD 镜头、电源、功能按键等元件。通过委托常州市新瑞得仪器有限公司对其进行设计和包装,从而制造出一款轻量级、多功能的森林资源调查装备(图 1)。



图 1 森林资源调查仪示意

Fig. 1 Schematic diagram of potable forest resources inventory instrument

1.2 嵌入式软件系统设计

软件系统是使用通用计算机编程语言 C 语言在 Keil uVision4 集成开发环境下开发编制的。软件系统采用模块化结构设计即每一项功能独立设计为单一功能模块,主要包括单木测胸径、单木测树高、单木测材积、圆形样地观测 4 个功能模块,最后统一集成通过 J-Link 仿真器烧录至调查仪的芯片中。该仪器嵌入式系统操作流程为:开机进入程序初始化界面,用户根据业务需求选择相应的功能模块进行森林观测,单株立木测量的胸径、树高、材积以及圆形样地观测获取的平均胸径、平均树高、株数

密度、蓄积量等林分参数测量结果均实时显示在屏幕上,系统自动将结果数据以 ASCII 码格式保存至 flash 中,可通过蓝牙连接将保存的数据传输到不同的终端。仪器系统操作流程见图 2。

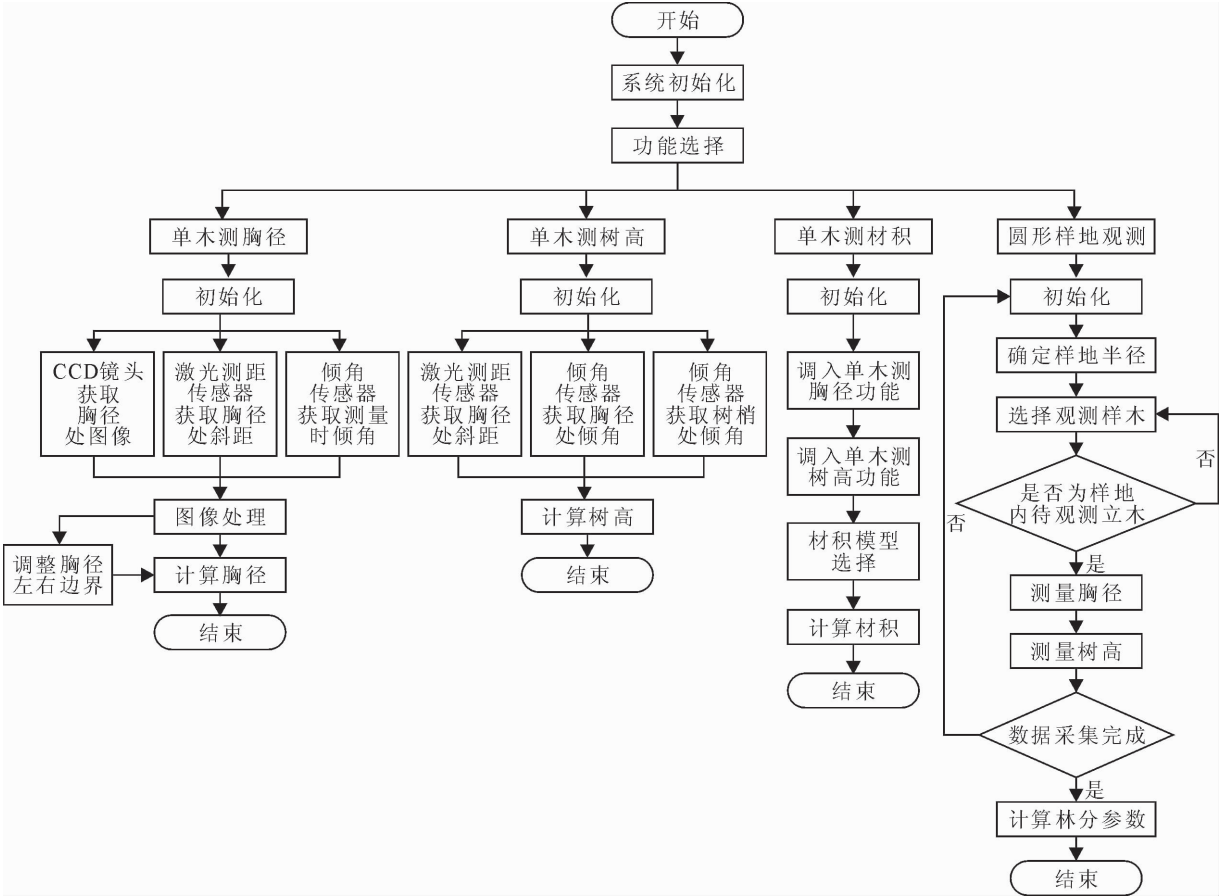


图 2 仪器系统操作流程

Fig. 2 Operation flow chart of instrument

1.3 仪器功能参数

调查仪主要包括单木测胸径、单木测树高、单木测材积、圆形样地观测等 4 项功能。良好天气条件下测量距离为 0.1~100 m,测量精度为±1.5 mm,最小显示单位为 0.1 mm,激光等级Ⅱ级,激光类型 635 nm,<1 mW;倾角测量范围为-90°~90°,测量精度±6 s;CCD 镜头有效像素 200 万,3.6 倍光学变焦,35 mm 等效焦距。操作系统为嵌入式 ARM 系统,CPU 为 Cortex-M32 处理器。调查仪工作环境温度为-20~50℃,在该条件下其电池连续工作时间长达 6 h。

2 功能操作及原理

2.1 单木测胸径

调查仪用于单木胸径测量时,首先将激光点对准待测立木胸径处(树高为 1.3 m 处),也可直接通过屏幕中的十字线对准立木胸径处,因为激光点位于十字线中心;然后按测量键进行测量,测量的同时,激光测距模块获取仪器前端到胸径处的斜距 L ,内置定焦焦距为 f 的 CCD 镜头获取胸径处影像;最

后通过加号键和减号键调整影像识别边界,使两侧边界正好位于立木胸径处的两侧,通过摄影测量单片解析原理数学公式: $D = \frac{N \times L}{f}$ 计算出胸径值,并通过胸径纠正^[22]处理得到最接近于真实胸径值的测量结果。式中, D 为测绘记算器测量任意处树干直径; N 为测绘记算器屏幕内所测图像值; f 为测绘记算器的 CCD 镜头定焦焦距。单木测胸径仪器操作及结果显示见图 3,摄影测量单片解析原理示意图见图 4。

2.2 单木测树高

调查仪用于单木树高测量时,第一步,将激光点或者显示屏中间的十字丝对准待测立木树干处并保持激光线水平,按测量键获取调查仪到该处的水平距离 L ;第二步,将激光点或者显示屏中间的十字丝对准待测立木根部,按测量键获取测树仪此时的下倾角 α_1 ;第三步,将激光点或者显示屏中间的十字丝对准待测立木树梢,按测量键获取测树仪此时的上倾角 α_2 。此时,内置程序通过树高计算数学模型: $H = L(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1)$ 解算出树高并显示在屏幕

上。调查仪测量树高操作步骤及测量结果见图 5，树高计算原理示意图见图 6。

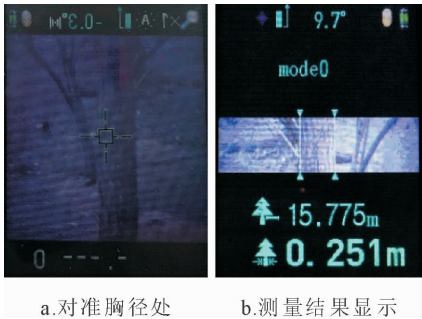


图 3 单木测胸径仪器界面

Fig. 3 Instrument interface of DBH measurement

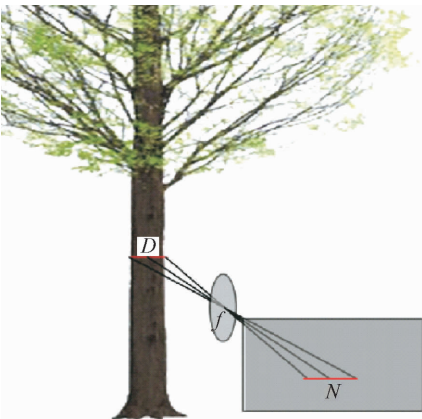


图 4 摄影测量单片解析原理示意

Fig. 4 Schematic diagram of photographic measurement of single-chip analysis principle

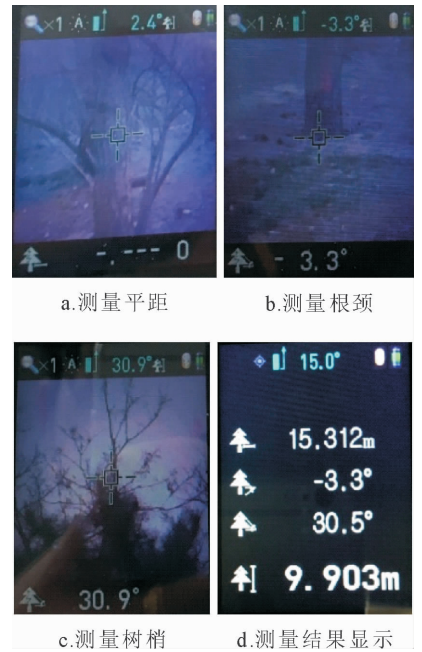


图 5 单木测树高仪器界面

Fig. 5 Instrument interface of tree height measurement

2.3 单木测材积

调查仪用于单木材积测算时分为测量胸径和测量树高 2 个部分,胸径测量和树高测量具体步骤如上文单木测胸径、单木测树高所述。测量所得的胸径、树高值通过全国通用单木立木材积解算公式: $V=5.917\ 3D^{1.918\ 70}H^{0.929\ 44}\times10^{-5}$ 计算出材积^[29]并显示在屏幕上。式中, V 表示单株立木材积; D 为所测得的胸径值; H 为所测得的树高值。材积测量结果显示界面见图 7。

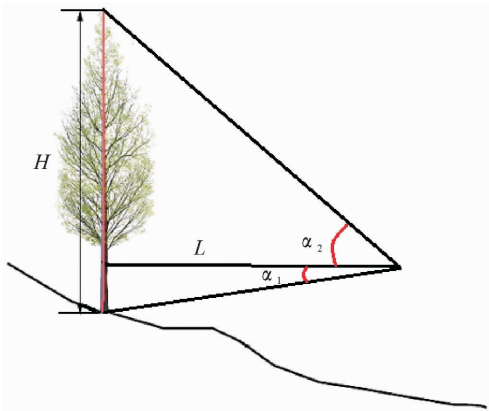


图 6 树高计算原理示意

Fig. 6 Schematic diagram of tree height measuring principle



图 7 材积测量结果显示界面

Fig. 7 Interface of volume measuring result

2.4 圆形样地观测

用调查仪进行圆形样地观测的具体步骤:1)在林区选定一点作为样地中心点,以中心点为圆心设置圆心样地面积,分别为 100、200、300 m²。2)利用调查仪进行绕测,首先判断所测树木是否在样地内,对在样地内的每一棵树木进行胸径、树高测量,直到采集完样地内所有样木的信息。3)调查仪根据采集到的样木信息自动解算出该圆形样地的林分平均胸径、平均树高、株数密度、蓄积量。圆形样地观测原理示意图见图 8。

调查仪中圆形样地观测功能获取林分参数解算原理,可以用下列公式表示:

林分平均胸径计算:

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

式中, n 为样地内观测木数量; D_i 为第 i 棵观测样木的胸径(cm)。

林分平均树高计算:

$$\overline{H} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i^2} \tag{2}$$

式中, n 为样地内观测木数量; H_i 为第 i 棵观测样木的树高(m)。

株数密度(株 · hm⁻²)计算:

$$N = \frac{n}{S} \times 10^4 \tag{3}$$

式中, n 为样地内观测木数量; S 为样地大小设置的面积(m²)。

林分蓄积量(m³ · hm⁻²)计算:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n G_i (H_i + 3) f_{\epsilon}}{S} \times 10^4 \tag{4}$$

式中, n 为样地内观测木数量; G_i 为第 i 棵观测样木的胸高断面积; f_{ϵ} 为推导形数^[30]; S 为样地大小设置的面积(m²)。

计算公式: $\overline{E}_H = \frac{|\overline{H}_A - \overline{H}_E|}{\overline{H}_E}$, 式中, \overline{H}_A 为调查测量数据的平均值(m); \overline{H}_E 为胸径尺或测树全站仪测量数据的平均值(m); \overline{E}_H 为相对误差(%) 计算各对比试验测量结果的相对误差, 调查仪单木因子测量功能对比试验及误差分析结果见表 1。

通过试验结果表明, 在 298 组测量数据随机选取的 20 组测量数据中, 胸径测量相对误差在 0.94%~5.12%; 树高测量相对误差在 1.05%~4.92%; 材积测量相对误差在 0.45%~10.12%, 符合国家森林资源一类连续清查工作的精度要求。

3.2 圆形样地观测试验

为验证调查仪的圆形样地观测功能及测量精度, 在北京松山国家级自然保护区选取了 20 个圆形观测样地, 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, 样地主要树种为大叶白蜡和油松, 分布均匀, 生长状况良好。在样地内, 观测人员分别用每木检尺的方法和调查仪圆形样地观测功能进行对比试验, 圆形样地观测试验及误差分析结果见表 2, 可以看出, 调查仪圆形样地观测功能中的林分平均胸径测量精度高达 97.92%, 林分平均高测量精度高达 97.97%, 株数密度测量精度高达 96.54%, 蓄积量测量精度高达 95.79%, 符合森林资源二类调查的精度要求。

4 结论与讨论

本研究研制了一种便携式森林资源调查仪, 实现了内外业一体化, 减轻了工作人员的负担。该仪器由 Cortex-M3 中央处理芯片、激光测距模块、倾角传感器、蓝牙模块、LED 彩屏、CCD 镜头等电子元件高密度集成于一体, 基于数字图像处理技术、摄影测量技术、测树学理论, 由内嵌单木测胸径模块、单木测树高模块、单木测材积模块、圆形样地观测模块等 4 大模块化程序, 实现胸径自动测量、树高自动测量、立木材积解算、圆形样地观测等 4 大功能。详细阐述了便携式森林资源调查仪的单木测胸径、单木测树高、单木测材积和圆形样地观测等功能的操作步骤和计算原理, 并在北京松山国家级自然保护区进行野外对比试验。试验得到单木因子测量功能的胸径测量精度高达 97.85%, 树高测量精度高达 97.46%, 材积测量精度高达 95.64%; 圆形样地观测功能林分参数获取, 林分平均胸径测量精度高达 97.92%, 林分平均高测量精度高达 97.97%, 株数密度测量精度高达 96.54%, 蓄积量测量精度高达 95.79%, 符合我国森林资源调查的精度要求, 可在森林资源调查工作中推广使用。

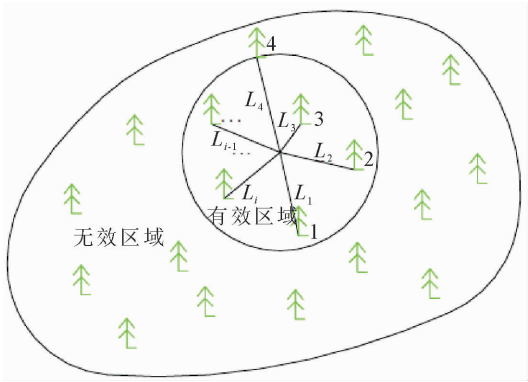


图 8 圆形样地观测原理示意

Fig.8 Schematic diagram of round sample measurement principle

3 试验验证

3.1 单木因子测量试验

为验证调查仪胸径、树高、材积 3 种单木因子的测量功能及测量精度, 在北京松山国家级自然保护区展开试验, 树种包括大叶白蜡、油松、山槐、榆树。在林区选取不同立地条件的多个样地对便携式森林资源调查仪的单木因子测量功能进行测量试验, 在不同方向选择观测点对待测木进行 2 次以上观测, 最后取平均值作为测量值。采用林业调查工作中常用的胸径尺和调查仪进行胸径测量对比试验; 利用广州南方测绘科技股份有限公司和北京林业大学测绘与 3S 技术中心共同研发的 2 秒测树全站仪和调查仪进行树高测量和材积测量试验。根据相对误差

表 1 单木因子测量试验及误差分析结果									
Table 1 Test and relative error results of tree single factor measurement									
树种	胸径测量值/cm		树高测量值/m		材积测量值/m ³		相对误差/%		
	胸径尺	调查仪	全站仪	调查仪	全站仪	调查仪	胸径测量	树高测量	材积测量
大叶白蜡	13.9	13.462	9.964	9.832	0.069	0.073	3.15	1.32	5.27
大叶白蜡	19.9	19.538	10.737	10.315	0.150	0.155	1.72	3.93	3.74
大叶白蜡	9.1	8.914	6.213	6.128	0.020	0.021	2.36	1.36	6.11
大叶白蜡	9.4	9.523	6.821	7.157	0.029	0.028	1.63	4.92	4.03
大叶白蜡	8.3	7.910	6.261	6.330	0.018	0.017	4.58	1.11	3.39
大叶白蜡	13.5	13.178	8.593	8.284	0.063	0.059	2.24	3.59	5.62
油松	18.0	17.756	15.036	15.217	0.176	0.185	1.30	1.21	5.35
油松	13.6	13.323	10.653	10.312	0.072	0.074	1.67	3.20	3.37
油松	18.5	18.257	11.983	11.664	0.161	0.153	1.20	2.66	5.12
油松	13.2	12.918	12.414	12.155	0.079	0.082	2.36	2.08	3.46
油松	20.2	19.909	11.306	11.187	0.181	0.174	1.34	1.05	4.14
油松	14.5	14.343	9.202	8.980	0.077	0.075	1.08	2.41	2.08
油松	18.8	18.427	10.274	10.067	0.135	0.136	1.72	2.02	0.45
油松	12.8	12.618	11.514	11.115	0.069	0.072	1.42	3.47	4.19
山槐	5.6	5.351	5.306	5.097	0.006	0.007	5.12	3.94	10.12
山槐	8.0	7.792	6.430	6.223	0.018	0.017	2.60	3.22	7.61
榆树	8.4	8.110	5.136	4.987	0.014	0.015	2.87	2.90	1.51
榆树	24.0	23.745	16.017	16.220	0.365	0.344	0.94	1.26	5.85
榆树	15.9	15.462	10.601	10.443	0.104	0.100	2.45	1.49	3.64
榆树	33.6	33.167	15.428	14.872	0.615	0.602	1.29	3.60	2.12
平均值	14.9	14.685	9.994	9.829	0.121	0.119	2.15	2.54	4.36
单木因子测量方差							1.18	1.29	4.52
单木测量平均方差							2.33		
单木因子测量精度							97.85	97.46	95.64
单木测量平均精度							96.98		

表 2 圆形样地观测试验及误差分析结果													
Table 2 Test and relative error results of round sample measurement													
样地 编号	树木 数量	平均胸径/cm		平均高/m		株数密度/株		蓄积量/(m ³ ·hm ⁻²)		相对误差/%			
		每木 检尺	调查仪	每木 检尺	调查仪	每木 检尺	调查仪	每木 检尺	调查仪	平均 胸径	平均 树高	株数 密度	蓄积量
1	22	13.2	12.784	10.85	10.970	2 058	2 134	70.15	68.921	2.97	1.06	3.69	1.75
2	24	11.4	11.760	7.04	7.173	2 100	2 078	60.80	64.455	3.34	1.93	1.05	6.01
4	17	11.7	12.101	9.86	10.290	1 500	1 571	61.45	59.648	3.23	4.41	4.73	2.93
5	12	17.6	17.723	16.47	15.896	1 700	1 680	181.31	185.993	0.77	3.49	1.18	2.58
7	25	10.8	11.187	9.21	9.541	2 500	2 632	72.08	75.054	3.32	3.54	5.28	4.12
8	21	11.3	11.424	8.83	8.774	1 718	1 791	85.6	89.452	1.10	0.63	4.25	4.50
10	19	12.2	12.193	12.18	11.991	1 859	1 801	143.77	135.647	0.06	1.55	3.12	5.65
11	23	15.3	15.610	10.81	10.845	3 021	3 150	154.77	145.058	2.03	0.32	4.27	6.28
12	20	15.4	15.875	10.22	10.479	2 331	2 419	128.62	135.270	3.08	2.53	3.78	5.17
14	15	16.4	16.552	9.5	9.426	863	891	97.94	94.886	0.93	0.78	3.24	3.12
平均值	20	13.5	13.721	10.50	10.539	1 965	2 015	105.65	105.438	2.08	2.03	3.46	4.21

参考文献:

[1] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2006:10-13.

[2] 侯磊,张硕新,陈云明,等. 林分密度对人工油松林下植物的影像[J]. 西北林学院学报,2013,28(3):46-52.

HOU L,ZHANG S X,CHEN Y M,et al. Impact of stand density on the vegetation under artificial *Pinus tabulae formis*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(3):46-52. (in Chinese)

[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,2002:10-30.

[4] MARSHALL D D,IIES K,BELL J F. Using a large-angle gauge to select trees for measurement in variable plot sampling[J]. Canadian Journal of Forest Research,2004,34(4):840-845.

[5] ALPARSLAN A,ANTHONIE V L. Forest Mensuration[M]. Netherlands:Springer,2007:78-243.

[6] 闫飞. 森林资源调查技术与方法研究[D]. 北京:北京林业大学,2014:15-16.

[7] 冯仲科,梁长秀,隋宏大,等. 内置程序式电子经纬内置程序式

电子经纬仪角规自动立体测树技术:101158576[P]. 2008-04-09.

[8] 冯仲科,徐祯祥,杰林德·罗斯纳尔. 电子角规测树仪及自动测树方法:1570557[P]. 2005-01-26.

[9] 冯仲科,姚山. 全站仪量测树高方法:101021416[P]. 2007-08-22.

[10] 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]. 农业机械学报,2015,46(9):257-265.

[11] 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 Z K, JING H T, ZHOU K L, *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)

[12] 冯仲科,马超,赵保卫,等. 视频超站仪及森林计测方法:1670474[P]. 2005-09-21.

[13] 冯仲科,王佳. 一种测树型超站仪及其使用方法:102466476A[P]. 2012-05-23.

[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]. 农业机械学报,2015,46(1):292-298.
CAO Z, GONG Y C, FENG Z K, *et al.* Error analysis on standing tree volume measurement by using electronic theodolites[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 292-298. (in Chinese)

[15] 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]. 农业机械学报,2015,46(1):299-305.

[16] 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,2015,46(4):7-13.
CAO Z, FENG Z K, XU W H, *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, 46(4): 7-13. (in Chinese)

[17] 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 C, ZHANG S Y, FENG Z K. A Fine estimation of standing tree volume based on electronic theodolite[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(6): 116-119. (in Chinese)

[18] 孙梦营,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.

[19] 王小昆,冯仲科,郝星耀,等. 电子角规用于 3P 抽样测定林分蓄积的研[J]. 林业资源管理,2005(3):38-42.

[20] 梁长秀,冯仲科,姚山,等. 基于电子经纬仪及 PDA 自动量测的电子角规测树原理、功能及精度研究[J]. 北京林业大学学报,2005,27(Supp. 2):142-147.
LIANG C X, FENG Z K, YAO S, *et al.* Principle, practice and accuracy analysis of electronic angle gauge based on electronic theodolite and PDA[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(Supp. 2): 142-147. (in Chinese)

[21] 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 W H, FENG Z K, SU Z F, *et al.* Development and experiment of handheld digitalized and multi-functional forest measurement gun[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 90-99. (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 X D, FENG Z K, XIE M X, *et al.* Developing and accuracy analysis of portable device for automatically measuring diameter at breast height and tree height[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(18): 92-99. (in Chinese)

[23] 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]. 农业机械学报,2017,48(4):1-12.
QIU Z X, FENG Z K, JIANG J Z W, *et al.* Development and test instrument of forest intelligent surveying and mapping calculator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 1-12. (in Chinese)

[24] 崔少伟,范文义,金森,等. 基于树影与快鸟图像的单木树高提取[J]. 东北林业大学学报,2011,39(2):47-50.
CUI S W, FAN W Y, JIN S, *et al.* Extraction of individual tree height using quickbird images based on tree shadow[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(2): 47-50. (in Chinese)

[25] 王佳,冯仲科. 航空数字摄影测量对林分立木测高及精度分析[J]. 测绘科学,2011,36(6):77-79.
WANG J, FENG Z K. Stand tree height measured by digital photogrammetry[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(6): 77-79. (in Chinese)

[26] 贾永倩,王振锡,瞿余红,等. 基于全极化 Radarsat-2 数据的苹果园平均树高估算模型[J]. 森林工程,2017,33(2):45-49.
JIA Y Q, WANG Z X, QU Y H, *et al.* Estimation model of apple tree average tree height based on fully polarized Radarsat-2 data[J]. Forest Engineering, 2017, 33(2): 45-49. (in Chinese)

[27] SU W, LIU R, LIU T, *et al.* The estimation of tree height based on LiDAR data and quickbird imagery[J]. Computer and Computing Technologies in Agriculture, 2013, 39(3): 472-482.

[28] 张珊珊,孟园,林文树. 基于三维激光扫描技术的单木参数提取精度研究[J]. 西北林学院学报,2017,32(5):189-196.
ZHANG S S, MENG Y, LIN W S. Extraction precision of forest parameters at single-tree level based on 3D laser scanning technology[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(5): 189-196. (in Chinese)

[29] 曹时凯,王立海,刘铁男,等. 移动测树激光扫描仪车载机构及车主参数确定[J]. 西北林学院学报,2017,32(6):178-183.
CAO S K, WANG L H, LIU T N, *et al.* Determination of the main parameters of vehicle-servo mobile tree-measuring scanner mounts and vehicle[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6): 178-183. (in Chinese)

[30] 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的建立[J]. 农业机械学报,2017,48(3):1-10.
CHENG W S, FENG Z K, YU J X. Developing generic standard volume model and derived form factor model for major tree species in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 1-10. (in Chinese)