

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.016

手持式精准立木树高测量装置设计与试验

刘海洋¹ 冯仲科¹ 呼诺¹ 刘金成¹ 于新文²

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要: 为解决森林资源调查中树高测量误差大, 复杂林分环境树高测量难, 倾斜立木树干长度测量不准等问题, 以测量学、测树学、电子信息技术、传感器技术和图像处理技术为基础, 研制了手持式精准立木树高测量装置。该装置集成了中央处理器、激光测距仪、高清摄像头、高精度陀螺仪传感器、液晶显示屏、存储器等元器件, 利用激光测距传感器获取测量装置与被测树根间的距离, 同时获取该装置的仰角信息, 再利用图像中心确定树顶位置后获取第2个仰角信息, 通过距离信息和角度信息解算测量树高。使用设备贴紧树干测量树干倾斜角度, 对于干型弯曲的树木, 利用边缘检测算法识别图像树干轮廓边缘, 以轮廓近似法提取树干轮廓边缘点, 获得树干边缘离散点坐标信息, 将线性拟合求得的直线斜率转换为树干倾斜角, 利用角度补偿算法完成长势倾斜立木的树长测量。试验结果表明树高测量精度可达98.04%, 倾斜立木测量精度为96.89%, 满足国家森林资源调查的精度要求。

关键词: 树高; 测量设备; 手持式; 精准测量

中图分类号: S758.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)12-0129-06

Design of Handheld Precision Standing Tree Height Measurement Device

LIU Haiyang¹ FENG Zhongke¹ HU Nuo¹ LIU Jincheng¹ YU Xinwen²

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Institute of Information Resources, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The object was to solve the problems of large tree height measurement errors in forest resources surveys, difficulties in measuring tree heights in complex forest stands, and measurement of the height of tilted stands, etc., and surveying, forest measurement, electronic information technology, sensor technology and image processing technology were focused on. Based on this, a handheld precision standing tree height measurement device was developed. The device consisted of a central processing unit, a laser range finder, a high-definition camera, a high-precision gyro sensor, a liquid crystal display, a memory and the like, and a laser-ranging sensor was used to obtain a distance between the measuring device and the root of tree, and the device was acquired at the same time. The elevation angle information was used to determine the position of the treetop after the image center was used to obtain the second elevation angle information, and the measurement tree height was solved by the distance information and the angle information. The equipment was used to measure the trunk inclination angle of the tree trunk. For the dry-bending trees, edge detection algorithm was used to identify the edges of the image trunk contour. Contour extraction method was used to extract edge points of the trunk contour, and coordinate information of the discrete points on the edge of the trunk was obtained to perform linear fitting. The slope of the straight line was converted to the angle of the trunk, and the angle compensation algorithm was used to complete the measurement of growth of trees with long slopes and standing trees. The test results showed that the tree height measurement accuracy can reach 98.04%, and the inclined standing wood measurement accuracy was 96.89%, which can meet the accuracy requirements of the national forest resource survey. The measuring method of tree height measurement device and the measuring method of high growth and volume of the inclined standing timber can provide new ideas for the

收稿日期: 2018-07-01 修回日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1710123)、北京市自然科学基金项目(6161001)、北京林业大学青年教师科学研究中长期项目(2015ZCQ-LX-01)和北京林业大学研究生课程建设项目(3001008)

作者简介: 刘海洋(1990—),男,博士生,主要从事林业装备与信息化研究,E-mail: 308735750@qq.com

通信作者: 冯仲科(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事林业3S技术研究,E-mail: fengzhongke@126.com

research of forestry equipment.

Key words: tree height; measuring equipment; handheld; precision measurement

0 引言

树高测量是森林资源调查过程中的重要环节,也是评价森林生长情况、材积量、碳储量以及林分收获出材量的重要数据依据,是我国森林资源连续清查中非常重要的调查因子^[1-2]。由于林分情况复杂,现阶段我国在森林资源连续清查中,树高测量精度不能得到较好保障,引起了树木树高计算中增长速度过快或过慢,甚至出现树高负增长情况,测量数据严重偏离了客观规律,给森林调查、林业生产和林木生长研究工作带来了诸多问题。由于长势倾斜的立木树高测量与实际树长偏差较大,严重影响材积量和出材量的计算和评估,始终是林业测量中的难题。因此,研制一种操作简单、测量精准、适应复杂林分测量和倾斜立木精准测量的树高测量装置,解决林业树高测量中的实际需求,提供可靠树高数据,对发展精准林业具有重要的意义^[3-4]。

随着科技不断发展和林业生产的迫切需求,一大批国内外专家学者提出了很多先进的研究理论、技术和测量方法^[5-7],同时研制了一批新的测量设备,其新理论和测量方法主要体现在遥感反演^[8-11]、激光测距、三维激光扫描^[12-14]、摄影测量等领域。国外的树高测量装备价格昂贵,使用激光测距传感器两次或多次测距的方式进行测量,树顶部的激光点较难确定和测量,操作性差并且测量存在较大误差,不适用于大面积的林业资源调查工作,如日本尼康公司生产的 Forestry 550^[15]型激光测距装备等。国外的专家学者利用这类仪器进行了大量的学术研究,如 RUTTEN 等^[16]使用瑞典 Haglöf 公司生产的 Vertex IV Hypsometer 有选择地记录研究山地森林的结构和组成,测量装备测量的局限性给森林研究工作带来了限制。近年来国内的专家为了发展精准林业,适应林业生产信息化和智能化的要求,对新型树木测量设备与测树方法进行大量研究^[17-21]。但目前国内研制的仪器还存在模仿国外产品,在树高测量方面仍使用传统的测量原理和方法,无法解决操作性差、测量精度低等问题。与此同时众多国内外研究树高测量仪器时,大多都未解决长势倾斜立木树高测量问题,对倾斜立木树高测量误差较大,不能测量树干实际长度,无法精准计算和评估倾斜立木的材积和出材量。

针对上述树高测量存在的问题,本文以国家森林资源调查为实际需求,综合考虑树高测量过程中

测量装备的精度要求和作业环境复杂等特点,基于传感器技术和嵌入式系统,研制一种便携式精准立木树高测量装置,实现复杂林分环境中立木树高的精准测量和倾斜立木树长测量,为森林计测装备提供新的测量方法和技术手段。

1 原理与方法

1.1 硬件设计

便携式精准立木树高测量装置由 CPU、GPU、存储设备 RAM/ROM、激光测距仪、显示屏、高清摄像头、无线通信模块、GPS 模块、高精度陀螺仪芯片、电源、天线等组成。其中中央处理器 CPU 采用 Cortex - A9 四核处理器,具有高速的运算性能,并采用三星 S5M8767 电源管理模块和 10 000 mA·h 锂电池供电,可降低功耗、增加野外作业时长。

传统的摄影测量装备在手持测量树高时误差较大,为保证测量精度通常固定在三脚架上,在复杂林分的树高测量中具有较大的局限性。本文便携式精准立木树高测量装置、激光测距仪和高清摄像头均采用了前置设计,将激光测距仪和高清摄像头并行排列置于装置上方,测距方向垂直于显示屏,这种设计可以在手持测量时,有效避免装备位置偏移产生的测量误差。硬件构成和试验样机如图 1 所示。

1.2 软件设计

树高测量装置软件采用嵌入式系统和 Android 7.1.1 系统。树高测量软件 APP 采用 Java 语言汇编实现,在开发环境 Android Studio 2.2 下集成后载入设备,采用流程化和模块化设计,包括树高测量模块、数据管理模块和数据计算模块,软件流程图如图 2 所示。

树高测量装置 APP 主要实现树高测量功能,此外还能对倾斜立木树长进行矫正测量。

在树高测量基础上,利用 SQLite 数据库系统,实现测量数据管理和数据分析功能,其中数据管理包括:数据记录功能记录被测量树 GPS 信息、胸径、坡度、坡向等信息;数据查询功能可根据数据属性条件查询,查询同类别的数据(如地点、树高取值范围等);数据编辑功能可将已测数据进行编辑(包括增加、删除、修改等);数据导出功能可生成 Excel 数据文件并导出。数据分析包括:通过调用已测量数据,进行样地树高统计分析(如最大值、最小值、平均值、标准方差等);根据树种、树高、胸径等信息实现单木材积计算分析;根据单木材积和树种信息实现

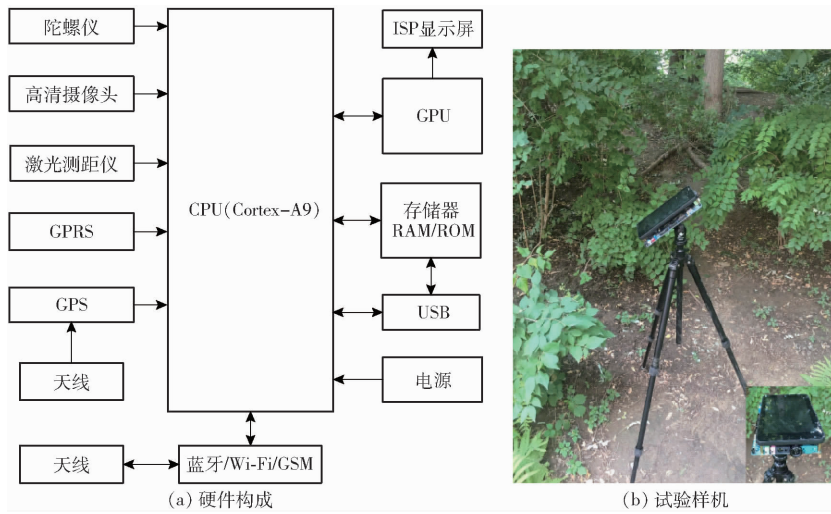


图 1 硬件构成和试验样机图

Fig. 1 Diagrams of hardware design and test prototype

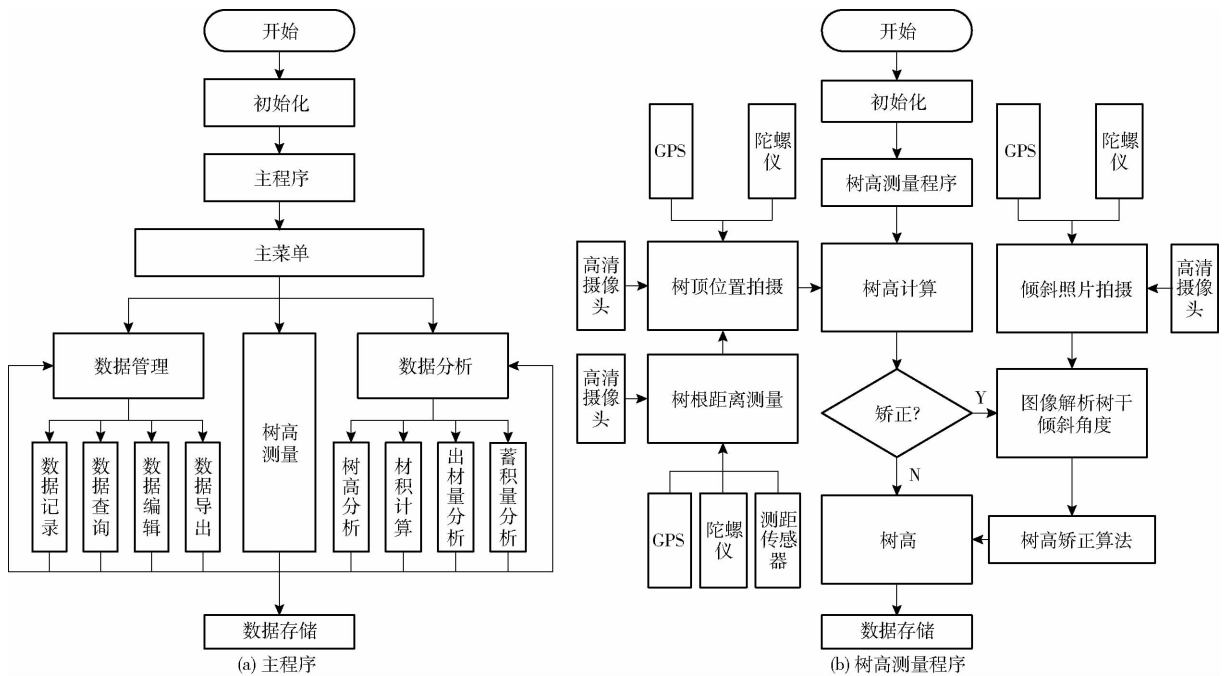


图 2 树高测量装置 APP 软件设计流程图

Fig. 2 Flow chart of APP software design for tree height measuring device

林木出材量计算分析;根据单木材积实现林分蓄积量计算分析。

1.3 树高测量

1.3.1 树高测量原理

本文树高测量主要利用摄影测量和三角函数原理进行计算,通过改进测量算法简化作业操作,仅需 2 个操作步骤即可完成测量,测量方法如图 3 所示。

首先使用高清摄像头拍摄树根位置,获取与激光测距传感器、高精度陀螺仪芯片间的距离 d 和设备仰角 α ,然后利用高清摄像头拍摄树顶位置,获取拍摄角 β ,计算得到立木树高 H ,计算式为

$$H = d \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin\beta} \quad (1)$$

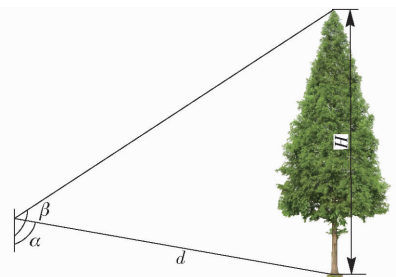


图 3 树高测量示意图

Fig. 3 Diagram of tree height measurement

1.3.2 倾斜立木树高矫正

使用设备贴紧树干测量树干倾斜角度,在树木干型弯曲时利用图像处理技术对倾斜立木树高测量进行矫正,利用边缘检测算法使用 Canny 算子进行

树干边缘检测,首先进行灰度化处理,计算公式为

$$f = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (2)$$

式中 f ——灰度

R 、 G 、 B ——红、绿、蓝颜色分量

对图像进行高斯滤波,公式为

$$k = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中 x 、 y ——点坐标值 σ ——标准差

用一阶有限差分近似求取灰度梯度,计算图像梯度幅值和方向,对梯度进行非极大值抑制,在获得梯度方向和大小后,对整幅图像扫描,去除非边界点,对每个像素进行检查,判断该点的梯度是否为周围具有梯度方向的点中最大。选取 2 个阈值,根据较高阈值得到一个边缘图像,这一图像含有少量假边缘,但由于阈值较高,产生的图像边缘可能不闭合,为解决此问题采用另一个低阈值。在高阈值图像中把边缘连接成轮廓,当达到轮廓的断点时,在断点的 8 邻域点中寻找满足低阈值的点,再根据此点收集新的边缘,直到整个图像边缘闭合。树干边缘检测如图 4 所示。



图 4 边缘检测处理结果

Fig. 4 Edge detection processing result

利用轮廓近似法提取树干轮廓边缘点,获得树干边缘离散点坐标信息,使用最小二乘法对树干边缘信息进行曲线拟合,处理后再进行线性拟合,求得直线斜率后转换为树干倾斜角 γ ,对树干高度进行矫正计算。根据公式求得倾斜立木树长 H' 和树高 H ,倾斜立木树高测量示意图如图 5 所示。

在倾斜立木倾斜正面使用测距仪测量设备到树

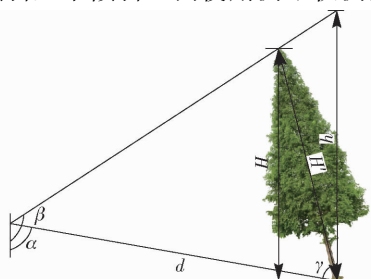


图 5 倾斜立木树高测量示意图

Fig. 5 Sketch of slant standing tree height measurement

根的距离 d 和设备仰角 α , 求出虚拟高度 h

$$h = d \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin\beta} \quad (4)$$

最后测量立木倾斜角 γ , 求出立木树长

$$H' = h \frac{\sin\beta}{\sin(90^\circ - \beta + \gamma)} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),化简得出

$$H' = d \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin(90^\circ - \beta + \gamma)} \quad (6)$$

由树长 H' 可求出倾斜立木树高

$$H = H' \sin\gamma \quad (7)$$

倾斜立木树长 H' 可用于立木材积精准计算,减少材积计算误差,提高材积测量精度。

2 试验

2.1 树高测量

试验在西山试验林场、松山自然保护区等地进行,选取不同树高的油松、雪松、侧柏等针叶树,蒙古栎、白蜡、栾树等阔叶树进行立木树高测量。选用南方测绘 NTS-282R6 型全站仪进行对比试验,并以全站仪测量数据为树高测量真值进行误差计算,测量结果如图 6 所示。

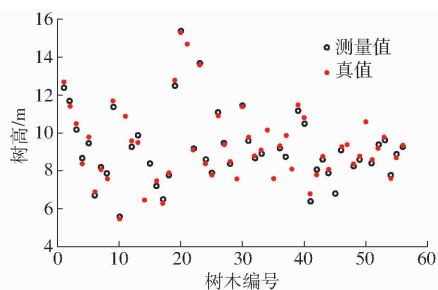


图 6 测量结果

Fig. 6 Measurement results

试验分别测量 56 棵树,树高在 5.6 ~ 15.4 m 之间,从测量数据分析得出其测量相对误差范围为 -0.4 ~ 1.1 m,平均绝对误差为 0.19 m。误差分布如图 7 所示。

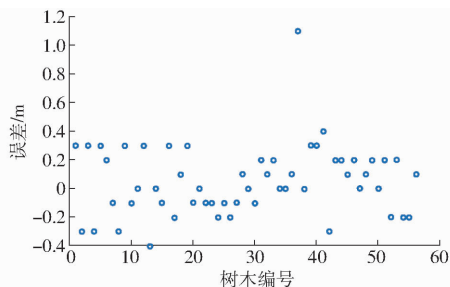


图 7 误差分布

Fig. 7 Error distribution map

根据测量误差分别计算乖离率为 0.05 (Bias)、0.58 (Bias%)、均方根误差为 0.40、4.30 m^[22]。

2.2 不同树种分析

将测量数据根据不同树种划分,并分别计算测量误差,结果如表 1 所示。

表 1 不同树种树高测量结果

Tab.1 Measurement results of different tree species

树种	株数	平均绝对误差/m	相对误差/%
油松	9	0.28	2.79
侧柏	9	0.17	2.09
雪松	5	0.12	0.97
蒙古栎	8	0.13	1.33
白蜡	10	0.25	2.68
栎树	15	0.16	1.88

由表 1 可以看出,本测量装置所测量不同树种树高平均绝对误差范围在 0.12 ~ 0.28 m 之间,测量不同树种树高相对误差范围为 0.97% ~ 2.79%,不同树种平均测量精度达 98.04%,不同树种的测量误差均能满足林业中树高测量要求,试验装置适用于多树种立木树高测量。

2.3 倾斜立木树长测量试验

在松山国家自然保护区对不同倾斜程度的立木分别进行测量,得出立木树长,并使用全站仪分别测量树顶和树根空间位置坐标,计算得出树高真值,试验结果如表 2 所示。

测量设备在不同树种间测量平均绝对误差在 0.1 ~ 0.5 m 之间,各种不同倾斜立木间测量结果的相对误差为 1.09% ~ 4.94%,平均测量误差为 3.11%,测量矫正效果较好,能有效测量树木树长,提高倾斜立木材积计算精度。

3 结论

(1) 利用电子信息技术、传感器技术和图像处理技术,在树高测量研究上提出新的测量方法并改

表 2 倾斜立木树长测量结果

Tab.2 Measurement results of tilted tree

编号	树种	测量值/m	真值/m	相对误差/%
1	旱柳	11.7	11.9	1.68
2	旱柳	13.7	13.2	3.79
3	旱柳	15.8	15.4	2.60
4	枫树	7.6	7.9	3.79
5	枫树	8.5	8.1	4.94
:	:	:	:	:
24	国槐	18.6	18.4	1.09
25	国槐	16.3	16.6	1.81
26	蒙古栎	9.7	10.2	4.90
27	蒙古栎	14.5	14.1	2.83
28	蒙古栎	9.4	9.1	3.29
平均值				3.11

进了树高测量技术,研制出一种便携式精准立木树高测量仪,实现了复杂林分环境下的精准立木树高测量和倾斜立木树长测量,同时此设备还实现了数据记录和存储功能,在记录样地信息的同时可根据输入树种、胸径等其他信息,计算该样地中的材积、出材量、蓄积量等信息。可根据需求,与手机数据接收端协同使用,实现对测量数据无线实时接收和读取,并实现测量数据的调用、编辑、导出 Excel 等功能。

(2) 试验表明本文设计的精准立木树高测量设备在树高测量中测量精度达到 98.04%,倾斜立木树长测量平均误差为 3.11%,符合国家森林资源连续清查等森林调查的树高测量精度要求。经测量作业实践证明,利用摄影方式解决了传统激光测高仪器在复杂林分环境下树冠激光点难确定的问题,优化了森林计测仪器的测量方法,利用图像处理技术计算倾斜立木树长,精准估算倾斜立木材积和出材量,可为林业调查工作人员提供可靠数据支持,同时为树高测量设备的研制提供新的研究方向。

参 考 文 献

- 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2006:10-11.
- WU J, CHEN X. Impact analysis of forest resources planning and design survey on forest management and management[J]. Journal of Green Science & Technology, 2017(13):164-165.
- 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.
- 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.
- 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)
- 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)
- 唐守正. 围尺测径和轮尺测径的理论比较[J]. 林业资源管理,1977(3):23-26.
TANG Shouzheng. Theoretical comparison of circumference measurement and wheel diameter[J]. Forest Resources Management, 1977(3):23-26. (in Chinese)

- 8 鄯广平. 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)
- 9 BROVKINA O, LATYPOV I S, CIENCIALA E, et al. Improved method for estimating tree crown diameter using high-resolution airborne data[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(2):026006.
- 10 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)
- 11 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.
- 12 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)
- 13 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.
- 14 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.
- 15 NIKON VISION Co. Ltd. Forestry 550[EB/OL]. [2015-06-05]. <http://www.nikon.com/products/index.htm>.
- 16 RUTTEN G, ENSSLIN A, HEMP A, et al. Forest structure and composition of previously selectively logged and non-logged montane forests at Mt. Kilimanjaro[J]. Forest Ecology & Management, 2015, 337: 61 - 66.
- 17 冯仲科, 徐祯祥, 杰林德·罗斯纳尔. 电子角规测试仪及自动测树方法: 1570557[P]. 2005-01-26.
- 18 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)
- 19 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?flag=1&file_no=20150939&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)
- 20 邱梓轩, 冯仲科, 蒋君志伟, 等. 森林智能测绘计算器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 179 - 187. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170522&flag=1. 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)
- 21 杨立岩, 冯仲科, 范光鹏, 等. 激光摄影测树仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 211 - 218. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180126&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 01. 026.
YANG Liyan, FENG Zhongke, FAN Guangpeng, et al. Design and experiment of laser photogrammetric instrument for measuring forest[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 211 - 218. (in Chinese)
- 22 LIANG X, HYYPÄ J, KUKKO A, et al. The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(9): 1504 - 1508.