

可穿戴式树木测高帽的研制与试验

孔 雷¹, 刘智军¹, 李陆勋¹, 胡文洪², 徐伟恒³, 朱丽艳¹, 王海亮¹

(1. 国家林业局昆明勘察设计院, 云南 昆明 650216; 2. 富民县林业局森林病虫害防治检疫站, 云南 富民 650400;
3. 西南林业大学 计算机与信息学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 针对现有的林木测高理论和测量技术的局限性, 本研究研制了一种可穿戴式树木测高帽, 实现了树高和相对坐标的测量。该设备以单片机、九轴传感器、红外测距模块等主要硬件为基础, 通过测量距离、倾角和磁方位角 3 个参数, 基于三角函数原理, 嵌入操作软件, 实现树体高度、相对坐标和冠幅的数字化、一体化精确测量。以四蕊朴 *Celtis tetrandra* 为测量树种, 分别以不同距离 (3 ~ 17 m) 和树干不同高度 (10 m 距离, 5.01 ~ 0.90 m) 为测量对象, 以鱼竿+皮尺为树高测量理论真值, 将可穿戴式树木测高帽、手持激光测距仪和罗盘仪进行测量比较试验; 以 32 株四蕊朴干为测量对象, 以罗盘仪为方位角测量理论真值, 与测高帽比较测量; 以同一株滇朴为测量树种, 分别以不同距离 (0.94 ~ 20.74 m) 为测量对象, 以皮尺为水平距离测量理论真值, 分别以测高帽和手持激光测距仪比较测量。结果表明, 在树高、方位角和水平距离测量时, 可穿戴式树木测高帽的准确度和中误差优于其他两种测量方式。

关键词: 林木; 测高帽; 穿戴式; 一体化; 多功能; 测量

中图分类号: S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3776 (2018) 01-0082-09

Experiment on Wearable Tree-Height Dendrometer

KONG Lei¹, LIU Zhi-jun¹, LI Lu-xun¹, HU Wen-hong², XU Wei-heng³, ZHU Li-yan¹, WANG Hai-liang¹

(1. Kunming Academy of Survey & Design, State Forestry Administration, Kunming 650216, China; 2. Forest Pest Control and Quarantine Station of Fumin Forestry Bureau of Yunnan, Fumin 650400, China; 3. College of Computer and Information, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: Presentation was made on wearable tree-height dendrometer in terms of structure and principles. Determinations were carried out on tree height of 32 *Celtis tetrandra* in the arboretum of Southwest Forestry University, Yunnan province, by the dendrometer, portable laser range finder and compass. Taking tape measure value as true value, comparisons on measured values by different devices demonstrated that the accuracy and mean square error of wearable tree-height dendrometer was the best.

Key words: tree; dendrometer; wearable; integration; multi-function; measurement

传统森林资源调查监测存在内外业工作量大、完成周期长、数据整理过程繁琐、数据难以统一管理存储等困难^[1-2]。随着森林计测学的发展和精准林业、数字林业等概念理论的提出和不断完善, 人们对森林资源调查和

收稿日期: 2017-05-25; 修回日期: 2017-11-17

基金项目: 云南省科技计划项目“数字化多功能便携式测树仪的研制”(编号: 2016BC006)

作者简介: 孔雷, 高级工程师, 博士, 从事天然林分结构研究; E-mail: 1234konglei4321@sina.com。

监测的要求也由手工、粗放化测量进入精准化、数字化、信息化测量时代, 尤其在全球森林资源日益减少的今天, 对单木和林分实现精准无损自动量测显得尤为重要和迫切^[3-4]。

在测树学中, 树高是最基本的测量因子之一。目前, 测高器的种类很多, 光学仪器有布鲁莱斯测高器、圆筒测高器和克里斯屯测高器等^[5], 电子仪器有手持式数字化多功能电子测树枪^[6]、超声波测高器 (Vertex III) 和 Haglöf Laser Vertex L402 Laser Only Hypsometer 等^[7-8]。现有技术的测高原理一般有相似三角形、三角函数和地面垂直比较等。利用相似三角形和三角函数原理的测量仪器必须要在通视的情况下, 看到树体的最顶端, 才能测其树高, 一般都是手持式, 在测量过程中无法固定仪器, 手臂位移对测树结构影响非常大^[9]。如果设置三脚架固定仪器, 又会给野外测量人员增加负担^[10]。利用地面垂直比较原理的测量仪器必须能够触及树体, 才能完成测量多为杆式结构的仪器。杆式测高仪等地面垂直比较测高的工具, 虽然在郁闭度较大、通视较差的林分内应用较为方便, 但是无法测量无法触及的目标林木, 如孤岛林地内生长的林木等情况。由于杆式测高仪等测高工具伸缩长度有限, 对于树体高大的林木, 特别是树高 20 m 以上的林木无法准确测量^[11]。

另外, 国内外测量仪器功能单一, 仅仅能够满足林业资源基本勘察工作, 无法满足林业科学深层次研究的需要, 特别是对林木坐标位置的调查; 而且实现不了内外作业一体化, 无形中增加了工作和研究人员的负担^[12]。针对现有的林木测高理论和测量技术的局限性, 本研究着力于解决上述现有技术之不足, 提供一种可穿戴式树木测高帽, 该测高帽带有倾角传感器、激光测距元件和电子罗盘, 能够实现树体高度、相对坐标和冠幅的数字化精确测量。

1 主要结构

1.1 系统构造

可穿戴式树木测高帽的构造如图 1 所示。由图 1 可知, 控制器内主要是以 MCU 为核心的电路, 电路由电池供电 (较佳为锂电池), 由操作按钮控制某一条电路的接通, MCU 与激光测距元件、方位感应模块、倾角传感器相连, 还与 FLASH 存储器、wifi 等相连。FLASH 存储器实现数据存储功能, 使设备断电后依然长久保存数据, 不会造成数据的丢失, wifi 用于与外界设备进行信息传输。

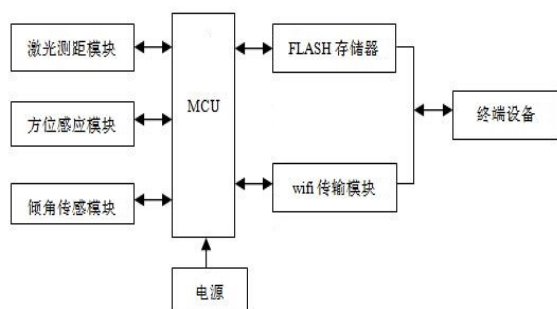
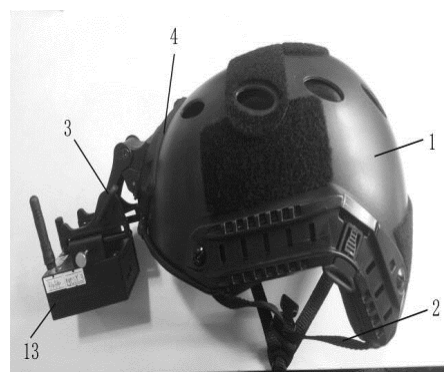


图 1 控制器电路框图以及与外部的终端设备连接关系图

Figure 1 Controller circuit block and connection diagram with external terminal device



1-帽体, 2-帽带, 3-支架, 4-卡槽, 13-测量模块。

图 2 可穿戴式树木测高帽右侧视结构图

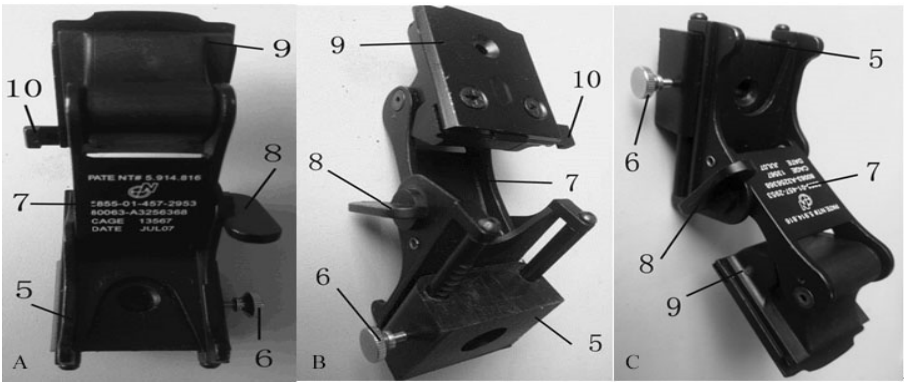
Figure 2 Right view of Wearable Tree-Height structure Dendrometer structure

1.2 帽体

可穿戴式树木测高帽帽体主要包括帽带、支架和卡槽 (图 2)。帽体选用抗摔耐磨材质, 既可满足各测量模块的衔接, 又可保护调查员头部。帽体内有夹层, 材质为塑料泡沫。帽带可以拉紧或者放松以调节穿戴。

帽体正前方位置设有卡槽, 通过卡位式将支架安装在卡槽内。支架共有 3 个部分可以旋转, 模块座可呈水平方位移动测量模块, 以调节水平目距, 当目距调节合适后, 可通过模块座制动螺丝制动; 中枢转轴可呈垂直

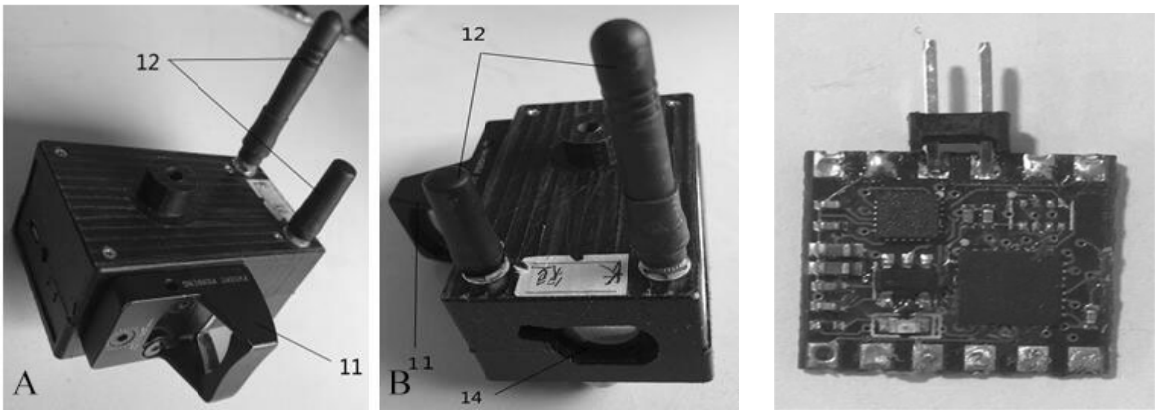
方位上下翻动测量模块，以调节垂直目距，当目距调节合适后，可通过中枢转轴制动螺丝制动；卡槽座可将整个支架卡在卡槽内，并通过绷簧固定在卡槽内。



A - 支架后视图； B - 支架正视图； C - 支架前视图；
5 - 模块座，6 - 制动螺丝，7 - 中枢转轴，8 - 中枢转轴制动螺丝，9 - 卡槽座，10 - 绷簧。

图 3 可穿戴式树木测高帽支架结构图

Figure 3 Bracket structure of Wearable Tree-Height Dendrometer



A - 测量模块侧视图； B - 测量模块正视图
11 - 全息瞄准镜，12 - 天线，14 - 红外测距元件。

图 4 可穿戴式树木测高帽测量模块实物图

Figure 4 Measuring module of Wearable Tree-Height Dendrometer

图 5 红外测距模块结构图

Figure 5 Infrared distance measurement module structure

1.3 测量模块

测量模块是可穿戴式树木测高帽测量实现部分，由外壳、MCU、红外测距元件、九轴传感器、FLASH 存储器、wifi 传输模块、锂电池、全息瞄准镜和天线等构成（图 4）。

1.4 红外测距模块

红外测距模块：获取测量员与被测目标的距离测量参数；选用支持二次开发且尺寸较小模块便于整体安装等，选用型号为 LRB6048，其参数如：测量范围 0.02 ~ 100 m，测量精度为 ± 2 mm，考虑使用安全因素等将激光波长和功率控制为 620 ~ 690 nm，< 1 mw（图 5）。

1.5 九轴传感器

九轴传感器：获取方位角及俯仰角参数；选用 JY901 高精度惯性导航模块，具有较宽工作电压 3 ~ 6v，引

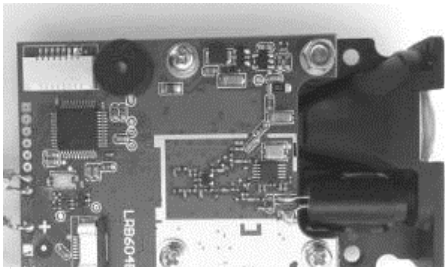


图 6 九轴传感器结构图

Figure 6 Nine axis sensor structure

脚电平兼容 3.3V/5V 的嵌入式系统, 减少器件与 MCU 的电平匹配 (图 6)。

2 测量原理

可穿戴式树木测高帽的基本功能是实现树高和位置的测量。测量时, 先用水准仪实现仪器水平校准; 然后启动激光测距元件, 激光测距元件向目标林木射出一束激光, 由光电元件接收目标反射的激光束, 计时器测定激光束从发射到接收的时间发送给 MCU, 从而计算出从观测者到目标林木的距离; 倾角传感器测量仪器的俯仰角度发送给 MCU。

2.1 林木高度的测量原理

可穿戴式树木测高帽对平地、高坡或洼地树木都可测量, 如图 7。林木高度的测量原理为利用倾角传感器的测角功能和激光测距元件的距离测量功能, 进行 2 次观测即可得到树高。首先倾角传感器水平瞄准树干作为测量角度的初始值, 然后仰头测得仪器到树顶部的倾斜角度 α , 再俯视测量仪器到树根部的倾斜角度 β ; 同时根据激光测距元件测得仪器到树干的水平距离 S , 观测点到地面高度 L , 观测点到树梢高度 h , 就可分平地、高坡或洼地三种情况计算树高:

$$\text{平地树高: } H = h + L = S \times (\tan \alpha + \tan \beta) \quad (1)$$

$$\text{高坡树高: } H = h - L = S \times (\tan \alpha - \tan \beta) \quad (2)$$

$$\text{洼地树高: } H = L - h = S \times (\tan \beta - \tan \alpha) \quad (3)$$

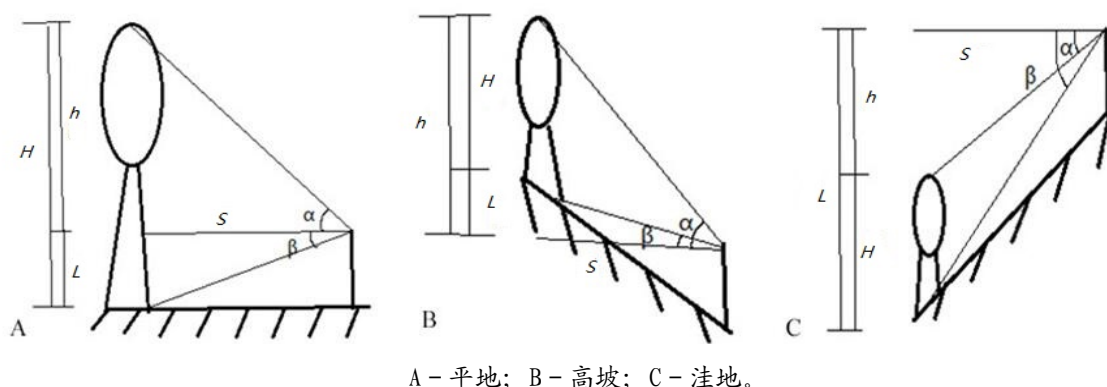


图 7 可穿戴式树木测高帽测量平地、高坡和洼地树高原理图

Figure 7 Schematic diagram for tree height by Wearable Tree-Height Dendrometer at flat ground, slope and depression

2.2 林木的相对坐标测量原理

借助该仪器还可以实现林木的相对坐标测量, 并实现样地闭合和标定, 利用电子罗盘的磁方位角测量功能和激光测距元件的距离测量功能。如图 8 所示, 首先, 从第一个角桩 (0, 0) 开始, 依次以 S_i 为长度, 在 0° , 90° , 180° 和 270° 四个角度各测量 1 次, 共测量 4 次, 可得到实际闭合导线坐标增量 $\Delta x_{i,i+1}$ 和 $\Delta y_{i,i+1}$ 的闭合差, 分别是 f_x 和 f_y 。最后, 计算测量导线全长 f_s , 导线总长 Σs 和导线全长相对闭合差 K , K 值不低于 1/200。

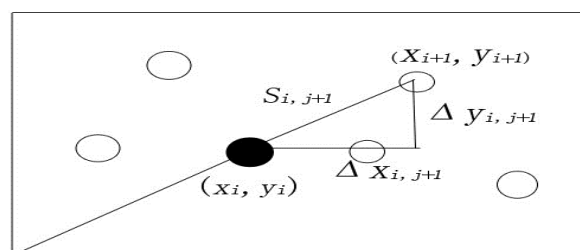


图 8 方形样地标定以及树木相对位置测量图

Figure 8 Square plot calibration and relative position of trees measurement

$$S_i = D_i \cos \delta_i \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta x_{i,i+1} = S_{i,i+1} \cos \gamma_{i,i+1} \\ \Delta y_{i,i+1} = S_{i,i+1} \sin \gamma_{i,i+1} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} f_x = \sum \Delta x_{i,i+1} \\ f_y = \sum \Delta y_{i,i+1} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_s = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (7)$$

$$K = \frac{f_s}{\sum S} \quad (8)$$

利用九轴传感模块的磁方位角测量功能和激光测距模块的距离测量功能,该仪器还可实现对样地内树木的相对坐标进行测量。

第 i 株树到 $i+1$ 株树形成的边的坐标增量改正数为 $V_{x_{i,i+1}}$ 和 $V_{y_{i,i+1}}$, 经过闭合差改正后的位置坐标为 (x_{i+1}, y_{i+1}) 计算公式如下:

$$\begin{cases} V_{x_{i,i+1}} = -\frac{f_x}{\sum S} S_{i,i+1} \\ V_{y_{i,i+1}} = -\frac{f_y}{\sum S} S_{i,i+1} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} X_{i+1} = x_i + \Delta x_{i,i+1} + V_{x_{i,i+1}} \\ Y_{i+1} = y_i + \Delta y_{i,i+1} + V_{y_{i,i+1}} \end{cases} \quad (10)$$

3 研究方法

3.1 树高、方位角和水平距离测量方法

试验样地设在云南省昆明市西南林业大学树木园。对分布于坡上、平地和坡下不同地形位置因素的 32 株四蕊朴 *Celtis tetrandra* 进行测量,分别以不同距离 (3 ~ 17 m) 和树干不同高度 (10 m 距离, 5.01 ~ 0.90 m) 为测量对象,以鱼竿为树高测量理论真值,与测高帽、手持激光测距仪 (D510, LEICA) 和罗盘仪 (DQL-16Z, 哈尔滨光学仪器厂) 分别比较测量。以 32 株四蕊朴干为测量对象,以罗盘仪为方位角测量理论真值,与测高帽比较测量。以同一株滇朴为测量树种,分别以不同距离 (0.94 ~ 20.74 m) 为测量对象,以皮尺为水平距离测量理论真值,分别以测高帽和手持激光测距仪比较测量。

3.2 测量精度分析

3.2.1 准确度分析 准确度是指所测量值与真值的复合程度,反映系统误差和随机误差合成大小的程度。

$$E_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i - \mu| \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i - h'| \quad (11)$$

式中, E_s 是仪器的准确度; h 是仪器测量实际真值; μ 是理论真值; h_i 是每株树每次测量值; n 是观测次数。

3.2.2 精密度分析 精密度是指在测量中所测数值重复性的程度,反映随机误差的大小程度。

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (12)$$

$$E_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i - \bar{h}| \quad (13)$$

式中, E_r 是仪器的精密度; \bar{h} 是每株样木多次测量的平均值; h_i 是每株树每次测量值; n 是观测次数。

4 研究结果与误差分析

4.1 树高测量结果与分析

表 1 表明, 从准确度来比较仪器之间精度, 测高帽的准确度为 0.02, 中误差为 0.02, 精度最高; 其次是罗盘仪, 准确度和中误差分别为 0.03 和 0.04; 手持激光测距仪精度最低, 准确度和中误差分别为 0.04 和 0.06。从精准确度的角度来比较仪器之间精度, 测高帽、手持激光测距仪和罗盘仪 3 者基本持平, 标准差都是 1.12。在可信度 $\alpha=0.25$, t 值检验结果都要远远小于 t_0 值 0.683, 表明所有测量结果可信。

表 1 测高帽、手持激光测距仪和罗盘仪树高测量结果和精度
Table 1 Tree height measured by Wearable Tree-Height Dendrometer, portable laser range finder and compass and their precision

测量 距离/m	测高帽 /m	手持激光 测距仪/m	罗盘仪/m	鱼竿/m	鱼竿与测高帽 差值/m	鱼竿与手持激光测距 仪差值/m	鱼竿与罗盘仪 差值/m
17	4.44	4.45	4.37	4.42	-0.02	-0.03	0.05
	4.97	4.87	4.93	5.00	0.03	0.13	0.07
16	4.97	4.91	4.97	5.00	0.03	0.09	0.03
	4.43	4.40	4.41	4.41	-0.02	0.01	0
15	4.97	4.88	4.98	4.97	0	0.09	-0.01
	4.42	4.41	4.39	4.41	-0.01	0	0.02
14	4.41	4.41	4.42	4.42	0.01	0.01	0
	4.97	5.01	4.96	4.97	0	-0.04	0.01
13	4.42	4.44	4.37	4.41	-0.01	-0.03	0.04
	4.97	4.91	4.95	5.00	0.03	0.09	0.05
e	2.87	2.88	2.85	2.89	0.02	0.01	0.04
11	2.87	2.86	2.86	2.89	0.02	0.03	0.03
10	2.88	2.88	2.88	2.89	0.01	0.01	0.01
e	2.89	2.88	2.88	2.89	0	0.01	0.01
8	2.88	2.91	2.91	2.89	0.01	-0.02	-0.02
7	2.87	2.90	2.86	2.89	0.02	-0.01	0.03
6	2.87	2.91	2.86	2.89	0.02	-0.02	0.03
5	2.88	2.91	2.84	2.89	0.01	-0.02	0.05
4	2.86	2.95	2.81	2.89	0.03	-0.06	0.08
3	2.85	2.91	2.78	2.89	0.04	-0.02	0.11
10	4.97	5.05	4.96	5.01	0.04	-0.04	0.05
	4.59	4.69	4.53	4.57	-0.02	-0.12	0.04
	3.83	3.79	3.79	3.81	-0.02	0.02	0.02
	3.34	3.35	3.31	3.34	0	-0.01	0.03
	2.73	2.73	2.70	2.73	0	0	0.03
	2.11	2.19	2.08	2.12	0.01	-0.07	0.04
	1.67	1.68	1.65	1.68	0.01	0	0.03
	0.89	0.76	0.87	0.9	0.01	0.14	0.03
平均值	3.565	3.569	3.54	3.57	0.01	0.01	0.03
方差	1.253	1.244	1.25	1.25	0.00	0.00	0.00
标准差	1.12	1.120	1.12	1.12	0.02	0.06	0.03
S 值	1.139	1.137	1.139	准确度	0.02	0.04	0.03
t 值	0.029	0.018	0.106	中误差	0.02	0.06	0.04
$\alpha=0.25$	t_0 值	0.683					

4.2 方位角测量结果与分析

由表 2 结果表明, 从准确度的角度来比较仪器之间精度, 测高帽的准确度为 0.959, 中误差为 1.336。从精准确度的角度来比较仪器之间精度, 测高帽标准差是 109.343。测高帽测得的值可信度较高, 其 t 值为 0.016, 小于 $t_0=0.682$ ($\alpha=0.25$), 表明测量结果可信。

表 2 测高帽方位角测量结果和精度
Table 2 The azimuth measuring results by Wearable Tree-Height Dendrometer and precision

物体编号	测高帽/(°)	罗盘仪/(°)	差值/(°)	物体编号	测高帽/(°)	罗盘仪/(°)	差值/(°)
1	209.9	211.8	1.9	17	52.9	52	-0.9
2	208.8	210	1.2	18	48.5	47	-1.5
3	206.9	208.2	1.3	19	39.0	38	-1.0
4	202	203.5	1.5	20	32.7	32	-0.7
5	198.4	200	1.6	21	22.7	23	0.3
6	184.5	185	0.5	22	1.4	1	-0.4
7	180.1	181	0.9	23	352.2	353	0.8
8	174.8	175	0.2	24	343.3	344	0.7
9	151.4	151	-0.4	25	334.9	336	1.1
10	115	115	0	26	327.7	329	1.3
11	105.6	106	0.4	27	322.3	324	1.7
12	90.6	91	0.4	28	313.7	315	1.3
13	73.2	72.5	-0.7	29	303.0	304.3	1.3
14	60.5	60	-0.5	30	289.3	290	0.7
15	58.9	58	-0.9	31	248.4	250	1.6
16	56.2	55	-1.2	32	233.2	235	1.8
平均值	173.188	173.634	0.447	S 值	111.482	准确度	0.959
方差	11 955.785	12 124.087	0.972	t 值	0.016	中误差	1.336
标准差	109.343	110.109	0.986	$\alpha=0.25$	t_0 值	0.682	

4.3 水平距离测量结果与分析

从表 3 结果表明,从准确度的角度来比较仪器之间精度,测高帽的准确度为 0.03,中误差为 0.04;手持激光测距仪的准确度和中误差分别为 0.16 和 0.17;测高帽的准确度和中误差都要优于手持激光测距仪。从精准确度的角度来比较仪器之间精度,测高帽也要优于手持激光测距仪,标准差分别是 6.089 和 6.101。

表 3 测高帽和手持激光测距仪水平距离测量结果和精度
Table 3 Tree height measured by Wearable Tree-Height Dendrometer and portable laser range finder and their precision

物体	测高帽/m	手持激光测距仪/m	皮尺/m	皮尺与测高帽差值/m	皮尺与手持激光测距仪差值/m
四蕊朴	20.70	20.88	20.74	0.04	-0.14
	19.64	19.80	19.62	-0.02	-0.18
	19.13	19.20	19.16	0.03	-0.04
	18.72	19.10	18.80	0.08	-0.30
	17.78	17.98	17.73	-0.05	-0.25
	17.00	17.20	17.00	0.00	-0.20
	15.92	16.13	15.96	0.04	-0.17
	15.25	15.43	15.28	0.03	-0.15
	14.04	14.31	14.07	0.03	-0.24
	12.64	12.78	12.66	0.02	-0.12
	11.84	12.02	11.88	0.04	-0.14
	10.16	10.27	10.20	0.04	-0.07
	9.92	10.10	9.95	0.03	-0.15
	8.67	9.00	8.71	0.04	-0.29
	7.38	7.55	7.41	0.03	-0.14
	6.96	7.14	6.99	0.03	-0.15
	5.72	5.88	5.75	0.03	-0.13
	4.41	4.59	4.46	0.05	-0.13
	3.12	3.25	3.14	0.02	-0.11
	1.99	2.18	2.03	0.04	-0.15
	0.92	1.07	0.94	0.02	-0.13
平均值	11.520	11.708	11.547	0.027	-0.161
方差	37.074	37.217	37.011	0.001	0.004
标准差	6.089	6.101	6.084	0.025	0.063
S 值	6.237	6.243	准确度	0.030	0.161
t 值	0.014	0.084	中误差	0.037	0.173
$\alpha=0.25$	t_0 值	0.686			

5 结论与讨论

从实证可穿戴式树木测高帽、手持激光测距仪和罗盘仪树高测定分析结果可以看出,与其他 2 种方法相比,可穿戴式树木测高帽无论是在准确度方面还是在精准度方面都要高于现有林业常用测量仪器。随着样本量的增加这样的结果会越来越明显,t 值检验结果也会越来越可信。可穿戴式树木测高帽选用 JY901 高精度惯性导航模块,集成高精度的陀螺仪、加速度计、地磁场传感器,且利用动力学解算与卡尔曼动态滤波算法,能够快速求解出模块当前的实时运动姿态,从而获取稳定的俯仰角和方位角。LRB6048 红外测距模块使用的激光波长不受日常野外调查强阳光影响,而且对人体没有伤害。

随着 PDA 等电子设备在森林计测中的广泛应用^[13],外业测量数据的记录和存储逐渐向数字化、自动化方向发展^[14]。但是,我国森林计测内、外业一体化的程度较低,内业部分还需要大量的重复劳动,工作效率低下^[15]。本研究将面向森林调查的内业工作需要,开发森林计测应用系统,形成技术规范。本仪器便携,同时兼具数据传输功能,自动化存储,实现内外作业一体化。本仪器测量功能强大,既可测量普通树高,也可测量超标树高。自主研发的树木测高帽,解决了目前森林调查测量设备落后,测量精度不高,效率低下等问题^[16],开发此精准、便携、易用、高效的测量仪器,实现了林木计测仪器的低成本、微型化、智能化、一体化、实时性、高可靠性的完美集成^[17]。除此之外,在可穿戴式树木测高帽测量林木坐标位置功能的基础上,可以实现一些林木空间结构关系因子的计量和分析,比如:角尺度、大小比和混交度等^[18-20]。

总而言之,可穿戴式树木测高帽是针对目前进口仪器功能单一,价格昂贵,国产仪器主要是仿制国外产品的现状,在已有研究积累的基础上,开展森林计测仪器的研制。同时,可穿戴式树木测高帽旨在形成从森林计测的外业装备到内业数据处理的一整套符合我国国情的森林计测技术系统。可穿戴式树木测高帽的研制是基于现有的森林计测的理论、技术和方法,开展对新仪器的实验,验证其功能、工效和精度,旨在使其能成为传统测量仪器的替代性产品,力争在森林资源连续清查和森林资源规划设计调查等领域,取得一些应用性成果,为我国实际森林计测工作提供科学支持。

参考文献:

- [1] 张慧春,郑加强,周宏平.精确林业 GPS 信标差分定位精度分析[J].农业工程学报,2011,27(7):210-214.
- [2] 曹恒,冯仲科,张茜.CASS 软件林业制图功能模块的设计与实现[J].农业工程学报,2012,28(12):201-207.
- [3] ADRIAN I H, FRÉDÉRIC M, LEBAN J. A Digital Photographic Method for 3D Reconstruction of Standing Tree Shape[J]. Ann For Sci, 2007, 64: 631-637.
- [4] CLARK N. An assessment of the utility of a non-metric digital camera for measuring standing trees [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998: 1-6.
- [5] 孟宪宇.测树学[M].北京:中国林业出版社,2006:13-15.
- [6] 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.
- [7] 陈金星.便携式测树仪的研制及应用研究[D].北京:北京林业大学,2016:3-7.
- [8] BRAGG C D. An Improved Tree Height Measurement Technique Tested on Mature Southern Pines[J]. S J App For, 2008, 32(1):38-43.
- [9] 张原琳,冯仲科,曹爱松,等.电子测树——用于单木测量误差分析研究[J].测绘通报,2015,(8):46-50.
- [10] 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,2014:45-46.
- [11] 国家林业局昆明勘察设计院,西南林业大学.一种便携式树木测高仪:CN201620956070.9[P].2016-08-26.
- [12] 刘发林,曾思齐,鄢前飞,等.数字式多功能测树仪的研制[J].中南林业科技大学学报,2012,32(4):41-44.
- [13] 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,27(2):142-148.
- [14] 国家林业局昆明勘察设计院,西南林业大学.一种便携式电子测径仪:CN201620956137.9[P].2016-8-26.
- [15] 鄢前飞.林业数字式测高测距仪的研制[J].中南林业科技大学学报,2007,27(5):66-70.
- [16] 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.
- [17] 国家林业局昆明勘察设计院,西南林业大学.一种可穿戴式树木测高帽:CN201620955329.8[P].2016-08-26.

