浙 江 农 林 大 学 学 报，2016，**33**(4)：589–598
Journal of Zhejiang A & F University
doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2016.04.006

手持式树径自动识别测树仪的研制与应用

陈金星[1]，岳德鹏[1]，冯仲科[1]，丁家巍[2]，姚炳全[1]，叶添雄[1]

（1. 北京林业大学 精准林业北京市重点实验室，北京 100083; 2. 常州市瑞德仪器有限公司，江苏 常州 213000）

摘要：在森林资源调查中需要调查林分因子，从而了解森林资源的数量与质量，以进行森林资源的规划、设计和经营。森林资源调查是一项费时费力的工作，使用传统测量工具需要不同仪器来进行测量，同时还受地形条件的限制。为快速精确地进行林木测量，开发设计了便携式数字化智能测树仪。仪器由 STM32F103VET6 单片机、ov9655 传感器、LIS331DLTR 倾角传感器、键盘等及其相关电路模块构成。采用相位原理测距，具有±1.5 mm 的测距精度。在径高同测模式下，利用摄像头和互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器对图像进行处理，能够实现树径的自动识别，再利用所测距离和倾角，实现高度、直径同步测量。仪器还有测径模式，测高模式，测距模式，倾角测量模式，面积计算模式。经实验验证，测径模式下，胸径的平均误差为–0.05 cm，误差在 0.50 cm 之内的占 97.6%。在不同距离下，对不同高度的直径进行测量表明，在最佳距离内可使误差在 0.50 cm 内。该便携式数字化智能测树仪可满足森林资源调查需求，实现林业数字化。图 14 表 3 参 20

关键词：森林测计学；测树仪；传感器；测量；图形识别；立木
中图分类号：S758.7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2016)04-0589-10

A handheld dendrometer for automatic tree diameter measurement

CHEN Jinxing[1], YUE Depeng[1], FENG Zhongke[1], DING Jiawei[2], YAO Bingquan[1], YE Tianxiong[1]

（1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Changzhou New Ruide Instrument Co., Ltd., Changzhou 213000, Jiangsu, China）

Abstract: In a Forest Resource Inventory, a time-consuming job traditionally requiring different instruments in difficult terrain conditions, stand factors are determined to understand the quantity and quality of forest resources, thereby enhancing forest planning, designing and operation. To enable fast and accurate tree measurement, a portable digital intelligent dendrometer was designed and developed. This instrument consisted of a STM32F103VET6 microcontroller, an ov9655 sensor, a LIS331DLTR angle sensor, a keyboard, laser ranging sensors, monitors, a power supply, and the relevant circuit module. Ranging used the phase principle with a ranging accuracy of ± 1.5 mm. In the simultaneous measurement mode for diameter and height, the diameter of the tree was automatically identified through image processing with a camera and a complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) sensor. In addition, the following modes were present, caliper, mode, distance measurement, angle measurement and area calculation. Experimental results showed that in the caliper mode, the average DBH error was –0.05 cm, and the error within 0.5 cm accounted for 97.6%. Diameter measurements at different distances and different heights showed that the error fot the optimum distance was within 0.5 cm. Thus, this instrument with automated measurements could meet the needs of a forest resource survey team.

收稿日期：2015-09-02；修回日期：2015-09-28
基金项目：国家自然科学基金资助项目(41371189)；国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(“948”计划)项目(2014-4-76)
作者介绍：陈金星，博士研究生，从事林业装备与信息化研究。E-mail：venusandp@gmail.com。通信作者：岳德鹏，教授，博士生导师，从事林业信息化、景观生态和土地评价等研究。E-mail：yuedepeng@126.com

[Ch, 14 fig. 3 tab. 20 ref.]
Key words: forest mensuration; dendrometer; sensor; measurement; image identification; standing trees

测树仪是主要用来测量树干直径的仪器，主要分为两大类：接触式和非接触式测树仪[1]。非接触式仪器包括光学叉和棱镜之类的设备；接触式主要分为点式和带式 2 类，包括常用的围尺和卡尺。点式测树仪主要用于测量树干大小的变化，带式测树仪测量树干的直径和某一高处树干的周长。非接触式测树仪可用于树干水分状态的评估，以及同质特性气候空间关系的探究[2-5]。专家学者对树木测量仪器和方法进行了大量研究，GREGOIRE 等[6]使用 Barr & Stroud 测树仪测量树木上部的直径， WILLIAMS 等[7]使用快特能 400 和 Barr & Stroud 测树仪进行树木上部直径测量值的对比， DEAN 等[8]使用单片近景摄影照片来测量立木地上部分材积。一些研究利用全站仪和电子经纬仪测树[9-11]，精度高，但仪器笨重，携带不便。三维激光扫描仪在提取树木胸径、树高、冠幅和材积中精度高[12-14]，但是仪器昂贵且内业处理复杂。丛宪冬等[15]设计了激光测高仪，鄢前飞等[16]研制了林业数字测径仪。BITTERLICH 等[17-18]发明了角规，冯仲科等[19-20]将角规功能融入了电子测树枪，可进行树高、角规等测量。现有的测树仪器和方式，操作复杂、精度低且价格昂贵。已有的非接触式仪器，可测某一位置的直径，再测量高度，但是反过来则难以实现，即无法确定给定高值处的位置(非接触情况下 1.3 m 处的判定)。电子化、数字化和智能化技术越来越多地用在森林资源调查中数据的获取，数字化镜头和激光测距仪能够快速获取更加详细的信息。因此，笔者结合互补金属氧化物半导体(COMS)传感器、摄像头、激光测距仪和倾角传感器等数字化电子元件，设计和开发了使用简单、成本低、携带方便的手持式测树仪。该仪器可测径、测高、测距(平距和斜距)，计算三角形、方形和梯形面积，结合这些测量功能还可用来测量冠幅和材积。

1 系统框架结构和软件设计

1.1 系统框架

系统框架如图 1 所示。微控制单元(MCU)采用意法半导体公司生产的 STM32F103VET6，主要对电路进行控制、数据输入输出等。互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器采用 OmniVision 公司的 ov9655，与摄像头相连接，主要用来进行图像的生成、处理和数字信号的输出。数据存储于内部 flash 中，数据可以在屏幕上显示和查看，在测完后输入电脑。部分数据处理采用 C# 开发的后处理软件，其他数据处理使用 matlab。激光传感器由激光发射器、激光接收器和相关电路组成。该仪器主要采用相位原理测距。倾角传感器采用意法半导体公司的 LIS331DLTR，用于测量倾角，电源向其他模块供电。

1.2 系统结构和相关参数

上面各模块在电路板上连接集成后，将其置入塑料外壳中，合成设备。设备轻便，尺寸为 5.00 cm × 13.50 cm × 2.70 cm，质量为 150.0 g。仪器测量的距离范围为 0.05~120.00 m，最小显示数值 1.0 mm，测量精度为±1.5 mm。倾角测量范围−90.0°~90.0°，精度为±0.3°。设备外形如图 2 所示：前端为激光头和摄像头区域，正面有显示屏和键盘，键盘中主要按键有图像缩放键、模式键和确认键等；背面为电池盖

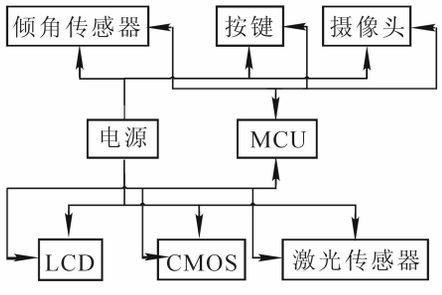

图 1 系统框架图

Figure 1 System framework chart

图 2 仪器结构图

Figure 2 Structure of instrument

板和螺丝口，可固定在三脚架上。与常规光学测树仪相比，不需要通过凸透镜来观测树木，眼睛不会难受，直接在显示屏上观测物体，且可以放大。

1.3　软件流程

首先，软件进入初始化，之后进入模式的选择。在距离模式下，需要打开发生电路和接收器，之后计算相位差从而得到距离值，再输出显示。其他测量模式中也多次进行距离测量，过程类似。直径测量中，按下确定键后，进入距离测量，之后在串行相机控制总线(SCCB)的控制下采集图像，经过模拟信号处理器后，原始图像信号由多路转换器转至 2 个 10 位模数转换器，之后数字信号处理器(DSP)进行图像质量的控制，进行空白像素的消除以及去噪，之后计算树木直径，最后显示数值和图像。而树高利用倾角传感器和激光传感器，按 3 次键，分别获取水平距、底角和倾角，其他测量模式主要应用了距离测量和倾角测量的 2 个基本测量(图 3)。

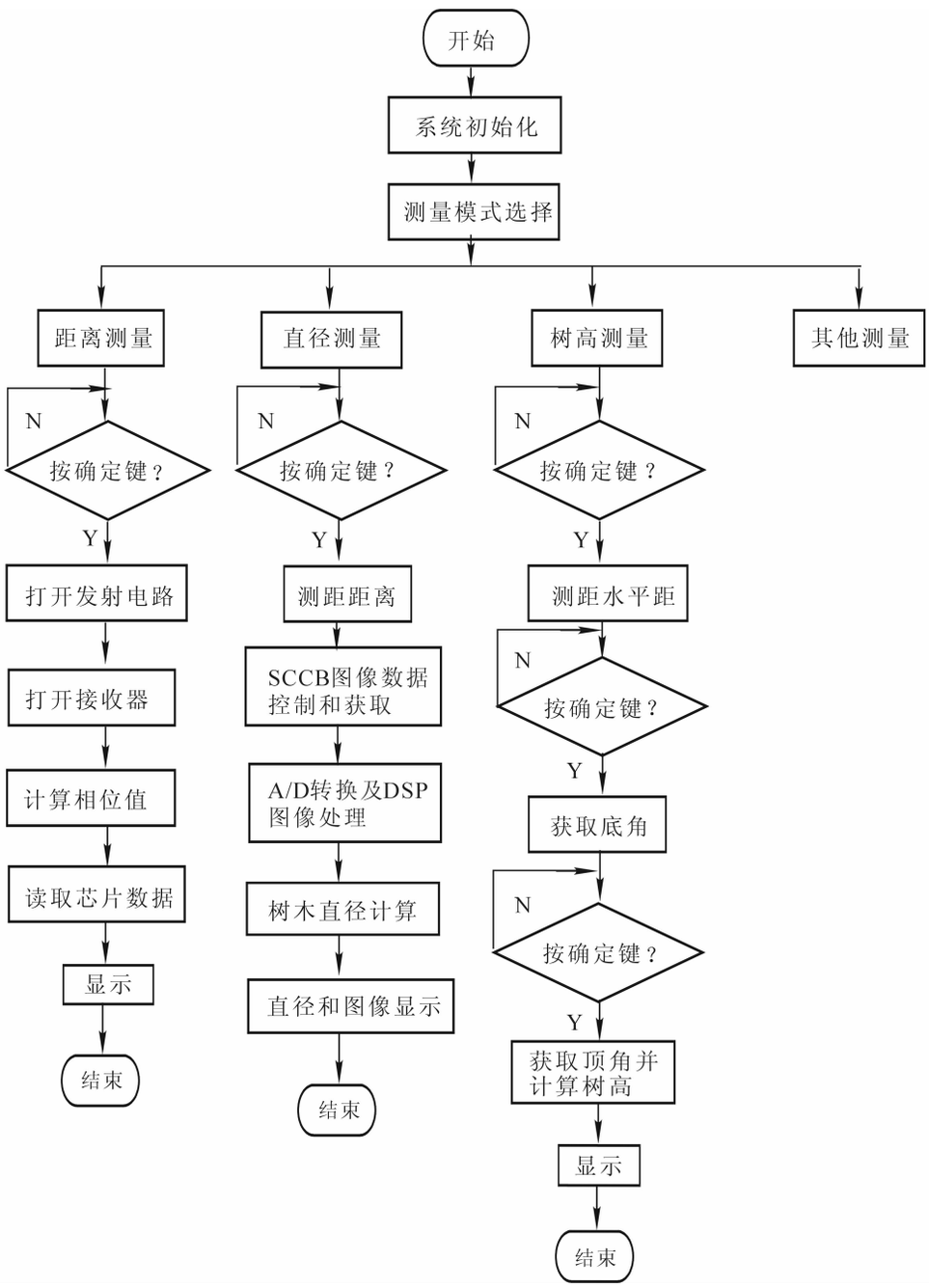

图 3　程序流程图

Figure 3　Program flow chart

2 测量原理和应用

2.1 直径测量原理和应用

当对准树木直径处，所测直径处及附近在摄像头视野内的光线射入 CMOS 的像素阵列中，在电源和外围电路的作用下，不同波长和强度的光子产生不同强度的电流，经过光电转换和其他处理，不同像素处的电流被转换成灰度图。灰度值为 8 位，即 0~255，灰度值越小图像越黑，越大图像越白，如图 4 右上部分。取屏幕中间，如图 4 像素阵列粗实线处，也即像素阵列里中间一行的像素值，对它们进行判断。当灰度值 $G_{ray}<150$，提取此像素，然后计算提取出的相连接的像素个数。这里相连接的线段可能不只一段，假设有 n 段，找出像素个数最多的一段，并在这一段的最左边和最边生成竖值的线以卡住树木。这一步可实现树木直径的自动识别。当然，由于设定的条件不能完全识别出所有树木直径，在此再加入手动调节。即：按下等于键的时候屏幕左侧或右侧的竖线闪动，再按+键和−键可以将竖线向左或右延长，共 4 个 mode，不同的 mode 下可实现不同程度的调节，由 100 个像素的粗调到 1 个像素微调。

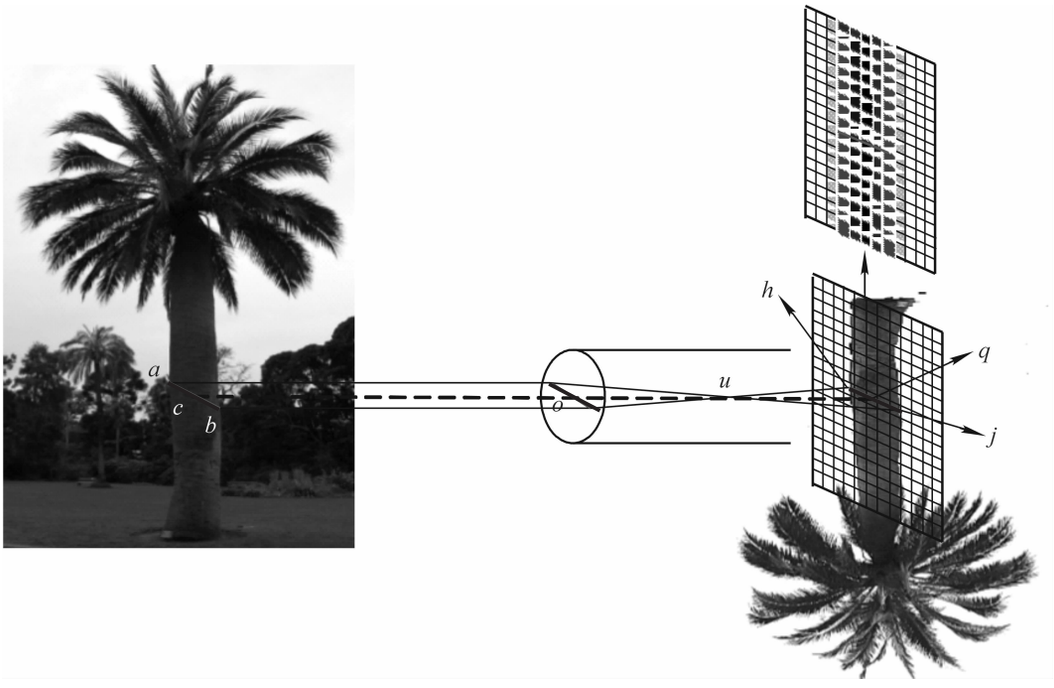

图 4 仪器直径测量原理

Figure 4 Diameter measurement principle of the instrument

如图 4，树木的直径 D 为 ab，c 点为与镜头中心 o 平行的树干上的一个点，与 ab 在同一直线上，co 为物距，oq 为相距，u 为焦点。焦距、物距和相距具有以下物像公式：

$$\frac{1}{co}+\frac{1}{op}=\frac{1}{f}; \tag{1}$$

$$oq=\frac{f\times co}{co-f}; \tag{2}$$

$$\frac{co}{ab}=\frac{op}{hj}; \tag{3}$$

$$ab=\frac{co\times hj}{oq}。 \tag{4}$$

每个像素的宽度为 3.18 μm，即为 3.18×10^{-6} m，焦距可由软件获取，整理式(1)~式(4)并将单位转为 m，得：

$$ab=\frac{n\times3.18\times10^{-6}}{f}\ (co-f)。 \tag{5}$$

co 可由激光传感器测得，单位为 m；f 为已知，由此可以算出树木直径 ab。

在北京市奥林匹克森林公园和鹫峰选择有代表的树进行胸径测量，利用直径测量模式共测 82 株。测量时，使用卡尺的测量值作为对比值，先用仪器测，之后再用卡尺测量。卡尺测量时，使其方向与仪器方向一致。误差分布如图 5，最大误差为 0.80 cm，最小误差为 0 cm，平均误差为−0.05 cm，总的均方根误差为 0.32，误差较小。

对误差分布进行统计，如图 6。绝对误差为 0.20 cm 的株数最多，有 23 株；其次为 0.40 cm，误差为 0.70 cm 和 0.80 cm 的各有 1 株，误差在 0.50 cm 之内的占 97.6%。直径的自动识别中，深色树木识别效果好，而树皮亮度高、纹理多的识别一般，需要通过人工判别来调节键。

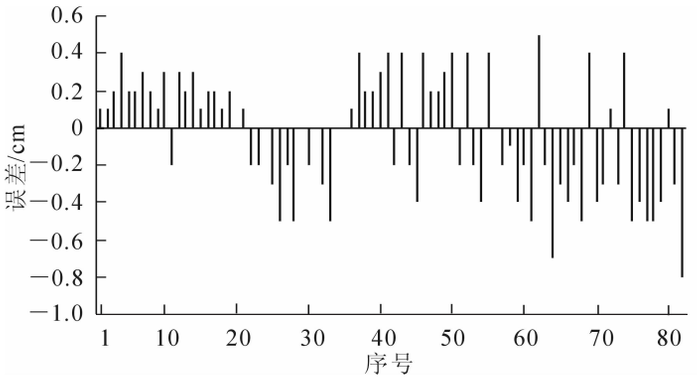

图 5　胸径误差图

Figure 5　Diagram of DBH error

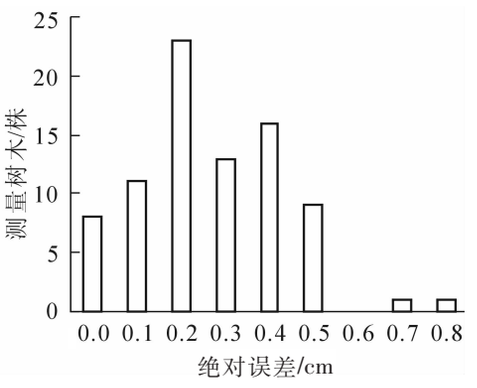

图 6　误差株数统计

Figure 6　Statistics of numbers with error

另外，对其胸径以 4 cm 为径阶进行统计(表 1)，测量树木的径阶范围为 4~56 cm，均方根误差总的趋势随着径阶的增加而增加，56 cm 径阶的均方根误差为 0.50 cm。平均误差最大为 0.50 cm，最大误差大于 0.50 cm 的误差为 36 和 56 cm 径阶，由表 1 可知径阶大的误差较大，主要在 36 cm 径阶及以上。所测数据全部符合二类森林资源调查要求，除 2 个异常值不符合一类森林资源调查要求外，其他全部满足一类森林资源调查要求。对于误差较大的，由于每一径阶的平均误差都在 0.50 cm 内，可通过多次测量求平均值解决。

表 1　胸径按径阶的误差统计

Table 1　Statistics of diameter at breast

径阶/cm	平均误差/cm	最大误差/cm	均方根误差	径阶/cm	平均误差/cm	最大误差/cm	均方根误差
4	0.10	0.40	0.24	32	−0.15	0.50	0.35
8	0.16	0.30	0.23	36	−0.38	0.70	0.42
12	0.04	0.20	0.16	40	−0.05	0.40	0.32
16	0.28	0.50	0.33	44	0.05	0.30	0.35
20	0.15	0.40	0.26	48	0.20	0.50	0.45
24	0.04	0.40	0.29	52	0.50	0.50	0.47
28	0.09	0.40	0.30	56	−0.35	0.80	0.50

2.2　高度、直径同步测量

树高直径同步测量，即测量给出高度值处的直径，如测量 1.30 m 处的直径(胸径)，按照普通测量方式，先用卷尺测出垂直方向上从树底起往上 1.30 m 处的位置，再用围尺测出胸径。对于非接触式测树仪，1.30 m 处的确定尚未得到很好解决，该仪器解决了此问题。如图 7 所示，将仪器固定在脚架上，瞄准树底后按下确定键，利用仪器的倾角传感器可获得向下的倾角 a，利用激光传感器可得到测点 O 到树底的斜距 OA，OS 为与树干垂直的直线，通过下式求得：

$$OS=OA\times\cos(|a|)。\tag{6}$$

保持仪器中心不变，慢慢向上倾斜，角度 b 为向上倾斜过程中与水平方向的夹角，内部程序每隔 0.3 s 按照下式计算树高 h：

$$h=OS\times\tan(b)-OA\times\sin(a)。\tag{7}$$

在向上移动的过程中，屏幕每 0.3 s 更新到树底的高度，由于时间短暂，感觉不到屏幕闪烁。当数字快显示到给定高度值处时(如 1.30 m)，缓慢向上调动，直到屏幕显示的数字稳定且与给定值相等时固定住仪器，再按下确认键，仪器将按上述测径原理测量直径，最后屏幕上显示出直径。

实际测量中，能自动识别。如果识别不好，则手动调节，使得与树木直径的边界一致。步骤如图 8 所示，屏幕中左下角的树为提示符，先瞄准树底。之后图 8 中第 2 幅图实时显示高度变化，到达所给值的地方固定住，并按测量键，屏幕中显示距离和直径以及卡住树木的图像。

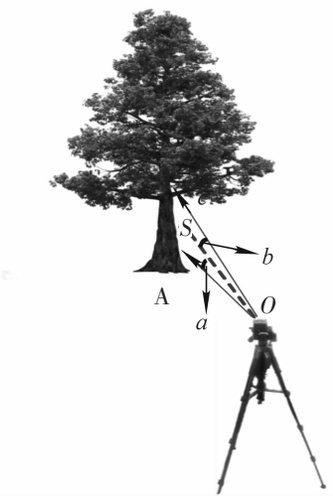

图 7 树高、直径同步测量图

Figure 7 Simultaneous measurement graph of height and diameter

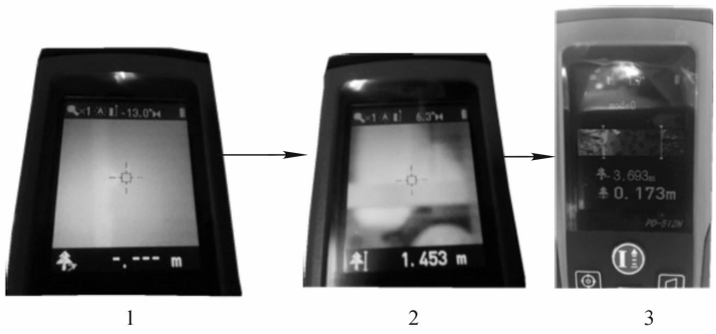

图 8 树高、直径同步测量步骤

Figure 8 Step of simultaneous measurement in height and diameter

外业实验时利用径高同测模式来测量胸径。先用仪器瞄准树底，当上移到 1.30 m 处，用粉笔在树上做出记号，之后用仪器测出胸径。最后用卡尺测出胸径，用钢卷尺测出仪器所测的胸高对应高度作为对比值，共 20 株树。如图 9，仪器所测 1.30 m 处误差极小，精度为 99.70%，最大绝对误差为 0. 90 cm，平均误差为 0. 30 cm。

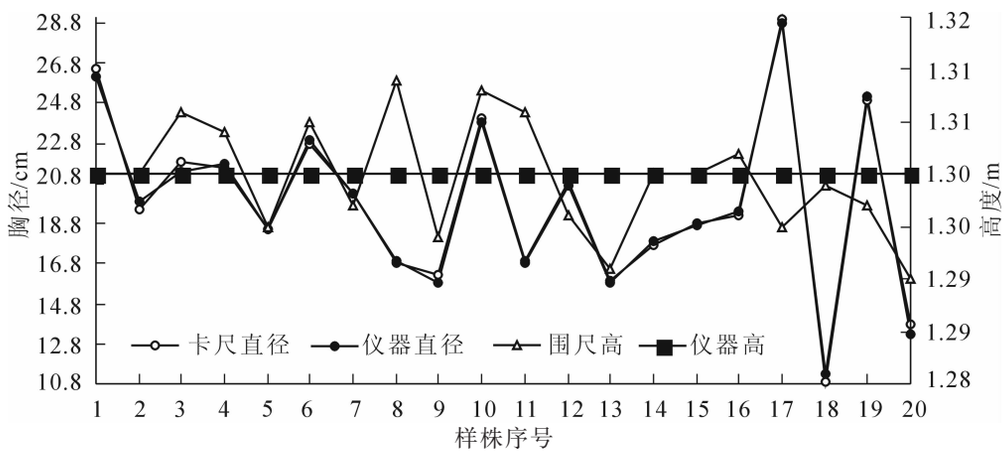

图 9 胸径处判别和测量

Figure 9 Identification and measurement of DBH

2.3 上部直径测量

该仪器除了测量胸径外，还可测量上部直径。上部直径测量时选择枝干较少且可攀爬的树，选择不同的距离进行测量。以卡尺的测量值作为对比值，测量方向与仪器测量方向一致，共测 3 株树，测量值分布如图 10 所示。横轴为距离，纵轴为直径大小，每条实心直线为某一高处的卡尺值，不变，每条虚折线为某一高处仪器测量值。从横向来看，测量值的精度随距离变化而变化，但总有一处距离使得其误差在 0.50 cm 内，其中第 1 株树，最佳测量距离所测值的误差均在 0.10 cm 内。上部直径由于角度、距

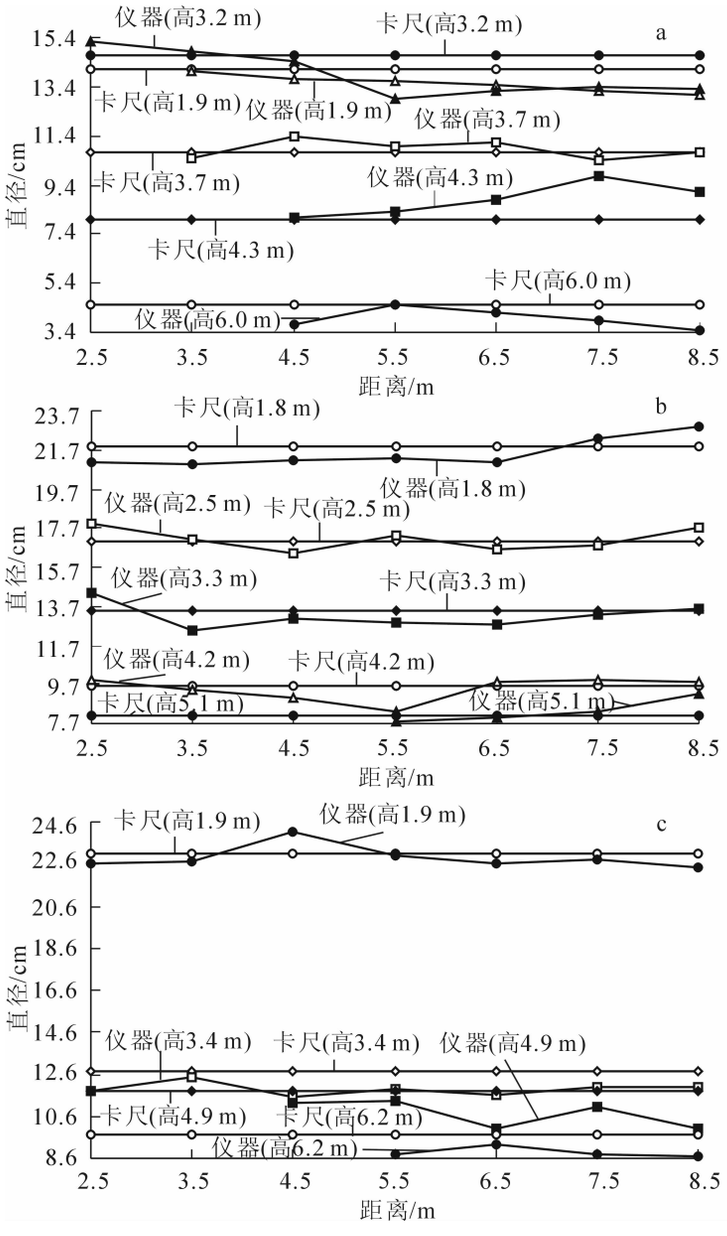

图 10　不同距离下上部直径测量值

Figure 10　Upper diameter at different distance

离和高度的原因，使得不同高度不同大小的直径在不同距离测量时会造成一定的误差，但在最佳距离处可抵消距离、高度和角度的影响。

2.4　树高测量

如图 11，先瞄向树干任意一点，如 w，按下确认键，由倾角传感器测得角度 a，由激光传感器测得斜距 cw。再瞄准树底并按确认键获得底角 b；往上移动，得到顶角 c，最后由下式获得树高 h：

$$h=cw\times\cos(a)\times[\tan(c)-\tan(b)]。\tag{8}$$

使用该仪器与 Trupulse200 激光测距仪进行树高测量，以 Trupulse200 激光测距仪所测值作为对比值。如图 12 所示，共有 177 株树。图 12 中工字形的仪器误差为实际误差值的 2 倍。树高范围为 5.00~21.90 m，均方根误差为 0.17，平均误差 7.50×10^{-2} m，树高总的精度为 99.20%，最大绝对误差为 0.60 m，还有 2 株误差大于 0.50 m，其余误差全在 0.50 m 内。

2.5　冠幅测量

该仪器可测量水平距离，从而可以用来测量树冠冠幅，某一方向冠幅测量如图 13 所示。选择一通视条件良好的地方，可以看到要测方向的两端，瞄准前端后按下确定键，测得水平距 x_1；再瞄准后端，

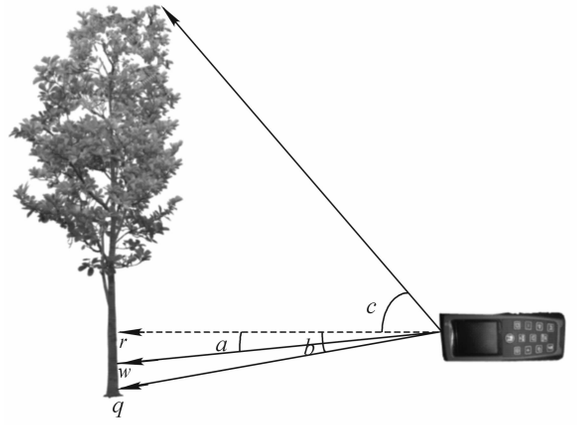

图 11 树高测量原理

Figure 11 Measurement principle of tree height

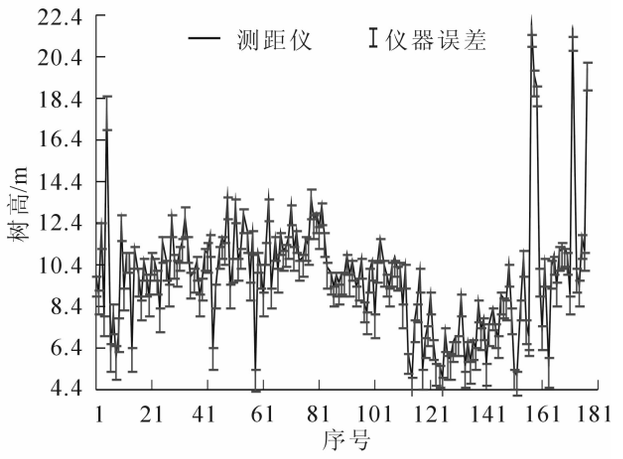

图 12 树高误差折线图

Figure 12 Line chart of tree height error

按下确定键，测得水平距 x_2。测量冠幅有 2 种情形，一是在树冠覆盖面之外，另一种为在树冠覆盖面之内。覆盖面之外时(图 13 左)，冠幅 $g=x_2-x_1$；而在覆盖面之内时，冠幅 $g=x_2+x_1$。

分别使用该仪器和皮尺对 10 株树的冠幅进行测量，每株树分别测量了东西和南北冠幅，测量结果如表 2。

两者的绝对差最大的为 0.49 m，均方根误差为 0.28×10^{-1}，精度为 96.60%。该仪器所测冠幅都比皮尺所测小。主要原因，大冠幅的树都在树下观察，仪器观测到树的边缘为内缘，而在树外观测都是一测为外缘一侧为内缘，都会造成偏小。

表 2 冠幅测量值

Table 2 Crown measurements

序号	方向	测距仪冠幅/m	皮尺冠幅/m	绝对误差/m
1	南北	9.12	9.40	−0.27
	东西	10.27	10.42	−0.15
2	南北	4.18	4.45	−0.27
	东西	3.23	3.59	−0.36
3	东西	2.62	2.96	−0.33
	南北	3.11	3.30	−0.19
4	东西	18.67	18.98	−0.31
	南北	16.51	16.92	−0.40
5	东西	8.25	8.56	−0.31
	南北	9.23	9.73	−0.49
6	南北	9.26	9.72	−0.46
	东西	10.12	10.30	−1.17
7	南北	9.31	9.32	−0.01
	东西	8.36	8.84	−0.48
8	南北	3.14	3.10	0.04
	东西	3.50	3.60	−0.10
9	东西	3.20	3.20	0.00
	南北	3.36	3.45	−0.09
10	东西	2.15	2.23	−0.07
	南北	2.36	2.59	−0.23

2.6 倾角测量

为验证倾角测量的精度，在墙上做出刻度，5.00 cm 为 1 格，然后离墙一定距离，将仪器置于三角架上，并置平，测出在墙上对应的高 h_0，以及到墙的距离 d。然后，从 0°开始测得到每一格的倾角，使用该仪器测了 0~82.20°间的角度值。假设某处高为 h，利用式(9)求得理论值 w：

$$w=\arctan\left(\frac{h-h_0}{d}\right)。\tag{9}$$

经试验测得，该仪器的最大误差在 0.30°内，倾角在 40°以内，误差主要集中在 0.20°内，40°以上误差集中于 0.30°，由此得该仪器倾角测量误差小。

2.7 立木体积测量

利用该仪器的径高同测模式，通过测得树干几个位置的高和直径，分段求积获得立木材积。将梢头外的树干部分均分，每部分用头尾的平均断面积乘以每段的长度以求得这部分的体积，而梢头看成是圆锥，如图 14。计算公式如下：

$$v=\left[\frac{1}{2}(g_0+g_n)+\sum_{i=1}^{n-1}g_i\right]\times h+\frac{1}{3}\times g_n\times h_n=\frac{\pi}{8}\times(d_0^2+d_n^2)\times h+\frac{\pi}{4}h\sum_{i=1}^{n-1}d_i+\frac{\pi}{12}\times d_n^2\times h_n。\tag{10}$$

式(10)中：g_0 为树干底部断面积，g_n 为梢头底部断面积，g_i 为各区分段的断面积。h 为每一区分段的高度，h_n 为梢头部分的高度。相应的，d_0 为树干底部直径，d_n 为梢头底部断直径，d_i 为各区分段的直径。测量步骤如下：①打开径高同测模式，对准地径处，测得直径 d_0 和高 h_0。②上移，测得第 2 处的直径

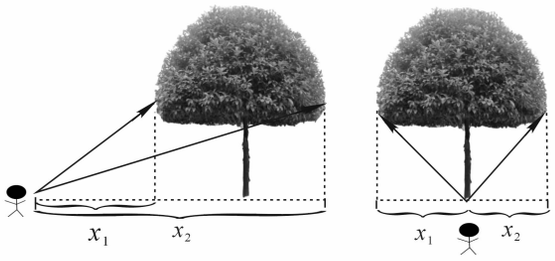

图 13　树冠测量

Figure 13　Crown measurement

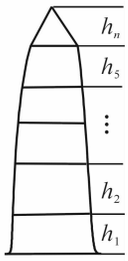

图 14　平均断面积法测树

Figure 14　Tree measuring with the tree's average section method

d_1 和 h_1。再上移，得到第 n 处的直径 d_n 和高 h_n，则每一段的高为 h_n–h_{n-1}。③对准树顶，测得树高 h，则测量结束。

选择枝干较少，易于攀爬的树，卡尺、围尺和该仪器测量了分段处的直径，用该仪器和皮尺测量了分段处的高。一共测量了 4 株树的立木体积，分别得到围尺、卡尺和该仪器的体积，可见三者测量的体积误差不大(表 3)。围尺的相对误差大于卡尺的相对误差，这是由于围尺测量直径的误差所造成的。该仪器与卡尺计算出来的体积误差最大为 2.70%，误差小。而该仪器与围尺最大误差为 11.12%，误差较大，由于围尺测量的直径为平均直径，树木不规则时卡尺在不同方向上测得的值不一致，从而计算的体积误差较大。

表 3　不同测量方法下立木体积值

Table 3　Stumpage volume values under different measurement methods

序号	围尺体积/m³	卡尺体积/m³	仪器体积/m³	仪器与围尺误差/m³	仪器与围尺相对误差/%	仪器与卡尺差/m³	快特能与卡尺相对差/%
1	9.29×10^{-2}	8.73×10^{-2}	8.68×10^{-2}	6.10×10^{-3}	6.54	0.50×10^{-3}	0.40
2	1.01×10^{-1}	1.02×10^{-1}	1.06×10^{-2}	0.50×10^{-3}	4.36	-0.40×10^{-3}	2.72
3	2.83×10^{-2}	2.75×10^{-2}	2.70×10^{-2}	1.30×10^{-3}	4.83	0.50×10^{-3}	1.94
4	1.66×10^{-2}	1.83×10^{-2}	1.84×10^{-2}	1.80×10^{-3}	11.12	-0.10×10^{-3}	0.68

3　结论

利用 CMOS 传感器，结合摄像头，通过对图像处理，仪器可自动识别树木直径，再通过激光测距传感器和倾角传感器，可实现树高与直径同步测量。通过实验得出，1.30 m 处判别的精度达 99.70%；直径测量模式下，均方根误差为 0.32，大的径阶下误差较大些。上部直径在不同距离下精度不一，但有最佳距离段下使得其误差满足林业调查精度需求。树高测量均方根误差为 0.17，平均误差 7.50×10^{-2} m；冠幅测量比皮尺所测值小，精度为 96.60%；倾角测量的误差在 3°以内。另外仪器还能进行样地设置，计算多边形样地的周长和面积。仪器小巧轻便，使用简单，能满足林业资源调查需求。

该仪器与传统测树仪(如 RD 1000)相比，利用图像识别进行直径测量，减少人眼识别的误差，测量速度快。测树装备从传统的机械式、光学式向电子化发展，再向智能化发展。由于不需要水平角测径，该仪器未加入水平角测量模式，而是将水平角的测量放在云台中。另外，该仪器还可以加入全球定位系统(GPS)模块以实现定位和坐标测量。还有该仪器存储在内部 flash 中，所存数据不多，需要加入存储模块，如安全数码卡(SD 卡)。可在该仪器原有功能基础上，完善其他功能，使得仪器更为实用。

4　参考文献

[1] CLARK N A, WYNNE R H, SCHMOLDT D L. A review of past research on dendrometers [J]. *For Sci*, 2000, **46**(4): 570 – 576.

[2] ZWEIFEL R, HÄSLER R. Dynamics of water storage in mature subalpine *Picea abies*: temporal and spatial patterns of change in stem radius [J]. *Tree Physiol*, 2001, **21**(9): 561 – 569.

[3] ZWEIFEL R, ITEM H, HÄSLER R. Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young Norway

spruce trees [J]. *Trees*, 2000, **15**(1): 50 – 57.

[4] WIMMER R, DOWNES G M, EVANS R. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes [J]. *Tree Physiol*, 2002, **22**(7): 449 – 457.

[5] DESLAURIERS A, MORIN H, URBINATI C, *et al*. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Québec (Canada) [J]. *Trees*, 2003, **17**(6): 477 – 484.

[6] GREGOIRE T G, VALENTINE H T, FURNIVAL G M. Estimation of bole volume by importance sampling [J]. *Can J For Res*, 1986, **16**(3): 554 – 557.

[7] WILLIAMS M S, CORMIER K L, BRIGGS R G, *et al*. Evaluation of the Barr & Stroud FP15 and Criterion 400 laser dendrometers for measuring upper stem diameters and heights [J]. *For Sci*, 1999, **45**(1): 53 – 61.

[8] DEAN C. Calculation of wood volume and stem taper using terrestrial single-image close-range photogrammetry and contemporary software tools [J]. *Silv Fen*, 2003, **37**(3): 359 – 380.

[9] 冯仲科，韩熙春，周科亮，等. 全站仪固定样地测树原理及精度分析[J]. 北京测绘，2003(1)：28 – 30.
FENG Zhongke, HAN Xichun, ZHOU Keliang, *et al*. The analysis of forestry mensuration principle and precision in fixed samples by total station [J]. *Beijing Survey Map*, 2003(1): 28 – 30.

[10] 韩光瞬，冯仲科，刘永霞，等. 三维激光扫描系统测树原理及精度分析[J]. 北京林业大学学报，2005，**27**(增刊 2): 187 – 190.
HAN Guangshun, FENG Zhongke, LIU Yongxia, *et al*. Forest measurement principles and precision analysis of three-dimensional laser scanning system [J]. *J Beijing For Univ*, 2005, **27**(supp 2): 187 – 190.

[11] 何成. 森林精准计测关键技术研究[D]. 北京：北京林业大学，2013.
HE Cheng. *The Key Technology for Precision measurement in Forest Surveying* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.

[12] 刘伟乐，林辉，孙华. 基于地面三维激光扫描技术的林木胸径提取算法分析[J]. 中南林业科技大学学报，2014，**34**(11)：111 – 115.
LIU Weile, LIN Hui, SUN Hua, *et al*. Based on the ground of 3D laser scanning technology analysis of forest tree diameter at breast height extraction algorithm [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2014, **34**(11): 111 – 115.

[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]. 农业机械学报，2015，**46**(3)：320 – 237.
FAN Zhongmou, FENG Zhongke, ZHENG Jun, *et al*. Tree crown volume calculation and prediction model establishment using cubic lattice method [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2015, **46**(3): 320 – 237.

[14] 贾振轩. 立木因子量测技术及其精度分析研究[D]. 北京：北京林业大学，2014.
JIA Zhenxuan. *Study Research on the Measurement Technique of Stumpage Factors and the Analysis of Its Accuracy* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[15] 丛宪冬，闫伟. 基于激光测距的激光测树仪结构设计[J]. 林业机械与木工设备，2012，**40**(3)：42 – 44.
CONG Xiandong, YAN Wei. Overall structural design of tree height measuring instrument based on laser distance [J]. *For Mach Woodwork Equip*, 2012, **40**(3): 42 – 44.

[16] 鄢前飞. 林业数字式测径仪的研制[J]. 中南林业科技大学学报，2008，**28**(2)：95 – 99.
YAN Qianfei. Development of forestry digital measurer of diameter [J]. *J Central South Univ For Technol*, 2008, **28**(2): 95 – 99.

[17] BITTERLICH W. Die winkelz hlprobe [J]. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 1952, **71**(7): 215 – 225.

[18] BITTERLICH W. The angle count method [J]. *Allg Forst-u J-Ztg*, 1947, **58**: 94 – 96.

[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**(2)：90 – 99.
XU Weiheng, FENG Zhongke, SU Zhifang, *et al*. Development and experiment of handheld digitalized and multi-functional forest measurement gun [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, **29**(3): 90 – 99.

[20] 徐伟恒. 手持式超站测树仪研制及功能测试研究[D]. 北京林业大学，2014.
XU Weiheng. *Study on Handheld Tree Measurement Smart Station Manufacture and Function Test* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.