

基于 CCD 超站仪的森林样地建立与精测方法研究

刘金成¹ 黄晓东² 杨立岩¹ 冯仲科¹

(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 100101)

摘要: 为了能够快速、精准地进行固定样地定位和样木胸径测量, 提出一种利用 CCD 超站仪按测带进行像对观测的方法, 在 GPS/RTK 确定或假定的观测点上架设仪器, 借助全站仪坐标测量和角度测量功能精确记录 CCD 摄影瞬间的外方位元素, 并确定出其他观测点坐标, 选择合适基线长建立像对进行观测, 提取目标位置的相对三维坐标, 以“S”形路线按测带进行测量, 配合少量的人工补测和相关坐标系的旋转变换, 实现森林固定样地精准建立和胸径精测的目的。通过实地测试, 表明利用该方法能够以较少的站点实现固定样地的建立, 并将图像解算的胸径值与实地调查值进行对比, 其平均相对误差为 3.9%, 解算均方根误差为 1.2 cm。该方法在森林样地建立中有较好的应用前景。

关键词: 森林固定样地; CCD 超站仪; 摄影测量; 样木坐标; 胸径

中图分类号: S718 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0316-06

Establishment and Precise Measurement of Forest Sample Plot Based on CCD Super Station

Liu Jincheng¹ Huang Xiaodong² Yang Liyan¹ Feng Zhongke¹

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

2. College of Arts and Science of Beijing Union University, Beijing 100101, China)

Abstract: The accurate establishment of forest sample plot plays a key role in capturing the parameters characteristics and reveals the regular variation of the forest. To quickly and precisely measure the fixed constructions and trees of sample plots, methods which used CCD super station to carry out image pair observation of measuring tape were proposed. Setting up the instruments in the observation point was determined by the GPS/RTK with the help of total station coordinate measurement and angle measurement function to accurately record the exterior orientation elements of the CCD moment photography. To determine the coordinates of other observation points, the appropriate baseline length to establish the image pair observation was selected in order to extract the relative three-dimensional coordinates of the target location. The measuring tape method with the “S” type route, with a small amount of artificial repair and related coordinate system rotation transformation were carried out, to achieve the precise establishment of forest fixed sample and the diameter measurement. The experimental results showed that the proposed method can be used to achieve the establishment of fixed sample plots with fewer sites, and the DBH calculated by the photos were compared with field survey value. The average relative error was 3.9%, and the root mean square error was 1.2 cm respectively. The proposed method has good application prospect in forest sample plot establishment.

Key words: forest sample plot; CCD super station instrument; photogrammetry; sample trees coordinates; diameter at breast height

收稿日期: 2016-05-19 修回日期: 2016-06-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371001)和北京市科技专项(Z15110000161596)

作者简介: 刘金成(1990—),男,博士生,主要从事摄影测量与地面测绘、林业装备与信息化研究,E-mail: jincheng9010@163.com

通信作者: 冯仲科(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事精准林业、测绘与 3S 技术集成研究,E-mail: fengzhongke@126.com

引言

森林作为最大的陆地生态系统,对陆地生态系统平衡和整个生物圈的稳定起着极其重要的作用。而森林的内部结构复杂多样,如何揭示森林本身的变化规律和内部特征,实现森林的可持续经营,有必要通过研究一些特征因子来掌握森林的特征及其变化规律。由于森林本身面积庞大,在实际调查工作中,一般不可能也没有必要对整个森林生态系统进行实测调查,而往往是按照相关要求和实地条件,通过建立固定样地局部实测的方式,依此来推算整个林分的特征和规律^[1]。在林业调查中,样木中心点坐标和胸径大小作为重要的指标参数,是建立森林固定标准地和评价林木基本状况的重要依据^[2-3]。

传统的固定样地建立方法一般需要首先确定样地边界,并由 2 人以上完成样地内样木相对位置的确定和每木检尺工作,测量耗费时间长,工作量大^[4-5]。随着科技的进步和多学科之间的交叉融合,越来越多的新设备和新技术应用到林业领域,尤其是在固定样地的建立和林木的精准观测上^[6-12]。冯仲科等^[6]将精准测量仪器(电子经纬仪、全站仪、GPS 等)和“3S”技术应用于林业领域,最早提出了“精准林业”的概念;随后,发明电子角规测树方法,配合罗盘仪、电子经纬仪和 DEM 进行样地建设和林木计测^[7-8];王秀美等^[9]进行了数字摄影测量技术在森林调查中的应用研究,建立森林照片处理系统;唐雪海等^[10]使用数字近景摄影测量辅助三维激光扫描对森林固定样地进行了观测;樊仲谋等^[11]、黄晓东等^[12]利用普通数码相机对森林样地进行摄影测量。这些技术和方法虽然在森林样地建立和调查中发挥了重要的作用,但由于受价格、测量精度和林区观测条件等的限制,在实际外业测量中均存在着不同程度的问题^[13]。

为了更好地进行森林样地的建立和调查工作,本文在综合精密测量和摄影测量的基础上,提出一种利用 CCD 超站仪按测带法进行森林固定样地建立和样木精测的方法。

1 研究区概况

香山公园位于北京市西北郊小西山山脉东麓,距市区 25 km,始建于金代,占地面积 160 余公顷,主峰香炉峰,海拔高度 557 m。园内各类树木 26 万余株,树种主要由黄栌、侧柏、油松、圆柏、白皮松、槐树、银杏、楸树、麻栎、榆树、元宝枫、栾树、七叶树、皂荚等组成,仅古树名木就达 5 800 多株,约占北京城区古树总量的 1/4,森林覆盖率达 96.8%。研究

区位于香山公园东北侧,坐标为北纬 39°59′24″,东经 116°10′23″。实验区整体地形较为平坦,有缓坡,区内树种以榆树、黄栌为主,林木间疏密程度较好,点位间通视,实验条件良好。

2 原理与方法

利用 CCD 超站仪进行森林固定样地建立的原则是,无需提前圈定样地边界,只需确定几个设站点的位置(假定或利用 GPS/RTK 确定),通过建立 CCD 超站仪像对观测,配合在 Visual Studio 2010 集成开发环境、.NET Framework 4.0 框架下使用 C#语言编写完成的内业配套软件,就能准确确定样地内林木的相对三维坐标值^[14-16],从而建立起样地内林木的相对位置关系。由于可解算出林木任意位置的三维坐标值,因此利用相关模型可求得对应样木的胸径值。

2.1 超站仪工作原理

本研究利用的测量设备^[17-19]是由全站仪(NTS-372R 型,南方测绘仪器有限公司,中国)、数码 CCD 镜头(DSC-QX100 型,Sony Corporation,日本)和一台预装 PlayMemories Mobile 软件的平板电脑或智能手机组合而成。CCD 超站仪是利用全站仪无反射棱镜测定控制点的测量模式,精准确定 CCD 镜头(数码相机)摄影瞬间的外方位元素,通过点位转换和坐标系旋转平移,用 CCD 镜头拍摄高分辨率图像实现摄影幅面的整体解算。

在进行摄影测量后处理时必须将全站仪控制下的测量中心点坐标与 CCD 镜头摄取的高分辨率图像进行精确配准,才能准确解算摄影图像幅面点位的坐标信息,进而实现精准测图。这就需要在 CCD 超站仪使用前,对组装好的仪器进行严格综合检校,以确定出 CCD 镜头中心相对全站仪测量中心的姿态偏移参数,其中,以全站仪测量中心的相对坐标系 $T-XYZ$ 为标准系,需要确定的是 CCD 镜头中心相对于全站仪测量中心的坐标位移(e_x, e_y, e_z)和旋转角($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$),测量坐标系坐标偏移如图 1 所示。

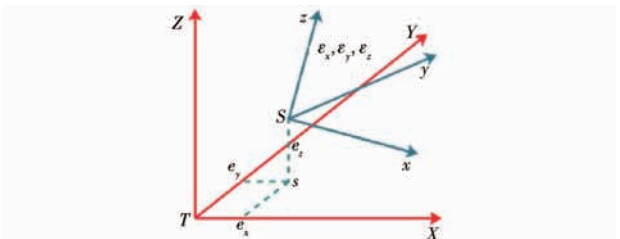


图 1 CCD 超站仪坐标系的坐标偏移量
Fig. 1 Coordinate offsets of CCD super station coordinate system

同时确定全站仪坐标数据(X_i, Y_i, Z_i)和摄影测量解算数据(X'_i, Y'_i, Z'_i)之后,对应坐标之间一定存

在着某种相关的旋转和平移关系,具体表现为

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -Z'_i & Y'_i \\ Z'_i & 0 & -X'_i \\ -Y'_i & X'_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}$$

(1)

利用式(1),配合对应的坐标数据,就能确定出 CCD 镜头中心相对于全站仪中心的坐标位移量(e_x, e_y, e_z)和姿态旋转量($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$),得出两测量中心的相对位置关系,进而建立起全站仪测量坐标系与摄影测量坐标之间的相对偏移变换关系。

仪器综合检校是在进行测量前完成的,且一经确定,CCD 镜头中心相对于全站仪测量中心的位置关系是不变的,在进行样地测量时无需再检校。

2.2 三维坐标解算原理

CCD 超站仪像对观测就是将仪器分别安置在同一坐标系的 2 个已知相对坐标点(可假定或利用 GPS/RTK 确定)上,并对待测目标物分别进行拍摄,获取待测目标物的立体像对。通过 CCD 超站仪记

$$R = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa & -\sin\varphi\cos\omega \\ \cos\omega\sin\kappa & \cos\omega\cos\kappa & -\sin\omega \\ \sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\sin\kappa & -\sin\varphi\sin\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa & \cos\varphi\cos\omega \end{bmatrix}$$

(3)

为了计算简便,这里做如下定义,令

$$\begin{cases} l_1 = fa_1 + (u - u_0)a_3 \\ l_2 = fb_1 + (u - u_0)b_3 \\ l_3 = fc_1 + (u - u_0)c_3 \\ l_4 = fa_1X_s + fb_1Y_s + fc_1Z_s + (u - u_0)a_3X_s + \\ \quad (u - u_0)a_3b_3Y_s + (u - u_0)fc_3Z_s \\ l_5 = fa_2 + (v - v_0)a_3 \\ l_6 = fb_2 + (v - v_0)b_3 \\ l_7 = fc_2 + (v - v_0)c_3 \\ l_8 = fa_2X_s + fb_2Y_s + fc_2Z_s + (v - v_0)a_3X_s + \\ \quad (v - v_0)a_3b_3Y_s + (v - v_0)fc_3Z_s \end{cases}$$

(4)

式(2)可整理简化为

$$\begin{cases} l_1X + l_2Y + l_3Z - l_4 = 0 \\ l_5X + l_6Y + l_7Z - l_8 = 0 \end{cases}$$

(5)

由于 1 对同名点可以列出如式(5)所示的 4 个方程式,而其中未知数个数只有 3 个,因此,可以采用最小二乘法计算立体像对中同名点的相对三维坐标。

2.3 样木相对位置确定

利用 CCD 超站仪建立固定样地时,由于无需提

录并获取 CCD 镜头拍摄瞬间图像的外方位元素($X_s, Y_s, Z_s, \varphi, \omega, \kappa$),利用相机检校所获得 CCD 镜头的内方位元素(u_0, v_0, f)对像素坐标进行纠正,并根据摄影测量内外方位元素均已知的条件,利用确定的共线方程求得目标同名像点的相对三维坐标。

由于在利用 CCD 超站仪进行水平正直测量时,首先需要严格整平,所以 ω 和 κ 是非常小的,在保证误差范围内可以将 ω 和 κ 看作零。要是利用仪器进行倾斜摄影,主光轴倾斜时, ω 可由仪器准确给出,而此时 κ 仍是很小的值,近似为零。

由共线方程^[20]可得

$$\begin{cases} u - u_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ v - v_0 = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases}$$

(2)

式中, (a_i, b_i, c_i) ($i = 1, 2, 3$) 是由摄影姿态角 (φ, ω, κ) 确定的方向余弦表达式;其旋转矩阵具体表达为

前确定样地边界,所以需要设计一种测量方案实现整个样地的准确定位。本文参照航空摄影测量中的航带测量法模式^[21],设计了一种固定样地测带法进行像对观测,观测模式如图 2 所示,依“S”形观测路线实现对整个样地的测量。

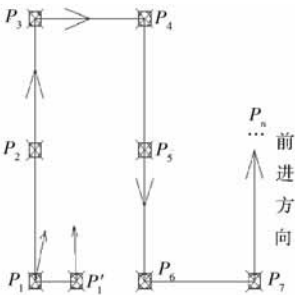


Fig.2 Schematic diagram of observation sample with strip method

已知设站点 P_1 的三维坐标为 (X_1, Y_1, Z_1), 对应的像对观测点 P'_1 坐标为 (X'_1, Y'_1, Z'_1), 分别在 P_1 和 P'_1 点安置仪器, 记录参数并进行交向摄影, 获取待测林木的立体像对。仪器在设站点 P_1 时, 还需往样地深处支出设站点 P_2 以及 P'_2 , 到样地边缘后依“S”型路线折返观测, 以此类推, 直至完成整个测带

的观测。

内业利用 CCD 超站仪配套软件解算出每个像对观测站内样木的三维坐标后,由于不同测带测量时解算的相对坐标系是不同的,这就需要已将解算出的每个像对观测站内样木的三维坐标转换到同一坐标系中,一般选定起始观测像对的坐标系为标准系。

也可以根据固定样地建立要求和解算出的林木相对位置关系来剔除某些数据,建立符合要求的样地类型。而我国标准地建立的形状一般为正方形或矩形,或者根据地形变换和实际情况选定为多边形^[22]。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_{\varphi} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\varphi & \sin\Delta\varphi & 0 \\ -\sin\Delta\varphi & \sin\Delta\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, (X', Y', Z') 为转换之前的三维坐标, $\Delta\varphi$ 表示摄影方向与标准系反方向的水平角旋转差值。解算坐标经转换到同一坐标系后,样地内林木之间的相对位置关系即可确定。

2.4 样木胸径解算

通过观测获取到样木的立体像对后,利用 CCD 超站仪配套软件对其进行处理,分别在形成立体像对的 2 幅图像上确定同一样木,分别点取 2 幅图像中的树根位置同名点,此时软件会自动默认假定该树根点的高度 $Z_0 = 0$;然后自动在此基础上分别根据 $(Z_0 + 1.3\text{ m})$ 确定 2 幅图像中的样木胸径位置;分别点取 2 幅图像中胸径左右沿的同名点,获取对应的像点坐标 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) ,利用 2.1 节中三维坐标解算原理,解算出像点对应的相对三维坐标值 (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) 。

胸径位置左右两端点的相对三维坐标确定后,利用两点距离公式,就能自动解算出样地内目标样木的胸径

$$d_{1.3} = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \quad (7)$$

式中 $d_{1.3}$ ——胸径

2.5 样地精确建立

利用该方案建立的森林固定样地属于无边界多边形样地,可以以观测到的所有林木作为固定样地,

利用该方案进行样地观测时,样地内的样木基本都可测量到,但由于 CCD 镜头摄影视场角限制和林木的遮挡问题,不可避免地存在缺测漏测的情况。为了更好、更快捷、更准确地建立森林固定样地,无需加密设站点再次观测,只需根据缺测漏测的情况,人工测量并记录其树种、胸径、相对某一特征木的方位角与水平距离,从而可完善观测方案的测量缺陷。

一般情况下,森林固定样地只需要确定样地内样木之间的相对位置关系即可,但在由多个小样地构成的森林大样地建立时,就需要将各个连续小样地内的坐标系转换到森林大样地坐标系中,建立起整个森林大样地内样木准确的相对位置关系。

3 结果与分析

为了检验利用 CCD 超站仪进行固定样地建立和胸径精测的可行性,选择在北京市香山进行了相关测试分析。

3.1 样木相对位置表示

因为样地通视条件较好,实验中在解算样木中心点坐标时点取的同名点均为样木树根位置的点坐标,这样能更准确地表示出样地中样木之间的相对位置关系。

本实验根据实地条件,选取了 4 个连续像对观测点的观测方案,假定设站点 P_1 为观测起点,其坐标设为 $(100.005, 100.000, 49.893)$,仪器设站点分别为 $P_1、P'_1、P_2、P'_2、P_3、P'_3、P_4、P'_4$,在每个设站点上建立样地的像对观测,获取待测样木的立体像对,而对应的设站点外业记录信息如表 1 所示。

表 1 CCD 超站仪样地观测外业记录信息							
Tab.1 Field record information of sample observation with CCD super station instrument							
设站点号	仪器高/ m	倾角/ (°)	方位角/ (°)	坐标			图像编号
				X/m	Y/m	Z/m	
P_1	1.565	5	280	100.005	100.000	49.893	P_1 (左)
P'_1	1.569	5	280	105.125	100.000	50.000	P'_1 (右)
P_2	1.525	5	275	105.627	91.476	50.192	P_2 (右)
P'_2	1.515	5	275	102.390	91.305	50.106	P'_2 (左)
P_3	1.505	0	90	108.432	86.090	50.264	P_3 (左)
P'_3	1.485	0	90	112.212	85.974	50.396	P'_3 (右)
P_4	1.501	0	90	107.867	93.551	50.241	P_4 (左)
P'_4	1.533	0	90	111.765	93.107	50.410	P'_4 (右)

根据外业记录的设站点摄影瞬间的位置和姿态信息,利用编写的 CCD 超站仪配套软件,分别导入样地样木成立体像对的 2 幅图像,进行同名点提取,经处理、解算,确定样地样木的相对三维坐标值。

对每个设站点像对观测解算出的三维坐标经旋转变换,统一到以设站点 1 为标准系的坐标系统中。然后借助编写的多边形样地自动生成软件,将转换后的样地样木坐标值导入,自动生成如图 3 所示的森林固定样地样木相对位置关系图(样地边长单位:m),这样,就完成了固定样地建立后样木之间相对位置关系的确定。

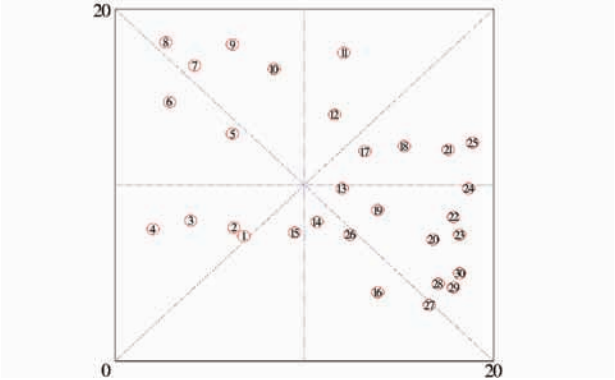


图 3 样地样木相对位置关系示意图

Fig.3 Sketch map of relative position of sample plot

3.2 胸径解算精度对比

同样利用前述的样地测带法,通过像对观测,解算出样木 1.3 m 处胸径位置两沿的相对三维坐标,利用距离公式,求得样木的胸径值。为了验证其解算精度,分别用胸径尺测量了对应样木的胸径值,并将胸径尺测量值作为标准值,对比结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,与胸径尺测量的标准值相比,胸径解算的最大误差为 2 cm,最小误差为 0 cm;最大相对误差为 14.5%,最小相对误差为 0,平均相对误差为 3.9%;经计算,本实验中,胸径解算的均方根误差为 1.2 cm。针对我国森林资源连清调查的要求,胸径大于或等于 20 cm 的树木,其测量精度要求为 1.5%,虽说测量数据与胸径尺实测值略有差距,但能够满足普通林业调查中胸径测量的需要。

3.3 实验结果分析

(1)测带法像对观测方法,即利用 CCD 超站仪像对摄影测量模式进行测量,充分利用了摄影测量快捷、准确的优势,通过测带法观测能够覆盖到整个样地范围,最终还能生成样地内样木的位置关系示意图,进而可根据需要确定样地的形式。

(2)针对样木胸径解算问题,实验中将解算数据与胸径尺测量值作比较,结果表明,解算数据平均相对误差为 3.9%,胸径中误差为 1.2 cm。对比于

表 2 胸径解算精度误差分析表
Tab.2 Error analysis of calculating accuracy of DBH

树号	树种	胸径解算值 d_i/cm	胸径标准值 d_0/cm	绝对误差/cm	相对误差/%
1	榆树	24.0	24.8	-0.8	3.2
2	榆树	25.2	26.1	-0.9	3.4
3	榆树	20.8	21.6	-0.8	3.7
4	榆树	36.5	37.9	-1.4	3.7
5	榆树	20.9	21.3	-0.4	1.9
6	榆树	34.1	36.1	-2.0	5.5
7	榆树	20.2	21.9	-1.7	7.8
8	榆树	30.7	32.3	-1.6	5.0
9	榆树	21.1	21.1	0.0	0.0
10	榆树	27.2	28.7	-1.5	5.2
10	榆树	23.6	24.5	-0.9	3.7
11	麻栎	21.1	21.5	-0.4	1.9
12	榆树	21.9	21.3	0.6	2.8
13	黄栌	20.9	22.4	-1.5	6.7
14	榆树	24.3	25.4	-1.1	4.3
15	榆树	23.7	25.0	-1.3	5.2
16	榆树	23.2	23.1	0.1	0.4
17	榆树	30.3	32.0	-1.7	5.3
18	榆树	27.2	27.4	-0.2	0.7
19	麻栎	21.1	22.6	-1.5	6.6
20	榆树	21.4	20.9	0.5	2.4
21	榆树	33.4	31.4	2.0	6.4
22	榆树	10.6	12.4	-1.8	14.5
23	榆树	32.7	32.6	0.1	0.3
24	榆树	25.4	24.5	0.9	3.7
25	榆树	25.7	24.9	0.8	3.2
26	榆树	24.2	24.5	-0.3	1.2
27	榆树	25.9	27.6	-1.7	6.2
28	榆树	30.3	30.9	-0.6	1.9
29	黄栌	17.1	17.8	-0.7	3.9
30	榆树	19.3	19.6	-0.3	1.5

我国森林资源连清调查的要求,该方法解算的数据虽然与胸径尺实测数据略有差距,但能够满足普通胸径测量的需要。进一步分析胸径解算问题,首先,该方案外业测量时,对通视条件要求较高,要求必须能够看到样木的树根位置,否则,需要人为确定出待测样木的胸高 1.3 m 位置处;其次,对于生长特别不规则的样木,需要从多个角度对其进行摄影、解算,以便能够更准确地求出样木的胸径值。

(3)研究中还存在很多的不足和需要改进的地方,比如说仪器整体比较笨重,这与林业调查的便携需求不符,因此该仪器适合于样地建立的精准定位测量,并不适合于林业测量的连年普测;由于摄影测量中视场角的限制,还没有解决样地内树高的自动提取和解算问题。这些不足之处有待进一步研究和改进。

4 结束语

提出了一种利用 CCD 超站仪按测带法进行森林固定样地建立和精测的方法与模式,这也是在林业调查方面的大胆尝试。通过借助全站仪的三维坐标测量功能和角度测量功能,准确记录 CCD 镜头摄影瞬间的外方位元素值,然后利用 CCD 镜头像对测量模式,解算求得样地内样木的相对三维坐标;通过不同摄影坐标系的转换,将不同设站点的解算坐标转换到同一标准坐标系中,实现样地内样木之间相

对位置关系的确定;根据解算出的胸径位置两端点的相对三维坐标,利用距离公式,求得样地内样木的胸径值。

经验证,该方法可较好地应用于森林固定样地建立和样木胸径精测工作,其胸径解算中误差为 1.2 cm。该方法也有着些许不足,在样地建立和精测方面也有一定的缺点,但总体而言,利用 CCD 超站仪进行森林固定样地建立和精测不失为是一种崭新的林业精测模式,它为更深层次和更广领域的林业调查领域提供了一种很好的参考和借鉴。

参 考 文 献

1 孟宪宇. 测树学[M]. 3 版. 北京:中国林业出版社, 2006: 59-61.

2 吕康梅,张一鸣,于涛. 北京市森林资源固定样地调查体系研究[J]. 林业资源管理,2009(2): 43-48.
LU Kangmei, ZHANG Yiming, YU Tao. Study on Beijing forest fixed sample plot investigation system[J]. Forest Resources Management,2009(2): 43-48. (in Chinese)

3 BECHTOLD W A, PATTERSON P L. The enhanced forest inventory and analysis program-national sampling design and estimation Procedures[R]. USDA General Technical Report SRS-80, 2005.

4 冯仲科,殷嘉俭,贾建华,等. 数字近景摄影测量用于森林固定样地测树的研究[J]. 北京林业大学学报,2001,23(9):15-18.
FENG Zhongke, YIN Jiajian, JIA Jianhua, et al. Forest measurement in fixed sample plot by digital close-range photogrammetric survey [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(9): 15-18. (in Chinese)

5 GILLIS M D, OMULE A Y, BRIERLEY T. Monitoring canada's forests: the national forest inventory[J]. Forestry Chronicle, 2005, 81(2):214-221.

6 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.

7 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)

8 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(增刊2): 142-148.
LIANG Changxiu, FENG Zhongke, YAO Shan, 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): 142-148. (in Chinese)

9 王秀美,曾卓乔. 数字摄影测量技术在森林调查中的应用研究[J]. 林业资源管理,2001(1): 31-35.
WANG Xiumei, ZENG Zhuoqiao. Application of digital photogrammetry technology in forest survey [J]. Forest Resources Management, 2001(1): 31-35. (in Chinese)

10 唐雪海,王田磊,袁进军,等. 数字近景摄影测量辅助三维激光扫描用于森林固定样地测树原理探讨[J]. 安徽农业科学, 2010(12): 6095-6097.
TANG Xuehai, WANG Tianlei, YUAN Jinjun, et al. Discussion on the principles of forest measurement in fixed sample plot with 3D laser scanning aided with digital close-range photogrammetry[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010(12): 6095-6097. (in Chinese)

11 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]. 农业机械学报,2015,46(5): 293-299.
FAN Zhongmou, FENG Zhongke, LI Yadong, et al. Investigation method of forestry plot based on binocular stereo camera [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 293-299. (in Chinese)

12 黄晓东,冯仲科. 基于数码相机的样木胸径获取方法[J]. 农业机械学报,2015,46(9): 266-272.
HUANG Xiaodong, FENG Zhongke. Study on obtaining sampling Tree's DBH in the plot based on plain ordinary digital cameral[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 266-272. (in Chinese)

13 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.
FENG Zhongke, HUANG Xiaodong, LIU Fang. Forest survey equipment and development of information technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 257-265. (in Chinese)

14 张祖勋. 论摄影测量与工程测量的结合——摄影全站仪+数码摄影机[J]. 地理空间信息,2004,2(6): 1-4.
ZHANG Zuxun. Information of photogrammetry and engineering surveying photo total station and digital camera[J]. Geospatial Information, 2004, 2(6): 1-4. (in Chinese)

15 张祖勋,詹总谦,郑顺义,等. 摄影全站仪系统——数字摄影测量与全站仪的集成[J]. 测绘通报,2005(11): 4-8.
ZHANG Zuxun, ZHAN Zongqian, ZHENG Shunyi, et al. Photo total station system—the integration of digital photogrammetry and total station [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005(11): 4-8. (in Chinese)

CIGR Workshop on Image Analysis in Agriculture, 2010; 108 – 115.

10 KLOSE R, PENLINGTON J, RUCKELSHAUSEN A. Usability study of 3D time-of-flight cameras for automatic plant phenotyping [J]. Bornimer Agrartechnische Berichte, 2009, 69; 93 – 105.

11 BISHOP T E, FAVARO P. The light field camera; extended depth of field, aliasing, and super resolution [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(5); 972 – 986.

12 OMASA K, HOSOI F, KONISHI A. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(4); 881 – 898.

13 HOSOI F, OMASA K. Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(2); 151 – 158.

14 LICHTI D D. Error modelling, calibration and analysis of an AM – CW terrestrial laser scanner system[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 61(5); 307 – 324.

15 张新, 赵燕东, 郑力嘉, 等. 基于三维机器视觉的植物叶片萎蔫预测模型[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9); 260 – 267. ZHANG Xin, ZHAO Yandong, ZHENG Lijia, et al. Prediction model of plant leaf wilting using 3-D machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9); 260 – 267. (in Chinese)

16 董士伟, 李宪海, 李红, 等. 基于多尺度分形特征的 ETM + 影像耕地提取[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2); 213 – 218. DONG Shiwei, LI Xianhai, LI Hong, et al. Extraction of cultivated land using ETM + image based on multiscale fractal signature [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2); 213 – 218. (in Chinese)

17 郭建明. 分形理论在遥感影像空间尺度转换中的应用研究[D]. 西安: 西北大学, 2008. GUO Jianming. An analysis on scale transformation in remote sensing-Based on fractal theory[D]. Xi'an: Northwest University, 2008. (in Chinese)

18 SERGEYEV Y D. Using blinking fractals for mathematical modeling of processes of growth in biological systems[J]. Informatica, 2011, 22(4); 559 – 576.

19 赵燕东, 刘贺, 刘卫平. 基于叶片分形维数的植物亏水胁迫萎蔫体态测量方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9); 191 – 195. ZHAO Yandong, LIU He, LIU Weiping. Measurement of plant leaf physical configuration under water deficit stress using fractal dimension[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9); 191 – 195. (in Chinese)

20 张红梅, 吴炳方, 闫娜娜. 饱和水汽压差的卫星遥感研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5); 559 – 568. ZHANG Hongmei, WU Bingfang, YAN Nana. Remote sensing estimates of vapor pressure deficit: An overview[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(5); 559 – 568. (in Chinese)

21 WANG X, GUO Y, LI B, et al. Evaluating a three dimensional model of diffuse photosynthetically active radiation in maize canopies[J]. International Journal of Biometeorology, 2006, 50(6); 349 – 357.

(上接第 321 页)

16 靳志光. 图像全站仪系统若干技术问题研究及应用[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2008. JIN Zhiguang. Some technique questions and application about the image total station system [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2008. (in Chinese)

17 SCHARSTEIN D, SZELISKI R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [C] // Proceedings of IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision, 2001; 131 – 140.

18 陈念, 李进, 王海晖. 双目立体视觉测量系统的研究与实现[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(5); 101 – 104. CHEN Nian, LI Jin, WANG Haihui. Research and implementation of measurement system based on binocular stereo vision [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(5); 101 – 104. (in Chinese)

19 张丽娟, 杨进华, 姜雨彤, 等. 基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9); 091002 – 1 – 091002 – 8. ZHANG Lijuan, YANG Jinhua, JIANG Yutong, et al. Research on target image matching algorithm for binocular CCD ranging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9); 091002 – 1 – 091002 – 8. (in Chinese)

20 冯文灏. 近景摄影测量——物体外形与运动状态的摄影法测定[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002; 11 – 14.

21 袁修孝, 明洋. POS 辅助航带间航摄影像的自动转点[J]. 测绘学报. 2010, 39(2); 156 – 161. YUAN Xiuxiao, MING Yang. POS-supported matching method for aerial images between neighboring strips[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(2); 156 – 161. (in Chinese)

22 雷相东, 洪玲霞, 陆元昌, 等. 国家级森林资源清查地面样地设计[J]. 世界林业研究, 2008, 21(4); 35 – 40. LEI Xiangdong, HONG Lingxia, LU Yuanchang, et al. A review on ground plot design for national forest inventory in the world[J]. World Forestry Research, 2008, 21(4); 35 – 40. (in Chinese)