doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.039

基于数码相机的样木胸径获取方法*

黄晓东　冯仲科
(北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 胸径测量是评价立地质量和林木生长状况的重要依据之一。利用普通数码相机对待测样地进行上下方向的任意摄影,并在林地中测量任意一段物体长度以便在解算中反推摄影基线,恢复摄影区域的真实空间比例关系,实现在图像上测量样地样木胸径和树心坐标的位置。该研究以摄影测量的理论为基础,以同名光线和摄影基线共面为条件,针对林业摄影测量的局限性,建立以垂直地面方向为主方向的摄影测量方式,实验分析验证测量算法的有效性,以 Microsoft Visual Studio 为开发平台,编制地面立体摄影测量系统软件,对 5 组样地 25 株立木进行测量计算,实验表明,采用普通数码相机测量样木胸径的精度高,25 棵样木的平均绝对误差为 0.29 cm,平均相对误差为 1.99%,符合国家森林资源连续清查中关于胸径测量的精度要求,该方法在森林资源调查中具有实际的应用前景。

关键词: 样木胸径　摄影测量　树心坐标　数码相机
中图分类号: S758　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)09-0266-07

Obtainment of Sample Tree's DBH Based on Digital Camera

Huang Xiaodong　Feng Zhongke
(*Precision Forestry Key Laboratory of Beijing*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The measurement of tree diameter at breast height (DBH) is an important parameter for evaluating site quality and tree growth status. An ordinary digital camera was used to randomly shoot plot that was measured in an up and down direction. And the length of object should be measured so as to reversely deduct the position of photographic baseline and recovery the true spatial scale of photography area, achieving the aim for measuring the DBH of sample trees in the plot and the coordinate of the tree's center. This research was based on theory of photogrammetry and carried out with the coplane of rays from same point and photographic as the conditions. Aiming at the limitation of photogrammetry, this research established the photogrammetry mode mainly in a vertical ground direction. The validity of the proposed algorithm was analyzed and verified in the experiment. Software of ground stereo photogrammetry system was developed, taking Microsoft Visual Studio as development platform. Twenty-five standing trees in five plots were measured and calculated. Experiment results demonstrated that the precision of DBH measurement using ordinary digital camera was high, and the experimental data were in good agreement with the actual, with the average absolute error of 0.29 cm, and the average relative error of 1.99%, which were in line with the tree diameter at breast height measurement accuracy of national forest resource continuous investigation. With the constant increase of field working cost, people will pay more attention on the utilization of portable instruments in measurement. Therefore, the method has practical application prospect in forest resource survey.

Key words: Diameter at breast height of sample trees　Photogrammetry　Coordinate of tree's center　Digital camera

收稿日期: 2015-05-31　修回日期: 2015-07-01
*国家自然科学基金面上资助项目(41371001)和"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAH34B01)
作者简介: 黄晓东,博士生,主要从事林业装备与信息化、摄影测量研究,E-mail: huangxiaodong0615@126.com
通讯作者: 冯仲科,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

距根颈 1.3 m 处的树木直径称为胸径，在森林资源连续清查中，立木的胸径是一个重要的测树因子，胸径的测量是评价立地质量与林木生长状况的重要依据[1]。现今，在森林资源连续清查中主要测量方式是用轮尺、直径卷尺、钩尺等仪器进行接触式的人工测量[2]，由于林地具有地形复杂等外界因素，人工进行胸径测量时不仅费时费力，而且还具有一定的危险性，甚至有些不可到达或者难以测量的地区只能进行人工估测，这种接触式的测量方式获取数据的周期时间长、时效性差、占用大量劳动力，不能适应精准林业和林业信息化发展的要求。

为克服不可到达等外界因素的影响，非接触式的胸径测量方式越来越受到重视[3-8]。但这些方式都是针对单株立木进行测量，在实际外业调查中并不能提高工作效率，相反会增加外业的负荷。本文在数码相机应用广泛的基础上[9-11]，提出一种利用数码相机实现样地样木胸径非接触式测量的方法，首先使用已经检校的数码相机对待测样地进行上下方向的任意摄影，并实际测量 2 幅图像重叠区域内任意一处的长度，利用同名光线和摄影基线共面的条件恢复测量样地的相对空间位置关系，然后通过实际测量任意一处长度的真值恢复待测样地的真实大小关系，这样可以测量出样地内所有样木的胸径、图像内可视样木任意处的直径以及样地样木的相对空间坐标。

1　研究原理

摄影测量技术经历了从模拟摄影测量、解析摄影测量到数字摄影测量 3 个发展阶段[12]，已形成了规范的规则流程。但由于树木直径的特殊性，按照规范的摄影测量方式并不能简单且准确地实现立木胸径的测量，若要准确测量需使相机进行旋转拍摄，并进行空间三维坐标之间的相互转换，基于相机操作、摄影习惯和解析过程 3 方面，本文建立了针对树木直径测量的上下拍摄的摄影测量方式，该方法是针对林业摄影测量而建立的，并且可以应用于所有柱形物体的测量。

1.1　相机检校

由于数码相机并不是专业的测量仪器，通过相机拍摄所获取的图像都存在光学畸变的影响，因此在进行实验前需要对普通数码相机进行相机检校。本文采用的检校方式为 DLT 线性变换检校方法，光学畸变改正数 Δx 和 Δy 以及内方位元素 (x_0, y_0, f) 的计算公式为

$$\begin{cases} \Delta x = (x-x_0)(k_1r^2+k_2r^4) + p_1[r^2+2(x-x_0)^2] + \\ \quad 2p_2(x-x_0)(y-y_0) + \alpha(x-x_0) + \beta(y-y_0) \\ \Delta y = (y-y_0)(k_1r^2+k_2r^4) + p_2[r^2+2(y-y_0)^2] + \\ \quad 2p_1(x-x_0)(y-y_0) \end{cases} \tag{1}$$

其中　$r = \sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}$

式中　(x_0, y_0)——图像的像主点坐标

α——非正方形比例系数

β——非正交性畸变系数

k_1、k_2——径向畸变系数

p_1、p_2——偏心畸变系数

通过获取图像上的像素点坐标值 (u, v) 以及 R、G、B 值后恢复摄影光束，利用 DLT 线性变换算法、畸变改正式(1)以及误差方程式，通过最小二乘法进行迭代运算，以焦距 f 的相邻两次运算的差值小于 0.01 mm 作为迭代终止条件[13-15]进行求解。相机检校之后对图像内所有的像素点进行畸变纠正，保证每次测量时所有的像素点坐标值不受光学畸变的影响。

1.2　立体像对的前方交会

从空间 2 个不同的位置对同一目标物体进行拍照所获得的 2 幅图像称之为立体像对，由立体像对上下 2 图像的内方位元素、外方位元素和同名像点的图像坐标的测量值来确定该点的物方空间坐标，称为立体像对的空间前方交会。假设已知所有拍摄图像的 3 个内方位元素 (x_0, y_0, f) 和 6 个外方位元素 $(X_S, Y_S, Z_S, \omega, \varphi, \kappa)$，通过像素坐标 (u, v) 就可以计算空间点的物方空间坐标。

上下 2 次拍摄点的位置假设为 S_1 和 S_2，空间点 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 在 S_1 点获得图像所对应的像点坐标 a_1 为 $(x_1, y_1, -f_1)$，在 S_2 点获得图像所对应的像点坐标 a_2 为 $(x_2, y_2, -f_2)$，对应转换成像素坐标即为 (u_1, v_1) 和 (u_2, v_2)。按照同名光线示意图，如图 1 所示，可得到公式

$$\begin{cases} \dfrac{S_1A}{S_1a_1} = \dfrac{X_A-X_{S_1}}{X_1} = \dfrac{Y_A-Y_{S_1}}{Y_1} = \dfrac{Z_A-Z_{S_1}}{Z_1} = N_1 \\ \dfrac{S_2A}{S_2a_2} = \dfrac{X_A-X_{S_2}}{X_2} = \dfrac{Y_A-Y_{S_2}}{Y_2} = \dfrac{Z_A-Z_{S_2}}{Z_2} = N_2 \end{cases} \tag{2}$$

其中　$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f_1 \end{bmatrix}$　$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f_2 \end{bmatrix}$

式中　$\boldsymbol{R}_1$、$\boldsymbol{R}_2$——像空间辅助坐标系的旋转矩阵

假设 S_1 所在的像空间坐标系等价于像空间辅

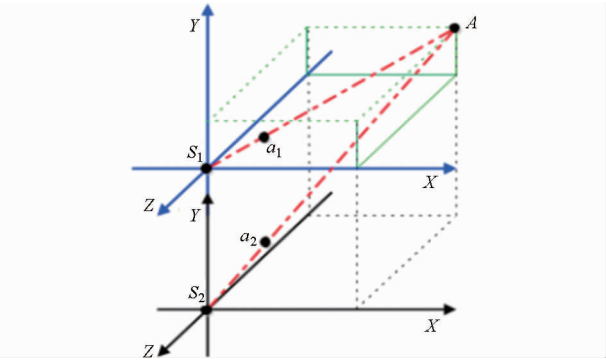

图 1 同名光线示意图

Fig. 1 Rays from same point

助坐标系,此时 $\boldsymbol{R}_1=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{R}_2$ 即为相对 $\boldsymbol{R}_1$ 所在像空间辅助坐标系(即像空间坐标系)的旋转矩阵。通过摄影基线(图 2)在以 S_1 建立的像空间辅助坐标系中展开。

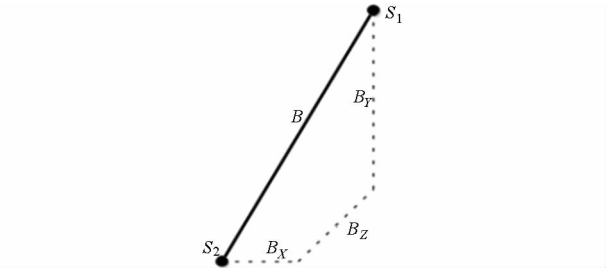

图 2 摄影基线

Fig. 2 Photography baseline

可得到公式

$$\begin{cases}B_X=X_{S_1}-X_{S_2}\\B_Y=Y_{S_1}-Y_{S_2}\\B_Z=Z_{S_1}-Z_{S_2}\end{cases}\tag{3}$$

根据式(2)和式(3)可得 3 组投影系数 N_1 和 N_2,即

$$\begin{cases}N_1=\dfrac{B_XY_2-B_YX_2}{X_1Y_2-X_2Y_1}\\N_2=\dfrac{B_XY_1-B_YX_1}{X_1Y_2-X_2Y_1}\end{cases}\tag{4}$$

$$\begin{cases}N_1=\dfrac{B_XZ_2-B_ZX_2}{X_1Z_2-X_2Z_1}\\N_2=\dfrac{B_XZ_1-B_ZX_1}{X_1Z_2-X_2Z_1}\end{cases}\tag{5}$$

$$\begin{cases}N_1=\dfrac{B_ZY_2-B_YZ_2}{Z_1Y_2-Z_2Y_1}\\N_2=\dfrac{B_ZY_1-B_YZ_1}{Z_1Y_2-Z_2Y_1}\end{cases}\tag{6}$$

将式(4)~(6)代回式(2)和式(3)中,得到相对于摄影点 S_1 的空间坐标(X,Y,Z),即

$$\begin{cases}X=N_1X_1+X_{S_1}=N_2X_2+X_{S_1}+B_X\\Y=N_1Y_1+Y_{S_1}=N_2Y_2+Y_{S_1}+B_Y\\Z=N_1Z_1+Z_{S_1}=N_2Z_2+Z_{S_1}+B_Z\end{cases}\tag{7}$$

为确定式(4)~(6)中的 N_1 和 N_2,采用正直摄影测量方式对系数进行验证,实验图像(图 3、4)的 B_Y 取值 28.3 cm。对式(4)~(6)中的系数分别进行计算,得出相应数据参见表 1。



图 3 下部照片

Fig. 3 The below photo



图 4 上部照片

Fig. 4 The above photo

由表 1 可知,式(5)结果全为零,是因为主基线方向为 Y 轴,基线在 X、Z 轴上的分量趋近于无穷小,说明不可采用式(5)作为求解系数。式(4)求得系数 N_1 和 N_2 对应的点坐标与真实值之间不存在关系,是因为在景深方向上未增加控制信息,进而产生错误数据,也说明式(4)不能用于求解空间点。式(6)所求得的 Y 和 Z 值与真值极为接近,误差来源是 S_1 不能完全与假设的像空间辅助坐标系重合,但这不影响 N_1 和 N_2 的确定,故式(6)是求解的最优系数。由 N_1 和 N_2 解算的 X 值存在差异,从图 5 可知,真实值介于 N_1 和 N_2 系数求解值之间,为提高值的准确性和稳定性,将式(7)化简得到上下摄影时的前方交会公式为

$$\begin{cases}X=(N_1X_1+N_2X_2+B_X)/2+X_{S_1}\\Y=N_1Y_1+Y_{S_1}\\Z=N_1Z_1+Z_{S_1}\end{cases}\tag{8}$$

1.3 摄影基线的确定

在任意拍摄上下 2 幅图像时,要准确记录 2 次拍摄之间的基线,会对外业的摄影操作增加难度。为降低外业的难度,考虑通过物方的空间点坐标来反推基线长。对固定基线长 28.3 cm 的一组图像改变其基线初始值,通过计算得到相应的坐标数据(表 2),从图 6 上可看出每组点都是呈空间线性分布。判断基线长和点坐标之间存在着线性变化。假

表 1　基线 28.3 cm 时 3 组系数求解得到的空间坐标

Tab. 1　Space coordinates calculated by three different coefficients with baseline of 28.3 cm　cm

序号	真实值			式(4)						式(5)		式(6)					
				N_1			N_2			N_1	N_2	N_1			N_2		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	$XYZXYZ$		X	Y	Z	X	Y	Z
1	0	−58	−350	0.43	3.02	18.16	0.43	3.02	−102.55	000000		−8.41	−58.44	−351.82	1.45	−58.44	−351.82
2	0	−58	−300	0.44	3.82	19.54	0.44	3.82	−84.56	000000		−6.87	−59.08	−301.86	1.58	−59.08	−301.86
3	−50	−58	−305	−37.11	−38.89	−194.07	−37.11	−38.89	−229.60	000000		−58.67	−61.48	−306.78	−49.59	−61.48	−306.78
4	−50	−58	−355	−36.34	−36.86	−216.93	−36.34	−36.86	−261.36	000000		−59.71	−60.58	−356.46	−49.56	−60.58	−356.46
5	−53	82	−395	−106.53	133.99	−651.30	−106.53	133.99	−789.97	000000		−64.35	80.94	−393.40	−53.05	80.94	−393.40
6	50	−58	−300	87.49	−115.65	−610.73	87.49	−115.65	−506.58	000000		42.76	−56.53	−298.52	51.55	−56.53	−298.52
7	−77	−2	−185	−75.70	−2.94	−167.62	−75.70	−2.94	−181.89	000000		−82.88	−3.22	−183.51	−76.38	−3.22	−183.51
8	−130	70	−300	−157.13	79.81	−340.75	−157.13	79.81	−368.27	000000		−138.32	70.26	−299.96	−127.98	70.26	−299.96
9	49	−2	−235	49.73	−2.24	−276.79	49.73	−2.24	−237.65	000000		42.22	−1.91	−235.02	49.18	−1.91	−235.02

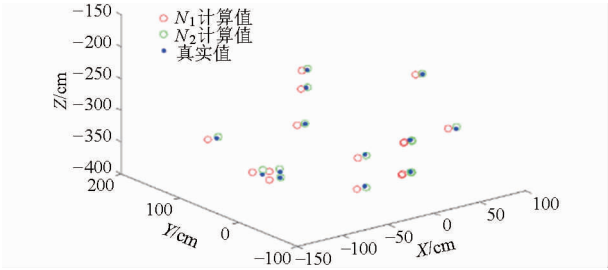

图 5　N_1和 N_2计算值与真实值空间位置对比图

Fig. 5　Real value and calculated value of N_1 and N_2

设基线的真实值 B 与初始值 B_0 之间的比值为 λ，则各基线分量的真值与初始值的关系为

$$\begin{cases} B_X = \lambda B_{X_0} \\ B_Y = \lambda B_{Y_0} \\ B_Z = \lambda B_{Z_0} \end{cases} \tag{9}$$

将其代入式(6)和式(8)之中得

$$\begin{cases} X = \lambda (N_1 X_1 + N_2 X_2 + B_{X_0})/2 + X_{S_1} \\ Y = \lambda N_1 Y_1 + Y_{S_1} \\ Z = \lambda N_1 Z_1 + Z_{S_1} \end{cases} \tag{10}$$

式(10)中所有的基线分量均为 B_{X_0}、B_{Y_0}、B_{Z_0}。

但整个摄影体系是以 S_1 建立的像空间辅助坐标系，任意一点的绝对空间坐标(X,Y,Z)和 S_1 的绝对空间坐标(X_{S_1},Y_{S_1},Z_{S_1})是未知的。引入一个新点的坐标，消除 S_1 摄影点坐标得到

$$\begin{cases} \Delta X = \lambda (N_{1A} X_{1A} + N_{2A} X_{2A})/2 - \\ \qquad (N_{1B} X_{1B} - N_{2B} X_{2B})/2 \\ \Delta Y = \lambda (N_{1A} Y_{1A} - N_{1B} Y_{1B}) \\ \Delta Z = \lambda (N_{1A} Z_{1A} - N_{1B} Z_{1B}) \end{cases} \tag{11}$$

利用距离公式，求得真实值与测量值关系，即

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} = \lambda D_0 \tag{12}$$

假设已知实际测量的任意一处的长度真实值，通过真实值可反推计算求解出 λ，进而求出真实的基线长度 B 及其空间上各个分量值，以恢复空间真实关系。

1.4　空间坐标及胸径的解算

通过解算可获得切点 A 和 C 在以摄影点 S_1 为

表 2　不同的基线初始值对空间点的坐标影响

Tab. 2　Effect of different initial baselines on space coordinates　cm

基线	1 号点			2 号点			3 号点			4 号点			5 号点		
长度	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.05	−2.05	−12.40	−4.51	2.48	−10.58	1.20	−1.93	−14.07	−2.77	0.03	−9.55	1.82	−1.98	−12.34
5	0.26	−10.27	−62.00	−22.57	12.40	−52.88	5.99	−9.64	−70.36	−13.85	0.15	−47.75	9.08	−9.91	−61.69
10	0.52	−20.55	−124.01	−45.15	24.79	−105.76	11.98	−19.29	−140.73	−27.69	0.31	−95.51	18.17	−19.82	−123.38
15	0.79	−30.82	−186.01	−67.72	37.19	−158.65	17.98	−28.93	−211.09	−41.54	0.46	−143.26	27.25	−29.73	−185.07
20	1.05	−41.10	−248.01	−90.30	49.59	−211.53	23.97	−38.58	−281.45	−55.38	0.61	−191.02	36.33	−39.64	−246.76
25	1.31	−51.37	−310.02	−112.87	61.98	−264.41	29.96	−48.22	−351.82	−69.23	0.76	−238.77	45.42	−49.55	−308.45
30	1.57	−61.65	−372.02	−135.45	74.38	−317.29	35.95	−57.87	−422.18	−83.08	0.92	−286.53	54.50	−59.47	−370.14
35	1.84	−71.92	−434.03	−158.02	86.78	−370.17	41.95	−67.51	−492.54	−96.92	1.07	−334.28	63.58	−69.38	−431.83
40	2.10	−82.20	−496.03	−180.59	99.17	−423.06	47.94	−77.16	−562.91	−110.77	1.22	−382.03	72.67	−79.29	−493.52
50	2.62	−102.75	−620.04	−225.74	123.97	−528.82	59.92	−96.45	−703.63	−138.46	1.53	−477.54	90.83	−99.11	−616.90
60	3.15	−123.30	−744.04	−270.89	148.76	−634.58	71.91	−115.73	−844.36	−166.15	1.83	−573.05	109.00	−118.93	−740.28
80	4.20	−164.40	−992.06	−361.19	198.35	−846.11	95.88	−154.31	−1125.82	−221.53	2.44	−764.07	145.33	−158.58	−987.03
28.3	1.48	−58.15	−350.94	−127.77	70.16	−299.31	33.92	−54.59	−398.26	−78.37	0.86	−270.29	51.41	−56.10	−349.16

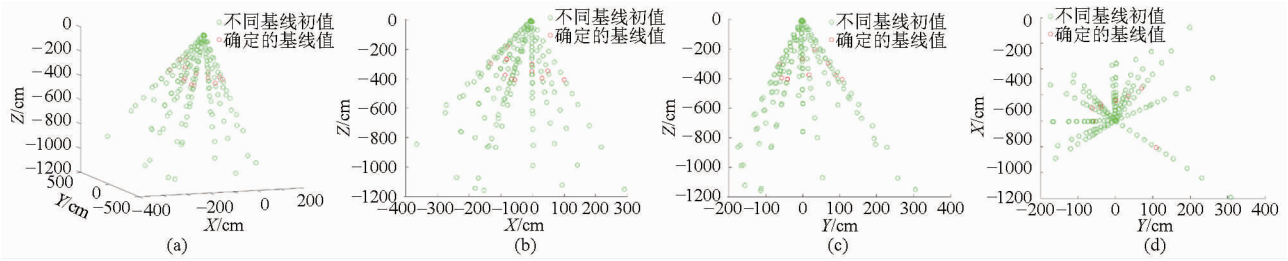

图 6 不同基线下坐标点示意图

Fig. 6 Coordinates under different baselines

(a) 立体图 (b) 俯视图 (c) 左视图 (d) 主视图

坐标原点的空间辅助坐标系中的坐标(X_A,Y_A,Z_A)和(X_C,Y_C,Z_C)。图像中所取的胸径同名点本身并不是严格的胸径处的同名点,而是光线切点处的同名点(图 7)。

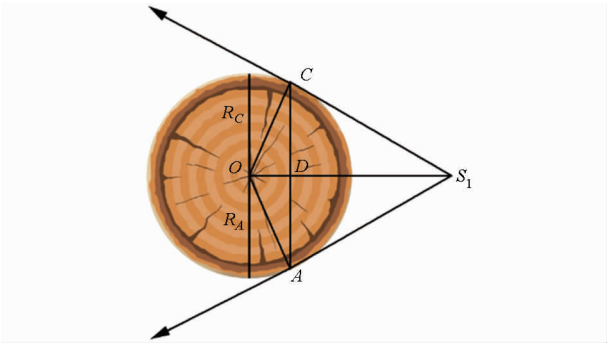

图 7 摄影测量胸径示意图

Fig. 7 Measurement of DBH

由于树木并不是完全等同于圆形,为提高数据的准确性,降低单点坐标误差对胸径测量精度的影响,本文分别对 A 和 C 点进行独立计算,得到胸径 R 的计算公式为

$$\begin{cases} R_A = l_{OA} = l_{S_1A} l_{AD} / \sqrt{l_{S_1A}^2 - l_{AD}^2} \\ R_C = l_{OC} = l_{S_1C} l_{CD} / \sqrt{l_{S_1C}^2 - l_{CD}^2} \\ R = R_A + R_C \end{cases} \tag{13}$$

2 实验验证

2.1 实验准备

实验中采用 FUJIFILM X100S 型数码相机,相机像幅大小为 4 896 像素 ×3 264 像素,APS 画幅大小为 23.6 mm ×15.8 mm,折算像元大小为 4.82 μm × 4.84 μm,利用 1.1 节相机检校中的原理得到数码相机的相机检校结果(表 3)。根据 1 节研究原理,利用 Microsoft Visual Studio 开发设计了地面立体摄影测量系统(图 8)。

2.2 实验过程

实验过程主要分为以下步骤:

(1)首先在待测样地处确定摄影点的合理位置,尽量保证所有待测样木处于无遮挡的情况(遮挡时需要换摄影点再补拍遮挡样木),然后对待测样地进行上下任意摄影(为了最大化的获取有效数据,尽量使相机进行上下平移,使图像重叠区域最大,本实验过程中采用的拍照方式为站立拍摄与下蹲拍摄,以获取较大上下平移量),保证测量的同组照片中都包含有一段已知的空间距离。为了实验方便,在待测样地中放置一根花杆,因此不需在野外作业中再进行测量(图 9)。

(2)在获取实验图像后,根据相机检校结果(表 3),根据式(1)对图像中的像素点进行遍历,纠正光学畸变。

(3)利用同名点进行外方位元素计算,求得相对外方位元素。

(4)恢复摄影基线,根据在假设某一基线情况下解算出来的长度与空间中真实长度的比值关系恢

表 3 相机检校结果

Tab. 3 Calibration results of camera

检校内容说明	符号	相机 1(X)/像素	相机 2(J)/像素
像主点横坐标	x_0	2 458.047 7	2 452.484 8
像主点纵坐标	y_0	1 661.957 7	1 665.090 2
相机焦距	f	4 961.457 7	4 962.283 2
径向畸变系数 1	K_1	$5.457\,578\times10^{-9}$	$5.842\,168\times10^{-9}$
径向畸变系数 2	K_2	$-4.067\,8\times10^{-16}$	$-4.218\,370\times10^{-16}$
偏心畸变系数 1	P_1	$-8.774\,575\times10^{-8}$	$-2.085\,813\times10^{-8}$
偏心畸变系数 2	P_2	$-1.442\,552\times10^{-7}$	$-5.467\,009\times10^{-8}$
非正方形比例系数	α	$4.267\,730\times10^{-5}$	$-8.437\,985\times10^{-5}$
非正交性畸变系数	β	$-8.754\,646\times10^{-6}$	$2.743\,436\times10^{-5}$

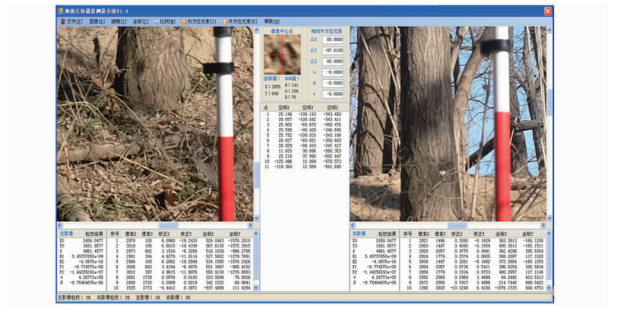

图 8 地面立体摄影测量系统主界面

Fig. 8 Main interface of ground stereo photogrammetry in system

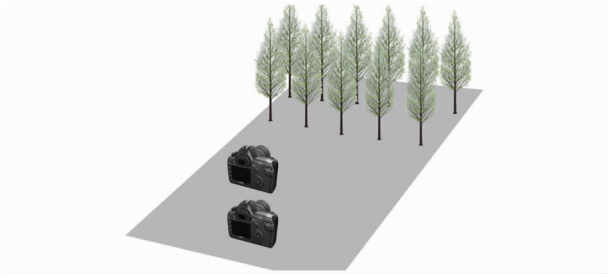

图 9　外业相机拍照示意图

Fig. 9　Diagram taken by field work camera

复摄影时基线的真实情况。

(5)测量待测样地中样木的胸径以及其相对摄影点的相对空间坐标值。

其中步骤(1)为野外作业操作,步骤(2)~(5)在开发的地面立体摄影测量系统软件中实现。

3　实验结果与分析

本实验过程中拍摄了 5 组图像,共计 25 棵立木。同时,在拍摄点处利用人工测量立木胸径的方法,用围尺和游标卡尺等接触式的测量工具进行多次立木胸径的测量,以此来确定验证胸径相对精度的真实值。

实验处理过程中,选取一组摄影基线最小,目标树距离摄影点最远的图像为例(图 10),此条件下解算的数据误差最大,通过开发设计的地面立体摄影测量系统进行解算,解算数据参见表 4,摄影时的基线为 59.65 cm,样木距摄影点的距离区间为 2.95 ~ 15.33 m,测量误差最大值为 0.89 cm,最大相对误差为 -4.77%;该组图像内所有待测样木胸径测量平均绝对误差为 0.38 cm,平均相对误差为 2.27%;经过对所有实验数据进行处理,此次实验 5 组 25 棵样本的平均绝对误差为 0.29 cm,平均相对误差为 1.99%。



图 10　外业获取的实验图像

Fig. 10　Experimental images taken by field work

表 4　图 10 图像计算结果误差分析

Tab. 4　Error analysis on calculating results of Fig. 10

序号	基线长度/cm	A 点/cm			B 点/cm			像长/cm	直径/cm	真实值/cm	相对误差/%
		X	Y	Z	X	Y	Z				
1	59.65	-117.096	83.498	299.511	-129.885	83.824	295.325	13.461	13.464	14.0	3.83
2	59.65	-246.587	138.164	760.993	-263.067	136.913	758.499	16.715	16.715	16.2	-3.18
3	59.65	125.436	125.435	618.772	110.523	125.339	624.578	16.006	16.007	15.4	-3.94
4	59.65	443.609	175.964	988.044	430.991	176.712	994.959	14.408	14.408	13.8	-4.41
5	59.65	-2.671	177.833	1 108.674	-22.367	177.826	1 108.571	19.696	19.697	18.8	-4.77
6	59.65	355.629	226.594	1 532.456	335.629	226.553	1 533.071	20.009	20.007	19.1	-4.76
7	59.65	-10.104	108.759	447.050	-13.083	108.759	447.033	2.979	2.979	3.0	0.70
8	59.65	-10.122	128.329	443.312	-13.171	128.330	443.230	3.048	3.048	3.0	-1.61

通过对 5 组 25 棵样本数据进行分析,本研究的测量误差最小值为 0.007 cm,相对误差可达到 0.06%,满足国家森林资源调查精度要求。对 25 棵样木的摄影基线长度、景深距离以及相对误差进行分析(图 11、12),得到以下结论:

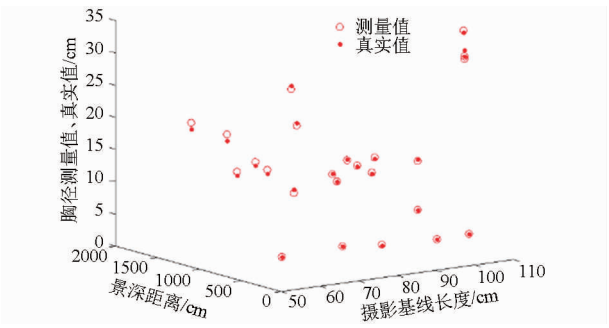

图 11　摄影基线长度、景深距离与胸径值关系

Fig. 11　Relationship among baseline, focus depth and DBH

(1)在同组照片中,摄影的基线即为固定值,胸径的精度跟空间坐标的 Z 坐标(景深方向)呈正相关分布,待测树木距离摄影点越远,测量精度越低,相对误差越大。在所测的 5 组样本数据中,最大相

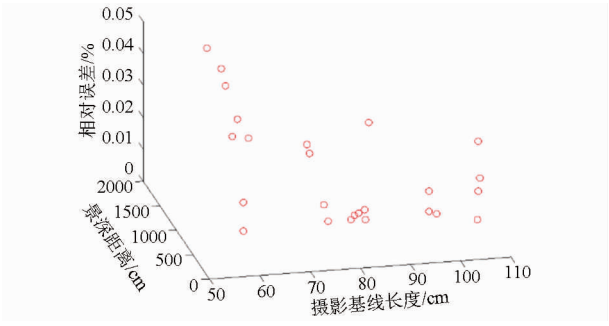

图 12　摄影基线长度、景深距离与相对误差关系

Fig. 12　Relationship of relative error among baseline, focus depth and relative error

对误差为4.77%,绝对误差为0.89 cm。

(2)25 棵样本数据中,摄影点与待测点的距离接近,即 Z 坐标值近似相等的 2 棵样木,摄影基线越小,测量精度越低,相对误差越大。

从图 12 可以看出,基线值介于 80 ~ 90 cm 组数据不稳定,并不符合结论(1)、(2),其主要原因是立木在生长过程中并不是按照标准圆进行生长,这就造成第 3 组数据出现偏差。实验中假设所有待测木均按照标准圆进行生长,故存在数据偏离。通过图 11 可知,为了提高测量精度,需要尽量增大摄影基线的长度,即 2 次摄影之间的纵向距离;并且尽量离待测立木的距离较近,一般在 20 m 范围之内。

4 结束语

从算法原理上详细提出了利用数码相机同时测量样地中多棵样木胸径的方案,经过原理推证、程序实现、实验验证,证明了本方案的可行性。实验验证该方法测量胸径的平均绝对误差为 0.29 cm,平均相对误差为 1.99%,符合国家森林资源连续清查中关于胸径测量的精度要求:胸径小于 20 cm 的树木,测量误差小于 0.3 cm。该方法在森林资源调查中具有实际的应用前景。

参 考 文 献

1 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.

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

3 杨华,孟宪宇,刘燕,等. 单株立木图像信息的提取与解算[J]. 北京林业大学学报,2005,27(1):51 - 54.
Yang Hua, Meng Xianyu, Liu Yan, et al. Measurement and calculation methods of stem image information[J]. Journal of Beijing Forestry University,2005,27(1):51 - 54. (in Chinese)

4 王建利,李婷,王典,等. 基于光学三角形法与图像处理的立木胸径测量方法[J]. 农业机械学报,2013,44(7):241 - 245.
Wang Jianli, Li Ting, Wang Dian, et al. Measuring algorithm for tree's diameter at breast height based on optical triangular method and image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):241 - 245. (in Chinese)

5 侯鑫新,谭月胜,钱桦,等. 一种基于单 CCD 与经纬仪的树木胸径测量方法[J]. 计算机应用研究,2014,31(4):1225 - 1228.
Hou Xinxin, Tan Yuesheng, Qian Hua, et al. DBH measurement method based on tree images taken by single-CCD camera mounted on theodolite[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(4):1225 - 1228. (in Chinese)

6 曹忠,巩弈成,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 Zhong, Gong Yicheng, Feng Zhongke, 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)

7 赵芳,冯仲科,高祥,等. 树冠遮挡条件下全站仪测量树高及材积方法[J]. 农业工程学报,2014,30(2):182 - 190.
Zhao Fang, Feng Zhongke, Gao Xiang, et al. Measure method of tree height and volume using total station under canopy cover condition[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2):182 - 190. (in Chinese)

8 程朋乐,刘晋浩,王典. 融合激光和机器视觉的立木胸径检测方法[J]. 农业机械学报,2013,44(11):271 - 275.
Cheng Pengle, Liu Jinhao, Wang Dian. Measuring diameters at breast height using combination method of laser and machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):271 - 275. (in Chinese)

9 白金顺,曹卫东,熊静,等. 应用数码相机进行绿肥翻压后春玉米氮素营养诊断和产量预测[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(12):3334 - 3338.
Bai Jinshun, Cao Weidong, Xiong Jing, et al. Nitrogen status diagnosis and yield prediction of spring maize after green manure incorporation by using a digital camera[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(12):3334 - 3338. (in Chinese)

10 胡天翔,郑加强,周宏平. 基于双目视觉的树木图像测距方法[J]. 农业机械学报,2010,41(11):158 - 162.
Hu Tianxiang, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping. Measurement method of depth information of tree images based on binocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):158 - 162. (in Chinese)

11 项荣,应义斌,蒋焕煜,等. 基于双目立体视觉的番茄定位[J]. 农业工程学报,2012,28(5):161 - 167.
Xiang Rong, Ying Yibin, Jiang Huanyu, et al. Localization of tomatoes based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5):161 - 167. (in Chinese)

12 张剑清,潘励,王树根. 摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009:1 - 12.

13 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)

14 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,2002:142 - 153.

15 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2012:114 - 129.