

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190345

基于智能手机单目视觉的多株立木高度提取方法

陈相武^{1,2,3} 徐爱俊^{1,2,3}

(1. 浙江农林大学信息工程学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311300;
3. 浙江农林大学林业感知技术与智能装备国家林业与草原局重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要:【目的】提出一种智能手机单目视觉下的多株立木高度提取方法。【方法】该方法以智能手机为采集设备, 利用 Graph Cut 算法对输入的立木图像进行分割定位, 实现单幅图像中多株立木轮廓的自动获取; 再通过智能手机相机对摄像头进行标定, 从而基于几何相似法获取智能手机相机图像的深度信息。在不同角度下拍摄标靶, 进行深度提取模型的精度优化, 进而确定信息提取的最优方位。同时, 结合高精度陀螺仪获取相机俯视角, 根据提取的深度信息和相机俯视角实现非接触条件下的多株立木高度测量。【结果】使用型号为 MI 2S 的小米智能手机为试验设备, 在本方法中的立木高度测量模型具有良好的稳定性, 并且试验中最高相对误差为 2.45%, 树高测量精度可达 97.55%。【结论】基于智能手机单目视觉下的立木高度提取方法精确度高、操作简便, 能够有效满足国家森林资源二类调查中对于树高测量精度的要求。

关键词: 单目视觉; 多株立木; 深度提取; 高度测量

中图分类号: S758.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)08-0043-10

引文格式: 陈相武, 徐爱俊. 基于智能手机单目视觉的多株立木高度提取方法 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 43-52.
Chen Xiangwu, Xu Aijun. Height extraction method of multiple standing trees based on monocular vision of smart phones [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 43-52.

Height extraction method of multiple standing trees based on monocular vision of smart phones

Chen Xiangwu^{1,2,3} Xu Aijun^{1,2,3}

(1. School of Information Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Forestry Intelligent Monitoring and Information Technology,
Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;
3. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Forestry Sensing Technology
and Intelligent Equipment, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to propose a method for extracting height of multiple standing trees based on monocular vision of smart phones. [Method] First of all, with smart phone as the acquisition device, this method segmented and located the input images of standing trees by Graph Cut algorithm, so as to realize the automatic outline acquisition of multiple standing trees in a single image. Then, the camera was calibrated by the camera of smart phones to acquire the depth of camera image of smart phones based on the geometry analogue method. Next, targets were taken from different angles to optimize the accuracy of depth extraction model and further determine the optimal orientation of information extraction. Meanwhile, combined with high-precision gyroscope, the depression angle of camera can be acquired, and the height measurement of multiple standing trees under non-contact condition can be realized according to the extracted depth information and depression angle of camera. [Result] In this method, the height

收稿日期: 2019-08-30 修回日期: 2019-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670641), 浙江省科技重点研究计划资助项目(2018C02013)。

第一作者: 陈相武。主要研究方向: 林业信息技术。Email: 791569410@qq.com 地址: 311300 浙江省杭州市临安区浙江农林大学信息工程学院。

责任作者: 徐爱俊, 博士, 教授。主要研究方向: 资源与环境信息系统。Email: xuaj1976@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

measurement model of standing trees had good stability with smart phone MI 2S as the experimental equipment. Moreover, the maximum relative error was 2.45% and the accuracy of tree height measurement can reach 97.55%. [Conclusion] The height extraction method of multiple standing trees based on monocular vision of smart phones has the characteristics of high accuracy and easy operation, which can effectively meet the accuracy requirements of tree height measurement in national forest resource survey II.

Key words: monocular vision; multiple standing tree; depth extraction; height measurement

森林是陆地生态系统的主体,具有涵养水源、保持水土、改善气候等多种生态功能,经济价值巨大^[1-2]。及时掌握森林资源的数量、质量和生长,以及与自然环境、经营之间的关系,对于制定林业生产计划以保证森林资源在国民经济建设中的发展具有重大意义^[3-5]。在森林资源调查中,立木高度是评价立木生长状况和立木质量的重要依据^[6]。目前,随着精准林业、数字林业的发展,国内外学者研究了很多关于立木高度的测量方法。越来越多的专业化、智能化设备被应用于森林资源的调查^[7-9]。其中,除了传统的目测法、人工接触式测绘等简易方法外^[10-11],以传感器为主体的物联网相关技术^[12-14],并耦合不同功能来进行立木高度测量的方法也得到了广泛的应用。长久以来,传统的测量方法劳动强度大、人力成本高、效率低;而专业的林业测量设备,存在着操作复杂、不易携带、成本较高等问题^[15-16]。另外,三维激光扫描、无人机遥感等新技术也已大量地投入林业的研究与应用^[17-18],其中三维激光扫描技术是一种新兴的实景复制技术,能以较高的准确度对指定的立木建立数据模型,得到立木的三维信息^[19-20];无人机遥感技术则通过拍摄高分辨率影像,产生三维点云,由此来提取树干底端及梢顶的高度信息,最终获得立木高度^[21-23]。目前,随着图像处理技术和近景摄影测量技术的不断发展,立木高度的测量也更趋向于集成化、智能化和一体化^[24-27]。邱梓轩等^[28]研制了以 PDA 模块、远程 EDM 模块、长焦 CCD 镜头模块和云组成的望远测树仪,该仪器通过获取倾角、方位角、远程距离等图像信息参数,在 Android Studio 2.1 开发环境下利用 JAVA 实现立木高度的测量功能。徐伟恒等^[29]通过测量距离、倾角、磁方位角 3 个参数,基于三角函数原理,设计手持式数字化多功能电子测树枪,嵌入操作软件后,实现了树高测量。王佳等^[30]以轻小型航空遥感系统为获取数据工具,通过激光雷达获取树木点云数据,以地面实测林分数据为真值,根据建立的遥感数据与实测数据关系模型来测量立木高度。管昉立等^[31]通过数字图像提取待测立木的最小外接矩形,通过相机标定获取的相机内参,建立二维图像坐标到三维坐标的空间映射模型实现立木高度的测量。但从目前看来,以

上有关信息化立木高度测量的研究,大多都需要复杂的试验步骤或昂贵的设备,且难以实现在同一场景中的多株立木测量。

鉴于此,本文提出一种智能手机单目视觉下多株立木高度的提取方法。该方法以智能手机为采集设备,基于 Graph Cut 算法^[32]对拍摄的单幅多株立木图像进行分割定位,实现单幅图像中多株立木轮廓的自动获取;通过标定得到智能手机摄像头内部参数,建立深度信息提取模型,获得待测立木的深度信息。结合高精度陀螺仪获取相机俯视角,根据提取的深度信息和相机俯视角,实现非接触条件下的多株立木高度测量。

1 研究方法

1.1 基于几何相似的深度信息获取

在实际测量中,当待测目标和智能手机相机处于同一地平线时,待测目标所在的平面和智能手机相机的像平面能够构成对应的几何关系。据此,通过几何相似法计算待测目标与智能手机像平面的三维空间几何关系,可获得树木的实际参数。根据手机相机内部成像原理,在同一地平面建立的图像像素坐标系与世界坐标系的几何相似模型如图 1 所示。

图 1 中, $ABCD$ 为智能手机相机的像平面,像平面上的点 (x_0, y_0) 为光轴与图像像平面的交点。点 (x_0, y_0) 射出的光轴垂直于像平面,且经过镜头中心。 f 表示镜头中心到像平面的距离,即焦距的大小。 P 点为几何相似模型中的待测点,在地平面 L 上, P 点在二维平面图像坐标系中的投影点为 (x, y) 。设定 h 为镜头中心到地平面的垂直高度, γ 为相机的垂直俯视角, β 为相机内部投影线与光轴的夹角。 d 表示智能手机相机在地平面上距离 P 点的水平距离(深度值)。通过上述的深度信息图可以推导出像素坐标系与世界坐标系的关系式:

$$d = \frac{h}{\tan(\gamma + \beta)} \quad (1)$$

式中: d 为待测深度值; h 为当前所在相机高度; γ 为相机俯视角; β 为投影线与光轴的夹角。

根据图 1 中的反三角函数关系, β 的表达式为:

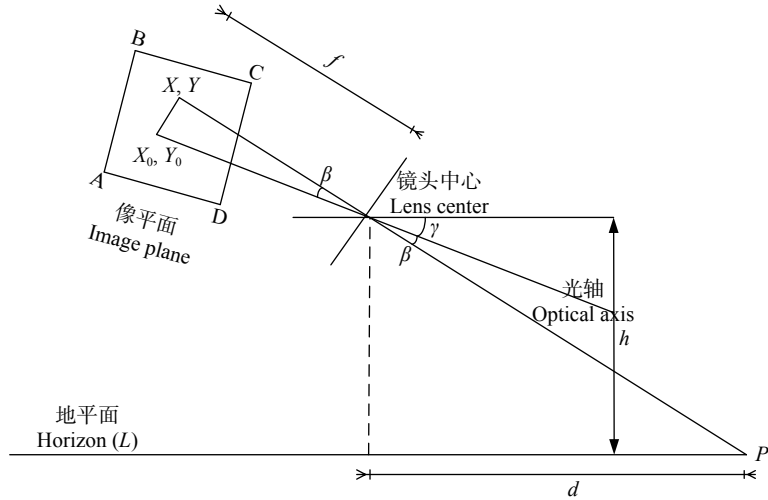


图 1 深度信息几何推导

Fig. 1 Geometric derivation of depth information

$$\beta = \arctan\left(\frac{-(y-y_0)}{f}\right) \quad (2)$$

式中： f 为相机焦距； y 为目标点在图像上的 y 轴坐标； y_0 为图像像平面 y 轴主点。

结合式(1)和式(2)可以得出公式：

$$d = \frac{h}{\tan\left(\gamma + \arctan\left(\frac{-(y-y_0)}{f}\right)\right)} \quad (3)$$

在图像坐标系上的点 (x, y) 在像素坐标系 (u, v) 中的坐标为 (u_0, v_0) ，像面上每一个像素点在 y 轴方向上的物理尺寸为 d_y 。根据图 2 中的图像坐标与像素坐标之间的几何转换关系可知：

$$v = \frac{y}{d_y} + v_0 \quad (4)$$

式中： v 为该坐标系中 y 轴坐标的大小； v_0 为相机内部参数； d_y 为相机 y 轴方向的物理尺寸。

故有

$$y = (v - v_0)d_y \quad (5)$$

又 $y_0 = 0$ ，故

$$d = \frac{h}{\tan\left(\gamma + \arctan\left(\frac{-(v - v_0)d_y}{f}\right)\right)} \quad (6)$$

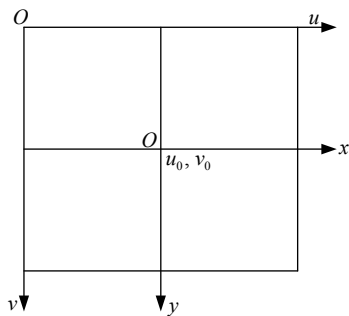


图 2 图像坐标系与像素坐标系转换

Fig. 2 Transformation between image coordinate system and pixel coordinate system

最后，由 $f_v = \frac{d_y}{f}$ 可得距离公式：

$$d = \frac{h}{\tan\left(\gamma + \arctan\left(\frac{-(v - v_0)}{f_v}\right)\right)} \quad (7)$$

式中：参数 h 是手机相机的高度， γ 为智能手机相机内部的垂直俯视角，这两个量可以在试验之前测得； v 为图像中的 y 轴坐标，可从拍摄的图像中自动获取；图像平面的 y 轴方向焦距 f_y 和图像平面的 y 轴主点 v_0 都是智能手机相机的内部参数，可以通过相机标定法标定获得。

根据以上已知的参数，可通过上述公式求得待测的深度信息 d 。

1.2 深度提取模型的验证与分析

为验证深度提取模型的可行性及精度，本文采用型号为 MI 2S，版本为 Android4.1.2 的小米智能手机，在不同角度下拍摄标靶获取深度验证模型输入图像。根据前面的推导公式得出，影响本模型精度的因素有以下两点：(1)选取的图像像素行；(2)智能手机相机垂直俯视角的准确度。本试验固定智能手机相机高度为 37.1 cm，通过改变智能手机相机的俯视角(相机的其他内部参数不变)，计算同一二维平面中不同位置像素行的深度提取值的精确度。

图 3 包含了俯视角 $\gamma = \{40^\circ, 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 0^\circ\}$ 的像平面。像平面中每一个格子的实际大小为 4.4 cm × 4.4 cm。

经相机标定计算出 MI 2S 智能手机相机内部参数为： $f_x = 3\,486.563\,7$ ， $u_0 = 1\,569.038\,3$ ， $f_y = 3\,497.465\,2$ ， $v_0 = 2\,107.989\,88$ ， $h = 37.1\text{ cm}$ ，图像分辨率为 3 120 × 4 208。将求得的参数代入深度信息模型，并通过以下几组试验进行验证(表 1)，每个试验组的相机俯视角各不相同。

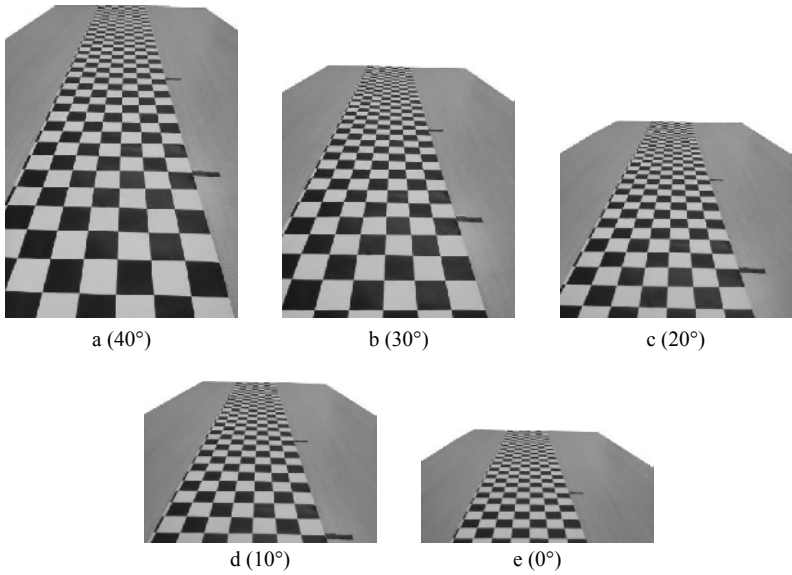


图 3 深度信息模型验证
Fig. 3 Verification of depth information model

表 1 深度信息测量数据
Tab. 1 Measurement data of depth information

俯视角 Top view angle (γ)/(°)	试验编号 Experiment No.	像素行 Pixel row (ν)	实际距离 Actual distance/cm	测量距离 Measuring distance/cm	视场角 Field of view angle (β)/(°)	相对误差 Relative error/%
40	1	3 224	88.00	82.234	- 17.697	0.044
	2	3 293	92.40	86.593	- 18.717	0.041
	3	3 360	96.80	91.168	- 19.696	0.041
	4	3 422	101.20	95.738	- 20.591	0.041
	5	3 477	105.60	100.096	- 21.377	0.039
30	1	2 589	92.40	86.316	- 7.831	0.013
	2	2 651	96.80	90.794	- 8.825	0.013
	3	2 705	101.20	95.012	- 9.687	0.011
	4	2 753	105.60	99.040	- 10.449	0.007
	5	2 803	110.00	103.546	- 11.239	0.007
20	1	2 025	101.20	94.866	1.359	- 0.015
	2	2 071	105.60	98.672	0.606	- 0.020
	3	2 117	110.00	102.754	- 0.148	- 0.022
	4	2 156	114.40	106.456	- 0.786	- 0.028
	5	2 197	118.80	110.610	- 1.458	- 0.029
10	1	1 636	112.50	115.664	7.686	0.028
	2	1 674	117.00	120.082	7.074	0.026
	3	1 713	121.50	124.962	6.443	0.028
	4	1 750	126.00	129.952	5.844	0.031
	5	1 779	130.50	134.137	5.374	0.028
0	1	1 121	127.60	131.466	15.759	0.030
	2	1 151	132.00	135.588	15.303	0.027
	3	1 181	136.40	139.976	14.845	0.026
	4	1 210	140.80	144.496	14.400	0.026
	5	1 238	145.20	149.147	13.969	0.027

通过以上几组试验可知,在提取深度信息较大的像素行时,智能手机相机的俯视角越小,提取的深度信息就越高。在智能手机相机旋转角度变化时,深度信息精确度的变化程度较为稳定,且越靠近光轴所在直线的目标点,深度信息的误差值就越小。因此,在实际测量树木中,使用较小的俯视角来提取图像深度信息,并由此计算智能手机相机内部靠近主点的深度信息,可获得更加精确的目标点深度。

1.3 多株立木高度测量模型

基于小孔成像原理,建立多株立木高度测量模型如图4所示。其中,ABCD为像平面,三维空间中目标立木 tree1、tree2、tree3 投影到二维像平面的成像画面显示为 h_1 、 h_2 、 h_3 。以 H_1 、 H_2 、 H_3 的值为目标立木的实际高度, h_1 、 h_2 、 h_3 的值为立木图像在二维平面上的像素差。此时,智能手机距离地面的高度为 h ,用 γ 表示智能手机的俯视角, d 为目标立木的深度信息。在实际测量中,相机的俯视角会随着测量的需求发生变化。根据相机投影模型可知,当俯视角发生变化时,各成像面之间的相对夹角不会发生变化。以 h_1 为例,根据智能手机相机内部成像原理,得出目标立木的测量公式:

$$\frac{H_1}{PQ} = \frac{h_1}{f_y} \quad (8)$$

图4中 h_1 为立木在二维平面图像上的成像像素差,可以通过立木在图像上最高点和最低点的差计算得出; f_y 是相机标定所得的已知参数; PQ 为智能手机相机沿光轴方向到目标立木 H_1 的距离。综上可得 d 与 PQ 之间的几何关系为:

$$PQ = \frac{d}{\cos(\gamma)} \quad (9)$$

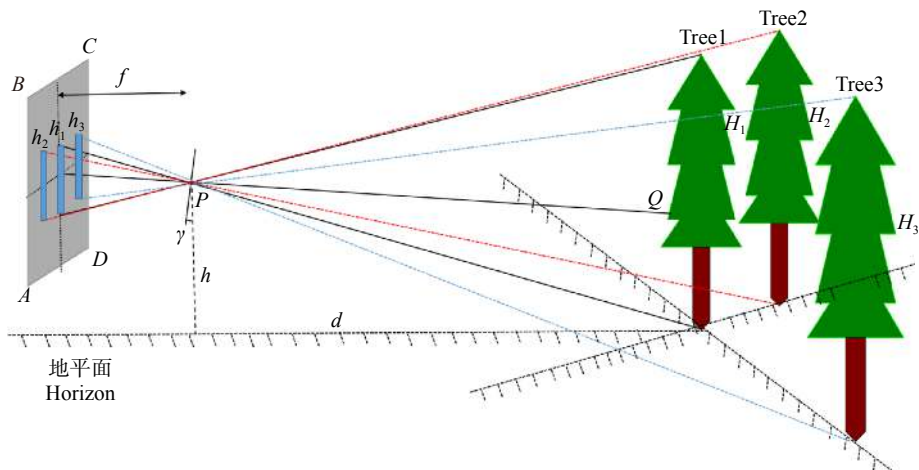


图4 多株立木成像图

Fig. 4 Imaging of multiple standing trees

已知 $\text{tree1} = H_1$, 结合式(8)和式(9)可得公式:

$$H = \frac{v'v \cdot d}{f_y \cos(\gamma)} \quad (10)$$

又已知 d 为目标立木的深度。根据深度提取出公式(11)如下:

$$H = \frac{h}{\tan\left(\gamma + \arctan\left(\frac{-(v-v_0)}{f_v}\right)\right)} \frac{y'y}{f_y} \quad (11)$$

以上公式通过获取立木图像在成像面上的像素差 h 和相机内部高精度陀螺仪获得的俯视角 γ 来获取立木的高度 H , 其中 h 的单位为 m , v 和 f_y 的单位均为像素(pixel), H 的单位为 m ; $v'v$ 是在像素坐标系下待测立木的像素差, $y'y$ 是图像坐标系下待测立木的像素差。

2 结果与分析

2.1 试验场景

本文使用型号为 MI 2S, 版本为 4.1.2 的小米智能手机, 使用 Java 语言和 C++ 语言实现相关功能。经相机标定后求得相机内部参数为: $f_x = 3\,486.563\,7$, $u_0 = 1\,569.038\,3$, $f_y = 3\,497.465\,2$, $v_0 = 2\,107.989\,88$, 设定智能手机距离地面的垂直高度 $h = 1.30\,\text{m}$, 图像分辨率为 $3\,120 \times 4\,208$ 。输入待测立木图像, 利用 Graph Cut 图像处理技术对立木图像进行分割。该算法针对自然环境下光线、阴影等因素, 通过进行多次图像前背景像素标记完成感兴趣区内局部立木图像初分割, 并对多张分割结果进行二值化、腐蚀、膨胀等图像预处理达到去噪、简化图像、减小其他复杂环境因素影响的目的。

2.2 树高模型试验

在试验场景中, 本文针对 4 株树高分别为 4.176、5.109、8.161 和 11.998 m 的立木, 分别在不同角度和

不同距离下进行了 45 次测量,对本文立木高度提取的方法进行了验证。结果如表 2 所示。以激光测树仪、全站仪多次测量的平均值作为立木实际高度的真值记入表中。

经试验结果分析可知,45 组数据的绝对误差范围在 0.012~0.67 m 之间(图 5)。从图 5a 可知:在不同的俯视角下进行测量时,当俯视角接近 0°,测量值和真实值的误差较小,测量结果较为精确;在俯视角近似的情况下,待测立木的高度增加时,其测量误差

也随之增大。

分析在不同距离下本方法的精度。如图 5b 所示:可以得出在较近的距离下,测量立木时能够取得良好的精度;但随着拍摄距离的增大,受图像畸变的影响,不能准确获得立木的图像信息,所以在测量较高树木时会产生较大的误差。

对本试验所测量的 45 组数据建立相对误差分布图(图 6)。从图 6 可知,大部分的相对误差显示在图像的左侧,且相对误差的值在 5% 以下。此外,通

表 2 立木高度测量数据表
Tab. 2 Measuring data of standing tree height

试验编号 Experiment No.	实际值 Actual value/m	距离/m Distance/m	俯视角 Top view angle/(°)	测量值 Measured value/m	相对误差 Relative error/%
1	4.176	6	1.11	4.121	1.32
2	4.176	6	1.11	4.188	0.29
3	4.176	6	1.11	4.126	1.19
4	5.109	6	-5.45	5.049	1.17
5	5.109	6	-5.45	5.383	5.36
6	5.109	6	-5.45	5.269	3.13
7	5.109	6	-8.11	4.873	4.61
8	5.109	6	-8.11	5.167	1.14
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
38	5.109	14	15.41	4.912	3.86
39	5.109	14	15.41	4.967	2.78
40	8.161	14	2.89	8.002	1.95
41	8.161	14	2.89	8.050	1.36
42	8.161	14	2.89	7.936	2.76
43	11.998	14	-5.81	11.461	4.48
44	11.998	14	-5.81	11.598	3.34
45	11.998	14	-5.81	11.514	4.04

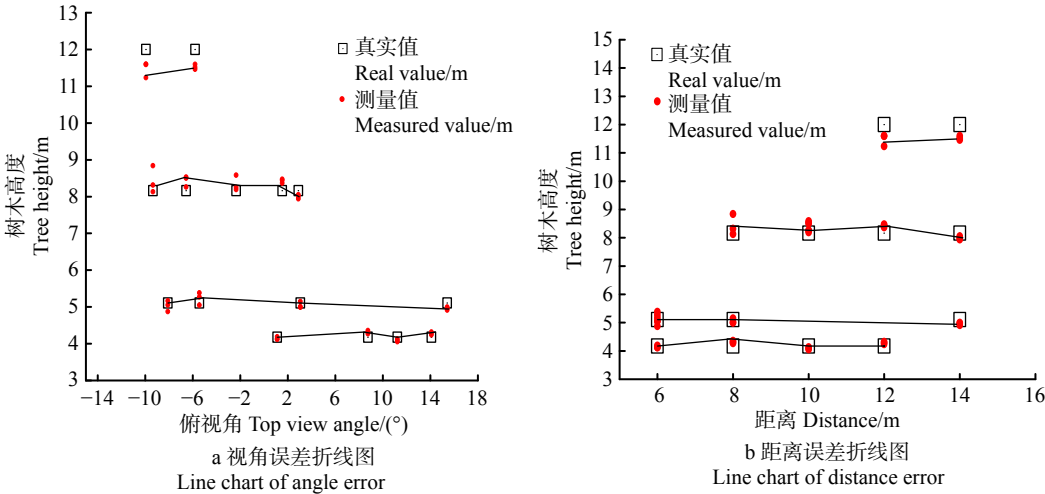


图 5 误差分析图
Fig. 5 Chart of error analysis

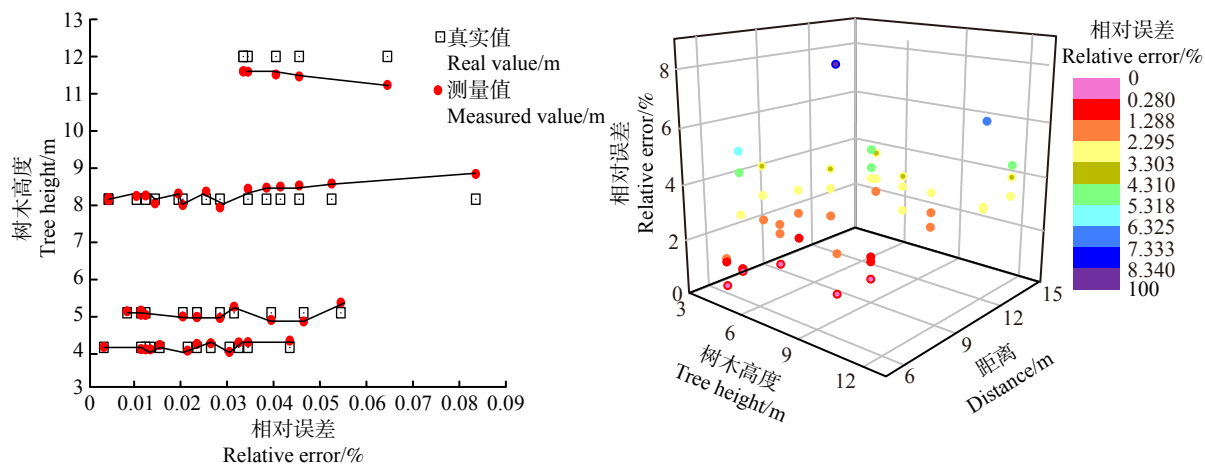


图 6 三维误差点云分布图
Fig. 6 Point cloud distribution map of 3D error

过对不同树木的高度、拍摄距离以及对应的相对误差建立三维点云模型，在不同维度上构建误差点云分布图进行比较分析。

在误差点云分布图中，数据点的分布趋于稳定状态。其中，树高测量的最高相对误差为 8.33%，最低相对误差为 0.29%。在误差折线图中，同一角度和距离下所测得的平均相对误差也呈现稳定状态。其中最高的平均相对误差为 4.36%，最低的平均相对误差为 0.93%。在不同距离下，使用该方法对不同树木高度进行测量的相对误差、同一距离下平均误差的分析可知，在多株立木的高度测量中本方法具有较强的实用性。

经树高测量试验分析，针对本模型的树高测量功能得到以下结论：

- (1)在森林资源调查中，获取立木图像时选取的距离对后续的处理有很大的影响，选择立木图像位置在主点处能够取得更好的效果。
- (2)测量时，智能手机摄像机内部俯视角越小，能够获得的深度信息越准确，立木高度测量的精度就越高。
- (3)在实际场景中，测量人员的距离和待测立木的高度相接近时，可有效地提高测量结果的精度，得

到更理想的高度。

2.3 外业树高测量

为了验证本方法在实际外业中的可行性和稳定性，试验随机选取了 60 棵树木进行树高测量。其中树高测量的真值通过全站仪、激光测树仪进行多次测量求平均值获得(图 7)。

为了得知本方法在不同高度下立木高度测量结果误差分布情况，以 3 m 为跨度把 60 组数据划分为 5 个小组。5 个小组的误差分析结果如表 3 所示。

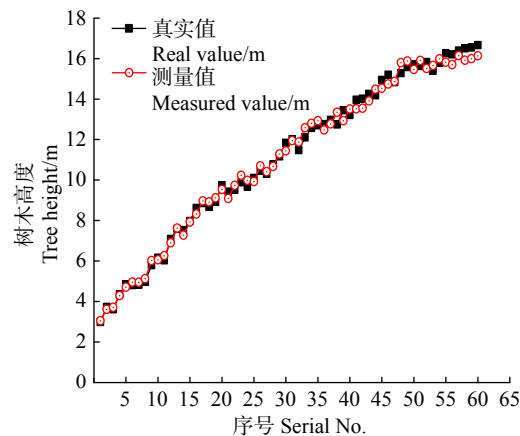


图 7 外业树高测量结果
Fig. 7 Measurement results of field tree height

表 3 树高计算结果误差分析
Tab. 3 Error analysis on calculating results of tree height

树高 Tree height/m	株数 Plant number	平均绝对误差 Mean absolute error/m	平均相对误差 Mean relative error/%
3 ~ 6	9	0.13	2.79
6 ~ 9	10	0.17	2.22
9 ~ 12	11	0.23	2.29
12 ~ 15	17	0.34	2.56
> 15	13	0.38	2.39
总计 Total	60	0.27	2.45

通过试验结果分析可知:60株立木的树高测量结果在5个小组内平均绝对误差范围为0.13~0.38 m,平均相对误差为2.22%~2.29%,树高测量结果在不同小组内误差范围相差不大,较为稳定;同时,相对误差范围为-3.59%~3.99%,平均相对误差为2.45%。由此得出,在外业试验中,本文高度测量模型的平均单次测量精度能够与测试数据中误差小于5%的精度吻合。同时,根据上面的试验分析结果,选取合适的距离、俯视角进行测量,能使其测量精度得到进一步提升,更能满足国家森林资源连续清查对树高测量精度的要求。

3 结论与讨论

本文提出了单目视觉下多株立木的高度测量方法。以智能手机设备为输入设备,利用几何相似法和摄影测量中三维空间到二维空间的坐标映射关系,能够实现林业调查中立木高度的快速精确测量。

利用智能手机设备,结合智能手机相机成像系统内部的几何关系,能有效建立树木高度测量模型。同时,用智能手机设备的内部处理器对收集到的数据进行处理,反应速度完全可以达到林业生产的要求,从而为获取精确的树高提供了硬件支持。本文根据单目视觉下的物体成像系统,通过事先对相机进行标定从而获得相机的内部参数和外部参数;选择几何相似法,对该模型进行逆求解,获取智能手机到立木底端的深度信息;再结合陀螺仪获取的俯视角,能有效地以低成本的方式通过深度信息和角度信息实现多株立木高度的快速测量,并且在部分遮挡下,待测立木只有部分的树冠被遮挡,其余主要部分的树干和顶部的树冠没有被遮挡住,就可以在待测立木高度相近的距离下寻找适当的角度拍摄待测立木。本方法能够应用且测得较为精准的立木高度。最后,对被测立木进行试验验证,得知利用本方法进行外业树高测量提取立木高度的绝对误差小于0.38 m,相对误差最大值为4.7%,且在5个小组内,其平均绝对误差均小于0.40 m,平均相对误差均小于3%,在不同高度的范围内都具有较高的精确性。同时,实际外业树高测量的总计平均相对误差为2.45%,树高测量精度可达97.55%,能够满足国家森林资源二类调查中树高测量精度的要求。

相较于现有的单目视觉立木高度测量的方法,大多都是针对单株立木进行测量。针对这一缺陷,本文所提出的测量方法成本低且工作效率高,能够较为准确地在单目视觉下测得多株立木的高度。但本文仍然存在一些不足,如在进行实际拍摄时,容易受到智能手机相机的畸变影响;不同的待测立木之

间的实际距离相差过大时,容易在成像时产生较大的畸变,导致该方法的精度受到影响。在后续研究中,如何在不同环境下尽可能消除图像边缘地区的畸变,将是研究的重点方向。

参考文献

- [1] 罗朝沁,林辉,孙华,等.基于MODIS影像大尺度森林资源信息提取方法研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(11): 21-26, 42.
Luo C Q, Lin H, Sun H, et al. Based on MODIS image large-scale forest resources information extraction method[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(11): 21-26, 42.
- [2] He J S. Carbon cycling of Chinese forests: from carbon storage, dynamics to models[J]. *Science China Life Sciences*, 2012, 55(2): 188-190.
- [3] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SIB) for use within general-circulation models[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(6): 505-531.
- [4] Hauglin M, Hansen E H, Næsset E, et al. Accurate single-tree positions from a harvester: a test of two global satellite-based positioning systems[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, 32(8): 774-781.
- [5] Olivier M D, Robert S, Fournier R A. A method to quantify canopy changes using multi-temporal terrestrial lidar data: tree response to surrounding gaps[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 237-238: 184-195.
- [6] Ahmed O S, Shemrock A, Chabot D, et al. Hierarchical land cover and vegetation classification using multispectral data acquired from an unmanned aerial vehicle[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8/10): 2037-2052.
- [7] 王佳,张隆裕,吕春东,等.基于地面激光雷达点云数据的树种识别方法[J].*农业机械学报*, 2018, 49(11): 180-188.
Wang J, Zhang L Y, Lü C D, et al. Tree species identification methods based on point cloud data using ground-based LiDAR[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 180-188.
- [8] 张雄清,张建国,段爱国.基于贝叶斯法估计杉木人工林树高生长模型[J].*林业科学*, 2014, 50(3): 69-75.
Zhang X Q, Zhang J G, Duan A G. Tree-height growth model for Chinese fir plantation based on bayesian method[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(3): 69-75.
- [9] 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 L X, Pang Y, Li Z Y. Individual tree DBH and height estimation using terrestrial laser scanning (TLS) in a subtropical

- forest[J]. *Scientia Silvae Sinica*, 2016, 52(2): 26–37.
- [10] Persson H J, Fransson J E S. Comparison between TanDEM-X- and ALS-based estimation of aboveground biomass and tree height in boreal forests[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, 32(4): 306–319.
- [11] 沈鹏, 汪长城, 朱建军, 等. 融合升降轨的极化干涉 SAR 三层模型植被高度反演方法[J]. *测绘学报*, 2017, 46(11): 1868–1879.
- Shen P, Wang C C, Zhu J J, et al. Vegetation height inversion method with three-layer model by fusing the ascending and descending PolInSAR data[J]. *Acta Geochimica Sinica*, 2017, 46(11): 1868–1879.
- [12] 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 Z K, Huang X D, Liu F. Forest survey equipment and development of information technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 257–265.
- [13] Thamrin N M, Arshad N H M, Adnan R, et al. Enhanced technique for cylindrical object diameter measurement via low-cost and innovated rotational non-intrusive sensor[C]// *IEEE 10th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA)*. Kuala Lumpur: IEEE, 2014.
- [14] 瞿帅, 张晓丽, 朱程浩, 等. 机载激光雷达森林资源调查系统的设计与试验[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(4): 175–182.
- Qu S, Zhang X L, Zhu C H, et al. Design and test of airborne LiDAR system for forest resources survey[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(4): 175–182.
- [15] Corona P, Fattorini L, Franceschi S, et al. Estimation of standing wood volume in forest compartments by exploiting airborne laser scanning information: model-based, design-based, and hybrid perspectives[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, 44(11): 1303–1311.
- [16] Tomppo E, Kuusinen N, Mäkisara K, et al. Effects of field plot configurations on the uncertainties of ALS-assisted forest resource estimates[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2016, 32(6): 488–500.
- [17] 王宁宁, 尹文广, 黄秦军, 等. 三维扫描技术在获取杨树树冠结构特征参数上的应用[J]. *林业科学*, 2015, 51(5): 108–116.
- Wang N N, Yin W G, Huang Q J, et al. Application of 3D scanner technology to analysis the crown architecture parameters of poplar plantations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(5): 108–116.
- [18] Díaz-Varela R A, De La Rosa R, León L, et al. High-resolution airborne UAV imagery to assess olive tree crown parameters using 3D photo reconstruction: application in breeding trials[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 4213–4232.
- [19] 邓向瑞, 冯仲科, 马钦彦, 等. 三维激光扫描系统在立木材积测定中的应用[J]. *北京林业大学学报*, 2007(增刊 2): 74–77.
- Deng X R, Feng Z K, Ma Q Y, et al. Application of 3D laser scanning system in mensurating standing volume[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007(Suppl.2): 74–77.
- [20] 郭彩玲, 宗泽, 张雪, 等. 基于三维点云数据的苹果树冠层几何参数获取[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 175–181.
- Guo C L, Zong Z, Zhang X, et al. Apple tree canopy geometric parameters acquirement based on 3D point clouds[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(3): 175–181.
- [21] Zarco-Tejada P J, Diaz-Varela R, Angileri V, et al. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 55: 89–99.
- [22] 张晓莉, 赵鹏祥, 高凌寒, 等. 基于 ArboLiDAR 的林分自动分割研究与应用[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(11): 76–83.
- Zhang X L, Zhao P X, Gao L H, et al. Research and application of stand automatic segmentation based on ArboLiDAR[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, 37(11): 76–83.
- [23] Panagiotidis D, Abdollahnejad A, Surov P, et al. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8/10): 2392–2410.
- [24] Holzmann C, Hochgatterer M. Measuring distance with mobile phones using single-camera stereo vision[C]// *32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*. Macau: IEEE, 2012: 88–93.
- [25] Chen S W, Fang X Y, Shen J B, et al. Single-image distance measurement by a smart mobile device[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 47(12): 4451–4462.
- [26] 周克瑜, 汪云珍, 李记, 等. 基于 Android 平台的测树系统研究与实现[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(4): 95–100.
- Zhou K Y, Wang Y Z, Li J, et al. A study of tree measurement systems based on Android platform[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (National Sciences Edition)*, 2016, 40(4): 95–100.
- [27] Han D Y, Wang C D. Tree height measurement based on image processing embedded in smart mobile phone[C]// *International Conference on Multimedia Technology*. Hangzhou: IEEE, 2011.
- [28] 邱梓轩, 冯仲科, 蒋君志伟, 等. 森林智能测绘记数器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(5): 179–187.

- Qiu Z X, Feng Z K, Jiang J Z W, et al. Design and experiment of forest intelligent surveying and mapping instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 179–187.
- [29] 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 W H, Feng Z K, Su Z F, et al. Development and experiment of handheld digitalized and multi-functional forest measurement gun[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 90–99.
- [30] 王佳, 杨慧乔, 冯仲科, 等. 利用轻小型飞机遥感数据建立人工林特征参数模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 164–170.
- Wang J, Yang H Q, Feng Z K, et al. Model of characteristic parameter for forest plantation with data obtained by light small aerial remote sensing system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(8): 164–170.
- [31] 管昉立, 徐爱俊. 基于智能手机与机器视觉技术的立木胸径测量方法[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(5): 892–899.
- Guan F L, Xu A J. Tree DBH measurement method based on smartphone and machine vision technology[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(5): 892–899.
- [32] 杨婷婷, 管昉立, 徐爱俊. 基于 Graph Cut 算法的多株立木轮廓提取方法[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 91–98.
- Yang T T, Guan F L, Xu A J. Multiple trees contour extraction method based on Graph Cut algorithm[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 42(6): 91–98.

(责任编辑 冯秀兰
责任编委 冯仲科)