

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.019

基于视觉里程计的森林样地调查系统研究

陈盼盼¹ 冯仲科¹ 范永祥¹ 高 祥² 申朝永¹

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 安徽农业大学理学院, 合肥 230036)

摘要: 以视觉里程计技术恢复连续摄影序列图像位姿,并以恢复位姿的图像为基础构建样地调查系统。该系统通过对图像位姿尺度恢复、定义样地坐标系、标记立木等过程估计样地中立木位置及胸径。用相机对 12 块半径为 7.5 m 的圆形样地进行连续摄影,获取有序图像序列,并使用构建的样地调查系统对图像序列进行处理,以获取样地中立木位置及胸径。实验结果表明,所有样地立木位置估计值 x 轴与 y 轴方向的偏差 (BIAS) 分别为 0.04、-0.03 m,均方根误差 (RMSE) 分别为 0.21、0.17 m;样地中立木胸径估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 0.09 cm (0.51%) 和 0.88 cm (5.03%)。

关键词: 森林样地; 视觉里程计; 调查系统; 立木位置; 胸径

中图分类号: S758.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)10-0167-08

Research on Forest Plot Survey System Based on Visual Odometer

CHEN Panpan¹ FENG Zhongke¹ FAN Yongxiang¹ GAO Xiang² SHEN Chaoyong¹

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

2. College of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The visual odometer technology was used to restore the posture of the continuous photographic sequences. The sample-plot survey system was constructed based on the images of the restored posture. The system can estimate the position and DBH of the sample trees in the sample-plot by recovering the image posture scale, defining the plot coordinate system, and sample tree marking. Totally 12 circular sample plots with radius of 7.5 m were continuously photographed to obtain the image sequence. And then the obtained image sequence was processed with the constructed sample plot survey system to measure the position and DBH of the sample trees. The results showed that the deviations of estimated values of sample tree position of the plots in the x -axis and y -axis directions were 0.04 m and -0.03 m, respectively, and the root mean square error (RMSE) was 0.21 m and 0.17 m, respectively. The BIAS and RMSE of the estimated DBH were 0.09 cm (0.51%) and 0.88 cm (5.03%), respectively. The results showed that the visual odometer technology had a great potential to restore the image posture and to use the non-point cloud method to estimate the tree position and the breast diameter from the picture by plot survey method.

Key words: forest field sample; visual odometer; inventory system; tree position; DBH

0 引言

森林占全球陆地生态系统的 30%, 为全世界 50% 以上的动植物提供了栖息地,是生物遗传多样性最为丰富的生态系统^[1-5],在气候调节、碳循环和

水土保持等方面发挥着重要作用^[6-7]。森林清查是自然资源监测和管理的重要组成部分,是了解森林资源现状及其动态变化的主要方式^[8]。森林清查依不同层次的森林管理者及政府决策者的需求不同而不同,为森林蓄积量、生长量、生物量及碳储量的

收稿日期: 2019-06-21 修回日期: 2019-08-12
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2015ZCQ-LX-01)、国家自然科学基金项目 (U1710123) 和安徽农业大学青年基金重点项目 (2015ZD06)
作者简介: 陈盼盼 (1990—),女,博士生,主要从事 3S 技术与应用、生态评价及 SLAM 在林业中的应用研究,E-mail: jeno.chen@foxmail.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

分析和评估提供系统的森林资源信息^[9]。

森林样地调查是森林资源清查的重要方式之一,不仅可以直接用于评估森林资源信息,也是空基等数据构建模型的参考数据源。森林样地通常为森林中具有代表性的小面积区域,通过对样地中的树木进行每木检尺获取属性信息并加以总结,便可获取森林总体的评价属性。森林样地调查的单木属性主要包括树种、位置、胸径、树高等,而生物量、蓄积等属性可通过所构建模型进行估计^[10-11]。显然,样地调查的精度及效率直接影响森林清查的可靠性及效率^[12]。在传统森林样地调查中,单木属性信息的获取主要依赖于简单的测量工具,如胸径尺、测高器、测树枪等。这些方法耗时、费力,且存在较大主观因素^[13-15]。

随着遥感技术的发展,利用传感器获取样地点云,然后从该点云中提取立木参数的方式被许多研究者关注^[16]。其中,主要使用的传感器包括激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)和摄影测量(Photogrammetry)相机。激光雷达通过主动测量目标点与激光雷达距离的方式获取深度信息^[17]。由于遮挡等原因导致该方法测得的树木点云密度过小,甚至无法进行拟合以获取树木胸径及位姿^[18]。摄影测量是一种被动对周围纹理进行观测的工具,通过匹配、位姿估计、稠密化点云等步骤获取森林三维点云。但由于森林结构复杂,不一定能够成功获取同名点,而获取稠密的树木点云,当然也无法获取较高精度的单木属性^[19-22]。

利用摄影测量很难保证所获稠密点云合格并可以提取所有立木的单木属性^[23-28]。视觉里程计是一种仅使用相机便可以基于摄影测量理论实时估计相机位姿的一种技术。显然,这种不需要全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)信号覆盖条件的技术适合在林下工作。本文设计一种以视觉里程计估计森林中获取的连续图像序列的位姿、利用非点云的方式获取立木胸径及位置的方法。利用该方法构建图像序列处理系统,并将其用于样地中获取图像序列处理,以获取样地中立木胸径及位置。

1 视觉里程计理论

视觉里程计(Visual odometry, VO)为以搭载在运动平台上的视觉传感器作为输入,利用传感器获取的时间序列帧数据,进行实时估计搭载平台位姿的技术^[29]。VO系统所搭载的视觉传感器主要包括单目相机(Monocular camera)、双目相机(Stereo camera)和深度相机(RGB-D camera)3类^[30]。视

觉里程计工作所需的传感器较为简单,而且在不需
要 GNSS 覆盖的条件下便可进行相对位姿估计,可以
用于机器人室内相对导航及宇宙探索中,也适合于
林下无 GNSS 信号条件下估计观测设备相对位姿
的情况^[31]。

VO 算法主要需要解决的问题是利用不同视觉
传感器获取的具有时间相关性的图像序列进行实时
估计搭载平台的位姿。若设视觉传感器在 N 个不
同时刻获取的帧序列为 $I_{0:N} = \{I_0, I_1, \dots, I_n\}$ (图 1),
视觉里程计通过相邻帧对同一环境进行重叠观测的
特性从而估计两相邻帧 $k-1$ 与 k 之间位姿的相对
变换,该刚性变换可以表示为

$$T_{k-1,k} = \begin{bmatrix} R_{k-1,k} & t_{k-1,k} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 $R_{k-1,k}$ ——从 $k-1$ 时刻到 k 时刻的旋转矩阵
 $t_{k-1,k}$ ——从 $k-1$ 时刻到 k 时刻的平移向量

所有连续帧的相对变换集合为 $T_{1:n} = \{T_{0,1}, T_{1,2}, \dots, T_{n-1,n}\}$,若设不同时刻的位姿序列为 $C_{0:n} = \{C_0, C_1, \dots, C_n\}$,则 k 时刻的位姿为

$$C_k = C_{k-1} T_{k-1,k} \tag{2}$$

且通常设 $k=0$ 时刻的位姿 C_0 作旋转矩阵为单位
阵、平移向量为零向量的假设。基于此便可以估计
不同时刻的位姿。

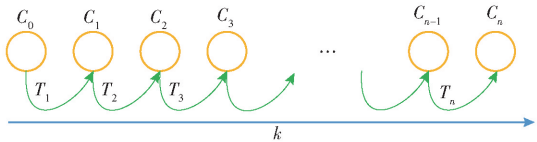


图 1 视觉里程计的本质
Fig.1 Essence of visual odometer

2 森林样地数据处理系统设计

森林样地数据处理系统主要包括视觉里程计及
森林调查系统两部分(图 2)。视觉里程计部分以外
业所采集的图像序列为输入估计各帧图像的位姿;
森林调查系统需要手动标记树木位置及胸径,然后
基于同名点自动匹配构建样地坐标系并估计立木位
置和胸径。

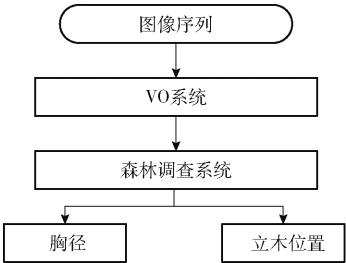


图 2 样地调查系统基本结构
Fig.2 Structure of forest inventory system

2.1 视觉里程计

通常使用的视觉里程计为基于特征的里程计，其利用不同帧中出现多个相同特征构建不同帧之间的位姿转换关系。如图 3 所示，为本文所构建的基于特征点的视觉里程计估计位姿的基本流程图，其利用有序的图像序列，通过特征提取、特征匹配、运动估计和局部光束法平差 4 个步骤为获取当前帧的位姿：① 特征点提取部分用于提取图像中对应于地面的点，好的特征点应具有位置精确（位置及尺度）、可重复性、计算高效及强鲁棒性等特征，本文选择提取速度较快的 FAST (Feature from accelerated segment test) 方法，提取角点类型的特征点。② 特征匹配部分需要建立不同帧中特征点之间的对应关系，并使用 BRIF (Binary robust independent elementary feature) 算子描述该特征点的特点且该算子之间的距离可以描述两个特征点的相似性，便可依次获取不同图像、相同场景特征点的对应关系。③ 当获取到匹配点时，即可利用 P2P 或 EPNP 估计当前帧的位姿。④ 利用局部光束法平差从统计优化的角度精确化所估计的位姿。

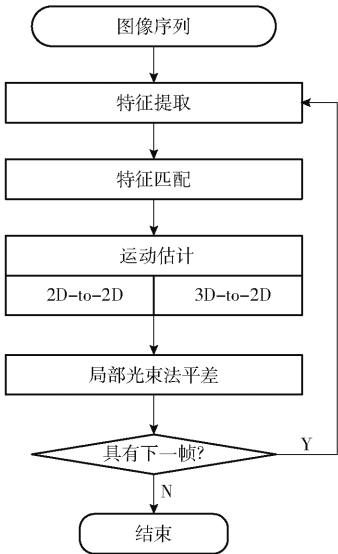


图 3 视觉里程计工作原理

Fig. 3 Operating principle of visual odometer

样地调查系统主要包含定义样地坐标系、构建全局一致的稀疏地图、每木检尺及参数计算 4 部分，如图 4 所示。定义的样地坐标系用于描述样地中每一棵树木的位置；构建全局一致性稀疏地图使每木检尺时所获取的手机位姿通过回环检测减少漂移，进而约束树木位置的估计误差；每木检尺过程观测样地中的所有树木；参数计算过程计算样地所代表区域的林分参数等。

为了减少位姿估计过程中的漂移，本文视觉里程计采用全局稀疏特征点地图的方式进行研究

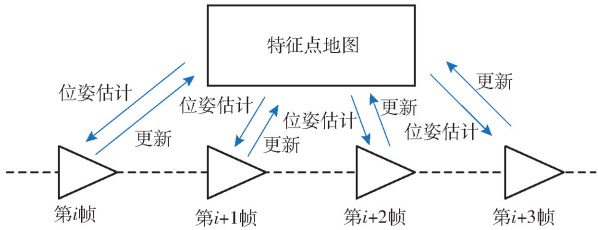


图 4 基于全局地图的视觉里程计

Fig. 4 Visual odometer based on global map

(图 4)。特征点地图中特征包含描述子、位置及其标准差信息。当获取到第 1 帧图像的特征点时，假设该帧所在位置为世界坐标原点且无旋转，故直接将所有特征点添加到特征点地图中并赋予适当的位置及标准差。当获取第 2 帧数据时与地图中的特征点进行匹配，基于匹配的点利用 P2P 算法、局部光束法平差估计该帧的位姿，获取到位姿后基于三角测量重新估计特征点地图中特征点的位置及其标准差；除此之外应将新获取的特征点添加到特征点地图。此后获取的帧数据则使用 EPNP 及局部光束法平差估计该帧图像的位姿，在更新特征点部分与第 2 帧相同。一个典型的位姿估计结果如图 5 所示。

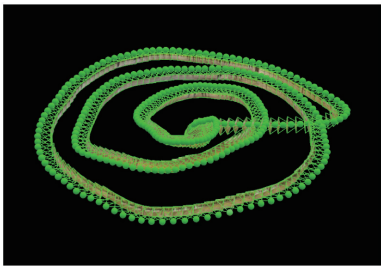


图 5 位姿估计结果示例

Fig. 5 Example of pose estimation results

2.2 立木位置与胸径估计系统构建

利用样地中拍摄的有序图像数据估计样地中立木的位置及胸径，通常所需要的立木位置使用以 x 轴水平向东、 y 轴正方向指向正北、 z 轴垂直向上的右手坐标系（样地坐标系）进行描述。然而，视觉里程计的全局坐标系是以第 1 帧图像的位姿构建的初始化坐标系。另外，视觉里程计假设第 2 帧图像与初始化坐标系原点的距离为单位距离。显然视觉里程计初始化坐标系描述下的位姿尺度不正确，且与目标坐标系——样地坐标系不一致。显然，在估计样地中立木位置前需要纠正其尺度，并构建从初始化坐标系到样地坐标系的转换，从而使所有帧数据能够在样地坐标系中描述，从而提取基于样地坐标系下的立木位置。然后，不同于传统基于 MVS (Multi-view stereo) 构建稠密点云并利用点云提取立木信息的方法，本文试图利用在图像上直接标注立木位置及胸径的方法估计待估单木信息。

2.2.1 样地坐标系构建

为构建样地坐标系,在扫描样地前首先在样地中放置如图 6 所示的特殊棋盘格,并使棋盘格上对应于样地中心的点与样地中心重合,箭头方向指示正北方向。在内业处理时,按照软件提示选择相关帧棋盘格对应的样地中心点及正北一点(图 7a),然后使用极线搜索和块匹配技术^[32]搜索其他相关帧对应于这两点的像素坐标,并通过三角测量的方法估计这两点在初始化坐标系的坐标值,然后便可依据棋盘格对应这两点的实际距离修正所有帧的实际位姿。尺度计算公式为

$$s = \frac{L}{\| \mathbf{x}_{north} - \mathbf{x}_{center} \|}$$
 (3)

式中 L ——棋盘格上两点的实际距离
 $\mathbf{x}_{north}$ 、 $\mathbf{x}_{center}$ ——棋盘格上正北一点及中心点在初始化坐标系中的坐标值

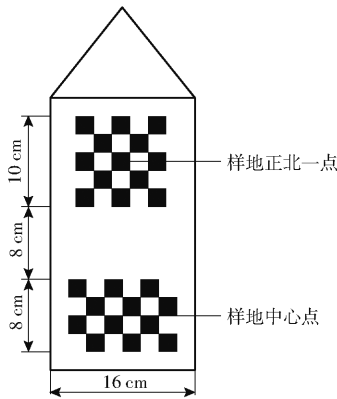


图 6 确定样地坐标系所使用的棋盘格
Fig.6 Chessboard used for building plot coordinate system

在修正尺度后便可获取正确尺度的样地中心及正北一点,为确定样地坐标系与初始化坐标系之间的变换关系还需要获取竖直方向的一个向量,本文通过假设样地中立木树干竖直向上估计该向量。如图 7b 所示,通过构建的森林样地调查系统在图像中选择立木地径及树干上一点,并使用极线搜索、块匹配技术搜索自动估计相应的在初始化坐标系中的坐标,则竖直方向的单位向量为

$$\mathbf{I}_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{x}_{top_i} - \mathbf{x}_{bottom_i}}{\| \mathbf{x}_{top_i} - \mathbf{x}_{bottom_i} \|}$$
 (4)

式中 $\mathbf{x}_{bottom_i}$ 、 $\mathbf{x}_{top_i}$ ——第 i 棵被标记立木的地径处一点及树干上一点的坐标

N ——被标记立木总数

由此,便可以估计样地坐标系 x 轴单位向量在初始化坐标系中为

$$\mathbf{I}_x = \frac{(\mathbf{x}_{north} - \mathbf{x}_{center}) \mathbf{I}_z}{\| (\mathbf{x}_{north} - \mathbf{x}_{center}) \mathbf{I}_z \|}$$
 (5)

y 轴的单位向量为

$$\mathbf{I}_y = \mathbf{I}_z \times \mathbf{I}_x$$
 (6)

由此可以获取由样地坐标系到初始化坐标系的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_{init_plot} = [\mathbf{I}_x \quad \mathbf{I}_y \quad \mathbf{I}_z]$$
 (7)

及平移向量

$$\mathbf{t}_{init_plot} = \mathbf{x}_{center}$$
 (8)

可以将所有图像位姿以样地坐标系进行表示。

2.2.2 立木位置及胸径估计

在样地构建过程中所有立木的地径可以自动将



图 7 森林调查系统操作界面
Fig.7 Forest survey system operation interfaces

立木胸高标记到图像(图 7c),胸径处点在图像中的像素坐标 $\tilde{u}=(u,v,1)$ 可由下式获取

$$z_{cam} \tilde{u} = K(R_{cam_{plot}} x_{plot} + t_{cam_{plot}}) \tag{9}$$

式中 x_{plot} ——胸高处一点在样地坐标系中的坐标值,其可由地径处点坐标 z 轴值加 1.3 m 获取

$R_{cam_{plot}}、t_{cam_{plot}}$ ——图像由样地坐标系变换到相机坐标系的旋转矩阵及平移向量,即图像在样地坐标系中的位姿的逆变换

K ——相机内方位元素矩阵

z_{cam} —— x_{plot} 在相机坐标系下的 z 轴坐标值

$\tilde{u}$ ——左、右侧边缘像素坐标

在获取到胸高处一点,基于极线搜索和块匹配精确化胸径处点,确保该点落在树干上。然后,需要在森林调查系统软件中点击树木胸高处左、右侧边缘以完成树木位置及胸径的估计(图 7d)。在点击立木左右边缘后,一个以该图像的位姿原点为原点、 z 轴水平指向胸径处点、 y 轴竖直向上的右手辅助相机坐标系被构建以便于参数估计,从而求解问题可以被描述到 $o_{AC}-x_{AC}-z_{AC}$ 平面内(图 8)。则立木的平面位置及胸径计算式为

$$x_C = x_{corr_bh} + \begin{bmatrix} 0 \\ d/2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$d = \frac{2|z_L x_C - x_L z_C|}{\|x_L\|} = \frac{2|z_R x_C - x_R z_C|}{\|x_R\|} \tag{11}$$

其中 $x_C = [x_C \ z_C]^T$ $x_L = [x_L \ z_L]^T$

$x_R = [x_R \ z_R]^T$

式中 $x_C、x_L、x_R$ ——树木位置在 $o_{AC}-x_{AC}-z_{AC}$ 平面的坐标

d ——胸径

$x_L、x_R$ ——树干边缘处点的平面坐标

x_{corr_bh} —— x_L 和 x_R 的中心点坐标

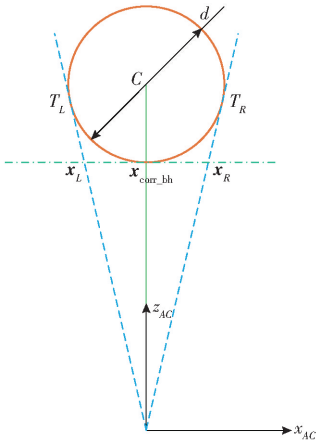


图 8 树木位置及胸径估计问题

其由胸径处点 $x_p = [x_p \ z_p]^T$ 及左右侧边缘的像素获取得

$$x = \|x_p\| \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{ac_c} K^{-1} \tilde{u} \tag{12}$$

式中 R_{ac_c} ——从相机坐标系到辅助坐标系的旋转矩阵

在获取到立木位置的平面位置 x_C 后设置其高度为胸径处点的高,便可换算到样地坐标系从而获取到样地坐标系描述下的立木位置。

3 实验材料与方法

3.1 研究区域概况

以北京市西山实验林场(39°58'N,116°11'E)为研究区域。该林场海拔为 300 ~ 400 m,平均降水量为 630 mm。研究区主要包括人工纯林和针阔混交林。选择了 12 块半径为 7.5 m 的圆形样地为研究对象,被选择样地地面灌草较少,以尽量减少环境对相机视野的阻挡。样地的基本情况如表 1 所示。

表 1 样地属性的描述统计

Tab. 1 Summary statistics of plot attributes

样地编号	立木数	主导树种	胸径/cm	
			均值	标准差
1	18	银杏	18.60	1.69
2	21	毛白杨	21.62	4.08
3	22	毛白杨	15.10	1.24
4	18	白蜡	18.75	2.16
5	17	白蜡	17.04	1.40
6	16	白蜡	16.37	2.93
7				

表 2 相机内参标定数据

Tab.2 Experimental result for camera calibration of intrinsic parameters

焦距/像素	像主点坐标/像素	畸变系数				
		k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
(3 008. 4,3 014. 6)	(1 922. 7,1 057. 5)	0.088 2	-0.202 2	0.090 7	-0.002 5	-0.003 4

各观测值进行评估,其计算公式为

$$B_{IAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ir})}{n}$$
 (13)

$$B_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{x_{ir}} - 1\right)}{n} \times 100\%$$
 (14)

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ir})^2}{n}}$$
 (15)

$$R_{rel} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{x_{ir}} - 1\right)^2}{n}} \times 100\%$$
 (16)

式中 x_i ——测量值
 x_{ir} ——相对于测量值 x_i 的参考值
 n ——测量值的总数
 B_{IAS} ——估计值偏差
 B_{rel} ——估计值相对偏差
 R_{MSE} ——估计值均方根误差
 R_{rel} ——估计值相对均方根误差

4 结果与分析

4.1 立木位置估计

立木位置估计值在 x 、 y 轴方向分别为 0.04、-0.03 m,且最大偏差不超过 0.10 m(表 3)。虽然样地 6 在 x 轴方向的 RMSE 达到 0.40 m,但总体而言估计值的 RMSE(0.21、0.17 m)较小。图 9 为所有样地中立木位置的误差,由图 9 可知,虽然单个样地中似乎立木位置存在系统误差,但总体而言其误差趋于 0 m,且最大误差小于 0.7 m。

4.2 胸径估计

经与参考值对比,胸径估计值具有较小偏差(0.09 cm, 0.51%)及较小的 RMSE(0.88 cm, 5.03%)(表 4)。其中,最大偏差及 RMSE 分别为 -0.95 cm 及 1.16 cm。由图 10 可见,胸径估计值与参考值相接近,且无偏差过大点;且不同径阶估计值也无明显偏差且具有相近的变异性(图 11)。

5 讨论

首先利用视觉里程计基本原理恢复了在森林样地中获取图像序列的位姿,然后利用构建的森林样

表 3 立木位置估计值的精度

Tab.3 Accuracies of tree position m

样地号	x		y	
	RMSE	BIAS	RMSE	BIAS
1	0.32	-0.02	0.08	0.02
2	0.02	0	0.24	-0.08
3	0.22	0.01	0.18	-0.08
4	0.13	0.05	0.04	0.01
5	0.07	0	0.13	-0.05
6	0.40	0.08	0.27	-0.03
7	0.19	0.09	0.17	0.02
8	0.25	0.10	0.20	-0.08
9	0.21	0.02	0.05	0.01
10	0.18	0.04	0.21	-0.05
11	0.09	0.02	0.10	-0.09
12	0.12	0.09	0.13	0.07
平均	0.21	0.04	0.17	-0.03

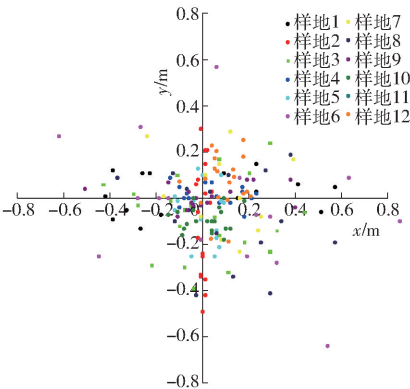


图 9 立木平面位置估计误差

Fig.9 Position errors of all trees in plots

表 4 胸径估计值的精度

Tab

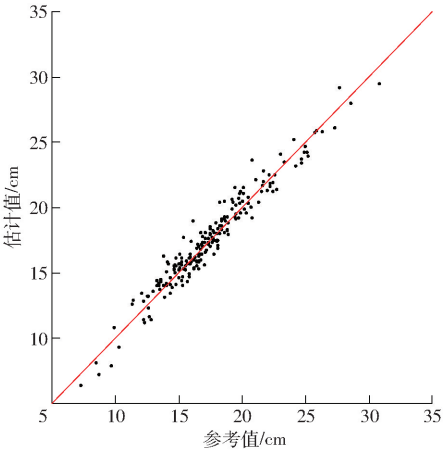


图 10 胸径估计值散点图

Fig. 10 Scatter plot of estimated DBH values

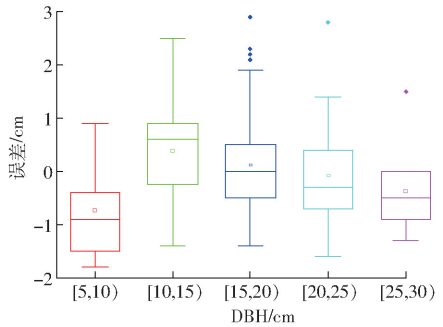


图 11 胸径估计值箱线图

Fig. 11 Errors of DBH observations for different DBH values

地调查系统通过构建样地坐标系、三角测量等过程估计了样地中立木胸径及位置。测试结果表明:立木位置估计值在 x 轴和 y 轴方向的 BIAS 分别为 0.04、 -0.03 m, RMSE 分别为 0.21、0.17 m;立木胸径估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 0.09 cm (0.51%) 和 0.88 cm (5.03%)。

目前对立木位置的研究相对较多,但较少明确给出精度。TANG 等^[32]利用移动激光雷达对不同

的样地进行了扫描,其运动轨迹的 RMSE 为 0.32、0.29 m,但未评估树木的精度。FAN 等^[10]利用 RGB-D SLAM 手机对立木位置进行了实时估计,其 x 轴及 y 轴方向均方根误差 (RMSE) 均为 0.12 m。LIU 等^[33]设计了一种实时动态多功能 CCD 连续摄影的地面观测仪器,通过点云提取立木位置,其偏差最大为 0.19 m,最小为 0.137 m,均方根误差 (RMSE) 最大为 0.201 m,最小为 0.162 m。显然,本文所构建调查系统所获取立木位置精度与以上方法所获取结果相似。

目前对立木胸径获取方法的研究较多。LIANG 等^[34]通过地面激光雷达获得点云数据并利用圆柱体拟合的方法来提取胸径,其胸径估计值的 BIAS 为 $-0.18 \sim 0.76$ cm, RMSE 为 0.74 ~ 2.41 cm;范永祥等^[35]基于 RGB-D SLAM 手机所构建的森林样地调查系统对立木胸径进行了评估,结果表明:胸径估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 0.36 cm (1.93%) 及 0.69 cm (3.89%);QIU 等^[36]利用连续摄影测量原理及图像识别技术研发了 PDA (Personal digital assistant) 摄影测树仪器,该设备估计胸径最大偏差为 2.1 cm,绝大多数样地测量偏差小于 1.5 cm。本文所构建系统所获取胸径精度与这些设备也相似。

6 结论

(1)设计了以视觉里程计估计、从森林样地中获取的有序图像序列的位姿;并构建了森林样地数据处理系统,以实现尺度修正、建立样地坐标系、立木位置及胸径标记、获取样地中立木位置及胸径。

(2)选取 12 块半径为 7.5 m 的圆形样地为研究对象,利用相机获取样地中连续图像序列。经所设计系统处理,所获取胸径及立木位置均具有较高精度。

参 考 文 献

[1] DAVID M H, SONJA N, OSWALT E, et al. Status and trends in global primary forest, protected areas, and areas designated for conservation of biodiversity from the global forest resources assessment [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 352: 68 – 77.

[2] SATORU M, MICHAEL A, THOMAS H, et al. Protective functions and ecosystem services of global forests in the past quarter-century [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 352: 35 – 46.

[3] KEENAN R, REAMS G, FREITAS J, et al. Dynamics of global forest area: results from the 2015 global forest resources assessment [J]. Forest Ecol. Manage, 2015, 352: 9 – 20.

[4] AERTS R, HONNAY O. Forest restoration biodiversity and ecosystem functioning [J]. BMC Ecol., 2011, 11: 29.

[5] MICHAEL K, RODEL L, MIGUEL C, et al. Changes in forest production, biomass and carbon: results from the 2015 UN FAO global forest resource assessment [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 352: 21 – 34.

[6] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. Science, 2008, 320: 1444 – 1449.

[7] PIAO S L, HUANG M T, LIU Z, et al. Lower land-use emission responsible for increased net land carbon sink during the slow warming period [J]. Nat. Geosci., 2018, 11: 739 – 743.

[8] FAO. Voluntary guidelines on national forest monitoring [R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2017.

[9] CHEN Wei, HU Xingbo, CHEN Wen, et al. Airborne LiDAR remote sensing for individual tree forest inventory using trunk detection-aided mean shift clustering techniques [J]. Remote Sens., 2018, 10: 1078.

- [10] FAN Y, FENG Z, MANNAN A, et al. Estimating tree position, diameter at breast height, and tree height in real-time using a mobile phone with RGB-D SLAM [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1845.
- [11] 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.
XU Weiheng. Study on handheld tree measurement smart station manufacture and function test [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [12] NEWNHAM G J, ARMSTON J D, CALDERS K, et al. Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement [J]. *Curr. For. Rep.*, 2015, 1: 239–251.
- [13] 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)
- [14] HOMOLOVÁ L, MALENOVSKÝ Z, CLEVERS J G, et al. Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping [J]. *Ecol. Complex.*, 2013, 15: 1–16.
- [15] 刘金成, 冯仲科, 杨立岩, 等. 实时动态多功能双目立体摄影测树仪设计 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 61–68.
LIU Jincheng, FENG Zhongke, YANG Liyan, et al. Design of real-time kinematic multi-functional binocular stereo-photogrammetric dendrometer [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(22): 61–68. (in Chinese)
- [16] JUNGHEE L, JUNGHO I, KYUNGMIN K, et al. Machine learning approaches for estimating forest stand height using plot-based observations and airborne LiDAR data [J]. *Forests*, 2018, 9: 268.
- [17] DASH J P, MARSHALL H M, RAWLEY B. Methods for estimating multivariate stand yields and errors using k-NN and aerial laser scanning [J]. *Forestry: Int. J. Forest Res.*, 2015, 88: 237–247.
- [18] SÉBASTIEN B, HARM B, KIM C, et al. Forest inventory with terrestrial LiDAR: a comparison of static and hand-held mobile laser scanning [J]. *Forests*, 2016, 7: 127.
- [19] BĚLAND M, WIDLOWSKI J L, FOURNIER R A, et al. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2011, 151: 1252–1266.
- [20] LIANG X, HYYPPÄ J, KUKKO A, et al. The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots [J]. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2014, 11: 1504–1508.
- [21] SAARINEN N, VASTARANTA M, NASI R, et al. Assessing biodiversity in boreal forests with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging [J]. *Remote Sens.*, 2018, 10(2): 338–360.
- [22] WHITE J C, COOPS N C, WULDER M A, et al. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review [J]. *Can. J. Remote Sens.*, 2016, 42: 619–641.
- [23] SCARAMUZZA D, FRAUNDORFER F. Visual odometry part I: the first 30 years and fundamentals [J]. *IEEE Rob. Autom. Mag.*, 2011, 18: 80–92.
- [24] 张朝阳. 基于数码照相的开采沉降模型实验数据采集与处理[D]. 西安: 西安科技大学, 2018: 17–18.
ZHANG Zhaoyang. Data acquisition and processing of mining subsidence model experiment based on digital photography [D]. Xian: Xian University of Science and Technology, 2018: 17–18. (in Chinese)
- [25] SIMON T, IGOR Š. Fusion of visual odometry and inertial navigation system on a smartphone [J]. *Computers in Industry*, 2015, 74: 119–134.
- [26] DURRANT W H, BAILEY T. Simultaneous localization and mapping: part I [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(2): 99–110.
- [27] SILVA B, BURLAMAQUI A, GONCALVES L. On monocular visual odometry for indoor ground vehicles, robotics symposium and latin american robotics symposium (SBR-LARS) [J]. *Brazilian*, 2012, 43: 220–225.
- [28] STRAUB J, HILSENBECK S, SCHROTH G, et al. Fast relocalization for visual odometry using binary features [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2013: 2548–2552.
- [29] NISTER D, NARODITSKY O, BERGEN J. Visual odometry, computer vision and pattern recognition [C] // *CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference*, 2004: 652–659.
- [30] 祝朝政, 何明, 杨晟, 等. 单目视觉里程计研究综述 [J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(7): 20–28, 55.
ZHU Chaozheng, HE Ming, YANG Sheng, et al. Survey of monocular visual odometry [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(7): 20–28, 55. (in Chinese)
- [31] 高翔, 张涛, 刘毅, 等. 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 320–325.
- [32] TANG J, CHEN Y, KUKKO A, et al. SLAM-aided stem mapping for forest inventory with small-footprint mobile LiDAR [J]. *Forests*, 2015, 6: 4588–4606.
- [33] LIU Jincheng, FENG Zhongke, YANG Liyan, et al. Extraction of sample plot parameters from 3D point cloud reconstruction based on combined RTK and CCD continuous photography [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1299–1321.
- [34] LIANG X, HYYPPÄ J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels [J]. *Sensors*, 2013, 13: 1614–1634.
- [35] 范永祥, 冯仲科, 陈盼盼, 等. 基于 RGB-D SLAM 手机的森林样地调查系统研究 [J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 226–234.
FAN Yongxiang, FENG Zhongke, CHEN Panpan, et al. Research on forest plot survey system based on RGB-D SLAM mobile phone [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 226–234. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190824&journal_id=jcsam