引文格式:尹伯卿,邢艳秋,杨书航,等.林下单木定位视觉SLAM算法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(4):792-801.DOI:10.13203/j.whugis20220794

Citation: YIN Boqing, XING Yanqiu, YANG Shuhang, et al. Visual SLAM Algorithm for Individual Tree Localization in Forest [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(4):792-801.DOI:10.13203/j.whugis20220794

林下单木定位视觉SLAM算法研究

尹伯卿[1] 邢艳秋[1] 杨书航[1] 常晓晴[1] 丁志文[1]

1 东北林业大学森林作业与环境研究中心,黑龙江 哈尔滨,150040

摘 要:森林中立木的单木定位是林业遥感领域中的重要问题,基于单目相机的视觉即时定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)算法是室外空间定位和建图的重要手段,解决了由于树木冠层遮挡导致的全球导航卫星系统信号缺失问题,然而现有的单目视觉SLAM算法无法实现样地内立木直接定位。为解决此问题,基于单目视觉SLAM算法,提出了单木SLAM(individual tree SLAM, Indi-tree SLAM)算法。该算法通过使用图像序列进行相机位姿估计、地图尺度恢复、单木位置判断和单木位置坐标计算等过程可实现样地中的立木直接定位。采用相机对3块边长为40 m的方形样地进行样地扫描,对Indi-tree SLAM算法进行精度验证。实验结果表明,Indi-tree SLAM算法所计算的样地立木坐标在沿x轴和y轴方向的均方根误差均为0.44 m,平均定位误差为6.3%。Indi-tree SLAM算法实现了样地内立木的直接定位,缩短了森林结构参数测量时间,为森林资源调查提供了一种准确、高效的可行性方案。

关键词:单目视觉;SLAM;图像增强;逆深度;单木定位

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-01-20

DOI:10.13203/j.whugis20220794 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0792-10

Visual SLAM Algorithm for Individual Tree Localization in Forest

YIN Boqing[1] *XING Yanqiu*[1] *YANG Shuhang*[1] *CHANG Xiaoqing*[1] *DING Zhiwen*[1]

1 Center for Research Institute of Forest Operations and Environment, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: **Objectives**: Individual tree localization is an important issue in the field of forestry remote sensing. Monocular visual simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithm is a significant tool for outdoor spatial localization and mapping, which solved the problem of inability to locate due to missing global navigation satellite system signal caused by tree canopy occlusion in forest resource survey. However, the existing monocular vision SLAM algorithm cannot achieve direct localization of standing trees in sample plots. To solve this problem, we proposed the individual tree (Indi-tree) SLAM algorithm based on monocular vision SLAM algorithm. **Methods**: First, camera pose estimation was performed using the direct sparse odometry SLAM algorithm and the actual displacement of the camera was applied to restore the map scale. Afterwards, according to the principle of edge detection technique in depth image, the position of standing trees in sample plots was determined. Finally, the camera coordinates and tree coordinates were converted based on the relationship between the camera and standing trees during the image acquisition process, ultimately achieving the direct positioning of standing trees within the sample plots. **Results**: In this experiment, three square sample plots with a side length of 40 m were scanned by the camera to verify the accuracy of the Indi-tree SLAM algorithm. The experimental results indicated that the root mean square error of the sample wood coordinates calculated by the proposed single-wood positioning algorithm was 0.44 m along both x and y axis, and the average positioning error is 6.3%. **Conclusions**: This study achieves direct positioning of standing trees in the sample plots, greatly reducing the measurement time of forest structure parameters

基金项目:国家重点研发计划(2021YFE0117700-6)。

第一作者:尹伯卿,硕士,研究方向为林业遥感。boqingyin@nefu.edu.cn

通信作者:邢艳秋,博士,教授。yanqiuxing@nefu.edu.cn

and offering an accurate and efficient feasible solution for forest resource inventory.

Key words: monocular vision; SLAM; image enhancement; inverse depth; individual tree localization

森林资源作为有限的再生资源和重要的环境资源,在碳循环以及日常生产中有着重要作用[1-4]。准确获取林区的空间分布和定位,可以为森林资源的调查和管理提供技术支撑,对促进经济发展和提升社会效益有重要意义[5-6]。随着遥感技术的发展,遥感已经成为精准林业中提取林木结构参数的重要手段[7-10],为估测森林碳储量和生物量提供了基础的数据支持[11-13]。近年来,计算机视觉技术在林业遥感中被广泛应用[14-18],在相机遥感设备中,单目相机相较于双目相机和深度(red green blue-depth,RGB-D)相机,具有价格低廉、功耗低、体积小,无需采用固定相机位置,可以更加灵活地对目标物从多角度进行观察等优势,被广泛应用。

目前,相机遥感研究大多采用近景摄影测量[19]、运动恢复结构[20](structure from motion, SfM)等方法。具体应用中,文献[21]利用普通数码相机结合近景摄影测量原理、数字图像测量及对应的比例转换来进行单木结构参数的提取,其估测精度为87.65%;文献[22]使用SfM的方法对采集图像数据的样地进行三维重建,通过恢复林分的三维空间结构实现了对林分立木结构参数以及生物量等因子的直接和间接估计。虽然以上方法都有良好的建图和林分立木结构参数提取效果,但由于在森林调查样地中缺少开阔条件,林下经常发生全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)信号丢失[23]、设备无法摆放的情况,导致难以进行林地定位与点云地图的构建。即时定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术的出现解决了上述问题,其中视觉SLAM(vision SLAM, V-SLAM)技术通过图像序列对周围环境进行轨迹追踪和建图,可实现传感器的定位和全局一致点云地图的构建,进而达成林地立木定位和垂直结构参数提取的目的。

国内外学者对V-SLAM技术进行了大量研究,其中特征点法SLAM系统的应用较为广泛,文献[24]提出并实现了第一个可以实施运行的单目V-SLAM系统MonoSLAM,该系统使用拓展卡尔曼滤波器进行后端优化;文献[25]提出了并行跟踪映射系统,创新性地引用非线性优化为后端,使追踪线程和建图线程可以并发运行,并且该系统首次使用关键帧机制,极大降低了后端处理的数据量;文献[26-28]提出了利用ORB(oriented fast and rotated brief)特征点法提取图像特征的ORB-SLAM系统,该系统在回环检测线程中使用词袋进行闭环探测,通过闭环矫正达到对本质图优化的目的,实现追踪、建图和回环检测的并行化。由于特征点法SLAM系统较为依赖特征点的提取和配准,在面对低纹理环境时经常发生由于特征点提取数量较少所导致的误匹配的现象,为解决特征点法面对低纹理环境时定位丢失的问题,基于直接法的单目视觉里程计法被提出。文献[29]提出的LSD(large-scale direct)-SLAM系统是首个不采用特征的实时SLAM系统,能够在估计相机位姿的同时创建半稠密三维点云地图;文献[30]提出了直接稀疏里程计(direct sparse odometry, DSO)-SLAM系统,该系统采用图像内具有强度梯度的像素点,使系统速度达到了传统特征点法的5倍,且创新性地提出了完整的光度标定方法,对相机曝光时间、暗角和伽马响应等参数进行标定,显著提升了系统的鲁棒性。在林业领域具体应用中,文献[23]利用双目相机对样地进行扫描,通过ORB-SLAM算法对林下控制点进行定位,为林下实时定位提供了一种可行性思路,但实验未进行样地内立木定位精度评估;文献[31]基于特征视觉里程计使用大疆灵眸Osmo型口袋云台相机对多块半径为7.5 m的样地进行立木位置估计,其估测值沿x和y轴方向的均方根误差分别为0.21 m和0.17 m,精度较高但未进行较大样地立木定位实验。在森林资源调查中,往往遇到林下纹理性和亮度低的问题,DSO-SLAM算法可直接对像素点的强度进行操作,避免了特征点的提取,对特征少的林下环境进行追踪和建图时有更高的鲁棒性,但使用该算法无法直接对林地立木进行定位。为解决上述问题,本文基于DSO-SLAM算法提出了适用于林业的单木SLAM(individual tree SLAM, Indi-tree SLAM)算法。

为探究Indi-tree SLAM算法在森林资源调查方面的应用潜力,选择位于中国黑龙江省哈尔滨市的城市林业示范基地樟子松林和蒙古栎林为研究对象,根据林地地形的随机分布特点建立随机样地,使用Indi-tree SLAM算法对样地内立木进行单木定位实验,以期为森林调查提供一种精准的单木定位方法。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

研究区位于哈尔滨市城市林业示范基地(126°37′15″E,45°43′10″N),海拔136～140 m,属于典型中温带大陆性季风气候,四季分明,冬长夏短。冬季1月平均气温约−18.7 ℃;夏季7月的平均气温约25.9 ℃。全年平均降水量557.5 mm,降水主要集中在6月—9月,降雪主要集中在每年11月至次年1月。研究区覆盖有蒙古栎、黑皮油松、樟子松等18种人工林,如图1所示。

根据树种和林分密度,选取研究区内3块边长为40 m的方形样地作为研究对象,如图2所示。样地内空间结构层次分明,无灌木遮挡,样地属性如表1所示。

1.2 单目相机图像数据采集

2022年5月21日使用佳能750D单目相机搭配光学镜头进行林地图像采集,相机频率为25 Hz,水平视角60°,图像分辨率为1 920×1 080像素,如图3(a)所示。为了防止定位丢失,且能采集到样地内所有立木的位置信息,在每块实验样地内预先设计一条包含林中所有立木的闭合采集路线[32],如图3(b)所示。实验时使用单目相机匀速行走进行数据采集,当经过样地待测立木时,相机应位于其右侧进行拍摄。

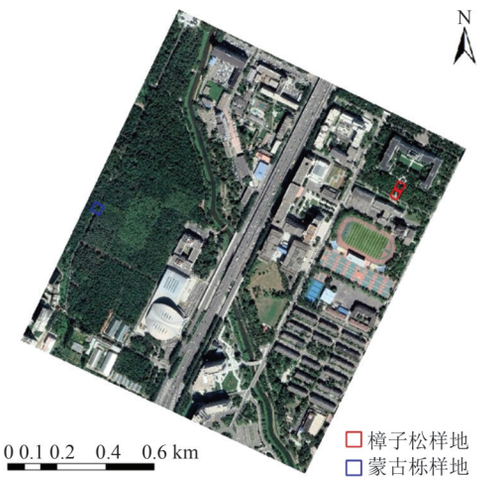


图1 研究区域位置及样地分布示意图

Fig. 1 Diagram of Regional Location and Distribution of Sample Plots



(a) 林地1 (b) 林地2 (c) 林地3

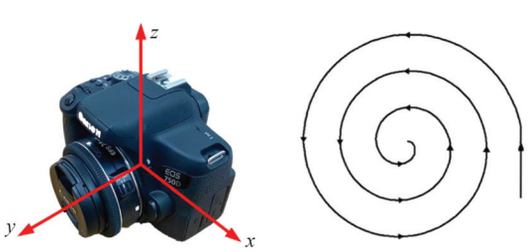
图2 实验样地

Fig. 2 Experimental Sample Plots

表1 样地属性

Table 1 Sample Properties

样地编号	优势树种	胸径/cm	株树/株
1	樟子松	20.41	22
2	樟子松	22.72	25
3	蒙古栎	18.85	34



(a) 单目相机 (b) 行进路线

图3 单目相机及行进路线

Fig. 3 Monocular Camera and Route

1.3 样地立木空间位置采集

在实验样地中使用Postex林地调查仪进行样地立木位置坐标测量,如图4所示,Postex林地调查仪基于超声波原理,通过3个反射器接收声波信号的方式可获取待测立木到中心点的距离r和角度θ,进而通过极坐标转换得到真实尺度下的坐标值。相较于传统全站仪测量设备,Poxtex林地调查仪测量距离和角度误差分别仅为1%和0.1%,具有操作便捷、携带方便和测量精度高等优点。利用Postex林地调查仪确定样地中所有立木的空间坐标,记录样地所有立木空间位置信息,作为本文实验中样地立木位置坐标的真值。

2 研究方法

使用Indi-tree SLAM算法进行样地立木定位的主要步骤包括数据集构建、Indi-tree SLAM算法和精度验证,流程图如图5所示。

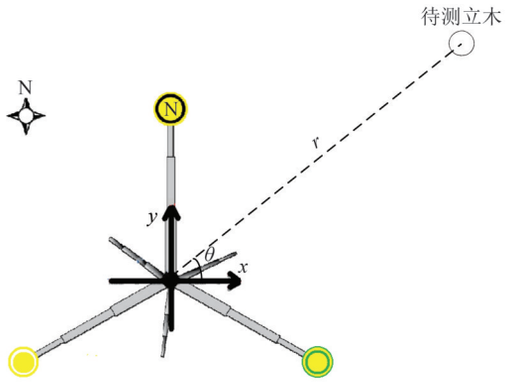


图 4　Postex林地调查仪测量模型

Fig. 4　Measurement Model of Postex

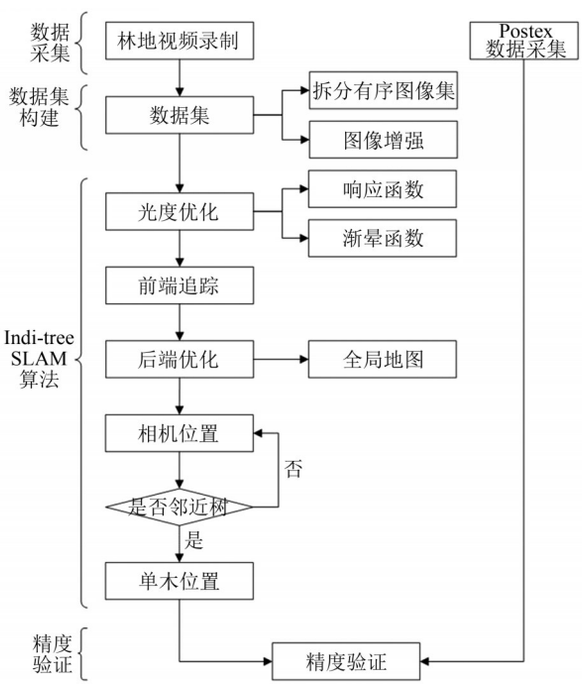


图 5　技术流程图

Fig. 5　Technical Flowchart

2.1　数据集构建

采用单目相机进行林地图像采集,相机频率为25 Hz。共采集14 151帧图像,其中样地1共计4 741帧图像,样地2共计4 277帧图像,样地3共计5 133帧图像,构建数据集的具体方法如下:

首先,按照相机频率对视频进行图像拆分,对拆分后的图像使用拉普拉斯算子与图像中各个像素点的灰度值进行卷积,使用像素点梯度的平方和作为评价函数对图像进行初次筛选,其中评价函数$D(f)$为:

$$D(f)=\sum_x\sum_y G^2(x,y) \tag{1}$$

式中,$G(x,y)$为拉普拉斯算子与像素点灰度值的卷积。

其次,利用数字图像处理学中的直方图均衡化算法对图像进行图像增强处理:使用累积分布函数对原始分布进行映射运算,生成新的均匀拉伸的分布,从而增强图像的对比度,提升图像的纹理性,消除细小高亮区域。累积分布函数的计算公式为:

$$f(D_A)=\frac{L_d}{A_0}\int_0^{D_A}H_A(D)\mathrm{d}D \tag{2}$$

式中,$f(D_A)$为图像A直方图均衡化后的对应像素点灰度值;L_d为灰度级深度;A_0为像素点个数;D为像素点灰度值;$H_A(D)$为图像A的直方图分布函数。

最后,对输出的图像进行高斯滤波处理,对整幅图像进行加权平均计算以降低噪声对图像的影响,使图像变得平滑,进一步降低亮度等外界因素对图像质量的影响。

2.2　Indi-tree SLAM 算法

Indi-tree SLAM算法中位姿估计以图像的亮度值为出发点,亮度值的准确度会影响算法的精度和稳定性,因此使用光度标定[33]的方法,使用精细的相机成像模型(见图6),标定成像过程中的光度参数,并对相机图像进行亮度值校正。光度模型公式为:

$$I(x)=G\big(tV(x)B(x)\big) \tag{3}$$

式中,$I(x)$为相机获取的图像;$G(\cdot)$为相机的响应函数;t为图像曝光时间;$V(x)$为归一化的渐晕函数;$B(x)$为辐照度图像。

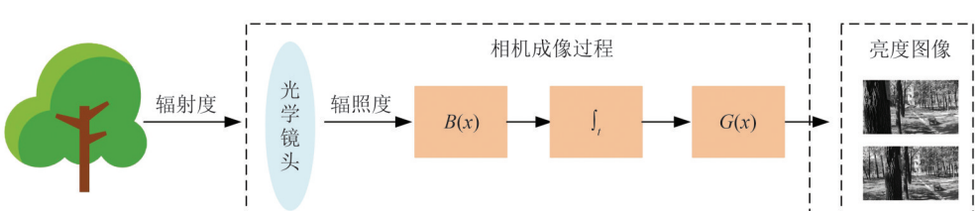


图 6　相机成像模型

Fig. 6　Camera Imaging Model

对图像进行光度优化后,根据样地内林木的纹理信息,使用图像梯度图提取图像梯度点,将第一帧初始化的梯度点投影到当前帧图像中构建残差,并采用光流金字塔对初始相对运动进行

估计:将相邻两个林地图像中提取到的梯度点全部投影到当前图像中,通过调整位姿和光度仿射模型使得两帧图像间的光度误差值最小,以实现对相机位姿的估计。随着时间积累,位姿信息和地图点信息不断增加,后端优化线程使用滑动窗口将窗口内每个地图点投影到除主导帧之外的其他图像帧上,产生投影误差。通过优化投影误差、相机位姿与地图点,同时利用图像边缘化处理去除逆深度信息、保留位姿信息,提高算法运行效率。

在相机在林地运动过程中,传统SLAM算法可以通过位姿估计进行传感器定位,而无法直接计算样地内立木的位置坐标。因此,Indi-tree SLAM算法通过深度图像边缘检测原理进行待测立木出现和消失的图像帧判断,如图7所示。首先,在林地图像左侧区域设置检测窗口;其次,计算第i帧图像中检测窗口内未成熟地图点(图像中通过极线追踪可以计算出逆深度和范围的像素点)深度值的平均值作为参考值$\bar{d}_i$,并计算得出连续两帧之间的参考值的变化值Δd_{i+1};最后,检测深度图跳跃型边缘,判断待测立木出现和消失的位置并进行记录,检测公式为:

$$|\Delta d|>\delta \tag{4}$$

式中,Δd为连续两帧图像之间深度参考值的差值;δ为两次深度变化参考值。

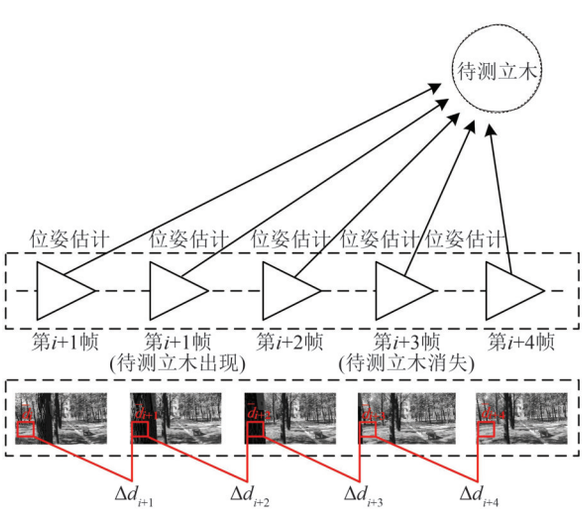


图7 单木位置判断

Fig. 7 Judgement the Position of Individual Tree

由于Indi-tree SLAM算法使用单目相机进行定位和地图构建,初始化时只能计算图像像素点相对深度,运动轨迹和地图存在尺度不确定性,故在进行坐标计算时需要进行尺度恢复以人的实际移动距离来还原SLAM地图的真实尺度,首先,在初始化过程中确定出至少两个关键帧,测量实际移动距离来确定地图尺度;后续以两控制点间(如起始点和地图拐点)人的实际位移迭代优化SLAM地图的尺度信息,恢复地图的真实尺度;最后,通过3组对应控制点求解旋转和平移矩阵,将SLAM初始坐标系转换到样地坐标系下。尺度计算公式为:

$$s=\frac{L}{\sqrt{(x_i-x_{i+1})^2+(y_i-y_{i+1})^2}} \tag{5}$$

式中,s为SLAM地图到真实世界的尺度因子;L为两控制点的真实距离;(x,y)为控制点在初始化坐标系中的坐标值。

如图8所示,相机所处的位置为通过单木位置判断得到的坐标,由于相机视角和轨迹规划的影响,待测立木位于距离相机行进方向垂直距离l处,相机位置并非待测立木位置,因此需要通过相机和立木的位置关系进行坐标转换。二者的坐标转换方程为:

$$\Delta x=\cos\left(\theta+\frac{\alpha}{2}\right)\times l\times\csc\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{6}$$

$$\Delta y=\sin\left(\theta+\frac{\alpha}{2}\right)\times l\times\csc\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{7}$$

式中,θ为相机瞬时行进方向的夹角;l为相机与待测立木的垂直距离;α为相机的视角范围。

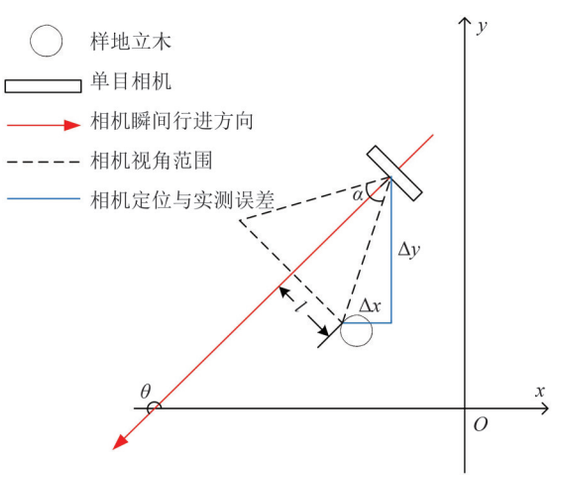


图8 坐标转换示意图

Fig. 8 Diagram of Coordinate Transformation

2.3 单木定位精度验证

以Postex林地调查仪测量结果为真值,统计样地内立木坐标值沿x和y轴的偏移误差,计算3块实验样地的均方根误差(root mean square error,RMSE)、距离偏差、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和到样地中心点距离误差,计算公式为:

$$x_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i^2}{n}} \tag{8}$$

$$y_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta y_i^2}{n}} \tag{9}$$

$$l_{\mathrm{MAE}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\Delta x_i^2+\Delta y_i^2}}{n} \tag{10}$$

$$\rho=\frac{|s_i-s_i'|}{s_i}\times 100\% \tag{11}$$

式中,x_{RMSE}和y_{RMSE}分别表示x轴和y轴上的均方根误差;l_{MAE}代表平均绝对误差;ρ代表相对误差百分比。n为样地内立木的数目;Δx_i为样地第i株立木坐标沿x轴的偏移量;Δy_i为样地第i株立木坐标沿y轴的偏移距离;s_i为样地第i株立木实测坐标到样地中心点的距离;s_i'为样地第i株估测坐标到样地中心点的距离。

3　结果与分析

3.1　Indi-tree SLAM算法运行结果

Indi-tree SLAM算法运行过程如图9所示,红色线段为相机轨迹,在图像帧中用不同的颜色表示梯度点的深度信息,其中蓝色表示深度值较大,红色反之。算法进行初始化后,在每张图像上追踪未成熟地图点,计算未成熟地图点的逆深度和变化范围,确定未成熟地图点的三维坐标,同时对图像关键帧进行单木位置判断。

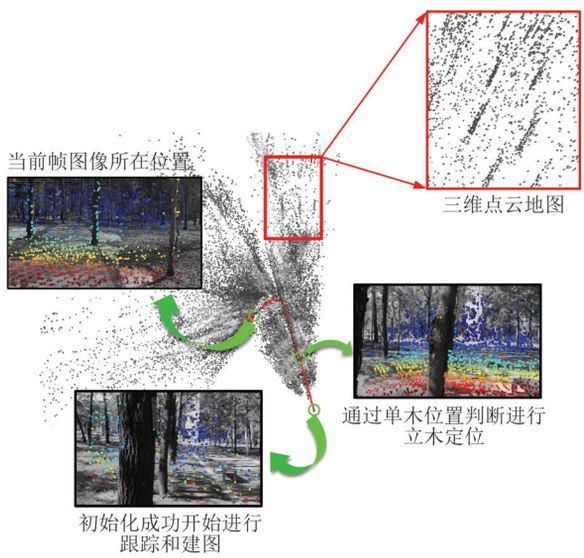
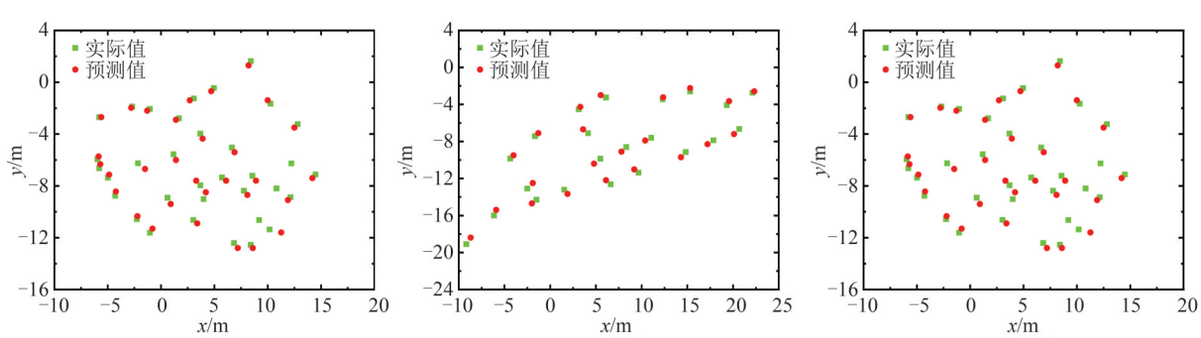


图9　算法运行示意图

Fig. 9　Diagram of Algorithm Operation

分别对样地内立木位置分布和林地图像采集以及算法运行时间进行统计,结果如图10和表2所示。3块样地的实测立木数量分别为22株、25株和34株;Indi-tree SLAM算法估测的立木数量分别为22株、23株和31株,与实测数量基本一致。相比人工测量,本文方法不仅降低了人力物力的损耗,还极大缩短了森林资源调查时林地作业时间。



(a) 样地1　(b) 样地2　(c) 样地3

图10　单木定位结果

Fig. 10　Results of Individual Tree Localization

表2　算法运行时间/s

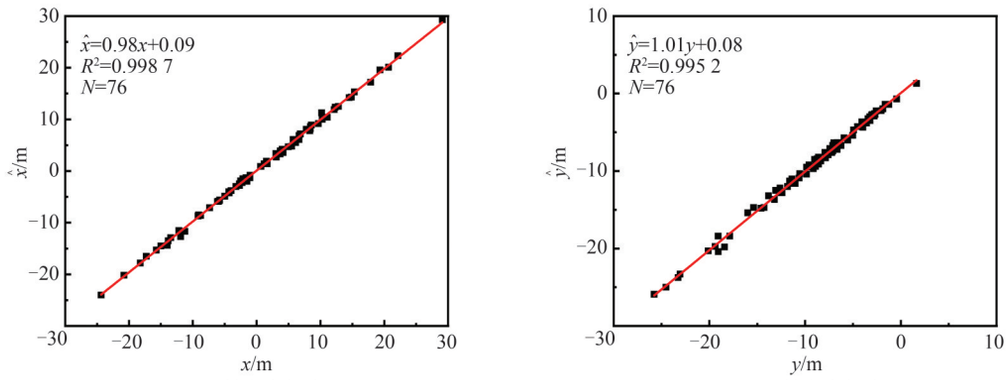
Table 2　Algorithm Runtime/s

样地编号	林地视频采集时间	初始化时间	算法运行时间
样地1	189	22	195
样地2	171	18	172
样地3	204	19	202
平均	188	20	190

3.2　定位精度评价与分析

对样地内单木位置坐标估测值和实测值进行统计分析,统计结果如图11和表3所示。图11中(x,y)和$(\hat{x},\hat{y})$分别表示立木实测坐标和估测坐标。回归直线拟合决定系数R^2均大于0.99,且3块样地立木坐标的RMSE均在0.5 m范围内,立木到样地中心点平均误差为6.3%,结果表明本文

算法估测值沿x轴和y轴方向坐标值精度较高，估测坐标与实测坐标结果基本一致。



(a) x轴方向拟合　(b) y轴方向拟合

图11　单木坐标验证结果

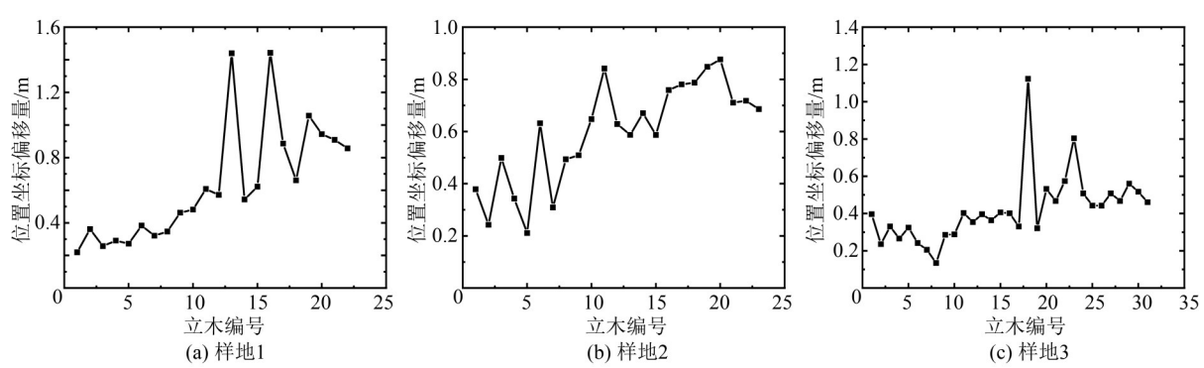
Fig. 11　Verification Results of Individual Tree Coordinates

表3　Indi-tree SLAM算法定位精度

Table 3　Positioning Accuracy of Indi-tree SLAM

样地编号	x_{RMSE}/m	y_{RMSE}/m	l_{MAE}/m	最大偏移误差/m	到样地中心点距离误差/%
样地1	0.46	0.56	0.63	1.44	6.2
样地2	0.46	0.43	0.60	0.88	6.7
样地3	0.39	0.33	0.48	1.12	5.9
平均值	0.44	0.44	0.57	1.44	6.3

位置坐标偏移量也是判断算法优劣的重要指标，本文对偏移量与样地立木编号二者之间的关系进行了探究，如图12所示，横坐标表示样地内立木编号，纵坐标表示对应立木位置坐标偏移量。结合采集路线可知，估测坐标值有不同程度的误差，采集路线中直线段处的立木具有较高的定位精度，其中偏移量较大的点多出现在采集路线方向发生改变的位置，且偏移量随着测量立木数量的增加会持续累积。分析其原因：Indi-tree SLAM算法基于DSO-SLAM算法，进行定位时不可避免地出现累积误差，且不可消除，应当适当减少样地面积和路线长度，以降低累积误差。



(a) 样地1　(b) 样地2　(c) 样地3

图12　单木位置偏移量

Fig. 12　Position Offset of Individual Tree

对同类林地定位算法进行统计分析，如表4所示，Indi-tree SLAM算法定位精度介于三者之间，表明：(1)使用像素强度进行相机位姿估计，更加适用于林下低纹理环境；(2)在采集设备上，大疆灵眸Osmo型口袋云台相机可以大幅度减少行走时抖动带来的影响，极大提高了数据集的质量，RGB-D相机可以直接获取图像深度信息，降低地图尺度恢复带来的误差；(3)样地面积较大，采集路线过长，导致算法累计误差增大，整体精度下降。

4　结　语

使用Indi-tree SLAM算法在林下低纹理环境的条件下进行追踪和建图，可以直接进行样地

表4　不同算法定位精度对比

Table 4　Comparison of Different Algorithms Positioning Accuracy

算法	样地面积/m^2	采集设备	定位点	x_{RMSE}/m	y_{RMSE}/m
Indi-tree SLAM	40×40	单目相机	控制点	0.44	0.44
文献[23]	40×40	双目相机	立木	0.81	0.65
文献[31]	$7.5^2\times\pi$	大疆灵眸Osmo型口袋云台相机	立木	0.21	0.17
文献[32]	$7.5^2\times\pi$	RGB-D相机	立木	0.12	0.12

内立木定位,为森林资源调查提供了一种廉价、高效、便捷的可行性方案,实现了计算机视觉技术在森林资源调查中的应用。

利用Indi-tree SLAM算法对样地内立木进行单木定位,定位结果与实测结果基本一致,提高了测量效率。相机图像采集前应进行合理规划,适当减少样地面积、行进路线长度和旋转角度;采集时可使用云台保持相机平稳匀速前进,降低样地立木定位误差,提高算法定位精度。

Indi-tree SLAM算法的定位精度还有一定的提升空间。后续研究中,可以通过联合惯性导航单元的方法[34]辅助定位与建图,降低地图尺度恢复带来的误差,以进一步提高算法性能和精度。

参　考　文　献

[1] CHANG X Q, XING Y Q, WANG J Q, et al. Effects of Land Use and Cover Change (LUCC) on Terrestrial Carbon Stocks in China Between 2000 and 2018[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 182: 106333.

[2] 赵苗苗, 赵娜, 刘羽, 等. 森林碳计量方法研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3797-3807.
ZHAO Miaomiao, ZHAO Na, LIU Yu, et al. An Overview of Forest Carbon Measurement Methods [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 3797-3807.

[3] 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 41-54.
XIE Xinyao, LI Ainong, JIN Hua'an. The Simulation Models of the Forest Carbon Cycle on a Large Scale: A Review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 41-54.

[4] 韩士杰, 王庆贵. 北方森林生态系统对全球气候变化的响应研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(4): 1-20.
HAN Shijie, WANG Qinggui. Response of Boreal Forest Ecosystem to Global Climate Change: A Review [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(4): 1-20.

[5] BONAN G B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests [J]. *Science*, 2008, 320 (5882): 1444-1449.

[6] HYYPPÄ J, VIRTANEN J P, JAAKKOLA A, et al. Feasibility of Google Tango and Kinect for Crowdsourcing Forestry Information [J]. *Forests*, 2018, 9(1): 6.

[7] 黄志鑫, 邢涛, 邢艳秋, 等. 基于动态圆柱拟合的背包激光雷达单木骨架曲线提取[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(12): 68-76.
HUANG Zhixin, XING Tao, XING Yanqiu, et al. Extraction of Single Tree Skeleton Curves Based on Dynamic Cylinder Fitting by Using Backpack Laser Scanning[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(12): 68-76.

[8] 胡凯龙, 刘清旺, 庞勇, 等. 基于机载激光雷达校正的ICESat/GLAS数据森林冠层高度估测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 88-95.
HU Kailong, LIU Qingwang, PANG Yong, et al. Forest Canopy Height Estimation Based on ICESat/GLAS Data by Airborne LiDAR[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16): 88-95.

[9] 李增元, 陈尔学. 中国林业遥感发展历程[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 292-301.
LI Zengyuan, CHEN Erxue. Development Course of Forestry Remote Sensing in China[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 292-301.

[10] 胡凯龙, 刘清旺, 崔希民, 等. 多源遥感数据支持下的区域性森林冠层高度估测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(2): 289-296.
HU Kailong, LIU Qingwang, CUI Ximin, et al. Regional Forest Canopy Height Estimation Using Multi-source Remote Sensing Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 289-296.

[11] ESTOQUE R C, OOBA M, AVITABILE V, et al. The Future of Southeast Asia's Forests[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1829.

[12] 李明泽, 于欣彤, 高元科, 等. 基于SAR极化分解与Landsat数据的森林生物量遥感估测[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 1-10.

LI Mingze, YU Xintong, GAO Yuanke, et al. Remote Sensing Quantification on Forest Biomass Based on SAR Polarization Decomposition and Landsat Data[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(2): 1-10.

[13] 魏雪梅. 多源数据支持下的森林地上生物量估算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1385-1390.
WEI Xuemei. Estimation of Forest Aboveground Biomass Based on Multi-source Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1385-1390.

[14] 李昕, 李立君, 易春峰. 基于目标保护的林业机器人视觉系统的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(7): 174-178.
LI Xin, LI Lijun, YI Chunfeng. Research on Robot Machine Vision Based on Object Protection [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(7): 174-178.

[15] 刘凯, 魏艳秀, 许京港, 等. 基于计算机视觉的森林火灾识别算法设计[J]. 森林工程, 2018, 34(4): 89-95.
LIU Kai, WEI Yanxiu, XU Jinggang, et al. Design of Forest Fire Identification Algorithm Based on Computer Vision[J]. *Forest Engineering*, 2018, 34(4): 89-95.

[16] 赖菲, 罗廷芳, 丁锐, 等. 图像处理技术在木材表面缺陷检测中的应用[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(2): 16-21.
LAI Fei, LUO Tingfang, DING Rui, et al. Application of Image Processing Technology to Wood Surface Defect Detection [J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2021, 49(2): 16-21.

[17] 张超. 树木影像特征提取与立体匹配技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.
ZHANG Chao. Research on Feature Extraction and Stereo Matching Technology of Tree Images[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2003.

[18] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(22): 61-68.

[19] 陈盼盼. 地面摄影测量在森林资源调查中的关键技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
CHEN Panpan. Study on the Key Technology of Ground Photogrammetry in Forest Resources Investigation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[20] 王小玲, 宋坤, 王子斐, 等. 基于SfM的城市树木参数提取研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(6): 139-148.
WANG Xiaoling, SONG Kun, WANG Zifei, et al. Usage of Structure-from-Motion for Urban Forest Inventory [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2021, 41(6): 139-148.

[21] 赵芳. 测树因子遥感获取方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
ZHAO Fang. Study on Remote Sensing Acquisition Method of Tree-Measuring Factors [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[22] FONSTAD M A, DIETRICH J T, COURVILLE B C, et al. Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(4): 421-430.

[23] 黎达, 邢艳秋, 黄佳鹏, 等. 基于双目立体视觉SLAM的林下实时定位[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(2): 16-22.
LI Da, XING Yanqiu, HUANG Jiapeng, et al. Real-Time Positioning in Forests Based on Binocular Stereo Visual SLAM[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(2): 16-22.

[24] DAVISON A J, REID I D, MOLTON N D, et al. MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(6): 1052-1067.

[25] KLEIN G, MURRAY D. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces [C]//The 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Nara, Japan, 2007.

[26] CAMPOS C, ELVIRA R, RODRÍGUEZ J J G, et al. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(6): 1874-1890.

[27] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDÓS J D. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(5): 1147-1163.

[28] MUR-ARTAL R, TARDÓS J D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1255-1262.

[29] ENGEL J, SCHÖPS T, CREMERS D. LSD-SLAM: Large-Scale Direct monocular SLAM

[C]//European Conference on Computer Vision, Zurich, Switzerland, 2014.

[30] ENGEL J, KOLTUN V, CREMERS D. Direct Sparse Odometry[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, 40(3): 611-625.

[31] 陈盼盼, 冯仲科, 范永祥, 等. 基于视觉里程计的森林样地调查系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 167-174.
CHEN Panpan, FENG Zhongke, FAN Yongxiang, et al. Research on Forest Plot Survey System Based on Visual Odometer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 167-174.

[32] 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]. 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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 226-234.

[33] 顾恺琦, 刘晓平, 王刚, 等. 基于在线光度标定的半直接视觉SLAM算法[J]. 机器人, 2022, 44(6): 672-681.
GU Kaiqi, LIU Xiaoping, WANG Gang, et al. Semi-direct Visual SLAM Algorithm Based on Online Photometric Calibration[J]. *Robot*, 2022, 44(6): 672-681.

[34] 楼益栋, 王昱升, 涂智勇, 等. 融合多棱镜式雷达/IMU/RTK的轨道车辆高精度实时定位与建图[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1802-1807.
LOU Yidong, WANG Yusheng, TU Zhiyong, et al. Real Time Localization and Mapping Integrating Multiple Prism LiDARs/IMU/RTK on Railway Locomotive[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1802-1807.