

RGB-D SLAM 增强现实原木检尺系统构建与测试

范永祥¹ 冯仲科² 苏珏颖² 韦泽波³ 申朝永³ 闫 飞²

(1. 季华实验室, 佛山 528000; 2. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 贵州省自然资源技术信息中心, 贵阳 550004)

摘要: 将内嵌有 ToF 相机、面阵相机及 IMU 的智能手机作为硬件系统, RGB-D SLAM 技术实时获取的深度图、位姿等为数据源, 构建了 RGB-D SLAM 增强现实楞堆原木检尺系统。首先设计了基于 ToF 影像实时估计 RGB 影像像素深度的方法, 实现对待测原木端面几何坐标的初步估计; 其次, 设计了散形分区去噪算法实现原木端面点云的精确过滤, 设计了原木端面曲率估计算法实现对过滤点云可靠性判别; 然后, 基于 PCA 等算法实现原木长、短直径方向向量估计, 并基于该向量对原木长、短直径进行了估计; 最后, 以所构建算法为基础在智能手机平台上搭建了增强现实楞堆检尺系统, 实现智能手机对原木进行实时检尺、增强现实场景对测量结果实时监督。新型检尺系统通过对 6 个楞堆 334 根原木进行了检尺实验, 以评估该设备的测量精度。结果显示: 原木平均直径估计值的偏差及均方根误差分别为 -0.13 cm (-0.35%) 及 1.05 cm (3.34%); 原木径阶化直径估计值的偏差及均方根误差分别为 -0.10 cm (-0.22%) 及 1.33 cm (4.43%); 原木材积估计值的偏差及均方根误差分别为 -0.007 m^3 (-0.27%) 及 0.0939 m^3 (7.23%); 楞堆材积相对误差绝对值均不大于 2.23% , 所有楞堆总材积相对误差为 -0.68% 。无论从单根原木还是楞堆角度来看, 材积等测量结果均无偏且高精度, 说明原木检尺系统是一种可高精度、高鲁棒性实时完成楞堆原木检尺的潜在方案。

关键词: 原木检尺; ToF 相机; 实时 SLAM; 增强现实

中图分类号: S758.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)12-0280-08 OSID: 

Construction and Testing of RGB-D SLAM Augmented Reality Log Measurement System

FAN Yongxiang¹ FENG Zhongke² SU Jueying² WEI Zebo³ SHEN Chaoyong³ YAN Fei²
(1. Jihua Laboratory, Foshan 528000, China

2. Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Natural Resources Technology Information Center of Guizhou Province, Guiyang 550004, China)

Abstract: The RGB-D SLAM augmented reality log measurement system was constructed, which used a smart phone embedded with a ToF camera, RGB camera and IMU as the hardware system, and used the depth map and pose acquired by RGB-D SLAM technology as the data source. Specifically, the method for online estimating the pixel depth of RGB images was designed based on ToF images in order to preliminarily estimate the position of log end faces; secondly, a denoising algorithm based on discrete partitioning and a log end face curvature estimation algorithm were designed for precisely filtering the log end point cloud and evaluating the reliability of the filtering results; then, the PCA algorithm was used to estimate the length and diameter direction vector of the log, which was used to estimate the value of the length and diameter of the log; and finally, the algorithm was used to build a log measurement system on the mobile phone platform, so as to realize the online measurement of the log diameter by using the smart phone, and the online supervision of the measurement results by using the augmented reality scene. The system was tested by measuring 334 logs in six regions to evaluate the measurement accuracy. The results showed that the bias and root mean square error (RMSE) of the log diameter estimates were -0.13 cm

收稿日期: 2023-08-22 修回日期: 2023-09-27

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515110253)

作者简介: 范永祥(1989—),男,助理研究员,博士,主要从事 SLAM 算法及其在林业中的应用研究, E-mail: fanyx@jihualab.ac.cn

通信作者: 韦泽波(1971—),男,工程师,主要从事自然资源信息化系统研究, E-mail: wei86857650@126.com

(-0.35%) and 1.05 cm (3.34%) respectively; the bias and RMSE of the log stepping diameter estimates were -0.10 cm (-0.22%) and 1.33 cm (4.43%) respectively; the bias and RMSE of the log volume estimates were -0.007 m^3 (-0.27%) and 0.0939 m^3 (7.23%) respectively; the absolute value of the relative error of the volume of log pile was no more than 2.23% ; and the error of the total volume of all log piles was -0.68% . Obviously, no matter from the point of view of a single log or a pile, the measurement results were unbiased and high-precision, which meant that the new log measuring system was a potential high-precision, high-robust real-time log measuring potential solutions.

Key words: log measurement; ToF camera; online SLAM; augmented reality

0 引言

森林是地球上重要的生态资源,包含约 90% 陆地生态系统碳汇、约 80% 陆地生物量,是陆地动、植物重要的栖息地^[1-3]。此外,森林所产出的木材等产品在国民经济发展中发挥着重要作用,是数百万人的重要生计来源;据估计,约有 4.1 亿人高度依赖森林维持生计和收入,约 16 亿人需要在生活中使用森林提供的产品及服务^[4-6]。在利用森林资源过程中有必要对其进行量化估计及价值估计,以便从政府等层面平衡森林生态价值及国民经济价值等。在木材利用中,通常通过对楞堆原木进行检尺和材积计算来评估木材的出材率及价值,精确、快速完成楞堆原木检尺是木材利用过程中的重要环节。

楞堆原木检尺即通过对楞堆中原木小头直径进行精确测量实现对楞堆材积估计。传统原木检尺主要借助皮尺等工具完成,是一项劳动强度大、效率低、主观性强的工作^[7]。随着计算机图形学等相关技术的进步,许多学者构建了从相机影像中提取原木端面的算法,这些算法可大致分为传统视觉分割方法及深度学习两类^[8-11]。文献[12]通过阈值分割、圆拟合等技术实现原木端面识别,识别率为 81.6%;文献[13-14]基于 SSD 网络、融合多尺度卷积核及空洞卷积等实现原木端面提取,检测精确率为 96.37%。由于相机成像质量易受环境光照条件影响,故仅依赖于相机的算法很难在实际生产过程中稳定工作。此外,部分学者构建了利用图像提取原木端面实现原木直径估计的算法,目前估计方法主要分为正射成像估计及立体成像估计两种方法^[15-18]。文献[14]以正射成像假设为基础,通过像素数估计了原木端面直径,相对均方根误差为 3.07%;文献[17]通过双目成像后正射纠正的方法对原木径阶估计,但测试样本原木仅有 9 根。这些方法均需进行内业处理才能获取测量结果,若出现漏测、无法识别等问题时需重新进行现场补测,无法满足实际需求。此外,由于缺乏可靠的监督与修正机制,很难判断测量结果的鲁棒性。

SLAM (Simultaneous localization and mapping) 技

术是一种利用观测传感器及运动传感器实现实时定位与建图的技术,具有不依赖于 GNSS (Global navigation satellite system) 信号的特点,在室内、林下及无人驾驶定位及建图中体现出重要价值^[19-22]。随着芯片技术及算法技术的进步,SLAM 系统可被搭载于智能手机等便携平台上并用于支持增强现实场景的实现,对该技术的普及起到重要作用^[23-25]。许多学者使用 SLAM 技术开展了森林样地清查等工作,借助增强现实场景实现实时对测量结果的鲁棒性监督,实现了实时、高精度及高鲁棒性测量^[26-29]。RGB-D SLAM 是一种以普通面阵相机、ToF (Time of flight) 相机为视觉传感器的 SLAM 系统,相比于单目 SLAM 及双目 SLAM 具有不受环境光照条件约束的特点;更重要的是,由于面阵相机及 ToF 相机低功率、体积小等特性,使其可以被内嵌于智能手机等便携、廉价平台上^[23]。显然,该技术是一种可用于楞堆原木检尺的潜在解决方案。

本文以带有 ToF 相机、RGB 相机及 IMU (Inertial measurement unit) 的智能手机平台为硬件系统,以 RGB-D SLAM 系统实时输出位姿及影像为数据源,构建楞堆原木检尺算法,并通过构建增强现实场景实现实时对检尺结果的监督。然后,该系统在 6 个楞堆中进行原木检尺测试,通过对测量误差统计完成新型设备测量精度评估。

1 SLAM 理论与技术

1.1 SLAM 理论

SLAM 技术是一种利用多源传感器进行实时定位与建图的技术,该技术可支持在未知环境中完成实时全局一致性建图,并基于该地图完成实时相对定位。SLAM 系统常以相机、激光雷达等传感器为视觉传感器,IMU、轮式里程计等为运动传感器。基于该数据构建 SLAM 问题均可描述为观测方程及运动方程,即

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k, w_k) \tag{1}$$

$$z_{k,j} = h(x_k, m, v_{k,j}) \tag{2}$$

式中 x_{k-1}, x_k —— $k-1, k$ 时刻 SLAM 系统位姿
 u_k ——IMU 等运动传感器输入量

- m ——SLAM 构建路标点
- $z_{k,j}$ —— k 时刻观测传感器对第 j 个路标点的测量值
- $w_k、v_{k,j}$ ——运动传感器、观测传感器的测量噪声

目前,用于解决 SLAM 问题的算法大致可分为滤波及优化两类:前者的优势在于优化速度较快,但通常使用的扩展卡尔曼滤波求解非线性问题时容易出现有偏估计及协方差错误估计等问题,迭代卡尔曼滤波、粒子滤波等算法在一定程度上改善该问题,但也增加运算量;优化方法通常为滑窗优化,具有优化精度高、对非高斯噪声适应性强等优势,随着芯片技术的提升,滑窗优化方法已成为实时 SLAM 的主流解决方案之一,并可在智能手机等便携式设备上使用^[30-32]。

1.2 RGB-D SLAM 技术

目前,主流 RGB-D SLAM 系统工作流程如图 1 所示,分为前端及后端两部分。SLAM 前端以 RGB-D 相机及 IMU 数据为输入,利用 RGB-D 影像通过特征提取与匹配实现对历史特征点的跟踪,利用 IMU 数据预积分实现对帧间运动估计与预测,通过滑窗优化对当前帧位姿及地图路标点进行估计。SLAM 后端以 SLAM 前端输出帧与位姿为输入构建关键帧位姿图,然后利用回环检测构建回环约束并添加到位姿图中,通过位姿图优化实现全局一致性建图并对里程计位姿进行修正。最后,输出全局一致性地图及修正漂移后位姿。RTAB-Map (Real-time appearance-based mapping) 开源库是一款典型的 RGB-D SLAM 系统,该系统已被证明可在大尺度环境中进行长时间、实时全局一致性建图,故本文选择该系统进行 RGB-D SLAM 数据处理^[33]。

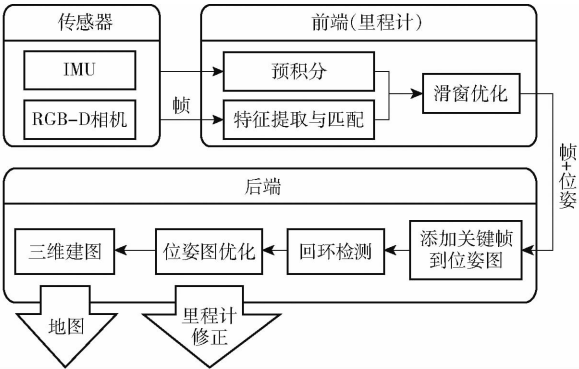


图 1 RGB-D SLAM 系统工作流程图

Fig. 1 Workflow of RGB-D SLAM system

选择 Lenovo Phab 2 Pro 智能手机为硬件平台,该平台具有以下特点:包含有 RGB 相机、ToF 相机、运动跟踪相机及 IMU 等传感器,可作为 RGB-D SLAM 系统输入数据源;包含有 Qualcomm

Snapdragon 652 处理器及 Myriad 计算图形处理器,可搭载 RGB-D SLAM 系统;包含有显示屏及手势交互等相关硬件,可用于构建交互式增强现实场景;作为智能手机,具有便携、廉价等特点(图 2)。更重要的是,Google Tango Project 将该 RTAB-Map 系统与该智能手机相关硬件等进行了适配,是一款可用于构建增强现实楞堆检尺系统的理想设备。



图 2 Lenovo Phab 2 Pro 智能手机

Fig. 2 Lenovo Phab 2 Pro smart phone

2 原木检尺系统架构与核心算法

2.1 测量系统工作框架

原木检尺系统依托 Android 平台开发,系统主要包含 RGB-D SLAM 模块、原木检尺核心模块及原木检尺用户交互模块 3 部分(图 3),其中:RGB-D SLAM 模块基于传感器数据实时估计位姿及深度图等,原木检尺核心模块用于接收用户指令并基于 SLAM 输出数据完成检尺、构建增强现实场景元素等,原木检尺用户交互模块用于为用户提供增强现实场景、完成手势交互及存储等任务(图 4)。检尺操作流程如图 5 所示,“端面识别与检尺”步骤利用 SLAM 系统输出位姿、深度图及被点击原木端面坐标数据构建相关算法实现(图 6)。

为提升原木检尺系统流畅度并适当减少开发量,该系统在 RGB-D SLAM 系统模块及原木检尺核心模块以 C/C++ 语言开发、原木检尺用户交互模块采用 Java 语言开发,两者通过 JNI (Java native interface) 技术实现数据交流。本文原木检尺系统所有代码于 Android Studio (Dolphin 版本) 集成开发工具上完成开发与编译。

2.2 原木端面提取与检尺算法

如图 7 所示,本文原木检尺算法以当前位姿、被点击 RGB 影像像素坐标以及 ToF 影像为输入,经过数据初始化、原木端面识别、原木参数估计及增强现实场景生成 4 步完成检尺与显示监督等。

在数据初始化时,本文利用深度图对被点击 RGB 影像像素坐标深度进行估计,即首先利用对极几何估计被点击像素点在深度图中的极线,公式为

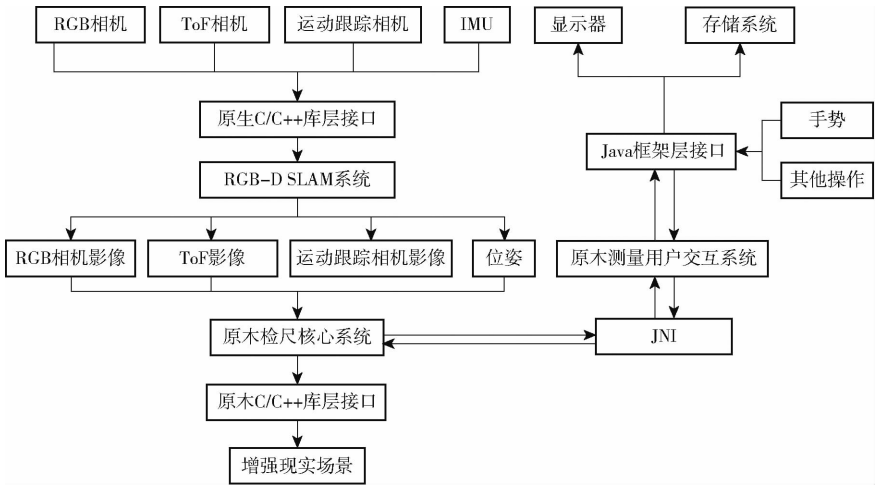


图 3 原木检尺系统工作流程图

Fig. 3 Workflow of log measuring system



图 4 原木检尺系统增强现实交互界面

Fig. 4 Log measuring system augmented reality interactive interface

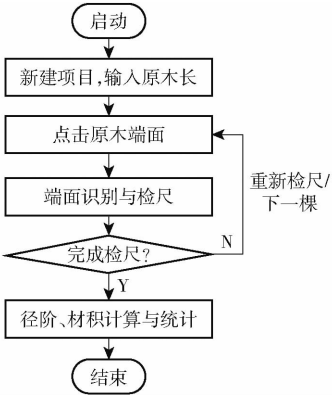


图 5 系统工作流程图

Fig. 5 System workflow diagram

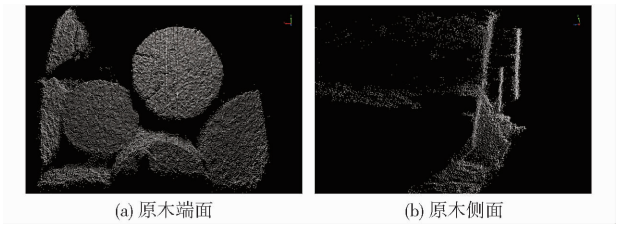


图 6 原木端面识别与检尺的深度图获取点云

Fig. 6 Point cloud from depth picture for log measurement

$$l = K_D^{-T} t^A R K_C^{-1} \tilde{x}_c \quad (3)$$

式中 l ——直线方程参数向量

K_D 、 K_C ——深度相机及 RGB 相机内参矩阵

R 、 t ——RGB 相机像空间坐标系到 ToF 相机像空间坐标系的旋转矩阵、平移向量

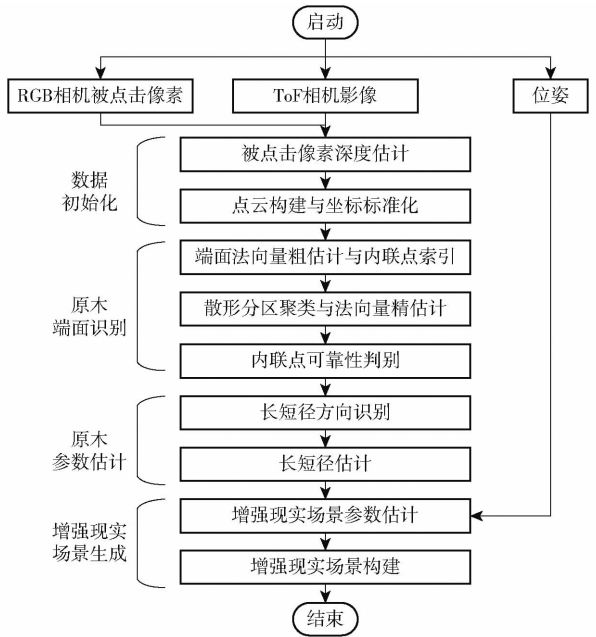


图 7 原木端面检尺数据处理流程图

Fig. 7 Workflow of data processing for log measurement

$\tilde{x}_c$ ——被点击 RGB 影像像素点坐标向量

则深度图上近似在极线上的像素点 $\tilde{x}_d$ 满足

$$l^T \tilde{x}_d = 0 \quad (4)$$

获取极线上所有点的像素及深度信息后利用公式

$$d_c \tilde{x}_c = K_C R^T (d_d K_D^{-1} \tilde{x}_d - t) \quad (5)$$

式中 d_d ——深度图中 $\tilde{x}_d$ 像素的深度

d_c ——RGB 影像中 $\tilde{x}_d$ 同名点的真实深度
获取其在 RGB 影像上的真实像素坐标,选择其中最邻近被点击像素的 $\tilde{x}_d$ 作为被点击像素在深度图中的同名点, d_c 即被点击 RGB 影像像素深度。在获取到被点击点深度后,原木端面识别将在 ToF 相机

像空间坐标系下进行,故深度图中点利用内参矩阵 K_D 及其深度 d_D 从中心投影坐标系变换到像空间坐标系下形成稠密点云(图6),其中一点的转换公式为

$$\mathbf{x}' = d_D K_D^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_D \tag{6}$$

为方便处理,利用变换到 ToF 相机像空间坐标系下的被点击点 $\mathbf{x}_b$ 将点云标准化,公式为

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}' - \mathbf{x}_b \tag{7}$$

式中 $\mathbf{x}$ ——标准化后点云中一点

在原木端面识别时,需将所有点云结构化为 kd-tree 以实现快速检索,在该树上通过半径索引获取距离原点小于 5 cm 的所有点,通过对其进行主成分分析(Principal component analysis, PCA)初步估计端面法向量(图8a),然后索引以原点为面上一点、该法向量为面法向量的所有内联点作为端面候选点云(图8b)。为剔除周围被候选点云中误分类点,本文通过区域增长分割(Region growing segment)实现聚类,选择距离原点最近的主分类为原木端面点云;为避免毗邻原木端面点被误分类,本文采取散形分区后再聚类的方法,即首先通过对候选点云坐标构成矩阵进行奇异值分解,获取特征值依次从大到小 3 个正交向量 $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ 、 $\mathbf{n}_3$,然后将候选点云投影到以候选点当前坐标系原点为原点、 v_1 为 X 轴、 v_2 为 Y 轴的平面坐标系内,获取极坐标 (θ, d) (其中, θ 为投影点与 v_1 轴夹角, d 为投影点到原点的距离),则候选点组成的集合可扩展字段为 $\{\mathbf{x}, \theta, d\}$,然后根据 θ 将点云分割为散形区域(本文等分为 72 份,见图8c),最后以原点作为初始索引点通过区域增长分割获取距离原点最近的主分类点云,各散形区域的主分类点云并集被视为原木端面点云,并通过对其进行主成分分析可获取其精确法向量。最后,本

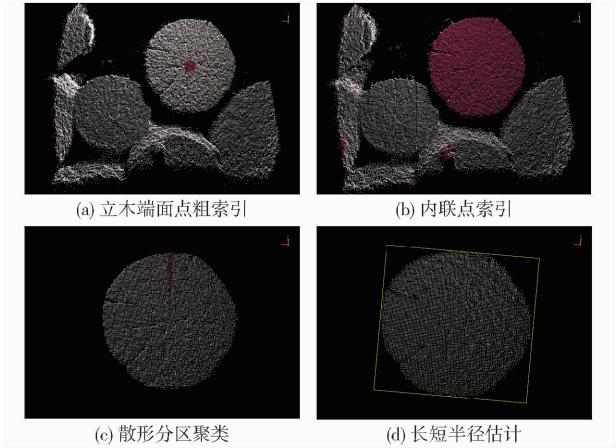


图8 原木端面识别与长短直径估计

Fig. 8 Filtering log end face point cloud and estimating diameter

文通过各散形分区曲率对提取到的原木端面点云可靠性进行评价,其中第 k 等分散形区域曲率计算公式为

$$\sigma_k = \frac{\sum_{i=-N}^N (d_k - d_{k+i})}{2N \sum_{i=-N}^N d_{k+i}} \tag{8}$$

式中 d_k 、 d_{k+i} ——第 k 、 $k+i$ 等分散形区域中极坐标距离极大值

N ——选择用于计算曲率的相邻散形数量

根据经验值确定当曲率最大值小于 0.01 时认为原木端面点云提取合格。

本文参考现行的国家标准 GB/T 4814—2013《原木材积表》设计端面参数估计方法^[34],即检尺以原木小头为准则,估计其端面长短径,计算长短径均值作为原木直径,然后将该直径参考奇进偶退原则转化为偶数径阶(即径阶化),最后使用此结果作为最终直径参与后序材积计算,所有树种的原木材积计算公式为

$$V = \begin{cases} 0.7854L(D+0.45L+0.2)^2/10\,000 & (4\text{ cm} \leq D \leq 12\text{ cm}) \\ 0.7854L[D+0.5L+0.005L^2 + 0.000125L(14-L)^2(D-10)]^2/10\,000 & (D \geq 14\text{ cm}) \end{cases} \tag{9}$$

式中 V ——原木材积, m^3
 L ——原木长度, m D ——径阶, cm

本文需利用原木端面点云数据提取原木长短径,将点云坐标构成的矩阵进行奇异值分解并获取到特征值从大到小的单位特性向量 $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ 及 $\mathbf{n}_3$,若设

$$d_{L1} = \max_{k=1}^K (\mathbf{x}_k^T \mathbf{n}_1) \tag{10}$$

$$d_{L2} = \min_{k=1}^K (\mathbf{x}_k^T \mathbf{n}_1) \tag{11}$$

$$d_{S1} = \max_{k=1}^K (\mathbf{x}_k^T \mathbf{n}_2) \tag{12}$$

$$d_{S2} = \min_{k=1}^K (\mathbf{x}_k^T \mathbf{n}_2) \tag{13}$$

$$\text{则长直径} \quad d_L = d_{L1} - d_{L2} \tag{14}$$

$$\text{短直径} \quad d_S = d_{S1} - d_{S2} \tag{15}$$

式中 $\mathbf{x}_k$ ——原木端面点云中第 k 点

K ——原木端面点云总点数

在增强现实场景中,本文以矩形框形式表达并用于监督测量结果,4 个角点在标准化坐标系内的坐标分别为 $(d_{L1} \mathbf{n}_1, d_{S1} \mathbf{n}_2)$ 、 $(d_{L1} \mathbf{n}_1, d_{S2} \mathbf{n}_2)$ 、 $(d_{L2} \mathbf{n}_1, d_{S1} \mathbf{n}_2)$ 及 $(d_{L2} \mathbf{n}_1, d_{S2} \mathbf{n}_2)$;任意角点 $\mathbf{x}_D$ 在世界坐标系中可表示为

$$\mathbf{x}_w = {}^D_w \mathbf{R}(\mathbf{x}_D + \mathbf{x}_b) + {}^w \mathbf{t}_D \tag{16}$$

式中 ${}^D_w \mathbf{R}$ 、 ${}^w \mathbf{t}_D$ ——世界坐标系到 ToF 像空间坐标系的旋转、平移量

增强现实场景构建结果如图 4 和图 8d 所示。

3 实验区域与方法

3.1 实验区域概况

本文选择天津市东丽区东丽湖建材市场 (39°17'N, 117°49'E) 及河北省曹妃甸区文丰码头 (39°11'N, 118°51'E) 两个贮木场 6 个楞堆中 334 根原木作为研究对象 (图 9), 楞堆原木属性统计结果如表 1 所示。



图 9 贮木场楞堆
Fig. 9 Wood stacking diagram

表 1 楞堆原木属性

Tab. 1 Properties of stacked wood

楞堆编号	原木数	原木直径/cm		
		最大值	最小值	均值
1	46	42.4	20.7	30.4
2	59	53.8	19.0	31.7
3	52	42.5	20.9	29.4
4	60	41.3	18.8	28.0
5	52	48.4	21.7	31.7
6	65	46.9	17.1	30.3

3.2 研究方法

为验证所设计楞堆原木检尺系统测量精度, 本文将使用皮尺进行长短半径测量后求得的平均值作为真值, 使用偏差 B_{LAS} 、均方根误差 (Root mean squared error, R_{MSE})、相对偏差 B_{rel} 及相对均方根误差 R_{rel} 对各测量值的偏差及变异性进行评估。

4 实验结果

所设计系统对 6 个楞堆中 334 根原木直径估计误差统计结果如表 2 所示, 结果显示, 长直径、短直径及平均直径偏差均为 -0.13 cm , 接近无偏; 径阶化直径偏差为 -0.10 cm , 显然径阶化过程未影响原木估计偏差, 由此估算的材积也是无偏的; 各直径估计值等相对偏差绝对值均小于 0.4% , 也说明本文检尺系统测量结果无偏。

表 2 原木直径估计值统计结果

Tab. 2 Statistical results for log diameter estimates

原木属性	偏差	相对偏差/ %	均方根误 差	相对均方 根误差/%
长直径	-0.13 cm	-0.36	1.22 cm	3.76
短直径	-0.13 cm	-0.25	1.52 cm	4.99
平均直径	-0.13 cm	-0.35	1.05 cm	3.34
径阶化直径	-0.10 cm	-0.22	1.33 cm	4.43
径阶化材积	-0.007 m³	-0.27	0.093 9 m³	7.23

从图 10 可知, 长直径、短直径及平均直径均集中于对角线上, 显示出无偏特性; 平均直径相比于长、短直径具有更小的离散度, 从表 2 也可知, 平均直径均方根误差小于长、短半径, 径阶化直径则相比于平均直径具有较大均方根误差, 但各直径相对均方根误差均小于 5.00% ; 由径阶化直径获取材积具有相对较大均方根误差, 这可能由直径径阶化过程引起。从图 11 可知, 各径阶下长直径、短直径及平均直径均趋于零偏; 相比于长直径、短直径, 平均直径在各径阶下离散度更小, 这可能由于人工测量时很难精确分辨出真正的长直径方向及短直径方向所致, 但不同测量方法获取的平均直径则具有较强相似性。

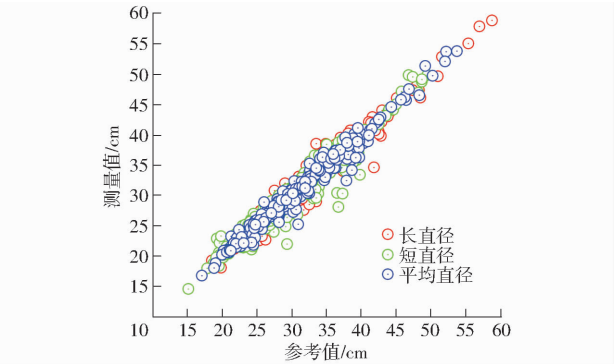


图 10 原木直径估计值散点图

Fig. 10 Scatter plot of log diameter estimation

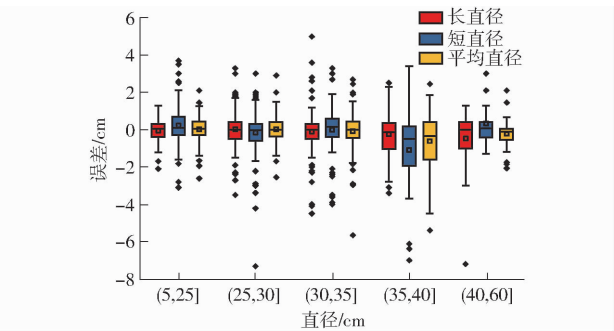


图 11 原木直径估计误差箱状图

Fig. 11 Log diameter estimation error box plot

各楞堆检尺统计结果如表 3 所示, 结果显示: 各楞堆原木直径在径阶化引入误差主要分布在 $\pm 2\text{ cm}$ 范围内, 且仅有极个别径阶化误差为 $\pm 4\text{ cm}$ 及

± 6 cm;从图 12 可看出,径阶化误差零偏、接近正态分布且具有较小方差。从楞堆总材积可见,单根原木检尺材积相对均方根误差虽然超过 7.00%,但各楞堆材积相对误差绝对值均小于 2.5%,显然单根原木材积均方根误差未影响楞堆

材积评估精度,这是由单根原木材积估计值零偏的性质决定的;所有楞堆原木总体材积相对误差绝对值则小于 1.00%,显然随着原木检尺数量的增加,单原木检尺材积零偏的性质使总体相对误差变小,即测量精度更高。

表 3 楞堆测量误差统计结果
Tab.3 Statistical results of flute stack measurement errors

楞堆编号	原木数	径阶化误差频数				总材积			
		0 cm	± 2 cm	± 4 cm	± 6 cm	参考值/m ³	估计值/m ³	误差/m ³	相对误差/%
1	46	24	21	1	0	12.072	12.072	<0.001	<0.01
2	59	33	24	1	1	17.455	17.199	-0.256	-1.47
3	52	40	12	0	0	12.676	12.775	0.099	0.78
4	60	42	18	0	0	13.370	13.244	-0.126	-0.94
5	52	30	20	2	0	14.794	14.465	-0.330	-2.23
6	65	44	19	2	0	17.139	17.156	0.016	0.10
总和	334	213	114	6	1	87.507	86.911	-0.596	-0.68

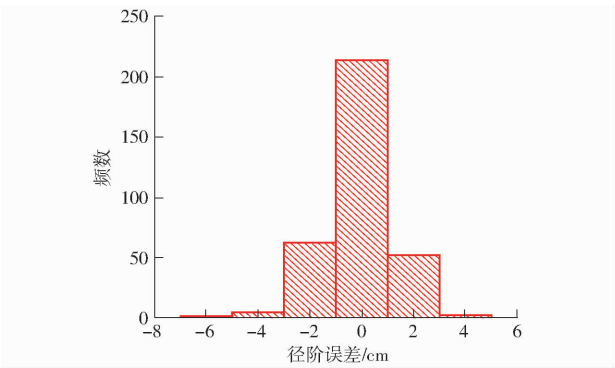


图 12 原木直径估计值径阶化误差统计图
Fig.12 Statistical diagram of log hierarchical diameter error

5 结论

(1)以内嵌有 ToF 相机、普通 RGB 相机及 IMU 的智能手机为硬件系统,以 RGB-D SLAM 技术为构建增强现实场景及楞堆原木检尺算法数据源,设计了一种便携式 RGB-D 增强现实楞堆检尺系统,实时完成原木检尺并监督测量结果可靠性。首先设

计利用深度图对 RGB 影像像素坐标深度进行实时估计的算法,以精确获取手势点击原木端面所在空间坐标;其次,通过 PCA 及散形分区聚类实现原木端面点云精确提取,并通过所构建曲率计算公式对提取质量进行评估;然后,利用 PCA 算法估计原木端面长直径与短直径方向向量,将原木端面点投影到该方向向量以估计长、短直径,并利用该方向向量及当前位姿在增强现实场景中表达测量结果;最后,以所构建算法为基础在智能手机平台上搭建了增强现实楞堆检尺系统,用于楞堆原木检尺与数据记录等。

(2)检尺系统在 6 个楞堆中进行了测试。经与参考值进行对比表明,原木检尺平均直径零偏且具有较高鲁棒性,由该平均直径获取的径阶化直径仍保持零偏及高精度,由径阶化直径估计的原木材积则仍保持零偏特性;通过对楞堆材积统计发现,楞堆材积相对误差较小,新型检尺系统可高精度、高鲁棒性实时完成楞堆检尺工作。

参 考 文 献

[1] BRANDO P M, PAOLUCCI L, UMMENHOFER C C, et al. Droughts, wildfires, and forest carbon cycling: a pantropical synthesis[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2019, 47: 555-581.
[2] GAUTHIER S, BERNIER P, KUULUVAINEN T, et al. Boreal forest health and global change[J]. Science, 2015, 349 (6250): 819-822.
[3] TITUS B D, BROWN K, HELMISAARI H S, et al. Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines[J]. Energy, Sustainability and Society, 2021, 11(1): 1-32.
[4] GE W, DENG L, WANG F, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145648.
[5] MACDICKEN K G. Global forest resources assessment 2015: what, why and how? [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 352: 3-8.
[6] YUDHA R P, SUGITO Y S, SILLANPÄÄ M, et al. Impact of logging on the biodiversity and composition of flora and fauna in the mangrove forests of Bintuni Bay, West Papua, Indonesia[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 488: 119038.
[7] 廖志雄. 木材检量工具使用方法和注意事项[J]. 绿色科技, 2017(13): 170-171.
[8] 丁博文. 基于计算机视觉的木材检尺系统[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

- DING Bowen. A wood measuring system based on computer vision[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [9] ANTTI R, HEIKKI K, MARKKU T, et al. Electrical impedance and image analysis methods in detecting and measuring Scots pine heartwood from a log end during tree harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177(1): 105690.
- [10] TANG H, WANG K, GU J C, et al. Application of SSD framework model in detection of logs end[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1486(7): 072051.
- [11] KECK C, SCHOEDEL R. Reference measurement of roundwood by fringe projection[J]. Forest Products Journal, 2021, 71(4): 352-361.
- [12] 景林, 黄习培, 丁盛彬. 成捆原木计算机图像检尺系统研究及应用[J]. 计算机应用, 2006(增刊 2): 137-139.
JING Lin, HUANG Xipei, DING Shengbin. Research and application of computer image measuring system for bundled logs[J]. Computer Applications, 2006(Supp. 2): 137-139. (in Chinese)
- [13] 胡笑天. 基于 RCO-SSD 的原木端面识别方法研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.
HU Xiaotian. Research on log end face recognition method based on RCO-SSD[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [14] 胡笑天, 王克俭, 王超, 等. 一种基于改进 SSD 的原木端面识别方法[J]. 林业工程学报, 2023, 8(1): 141-149.
HU Xiaotian, WANG Kejian, WANG Chao, et al. Development of log end face recognition method based on improved SSD[J]. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(1): 141-149. (in Chinese)
- [15] 李佳雨, 刘晋浩. 基于实例分割模型的原木检尺径方法[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(3): 153-159.
LI Jiayu, LIU Jinhao. A method of log diameter measurement based on instance segmentation model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(3): 153-159. (in Chinese)
- [16] 林耀海, 赵洪璐, 杨泽灿, 等. 结合深度学习与 Hough 变换的等长原木材积检测系统[J]. 林业工程学报, 2021, 6(1): 136-142.
LIN Yaohai, ZHAO Honglu, YANG Zecan, et al. An equal length log volume inspection system using deep-learning and Hough transformation[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(1): 136-142. (in Chinese)
- [17] 陈广华, 张强, 陈梅倩, 等. 双目视觉的原木径级快速检测算法[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(2): 22-30.
CHEN Guanghua, ZHANG Qiang, CHEN Meiqian, et al. Rapid detection algorithms for log diameter classes based on binocular vision[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(2): 22-30. (in Chinese)
- [18] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [19] SINGANDHUPE A, LA H M. A review of SLAM techniques and security in autonomous driving[C] // 2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). IEEE, 2019: 602-607.
- [20] TAKETOMI T, UCHIYAMA H, IKEDA S. Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016[J]. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2017, 9(1): 1-11.
- [21] HUANG L. Review on LiDAR-based SLAM techniques[C] // 2021 International Conference on Signal Processing and Machine Learning (CONF-SPML). IEEE, 2021: 163-168.
- [22] MARDER-EPPSTEIN E. Project tango[C] // ACM SIGGRAPH 2016 Real-Time Live!, 2016: 25.
- [23] NOWACKI P, WODA M. Capabilities of arcore and arkit platforms for AR/VR applications[C] // Engineering in Dependability of Computer Systems and Networks: Proceedings of the Fourteenth International Conference on Dependability of Computer Systems DepCoS-RELCOMEX. Brunów: Springer International Publishing, 2020: 358-370.
- [24] OUFQIR Z, EL ABDERRAHMANI A, SATORI K. ARKit and ARCore in serve to augmented reality[C] // 2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV). IEEE, 2020: 1-7.
- [25] 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.
- [26] 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. (in Chinese)
- [27] FAN Y, FENG Z, SHEN C, et al. A trunk-based SLAM backend for smartphones with online SLAM in large-scale forest inventories[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 162: 41-49.
- [28] 范永祥, 冯仲科, 闫飞, 等. 单目 SLAM 增强现实测树系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 259-266.
FAN Yongxiang, FENG Zhongke, YAN Fei, et al. Development of monocular SLAM augmented reality tree measurement system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 259-266. (in Chinese)
- [29] BARFOOT T D. State estimation for robotics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [30] ULLAH I, SU X, ZHANG X, et al. Simultaneous localization and mapping based on Kalman filter and extended Kalman filter[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2020(Special Issue): 2138643.
- [31] LATIF R, DAHMANE K, SADDIK A. SLAM algorithm: overview and evaluation in a heterogeneous system[C] // Enabling Machine Learning Applications in Data Science: Proceedings of Arab Conference for Emerging Technologies 2020. Springer Singapore, 2021: 165-177.
- [32] LABBÉ M, MICHAUD F. RTAB-Map as an open-source LiDAR and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation[J]. Journal of Field Robotics, 2019, 36(2): 416-446.
- [33] WANG X. Realtime 3D reconstruction with mobile devices[C] // International Conference on Applications and Techniques in Cyber Security and Intelligence ATCI 2018: Applications and Techniques in Cyber Security and Intelligence. Springer International Publishing, 2019: 874-882.
- [34] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 原木材积表: GB/T 4814—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.