doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.024

基于 RGB - D SLAM 手机的森林样地调查系统研究

范永祥'冯仲科'陈盼盼'高祥'申朝永'

(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:基于 RCB - D SLAM 手机构建了森林样地调查系统,该系统实现了样地构建、每木检尺及林分/样地参数的估计功能,并在测量过程中使用增强现实展示测量结果,且提供了重新测量的交互方式,使观测者在观测过程中能够检测结果的可靠性,并保证所获取样地信息的完整性。该系统在 18 块半径为 7.5 m 的圆形样地中进行了测试。结果显示,平均胸径估计值的偏差(BIAS)及均方根误差(RMSE)分别为 0.36、0.69 cm,平均树高估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 0.06、0.63 m,蓄积量估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 0.36、0.69 cm,平均树高估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 0.06、0.63 m,蓄积量估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 8.595 9、25.735 8 m³/hm²,横断面积估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 0.949 7、1.987 3 m²/hm²,株树密度估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 – 3、13 株/hm²,坡度估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 0.30°、0.88°,坡向估计值的 BIAS 及 RMSE 分别为 – 0.44°、7.61°。其中,坡向估计具有较大的 RMSE,是由于当坡度较小时,即使 SLAM 系统估计位姿有较小漂移,仍会导致该值产生较大偏差,但整体而言坡向仍是无偏的。

关键词:森林;样地调查;ToF相机;SLAM;增强现实 中图分类号:S758.7 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2019)08-0226-09

Research on Forest Plot Survey System Based on RGB – D SLAM Mobile Phone

FAN Yongxiang¹ FENG Zhongke¹ CHEN Panpan¹ 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: Forest resources have their own importance in human survival and development. Forest plot survey is used to obtain forest information and analyze the status of forest resources. With the advancement in sensor technology, remote sensing, especially LiDAR, is used to obtain point cloud data by scanning plots which can be used to extract forest-based factors. The improvement of SLAM algorithm enables the positioning without GPS signal coverage. So that, the combination of LiDAR and SLAM system can be used to get a globally consistent point cloud of a plot under the canopy which can ensure the integrity and accuracy of the extracted plot properties. However, the estimations can not be checked and the omissions or errors can not be corrected. A plot survey system based on RGB - D SLAM mobile phone was developed, which constructed the process of plot survey, the estimation of tree-based properties and forest-based properties. Augmented reality technology was used to show the observer estimation results and the way of re-estimation, which ensured the reliability and integrity of the acquired plot information through human intervention. The system was tested in 18 circular plots with radius of 7.5 m. The average DBH estimations showed 0.36 cm BIAS and 0.69 cm RMSE; the average tree height estimations showed 0.06 m BIAS and 0.63 m RMSE; the volume estimations showed 8.595 9 m^3/hm^2 BIAS and 25.735 8 m³/hm² RMSE; the cross-sectional area estimations showed 0.949 7 m²/hm² BIAS and 1. 987 3 m²/hm² RMSE; the stem density estimations showed -3 stems/hm² BIAS and 13 stems/hm² RMSE; the slope estimations showed 0. 30° BIAS and 0. 88° RMSE; and the aspect estimations showed -0.44° BIAS and 7.61° RMSE. The aspect estimations had a large RMSE due to the estimated pose errors of the SLAM system, but the aspect measurements were still unbiased as a whole. Key words: forest; plot survey; ToF camera; SLAM; augmented reality

收稿日期: 2019-01-11 修回日期: 2019-01-31

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:范永祥(1989—),男,博士生,主要从事机器视觉、点云算法及 SLAM 在林业中的应用研究, E-mail: xiaoxiangsmail@ gmail. 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

0 引言

森林具有多种环境功能和社会经济功能,与人 类生存、发展息息相关。在环境方面,森林具有固 碳、水土保持、调节气候、保持生物多样性等多方面 的作用;在社会经济方面,森林为人类提供了食物、 木材、能源等^[1-2]。

森林资源信息能够为不同层面的决策者提供管 理森林、计划造林等依据。森林清查的主要目的是 收集不同决策者所需要的森林属性,通常调查属性 包括生物量、蓄积量、树种等^[3]。传统的地面清查 方法是在调查区域合理布设样地,并对样地的森林 属性进行清查,通过这些点估计来反演整个研究区 域平均或总体的林业属性[4]。通常样地调查属性 包括树种、胸径、树高,生物量、蓄积量等属性一般通 过构建以树种、胸径、树高为自变量的模型进行估 计^[5]。除这些属性外,样地树木位置是解算林分空 间结构参数如角尺度、混交度、大小比数等因子所必 需的属性[6]。传统样地调查中,使用胸径尺或卡尺 测量胸径,使用测高器测量树高,使用罗盘、皮尺或 全站仪测量树木位置。这些方法不仅耗时耗力,而 且无法克服观测者主观因素的干扰。Laserrelascope^[7]、电子测树枪^[8]等设备提供了同时测量 树木胸径、树高、位置等一体化解决方案,但仍然无 法克服安装复杂、观测难、主观因素干扰等问题。

激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR) 技术的出现及计算机运算能力的提高为样地清查提 供了新的解决方案^[9-11]。利用激光雷达对样地进 行扫描并获取样地三维采样点云,然后从点云中客 观地提取样地属性。地基激光扫描(Terrestrial laser scanning,TLS)作为一种地基激光雷达,已经被许多 学者用于样地清查,并通过算法对森林属性进行提 取和评估^[5,12]。TLS 通常以两种方式被使用:单次 扫描和合并多次扫描。单次扫描即在样地中心建立 站点并对样地进行扫描^[13]。该方式数据处理简单, 但在较密的森林中由于遮挡的原因经常发生漏测。 多扫描即在样地中建立多个扫描站点,然后利用算 法将多次的单扫描数据进行合并^[14]。该方式虽然 避免了遗漏问题,但合并单次扫描数据的难度较大。 显然,TLS 不适合在较大的样地中使用。移动激光 扫描(Mobile laser scanning, MLS)的出现解决了TLS 多次扫描数据难以合并的问题,从而可以在较大的 样地中进行森林属性清查[15-17]。移动激光雷达通 常为载有全球卫星导航系统 (Global navigation satellite system, GNSS)、惯性测量单元 (Inertial measurement unit, IMU)、激光雷达组合的运动平台。 其中,GNSS+IMU 的组合能够在移动激光雷达系统 运动过程中对 LiDAR 的位姿进行测量,利用所测得 的位姿可以对各个时刻的扫描数据进行合并。但在 林下没有被 GNSS 覆盖的区域, MLS 系统很难构建 全局一致的点云。即时定位及构图(Simultaneous localization and mapping,SLAM) 技术的出现使得在 林下无 GNSS 信号的区域定位成为可能。SLAM 系 统在运动过程中,利用单目相机、双目相机或 RGB-D 相机对周围环境进行观测,从而获取观测序列,然 后使用该视觉观测序列对周围环境建图,并估计 SLAM 系统的位姿^[18-19]。目前的研究中,将激光 SLAM 和双目 SLAM 作为 MLS 系统的辅助相对定位 系统,从而使 MLS 系统在无 GNSS 信号样地中扫描 样地时仍能获取全局一致的点云^[20-22],但 MLS 系 统构造复杂、质量较大、价格昂贵,尤其对于轮式系 统还需要较好的林下工作条件。

ToF (Time of flight)相机^[23-24]作为一种测量 深度的消费级产品,具有体积小、价格便宜、功率低 等优势,是激光雷达的一种替代品,且经常作为 RGB - D SLAM 的输入。随着智能手机运算能力的 增强及 SLAM 算法的改进,RGB - D SLAM 系统可以 在手机上运行,从而使手机具有实时定位并构图的 功能^[25-26]。TOMAŠTÍK 等^[27]使用这种手机扫描样 地,并在线下从获取的点云中提取了样地树木位置、 胸径。FAN 等^[28]使用这种手机实现了实时获取样 地的单木属性——位置、胸径和树高,但并未评估样 地属性。

本文利用带有 RGB - D SLAM 系统的手机构建 森林样地调查系统,主要实现样地构建、每木检尺及 林分/样地属性计算,并使用增强现实技术进行结果 实时显示与交互。应用该系统在 18 块半径为 7.5 m 的圆形样地中进行测试,对估计结果进行评估。

1 理论与技术

1.1 SLAM 理论

SLAM 为以控制及观测为输入,在未知环境中 未知位置构建周围三维地图的同时实时估计当前运 动平台位姿的过程。即在 SLAM 过程中,运动平台 位姿及所有路标点的位置在没有任何先验信息的条 件下被实时估计。从概率分布的角度讲^[29-30],控制 输入可以描述为运动模型 $P(x_k | x_{k-1}, u_k)$,其中, x_{k-1}, x_k 为k-1, k 时刻的位姿, u_k 为控制输入。

观测输入可以被描述为观测模型 $P(z_k | x_k, m)$ 。 其中, z_k 为 k 时刻的观测,m 为所有路标点。

SLAM 求解过程通常被视为具有马尔可夫性, 即未来的位姿仅与前一时刻的位姿有关系而与过去 的位姿没有关系,从而运动模型与观测模型可以通 过贝叶斯过滤(Bayes filter)来求解当前位姿的后验 分布,先验位姿的估计被描述为预测更新

$$P(\mathbf{x}_{k}, \mathbf{m} | \mathbf{Z}_{0:k-1}, \mathbf{U}_{0:k}, \mathbf{x}_{0}) = \int P(\mathbf{x}_{k} | \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k}) P(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{m} | \mathbf{Z}_{0:k-1}, \mathbf{U}_{0:k-1}, \mathbf{x}_{0}) \, \mathrm{d}\mathbf{x}_{k-1}$$
(1)

式中 **Z**_{0;k-1}——0 到 k – 1 时刻的观测 **U**_{0;k}——0 到 k 时刻的控制输入 **x**₀——初始时刻的位姿

利用先验分布及观测模型求解后验位姿估计被描述 为观测更新

$$\frac{P(\mathbf{x}_{k}, \mathbf{m} | \mathbf{Z}_{0:k}, \mathbf{U}_{0:k}, \mathbf{x}_{0}) =}{\frac{P(\mathbf{z}_{k} | \mathbf{x}_{k}, \mathbf{m}) P(\mathbf{x}_{k}, \mathbf{m} | \mathbf{Z}_{0:k-1}, \mathbf{U}_{0:k}, \mathbf{x}_{0})}{P(\mathbf{z}_{k} | \mathbf{Z}_{0:k-1}, \mathbf{U}_{0:k})}$$
(2)

贝叶斯过滤仅从概率角度解决了 SLAM 问题, 在实际使用时需要给出运动模型及观测模型的具体 形式,目前主流的解决方案包括扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman filter, EKF)及其变体^[31]、非线性 优化(Sparse non-linear optimization method)^[30]及粒 子滤波(Particle filter)^[31]。

1.2 RGB-D相机技术

RGB 相机是一种用于获取周围环境纹理信息 的工具,常用于 SLAM 系统的观测输入,但由于其仅 具有测角而不具有深度测量的功能,所以无法为 SLAM 系统所估计的位姿及地图提供尺度。深度相 机因具有测距功能,弥补了 RGB 相机不能获取深度 的问题。RGB - D 相机作为 RGB 相机与深度相机 硬连接组成体,可以同时获取周围环境的纹理信息 及深度信息。

目前,深度相机进行深度估计主要基于飞行时 间(Time of flight)原理,这种相机被称为 ToF 相机。 飞行时间一般通过使用脉冲信号或调制连续波来获 取,但目前主要使用基于调制连续波的技术。这种 技术通过使用发光二极管(Light-emitting diodes, LED)向目标发射近红外光(Near-infrared light, NIR),当光被反射回来时利用传感器接收并获取当 前相位差及信号强度,用于计算测量目标深度及其 可靠性。ToF 相机测距原理基本与激光雷达一致, 但激光雷达采用逐点扫描的方式对周围目标深度进 行采样,即在测量深度时需要记录角度才能获取所 采样点的坐标;而 ToF 相机使用普通相机中心投影、 通过像素坐标的方式测量角度。

将 ToF 相机与 RGB 相机硬连接后的组合体标 定其内方位元素及相对外方位元素后便可以成为真 正意义的 RGB - D 相机,然后便可将深度相机获取 的像素深度映射到 RGB 相机像素对应的深度

$$d_{c}\boldsymbol{u}_{c} = \boldsymbol{K}_{c} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{c_{d}} (d_{d}\boldsymbol{K}_{d}^{-1}\boldsymbol{u}_{d}) + \boldsymbol{t}_{c_{d}} \end{bmatrix}$$
(3)

$$\ddagger \psi \qquad \boldsymbol{u}_{d} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_{d} & \boldsymbol{v}_{d} & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(4)

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f & c \end{bmatrix}$$
(5)

$$\boldsymbol{K}_{d} = \begin{bmatrix} f_{x} & 0 & c_{x} \\ 0 & f_{y} & c_{y} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(6)

式中
$$d_d$$
——深度相机像素点坐标 u_d 对应的深度

$$K_c$$
、 K_d ——RGB 相机与深度相机的内方位元
素矩阵

 c_x, c_y ——投影中心投影在像素平面坐标系的 坐标

- **R**_{e_d}, **t**_{e_d}——深度相机坐标系相对于 RGB 相 机坐标系的旋转矩阵及平移向 量
- d_e ——RGB 相机像素点坐标 u_e 对应的深度
- **u**_a、**u**_e——深度相机像素点坐标、RGB 相机像 素点坐标

1.3 Google Tango 技术

虽然近年来 SLAM 算法得到改进,芯片运算能 力得到提高,要使移动设备能够实时估计位姿仍然 具有难度。Google Tango 通过使用特殊硬件使智能 手机能够运行 SLAM 系统。如图 1 所示, Google Tango 以运动跟踪相机(RGB 相机)及 ToF 相机(深 度相机)作为观测输入,9轴的加速度传感器、重力 传感器、罗盘传感器估计控制输入,并使用专用的低 功率计算机视觉处理器加快数据处理过程。Google Tango 手机使用基于外观的实时构图 (Real-time appearance-based mapping, RTAB – Map)^[32-33]SLAM 系统,如图2所示, RTAB - Map 系统分为前端和后 端两部分。前端为视觉里程计,该部分使用 RGB -D及IMU 获取的数据逐帧估计手机的相对位姿。 随着估计过程的进行,估计误差累积使位姿漂移逐 渐加重,后端的目的正是为了减少这种误差,后端由 局部光束法平差(Local bundle adjustment)模块与回 环检测模块组成,局部平差模块用于对最近的关键 帧位姿进行平差修正;回环检测通过检测访问过的 区域使用位姿图优化(Pose graph optimization)对各 时刻的位姿进行纠正。

2 样地调查系统设计与原理

该样地调查系统主要依托于 SLAM 系统。如







图 2 RTAB - Map 系统位姿估计、地图构建过程 Fig. 2 Process of estimating pose and mapping in RTAB - Map system

图 3 所示, SLAM 系统以 RGB - D 相机及 IMU 为输 入并实时估计获取的实时 RGB 图像、点云数据、位 姿等信息;样地调查系统使用位姿及深度信息来估 计单木参数, RGB 图像及位姿则通过 OpenGL 构建 三维虚拟场景,通过将 SLAM 坐标系统与 OpenGL 坐标系统对齐从而通过手机屏幕为使用者提供增强 现实(Augmented reality, AR)场景,并使用户能通过 屏幕与 AR 场景进行交互。





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。



SLAM 系统会定义一个以系统启动时设备位置 为原点、x 轴正向水平向右、z 轴正向垂直向上、y 轴 正向指向深度方向的右手坐标系,即初始化坐标系。 SLAM 系统的位姿将以该坐标系为参考坐标系。样 地坐标系是以样地中心为原点、x 轴水平向东、y 轴 正向指向正北、z 轴垂直向上的右手坐标系,可以更 好地描述样地中树木位置。因此,需要获取两个坐 标系的相对关系以实现将以初始化坐标系为参考系 的树木位置转换为以样地坐标系为参考系。两坐标 系之间的相对关系由平移和旋转共6个自由度来确 定,仅需获取2个点在不同坐标系中的坐标值便可 以获取两坐标系的变换矩阵。本文通过采集样地中 心点 $x_{i,center}$ 以及正北方向一点 $x_{i,north}$ 来获取变换矩 阵,其旋转矩阵 $R_{i,p}$ 及平移矩阵 $t_{i,p}$ 分别为

$$\boldsymbol{R}_{i,p} = \begin{bmatrix} I_{z} & -I_{x} & 0\\ 0 & 0 & 1\\ -I_{x} & -I_{z} & 0 \end{bmatrix}$$
(7)

$$\boldsymbol{t}_{i_p} = \boldsymbol{x}_{i_center} \tag{8}$$

$$I = \frac{\begin{bmatrix} x_{c} - x_{n} & 0 & x_{c} - z_{n} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}}{\| \begin{bmatrix} x_{c} - x_{n} & 0 & x_{c} - z_{n} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \|} = \begin{bmatrix} I_{x} & 0 & I_{z} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(9)

为了自动获取样地中心及正北方向一点,本文 设计了棋盘如图 5 所示,用其中 3 × 3 圆形格网指示 样地中心、4 × 4 棋盘格中心指示样地正北方向点, 然后通过使用 OpenCV 库棋盘格检测的方法检测两 棋盘格并获取圆形格网及棋盘格中心坐标,从而获 取 x_{i_center} 及 x_{i_north} ,并经过转换获取样地坐标系 (图 6a)。



图 5 确定样地坐标系所使用的棋盘格

Fig. 5 Chessboard used for building plot coordinate system

SLAM 系统通过回环检测及位姿图优化可以减 少前端视觉里程计位姿估计产生的漂移。若在观测 前获取了样地全局一致的地图,则在每木检尺时手 机位姿漂移将通过后端得到优化,所以本文在每木 检尺之前进行了样地扫描从而构建样地稀疏地图的 步骤。全局一致性地图的准确性与扫描轨迹有着密 切联系,扫描过程适当的应用回环检测则可获取准 确的地图,本文采用螺旋形路径进行扫描以尽可能 多的构建回环检测(图7),图中绿色三角形表示样 地中心,也是扫描起点;红色方形为扫描终点,该点 接近于样地边界。为了确保能够获取完整的样地地 图且不至于浪费时间扫描样地外的地面,或者在每 木检尺时避免采集样地外树木的信息,确定样地







边界极为重要。本文使用增强现实技术在 OpenGL 坐标系内构建了样地边界,当观测者接近样地边界 时,手机屏幕将会显示样地边界的位置(图 6b)。

每木检尺过程需要对样地中所有立木的胸径、 树高和树种等进行观测。为确定胸径所在位置,首 先需要确定地径处一点以确定胸高位置(图6c、 6d),然后利用胸高处的点云过滤、拟合可获取立 木胸径及位置信息^[28],经过映射到 OpenGL 坐标 系便可以将结果展示在屏幕上(图6e);在完成胸 径、位置估计后,若需要观测树高则移动到能够观 测到树梢的位置,在屏幕上点击树梢,便可计算树 高(图6f)。



Fig. 7 Scanning trajectory for building plot map

每木检尺过程获取了立木的胸径、树高、立木位 置、树种信息(图 6g、6h),所有样地、样地所代表的 林分等信息便可由此计算(图 6i)。林分平均胸径 为

$$\overline{D} = \sum_{i=1}^{N} d_i \tag{10}$$

式中 d_i ——样地中第 i 棵树的胸径, cm

林分平均树高为

$$\overline{H} = \sum_{i=1}^{N} h_i \tag{11}$$

式中 *h_i*——样地中第*i*棵树的树高,m 第*i*棵立木材积为

$$V_i = \frac{\pi d_i^2 (h_i + 3) f_\varepsilon}{4} \tag{12}$$

式中 f_-实验形数

每公顷蓄积量(单位:m3/hm2)为

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{N} V_i}{S} \times 10^4$$
 (13)

式中 S-----样地面积,m²

每公顷横断面积(单位:m²/hm²)为

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{\pi d_i^2}{4}}{S} \times 10^4$$
(14)

林分株树密度(单位:株/hm²)为

$$n = \frac{N}{S} \times 10^4 \tag{15}$$

若样地中立木的位置平均值 μ 及协方差 Σ 分 别为

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_{x} \\ \boldsymbol{\mu}_{y} \\ \boldsymbol{\mu}_{z} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{x}_{i} = \sum_{i=1}^{N} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{i} \\ \boldsymbol{y}_{i} \\ \boldsymbol{z}_{i} \end{bmatrix}$$
(16)

$$\boldsymbol{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} (\boldsymbol{x}_{i} - \boldsymbol{\mu}) (\boldsymbol{x}_{i} - \boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}} = \sum_{i=1}^{N} \begin{bmatrix} x_{i} - \boldsymbol{\mu}_{x} \\ y_{i} - \boldsymbol{\mu}_{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i} - \boldsymbol{\mu}_{x} \\ y_{i} - \boldsymbol{\mu}_{y} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} x_{i} - \boldsymbol{\mu}_{x} \\ y_{i} - \boldsymbol{\mu}_{y} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{x}_{i} = (\boldsymbol{x}_{i}, y_{i}, z_{i})^{\mathrm{T}}$$
(17)

其中

式中 **x**_i——样地中第 i 棵树在样地坐标系中的位置 坐标

则样地近似平面的法向量为协方差矩阵 Σ 最小特征值所对应的特征向量 $n_{min_{eigenvalue}}$,则样地的坡度及坡向分别为

$$P = \frac{180}{\pi} \arccos \frac{\boldsymbol{n}_{min_eigenvalue} \boldsymbol{I}_z}{|\boldsymbol{n}_{min_eigenvalue}|}$$
(18)

$$A = \frac{180}{\pi} \arccos \frac{(En_{min_eigenvalue})I_{y}}{|En_{min_eigenvalue}|}$$
(19)

其中
$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(20)

3 实验区域与方法

3.1 实验区域概况

实验区域为北京市西山实验林场,该林场位于 北京市近郊小西山(39°58′N,116°11′E)。选择18 块半径为7.5 m 的圆形样地为研究对象。为了使实 验具有代表性,所选的样地具有不同的坡向、坡度, 林分具有不同密度、树种。所选样地地面具有较少 灌木且容易到达。表1为不同样地立木的基本属性。

表1 样地属性

Tab. 1 Summary statistics of plot attributes

样地	立木	十日村社	唇材和 胸径/cm		树高/m		
编号	数	土于树种	均值	标准差	均值	标准差	
1	17	银杏	18.66	1.72	10.76	0.72	
2	20	毛白杨	21.57	4.18	20.81	3.07	
3	21	毛白杨	15.11	1.27	14.08	2.96	
4	12	油松	15.74	1.73	6.97	1.43	
5	17	白蜡	18.76	2.22	13.91	0.76	
6	16	白蜡	17.02	1.44	13.85	0.66	
7	14	白蜡、刺槐	19.57	8.50	13.78	3.31	
8	16	白蜡	16.23	2.97	13.76	1.00	
9	12	旱柳	21.12	4.10	13.50	1.20	
10	16	银杏、油松	17.21	2.86	19.75	2.39	
11	16	榆树	14. 83	2.46	10.16	1.04	
12	14	毛白杨	21.38	4.01	14.67	1.81	
13	18	栾树	17.18	3.09	9.42	1.37	
14	16	栾树	16.02	2.66	9.81	1.29	
15	20	榆树	16.15	6.06	11.23	3.37	
16	20	银杏	17.02	1.50	11.24	0.85	
17	19	毛白杨	24.80	2.32	24.72	4.68	
18	17	毛白杨	27 46	2 38	26.48	2 70	

3.2 实验方法

为了验证设计的系统在样地调查中的精度,使 用胸径尺测量胸径作为胸径参考值,使用全站仪 (Leica Flexline TS06plus)测量树高作为树高参考 值,使用全站仪测量立木位置作为立木位置的参考 值。样地所代表区域林分参数的参考值均基于胸 径、树高及立木位置参考值进行计算。为了给出所 设计系统的估计精度,本文使用偏差(BIAS)、均方 根误差(Root mean squared error, RMSE)、相对偏差 (relative BIAS)及相对均方根误差(relative RMSE) 对各测量值进行评估,计算公式如下

$$B_{IAS} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{ir})}{n}$$
(21)

$$B_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{x_i}{x_{ir}} - 1\right)}{n} \times 100\%$$
(22)

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{ir})^2}{n}}$$
(23)

$$R_{rel} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{x_i}{x_{ir}} - 1\right)^2}{n}} \times 100\%$$
 (24)

式中 x_i-----测量值

 x_{ir} ——测量值 x_i 对应的参考值

 n ——测量值总数

 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 实验结果

所设计系统通过样地调查估计林分因子及样地 因子的关键在于测量样地中立木胸径、树高及位置 的精度。如图 8 所示,胸径估计值是无偏的且随着 胸径增加估计值的误差离散度不变。由表 2 可以看 出,胸径估计值具有较小的偏差(0.32 cm)及较小 的离散度(1.27 cm)。图 9 说明了树高估计值是无 偏的(8.0 cm),而估计值的离散度随树高增加而变 大,但由表 2 可知总体仍然具有较小的离散度 (95 cm)。图 10 描述了树木在水平面上的位置误 差,总体而言立木位置是无偏的(x 方向偏差为



Fig. 8 Scatter plot of estimated DBH values

3.0 cm; y 方向为 – 1.7 cm),且离散度较小(x 方向 为 3.8 cm; y 轴方向为 3.0 cm),由表 2 可知,高程方 向的偏差(0.4 cm)及离散度(1.1 cm)相较于 x 、y 方 向较小。

表 2 单木属性精度 Tab. 2 Estimations of tree-based properties

単木	因子	B_{IAS} /cm	$B_{rel}/\%$	$R_{\rm MSE}/{ m cm}$	$R_{rel}/\%$		
胸	径	0.32	1.85	1.27	6.77		
树	高	8.0	0.66	95	5.52		
	x	3.0	1.46	3.8			
位置	у	-1.7	2.28	3.0			
	z	0.4	0.46	1.1			



Fig. 9 Scatter plot of estimated tree height values



Fig. 10 Position errors of all trees in plots

表3为18块样地的林分参数,所有的林分参数 均与参考值相接近。仅样地3株树密度与参考值不 一致。如表4所示,总体而言所有林分估计值具有 较小偏差及较小的离散度。表5比较了样地坡度及 坡向测量值与估计值,结果表明坡度的估计值与参 考值接近;当坡度较小时,由于 SLAM 系统位姿估计 误差导致坡向估计值与参考值差异较大。总体而 言,坡度及坡向的测量值仍然可靠。

表3 林分属性估计结果

Tab. 3 Estimation results of forest-based properties

长叶白	平均胸径/cm		平均树高/m		蓄积量/(m ³ ·hm ⁻²)		横断面积/(m ² ·hm ⁻²)		株树密度/(株·hm ⁻²)	
忤地亏	估计值	参考值	估计值	参考值	估计值	参考值	估计值	参考值	估计值	参考值
1	19.09	18.66	10.96	10.76	161. 125 9	151. 178 1	27. 881 3	26. 529 2	962	962
2	21.64	21.57	22.13	20.81	449. 780 9	426. 337 9	43.0710	42.8879	1 132	1 132
3	15.25	15.11	13.82	14.08	152. 452 6	152. 938 8	21.8036	21.4711	1 132	1 188
4	17.10	15.74	7.20	6.97	66. 845 4	55. 279 8	15.7443	13.3761	679	679
5	18.92	18.76	13.98	13.91	193. 059 2	189.4271	27.4033	26. 959 3	962	962
6	17.64	17.02	13.85	13.85	156.0418	145. 199 5	22. 350 2	20. 743 5	905	905
7	20.65	19.57	13.94	13.78	227. 264 4	211.6346	30. 720 2	28.3338	792	792
8	17.10	16.23	13.78	13.76	151. 432 6	135.6873	21. 475 2	19.3611	905	905
9	20.87	21.12	12.95	13.50	158. 332 4	168. 254 5	23.9686	24.6776	679	679
10	17.57	17.21	20.01	19.75	215.0430	207.0774	22. 362 7	21.6481	905	905
11	15.23	14.83	10.13	10.16	92. 783 8	88.4782	16. 858 6	16.0736	905	905
12	21.63	21.38	15.11	14.67	225. 142 6	215.8080	30. 076 3	29.4365	792	792
13	17.43	17.18	9.52	9.42	129. 409 4	124. 849 1	25.0619	24. 385 8	1 019	1 019
14	16.75	16.02	9.76	9.81	107. 193 5	98. 157 6	20. 461 5	18. 749 4	905	905
15	15.21	16.15	11.23	11.23	155. 474 4	170. 555 6	23. 904 2	26.4517	1 132	1 132
16	16.31	17.02	11.21	11.24	140. 633 0	152. 959 4	23. 863 5	25.9336	1 132	1 132
17	26.13	24.80	25.77	24.72	699. 470 3	604. 747 2	58.0772	52. 389 8	1 075	1 075
18	27.79	27.46	24.61	26.48	683. 524 9	711.7131	58. 839 6	57.4211	962	962

表4 林分/样地属性估计值的精度

 Tab. 4
 Accuracies of forest-based and

sample-based properties

林分/样地	R	B /0%	R	R /0%
属性	DIAS	D _{rel} / /0	<i>R_{MSE}</i>	n_{rel} //
平均胸径	0.36 cm	1.93	0.69 cm	3.89
平均树高	0.06 m	0.50	0.63 m	2.95
蓄积量	$8.5959\ m^3/hm^2$	4.21	$25.735\;8\;m^3/hm^2$	8.67
横断面积	$0.949~7~m^2/hm^2$	3.81	$1.\ 987\ 3\ m^2/hm^2$	7.51
株树密度	-3株/hm²	-0.26	13 株/hm ²	1.12
坡度	0. 30°		0. 88°	
坡向	-0.44°		7.61°	

5 结论

(1)基于 RGB - D SLAM 手持式设备构建了森林样地调查系统,该系统使用 SLAM 系统估计了设备的相对位姿,利用 ToF 相机获取周围三维采样,依此设计了计算立木胸径、树高及位置的算法,从而形成了构建样地、每木检尺及林分/样地参数估计的调查系统。基于 Android 平台显示系统设计了增强现实功能,用于实时显示调查结果,为观测者提供检查及交互功能。

表5 样地属性估计结果

Tab. 5 Estimation results of plot-based properties

	坡	坡度		向
忭 地亏	估计值	参考值	估计值	参考值
1	4.7	4.9	78.5	74.7
2	3.2	3.8	73.4	62.1
3	6.6	6.0	64.3	63.0
4	8.6	8.4	89.7	98.1
5	7.6	6.5	56.1	37.0
6	3.5	2.1	12.2	8.2
7	0.8	0.8	132.1	135.7
8	8.3	7.5	174.7	178.7
9	5.8	5.5	171.4	171.4
10	2.8	0.8	155.8	168.4
11	4.6	4.7	126.7	138.9
12	4.8	3.4	162.7	162.4
13	6.0	5.7	177.1	171.7
14	1.4	2.9	130.9	131.8
15	13.5	14.1	56.9	56.9
16	14.2	14.1	36.5	37.8
17	1.9	2.2	135.9	145.0
18	23.3	22.7	28.5	29.6

(2)该系统在18块半径为7.5m的圆形样地中进行了测试。与参考值对比表明,该系统在林分及 样地属性估计时均能获取较精确的结果。

参考文献

- [1] TRUMBORE S, BRANDO P, HARTMANN H. Forest health and global change[J]. Science, 2015, 349(6250):814-818.
- [2] RIDDER R M. Global forest resources assessment 2010: options and recommendations for a global remote sensing survey of forests[J]. Forest Resources Assessment Working Paper, 2007, 141:7-30.
- [3] MACDICKEN K G. Global forest resources assessment 2015: what, why and how? [J]. Forest Ecology and Management, 2015,352:3-8.

(0)

- [4] REUTEBUCH S E, ANDERSEN H E, MCGAUGHEY R J. Light detection and ranging (LiDAR): an emerging tool for multiple resource inventory[J]. Journal of Forestry, 2005, 103(6): 286-292.
- [5] LIANG X, KANKARE V, HYYPPÄ J, et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 63 - 77.
- [6] 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)
- [7] KALLIOVIRTA J, LAASASENAHO J, KANGAS A. Evaluation of the laser-relascope [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 204(2-3): 181-194.
- [8] 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)
- [9] BARRETT F, MCROBERTS R E, TOMPPO E, et al. A questionnaire-based review of the operational use of remotely sensed data by national forest inventories [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 279 289.
- [10] SUCIU G, CIUCIUC R, PASAT A, et al. Remote sensing for forest environment preservation [C] // World Conference on Information Systems and Technologies. Cambridge: Springer, 2017: 211 220.
- [11] LIM K, TREITZ P, WULDER M, et al. LiDAR remote sensing of forest structure [J]. Progress in Physical Geography, 2003, 27(1): 88 106.
- [12] BÉLAND M, WIDLOWSKI J L, FOURNIER R A, et al. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(9): 1252 – 1266.
- [13] LIANG X, LITKEY P, HYYPPA J, et al. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(2): 661-670.
- [14] LIANG X, HYYPPÄ J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels
 [J]. Sensors, 2013, 13(2): 1614 1634.
- [15] LIANG X, HYYPPÄ J, KUKKO A, et al. The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(9): 1504 – 1508.
- [16] RYDING J, WILLIAMS E, SMITH M J, et al. Assessing handheld mobile laser scanners for forest surveys [J]. Remote Sensing, 2015, 7(1): 1095 - 1111.
- [17] BAUWENS S, BARTHOLOMEUS H, CALDERS K, et al. Forest inventory with terrestrial LiDAR: a comparison of static and hand-held mobile laser scanning[J]. Forests, 2016, 7(6): 127 - 143.
- [18] SCARAMUZZA D, FRAUNDORFER F. Visual odometry tutorial [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2011, 18(4): 80-92.
- [19] FRAUNDORFER F, SCARAMUZZA D. Visual odometry: part II: matching, robustness, optimization, and applications[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012, 19(2): 78 - 90.
- [20] TANG J, CHEN Y, KUKKO A, et al. SLAM-aided stem mapping for forest inventory with small-footprint mobile LiDAR[J]. Forests, 2015, 6(12): 4588-4606.
- [21] HOLMGREN J, TULLDAHL H M, NORDLÖF J, et al. Estimation of tree position and stem diameter using simultaneous localization and mapping with data from a backpack-mounted laser scanner[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2017, 42:59-63.
- [22] KUKKO A, KAIJALUOTO R, KAARTINEN H, et al. Graph SLAM correction for single scanner MLS forest data under boreal forest canopy[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 132: 199 – 209.
- [23] FOIX S, ALENYA G, TORRAS C. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: a survey [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(9):1917-1926.
- [24] HYYPPÄ J, VIRTANEN J P, JAAKKOLA A, et al. Feasibility of Google Tango and Kinect for crowdsourcing forestry information[J]. Forests, 2017, 9(1): 152 – 165.
- [25] KERALIA D, VYAS K K, DEULKAR K. Google project Tango—a convenient 3D modeling device[J]. International Journal of Current Engineering and Technologies, 2014, 4: 3139 3142.
- [26] JAFRI R, CAMPOS R L, ALI S A, et al. Utilizing the Google project Tango tablet development kit and the unity engine for image and infrared data-based obstacle detection for the visually impaired [C] // Proceedings of the 2016 International Conference on Health Informatics and Medical Systems (HIMS'15). Las Vegas, 2016: 163-164.
- [27] TOMAŠTÍK J, SALOŇŠ, TUNÁK D, et al. Tango in forests—an initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 109-117.
- [28] 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.
- [29] DURRANT-WHYTE H, BAILEY T. Simultaneous localization and mapping: part I [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(2): 99 - 110.
- [30] BAILEY T, DURRANT-WHYTE H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(3): 108 117.
- [31] THRUN S, BURGARD W, FOX D. Probabilistic robotics [M]. MIT Press, 2005.
- [32] LABBÉ M, MICHAUD F. Memory management for real-time appearance-based loop closure detection [C] // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2011; 1271 1276.
- [33] LABBE M, MICHAUD F. Appearance-based loop closure detection for online large-scale and long-term operation [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(3): 734 745.