

DOI: 10.11929/j.swfu.202011092

引文格式: 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): 1-10.

基于 SfM 的城市树木参数提取研究

王小玲¹ 宋坤^{1,2,3} 王子斐¹ 达良俊^{1,2,3} Martin Mokroš^{4,5}

(1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 上海 200241; 2. 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 3. 崇明生态研究院, 上海 200062; 4. 捷克布拉格生命科学大学林业和木材科学学院, 捷克 布拉格 16500; 5. 兹沃伦技术大学林学院, 斯洛伐克 兹沃伦 96001)

摘要: 通过在城市森林样地水平的树干三维模型重建与估算胸径试验 (半径 6 m 圆形样地), 研究运动恢复结构 (SfM) 算法在城市森林调查中应用的可行性, 并将 SfM 算法得到的胸径与手持式激光雷达结果进行比较。结果表明: 在胸径估算结果上, SfM 算法的 rRMSE 为 5.38% (rBias=2.74%), 手持式激光雷达的 rRMSE 为 3.35% (rBias=1.04%), 2 种方法的估测值均与野外实测值高度呈正相关 (R^2 大于 0.97), 满足树木参数提取精度要求。SfM 算法成本低、易操作, 具有创新意义, 且估算树干胸径在森林资源调查允许误差范围内, 在城市森林资源调查中具有一定应用价值。

关键词: 近景摄影测量; 林业调查; 消费级相机; 手持式激光雷达; 城市绿地

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2021)06-0001-10

Usage of Structure-from-Motion for Urban Forest Inventory

Wang Xiaoling¹, Song Kun^{1,2,3}, Wang Zifei¹, Da Liangjun^{1,2,3}, Martin Mokroš^{4,5}

(1. Zhejiang Tiantong Forest Ecosystem National Observation and Research Station, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Process and Eco-Restoration, Shanghai 200241, China; 3. Institute of Eco-Chongming, Shanghai 200062, China; 4. Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Prague 16500, Czech Republic; 5. Department of Forest Harvesting, Logistics and Ameliorations, Faculty of Forestry, Technical University in Zvolen, Zvolen 96001, Slovakia)

Abstract: SfM can produce image-based point clouds with high accuracy and quality only by consumer cameras. In this paper, we evaluated the urban trees reconstruction and Diameter at Breast Height (DBH) measurements by SfM based on a circular urban forest plot (radius = 6 m) to verify the feasibility for urban forest inventory. Furthermore, hand-held laser scanning was also used as a counterpart technique. The results indicated that SfM can obtain DBH of urban trees with satisfying accuracy for urban forest inventory measurements (RMSE = 5.38%, rBias = 2.74%), which was similar to the hand-held laser scanner (RMSE = 3.35%, rBias = 1.04%). Both of the evaluated DBH from SfM and hand-held laser scanner were highly and positively correlated with that from field measurements ($R^2 > 0.97$). SfM is a revolutionary, low-cost, and user-friendly technique, which can also meet the requirements of tree-parameter precision. Thus, the SfM technique is valuable in urban tree inventory.

Key words: close-range photogrammetry; forest inventory; consumer camera; hand-held laser scanning; urban greening

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金 (31500355, 31770468) 资助; 上海市科技创新行动计划 (18DZ1204600, 18DZ1204704) 资助; 中国长江三峡集团科技基金 (20203138) 资助。

第 1 作者: 王小玲 (1996—), 女, 博士研究生。研究方向: 城市生态学。Email: wxl332529@163.com。

通信作者: 宋坤 (1983—), 男, 副教授。研究方向: 植被生态学、植被学、恢复生态学。Email: ksong@des.ecnu.edu.cn。

城市森林为居民提供了多重生态系统服务,包括降温增湿、净化空气和游憩休闲等,评估城市森林资源的时空变化对理解多重生态系统服务和森林资源管理至关重要^[1-2]。在城市森林资源调查中,树干胸径(DBH)可与树高、材积和生物量等相关联,对于经济效益建模^[3]、空气污染净化^[4-5]和缓解城市热岛效应都具有一定影响,因此DBH是城市森林调查中重要的树木参数。传统野外调查依赖于人工,费时费力,主观性强,且无法得到树木三维信息。遥感技术的出现,使森林资源调查技术具有更多选择^[6-7]。在基于遥感技术的森林资源调查中,地基激光雷达技术能够以点云的形式较准确地估算出DBH,树高和生物量等^[8],被认为是最精确的地面遥感技术之一。在我国,激光雷达扫描技术在森林调查中已备受关注,庞勇等^[8]和郭庆华等^[9]分别进行了激光雷达技术在森林资源调查中适用性的综述研究。然而,地基激光雷达技术的花费仍然较昂贵,在森林调查中需要具备专业知识的技术人员,且模型结果无法体现树木纹理。因此,其他遥感技术如移动激光雷达(MLS)^[10]和近景摄影测量技术(CRP)^[11]获得越来越多的关注。

近年来,随着图像匹配算法和计算机硬件的发展,基于运动恢复结构(SfM)算法的近景摄影测量技术成为一种地面遥感技术新方法。该方法与激光雷达昂贵的硬件设备相比,仅需要消费级相机,且基于该方法的DBH评估值在森林资源调查允许误差范围内(RMSE=0.91~6.79 cm)^[11-15]。在SfM算法还没出现以前,国内对数字近景摄影测量技术在森林调查上的应用已有一定研究^[16-19],冯仲科等^[19]将精准测量仪器应用于林业调查,最早提出“精准林业”的概念并强调用普通相机进行摄影测量意义重大;王秀美等^[16]基于数字摄影测量技术,建立了森林照片处理系统;刘金成等^[20]通过CCD镜头结合高精度定位模块建立三维点云测量了北京香山公园人工林树木位置、胸径和树高。然而,以往的数字近景摄影测量技术需要繁琐的控制测量和相机参数获取步骤。SfM算法中场景几何形状、摄像机位置和方向均可自动处理。SfM算法以其高精度和低廉的价格正受到国外林业学者的重视^[21],国内对SfM算法在森林调查上的应用关注较少。SfM算法起源于20世纪90年代的计算机视觉领域^[22]。在21世纪初,基于该算法的三维场景重建技术得到迅速发展^[23]。Westoby等^[24]基于SfM算法进行矿山三维场景重

建并进行摄影测量实践,获得了精度较高的数字高程模型,SfM算法在各个领域的应用由此展开^[24-26],涉及航空和地面摄影测量。Liang等^[12]首次在林业调查中应用SfM算法并提取树干位置和胸径。随后,捷克和斯洛伐克^[11,14]、澳大利亚^[27]、美国^[28]等地的学者陆续在林业调查中应用SfM算法提取树木参数。研究发现,SfM算法在人工林^[29]或天然林^[14]中对单株树木有很好的三维重建效果,在天然林的样地尺度上能够提取胸径和树干位置等参数^[11-12,15]。由于天然林中光照条件差、树木密度高且有树枝和灌木遮挡,其成像条件将不如人工林。在城市森林调查中,消费级相机的灵活性更高,SfM算法能够增加森林调查的频率,从而拓宽了城市森林生态学研究范围,如物候的改变^[30]等。同时,SfM算法提供的光谱信息可用于树种的识别^[31-32]和森林健康^[32]的研究。目前,SfM算法还未曾出现在城市森林的调查中。

有鉴于此,为了评估SfM算法在城市森林调查和管理中应用的可行性。研以华东师范大学内的人工林为研究对象,探究SfM算法在城市森林调查中重建树干三维模型并提取树干胸径一般步骤。将SfM算法得到树木胸径与移动激光雷达(手持式)结果作对比,对SfM算法在城市森林调查中应用的可行性进行分析并对未来研究方向提出建议。

1 材料与方法

1.1 研究区选择

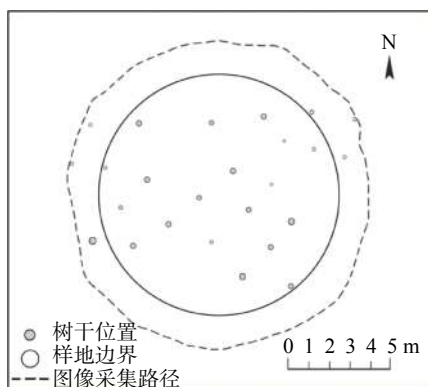
研究区位于华东师范大学闵行校区内(31°1'58.33"N, 121°26'55.28"E),样地为半径6 m的圆形样地,坡度为5°,样地内有水杉(*Metasequoia glyptostroboides*) 19株,胸径为(15.16±4.34) cm。林下无其他灌木,地面以裸露土壤和草本为主(图1a)。

1.2 样地设置与调查

本研究使用5个均匀分布在样地的人工标记物和1个花杆(图1a)进行点云的定位和缩放。采用胸径尺测量每个树干的胸径作为参考值,使用华测导航X12惯导RTK(上海华测导航科技股份有限公司,中国)记录树干1.3 m高度及人工标记物的地理坐标,树干位置用于后期匹配参考胸径进行精度分析,人工标记物位置用于点云的相对定位。



a. 样地中相机、花杆及人工标记物设置



b. 样地边界及采集路径

灰色填充圆代表不同树干位置和胸径大小。

图1 研究区

Fig. 1 Research area

1.3 数据采集

1.3.1 SfM 照片采集

相机参数设置会影响照片质量，从而对 SfM 建模的结果造成影响；照片质量的差异会影响图片匹配，因此需要确定并固定最优相机参数。相机参数主要包括光圈大小、快门速度、感光度（ISO）和对焦设置^[16,33]。在距离树干 3~4 m 的位置进行相机自动对焦，随后调整成手动模式，并在接下来的拍摄过程中保持对焦不变。快门速度决定是否使用三脚架（使用三脚架时快门速度应较低，如 1/30）以及是否移动拍摄（移动拍摄时快门速度应较高，如 1/250），较大的快门速度能够减少图像模糊，但会减少进光从而使图像变暗。因此快门速度需要与 ISO 和光圈相互调节，最佳 ISO 为 100，因为较高的 ISO 会使照片有更多噪点，但当照片欠曝光时，需要调大 ISO 但不能高于 800；光圈越大景深越大，最佳光圈大小为 7.1，但当照片曝光过度时需要调大光圈直到正常。本研究在调试过后，相机参数设置如下：ISO 为 100，快门速度为 1/30，光圈为 7.1，手动对焦模式下保持焦距不变。

本研究选取的消费级相机为 Sony α9 单反相机（索尼公司，日本），镜头为 Sony FE 24–70 mm

F2.8 GM，同时使用三脚架防止抖动影响照片质量。照片采集时间在 2020 年 6 月 6 日下午 14:00 左右，天气为阴天。采集路径为距离圆形样地边界 1~2 m 的圆形路径（图 1b），使相机位于 1.3 m 高度处且镜头垂直与样地圆心（图 1a）。采用走走停停的方式采集照片，保证相邻照片影像重叠度在 70%~80% 左右，最终共采集 99 张照片，耗时 16 min。

1.3.2 手持激光雷达数据采集

同步定位与建图（SLAM）技术可以让设备（相机或激光雷达）在没有 GNSS 信号的情况下进行实时相对定位^[34-35]。已有研究将 SLAM、激光雷达、GPS 和惯性测量单元（IMU）集成为移动激光雷达扫描系统，并将该扫描系统应用在自然林的调查中^[36-37]。手持激光雷达 ZEB-Horizon（GeoSLAM，英国）（图 2b）是基于 SLAM 技术的轻型激光雷达扫描仪，其将 Velodyne VLP-16 激光雷达搭载在可旋转手柄上，是已集成的商业手持式激光雷达。整套装置重 1.5 kg，激光最远射程为 100 m，采集速度 30 万点/s，非常适合户外林业调查使用。依据需要获得树木参数的不同，可选择不同扫描方式，如需获得冠幅参数可在移动过程中将手持激光雷达上下扫描（图 2a）。



a. 树冠扫描



b. 设备全貌

扫描树干时，设备应位于胸高位置。

图2 手持式激光雷达

Fig. 2 The hand-held ZEB-Horizon laser scanner

本研究选取手持式激光雷达 ZEB-Horizon 沿着样地外围圆形路径（图 1b）进行扫描，并保证路线闭合，使 SLAM 算法检测到相对位置。使手持式激光雷达位于 1.3 m 高度处，并将扫描仪始终垂直于样地圆心。采用连续扫描的方式，共耗时 5 min。

1.4 树木参数提取方法

1.4.1 基于 SfM 的胸径提取

1) 点云的生成。点云的生成即基于 SfM 算法通过照片构建三维点云的过程。基本假设：图像中包含物体不同角度的二维投影，对物体特征点进行三角测量能够计算出物体的三维几何形

状^[15]。关键在于识别图像中的物体特征点的过程，确定不同图像的特征点可以获得点的三维位置和图像对应的相机位置。能够实现 SfM 算法三维点云重建的专业软件有很多，包括商业软件 Agisoft Metashape、Reality Capture 以及开源软件 Visual SfM 和 Mic Mac 等^[38-39]。依据各软件的可操作性、处理速度和受众等，对软件的各项性能进行评估（表 1），其中结果准确性受软件参数设置的影响^[38]。结果表明，Agisoft Metashape 除处理速度欠佳外，其他性能均为优秀，综合表现最佳。本研究选取 Agisoft Metashape 生成点云，耗时 102 min。

表 1 基于 SfM 算法重建三维点云的不同软件对比

Table 1 Comparison of different software which can reconstruct 3D point clouds by SfM photogrammetry

软件名称	许可性	流程简洁性	操作引导性	处理快速能力	数据融合能力	交互性能	用户群大小
Agisoft Metashape	收费	优	优	良	优	优	优
Pix4D	收费	优	优	良	良	良	优
Visual SfM	开源	良	良	优	良	良	良
Mic Mac	开源	优	优	良	优	良	优

2) 点云的定位与缩放。由照片生成的点云位于计算机定义的相机空间内，而相机空间与真实空间不同。因此点云需要经过定位和缩放以接近真实值。定位和缩放的方式有多种，包括通过 GNSS，记录相机的位置或通过 GNSS 记录地面控制点位置来定位和缩放。例如，Forsman 等^[13]基于多相机平台，对相机和平台进行标定，标定过程中获得的相机基线使点云能够自动缩放；Liu 等^[20]将 CCD 镜头绑定在 RTK 上以记录相机位置。但 SfM 算法主要还是通过提前用 GNSS 记录野外参照物或人工标记物的地理位置，以此作为地面控制点来进行定位和缩放，如 Liang 等^[12]和 Mok-roš 等^[11]以测绘花杆和人工标记物作为参照进行垂直定向和比例缩放。本研究通过人工标记物和花杆进行定位与缩放（图 1a）。

3) 点云单木分割与树木参数提取。本研究选取 Li 等^[40]开发出的一种对点云进行单木分割的算法，算法原理见图 3。该算法从种子点 A 开始，根据间距临界值和最小间距对更低点进行估算，将种子点 A 发展为 1 号树木的聚类。当间距 d_{AB} 大于设定的临界值时，点 B 被分类为 2 号树

木的聚类；同理， d_{AC} 小于临界值，且 d_{AC} 小于 d_{BC} ，点 C 属于 1 号树木；通过点 B 与点 C 的比较，点 D 被分类为 2 号树木；通过点 C 与点 D 的比较，点 E 被分类为 2 号树木，以此类推，得到单木分割点云。临界值的设定应避免过大或过小，一般与冠层半径相等。

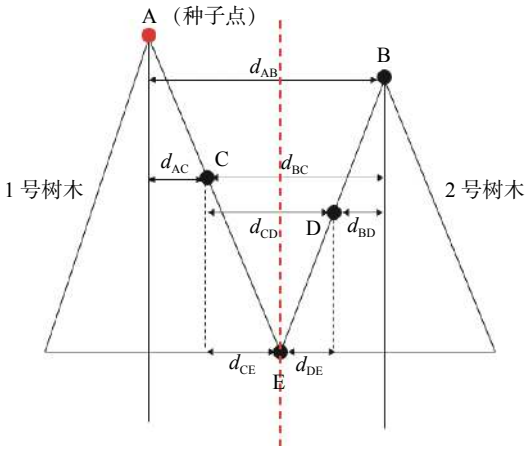


图 3 单木分割算法^[40]

Fig. 3 Individual tree segmentation^[40]

树木参数可通过直接的线性测量得到^[41]，或通过计算机算法得到^[12]，后者通常更准确。目前

研究中,通过计算机算法得到的树木参数包括树干位置、胸径、体积、树干曲线和增长量等。如树干位置和胸径估算可通过基于三维点云投影的圆(柱)拟合算法^[12-13]或凸包算法^[28,42]得到,其中树干位置即拟合圆柱的圆心。树木枝条或根系体积可通过 watertight 模型对三维模型进行封闭估算得到^[41,43],树干体积或增长量可通过异速生长方程结合胸径估算得到^[41]。商业软件 LiDAR360^[44]和开源软件 DendroCloud^[45]均能够通过计算机算法提取树木参数。另外,软件 FAIT 也在已有研究中出现过^[46]。本研究在 DendroCloud 中通过圆拟合算法实现胸径的提取。

1.4.2 基于手持激光雷达数据的胸径提取

本研究选取的手持式激光雷达 ZEB-Horizon 是已经集成 SLAM 的商业设备,点云数据在设备中产生时已经过定位与缩放,导出数据并剪裁耗时 10 min。为保证与 SfM 算法具有可比性,单木分割以及胸径提取的过程与 SfM 保持一致。

1.5 精度分析

结果的准确性通过偏差(Bias),相对偏差(rBias),均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(rRMSE)来表示,详见公式(1)~(4)。通过线性回归模型分别比较 SfM 算法和手持式激光雷达胸径估算值与野外实地测量值的关系。上述计算在 R 3.5.3 的集成开发环境 R-Studio 中完成。

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ri}) \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_{ri})^2}{n}} \quad (2)$$

$$\text{rBias} = \frac{\text{Bias}}{\bar{y}_r} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{rRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{y}_r} \times 100\% \quad (4)$$

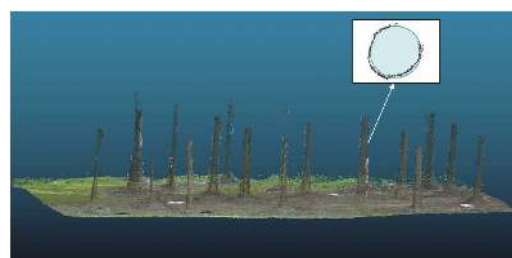
式中: y_i 表示第 i 个估测值, y_{ri} 表示第 i 个参考值, $\bar{y}_r$ 表示参考值均值, n 表示估测值个数。

2 结果与分析

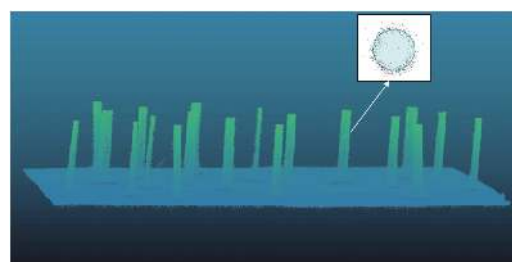
2.1 基于 SfM 的城市树木胸径估算结果

基于 SfM 算法创建样地三维模型,树木检出率为 100% (图 4)。SfM 算法得到胸径的 Bias 为 0.42 cm, RMSE 为 0.82 cm, rRMSE 为 5.38%, rBias 为 2.74% (表 2)。SfM 估测得到的胸径大小为 (15.57±4.39) cm, 与野外参考值 ((15.16±

4.34) cm) 无显著性差异 (图 5)。SfM 算法得到胸径与野外实地测量值高度正相关,线性回归模型的决定系数 (R^2) 为 0.9714 (图 6)。



a. SfM 算法



b. 手持式激光雷达

图中黑点为某个体树干胸高处点云,黑实线为点云在 DendroCloud 1.21 中进行圆拟合后得到的拟合线。

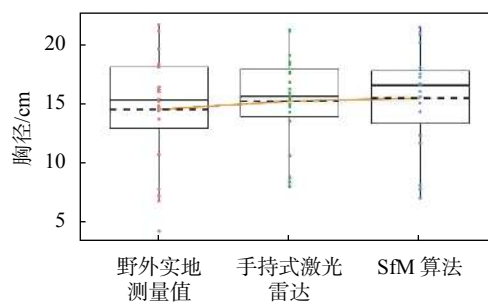
图 4 样地三维模型与点云胸高截面示意图

Fig. 4 The 3D views of the forest plot and cross-section of a trunk at breast height

表 2 SfM 算法与手持式激光雷达估算胸径结果

Table 2 The results of SfM photogrammetry and hand-held laser scanning for DBH estimation

方法	Bias/cm	rBias/%	RMSE/cm	rRMSE/%
SfM算法	0.42	2.74	0.82	5.38
手持式激光雷达	0.16	1.04	0.51	3.35



相同小写字母表示差异不显著。

图 5 不同方法得到胸径箱线图。

Fig. 5 Comparison of DBH estimations from different methods

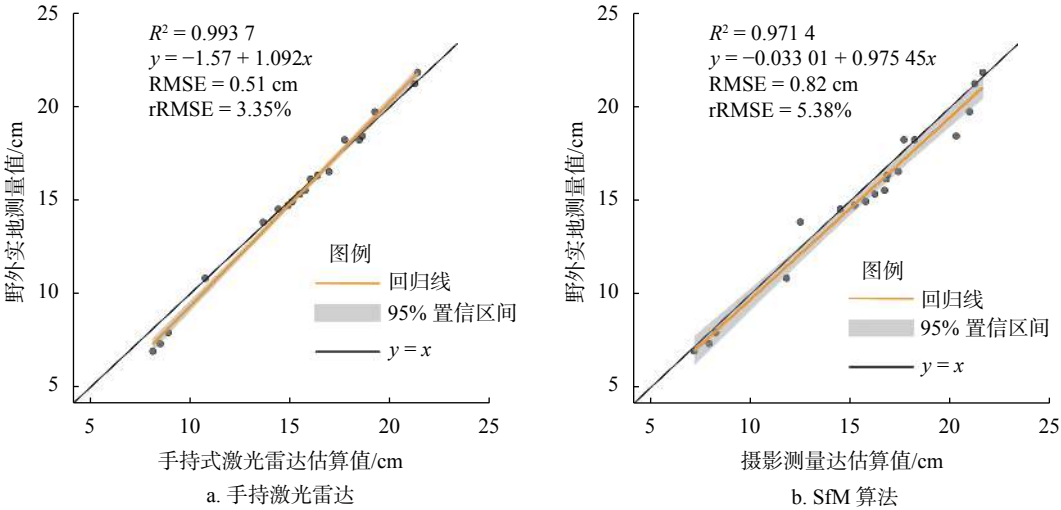


图 6 SfM 算法与手持式激光雷达估算胸径与野外实地测量值的线性回归
Fig. 6 The regression of field data and trunk DBH calculated from SfM photogrammetry and hand-held laser scanning respectively

2.2 基于激光雷达的城市树木胸径估算结果

基于手持式激光雷达得到样地点云数据如图 4b 所示，树木检出率为 100%。手持式激光雷达得到胸径的 Bias 为 0.16 cm，RMSE 为 0.51 cm，rRMSE 为 3.35%，rBias 为 1.04%（表 3）。激光雷达估测

得到的胸径大小为（15.32±3.96）cm，与野外参考值无显著性差异（图 5）。同时，SfM 算法得到胸径与手持式激光雷达得到胸径也无显著性差异。手持式激光雷达与野外实地测量值高度正相关，线性回归模型的 R^2 为 0.9937（图 6）。

表 3 SfM 算法与手持式激光雷达方法对比
Table 3 Comparison of SfM photogrammetry and hand-held laser scanning

主要步骤	具体过程	SfM算法	手持式激光雷达
野外作业	采集设备	Sony α9单反相机（CMOS 35.6×23.8 cm传感器，最大分辨率6000×4000像素）、Sony FE24–70 mm F2.8 GM镜头、三脚架（总价约3.8万元，质量3.0 kg）	GeoSLAM ZEB HORIZON（GeoSLAM Ltd., UK）（总价约60万元，质量1.3 kg）
	采集过程	走走停停（耗时约16 min，照片99张）	连续扫描（耗时约5 min）
	定位与缩放	花杆、人工标记物和华测导航X12惯导RTK（上海华测导航技术股份有限公司）	激光测距
三维点云重建	软件	Agisoft Metashape 1.5.5（Agisoft, LLC, Russia）	CloudCompare V2.11.09（ http://cloudcompare.org/ ）
	计算机	Intel Core i5–8265U 处理器配置16 GB固态硬盘（2400 MHz）	Intel Core i5–8265U 处理器配置16 GB固态硬盘（2400 MHz）
	耗时	102 min	10 min
树干胸径提取	算法	圆拟合算法	圆拟合算法
	软件	DendroCloud 1.21	DendroCloud 1.21

2.3 SfM 的可行性分析

SfM 算法与手持式激光雷达 2 种技术的数据采集、三维点云重建与胸径提取过程的比较见表 3。对于设备费用而言，SfM 算法远低于手持式激光雷达，SfM 算法所需摄影器材总价约 3.8 万元，而 GeoSLAM ZEB HORIZON 手持式激光雷达总价约 60 万元。然而，SfM 算法在三维点云重建上所需的时间远多于手持式激光雷达，SfM 算法需要约

102 min 通过照片进行三维建模，由于手持式激光雷达在数据采集的过程中已进行三维建模，因此仅需 10 min 导出点云数据。在树干胸径提取上，SfM 算法与手持式激光雷达均能够依据圆拟合算法成功提取树干胸径。

2.3.1 精度

SfM 算法构建三维点云受许多因素影响包括：相机和镜头参数^[42]，照片采集方法如相机数量、

采集路径等^[11,15]和照片质量如需避免过度曝光或欠曝光等^[15,42]。结果表明, SfM 算法结果($rRMSE=5.38\%$, $rBias=2.74\%$)。虽然较手持式激光雷达测量结果($rRMSE=3.35\%$, $rBias=1.04\%$)差一些, 但其与野外实地测量值高度正相关, 线性回归模型的 R^2 大于 0.97, 胸径估测值在森林资源调查允许误差范围内。

2.3.2 效率

SfM 算法在林业调查中主要分为样地三维点云重建和样地树木参数提取过程, 样地三维点云重建过程又包括野外摄影和室内点云生成过

程, 具体步骤见图 7。运动恢复结构算法与数字近景摄影测量的基本原理是一致的, 即从一系列重叠的偏移影像中分辨出立体结构, 但 SfM 算法不需要控制测量和相机外参获取步骤^[24], 因此与以往近景摄影测量技术相比效率更高。然而, SfM 算法在本试验中总共耗时 118 min (照片采集耗时 16 min, 数据分析耗时 102 min), 相比野外实地测量和手持激光雷达耗时更长。激光雷达设备在扫描样地阶段自动合成点云, 而 SfM 算法需要在室内通过照片生成点云, 因此需要额外的处理时间。

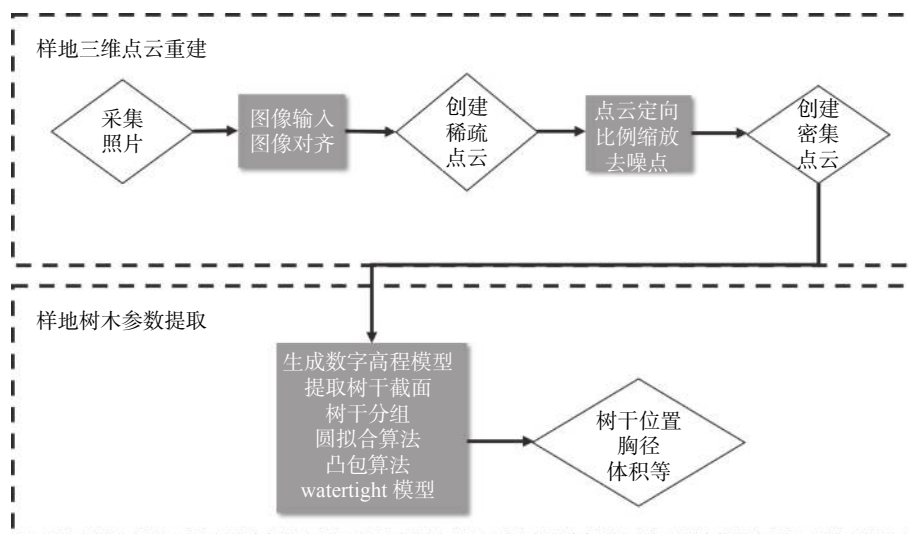


图 7 SfM 算法在林地树木测量中的一般步骤

Fig. 7 General processes of SfM photogrammetry applications in forest inventory

2.3.3 成本

SfM 算法仅需要一台消费级相机 (3.8 万元), 其成本远低于手持式激光雷达 (60 万元)。SfM 算法能够节省野外劳动力, 并且能够获得传统野外调查难以获取的树木参数如树干曲线^[46]、树墩体积^[27]等。地基激光雷达 (TLS) 同样能够在样方水平获得单株树干体积和树干、细枝、叶片等调查数据, 但 SfM 算法在采集和处理数据的成本、设备的灵活性和对专业知识的需求上都更具优势。

3 结论与讨论

基于本研究对 SfM 算法在城市森林调查中的应用实践, 可以看出 SfM 算法在城市森林资源调查中具有一定应用价值。基于 SfM 算法的三维点云重建仅限于物体可见的表面, 城市人工林相比于天然林结构简单, 具有光照条件好、树木密度低、树枝和灌木遮挡少的优势, 有利于 SfM 算法的应用。本试验中 SfM 算法估算胸径与野外测量

胸径相比 $rRMSE$ 为 5.38%, 在森林资源调查允许误差范围内, 除了胸径以外的其他树木参数值得进一步研究。同时, SfM 算法胸径估算结果与手持式激光雷达相差不大, 但手持式激光雷达所需设备费用昂贵, 本试验中使用的手持式激光雷达设备费用是相机的近 15 倍。城市森林资源调查范围广, 需要不同行政单位分小班调查, SfM 算法所需设备仅为消费级相机, 有利于林业资源调查技术的统一。

SfM 算法在城市森林资源调查中也存在一些限制。SfM 算法的野外照片采集和室内三维点云重建时间较长。本研究结果准确性是较高的, 可能是由于样地面积小。在本研究中, 样地面积为 113.1 m^2 (19 棵树), 树木检出率为 100%, 估算胸径与野外实地测量胸径相比 $RMSE$ 为 0.82 cm ; 在 Liang 等人的研究中, SfM 算法在 900 m^2 矩形样地 (25 棵树) 的树木检出率为 88%, 胸径 $RMSE$ 为 2.39 cm ^[12]; Mokroš 等人在 1225 m^2 矩形样地

(74 棵树)的树木检出率为 49%，树木胸径 RMSE 为 4.41 cm^[11]；Forsman 等人在 1314.2 m² 圆形样地 (12 棵树)的使用 SfM 算法得到的树木检出率为 83%，胸径 RMSE 为 6.7 cm^[13]。因此，随着样地面积的增加，树干胸径估算结果的准确性或有降低。

为了弥补 SfM 算法的不足之处，推动该技术在城市树木测量领域的应用，尚需要在以下几个方面开展深入研究和探索：1) 多相机系统的开发：针对大面积样地估算结果准确性降低问题，通过综合考虑多相机系统^[13,47]、增大采集路径密度^[11]和设置计算机自动识别标记物如编码标记物^[11,42]，从而提高 SfM 算法在树木参数估算结果准确性。2) 计算机语言的开发：针对 SfM 算法耗时问题，一方面在野外照片采集时，综合考虑多人协同作业或照片数量最优化从而有效减少耗时；另一方面在室内三维点云重建上，需要进一步开发算法，并在开源计算机语言 (R 语言或 Python) 平台上开发应用软件。3) 应用智能手机进行摄影：2020 年最新 iPad Pro 具有特制激光雷达扫描仪，但其点云质量是否满足准确提取树木参数的要求存疑。SfM 算法已经证明具有应用智能手机采像并提取树木参数的能力^[48]，今后有必要针对能够满足树木参数提取精度要求的且更平民化的拍照工具展开研究。4) 航空与地面摄影的结合：城市绿地林冠郁闭度低，无人机可以拍摄到地面控制点，有助于航空和地面摄影测量点云的匹配。因此可以进一步探索航空和地面 SfM 算法的结合，更准确且全面地重建样地空间三维结构，有助于准确测量更多的城市树木参数，如树高和树冠参数等。

[参 考 文 献]

- [1] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果 [J]. 林业资源管理, 2014(1): 1-2.
- [2] FAO. Global forest resources assessment 2010: Main report[R]. Rome, Italy: FAO, 2010.
- [3] Nowak D J, Crane D E, Dwyer J F. Compensatory value of urban trees in the United States [J]. Journal of Arboriculture, 2002, 28(4): 194-199.
- [4] Freer-Smith P H, El-Khatib A A, Taylor G. Capture of particulate pollution by trees: a comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and north American species [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2004, 155(1/2/3/4): 173-187.
- [5] Janhäll S. Review on urban vegetation and particle air pollution-Deposition and dispersion [J]. Atmospheric Environment, 2015, 105: 130-137.
- [6] Ciesielski M, Sterenczak K. Accuracy of determining specific parameters of the urban forest using remote sensing [J]. IForest-Biogeosciences and Forestry, 2019, 12(6): 498-510.
- [7] Shahtahmassebi A R, Li C L, Fan Y F, et al. Remote sensing of urban green spaces: a review [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 57: 126946.
- [8] 庞勇, 李增元, 陈尔学, 等. 激光雷达技术及其在林业上的应用 [J]. 林业科学, 2005, 41(3): 129-136.
- [9] 郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 等. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望 [J]. 科学通报, 2014, 59(6): 459-478.
- [10] Liang X L, Kukko A, Kaartinen H, et al. Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services [J]. Sensors, 2014, 14(1): 1228-1248.
- [11] Mokroš M, Liang X L, Surový P, et al. Evaluation of close-range photogrammetry image collection methods for estimating tree diameters [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018, 7(3): 93.
- [12] Liang X L, Jaakkola A, Wang Y S, et al. The use of a hand-held camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots [J]. Remote Sensing, 2014, 6(7): 6587-6603.
- [13] Forsman M, Börllin N, Holmgren J. Estimation of tree stem attributes using terrestrial photogrammetry with a camera rig [J]. Forests, 2016, 7(12): 61.
- [14] Surový P, Yoshimoto A, Panagiotidis D. Accuracy of reconstruction of the tree stem surface using terrestrial close-range photogrammetry [J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): 123.
- [15] Liang X L, Wang Y S, Jaakkola A, et al. Forest data collection using terrestrial image-based point clouds from a handheld camera compared to terrestrial and personal laser scanning [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(9): 5117-5132.
- [16] 王秀美, 曾卓乔. 数字摄影测量技术在森林调查中的应用研究 [J]. 林业资源管理, 2001(1): 31-35.
- [17] 唐雪海, 王田磊, 袁进军, 等. 数字近景摄影测量辅助三维激光扫描用于森林固定样地测树原理探讨 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(12): 6095-6097.

- [18] 刘千里, 李春友, 孟平, 等. 多基线数字近景摄影测量系统测树方法及数据分析 [J]. *林业科学*, 2010, 46(2): 166–170.
- [19] 冯仲科, 聂玉藻, 赵春江, 余新晓. 精准林业 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [20] 刘金成, 黄晓东, 杨立岩, 等. 基于 CCD 超站仪的森林样地建立与精测方法研究 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 316–321, 328.
- [21] Iglhaut J, Cabo C, Puliti S, et al. Structure from motion photogrammetry in forestry: a review [J]. *Current Forestry Reports*, 2019, 5(3): 155–168.
- [22] Szeliski R, Kang S B. Recovering 3D shape and motion from image streams using nonlinear least squares [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1994, 5(1): 10–28.
- [23] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Photo tourism [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 835–846.
- [24] Westoby M J, Brasington J, Glasser N F, et al. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications [J]. *Geomorphology*, 2012, 179: 300–314.
- [25] 查冰. 基于非量测相机无结构影像的运动估计算法研究 [D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2017.
- [26] 李绍鑫. 基于运动恢复结构摄影测量技术的崩岗侵蚀特征研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [27] Dean C, Kirkpatrick J B, Osborn J, et al. Novel 3D geometry and models of the lower regions of large trees for use in carbon accounting of primary forests [J]. *AoB PLANTS*, 2018, 10(2): 1–76.
- [28] . Stem measurements and taper modeling using photogrammetric point clouds [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 716.
- [29] Morgenroth J, Gomez C. Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique —A proof of concept [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(1): 198–203.
- [30] Feduck C, McDermid G, Castilla G. Detection of coniferous seedlings in UAV imagery [J]. *Forests*, 2018, 9(7): 432.
- [31] Nevalainen O, Honkavaara E, Tuominen S, et al. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 185.
- [32] Michez A, Piégay H, Lisein J, et al. Classification of riparian forest species and health condition using multi-temporal and hyperspatial imagery from unmanned aerial system [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(3): 1–19.
- [33] Mokroš M, Výboštok J, Tomašík J, et al. High precision individual tree diameter and perimeter estimation from close-range photogrammetry [J]. *Forests*, 2018, 9(11): 696.
- [34] Durrant-Whyte H, Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(2): 99–110.
- [35] Bailey T, Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(3): 108–117.
- [36] Tang J, Chen Y W, Kukko A, et al. SLAM-aided stem mapping for forest inventory with small-footprint mobile LiDAR [J]. *Forests*, 2015, 6(12): 4588–4606.
- [37] 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]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-3/W3: 59–63.
- [38] Niederheiser R, Mokroš M, Lange J L, et al. Deriving 3d point clouds from terrestrial photographs-comparison of different sensors and software [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B5: 685–692.
- [39] Gagliolo S, Ausonio E, Federici B, et al. 3d cultural heritage documentation: a comparison between different photogrammetric software and their products [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-2: 347–354.
- [40] Li W K, Guo Q H, Jakubowski M K, et al. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2012, 78(1): 75–84.
- [41] Miller J, Morgenroth J, Gomez C. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(4): 932–940.
- [42] Bauwens S, Fayolle A, Gourlet-Fleury S, et al. Terrestrial photogrammetry: a non-destructive method for modelling irregularly shaped tropical tree trunks [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8(4): 460–471.
- [43] Koester A K, Roberts J W, Miesbauer J W, et al. Testing the accuracy of imaging software for measuring

- tree root volumes [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 18: 95–99.
- [44] 周佳雯, 张良, 马海池, 等. 机载 LiDAR 点云数据处理软件对比及评测 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(11): 101–104.
- [45] Koreň M. Dendrocloud: Point cloud processing software for forestry[Z]. Zvolen, Slovakia: Technical University in Zvolen, 2017.
- [46] Piermattei L, Karel W, Wang D, et al. Terrestrial structure from motion photogrammetry for deriving forest inventory data [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 950.
- [47] Liu J C, Feng Z K, Yang L Y, 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.
- [48] Marzulli M I, Raunonen P, Greco R, et al. Estimating tree stem diameters and volume from smartphone photogrammetric point clouds [J]. *Forestry: an International Journal of Forest Research*, 2020, 93(3): 411–429.

(责任编辑 陆 驰)

