基于树冠最高点和地面树干中心的森林影像点云配准方法

刘金成¹,郭义军¹,曾嘉¹,陈卓¹,王海明¹,于强^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院,杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,杨凌 712100)

摘 要:为了弥补无人机和地面不同观测视角导致的森林信息缺失以及不同平台摄影测量影像点云难以高效配准的问题,该研究基于无人机和地面摄影测量构建森林三维影像点云数据,以提取的无人机树冠最高点和地面树干中心为关键特征点,参考由粗到精的配准思路,借助特征点在 3D 和 2D 的映射关系以及改进的模拟退火算法和迭代最近点算法,提出了一种适合于无人机和地面不同观测平台的森林影像点云配准框架。测试结果表明,相较于银杏树和楸树而言,杨树对关键点匹配影响较大(杨树 1.13 m > 楸树 0.75 m > 银杏树 0.52 m),不同树种对粗配准影响较小(杨树 0.13 m > 银杏树 0.08 m > 楸树 0.07 m);所提方法在不同树种组成的 6 块典型样地上表现出色,平均精配准误差分为 0.06 m,有效实现了无人机和地面平台影像点云的精细化配准。研究结果可为森林资源调查、森林三维重建以及影像点云的推广应用提供有力的支撑。 关键词: 无人机;点云;森林;树冠;地面摄影测量

doi: 10.11975/i.issn.1002-6819.202403086

中图分类号: S771.8 文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2024)-15-0127-08

刘金成,郭义军,曾嘉,等.基于树冠最高点和地面树干中心的森林影像点云配准方法[J].农业工程学报,2024,40(15): 127-134. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403086 http://www.tcsae.org

LIU Jincheng, GUO Yijun, ZENG Jia, et al. Forest point cloud registration using the tree top and the ground-level tree center[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(15): 127-134. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403086 http://www.tcsae.org

0 引 言

三维点云技术在森林调查中的应用极为重要,它通 过精确捕捉森林的三维结构信息,为树高、冠层覆盖和 生物量估算等关键指标的测量提供了高效和精确的手段。 激光雷达以其高精度和操作便捷的特点,在多个应用领 域成为获取点云数据的首选方法。然而,随着各种影像 匹配和点云重建技术的不断发展和改进,光学影像已经 逐渐成为重要的点云数据来源^[1-2]。与激光雷达点云相比, 摄影测量技术所构建的影像点云成本低、效率高和易推 广,逐渐成为了森林三维重建和精细化调查的重要手段^[3-4]。 同时,影像点云在密度、纹理和色彩方面具有显著优势^[5]。 因此,探究影像点云的林业应用问题,已成为国内外精 准林业领域研究的热点^[6-7]。

然而,由于森林环境复杂多样,其特征结构在水平 和垂直维度上具有明显的异质性。此外,受限于森林冠 层的遮挡,通常需要将森林数据采集工作分为冠层以上 和冠层以下两个部分单独进行,从而导致不同数据集之 间的信息较为独立。为了满足不同林分调查的需求,通 常需要从不同数据集中独立提取相关因子,甚至需要进 行大量重复调查工作,以弥补单一数据集数据缺失问题^[8]。 点云配准可以将不同时间、不同空间以及不同平台采集

收稿日期: 2024-03-13 修订日期: 2024-06-12

基金项目:国家自然科学基金项目(32001249、32371875)

作者简介: 刘金成,博士,副教授,研究方向为智慧林业、植被生态遥感、 地理信息科学等。Email: jinchengl@nwafu.edu.cn 的点云数据进行融合,提供完整的、准确的林分立体信息,成为现阶段解决这一问题的关键手段^[9]。

地面与空中平台的配准主要以激光雷达点云为对象, 将树木的位置、形状以及几何特征等作为关键点进行特 征匹配^[9-10]。FRITZ使用树间距离、地面激光雷达的树 干信息估计无人机激光雷达的树顶位置和三维盒模型等 方法进行配准[11]。然而,单纯依赖树木位置和形状等简 单特征进行配准的效果较差。HAUGLIN 和 PARIS 采用 胸径和树高的归一化特征、冠层高度模型等复杂特征进 行配准,以提高点云配准的精确性^[12-13]。尽管这些方法 相较于之前有所提高,但配准精度仍然不能满足现实的 需求。随着技术的发展,点云配准过程已经演变成粗配 准和精配准两阶段策略[14-15]。粗配准阶段使用树木属性 及其衍生的高级特征如基于冠层点密度差异生成的模式 点^[14]、特征直方图^[15]、特征三角形^[16]等进行初步配准, 通过求取变换关系,将原始点云配准到一个共同的参照 框架中,完成初配准。精配准阶段采用迭代最近点、图 优化等算法进行精细配准,进一步缩小配准误差。

近年来激光雷达在林业调查中有大量的尝试和应用, 但由于其硬件设备和调查成本过高投入等问题,这些技 术在大规模森林资源调查中的推广应用受到阻碍和限制。 然而,基于光学影像的摄影测量技术以其较低的成本投 入和较高的信息产出优势,助力了遥感技术在森林资源 调查中的应用。TIAN 和 HUANG 使用无人机影像点云 代替机载点云与地基点云配准,验证了影像点云在森林 场景中应用的可行性和有效性^[17-18]。然而,由于拍摄角 度、光照变化等因素的影响,影像点云在重建过程中存 在大量噪声点、匹配误差以及尺度发生变化等问题,其

[※]通信作者:于强,博士,研究员,研究方向为气候变化与农业生态。 Email: yuq@nwafu.edu.cn

在地面摄影测量点云中更为严重^[19]。此外,基于激光点 云配准的方法通常是对点云进行刚性配准,而影像点云 配准还需要考虑尺度干扰因素。因此,目前常见点云配 准方法并不能直接应用于影像点云数据,影像点云精细 化配准仍然面临较大的挑战,需要更多的研究来解决这 一问题。鉴于此,本研究基于无人机和地面摄影测量影 像点云数据,借鉴由粗到精的配准思路,提出了一种以 无人机树冠最高点和地面树干中心为特征点的森林影像 点云配准框架,旨在为森林三维重建和森林资源精细化 调查提供有力的技术支撑。

1 数据来源

1.1 研究区概况

为了测试所提方法的可行性和适用性,本研究选择 3个不同树种组成的6个典型森林样地作为研究对象 (图1),对应的样地编号为1~6。研究区位于陕西省 杨凌示范区内(34°14′~34°20′ N,107°59~108°08′ E),海 拔418.0~540.1 m,属东亚暖温带半湿润半干旱气候区。 样地大小均设置为 20 m×30 m,其中,样地 1 和 2 的优 势树种为银杏树,样地 3 和 4 的优势树种为楸树,样地 5 和 6 的优势树种为杨树。所选的 6 个森林样地在树种、 生长阶段和林分复杂程度等方面存在一定差异,具体参 数信息见表 1。



Fig.1 Distribution of sample plots in the study area

表 1 样地信息表 Table 1 Sample plot information table

Table 1 Sample plot information table							
类型 Type	地形 Terrain	优势树种 Dominant species	树木数量 Number of trees	平均胸径 Average diameter at breast height/cm	林分平均高 Average height/m	无人机影像点云 UAV image point cloud	地面影像点云 Ground image point cloud
样地 1Sample plot 1	局部起伏	银杏树	16	23.15	11.68	179 997	1 412 432
样地 2Sample plot 2	局部起伏	银杏树	15	22.04	11.09	209 203	2 495 034
样地 3Sample plot 3	平坦	楸树	20	30.33	13.59	130 124	2 638 292
样地 4Sample plot 4	平坦	楸树	23	28.31	14.1	153 612	2 896 469
样地 5Sample plot 5	平坦	杨树	24	23.84	17.54	165 715	1 809 720
样地 6Sample plot 6	平坦	杨树	21	22.23	15.69	176 114	2 895 776

1.2 无人机数据采集

针对无人机平台,本研究使用大疆精灵4RTK(DJI PHANTOM4RTK)采用倾斜摄影测量方式进行航拍作 业。数据采集于2024年1月,天气晴朗,风力小。无人 机参数设置为飞行高度64m、飞行速度4m/s、旁向重 叠度75%、航向重叠度80%、外扩边距64m。

1.3 地面影像数据采集

针对地面平台,本研究以3台普通数码相机 (SONY QX 1)组合的方式进行作业(图 2a)。



1. 接收机 2. CCD 镜头 3. 手簿 4. 碳纤杆

1. Receiver 2. CCD lens 3. Handheld terminal 4. Carbon fiber rod

图 2 地面摄影测量设备及仿航线观测



数据采集于 2024 年 1 月,天气晴朗。根据样地地形 和内部空间结构特征,设计"仿航线法"获取样地影像 信息(图 2b)。为了确保影像的重叠率,沿前进方向每 隔 2 m 进行拍摄,每个拍摄点需将相机固定调整至 3 个 角度(-30°、0°、30°)。同时,为确保数据质量和后期 处理的准确性,需要保证每个角度下拍摄照片之间的重 叠率不低于 60%。

2 研究方法

本研究提供了一个基于无人机树冠最高点和地面树干中心的森林影像点云配准框架,主要包含两部分: 1)从无人机和地面影像点云中分别提取树冠最高点 (tree top, TT)和地面树干中心(ground-level tree center, GTC)。2)对提取的特征点进行降维后,利用改进模拟 退火算法求取特征点之间的变换关系进行粗配准,并采 用迭代最近点算法^[20]进行精配准。

2.1 预处理

获取的无人机和地面影像分别利用大疆智图 3.5.5 (大疆创新,中国)和 Pix4Dmapper 4.4.12(Pix4D 公司, 瑞士)软件进行三维重建,以获取无人机和地面影像点 云,再通过去噪、滤波和归一化等预处理得到 6 个样地 的待配准影像点云。

2.2 无人机影像点云关键点提取

为避免低矮植被及其他标志物的影响,本研究从 无人机影像点云中提取了高于2m的点云(见图 3a)。 然后,采用欧式聚类方法对无人机影像点云进行单木 分割提取TT。然而,由于树冠的遮挡,部分树冠 下方的点云缺失,使用欧式聚类方法进行单木分割 会产生多分割和错分割现象,导致单棵树木有多个 TT,如图 3b 中圈内所示。错误的聚类位于树冠附近, 而正常的聚类应该在 2 m 到最高点之间连续。受到 FRITZ 等^[11]的启发,构建了每个聚类的 AABB 包围 盒(图 3c),计算高度在 2 ~ 3 m 范围内的点数以识 别错误的聚类。通过查找最近的 AABB 包围盒的中心, 将错误聚类与找到的非错误聚类合并,提取正确的 TT;合并后的聚类及提取的 TT 如图 3d 所示。最后, 将提取的 TT 投影到 XY 平面,得到无人机影像点云 的关键点。



注: 圆 b 中圆圈内表示识别的错误聚类,图 c 中长方体表示每个聚类的 AABB 包围盒,图 d 和图 f 中实心圆表示提取的关键点 Note: In figure b, the inner circle indicates recognized error clusters; in figure c, the rectangles represent the AABB bounding boxes for each cluster; in figures d and f, the solid circles indicate the extracted key points



2.3 地面影像点云关键点提取

同无人机影像点云一样,为了避免低矮植被及其他标志物的影响,本研究地面影像点云中提取了1~2m的点云(图4e)。然后,使用欧式聚类的方法对地面影像点云进行单木分割,并将提取的每个聚类的地面树干中心点作为关键点,提取结果如图4f所示。最后,将提取的GTC结果投影到XY平面,得到地面影像点云的关键点。

2.4 基于改进模拟退火算法进行粗配准

模拟退火算法的基本原理是从整体出发,不仅接受 当前的最优解,还以一定的概率接受非最优解,以便在 另一个区域进行最优解的搜索。随着温度的降低,接受 非最优解的概率也会降低,最终使算法收敛到最优解状 态。无人机摄影测量获取的影像具有 POS 数据,基于无 人机获取的影像点云则处于绝对坐标系;而地面摄影测 量受到冠层遮挡,通常使用定焦相机拍摄,往往没有定 位信息,地面影像点云则处于局部坐标系。由于坐标系 的不同,这两类点云的初始位置距离很远。因此,为了 获得较好的初始位置,受到 GUO 等^[21] 启发,引入 了模拟退火算法。该算法以两个点集之间的最小距离 作为目标函数,并利用温度调节扰动步长,通过迭代寻 找更优的初始位置。通过模拟退火算法后,可以将 GTC 和 TT 初步配准在一个坐标系内,获取较好的初始位置。

尽管通过模拟退火算法获得了较佳的初始位置,但 GTC 和 TT 中关键点之间的对应关系仍不清晰(图 4d)。 受到刘清等^[16] 启发,并考虑到狄洛尼三角剖分具有最接 近性和唯一性等特征,本研究利用狄洛尼三角剖分对提 取的关键点进行分析,通过几何和拓扑关系来探索关键 点之间的联系(图 4a、图 4b 和图 4c)。具体来说,构 建了狄洛尼的最外层边界凸多边形外壳,考虑了每个点 在该凸多边形内部还是边上以及每个点连接的边的数量 (见表 2)。然而,关键点之间的具体对应关系仍然需 要进一步寻找。



注: 图 d ~ i 中方块表示 TT, 圆点表示 GTC; 图 a ~ c 中 1~16 表示顶点编号, ①~ ⑳表示特征三角形编号。 Note: In figures d ~ i, the block represent TT, and the circular dots represent GTC; in figures a ~ c, the numbers 1~16 represent vertex indices, and the numbers ①~ ⑳ represent feature triangle indices.

图 4 基于树冠最高点和地面树干中心点对求取变换关系

Fig.4 Transformation relationship based on corresponding points between TT (tree top) and GTC (ground-level tree center)

Tuble 2 Tossible correspondence between TT and GTC							
关键点 Key points	点编号 Point number	点连接的边数量 Number of edges connected by points	点是否 在面内 Whether the point within plane	平面横坐标 Plane horizontal coordinate/ ×10 ⁵ m	平面纵 坐标 Plane vertical coordinate ×10 ⁶ /m		
TT	4	5	是	2.293 92	3.795 620		
	5	8	是	2.293 99	3.795 624		
	8	6	是	2.294 10	3.795 625		
	11	5	是	2.293 91	3.795 627		
	13	5	是	2.294 06	3.795 628		
GTC	2	4	是	2.293 92	3.795 618		
	4	5	是	2.293 89	3.795 622		
	5	7	是	2.293 97	3.795 624		
	8	5	是	2.294 07	3.795 622		
	11	5	是	2.293 91	3.795 629		

表 2 TT 和 GTC 可能的对应关系 Table 2 Possible correspondence between TT and GTC

为此,在得到可能的对应关系的基础上,通过

判断点连接边的数量是否一致、点是否在面内以及 两个对应点的距离是否小于模拟退火算法得到的最 小距离的3倍作为限制条件,进一步寻找关键点之 间的对应关系(表3)。然后,通过奇异值分解求 取点位对应关系的变换矩阵(图4e、图4f),求取 所有的GTC的变化(图4g)。在初步得到对应关系 的基础上,通过寻找每个TT中GTC的最近邻点, 求取所有点对的对应关系,结果如图4h所示。在求 取所有点对的对应关系的基础上,以两个点集距离 的最小值为目标函数,通过迭代寻找*X、Y*方向的最 佳缩放因子,求取最终变化下生成的GTC(图4i)。 最后,基于点对求取的变换关系对原始点云应用变 换完成粗配准。

2.5 基于 ICP 算法进行精配准

在完成粗配准后,采用迭代最近点算法进行精配准。

该算法通过迭代寻找两组点云中距离最近的点对,并据 此计算出最佳的刚体变换(旋转和平移),进而最大程 度的减少两点云集合间的距离偏差。由于其优异的精准 配准效果,该算法已广泛应用于森林点云配准领域^[22-24]。

	表 3	TT 和 GTC 的对应	关系
Table 3	Corr	espondence between '	TT and GTC

对应关系的 数量 Correspondence number of quantity	TT 点编号 Point ID from TT	TT 中点连接的 边数量 Number of edges connected from TT points	TT 中点是否 在面内 Whether the point within plane in TT	GTC 点编号 Point ID from GTC	GTC 中点连接的 边的数量 Number of edges connected from GTC points	GTC 中点是否 在面内 Whether the point within plane in GTC	
1	4	5	是	4	5	是	
2	11	5	是	11	5	是	
3	13	5	是	8	5	是	
4	8	6	是	14	6	是	

3 结果与分析

本研究借鉴了由粗到精的配准策略,提出了一种 TT和GTC作为特征点的森林影像点云配准框架。在粗 配准阶段,利用改进的模拟退火算法对特征点进行了变 换求解;在精配准阶段,采用了迭代最近点算法进一步 减少误差。

本研究在6块样地上进行了试验,配准结果如图5 所示。在粗配准和精配准的结果中,选取紫色表示地面 影像点云,绿色表示无人机影像点云。可以观察到,无 人机采集的点云与地面影像高度匹配。在样地3、样地4、 样地5和样地6中,由于楸树和杨树较高,地面影像点 云未能捕捉到其冠层顶部的信息,而无人机点云有效填 补了这一数据缺失。另外,为了更好地展示精配准的局 部细节,使用黄色表示地面影像点云,红色表示无人机 影像点云。可以看见,地面影像点云密度要高于无人机 影像点云,两者在树枝、树干以及间隙处高度吻合。



注: 在粗配准结果和精配准结果中,紫色表示地面影像点云,绿色表示无人机影像点云;在精配准的局部细节中,使用黄色表示地面影像点云,红色表示 无人机影像点云。

Note: In the coarse registration results and the fine registration results, purple represents the ground image point cloud, green represents the UAV image point cloud; in the local details of the fine registration, yellow represents the ground image point cloud, and red represents the UAV image point cloud.

图5 6个样地的配准结果

Fig.5 Registration results of 6 sample plots

同时,为了检验配准方法的精度,选用均方根误差 (root mean square error, RMSE)进行定量评价。配准 精度反映了源点云在转换参数变换后与目标点云之间的 接近程度,即对于源点云中的每个点,在目标点云中查 找最近点计算其距离。 在粗配准时,无人机和地面影像点云的初始特征点误差较大,这是由于不同数据源在坐标系上的差异所致。 为了获取较优的初始位置,引入了模拟退火算法,取得 了不错的效果(表4)。可以看见,样地关键点之间的 误差为0.90~2.45 m,其中样地1误差2.45 m,样地2 误差 0.90 m。尽管样地 1 和样地 2 条件类似,然而相较 于其他样地的楸树、杨树来说,银杏树顶端树枝较多, 识别出的 TT 与 GTC 偏离太大,表明提取的 TT 在相同 树种间存在差异。在此基础上,利用限制条件寻找关键 点之间可能的对应关系进行匹配,以及通过最邻近点方 法找到所有点对的关系进行配准,6块样地的平均配准 精度为 1.53 m。通过迭代放缩 X、Y 方向因子进一步优 化,结果显示关键点之间的平均配准精度为 0.81 m。在 样地 6 中,经过模拟退火算法调整、部分点对调整以及 所有点对调整后,误差降低的不明显。通过迭代放缩后, 样地 6 的平均配准误差的降低趋势是前两步优化过程的 3 倍左右,表明尺度因子的调整对降低误差很重要。此 外,相较于银杏树和楸树而言,杨树对关键点匹配的结 果影响较大(杨树 1.13 m>楸树 0.75 m>银杏树 0.52 m),主要是因为样地内杨树数量较多且树木较高。通过关键 点求取的变换关系进行粗配准后,6块样地平均粗配准 精度为 0.09 m,不同树种对粗配准的结果影响较小(杨树 0.13 m>银杏树 0.08 m>楸树 0.07 m)。粗配准误差 远小于关键点对的误差,主要是由于个别树木提取的 TT 与 GTC 不在一条竖直线上。

Table 4Registration errors of the proposed method in six sample plots m								
样地 Sample plot	初始点对误差 Initial correspondence error	模拟退火算法 调整后的误差 Adjusted error after simulated annealing	部分对应点对调整 后的误差 Adjusted error for partial corresponding point pairs	所有点对调整后 的误差 Adjusted error for all point pairs	所有点对缩放调整 后的误差 Adjusted error for all point pairs after scaling	粗配准误差 Coarse registration error	精配准误差 Fine registration error	
样地 1 Sample plot 1	3 802 595.58	2.45	1.50	1.43	0.48	0.07	0.07	
样地 2 Sample plot 2	3 802 348.76	0.90	0.64	0.56	0.55	0.08	0.06	
样地 3 Sample plot 3	3 802 409.86	1.26	1.30	1.25	0.70	0.07	0.06	
样地 4 Sample plot 4	3 802 408.61	1.21	1.28	1.22	0.80	0.07	0.07	
样地 5 Sample plot 5	3 801 829.81	1.63	1.42	1.43	0.86	0.08	0.07	
样地 6 Sample plot 6	3 801 836.33	1.90	1.87	1.76	1.40	0.18	0.05	

目前,地面与无人机平台的粗配准方法配准精度较低,如基于相干点漂移算法的粗配准误差为 0.25 m^[15]、基于快速点特征直方图的粗配准误差为 1.44 m^[25]等,相较之下,所提方法得到的粗配准误差更小。此外,6 块样地的平均精配准误差为 0.06 m,其粗配准效果与精配准效果相近。

4 讨 论

现有的大多数配准算法通常是刚性配准^[15,25-26],即 通过求解3个旋转参数和3个平移参数,共计6个自由 度,以获取变换关系。然而,地面影像点云在借助标杆 恢复尺度时,仍然可能存在误差。但是,这种误差通常 是等比例的,也就是说,尺度的变化在整个点云中是均 匀的。因此,为了准确地将地面摄影点云与无人机影像 点云进行配准,需要考虑到7个自由度,即3个平移、 3个旋转和1个缩放变换参数。为了简化对应关系的复 杂度,研究将问题由三维转化到二维^[13]。在平面上,只 需考虑平移、旋转和缩放这3个变换参数,共计4个自 由度,求取变换关系。

在粗配准阶段,使用特征匹配的方法如采用树木位 置^[27-28]、树高与胸径^[12]、茎位置或茎曲线^[29-31]和冠层高 度模型^[13]等作为特征点在地面平台之间配准较为成熟。 然而,在无人机和地面平台之间,由于地面影像生成的 点云在树冠上存在明显缺失。因此,仅仅依赖树干^[32]、 树高^[33]以及基于树冠密度的模式点^[26]等作为特征点可 能会存在不对应问题。基于此,研究提出以 TT 和 GTC 作为特征点能充分的代表原始点云特征,可以进一步提 高配准的准确性和稳定性。与其他研究者一样,特征点 的选取影响粗配准的精度^[12,29,33-34]。研究在提取 TT 时产 生了错分割的现象(图 3),考虑到错分割的聚类都在 树冠附近,对此提出了一种结合 AABB 包围盒和欧式聚 类的方法。该方法与基于树冠密度的模式点相比^[12],提 取特征点所需时间更短。

研究选取了典型人工林环境下的银杏树、楸树和杨树 等森林样地作为研究对象,并验证了所提方法的适用性。 值得注意的是,复杂林分环境下的单木分割比本实验中的 情况更为复杂,可能需要更为精细的单木分割方法。但是 只要提取的特征点准确,所提出的方法理论上可以取得与 本研究相似的效果,接下来将进一步验证这个试验猜想。

研究过程中仍存在不足: 1)关键点的提取依赖于一 系列预处理步骤,如去噪、归一化和单木分割,这些步 骤虽然对于确保数据的准确性至关重要,但也增加了处 理流程的复杂性和所需时间:2)为了实现精准的配准, 研究中要求无人机影像点云和地面影像点云中识别的树 木需要保持一致性,未来的改进方向将集中于开发一个 更加自适应的框架,通过匹配度自动识别出需要进行配 准的点云; 3)相较于激光点云配准而言,影像点云在配 准过程中往往还存在着影像匹配误差、光照变化影响以 及尺度变化等问题。本研究在天气晴朗、光照充足的条 件下获取影像信息,尽量避免了光照强度变化对影像点 云生成的影响。影像匹配误差是由于获取得到的影像信 息不匹配造成的,这主要是由于不同软件的算法所致。因 此,本研究只针对尺度因素进行探讨,从样地6的配准结 果看尺度大小可能是影响森林影像点云配准的重要因素。 在进行影像点云配准时,需要考虑并校正这些尺度差异。

5 结 论

本研究提出了一种适用于无人机和地面平台的森林 影像点云配准方法。该方法从无人机影像点云中提取 TT 以及从地面影像点云中提取 GTC 作为特征点。通过 在不同树种组成的样地上进行了试验,结果表明:1)研 究提出了一种结合 AABB 包围盒和欧式聚类的方法,该 方法在 6 块样地的单木识别率为 100%。2)相较于银杏 树和楸树而言,杨树对关键点匹配影响较大(杨树 1.13 m > 楸树 0.75 m > 银杏树 0.52 m),而不同树种对 粗配准影响较小(杨树 0.13 m > 银杏树 0.08 m > 楸树 0.07 m)。3)研究提出了一种结合改进模拟退火算法和 迭代最近点算法的森林影像点云配准方法,该方法在 6 个样地上均显示出了较好的稳定性,6块样地的平均粗 配准、精配准误差分别为 0.09、0.06 m,其粗配准效果 与精配准效果相近,有效实现了无人机和地面平台影像 点云的精细化配准。

[参考文献]

- LIANG X, WANG Y, 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.
- [2] HORTOBAGYI B, CORENBLIT D, VAUTIER F, et al. A multi-scale approach of fluvial biogeomorphic dynamics using photogrammetry[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 202(2): 348-362.
- [3] 刘金成,王海明,何亚琼,等.无人机技术在精准林业中的应用与挑战[J].农业工程学报,2024,40(5):1-12.
 LIU Jincheng, WANG Haiming, HE Yaqiong, et al. Application and challenges of UAV-based technology in precision forestry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(5): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [4] LIU J, FENG Z, YANG L, 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.
- [5] 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 stereophotogrammetric dendrometer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(22): 61-68. (in Chinese with English abstract)
- [6] SHIMIZU K, NISHIZONO T, KITAHARA F, et al. Integrating terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry to estimate individual tree attributes in managed coniferous forests in Japan[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 106: 102658.
- [7] 赵自雨,冯仲科,田艺,等.UWB 定位摄影测树仪设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(17):167-173.
 ZHAO Ziyu, FENG Zhongke, TIAN Yi, et al. Design and test of photographic dendrometer based on ultra wide band positioning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(17):167-173. (in Chinese with English abstract)
- [8] NI W, RANSON K J, ZHANG Z, et al. Features of point clouds synthesized from multi-view ALOS/PRISM data and comparisons with LiDAR data in forested areas[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 149: 47-57.
- [9] LIU J, GUO Y, YANG J, et al. Forest point cloud registration: A review[J]. Forestry Research, 2024, 4: e018.
- [10] 黄洪宇,骆钰波,唐丽玉,等.基于单木位置特征的多源树木三维点云配准方法[J].林业科学,2022,58(11):96-107.
 HUANG Hongyu, LUO Yubo, TANG Liyu, et al. Registration of point cloud from different platforms in forested area based

on tree position features[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(11): 96-107. (in Chinese with English abstract)

- [11] FRITZ A, WEINACKER H, KOCH B. A method for linking TLS-and ALS-derived trees[C]. // SilviLaser 2011 Conference Proceedings, Hobart, 2011: 1-9.
- [12] HAUGLIN M, LIEN V, NASSET E, et al. Geo-referencing forest field plots by co-registration of terrestrial and airborne laser scanning data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(9): 3135-3149.
- [13] PAIRS C, KELBE D, AAEDT J, et al. A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure[J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(7): 3679-3693.
- [14] DAI W, YANG B, LIANG X, et al. Automated fusion of forest airborne and terrestrial point clouds through canopy density analysis[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 156: 94-107.
- [15] ZHANG W, SHAO J, JIN S, et al. Automated marker-free registration of multisource forest point clouds using a coarse-toglobal adjustment strategy[J]. Forests, 2021, 12(3): 269.
- [16] 刘清,朱宁宁,余万东,等.一种林区无人机和地基点云的 自动化配准方法[J].地理空间信息,2022,20(5):96-101. LIU Qing, ZHU Ningning, YU Wandong, et al. A method for automatic registration of unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanning point clouds in forest areas[J]. Geospatial Information, 2022, 20(5): 96-101. (in Chinese with English abstract)
- [17] TIAN J, DAI T, LI H, et al. A novel tree height extraction approach for individual trees by combining TLS and UAV image-based point cloud integration[J]. Forests, 2019, 10: 537
- [18] HUANG R, YAO W, XU Z, et al. Information fusion approach for biomass estimation in a plateau mountainous forest using a synergistic system comprising UAS-based digital camera and LiDAR[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107420
- [19] POLEWSKI P, ERICKSON A, YAO W, et al. Object-based coregistration of terrestrial photogrammetric and ALS point clouds in forested areas [C]. //ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Prague, 2016, 347-354.
- [20] BESL P, MCKAY N. Method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256. DOI:10.1109/34.121791
- [21] GUO Y, LIU J, YANG X, et al. A new decision-making method for the renewal of agricultural irrigation wells: a case study of songzhuang town, tongzhou district, Beijing[J]. Ecological Informatics, 2023, 78: 102316.
- [22] ZHANG J, WANG J, CHENG F, et al. Natural forest ALS-TLS point cloud data registration without control points[J]. Journal of Forestry Research, 2023, 34(3): 809-820.
- [23] 高世强,狄海廷,邢艳秋,等.背包式激光雷达林木点云帧间匹配算法比较研究[J].中南林业科技大学学报,2022,42(4):1-11.
 GAO Shiqiang, DI Haiting, XING Yanqiu, et al. A comparative study on the matching algorithms of forest point cloud frames for backpack laser scanning[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(4):1-11. (in Chinese with English abstract)
- [24] GUAN H, SU Y, HU T, et al. A novel framework to automatically fuse multiplatform LiDAR data in forest environments based on tree locations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(3): 2165-2177.

- [25] POLEWSKI P, YAO W, CAO L, et al. Marker-free coregistration of UAV and backpack LiDAR point clouds in forested areas[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 147: 307-318.
- [26] DAI W, KAN H, TAN R, et al. Multisource forest point cloud registration with semantic-guided keypoints and robust RANSAC mechanisms[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 115: 103105.
- [27] OLOFSSON K, LINDBERG E, HOLMGREN J. A method for linking field-surveyed and aerial-detected single trees using cross correlation of position images and the optimization of weighted tree list graphs[C]. //SilviLaser 2008: 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory, Edinburgh, 2008, 17-19.
- [28] LIANG X, HYYPPA J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels[J]. Sensors, 2013, 13(2): 1614-1634.
- [29] KELBE D, AARDT J, ROMANCZYK P, et al. Marker-free registration of forest terrestrial laser scanner data pairs with embedded confidence metrics[J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(7): 4314-4330.
- [30] LIU J, LIANG X, HYYPPA J, et al. Automated matching of

multiple terrestrial laser scans for stem mapping without the use of artificial references[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 56: 13-23.

- [31] TREMBLAY J, BELAND M. Towards operational markerfree registration of terrestrial lidar data in forests[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 146: 430-435.
- [32] GIANNETTI F, PULETTI N, QUATRINI V, et al. Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single-tree attributes in mediterranean forest stands[J]. European Journal of Remote Sensing, 2018, 51(1): 795-807.
- [33] LIU Q, WANG J, MA W, et al. Target-free ULS-TLS pointcloud registration for alpine forest lands[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190: 106460.
- [34] 林怡,曹宇杰,程效军.基于树冠体素特征的森林机载-地基激光点云无控配准[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(7):994-1001.
 LIN Yi, CAO Yujie, CHENG Xiaojun. A mark-free registration method for forest airborne and terrestrial laser scanning point clouds fusion based on canopy voxel features[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2023,51(7):994-1001. (in Chinese with English abstract)

Forest point cloud registration using the tree top and the ground-level tree center

LIU Jincheng¹ , GUO Yijun¹ , ZENG Jia¹ , CHEN Zhuo¹ , WANG Haiming¹ , YU Qiang^{1,2*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicle (UAV) and ground-based photogrammetry have been essential to the forest resource surveys, due to the low cost, high efficiency and scalability. However, the complex and heterogeneous nature of forest environments can often lead to the UAV platforms with the less understory information. While the ground platforms can frequently miss the canopy details. The information gaps can be caused by different observation perspectives from UAVs and ground platforms. Some challenges are also remained to efficiently register photogrammetric point clouds. In this study, a point cloud registration was proposed for forest images, according to three-dimensional (3D) point cloud from UAV and ground photogrammetry. Key points of feature were then extracted using coarse-to-fine registration, including the tree top and the ground-level tree center. The specific procedures were as follows: 1) Image Point Cloud Acquisition. In UAV platforms, DJI Phantom 4 RTK UAV were used to capture plot images via oblique photogrammetry. In ground platforms, a "simulated flight path" was employed to obtain the plot images. 3D reconstruction was implemented to generate 3D point cloud data. 2) Feature Point Extraction. Single tree segmentation was combined with AABB bounding boxes and Euclidean clustering. The highest points of individual UAV tree canopies were extracted as feature points. Euclidean clustering was used on ground image point clouds. Single trees were then segmented to extract the ground-level tree center as ground feature points. 3) Coarse Registration. Feature points were mapped from 3D to 2D. Transformation relationships were calculated using improved simulated annealing, partial/full point pair transformation and scale adjustment. The coarse registration was achieved in the original point cloud. 4) Fine Registration. Precise registration was achieved to reduced further error using iterative closest point. A series of tests were performed on six sample plots with different tree species. The results demonstrated the following: 1) The high accuracy and reliability were validated experimentally in the single tree segmentation with AABB bounding boxes and Euclidean clustering. 2) The better performance and stability were achieved in the forest image point cloud registration with improved simulated annealing and iterative closest point. The average errors of coarse and fine registration were 0.09 and 0.06 m, respectively, in the six sample plots. The coarse registration was closely matched the fine registration, indicating the refined registration of image point clouds from UAV and ground platforms. 3) Poplar trees shared a greater impact on coarse registration, compared with ginkgo and catalpa trees. While there was the minimal impact of different tree species on the fine registration. 4) Scale differences were emerged as the influencing factors on forest image point cloud registration. It was necessary to consider and correct during registration. Therefore, cross-platform registration was successfully implemented on the forest image point clouds using UAV and ground-based photogrammetry. A promising approach was presented to tackle the challenges of forest image point cloud registration. This finding can also provide the sound support to forest resource surveys, and 3D forest reconstruction in the wide application of image point clouds. Furthermore, the practical insights can be offered for the precision and intelligent forestry production.

Keywords: UAV; point cloud; forestry; tree top; terrestrial photogrammetry