

引用格式:魏倪彬,余坤勇,刘健.无人机航拍参数对林木冠层三维点云重构的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2025,54(3):410-419.

WEI N B, YU K Y, LIU J. Impact of drone aerial photography parameters on 3D point cloud reconstruction of tree canopy[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2025,54(3):410-419.

无人机航拍参数对林木冠层三维点云重构的影响

魏倪彬^{1,2}, 余坤勇^{2,3}, 刘健^{2,3}

(1.福建农林大学菌草与生态学院;2.福建农林大学3S技术与资源优化利用福建省高校重点实验室;3.福建农林大学林学院,福建福州350002)

摘要:【目的】探究3种航拍参数(飞行高度、航向重叠度、旁向重叠度)对林木冠层三维点云重构及其结构参数估算精度的影响,为提升无人机影像点云(drone-based image point clouds, DIPC)在冠层结构监测中的应用能力提供参考。【方法】以桂花树林为研究对象,设置4组飞行高度(40、80、120、160 m)、3组航向重叠度(70%、80%和90%)和3组旁向重叠度(70%、80%和90%)采集DIPC数据。利用地基激光雷达数据,对不同飞行参数下DIPC的重构质量(通过点云高程变异系数衡量)以及冠层结构参数(树冠体积、树冠垂直投影面积、冠幅、冠长和树高)的估算精度进行评价。【结果】在80~160 m飞行高度,DIPC的高程变异系数显著降低;在40~120 m,冠层结构参数的估算精度较高且趋于稳定,但在120~160 m,其估算精度显著降低。随着航向重叠度的升高,DIPC的高程变异系数逐渐升高;航向重叠度为70%~80%时,冠层结构参数的估算精度显著升高,但航向重叠度为80%~90%时,其估算精度的变化趋于稳定。随着旁向重叠度的升高,DIPC的高程变异系数呈升高趋势;旁向重叠度为70%~80%时,冠层结构参数的估算精度显著升高,旁向重叠度为80%~90%时,其估算精度的变化趋于稳定。【结论】航向与旁向重叠度由70%增至80%对冠层结构参数估算精度提升作用最大,且航向重叠度对冠层结构参数估算精度的影响大于旁向重叠度。飞行高度由120 m增至160 m会显著降低冠层结构参数的估算精度。

关键词:林木冠层;三维结构;无人机遥感;点云数据;飞行高度;图像重叠度

中图分类号: S771.8; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1671-5470(2025)03-0410-10

DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).202407025



开放科学(资源服务)
标识码(OSID)

Impact of drone aerial photography parameters on 3D point cloud reconstruction of tree canopy

WEI Nibin^{1,2}, YU Kunyong^{2,3}, LIU Jian^{2,3}

(1.College of JunCao Science and Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University; 2.University Key Lab for Geomatics Technology and Optimize Resource Utilization in Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University; 3.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: 【Objective】This study explored the impact of 3 aerial photography parameters (flight height, forward overlap and side overlap) on the three-dimensional (3D) point cloud reconstruction of forest canopy and the precision of structural parameter estimation, aiming to provide a reference for enhancing the application capability of drone-based image point cloud (DIPC) in canopy structure monitoring. 【Method】With *Osmanthus* forest as the research subject, its DIPC data were collected at different flight heights (40, 80, 120 and 160 m), forward overlaps (70%, 80% and 90%) and side overlaps (70%, 80% and 90%). Ground-based LiDAR data was used to evaluate the reconstruction precision (according to the elevation variation coefficient of point cloud) and estimation precision of canopy structural parameters (canopy volume, vertical projection area of canopy, canopy width, canopy length and tree height) based on DIPC under different flight parameters. 【Result】The variation coefficient of DIPC-based elevation de-

收稿日期:2024-07-12 修回日期:2024-08-11

基金项目:“十四五”国家重点研发计划课题(2023YFD2201205);国家自然科学基金面上项目(32271876)。

通信作者:余坤勇(1980—),男,教授。研究方向:资源环境监测与森林可持续经营。Email:yuyky@126.com。

clined dramatically with flight height between 80 and 160 m, and the estimation precision of canopy structural parameters based on DIPC was high and trended to stabilize at flight height of 40–120 m, but decreased rapidly at 120–160 m. The variation coefficient of DIPC-based elevation trended to increase with forward overlap or side overlap. The estimation precision of canopy structural parameters based on DIPC increased significantly with forward overlap (70%–80%) or side overlap (70%–80%), and was stabilized when forward overlap or side overlap arrived at 80%–90%. 【Conclusion】The increase of forward overlap and side overlap from 70% to 80% exerted the most significant effects on lifting the estimation precision of canopy structure parameter, with greater impacts from forward overlap; however, raising flight height from 120 m to 160 m significantly lowered the estimation precision of canopy structure parameters.

Key words: tree canopy; 3D structure; unmanned aerial vehicle remote sensing; point cloud data; flight height; image overlap

林木冠层影响太阳辐射截获、风力、湿度、温度和土壤蒸发量等环境因素,在生态系统和碳循环过程中发挥着至关重要的作用。同时,它对物质能量循环、生物多样性以及气候变化等方面也有重要影响^[1-3]。林木冠层的结构参数是生物-大气过程模型的重要输入参数,准确获取这些参数是揭示植被生态系统格局和机制以及探究森林长期演变过程并改进和提高生物-大气过程模型反演效果的重要基础^[4-5]。

传统的样木冠层结构参数调查主要利用围尺、皮尺和轮尺等工具进行人工测量,该方法耗时费力,难以满足大区域应用和研究的需求^[6-7]。此外,人工测量通常依赖破坏性手段,存在调查干扰因素多、主观性强和测量数据简单等局限性。传统测量主要在林木的二维方向上进行,而树冠体积和树冠面积等参数难以直接测量,通常需要基于其他单木参数并使用经验公式进行间接估算,其数据精度具有较大的不确定性。传统方法在获取林木垂直方向和树冠内部空间的冠层结构信息方面存在很大局限^[8]。激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)技术能够精确、无损地获取林木冠层垂直结构信息。LiDAR点云数据可以表征目标物表层和内部三维空间分布信息,在一定程度上克服了传统测量难以反映地物三维立体信息的局限,在森林三维结构研究等领域具有优势^[9-11]。通过LiDAR点云数据,可以获得丰富的林木结构信息,包括树高^[11]、单木胸径^[12]和郁闭度^[13]等参数。此外,基于LiDAR点云数据还能实现树干^[14]和树冠^[15]等部位的三维重构,从而准确获取垂直方向上的冠层结构信息,这在林业资源调查和生物量估算等方面具有独特优势^[16-18]。然而LiDAR数据的获取存在使用成本高、实时性差和操作复杂等局限,限制了其在林业领域的大规模应用。

随着数字图像处理技术和航空技术的发展,成本低、操作便捷、时效性强的无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)搭载可见光相机等传感器结合一系列图像特征点匹配算法^[19]获取高密度三维点云数据的技术应运而生。这些由图像匹配算法生成的高密度点云数据具有一定的穿透能力,适合应用于获取森林冠层三维空间光谱数据^[20]、单木和森林冠层三维结构测量等方面的研究^[21-23]。大量研究表明,无人机影像点云(drone-based image point clouds, DIPC)可以替代LiDAR点云获取单木及森林结构信息^[11,24-26]。然而,DIPC的获取受到多个因素的综合影响,包括平台飞行高度、飞行速度、成像角度、图像重叠度、图像采集时间和太阳高度角等。其中,飞行高度、航向重叠度以及旁向重叠度不仅直接影响DIPC的重构,还间接影响基于DIPC的冠层结构参数估算。研究表明,在利用DIPC进行林木冠层结构测量时,较高的旁向重叠度和航向重叠度(大于80%)生成的点云数据估算精度较高^[24,27],但基于DIPC的指标与基于机载LiDAR的指标之间的平均差异会随着重叠度的降低而增加,较高的图像重叠度会产生更多的照片,从而增加数据计算时间^[26]。Swayze et al^[21]研究表明,较低的飞行高度能产生较好的估算精度^[21];而Tu et al^[24]的研究表明,较高的飞行高度也可以实现更精确的测量。

基于此,本研究选择福建农林大学校内地物遮挡较少、树冠相互遮挡较少且冠型完整的桂花树林为研究对象,通过设置4组飞行高度(40、80、120、160 m)、3组航向重叠度(70%、80%和90%)和3组旁向重叠度(70%、80%和90%)进行无人机航拍,基于每次飞行获取的航拍影像重构DIPC,并进行林木冠层结构参数的估算。以地基LiDAR获取的点云数据作为参考,评估不同飞行参数下获取的

DIPC 重构精度(点云高程变异系数),比较各冠层结构参数 DIPC 估算精度,以期为实现更高精度的林木冠层结构参数 DIPC 估算提供飞行方案。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省福州市仓山区上下店路 15 号福建农林大学金山校区(26°5'15"N, 119°14'18"E),平均海拔 40 m,属于典型的亚热带季风气候,年均温度 16~20 °C,年均相对湿度约 77%^[28]。研究区有 36 棵桂花树,树高 2.6~4.3 m(平均 3.3 m),冠幅 1.1~2.0 m(平均 1.5 m)。地势平坦且临近区域无高层建筑等物遮挡,有利于无人机和地基 LiDAR 数据采集。

1.2 数据获取

采用大疆经纬 M300 RTK 无人机(深圳市大疆创新科技有限公司),搭载禅思 P1 高精度可见光相机获取研究区的影像数据。无人机空质量为 3.6 kg,最高飞行高度可达 5 000 m,最长续航时间为 55

min。无人机悬停定位精度在垂直和水平方向上可达±0.1 m,其 RTK 定位精度在水平方向上为(1.0±1×10⁻⁶) cm,垂直方向上为(1.5±1×10⁻⁶) cm。相机配备全色 RGB 镜头,传感器尺寸为 35.9 mm×24 mm(全画幅),图像尺寸为 8 192 pix×5 460 pix,有效像素为 4 500 万,像元尺寸为 4.4 μm。推荐的航向重叠度和旁向重叠度均为 80%,本研究选择的相机镜头焦距为 2.4 μm,视场角为 84°,光圈值为 2.8。

在 2023 年 6 月,选择晴朗无风、光线均匀的条件执行无人机飞行计划,以保证影像获取的一致性。共设置 36 次飞行任务,飞行参数包括飞行高度 40、80、120、160 m,航向重叠度 70%、80% 和 90%,以及旁向重叠度 70%、80% 和 90%。各飞行参数设置详见表 1。

使用 Stonex X300 三维激光扫描仪(意大利 STONEX 公司)获取目标树的地基点云数据。该扫描仪的水平可视范围为 360°,垂直可视范围为 -25°~65°,测量距离为 2~300 m。在 10 m 处,点云分辨率约为 3.7 mm。

表 1 飞行参数

Table 1 Flight parameters

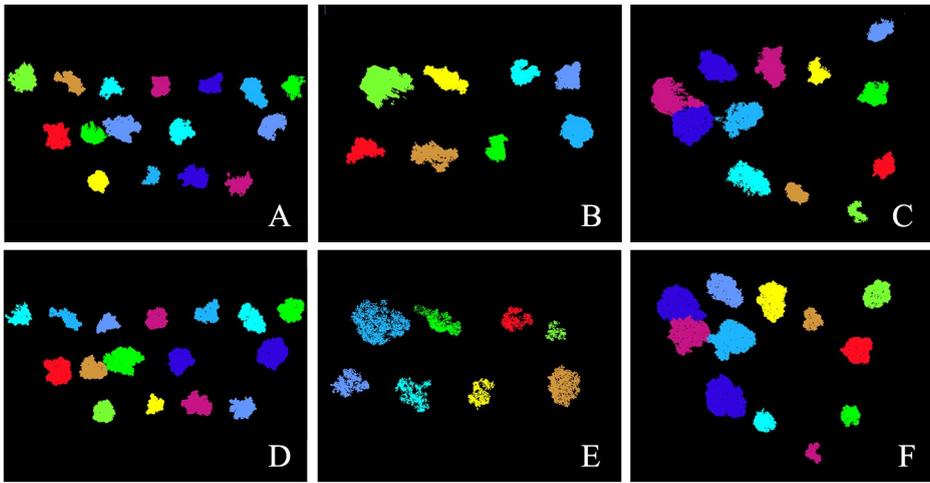
飞行高度/m Flight height	图像分辨率/cm Image resolution	航向重叠度/% Forward overlap	旁向重叠度/% Side overlap	飞行高度/m Flight height	图像分辨率/cm Image resolution	航向重叠度/% Forward overlap	旁向重叠度/% Side overlap
40	0.4	70	70,80,90	120	2.2	70	70,80,90
		80	70,80,90			80	70,80,90
		90	70,80,90			90	70,80,90
80	1.5	70	70,80,90	160	2.9	70	70,80,90
		80	70,80,90			80	70,80,90
		90	70,80,90			90	70,80,90

本研究采用 3 站扫描方式,每个扫描站点以 120°为间隔采集目标树的点云数据。以宽度大于树干直径的矩形泡沫板作为参考标志物,根据扫描角度和单次扫描所覆盖的目标树数量,设置 3~6 个泡沫板。在单次扫描时,将扫描仪镜头对准目标树,水平扫描角度设置为 120°~150°,并采用标准扫描模式。通过目视解译的方法,将扫描获取的点云数据与现场照片进行比对,对于明显缺失的目标树进行重新扫描,以确保每棵目标树具有较完整的点云数据。

1.3 数据处理

通过恢复结构和多视图立体视觉(structure from motion and multi-view stereo, SFM-MVS)技术,从无人机影像数据中生成三维立体点云数据。该

技术主要包括 3 个步骤:(1)从无人机影像中检测地物特征点并进行匹配;(2)基于运动恢复结构(structure from motion, SFM)算法将特征点重建为稀疏点云;(3)采用多视角密集匹配使点云进一步致密化。其中,前 2 步属于运动中恢复结构 SFM 算法,第 3 步利用多视角立体视觉匹配(cluster multi-view stereo, CMVS)算法和基于面片模型的密集匹配(patch-based multi-view stereo, PMVS)算法实现^[29]。采用 Li et al^[30]提出的单木分割算法对地基 LiDAR 和无人机 DIPC 数据进行处理(图 1)。通过人工编号的方法,将 LiDAR 点云单木和 DIPC 单木一一对应。使用人工裁剪和目视解译的方法,提取出所有目标树的冠层部分,确保每棵目标树的树冠层部分都得到正确的单木分割与提取。



不同颜色代表不同单木。图 A、B、C 为地基 LiDAR 单木分割结果,图 D、E、F 为无人机 DIPC 单木分割结果。
Different colors represent different individual trees. Figure A, B, C and figure D, E, F demonstrate individual tree segmentation results based on ground-based LiDAR and drone DIPC, respectively.

图 1 LiDAR 和无人机点云单木分割结果

Fig.1 Individual tree segmentation results based on LiDAR and UAV point cloud

1.4 指标计算

高程变异系数是量化点云穿透能力的重要指标,它反映了不同飞行参数下生成的 DIPC 效果之间的差异,指示被测样木冠层内部三维信息的丰富程度^[27]。点云的穿透能力越强,其高程数据的变化越明显,进而导致高程变异系数的增大。因此,点云高程变异系数可以作为样木冠层内部三维信息丰富程度的正向指标。选取点云高程变异系数来反映无人机 DIPC 点云数据的质量,并利用地基 LiDAR 数据的点云高程变异系数作为评价基准。点云高程变异系数的计算公式如下:

$$CV/\% = \frac{Z_{std}}{Z_{mean}} \times 100 \quad (1)$$

式中:CV 为点云高程变异系数, Z_{std} 为冠层内点云高程值的标准差, Z_{mean} 为冠层内点云高程值的平均值。

采用散乱点集凸包算法^[8]计算冠层垂直投影面积和冠层体积,并使用 Cloud Compare 软件从点云数据中提取冠幅、冠长和树高。

2 结果与分析

2.1 飞行高度对高程变异系数和冠层结构参数估算精度的影响

由图 2 可知,当飞行高度为 40 m 时,DIPC 高程变异系数与地基 LiDAR 点云高程变异系数的相关性较强($R^2 = 0.635$)。随着飞行高度升高,DIPC 高程变异系数与地基 LiDAR 变异系数的相关性逐渐减弱。当飞行高度升至 120 m 和 160 m 时,DIPC

高程变异系数与地基 LiDAR 变异系数的相关性显著降低($R^2 = 0.383$ 和 0.010)。飞行高度为 80~160 m 时,DIPC 高程变异系数显著减小,同时所有飞行高度下 DIPC 高程变异系数均存在明显的低估现象。

由图 3 可知,随着飞行高度升高,基于 DIPC 的冠层结构参数估算精度呈现出先稳定(40~120 m)后降低(120~160 m)的趋势。其中,在 120~160 m 时,树冠体积和冠长的估算精度显著降低,分别下降 24.82% 和 26.26%。

2.2 航向重叠度对高程变异系数和冠层结构参数估算精度的影响

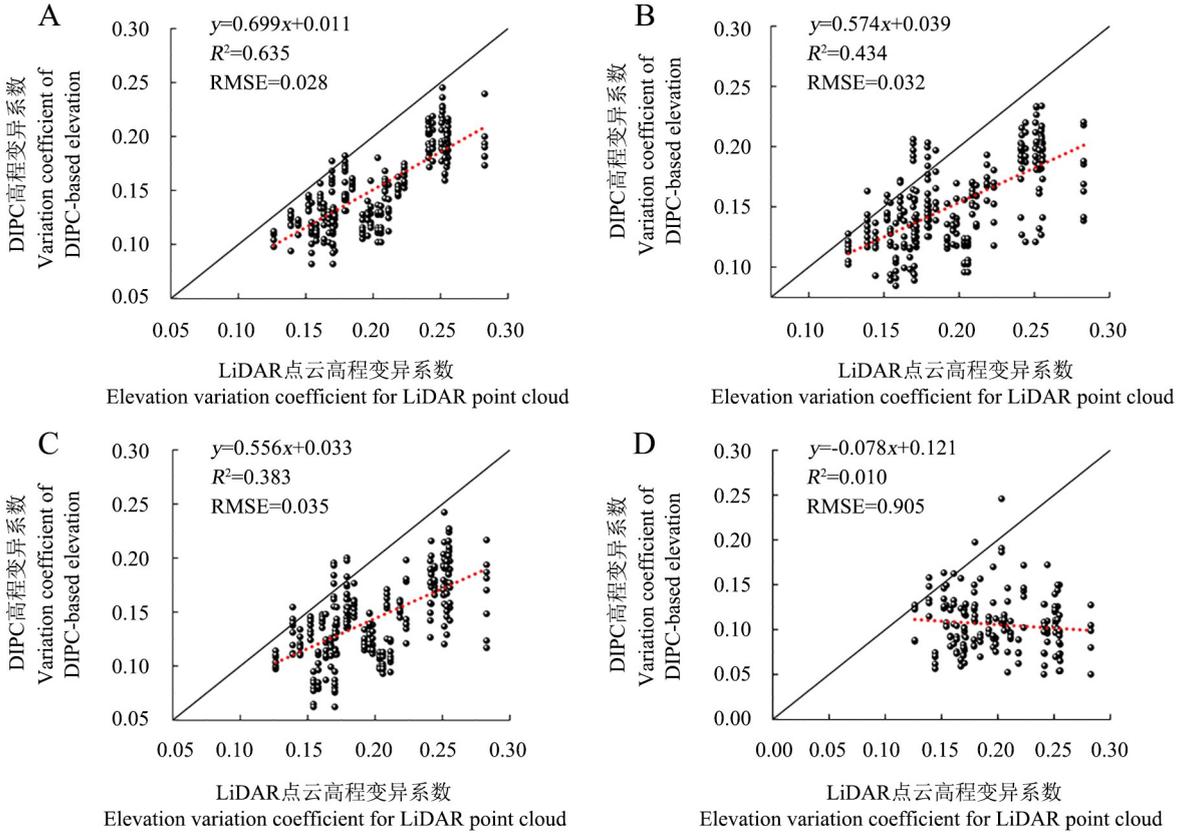
随着航向重叠度的升高,DIPC 高程变异系数与地基 LiDAR 变异系数的相关性逐渐增强,DIPC 高程变异系数逐渐增加,但所有 DIPC 高程变异系数均存在明显的低估现象(图 4)。当航向重叠度从 70% 提高至 80% 时,基于 DIPC 的冠层结构参数估算精度显著提高(图 5)。其中,树冠体积的估算精度提高最多(15.02%)。当航向重叠度从 80% 提升至 90% 时,各冠层结构参数的估算精度变化较小(-1.78%~0.67%)。

2.3 旁向重叠度对高程变异系数和冠层结构参数估算精度的影响

随着旁向重叠度的升高,DIPC 高程变异系数与地基 LiDAR 变异系数的相关性逐渐增强(图 6),DIPC 高程变异系数显著升高,但所有 DIPC 高程变异系数均存在明显的低估现象。当旁向重叠度从 70% 提高至 80% 时,除树高外,其余参数的估算精

度均有较大提高(图 7)。其中,树冠体积的估算精度显著升高(14.27%)。当旁向重叠度从 80% 提升

至 90%时,树高估算精度呈现下降趋势(-2.3%),其他冠层结构参数的估算精度变化相对较小。



A 图表示 40 m 航高, 航拍分辨率 0.4 cm; B 图表示 80 m 航高, 航拍分辨率 1.5 cm; C 图表示 120 m 航高, 航拍分辨率 2.2 cm; D 图表示 160 m 航高, 航拍分辨率 2.9 cm。红线表示由线性回归分析计算的各 DIPC 高程变异系数趋势线。RMSE; 均方根误差。
Figure A is 40 m flight height with aerial resolution of 0.4 cm; Figure B is 80 m flight height with aerial resolution of 1.5 cm; Figure C is 120 m flight height with aerial resolution of 2.2 cm; Figure D is 160 m flight height with aerial resolution of 2.9 cm. The red line represents the trend line of elevation variation coefficients of each DIPC calculated by linear regression analysis. RMSE; root mean square error.

图 2 不同飞行高度下 DIPC 高程变异系数与 LiDAR 点云高程变异系数

Fig.2 Elevation variation coefficients of DIPC and LiDAR point cloud at different flight heights

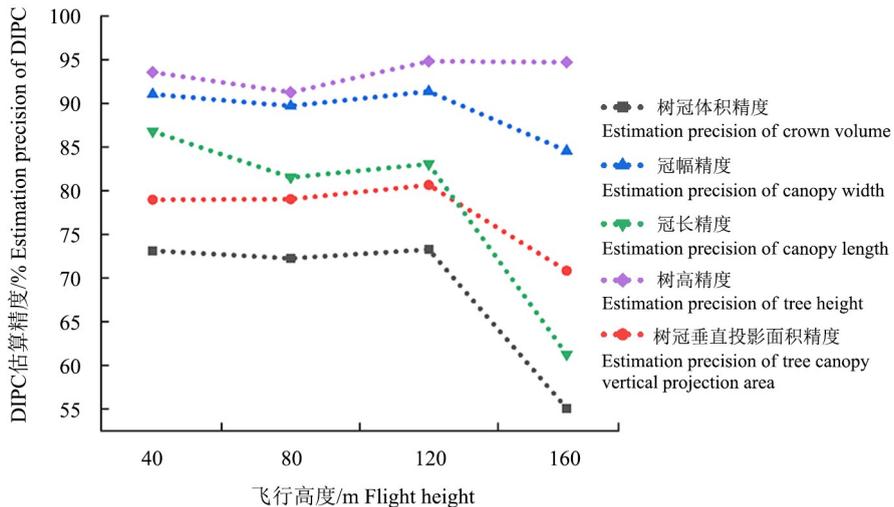
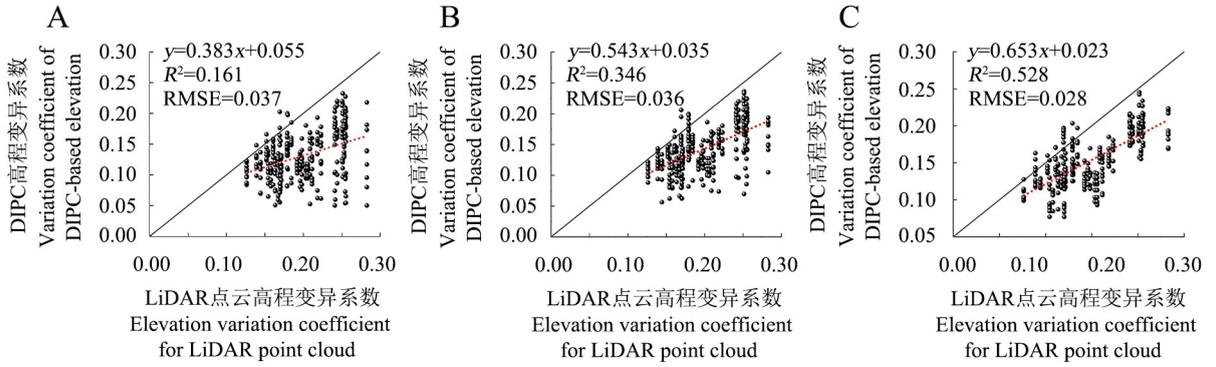


图 3 不同飞行高度下基于 DIPC 的冠层结构参数估算精度

Fig.3 Estimation precision of DIPC-based canopy structure parameters at different flight heights



A.70%航向重叠度;B.80%航向重叠度;C.90%航向重叠度。红线表示由线性回归分析计算的各DIPC高程变异系数趋势线。RMSE:均方根误差。

A.70% forward overlap; B.80% forward overlap; C.90% forward overlap. The red line represents the trend line of elevation variation coefficients of each DIPC calculated by linear regression analysis. RMSE:root mean square error.

图4 不同航向重叠度下DIPC高程变异系数与LiDAR点云高程变异系数

Fig.4 Elevation variation coefficients of DIPC and LiDAR point cloud at different forward overlaps

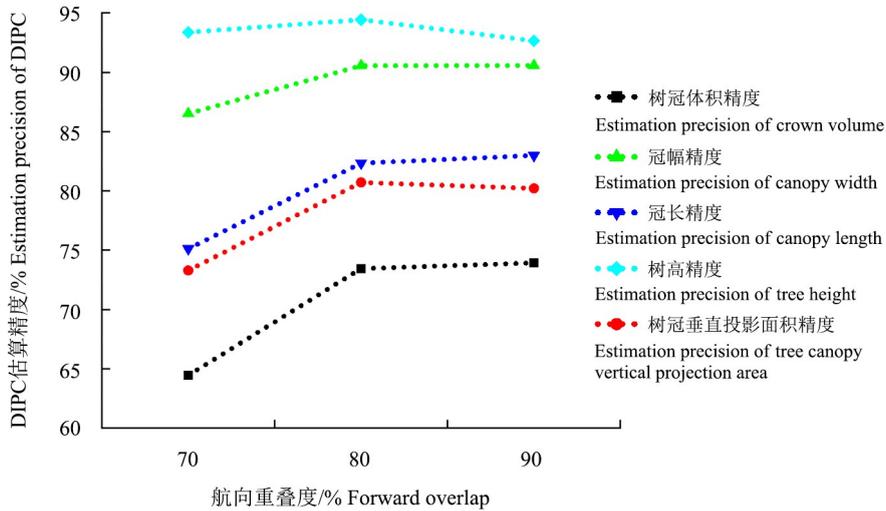
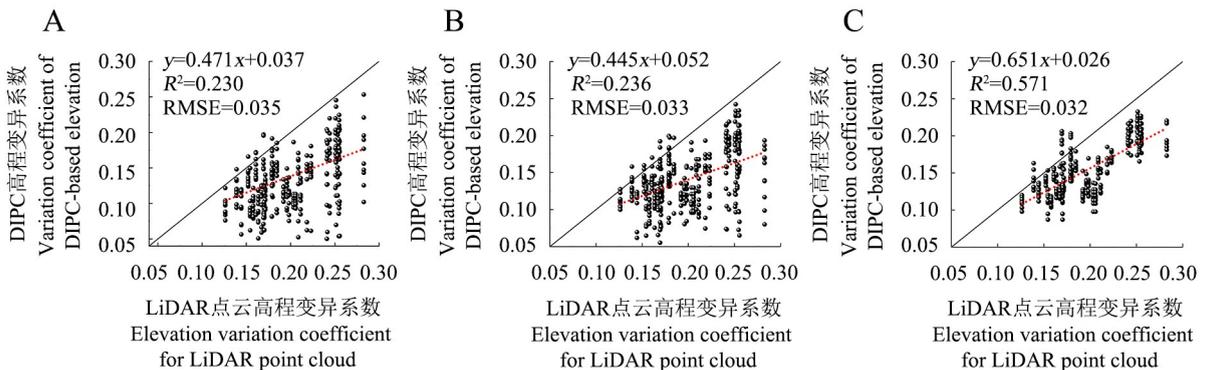


图5 不同航向重叠度下基于DIPC的冠层结构参数估算精度

Fig.5 Estimation precision of DIPC-based canopy structure parameters at different forward overlaps



A.70%旁向重叠度;B.80%旁向重叠度;C.90%旁向重叠度。红线表示由线性回归分析计算的各DIPC高程变异系数趋势线。RMSE:均方根误差。

A.70% side overlap; B.80% side overlap; C.90% side overlap. The red line represents the trend line of elevation variation coefficients of each DIPC calculated by linear regression analysis. RMSE:root mean square error.

图6 不同旁向重叠度下DIPC高程变异系数与LiDAR点云高程变异系数

Fig.6 Elevation variation coefficients of DIPC and LiDAR point cloud at different side overlaps

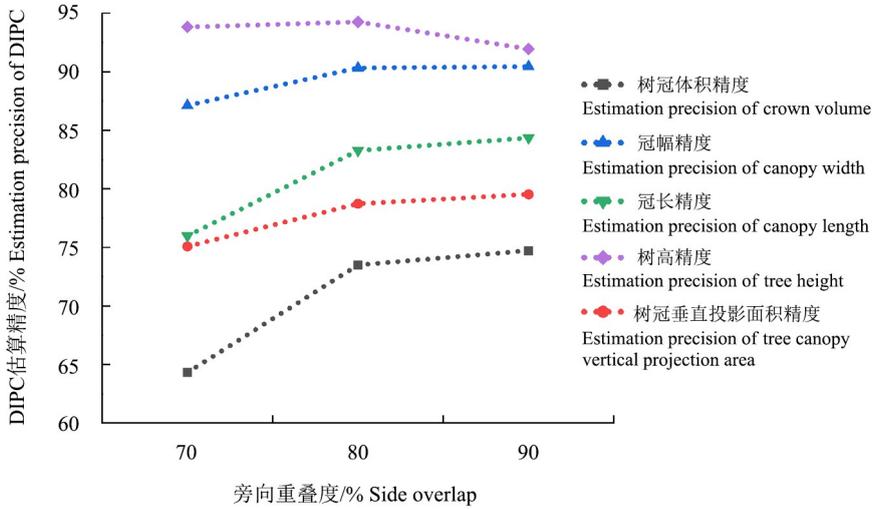


图 7 不同旁向重叠度下基于 DIPC 的冠层结构参数估算精度

Fig.7 Estimation precision of DIPC-based canopy structure parameters at different side overlaps

3 讨论

DIPC 高程变异系数在不同飞行高度下均低于 LiDAR 点云高程变异系数。随着飞行高度的升高, DIPC 高程变异系数与地基 LiDAR 点云高程变异系数的相关性呈现减弱的趋势,这一现象在飞行高度为 80~160 m 时尤为明显。这表明在不同飞行高度时, DIPC 的穿透能力均弱于 LiDAR 的穿透能力, 在 80~160 m 时, DIPC 的穿透能力呈现出整体下降的趋势。随着飞行高度逐渐升高, 除树高估算精度外, 其余各指标的 DIPC 估算精度均呈现出波动式下降的趋势。

飞行高度的升高导致树冠体积 DIPC 估算精度的降幅最大, 而冠幅 DIPC 估算精度则随飞行高度的上升呈现最小的变化幅度。冠层结构参数的估算精度随着飞行高度的变化具有明显的分段性。在 40~120 m 时, 各指标 DIPC 估算精度保持相对稳定; 在 120~160 m 时, 各指标 DIPC 估算精度显著下降。在飞行高度达到 120 m 时, 冠层结构参数 DIPC 估算精度的变化曲线均呈现明显的拐点。其中: 在 120 m 时, 树冠体积、树冠面积、冠幅和树高的估算精度最高; 在 160 m 时, 树冠体积、树冠面积和冠幅的估算精度最低。

综上, 飞行高度由 120 m 升至 160 m 时, 林冠层三维重构的质量明显降低, DIPC 对冠层的穿透能力也有所减弱。本研究还发现, 飞行高度越低并不代表冠层三维结构 DIPC 估算精度越高或 DIPC 穿透能力越强, 较高的飞行高度也能实现较高的冠

层指标估算精度, 这与 Goodbody et al^[25] 和 Jonathan et al^[27] 的研究结果一致。然而, Seifert et al^[31] 的研究表明, 较低飞行高度能够产生较多的重建细节和较高的估算精度, 这与本研究的结论存在差异。上述研究在主要研究树种、飞行高度范围、相机分辨率和研究区冠层盖度等方面具有较大差异。因此, 在考虑相机参数差异的前提下还需设置更大范围的飞行高度以及更多的树种和林分密度来进一步探究飞行高度的影响机制。

随着航向重叠度的增加, 沿飞行方向上可见光相机的拍摄点密度逐渐提高, 航摄照片的纵向重叠面积逐渐增大。点云密度增加, DIPC 质量呈现逐渐改善的趋势。在各航向重叠度下, DIPC 高程变异系数均低于 LiDAR 高程变异系数, 说明无论航向重叠度如何变化, DIPC 穿透能力均低于 LiDAR 点云穿透能力。随着航向重叠度的逐步提升, 除树高和树冠垂直投影面积外, 其余参数的估算精度总体均呈现上升的趋势。这说明增加航向重叠度对林木冠层三维重构质量具有显著的正向贡献, 并能够在一定程度上增强 DIPC 在冠层内部的穿透能力。航向重叠度的提升对树冠体积估算精度的改善最为明显, 而对树高估算精度的提升作用相对较小(图 5)。在 80% 航向重叠度下, 树高估算精度和树冠面积估算精度均达到最大值。此外, 冠层结构参数的估算精度在 80% 航向重叠度处表现出明显的拐点特征。航向重叠度由 70% 提升至 80% 时, 多数冠层结构参数的估算精度提升幅度较大; 当航向

重叠度由 80% 提升至 90% 时,其估算精度趋于稳定,而树高和树冠垂直投影面积估算精度反而出现下降。此外,在冠层结构参数中,树高估算精度最高,冠幅估算精度次之,而树冠体积估算精度最低。

随着旁向重叠度的升高,无人机的飞行航线愈加密集,所获取无人机图像的横向重叠面积增加,增多了从飞行航线两侧所获取的冠层信息。与 LiDAR 点云高程变异系数相比,在 70%、80%、90% 旁向重叠度下,DIPC 高程变异系数均出现不同程度的低估,说明 DIPC 的穿透能力均低于 LiDAR 点云的穿透能力。但是,随着旁向重叠度由 70% 逐步升至 90% 时,树冠体积、树冠面积、冠幅和冠长的估算精度均表现出不同程度的提升。其中,旁向重叠度的升高对树冠体积估算精度的提升作用最显著,对冠幅估算精度的影响最小。当旁向重叠度由 70% 升至 80% 时,各冠层结构参数的估算精度提升幅度显著高于旁向重叠度为 80%~90% 时的结果。在旁向重叠度从 80% 升至 90% 的阶段,树高估算精度出现下降趋势。与航向重叠度的情况类似,在所有研究的冠层结构参数中,树高估算精度最高,冠幅估算精度次之,树冠体积估算精度最低。

在不同航向重叠度和不同旁向重叠度下,除了冠长的估算精度外,其余指标 DIPC 估算精度在航向重叠度升高时提升更为显著。因此,航向重叠度对 DIPC 树冠指标估算精度的影响大于旁向重叠度。

本研究发现,DIPC 树高估算精度的变化趋势与其他冠层的变化规律不同。树高估算精度并不随着飞行高度降低或航向和旁向重叠度的升高而升高。树高估算精度在所有冠层指标中通常是最高的,并且随着飞行方案的改变,树高估算精度也发生了明显变化。因此,需要进一步探究哪些参数对树高估算精度的影响最大。

本研究仅使用飞行高度、航向重叠度和旁向重叠度分析了无人机航拍参数对树冠层三维结构 DIPC 重构效果的影响。无人机飞行时的光照条件、航线规划、相机性能、目标树木所在的地形地貌以及地表覆盖等因素均可能对 DIPC 林冠层的三维重构质量产生影响。此外,本研究仅以桂花树为研究对象,而不同树种及不同森林结构中的林冠层三维形态往往存在较大差异。因此,可以考虑引入更多的飞行参数、气象参数、地面参数,以及不同树种

和森林结构,以更深入地研究无人机飞行状态、外部环境条件和树种差异等因素对 DIPC 林木冠层三维重构效果的影响。

在进行航摄任务和数据处理时,快速生成高质量结果的能力也是需要考虑的重要因素。在飞行高度为 40 m 或 120 m,航向和旁向重叠度均为 80%~90% 时,各参数的 DIPC 估算结果均相对较好。虽然较低的飞行高度和较高的重叠度能够提高 DIPC 估算精度,但也会显著增加任务的时长和数据量。因此,在本研究中,最优的飞行参数是飞行高度为 120 m,航向和旁向重叠度均为 80%。在后续的研究中,也应考虑多种因素下对应的无人机飞行和数据处理时长,从而在冠层三维重构质量和飞行任务时长之间实现良好的权衡,以确定针对不同树种和不同地形的最优飞行方案。

4 结论

(1) 随飞行高度的增加,DIPC 高程变异系数与地基 LiDAR 点云高程变异系数的相关性逐渐减弱,其在飞行高度 120~160 m 时显著下降。而 DIPC 高程变异系数在 80~160 m 显著减小。冠层结构参数 DIPC 估算精度先(40~120 m)保持相对不变,后(120~160 m)显著降低。

(2) 随航向重叠度的提高,DIPC 高程变异系数逐渐增大,DIPC 高程变异系数与地基 LiDAR 点云高程变异系数的相关性逐渐增强。冠层结构参数 DIPC 估算精度先(航向重叠度 70%~80%)显著提高,后(航向重叠度 80%~90%)保持相对不变。

(3) 随旁向重叠度的提高,DIPC 高程变异系数显著增大,DIPC 高程变异系数与地基 LiDAR 点云高程变异系数的相关性逐渐增强。冠层结构参数 DIPC 估算精度先(旁向重叠度 70%~80%)显著提高,后(旁向重叠度 80%~90%)保持相对不变。

综合分析后发现,航向和旁向重叠度在 70% 至 80% 阶段对冠层结构参数 DIPC 估算精度的提升作用最显著,且增加航向重叠度对 DIPC 估算精度的提升作用更大。而飞行高度在 120 m 上升至 160 m 的过程中会显著降低各冠层结构参数的 DIPC 估算精度。

参考文献(References)

- [1] 彭焕华,赵传燕,冯兆东,等.利用半球图像法提取植被冠层结构特征参数[J].生态学报,2011,31(12):3376-

3383. DOI: 10.20103/j.stxb.2011.12.015.
- PENG H H, ZHAO C Y, FENG Z D, et al. Extracting the canopy structure parameters using hemispherical photography method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3376–3383. DOI: 10.20103/j.stxb.2011.12.015.
- [2] VIERLING L A, WESSMAN C A. Photosynthetically active radiation heterogeneity within a monodominant Congolese rain forest canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103(3): 265–278. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00129-5.
- [3] 崔启武, 朱劲伟. 林冠的结构和光的分布——光的透射和反射理论[J]. *地理学报*, 1981, 36(2): 196–208. DOI: 10.11821/xb198102008.
- CUI Q W, ZHU J W. The transmissive and reflective theories of light for various structures of the forest canopy[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1981, 36(2): 196–208. DOI: 10.11821/xb198102008.
- [4] LI D Z, ZANG R G. The research advances on the structure and function of forest canopy, as well as their temporal and spatial changes[J]. *World Forestry Research*, 2004, 17(3): 12–16. DOI: 10.1016/j.jce.2003.10.003.
- [5] CHEN J M, RICH P M, GOWER S T, et al. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D24): 29429–29443. DOI: 10.1029/97jd01107.
- [6] MATHEWS A, JENSEN J. Visualizing and quantifying vineyard canopy LAI using an unmanned aerial vehicle (UAV) collected high density structure from motion point cloud[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(5): 2164–2183. DOI: 10.3390/rs5052164.
- [7] HUANG H B, LI Z, GONG P, et al. Automated methods for measuring DBH and tree heights with a commercial scanning lidar[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2011, 77(3): 219–227. DOI: 10.14358/pers.77.3.219.
- [8] 孟园. 基于地面三维激光扫描技术的树冠参数的估测研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- MENG Y. Estimation of crown parameters based on ground three-dimensional laser scanning technology[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [9] DRAKE J B, DUBAYAH R O, CLARK D B, et al. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 305–319. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00281-4.
- [10] POPESCU S C, WYNNE R H, NELSON R F. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 37(1/2/3): 71–95. DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00121-7.
- [11] 徐慧丹. 基于 TLS 和 UAV 影像点云的森林样地参数自动估算[D]. 福州: 福州大学, 2018.
- XU H D. Automatic estimation of forest sample parameters based on TLS and UAV image point cloud[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [12] LIANG X L, HYYPPÄ J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels[J]. *Sensors*, 2013, 13(2): 1614–1634. DOI: 10.3390/s130201614.
- [13] PARKER G G, HARDING D J, BERGER M L. A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2004, 41(4): 755–767. DOI: 10.1111/j.0021-8901.2004.00925.x.
- [14] WITZMANN S, MATITZ L, GOLLOB C, et al. Accuracy and precision of stem cross-section modeling in 3D point clouds from TLS and caliper measurements for basal area estimation[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1923. DOI: 10.3390/rs14081923.
- [15] ZHU C, ZHANG X P, HU B G, et al. Reconstruction of tree crown shape from scanned data[M] // PAN Z G, ZHANG X P, EL RHALIBA A, et al. *Technologies for E-learning and digital entertainment*. Heidelberg: Springer Berlin, 2008: 745–756. DOI: 10.1007/978-3-540-69736-7_79.
- [16] 徐华东, 陈文静, 刘华. 基于三维激光扫描的单木胸径和树高提取[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(5): 524–529. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2019.05.011.
- XU H D, CHEN W J, LIU H. Single-wood DBH and tree height extraction using terrestrial laser scanning[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(5): 524–529. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2019.05.011.
- [17] 杨可乐, 谭艳, 郭孝玉, 等. 集成多源遥感与极限梯度提升的竹林地上生物量估测[J]. *森林与环境学报*, 2024, 44(4): 431–440. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2024.04.011.
- YANG K L, TAN Y, GUO X Y, et al. Above-ground biomass estimation of bamboo forests by integrating multi-source remote sensing and XGBoost machine learning[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2024, 44(4): 431–440. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2024.04.011.

- [18] CHANG A J, JUNG J, KIM Y. Estimation of forest stand diameter class using airborne lidar and field data [J]. *Remote Sensing Letters*, 2015, 6 (6): 419–428. DOI: 10.1080/2150704X.2015.1035770.
- [19] PARIS C, KELBE D, VAN AARDT 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. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2675963.
- [20] DANDOIS J P, ELLIS E C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 259–276. DOI: 10.1016/j.rse.2013.04.005.
- [21] SWAYZE N C, TINKHAM W T, VOGELER J C, et al. Influence of flight parameters on UAS-based monitoring of tree height, diameter, and density [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 263: 112540. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112540.
- [22] FU X Y, ZHANG Z N, CAO L, et al. Assessment of approaches for monitoring forest structure dynamics using bi-temporal digital aerial photogrammetry point clouds [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 255: 112300. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112300.
- [23] HUANG H Y, HE S D, CHEN C C. Leaf abundance affects tree height estimation derived from UAV images [J]. *Forests*, 2019, 10(10): 931. DOI: 10.3390/f10100931.
- [24] TU Y H, PHINN S, JOHANSEN K, et al. Optimising drone flight planning for measuring horticultural tree crop structure [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 160: 83–96. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.12.006.
- [25] GOODBODY T R H, COOPS N C, WHITE J C. Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: a review of opportunities, challenges, and future directions [J]. *Current Forestry Reports*, 2019, 5 (2): 55–75. DOI: 10.1007/s40725-019-00087-2.
- [26] GOODBODY T R H, WHITE J C, COOPS N C, et al. Benchmarking acquisition parameters for digital aerial photogrammetric data for forest inventory applications: impacts of image overlap and resolution [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 265: 112677. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112677.
- [27] DANDOIS J, OLANO M, ELLIS E. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13895–13920. DOI: 10.3390/rs71013895.
- [28] 董钠,李成儒,陈蕾,等. 酢浆草属植物观赏性评价体系的建立与应用 [J]. *热带作物学报*, 2020, 41 (9): 1770–1778. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2020.09.007.
- DONG N, LI C R, CHEN L, et al. Establishment and application of ornamental evaluation system for *Oxalis* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41 (9): 1770–1778. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2020.09.007.
- [29] 王洋,张涛,李欢利,等. 应用 SFM 和多视图面片实现牙模三维重建 [J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21 (4): 1067–1070. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2013.04.062.
- WANG Y, ZHANG T, LI H L, et al. 3D reconstruction of teeth models based on SFM and patches-based multi-view stereo [J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21 (4): 1067–1070. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2013.04.062.
- [30] 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. DOI: 10.14358/pers.78.1.75.
- [31] SEIFERT E, SEIFERT S, VOGT H, et al. Influence of drone altitude, image overlap, and optical sensor resolution on multi-view reconstruction of forest images [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (10): 1252. DOI: 10.3390/rs11101252.

(责任编辑:吴显达)