

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.019

基于 SfM 的针叶林无人机影像树冠分割算法

杨全月¹ 董泽宇² 马振宇³ 吴悠² 崔琪² 卢昊²

(1. 北京农学院计算机与信息工程学院, 北京 102206; 2. 北京林业大学信息学院, 北京 100083;
3. 弗莱堡大学环境与自然资源学院, 弗莱堡 79106)

摘要: 利用无人机影像进行森林资源调查具有作业快速便捷、数据分辨率较高、影像细节丰富的特点,可较好地识别单木,获取树木位置、冠幅等信息。但是,厘米级的影像分辨率使基于光谱信息的传统分割算法在提取树冠时出现破碎化现象,产生过分割结果。同时,在非落叶季由于无人机影像难以观测到茂密林冠下层地形,故在地形起伏较大的林区难以实现基于树木冠层高度模型(CHM)的单木分割方法。针对上述问题,结合传统二维图像处理和SfM三维建模,提出了一种无需高度归一化的无人机影像树冠三维分割提取算法,首先利用SfM技术从重重叠叠航片建立三维表面模型,利用高程和图像信息检测初始树木位置,再采取kNN自适应邻域分水岭分割的方式对中心单木进行精确的树冠参数提取。在北京市百花山国家级自然保护区的落叶松林地进行了高分辨率无人机影像实验,采用正射影像目视解译结果和多种基于图像、点云的自动分割算法结果进行验证和评价。结果表明,本文方法对树木总体检出率在91%以上,冠幅提取精度在81%以上,优于传统的全局分水岭方法和其他树冠分割算法。

关键词: 树冠; 针叶林; 分割算法; SfM; 无人机

中图分类号: S771.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0181-10 **OSID:** 

Coniferous Forest Crown Segmentation Algorithm of UAV Images Based on SfM

YANG Quanyue¹ DONG Zeyu² MA Zhenyu³ WU You² CUI Qi² LU Hao²

(1. School of Computer and Information Engineering, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China
2. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
3. Faculty of Environment and Natural Resources, University of Freiburg, Freiburg 79106, Germany)

Abstract: Using unmanned aerial vehicle (UAV) images to inventory forest resource is a quick solution to collect high resolution data with rich imagery details. It is capable to recognize individual trees with locations and crown sizes. An intrinsic problem of high spatial resolution UAV images at centimeter levels is that the images are tended to over-segmented. In addition, UAV images captured in plant growing season can hardly observe the ground and objects beneath the canopy top, leading to infeasibility of height normalized canopy height model (CHM) based crown segmentation algorithms in forested areas with large terrain variations. To tackle these problems, a novel UAV image crown extraction approach was proposed, which was free of height normalization. Firstly, a 3D surface model was built from dense images by structure from motion technology. Initial tree locations were identified by combining height information and image contexts. An adaptive kNN neighborhood watershed algorithm was implemented to derive crown coverage of each initial tree locations. UAV images of Larch forests in Baihuashan National Nature Reserve of Beijing were used to conduct the experiment, and it was validated by visual interpretation on orthophotos and compared with a couple of images or point cloud based automatic segmentation algorithms. The results showed that the overall detection rate of individual trees was over 91%. The crown size extraction accuracy was over 81%, which outperformed the original watershed and other crown segmentation methods. It was demonstrated that the proposed method can serve to extract high accuracy tree parameters rapidly at large scales in complex terrain environment.

Key words: crown; coniferous forest; segmentation algorithm; SfM; unmanned aerial vehicle

收稿日期: 2019-11-27 修回日期: 2020-03-10

基金项目: 北京市教委科研计划项目(KM201710020016)

作者简介: 杨全月(1979—),女,讲师,主要从事林业信息化研究,E-mail: 39062104@qq.com

通信作者: 卢昊(1990—),男,讲师,博士,主要从事激光雷达和无人机林业遥感研究,E-mail: luhao@bjfu.edu.cn

0 引言

树冠是树木获取光能并进行能量转换的主要场所,冠幅反映了树木的生长活力及林木空间属性^[1],准确获取树冠信息有助于监测树木长势、估算树木生物量及小班蓄积量、预防树木病虫害^[2]。利用传统的光学遥感手段,可进行面向对象的图像分割树冠提取,一般使用光谱和纹理信息^[3]、图像梯度^[1]或图像分水岭^[4-5]等方法。随着无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)技术的迅速发展,无人机航拍影像广泛应用于高精度的森林资源调查等领域^[6]。利用无人机影像可快速获取林区高分辨率影像数据,运用传统遥感图像处理手段提取单木冠幅信息^[7]。一般认为,激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)点云具有很高的几何精度和细节反映能力,可精确提取单木树高、冠幅、树冠体积、林隙等信息^[8-11],基于机载 LiDAR 数据的单木分割算法中,具有代表性的分别为基于冠层高度模型(Canopy height model, CHM)^[12-13]的分割算法和基于原始点云的分割算法^[14]。

随着摄影测量技术和计算机视觉技术的发展,基于双目视觉原理,可对图像构建立体像对、进行前方交会,求得林下树木几何结构信息^[15-17]。由于计算性能的大幅度提高,传统摄影测量的空三加密发展为密集匹配算法^[18],出现了快速有效的运动恢复结构(Structure from motion, SfM)技术。通过密集匹配点云提取林分参数已取得了初步进展,有效地解决了高分辨率图像的过分割问题。曾健等^[19]运用倾斜摄影测量技术提取了落叶树人工林地地形,发现无人机影像匹配点云与机载 LiDAR 点云具有很高的一致性。LI 等^[20]对有人机(Charge-coupled device, CCD)航片进行密集匹配,有效反演了东北地区地上生物量和叶面积指数。陈崇成等^[21]利用密集匹配点云 CHM 模型分割了苗圃单木。刘见礼等^[22]提出一种点云分层切片方法,实现了单木树冠提取。许子乾等^[23]结合 LiDAR 数字高程模型(Digital elevation model, DEM)研究亚热带森林林分特征变量,发现 Lorey's 高等林分指标与 UAV 点云指标具有较高敏感性。

分析这些方法发现,无人机拍摄一般在人工林^[19]、稀疏林地^[22]、苗圃^[21]等郁闭度较低的林分中才能直接观测地表,得到 DEM;在密林^[23]、天然林^[18, 20]中,影像密集匹配点云往往需要借助 LiDAR 等主动遥感手段获取的 DEM 进行高度归一化,再进行林木参数提取。这种依赖性显然制约了无人机影像在大范围天然林区自动提取森林参数的实用性。

本文利用无人机快速机动航拍的优势获取地势陡峭、坡度较大的生长季针叶林高重叠度影像,基于 SfM 技术进行三维表面重建,借鉴激光雷达点云分水岭分割单木的思想,提出一种无需 DEM 数据支持的自适应邻域分水岭算法,旨在解决在茂密林区高分辨率无人机影像三维重建无法得到地形信息以及树冠过分割的问题,从而提升无人机影像在森林资源调查中的实用性。

1 实验区概况与数据获取

1.1 实验区概况

本研究区位于北京市西部百花山国家级自然保护区,地处北京市门头沟区清水镇境内,是以保护暖温带华北石质山地次生落叶阔叶林生态系统为主的自然保护区。森林植被垂直分异明显,海拔为 1 000 ~ 1 900 m。选择区内一处北向坡面为实验林地,海拔为 1 100 ~ 1 200 m,面积约为 8 000 m²,位置分布如图 1 所示。林地坡度约为 40°,地势陡峭,生长植被主要为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)。

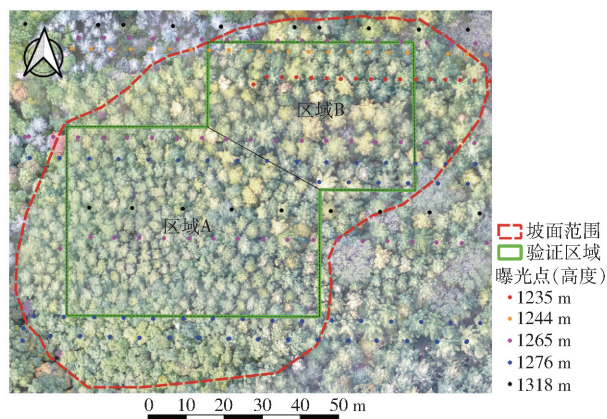


图1 实验区位置

Fig. 1 Overage of experiment region

1.2 无人机数据获取

数据获取时间为 2018 年 9 月,实验区树木处于生长季末期,部分林冠叶片颜色开始发黄,区分度较大。使用大疆精灵 4 型(DJI Phantom 4)无人机,搭载 FC330 型相机,内置 Sony Exmor R CMOS 传感器,有效像素为 1 200 万,感光单元尺寸为 1.58 μm,焦距为 3.61 mm,因此,在相对飞行高度 100 m 时地面采样分辨率(Ground sample distance, GSD)约 4.4 cm。由于目标区域坡度较大,坡面上下高差超 50 m,为保证对不同高度处的林木均有近似分辨率成像,依据山势设计了 5 种不同高度(1 235、1 244、1 265、1 276、1 318 m)航线进行重叠覆盖。无人机作业采用自动巡航模式,使用 DJI GS Pro 型地面站进行控制。通过指定成像范围和影像重叠度的方式自动计

算飞行轨迹和曝光点,以定点悬停拍摄的方式完成区域成像。通过云台控制镜头始终垂直向下以保证成像姿态角的相对稳定。无人机内置全球定位系统(Global positioning system, GPS)模块记录曝光点位置并以(Exchangeable image file format, EXIF)信息的形式存储在图像中。最终 5 个不同高度共获得高分辨率无人机图像 509 幅,实验林地坡面区域内的影像曝光点如图 1 所示。

2 原理与方法

本文方法总体思路是从二维影像构建三维模型,再从三维模型回归林木二维结构信息,技术流程如图 2 所示。

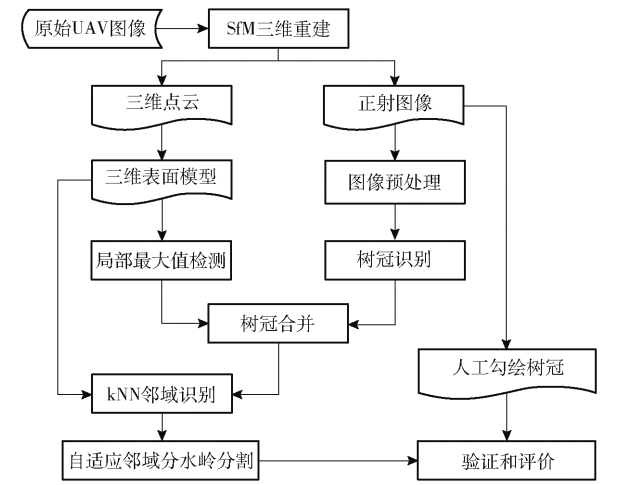


图 2 总体技术流程图
Fig. 2 Overview technical flowchart

2.1 无人机影像 SfM 三维重建

2.1.1 密集影像 SfM 处理

为提取林地三维表面结构,首先对原始无人机影像进行 SfM 三维重建。SfM 算法步骤为:密集影像同名特征提取和匹配。利用同名特征点进行影像相对定向并计算外方位元素。空三处理生成稀疏点云及迭代光束法平差。基于稀疏点云进行加密得到密集点云。本研究使用 Pix4Dmapper 软件处理无人机影像。特征点搜索使用结合特征匹配和像素匹配的 Daisy 算子,无人机内置 GPS 提供的曝光时刻机身坐标作为影像外方位元素的坐标初始值进行迭代优化,最后使用面片多视角立体视觉(Patch-based multi-view stereo, PMVS)算法搜索图像中的像素以得到更多的匹配点,加密点云数据。SfM 技术进行同名点搜索、匹配和点云加密的方式如图 3 所示,图 3a 下方背景为 SfM 生成彩色点云,空中蓝色圆点为平差后像主点位置,蓝色矩形表示相机投影方向,一组绿色射线表示地表一个同名点被多个影像同时观测,前方交会于地物空间。图 3b 表示该同名点在

一系列不同影像中的搜索位置。初始相机内参数修正误差为 2.48%,联合光束法平差的平均误差为 0.2 像元,符合测绘要求。最终得到实验区点云密度为 600~1 000 个/ m^2 。同时,对原始无人机影像进行拼接处理和地理编码,平均采样分辨率为 2.78 cm,利用点云高程信息进行了正射纠正并生成空间分辨率为 0.05 m 的彩色影像作为实验区底图(图 1)。

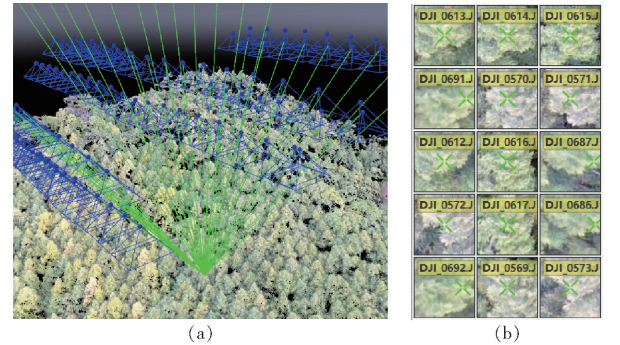


图 3 SfM 技术密集匹配彩色点云示意图
Fig. 3 Illustrations of densely matched true color point cloud from SfM

2.1.2 三维表面模型处理

基于 3D 点云分割的单木提取方法依赖树冠的点云包络或较完整的点云冠层模型^[14,22],但由于研究区生长季树叶茂密,林地郁闭度较高,无人机影像难以拍摄到林冠内部细节、林窗及林下地表,或无法在多张影像上构成同名点观测。由图 3a 可知,绝大部分点集中在树冠顶层,导致上述 3D 点云分割方法适用性较差。但由于冠层表面三维点云密度极高,可利用表面模型处理方法进行树冠提取。针对该特点,使用点云数字表面模型(Digital surface model, DSM)内插方法生成分辨率 0.05 m 的 DSM 模型,并进行了表面平滑处理以消除表面噪声。

2.2 kNN 自适应邻域分水岭分割

2.2.1 单木检测

单木检测是为了找出树木中心位置,作为后续树冠分割的起始位置。为了充分利用无人机影像高分辨率纹理和 SfM 三维结构信息,设计了一种结合图像信息和高程信息的检测策略。

(1) 基于图像的单木检测

首先,进行图像预处理以增强树冠边缘和边界差异。利用 Sobel 算子和 Laplace 算子增强图像中树冠的边缘,使树与树之间、树与地面之间的边界更加清晰明确。利用中值滤波可以在一定程度上去除增强时出现的噪声点。在预处理过程中,两种算子和中值滤波交替使用。形态学开运算和闭运算可以使树冠内部紧密、体积缩小,并且树冠之间的间距增大,直方图均衡化使图像的树冠部分和非树冠部分的灰度差距增大。进行上述处理后,使用滑动窗口

的大津阈值法将图像分为多个小块,对每一块使用大津阈值法得到二值图像。再对该二值图像使用像素之间的欧氏距离变换计算初始树冠中心^[24],最后使用图像分水岭法分割出树冠。由于图像进行了形态学开运算和闭运算,树冠图像不能准确代表真实树冠,因此仅保留树木位置信息。

(2) 基于高程信息的单木检测

由于树木本身有向上生长的特点,在地形高差变化较大的区域,树冠仍然符合树顶高于其他部分的特点。基于高度信息进行树冠检测,一般利用树冠几何形态特征作为先验知识,树顶位置往往在高程上处于局部最大值点。参照文献[22,25],设定一个最小树冠半径 R ,对于表面模型栅格中的每一个点,判断与距离小于 R 的所有点是否全部低于该点,将符合条件的像素视为初始树顶点。分析发现,一般针叶林林分都较为均匀,定值 R 足够进行检测,自适应调整的影响不大。实际上,文献中一般使用 CHM 进行检测,但在坡度较大情况下,树木冠幅内部不同像素对应的高程可能不一样,导致 CHM 树冠形状发生扭曲,直接应用 DSM 可在很大程度避免该问题。

(3) 单木树冠检测结果合并

树冠最高点一般是较为准确的树顶点,而图像识别的中心点不一定是准确的树顶点,依据高程信息检测的结果往往更加准确,但图像信息可以在三维重建不精确的位置补充识别部分漏检单木。由于三维模型的准确度有限且针叶树木的特殊冠型(树冠凹凸不平滑),需设定较大的树冠半径 R 才能较好地避免过分割,但导致有些树木不能被识别。对未被识别的树,使用图像信息作为补充,二者合并的具体策略是:对每个高程检出点,去除其周围半径为 R 圆周内的图像检出点;再把剩余图像检出的树顶点加入到高程检出的树顶点,形成完整的树顶点检测结果。

2.2.2 自适应 kNN 邻域检测

针对生长季林区无法从无人机观测到地面,无法进行点云高度归一化的问题,提出了自适应 kNN 邻域检测的方法,改变传统分水岭进行全局处理的方式,利用初始树顶检测位置进行 kNN 邻域识别,

从而在尽可能小的单木邻域内进行分水岭分割,避免地形变化导致分水岭分割的错误。无需对林区点云进行高度归一化,可使分水岭分割直接应用于 DSM 模型。令 $T_{\text{tree}} = \{T_h | h \in [0, m]\}$ 为林地内树顶检测得到的 m 个顶点集合, $C_{\text{tree}} = \{C_h^T | h \in [0, m]\}$ 为 m 个相应树冠集合。计算顶点之间的水平欧氏距离,得到距离矩阵为

$$D_r = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $d_{ii} = 0 (i = 1, 2, \dots, m)$ 。待分割的目标树为 T , 它的 kNN 邻域定义为

$$kNN(T) = C_T^T \cup C_1^T \cup C_2^T \cup \cdots \cup C_k^T \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad C_i^T \in \{C_j^T | j = \min\{D_i^T, k\}\} \quad (3)$$

C_i^T 表示树 T_i 所占据的树冠空间,是 DSM 像元的集合。式(2)即对 T 取距离矩阵第 i 行中,除去它自身最小的 k 个元素对应的 C_{tree} 求并。

由于初始分割之前树冠 C_i^T 的范围未知,本文简化了邻域计算,构建以目标树顶点为中心的矩形区域,并不断扩大这个矩形,使其能够包括目标树顶点及其周围的 k 个最近树顶点所在缓冲区。考虑到林地树木分布较为均匀,本研究中将 kNN 邻元参数 k 取 4,并对邻元选择进行了改进。在目标树顶左上、右上、左下和右下 4 个象限中各找出距离最近的树顶点,如图 4a、4b 所示。自适应邻域的优点是,邻域范围是随林木的实际空间分布变化的,株数密度较大的林区 kNN 邻域较小,密度较小的林区则 kNN 邻域较大,以保证该邻域在尽可能小的同时能够包括目标树的周边区域。另一个优点是,在每个邻域内可重新检验局部最大值以获得更加精确的树顶,原因是:图像检测出的树顶点不一定是树的最高点,导致分水岭效果变差。得到邻域矩形后,可根据其尺寸估算区域内树冠尺寸,从而确定更优的最小树冠半径 R ,使树顶检测可以适应不同大小的树。 k 为本文方法中可变参数,若 4 邻域分割无法适应复

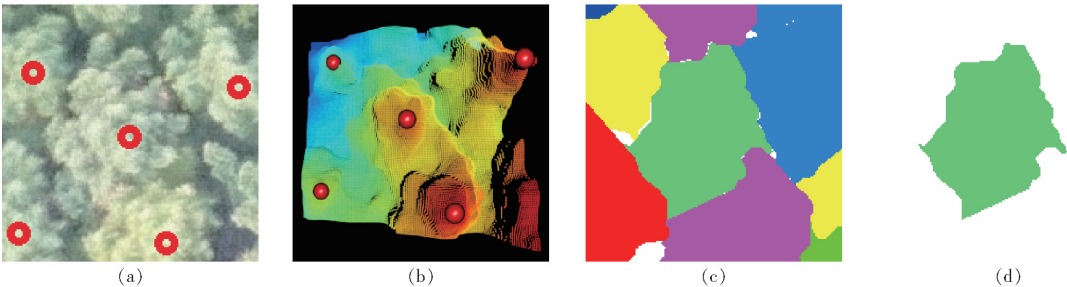


图 4 自适应 kNN 邻域示意图

Fig. 4 Illustrations of adaptive kNN neighborhood

杂林分条件,可根据实际林分状况调整 k ,将 2π 的圆周进行 k 等分搜索,使最小包围矩形囊括目标树的局部邻域。

2.2.3 邻域分水岭分割

分水岭分割是一种常用于图像分割的数学形态学方法,基本思想是将输入的灰度图像视为拓扑地貌,基于流溢模型进行分水岭变换。对于图像分割而言,通常在梯度图像上进行分水岭变换,而对于表示冠层高度的栅格模型,分水岭可直接应用,不同之处在于树冠高度模型经过“倒置”,一般由最高点开始“浸水”。由于已检测了单木初始位置,本方法是一种标记控制的分水岭算法,目的是基于 $kNN(T)$ 和 T_{tree} 求得 C_{tree} 集合。 T_{tree} 为树顶检测得到的顶点集合,表示分水岭算法的初始状态。在每个 kNN 邻域内,从 $k+1$ 个单木初始点开始进行分水岭处理,设 kNN 邻域的高程范围是 $[H_{min}, H_{max}]$,随着水位从 H_{min} 到 H_{max} 不断增加,邻域内的地形会被水漫过,每个被漫过像素将被分配给不同树冠,当这 $k+1$ 个树冠两两之间出现连通时,在连通像素上标记阻断。最终,邻域内存在一些点属于两个或多个树冠,这些点构成“分水线”,进而确定了树冠像素集合,如图 4c 所示。由于邻域是围绕目标树构建的,只有包围目标树冠的分水线最接近自然边界,故只取邻域分水岭结果中目标树的分割区域作为该邻域分割结果,其他邻接树冠予以舍弃,如图 4d 所示。最后将所有单木作为目标树的分割结果合并成完整的林分树冠分割结果。综上可知,邻域分水岭与传统分水岭最大区别在于邻域内高程范围的不同。传统分水岭作用于全局 CHM 模型,范围一般为从 0 到最大树高,而邻域分水岭由于不需高程归一化,随着不同目标树邻域在地形表面移动,自适应地获得较小的高程范围,避免高程范围过大提取错误的分水线。

3 结果验证与分析

本文使用于旭宅等^[5] 和陈崇成等^[21] 研究的验证方式,利用地理信息系统 (Geographic information system, GIS) 在高分辨率无人机正射影像上进行目视解译勾绘树冠轮廓作为验证。从图 1 可看出,实验区坡面西南侧树木冠幅相对较小,以 2 ~ 4 m 居多,东北侧树木冠幅相对较大,分布在 4 ~ 6 m 不等。以此为依据划分了 2 块验证区域:区域 A 约为 66 m × 50 m,包括目视解译的树木 246 棵;区域 B 约为 54 m × 38 m,包括目视解译的树木 112 棵。区域 A 可加强表现分割算法的总体适用性,区域 B 树木可分析局部效果。对 GIS 勾绘的冠幅多边形计算几何中心作为参考的单木位置,多边形面积作为参考冠幅面积。

3.1 单木检出精度

样地树顶检测结果如图 5a 所示,算法识别单木位置为图中黑点,综合了图像检出点和高程信息检出点。单木检测精度以检测率表示,检测结果有正检、漏检和过检 3 种情况。正检定义为在一个参考树冠上,有且仅有一个检测出的树顶点 (图 5b);漏检定义为一个参考树冠上没有检测到树顶点 (图 5c);过检定义为在一个参考树冠上检测到两个或多个树顶点或不是树冠的位置检测到树顶点 (图 5d)。图 5b ~ 5d 中,黄点为目视解译得到树顶点,红圈为算法识别树顶点。正检率 D 是评价结果的主要指标,用户精度 U 突出过检 (错分),生产者精度 P 突出漏检 (漏分),精度定义为

$$D = \frac{N_d}{N_r} \times 100\%$$
 (4)

$$U = \frac{N_c}{N_{all}} \times 100\%$$
 (5)

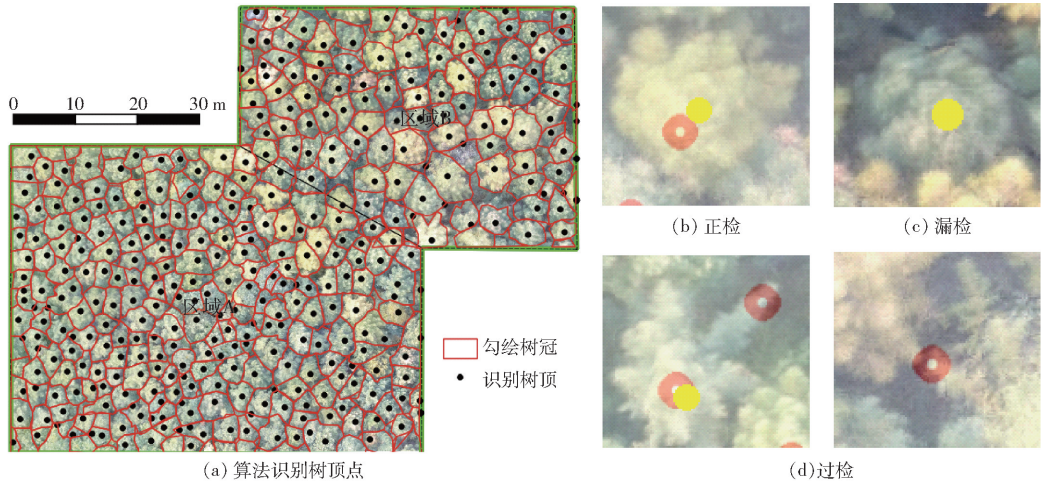


图5 单木检测结果
Fig.5 Results of individual tree detection

$$P = \frac{N_c}{N_r} \times 100\% \tag{6}$$

式中 N_d ——正检数
 N_c ——树冠内检测出树顶的参考树冠数量
 N_r ——参考树冠数量
 N_{all} ——算法检测出的树冠数量

表 1 实验区单木检测结果

Tab.1 Individual tree detection results of experiment regions

区域	正检数	过检数	漏检数	参考数	检出率/%	用户精度/%	生产者精度/%
A	225	34	11	246	91.46	90.73	95.53
B	104	16	5	112	92.86	89.17	95.54

3.2 树冠面积提取精度

检出率反映了算法对初始单木位置的识别率，但检出的树顶点在树冠分割过程中未必与参考冠幅有较好的匹配。为了进一步评价分割算法的总体性能，定义分割冠幅面积相对误差为

$$\delta = \frac{|S - S_r|}{S_r} \times 100\% \tag{7}$$

式中 S ——算法提取的树冠面积
 S_r ——对应位置参考树冠面积

基于相对误差，可使用位置和树冠面积综合判定的策略：在树木中心位置符合正检判定的前提下，冠幅面积相对误差低于判定阈值(δ_i)时视为正确提取，故正确率定义为

$$P_d = \frac{\text{Count}(\{N_d\} \cap \{\delta < \delta_i\})}{N_r} \times 100\% \tag{8}$$

两个区域的单木树冠提取结果如图 6 所示，彩色多边形分块表示为本文算法分割树冠结果。可看出本文方法对树冠的提取无论在位置上还是形态上均基本符合实际树冠情况。少数树冠存在“直边”分水线，发现是由于三维重建时 DSM 模型本身对茂密冠层没有较深的透入，不能准确反映树冠边界轮廓所致，这一现象对面积提取影响不大。

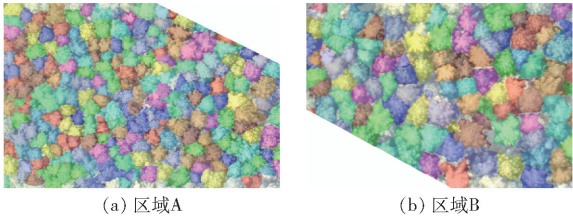


图 6 提取树冠结果

Fig.6 Results of individual tree crown segmentation

对人工勾绘树冠面积和算法提取面积进行线性回归并计算决定系数 R^2 ，由于相对误差阈值 δ_i 对正确率存在影响，计算不同 δ_i 下正确提取树冠数量和面积 R^2 的关系如图 7 所示。由图 7 可看出， R^2 随 δ_i 增加而减小，因相对误差阈值增加时，保留了更多面

统计 2 个区域各项检测指标如表 1 所示。区域 A 检出率为 91.46%，区域 B 检出率为 92.86%，略高于区域 A。可发现总体检出率均较高，对于 2~6 m 冠幅的树木而言，冠幅变化对检出率的影响不大。但由于算法主要依赖高程信息进行树顶检测，树冠越大，DSM 冠型越趋于实际形态，因此检测率略有提高。

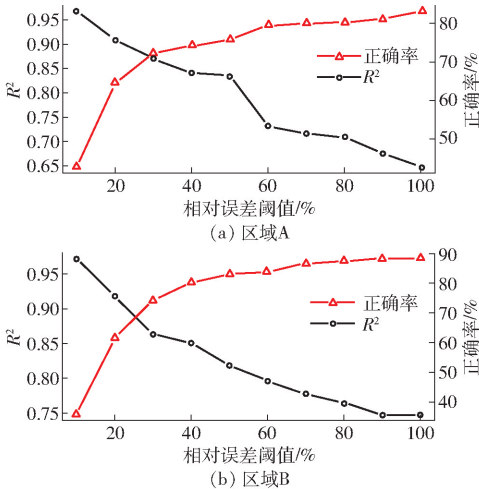


图 7 相对误差阈值对提取结果的影响

Fig.7 Influence of relative error threshold on extraction results

积误差较大的树木，从而降低了面积提取精度，同时树木检测数量(右侧纵轴)随之增加。

当 δ_i 取 50% 时，区域 A 正确率为 76.02%， $R^2 = 0.8349$ ；区域 B 正确率为 82.14%， $R^2 = 0.8172$ 。线性回归如图 8 所示。可以发现，主要为小树的区域 A 树冠面积精度略高于大树居多的区域 B，区域 B 内部算法提取树冠面积总体偏大，但区域 B 正确率高于区域 A。面积精度的差异主要来自 DSM 模型：树冠之间存在连通性。对于常规 DEM 支持的分割算法，一般剔除一定高度阈值以下的 CHM 像素，以避免低矮植被和地物的影响，从而很大程度消除了树冠之间的连通性。本研究由于不使用高度归一化，故有少数树冠之间的像素误分为树冠边缘(图 4a~4c)。通过密集匹配点云提取单木，因难以得到冠层以下及地表观测，SfM 三维重建时仅在最顶层以拉伸填充的方式表示冠层，在茂密林区不可忽视。由于区域 B 树冠较大，株数密度较低，导致树冠边缘像素引起的误差也更明显。对于正确率的差异，由于区域 B 大树的检出率较高，且面积分布更为均匀，相对误差阈值变化引起的正确率变化较小。

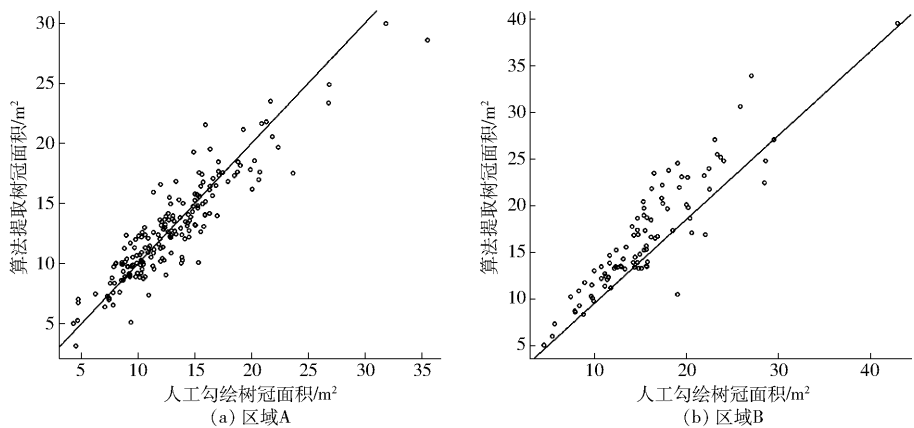


图8 树冠面积回归关系

Fig. 8 Regression relations of tree crown areas

林地树冠参数提取结果如表 2 所示。由表 2 可知,本文结果满足林业资源调查对树冠提取的需求。

表 2 单木树冠提取结果与对比

Tab. 2 Results and comparisons of individual tree crown extraction

树冠 序号	区域 A			区域 B		
	算法 面积/m ²	参考 面积/m ²	相对 误差	算法 面积/m ²	参考 面积/m ²	相对 误差
1	14. 823	14. 773	0. 003	7. 906	8. 630	0. 092
2	15. 851	14. 027	0. 115	14. 168	13. 887	0. 020
3	9. 229	9. 030	0. 022	11. 103	11. 383	0. 025
4	11. 872	13. 393	0. 128	23. 693	25. 195	0. 063
5	10. 207	10. 245	0. 004	11. 108	12. 697	0. 143
6	10. 172	9. 893	0. 027	12. 471	13. 402	0. 075
7	9. 189	9. 190	0	19. 968	20. 142	0. 009
8	12. 318	13. 745	0. 116	8. 308	9. 315	0. 121
9	21. 645	23. 767	0. 098	9. 885	9. 835	0. 005
10	12. 649	13. 627	0. 077	14. 619	17. 405	0. 191
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4 讨论

4.1 算法比较

利用多种方法进行了树冠分割提取的比较。实现了传统的应用于全图的分水岭分割算法^[12](以下称为全局分水岭)和 SILVA 等^[13]提出的针对 LiDAR 数据 CHM 的分割算法(以下称为 SILVA2016),正确率和面积 R^2 比较如图 9 所示。可见,不同算法在区域 A 的正确率差异不大(76.00%~79.00%),区域 B 本文算法正确率为 82.14%,略高于全局分水岭(80.36%),明显高于 SILVA2016(75.00%)。因不同算法使用的 DSM 模型相同,且均主要基于高程信息检测初始单木,同时受到相对误差剔除的影响较小。对于面积精度,在区域 A 本文算法(R^2 为 0.834 9)明显高于全局分水岭($R^2 = 0.685 8$)和 SILVA2016($R^2 = 0.509 4$),区域 B 内本

文算法与全局分水岭接近(R^2 为 0.817 2 和 0.799 0),远高于 SILVA2016($R^2 = 0.485 2$)。由比较可知,本文算法避免了在未高程归一化条件下的分割错误问题,在区域 A 体现最为明显。区域 A 地形高差变化较大、树冠为中等尺寸,全局分水岭在没有高程归一化的条件下很难准确分割。

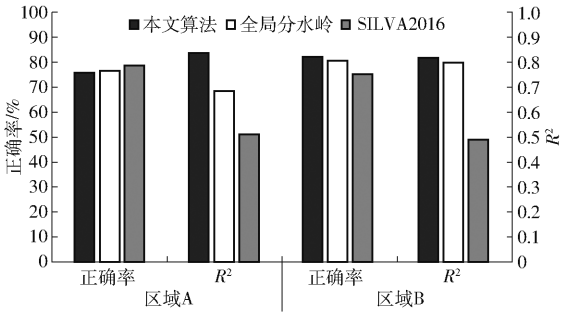


图9 算法精度横向比较

Fig. 9 Comparison of algorithm accuracy

图 10 为全局分水岭和 SILVA2016 方法的树冠面积回归情况,可以看出全局分水岭同样存在对大树树冠面积的高估(图 10c)。与图 8 对比可发现,本文算法对面积提取的准确度更高,集中度更好。

4.2 精度影响因素分析

本文单木树冠分割算法结合了三维和二维数据处理流程,因此各环节处理效果对最终树冠提取结果均有直接或间接影响。研究发现,SfM 三维重建对林木参数提取影响最大,其精度直接决定树冠形态是否真实。SfM 重建受到几个关键因素影响:①图像本身拍摄质量,反映为图像的清晰度、畸变和空间分辨率等特征。②图像重叠度。③GPS 初始坐标精度。较差的影像质量对同名点搜索匹配质量造成不可逆的降低,很难在算法处理环节恢复。因此,无人机作业应尽量在光照稳定、无风条件下进行,避免光照阴影和过度曝光,防止枝叶的摇晃造成同名点配准误差。尽量提高影像重叠度以增加冗余观测,可有效消除影像质量不佳对 SfM 总体结果的影

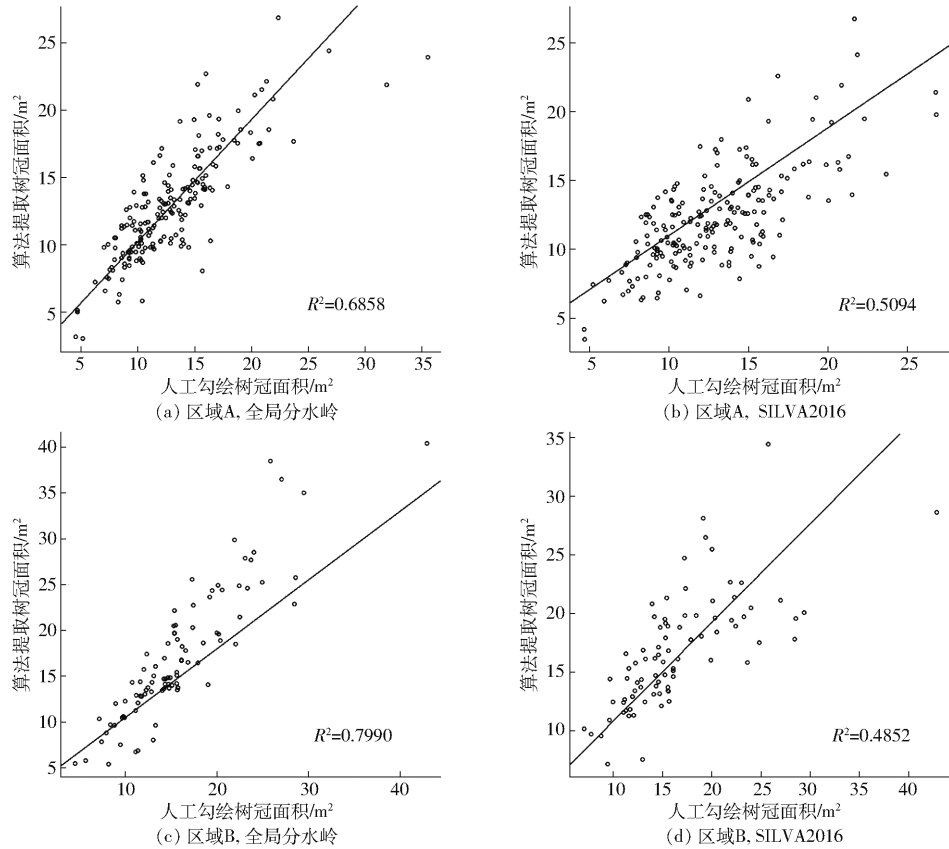


图 10 算法的面积精度比较
Fig. 10 Area accuracy compare of algorithms

响,同时可在不同航高叠加拍摄避免地形高差变化带来航拍漏洞。在 SfM 处理中,利用区域网平差可有效调整曝光点坐标,因此无人机 GPS 精度对结果的影响相对可控。

同名点搜索与匹配直接影响点云坐标的精度,错误的冠层点云会使树冠形态发生扭曲和形变,降低冠层的天然连续性,最有可能形成过检(图 5d)。由于生长季树叶茂密,无人机无法观测到林冠下层,表面模型在树冠边缘和间隙普遍存在一定的模糊性,无法像激光雷达点云一样准确地描述树梢细节,会导致分水岭分割算法出现“直边”现象,也使分水岭提取树冠面积略高于真实面积。为了解决该问题,需提高无人机成像的清晰度和空间分辨率,避免在树冠间隙进行错误的点云加密。本文算法选取 kNN 邻元参数为 4,可有效进行分割,对更复杂林分可尝试增大 k 或进行二次分水岭对边缘进行优化。

复杂地形条件对无人机遥感单木识别具有较大的挑战性,本研究区坡面地形条件复杂,坡度陡峭,代表了典型山地环境下的林分地形条件。一方面,复杂地形增大了无人机航线规划难度,为了获取完

整坡面数据,使用了多个航高叠加的成像方式。另一方面,复杂地形条件下,地形坡度大、高程变化剧烈,无人机航拍获取林下 DEM 存在很大的精度问题,采用 DSM 和 DEM 求差获取 CHM 的方法受到了制约,逐像元的差值运算甚至可能扭曲原始冠型。本研究针对性地采用了 DSM 分割方法解决了这一问题,避免了地形变化对冠层提取的精度造成影响,可达到与传统 CHM 分割方法相当的精度。

5 结束语

针对目前无人机技术在森林资源调查中的应用现状和实际林区的特点,提出了一种基于 SfM 三维重建的 kNN 自适应邻域分水岭分割算法,充分利用密集航片的数据冗余特点进行三维表面重建,利用高程和纹理信息结合的方式实现了较高的树木检出率。自适应邻域分水岭分割方法无需无人机拍摄林下地表,无需第三方 DEM 数据进行高度归一化,即可准确分割树冠,同时,避免了高分辨率图像的过分割问题,有效提升了无人机影像在森林资源调查中的实用性。

参 考 文 献

- [1] 冯静静, 张晓丽, 刘会玲. 基于灰度梯度图像分割的单木树冠提取研究[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(3): 16–23.
FENG Jingjing, ZHANG Xiaoli, LIU Huiling. Single tree crown extraction based on gray gradient image segmentation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(3): 16–23. (in Chinese)
- [2] 王枚梅, 林家元, 林沂, 等. 基于无人机可见光影像的亚高山针叶林树冠参数信息自动提取[J]. 林业资源管理, 2017(4): 82–88.
WANG Meimei, LIN Jiayuan, LIN Yi, et al. Subalpine coniferous forest crown information automatic extraction based on optical UAV remote sensing imagery[J]. Forest Resource Management, 2017(4): 82–88. (in Chinese)
- [3] 张凝, 冯跃文, 张晓丽, 等. 结合航空影像纹理和光谱特征的单木冠幅提取[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 13–19.
ZHANG Ning, FENG Yuewen, ZHANG Xiaoli, et al. Extracting individual tree crown by combining spectral and texture features from aerial images[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(3): 13–19. (in Chinese)
- [4] 李丹, 张俊杰, 赵梦溪. 基于 FCM 和分水岭算法的无人机影像中林分因子提取[J]. 林业科学, 2019, 55(5): 180–187.
LI Dan, ZHANG Junjie, ZHAO Mengxi. Extraction of stand factors in UAV image based on FCM and watershed algorithm[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(5): 180–187. (in Chinese)
- [5] 于旭宅, 王瑞瑞, 陈伟杰, 等. 改进分水岭算法在无人机遥感影像树冠分割中的应用[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(4): 428–434.
YU Xuzhai, WANG Ruirui, CHEN Weijie, et al. Forest canopy segmentation of UAV remote sensing images using improved watershed algorithm[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition), 2018, 47(4): 428–434. (in Chinese)
- [6] 李祥, 郑清文, 戴楚彦, 等. 基于无人机影像的森林信息获取研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(4): 41–46.
LI Xiang, ZHENG Yuwen, DAI Chuyan, et al. Research progress of forest information acquisition based on unmanned aerial vehicle (UAV) image[J]. World Forestry Research, 2017, 30(4): 41–46. (in Chinese)
- [7] 刘清旺, 李世明, 李增元, 等. 无人机激光雷达与摄影测量林业应用研究进展[J]. 林业科学, 2017, 53(7): 134–148.
LIU Qingwang, LI Shiming, LI Zengyuan, et al. Review on the applications of UAV-based lidar and photogrammetry in forestry [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(7): 134–148. (in Chinese)
- [8] 韦雪花, 王永国, 郑君, 等. 基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 235–240.
WEI Xuehua, WANG Yongguo, ZHENG Jun, et al. Tree crown volume calculation based on 3-D laser scanning point clouds data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 235–240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130741&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.041. (in Chinese)
- [9] 杨全月, 陈志泊, 孙国栋. 基于点云数据的测树因子自动提取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 179–185.
YANG Quanyue, CHEN Zhibo, SUN Guodong. Automatic extraction method of tree measurement factors based on point cloud data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 179–185. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170820&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.020. (in Chinese)
- [10] 王佳, 张芳菲, 高赫, 等. 地基激光雷达提取单木冠层结构因子研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 199–206.
WANG Jia, ZHANG Fangfei, GAO He, et al. Extracting crown structure parameters of individual tree by using ground-based laser scanner[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 199–206. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180226&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.026. (in Chinese)
- [11] 毛学刚, 杜子涵, 刘家倩, 等. 基于无人机 LiDAR 的天然林与人工林林隙提取[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 232–240.
MAO Xuegang, DU Zihan, LIU Jiaqian, et al. Extraction of forest gaps in natural forest and man-made forest based on UAV LiDAR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 232–240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200327&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.027. (in Chinese)
- [12] ZHAO Dan, PANG Yong, LI Zengyuan, et al. Isolating individual trees in a closed coniferous forest using small footprint lidar data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(20): 7199–7218.
- [13] SILVA C, HUDAK A, VIERLING L, et al. Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2016, 42(5): 554–573.
- [14] LI W, GUO Q, JAKUBOWSKI M, et al. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2012, 78(1): 75–84.
- [15] 樊江川. 无人机航空摄影测树技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
FAN Jiangchuan. Study of the tree measurement technology by UAV aerial photography[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese)

- [16] 樊仲谋,冯仲科,李亚东,等. 基于双目相机的森林样地调查方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):293-299.
FAN Zhongmou, FENG Zhongke, LI Yadong, et al. Investigation method of forestry plot based on binocular stereo camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):293-299. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150542&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.042. (in Chinese)
- [17] 李亚东,曹明兰,李长青,等. 无人机森林航摄影像三维点云估测林分蓄积量研究[J]. 中南林业科技大学学报,2019,39(3):56-60.
LI Yadong, CAO Minglan, LI Changqing, et al. A research on three-dimensional point cloud estimation of forest stand volume by UAV forest aerial survey images[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019,39(3):56-60. (in Chinese)
- [18] 夏永杰,庞勇,刘鲁霞,等. 高精度 DEM 支持下的多时期航片杉木人工林树高生长监测[J]. 林业科学,2019,55(4):108-121.
XIA Yongjie, PANG Yong, LIU Luxia, et al. Forest height growth monitoring of cunninghamia lanceolata plantation using multi-temporal aerial photography with the support of high accuracy DEM[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019,55(4):108-121. (in Chinese)
- [19] 曾健,张晓丽,周雪梅,等. 倾斜摄影测量技术提取落叶松人工林地形信息[J]. 北京林业大学学报,2019,41(6):1-12.
ZENG Jian, ZHANG Xiaoli, ZHOU Xuemei, et al. Extraction of topographic information of Larch plantation by oblique photogrammetry[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019,41(6):1-12. (in Chinese)
- [20] LI D, GU X, PANG Y, et al. Estimation of forest aboveground biomass and leaf area index based on digital aerial photograph data in Northeast China[J]. Forests, 2018(9):275.
- [21] 陈崇成,李旭,黄洪宇. 基于无人机影像匹配点云的苗圃单木冠层三维分割[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):149-155,206.
CHEN Chongcheng, LI Xu, HUANG Hongyu. 3D segmentation of individual tree canopy in forest nursery based on drone image-matching point cloud[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(2):149-155,206. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180220&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.020. (in Chinese)
- [22] 刘见礼,张志玉,倪文俭,等. 无人机影像匹配点云单木识别算法[J]. 遥感信息,2019,34(1):93-101.
LIU Jianli, ZHANG Zhiyu, NI Wenjian, et al. Individual tree recognition algorithm based on unmanned aerial vehicle image matching point cloud[J]. Remote Sensing Information, 2019,34(1):93-101. (in Chinese)
- [23] 许子乾,曹林,阮宏华,等. 集成高分辨率 UAV 影像与激光雷达点云的亚热带森林林分特征反演[J]. 植物生态学报,2015,39(7):694-703.
XU Ziqian, CAO Lin, RUAN Honghua, et al. Inversion of subtropical forest stand characteristics by integrating very high resolution imagery acquired from UAV and LiDAR point-cloud[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015,39(7):694-703. (in Chinese)
- [24] 刘相滨,邹北骥,孙家广. 基于边界跟踪的快速欧氏距离变换算法[J]. 计算机学报,2006,29(2):317-323.
LIU Xiangbin, ZOU Beiji, SUN Jiaguang. Fast Euclidean distance transform based on contour tracking[J]. Chinese Journal of Computers, 2006,29(2):317-323. (in Chinese)
- [25] POPESCU S, WYNNE R. Seeing the trees in the forest: using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004,70(5):589-604.