doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.020

基于无人机影像匹配点云的苗圃单木冠层三维分割

陈崇成[1,2]　李　旭[1,2]　黄洪宇[1,2]

(1.福州大学地理空间信息技术国家地方联合工程研究中心,福州 350116;
2.福州大学空间数据挖掘与信息共享省部共建教育部重点实验室,福州 350116)

摘要:近年来较多的树冠提取算法以激光雷达数据为基础,然而激光点云数据量大、冗余多而且采集成本高。本文基于无人机影像匹配点云提取单木树冠轮廓,研究一种成本可控、能够补充甚至部分替代激光雷达的小范围森林制图方案。以福建省三明市某林场内苗圃地作为研究对象,在稠密的无人机影像匹配点云中截取 2 个 25 m×25 m 的样地作为测试样本。预处理后,首先构建植被冠层高度模型,以局部最大值法探测树冠位置并标记为种子点;从这些种子点形成的初始区域开始生长,迭代计算直到全部的影像匹配点云归并完毕;最后,将算法提取的树冠轮廓导入 ArcGIS 中获取树冠轮廓矢量边界,并与手绘参考树冠叠加,利用 F 测度实现精度的评定。依此方案,在 2 个林分范围内的树冠提取 F 测度均达到了 89% 以上,单木冠幅提取的误差在 0.14 m 以内。结果表明,该方案简单有效、精度可靠,适用于小范围、高精度的植被制图。

关键词:无人机;单木提取;影像匹配点云;区域生长算法;植被高度模型

中图分类号:S771.8;TP79　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)02-0149-07

3D Segmentation of Individual Tree Canopy in Forest Nursery Based on Drone Image-matching Point Cloud

CHEN Chongcheng[1,2]　LI Xu[1,2]　HUANG Hongyu[1,2]

(1. *National Engineering Research Centre of Geospatial Information Technology*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350116, *China*
2. *Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing*, *Ministry of Education*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350116, *China*)

Abstract: Over the last decade point cloud derived from laser scanner has become the mainstream of the individual tree canopy extraction research. However, the high cost of airborne laser scanning acquisition makes it unsuitable for repeated surveys and small-scale forest mappings. Individual tree canopy was extracted from unmanned aerial vehicle images matching point cloud, aiming to provide a cost-effective method which can complement or even partly replace LiDAR forest mapping in small area. Choosing young Osmanthus and Podocarpus trees growing in a nursery as the study objects, the method was tested in two samples of images matching point cloud. An inexpensive commercial off-the-shelter drone with built-in camera was used to acquire overlapping nadir-viewing images. These images were then used to generate dense point cloud in photogrammetry software. After preprocessing, canopy height model was firstly built from the point cloud; a local maximum filter was applied to detect the canopy positions and marked as the seed points; then the initial area of regional growth can be formed from these seeds; in an iterative calculation process of all image matching points were classified. The canopy contours extracted by the algorithm were inputted into ArcGIS to obtain canopy contour vectors, and were validated by comparing with the manually drawn individual tree crown polygon (reference crown). The F score of segmentation results was higher than 89%, and the errors of individual tree crown diameter extraction results were less than 0.14 m (root mean square error) in both sample plots.

Key words: unmanned aerial vehicle; individual tree extraction; image-matching point cloud; regional growth algorithm; canopy height model

收稿日期:2017-11-06　修回日期:2017-11-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0504202)和福建省科技计划重点项目(2015H0015)

作者简介:陈崇成(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事地学可视化与虚拟地理环境研究,E-mail:chencc@fzu.edu.cn

0 引言

从森林蓄积量、生物量的估算到物种识别、林木生长模型的构建,单木树冠的提取(Individual tree crown detection and delineation, ITCD)一直是森林资源调查与管理中最为关键的步骤之一[1-2]。

光学影像与激光雷达点云是 ITCD 研究的两类主流数据来源。在林业遥感中,光学影像主要反映树冠的二维信息,而激光雷达可以穿透森林冠层,从而直接获得地面和森林冠层间垂直的三维结构信息,因此具有无可比拟的优势。基于激光点云的 ITCD 策略通常将三维点云转化为栅格化的冠层高度模型(Canopy height model, CHM),单木树冠的提取过程随即转换为二维影像的分割问题[2]。一些主流的树冠提取方法如爬峰法[3]、射线法[4]、模版匹配法[5]、区域生长算法[6]、标记分水岭分割算法[7]等分割方案得以应用。从树木的激光点云数据出发,王祺等[8]运用扇形面积逼近和不规则体切片分割累加算法,实现树冠体积的自动计算。杨全月等[9]基于计算几何学的寻找凸包算法,实现了自动提取树冠的表面积、投影面积以及体积等测树因子。卜帆等[10]在机载 LiDAR 数据和高空间分辨率航空影像两类数据的支持下,以城市为实验区,利用标记分水岭分割算法实现了单木树冠提取。然而,虽然激光雷达在采样精度和工作速度方面有了很大提升,但是这些数据采集和处理的成本高昂。

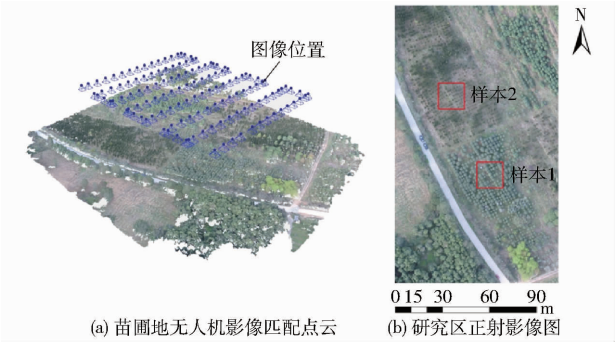
随着计算机视觉算法的不断发展,由影像匹配方式获取的点云精度和密度越来越高,采用影像匹配的方式获取点云数据显得更为经济实用。影像匹配点云在空间中的分布形态表现为一系列离散的、不均匀分布的三维点集,含有丰富的纹理和语义信息[11]。类似于激光雷达,通过影像匹配点云可以获得数字地表模型(Digital surface model, DSM)和数字高程模型(Digital elevation model, DEM),但是由于影像属于被动式遥感产物,不像激光雷达具有一定的植被穿透性,因此在植被密集覆盖的情况下从影像点云中获取完整准确的 DEM 还是有困难的。目前,国外基于影像匹配点云的研究大多是单木定位识别或树种分类等应用,旨在单木树冠的勾绘与参数提取的研究较少,国内亦是如此[12-14]。

本文从影像匹配点云出发,基于改进的种子区域生长算法,对单木进行定位识别与冠层轮廓的三维分割;对比手绘参考树冠,从 2 个尺度(由林分到单木)的 2 个层面(由多边形精度到点精度)评价单木的提取结果;同时,尝试提取单木的坐标、冠幅和树高等参数,选取冠幅的提取结果进行定量评价。

1 研究区概况

选取福建省三明市某林场内的罗汉松和桂花树苗圃中的 2 块 25 m×25 m 大小的区域作为测试样本:样地样本 1 为中低度郁闭的桂花树林,阔叶林;目测胸径为 0.02 m 以上,树高范围 2.05~4.16 m,冠幅 0.9~3.3 m;树冠呈近半球型,长势良好;部分区域树冠之间存在粘连现象。样地样本 2 为中低度郁闭的罗汉松苗圃,针叶林;树冠呈锥形,树高范围 1.5~3.56 m,冠幅 0.4~1.8 m;冠型小且结构复杂。

原始影像采集于 2017 年 3 月 2 日,利用大疆精灵 3A 多旋翼无人机在苗圃地上空 60 m 处进行航摄,飞行耗时 10 min,获得了分辨率为 1 200 万像素、航向重叠达 90% 的 RGB 影像 135 张。使用计算机视觉和摄影测量软件 Pix4DMapper 2.1,对这些影像进行特征点提取、特征点匹配、空中三角解算、影像校正、拼接,生成一幅研究区域的高分正射影像和由稀疏点云加密生成的密集点云(图 1)。其中,高分影像的空间分辨率为 0.025 4 m,覆盖范围为 0.366 km^2,密集点云总数为 9 638 195,平均点密度为 233.49 点/m^3。图 1a 是由 Pix4DMapper 生成的密集点云的倾斜透视图,点云上方的蓝色圆点和矩形代表了无人机在飞行区域上空飞行时所拍摄的图像位置;图 1b 为研究区正射影像图和测试样本 1、样本 2 所在的位置(红色矩形)。



(a) 苗圃地无人机影像匹配点云 (b) 研究区正射影像图

图 1 数据采集与测试样本

Fig. 1 Data acquisition and measuring sample

2 研究方法

研究方法如图 2 所示,分 3 部分:第 1 部分是预处理,第 2 部分是单木提取,第 3 部分是实验结果与精度验证。

预处理的主要目的是为了生成具有足够精度的冠层高度模型;本研究采用归一化点云栅格化的生成方式,这个过程中最关键的是要准确地拟合待研究区域的地形;单木提取应用改进的种子区域生长算法[15]实现,其主要内容包括种子区域选取、生长规则的设定等;得到单木的二维树冠轮廓(凸包)

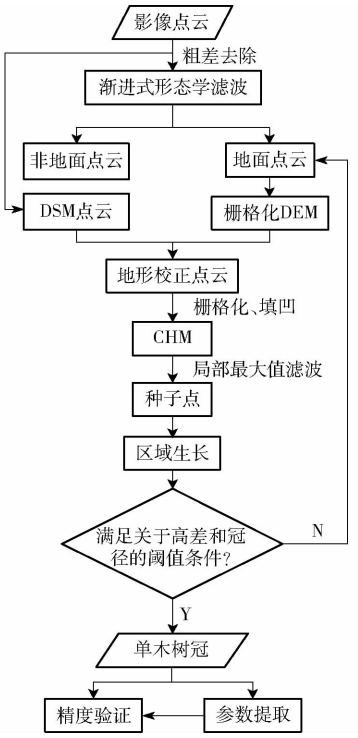


图 2　研究方法流程图

Fig. 2　Flow chart of research method

后，以包内影像点云“重构”单木树冠达到三维分割的目的；由于缺乏单木树冠的地面实测数据，在精度验证时，对树冠提取精度的评价选取了 ArcGIS 中手绘的树冠轮廓作为参考，单木参数提取及其验证过程可以看作是对树冠提取结果的间接验证，也是基于手绘的树冠轮廓进行的。

2.1　预处理

CHM 是一个表达树冠上表面距离地面高度和树冠水平分布的模型，它使得植被的冠高不再受地形的影响，是各项森林结构参数或森林生物量反演的关键[16-19]。林业资源调查中的很多重要参数都可以从 CHM 中直接或间接地获得，如树高、冠幅、胸径和郁闭度等。CHM 有 2 种生成方式：第 1 种是通过数字表面模型（DSM）与地面高程模型（DEM）相减得到。第 2 种方法是将 DSM 点云数据中每个点的 Z 值（高程）扣除其对应的地形贡献，得到归一化点云，再由归一化点云经过栅格化方式得到。本文选用第 2 种生成方式。需要注意的是，实验得到的栅格化的 CHM 上存在少量“凹坑”，这使得 CHM 不能真实反映和描述森林冠层表面的形态结构，对后续树冠、树高、生物量等森林参数反演造成影响。因此，本文还加上了对 CHM 去除凹坑的操作。预处理步骤如下：① 在 CloudCompare 软件[20]中以随机采样的方式，对原始点云样本进行抽稀；采用维也纳技术大学摄影测量研究组开发的 OPALS 软件实现[21-22]粗差的去除。② 利用渐进式形态学滤波算法[23]，通过控制滤波窗口的尺寸逐步剔除非地面点，提取地形采样点。③ 然后，采用泛克里金插值法[24]填补点云“空洞”，并生成栅格 DEM。④ 将点云 Z 值坐标与 DEM 对应位置的高程值相减得到归一化点云或称地形校正点云，再由归一化点云插值后栅格化的方式得到 CHM。⑤ 平滑噪声，并对 CHM 上的少量凹坑进行“填凹”处理，采用一种先对 CHM 进行局部最大值滤波，再进行均值滤波的复合滤波方式去除“凹坑”。

2.2　基于种子区域生长算法的单木树冠提取

种子区域生长的过程改进自文献[25-26]的实现方案，该算法首先作用在 CHM 栅格上，得到二维树冠凸包多边形，再沿着二维凸包用归一化影像匹配点云对单木树冠进行重构，进而达到单木树冠点云三维分割的目的。

算法基于 R/RStudio 实现。R 是一个免费、源代码开放的、用于统计计算和制图的工具软件。RStudio 是 R 语言的一种集成开发环境，基于 C++ 开发，它的图形用户界面基于 Qt。具体步骤如下：①种子点的选取：种子点是生长发生的初始区域，一般通过定义一个滑动的最大值搜索窗口，选取 CHM 中高于预设的最低树高阈值的点作为种子点。②初始区域标记：标记 CHM 上点的类别，将其分为种子点和非种子点两类。③区域生长准则：从初始区域出发，搜索一个种子点的 4 个邻接点；判断各邻接点到对应种子点的水平距离是否小于预设的最大冠径；判断各邻接点的高程是否大于预设的高差值。若邻接点同时满足以上条件，则被标记为新的种子点（树冠点）；对所有非种子点重复以上过程，直到所有非种子点被归类完毕。④标记后的 CHM 中，以每一个初始种子点为中心，单木树冠（即按照树顶点的判别标准，由初始种子点生长形成的区域）内的中心点坐标可以确定，依此建立一个二维的凸包记录它的边界。⑤生成的边界多边形，即为最后的树冠轮廓；沿此轮廓以树冠影像点云重构单木形态，即可获得三维的分割效果。

2.3　结果与验证

对实验结果的精度加以验证，精度验证是 ITCD 研究的重要组成部分，主要包括两方面：①林分点精度验证标准和单木点精度验证标准。②树冠轮廓勾绘精度，即多边形精度。

2.3.1　单木识别

林分尺度的单木识别精度评价指标，可利用检出率 D 表示，即正检单木数 N_d 与参考单木数 N_r 的比值

$$D = \frac{N_d}{N_r} \times 100\% \quad (1)$$

单木尺度的单木识别精度,即验证已检出单木的定位精度。HIRSCHMUGL 等[6]提出以实测单木位置为中心建立 1 m 的缓冲区,统计包括缓冲区范围内的单木数量 $N_{1:1}$,并通过基于 $N_{1:1}$ 的生产者精度 P 和用户精度 U 来验证单木的定位精度。

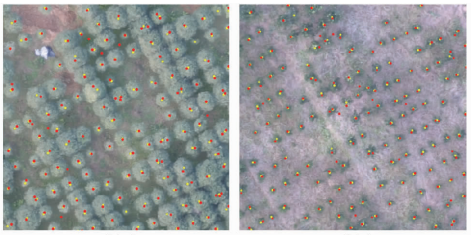
$$P = \frac{N_{1:1}}{N_r} \times 100\% \quad (2)$$

$$U = \frac{N_{1:1}}{N_{all}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 N_{all}——正检、过检和错检出的树冠顶点数之和

图 3 展示了 2 个样地单木位置的识别,即树顶点的探测结果。

红色圆点表示本文的单木识别算法检测出的树冠顶点位置,黄色圆点表示通过目视解译获取的参考树冠顶点位置。观察红点与树冠的相对位置可将检测结果分成 4 类(图 4)。



(a) 样本1 (b) 样本2

图 3 树顶点探测结果

Fig. 3 Tree top dectection results

当同一树冠内红点和黄点的个数比为 1 时,被视为正检;同样,当个数比大于 1 时被视为过检;当个数比为无穷大时,被视为错检;当个数比为 0 时,被视为漏检。

依此规则,统计分析结果如表 1 所示。



(a) 正检 (b) 错检 (c) 过检 (d) 漏检

图 4 单木树顶点检测结果分类

Fig. 4 Classification of individual tree top dectection results

表 1 树顶探测精度验证结果

Tab. 1 Accuracy assessment of tree top detection results

样地	参考数	正检数	过检数	漏检数	错检数	检出率/%	生产者精度/%	用户精度/%
样本 1	128	111	24	4	6	76.03	86.72	78.72
样本 2	141	128	20	1	12	79.50	90.78	80.00

2.3.2 树冠勾绘

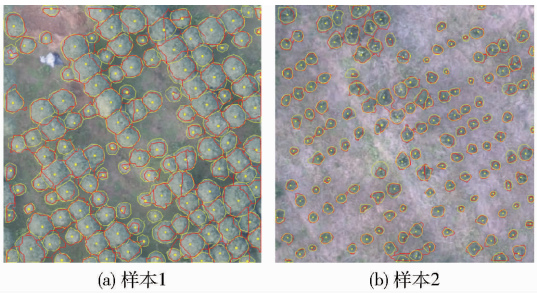
林分尺度的单木树冠轮廓多边形精度,通常采用树冠面积的相对误差 E 进行验证[25]。E 主要考虑了正检树冠总面积 S_D 与参考树冠总面积 S_R 之间的差异,其计算公式为

$$E = \frac{S_D - S_R}{S_R} \times 100\% \quad (4)$$

其中,若 E 为正值,则表明本文的 ITCD 算法存在对树冠面积的高估现象,反之相反。

单木尺度的树冠轮廓多边形精度评价指标研究成果甚多,其中 F 测度在考虑到了过分和漏分误差的同时评价单木树冠的提取精度,被认为是一种全面的、综合的 ITCD 评价标准。

2 个林窗的树冠轮廓勾绘结果见图 5。



(a) 样本1 (b) 样本2

图 5 树冠勾绘结果

Fig. 5 Tree crown delineation results

F 测度的计算需要对树冠勾绘的结果进行分类,以手绘的结果为参考,图 5 中树冠分割结果可以被分为匹配、接近匹配、过分割、错分割、合并和丢失 6 类,直观解释如图 6 所示。

设黄色轮廓为参考树冠,红色轮廓为算法自动勾绘轮廓,计算两色树冠轮廓的面积比;若该比值接近于 1,则分割结果被视为匹配;若该比值介于 0.5 到 1 之间,则被视为接近匹配;若一个黄色轮廓被多个红色轮廓占据则被视为过分割;错分割在 2 个样地中,多表现为红色轮廓内的凹坑;合并指一个红色轮廓被多个黄色轮廓占据;丢失指黄色轮廓范围内

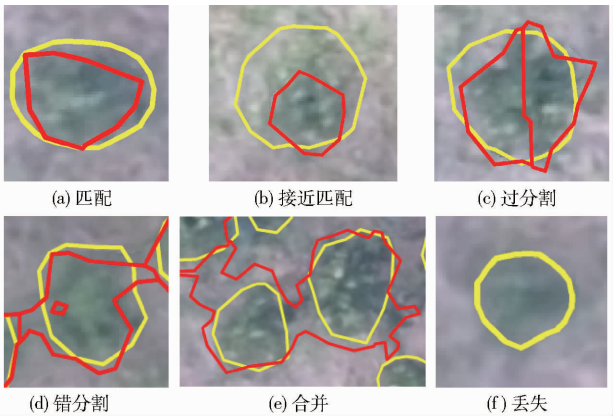


图 6　单木树冠勾绘结果分类

Fig. 6　Classification of individual tree crown delineation results

无红色轮廓出现。黄色轮廓(参考树冠)总数记为 N_R;红色轮廓(算法检出的树冠总数)的总数记为 N_D;只有匹配和接近匹配被认为是正确的树冠提取结果(算法检出的正检树冠数),记为 N_C。

树冠提取的精确率 A_D 为

$$A_D = \frac{N_C}{N_D} \times 100\% \tag{5}$$

树冠提取的召回率 A_R 为

$$A_R = \frac{N_C}{N_R} \times 100\% \tag{6}$$

则 F 测度计算公式为

$$F = \frac{2A_R A_D}{A_R + A_D} \times 100\% \tag{7}$$

表 2 给出了 2 个测试样地的精度验证结果。

2.3.3　三维分割

基于栅格化的 CHM 对单木树冠的二维轮廓进行提取后,以 CHM 上每个单木多边形凸包为参考,拾取 CHM 归一化影像匹配点云中属于 CHM 上凸包内的点,并随机赋予不同颜色;这样以 CHM 点云“重构”CHM 栅格上的单木二维树冠,达到单木三维分割效果。图 7 展示了 2 个样地的原始点云(抽稀后)、地形校正点云以及最终的单木三维分割结果,其中图 7c 中不同颜色代表不同的树。

表 2　树冠勾绘结果精度验证

Tab. 2　Accuracy assessment of tree crown delineation results

样地	参考数	参考总面积/m²	正检数	正检总面积/m²	总检数	相对误差/%	精确率/%	召回率/%	F 测度/%
样本 1	128	348.27	118	336.37	132	-3.41	89.39	92.19	90.77
样本 2	141	121.08	130	110.68	149	-8.59	87.25	92.20	89.66

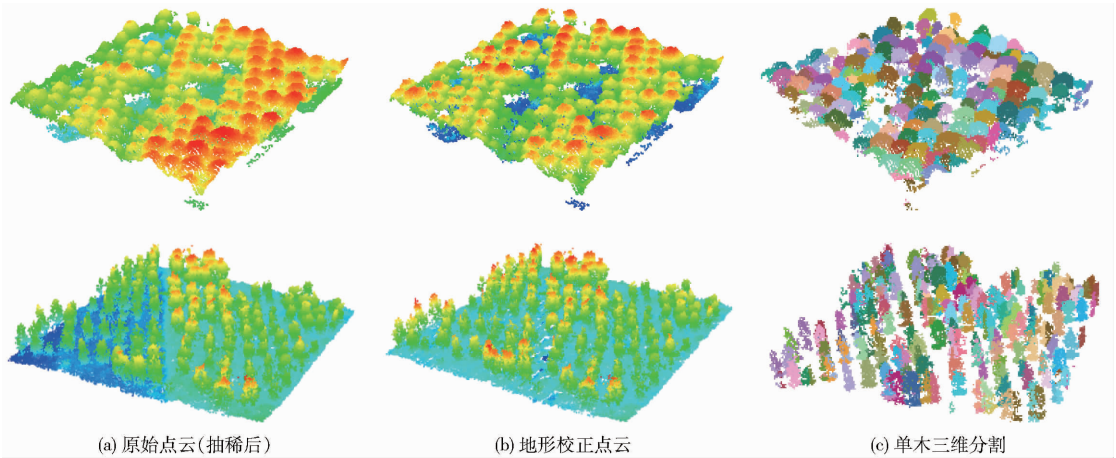


图 7　单木树冠点云三维分割结果

Fig. 7　3D segmentation results of individual tree crowns

2.3.4　单木结构参数提取

基于 2.3.2 节的方法,树顶探测结果可以用于计算单木的地理位置和树高,而树冠轮廓的勾绘结果可以用于估测单木冠面积、冠周长和冠幅等参数。表 3 给出了 2 个样地的部分单木参数提取结果,主要包括树高、冠面积、冠幅和冠周长。

基于表 3 的结果,采用手绘树冠轮廓的冠幅为参考值,2 个样地的树冠冠幅提取结果为从 100 个样本 1 中选 60 个、120 个样本 2 中选 80 个。借助 SPSS 软件建立实验值与参考值的回归方程,评价冠幅提取精度。从图 8 可以看出,2 个样地的冠幅提取值与参考值的决定系数为 0.85 及 0.87,均方根误差分别为 0.14 m 和 0.06 m。

3　讨论

本文选取的阔叶林和针叶林样本地形都较为平坦,且森林郁闭度较小,主要是基于影像点云难以表达冠下地形的考虑。从原始点云开始经过去粗差、

表 3 单木树冠参数提取结果

Tab. 3 Extraction results of individual tree crown parameters

ID	位置 x	位置 y	树高/m	冠面积/m^2	冠幅/m	冠周长/m
1001	542 951.175	2 951 290.725	3.614	0.963	1.320	4.148
1002	542 955.675	2 951 290.525	3.727	2.485	2.271	7.135
1003	542 959.175	2 951 289.925	3.840	4.658	2.735	8.592
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1098	542 963.125	2 951 266.975	2.703	2.339	2.201	6.913
1099	542 967.425	2 951 266.925	3.235	3.376	2.382	7.484
2001	542 921.825	2 951 343.475	2.652	1.725	5.006	1.593
2002	542 930.775	2 951 342.775	2.687	2.195	5.638	1.795
2003	542 925.375	2 951 342.525	2.890	1.787	5.189	1.652
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2119	542 923.125	2 951 320.225	2.190	0.563	2.825	0.899
2120	542 934.025	2 951 319.925	2.784	1.162	4.326	1.377

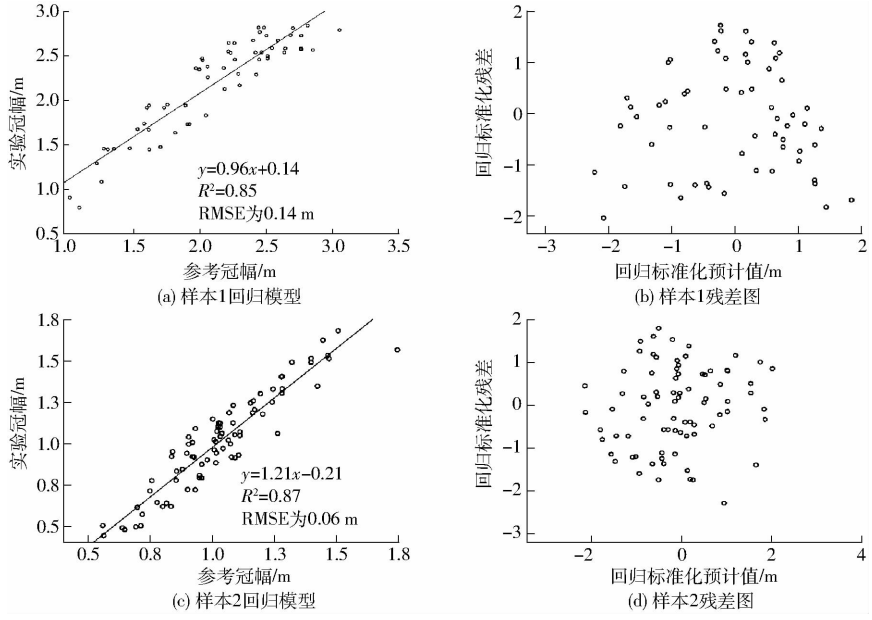


图 8 单木树冠冠幅提取结果精度评定

Fig. 8 Accuracy evaluation of individual tree crown diameter extraction results

地形采样点提取、DEM 拟合、到最后归一化点云栅格化过程中,点云或者影像产物的分辨率始终保持一致。对算法树冠提取精度的验证从林窗尺度逐渐细化到单木尺度,并给出了单木提取的点精度与多边形精度;特别地,在树冠勾绘的多边形精度评价中,树冠提取面积相对误差为负值,说明本文方法存在低估的问题,但其数值控制在 8.59% 以内;参数提取时,由于实测数据难以准确地获取,本文采用手绘树冠冠幅为参考,基于实验值与参考值的回归方程,实现对单木冠幅的提取结果评价;类似地,张树森等[27]对大兴安岭地区天然兴安落叶松疏开木冠幅预测模型中,冠幅估测精度 RMSE 为 0.403 4 m。李赟等[28]基于 UAV 高分影像对杨树冠幅提取及相关性研究中,估测冠幅 RMSE 为 0.444 m。本文树冠估测结果的均方根误差则达到了 0.14 m 以内,精度较高。此外相比于阔叶树冠,针叶树冠的冠幅提取结果更加准确,可达到 0.06 m。

基于无人机获取影像的遥感方式具有机动灵活、快速出图和高时空分辨率等方面的优势,但其主要不足之处在于影像只能反映表面信息,不能得到密闭树冠下的地形状况;这种情况下若得到的冠层高度模型 CHM 不准确,其对提取结果的精度和准确性将会产生不利影响。如果有合适的地形数据(例如来自于早期机载或地面激光雷达扫描获得的 DEM,或实测得到的地形图)作为补充,结合无人机影像匹配点云使用,本文提出的方法可以适用于更广泛的场景。

4 结束语

以某林场内的苗圃地作为研究对象,基于无人机影像点云提取了 2 个样地、2 种类型的单木树冠(针叶纯林和阔叶纯林)。从实验样地的 2 个尺度

的 2 个层面的精度验证结果看，树冠勾绘算法虽然存在低估现象，但相对误差控制在 8.59% 以内；依此方案，林窗范围内的树冠提取 F 测度达到了 89% 以上，对单木冠幅的提取精度达到了 0.14 m 以内。研究表明，该方案精度可靠、简单有效，适用于小范围、高精度的植被制图。

参 考 文 献

1 JING L, HU B, NOLAND T, et al. An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2012, 70(3):88 - 98.

2 ZHEN Z, QUACKENBUSH L, ZHANG L. Trends in automatic individual tree crown detection and delineation—evolution of LiDAR data [J]. Remote Sensing, 2016, 8(4):333.

3 张凝, 张晓丽, 叶栗. 基于改进爬峰法高分辨率遥感影像分割的树冠提取[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(12):294 - 300. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141242&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.042.
ZHANG Ning, ZHANG Xiaoli, YE Li. Tree crown extraction based on segmentation of high-resolution remote sensing image improved peak-climbing algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 294 - 300. (in Chinese)

4 POULIOT D A, KING D J, BELL F W, et al. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(2 - 3): 322 - 334.

5 POLLOCK R J. The automatic recognition of individual trees in aerial images of forests based on a synthetic tree crown image model [D]. Vancouver: The University of British Colombia, 1996.

6 HIRSCHMUGL M, OFNER M, RAGGAM J, et al. Single tree detection in very high resolution remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(4): 533 - 544.

7 GAETANO R, MASI G, POGGI G, et al. Marker-controlled watershed-based segmentation of multiresolution remote sensing images [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(6):2987 - 3004.

8 王祺,胡洪,吴艳兰,等. 基于点云数据的树冠体积自动求算方法[J]. 西北林学院学报,2017,32(2):242 - 246.
WANG Qi, HU Hong, WU Yanlan, et al. Automatic tree volume calculation method based on point cloud data [J]. Journal of Northwest Forestry University,2017, 32(2):242 - 246. (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. 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.
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. (in Chinese)

10 卜帆,石玉立. 机载 LiDAR 高差和高分影像的城市树冠提取比较[J]. 遥感技术与应用,2017, 32(5):875 - 882.
BU Fan, SHI Yuli. The comparison of urban tree crown extraction based on airborne LiDAR elevation difference and high resolution imagery [J]. Remote Sensing Technology and Application,2017, 32(5):875 - 882. (in Chinese)

11 冯帅. 影像匹配点云与机载激光点云的比较[J]. 地理空间信息, 2014, 32(6):82 - 83.
FENG Shuai. Comparison of image matching point clouds with LiDAR point clouds [J]. Geospatial Information, 2014, 32(6): 82 - 83. (in Chinese)

12 SPERLICH M, KATTENBORN T, KOCH B, et al. Potential of unmanned aerial vehicle based photogrammetric point clouds for automatic single tree detection [C]// Gemeinsame Tagung 2014 der DGfK, der DGPF, der GfGI und des GiN, 2014.

13 KATTENBORN T, SPERLICH M, BATAUA K, et al. Automatic single tree detection in plantations using UAV-based photogrammetric point clouds [C]// ISPRS Technical Commission III Symposium, 2014:139 - 144.

14 杨坤,赵艳玲,张建勇,等. 利用无人机高分辨率影像进行树木高度提取[J]. 北京林业大学学报,2017,39(8):17 - 23.
YANG Kun, ZHAO Yanling, ZHANG Jianyong, et al. Tree height extraction using high-resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(8): 17 - 23. (in Chinese)

15 DALPONTE M, COOMES D A. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data [J]. Methods in Ecology & Evolution, 2016, 7(10):1236 - 1245.

16 KOUKOULAS S, BLACKBURN G A. Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(15): 3049 - 3071.

17 BRANDTBERG T. Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne LiDAR [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 61(5): 325 - 340.

18 POPESCU S C. Estimating plot-level forest biophysical parameters using small-footprint airborne LiDAR measurements [D]. Virginia: Virginia Tech., 2002.

19 POPESCU S C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne LiDAR [J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31(9): 646 - 655.

(下转第 206 页)

2013.07.041.
WEI Xuehua, WANG Yongguo, ZHENG Jun, et al. Tree crown volume calculation based on 3D laser scanning point clouds data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 235 - 240. (in Chinese)

15 樊仲谋,冯仲科,郑君,等. 基于立方体格网法的树冠体积计算与预估模型建立[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3): 320 - 327. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150347&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.047.
FAN Zhongmou, FENG Zhongke, ZHENG Jun, et al. Tree crown volume calculation and prediction model establishment using cubic lattice method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 320 - 327. (in Chinese)

16 刘芳,冯仲科,杨立岩,等. 基于三维激光点云数据的树冠体积估算研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):328 - 334. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160346&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.046.
LIU Fang, FENG Zhongke, YANG Liyan, et al. Estimation of tree crown volume based on 3D laser point clouds data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 328 - 334. (in Chinese)

17 巩垠熙,何诚,冯仲科,等. 基于改进 Delaunay 算法的树冠三维重构单木因子提取[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2): 192 - 199. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130236&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.036.
GONG Yinxi, HE Cheng, FENG Zhongke, et al. Amended Delaunay algorithm for single tree factor extraction using 3-D crown modeling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 192 - 199. (in Chinese)

18 GONG Yinxi, YAN Fei, FENG Zhongke, et al. Extraction of crown volume using triangulated irregular network algorithm based on LiDAR[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(2): 177 - 183, 189.

19 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170820&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.020.
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. (in Chinese)

20 JUPP D L B, CULVENOR D S, LOVELL J L, et al. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground based laser called Echidna[J]. Tree Physiol, 2009, 29: 171 - 181.

21 LEGENER N, FLECK S, SEIDELD, et al. Crown transparency assessment based on terrestrial LiDAR[C]// Silvilaser Conference-10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, Freiburg, Germany, 2010: 383 - 394.

22 GUANG Z, MOSKAL L M. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors[J]. Sensors, 2009, 9(4): 2719 - 2745.

23 TAKEDA T, OGUMA H, SANO T, et al. Estimating the plant area density of a Japanese larch (*Larixkaempferi* Sarg.) plantation using a ground-based laser scanner[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2008, 148(3): 428 - 438.

24 郑治刚,李怀玉,廖雅萍. 树冠空间体积的计算方法[J]. 林业资源管理,1986(1):35 - 40.
ZHENG Zhigang, LI Huaiyu, LIAO Yaping. Calculation method of crown space volume[J]. Forest Resources Management, 1986(1): 35 - 40. (in Chinese)

(上接第 155 页)

20 CloudCompare (version 2.6) [EB/OL][2017 - 10 - 30] http://www.cloudcompare.org/.

21 MANDLBURGER G, PFENNIGBAUER M, PFEIFER N. Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry—a case study at the River Pielach [C]// ISPRS Ann. Photogramm, 2013, II - 5/W2: 175 - 180.

22 MANDLBURGER G, HAUER C, WIESER M, et al. Topo-bathymetric LiDAR for monitoring river morphodynamics and instream habitats—a case study at the Pielach River [J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 6160 - 6195.

23 ZHANG K, CHEN S C, WHITMAN D, et al. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 41(4): 872 - 882.

24 PEBESMA E J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package [J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(7): 683 - 691.

25 HYYPPÄ J, KELLE O, LEHIKOINEN M, et al. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remate Sensing, 2001, 39(5): 969 - 975.

26 ZHEN Z, QUACKENBUSH L J, STEHMAN S V, et al. Agent-based region growing for individual tree crown delineation from airborne laser scanning ALS data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(7): 1965 - 1993.

27 张树森,贾炜玮,王玉霞,等. 大兴安岭地区天然兴安落叶松疏开木冠幅预测模型[J]. 森林工程, 2017, 33(3): 33 - 38.
ZHANG Shusen, JIA Weiwei, WANG Yuxia, et al. Modeling crown width for the opening-grown trees of natural *Larix gmelini* plantation in Daxing'an Mountains [J]. Forest Engineering, 2017, 33(3): 33 - 38. (in Chinese)

28 李赟,温小荣,佘光辉,等. 基于 UAV 高分影像的杨树冠幅提取及相关性研究[J]. 林业科学研究,2017,30(4):653 - 658.
LI Yun, WEN Xiaorong, SHE Guanghui, et al. Study on poplar crown extraction and correlation based on UAV high resolution image [J]. Forest Research, 2017, 30(4): 653 - 658. (in Chinese)