

基于改进 α -shape 算法的三维点云树冠体积计算方法

程 钢¹ 王敬宇¹ 杨 杰² 赵宗泽¹ 王 磊¹

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000; 2. 河南理工大学教务处, 焦作 454000)

摘要: 为准确测量树冠体积, 深入研究三维绿量和区域碳循环, 针对现有点云数据测量树冠体积方法存在的高估与低估问题, 提出了一种顾及点云边界密度、变阈值 α -shape 边界提取方法, 并通过实验分析确定最优线性迭代步长和分层间距, 实现了对树冠体积的精确计算。首先, 对树冠点云数据进行等间距切片处理; 然后, 采用改进 α -shape 算法提取点云切片更为真实、自然的边界多边形; 最后, 计算切片面积和各层点云间的台体体积, 并累加台体体积, 获得树冠体积。实验表明: 树冠体积计算的准确性与树冠内部枝叶结构和点云密度相关; 无论对于高密度还是低密度树冠, 采用改进 α -shape 算法的树冠体积计算结果不仅具有良好的稳定性, 而且相较于已有其他方法更为准确, 避免了 Graham 凸包算法的高估问题, 与体元累加法相比也更利于树冠总体占用空间的计算。

关键词: 树冠体积; 点云数据; 边界提取; 改进 α -shape 算法

中图分类号: P225.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0175-09 OSID: 

Calculation Method of 3D Point Cloud Canopy Volume Based on Improved α -shape Algorithm

CHENG Gang¹ WANG Jingyu¹ YANG Jie² ZHAO Zongze¹ WANG Lei¹

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China
2. Dean's Office, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Canopy volume is an important tree measurement factor for trees, and the accurate measurement of its volume value plays an important role in the in-depth study of three-dimensional green quantity and regional carbon cycle. Aiming at the problems of overestimation and underestimation in the existing methods of measuring tree canopy volume from point cloud data, a α -shape boundary extraction method that took into account the point cloud boundary density and variable threshold was proposed. The length of the optimal linear-iterative step and the interval between layers of the method were determined through experimental analysis, so as to realize the accurate calculation of canopy volume. Firstly, the canopy point cloud data was sliced at equal intervals; then, an improved α -shape algorithm was used to extract the more realistic and natural boundary polygons of the point cloud slices; finally, the section area and the volume of the platform between each layer point cloud were calculated, and the canopy volume was obtained by adding the platform volumes. The experimental results showed that the accuracy of obtaining the canopy volume was related to the structure of branches and leaves inside the canopy and the point cloud density. Regardless of high-density or low-density canopies, the canopy volume value calculated by the improved α -shape algorithm not only had good stability, but also was more accurate than that of existing methods, which avoided the overestimation of Graham convex hull algorithm, and was more conducive to the calculation of the overall volume of the canopy compared with the volume element accumulation method.

Key words: canopy volume; point cloud data; boundary extraction; improved α -shape algorithm

收稿日期: 2021-01-28 修回日期: 2021-02-25
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC08033103)、国家自然科学基金项目(41001226)、国家自然科学基金青年基金项目(41801318)、中国博士后科学基金面上项目(2015M582831)和河南省高校基本科研业务费专项资金项目(NSFRF180329)
作者简介: 程钢(1981—),男,教授,博士,主要从事地理空间信息服务与处理研究,E-mail: chenggang1218@163.com
通信作者: 杨杰(1981—),女,讲师,主要从事 GIS 理论方法与管理研究,E-mail: yangjie@hpu.edu.cn

0 引言

森林是重要的生态与经济资源,包含了地球上约80%的植被生物量,对全球碳循环平衡具有非常重要的意义^[1]。随着三维绿量^[2]、冠积指数^[3]等植被生物量统计参数概念的提出,三维树木因子的测定也变得愈发重要。树冠作为树木的重要组成部分,其体积参数的确定对森林生物量和三维绿量的统计分析具有重要作用。

传统的树冠体积量测方法^[2-5]通过构建树冠体积预估方程进行量测,这种方法要考虑树种等因素的影响,其作业周期长、拟合形状差,测量精度很难保证,易造成计算结果不稳定、不准确等方面的问题。近年来,三维激光扫描技术已逐渐被应用到逆向工程^[6]、文物保护^[7]以及传统测绘^[8]等领域,该技术可以在不接触物体的情况下对物体进行远距离测量,这为无损、快速、准确地量测树冠体积提供了契机。基于激光点云数据进行树冠体积计算的方法主要分为基于内部结构的树冠体积计算和基于外部轮廓的树冠体积计算两类。第1类计算方法,如文献[9-10]提出以固定的体元来模拟不规则树冠形状的体元模拟法,该方法对于浓密程度较高的树木由于遮挡原因会导致其利用三维点云数据构建的结构内部产生“空洞”现象,使测算结果相较于真值偏小。第2类计算方法,如文献[11]通过改进Delaunay算法机制,采用一种基于空间分割分块优先机制的三角网表面重建算法来提取树冠三维信息,具有较好的稳定性;文献[12]通过提取树冠冠体边缘点云,应用不规则三角网TIN计算冠体体积,由于每次提取的轮廓点仅有4个,故树冠体积计算结果不够准确;文献[13]将树冠分割为多个不规则的台体,但是将每个点云切片的横截面看作圆形或椭圆形,导致计算结果偏差较大;文献[14]对文献[13]中的台体法进行改进,通过计算每个树冠点云切片的凸包面积来求取台体体积,但计算结果仍有较大偏差;文献[15]运用三维凸包算法计算树冠凸包体积,由于未考虑树冠边缘间的空隙,故计算结果较真值偏差仍较大。

总的来看,体元法基于树冠内部结构计算树冠体积,有利于消除树冠内部无效体积,对于内部结构遮挡较少的稀疏枝叶树冠体积计算有一定优势,但对于枝叶较为浓密的树冠,由于缺少树冠内部点云数据,其计算结果往往不准确。因此,由于遮挡的缘故,体元法通常存在树冠体积低估的问题。台体法将三维树冠体积计算转换为多个二维切片面积计算,使其可以在充分利用树冠外部几何特征的基础

上来求解三维树冠信息,是一种简单、快速、有效的树冠体积量测方法,其准确度除与树冠内部结构有关外,最关键的步骤在于台体外轮廓的精确计算。为了提高台体法的准确度,文献[16]提出了一种基于过滤三角网的树冠边界精确提取算法,对最优分层间距与过滤阈值进行了讨论,在考虑树冠外部空隙的情况下得到更为准确的树冠体积;文献[17]将边长阈值作为圆直径,在切片凸包的基础上搜寻“疑似边界点集”中与直径端点组成最大角的点作为新边界点,但未对边长阈值做进一步讨论。上述2种方法均通过设置固定边长阈值来消除树冠边缘存在的空隙,阈值过小,容易使整个切片碎片化,阈值过大,则会高估切片面积。考虑到动态阈值对于点云外轮廓形状描述的重要性,本文在 α -shape算法^[18-22]的基础上,借鉴三角网生长算法的思想^[23-26],提出一种考虑边界点云密度的动态阈值改进 α -shape算法,以期提取更为准确的点云切片边界,并利用台体法的基本思想获取更为准确的树冠体积。

1 研究方法

1.1 台体法计算树冠体积

台体法计算树冠体积是把单棵树木整个树冠从下到上看作是由许多个台体和一个锥体所组成的几何体,如图1所示,通过对树冠点云数据基于高程进行切片并利用离散化格林公式求解每个切片面积 S (图2),进而计算出每个台体体积,然后将这些台体和锥体体积进行累加计算,即可算出整个树冠的体积。计算公式为

$$S = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (x_k y_{k+1} - x_{k+1} y_k) \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n-1} (S_i + S_{i+1} + \sqrt{S_i S_{i+1}}) h_i + \frac{1}{3} S_n h_{n+1} \quad (2)$$

式中 m ——端点数量

$(x_k, y_k), (x_{k+1}, y_{k+1})$ ——第 $k, k+1$ 个端点的平面坐标

S_i, S_{i+1} ——第 $i, i+1$ 层点云切片面积

n ——切片数量

h_i ——相邻切片之间的间隔

h_{n+1} ——圆锥体高

V ——树冠体积

计算过程中,点云切片面积的准确性至关重要,直接影响到后续树冠体积的计算,合理、准确地求取树冠点云切片面积成为台体法计算树冠体积的关键问题。

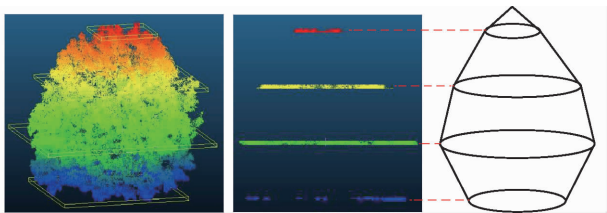


图 1 台体法树冠模拟图

Fig. 1 Simulation diagram of canopy volume calculated by platform method

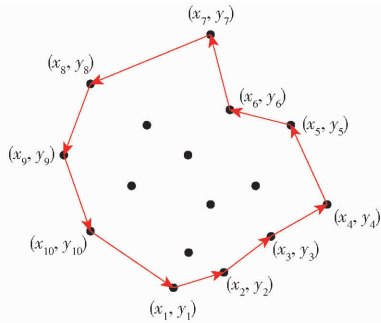


图 2 点云切片示意图

Fig. 2 Schematic of point clouds slice

1.2 改进 α -shape 算法

α -shape 算法作为经典的边缘探测算法之一,最早是由 EDELSBRUNNER 等^[18]提出并被用于获取散乱点集的轮廓,本质上使用该算法所获取的图形为欧几里得空间中点集三角剖分的子集。文献[19]通过引入加权思想来控制点集中每一个点对周围点的影响力进而实现捕捉不同层次的局部空间特征,使得加权 α -shape 算法被广泛应用到局部特征提取领域,文献[20 - 21]均采用这种加权算法来实现对局部特征图形结构的探测。文献[27]通过计算检测点的 k 个邻近点平均距离和增设调节因子,自适应设置滚动圆半径 α ,但未考虑实测点云中激光扫描噪声和散乱点云点间距离离散程度对 α 的影响。在提取树冠散乱点云轮廓方面,文献[28]通过使用 α -shape 算法获取了树冠体积并对结果进行了验证,但其获取轮廓的 α 是固定的,理论上仍存在提升树冠体积精度的空间。

二维空间中, α -shape 算法可以想象成一个半径为 α 的圆在一堆无序点集 P 中进行滚动,当 α 足够大时,这个圆不会滚动至点集内部,此时的滚动痕迹即为该点集的边界^[27],如图 3 所示。本文将 α -shape 算法运用到点云切片外轮廓的获取,根据不同切片的点云结构,动态设定 α 。

根据文献[18]可知,当半径 α 趋于无穷小时,点集 P 中的所有点都有可能是边界点;当半径 α 趋于无穷大时,会形成一个包含点集 P 中所有点的凸包。理论上,存在一个阈值 α_b ,当 $\alpha \geq \alpha_b$ 时,其所形成的边界多边形可以包含点集 P 中的所有点。

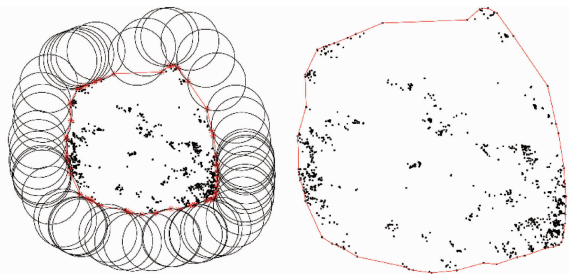


图 3 α -shape 算法滚动痕迹示意图

Fig. 3 Schematic for rolling trace of α -shape algorithm

本文通过迭代方式来找寻每个点云切片的阈值 α_b 并获取该阈值下切片外轮廓多边形的面积。迭代公式为

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \Delta\alpha \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中 α_i, α_{i+1} ——第 $i, i+1$ 次迭代时圆的半径
 $\Delta\alpha$ ——迭代步长 i ——迭代次数

设树冠点云位于空间直角坐标系 $OXYZ$ 中, OZ 轴为高程轴。对树冠点云基于高程进行等间距切片处理,设其中一个点云切片的点集为 D ,则改进 α -shape 算法构建切片外轮廓多边形及求取面积的流程图如图 4 所示,具体如下:

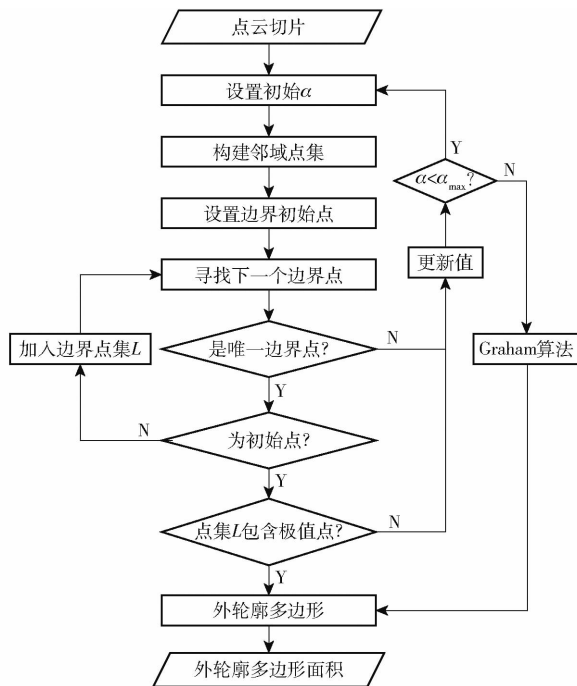


图 4 改进 α -shape 算法流程图

Fig. 4 Flow chart for improved α -shape algorithm

- (1)输入点云切片并设置初始 α 。
- (2)构建邻域点集。将点集 D 投影至 XOY 平面,获取投影点集 P 中每一个点 P_i 的半径为 2α 的圆形邻域内的点集,其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。为了提高其查询速度,本文借助了 kd -tree 结构来获取点集 P 中每一个点的邻域点集。
- (3)设置边界初始点。由凸包性质可知,点集中任意一个凸包极值点均为该点集的边界点,为了

便于获取可以将初始点设置为 OX 或 OY 方向上其中一个极值点即可,本文以 OY 方向上的最小值点 P_{yMin} 为例,将其设置为初始边界点并加入到边界点集 L 中。

(4)获取整个切片的边界点集 L 。包括以下几个步骤:

①寻找下一个边界点。以当前边界点 L_i 为基础,从其邻域点集 N_i 中选取任意一点 n_1 ,求出过点 L_i 和 n_1 且半径为 α 的两个圆 o 和 o' ;遍历点集 N_i ,依次判断邻域中其他点是否落入圆 o 和 o' 内部,如果存在一个不包含其他邻域点的圆(“空圆”准则,见图 5),则可以判断出点 n_1 是点集 P 的边界点;对 N_i 内下一点重复上述过程,直至对 N_i 内所有点均使用“空圆”准则判别之后,统计其边界点的个数。

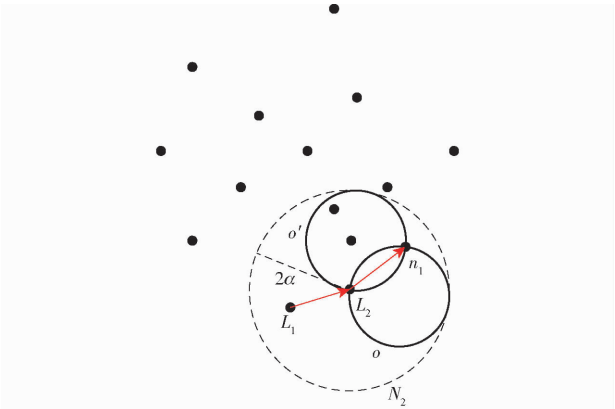


图 5 “空圆”准则示意图
Fig. 5 Schematic of “empty circle” criterion

其中,初始点 $P_{yMin}(L_1)$ 较为特殊,该点在寻找下一个边界点的过程中不需要统计其邻域内的边界点个数,只需要在 N_{yMin} 中找到一个符合“空圆”准则的边界点即可执行步骤①,反之,如果一个边界点也找不到,则跳转至步骤(5)。

②判断边界点的唯一性。如果新找到的边界点有且仅有 1 个,则执行步骤③。如果新找到的边界点个数为 0 或大于 1 个,则跳转至步骤(5),如图 6a 中,边界点 7 的邻域点集为空,新边界点的个数为 0,边界无法回到起始点。图 6b 中,边界点 3 存在 2 个新边界点,边界出现 2 个可能的走向。图 6 这 2 种情况均说明当前阈值无效,需要更新 α 。

③判断唯一边界点是否为初始点。如果该边界点为初始点 P_{yMin} (图 7),则执行步骤④;反之,则将该边界点添加至点集 L 中,并执行步骤①。

④判断点集 L 是否包含点集 P 中的极值点。获取点集 P 中多个方向上的凸包极值点^[29],如图 8a 所示,根据文献[18]可知,相同点集下,该点集的凸包极值点亦是其边界凹包的极值点,故这些极值点一定为点集 P 的边界点。如果点集 L 未包含这

些极值点,则该凹包仅仅为点集 P 的一个局部凹包,如图 8b 所示,则跳转至步骤(5);反之,输出相应 α 值下的凹包并执行步骤(6),如图 8c 所示。

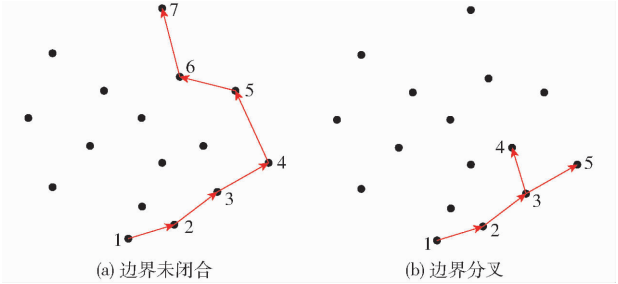


图 6 边界点非唯一的两种情况
Fig. 6 Two cases where boundary points were not unique

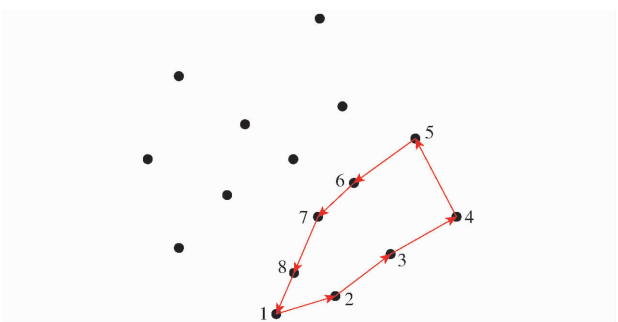


图 7 未回到起点的生长线段
Fig. 7 Growth line segment not returned to starting point

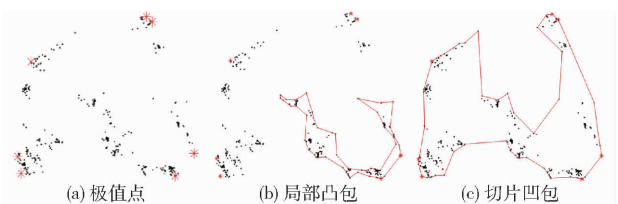


图 8 基于凸包极值点的边界凹包判断
Fig. 8 Convex hull extreme point judgment
boundary concave envelope

(5)更新 α 并判断 α 是否达到终止条件。利用式(3)迭代更新 α ,之后将 α 与迭代阈值 α_{max} 相比较,如果大于 α_{max} 则停止迭代过程,输出一个包含点集 P 的凸包面积;反之,执行步骤(1)重新设置 α 。设置终止条件的原因在于:一方面,当 α 过大时,提取的边界形状趋于凸包,另一方面,可以避免程序陷入死循环。

(6)求解切片外轮廓多边形面积。利用离散化格林公式求解出切片外轮廓多边形面积的绝对值并输出,则整个边界提取过程结束。

最后,将整个树冠的所有点云切片均重复步骤(1)~(6)以获取其相应的切片外轮廓面积,求取对应的台体体积,进而通过累加求出更为准确的树冠体积。

2 分层间距与迭代步长的确定

2.1 树冠点云获取

本次实验研究区域为某校园内,选择晴朗天气

采集树木点云数据,采集平台为 Leica 公司 MS60 型全站仪,扫描分辨率设置为 $0.01\text{ m} \times 0.01\text{ m}$ (与仪器激光发射中心某个距离的平面上,点云点间距在水平和垂直方向上均为 0.01 m),每秒测量 3 600 个点。选取校内 14 棵树进行扫描,获取树木点云数据后,对数据进行去噪和滤波处理,仅留下纯粹的树冠点云数据,如图 9 所示。算法实验在一台 CPU 为 Intel Core i5-9300H、频率为 2.4 GHz 的便携式计算机上进行,开发平台为 Matlab R2018a, α 的初始值设置为 0.01 m 。

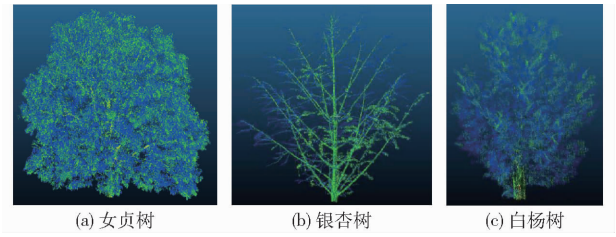


图 9 树冠示意图

Fig.9 Schematics of tree canopy

2.2 分层间距及迭代步长

使用改进 α -shape 算法计算树冠体积时,不同的迭代步长与树冠分层间距会直接影响树冠体积的计算效率与准确度,并且考虑到方法的实用性等因素,需要为改进 α -shape 算法确定最优的迭代步长以及分层间距。由微积分原理可知,树冠分层间距越小,使用该方法计算的树冠体积越准确。因此,将迭代步长为 0.01 m 、分层间距为 0.1 m 时的计算结

果作为体积参照。为了消除不同树木之间计算时间与体积的差异,更为合理表征方法的计算效率与准确度,本文对不同树木样本的树冠体积与计算时间进行归一化处理,计算公式为

$$n_t = \frac{t}{t_0} \times 100\% \tag{4}$$

$$n_v = \frac{|V_\alpha - V_0|}{V_0} \times 100\% \tag{5}$$

式中 n_t 、 n_v ——计算时间、树冠体积归一化值, n_t 越小表示计算效率越高, n_v 越大表示体积损失越大

t 、 V_α ——使用改进 α -shape 算法计算单木树冠体积所用时长与体积

t_0 、 V_0 ——迭代步长为 0.01 m 、分层间距为 0.1 m 时所用时长和体积

采用不同迭代步长和分层间距对样本数据进行实验和统计,结果如图 10 所示。分析迭代步长对运算时间的影响及其造成的体积损失(图 10a、10b)可知,当迭代步长 $\Delta\alpha$ 约为 0.1 m 时,计算效率的提升效果开始趋于缓和。考虑到随着迭代步长的增大,树冠体积损失也在增加,因此迭代步长 $\Delta\alpha = 0.05\text{ m}$ 是一个较为理想的选择。在 $\Delta\alpha = 0.05\text{ m}$ 的基础上,分析分层间距对时间和体积的影响(图 10c、10d)可知,当分层间距 $\Delta h = 0.2\text{ m}$ 时,树木样本体积损失情况与 $\Delta h < 0.2\text{ m}$ 时的体积损失情况相当,并且其计算效率亦有显著的提升,故选择分层间距

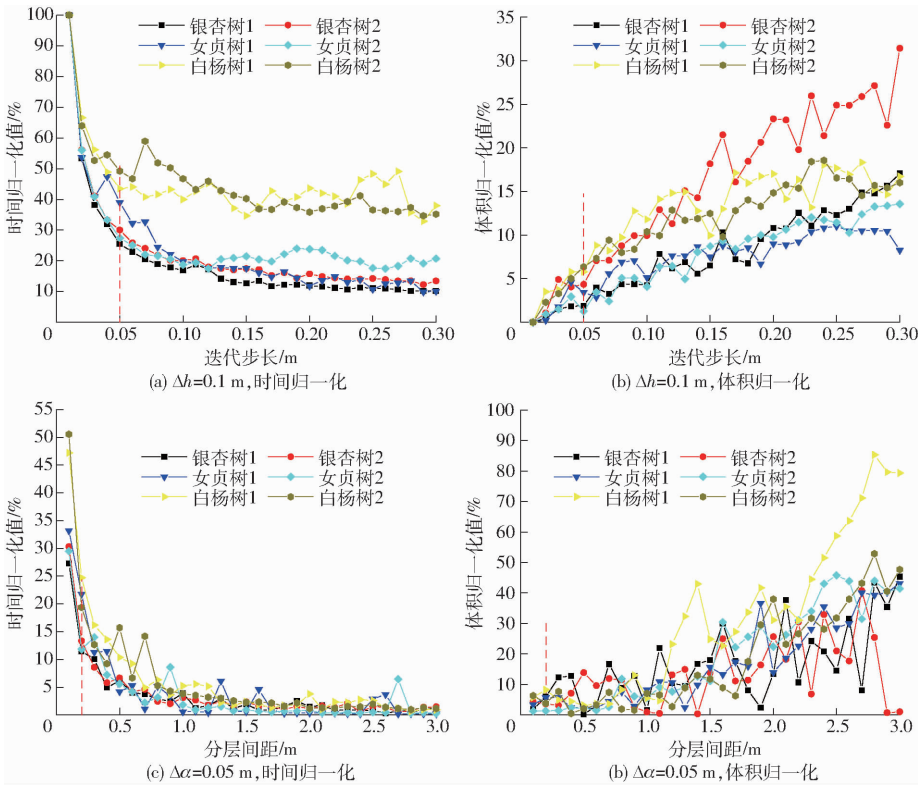


图 10 迭代步长与分层间距对归一化指标的影响

Fig.10 Influence of iteration step length and stratification interval on normalization index

$\Delta h=0.2\text{ m}$ 。

对样本树木树冠体积计算的时长和体积进行统计和分析,见表 1。分析表 1 可知,对女贞树 2 来说,采用选定的 $\Delta\alpha$ 与 Δh 时,体积 V_1 比 V_0 仅损失了 1.360 7%,而时间仅为原来的 11.851 3%,运算效率大大提升。对白杨树 3 来说,采用选定的 $\Delta\alpha$ 与 Δh 时,体积 V_1 比 V_0 仅损失了 2.512 6%,而时间

为原来的 29.080 2%,运算效率明显提升。体积损失最高的是银杏树 3, V_1 比 V_0 损失了 9.167 3%,时间为原来的 21.845 9%,运算效率亦有明显提升。可见,在 V_1 与 V_0 的相对误差不超过 9.167 3%的情况下,改进 α -shape 算法的用时仅为参照数据用时的 11.460 6%~31.581 9%,显著提高了方法的运算效率和实用性,可以满足树冠体积测算的实际需求。

表 1 树冠样本计算结果
Tab.1 Calculation results of tree canopy samples

树木	点数量	$\Delta\alpha=0.01\text{ m},\Delta h=0.1\text{ m}$		$\Delta\alpha=0.05\text{ m},\Delta h=0.2\text{ m}$		$n_V/\%$	$n_t/\%$
		树冠体积 V_0/m^3	计算时间 t_0/s	树冠体积 V_1/m^3	计算时间 t_1/s		
银杏树 1	348 098	45.900 6	216.134 0	43.168 2	24.770 2	5.952 9	11.460 6
银杏树 2	89 224	40.007 3	11.766 6	41.470 7	1.569 3	3.657 9	13.337 3
银杏树 3	105 578	38.861 7	7.028 2	42.424 3	1.535 4	9.167 3	21.845 9
女贞树 1	455 172	45.025 6	167.277 5	47.588 2	36.391 3	5.691 3	21.755 1
女贞树 2	329 832	37.786 5	58.429 3	37.272 4	6.924 6	1.360 7	11.851 3
女贞树 3	352 220	52.392 7	81.376 7	54.241 4	18.745 4	3.528 5	23.035 3
白杨树 1	158 404	6.726 0	5.233 0	7.281 4	1.293 6	8.256 8	24.720 7
白杨树 2	80 644	15.305 0	1.932 7	15.893 2	0.374 2	3.843 2	19.362 5
白杨树 3	92 643	23.267 7	2.703 4	23.852 3	0.786 2	2.512 6	29.080 2
白杨树 4	119 722	3.993 5	3.226 9	4.188 4	0.837 5	4.881 3	25.954 8
白杨树 5	104 710	3.522 2	2.940 1	3.662 6	0.928 6	3.983 1	31.581 9
白杨树 6	130 671	4.900 6	19.906 6	5.280 7	4.490 8	7.757 5	22.559 5
白杨树 7	104 830	16.242 4	2.783 5	17.523 6	0.561 5	7.887 8	20.173 5
白杨树 8	45 262	9.208 3	1.358 0	9.605 0	0.306 7	4.307 5	22.585 3

3 实验结果与分析

3.1 树冠体积计算

分别使用体元累加法、Graham 算法^[14]和改进 α -shape 算法对所有树冠样本进行体积计算。参数设置方面,将改进 α -shape 算法的初值、迭代步长、分层间距、最大迭代阈值 $\alpha_{\max}$ 分别设置为 0.01、0.05、0.2 m、2;Graham 算法的分层间距亦设置为 0.2 m;参照文献[9],本文对不同体元边长与体积增幅 G 之间的关系进行比较分析,从图 11 可见,当体元边长为 10 cm 左右时,体积增幅已趋于稳定,故将体元累加法中的体元边长设置为 10 cm(数据获取方法同 3.2 节)。

$$G_j=\frac{B_{j+1}}{B_j}\quad(j=1,2,\cdots,n)\tag{6}$$

式中 $B_i、B_{j+1}$ ——体元边长为 $j、j+1$ 时所计算的树冠体积

G_j ——体元边长为 $j+1$ 与 j 的树冠体积比值

将体元累加法、Graham 算法和改进 α -shape 算法所计算出的树冠体积分别记为 $v_0、v_1$ 和 v_2 ,结果如表 2 所示。

通过对不同树种不同方法获得的单木树冠体积

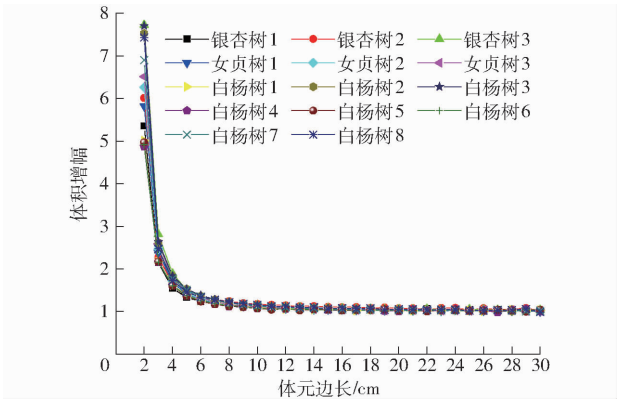


图 11 体元边长与体积增幅关系曲线

Fig.11 Relationship between voxel size and volume increase

(表 2)进行分析,可以得出以下规律:

- (1)对于枝叶密度稀疏的树冠(如银杏树 1~3), $v_1、v_2$ 相较于 v_0 均偏差较大,存在高估现象, v_2 相比于 v_1 更接近 v_0 。分析原因在于,对于枝叶密度稀疏的树冠其内部的空隙可以被体元法更好地识别和去除,体积明显小于使用外轮廓进行体积估算的方法;由于 Graham 算法没有顾及到树冠边缘的空隙问题(图 12),本文算法相较于 Graham 算法所计算的结果 v_1 会更为准确。
- (2)枝叶茂密的情况下(如女贞树 1~3、白杨

表 2 不同方法计算树冠体积

Tab.2 Canopy volume values calculated by different

methods

样本	体元累加法	Graham 算法	改进 α -shape	α 平均值/
	体积 v_0 /	体积 v_1 /	算法体积	m
	m^3	m^3	v_2/m^3	
银杏树 1	16.380 0	74.648 4	43.168 2	0.766 7
银杏树 2	8.498 0	67.906 2	41.470 7	0.892 9
银杏树 3	25.612 4	61.419 1	42.424 3	0.576 7
女贞树 1	28.258 2	53.423 2	47.588 2	0.600 0
女贞树 2	28.090 0	47.830 7	37.272 4	0.410 0
女贞树 3	39.707 7	62.246 3	54.241 4	0.711 9
白杨树 1	6.412 2	9.451 5	7.281 4	0.333 7
白杨树 2	12.331 0	20.664 0	15.893 2	0.285 9
白杨树 3	21.883 4	30.287 5	23.852 3	0.369 7
白杨树 4	3.866 6	5.443 9	4.188 4	0.186 5
白杨树 5	3.487 2	4.827 7	3.662 6	0.186 7
白杨树 6	5.026 3	6.786 0	5.280 7	0.353 8
白杨树 7	15.462 1	22.244 8	17.523 6	0.355 2
白杨树 8	7.311 1	12.794 9	9.605 0	0.324 6

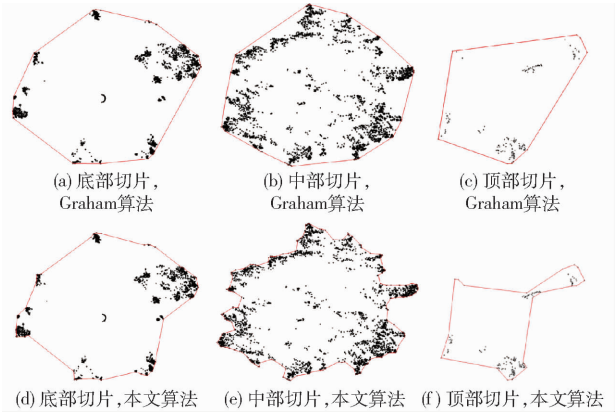


图 12 Graham 算法与本文算法提取边界对比

Fig.12 Comparisons of boundary extraction results between Graham algorithm and proposed algorithm

树 1 ~ 8), 3 种方法得到的树冠体积更为接近。分析表 2 可知, v_2 恰好处于 v_0 与 v_1 之间, 表明 Graham 算法的高估问题仍然存在, 改进 α -shape 算法虽然略高于体元累加法, 但相较于 Graham 算法更接近于体元累加法。分析原因在于, 对于枝叶密度较高的树冠, 体元法对于内部空隙的去除作用减弱。

(3) 通过表 2 可知, 计算不同样本树冠体积时, 求得了不同的 α , 说明本文方法对不同树种树冠的适用性较好。

综合分析来看, 树冠体积计算准确度与树冠自身的枝叶结构关系紧密。本文算法可以适用于不同树种的树冠, 无论是低密度还是高密度树冠, 其结果相对于 Graham 算法可以去除凸包边界带来的高估问题, 相对于体元累计法则更有利于树冠总体占用空间的计算。

3.2 改进 α -shape 算法稳定性测试

计算结果的稳定性是衡量一个算法好坏的重要指标, 从样本数据中任意选取一个树冠样本进行算法稳定性测试。对原始点云数据经去噪滤波处理后, 进行均匀抽稀。抽稀过程以树冠点云的立方体包围盒为基础, 通过构建不同大小的正方体体元, 保留体元内距离体元几何中心的最近点, 剔除体元内其他点。使用这种方式可以将原始点云分别抽稀为分辨率为 1 ~ 10 cm 的树冠点云 (分辨率 k 表示每个边长为 k 的体元内仅保留不多于 1 个激光点), 用以测试不同算法计算树冠体积的效果。对实验结果进行归一化处理, 即

$$K_v = \left(1 - \frac{F_k}{F_1}\right) \times 100\% \tag{7}$$

$$K_s = \frac{C_k}{C_1} \times 100\% \tag{8}$$

式中 K_v 、 K_s ——抽稀后树冠样本的体积相对误差和抽稀后点云占比。 K_v 越大则体积损失越大; K_s 越小, 则表示抽稀后剩余点云数据占原始点云数据比例越少

F_k 、 F_1 ——点云体元边长为 k 、1 cm 时树冠体积

C_k 、 C_1 ——点云体元边长为 k 、1 cm 时点数量

测试结果见表 3。表 3 第 1 列, 点云体元表示 1 个点所占的立方体空间, 数值越大, 点云分辨率越低。分析表 3 可知, 在设置相同参数情况下, 随着点云分辨率降低, 不同算法计算的树冠体积均呈下降趋势。其中, 体元法受点云分辨率的影响波动较大, 当点云体元边长为 10 cm 时, 损失了原始树冠体积的 51.016 6%; Graham 算法与本文算法体积下降的幅度相较于去除点云的比例相对较小, 在点云体元边长为 10 cm, 且抽稀后点云数量仅为原始点云样本的 3.478 0% 的情况下, 损失了原始树冠体积的 13.746 1% 和 11.804 6%。这说明本文算法在相同的迭代步长与分层间距下, 计算结果受点云分辨率影响相对较小, 高密度点云使用的相关参数对于低密度数据亦具有一定适用性, 在一定程度上说明了本文算法的稳定性。

4 结论

(1) 树冠体积计算的准确性与树冠内部枝叶结构和点云密度均有关系。

(2) 本文算法对不同树种树冠体积计算具有较好的适用性, 无论对于高密度还是低密度树冠, 采用改进 α -shape 算法的树冠体积计算结果具有良好的稳定性, 在过滤样本为原始点云样本 3.478 0% 的情

表 3 抽稀与计算结果
Tab.3 Extraction and calculation results

点云体元 边长/cm	女贞树 1 点 数量	体元法体积/ m ³	体元法体积 相对误差/%	Graham 算法 体积/m ³	Graham 算法体积 相对误差/%	改进 α-shape 算法体积/m ³	改进 α-shape 算法 体积相对误差/%	抽稀后点云 占比/%
1	455 172	31.084	0	53.423 2	0	47.775 3	0	100
2	211 709	30.436	2.084 7	53.030 0	0.736 0	46.196 1	3.305 3	46.511 9
3	130 475	29.673	4.539 3	51.971 7	2.717 0	45.523 1	4.713 9	28.665 0
4	85 884	28.66	7.798 2	51.753 5	3.125 4	45.273 1	5.237 3	18.868 5
5	59 688	27.344	12.031 9	50.957 4	4.615 5	44.816 9	6.192 2	13.113 3
6	43 651	25.713	17.279 0	49.788 5	6.803 5	43.895 6	8.120 7	9.590 0
7	32 765	23.431	24.620 4	48.869 3	8.524 2	42.856 9	10.294 8	7.198 4
8	25 216	20.811	33.049 2	47.885 7	10.365 3	42.733 8	10.552 3	5.539 9
9	19 782	18.004	42.079 5	46.293 2	13.346 3	42.520 3	10.999 2	4.346 0
10	15 831	15.226	51.016 6	46.079 6	13.746 1	42.135 6	11.804 6	3.478 0

况下,仅损失了原始树冠体积的 11.804 6% ,而且相 包算法的高估问题,相较于体元累加法也更利于树
较于已有其他方法更为准确,既避免了 Graham 凸 冠总体占用空间的计算。

参 考 文 献

[1] ZHANG W, WAN P, WANG T, et al. A novel approach for the detection of standing tree stems from plot-level terrestrial laser scanning data[J]. Remote Sensing, 2019,11(2):211–229.

[2] 周坚华. 城市绿量测算模式及信息系统[J]. 地理学报, 2001, 56(1):14–23.
ZHOU Jianhua. Theory and practice on database of three-dimensional vegetation quantity[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(1):14–23. (in Chinese)

[3] 陈东来, 刘丽华, 张景兰. 林分密度的新指标——冠积指数[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(5):15–17.
CHEN Donglai, LIU Lihua, ZHANG Jinglan. A new index of stand density—the crown volume index[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(5):15–17. (in Chinese)

[4] 周一凡, 周坚华. 绿量快速测算模式[J]. 生态学报, 2006, 26(12):4204–4211.
ZHOU Yifan, ZHOU Jianhua. Fast method to detect and calculate LVV[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12):4204–4211. (in Chinese)

[5] 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.
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. 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. (in Chinese)

[6] HUANG Q, FLÖRY S, GELFAND N, et al. Reassembling fractured objects by geometric matching[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3):569–578.

[7] 许丽鹏, 黄先锋, 吴健, 等. 基于激光点云的敦煌洞窟空间信息重建[J]. 敦煌研究, 2019(4):121–127.
XU Lipeng, HUANG Xianfeng, WU Jian, et al. Reconstructing the spatial information of Dunhuang caves based on laser point cloud analysis[J]. Dunhuang Research, 2019(4):121–127. (in Chinese)

[8] 杨必胜, 董震. 点云智能研究进展与趋势[J]. 测绘学报, 2019,48(12):1575–1585.
YANG Bisheng, DONG Zhen. Progress and perspective of point cloud intelligence[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019,48(12):1575–1585. (in Chinese)

[9] 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?file_no=20130741&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.041. (in Chinese)

[10] 李凤霞, 石辉, 撒利伟, 等. 微分法三维激光点云数据单木三维绿量测定研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017,49(4):530–535.
LI Fengxia, SHI Hui, SA Liwei, et al. 3D green volume measurement of single tree using 3D laser point cloud data and differential method[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017,49(4):530–535. (in Chinese)

[11] 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.

- GONG Yinxì, 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. 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. (in Chinese)
- [12] 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. 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. 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. (in Chinese)
- [13] 王佳, 杨慧乔, 冯仲科. 基于三维激光扫描的树木三维绿量测定[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(8):229 – 233. WANG Jia, YANG Huiqiao, FENG Zhongke. Tridimensional green biomass measurement for trees using 3-D laser scanning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(8):229 – 233. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130839&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.039. (in Chinese)
- [14] 徐伟恒, 冯仲科, 苏志芳, 等. 一种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014,34(2):465 – 471. XU Weiheng, FENG Zhongke, SU Zhifang, et al. An automatic extraction algorithm for individual tree crown projection area and volume based on 3D point cloud data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014,34(2):465 – 471. (in Chinese)
- [15] 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?file_no=20170820&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.020. (in Chinese)
- [16] 林松, 田林亚, 毕继鑫, 等. 三维激光扫描数据的单木树冠体积精确计算[J]. 测绘科学, 2020,45(8):115 – 122. LIN Song, TIAN Linya, BI Jixin, et al. Accurate calculation of single-tree crown volume based on 3D laser scanning data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020,45(8):115 – 122. (in Chinese)
- [17] 董亚涵, 李永强, 李鹏鹏, 等. 基于改进凸包算法的树冠轮廓点提取与体积计算[J]. 测绘工程, 2018,27(8):66 – 71. DONG Yahan, LI Yongqiang, LI Pengpeng, et al. Tree crown outline points extracting and volume calculation base on improved convex hull algorithm[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018,27(8):66 – 71. (in Chinese)
- [18] EDELSBRUNNER H, KIRKPATRICK D, SEIDEL R. On the shape of a set of points in the plane[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983,29(4):551 – 559.
- [19] EDELSBRUNNER H. Alpha shapes—a survey[J]. Tessellations in the Sciences, 2010,27:1 – 25.
- [20] VARYTIMIDIS C, RAPANTZIKOS K, AVRITHIS Y. W α SH: weighted α -shapes for local feature detection[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2012:788 – 801.
- [21] VARYTIMIDIS C, RAPANTZIKOS K, AVRITHIS Y, et al. α -shapes for local feature detection[J]. Pattern Recognition, 2016,50:56 – 73.
- [22] EDELSBRUNNER H, MÜCKE E P. Three-dimensional alpha shapes[J]. ACM Transactions on Graphics, 1994,13(1):43 – 72.
- [23] 武晓波, 王世新, 肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报, 1999,28(1):28 – 35. WU Xiaobo, WANG Shixin, XIAO Chunsheng. A new study of Delaunay triangulation creation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999,28(1):28 – 35. (in Chinese)
- [24] LEWIS B A. Triangulation of planar regions with applications[J]. The Computer Journal, 1978,21(4):324 – 332.
- [25] GREEN P J, SIBSON R. Computing dirichlet tessellations in the plane[J]. Computer Journal, 1978,21(2):168 – 173.
- [26] MAUS A. Delaunay triangulation and the convex hull of n points in expected linear time[J]. Bit Numerical Mathematics, 1984,24(2):151 – 163.
- [27] 廖中平, 陈立, 白慧鹏, 等. 自适应 α -shapes 平面点云边界提取方法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019,16(2):15 – 21. LIAO Zhongping, CHEN Li, BAI Huipeng, et al. Adaptive α -shapes plane point cloud boundary extraction method[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2019,16(2):15 – 21. (in Chinese)
- [28] 连强强, 顾敏. 基于 α -shape 的三维激光点云计算树冠体积的研究[J]. 青海大学学报, 2020,38(5):74 – 79. LIAN Qiangqiang, GU Min. Research on the calculation of tree crown volume by 3D laser point cloud based on α -shape[J]. Journal of Qinghai University, 2020,38(5):74 – 79. (in Chinese)
- [29] 余翔宇, 孙洪, 余志雄. 改进的二维点集凸包快速求取方法[J]. 武汉理工大学学报, 2005,27(10):85 – 87. YU Xiangyu, SUN Hong, YU Zhixiong. An improved algorithm to determine the convex hull of 2-D points set[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(10):85 – 87. (in Chinese)