

基于最小角度三角化填充的枝干点云根部空洞修补

杨 杰^{1,2}, 温小荣^{1,2*}, 汪求来³, 叶金盛³

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037;
3. 广东省林业调查规划院, 广东 广州 510520)

摘要:激光雷达扫描仪获得的树木点云仅表达了树木的表面,缺少根部截面的点云,因而往往是不封闭的,这一特性对树木建模的2种主要方法(骨架和Delaunay三角网)都会产生影响,增加了额外处理工作并且降低了模型精度,而现有研究中点云的空洞修补方法并不能直接应用于枝干点云根部。针对这一现状,结合对现有空洞修补方法进行改进,并适用于枝干点云的根部,分为由预处理、根部空洞边界的获取、基于最小角度法的空洞三角化填充与后处理4个阶段,并以C++编程实现,以根部空洞修复和未修复的骨架对比了效果。结果表明, r_{be} 、 α 、 k 、 ϵ 4个参数设置合理时填充枝干点云能够在正确监测点云空洞边界的基础上较好且快速地修复根部的空洞,使用处理后的点云建立的骨架相较于未处理的中心偏移明显改善,因而有助于提高枝干建模的精度。该方法拓宽了点云空洞修补的适用场合。

关键词:空洞修补;Delaunay三角网;树木建模

中图分类号:S758 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2023)04-0214-10

Filling Tree Root Hole in Branch Point Cloud With Triangulations Based on Minimum Angles

YANG Jie^{1,2}, WEN Xiao-rong^{1,2*}, WANG Qiu-lai³, YE Jin-sheng³

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
2. Faculty of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
3. Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: Only the surface of a tree can be expressed in the point cloud provided by a LiDAR scanner. Tree point clouds are always unclosed for lack of the section of the root. The feature has a bad influence on two major methods of tree modeling, including skeleton and Delaunay triangulation, which increase extra processing work and decrease the accuracy of models. However, the existing methods of point cloud hole-filling cannot directly apply to the root section in tree branch point cloud. Aimed at this issue, the method proposed in the research improved the existing hole-filling methods to satisfy the applicability of handling the root section in tree branch point cloud. It was divided into four stages: preprocessing, obtaining the root cavity boundary, cavity triangulation filling based on the minimum angle method and post-processing. It was implemented by C++ programming for showing the difference between the skeleton produced after hole-filling and without hole-filling. The results showed that when four parameters were set rationally r_{be} , α , k , ϵ filling the root hole of the branch point clouds was better and quick. Compared with the branch point cloud before root hole-filling, the produced skeleton with that after root hole-filling had smaller center devi-

收稿日期:2022-04-25 修回日期:2022-06-02

基金项目:广东省林业科技创新项目(2021KJCX001);国家重点研发计划(2016YFC0502704);江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)。

第一作者:杨 杰。研究方向:遥感与GIS应用技术。E-mail:nj_yang_jie@qq.com

*通信作者:温小荣,博士,副教授,硕士生导师。研究方向:森林资源监测与GIS应用。E-mail:njw9872@163.com

ation. Therefore the research is helpful to improve the accuracy of tree branch modeling. Additionally the method can broaden applicable occasion of point cloud hole-filling.

Key words: hole-filling; Delaunay triangulation; tree modeling

树木枝干在林业调查研究中十分重要,近年来,利用树木枝干点云作为数据源进行枝干建模提取林业参数成为一项研究热点^[1-2]。但由于激光雷达获取的是物体表面的信息,对于树木根部截面只有边缘点,这一现象会对枝干建模造成影响。(树木)枝干点云建模一般使用 Delaunay 三角网方法或骨架方法^[3],若采用 Delaunay 三角网方法,则模型在根部截面处会出现很多“狭长”三角形,影响了三角网的构建质量^[4];若采用骨架方法,按照 Xu 等^[5]给出的骨架建立过程,需要选择一个根节点,计算枝干点云中其他点与根节点的最短路径距离,依据距离划分成若干层(bins),并把每层聚类分割成若干部分(bin),最后由每一个部分计算中心确定骨架点。当

根节点位于根部截面的边缘时,靠近根部的骨架点会朝树干表面偏移,影响了骨架的精度。对枝干点云根部的空洞修补能够有效解决问题。

目前,点云空洞修补是一项关键的研究,但这些研究并没有针对枝干点云并且也不能直接运用到枝干点云上。表 1 对比了现有的若干研究并分析了各自的局限性,这些局限性正是这些算法不能直接处理枝干点云空洞的原因。

针对于树木枝干点云根部的空洞修补,本研究基于 C++ 编程实现,结合 PCL 点云库以及该库所自带的第三方库给出了一种修补流程,由预处理、根部空洞边界的获取、基于最小角度法的空洞三角化填充与后处理 4 个阶段构成。

表 1 点云空洞修补研究及其局限性

Table 1 Researches of point cloud hole-filling and their limitations

文献来源	原理	局限性
蒋刚 ^[6]	将已有空间点向 3 个相互正交的空间平面投影,并在各投影面上分别利用支持向量机做回归,再通过内插值获得缺失点在 3 个平面上的坐标后合成缺失的空间点	只适用于已有点和缺失点近似在同一条连续光滑的曲线上的情况
蔡香玉等 ^[7]	采用径向基函数神经网络填补空洞	适用于平面点云或变化缓慢的近似于光滑曲面的点云,且在这个面上已知点较多
王俊豪 ^[8]	通过选取特征点的方法进行空洞修补	要能够找到与空洞区域具有特征相同的其他位置的点
王丽英等 ^[9]	利用外边界轮廓点拟合最小二乘平面,在该平面内利用边界点与中心距离的方差和曲率在等距扩大或者缩小的范围内插值	算法主体是检测空洞范围,没有给出具体的插值方式
孙晓东 ^[10]	利用边界结合 NURB 曲线反求漏洞点并规避噪声点	更偏向于解决边界不闭合时的情况
陈相等 ^[11]	采用最小角度法三角化填充空洞	松弛参数是定值,在不同点云上效果不一;原算法只适用于凸多边形的空洞

1 材料与方 法

1.1 试验数据来源

使用型号为 RIEGL VZ-400i 的地基激光雷达扫描仪,设置扫描模式为 Panorama40。对位于江苏省宿迁市泗洪县陈圩林场马浪湖分场(33°15'N, 118°18'E)中美洲黑杨(*Populus deltoides*)的一个小班中选择的样地,进行多站扫描得到样地的地基激光点云数据^[12-13],扫描模式的详细参数见表 2。对该点云数据经去噪、去除地面点、归一化后进行单木分割,从中选取 1 棵样木的点云,进行枝叶分离得到试验所用的枝干点云(图 1)。在试验阶段先以枝干点云对比不同参数对某些步骤产生的影响,而在算法性能分析部分选用同一样地内的其他美洲黑杨的枝干点云展示在各自相对最佳参数下的效果。

1.2 空洞修补原理

本研究提出的空洞修补主要分为 4 个阶段:预

处理、根部空洞边界的获取、基于最小角度法的空洞三角化填充与后处理。预处理部分用于找到输入枝干点云的根部边界点云,在根部空洞边界获取阶段,由于直接确定真正的空洞边界较为困难,因而转化为确定一个等价的空洞边界,然后再基于最小角度



图 1 试验用的枝干点云

Fig. 1 Branch point cloud in the research

表 2 RIEGL VZ-400i 扫描模式 Panorama 40
Table 2 RIEGL VZ-400i scanning mode Panorama 40

扫描分辨率	扫描时间/s	测量	分辨率@20 m	分辨率@50 m	扫描站数
40 mdeg	45	22.5 Mio	14 mm	34 mm	400

法的空洞三角化填充阶段填充这个等价的空洞,把填充好的等价空洞还原到枝干根部空洞所在位置,并对可能存在的缝隙和重复点进行处理后得到修补后的树木枝干点云。空洞修补流程见图 2。

1.2.1 预处理 对于输入的枝干点云,为了获取它的边界,需要对每一个点进行法线估计(normal estimation),以作为对局部表面的法向量的近似推断,法线估计可采用 kdtree 的 K 搜索或半径搜索(搜索半径记为 r_{ne})。在获取了法线估计值后,与原点云一同作为输入,设置搜索半径(search radius) r_{be} 和夹角阈值(angle threshold) φ_m (默认取 $\pi/4$) 后获得枝干边界点云。此时获得的枝干边界点云中的点集中分布在枝干点云的根部及树梢位置,但并没有区分出哪些点是根部边界的点,可以通过聚类将所有点分割成不同的部分,欧氏聚类提取(euclid cluster extraction, ECE)是点云聚类中的一种简单有效的方法^[14],除了输入的点云外,还需要 2 个必要的参数,一是聚类容忍度(cluster tolerance)或搜索半径(用 Eps),二是每一个聚类分割所允许的最小点数(min cluster size,用 MinPts 表示)^[15]。由于能够构成面至少需要 3 个点,因而 MinPts 取 3。在聚类完成后,很容易找到根部边界点云。

1.2.2 根部空洞边界的获取 首先,拟合平面与计算平面法向。记根部边界点 $p_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$, $i=1,2,\dots,n, n \geq 3, p_i \in B$,所有根部边界点的平均

坐标(质心)为 $[\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}]^T$,待拟合的平面方程为 $ax+by+cz+d=0$,为了便于后续研究, a, b, c 需要满足 $a^2+b^2+c^2=1$,记矩阵

$$A = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x} & y_1 - \bar{y} & z_1 - \bar{z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - \bar{x} & y_n - \bar{y} & z_n - \bar{z} \end{bmatrix}$$

Zwrick^[16]指出,正交距离回归(ODR)可以用于拟合平面,而在三维空间中找到最优 ODR 平面最常用的方法是利用矩阵的奇异值分解(SVD):对 A 进行 SVD 分解,即存在 n 维酉矩阵 U 、3 维酉矩阵 V

和矩阵 $\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{n \times 3}$

式中:奇异值 $\sigma_i, i=1,2,3$ 满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$,使得 $A=U\Sigma V^H$,则最优 ODR 平面经过质心,且垂直于 A 的最小奇异值 σ_3 对应的矩阵 V 的列,即拟合后得到的 $a=V_{13}, b=V_{23}, c=V_{33}, d=-a\bar{x}-b\bar{y}-c\bar{z}$,拟合平面的法向量为 $n=[a \ b \ c]^T$,是单位向量。本研究中对矩阵 A 进行 SVD 分解时使用 Eigen::JacobiSVD《Eigen::MatrixXd》类。

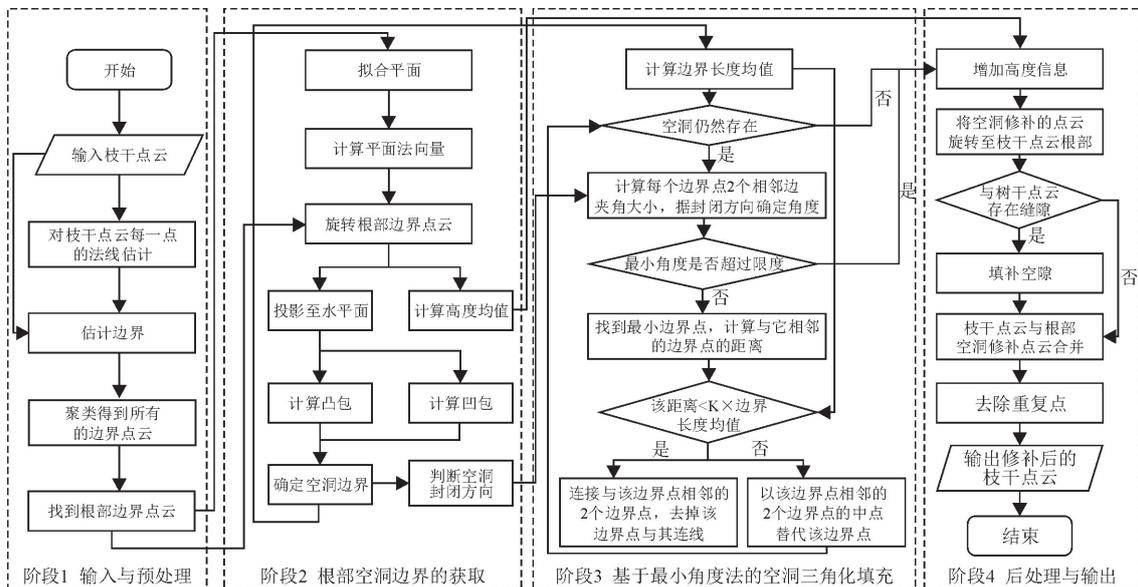


图 2 空洞修补流程

Fig. 2 Hole-filling process

其次,旋转根部边界点云后投影至水平面并计算高度均值。由于倾斜且不在同一个平面内的离散点近似在一个多面体盒子中,难以确定的空洞边界,在得到平面法向量后,对点云进行旋转,并投影到水平面上,以便于研究。令向量 $\mathbf{e}_z = [0 \ 0 \ 1]^T$,旋

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta + \omega_x^2(1 - \cos\theta) & -\omega_z \sin\theta + \omega_x \omega_y(1 - \cos\theta) & \omega_y \sin\theta + \omega_x \omega_z(1 - \cos\theta) \\ \omega_z \sin\theta + \omega_x \omega_y(1 - \cos\theta) & \cos\theta + \omega_y^2(1 - \cos\theta) & -\omega_x \sin\theta + \omega_y \omega_z(1 - \cos\theta) \\ -\omega_y \sin\theta + \omega_x \omega_z(1 - \cos\theta) & \omega_x \sin\theta + \omega_y \omega_z(1 - \cos\theta) & \cos\theta + \omega_z^2(1 - \cos\theta) \end{bmatrix},$$

并记每一个旋转后的边界点为 $\mathbf{p}'_i = \mathbf{R}\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i \in B'$, 将 \mathbf{p}'_i 投影至水平面得到 $\mathbf{p}''_i = [\mathbf{p}'_{i1} \ \mathbf{p}'_{i2}]^T \in B''$, 并令 $\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{p}'_{i3}$, 该高度将作为所有修补的空洞点的高度。

再次,计算凸包、凹包以获得空洞边界。当有了平面点集后,待填充的空洞位于一个可将这些点包围住的多边形的内部,需要找到空洞的边界。最小凸包是指一个能够包括平面点集中全部点的最小凸多边形^[17], 利用 `pcl::ConvexHull<<pcl::PointXYZ>>` 类求取平面点集 B'' 的最小凸包,得到多边形 $C_{\text{凸}}$, 该多边形以有向边组成,即 $C_{\text{凸}}$ 的边为 $\{\mathbf{v}_0\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_1\mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_{m-2}\mathbf{v}_{m-1}, \mathbf{v}_{m-1}\mathbf{v}_0\}, \mathbf{v}_i \in B''$ 。若直接在最小凸包内填充点,边界处的点则会增多,这一方面会造成外密内疏的现象,另一方面影响到原本真实的边界点云的分布状况,因而需要在最小凸包中去掉原本点分布的区域。凹包是一个能够尽可能包括平面点集中点的凹多边形,不同于凸包,没有最小凹包一说,此外,获得的凹包的形状受制于形状参数 α, α 越小,凹包的形状倾向于在某一处凹陷以更加贴合点集的外形,这就会造成某些点因为影响到为满足其他更多点贴合的多边形的建立而被排除在得到的凹包内的情况,当 $\alpha \rightarrow +\infty$ 时得到的凹包将无限接近于凸包^[18]。本研究中以参数 α 利用 `pcl::ConcaveHull<<pcl::PointXYZ>>` 求取平面点集 B'' 的凹包,得到多边形 $C_{\text{凹}}$ 。从最小凸包中去掉与凹包相同的部分,事实上剩余的图形可能是由多个多边形所构成,也就是说,多边形的减法运算得到的是多边形的集合,而定义最优化问题。

$\max \text{Area}(C) \text{ s. t. } C \in S_C = C_{\text{凸}} - C_{\text{凹}}$ 的最优解 $C = C^*$ 为空洞边界的多边形,本研究中利用 boost 库求取空洞多边形边界。

最后,需要确定边界的封闭方向,也就是确定指向多边形内部的方向。由格林公式可知封闭区域 D 边界曲线正向 L^+ 满足

$$\iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy = \oint_{L^+} P dx + Q dy$$

由式(1)可知,沿多边形的边求曲线积分,若积分值

转角度 $\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_z}{|\mathbf{n}| |\mathbf{e}_z|}\right)$, 旋转轴 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{n} \times \mathbf{e}_z$, 归一化的旋转轴 $\boldsymbol{\tau}^0 = \frac{\boldsymbol{\tau}}{|\boldsymbol{\tau}|} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$, 由罗德里格旋转公式可知旋转矩阵:

为正,则为沿着边界曲线正方向(逆时针),反之为顺时针,记 C 是由点 $\mathbf{u}_i = [x_i \ y_i]^T, i=0, 1, L, r-1$ 依次构成,则边界的路径积分为

$$\oint_C -y dx = - \sum_{i=0}^{r-1} (x_{(i+1) \bmod r} - x_i) \frac{y_{(i+1) \bmod r} + y_i}{2} = \iint_D \left(-\frac{\partial(-y)}{\partial y} \right) dx dy = \iint_D dx dy$$

因而只需计算

$$- \sum_{i=0}^{r-1} (x_{(i+1) \bmod r} - x_i) \frac{y_{(i+1) \bmod r} + y_i}{2} \quad (1)$$

的值,若为正,则多边形随着点的序号增加逆时针封闭;若为负,则为顺时针封闭。式(1)取绝对值后即求二维平面离散点依次所围成的多边形面积的鞋带公式(shoelace formula)^[19]。

1.2.3 基于最小角度法的空洞三角化填充 算法 1 给出了根部点云空洞的填补方法。本研究对以前的方法做了如下完善。1)引入多边形封闭方向可适应凹多边形的处理,并且便于编程,而且计算复杂度低;2)将松弛参数 k 由定值 1.2 修改为变量,试验结果部分将比较不同 k 对填充效果的影响;3)引入最小角度的限制,该最小角度用 $180^\circ - \epsilon$ (ϵ 为一个较小的正数参数)作限制,一方面可以避免编程时由于浮点数产生的问题;另一方面 ϵ 也可以影响到允许的三角形的形状,进而影响到修补点的分布。

算法 1 基于最小角度的空洞三角化填充

Algorithm. 1 Triangular hole-filling based on a minimum angle

输入: C , 空洞多边形边界封闭方向, k, ϵ

输出: Q''

计算初始的空洞多边形边长的平均值 \bar{l}

初始化当前空洞边界多边形 $\tilde{C} := C$

初始化新增加点的集合 $Q'' := \emptyset$

while 空洞未修补完整 do

初始化存放每一个边界点的内角角度的序列 Θ, Θ 中元素个数与 \tilde{C} 的顶点数相等

foreach 空洞多边形 \tilde{C} 的边界点 \mathbf{u}_i do

$$\theta := \langle \mathbf{u}_i \mathbf{u}_{(i-1) \bmod r}, \mathbf{u}_i \mathbf{u}_{(i+1) \bmod r} \rangle \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$$

根据封闭方向决定 $\Theta_i \leftarrow \theta$ 还是 $\Theta_i \leftarrow 360^\circ - \theta$

end for

if Θ 中最小角度值 $\theta_{\max} \geq 180^\circ - \epsilon$ then

break

end if

找到 Θ 中最小角度值对应的边界点 u_i

if $|u_{(t-1) \bmod r} u_{(t+1) \bmod r}| < k\bar{l}$ then

去掉 \tilde{C} 中的边界点 u_i 和与之相连的边,并连接

$u_{(t-1) \bmod r} u_{(t+1) \bmod r}$

else

u'_t 定义为点 $u_{(t-1) \bmod r}$ 和 $u_{(t+1) \bmod r}$ 的中点

$Q'' \leftarrow Q' \cup \{u'_t\}$

将 \tilde{C} 中的边界点 u_i 和与之相连的边分别用 u'_i

和 $u_{(t-1) \bmod r} u'_t, u'_t u_{(t+1) \bmod r}$ 取代

end if

end while

其中,条件“空洞未修补完整”可以由研究者的需要所确定,例如判断当前的空洞多边形面积是否大于某一值等,而若未作约束以 true 替代即可,因为依靠最小角度是否满足程序继续的要求仍可以作为判断循环终止的依据,本试验采用后者,不采用约束。不论是自行确定的“空洞未修补完整”还是对最小角度的约束,事实上是防止中心过密与计算机浮点数所带来的无限循环问题。

对于每一轮找到最小角度值对应的边界点的处理见图 3。

此外,算法中,根据方向决定 $\Theta_i \leftarrow \theta$ 还是 $\Theta_i \leftarrow 360^\circ - \theta$,是指多边形某一个顶点 u_i 所在的内角的角度 Θ_i 应当由该顶点到与之相连的 2 条边的 2 个顶点 $u_{(i-1) \bmod r}, u_{(i+1) \bmod r}$ 的 2 个向量 $u_i u_{(i-1) \bmod r}, u_i u_{(i+1) \bmod r}$ 的夹角 θ 根据多边形封闭方向确定(表 3),其中 $u_{\cdot, 1}, u_{\cdot, 2}$ 分别表示顶点 u_{\cdot} 的横坐标与纵坐标。

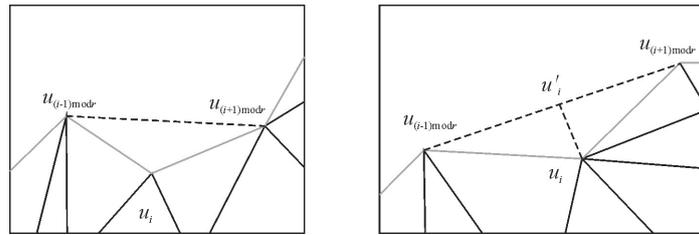


图 3 三角化填充过程

Fig. 3 Process of triangular filling

表 3 顶点内角角度的确定方法

Table 3 Determination method of internal angles from vertices

条件 1	条件 2	封闭方向	条件 3	Θ_i
$u_{(i-1) \bmod r, 1} = u_{i1}$	$u_{(i-1) \bmod r, 2} < u_{i2}$	逆时针	$u_{i1} \leq u_{(i+1) \bmod r, 1}$	$360^\circ - \theta$
		顺时针	$u_{i1} > u_{(i+1) \bmod r, 1}$	θ
	$u_{(i-1) \bmod r, 2} > u_{i2}$	逆时针	$u_{i1} < u_{(i+1) \bmod r, 1}$	θ
		顺时针	$u_{i1} \geq u_{(i+1) \bmod r, 1}$	$360^\circ - \theta$
$u_{(i-1) \bmod r, 1} \neq u_{i1}$ $u'_{(i+1) \bmod r, 2} = \frac{u_{i2} - u_{(i-1) \bmod r, 2}}{u_{i1} - u_{(i-1) \bmod r, 1}} \times (u_{(i+1) \bmod r, 1} - u_{(i-1) \bmod r, 1}) + u_{(i-1) \bmod r, 2}$	$u_{(i-1) \bmod r, 1} < u_{i1}$	逆时针	$u_{(i+1) \bmod r, 2} \leq u'_{(i+1) \bmod r, 2}$	$360^\circ - \theta$
		顺时针	$u_{(i+1) \bmod r, 2} > u'_{(i+1) \bmod r, 2}$	θ
	$u_{(i-1) \bmod r, 1} > u_{i1}$	逆时针	$u_{(i+1) \bmod r, 2} < u'_{(i+1) \bmod r, 2}$	θ
		顺时针	$u_{(i+1) \bmod r, 2} \geq u'_{(i+1) \bmod r, 2}$	$360^\circ - \theta$

1.2.4 后处理 在填充后,令 $q'_i = [q''_{i1} \ q''_{i2} \ \bar{h}]^T \in Q'$,其中, $q''_i \in Q''$,修补的空洞点云 Q 由每一个点 $q_i = R^{-1} q'_i$ 构成。

按照前述方法得到的修复的空洞点所形成的面与根部点云间可能会存在一定的间隙。判断间隙是否存在的依据可以表述为:存在 Q 中某一边界点

q_j ,若它在一定范围 r 内的近邻点中没有任何属于原枝干点云的点,则存在空隙。 r 可以取原枝干点云在不存在重复点的情况下的分辨率(或称点云密度,定义为点云中每一个点与其最近点的距离的均值)。若存在空隙,只需将拟合平面上半部分内的根部边界点云投影至该平面上所形成的点云加入到空

洞修补的点云。

最后,为防止重复点对后续编程实现时造成影响,将空洞点云加入原枝干点云后,需要去除重复点,或者利用 kdtree 以较小的半径最邻近搜索,将存在于非常小范围邻域内的邻居点从点云中移除。若想使空洞修补的点云尽可能地与原枝干点云的点分布密度相接近,则半径的选取可以点云分辨率为准。

1.3 试验环境

试验环境见表 4。

表 4 试验环境

Table 4 Experimental environment

项目	配置/版本号
操作系统	Windows 11 专业版版本 21H2
处理器	11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1165G7 @ 2.80GHz
内存	16.0GB
Visual Studio Community 2019	16.11.11
PCL	1.11.1
Boost	1.74(PCL 1.11.1 第三方库自带)
Eigen	3(PCL 1.11.1 第三方库自带)

2 结果与分析

2.1 不同的搜索半径对边界点云检测的影响

该枝干点云的点数为 246 625,点云分辨率 $\rho = 0.006\ 632$,用参数 $K = 10$ 搜索进行法线估计,设置参数 $r_{be} = 20\rho$ 、 $\varphi_m = \frac{\pi}{4}$ 、 $Eps = 10\rho$ 、 $MinPts = 3$ 获取根部边界点云,一般来说, $r_{be} = 10\rho$ 即可,由于本试验的点云密度高,而在根部某一侧上点云略微稀疏,若仍这样取会使获得的根部边界点云过多地包括稀疏一侧的点云,效果差,因而后续试验均在取 $r_{be} = 20\rho$ 的条件下进行。图 4 为试验数据在某一角度观察下的根部点云以及 $r_{be} = 10\rho$ 与 $r_{be} = 20\rho$ 时获得的根部边界点云。

2.2 不同的 α 对空洞边界形状的影响

由原理部分可知,在阶段 2 中会对最终结果影响的参数为 α ,而 α 的选取应当尽可能贴合点集。为了便于直观展示,以向 z 轴正方向作为观察方向观察根部点云,不同的 α 得到的空洞边界形状见图 5。

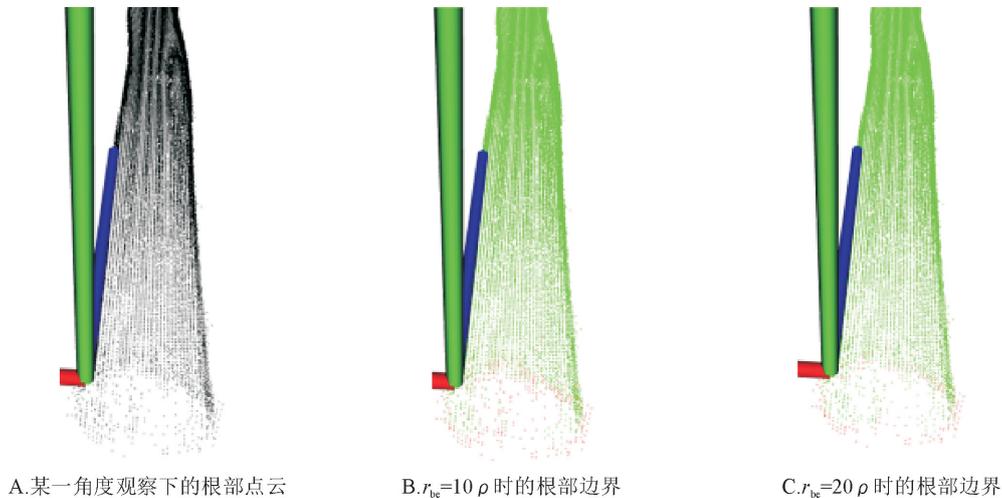


图 4 根部边界获取结果的比较

Fig. 4 Comparison between acquisition results of root boundary

由图 5 可知,当 α 显著大于 6ρ 时,凹包的形状不断接近凸包的形状,因而无法找到空洞;而 α 略小于 6ρ 时,凹包未能够涵盖全部的点,并且在显著小于 6ρ 时,凹包不能涵盖到绝大部分点,此时的空洞边界与凸包非常接近,也不正确;当 $\alpha = 6\rho$ 时得到的空洞边界是相对最正确的,以此继续后续试验。

2.3 不同的 k, ε 对修补结果的影响

由原理部分可知,参数 k 影响新增点的数量和分布,而参数 ε 决定是否停止修补。对比不同 k, ε 对修补结果的影响见图 6。

用 ρ^* 表示填充的点云的分辨率, ξ 表示填充的点云中离空洞边界多边形质心最近的点与质心的直线距离,比较图 6 中 16 种情况。 ρ^* 与 ρ 越靠近,即 $\Delta\rho = |\rho^* - \rho|$ 越接近 0,填充的点云分辨率越接近原枝干点云的分辨率;若 ξ 较大,说明根部中心并没有得到填充,填充的点云并不能完整地覆盖整个根部截面。因此理想的修复效果应为 ρ^* 与枝干点云分辨率 ρ 接近,且 ξ 须尽可能小。 n^* 表示填充的点云点数。

结合图 6 和表 5 可知, ε 在一定范围内对修补结果毫无影响,而超过了这个范围后,重建结果十分

糟糕,而由原理部分可知, ϵ 也不能取值过小,不然会造成无限循环,而 ϵ 取值大并不总是没有影响,因而 ϵ 取 0.05° 能够保证在其他枝干点云上的可用性。当 $k=2.4$ 时,中心偏右的一块较大的区域中未有新增点,在现有的研究中, k 取 1.2 与 1.8 相比, $\Delta\rho$ 非常接近,而 $k=1.8$ 时的 ξ 更小,这说明根部中心的点云空洞更小一些,结合图像可知,此时点的密度与边界点云更为接近,并不像 $k=1.2$ 时集中直观上与多条线段相类似,分布相对分散,符合理想的修补效果。后续以参数 $k=1.8, \epsilon=0.05^\circ$ 继续试验。

2.4 算法性能分析

在前述参数设定的条件下分别测量所提出算法的用时与最大内存使用,其中最大内存使用是指该阶段中内存峰值与运行本研究算法前内存的差值,

结果为:总运行时间为 27.766 s,阶段 1 用时 25.078 s;最大内存使用为 36 MB(出现在阶段 1),输出时相较于执行算法前额外增加了 3 MB。阶段 1 用时较多且内存用量大是由点云的法线估计造成。

以枝干骨架为例,对比未作空洞修补与作过空洞修补的枝干点云建立出的效果(图 7),以枝干点云的根部质心作为根部骨架点改进前后定量分析的基准,由于计算根部骨架点的点云与根部点云质心是不同的,因而偏移距离总是 >0 ,而偏移距离越小,则与根部中心越契合。试验表明,未作空洞修补的根部骨架点偏移距离为 0.162 046 0,而作过空洞修补的根部骨架点偏移距离为 0.016 323 0,仅为前者的约 1/10。

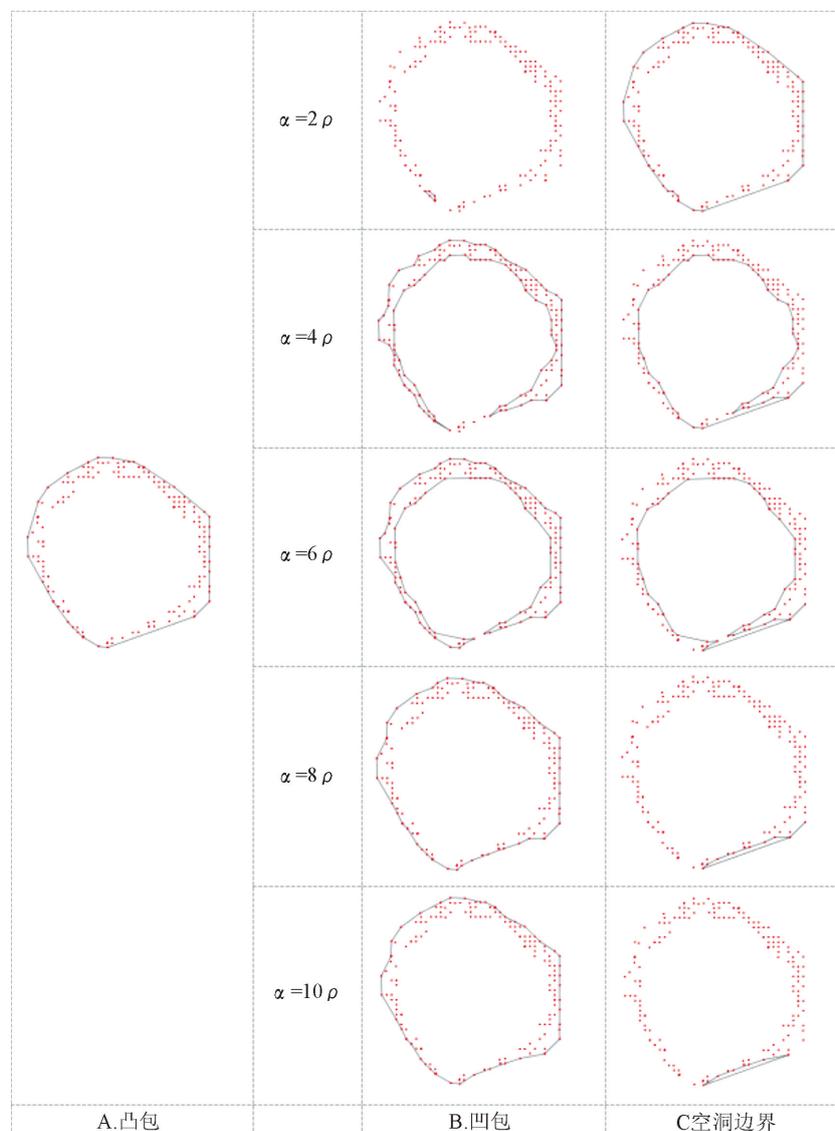


图 5 α 对空洞边界形状的影响

Fig. 5 Influences on the hole shape with different α

表 5 不同 k, ϵ 时的 $\rho^*, \Delta\rho, \xi, n^*$
Table 5 $\rho^*, \Delta\rho, \xi, n^*$ of different k, ϵ

$\epsilon / (^\circ)$	$k=0.6$	$k=1.2$	$k=1.8$	$k=2.4$
0.05	$\rho^* = 0.002\ 441$ $\Delta\rho = 0.004\ 191$ $\xi = 0.007\ 082$ $n^* = 1\ 982$	$\rho^* = 0.004\ 395$ $\Delta\rho = 0.002\ 237$ $\xi = 0.019\ 243$ $n^* = 746$	$\rho^* = 0.008\ 900$ $\Delta\rho = 0.002\ 268$ $\xi = 0.013\ 688$ $n^* = 255$	$\rho^* = 0.016\ 689$ $\Delta\rho = 0.010\ 057$ $\xi = 0.005\ 164$ $n^* = 93$
5	$\rho^* = 0.002\ 441$ $\Delta\rho = 0.004\ 191$ $\xi = 0.007\ 082$ $n^* = 1\ 982$	$\rho^* = 0.004\ 395$ $\Delta\rho = 0.002\ 237$ $\xi = 0.019\ 243$ $n^* = 746$	$\rho^* = 0.008\ 900$ $\Delta\rho = 0.002\ 268$ $\xi = 0.013\ 688$ $n^* = 255$	$\rho^* = 0.166\ 89$ $\Delta\rho = 0.010\ 057$ $\xi = 0.005\ 164$ $n^* = 93$
15	$\rho^* = 0.008\ 212$ $\Delta\rho = 0.001\ 58$ $\xi = 0.145\ 198$ $n^* = 93$	$\rho^* = 0.008\ 297$ $\Delta\rho = 0.001\ 665$ $\xi = 0.141\ 437$ $n^* = 80$	$\rho^* = 0.008\ 900$ $\Delta\rho = 0.002\ 268$ $\xi = 0.013\ 688$ $n^* = 255$	$\rho^* = 0.166\ 89$ $\Delta\rho = 0.010\ 057$ $\xi = 0.005\ 164$ $n^* = 93$
25	$\rho^* = 0.022\ 375$ $\Delta\rho = 0.015\ 743$ $\xi = 0.145\ 323$ $n^* = 23$	$\rho^* = 0.038\ 530$ $\Delta\rho = 0.031\ 898$ $\xi = 0.143\ 643$ $n^* = 16$	$\rho^* = 0.041\ 758$ $\Delta\rho = 0.035\ 126$ $\xi = 0.142\ 411$ $n^* = 15$	$\rho^* = 0.080\ 556$ $\Delta\rho = 0.073\ 924$ $\xi = 0.143\ 387$ $n^* = 7$

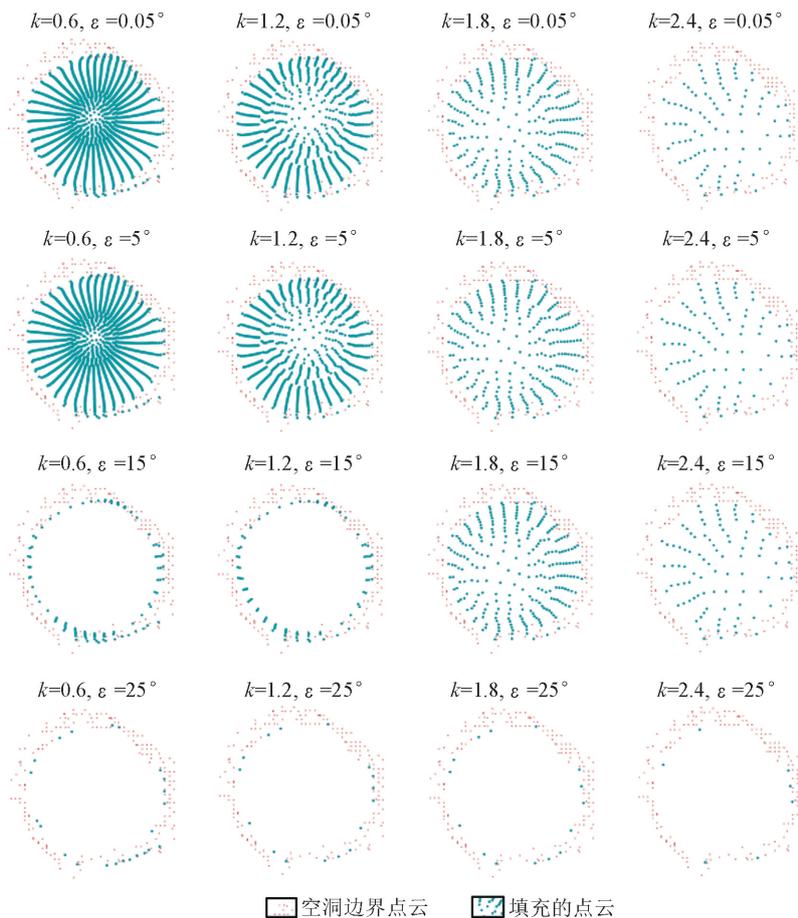


图 6 k, ϵ 对修补结果的影响

Fig. 6 Influences on filling effects with different k, ϵ

进一步选取同一样地其他美洲黑杨的枝干点云在各自相对最佳参数下进行空洞修复,它们的参数、枝干点云形态与修复前后的骨架见图 8。由图 8 可知,设置适当参数进行空洞修补后,骨架的根部偏移均有所改善。

因此,本方法能够明显改善树木枝干骨架根部中心偏移问题,证实了本研究的有效性和实用性。

3 结论与讨论

针对现有有点云修补算法不能直接适用于枝干根

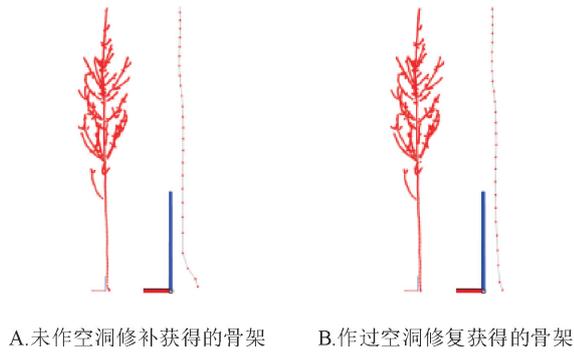


图 7 效果对比

Fig. 7 Effect comparison

部点云的空洞修补,提出的基于最小角度三角化填充的枝干点云根部空洞修补,通过试验验证其能够较为快速且较好地修复根部的空洞,但仍有改进的空间。

1)PCL 提供的点云法线估计用时和内存使用较高,更快的法线估计算法能够进一步降低二者的需求。

2)该算法需要设定的参数较多,并且某些参数根据经验所设定时并不能很好地得到预期的效果,而设置不合理的参数会严重影响到修补结果,因而需要研究者多次尝试方可确定。可以直接决定参数

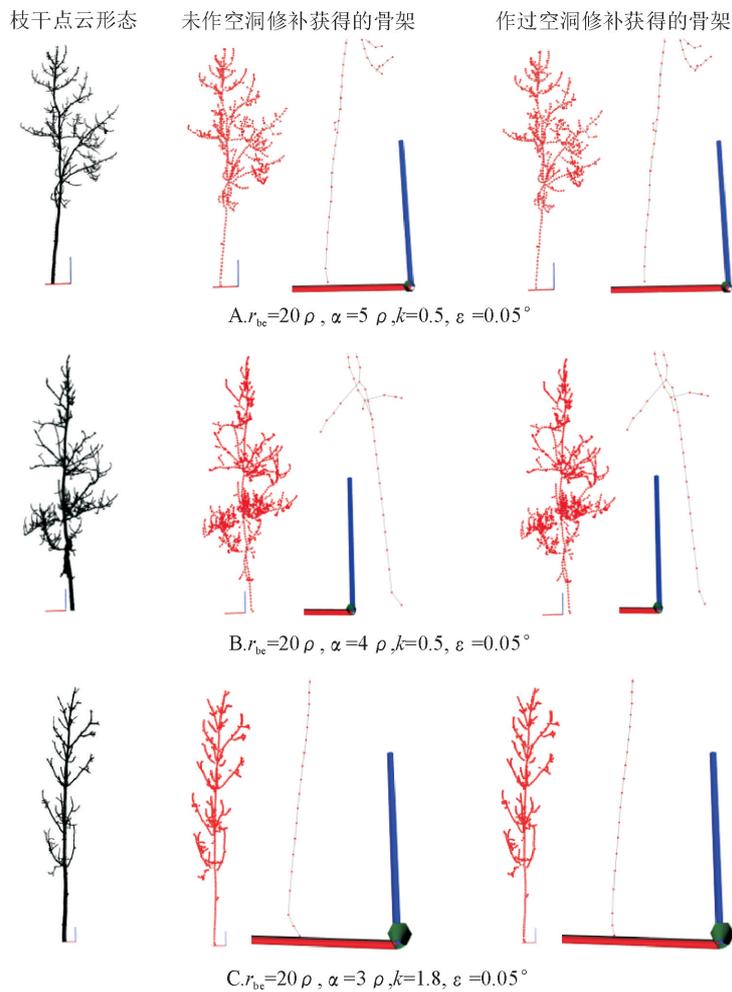


图 8 验证

Fig. 8 Validation

或给出合理的参数选取范围以帮助研究者决定的启发式算法。

由图 4 可知,搜索半径应为边界点云近乎在一个平面或近似为扁筒壁状,若难以找到合适的搜索半径,则选取 1 个畸变较小的边界点云时的搜索半径,并对边界点云中的点过滤使其满足形状上的要求。

此外,本研究也有助于其他不规则物体的点云中某一或某些平面缺损时的修补,相较于以往只对

平面点云或近似平面的地面点云拓宽了适用的场景。

参考文献:

[1] 曹伟,陈动,史玉峰,等. 激光雷达点云树木建模研究进展与展望[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2021,46(2):203-220.
CAO W, CHEN D, SHI Y F. Progress and prospect of LiDAR point clouds to 3D tree models[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2): 203-220. (in Chinese)

- [2] 夏明鹏,官凤英,范少辉,等. TLS技术在森林资源调查中的应用现状与展望[J]. 西北林学院学报,2018,33(3):238-244.
XIA M P, GUAN F Y, FAN S H, *et al.* Application status and prospect of TLS in forest resources inventory[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3):238-244. (in Chinese)
- [3] 石银涛. 基于点云的真实树木三维仿真理论与技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- [4] 余杰,吕品,郑昌文. Delaunay三角网构建方法比较研究[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(8):1158-1167.
YU J, LÜ P, ZHENG C W. A comparative research on methods of Delaunay triangulation[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(8):1158-1167. (in Chinese)
- [5] XU H, GOSSETT N, CHEN B. Knowledge and heuristic-based modeling of Laser-scanned trees [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(4):11-19.
- [6] 蒋刚. 基于SVM和空间投影的点云空洞修补方法[J]. 计算机工程, 2009, 35(22):269-271.
JIANG G. Pointcloud hole filling method based on SVM and space projection[J]. Computer Engineering, 2009, 35(22):269-271. (in Chinese)
- [7] 蔡香玉,杨林,吕海洋. 基于径向基函数神经网络的机载LiDAR点云空洞填补方法[J]. 南京师范大学学报:工程技术版, 2017, 17(3):57-62.
CAI X Y, YANG L, LÜ H Y. Filling method of airborne LiDAR point cloud hole based on the radial basis function neural network[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2017, 17(3):57-62. (in Chinese)
- [8] 王俊豪. 三维激光点云配准与摄影测量漏洞修补研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
- [9] 王丽英,夏玉红,徐艳,等. 一种机载LiDAR点云缺失数据的填补方法[J]. 测绘通报, 2018(10):27-31.
WANG L Y, XIA Y H, XU Y, *et al.* A method for filling absence data of airborne LiDAR point cloud[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(10):27-31. (in Chinese)
- [10] 孙晓东. 人体点云数据处理中若干问题的研究[D]. 北京:北京工业大学, 2012.
- [11] 陈相,童小华. 基于三角格网的点云空洞修补算法及精度研究[J]. 测绘通报, 2013(4):1-3.
CHEN X, TONG X H. Research on points cloud hole filling algorithm and accuracy in triangle mesh[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(4):1-3. (in Chinese)
- [12] 蒋映萱,温小荣,蒋佳文,等. 基于2期地基激光数据的杨树树干形变化监测[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5):140-145.
JIANG Y X, WEN X R, JIANG J W, *et al.* Observation on the changes of poplar stem based on 2-Phase data of terrestrial laser scan[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5):140-145. (in Chinese)
- [13] 蔡硕,邢艳秋,端木嘉龙. 背包式激光雷达滤除低强度点云提取林木胸径[J]. 森林工程, 2021, 37(5):12-19.
CAI S, XING Y Q, DUANMU J L. Extraction of DBH from filtering out low intensity point cloud by backpack laser scanning[J]. Forest Engineering, 2021, 37(5):12-19. (in Chinese)
- [14] RUSU R B. Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments[D]. Munich: The Technical University of Munich, 2009.
- [15] NGUYEN A, CANO A M, EDAHIRO M, *et al.* Fast euclidean cluster extraction using GPUs[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2020, 32(3):548-560.
- [16] ZWICK D S. Applications of orthogonal distance regression in metrology[C]. Leuven: proceedings of the second international workshop on recent advances in total least squares techniques and errors-in-variables modeling, 1997.
- [17] 程三友,李英杰. 一种新的最小凸包算法及其应用[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(5):43-45.
CHEN S Y, LI Y J. A new method of minimum convex hull and its application[J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(5):43-45. (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] LI M W. Shoelace formula: connecting the area of a polygon and vector cross product[J]. Mathematics Teacher, 2017, 8(110):631-636.