



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117315488 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 05

(21) 申请号 202311454780.2

G06V 10/44 (2022.01)

(22) 申请日 2023.11.03

G06V 10/80 (2022.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G06V 10/82 (2022.01)

申请公布号 CN 117315488 A

G06N 3/0464 (2023.01)

G06N 3/08 (2023.01)

(43) 申请公布日 2023.12.29

(56) 对比文件

(73) 专利权人 云南师范大学

CN 113657216 A, 2021.11.16

地址 650000 云南省昆明市呈贡区聚贤街
768号

CN 110910407 A, 2020.03.24

审查员 李安安

(72) 发明人 邓云程 张建鹏 王金亮 董品亮
刘嵩 奎梦云 段迪

(74) 专利代理机构 厦门致群财富专利代理事务
所(普通合伙) 35224

专利代理师 巫其荣

(51) Int. Cl.

G06V 20/10 (2022.01)

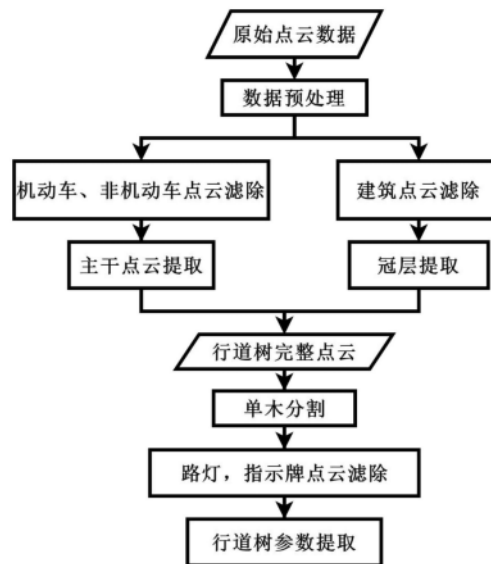
权利要求书3页 说明书8页 附图8页

(54) 发明名称

一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法,包括如下步骤:S1、对LiDAR原始点云数据进行预处理;S2、基于行道树形态学特征采用胸径圆拟合法,将机动车和非机动车点云滤除,进行主干点云提取;S3、基于点云领域特征,将建筑点云滤除,进行冠层点云提取;S4、将行道树的主干点云与冠层点云融合,得到行道树完整点云,并进行行道树单木分割;S5、采用相似检测法将路灯和指示牌点云滤除,得到城市行道树点云;本发明充分考虑行道树的形态学特征和在LiDAR中的行道树点云特征,将行道树分为单木主干和冠层两个部分,分别进行提取,再进行融合,有效剔除了真实场景中的噪声点云,可高效、准确的提取城市行道树。



1. 一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法,其特征在于:包括如下步骤:

S1、对LiDAR原始点云数据进行预处理;

S2、基于行道树形态学特征采用胸径圆拟合法,将机动车和非机动车点云滤除,进行主干点云提取;

步骤S2的具体过程为:

S21、对归一化后的行道树点云进行胸径高度位置的切片;

S22、对切片点云数据执行密度聚类分割;

S23、在聚类分割后的点云数据进行圆拟合,令 δ_i 的平方和最小,迭代计算求解拟合圆,拟合算法如公式(1)所示:

$$\delta_i = d_i^2 - r^2 = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2 - r^2 = x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c \quad (1)$$

其中, δ_i 表示点 (x_i, y_i) 到拟合圆边缘的距离与圆半径平方的差, d_i^2 表示点 (x_i, y_i) 到拟合圆边缘的距离, r 表示拟合圆的半径, x_i 表示点 (x_i, y_i) 的横坐标, y_i 表示点 (x_i, y_i) 的纵坐标, A 表示拟合圆圆心的横坐标, B 表示拟合圆圆心的纵坐标, a 、 b 和 c 表示待求解参数;

S24、判断各个拟合圆点云数量,当圆上点云数量小于圆内点云数量时,则剔除该拟合圆,其他拟合圆则保留,直到所有拟合圆判断结束,此时保留的拟合圆即为真实单木所在位置,圆心坐标即为单木坐标,拟合圆直径即为单木胸径;

S25、以所有保留拟合圆圆心作为中心点,以行道树平均胸径作为外扩距离建立立方体,筛选点云,所筛选点云即为主干点云,至此完成行道树主干点云的提取;

S3、基于点云领域特征,将建筑点云滤除,进行冠层点云提取;

步骤S3的具体过程为:

S31、通过协方差矩阵提取的特征值计算点云R邻域的平面特征和离散特征,利用平面特征结合欧氏距离聚类提取出建筑物点云,利用离散特征提取出基本的植被点云;

协方差矩阵如公式(1)和公式(3)所示:

$$Cov(p_i) = \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T = \sum_{j=0}^2 e_j \lambda_j e_j^T \quad (2)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (3)$$

平面特征如公式(4)所示:

$$P = \frac{\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_0}} \quad (4)$$

离散特征如公式(5)所示:

$$D = \frac{\sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_0}} \quad (5)$$

其中,点 p_i ($i=1, 2, 3 \dots n$)为点云集合C中的一点,则 p_i 与其点云R邻域内的点所组成的协方差矩阵如式(2)所示; n 表示点 p_i 的点云R邻域内点的数量, \bar{p} 表示该邻域内点集的几何

中心, j 表示特征值和特征向量的数量, $j=3$, e_j 和 λ_j 分别表示对应的特征向量和特征值, 其中 $\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2$, T 表示矩阵计算中的转置;

S32、将提取的建筑物点云作为约束条件, 在步骤S31提取的植被点云中通过最邻近距离搜索找到建筑边界点, 通过欧氏距离聚类提取出精确的植被点云;

S33、设置一定的高度阈值, 获取高度阈值以上的植被点云, 保证其既有完整的冠层的点云又有少量的主干点云;

S34、在步骤S32提取的植被点云中搜索一定范围内的点, 补全植被点云, 得到完整的冠层植被点云;

S4、将行道树的主干点云与冠层点云融合, 得到行道树完整点云, 并进行行道树单木分割;

步骤S4的具体过程为:

S41、将步骤S2与步骤S3中提取的行道树主干点云与冠层点云融合, 得到行道树完整点云;

S42、计算行道树完整点云法向量, 估计法向量Z轴分量, 根据Z轴分量阈值挑选主干种子点, 计算公式如公式(6)和公式(7)所示:

$$Cov(p_i) = \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T = \sum_{j=0}^2 e_j \lambda_j e_j^T \quad (6)$$

$$Z_n = |e_1 \times n| \quad (7)$$

其中, 点 p_i ($i=1, 2, 3 \dots n$) 为点云集合C中的一点, 则 p_i 与其点云R邻域内的点所组成的协方差矩阵如式(2)所示; n 表示点 p_i 的点云R邻域内点的数量, \bar{p} 表示该邻域内点集的几何中心, j 表示特征值和特征向量的数量, $j=3$, e_j 和 λ_j 分别表示对应的特征向量和特征值, Z_n 表示法向量在Z轴分量;

S43、通过主干种子点进行区域生长找到所有主干点;

S44、搜索主干点邻近点作为枝干种子点, 通过区域生长找到所有枝干点;

S45、执行最邻近搜索将枝叶点分配到所属枝干, 至此完成行道树单木分割;

S5、采用相似检测法将路灯和指示牌点云滤除, 得到城市行道树点云。

2. 如权利要求1所述的一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法, 其特征在于, 步骤S1中所述预处理包括对LiDAR原始点云数据进行去噪处理和高程归一化处理; 所述去噪处理的具体过程为计算每个点云至邻域点云的平均距离, 将平均距离超出设定阈值的点云标记为噪声点剔除; 所述高程归一化处理的具体过程为通过滤波分离地面点与非地面点, 查找非地面点对应最邻近的地面点, 对高程属性作差, 即得到高程归一化点云数据。

3. 如权利要求1所述的一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法, 其特征在于, 步骤S21中所述胸径高度位置为 $1.3m \pm 0.05m$; 步骤S25中所述行道树平均胸径为 $0.2m$ 。

4. 如权利要求1所述的一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法, 其特征在于, 步骤S33中所述高度阈值为 $1.5m$ 。

5. 如权利要求1所述的一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法, 其特征在于, 步骤S5的具体过程为:

S51、将分割后的点云主干部分进行不同高度多层切片,层数 ≥ 3 ;

S52、对每一单木每一层切片进行圆拟合;

S52、判断每一单木每一拟合圆的半径和圆心位置,若完全一致则将其所属类别剔除,实现路灯和指示牌点云剔除。

6.如权利要求5所述的一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法,其特征在于,步骤S5后还进行行道树单木参数反演;所述行道树单木参数反演分别计算第一枝下高、冠层体积和树高;

所述第一枝下高的计算过程为:

S61A、建立单木Z轴点云数量频次直方图;

S62A、检测直方图中点云数量第一突变点,第一突变点的计算公式如公式(8)所示:

$$\text{Count}_n - \text{Count}_{n-1} > \text{threshold} \quad (8)$$

其中, Count_n 表示第n层切片点云数, Count_{n-1} 表示第n-1层切片点云数,threshold表示突变阈值;

S63A、将突变点Z值反馈到真实点云中,即找到主干分叉位置,获取高度,即为单木第一枝下高;

所述冠层体积的计算采用多个局部凸包构建表面的办法计算多边形立方体体积,计算过程为:

S61B、根据计算的单木第一枝下高筛选点云,只保留枝下高位置以上点云,即为单木冠层点云;

S62B、在保留的冠层点云集Q中,任意选取一点 q_1 ,将其与距离小于阈值 $2d$ 的点构成新的点云集 Q_1 ,从 Q_1 中任取点 q_2 和 q_3 ,求出过 q_1 、 q_2 、 q_3 且半径为 d 的球的球心 o 和 o' ;

S63B、遍历点云集 Q_1 ,分别求出剩余点到球心 o 和 o' 的距离集合1和集合1',若集合1和集合1'中有一个集合的距离均 $> d$,则判断 q_1 、 q_2 、 q_3 为轮廓点,连接构成边界三角形,否则停止遍历,执行步骤S64B;

S64B、选择点云集 Q_1 中的下一组点,重复步骤S62B和S63B,直到点云集 Q_1 中的所有点判断结束,则输出面片集合A,集合中暴露的三角面片形成局部凸包;

S65B、选择点云集Q中的下一个点,执行步骤S62B-S64B,直到点云集Q中所有点结束,将所有局部凸包构建树冠表面,计算体积;

所述树高的计算过程为:

获取单木点云Z轴最大值和最小值作差即可求得树高,计算公式如公式(9)所示:

$$\text{Height} = \max(Z) - \min(Z) \quad (9)$$

其中,Height表示树高,max(Z)表示单木点云Z轴最大值,min(Z)表示单木点云Z轴最小值。

一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法

技术领域

[0001] 本发明涉及城市行道树提取技术领域,特别涉及一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法。

背景技术

[0002] 行道树作为城市绿地的重要组成部分,吸收道路机动车排放尾气、遮阴调温、固氮释氧、减少空气污染和噪声,可有效调节和改善城市小气候。行道树资源调查是城市生态环境研究的重要前提,是数字化城市建设的关键环节。目前的调查手段主要以人工抽样调查为主,调查具有一定的主观性,且耗费大量的人力物力。

[0003] 激光雷达(light detection and ranging,LiDAR)作为一种主动遥感技术,能够即时获取城市空间中的各要素立体信息,尤其对于行道树这类主干信息尤为关键的地物,LiDAR具有其他探测手段无法比拟的优势,渐渐已经成为林业信息监测的主要手段。然而,激光雷达传感器在获取点云信息时具有无目标指向性,在真实的城市空间中,多种地物要素并存,所获取的数据中包含所有的地物点云,使得纯净行道树从复杂街道场景中提取难度增大。

[0004] 当前的行道树提取方法包括借助传统机器学习的算法,如支持向量机、K近邻、决策树、随机森林等算法,当然也包括深度学习,如PoinNet++、BP神经网络等。但是这些方法多基于单一分类器,而且需要大量的训练标签,底层原理复杂难懂,对数据质量要求较高,处理过程难以形象地可视化表达,缺乏对行道树本身及其周围环境形态学特征的挖掘,处理结果受不同环境的影响较大,提取精度仍然有较大的提升空间。因此,探索一种高效、准确地提取和量化城市行道树信息方法对于城市绿地空间规划和城市绿地碳汇核算具有科学指导意义和实践价值。

发明内容

[0005] 为解决上述问题,本发明提供了一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法,本发明充分考虑行道树的形态学特征和在LiDAR中的行道树点云特征,将行道树分为单木主干和冠层两个部分,分别进行提取,再进行融合,有效剔除了真实场景中的建筑、机动车、非机动车、路灯和指示牌等噪声点云,将完整行道树点云完整提取,再通过区域生长分割算法对行道树进行单木分割,进而融合点云特征和行道树形态学特征完成行道树单木参数的反演,可高效、准确的提取城市行道树。

[0006] 本发明采用以下技术方案:

[0007] 一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法,包括如下步骤:

[0008] S1、对LiDAR原始点云数据进行预处理;

[0009] S2、基于行道树形态学特征采用胸径圆拟合法,将机动车和非机动车点云滤除,进行主干点云提取;

[0010] S3、基于点云领域特征,将建筑点云滤除,进行冠层点云提取;

[0011] S4、将行道树的主干点云与冠层点云融合,得到行道树完整点云,并进行行道树单木分割;

[0012] S5、采用相似检测法将路灯和指示牌点云滤除,得到城市行道树点云。

[0013] 优选地,步骤S1中所述预处理包括对LiDAR原始点云数据进行去噪处理和高程归一化处理;所述去噪处理的具体过程为计算每个点云至邻域点云的平均距离,将平均距离超出设定阈值的点云标记为噪声点剔除;所述高程归一化处理的具体过程为通过滤波分离地面点与非地面点,查找非地面点对应最邻近的地面点,对高程属性作差,即得到高程归一化点云数据。

[0014] 优选地,步骤S2的具体过程为:

[0015] S21、对归一化后的行道树点云进行胸径高度位置的切片;

[0016] S22、对切片点云数据执行密度聚类分割;

[0017] S23、在聚类分割后的点云数据进行圆拟合,令 δ_i 的平方和最小,迭代计算求解拟合圆,拟合算法如公式(1)所示:

$$[0018] \quad \delta_i = d_i^2 - r^2 = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2 - r^2 = x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c \quad (1)$$

[0019] 其中, δ_i 表示点 (x_i, y_i) 到拟合圆边缘的距离与圆半径平方的差, d_i^2 表示点 (x_i, y_i) 到拟合圆边缘的距离, r 表示拟合圆的半径, x_i 表示点 (x_i, y_i) 的横坐标, y_i 表示点 (x_i, y_i) 的纵坐标, A 表示拟合圆圆心的横坐标, B 表示拟合圆圆心的纵坐标, a 、 b 和 c 表示待求解参数;

[0020] S24、判断各个拟合圆点云数量,当圆上点云数量小于圆内点云数量时,则剔除该拟合圆,其他拟合圆则保留,直到所有拟合圆判断结束,此时保留的拟合圆即为真实单木所在位置,圆心坐标即为单木坐标,拟合圆直径即为单木胸径;

[0021] S25、以所有保留拟合圆圆心作为中心点,以行道树平均胸径作为外扩距离建立立方体,筛选点云,所筛选点云即为主干点云,至此完成行道树主干点云的提取。

[0022] 优选地,步骤S21中所述胸径高度位置为 $1.3\text{m} \pm 0.05\text{m}$;步骤S25中所述行道树平均胸径为 0.2m 。

[0023] 优选地,步骤S3的具体过程为:

[0024] S31、通过协方差矩阵提取的特征值计算点云 R 邻域的平面特征和离散特征,利用平面特征结合欧氏距离聚类提取出建筑物点云,利用离散特征提取出基本的植被点云;

[0025] 协方差矩阵如公式(1)和公式(3)所示:

$$[0026] \quad Cov(p_i) = \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T = \sum_{j=0}^2 e_j \lambda_j e_j^T \quad (2)$$

$$[0027] \quad \bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (3)$$

[0028] 平面特征如公式(4)所示:

$$[0029] \quad P = \frac{\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_0}} \quad (4)$$

[0030] 离散特征如公式(5)所示:

$$[0031] \quad D = \frac{\sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_0}} \quad (5)$$

[0032] 其中,点 p_i ($i=1,2,3\cdots n$) 为点云集合 C 中的一点,则 p_i 与其点云 R 邻域内的点所组成的协方差矩阵如式(2)所示; n 表示点 p_i 的点云 R 邻域内点的数量, \bar{p} 表示该邻域内点集的几何中心, j 表示特征值和特征向量的数量, $j=3$, e_j 和 λ_j 分别表示对应的特征向量和特征值,其中 $\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2$, T 表示矩阵计算中的转置;

[0033] S32、将提取的建筑物点云作为约束条件,在步骤S31提取的植被点云中通过最邻近距离搜索找到建筑边界点,通过欧氏距离聚类提取出精确的植被点云;

[0034] S33、设置一定的高度阈值,获取高度阈值以上的植被点云,保证其既有完整的冠层的点云又有少量的主干点云;

[0035] S34、在步骤S32提取的植被点云中搜索一定范围内的点,补全植被点云,得到完整的冠层植被点云。

[0036] 优选地,步骤S33中所述高度阈值为1.5m。

[0037] 优选地,步骤S4的具体过程为:

[0038] S41、将步骤S2与步骤S3中提取的行道树主干点云与冠层点云融合,得到行道树完整点云;

[0039] S42、计算行道树完整点云法向量,估计法向量 Z 轴分量,根据 Z 轴分量阈值挑选主干种子点,计算公式如公式(6)和公式(7)所示:

$$[0040] \quad Cov(p_i) = \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T = \sum_{j=0}^2 e_j \lambda_j e_j^T \quad (6)$$

$$[0041] \quad Z_n = |e_1 \times n| \quad (7)$$

[0042] 其中,点 p_i ($i=1,2,3\cdots n$) 为点云集合 C 中的一点,则 p_i 与其点云 R 邻域内的点所组成的协方差矩阵如式(2)所示; n 表示点 p_i 的点云 R 邻域内点的数量, \bar{p} 表示该邻域内点集的几何中心, j 表示特征值和特征向量的数量, $j=3$, e_j 和 λ_j 分别表示对应的特征向量和特征值, Z_n 表示法向量在 Z 轴分量;

[0043] S43、通过主干种子点进行区域生长找到所有主干点;

[0044] S44、搜索主干点邻近点作为枝干种子点,通过区域生长找到所有枝干点;

[0045] S45、执行最邻近搜索将枝叶点分配到所属枝干,至此完成行道树单木分割。

[0046] 优选地,步骤S5的具体过程为:

[0047] S51、将分割后的点云主干部分进行不同高度多层切片,层数 ≥ 3 ;

[0048] S52、对每一单木每一层切片进行圆拟合;

[0049] S52、判断每一单木每一拟合圆的半径和圆心位置,若完全一致则将其所属类别剔除,实现路灯和指示牌点云剔除。

[0050] 优选地,步骤S5后还进行行道树单木参数反演;所述行道树单木参数反演分别计算第一枝下高、冠层体积和树高;

[0051] 所述第一枝下高的计算过程为:

[0052] S61A、建立单木 Z 轴点云数量频次直方图;

[0053] S62A、检测直方图中点云数量第一突变点,第一突变点的计算公式如公式(8)所

示:

[0054] $\text{Count}_n - \text{Count}_{n-1} > \text{threshold}$ (8)

[0055] 其中, Count_n 表示第 n 层切片点云数, Count_{n-1} 表示第 $n-1$ 层切片点云数, threshold 表示突变阈值;

[0056] S63A、将突变点 Z 值反馈到真实点云中, 即找到主干分叉位置, 获取高度, 即为单木第一枝下高;

[0057] 所述冠层体积的计算采用多个局部凸包构建表面的办法计算多边形立方体体积, 计算过程为:

[0058] S61B、根据计算的单木第一枝下高筛选点云, 只保留枝下高位置以上点云, 即为单木冠层点云;

[0059] S62B、在保留的冠层点云集 Q 中, 任意选取一点 q_1 , 将其与距离小于阈值 $2d$ 的点构成新的点云集 Q_1 , 从 Q_1 中任取点 q_2 和 q_3 , 求出过 q_1 、 q_2 、 q_3 且半径为 d 的球的球心 o 和 o' ;

[0060] S63B、遍历点云集 Q_1 , 分别求出剩余点到球心 o 和 o' 的距离集合 l 和集合 l' , 若集合 l 和集合 l' 中有一个集合的距离均 $> d$, 则判断 q_1 、 q_2 、 q_3 为轮廓点, 连接构成边界三角形, 否则停止遍历, 执行步骤 S64B;

[0061] S64B、选择点云集 Q_1 中的下一组点, 重复步骤 S62B 和 S63B, 直到点云集 Q_1 中的所有点判断结束, 则输出面片集合 A , 集合中暴露的三角面片形成局部凸包;

[0062] S65B、选择点云集 Q 中的下一个点, 执行步骤 S62B-S64B, 直到点云集 Q 中所有点结束, 将所有局部凸包构建树冠表面, 计算体积;

[0063] 所述树高的计算过程为:

[0064] 获取单木点云 Z 轴最大值和最小值作差即可求得树高, 计算公式如公式 (9) 所示:

[0065] $\text{Height} = \max(Z) - \min(Z)$ (9)

[0066] 其中, Height 表示树高, $\max(Z)$ 表示单木点云 Z 轴最大值, $\min(Z)$ 表示单木点云 Z 轴最小值。

[0067] 采用上述技术方案后, 本发明与背景技术相比, 具有如下优点: 本发明针对城市街道场景点云数据, 构建了较为完整的街道行道树提取流程和单木参数反演方法。其中, 本发明充分利用了激光点云法向量特征完成了行道树冠层的提取; 本发明利用行道树特殊的形态学特征, 通过圆拟合方法快速确定行道树单木位置, 并通过拟合圆点云数量判断剔除了城市场景中复杂的非机动车点云和机动车点云; 本发明结合点云特征和行道树形态学特征构建了区域生长分割算法对单木进行分割取得较好结果; 本发明所构建的方法完全基于点云特征和目标物形态学特征, 能够适用于车载激光点云和地基激光点云, 能够为城市街区行道树快速提取提供技术支持, 为城市碳储量精确估算提供科学依据。

附图说明

[0068] 图1为本发明的技术流程图;

[0069] 图2为本发明的预处理后的点云数据图;

[0070] 图3为本发明的切片点云密度聚类分割图;

[0071] 图4为本发明的圆拟合图;

[0072] 图5为本发明的误检拟合圆剔除图;

- [0073] 图6为本发明的行道树主干提取图；
 [0074] 图7为本发明的建筑物点云图；
 [0075] 图8为本发明的粗糙植被点云图；
 [0076] 图9为本发明的精确植被点云图；
 [0077] 图10为本发明的完整植被冠层点云图；
 [0078] 图11为本发明的主干-冠层融合后两个角度的完整行道树点云图；
 [0079] 图12为本发明的单木分割图；
 [0080] 图13为本发明的单木Z轴点云数量频次直方图及突变位置图；
 [0081] 图14为本发明的枝下高位置点云示意图；
 [0082] 图15为本发明的单木冠层点云图；
 [0083] 图16为本发明的树冠表面凸包图。

具体实施方式

[0084] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0085] 实施例

[0086] 如图1至图16所示,一种基于点云特征和形态学特征的城市行道树提取方法,包括如下步骤:

[0087] S1、对LiDAR原始点云数据进行预处理;

[0088] 步骤S1中所述预处理包括对LiDAR原始点云数据进行去噪处理和高程归一化处理;所述去噪处理的具体过程为计算每个点云至邻域点云的平均距离,将平均距离超出设定阈值的点云标记为噪声点剔除;所述高程归一化处理的具体过程为通过滤波分离地面点与非地面点,查找非地面点对应最邻近的地面点,对高程属性作差,即得到高程归一化点云数据;

[0089] S2、基于行道树形态学特征采用胸径圆拟合法,将机动车和非机动车点云滤除,进行主干点云提取;

[0090] 步骤S2的具体过程为:

[0091] S21、对归一化后的行道树点云进行胸径高度位置的切片;

[0092] S22、对切片点云数据执行密度聚类分割;

[0093] S23、在聚类分割后的点云数据进行圆拟合,令 δ_i 的平方和最小,迭代计算求解拟合圆,拟合算法如公式(1)所示:

$$[0094] \quad \delta_i = d_i^2 - r^2 = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2 - r^2 = x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c \quad (1)$$

[0095] 其中, δ_i 表示点 (x_i, y_i) 到拟合圆边缘的距离与圆半径平方的差, d_i^2 表示点 (x_i, y_i) 到拟合圆边缘的距离, r 表示拟合圆的半径, x_i 表示点 (x_i, y_i) 的横坐标, y_i 表示点 (x_i, y_i) 的纵坐标, A 表示拟合圆圆心的横坐标, B 表示拟合圆圆心的纵坐标, a 、 b 和 c 表示待求解参数;

[0096] S24、判断各个拟合圆点云数量,当圆上点云数量小于圆内点云数量时,则剔除该拟合圆,其他拟合圆则保留,直到所有拟合圆判断结束,此时保留的拟合圆即为真实单木所

在位置,圆心坐标即为单木坐标,拟合圆直径即为单木胸径;

[0097] S25、以所有保留拟合圆圆心作为中心点,以行道树平均胸径作为外扩距离建立立方体,筛选点云,所筛选点云即为主干点云,至此完成行道树主干点云的提取;

[0098] 步骤S21中所述胸径高度位置为 $1.3\text{m} \pm 0.05\text{m}$;步骤S25中所述行道树平均胸径为 0.2m ;

[0099] S3、基于点云领域特征,将建筑点云滤除,进行冠层点云提取;

[0100] 步骤S3的具体过程为:

[0101] S31、通过协方差矩阵提取的特征值计算点云R邻域的平面特征和离散特征,利用平面特征结合欧氏距离聚类提取出建筑物点云,利用离散特征提取出基本的植被点云;

[0102] 协方差矩阵如公式(1)和公式(3)所示:

$$[0103] \quad \text{Cov}(p_i) = \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T = \sum_{j=0}^2 e_j \lambda_j e_j^T \quad (2)$$

$$[0104] \quad \bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (3)$$

[0105] 平面特征如公式(4)所示:

$$[0106] \quad P = \frac{\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_0}} \quad (4)$$

[0107] 离散特征如公式(5)所示:

$$[0108] \quad D = \frac{\sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_0}} \quad (5)$$

[0109] 其中,点 p_i ($i=1,2,3 \cdots n$)为点云集合C中的一点,则 p_i 与其点云R邻域内的点所组成的协方差矩阵如式(2)所示; n 表示点 p_i 的点云R邻域内点的数量, \bar{p} 表示该邻域内点集的几何中心, j 表示特征值和特征向量的数量, $j=3$, e_j 和 λ_j 分别表示对应的特征向量和特征值,其中 $\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2$, T 表示矩阵计算中的转置;

[0110] S32、将提取的建筑物点云作为约束条件,在步骤S31提取的植被点云中通过最邻近距离搜索找到建筑边界点,通过欧氏距离聚类提取出精确的植被点云;

[0111] S33、设置一定的高度阈值,获取高度阈值以上的植被点云,保证其既有完整的冠层的点云又有少量的主干点云;

[0112] 步骤S33中所述高度阈值为 1.5m ;

[0113] S34、在步骤S32提取的植被点云中搜索一定范围内的点,补全植被点云,得到完整的冠层植被点云;

[0114] S4、将行道树的主干点云与冠层点云融合,得到行道树完整点云,并进行行道树单木分割;

[0115] 步骤S4的具体过程为:

[0116] S41、将步骤S2与步骤S3中提取的行道树主干点云与冠层点云融合,得到行道树完整点云;

[0117] S42、计算行道树完整点云法向量,估计法向量Z轴分量,根据Z轴分量阈值挑选主干种子点,计算公式如公式(6)和公式(7)所示:

$$[0118] \quad Cov(p_i) = \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T = \sum_{j=0}^2 e_j \lambda_j e_j^T \quad (6)$$

$$[0119] \quad Z_n = |e_1 \times n| \quad (7)$$

[0120] 其中,点 p_i ($i=1,2,3\cdots n$)为点云集合C中的一点,则 p_i 与其点云R邻域内的点所组成的协方差矩阵如式(2)所示; n 表示点 p_i 的点云R邻域内点的数量, \bar{p} 表示该邻域内点集的几何中心, j 表示特征值和特征向量的数量, $j=3$, e_j 和 λ_j 分别表示对应的特征向量和特征值, Z_n 表示法向量在Z轴分量;

[0121] S43、通过主干种子点进行区域生长找到所有主干点;

[0122] S44、搜索主干点邻近点作为枝干种子点,通过区域生长找到所有枝干点;

[0123] S45、执行最邻近搜索将枝叶点分配到所属枝干,至此完成行道树单木分割;

[0124] S5、采用相似检测法将路灯和指示牌点云滤除,得到城市行道树点云;

[0125] 步骤S5的具体过程为:

[0126] S51、将分割后的点云主干部分进行不同高度多层切片,层数 ≥ 3 ;

[0127] S52、对每一单木每一层切片进行圆拟合;

[0128] S52、判断每一单木每一拟合圆的半径和圆心位置,若完全一致则将其所属类别剔除,实现路灯和指示牌点云剔除;

[0129] 步骤S5后还进行行道树单木参数反演;所述行道树单木参数反演分别计算第一枝下高、冠层体积和树高;

[0130] 所述第一枝下高的计算过程为:

[0131] S61A、建立单木Z轴点云数量频次直方图;

[0132] S62A、检测直方图中点云数量第一突变点,第一突变点的计算公式如公式(8)所示:

$$[0133] \quad Count_n - Count_{n-1} > threshold \quad (8)$$

[0134] 其中, $Count_n$ 表示第 n 层切片点云数, $Count_{n-1}$ 表示第 $n-1$ 层切片点云数, $threshold$ 表示突变阈值;

[0135] S63A、将突变点Z值反馈到真实点云中,即找到主干分叉位置,获取高度,即为单木第一枝下高;

[0136] 所述冠层体积的计算采用多个局部凸包构建表面的办法计算多边形立方体体积,计算过程为:

[0137] S61B、根据计算的单木第一枝下高筛选点云,只保留枝下高位置以上点云,即为单木冠层点云;

[0138] S62B、在保留的冠层点云集Q中,任意选取一点 q_1 ,将其与距离小于阈值 $2d$ 的点构成新的点云集 Q_1 ,从 Q_1 中任取点 q_2 和 q_3 ,求出过 q_1 、 q_2 、 q_3 且半径为 d 的球的球心 o 和 o' ;

[0139] S63B、遍历点云集 Q_1 ,分别求出剩余点到球心 o 和 o' 的距离集合 l 和集合 l' ,若集合 l 和集合 l' 中有一个集合的距离均 $> d$,则判断 q_1 、 q_2 、 q_3 为轮廓点,连接构成边界三角形,否则停止遍历,执行步骤S64B;

[0140] S64B、选择点云集 Q_1 中的下一组点,重复步骤S62B和S63B,直到点云集 Q_1 中的所有点判断结束,则输出面片集合A,集合中暴露的三角面片形成局部凸包;

[0141] S65B、选择点云集Q中的下一个点,执行步骤S62B-S64B,直到点云集Q中所有点结

束,将所有局部凸包构建树冠表面,计算体积;

[0142] 所述树高的计算过程为:

[0143] 获取单木点云Z轴最大值和最小值作差即可求得树高,计算公式如公式(9)所示:

$$[0144] \text{Height} = \max(Z) - \min(Z) \quad (9)$$

[0145] 其中,Height表示树高,max(Z)表示单木点云Z轴最大值,min(Z)表示单木点云Z轴最小值。

[0146] 以上所述,仅为本发明较佳的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

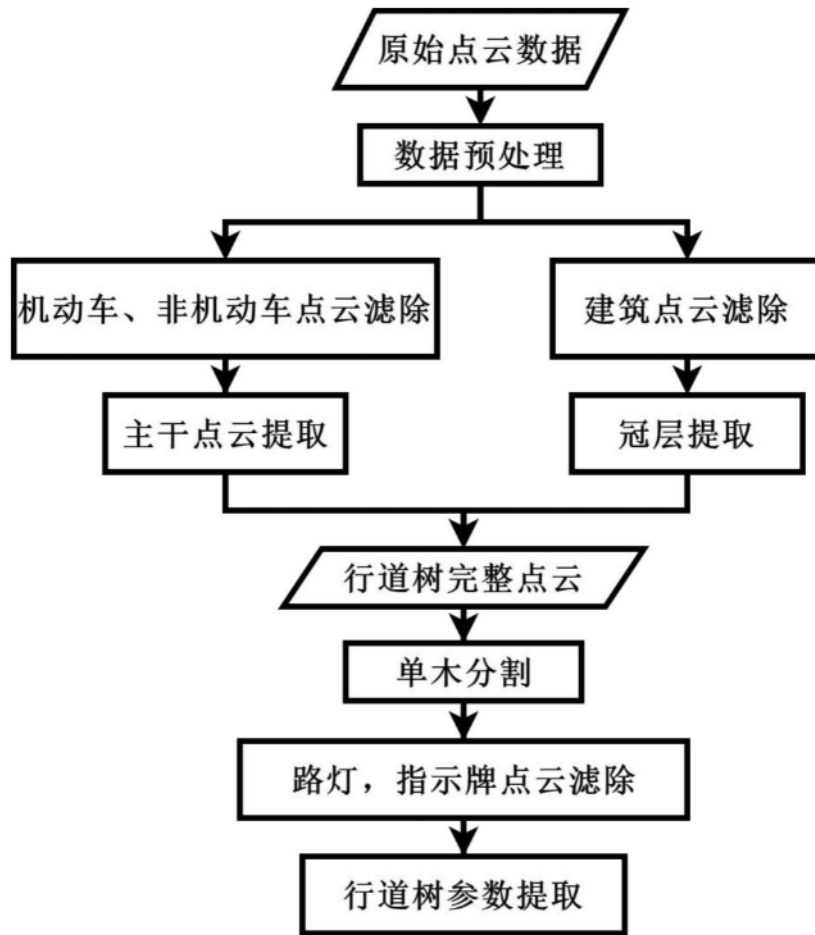


图1

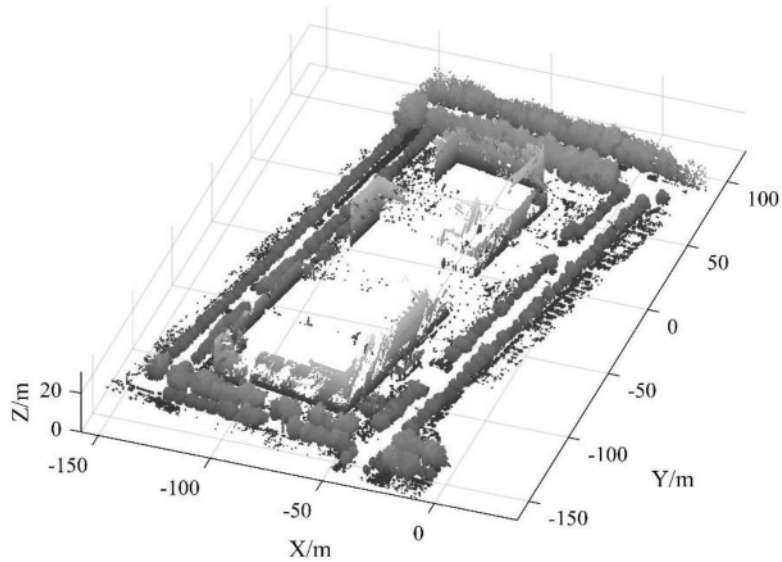


图2

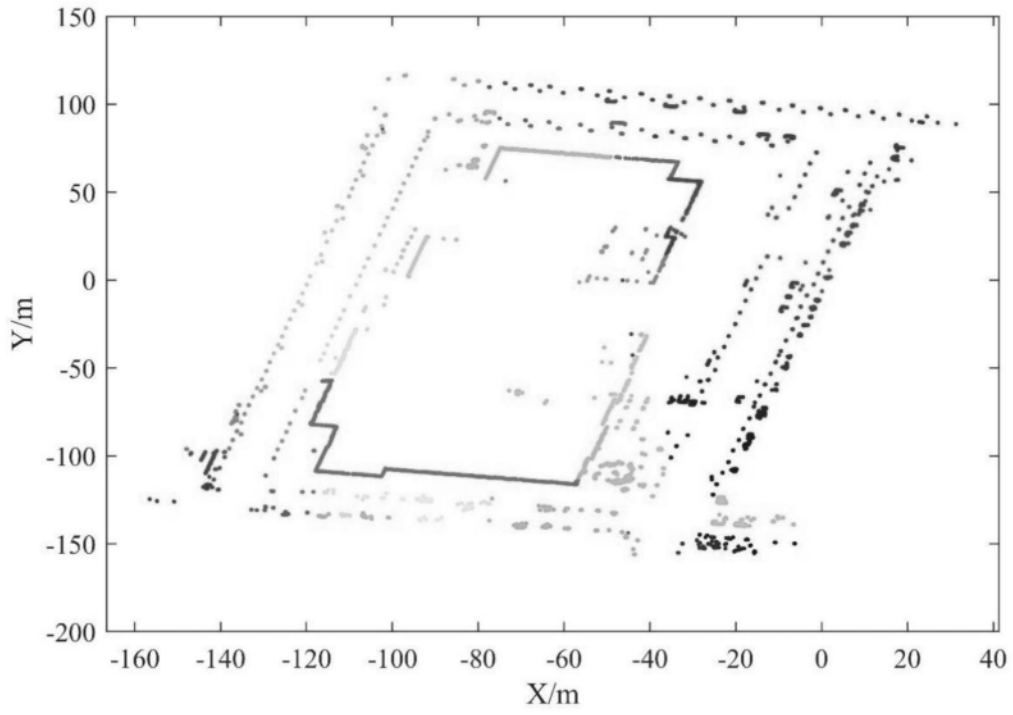


图3

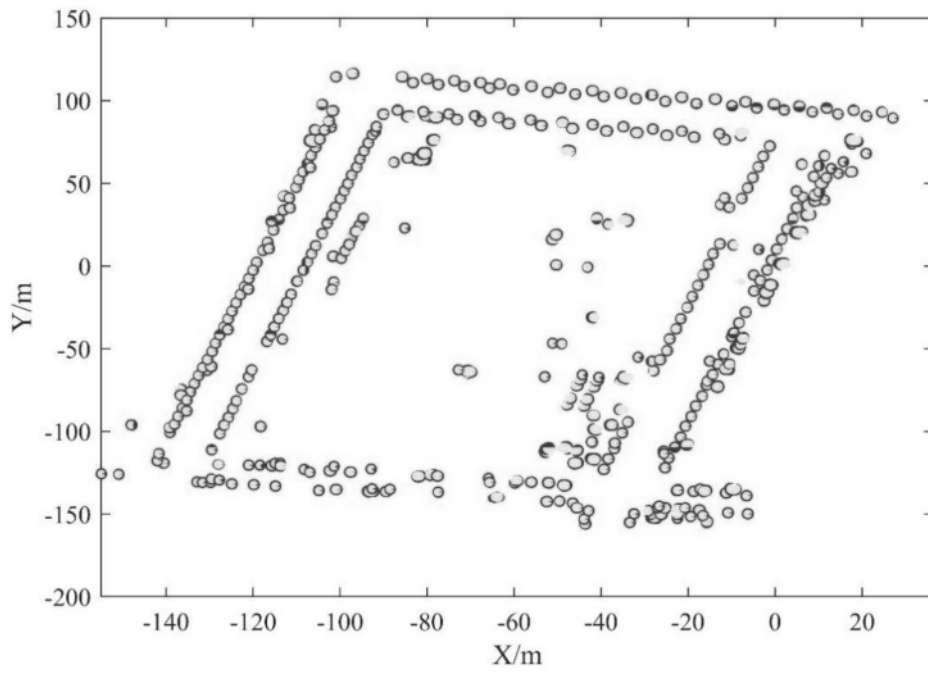


图4

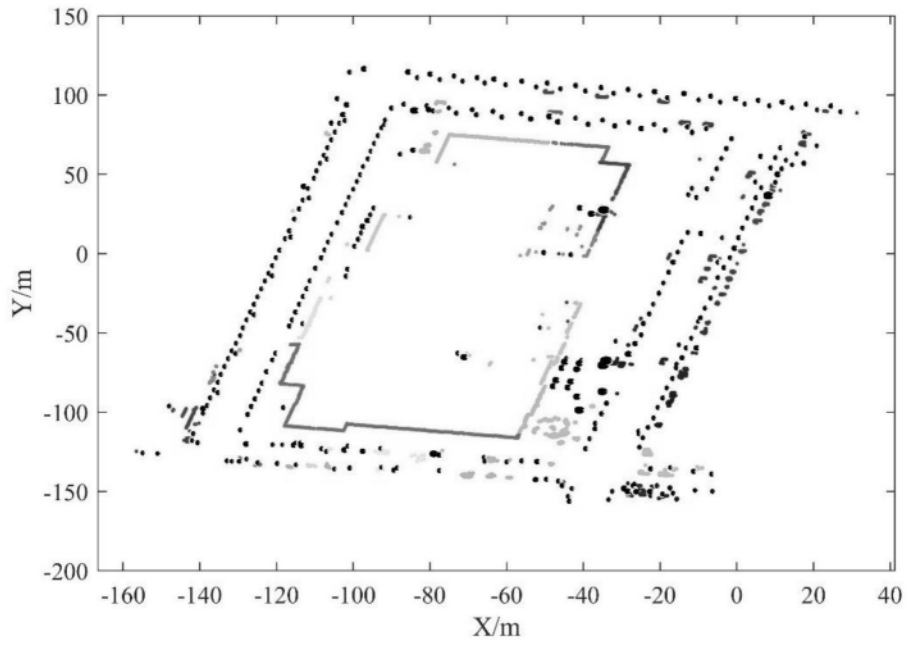


图5

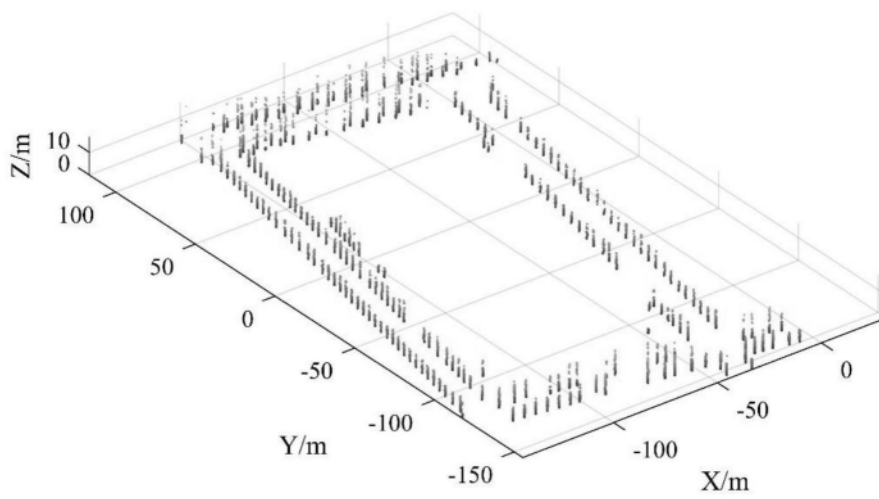


图6

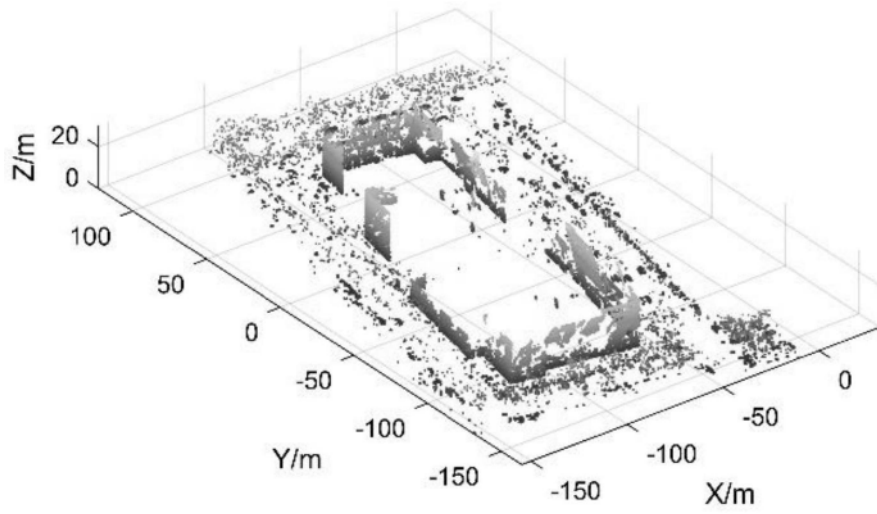


图7

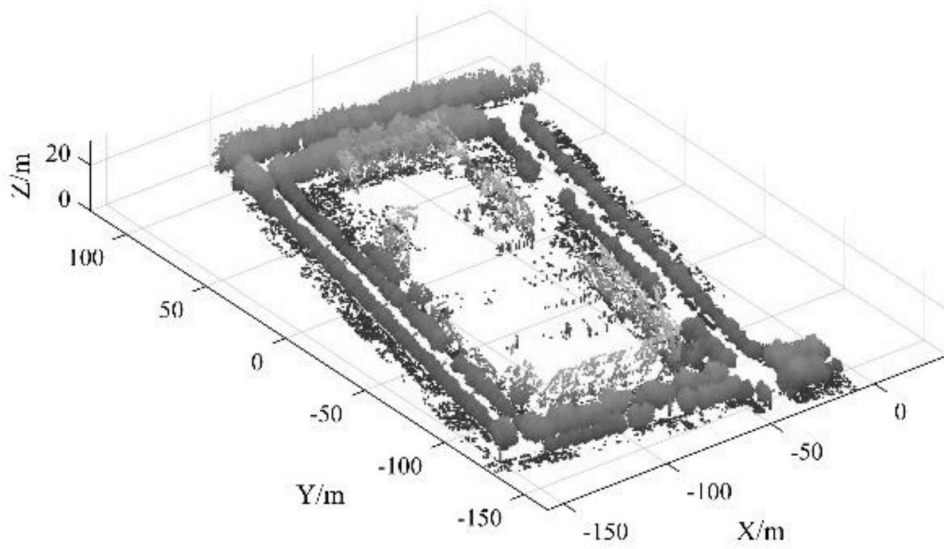


图8

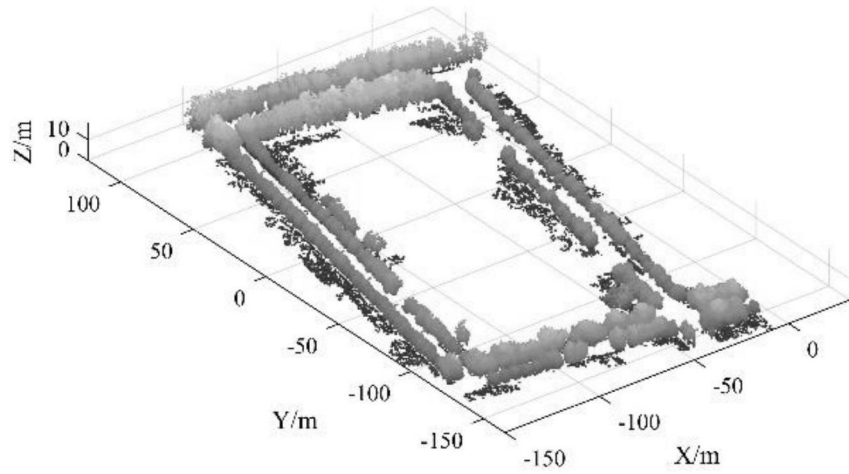


图9

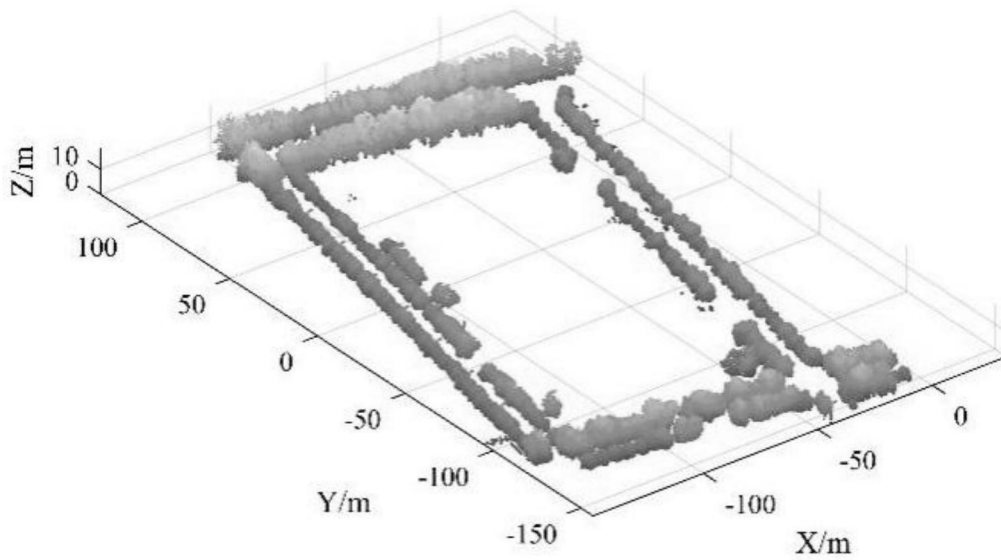


图10

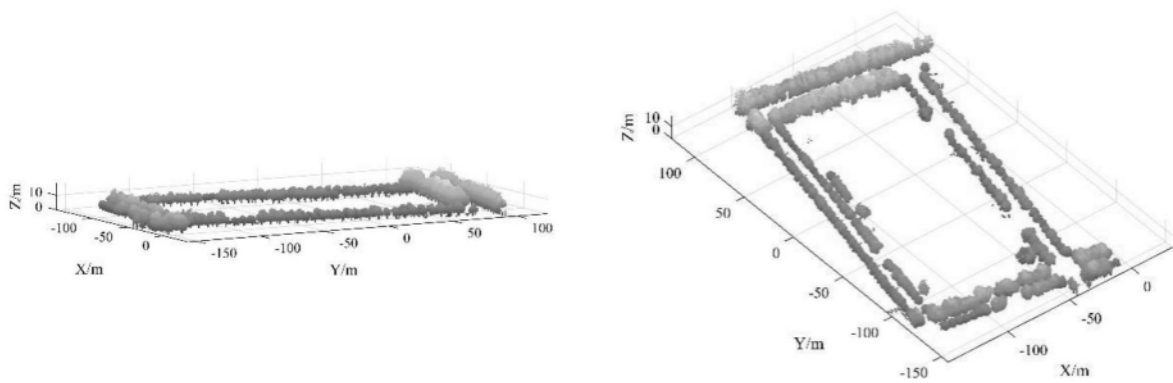


图11

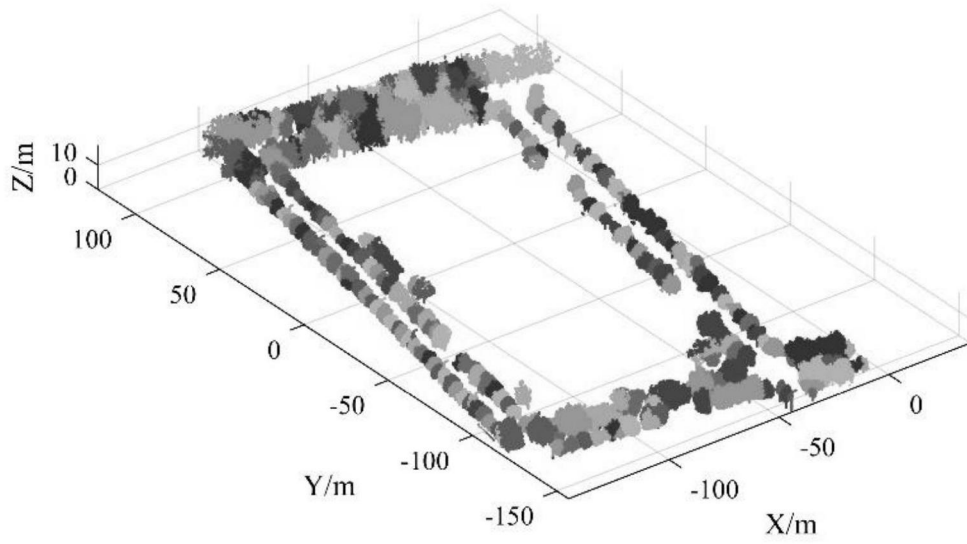


图12

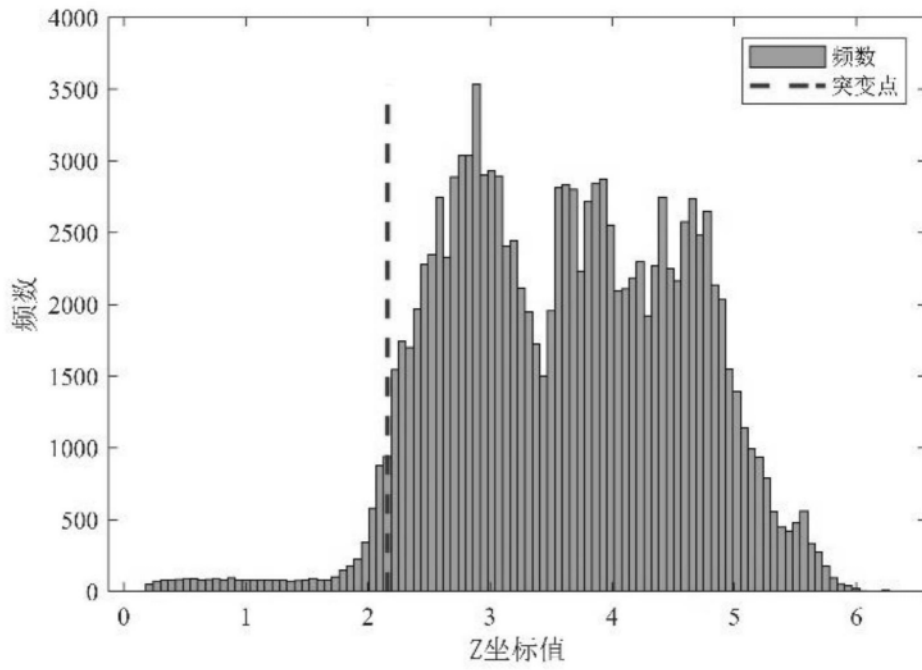


图13

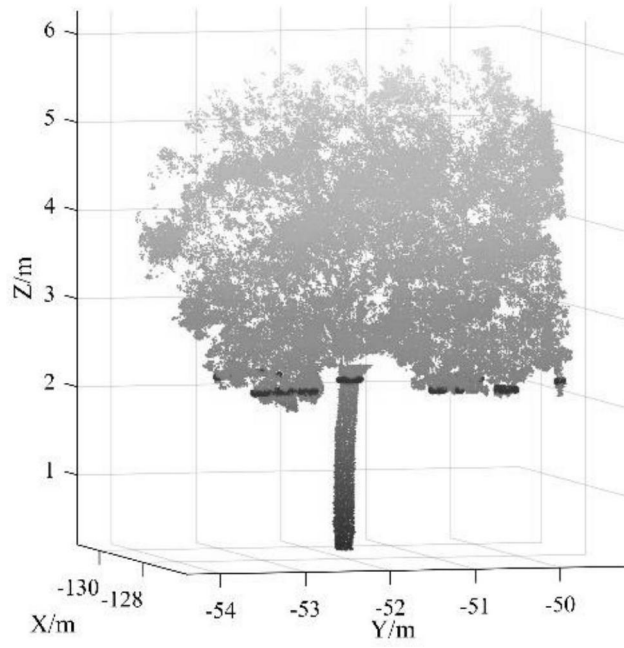


图14

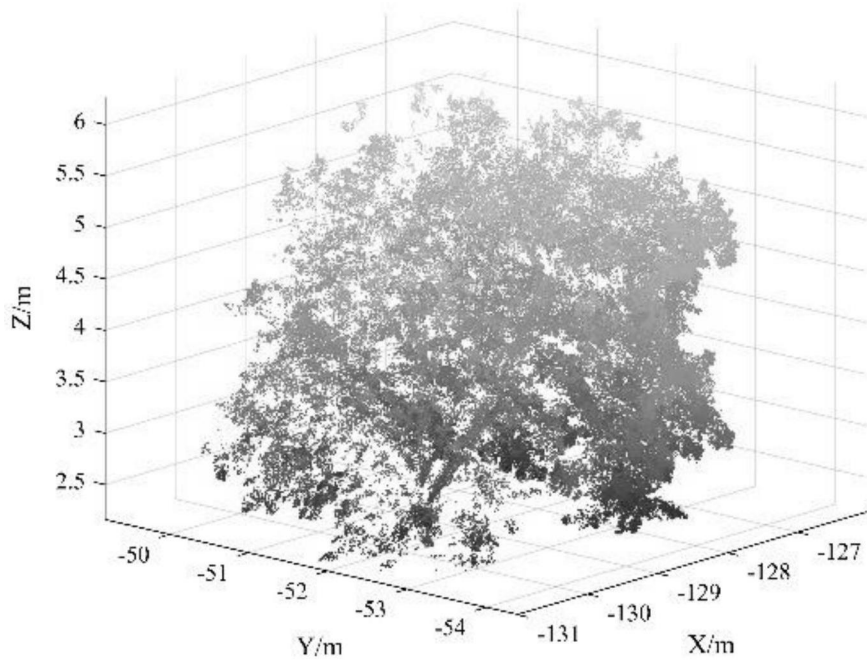


图15

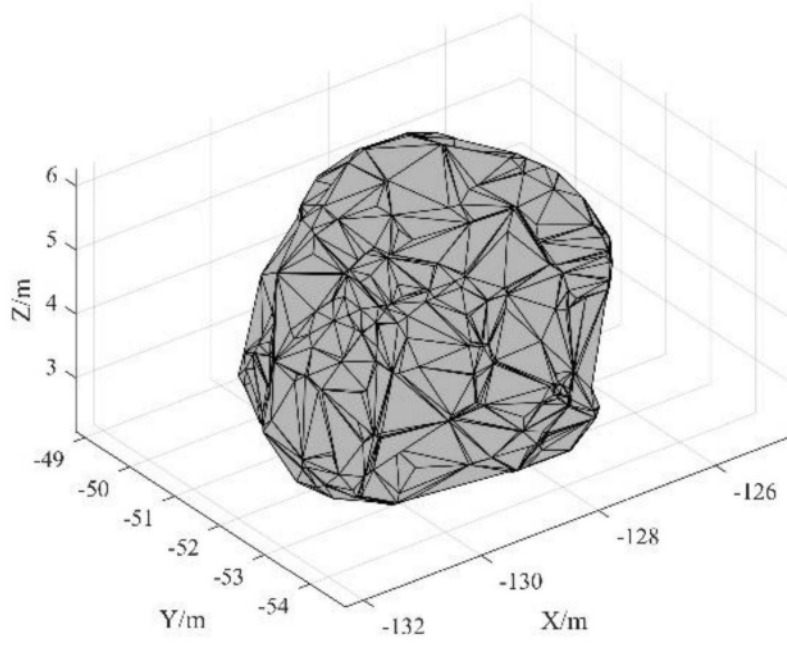


图16