

面向虚拟地理环境构建的树木模型高保真三维重建

王伟玺, 黄鸿盛, 杜思齐, 李晓明, 谢林甫, 洪林平,
郭仁忠, 汤圣君

深圳大学 建筑与城市规划学院智慧城市研究院 深圳市城市数字孪生技术重点实验室 广东省粤港澳
智慧城市联合实验室, 深圳 518061

摘要: 树木是城市地物的重要组成部分, 树木三维模型是实景三维建设、虚拟地理环境构建以及数字孪生城市建设不可或缺的内容。目前树木实景三维模型主要基于影像或者模型库的方式进行重建, 前者表现为杂乱的三角网团簇, 后者在几何表达和真实感方面与真实情况差距较大, 这使得重建后的树木模型难以直接用于智慧城市的实际应用。因此, 本文面向虚拟地理环境高逼真场景构建需求, 提出一种基于高精度激光扫描点云数据的树木三维模型高保真仿生重建方法, 以期实现形态特征保持的树木三维模型自动化重建。首先, 提出基于骨架的树木模型参数化重构方法, 通过广义圆柱体拟合实现树枝几何形状的抽取, 并根据树木生长参数对树干、主要枝条、细小枝条模型以及树冠等要素进行分级提取; 其次, 考虑树木不同部位精细化建模要求, 提出泊松构造与参数拟合融合的树木几何模型精细化重建方法, 进而基于边界约束条件实现树干与树枝模型的精准拼接与融合; 最后, 采用顾及树木结构的纹理展开方法, 对多层级树木枝干进行纹理自动映射贴图, 实现高保真的树木模型三维重建。经实际验证表明: 基于背包式或站点式获取的激光点云, 本方法可生成形态特征高保真的精细化三维树木模型, 模型整体几何误差优于 10 cm, 树干模型误差优于 3 cm; 在相同数据条件下, 与其他几种主流树木建模方法对比, 本方法对树木三维形态和真实纹理的还原度程度最高。基于该研究成果, 可进一步实现树木结构信息提取、三维绿量计算。

关键词: 遥感, 实景三维, 树木重建, 虚拟地理环境, 参数化建模, 激光点云

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 王伟玺, 黄鸿盛, 杜思齐, 李晓明, 谢林甫, 洪林平, 郭仁忠, 汤圣君. 2024. 面向虚拟地理环境构建的树木模型高保真三维重建. 遥感学报, 28(5): 1222-1231

Wang W X, Huang H S, Du S Q, Li X M, Xie L F, Hong L P, Guo R Z and Tang S J. 2024. Highly realistic 3D reconstruction method for tree models created for virtual geographic environments. National Remote Sensing Bulletin, 28(5): 1222-1231 [DOI: 10.11834/jrs.20232589]

1 引言

三维树木几何模型是数字城市与数字林业工程的重要组成部分, 并且在实景三维建设、虚拟地理环境构建以及森林碳汇仿真计算等过程中发挥了重要的作用。植被影响地气系统的能量平衡, 是环境评估的敏感载体 (马红章等, 2022)。自动化、高效化、高保真度地重建树木模型, 已逐渐成为数字城市与数字林业建设的热点和前沿。当前, 树木建模大致分为模型驱动与数据驱动两种

建模思想 (曹伟等, 2021)。

模型驱动思想从树木语法规则或模型库匹配视角出发构建具有较为真实的几何结构的树木模型, 这种策略注重树木的自然生长规则和树木几何形态, Lindemayer (1968) 基于植物生长的数学理论首次提出了 L-System 理论, 根据改写规则的方法进行树木模型的简单构建。最初没有包含足够的信息以允许对高等植物进行全面建模, 但后续研究提出了 L-System 的一些几何方式并将其转化为植物建模的通用工具 (Boudon 等, 2012;

收稿日期: 2022-11-01; 预印本: 2023-02-15

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2022YFB3903700); 广东省科技创新战略专项资金 (粤港澳联合实验室) 项目 (编号: 2020B1212030009); 广东省自然科学基金面上项目 (编号: 2121A1515012574); 深圳市科技计划面上项目 (编号: JCYJ20210324093012033)

第一作者简介: 王伟玺, 研究方向为城市三维建模, 摄影测量。E-mail: weixiawang@szu.edu.cn

通信作者简介: 汤圣君, 研究方向为计算机视觉, 城市三维建模。E-mail: shengjuntang@szu.edu.cn

Cieslak 等, 2015)。基于 L-System 的树木建模方法, 通过控制线条的生成来影响树木形态结构, 清晰直观的表达树木的层次结 (郝腾宇, 2019; Takeda 等, 2001)。使用尺寸、方向和位置等语法构建树木生长规则, 并生成树木几何模型 (Tatsuma 和 Aono, 2009)。模型驱动策略可以通过参数输入控制树木建模的过程, 遵循树木的自然生长规则重建出较真实的整体几何形态。但是为了保证模型拓扑结构的正确性, 该建模算法的参数调节过程复杂, 算法时空复杂度较高。另外由于重建过程缺乏树木真实信息的输入, 几何精度低, 不能对真实世界的树木模型进行仿真建模, 仅能满足较低层次细节表达的需求。

数据驱动思想从树木本体的图像和点云等数据中抽象出有效的建模信息, 通过这些信息保证树木模型的几何精度与保真度, 可以实现模型的多层次细节表达, 方便后续参数提取、生态评估等。建模过程通常基于树木骨架或树冠, 注重算法与模型细节的优化处理, 例如, Thies 等 (2004) 在生成树木枝干的三维模型时, 将具有连续结构的圆柱体拟合到树木原始点云数据中, 以此来获取较为真实的模型 (Thies 等, 2004); Liu 等 (2012) 在提取树木骨架的方法做出更新, 其基于广义 Voronoi 图的提取方法可以更好的表现树木骨架; Raunonen 等 (2013) 使用步进式圆柱体拟合的方式对树木整体几何结构进行拟合; Gossett 等 (2007) 将最短路径法应用于树木骨架的提取, 在此基础上还结合了植物学原理来估算树木半径, 从而为后续的树木三维重建提供约束条件 (Xu 等, 2007)。Li 等 (2021) 利用单张树木照片, 通过深度学习方法中的神经网络, 识别树种并获取树木径向边界体积 (RBV), 从而生成树木的三维结构模型。Liu 等 (2021) 使用 TreePartNet 网络识别树木点云的分支点和骨架, 利用广义圆柱体拟合枝干点云得到整体网格模型。数据驱动建模的研究基本是利用广义圆柱体拟合的方式重建枝干几何模型, 这样构建的模型与树木的真实形态有较大的偏差, 忽略了许多树木的细节。虽然目前也有基于网格建模的方法对树干几何重建, 但是需要估算点云的法向量, 需要花费更多的时间, 重建出来的模型点云密度大不够轻量化。

针对上述问题, 本文面向虚拟地理环境高逼真场景构建需求, 提出一种基于高精度激光扫描

点云数据的树木三维模型高保真仿生重建方法, 可实现形态特征保持的多细节层次树木三维模型自动化重建。既提高树木模型的几何精度维持树木模型的真实感, 又能高效实现大场景的树木重建。

2 高逼真树木建模方法

2.1 高逼真树木建模框架

图 1 为高逼真树木模型建模流程图。输入数据为单棵树木激光点云, 基于图论的方法提取树木骨架点云, 分两部分建模, 首先, 基于骨架点分叉原理识别与分割出树干部分点云与骨架信息。具体而言, 基于 Adtree 方法提取树木的初始骨架, 在此基础上以骨架分岔点为树干和非树干区域连接点, 并在该位置水平方向将点云进行切割和分离, 上半部分为树枝点云, 下半部分为树干点云, 最后基于泊松网算法重建树干部分精细几何模型。其次, 将非树干骨架以广义圆柱体模型拟合的方式重建单株树木以获取分层级三角网格模型, 并对每根枝条自动化纹理展开。再次, 将泊松重构的获取的树干三角网模型与参数化构建的树木枝干模型自动化拼接融合形成精细化树木三维模型。最后, 对树枝末端随机生长树叶并添加真实采集的纹理信息得到最终树木三维模型。

2.2 基于骨架的树木模型参数化重构

2.2.1 树木骨架提取

树木的骨架提取结果是树木参数化重构的关键, 本文基于高精度的单株树木的激光点云数据, 采用图论方法构建最小生成树框架, 最后通过最短路径贪心算法生成整体树木骨架。具体而言:

首先采用构造的最小生成树图用来表示树木的初始骨架, 基于构造最小生成树提取树木的初始骨架, 在欧几里得空间中对 Delaunay 三角剖分后的边附加权重值, 基于树木水分养分运输途径是走所有节点的最短路径理论, 采用 Dijkstra 最短路径贪心算法进行连接。考虑到 Dijkstra 最短路径贪心算法的加入可以更好的约束整体骨架, 因此对整体骨架进行简化和平滑处理以得到平滑骨架模型, 根据顶点和边的权重值去除冗余顶点和短边, 接着以顶点的接近程度合并相似的顶点和短边完成简化。另外由于树木骨架点在坐标系上的

位置和切线方向是已知的, 根据 Hermite 三次样条曲线算法可以对骨架进行平滑, 对树木骨架上的边进行插值得到较平滑的骨架模型。其三次多项式函数方程表示如下:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & d_x \\ a_y & b_y & c_y & d_y \\ a_z & b_z & c_z & d_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}, t \in [0, 1] \quad (1)$$

式中, $Q(t)$ 表示位于三次样条曲线中的所有节点的坐标值, $a_x, a_y, a_z, b_x, b_y, b_z, c_x, c_y, c_z, d_x, d_y, d_z$, 分别为待求解常数。

树木骨架平滑效果如图 2 所示。可见, 树木的骨架经过三次样条曲线平滑处理后, 线段 AD 与 CD 在连接处的过渡带有明显的弧度, 显得更加流畅自然。

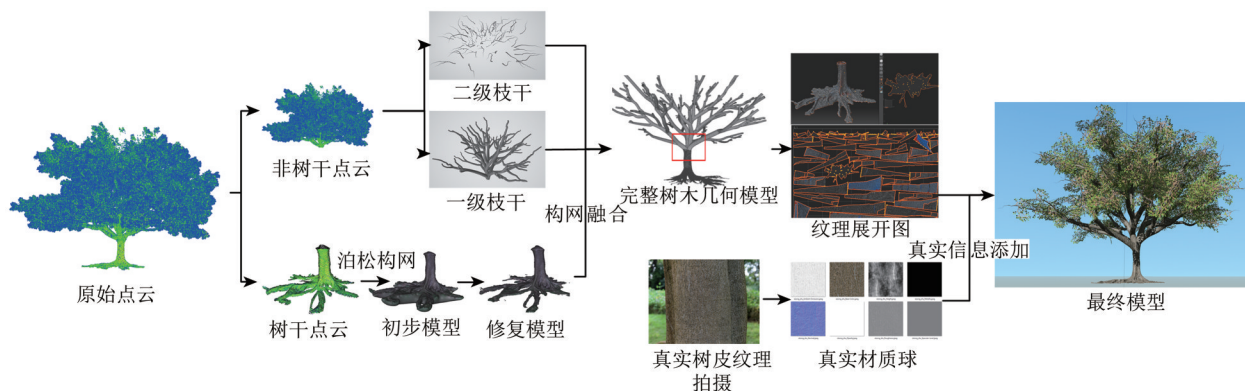


图 1 总体流程图

Fig. 1 Overall flow chart

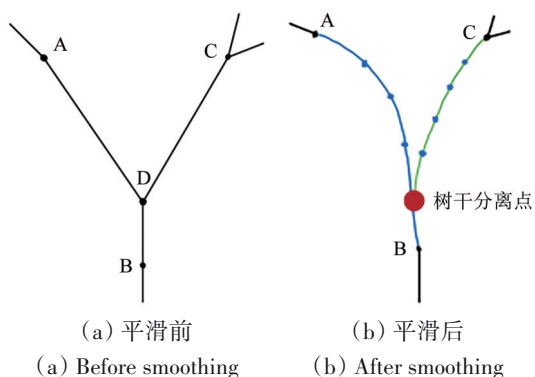


图 2 3次样条骨架平滑效果

Fig. 2 Smooth effect of the tree skeleton

在得到平滑后的树木骨架模型之后, 本文将提取树干骨架、主要枝干骨架点和细小枝干骨架点, 并对应生成树干、主要枝干和细小枝干的三维模型。

具体而言, 对平滑骨架模型的骨架点进行分级, 根据预设的半径阈值 (比如小于树干半径的 1/10) 进行分级, 大于预设的半径阈值的枝干是主要树枝, 小于预设的半径阈值的枝干则为细小树枝, 提取出树干骨架、主要枝干骨架点以及细小枝干骨架点。

由图 2 (b) 可见: 红色点为树干分离点, 即

树木分叉位置, 将该点作为树干和非树干的分离点, 并在水平方向分割点云; 同时, 根据骨架点半径参数对树木骨架点进行分级, 提取出树干骨架、主要枝干骨架点以及细小枝干骨架点。其中对细小枝干进行半径判断与数量约束, 减少细小枝干的生成。

2.2.2 分级参数拟合

对树木主要枝干和细小枝干分别进行圆柱体拟合和三角形拟合, 并生成树木几何模型。即根据树木枝干的重要性, 对主要枝干和细小枝干建立不同建模精细层级的几何重建, 保证树木三维模型真实感和轻量化。

对平滑骨架模型的骨架点进行分级, 根据预设的半径阈值进行分级, 大于预设的半径阈值的枝干是主要树枝, 小于预设的半径阈值的枝干则为细小树枝, 提取出树干骨架、主要枝干骨架点以及细小枝干骨架点。对树干的横截面、主要枝干和细小枝干分别进行曲线拟合、圆柱体拟合和三角形拟合, 并生成树木几何模型。分级重建的步骤如下:

步骤 1: 获取细小枝干的半径, 去除半径小于预设的半径数值的细小枝干。其中, 通过对细小枝

干的半径大小,判断细小枝干是否符合要求,将半径小于预设的半径数值的细小枝干去除,进而实现细小枝干的数量约束,减少细小枝干的生成。

步骤2:对主要枝干和细小枝干进行圆柱体拟合,其中对细小枝干采样3个点构建三角网格模型并进行圆柱体拟合。

具体地,对枝干利用广义圆柱体自动拟合,其中对细小枝干在圆柱体拟合的情况下一圈仅采样3个点构建三角网格模型。圆柱体拟合的方法属于经典的非线性最小二乘问题,输入数据、待解参数和目标函数具体定义如下:

树木枝干圆柱体拟合示意图见图3。本文参考了Levenberg-Marquardt算法解决圆柱体拟合中非线性最小二乘问题(Du等,2019)。但是由于该方法对点云数据的噪声和异常值比较敏感,因此本文迭代使用非线性最小二乘法,并为每个三维点引入权重,圆柱体附近的点赋予较大的权重,而远离圆柱体的点赋予较小的权重。因此特定三维点到圆柱体的距离权重 w_i 定义如下:

$$w_i = 1 - \frac{\text{dist}(p_i)}{\text{dist}_{\max}} \quad (2)$$

式中, $\text{dist}(p_i)$ 表示当前第 i 个点与初始圆柱体之间的距离, $\text{dist}_{\max}$ 是所有点到圆柱体的最大距离。所有点的权重归一化在 $[0, 1]$ 的范围。目标函数是从各点到枝干圆柱体的距离的平方和:

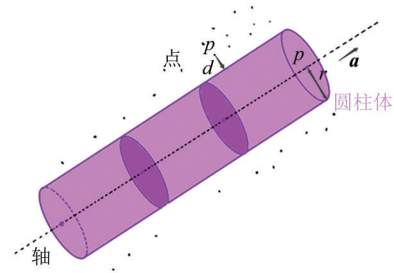
$$t = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \text{dist}(p_i) \quad (3)$$

在树冠或者低等级的树枝附近,噪声会变得更大,因此无法准确的拟合圆柱体。为了合理的估计这些树枝或者小枝,本文使用异速规则对剩余枝干半径赋值,假设分支边的半径与其权重成正比,权重定义为其两个端点顶点的子树长度的平均值。使用以下公式计算其余分支边的半径:

$$r_{ei} = r_i \left(\frac{w_i}{w_i} \right) \quad (4)$$

式中, r_{ei} 是第 i 分支边的半径, r_i 是通过圆柱拟合的树干半径, w_i 是第 i 分支边的权重。

由上述方法可知,根据树木枝干的重要性,对树干、主要枝条与细小枝条建立了不同建模精细层级的几何重建,在保证树木真实感的前提下构建轻量化的树木三维模型。



点 p 为输入数据点的位置,待求解参数是圆柱体的轴方向向量 a ,轴上的端点位置 p_i 和圆柱体的半径 r

图3 圆柱体拟合

Fig. 3 Cylinder fitting

2.3 泊松构网及参数拟合几何融合

2.3.1 主干高精度泊松构网

由于广义圆柱体模型无法精确的恢复树木主干几何结构,重建的树木主干三维模型与真实形态差异大,因此本文对树干单独采用泊松构网算法进行曲面重建。泊松曲面重建属于隐函数方法实现。泊松表面重建的算法融合了全局和局部方法的优点,采取隐性拟合的方式,通过求解泊松方程来取得点云模型所描述的表面信息代表的隐性方程,通过对方程进行等值面提取,从而得到具有几何实体信息的表面模型。优点在于,重建出的模型具有水密性的封闭特征,具有良好的几何表面特性和细节特性。树干点云泊松构网结果如图所示,重建过程如下:

(1) 定义八叉树。使用八叉树结构存储点集,根据采样点集的位置定义八叉树,然后细分八叉树使每个采样点都落在深度为 D 的叶节点;

(2) 设置函数空间:对八叉树的每个节点设置空间函数 F ,所有节点函数 F 的线性组合可以表示向量场 V ,基函数 F 采用了盒滤波的 n 维卷积;

(3) 创建向量场:均匀采样的情况下,假设划分的块是常量,通过向量场 V 逼近指示函数的梯度。采用三次样条插值(三线插值);

(4) 求解泊松方程:方程的解采用拉普拉斯矩阵迭代求出;

(5) 提取等值面:为得到重构表面,需要选择阈值获得等值面;先估计采样点的位置,然后用其平均值进行等值面提取,然后用移动立方体算法得到等值面。

2.3.2 边界约束的三角网融合

由于参数化获取的几何模型与泊松构网获取的树干模型在树干粗细、三角网对齐等方面存在不一致, 因此需要将参数化获取的树枝模型与泊松构网获取的树干模型进行融合获取统一且无缝的树木三角网。单根枝干模型三角网融合结果如图4所示。

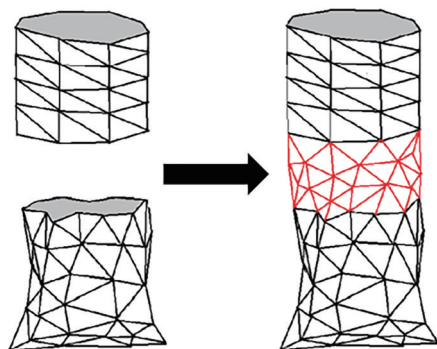


图4 三角网格融合

Fig. 4 Triangle mesh fusion

以泊松构网树干模型作为基准参照, 在数据三角网融合之前会首先将泊松构网获取的三维模型进行三角网剔除修复, 得到不封闭的树干三维模型如图5所示; 其次通过交互式删除参数拟合几何模型与泊松构网模型中重叠部分面片, 在两部分模型之间保留狭小间隙。三角网格加密优化过程如图6所示: 在间隙处填充三角面片以连接两部分模型, 最后对填充的面片进行加密使填充后网格密度与周围网格密度相同。三角网融合具体过程如下:

(1) 通过半边数据结构提取模型中的所有边界边, 边界边索引找到下一条边界边, 直到最后一条边头部与第一条边尾部想借, 边界边闭合形成孔洞。通过拟合孔洞中心点, 计算孔洞之间中心点的欧式距离, 提取匹配的孔洞对;

(2) 匹配结果由两条有向多边形链组成, 在三维空间中互相接近。对两条有向链任意选择匹配的一端, 然后合并两个链, 两条链作为排序列表, 在每一步中都有指向当前点和的指针, 决定两条链哪一条应该前进。计算结果为

$$\left| \overrightarrow{v_i^1 v_{i+1}^1} \right| + \left| \overrightarrow{v_j^2 v_{j+1}^2} \right| < \left| \overrightarrow{v_i^1 v_{j+1}^2} \right| + \left| \overrightarrow{v_j^2 v_{i+1}^1} \right|, \text{ 则向前移动指针, 否则不移动。}$$

假设当前点为 u 和 v , 一步计算中移动到下一个点 w , 则添加面片 Δuvw 到

三角网模型中, 当双链到达终点时停止算法;

(3) 计算孔洞边界上顶点的边长数据, 相邻边长平均值作为约束边界顶点的权重值, 对新添加的面片形心处插入一个顶点, 并调整新顶点与周围网格的连接边以保持狄洛尼三角剖分性质。当插入顶点后, 边界填充处三角网的边长与约束边界边长相近时停止内插。



(a) 泊松构网模型

(b) 修复后模型

(a) Poisson reconstruction model (b) Repaired model

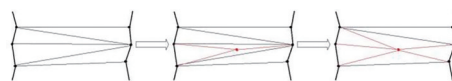
图5 树干三角网修复

Fig. 5 Mesh repairing for tree trunk



(a) 三角网格填充

(a) Triangle mesh filling



(b) 三角网格加密

(b) Triangle mesh refinement

图6 三角网格填充与加密

Fig. 6 Mesh filling and Encryption

2.4 树木纹理展开及映射

纹理映射技术可以把一张贴图黏在模型表面控制模型的可视化效果。为了使重建得到的树木几何模型的每个顶点获取纹理中对应的二维坐标, 本文使用顾及树木结构的纹理展开与映射技术, 可以在参数化重建树枝模型的过程中实现自动化纹理映射坐标, 不需要额外的人工编辑操作。

图7为本文方法将三维顶点坐标映射到二维平面的过程示意图。可见: 图7中 $\vec{n}$ 代表第 i 个点所在圆柱平面的法向量, 该法向量与竖直方向的夹角 θ 表示树枝生长方向的弯曲角度。

在圆柱体上某一顶点 $P(x_i, y_i, z_i)$ 映射到纹理坐标系中的二维坐标 $T(u_i, v_i)$ 的映射公式如下所示:

$$\begin{cases} F(x_i, y_i, z_i) = (u_i, v_i) \\ u_i = u_{i-1} + \Delta C_i \cos \theta \\ v_i = v_{i-1} + \Delta C_i \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中, $F(x_i, y_i, z_i)$ 表示圆柱体顶点上第 i 个点转化为纹理坐标的映射函数, C_i 表示第 i 个点所在的圆柱平面周长, ΔC_i 为同一圆柱平面上相邻顶点坐标的弧长, u_i 为圆柱体顶点上第 i 个点在二维纹理坐标上的横坐标值, v_i 为圆柱体顶点上第 i 个点在二维纹理坐标上的纵坐标值。

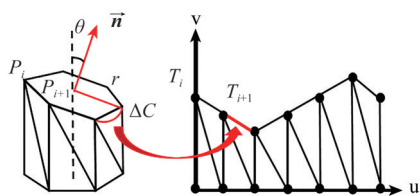


图7 纹理展开与映射

Fig. 7 Texture expansion and mapping

3 实验数据与分析

3.1 实验数据

本文实验对象为广东省深圳市常见树种, 以两棵芒果树, 一棵高山榕高精度树木激光点云为例。实验数据采集设备使用天宝 X7 三维激光扫描仪, 测距噪声小于 3 mm, 扫描精度为 2 cm。具体点云参数如表 1 所示。

3.2 三维模型精度评价指标

树木三维模型的几何精度常用的评价指标为平均距离和标准差。给定八叉树级别 l , 令 S 和 S' 分别为 2 个同源单元中点子集, S 为待检测点云, S' 为参考点云, N 和 N' 分别表示 S 和 S' 的大小。

(1) 平均距离法。计算 S 中的所有点与其在 S' 中的最临近点距离的平均值或者最大值中的最小值, 并将该值赋予 S 中的所有点, 如果 l 足够大或者 N 和 N' 足够小, 该值可以快速计算出来, 平均距离法噪声和点云密度变化比较稳健, 但对于不同的级别 l , 计算出的值并不一定相同, 递归地进行近似值计算可以优化计算结果。平均距离越小, 表示待检测点云与参考点云越相似。

(2) 标准差计算。标准差是反映一组数据离散程度最常用的一种量化形式, 是表示精确度的重要指标。标准差定义是总体各单位标准值与其

平均数离差平方的算术平均数的平方根, 见式 (6), 其中 $\bar{x}$ 代表所采用样本 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的均值, 它反映组内个体间的离散程度。标准差越大, 表示数据离散程度越大。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (6)$$

3.3 结果及分析

3.3.1 树木几何重构结果

为了进行三维重构的精度对比, 选取了 3 棵典型树木进行了重建, 并对树木的几何精度进行了量化评估, 其结果也与现有的树木重建算法结果进行了对比。可见基于本文提出的树木重建方法的与 TreeQSM (Raumonen 等, 2013) 和 Adtree 树木重建方法 (Du 等, 2019) 在树木几何精度上的对比详见图 8。可见, TreeQSM 的方法不能重建出连贯的树枝的几何形状, 与 Adtree 相比本文方法重构的树木几何模型在树干具有更加真实的几何形态; 在几何结构复杂区域, ADtree 方法难以准确表达树木的几何特征, 仅通过简单的圆柱拟合来对该区域进行表达。相比而言, 本方法在几何结构复杂区域具有良好的表现, 这主要是得益于本方法采用高保真的三角网重构对复杂区域进行建模, 能够很好的保持具有复杂结构树木的几何特征。

为了进一步量化评估树木模型的几何精度, 本研究将重建后的树木模型与原始点云进行了距离计算, 得到树木重建精度。值得一提的是, 由于树木的真实骨架难以获取, 本研究将直接采用重建后的树木三角网与原始点云进行距离计算, 得到最终的树木重建精度, 该方法也被广泛用于三维模型重建精度评估。图 9 显示了进行距离计算之后树木模型与原始点云误差分布。树木三维模型几何精度评估结果见表 1。可见整体树木重建精度在 10 cm 以内, 另外对于精细化重建的树干部分精度可以保持在 3 cm 以内, 而 ADtree 方法获取的树木模型在树干部分误差相对较大, 包含大量的高误差点 (绿色和红色区域), 其精度基本维持在 20 cm 以内。因此, 相比与现有算法, 本文提出的方法对于复杂树木的三维重建具有良好的几何精度, 能够高保真的描述树木模型细节。

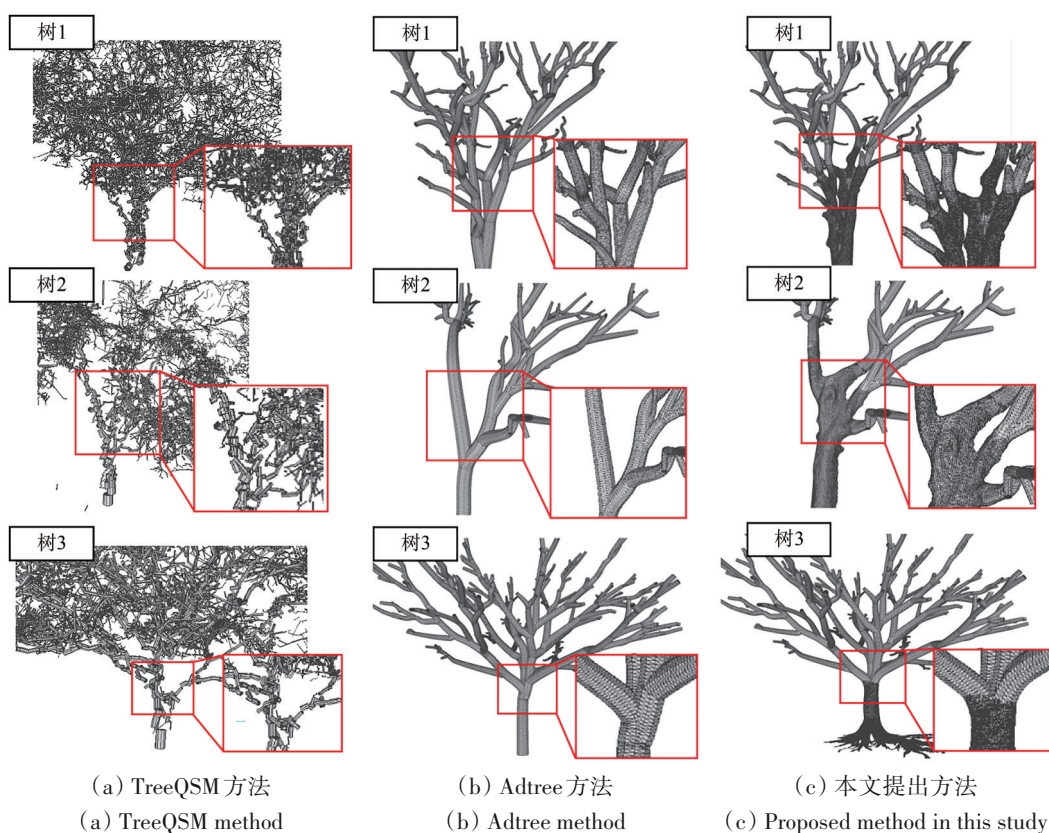


图8 基于不同方法的树木三维模型对比图

Fig. 8 Comparison of tree 3D models based on different methods

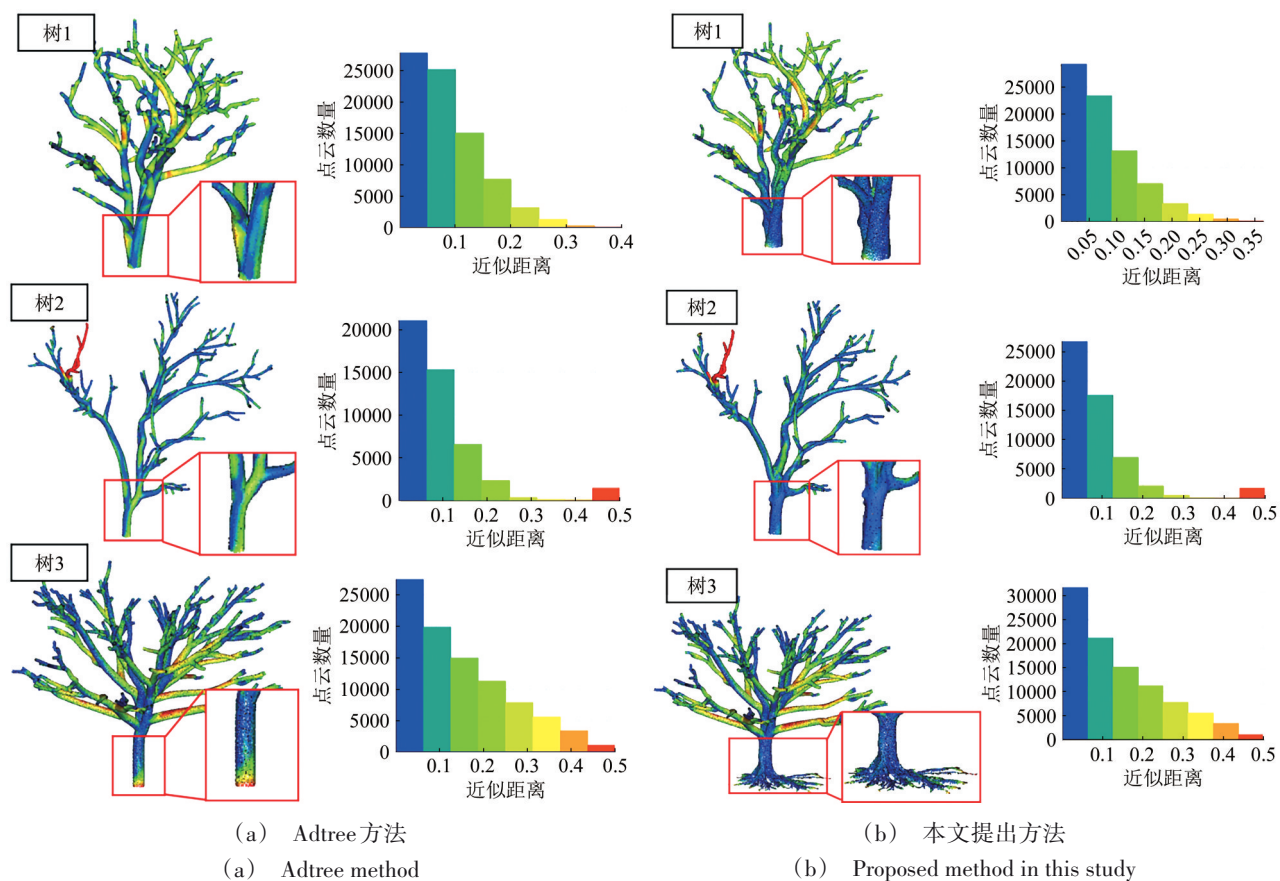


图9 基于2种不同方法的树木三维模型误差分布对比

Fig. 9 Comparison of error distribution in tree 3D models based on two different methods

表1 树木几何精度

Table 1 Geometric accuracy of reconstruction results

编号	树高/m	采集设备	点云数量	整体平均距离/cm	整体标准差	树干平均距离/cm	树干标准差
树1	13.26	架站式激光扫描仪	448265	7.85	5	2.35	2.57
树2	14.31	架站式激光扫描仪	217002	7.73	5	2.74	2.82
树3	11.22	架站式激光扫描仪	547852	10.65	9	2.51	2.88

3.3.2 树木纹理映射结果

为了实现高保真的树木重建，本文提出的自动纹理展开方法可以实现树木模型纹理UV坐标的快速展开，并用于纹理贴图。图10展示了本文提出的自动纹理展开方法获取的UV展开效果以及纹理贴图效果。由白色到红色代表纹理展开的变形程度逐渐增大，可见对于单个枝干，自动化的纹理展开方法能够达到高保真纹理贴图的需求。在树木弯折严重的地方，依然还存在UV展开混乱的问题，但对整体视觉效果影响不大。图11展示了3棵树木添加纹理映射和树叶后的重建效果。纹理映射应用于树干、树枝和树叶之后，模型表面纹理与原始图片高度一致，有效提升了模型的逼真度。这进一步证明了我们的方法能够实现树木模型的高保真三维重建。

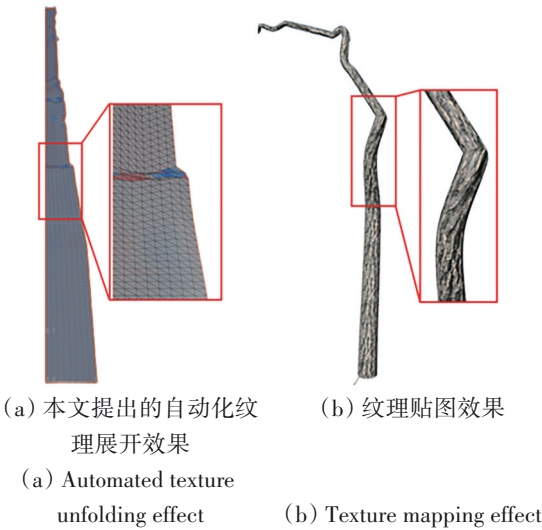
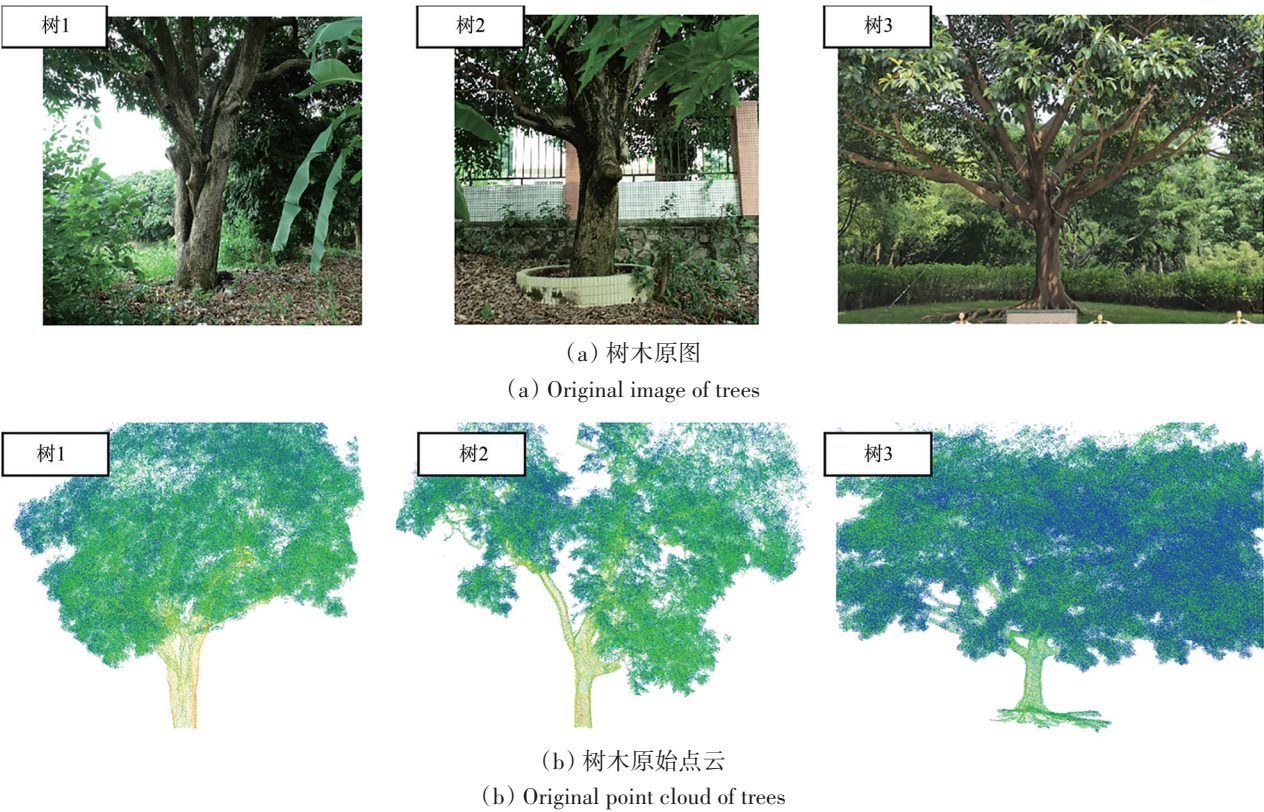


图10 枝干纹理展开及映射结果

Fig. 10 Branch texture unfolding and mapping results





(c) 本文生成的精细化树木模型
(c) Refined tree models generated in this paper

图 11 3 棵树的精细化三维树木模型结果

Fig. 11 3D tree model after texture mapping of three trees

4 结 论

为了解决当前城市虚拟地理环境建模中植被模型建模效果差、精度低等问题,本文提出一种面向虚拟地理环境高逼真场景构建的树木模型高逼真仿生三维重建方法,实现单株树木树根、树干、树枝、树叶高精度几何重建与纹理映射。该方法的核心是考虑树木重建过程中不同部位的多细节层次需求,融合泊松构网与参数拟合完成高逼真树木三维重建。为了验证本文提出的方法有效性,对三棵具有不同复杂程度的树木进行模型重建,并与常用的Adtree树木三维重建方法进行对比。实验结果显示,本文提出的树木三维重建方法可以实现高精度的树木几何重建与纹理映射,相较于传统方法能够更好的保持树木的几何特征,具有更高的真实还原度,其几何整体误差优于10 cm,树干部分误差优于3 cm。该研究成果将可用于树木参数的精确提取,可以为树木结构信息提取、三维绿量计算以及虚拟地理环境高逼真建模和仿真提供重要的基础。

参考文献(References)

Boudon F, Pradal C, Cokelaer T, Prusinkiewicz P and Godin C. 2012. L-Py: an L-system simulation framework for modeling plant architecture development based on a dynamic language. *Frontiers in Plant Science*, 3: 76 [DOI: 10.3389/fpls.2012.00076]
Cao W, Chen D, Shi Y F, Cao Z and Xia S B. 2021. Progress and prospect of LiDAR point clouds to 3D tree models. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(2): 203-220 (曹伟, 陈

动, 史玉峰, 曹震, 夏少波. 2021. 激光雷达点云树木建模研究进展与展望. *武汉大学学报(信息科学版)*, 46(2): 203-220 [DOI: 10.13203/j.whugis.20190275]

Cieslak M, Runions A and Prusinkiewicz P. 2015. Auxin-driven patterning with unidirectional fluxes. *Journal of Experimental Botany*, 66(16): 5083-5102 [DOI: 10.1093/jxb/erv262]

Du S L, Lindenbergh R, Ledoux H, Stoter J and Nan L L. 2019. AdTree: accurate, detailed, and automatic modelling of laser-scanned trees. *Remote Sensing*, 18(11): 2074 [DOI: 10.3390/rs11182074]

Hao T Y. 2019. Study on Tree Point 3D Reconstruction Base on Skeleton Extraction. Yangling: Northwest A&F University (郝腾宇. 2019. 基于骨架提取的树木点云三维重建方法研究. 杨凌: 西北农林科技大学)

Li B S, Kałużny J, Klein J, Michels D L, Pałubicki W, Benes B and Pirk S. 2021. Learning to reconstruct botanical trees from single images. *ACM Transactions on Graphics*, 40(6): 231 [DOI: 10.1145/3478513.3480525]

Lindenmayer A. 1968. Mathematical models for cellular interactions in development. I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*, 18(3): 280-299 [DOI: 10.1016/0022-5193(68)90079-9]

Liu H Z, Wu Z H, Frank Hsu D, Peterson B S and Xu D R. 2012. On the generation and pruning of skeletons using generalized Voronoi diagrams. *Pattern Recognition Letters*, 33(16): 2113-2119 [DOI: 10.1016/j.patrec.2012.07.014]

Liu Y C, Guo J W, Benes B, Deussen O, Zhang X P and Huang H. 2021. TreePartNet: neural decomposition of point clouds for 3D tree reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, 40(6): 232 [DOI: 10.1145/3478513.3480486]

Ma H Z, Sun S Y, Liu S M, Ai L, Sun G Y and Sun L. 2022. Construction and simulation of a BRF model for the 3D canopy. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(11): 2282-2291 (马红章, 孙淑怡, 刘素美, 艾璐, 孙根云, 孙林. 2022. 三维冠层BRF模型构建与模拟. 遥感学报, 26(11): 2282-2291) [DOI: 10.11834/jrs.20210178]

- Raunonen P, Kaasalainen M, Åkerblom M, Kaasalainen S, Kaartinen H, Vastaranta M, Holopainen M, Disney M and Lewis P. 2013. Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sensing*, 5(2): 491-520 [DOI: 10.3390/rs5020491]
- Takeda T, Hirano T, Urano S I and Horiguchi I. 2001. A geometric model of sunflower plants using L-system. *Journal of Agricultural Meteorology*, 57(3): 145-153 [DOI: 10.2480/agrmet.57.145]
- Tatsuma A and Aono M. 2009. Multi-Fourier spectra descriptor and augmentation with spectral clustering for 3D shape retrieval. *The Visual Computer*, 25(8): 785-804 [DOI: 10.1007/s00371-008-0304-2]
- Thies M, Pfeifer N, Winterhalder D and Gorte B G H. 2004. Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6): 571-581 [DOI: 10.1080/02827580410019562]
- Xu H, Gossett N and Chen B Q. 2007. Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees. *ACM Transactions on Graphics*, 26(4): 19-es [DOI: 10.1145/1289603.1289610]

Highly realistic 3D reconstruction method for tree models created for virtual geographic environments

WANG Weixi, HUANG Hongsheng, DU Siqu, LI Xiaoming, XIE Linfu, HONG Linping, GUO Renzhong, TANG Shengjun

Smart City Research Institute, Shenzhen Key Laboratory of Urban Digital Twin Technology, Hong Kong, Macau & Guangdong Smart City Joint Laboratory of Guangdong Province, School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

Abstract: Trees are an important part of the cityscape, and 3D models of trees are indispensable for real-time 3D design, construction of virtual geographic environments, and construction of digital twin cities. Current 3D models of trees are reconstructed based on images or model libraries. The former show cluttered triangular network clusters, and the latter are vastly different from the real situation in terms of geometric expression and realism, which makes directly using the reconstructed tree models in the practical applications of smart cities difficult. Therefore, in this paper, a bionic reconstruction method for 3D tree models is proposed based on high-precision laser scanning point cloud data for building realistic scenes in virtual geographic environments, which enables the automated reconstruction of 3D tree models at multiple levels of detail while preserving morphological features.

First, a skeleton-based parametric tree model reconstruction method that extracts branch geometry by generalized cylinder fitting and extracts the trunk, main branches, models of fine branches, and crown elements in a hierarchical manner according to the growth parameters of the tree is proposed. Second, the refinement requirements of modeling distinct parts of trees are considered, and a refined tree geometry reconstruction method by integrating the conformal Poisson network and parametric fitting is presented. Finally, the texture mapping method is applied to map the texture of multilevel tree branches automatically to achieve a detailed 3D reconstruction of tree models by considering the texture extension of the tree structure. Based on the laser point cloud acquired with a backpack or station, this method can produce a refined 3D tree model with high accuracy of morphological features.

The overall geometric error of the model is better than 10 cm, and the geometric error of the trunk model is better than 3 cm. Under the same data conditions, the method has the highest degree of reproduction of 3D tree morphology and real texture compared with various mainstream tree modeling methods. Based on the results of this paper, the method can further advance the extraction of tree structure information and the calculation of 3D green volume for the realistic 3D China and national strategies such as green low-carbon development, which have great practical value.

This paper proposes a 3D bionic reconstruction method for constructing high-fidelity scenes in virtual geographic environments to achieve highly accurate geometric reconstruction and texture mapping of individual tree roots, trunks, branches, and leaves. The core of the method is to consider the requirements of distinct parts of the tree reconstruction at multiple levels of detail and integrate Poisson mesh and parameter fitting to complete the 3D reconstruction of the tree with high accuracy. The experimental results show the proposed tree 3D reconstruction method provides a highly accurate reconstruction of the tree geometry and texture. The research results are used for the accurate extraction of tree parameters, which can provide an important basis for tree structure information extraction, 3D green volume calculation, and realistic modeling and simulation of virtual geographic environments.

Key words: remote sensing, 3D modeling, tree reconstruction, virtual geographic environments, parametric modeling, laser point cloud

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3903700); Guangdong Science and Technology Strategic Innovation Fund (Guangdong-Hong Kong-Macau Joint Laboratory Program) (No. 2020B1212030009); Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2121A1515012574); Research Program of Shenzhen S&T Innovation Committee (No. JCYJ20210324093012033)