

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240400

面向城市绿化精细管理的低密度树木数字孪生模型 ——以树木风灾风险管理为例

魏云琦 王 旻 尹 豪

(北京林业大学园林学院, 北京 100083)

摘要:【目的】针对传统理想化树木数字模型难以精细呈现树木真实形态的问题,本研究提出一种精细化树木数字孪生模型的生成方法,为智慧城市技术在城市绿化精细化管理中的应用提供高效、准确的模型支持。【方法】本研究以北京市某高校建筑旁的 16 棵国槐树为对象,构建精细化树木数字孪生模型。首先,通过循环应用 DBSCAN 算法对单体树木点云进行分割;其次,结合降维升维思想,利用二维点云的 α -shapes 算法提取三维树木点云的外轮廓;然后,通过上采样最近插值法生成真实树木的三维 mesh 网格,并利用 Grasshopper 进行模型平滑处理;最后,在 Revit 平台上添加模型参数信息,完成树木数字孪生模型的创建。模型质量通过 CloudCompare 软件从树木形态参数还原性和点云契合度两方面进行评估,并利用 Phoenix 软件对比分析其与理想化树木数字模型在 CFD 风模拟中的表现。【结果】16 棵形态各异的国槐数字孪生模型与点云距离的平均误差为 -3.06 cm,证明该模型能够精确保留树木的独特形态特征。在强风条件下,两种模型的风速模拟结果差异显著,最大可相差 97.23%。【结论】该模型为城市绿化精细化管理提供了有效的决策工具,有助于拓展智慧城市技术在城市绿化管理中的应用场景。然而,由于 DBSCAN 点云分割算法的局限性,本研究方法主要适用于低密度树木群落建模。对于树冠重叠度较高的高密度植物群落,仍需探索新的建模方法以进一步优化模型的适用性。

关键词: 智慧城市; 数字孪生; 城市绿化; 点云分割; 3D 建模; 计算机仿真; 风险评估; 精细管理

中图分类号: S731.2; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)03-0139-12

引文格式: 魏云琦,王旻,尹豪.面向城市绿化精细管理的低密度树木数字孪生模型——以树木风灾风险管理为例[J].北京林业大学学报,2025,47(3):139-150. Wei Yunqi, Wang Yang, Yin Hao. A low-density tree digital twin model for refined urban greening management: a case study of tree wind disaster risk management[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(3): 139-150.

A low-density tree digital twin model for refined urban greening management: a case study of tree wind disaster risk management

Wei Yunqi Wang Yang Yin Hao

(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Traditional idealized tree models struggle to accurately represent the real shape of trees. This study proposes a method to generate a refined tree digital twin model, providing an efficient and accurate model support for the application of smart city technologies in urban greening management. [Method] This study constructed a refined digital twin model for 16 Chinese scholar trees (*Sophora japonica*) located beside a university building in Beijing. First, the single tree point cloud was segmented by cyclically applying the DBSCAN algorithm. Second, the α -shape algorithm of 2D point clouds, combined

收稿日期: 2024-11-26 修回日期: 2025-02-22

基金项目: 北京林业大学热点追踪项目“城市人居环境植物景观资源应用水平与提升策略研究”(2022BLRD05),北京市共建项目专项资助(2019GJ-03)。

第一作者: 魏云琦, 博士生。主要研究方向: 数字景观、植物景观规划设计。Email: weiyunqi8023@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。

责任作者: 尹豪, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 城乡生态人居环境、风景园林规划设计、植物景观。Email: yinhao@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

with the idea of dimensionality reduction and augmentation, was used to extract the outer contour of 3D tree point clouds. Thirdly, the 3D mesh of real tree was generated using up-sampling nearest interpolation method, and then the model smoothing was carried out by Grasshopper. Finally, model parameters were added on the Revit platform to complete the creation of digital twin model. The model quality was assessed in terms of tree morphology parameter reproducibility and point cloud fit using CloudCompare software. Additionally, the performance of model in CFD wind simulation was compared with that of an idealized tree digital model using Phoenix software. **[Result]** The average error between digital twins of 16 diverse Chinese scholar trees and the point clouds was -3.06 cm, indicating that the model can accurately preserve the unique morphological characteristics of trees. Under strong wind conditions, the wind speed simulation results of the two models showed significant differences, with a maximum discrepancy of 97.23%. **[Conclusion]** The model provides an effective decision-making tool for the refined management of urban greening, and helps to expand the application scenarios of smart city technologies in urban greening management. However, due to the limitations of DBSCAN point cloud segmentation algorithm, the method in this study is mainly applicable to modeling low-density tree communities. For high-density plant communities with a high degree of canopy overlap, new modeling methods need to be explored to further optimize the applicability of the model.

Key words: smart city; digital twin; urban greening; point cloud segmentation; 3D modelling; computer simulation; risk assessment; refined management

随着信息革命的加速推进,数据和算法分析正不断整合现实世界中的各类信息,将其转化为辅助调查、识别和决策的数字管理平台。这一进程迅速确立了智慧城市在城市治理领域的关键地位。然而,在城市绿化的精准治理中,智慧城市技术的应用仍面临诸多挑战,其中树木数字化转型的不完善是主要原因之一。目前,城市绿化管理主要依赖物联网与二维数字地图的联动,实现绿化管理问题的二维平面空间定位^[1-2]。尽管三维树木数字孪生模型已逐渐受到关注,但其应用仍不充分,多作为地图信息的代理模型辅助三维可视化^[3],难以准确反映每棵现状树木的真实形态。

数字孪生技术作为现实对象的数字化模拟,具有真实性、实时性以及多学科高效整合性等显著优势。精细化的三维数字模型重建是实现数字孪生技术高效管理现实场景的必然开端,也是整合多项现实物理信息至统一数字平台,实现多学科协同实时管理的关键技术载体。这一技术的发展对于数字孪生在未来城市管理中的广泛应用具有决定性意义,其发展趋势必然指向数字模型的精细化^[4]。在城市绿化精细化管理的数字化研究中,精细化的三维树木数字孪生模型尤为重要,例如在树木风灾风险预测方面。强风天气导致的树枝折断甚至树木倒伏是城市绿化管理中必须重点关注的社会安全隐患^[5]。在社区、校园开放空间等小区域,树木风险预测需要借助精细的树木数字孪生模型,通过模拟不同树冠部分的风速,为城市绿化精细化管理决策提供科学

依据,如指导树木修剪等养护管理措施,从而减少风致树木灾害。

然而,传统的树木数字孪生模型存在明显不足。一方面,传统模型多为柱状、球形、宽圆锥形等理想几何模型^[6],是一种理想化树木数字模型,虽可通过株高和冠幅参数进行调整,但同一树种的几何形状固定,其规律化排列组合也可用于模拟一个简单的树群^[7],难以体现树木独特的自然形态特征^[8]。另一方面,一些基于 TRNSYS 等模型代理库的数字孪生模型虽形态较为真实,但每棵树采用相同模型,缺乏独特性^[9]。此外, Kurdi 等^[10]提出的参数化树木矩阵数学模型虽能精确呈现真实树木的三维形态,但模型过于复杂,处理风模拟等复杂计算时会给计算机带来沉重负担,难以广泛推广。数据量轻便的树木数字孪生模型更易于推广。

因此,亟需建立一种轻量化且能再现树木真实三维形态的数字孪生模型,以推动智慧城市技术在城市绿化管理中的应用,促进城市绿化精细化管理的高质量发展。LiDAR 和三维点云重建技术在数字孪生模型的构建和高精度识别现状树木方面展现出广阔的应用前景^[11]。基于此,本文提出一种基于真实现状树群三维点云的精细化树木数字孪生模型生成流程。与理想化树木数字模型相比,该模型在准确性、独特性、灵活性和轻便性等方面具有显著优势,能够精确体现每棵树不规则且自然独特的形态特征,同时确保计算机处理时负担较轻。

本研究的核心目标是弥补现有树木数字孪生模

型在真实性和准确性方面的不足。通过对比分析传统点云分割和重建方法,结合城市绿化管理的实际需求,对关键步骤进行优化改进,并将其整合为一套完整的精细化树木数字孪生模型生成 workflow。在此基础上,利用 CloudCompare 软件对模型质量进行验证,并通过 CFD(计算流体动力学)风模拟,将该模型与传统模型在树木风灾风险预测方面进行对比分析,以充分展示其在城市绿化精细化治理中的应用潜力和优势。

1 模型构建

1.1 树木点云处理技术的选择与改进

1.1.1 树木点云聚类分割技术

单体树木点云的三维分割通常采用传统方法,如 K-means 聚类和均值漂移算法^[12],以及较新的方法,如点云区域生长算法、图分割算法和谱聚类算法等。然而,这些方法大多无法同时分割树冠和树干的点云^[13],需要分别对树冠和树干进行预处理,这限制了其在实际应用中的推广性。这一问题的根源在于树木的树冠和树干点云密度差异显著,而大多数现有算法难以有效处理这种密度差异。

相比之下,DBSCAN 聚类算法作为一种经典的“基于密度的聚类”方法,擅长处理密度特征显著的点云数据。它能够将密度可达的核心点划分为同一簇,无需事先划分树冠和树干,也无需预设超参数 k ^[14]。这种特性使其能够有效处理任意形状的密集数据集,为树木群落的分离提供了关键可能性。

然而,DBSCAN 算法虽然适用于密度差异较大的点云,但对于种植密度高、树冠重叠严重、树木粘连情况复杂的高密度树木群落,其分离效果较差。因此,本文重点关注低密度树木群落点云,这类群落中树木粘连情况较轻,更适合 DBSCAN 算法的应用。

在低密度树木群落中,部分相邻树木间距较近,即使采用 DBSCAN 算法,也难以完全分离。针对这一问题,本文提出了一种循环迭代思想,能够将这些相邻树木重新分类到不同的簇中,从而有效解决树木点云的分离问题。

1.1.2 树木点云三维重建技术

树冠三维重建的方法主要可分为 3 类:树干结构重建^[15]、理想几何树冠外壳重建和树冠表面重建。需要指出的是,树木重建可以分为器官尺度的精细刻画和树木整体轮廓的重建,而本文主要侧重于后者。这一选择基于以下两方面原因:首先,器官尺度的精细刻画主要依赖于 L 系统^[16]和 Computree^[17]等方法,这些方法虽然有助于计算生态量并辅助森林管理,但主要关注树干结构,对叶群和整体树冠轮

廓形态的刻画不足,难以直接应用于风环境和阳光分析等详细的生态系统服务评估;其次,在风环境分析中,当树木种植密度较低时,树木间距对空气动力学的影响比树冠内部孔隙的影响更为显著^[18-19]。因此,在室外空间风环境模拟中,通常采用植物轮廓模型作为植物形态的概念化模型^[20-21]。

基于上述原因,本研究重点关注基于三维点云的树木整体外轮廓曲面重建。传统的外轮廓重建方法通常将树木简化为理想几何模型,例如通过株高、冠幅等参数将实际树冠点云拟合为椭球体或其他规则几何体。然而,这种过于圆滑的树冠外壳模型难以反映树冠真实形态的凹凸变化,限制了其在精细化分析中的应用。相比之下,利用真实点云直接构建树冠表面模型能够更准确地反映树冠的实际形态。

为实现这一目标,本研究对仅适用于二维点云的 α -shapes 算法进行了改良,使其能够有效提取三维点云中树木的外轮廓点。在此基础上,通过点云上采样处理,并结合 Bellock 等提出的算法程序包^[22]构建树冠模型。该方法能够充分保证模型的精确性,为后续的风环境分析和生态系统服务评估提供可靠的几何基础。

1.2 模型本体生成步骤

现场扫描的原始点云数据同时包含了建筑物和树木的点云信息。因此,在处理过程中,首先需要点对云进行下采样以降低数据密度,随后移除建筑物的点云,以保留树木的点云数据。精细化树木数字孪生模型的生成及其后续质量检测的工作流程如图 1 所示。在该流程中,对传统的点云聚类分割、点云轮廓点提取和三维曲面重建步骤进行了针对性的改良,具体方法将在后文分项说明。此外,由于 DBSCAN 聚类算法能够直接对离散点进行聚类,本文跳过了传统点云处理中的离散点去除步骤,而是将地面滤波作为整个流程的第一步。

(1)点云聚类分割。首先,采用 CSF(cloth simulation filter)地面滤波算法分离地面点云,以去除地面干扰。随后,利用 DBSCAN 聚类算法实现单体树木点云的分离。DBSCAN 算法通过计算点云的密度来建立若干密度相近的点簇,适用于低密度树木群落的聚类分析。然而,该算法需要根据每棵树之间的近似最小距离来确定 EPS 参数,并将 MinPts 参数设置为较小值,以避免将同一棵树分割成多个部分。尽管低密度树木群落的树木粘连情况较轻,但现状树木之间的间距往往存在较大差异。这种多样性可能导致点密度划分忽视单体树木的整体性,进而影响聚类结果的准确性。例如,某些树木可能因距离过近而无法被有效分离。因此,本文引入了

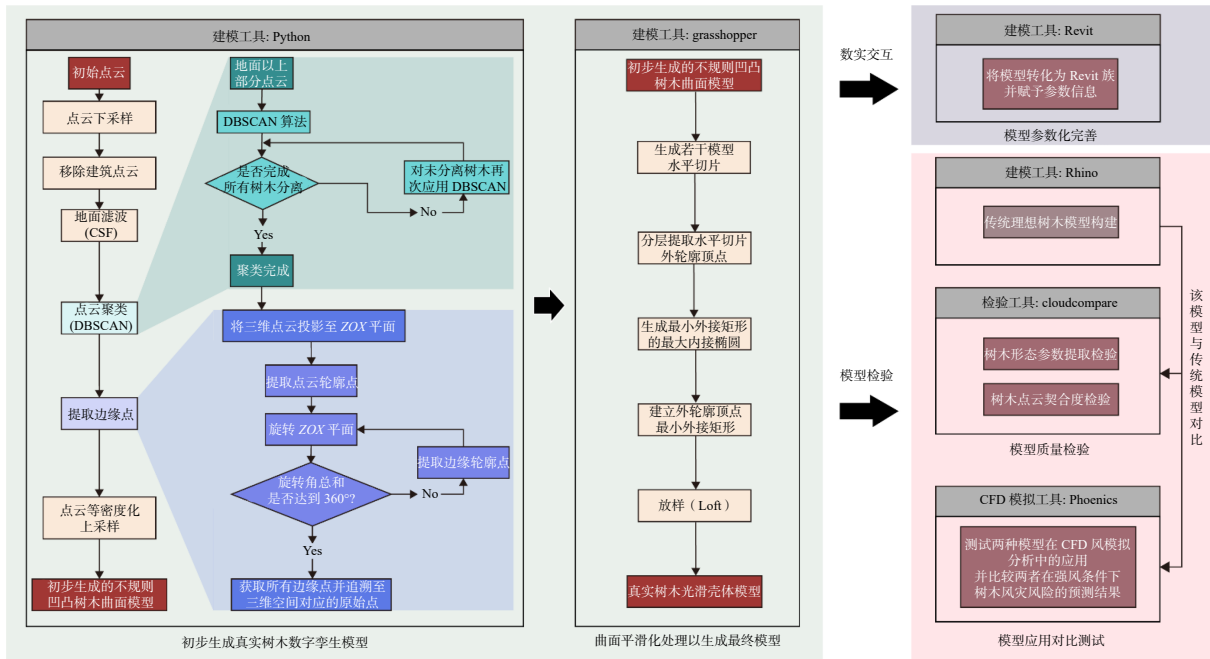


图 1 基于现状树木点云生成真实树木数字孪生模型的工作流程

Fig. 1 A workflow for generating a digital twin model of a real tree based on a point cloud of existing trees

人工监督步骤,用于判断 DBSCAN 聚类结果是否成功分离所有单体树木。如果存在未被正确分离的树木,则将这些树木提取出来,进入新一轮 DBSCAN 聚类处理,直至所有树木均被成功分离。这一迭代优化过程能够有效解决低密度树木群落中树木间距不均匀的问题,确保聚类结果的可靠性。

(2)点云三维轮廓点提取。从分割后的单体树点云中提取三维轮廓点是实现三维重建的关键步骤。 α -shapes 算法是一种简单有效的边界点提取方法,主要用于二维平面点云的边界提取。在二维平面中,对于任意两点 p_1 和 p_2 , 圆心 p_3 和 p_4 是经过这两点且半径为 α 的圆的圆心坐标。其计算公式^[23]为

$$\begin{cases} x = x_1 + \frac{1}{2}(x_2 - x_1) \pm H(y_2 - y_1) \\ y = y_1 + \frac{1}{2}(y_2 - y_1) \pm H(x_2 - x_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 、 y 是圆心 p_3 和 p_4 的横、纵坐标, x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 分别指代 p_1 和 p_2 的横、纵坐标, $H = \sqrt{\frac{\alpha^2}{s^2} - \frac{1}{4}}$, $s^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2$ 。

本文提出了一种基于降维与升维的算法思想,以优化三维点云的边界点提取过程。具体而言,首先通过立面投影将三维点云降维至 ZOX 平面,随后在该平面上多次旋转点云,以增加边界点的数量。这一过程有效提升了模型的精度。最终,将所有二维边界点重新升维至其对应的三维位置。通过这一降维与升维的处理方式,成功突破了传统 α -shapes 算法在三维点云边界提取中的应用局限性,显著提高了模型的准确性和适用性。

(3)点云重建。Bellock 等提出的 Alpha Shape 程序包算法与 α -shapes 算法虽名称相似,但功能有所不同。它专注于三维点云的重建,而 α -shapes 算法主要用于平面点云的外轮廓提取。它作为一种优质的点云重建算法,主要适用于密度较为均匀的三维点云。但是从树木外轮廓提取的点云往往表现出明显的密度不均匀性,邻近点之间的距离差异较大。这种不均匀性可能影响重建模型的精度和合理性。为解决这一问题,本文提出了一种针对外轮廓点云的等密度化处理方法。具体而言,仅对相距大于 1.5 倍点云平均距离的两点之间进行上采样插值,以增加点云密度。而对于相距较远的相邻点,不进行等距离插值,从而避免因过度插值而导致的计算负担增加。通过这种有针对性的处理,最终重建的模型能够更好地贴合真实树木的三维形态,同时保持合理的凹凸特征,确保模型的准确性和实用性。

(4)模型平滑曲面重构。完全贴合树木真实形态的树木模型虽然能够呈现不规则的凹凸变化,充分还原树木的真实形态,但其树体形态可能略显不自然。因此,本文借助 Grasshopper 对已生成的树木模型进行曲面重构,以使树木轮廓模型更加光滑,便于后续的计算分析和模拟计算。具体步骤如下:首先,对已生成的树木三维模型生成若干水平不规则切片,提取其顶点并识别每层的外轮廓顶点;接着,建立每层切片外轮廓顶点的最小外接矩形,并基于此矩形生成最大内接椭圆。最后,利用“放样”(Loft)命令将这些椭圆重构为光滑的树木外轮廓壳体模型。通过上述步骤,完成了树木精细化模型的创建,

本文的研究结果也主要围绕该模型展开。然而,在实际的数字化平台应用过程中,仍需要赋予模型参数化信息,并对其质量和应用潜力进行验证。

1.3 模型参数化赋予

在完成模型创建之后,虽然已经构建了树木的数字模型,但为了确保其能够实际应用于数实交互场景,未来将模型应用于数字平台时,需要将模型转化为 Revit 族。具体而言,将上一步生成的 Grasshopper 模型在 Rhino 中转化为网格格式,并将其导出为 DWG 实体文件,导入至 Autodesk Revit 软件。在 Revit 中,可以对模型进行属性添加和分类,定义包括树种名称、树木习性、健康状况、土球标准、苗木单价、供应商等参数信息,从而完成智慧 BIM 树木模型(图 2)。未来,当 IOT 设备收集到相关数据后,通过数字孪生平台的数据接口将这些数据赋予模型参数,即可实现现实动态数据在三维数字可视化场景中的实时更新。

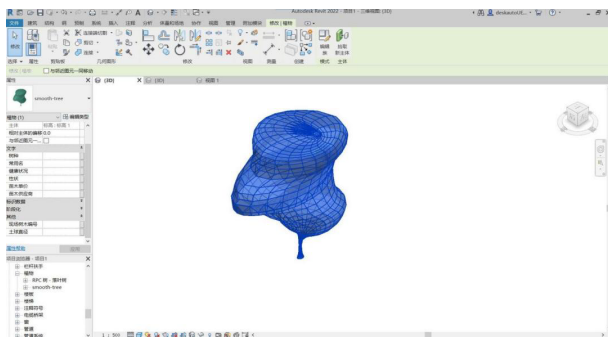


图 2 智慧 BIM 树木数字孪生模型参数化示意
Fig. 2 Schematic of parameterization of the digital twin model of a smart BIM tree

2 研究对象与数据采集

研究对象为北京某高校大草坪西侧靠近建筑的 16 棵国槐行道树(图 3)。这些树木整体呈现出城市树木在树龄和冠形等方面的典型多样性特征,且整体密度较低。16 棵国槐基本保持自然生长的形态,

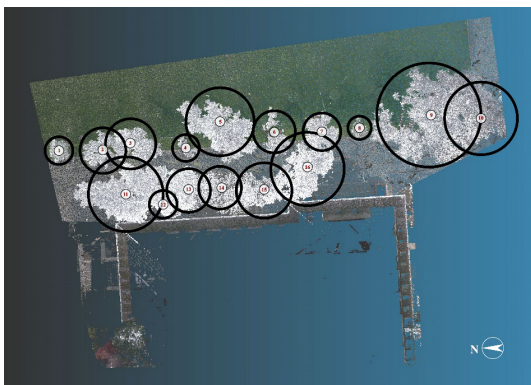


图 3 研究对象及其单棵树标记
Fig. 3 Research subjects and their individual tree labeling

但树冠形态存在较大差异:小树栽种于 2~3 年前,用于替换因严重病虫害死亡的大树;部分大树经过大量修剪,缺失部分树枝和树冠,呈现出不同程度的偏冠状态。本文采用 FARO Focus Plus S70 激光扫描仪对场地进行全方位扫描,扫描点位共 30 个,位置配准精度为 12.22 mm。

3 模型检验

3.1 模型质量检验

本文构建的模型是一种精细化树木数字模型。该模型基于点云数据生成,能够高度契合树木原始点云的外轮廓形态,是对传统树木模型的优化。传统的理想化模型通常通过树木点云或实地测量获取树木的基本形态参数(如树高、冠幅等),并以椭球体等理想几何形体为基础,依据这些参数来概括树木的形态。虽然理想化模型的基本形态参数与实测参数一致,但其与点云数据的契合度显然较低。

为进一步证明精细化模型的优势,本文进行了模型质量对比检验。具体而言,在完成精细化模型构建的基础上,本文根据 16 棵国槐的树高、冠幅和枝下高,利用 Rhino 软件构建了椭球体模型作为理想化的树木数字孪生模型^[24],并调整椭球体的长轴和短轴,使其更贴近实际树木的不均匀树冠特征。随后,本文通过两类指标验证所构建精细化模型在树木形态参数还原性和点云契合度方面的性能:第一类是模型对树木形态参数的还原性,即模型对树木形态特征的准确还原程度;第二类是模型与点云数据的距离契合度,即模型与原始点云数据在空间位置上的匹配精度。

在树木形态参数还原性验证方面,本文直接从精细化模型中测量获取树木的基本形态参数,包括株高、冠幅和胸径。这些参数与树木实测参数进行对比,以验证精细化模型在精确保留树木基本形态参数方面的能力。具体而言,冠幅是通过模型树冠垂直投影的外轮廓计算最小外接矩形的长宽边均值获得;胸径则是通过模型主干距离地面 1.2~1.4 m 处的水平切片的垂直投影获取。

在点云契合度验证方面,本文借助 CloudCompare 软件中的“cloud-to-mesh”工具,计算每棵树的外轮廓点与生成的曲面网格模型之间的欧氏距离^[25],以评估模型的点云契合度。距离的绝对值越小,表明模型的点云契合度越高。值得注意的是,原始点云中包含大量树木内部的点云数据,而精细化模型主要基于树木轮廓构建。因此,为确保质量检测的准确性,本文采用点云的外轮廓数据而非原始点云进行验证。

3.2 模型应用对比测试

在验证模型本体质量之后,为进一步直观呈现本文精细化树木数字模型相较于传统的理想化树木数字模型在应用方面的优势,本文借助 Phoenix 等软件,对两种模型进行了 CFD(计算流体动力学)风模拟分析。所用的 16 棵国槐的理想化模型与精细化模型具有相同的树木群落布局结构,均以 3ds 格式导入 Phoenix 软件。通过比较两种模型在相同天气和地理条件下的树冠周围气流运动情况,利用 FlowDesign 软件直观呈现风湍流的矢量运动特征。

通过对比两种模型在相同强风条件下的风速、风压等风灾风险预测结果,进一步证明精细化模型在解决城市绿化精细化管理问题方面的优势和潜力。根据蒲福风级(Beaufort wind scale),当风速超过 17.2 m/s 时,可能导致树枝折断并对行人造成安全隐患。因此,本研究将 10.8 m/s 的风速设定为初始强风条件,模拟树冠周围风速超过 17.2 m/s 的区域,以评估两种模型在风灾风险预测中的表现。

4 结果与分析

4.1 模型构建

4.1.1 点云聚类分割

引入人工监督的循环 DBSCAN 算法能够有效改善低密度树木群落点云的分割效果,从而获得较为理想的分割结果。图 4 展示了在完成地面点云分离后,采用 DBSCAN 算法进行初步聚类处理的树木群落点云。图中,离散点被识别为标记为-1 的点,不显示颜色,并自动从结果中删除。不同颜色的点云代表不同的树木,能够从周围环境元素中准确分离出来,行人、自行车、路灯等环境要素几乎全部被成功分离。然而,部分树冠或树干距离较近的树木(如图 4 中蓝色的两棵树)仍被赋予相同的标签颜色,未能完全分离。通过多次循环应用 DBSCAN 算法对未成功分离的部分进行处理后,所有单体树基本能够完全分离(图 5)。尽管在这一过程中,仍有少数树枝点云出现错误聚类情况,但总体而言,分割结果仍能较好地反映现有树木的自然形态。

4.1.2 三维点云轮廓点提取和三维点云重建

本文对 α -shapes 算法进行了基于降维与升维思

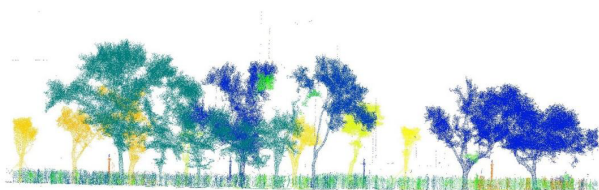


图 4 首次 DBSCAN 算法的聚类结果

Fig. 4 Initial clustering results of DBSCAN algorithm

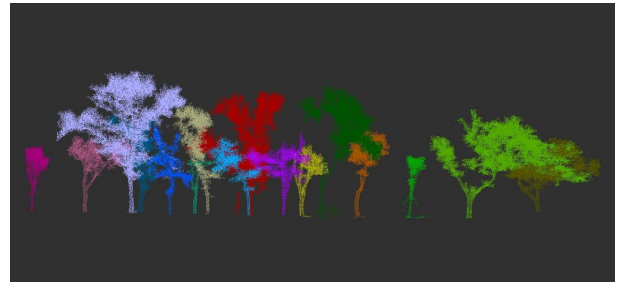


图 5 DBSCAN 算法经过 3 次循环后的聚类结果

Fig. 5 Clustering results of DBSCAN algorithm after three iterations

想的改良,从而突破了二维点云应用的局限,成功获取了每棵树木点云的三维外轮廓点(图 6b)。尽管增加三维外轮廓点的数量可以进一步提升模型的精度,但过大的数据量也会给计算机运算带来负担。经过测试,本文发现将单体树木点云每 60° 旋转一次,并在 ZOX 平面上进行 3 次投影,即可提取足够的三维外轮廓点以表征树木的冠形轮廓特征,同时避免了过重的运算负担。此外,该方法能够保留较大的树冠孔隙,为更准确地分析树冠透光性和周围风环境提供了可能。

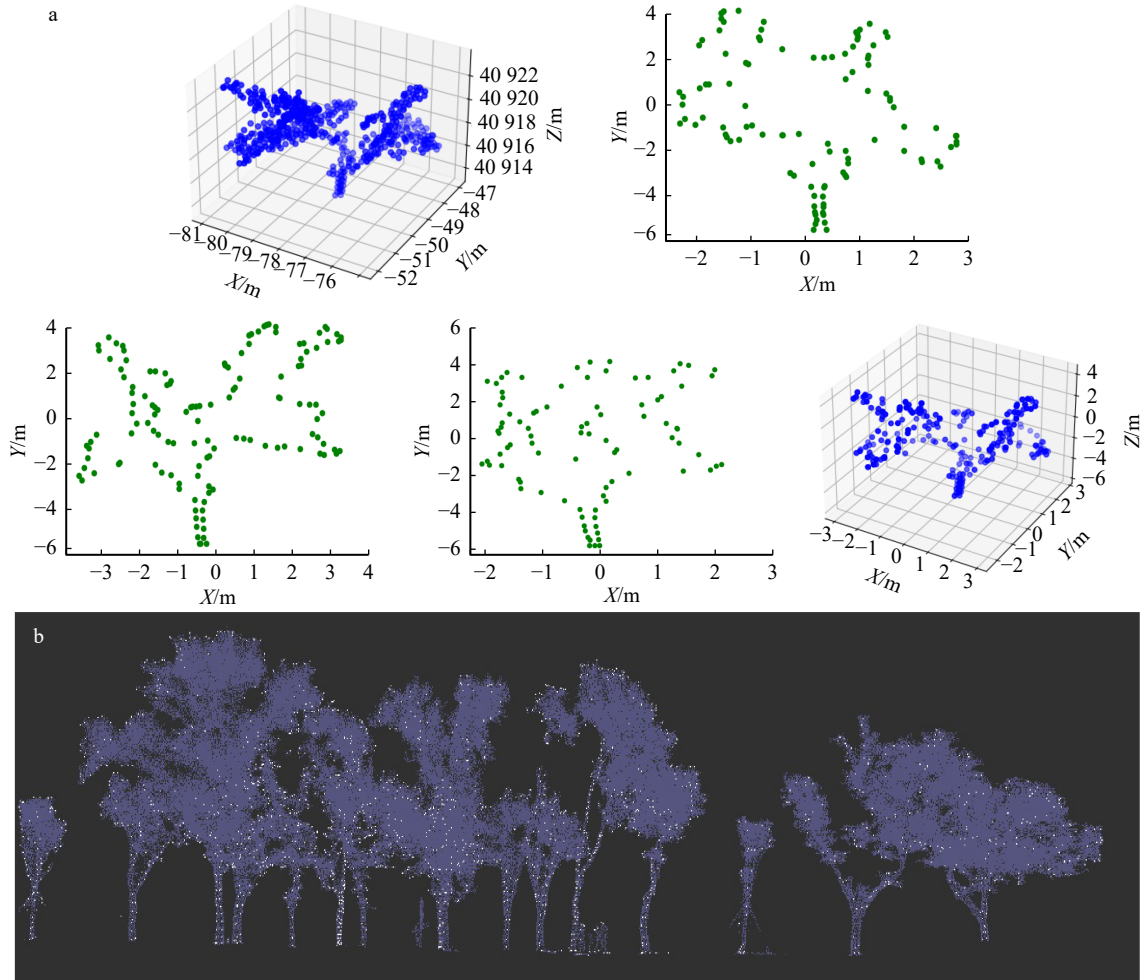
本文最终建立的平滑树木数字模型能够充分保留树木在实际场地中的布局结构和形态特征。图 7a 展示了生成的树木模型与原始点云的叠加对比,初步证明了模型具有较高的还原度。每棵树的种植位置与其真实生长位置准确一致,树冠本身的凹凸变化也得到了大部分保留。然而,需要指出的是,由于 DBSCAN 聚类结果不完整,一些具有大量重叠区域的树木点云在模型中丢失了部分树冠。如果 DBSCAN 点云分割算法得到改进,这些树木也将获得更贴合实际的数字孪生模型。不过,对这种算法基本原理的改进并不在本文的研究范围内。

图 7b 进一步说明了该模型的高度还原性、真实性和独特性。尽管其中一些树冠底部过于圆滑,例如 12 号树的树冠底部与树干衔接位置存在较大凹陷,但模型未能充分表现出这种凹陷状况。然而,通过调整邻近点等距离插值的阈值判断条件,这一问题可以得到改善。

4.2 模型质量评估结果

4.2.1 树木形态参数还原性验证

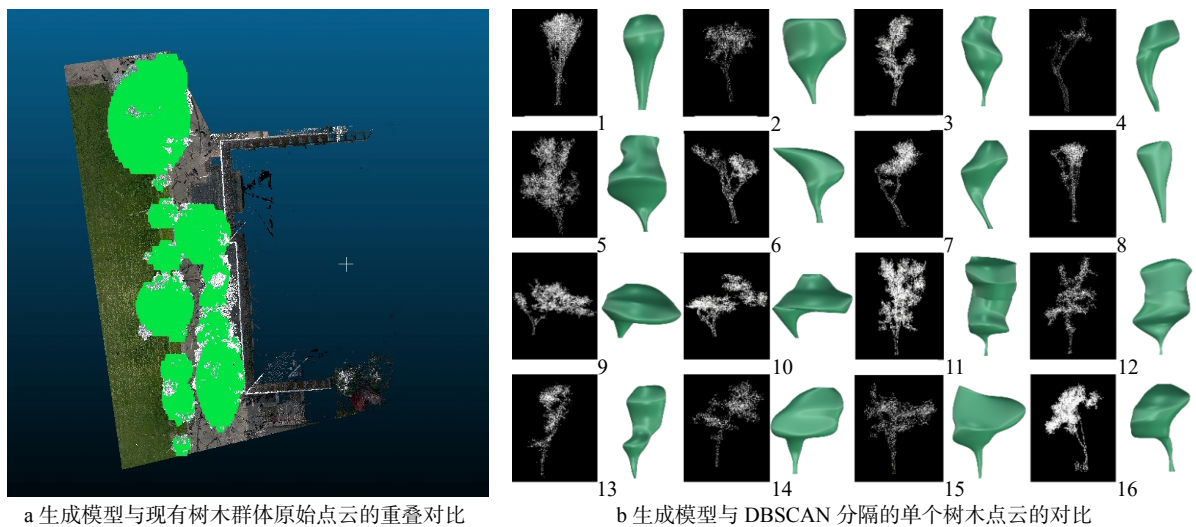
模型能够较为准确地还原树木的胸径、冠幅和株高等参数。表 1 展示了模型提取参数与点云实测参数之间的绝对误差和相对误差^[10]的对比结果。具体而言,每棵树的胸径和冠幅的最大相对误差分别为 -0.92% 和 1.04%,其高精度主要得益于对树冠上边界点的精确提取。相比之下,树木株高的相对误差较大,最大值达到 3.71%。这是因为在株高提取过



a. 以 12 号树为例, 说明边界点提取的中间过程, 表现该方法可以提取较大的树洞孔隙轮廓; b. 白点为提取边界点, 紫色点为每棵树的点云

图 6 从单体树木的点云中提取的边界点

Fig. 6 Boundary points extracted from the point cloud of an individual tree



a 生成模型与现有树木群体原始点云的重叠对比

b 生成模型与 DBSCAN 分隔的单个树木点云的对比

图 7 精细化树木数字模型生成结果(1~16 号树)

Fig. 7 Generation results of refined tree digital models (tree No. 1-16)

程中, 株高是通过计算外轮廓点云的 z 值极值之差来确定的, 而外轮廓点云在三维重建过程中, 由于 α -shapes 算法的检索半径设置, 几乎不可避免地会出

现部分外轮廓点云缺失的现象。因此, 株高绝对误差 (ΔH_t) 均为负值。如果减小检索半径, 点云缺失现象会减少, 株高的相对误差也会相应降低。

表1 模型提取与点云实测树木参数对比

Tab. 1 Comparison of tree parameters extracted by model and measured by point cloud

树木编号	点云实测			树木模型参数提取			AEs			RAEs		
	CW/m	Ht/m	DBH/m	CW/m	Ht/m	DBH/m	Δ CW/m	Δ Ht/m	Δ DBH/m	Δ CW/CW	Δ Ht/Ht	Δ DBH/DBH
1	2.92	7.4	0.21	2.89	7.4	0.21	0.03	0	-0.017	1.04%	0.00	-0.80%
2	5.76	8.6	0.36	5.71	8.66	0.36	0.05	-0.06	0	0.88%	-0.69%	0.00
3	5.38	11.2	0.46	5.33	11.33	0.46	0.05	-0.13	0.002	0.98%	-1.15%	0.48%
4	2.72	7.05	0.32	2.70	7.23	0.32	0.02	-0.18	-0.002	0.86%	-2.49%	-0.56%
5	9.27	14.23	0.51	9.22	14.46	0.51	0.05	-0.23	0.002	0.55%	-1.59%	0.31%
6	4.19	8.25	0.41	4.17	8.25	0.41	0.02	0	-0.004	0.48%	0.00	-0.92%
7	5.05	9.86	0.42	5.04	10.24	0.42	0.01	-0.38	0.001	0.29%	-3.71%	0.27%
8	2.5	7.05	0.23	2.49	7.20	0.23	0.01	-0.15	-0.002	0.26%	-2.08%	-0.89%
9	13.85	12.28	0.52	13.71	12.52	0.52	0.14	-0.24	0.001	0.99%	-1.92%	0.22%
10	8.71	8.27	0.62	8.71	8.27	0.61	0.01	0	0.005	0.02%	0.00	0.88%
11	8.01	16.28	0.45	8.06	16.53	0.45	-0.05	-0.25	0	-0.60%	-1.51%	0.00
12	5.15	10.12	0.18	5.17	10.26	0.18	-0.02	-0.14	-0.001	-0.32%	-1.36%	-0.70%
13	5.14	12.67	0.28	5.13	12.85	0.28	0.01	-0.18	0.002	0.22%	-1.40%	0.83%
14	3.57	8.98	0.25	3.61	9.03	0.25	-0.04	-0.05	0.002	-0.99%	-0.55%	0.63%
15	4.29	9.08	0.3	4.33	9.28	0.30	-0.04	-0.20	-0.002	-0.95%	-2.16%	-0.71%
16	9.23	15.18	0.3	9.18	15.41	0.30	0.05	-0.23	-0.001	0.57%	-1.49%	-0.48%

注: CW为冠幅, Ht为株高, DBH为胸径, AEs为绝对误差, RAEs为相对误差。

4.2.2 点云契合度验证

16个精细化树木模型的外轮廓点云平均误差仅为-3.06 cm。偏冠现象和点云分割不完整是导致误差的两个主要原因。9号树的平均误差和标准差在所有树木中最大(图8), 标准差为0.81, 主要原因是该树存在严重的偏冠现象。此外, 点云分割的不完整性也会导致较高的误差。以5号树为例, 其原始点云在图7b中存在部分枝干点云丢失的问题。这是由于点云分割算法自身的不完善性导致的不完整分割。丢失枝干的树冠部分仍会被识别为轮廓点, 从而导致5号模型内部出现多余轮廓点, 其模型与外

轮廓点云距离的标准差为0.74。

此外, 精细化模型与点云的契合度明显优于传统模型。从图9可以看出, 对于16棵树木的总体模型, 两种模型与点云距离的误差统计均呈现正态分布。然而, 精细化模型的误差分布更趋向于0, 而理想化模型的误差分布则更为分散, 精细模型的标准差比理想模型低0.43, 这说明精细模型整体比理想模型精度更高且生成质量更稳定。

4.3 模型对比应用结果

为测试两种模型在评估城市树木风灾风险这一关键的城市绿化精细化管理问题上的表现, 构建两

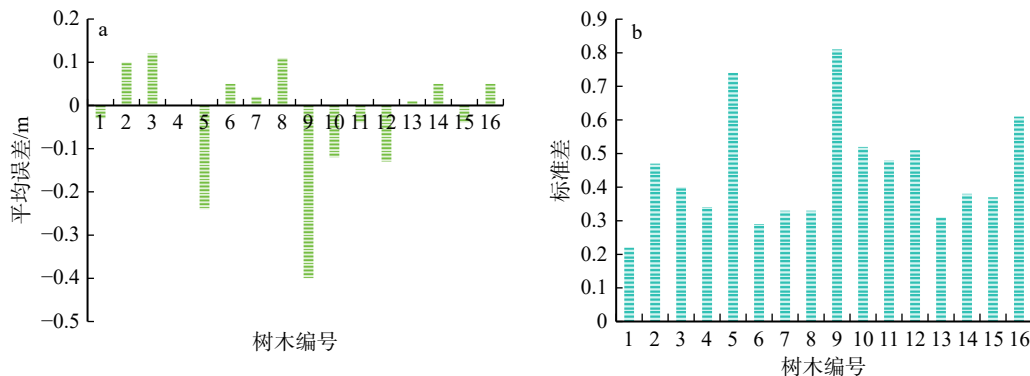


图8 基于 CloudCompare 的欧氏距离的精细化模型与对应点云的平均误差(a)与标准差(b)统计图

Fig. 8 Average error (a) and standard deviation (b) statistics of the refined model with the corresponding point cloud based on Euclidean distance in CloudCompare

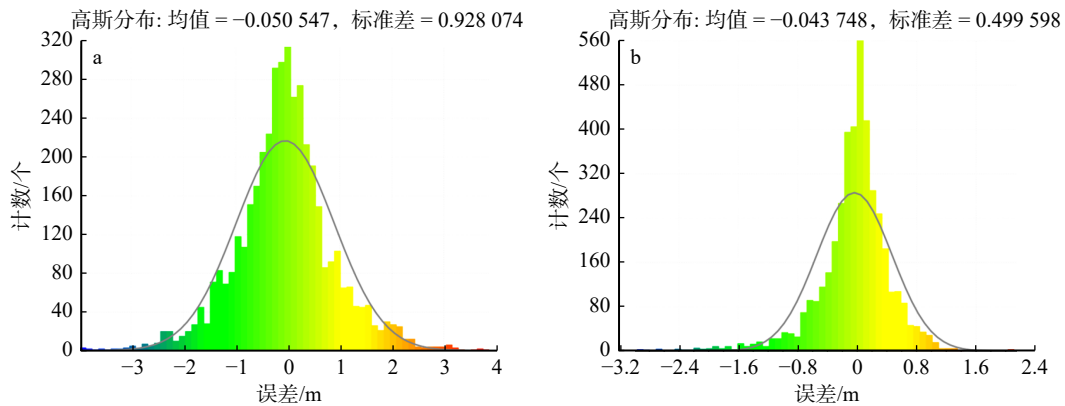


图 9 基于 CloudCompare 欧氏距离的理想模型(a)、精细模型(b)各自与其对应点云的误差直方图

Fig. 9 Histogram of errors between ideal models (a), refined models (b) and their corresponding point clouds based on Euclidean distance in CloudCompare

种模型的同一场景(图 10),在软件模拟强风环境下,开展模型应用对比实验。传统的树木模型在进行计算 CFD 模拟时,通常仅收集树木的基本参数(如树冠直径或树高),并将其简化为几何图形(如椭球体或锥体)以代表树冠。虽然这种理想化模型在计算时数据量较小,但其简化的几何形状在小尺度场地风模拟中可能无法准确反映树冠周围的气流运动,从而导致一定的精度损失。相比之下,本研究生成的精细化树木数字孪生模型能够有效解决这一问题。

通过 Phoenix 软件的模拟分析,两种模型在强风天气下树冠周围的风速分布存在显著差异(图 11),且模拟结果的收敛性验证了其有效性(图 12)。特别是在树木群落内部,理想模型难以准确模拟风在树群中的复杂湍流变化,而精细模型则能够更好地还原这些复杂现象。两种模型在风速分布方面的差异尤为明显(见图 13),在风速为 15.00~16.25 m/s 时,分布面积的最大差异可达 97.23%;而在风速为 16.25~17.50 m/s 时,树木已面临较高安全风险,此时风速分布差异可达 88.58%。这表明在相同的强风条件下,两种模型模拟的树木受灾风险范围存在较大差异。

对比结果清楚地表明,本研究的精细化树木模型能够提供更精细、更准确的模拟结果。作为数字孪生模型,它相较于传统应用中的理想化模型更适

合应用于智慧城市中的树木风险管理。在大风天气来临前,该模型能够更精准地预警可能受到风灾威胁的树木,并为城市树木的修剪和养护管理等精细化操作提供科学指导。

5 结 论

本文针对传统树木数字孪生模型难以精细化呈现树木真实形态的问题,提出了一种精细化树木数字孪生模型及其生成流程。该模型基于现状树群的三维点云,通过点云分割和重建技术生成,能够模拟整个现状树木群落。与传统理想模型相比,新型模型在全面性、灵活性、准确性、轻便性和独特性方面更具优势。

精细化数字孪生树模型能够完整保存树木的内外部基本结构,比传统理想树模型更全面且更灵活。树冠轮廓的凹凸变化得以保留,并可通过超参数设置调整其凹凸性和圆滑度。例如,增大最近插值点检测阈值会使树冠更平滑,而减小该值则使模型更逼真,但同时会增加计算负担。经测试,将该阈值设置为点云平均距离的 1.5 倍,可在保证模型精确性的同时,保持数据的轻便性。

该模型具有极高的准确性。在最近插值点检测阈值为点云平均距离 1.5 倍时,16 个国槐模型的平均误差仅为 1.6 cm,最大误差为 7.5 cm。与规则形状的理想模型相比,从精细化模型中提取的树木形态参数更接近实际测量结果。冠幅和胸径的误差小于 1.1%,尽管树高测量误差相对较高,但可通过改进点云分割算法和优化 α -shapes 算法的 α 参数设置来解决。

高精度特性还使该模型能够保存每棵树在轮廓形状和位置上的独特性。该工作流程可根据每棵真实树木的形态和位置,在数字平台上生成独一无二的数字孪生模型。与传统的理想化模型相比,精细

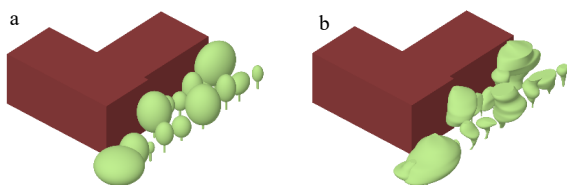
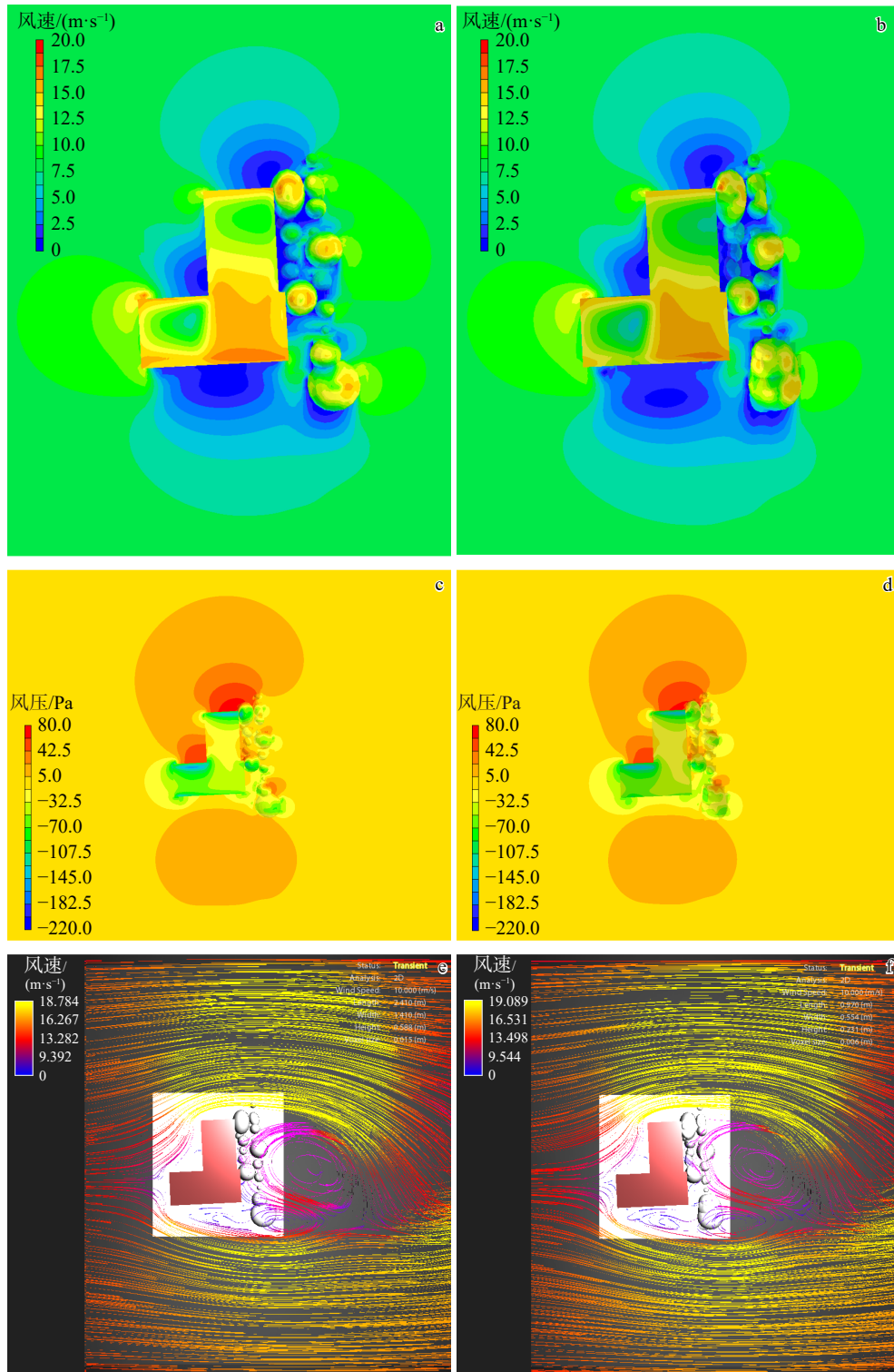


图 10 基于现状树群三维点云的理想树木模型(a)与精细化树木模型(b)

Fig. 10 Ideal models (a) and refined tree models (b) derived from the 3D point clouds of existing tree clusters



a, b 分别为理想模型和精细模型的风速模拟; c, d 分别为两种模型的风压模拟; e, f 呈现风矢量运动轨迹, 其运动激烈程度可直观呈现湍动

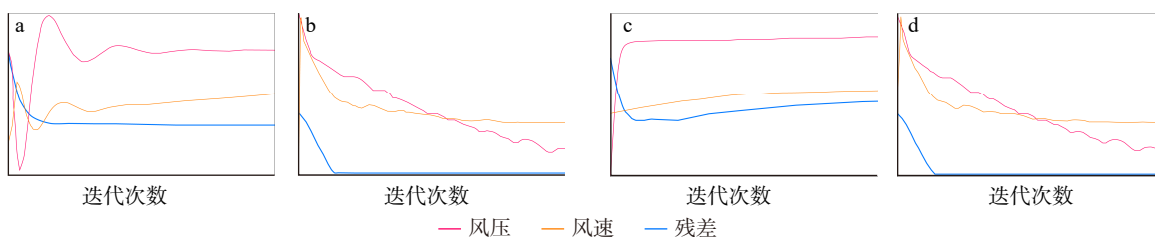
图 11 强风下树冠周围风速的预测结果

Fig. 11 Prediction results of wind speed around tree crowns under strong wind conditions

化树木数字孪生模型能够更好地仿真树木的真实特征。因此, 该模型可与智慧城市技术结合, 应用于树木风灾风险管理等城市树木精细化问题的研究, 从而推动智慧城市技术更广泛、更深入地应用, 有效提升城市绿化治理决策的效率和精度。

本研究提出的精细化模型适用于植株粘连状况

不严重、种植密度相对较低的乔木和灌木群落, 且不受树种限制。然而, 对于植株黏连严重、种植密度较高的植物群落, 该模型的适用性较低。为解决这一问题, 未来需要改进 DBSCAN 等点云分割算法的底层逻辑, 以拓展该工作流程在高密度植物群落数字孪生模型生成中的应用。



a, b. 理想模型残差图; c, d. 真实模型残差图。a 和 c 是某时刻瞬时模拟数值; b 和 d 是随迭代次数累加的某时刻迭代模拟数值, 橙色和红色分别是风速、风压在每次迭代时的数值结果(共迭代 500 次)。b、d 中的蓝色线均趋于稳定证明两种模型的迭代计算均收敛。

图 12 Phoenix 软件中理想和真实两种模型风模拟计算的残差图

Fig. 12 Residual plots of the two models in wind simulation calculations using Phoenix software

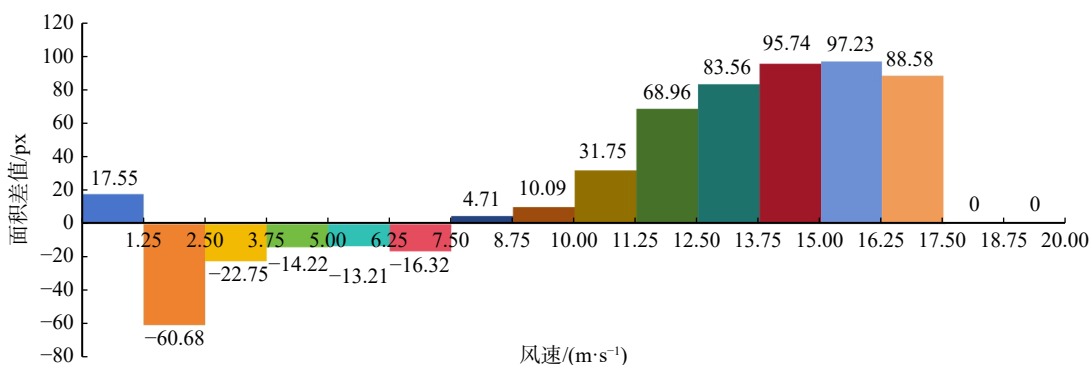


图 13 理想和精细两种模型在不同风速等级的模拟结果面积相差对比

Fig. 13 Comparison of area difference between the simulation results of ideal and refined models for different wind speed classes

致谢 全体作者衷心感谢清华大学郭湧老师! 在本研究过程中, 郭老师为点云数据的获取与分析提供了宝贵支持。

参 考 文 献

[1] Kim Y G, Song Y M, Cho S. Design and management direction of smart park for smart green city[J]. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture, 2020, 48(6): 1-15.

[2] 师卫华, 季珏, 张琰, 等. 城市园林绿化智慧化管理体系及平台建设初探 [J]. 中国园林, 2019, 35(8): 134-138.

Shi W H, Ji Y, Zhang Y, et al. Discussion on the intelligent management system and platform construction of urban landscaping[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(8): 134-138.

[3] 吴立峰, 化剑, 辛磊, 等. 智慧园林背景下西安国际港务区城市公园绿地智慧化建设探究 [J]. 中国园林, 2023, 39(增刊 2): 126-131.

Wu L F, Hua J, Xin L, et al. Exploring the smart construction of urban parks and green spaces in Xi'an International Trade & Logistics Park[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(Suppl.2): 126-131.

[4] 袁旻洋, 谈方琪, 樊柏青, 等. 乡村景观全要素数字化模型构建研究: 以福建省将乐县常口村为例 [J]. 中国园林, 2023, 39(2): 50-56.

Yuan Y Y, Tan F Q, Fan B Q, et al. Research on the construction of full-elements digital model of rural landscape: a case study of Changkou Village in Jiangle County, Fujian Province[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(2): 50-56.

[5] Li H, Zhang X, Li Z, et al. A review of research on tree risk assessment methods[J]. Forests, 2022, 13(10): 1556.

[6] Qian C, Yao C, Ma H, et al. Tree species classification using airborne LiDAR data based on individual tree segmentation and shape fitting[J]. Remote Sensing, 2023, 15(2): 406.

[7] Hong B, Lin B, Hu L, et al. Optimal tree design for sunshine and ventilation in residential district using geometrical models and numerical simulation[J]. Building Simulation, 2011, 4(4): 351-363.

[8] 郭湧, 魏云琦, 欧阳翠玉. 基于 LIM 的城市园林树木碳储量基线情景模拟研究: 以北京市某高校绿地为例 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 44(12): 111-120.

Guo Y, Wei Y Q, Ouyang C Y. Research on LIM-based simulation of carbon stock baseline scenario in urbantrees: taking the green space of a university in Beijing as an example[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 44(12): 111-120.

[9] Palme M, Privitera R, La Rosa D. The shading effects of green infrastructure in private residential areas: building performance simulation to support urban planning[J]. Energy and Buildings, 2020, 229: 110531.

[10] Tarsha K F, Lewandowicz E, Shan J, et al. Three-dimensional modeling and visualization of single tree LiDAR point cloud using matrixial form[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 3010-3022.

[11] Fawcett D, Azlan B, Hill T C, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) derived structure-from-motion photogrammetry point clouds for oil palm (*Elaeis guineensis*) canopy segmentation and height estimation[J/OL]. International Journal of Remote Sensing, 2019. [2024-10-02]. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.>

- 1080/01431161.2019.1591651.
- [12] Hu X, Hu C, Han J, et al. Point cloud segmentation for an individual tree combining improved point transformer and hierarchical clustering[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2023, 17(3): 034505.
- [13] 孔丹, 庞勇, 梁晓军, 等. 基于分层叠加的机载 LiDAR 点云单木分割 [J]. *林业科学*, 2024, 60(3): 87–99.
- Kong D, Pang Y, Liang X J, et al. Individual tree segmentation from ALS point clouds based on layers stacking algorithm[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, 60(3): 87–99.
- [14] Ester M, Kriegel H P, Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[J]. *Knowledge Discovery and Data Mining*, 1996, 96(34): 226–231.
- [15] Ning X, Ma Y, Hou Y, et al. Trunk-constrained and tree structure analysis method for individual tree extraction from scanned outdoor scenes[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1567.
- [16] Xu H, Gossett N, Chen B. Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(4): 19–22.
- [17] Hachenberg J, Spiecker H, Calders K, et al. SimpleTree: an efficient open source tool to build tree models from TLS clouds[J]. *Forests*, 2015, 6(11): 4245–4294.
- [18] Zhang J, Li B, Wang M Y. Study on windbreak performance of tree canopy by numerical simulation method[J]. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2018, 10(4): 259–265.
- [19] Zheng B, Bernard B K, Zheng J, et al. Combination of tree configuration with street configuration for thermal comfort optimization under extreme summer conditions in the urban center of Shantou City, China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(11): 4192.
- [20] Chen L, Zhang Y, Luo Z, et al. Optimization design of the landscape elements in the lhasa residential area driven by an orthogonal experiment and a numerical simulation[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(10): 6303.
- [21] Li R, Zhao Y, Chang M, et al. Numerical simulation methods of tree effects on microclimate: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 205: 114852.
- [22] Bellock K, Godber N, Kahn P. bellockk/alphashape: v1. 3.1 Release[CP/OL]. 2021. [2024–10–02]. https://zenodo.org/search?q=metadata.creators.person_or_org.name%3A%22Ken%20Bellock%22&l=list&p=1&s=10&sort=bestmatch.
- [23] 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 Z P, Chen L, Bai H P, et al. Adaptive alpha-shapes plane point cloud boundary extraction method[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2019, 16(2): 15–21.
- [24] Amani B M, Tabatabaei M M, Dehghanian K, et al. Investigating the effects of wind loading on three dimensional tree models using numerical simulation with implications for urban design[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 7277.
- [25] Murtiyoso A, Veriandi M, Suwardhi D, et al. Automatic workflow for roof extraction and generation of 3D CityGML Models from low-cost UAV image-derived point clouds[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(12): 743.

(责任编辑 吴娟
责任编委 陈志泊)