

doi: 10.6046/zrzyyg.2023211

引用格式: 万里红, 曹振宇, 田志林, 等. 一种基于地面激光雷达点云的树木三维建模方法[J]. 自然资源遥感, 2025, 37(1): 62-67. (Wan L H, Cao Z Y, Tian Z L, et al. A method for 3D modeling of trees based on terrestrial LiDAR point cloud[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(1): 62-67.)

一种基于地面激光雷达点云的树木三维建模方法

万里红^{1,2}, 曹振宇^{1,3}, 田志林², 施艳丽¹

(1. 自然资源部四川基础地理信息中心, 成都 610041; 2. 电子科技大学资源与环境学院, 成都 611731; 3. 自然资源部应急测绘技术创新中心, 成都 610041)

摘要: 为更好地获取树木三维几何结构信息, 解决高精度、高还原度的树木三维重建问题, 提出了一种基于地面激光雷达 (terrestrial laser scanning, TLS) 点云数据的树木三维建模方法。针对 TLS 扫描存在树叶间隙的遮挡, 充分考虑叶片聚集, 结合叶片和枝干的形态特征, 采用 Delaunay 三角网和 Alpha-shape 算法分别对树木叶片和枝干进行模型拟合重建, 有效克服了过去树木三维建模枝干结构不真实、器官建模不精细等问题, 较好实现了对单棵树木叶片和细小枝干的三维重建。所提方法可为森林结构参数获取和资源经营管理等提供技术支撑, 同时也能为典型树木的部件级实景三维建模提供一定的借鉴和参考作用。

关键词: 地面激光雷达; 点云; 枝叶分离; 实景三维; 树木三维建模

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2025)01-0062-06

0 引言

树木三维建模已经有几十年的研究历史, 由于其形状结构的多样性和复杂性, 构建其真实的三维模型一直是一个具有挑战性的研究难题^[1]。最早国内外学者试图使用摄影测量遥感的方式对树木进行扫描和建模, 但是光学测量无法有效地穿透森林获取冠层内部垂直结构信息, 树叶的遮挡也会造成枝干信息无法准确获得, 因此只能通过植物表型知识来随机生成枝干, 与真实的树木数据之间具有较大的差异, 并不具备形态结构上的保真性^[2]。

激光雷达是近年来发展十分迅速的一种主动遥感技术, 具有高空间分辨率、高精度和强穿透性, 能提供扫描对象的精确三维几何结构信息, 相较于光学摄影测量, 在三维重建上具有无可比拟的优势^[3]。由于激光雷达获取的点云数据量庞大, 海量点云数据的处理、三维重建算法的选择和优化将直接影响整个重建的效率和精度。目前, 伴随着计算机视觉算法和计算机图形学方法的不断发展完善, 树木枝叶分离算法日渐成熟, 激光雷达三维点云数据已经可以实现对实体树木进行三维仿真和器官重建, 进而对树木进行三维建模。这将对森林碳汇经

营、林业生态管理、智慧农林、虚拟现实和元宇宙等领域都具有重要价值和意义。

利用地面激光雷达点云数据进行单木三维重建, 特别是在树木枝干重建方面, 目前已有一些比较成熟的算法^[4]。Cheng 等^[5]利用地基激光雷达单站数据, 结合深度图像法建立了树木枝干和树枝的三维模型, 但是单站数据由于扫描角度有限, 得到的点云数据会因为激光雷达扫描过程中受木质组分遮挡而产生较大的空隙和孔洞, 并且单站扫描点云空间分辨率较低, 无法有效地对叶片进行建模; 苏中花^[6]通过多站扫描地基激光雷达对树木进行了主干建模和局部单片叶片建模, 但存在建模效率低、细小枝干建模不完整、无法有效建模出冠层内所有的叶簇等问题。同时, 在建模过程中, 由于叶簇聚集的问题, 还会在建立叶簇模型时无法排除叶簇之间的空隙, 导致叶簇体积增大、形状失真等问题, 无法实现对树木的高还原度数字孪生建模。

针对上述存在问题和不足, 本文提出了一种基于地基激光雷达点云的树木三维建模方法。基于超高空间分辨率的多站式地基激光扫描技术, 结合形态学和图形学的方法, 通过对叶片和枝干进行聚类分离提取和算法建模, 从而实现单棵树木数字孪生, 对树木的叶片和细小枝干均建立高还原度的模型,

收稿日期: 2023-07-14; 修订日期: 2023-12-15

基金项目: 四川省科技计划项目“山区重大地质灾害智能识别与动态风险评估关键技术研究”(编号: 2023YFS0434)和“化工重大危险源事故监测预警及应急救援决策支撑关键技术研究与示范”(编号: 2023YFS0415)共同资助。

第一作者: 万里红(1980-), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要研究方向为时空大数据三维 GIS。Email: wlh_666@126.com。

解决树木结构不真实、器官建模不精细等问题。

1 研究方法

本研究充分利用地面激光雷达多角度扫描高精度、高密度和强穿透性等特点。首先对树木进行多站式地基激光雷达扫描,得到完整的地基激光雷达扫描点云数据;再对原始的地基激光雷达数据进行点云预处理工作,完成去噪、树木点云提取等工作;之后采用 LeWoS 算法对树木点云进行枝叶分离,进而得到其叶片点云和枝干点云,对于叶片点云,采用欧氏距离聚类法,对其进行叶簇尺度的聚类^[7],并在此基础上基于 Delaunay 三角网构建叶片模型,对于枝干点云,采用 Alpha-shape 算法构建枝干模型;最后将构建完成的叶片模型和枝干模型叠加在一起,完成对目标树木的数字孪生重建,整个技术路线流程如图 1 所示。

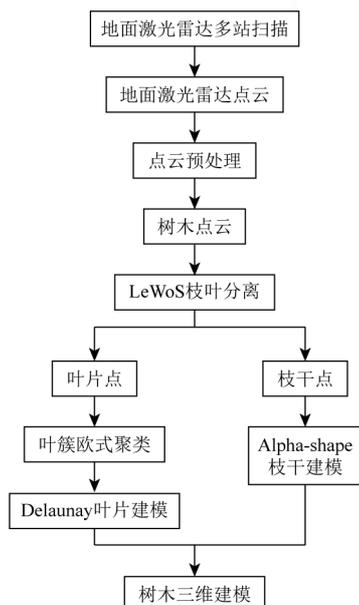


图 1 研究技术路线

Fig.1 Flowchart for research technology

1.1 TLS 多站扫描

本次选择 Leica Scan Station C10 地基激光雷达扫描仪对一株香樟树进行点云样例数据采集获取。考虑到树木的叶片与枝干存在聚集、遮挡等复杂因素,为了更全面、精确地获得该树木的三维点云数据,尽量在晴朗无风的条件下设立 3 个独立站点对被测树木进行环绕扫描和标靶定标采集,其中 3 个相邻站点之间的夹角为 120° 。

由于在激光雷达扫描过程中,重叠的叶片和树木的木质组分会对激光有一定的遮挡效应,因此采用多站式扫描,尽量减少由于遮挡效应造成的树木点云数据的缺失^[8]。多站扫描时各站点架设沿待

扫描对象尽量均匀分布。在对物体进行多站扫描之后,通过站点之间的位置标定对各站数据进行拼接,得到完整的地基激光雷达扫描点云数据。

1.2 点云预处理

激光雷达扫描得到的点云数据是对真实场景中的物体进行采样,在扫描采样的过程中由于受到外界环境、目标物体表面形状纹理等因素影响^[9],点云数据中不可避免地会出现误差和噪声,同时还存在其他无关点云和冗余数据。因此,对于原始激光雷达数据需要进行点云预处理,主要包括数据过滤、数据配准、非树木点去除、数据抽稀等步骤^[10]。

1.3 枝叶分离

由于树木的枝干和叶片具有不同的几何形态和生物特征,而且提取的树木点云数据只有坐标和强度信息,因此需要通过枝叶分离的方法对其进行类别判别,进而分类确定原始点云中的叶片点和木质组点。对于地基激光雷达点云数据而言,由于其穿透性较好、空间分辨率高等特点,枝干的轮廓细节获取完整,相较于叶片而言,枝干几何形状明显,便于提取。本次采用开源 LeWoS 模型算法进行树木的枝叶分离,该模型是一种基于点云网络递归分割和分类正则化的方法,只需要输入一个参数,即可高效、精确地完成枝干提取工作^[11]。基于获取的点云数据无监督完成树木枝干和叶片点云分类,从而得到单棵树木的枝干点和叶片点。

2 树木建模

根据树木点云预处理后得到的叶片和枝干点云分别进行建模,枝叶建模主要开发环境为 MATLAB 2020B 和 Dev-C++ 5.11,编程语言为 MATLAB 和 C++。

2.1 叶簇聚类

由于叶簇之间存在聚集,如果直接对提取出来的叶片点云进行建模,可能会造成不同的叶片点被归为同一叶片点。因此,本文先将叶片点云基于欧氏距离聚类成多个叶簇,然后再对各个叶簇进行建模,从而规避叶片建模混乱的问题。

首先利用欧氏距离进行点云聚类,这是一种基于欧氏距离度量的聚类算法,可以将其应用于测绘领域中点云数据的分割^[12]。首先计算点云数据中两点之间的欧氏距离,将距离小于指定阈值作为分为一类的判定准则;然后迭代计算,直至所有的类间距大于指定阈值,完成欧氏聚类分割。

由于叶片卷曲局部较为扁平,因此本文采用 Delaunay 三角网对各个叶簇建模。在建立 Delaunay

三角网时采用 Lawson 逐点插入法,具体实施方法步骤如下:

1) 将叶片点云中拥有相同叶簇类别编号的点组成的点集称为一个叶簇。对叶簇 $cluster_i$ 建立一个一一对应的三角形凸包 Tri_i , 其中 i 为叶簇序号。

2) 对于三角形凸包 Tri_i , 向其内部插入 $cluster_i$ 中的一点, 令插入的点与它所在的三角形的 3 个顶点相连, 进而生成 3 个新的三角形。然后对新生成的 3 个三角形分别做外接圆, 如果三角形的外接圆内不包含已经生成的三角形的顶点, 则认为新生成的三角形为 Delaunay 三角网的一部分; 如果三角形的外接圆内包含了已经生成的三角形的顶点, 则删去该顶点和新生成的 3 个三角形。

3) 在 $cluster_i$ 选取之前未插入的点, 重复步骤 2), 直至遍历完 $cluster_i$ 内的所有点, 意味着该叶簇的 Delaunay 三角网模型建立完成。

4) 重复以上步骤 1)–3) 直至所有叶簇被遍历, 完成每个叶簇的模型建立, 从而得到叶簇点集聚类结果。如图 2 所示, $R=0.006$ m 为欧式聚类分割距离阈值。

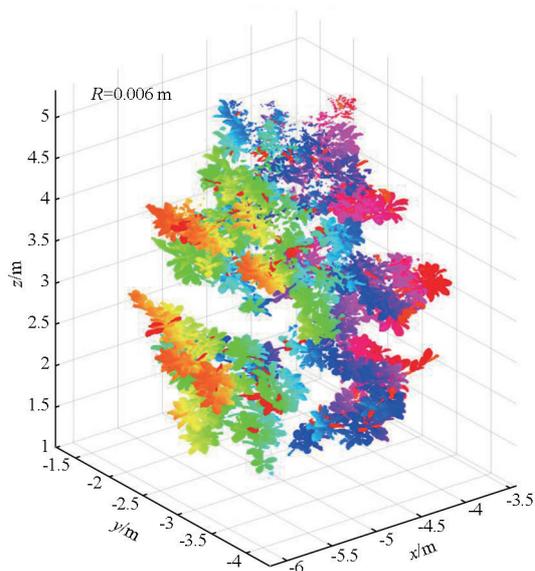


图 2 叶簇欧氏距离聚类结果

Fig.2 Leaf cluster Euclidean distance clustering result

2.2 叶片建模

根据得到的叶簇点集, 基于 Delaunay 三角网构建各叶片模型, 具体实施步骤为:

1) 初始化叶片点云的叶簇类别编号, 令所有叶片点云的叶簇类别编号为 0。

2) 取叶片点云中的任意一点 P , 记其叶簇类别编号为 K_n , $K_1=1, K_n=n$; 以 P 为中心点, 在叶片点云中搜索与 P 的距离 R 小于固定阈值 R_{th} 的点, 归入点集 K_n , n 为自然数, 从 1 依次取值; R_{th} 取值一般

为 5~300 mm, 叶片分布密度不变的情况下, 叶片尺寸越大, R_{th} 越大。 P 和非 P 点之间的距离 R 计算公式为:

$$R = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (1)$$

式中: (x, y, z) 为点 P 的坐标; (x_i, y_i, z_i) 为非 P 点的坐标。遍历点集 K_n 内的所有点, 在叶片点云中搜索是否存在一点 T , 使得点集 K_n 内存在一点 G 与点 T 之间的距离 R 小于固定阈值 R_{th} , 如果存在, 则将 T 归入点集 K_n , 并再次重复上述步骤, 搜索可以被并入点集 K_n 的点; 如果不存在, 则意味着点集 K_n 内的所有点被找到。

3) 循环以上步骤遍历 $K_1 \sim K_n$ 以外的剩余叶片点云, 直至叶片点云中不存在叶簇类别编号为 0 的点。然后, 对欧氏距离聚类后的叶片点云的各个叶簇进行基于 Delaunay 三角网的模型构建, 并累加各个叶簇的模型, 得到单棵树木叶片模型, 结果如图 3 所示。

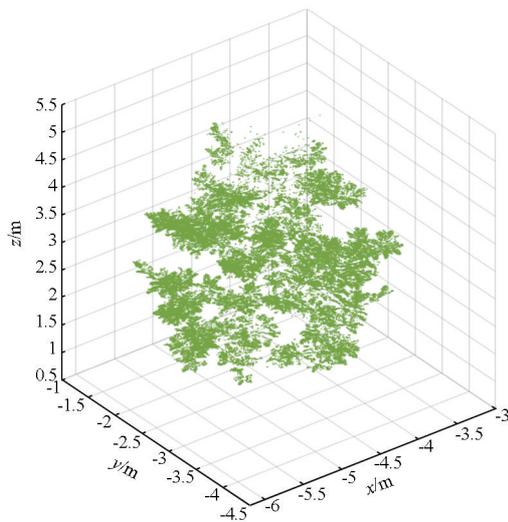


图 3 叶片建模结果

Fig.3 Tree leaf modeling result

2.3 枝干建模

由于枝干点卷曲程度较高, 且在实际情况中会由于扫描角度、遮挡间隙等问题造成枝干表面点密度分布不均匀, 因此本文采用对间隙更为包容的 Alpha-shape 算法进行枝干建模。Alpha-shape 是一种提取边界点的算法, 通过控制参数 a 的大小, 对树冠进行三维模型重建。一般参数 a 越小, 结果越精确, 但当减少到一定值时, 重建结果不完整, 无法形成树木枝干模型^[13]。

Alpha-shape 算法本质为滚球法, 通常用于点云轮廓提取或三维重建, 通过控制不同半径的滚球, 求取包络, 确定整个点集的表面^[14], 其算法实现具体方法如下:

在先前枝叶分离的枝干点集中抽取任意不在一条直线上的3个点,记为 M, N, Q 。在三维空间中过点 M, N, Q 可以生成2个半径大小为 r 的球体,分别记为 $Sphere_a$ 和 $Sphere_b$ 。

如果在 $Sphere_a$ 和 $Sphere_b$ 中存在一球体,该球体内部不包含枝干点集内的任何点,那么则判定这3个点组成的表面为枝干模型多面体的一个表面,并将其记为建模模型的一个表面。如果上述情况不存在,则由 M, N, Q 3点组成的表面不为建模模型的表面。通过程序遍历枝干点集内的所有点的组合,基于Alpha-shape算法完成枝干模型的表面重构,得到实例枝干三维重建模型如图4所示。

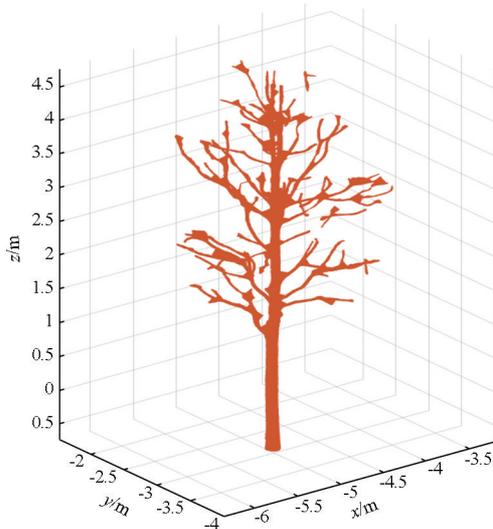


图4 枝干建模结果

Fig.4 Tree Branch Modeling Result

2.4 枝叶融合

最后,将得到的叶片和枝干模型进行修饰整理和集成融合,并根据实际需求赋予各自的标签和属性,即完成对整棵树木的数字孪生三维建模(图5)。

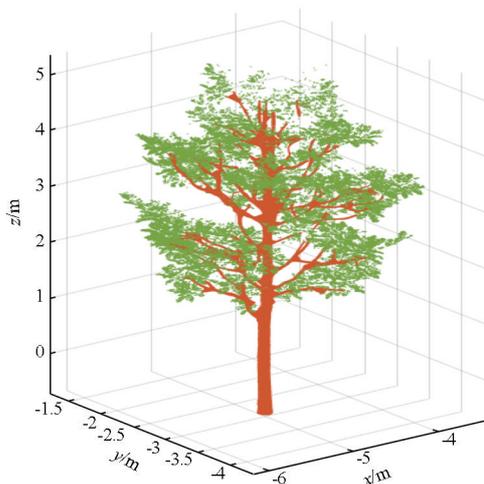


图5 树木三维建模结果

Fig.5 Tree 3D modeling result

同时还可以将建立的三维模型导出 dxf, dae, obj, flx 等其他常用三维模型格式,集成加载到其他三维可视化平台中作为实景三维和数字孪生三维部件模型共享交换使用^[15]。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究根据地基激光雷达点云数据特征,充分考虑了地基激光雷达实际扫描时枝干遮挡、叶片聚集等问题,结合叶片和枝干的形态特征,采用多基站地面激光雷达扫描对一棵香樟树进行有效点云数据采集,然后运用Alpha-shape和Delaunay三角网算法做叶片和枝干模型拟合,有效克服了现有树木数字建模细节不全、枝干构建不真实等问题。结合树木三维建模模型效果与实际现场树木进行目视比对,不难发现其模型存在树木结构更加完善,细节更加逼真等优势,初步实现了树木数字孪生,具有高精度、高还原度的技术效果。

目前,虽然该方法在一定程度上实现了树木的三维建模,也达到了预期的效果,但由于树木结构的生态复杂多样性和相邻树木遮挡等因素,仍有许多方向和问题值得进一步探索和研究。例如在面对复杂细小灌木的单木分割和细节尺度问题、面对高大乔木的有效激光扫描距离等问题时都还需要进一步结合其他手段和方式才能很好地解决。而且,在实际使用该方法过程中特别需要注意保证地面激光雷达扫描的有效距离、点云密度和多基站方位配准等问题,尽量选择在周边遮挡条件好、便于仪器架设、光线充足而且同名匹配点多的情况下进行数据采集。

3.2 结论与展望

本次树木点云三维重建的方法虽然实现了树木三维形态机构的重建,但容易忽视局部树木表面纹理和细节等问题。同时,在重建的过程中,还面临激光雷达数据量大,处理流程多,建模算法复杂度高、运行效率低等问题,还需要后期继续深入研究。尽管地基激光雷达能够获取单棵树木令人满意的三维建模结果,但是对于森林调查进行大范围推广显然不太现实。近年来,随着激光雷达遥感技术的发展和实景三维行业应用需求的引导,基于多平台激光雷达点云数据的单木分割和枝叶分离算法研究都将是树木三维建模的关键技术支撑。由于其在点云密度、扫描方式、数据来源和数据处理等方面都存在差异,所以如何借用多手段多平台相互补充综合高效解决树木三维建模数字孪生势必将是一个重要的研究内容和方向。

参考文献 (References):

- [1] 黄洪宇,陈崇成,邹杰,等.基于地面激光雷达点云数据的单木三维建模综述[J].林业科学,2013,49(4):123-130.
Huang H Y, Chen C C, Zou J, et al. Tree geometrical 3D modeling from terrestrial laser scanned point clouds: A review [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(4): 123-130.
- [2] 张天安,云挺,薛联凤,等.基于地面激光雷达的活立木枝干三维建模[J].南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(4):163-167.
Zhang T A, Yun T, Xue L F, et al. A new 3D modeling method for branches of standing trees based on point cloud data of terrestrial laser scanning [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(4): 163-167.
- [3] 卢军,刘宪钊,孟维亮,等.基于地面激光点云数据的单木三维重建方法[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(6):193-199.
Lu J, Liu X Z, Meng W L, et al. Methodology of individual tree 3D reconstruction based on terrestrial laser scanning point cloud data [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(6): 193-199.
- [4] 王向玉,谢东辉,汪艳,等.基于地面激光雷达点云数据的单木三维重建[J].遥感技术与应用,2015,30(3):455-460.
Wang X Y, Xie D H, Wang Y, et al. 3D reconstruction of a single tree from terrestrial laser scanner data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(3): 455-460.
- [5] Cheng Z L, Zhang X P, Chen B Q. Simple reconstruction of tree branches from a single range image [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2007, 22(6): 846-858.
- [6] 苏中花.基于地面激光雷达点云数据的单木三维建模[D].成都:成都理工大学,2019.
Su Z H. Three-dimensional model of individual tree based on terrestrial LiDAR scanner point cloud data [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [7] 王晓辉.基于地面激光雷达点云的单树三维几何建模研究[D].福州:福州大学,2014.
Wang X H. Three dimensional geometrical modeling of individual tree from terrestrial LiDAR scanner point cloud [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.
- [8] 段芸杉.基于激光雷达点云数据的单木建模综述[J].测绘与空间地理信息,2022,45(5):80-82.
Duan Y S. Overview of single tree modeling based on LiDAR point clouds data [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(5): 80-82.
- [9] 李萍,冯仲科,苏珏颖.定量结构模型的地面激光雷达单木分割应用[J].测绘科学,2022,47(2):151-156,199.
Li P, Feng Z K, Su J Y. Application of quantitative structure model in TLS single wood segmentation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(2): 151-156, 199.
- [10] 傅根深,陈健,黄庆丰,等.基于地基激光雷达的单木森林参数提取分析[J].安徽农业科学,2022,50(4):128-131.
Fu G S, Chen J, Huang Q F, et al. Extraction and analysis of forest parameters for individual tree based on terrestrial laser scanning [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(4): 128-131.
- [11] 林筱涵,李爱农,边金虎,等.基于网络图的地基激光雷达复杂树木点云枝叶分离方法[J].遥感技术与应用,2022,37(1):161-172.
Lin X H, Li A N, Bian J H, et al. A method for separating leaf and wood components of complex tree point cloud data based on network graph with terrestrial laser scanning [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 161-172.
- [12] 廖晓和.基于车载点云数据的树木提取与分析[J].测绘通报,2020(11):163-166.
Liao X H. Tree extraction and analysis based on vehicle point cloud data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(11): 163-166.
- [13] 李庆,高祥伟,费鲜芸,等.利用Alpha-shape算法进行树冠三维模型构建[J].测绘通报,2018(12):91-95.
Li Q, Gao X W, Fei X Y, et al. Construction of tree crown three-dimensional model using alpha-shape algorithm [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(12): 91-95.
- [14] 付昱兴,李承明,朱江,等.Alpha-shape算法构建枣树点云三维模型[J].农业工程学报,2020,36(22):214-221.
Fu Y X, Li C M, Zhu J, et al. Three-dimensional model construction method and experiment of jujube tree point cloud using Alpha-shape algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 214-221.
- [15] 张波,刘红伟,裴小节.基于三维激光点云数据建立三维树木模型方法的研究[J].安徽农业科学,2011,39(33):20904-20905,20930.
Zhang B, Liu H W, Pei X J. Research on the method of building 3D tree model based on 3D laser point cloud data [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(33): 20904-20905, 20930.

A method for 3D modeling of trees based on terrestrial LiDAR point cloud

WAN Lihong^{1,2}, CAO Zhenyu^{1,3}, TIAN Zhilin², SHI Yanli¹

(1. Sichuan Basic Geographic Information Center, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610041, China; 2. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 3. Technology Innovation Center of Emergency Surveying and Mapping, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610041, China)

Abstract: To capture information about the 3D geometric structures of trees more effectively and address the challenge of high-precision, high-fidelity tree reconstruction, this study proposed a method for 3D modeling of trees based on terrestrial LiDAR point cloud. To overcome the occlusion caused by leaf gaps in TLS, this method

fully considered the aggregation of leaves, as well as the morphological characteristics of both leaves and branches. By conducting the model fitting and reconstruction of tree leaves and branches using Delaunay triangulation and Alpha-shape algorithm, respectively, the proposed method effectively addressed previous issues such as unrealistic tree structures and imprecise organ modeling, thus achieving the 3D reconstruction of individual tree leaves and small branches efficiently. This study holds great significance for determining forest structural parameters and managing resources, while also offering a valuable reference for component-level real scene 3D modeling of typical trees.

Keywords: terrestrial laser scanning; point cloud; branch and leaf separation; 3D real scene; tree 3D reconstruction

(责任编辑: 张 仙)

下期要目

- 史俊波 川西可尔因稀有金属矿集区遥感地质找矿应用
邵 攀 基于宽度学习的非监督 SAR 影像变化检测
尚华胜 级联边缘检测和 DeepLabv3+网络改进优化的坡耕地提取
马 敏 松嫩平原土壤盐碱化地表基质成因研究
徐 雅 20 世纪 80 年代以来盐城滨海湿地互花米草扩张时空轨迹及对景观格局的影响
魏佳宁 综合冰通量散度的格陵兰冰盖表面物质平衡遥感估算
陈雪娇 大兴安岭反照率对森林火灾的响应变化分析
聂诗音 基于图谱耦合的高寒湿地土地类型识别与分类
何晓军 结合上下文与类别感知特征融合的高分遥感图像语义分割
郑宗生 基于样本迭代优化策略的密集连接多尺度土地覆盖语义分割
余姝辰 基于多源遥感的洞庭湖洲滩时空演变研究