

基于 AI 的砂船量方算法模型研究及 其在人工岛建设中的应用*

漫肇斌, 柴冠军, 简 朴, 冯国伦, 贾蔚宇

(中交华南勘察测绘科技有限公司, 广东 广州 510220)

摘要: 针对传统砂船量方方式主要依赖人工, 存在精度不足和效率低下的问题, 提出一种基于深度学习的砂船量方算法。采用三维点云技术结合 PointNet++ 深度学习网络, 实现对砂船内部砂体点云的自动分类与精确分割。开发人工智能 (AI) 砂船量方系统, 通过构建 PointNet++ 模型, 对采集的点云数据进行语义分割, 计算砂石体积。结果表明: 在某海外吹填工程中应用本系统, 将单艘船舶的量方内业处理时间由传统手工的 60 min 缩短至不到 10 min, 显著提高了效率; 砂舱区域自动识别分类精度提升至 95% 以上, 测量误差率降低至 2%。该 AI 砂船量方方法能够提升砂船载砂量计算的效率和准确性, 并降低人员现场作业风险, 满足现代海洋工程对施工计量的智能化要求, 具有良好的工程应用价值。

关键词: PointNet++; 三维点云; 深度学习; 砂船量方

中图分类号: U693+.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0197-05

Algorithm model of AI-based sand vessel volume measurement and its application in artificial island construction

MAN Jiangbin, CHAI Guanjun, JIAN Pu, FENG Guolun, JIA Weiyu

(CCCC Southern China Surveying & Mapping Technology Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

Abstract: To address the issues of low accuracy and inefficiency in traditional sand vessel volume measurement methods, which primarily rely on manual operations, we propose a deep learning-based sand vessel measurement algorithm. Integrating 3D point cloud technology with the PointNet++ deep learning network achieves automatic classification and precise segmentation of sand body point clouds inside the vessel. An artificial intelligence (AI)-based sand vessel volume measurement system is developed, and a PointNet++ model is built to perform semantic segmentation on the collected point cloud data and calculate the sand volume. The results show that in an overseas reclamation project, the system reduces the internal volume processing time for a single vessel from 60 min (manual) to under 10 min, improving efficiency significantly. The accuracy of automatic sand compartment classification increases to over 95%, and the measurement error rate drops to below 2%. The proposed AI-based sand vessel volume measurement approach significantly enhances the efficiency and accuracy of sand load calculations, reduces on-site operational risks, and meets the intelligent measurement demands of modern marine engineering, offering strong practical value for engineering applications.

Keywords: PointNet++; 3D point cloud; deep learning; sand vessel volume measurement

人工岛建设是海洋工程的重要组成部分, 广泛应用于填海造陆、港口扩建等领域。其中, 砂石材料的运输与计量是影响工程进度、成本控制

的关键因素。传统的砂船量方方法主要依赖人工测量, 存在精度低、效率低等问题^[1-2], 难以满足现代化工程建设对高效化、智能化管理的需求。

收稿日期: 2025-03-10

***基金项目:** 中交集团数字化专项 (RP2024045117)

作者简介: 漫肇斌 (1983—), 男, 高级工程师, 从事海洋测绘工程设计工作。

针对目前砂船量方存在的问题,已有研究提出了不同的技术方案。例如,张本平^[3]利用全站仪获取数据,并结合 CASS 软件进行计算;张红亮等^[4]采用全球定位系统-实时动态载波相位差分(GPS-RTK)技术结合方格网法进行测量;张荣华等^[5]引入三维激光扫描技术,实现了土方量的高精度计算;梅志能等^[6]将背包式三维激光扫描仪应用于砂船量方,测量结果误差低于 1.5%。尽管这些方法在一定程度上提高了测量精度和效率,但仍存在局限性。例如,全站仪及 GPS-RTK 受环境和施工条件的影响较大;三维激光扫描仪设备成本昂贵,难以大规模推广应用等。

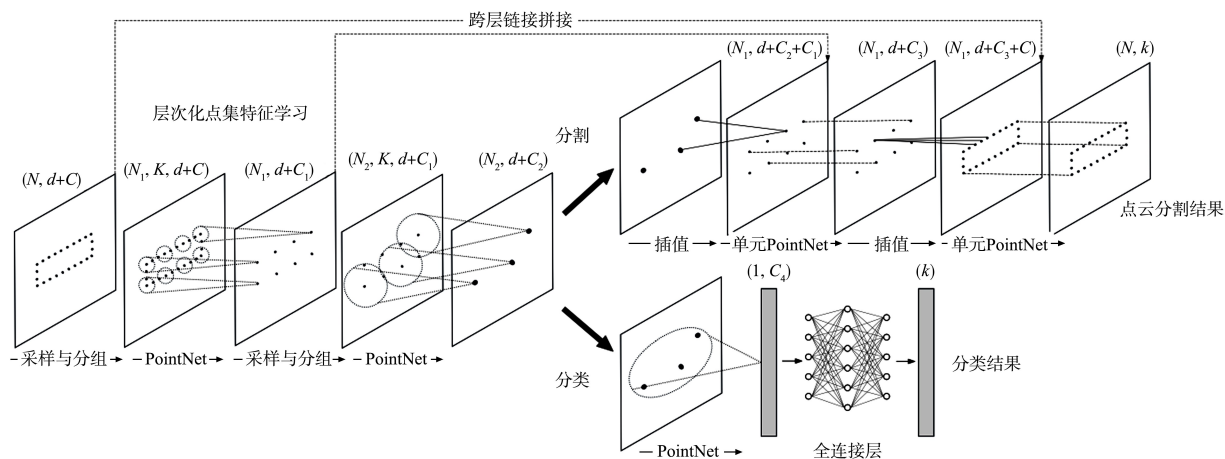
近年来,点云技术发展迅速,三维点云数据可以精确地描述三维空间中的物体形态^[7],结合深度学习算法,可实现对复杂形态的自动识别、分割和计算^[8]。在此基础上,Qi 等^[9]提出 PointNet++ 网络,显著提升了对非均匀分布的点云数据的分类和分割精度,在砂船量方领域具有广阔的应用前景。然而,已有的深度学习研究多应用于其他领

域的点云处理,如机载 LiDAR 点云分类^[10]、煤场点云分割^[11]等,但在砂船量方数据处理领域基于人工智能(artificial intelligence, AI)的自动化方法尚未成熟,存在明显的研究缺口。

本文以某海外吹填工程为实际背景,旨在构建基于 PointNet++ 网络的 AI 砂船量方系统,以解决传统量方方法精度低、效率低的问题。本文将 PointNet++ 网络应用于砂船量方领域,提出一种新的自动化测量方法,并开发出一套 AI 砂船量方系统。经验证,该系统可显著提升测量精度及效率,并推动 AI 技术在海洋工程等领域的应用,具有重要的理论价值和工程实践意义。

1 算法原理

PointNet++ 网络是在 PointNet 基础上扩展而来的深度学习网络,可以同时处理点云分类和分割任务,其主要结构见图 1。其核心思想是通过层次化的特征学习,递归地使用 PointNet 逐步捕捉点云的局部和全局几何信息。



注: k 为分割分类中需要判别的类别数。

图 1 PointNet++ 网络原理

Fig. 1 Principle of PointNet++

在 PointNet++ 网络中,每一层都通过“采样与分组”模块对输入点云进行处理,逐步减少点数并提取局部几何特征。用最远点采样法,从原始点集中选取均匀分布的中心点,确保覆盖整个点云的空间结构。输入点集的维度为 $N(d+C)$,其中 N 为点的数量, d 为点的坐标维度, C 为初始特征维度。通过采样后,采样点数量减少到 N_1 ,并得到维度为 $N_1K(d+C)$ 的局部点集,其中 K 为每个

采样中心点邻域内包含的点数,根据几何距离对每个采样点周围的邻近点进行分组,构建局部区域。

在分组后的每个局部区域中,PointNet++ 使用局部 PointNet 模块对点的特征信息进行提取。首先将点的绝对坐标转换为相对中心点的局部坐标,以强化区域内部几何关系的学习。随后,每个点的特征通过共享的多层感知机(multilayer perceptron,

MLP) 进行非线性变换, 并输出中间特征维度为 C_1 。通过最大池化操作, 将局部点集特征聚合为固定长度的特征向量, 从而对局部区域进行压缩与抽象。此时, 输出点集的维度从 $N_1 K(d+C)$ 转换为 $N_1(d+C_1)$, 从而实现局部区域的几何编码。

PointNet++ 网络通过逐层递进的方式对点云特征进行层次化抽象。每一层的输入是上一层的输出, 并对采样点重新进行分组和特征提取。第 2 层通过进一步采样, 将点数量减少为 N_2 , 对应的特征维度从 $N_1(d+C_1)$ 转换为 $N_2(d+C_2)$ 。随着层数的增加, 采样点的数量逐步减少, 覆盖的局部范围逐渐扩大, 同时每层特征维度 C_i 不断增加。

为了使网络自适应密度不均匀下的特征提取, PointNet++ 网络提出多尺度分组方法 (multi-scale grouping, MSG) 和多分辨率分组方法 (multi-resolution grouping, MRG), 见图 2, 通过不同半径分组捕捉密集和稀疏区域的多尺度特征, 增强了模型对非均匀采样点云的适应能力。

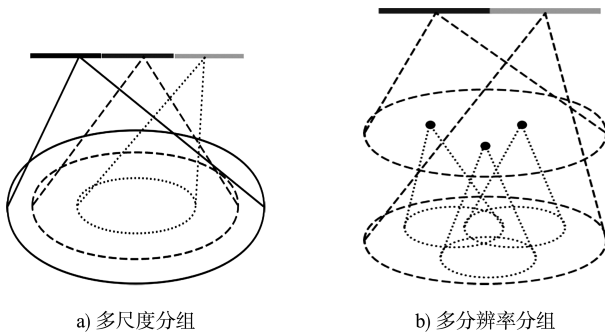


图 2 密度自适应层

Fig. 2 Density adaptive layer

MSG 的基本思想是产生不同尺度即不同半径的分组, 对每个尺度进行特征提取, 最后将每个尺度提取出来的特征连接起来形成多尺度特征, 见图 2a)。

MRG 的中心思想是使每一层的特征都由两个向量组成, 左边的向量使用几何抽象层汇总子区域的特征, 右边的向量则直接使用 PointNet 对原始点云进行特征提取, 根据点云密度对两边赋予不同的权重, 见图 2b)。

在特征提取完成后, PointNet++ 网络将全局特征用于点云的整体分类, 通过特征传播机制, 将高层次特征传递回原始点, 实现对每个点的精细

预测。在分类任务中, 通过特征抽象, 将全局特征聚合为一个 C_4 维的全局特征向量, 最后通过全连接层完成非线性变换, 输出点云整体类别预测结果。在分割任务中, 特征传播模块将高层次的特征逐步传递回原始的高分辨率点集, 生成逐点特征, 并通过逐点分类生成每个点的语义标签。

2 系统设计与实现

2.1 系统环境

2.1.1 系统开发环境

系统主要使用 Python 3.9 进行开发, 使用 PyTorch 2.1 以及 cuda12.1 作为深度学习框架。其他依赖包有 NumPy、Open3D、Scikit-Learn、Matplotlib 等。

2.1.2 系统运行环境

系统支持 Windows 10/11 和 MacOS 10.15 及以上版本。硬件方面, 至少需要 Intel i5 处理器或 Mac 系统 M1 处理器; 内存不小于 8 GB; 显卡要求支持 OpenGL 4.0 及以上版本, 建议使用独立显卡, 显存至少为 6 GB; 分辨率推荐 1 920 px × 1 080 px, 以确保系统界面的清晰度。

2.2 系统设计

系统的设计核心思想是通过模块化的流程, 将船体点云分割任务分解为预处理、分割采样、训练和推理 4 个阶段, 见图 3。

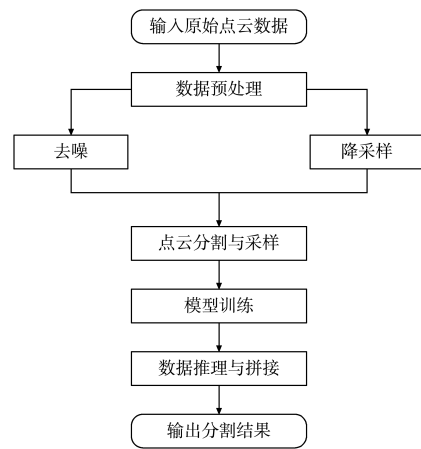


图 3 系统流程

Fig. 3 System process

2.2.1 数据预处理

数据预处理阶段主要对原始船体的点云数据

进行去噪和降采样处理,优化数据质量。系统采用去噪算法清除点云中的干扰点和异常值,使用降采样技术,在保留几何特征的前提下对点云数据进行简化处理。

2.2.2 点云分割与采样

在此阶段,系统将预处理后的点云按一定规则切分为若干段。分割阶段基于船体的几何特性和结构规则,确保每段点云能够表示局部的几何特征。在每个点云段内进行多次随机抽样,每次抽取固定数量的点,保证样本在空间上的均匀分布,同时通过旋转、平移、尺度变化等样本增强操作丰富数据特性。

2.2.3 模型训练

在训练阶段,采用初始学习率 0.001、批次大小为 24、训练次数为 500 的配置训练网络,训练损失曲线见图 4a),训练精度曲线见图 4b)。

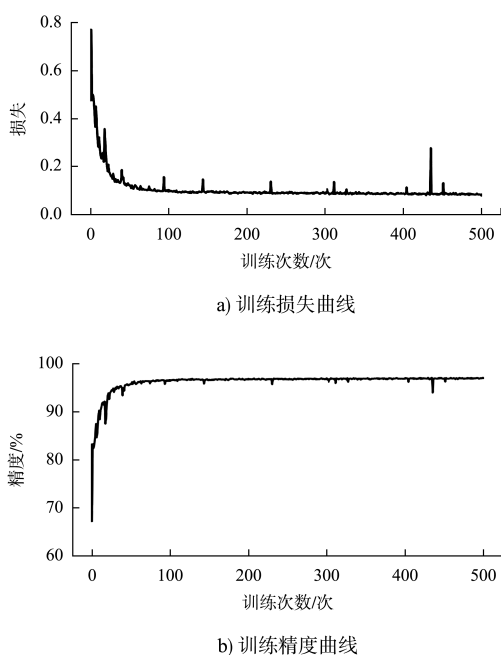


图 4 训练损失曲线和训练精度曲线

Fig. 4 Training loss curve and training accuracy curve

从图 4 中可以观察到,随着训练次数的增加,测试集的每个点的语义分割精度从初始的约 67% 逐步提升至 97% 左右,并在大约第 70 次后趋于稳

定,损失函数在前 30 次下降速度较快,之后下降趋于平缓,最终在 0.1 左右收敛。

2.2.4 推理与结果整合

在此阶段,利用训练好的 PointNet++ 模型,从输入点云中随机抽取与训练时相同数量的点进行推理。如果剩余的未推理点不足以满足抽取数量,系统将从已经推理过的点中补充抽取,以确保每次推理的点数一致,直到所有点都被推理完成,输出每个点的语义分割结果。最后,系统将每段的分割结果拼接成完整的船体点云分割结果。

2.3 系统主要功能模块

AI 砂船量方系统主要包括点云处理、体积计算、空间测量、AI 分类等功能模块。

点云处理模块负责对三维点云数据进行去噪、降采样等处理,以确保数据质量和计算效率。去噪功能通过半径滤波等方法清除异常点,提高点云的准确性和完整性。降采样功能可减少数据冗余,适用于大规模点云数据的处理。系统还具有点云配准和坐标对齐功能,以便不同时间段采集的数据能够进行精确匹配。

体积计算模块用于精确测量砂石或土方的体积。该模块基于点云分割结果,结合区域选择工具,自动计算指定区域的体积。

空间测量模块提供了精准的三维测量工具,用于计算距离、角度、高度等参数。用户可选择测量点,系统实时显示 3D 空间测量结果,支持点到点距离、两点间高差等计算,支持数据导出和自动标注,方便用户记录和管理测量数据。

AI 分类模块可以根据训练后的模型,自动推理新数据分类,随着训练数据的增加,模型能够更好地捕捉数据中的特征和规律,从而提升分类精度和泛化能力。

3 应用成果

该系统目前已应用在某境外吹填开发工程, 涵盖砂船点云数据的预处理、分类与分析等环节。自 2024 年 9 月起, 系统开始用于该工程的内业工作, 与人工操作的对比结果见表 1。

经应用验证, 采用该系统对 1 艘船的三维

点云数据进行量方作业, 耗时从传统手工操作的 60 min 缩短至 10 min, 效率提升效果显著, 且分类精度达到 95% 以上, 测量误差率降至 0.5% ~ 2.0%, 大幅提升了内业处理数据的效率和准确性, 降低了人工操作的风险。

表 1 人工与自动化作业对比
Tab. 1 Comparison between manual and automated operations

操作类型	作业时间/min	分类精度/%	测量误差率/%	操作风险
人工操作	约 60(手动测量、记录、计算)	85	10	高
自动化操作	<10	>95	0.5~2.0	低

4 结语

1) 本文通过结合三维点云技术与深度学习算法, 实现了对船舶舱内砂体点云的自动分类与精确分割, 解决了传统量方方式精度不高、效率低下的问题。

2) 研发的集成点云处理、智能分类等多模块的 AI 砂船量方系统, 已成功应用于实际工程。应用结果表明, 该方法的量方作业效率提升效果显著, 分类精度提高至 95% 以上。

3) 该 AI 砂船量方算法模型能够满足现代海洋工程对施工计量的智能化需求, 为提高海洋吹填工程的计量管理水平提供了一种高效可靠的技术手段。未来可进一步通过增量学习持续优化模型, 在更多类型船舶和作业条件下验证其适用性, 不断拓展其工程应用范围。

参考文献:

[1] 鲁鹏, 黄声享, 何海清, 等. 砂船量方的无人机低空摄影测量试验分析[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(3): 44-47.

LU P, HUANG S X, HE H Q, et al. Experimental study on the sand volume measurement by UAV low altitude photogrammetry[J]. Journal of geomatics, 2020, 45(3): 44-47.

[2] 鲁鹏, 黄声享, 何海清, 等. 无人机测绘技术在砂船量方

中的应用[J]. 测绘通报, 2018(S1): 59-61, 69.

LU P, HUANG S X, HE H Q, et al. Application of UAV surveying and mapping technology in the sand volume measurement [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2018(S1): 59-61, 69.

[3] 张本平. 基于全站仪和 CASS 软件的土石方量计算[J]. 科技创新导报, 2011(23): 120, 122.

ZHANG B P. Calculation of earthwork volume based on total station and CASS software [J]. Science and technology innovation herald, 2011(23): 120, 122.

[4] 张红亮, 胡波, 蔡元波. GPS-RTK 技术在土方测量中的应用[J]. 城市勘测, 2008(5): 83-85.

ZHANG H L, HU B, CAI Y B. Application of GPS-RTK to the earthwork volume measure [J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2008(5): 83-85.

[5] 张荣华, 李俊峰, 林昀. 三维激光扫描技术在土方量算中的应用研究[J]. 测绘地理信息, 2014, 39(6): 47-49.

ZHANG R H, LI J F, LIN Y. Application of 3D laser scanning technology in earth volume calculation [J]. Journal of geomatics, 2014, 39(6): 47-49.

[6] 梅志能, 焦永强, 黄双飞, 等. 三维激光测量技术在砂船量方中的应用[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(3): 6-9.

MEI Z N, JIAO Y Q, HUANG S F, et al. Application of 3D laser scanning technology in vessel measurement of sand volume[J]. China harbour engineering, 2018, 38(3): 6-9.