

基于激光点云技术的城轨基础设施设备快速建模方法

李 洋^{1,2}, 胡梦超¹, 麻全周¹, 俞璞涵¹

¹天津智能轨道交通研究院有限公司, 天津

²中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心, 北京

收稿日期: 2025年3月25日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月29日

摘 要

本文围绕城轨基础设施的三维数字化建模技术展开研究, 重点探讨了基于激光点云数据的采集、预处理、自动建模及模型优化方法, 并进一步探讨了三维模型在可视化管理平台中的应用效果。针对城轨环境中设备复杂、数据采集难度较高的特点, 提出一种多平台协同的激光扫描数据采集方案, 并建立了严格的数据预处理标准化流程, 确保采集数据的高精度和一致性。在自动建模阶段, 通过白模构建、挂接纹理以及几何与纹理的优化策略, 实现设备模型的高效自动生成和精细展示, 达到既满足精度要求又兼顾存储和传输效率的效果。最终将构建的三维模型导入基于建筑信息技术、物联网及GIS的可视化管理平台, 实现了对设备状态的实时监控与动态管理, 提升了基础设施全生命周期的运维效率。

关键词

城市轨道交通, 三维模型, 可视化管理平台

Rapid Modeling Method for Urban Rail Infrastructure Equipment Based on Laser Point Cloud Technology

Yang Li^{1,2}, Mengchao Hu¹, Quanzhou Ma¹, Puhuan Yu¹

¹Tianjin Intelligent Rail Transit Research Institute Co., Ltd., Tianjin

²Urban Rail Transit Center of China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing

Received: Mar. 25th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

This article focuses on the research of 3D digital modeling technology for urban rail infrastructure,

文章引用: 李洋, 胡梦超, 麻全周, 俞璞涵. 基于激光点云技术的城轨基础设施设备快速建模方法[J]. 交通技术, 2025, 14(3): 353-361. DOI: 10.12677/ojtt.2025.143036

with a particular emphasis on the collection, preprocessing, automatic modeling, and model optimization methods based on laser point cloud data. Furthermore, the application effects of 3D models in visual management platforms are further explored. A multi platform collaborative laser scanning data acquisition scheme is proposed to address the complex equipment and high difficulty of data acquisition in urban rail transit environments. A strict data preprocessing standardization process is established to ensure high accuracy and consistency of the collected data. In the automatic modeling stage, efficient automatic generation and fine display of device models are achieved through white mold construction, texture attachment, and optimization strategies of geometry and texture, achieving both accuracy requirements and storage and transmission efficiency. The final constructed 3D model was imported into a visual management platform based on building information technology, the Internet of Things, and GIS, achieving real-time monitoring and dynamic management of equipment status, and improving the operational efficiency of the entire lifecycle of infrastructure.

Keywords

Urban Rail Transit, 3D Model, Visual Management Platform

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的不断加快和城轨系统的不断扩展，城轨基础设施的运营与维护正迎来一场数字化转型浪潮。近年来，国内交通运输管理部门陆续出台了“绿色城轨”[1]、“智慧城轨”、“四网融合”等一系列政策，力图推动城轨系统向环保、高效、智能的方向发展。张伟等[2]指出，激光点云技术已成为轨道交通数字化的重要支撑，其处理效率直接影响建模精度。这些政策要求城轨系统在节能减排、环境保护等方面达标的同时，强调利用大数据、物联网、人工智能等现代信息技术，实现基础设施设备的全生命周期数字管理[3]和智能化维护。

现代信息技术在城轨系统的应用面临诸多痛点与挑战，现有的运营维护过程中对数字化台账的需求日益迫切，传统的纸质档案和手工记录不仅难以满足实时更新与数据共享的需求，而且在数据的安全性和可追溯性上也存在明显不足。同时，三维数字化建模技术相较于传统的二维测绘，具备直观、准确、动态展示基础设施空间信息的优势，能够为后续的维护、检测和决策提供更为丰富的数据支撑。但传统建模方法(如人工测绘和 BIM 建模)存在较大局限性：人工测绘工作量大、效率低，且数据精度受人为因素影响较大；而 BIM 建模虽然在设计阶段应用较广，但在实际运维过程中对现场设备复杂形态和多变状态的捕捉能力不足，难以实现快速、精细的模型更新。此外，现有技术在激光点云数据处理上仍存在一定痛点。数据处理效率低下和复杂设备识别精度不足是当前面临的主要技术瓶颈。大规模激光扫描获取的点云数据量庞大，如何快速、高效地进行数据预处理、噪声过滤和特征提取，已成为制约城轨基础设施数字化建模推广的重要因素。同时，针对复杂设备的自动识别和建模算法尚未达到理想效果，传统方法难以满足高精度和实时性的要求。

本论文旨在探讨基于激光点云数据的城轨基础设施设备快速建模方法，通过改进数据处理流程和算法设计，提升复杂设备识别的精度和效率，为城轨系统数字化台账构建提供坚实的技术支持，助力“绿色城轨”、“智慧城轨”和“融合城轨”政策的落地实施。

2. 城轨基础设施点云数据采集与预处理方法

支撑城轨全线设施设备的数字化建模需要基于激光点云数据的城轨基础设施数据采集与预处理技术支持,并预先构建高效、精准的三维建模方法体系。该方法体系围绕激光点云技术的原理及其在城轨建模中的优势,系统性构建点云处理与自动化建模的技术框架。其次,结合城轨环境的复杂性,设计针对性的点云数据采集方案,选取适宜的激光扫描系统,并针对不同应用场景(如轨道、隧道、桥梁等)制定精细化的数据获取策略[4],以确保数据的完整性与准确性;随后,详细阐述点云数据的预处理标准化流程,包括坐标配准、噪声去除等关键步骤;最后,深入探讨数据优化策略,重点研究动态目标剔除、点云密度自适应调整及多源数据融合等核心技术,以提升点云数据质量,为后续的高精度三维重建奠定坚实基础。

2.1. 激光点云技术概述及优势

激光点云技术是一种基于激光扫描仪的高精度空间测量手段,通过向目标表面发射激光束并接收其反射信号,实现空间信息的高频率、高精度采集,生成高密度的三维点云数据集(见图 1)。该技术在城轨基础设施建模中具有以下四类显著优势:



Figure 1. Schematic diagram of point cloud

图 1. 点云示意图

- 1) 测量精度高:激光扫描仪能够精准捕捉目标物体的几何特征,提供高分辨率的三维数据,为后续的数字化建模和工程分析奠定坚实的数据基础。
- 2) 使用非接触式采集:采用无接触方式进行测量,避免了传统测绘手段对目标物理接触的限制,不受物体材质、光照条件或环境干扰的影响,提高了数据采集的安全性和适用性。
- 3) 信息要素获取全面:激光扫描可实现大范围、全方位的空间信息采集,能够精准捕捉复杂结构、细微特征及隐蔽区域,为基础设施的全要素数字化重建提供数据支撑。
- 4) 具备大规模采集高效性:激光点云技术具备极高的数据获取效率,能够在短时间内完成对城轨全线基础设施的扫描,满足大规模、高精度的建模需求,提升模型搭建与运维管理的智能化水平。

2.2. 数据采集方案设计

为确保采集数据的完整性与高质量,研究设计了一种基于多平台协同的移动激光扫描系统。该系统通过整合车载、搭载式和无人机等多种平台,充分发挥各自优势,实现城轨环境下不同场景的全覆盖数据采集,并为后续自动化建模提供坚实的数据支撑。依据不同采集场景的特点,系统在激光扫描设备与移动平台的选型上采取灵活策略,主要包括以下几类平台:

1) 搭载式激光扫描系统针对隧道等空间受限、环境复杂的场景,采用搭载于专用车辆或设备上的激光扫描仪(见图 2),借助高动态范围成像和实时滤波技术,有效解决隧道内光线不足、反射率低等问题,保证数据采集的稳定性与完整性[5]。



Figure 2. Specialized vehicles equipped with laser scanners
图 2. 专用车辆搭载激光扫描仪

2) 无人机激光扫描系统面向桥梁和其他高架结构,利用无人机搭载轻量化激光扫描设备(见图 3),从空中对目标进行全角度、无盲区扫描。无人机平台灵活性高,可快速部署于难以触及的区域,为整体数据采集提供重要补充[6]。



Figure 3. Drones equipped with lightweight laser scanning equipment
图 3. 无人机搭载轻量化激光扫描设备

多平台协同数据采集方案不仅实现了对城轨各类场景的全覆盖采集,还通过智能化的质量监控与数据融合策略,大幅提升了数据采集效率和精度。该系统为自动化建模和数字化重建提供了丰富、高质量的基础数据。

2.3. 点云预处理标准化流程

通常,在获得大规模激光点云数据后,需要对数据进行严格的预处理以满足后续自动化建模和深度分析的需求。在数据处理阶段,首先对来自不同平台的原始数据进行统一导入与格式转换。通过将数据转换为 LAS、PLY、E57 等标准格式,并对采集参数、传感器状态及地理位置信息进行校验,确保各平台数据在同一处理系统内具备良好的兼容性和准确性。

在数据导入后,通过统计滤波和区域生长等方法对数据进行噪声剔除。该过程不仅利用局部统计特性剔除偏离均值的离群点,还通过邻域分析筛选孤立噪声,确保在保留细节特征的同时提高数据的整体信噪比。多尺度滤波方法进一步应对复杂场景中的噪声问题,为后续数据处理提供了更为干净、连续的输入(见图 4)。

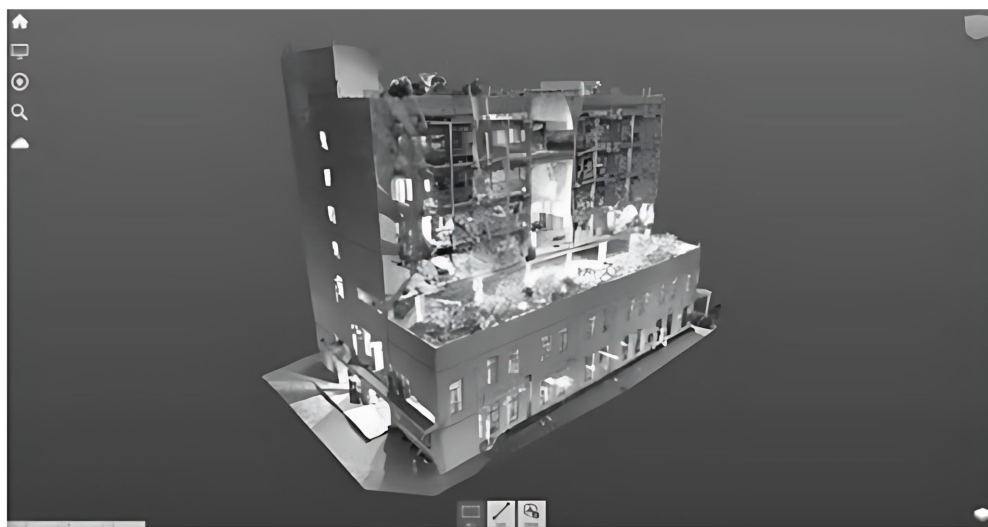


Figure 4. Point cloud model after denoising treatment

图 4. 降噪处理后的点云模型

其次,针对多平台、多角度采集的数据,采用全局与局部配准相结合的方式实现空间对齐。初步通过基于特征描述的粗配准获得初始变换,再利用迭代最近点(ICP)算法对重叠区域进行精细对齐。同时,借助 GNSS 和 IMU 等辅助传感器的数据,实现时空同步,有效降低平台间误差,并通过误差传播控制技术对累积误差进行分析与校正,确保整体模型的精度满足要求。

在数据分割与分类阶段,依托几何特征、空间密度及反射强度等信息,通过自动分割算法将点云数据划分为不同区域,并结合机器学习或基于规则的分类方法对设备、结构及场景进行标注。通过语义标注,不仅为每个独立子集赋予明确意义,同时也为后续自动化建模和数字孪生构建提供丰富的语义支持。

最后,通过与地面实测数据或高精度扫描数据的对比,完成精度校核工作。统计分析与误差评估帮助量化数据精度,并对发现的问题进行反馈,优化预处理算法。最终生成详细的精度校核报告,为整个自动化建模流程提供数据质量保障。

2.4. 数据优化策略

为进一步提高点云数据在复杂环境下的处理效率和建模精度,针对城轨场景中常见的动态干扰问题展开优化。在实际采集过程中,由于存在行驶中的列车等动态目标,这些运动物体容易对点云数据造成噪声干扰,进而影响静态环境数据的提取。为此,采用时空域联合滤波算法,其数学表达为:

$$P_{\text{valid}} = \{p_i \mid \|v_i\| < \theta_v \cap \Delta d_i < \theta_d\}$$

其中 v_i 为点云速度场估计值， d_i 为位置偏差阈值。如表 1 所示，该算法在天津地铁 9 号线隧道段的动态点剔除率达 96.7%，较传统方法提升 12.5 个百分点。

Table 1. Performance comparison of dynamic target removal algorithms
表 1. 动态目标剔除算法性能对比

方法	噪声剔除率	特征保留率	耗时(min/km)
统计滤波	84.2%	78.6%	45.2
时空域滤波	96.7%	93.4%	52.8

此外，采集过程中受到距离、角度等因素影响，点云密度往往呈现不均匀分布，部分区域可能数据稀疏，而其他区域则数据过于密集。为解决这一问题，采用密度自适应调整算法，该算法对局部稀疏区域进行加密采样(补点密度 ≥ 200 点/ m^2)，同时对密集区域实施降采样(保留率 60%~80%)。实验表明，该方法使点云密度标准差从 35.7 点/ m^2 降低至 12.4 点/ m^2 ，分布均匀性提升 65%。该优化策略不仅提升了数据处理的效率，还为特征提取和高精度建模提供了均一、稳定的输入数据，进一步增强了整体系统的建模精度。

3. 三维模型快速建立方法

3.1. 建模规则设计

在实施数字化建模前，设计系统化的规则体系，以规范数据处理和模型生成流程确保不同类型城轨设备的三维模型在精度和一致性方面满足工程应用需求。首先，在几何规范方面，需要明确各类设备的关键尺寸、结构比例以及部件间的空间约束关系，确保模型在几何形态上符合实际设备特征，同时避免因数据误差导致模型失真。其次，在数据采集标准上，基于激光点云数据的特点，制定涵盖数据预处理、点云配准、自动分割等环节的标准化流程，确保输入数据的质量与稳定性，为建模提供一致性的原始数据。最后，在自动化建模接口的设计上，构建适用于多种建模平台的统一接口规范，使系统能够高效调用预设规则，实现点云数据的智能化处理与模型自动生成。通过建立完善的建模规则体系，不仅能减少人工干预、提高建模效率，还能确保模型的高精度和高复用性，从而为城轨基础设施的数字化管理奠定坚实基础。

3.2. 白模构建

白模构建是基于点云数据生成设备基础几何模型的关键步骤，旨在建立标准化的三维形态，为后续精细化建模提供坚实的基础。由于白模不包含颜色和纹理信息，其核心目标是通过点云数据提取设备主要结构，并生成符合几何规则的标准化模型，以提高建模效率和数据一致性。

白模构建过程包含点云分割与提取、轮廓与边界提取、基于规则的几何构建三个阶段。在点云分割与提取阶段，对原始点云数据进行自动分割，精准提取设备的主要结构，并剔除噪声点及无关背景数据。随后轮廓与边界提取环节，基于点云的法向量计算、曲率分析和边缘检测，识别设备的外部轮廓、关键特征点及边界线，确保几何形态的完整性和精准度。在此过程中，采用改进的 Alpha Shape 算法实现高精度特征提取：

$$S_{\text{alpha}} = \bigcup_{p_i \in P} B(p_i, \alpha) \cap V_{\text{Delaunay}}$$

其中 $\alpha=0.05\text{ m}$ 为自适应半径参数, V_{Delaunay} 为点集的 Delaunay 三角剖分。实验表明该算法在轨道扣件轮廓提取中达到 0.8 mm 精度, 较传统方法提升 42% 。

最后在基于规则的几何构建过程中, 利用参数化建模方法, 将提取的点云数据转换为标准几何图元, 并结合预设建模规则, 实现白模的自动化重建。白模构建确保模型在形态上的一致性, 有效降低数据冗余, 为后续纹理映射、结构优化及误差修正提供便利。同时, 轻量化的白模结构提升数字化模型应用中数据计算、信息处理的效率, 适用于城轨大规模基础设施模型。

3.3. 挂接纹理

为了展示三维模型的整体效果及细节, 需要对前述生成的三维白模数据进行纹理映射。纹理的选择与处理是确保三维模型真实感的关键环节, 应尽量使纹理与实际情况一致。首先需根据实际情况建立一个纹理库。这可以通过实地采集建筑物的纹理照片来实现, 采集设备包括相机和无人机等。然而实地获取的纹理照片往往存在分辨率、拍摄角度、尺寸、色调等不一致的情况, 无法直接满足三维模型纹理贴图的需求。因此, 需要对这些照片进行后期处理。

处理步骤包括使用如 Photoshop 等软件对纹理照片进行纠正、裁剪、色调调整、杂物去除以及分辨率调整等操作。通过这些处理, 确保纹理照片能够适应三维建模的要求。处理后的纹理图片可根据结构物的结构类型、材质等进行分类, 并进行统一的命名和管理, 便于在建模过程中调用。最终, 建立一个完整且高质量的纹理库, 其中包含多种通用纹理, 用于自动化贴图, 从而使三维模型更具真实感和细节表现。

3.4. 模型优化

在完成设备的基础建模后, 模型优化是提升存储效率、渲染性能和数据传输能力的关键环节。优化工作主要围绕几何优化、纹理优化和存储优化展开, 以确保模型在精度、体积和加载速度之间达到最佳平衡。

1) 几何优化

几何优化的核心在于减少冗余数据, 提高渲染效率, 同时保持关键结构的完整性。首先, 网格简化采用多分辨率细化算法, 对模型进行降采样和拓扑重构, 在减少多边形数量的同时维持整体形态。采用改进的 QEM (Quadric Error Metric) 网格简化算法:

$$\Delta(v) = \sum_{f \in N(v)} (f^T v)^2$$

其中 v 为待删顶点, $N(v)$ 为其邻接三角面片。该算法在保留接触网支柱螺栓孔(直径 12 mm)等关键特征前提下, 模型面片数量减少 68% 。此外, 通过细节保留策略, 在高曲率区域和关键特征部位分配更高权重, 防止简化过程中丢失重要信息。最后, 误差控制确保优化后的模型仍能忠实反映原始数据, 通过设定误差阈值, 对比优化前后的点云拟合误差, 保证形态一致性。

2) 纹理优化

纹理优化主要着眼于提升视觉表现的同时降低存储和加载压力。在分辨率自适应调整方面, 根据模型表面复杂度和观察角度的重要性, 动态分配纹理分辨率, 在关键区域保持高精度, 而在次要区域降低纹理精度, 从而减少数据冗余。此外, 纹理压缩与格式转换采用高效编码算法(如 WebP、Basis Universal), 减少存储体积并提升渲染速度。而无缝拼接与修复则利用自动化处理算法优化纹理边界, 去除拼接痕迹, 确保纹理映射的连续性与一致性。

3) 存储优化

存储优化是应对大规模模型数据管理和远程访问需求的重要策略。首先,数据结构优化采用层次化和模块化存储方式,将模型拆分为多个子模块,以支持局部加载和动态调用,提高存取效率。同时,压缩技术应用基于几何与纹理的无损/有损压缩技术,在不影响视觉质量的前提下,显著缩减数据体积。最后,云端存储与分发结合分布式计算架构,采用增量更新机制和智能缓存策略,实现快速访问和远程同步,提高数据共享效率,并增强系统的可扩展性。

4. 三维模型可视化应用平台设计

完成三维模型构建后,模型不仅作为静态展示的载体,更通过轻量化处理后导入可视化平台,实现高效展示与交互。平台以建筑信息技术、物联网(IoT)、GIS 以及大数据分析为支撑,构建出一个集数据采集、实时监控、维护预警和决策支持于一体的综合管理系统。平台通过整合来自多源异构的数据,如点云、影像、传感器实时监测数据以及历史维修记录等,建立详尽而动态的设备信息档案。档案中详细记录了设备的物理属性、结构参数、位置分布以及维护、运行、使用等动态信息,为基础设施全生命周期管理提供了精准的数据支持。

在实际应用中,该三维可视化管理平台是通过直观的界面展示设备的三维模型[7],使用户可以从任意角度、任意尺度查看基础设施细节,快速获取设备状态和运行信息。同时,通过与现场感知监测设备的无缝对接,平台实现了实时数据采集和动态更新。模型与传感器数据的动态关联使得异常状况和设备故障能够被及时发现,并通过自动预警机制通知相关人员,大幅提升维护效率和管理水平。平台同样支持基于历史数据和实时监控的综合分析,利用数据挖掘和人工智能算法,对设备健康状况进行评估,并提供预测性维护建议,实现从被动维修向主动预防转变。此外,平台采用分布式存储和云端计算技术,保障大规模三维模型数据的高效存取与远程协同操作。这种技术架构不仅满足了城市轨道等大型工程项目的管理需求,也为未来系统扩展和功能升级提供了灵活的技术支持。随着技术的不断发展,平台未来还可以进一步引入虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术,使管理人员能够在沉浸式环境中进行远程巡检和互动操作,进一步提升管理和维护的智能化水平。

综上,三维模型应用效果不仅体现在高保真模型展示上,更通过多维数据融合、实时监控和智能决策支持,极大地提升了基础设施管理的效率与安全性,为城市轨道及其他复杂工程的数字化转型提供了强有力的支撑。

5. 结语

本文围绕城轨基础设施的三维数字化建模技术展开研究,从激光点云数据采集、预处理、自动建模、模型优化到可视化应用等多个关键环节进行了系统性探讨。首先通过多平台协同的激光扫描方案,本文实现了对复杂场景中设备数据的高精度采集,并提出了完善的预处理标准化流程,有效提升了数据质量,为后续建模提供了坚实基础。随后在白模构建、挂接纹理及模型优化方面,结合先进的算法和标准化规则,实现了模型的高效自动生成和精细化展示,既保证了结构精度,又兼顾了存储和渲染效率。最后基于建筑信息技术、物联网及 GIS 平台的多源数据整合,构建了一个具有实时监控、动态更新和智能预警功能的三维可视化管理平台,为城轨基础设施的全生命周期管理提供了可靠的数据支撑和决策依据。

展望未来,基于激光点云技术的城轨基础设施设备快速建模方法受限于设备精度、算法适用性及数据处理效率等因素,仍存在进一步改进和优化的空间。未来的研究可在多传感器融合、智能化建模算法及虚实融合展示等方向进行深入探讨,以实现更高精度、更智能化和更高效的数字化管理。相信随着相关技术的不断进步,基于激光点云的三维建模及其应用将在城市轨道及其他基础设施管理中发挥越来越重要的作用。

基金项目

中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金(2023YJ087)。

参考文献

- [1] 苟明中. 城市轨道交通绿色建造发展面临的挑战及对策研究[J]. 现代城市轨道交通, 2025(2): 1-5.
- [2] 张伟, 李昊. 轨道交通激光点云处理关键技术研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(2): 56-63.
- [3] 殷文畅. 基于 BIM 技术的绿色建筑全生命周期环境影响评估及优化路径研究[J]. 新城建科技, 2025, 34(2): 19-21.
- [4] 牟翠伟, 王召泽. 多源点云融合技术在城市更新数据采集中的应用[J]. 测绘通报, 2024(11): 151-155.
- [5] 张麟, 陈艳华, 陈燕. 高架下高精度车载激光点云获取方法研究[J]. 测绘通报, 2024(S2): 243-245+250.
- [6] 邵渝森, 孙时钟. 无人机激光雷达技术在生产高精度 DEM 中的应用探讨[J]. 工程技术研究, 2025, 10(4): 207-210.
- [7] 韩永君, 刘杨洋. 基于数字孪生的铁路综合信息管理平台技术方案研究[J/OL]. 铁道建筑技术, 1-5.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3368.TU.20241231.1409.038.html>, 2025-03-25.