

基于数字孪生技术的实景三维公路建设方法与应用研究

徐可¹, 陈得冠², 陈美妍²

(1.江苏天地图地理信息工程技术有限责任公司,江苏南京 210013;

2.广东省城乡规划设计研究院科技集团股份有限公司,广东广州 510290)

摘要 为顺应交通领域数字化发展趋势,提升公路智能化管理水平,融合无人机倾斜摄影、BIM、GIS、数字孪生等信息化技术,构建数字孪生公路应用平台。提出适宜不同类型设施的数字孪生模型数据采集方法以及模型构建算法,深度融合模型数据,打造数字孪生平台实现分析应用等功能。通过数据采集与处理、模型构建与优化,得到精度符合要求的公路模型,为平台运行与功能实现提供数据基础。集成数据驱动、模型仿真、交互展示等功能模块,搭建数字孪生平台,实现公路数字化管理与可视化监控。将数字孪生平台投入实际应用,通过实时数据交互与智能分析,有效提高了公路管理决策的科学性与时效性,显著提升了公路管理效率,为交通领域智能化发展提供了切实可行的解决方案。

关键词 数字孪生; 实景三维; 公路; WebGIS

0 引言

数字孪生(Digital Twin)技术对物理实体进行数字化建模,实时同步其状态、行为数据信息,形成动态映射的虚拟模型,应用于监控分析等任务^[1]。随着社会经济的发展,交通建设水平不断提升,超大桥梁、大型隧道、高架路等立体交通设施大量兴建,其三维数字化管理与应用需求进一步凸显,高效的三维建模方法和公路数据挖掘等问题有待研究。

2016年,Pan等^[2]提出了行人和车辆的数字孪生场景搭建;2019年,陶飞等^[3]论述了数字孪生五维模型在智慧城市建设方面的应用;2024年,孙剑等^[4]提出了道路交通系统数字孪生成熟度分级模型。在相关理论的不断深化和扩充下,数字孪生技术在交通领域的应用引发了众多学者的关注和研究,无人机倾斜摄影、BIM、GIS等信息化技术被广泛应用于实景三维公路建设中^[5]。数字孪生模型采集与处理技术的研究和发展,以及数字孪生平台的成熟应用,为实景三维公路建设提供了有力技术保障。

基于数字孪生技术的实景三维公路建设,针对高效建模问题构建公路多层次数字孪生模型体系,为充分挖掘和利用模型数据设计全要素数字孪生交互平台,实现从数据采集、模型构建、模型优化到平台建设的全流程设计,协助提升公路工程的设计质量、施工效率与运维水平,为交通基础设施数字化转型筑牢根基,推动行业迈向智能化发展新阶段。

1 数字孪生模型采集与制作

1.1 技术路线

综合运用车载激光雷达、无人机倾斜摄影等技术手段,对公路及其周边基础设施进行全方位、高精度的信息采集。运用先进算法和建模技术,在专业三维建模软件建立公路模型。经过语义化、轻量化等处理,将优化后的模型投入数字孪生平台建设。该过程的总体技术路线如图1所示。

1.2 模型数据采集

不同公路基础设施在采集需求上存在差异,因地制宜选用适当方法获取数字孪生模型,融合多种技术构建公路多层次数字孪生模型体系。针对重点路段,综合运用点云数据、图纸资料和CAD数据,借助3D Max等三维建模软件,对公路沿线的各类基础设施开展精细化BIM三维建模工作,以精准呈现其空间形态与结构特征。对于普通路段,采用车载激光点云技术对公路路面及沿线环境进行数据采集与处理。针对公路沿线其他资产,采用倾斜摄影建模与激光点云技术相结合的方式,高效获取设施的轮廓信息,实现对公路资产的全面数字化覆盖。

1.3 公路模型构建

公路模型构建是公路三维数字化过程的核心环节,融合倾斜摄影模型与激光点云数据构建高精度三维道路模型。将工作底图、激光点云、倾斜摄影模型导入三维建模平台,进行二三维交互式联动建模,确保模型尺寸、位置与工作底图保持一致。

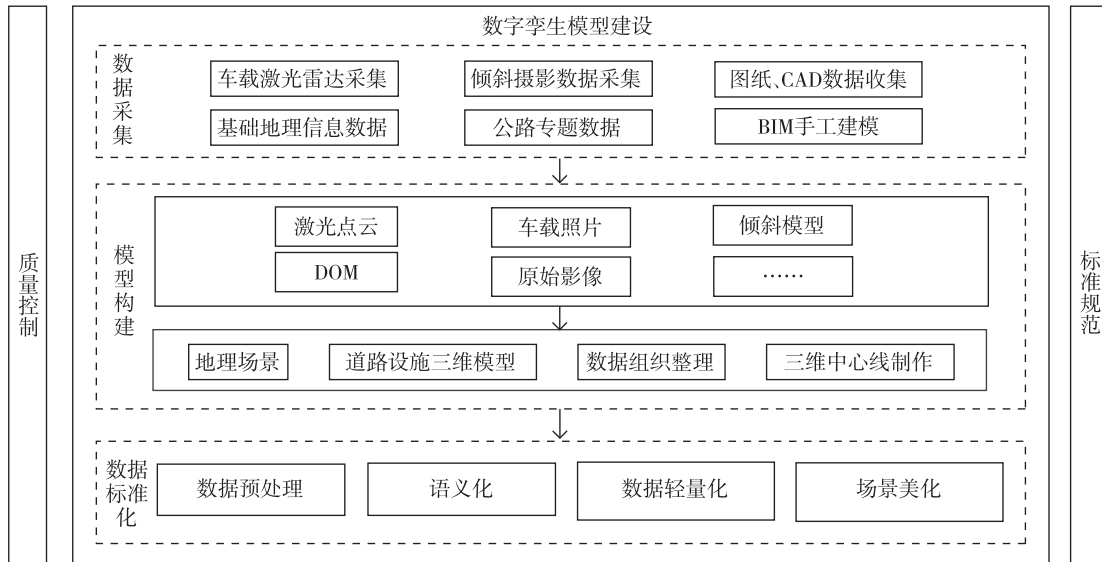


图1 数字孪生模型采集与制作技术路线

为建好的空白模型映射纹理,最后对模型结构、几何、属性、关系进行检查。

为提高公路模型生产效率,针对道路边线、路面标志等设施研制多种算法,为模型单体化工作提供便利^[6]。以道路边线自动提取为例,算法针对因遮挡、数据缺失等原因导致的边界不完整问题,采用智能插值与拓扑修复算法对边界进行补全,生成完整的矢量化道路边界数据,一定程度上提高了道路边线提取的效率与精度。在标志标牌的自动化创建方面,融合知识规则推理与深度学习方法,形成道路实体采集核心技术,构建高效、精准的道路实体识别与定位模型。该技术有效解决了高精度、自动化的道路实体类型识别难题,以及自动空间定位方面的技术瓶颈,实现了标志标牌的快速、精准建模。

1.4 模型数据规范化

对采集到的多源数据和已有的三维模型数据进行数据治理和优化,保证模型数据的属性完整、质量合规,且能够支持基于统一数据架构的通用数据格式。通过三维模型的语义化使其具有空间上的唯一性,采用坐标系统转换、数据结构转换、映射表制作、矢量图形匹配等数据标准化和规范化处理方式,丰富道路及沿线设施实体属性,实现三维单体模型的语义化。完成多源数据融合轻量化处理,打造三维模型数据在 Web 端的轻量化应用。开展多源空间数据模型美化工作,优化光照、材质等要素,提升模型渲染效果。将经过处理和美化的三维模型应用到平台建设,在平台中进行展示和进一步应用。

2 数字孪生公路平台建设

2.1 技术路线

数字孪生公路平台采用分层架构设计理念,自下而上依次构建运行支撑层、数据层、服务层和应用层,各层级之间职责清晰、协同运作,共同支撑平台稳定运行,系统架构如图 2 所示。

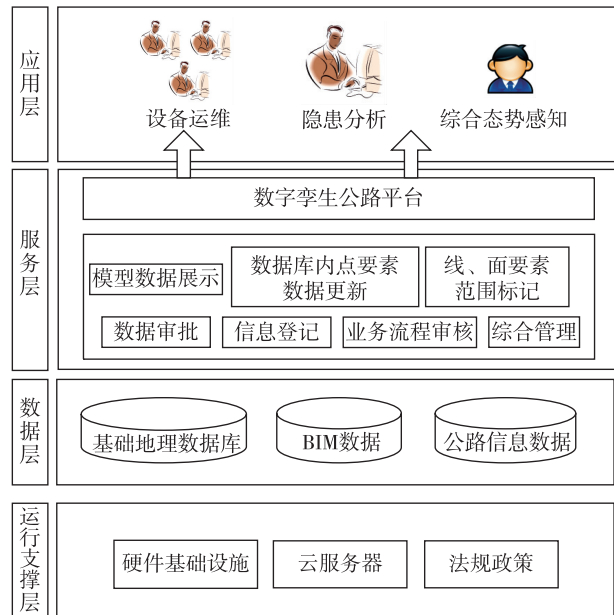


图2 数字孪生公路平台架构

以行业政策法规为基础,运行支撑层包括硬件基础设施和云服务器;数据层负责平台数据的存储和管理;服务层提供数据访问、模型计算、仿真分析等服务接口;应用层面向用户,提供可视化操作界面和具体业务应用功能。分层架构使平台具有良好的可扩展性、可维护性和可复用性。

引入微服务架构理念,将平台功能拆分成多个独立微服务,各微服务负责特定的业务功能,包括交通流量监测服务、车辆轨迹跟踪服务、结构健康监测服务等。微服务之间通过轻量级通信协议实现交互,既便于平台的开发、部署和维护,同时也提高了系统的容错性和灵活性。

2.2 平台搭建

数字孪生公路平台将 GIS 功能与 Web 环境深度融合,构建高效的地理信息应用模式^[7]。采用 B/S 架构,浏览器端负责界面展示与用户交互,提供直观便捷的操作体验;服务器端承担地理数据存储、空间分析等复杂任务,确保数据处理的高效准确。通过 HTTP/HTTPS 协议通信,保障数据传输的安全稳定。当用户在浏览器端请求某区域地图数据时,服务器端快速处理数据,生成适配显示的地图切片并返回。引入分布式计算与云计算技术,采用多节点并行处理与云端资源弹性扩展,实现三维场景的高效渲染与流畅展示。

2.3 平台优化

为实现数字孪生公路平台高效且逼真的渲染效果,引入游戏引擎技术打造接近真实世界且具备高交互性的虚拟环境。Unreal Engine 5(UE5)作为游戏引擎,凭借其卓越的图形渲染能力以及灵活的系统扩展性,在数字孪生平台建设中发挥着关键作用^[8]。在视觉呈现方面,游戏引擎使虚拟场景的光照环境与现实世界高度一致,增强了数字孪生平台的沉浸感与可信度。使用 LOD 技术根据物体与视点的距离加载不同精细程度的模型,通过减少渲染时的计算实现模型的快速加载。在功能实现方面,UE5 支持编写高性能的核心算法与底层功能模块,实现与平台的无缝对接;支持多用户协作与跨平台发布,能够在多种设备和操作系统上运行,为系统协作开发和用户多平台访问提供便利。

3 实现效果

3.1 数字孪生模型制作

公路模型数据采集和制作流程包括数据采集与处理、倾斜摄影三维建模、道路及沿线设施三维单体模型制作、三维模型语义化、模型美化等步骤,最终得到的模型效果如图 3 所示。获得的公路模型空间定位精度、几何形态还原度及属性信息完整性均符合行业标准要求,为实景三维公路数字孪生平台建设提供数据保障。

3.2 数字孪生平台建设

基于 WebGIS、游戏引擎等技术建立的数字孪生公路平台,实现了二三维地图浏览、二三维空间



图 3 美化后模型效果图

分析、公路数据展示、物联网数据展示以及公路基础设施查询统计等功能^[8]。平台设计了资产管理、视频监控等核心功能,实现对公路资产的常态化监测与管理,切实提升了公路资产的管理效能。用户可通过点击三维模型查看路产属性信息,实现基于三维模型的公路资产精细化管理。同时,平台对接公路路网视频监控系统,支持查看对应区域的视频监控。动态发布桥梁应力、腐蚀、裂缝、交通荷载监测等信息,实现对桥梁健康情况的精细化管控。平台中的公路模型展示效果如图 4 所示,不同时段视频监控对比查看效果如图 5 所示。



图 4 公路模型展示效果图

4 结语

本研究基于数字孪生技术体系构建了具备高度真实性与交互性的实景三维公路模型,提出了针对不同类型公路设施的数字孪生模型数据采集方法和模型构建算法,并配套开发了数字孪生公路应用平台。通过深度融合无人机倾斜摄影、BIM、GIS、数字孪生等前沿信息化技术,形成了完整的实景三维公路数字化解决方案。所搭建的数字孪生公路平台具备多维度可视化展示以及智能化管理分析功能,有效提高了公路设施巡检效率和养护决策响应速度,实现了公路智能化管理和公路数据的深度挖掘应用。

下一步研究将聚焦于 AI 驱动的数字孪生体进



图 5 视频监控效果图

化机制,通过深度学习技术实现模型自优化与预测性维护;建立基于数字孪生的全要素资产管理标准体系,推动公路行业数字化转型从可视化向可决策的范式跃迁。

参考文献

- [1] 伍朝辉,徐建达,符志强,等.交通强国建设视域下公路交通数字孪生体系架构、关键技术与实践案例[J].交通运输研究,2023,9(4):104-124.
- [2] PAN C, CHEN Y, WANG G. Virtual-real fusion with dynamic scene from videos[C]//2016 International Conference on Cyberworlds (CW).IEEE Computer Society, 2016: 65-72.

- [3] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):1-18.
- [4] 孙剑,秦国阳.道路交通系统数字孪生:概念、成熟度分级与研究展望[J].中国公路学报,2024,37(7):218-236.
- [5] 贺鹏飞.公路基础设施数字孪生体的构建与应用研究[D].兰州:兰州交通大学,2024.
- [6] 潘智勇.基于实景三维数据的道路横断面自动提取方法研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2023.
- [7] 奚燕,姜雪明,吴珍珍,等.公路交通数字孪生应用开发平台设计与应用[J].中国交通信息化,2024,(10):82-85.
- [8] 贺华承.基于 UE5 的地形级实景三维研究[D].武汉:长江大学,2024.

【上接第 12 页】

的现状。两项工作均已开展实验区研究,实际探索辅助决策地图在大数据环境下的变化信息发现更新及地图综合尺度自动转换的新发展模式,构建更加高效、精准、灵活的地图供给机制,提升地图服务水平。

参考文献

- [1] 王迪,钱海忠,赵钰哲.综述与展望:地理空间数据的管理、多尺度变换与表达[J].地球信息科学学报,2022,24(12):2265-2281.

- [2] 张新长,何显锦,孙颖,等.多尺度空间数据联动更新技术研究现状及展望[J].测绘学报,2022,51(7):1520-1535.
- [3] 白光平,黄洪纤.江苏省辅助决策地图联动更新实践探讨[J].测绘与空间地理信息,2019,42(11):46-48.
- [4] 方川,黄洪纤.基于 ArcGIS API for JavaScript 的辅助决策地图变化信息联动系统开发[J].测绘与空间地理信息,2021,44(3):30-32,35.
- [5] 周宇晨.“天地图·江苏”精细电子地图建设方案研究[J].测绘与空间地理信息,2023,46(5):93-95,99.
- [6] 王海荣.面向快速制图的多尺度地图数据库设计与建设[J].地理空间信息,2021,19(10):76-79,150.