

Research on digital twin city modeling scheme based on real scene 3d mapping data

Kaiyi Liu

Hebei Second Surveying and Mapping Institute, Shijiazhuang, Hebei, 050030, China

Abstract

With the deepening of urban digitalization, digital twin cities—an innovative model integrating perception, simulation, prediction, and decision-making—are emerging as a crucial direction for smart city development. As the spatial data foundation of digital twin cities, 3D real-scene mapping enables accurate representation of urban physical geometry, spatial structures, and attribute information, serving as a key component in constructing high-precision digital city models. This paper focuses on modeling research in 3D real-scene mapping for digital twin cities, systematically outlining critical processes including 3D data acquisition, preprocessing, modeling, and semantic integration. It explores integration mechanisms for multi-source heterogeneous data such as BIM, GIS, and IoT, while proposing dynamic updates and intelligent service models tailored for digital twins. The study demonstrates that building high-precision, semantically enriched, and interactive 3D urban models significantly supports improved urban management accuracy, enabling refined governance and scientific decision-making.

Keywords

digital twin city; real scene 3D mapping; data modeling; semantic fusion; smart city

基于实景三维测绘数据的面向数字孪生城市建模方案的研究

刘凯怡

河北省第二测绘院, 中国·河北 石家庄 050030

摘要

随着城市数字化建设的不断深入, 数字孪生城市作为融合感知、模拟、预测与决策的创新模式, 正在成为智慧城市发展的重要方向。三维实景测绘作为数字孪生城市的空间数据底座, 能够真实反映城市物理世界的几何形态、空间结构与属性信息, 是构建高精度数字城市模型的关键环节。本文围绕三维实景测绘在数字孪生城市中的建模研究展开, 系统阐述三维数据获取、预处理、建模与语义融合等关键流程, 探讨BIM、GIS与IoT等多源异构数据的集成机制, 并提出面向孪生体的动态更新与智能服务模型。研究表明, 构建高精度、语义化、可交互的三维城市模型, 对于提升城市管理精度、实现精细化治理与科学决策具有重要支撑作用。

关键词

数字孪生城市; 实景三维测绘; 数据建模; 语义融合; 智慧城市

1 引言

数字孪生 (Digital Twin) 概念最初源于工业领域, 随着城市信息化进程的推进, 其理念逐步延伸至城市治理、基础设施管理及公共服务等多个领域, 形成数字孪生城市的概念体系。作为数字城市向智慧城市演进的重要形态, 数字孪生城市依托高精度三维建模、时空数据集成与实时仿真能力, 实现物理城市与虚拟城市的协同映射与联动控制。实景三维测绘技术以其真实、连续、精细的空间表达能力, 为数字孪生城市提供坚实的数据基础, 成为建模环节不可或缺的关键技术支撑。

【作者简介】刘凯怡 (1992-), 女, 中国河北饶阳人, 本科, 助理工程师, 从事测绘研究。

当前, 尽管三维建模技术已在城市规划、应急管理、交通调度等方面得到广泛应用, 但仍存在数据标准不统一、建模流程复杂、更新机制滞后等问题。为实现面向孪生城市的高质量三维模型构建, 亟需从数据采集、模型重建、语义识别、异构融合到智能服务等方面展开系统研究。

2 三维建模流程与关键处理技术

2.1 数据采集与预处理

三维建模的首要环节是原始数据的获取, 其质量直接决定最终模型的精度、完整性与语义表现力。在城市尺度下的建模任务中, 由于地形复杂、建筑形态多样、遮挡物频繁等现实因素的影响, 需依据不同应用场景选择合适的数据采集设备与路径策略, 实现从地面、空中到地下的立体感知^[1]。在空中测量方面, 倾斜摄影航测系统通过搭载多镜头传感器

获取多视角、高重叠率的图像数据，能够兼顾屋顶、立面与地面等多个方向的几何信息，在保证精度的同时，提升建模的完整性与真实感。对于大尺度城市区域，常采用固定翼无人机进行分区航拍，确保覆盖范围与分辨率的动态平衡。而在地面感知方面，激光扫描系统（如地面三维激光扫描仪、移动测量车）可获取高密度点云数据，适用于建筑立面、街道设施、交通节点等局部高精度建模。数据采集完成后，预处理环节主要包括数据配准、滤波降噪、坐标转换、点云稀疏化与分类。

2.2 三维模型构建与纹理映射

三维模型的构建过程是在经过预处理与特征提取后的数据基础上，按照一定的几何重建与纹理生成逻辑，将城市现实空间转化为虚拟空间中的可视化实体^[2]。该过程既需兼顾模型的结构精度与几何表达能力，又需实现纹理图层的逼真映射与动态响应能力，是数字孪生城市建模中的核心环节。在几何建模方面，常见的重建策略主要分为基于点云的表面重建与基于网格的构件建模两大路径。点云表面重建适用于大范围环境场景的快速建模，常采用泊松重建（Poisson Surface Reconstruction）、Delaunay三角剖分、逐步法（Greedy Projection Triangulation）等算法，构建连续、流畅的表面网格模型，尤其适用于自然地形、城市街道与构造复杂区域。而构件建模更侧重于结构化表达，通过将点云或影像切割为标准构件单元（如墙体、窗户、屋顶、栏杆等），结合BIM对象库进行规则建模，可在保证精度的同时增强模型的语义性与拓展性。

纹理映射环节旨在将获取的高分辨率图像与几何模型进行精准结合，提升三维模型的视觉表达能力与沉浸式体验效果。通常采用基于投影映射的方式，根据摄影测量生成的相机内外参数，将图像投影至模型表面。在此过程中需对多视角图像进行几何校正与亮度均衡处理，避免接缝错位、重影叠加与色差跳变等问题^[3]。部分先进系统还引入了自动纹理拼接与图像融合算法，如多边权重拼接法、视点选择算法（View Selection），以实现更自然的纹理连续性。近年来，随着AI图像识别与深度估计技术的发展，部分建模流程已实现自动化，如通过图像深度网络预测建筑轮廓与层高，通过实例分割提取构件纹理等，推动三维建模向智能化与数据驱动建模模式转型。同时，对于动态场景与时变对象，还可借助视频纹理流与多时相数据建立时间轴上的纹理更新机制，为数字孪生城市的时态演化建模提供数据支撑。

3 多源数据融合与语义建模

3.1 BIM与GIS的融合路径

在数字孪生城市的建模体系中，三维模型不仅承载着空间几何形态的表达，更是多维信息集成与城市管理逻辑承载的载体。其中，建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）与地理信息系统（Geographic Information System, GIS）分别代表了工程建设领域与地理空间信息管理领域的两大核心数据体系^[4]。BIM模型具有高度细化的

构件级语义结构，便于建筑物生命周期管理，而GIS则擅长对大尺度、多源异构空间数据的组织与分析。因此，BIM与GIS的有效融合，是构建城市级三维语义模型、实现孪生体结构化表达的关键路径。但BIM与GIS在数据结构、坐标体系、信息粒度与应用目的等方面存在显著差异，导致两者在模型融合过程中面临多项技术挑战。一方面，BIM通常采用建筑本地坐标系，强调构件属性与设计逻辑，其文件格式以IFC（Industry Foundation Classes）、Revit等为主，构件间的几何关系精密；另一方面，GIS则采用全球统一的大地坐标系（如WGS84、CGCS2000），关注空间对象在地理环境中的位置与属性，其数据格式以Shapefile、GML、GeoJSON等为主。因此，融合过程中首要任务是在空间坐标维度实现统一。

目前的BIM-GIS融合主要有三种路径：一是基于数据转换的轻量化集成，将BIM模型简化为LOD模型后导入GIS平台，如将IFC转化为CityGML；二是通过中间模型构建融合桥梁，如使用Unity或Cesium等三维可视化引擎进行渲染驱动，同时建立构件属性映射表；三是采用语义层融合方式，在数据库层构建统一的数据结构与标识体系，实现语义联通与服务协同。第三种路径虽然技术复杂度高，但在面向孪生城市的应用中具有更强的可扩展性与智能化潜力。BIM-GIS的深度融合不仅能够支撑静态空间建模，更为动态运营与场景分析提供坚实支撑。例如，可将城市道路空间的三维网格与BIM构件模型关联，实时映射交通设施运行状态；或在建筑模型中嵌入IoT节点数据，实现温湿度监测与能耗控制的可视化表达。通过建立构件级“语义+位置+状态”的三维数据集，数字孪生城市模型可向“认知型模型”演进，为城市治理注入智慧内核。（通篇多个“”应改为“”）

3.2 IoT感知数据的集成建模3.2

数字孪生城市的核心价值不仅在于实现物理空间的静态数字再现，更在于构建具备动态响应能力、智能分析与预测调控能力的虚拟镜像。而这一能力的实现，依赖于物联网（Internet of Things, IoT）感知系统所提供的连续、实时、动态的数据输入。将IoT感知数据有效集成至三维实景模型之中，是推动静态三维建模向动态孪生体转化的关键环节。IoT感知数据具有多源异构、时序密集、语义丰富等典型特征，来源包括城市感知终端（如温度传感器、烟雾探测器、门禁系统）、环境监测设备（如PM2.5监测站、噪音监测点）、移动设备定位信号（如GPS数据、Wi-Fi轨迹）以及智能摄像头所生成的图像流等。

4 面向孪生城市的三维模型系统集成

实现面向数字孪生城市的三维建模不仅仅是对现实世界进行形态还原，更关键的是构建一个具有系统性、可扩展性与智能性的数据平台架构。该平台不仅需承载多源数据的统一接入与处理，还需实现模型管理、语义解析、实时更新、可视化展示与智能服务等功能。当前主流的三维孪生城市平

台架构多采用“多层分布、模块耦合、服务驱动”的技术体系，核心由感知层、建模层、分析层与应用层四级组成^[9]。为系统呈现面向数字孪生城市的三维建模系统架构，本文构建如下四层技术体系图，涵盖感知、建模、分析与应用四个层级，如图 1 所示：感知层是平台的底层数据输入通道，负责接入来自激光雷达、倾斜摄影、卫星遥感、IoT 终端、城市运行系统等多种异构传感器的数据流，并进行格式标准化、时间对齐与质量控制。该层的关键在于建立一个高通量、低延迟、可扩展的数据采集网关，实现城市状态的“感知全覆盖”。建模层是数据平台的核心处理引擎，承担几何建模、语义融合、数据压缩、动态更新等核心功能。在此层面，需构建 LOD 分级管理体系与构件级数据索引体系，以支持不同精度层次下的快速加载与多维分析。在构建动态响应模型过程中，可将三维模型的实时状态表达为多源数据的融合函数。设 M_t 为时刻 t 的三维模型状态， P 表示点云数据集， T 为纹理图像集， S 为传感器时序数据，模型融合表达如下：

$$M_t = f(P, T, S, t) = \alpha \cdot G(P) + \beta \cdot R(T) + \gamma \cdot D(S, t)$$

其中， $G(P)$ 为点云几何构建函数， $R(T)$ 为纹理重投影函数， $D(S, t)$ 为动态数据驱动函数， $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ，用于控制不同数据源对建模结果的影响权重。为实现高效的场景切换与 LOD 控制机制，可进一步构建模型加载响应时间函数：

$$LOD_i(t) = \frac{W_i \cdot D_i}{B(t)}$$

其中， LOD_i 为第 i 层精度模型加载时间， W_i 为权重， D_i 为数据量， $B(t)$ 为带宽随时间变化的动态函数。同时还需部署 BIM-GIS 集成引擎与点云重建模块，形成具备高保真度与高可用性的三维语义模型库。

分析层是支撑智能决策与城市仿真的逻辑中枢，其主要功能包括多维数据分析、规则推理、AI 辅助诊断与模拟仿真等。通过构建知识图谱与数据模型耦合机制，可实现对城市运行状态的实时分析与趋势预测。例如，在城市管网管理中，可结合流速传感器数据与管道三维模型，实时监测水压异常与堵塞位置；又如在交通管理中，融合交通流模型与三维道路场景，可模拟不同调度策略下的运行效果。应用层则面向用户提供可视化交互与管理服务，支持桌面端、Web 端与移动端等多终端访问。通过引入 WebGL/WebGPU 三维图形引擎、Cesium/Unity 等空间渲染框架，实现场景漫游、属性查询、图层叠加、态势展示等多种功能。同时，平台还应支持用户自定义模型加载、数据导入、场景标注与协同设计等操作，实现从“被动感知”到“主动参与”的模式转变。部分先进平台还引入 XR（扩展现实）接口，实现三维孪生场景在 AR/VR/MR 设备中的沉浸式交互体验，增强公众参与与管理可视化能力。

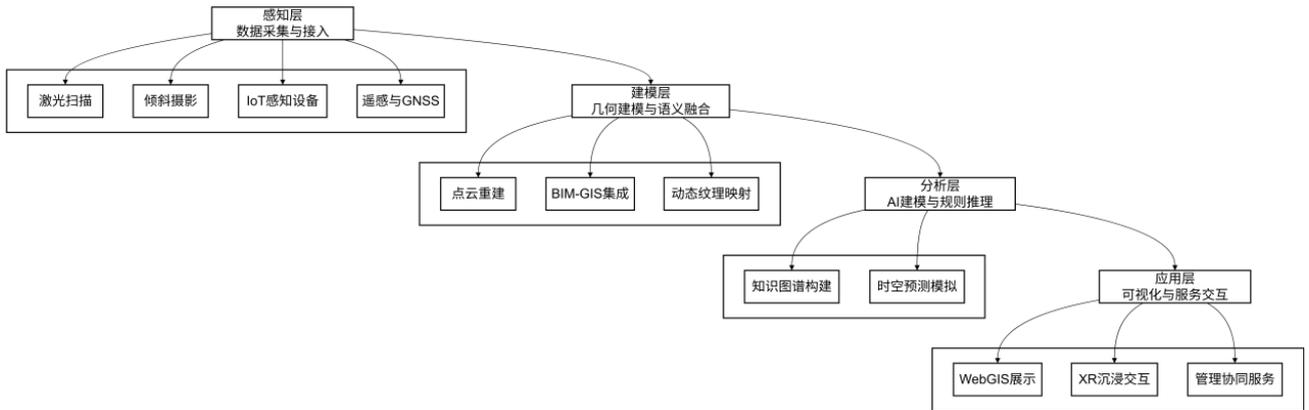


图 1 数字孪生城市三维建模系统的四层架构模型图打印后会有些不清楚

5 结论

既然你提出了模型架构，如果能有的地方应用例子佐证为最好和更有说服力

实景三维测绘作为数字孪生城市建设的关键支撑技术，其建模质量直接影响孪生体系统的真实性、时效性与应用效能。本文系统梳理了三维实景建模的技术原理、建模流程、语义融合路径与系统集成机制，指出融合 BIM、GIS 与 IoT 数据、构建高精度语义模型是当前孪生城市发展的技术核心。相信随着 AI 识别、图神经网络、时空知识图谱等新技术的引入，三维建模将更加智能化、自动化，并向动态孪生演化方向持续演进。

参考文献

- [1] 蓝凯,宋坤良,王新兴.基于三维实景模型与点云的全要素地形图制作[J].测绘与空间地理信息,2024,47(11):218-221.
- [2] 危磊.矿山巷道三维模型可视化实现方法研究[J].重庆建筑,2024,23(08):24-26+39.
- [3] 熊小龙,伍根,孔德炜.无人机近距离摄影的建筑三维测绘模型构建[J].中国高科技,2024,(13):38-40.DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.13.10.
- [4] 潘龙祥,刘传俊,单子丽,等.无人机倾斜摄影三维实景建模在不动产测绘中的应用[J].新城建科技,2024,33(06):67-69.
- [5] 李鹏程.基于多源测绘数据的三维实景模型分析[J].智能城市,2024,10(05):60-62.DOI:10.19301/j.cnki.zncs.2024.05.018.