

新型测绘在数字孪生城市建设中的应用

郑欣然

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年6月11日; 录用日期: 2025年7月2日; 发布日期: 2025年7月11日

摘要

在当今新一轮信息技术革命浪潮中, 以大数据、物联网、人工智能、虚拟现实等为代表的数字技术集群加速演进, 推动着数字空间与现实世界的深度耦合与交互演进。在此背景下, 作为虚实交互的使能技术, 数字孪生通过物联网技术的迭代升级, 已深度融入智慧城市全生命周期管理, 重构城市空间治理范式。该体系构建的核心在于全要素地理实体数据的精准获取与动态更新, 而传统基础测绘的服务模式已显现出多重局限, 迫切需要向地理实体全息建模的新型测绘体系转型。本文聚焦数字孪生城市发展需求, 剖析当前发展瓶颈, 梳理了新型测绘的主要技术及应用实践。

关键词

智慧城市, 数字孪生城市建设, 新型测绘, 应用现状

Application of New Surveying and Mapping in the Construction of Digital Twin Cities

Xinran Zheng

College of Geographical Science, Harbin Normal University Harbin, Harbin Heilongjiang

Received: Jun. 11th, 2025; accepted: Jul. 2nd, 2025; published: Jul. 11th, 2025

Abstract

In today's new wave of information technology revolution, digital technology clusters represented by big data, Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and virtual reality (VR) have accelerated their evolution, promoting the deep coupling and interactive evolution of digital space and the real world. In this context, as the enabling technology for virtual-reality interaction, digital twin has been deeply integrated into the whole life cycle management of smart cities through the iterative upgrading of IoT technology, reconfiguring the paradigm of urban spatial governance. The core of this system lies in the accurate acquisition and dynamic updating of all elements of geographic entity data, while

文章引用: 郑欣然. 新型测绘在数字孪生城市建设中的应用[J]. 测绘科学技术, 2025, 13(3): 171-178.

DOI: 10.12677/gst.2025.133020

the traditional service model of basic surveying and mapping has shown multiple limitations, and there is an urgent need to transform to a new type of surveying and mapping system for holographic modeling of geographic entities. This paper focuses on the development needs of digital twin cities, analyzes the current development bottlenecks, and explores the main technologies and application practices of new surveying and mapping.

Keywords

Smart City, Digital Twin City Construction, New Surveying and Mapping, Application Status Quo

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. 数字孪生城市建设价值

随着城市人口不断增长以及城市化进程不断加快,人们对城市生活质量的要求也越来越高,智慧城市市建设已成为城市发展的重要趋势之一。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中明确提出“分级分类推进新型智慧城市建设”、“探索建设数字孪生城市”[1]。早在2017年,中国信息通信研究院在长期从事智慧城市顶层设计实践基础上,就提出了“以数字孪生城市推进新型智慧城市建设”的创新理念。数字孪生技术通过融合多源异构数据(包括物理实体传感信息、历史运行参数及多学科知识模型),构建跨尺度、多物理场耦合的动态仿真体系,在虚拟空间中对实体对象进行全生命周期的高保真映射与交互验证。其本质是依托数据驱动与模型驱动的协同机制,实现物理世界与数字空间的闭环反馈与动态演进。而数字孪生城市作为该技术的宏观延伸,以城市信息模型(CIM)为核心载体,通过物联网感知网络与人工智能算法构建城市级虚实共生系统,形成物理空间实体与数字空间镜像的精准映射、实时交互与协同优化,如图1所示。

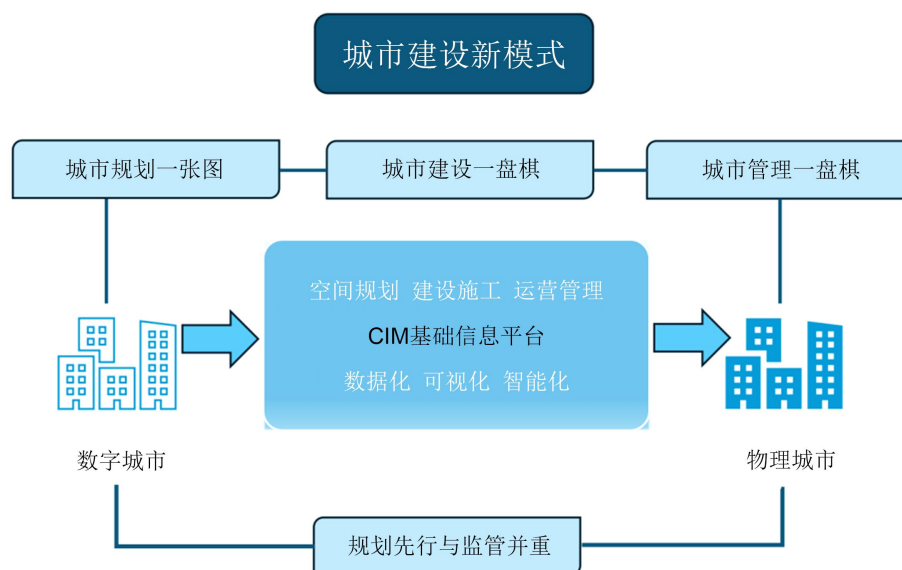


Figure 1. Introduction diagram of digital twin city
图 1. 数字孪生城市介绍图

这种新型城市形态不仅实现基础设施、人口活动、生态环境等全要素的数字化重构与动态可视化，更通过机器学习驱动的自我迭代能力，支撑交通流量预测、能源管网调控、公共安全应急等场景的智能决策，推动城市治理从经验驱动向数据驱动、从静态管控向动态认知的范式变革[2]。作为智慧城市建设的核心使能技术，数字孪生通过多维度仿真推演、故障预诊断与协同优化机制，显著提升城市资源配置效率与可持续发展能力。随着城市感知神经网络与时空知识图谱等技术的深度融合，数字孪生正从工具性支撑向战略性基础设施跃迁，其深度应用将重构城市规划、建设与运维的全生命周期管理逻辑，开启虚实共智的城市发展新纪元。

2. 新型测绘在数字孪生城市建设中的应用类型

城市信息模型与数字孪生系统的构建，本质上依赖于覆盖全域空间、贯穿地上地下、整合室内外的全息地理实体数据库。这类三维空间基准数据不仅构成城市数字底座的核心要素，更是实现虚实空间动态映射与协同演算的基础支撑。当前，传统以二维制图体系为主导的地理信息生产模式已显现显著局限——基于平面投影的要素抽象表达难以承载建筑体内部结构、地下管网拓扑、城市部件动态属性等精细化语义信息，更无法满足城市体征实时监测、空间冲突智能预警等现代治理需求。

在此背景下，数字孪生城市建设正驱动测绘技术体系向全要素实体化建模、多尺度时空融合、厘米级精度表达的方向加速转型，亟需构建具备动态实体编码、语义关联网络、时空版本管理等特征的新型三维地理信息产品体系[3]。面向城市治理现代化与空间智能化的双重诉求，全域覆盖的实景三维建模、地下空间透明化探测、室内外无缝定位等创新测绘技术，正在重塑城市数字空间的构建范式，目前流行的新型测绘介绍如下。

2.1. 地面移动测量系统

移动测量系统(mobile mapping system, MMS)作为现代空间信息感知体系的核心装备，通过多源传感器(激光雷达、全球导航卫星系统、惯性测量单元、多光谱相机等)的异构集成与时空同步标定，构建了动态地理空间数据采集机制。其依托车载、机载或便携式移动载体，在行进过程中同步获取厘米级三维坐标、多视角影像序列及高密度点云数据，形成全息空间信息流，其主要分类如图 2 所示。面向数字孪生城市建设需求，地面移动测量系统通过集成多源传感设备，实现城市空间要素的全域动态感知——既涵盖建筑立面几何形态、道路设施拓扑关系等静态实体特征，亦能捕捉车流密度变化、人群热力分布等动态时空规律。在此基础上，通过融合惯性导航系统输出的位姿参数与点云语义分割算法，系统可实时解析城市空间格局演变趋势，并借助云端分布式计算架构对海量异构数据进行特征提取与知识挖掘，为城市精细化治理提供毫米级精度的决策依据。此外，通过融合低空无人机航测技术，该系统进一步拓展了垂直空间数据获取能力，结合倾斜摄影与激光雷达的混合建模技术，构建了从街景立面到城市天际线的多尺度透明化数字镜像，为智慧城市全生命周期管理提供高保真空间基底[4]。

地面移动测量系统通过集成高精度 GPS、惯性导航(INS)及多线激光雷达，在智慧城市建设、工业物流及灾害应急等领域展现高效多场景适应能力，其优势体现在厘米级三维数据采集与数字孪生平台的无缝对接，但受限于复杂环境下的定位可靠性和高昂硬件成本以及多传感器融合算法与数据标准化难题。典型案例中，国家电网四足巡检机器人基于北斗 + 3D SLAM 技术实现电缆隧道无 GNSS 环境自主导航，山东科技大学车载系统通过激光 - 影像融合完成青岛城市实景建模，建模效率提升了 3 倍。未来创新聚焦量子惯性导航、边缘计算轻量化 AI 及开放式软件框架，结合政策推动与硬件集成化，预计 2030 年系统综合成本降低 50%且探测距离突破 500 米，为数字孪生城市、工业元宇宙等场景提供核心空间数据支撑。



Figure 2. Classification diagram of mobile surveying and mapping systems

图 2. 移动测绘系统分类示意图

2.2. 倾斜摄影技术

倾斜摄影测量作为地理空间信息获取领域的革新性技术,通过多视点异构影像采集与密集匹配算法,为智慧城市构建了多粒度空间认知框架。该技术依托多旋翼无人机平台搭载五镜头倾斜相机阵列,以航带规划方式获取地物顶视与侧视多角度影像序列,结合运动恢复结构算法生成高密度三维点云,进而通过语义分割与纹理映射构建厘米级精度的实景三维模型,大致数据采集过程如图 3 所示[5]。相较于传统以正射影像与二维线划图为主导的规划数据基底,倾斜摄影构建的立体化城市数字镜像突破了空间表达维度限制,使规划决策者能够基于沉浸式空间认知环境,开展建筑体量推敲、天际线管控、交通廊道优化等多尺度空间分析。通过融合 BIM 与 GIS 数据,该技术可实现规划方案的空间冲突检测与控高合规性验证,精准量化建筑间距、容积率等关键指标。在灾害韧性评估领域,倾斜摄影衍生的数字表面模型(DSM)与数字高程模型(DEM)耦合水文动力模型,可动态模拟极端降雨情景下的地表径流演进与内涝风险分布,为海绵城市建设和排水管网优化提供毫米级空间基准[6]。这种从静态测绘向动态感知的范式转变,标志着城市空间治理已进入全要素可计算、全场景可推演的新阶段。

然而,该技术仍存在显著技术瓶颈,一是环境依赖性,雨雾天气会显著降低影像清晰度,且无 GPS 环境下惯性导航误差累积问题突出(如隧道内定位误差率可达 0.1%/小时);二是数据处理复杂度高,每秒百万级点云数据需依赖高性能计算平台,例如 ContextCapture 软件处理大规模点云时需人工干预遮挡区域匹配;三是硬件成本与标准化难题,传统多镜头系统单机成本超 1 万美元,且不同厂商数据格式兼容性不足,制约智慧城市平台整合。

在实际应用中,倾斜摄影技术已渗透至多个领域,城市更新与文化遗产保护方面,北京崇雍大街改造项目通过三维可视化 WebGIS 平台实现“所见即所得”设计,居民可实时参与方案优化。在水利工程与灾害防治领域,湖北黄冈长河治理项目利用倾斜摄影生成真正射影像(TDOM),消除传统 DOM 的投影差与建筑物错位问题,为工程规划提供无变形底图。在司法与公益诉讼领域,浙江省慈溪市检察院采用“空天地一体化”技术,结合卫星遥感和无人机倾斜摄影,快速甄别古窑遗址周边违规填埋线索,提升取证效率。此外,贵州迈普空间通过 18 镜头相机矩阵实现 470 平方公里三维建模,支撑政府决策与智慧旅游,展现了其在区域空间数据服务中的潜力。未来技术突破方向将聚焦在多源数据融合与算法优化层

面，如攀枝花学院研发的“OPGS 倾斜摄影数据与 3D 高斯溅射融合算法”，通过模拟点云分布提升复杂山地建模精度至厘米级，减少施工浪费 15%。以及边缘计算与轻量化处理，将 AI 模型(如 GAN 网络)嵌入车载设备，实现非视域场景实时重建，降低云端依赖。通过上述路径，倾斜摄影技术有望实现硬件成本降低 50%(如固态 PPK 模块降至 500 美元级)，并拓展至深海探测与太空测绘等前沿领域，成为数字孪生与智慧城市的核心技术支柱。



Figure 3. Schematic diagram of data collection by oblique photography technology
图 3. 倾斜摄影技术采集数据示意图

2.3. 激光雷达技术

激光雷达(LiDAR)作为新一代空间感知技术的核心使能手段，基于飞行时间测距(ToF)原理与多脉冲回波分离技术，通过亚厘米级空间分辨率与毫米级测距精度，构建了城市物理空间的数字化镜像体系。在基础设施数字化领域，车载/机载 LiDAR 系统通过多平台协同扫描如图 4 所示，获取城市建筑立面、道路设施及地下管廊的多回波点云数据，结合点云语义分割算法与三维重建技术，生成具有拓扑关系的 BIM-GIS 融合模型，为城市更新与地下空间开发提供毫米级空间基准[7]。环境生态监测维度，LiDAR 通过全波形分析技术解析气溶胶垂直分布特征，结合多光谱传感器融合数据，实现植被生物量反演与水体富营养化程度评估，同时基于热红外点云构建城市三维热环境模型，精准识别热岛效应核心区。在交通治理方面，道路平整度检测精度可达 ± 3 mm，通过多时相点云差分分析路面形变趋势，结合移动激光扫描实时捕捉积水区域空间分布，为道路养护提供动态决策依据。公共安全领域，LiDAR 点云时序分析可构建火灾烟雾扩散三维模型，结合水文激光雷达(Hydro LiDAR)实现洪涝淹没边界的亚米级快速圈定，显著提升灾害应急响应效能。气象监测中，南京信息工程大学研发的非视域激光雷达在广州白云机场实现了风切变预警。地理考古领域则以武汉大学的拉曼散射激光雷达为代表，其突破性实现 35 公里大气温度和气溶胶浓度同步测量，为极端天气预测提供了数据支撑[8]。这种从静态空间数据采集向动态城市体征感知的技术跃迁，标志着城市治理已进入全要素可计算、全风险可预判的智能新纪元。

然而该技术仍面临显著挑战，极端天气下激光散射效应(如雨滴和雾霾颗粒导致信号衰减超过 60%)严重影响探测精度，硬件成本居高不下，以及每秒百万量级的点云数据对实时处理算力的严苛要求。当前创新聚焦于材料与算法协同突破，例如，固态技术和纳米疏水涂层提升环境适应性。AI 驱动非视域重建与边缘计算优化实时处理，量子单光子探测技术将探测距离拓展至深海/太空领域。典型案例显示，通

过多模态融合与芯片级集成，预计 2030 年前实现成本减半与性能倍增，推动其在智慧城市、精准农业等场景的规模化落地。

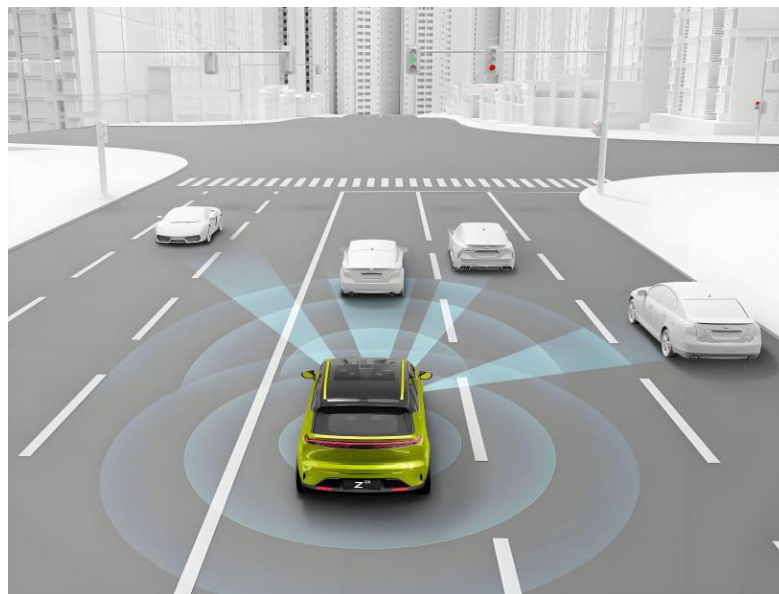


Figure 4. Schematic diagram of data collection by LiDAR technology
图 4. 激光雷达技术采集数据示意图

3. 当前新型测绘在数字孪生城市建设中的应用

3.1. 上海市“智能化全息测绘”项目

上海市于 2020 年 2 月发布《关于进一步加快智慧城市建设的若干意见》，系统部署以数据要素为核心驱动力的城市数字化转型战略，明确提出构建“全域感知 - 数据融通 - 智能决策”的新型城市治理范式。该规划锚定 2022 年建成全球智慧城市标杆的目标，着力突破传统治理模式中的信息孤岛壁垒，通过构建“城市智能中枢系统”实现跨部门数据资源全量归集与价值再造。其创新性提出“数字孪生城市”建设路径，依托多模态时空数据库搭建城市信息模型(CIM)，实现对城市生态系统的全要素数字化映射与动态仿真推演。作为支撑体系的核心突破，上海市率先发布《基于地理实体的全息要素采集与建库》团体标准，标志着基础测绘领域实现从“制图思维”向“城市体征感知”的范式创新[3]。

顾建祥团队提出的智能化全息测绘技术体系以城市数字化孪生为核心目标，通过多源传感器融合与人工智能技术，构建了一套覆盖城市全空间、动静态信息的综合解决方案。技术路线主要以“空 - 天 - 地”立体化数据采集为基础，融合机载激光扫描覆盖大范围建筑屋顶与地形、倾斜摄影补充单体化模型细节、车载激光扫描获取道路及建筑立面数据、地面三维激光扫描地下空间与街坊内部精细化建模、便携式设备快速补测小范围区域及探地雷达探测地下管线探测等多平台传感器的使用，形成室内外、地上地下无缝衔接的数据获取能力，如该项目上海试点中完成 90 km² 车载点云和 30 km² 机载点云采集。数据来源不仅包含传统测绘数据，还深度整合如视频监控、车辆轨迹、地下管网、环境监测等物联网动态传感数据流，通过时空一致性映射模型实现静态空间信息与动态数据的精准融合。

实施效果方面，该技术体系在上海市试点中显著提升城市管理效率，首先，通过深度学习与迁移学习算法，自动化提取城市全要素地理实体的结构与语义信息，如建筑立面纹理、道路附属设施分类，减少人工干预 90%。其次，构建城市场景结构化语义模型，支持“所见即所得”的虚拟现实交互，为智慧

城市决策提供动态数据支撑。最后，在复杂场景中实现厘米级精度建模，如崇雍大街改造项目融合地面激光与倾斜摄影消除纹理缺失，并将中小城市三维建模周期从传统 1~2 年压缩至 3~5 个月。该项目的创新突破主要体现在多模态数据时空误差耦合优化、基于“结构-语义-动态”迭代的模型重建方法，以及开源模块化框架“台湾大学 ntuMMF”的引入，为跨领域数据共享与算法扩展提供技术基础。未来该技术有望推动城市管理从“被动响应”向“智能预测”转型，并为工业元宇宙、数字孪生流域等新兴领域提供核心空间数据底座。

3.2. 数字孪生可视化测绘平台

饶俊清等人利用数字化建模、数字化双向传输以及虚拟可视化作为关键技术搭建了数字孪生可视化平台[9]。数字孪生可视化测绘平台的基本架构将实时数据采集、数字孪生模型建立、数据融合与分析和可视化界面开发紧密结合，以提供用户友好的界面和功能，帮助用户更好地理解和管理现实世界中的物体和系统。平台的基本架构如图 5 所示，并基于数字孪生可视化测绘平台对广东省某一工业园区进行 1:1 精细化构建和环境高度仿真渲染，再利用平台进行智慧应用管理，试验区的范围大约为 500 m × 400 m，面积约 0.20 km²。

模型构建完成后，可以进行可视化演示和分析。通过虚拟现实技术，将构建好的模型呈现在屏幕上，可以方便用户对场景进行视觉化理解 and 空间分析，平台将实际场景的数据与模拟环境相结合，实现对场景的智能化管理和决策支持。平台以第一视角、第三视角对园区进行场景漫游，在第一视角下可对电梯、电灯等单体设备进行操作，对园区内的内部管线可视透明化；平台还接入了智能 AI 语音助手，对语音助手进行赋能，通过语音指令让 AI 完成对应操作，使工作更快捷、更自动化；实现园区全仿真气象环境模拟，高拟真复现物理环境效果，并支持与真实世界同步；实现园区内安防监控设备统一管理，对监控设备状态、位置等实时监测；实现园区内资产智能管理，对所有资产进行定位与价值信息显示。在第三视角下用户可以鸟瞰全局，了解园区的整体布局和各个区域的功能划分。同时，平台可以对园区内的各种数据进行分析，使用户可以获得更全面的数据分析结果，为决策提供有力支持。

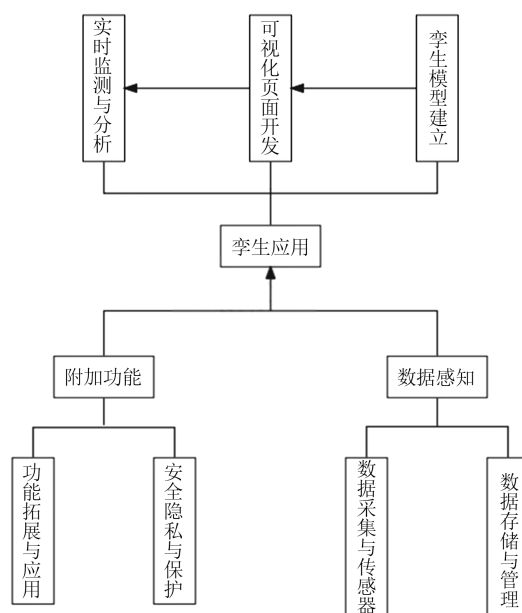


Figure 5. Architecture of digital twin visualization surveying and mapping platform

图 5. 数字孪生可视化测绘平台架构

4. 结语

数字孪生城市的构建正驱动测绘技术体系向全域感知、全息建模、全时响应的方向深度演进。新型测绘通过空天地井一体化感知网络的异构集成,实现城市地表形态、地下管网、建筑 BIM 参数等要素的亚厘米级精度动态捕获,结合多模态时空数据库构建全息地理实体编码体系,形成“从宏观城市肌理到微观构件属性”的语义化数字镜像。这种“物理空间-数字空间”的精准映射能力,使城市管理者可通过三维语义场景解析引擎,实时透视交通流态、能源管网压力分布等隐性城市体征,并通过数字线程(Digital Thread)技术实现规划方案的多维度冲突检测与灾害场景的智能推演,构建“数据驱动-模型验证-决策优化”的闭环治理范式[10]。

面向未来,亟需建立涵盖数据标准、算力算法、安全体系的测绘技术生态链:通过区块链增强多源异构数据的确权与可信流通,依托联邦学习构建跨域数据融合计算框架,结合时空知识图谱实现城市治理规则的数字化表达。唯有构建“感知-认知-预知”递进式的新型测绘技术体系,方能突破传统空间信息服务的维度局限,为数字孪生城市注入动态进化能力,推动城市治理迈入虚实共生、全局寻优的智能新阶段。

参考文献

- [1] 周长江, 杜洪涛, 李欣, 等. 车载移动测量系统在智慧城市建设中的应用研究[J]. 城市勘测, 2023(2): 80-84.
- [2] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告(2018 年) [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2018.
- [3] 顾建祥, 杨必胜, 董震. 智能化全息测绘及示范应用[J]. 城市勘测, 2019(3): 10-14.
- [4] 李德仁, 刘立坤, 邵振峰. 集成倾斜航空摄影测量和地面移动测量技术的城市环境监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(4): 427-435+443.
- [5] Xu, J., Zhang, S., Jing, H., Hancock, C., Qiao, P., Shen, N., *et al.* (2024) Improving Real-Scene 3D Model Quality of Unmanned Aerial Vehicle Oblique-Photogrammetry with a Ground Camera. *Remote Sensing*, **16**, Article No. 3933. <https://doi.org/10.3390/rs16213933>
- [6] 王琳, 郭功举, 刘一宁. 面向智慧城市建设的地理实体构建方法[J]. 测绘通报, 2022(2): 20-24.
- [7] 刘斌, 张军, 鲁敏, 等. 激光雷达应用技术研究进展[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 117-122.
- [8] Wang, L., Mačak, M.B., Stanič, S., Patruno, L., Dong, W. and Chen, D. (2025) Orography-Induced Atmospheric Small-Scale Waves during Bora Using Lidar Observations and Numerical Simulations. *Geophysical Research Letters*, **52**, e2024GL112400. <https://doi.org/10.1029/2024gl112400>
- [9] 饶俊清, 汪琳. 数字孪生可视化测绘平台在智慧城市建设中的应用[J]. 经纬天地, 2024(1): 97-100.
- [10] Ghosh, S., Hughes, M., Hughes, P. and Hodgkinson, I. (2025) Digital Twin, Digital Thread, and Digital Mindset in Enabling Digital Transformation: A Socio-Technical Systems Perspective. *Technovation*, **144**, Article ID: 103240. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2025.103240>