引文格式：陈锡创,梁铭,盛兆阳. 全国产技术栈城市级高斯重建与智能交互应用[J]. 地理空间信息, 2026, 24(6):93-98. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.06.017

全国产技术栈城市级高斯重建与智能交互应用

——以深圳市龙华区为实例

陈锡创[1]，梁　铭[1*]，盛兆阳[2]
（1. 深圳数生科技有限公司，广东 深圳　518000；2. 武汉大学 资源与环境科学学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：针对城市数字孪生依赖国外技术的安全与交互问题，构建了基于全国产技术栈的城市智能孪生系统。以自主可控SS Engine为底座，融合华为昇腾AI与鸿蒙系统，实现100%代码自主率；基于昇腾CANN重构3D高斯泼溅算法，支持8卡分布式联动；构建大语言模型语义交互引擎。以深圳龙华区176 km²为例进行验证，实现二维3 000并发、实景三维1 000并发，在城市管理与应急响应中成效显著，具备规模化应用能力。

关键词：数字孪生；全国产技术栈；高斯泼溅；昇腾算力；智能交互
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）06-0093-06

City-level Gaussian Reconstruction and Intelligent Interaction Application with Fully Domestic Technology Stack: A Case Study of Longhua District, Shenzhen City, Guangdong Province, China

CHEN Xichuang[1], LIANG Ming[1], SHENG Zhaoyang[2]
(1. Shenzhen Shusheng Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;
2. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: To address the critical challenges of industrial chain security risks, data security vulnerabilities, and high interaction barriers caused by long-term dependence on foreign technologies in urban digital twin construction, we proposed and implemented an urban intelligent twin system based on fully domestic technology stack. Taking the self-controllable SS Engine as the technical foundation and deeply integrating Huawei Ascend AI computing power with the HarmonyOS ecosystem, we establish an integrated three-in-one technical framework, achieving 100% autonomous code ownership. To overcome bottlenecks in 3D reconstruction efficiency, we reconstructed core operators of 3D Gaussian splatting algorithm, enabling distributed collaborative production across eight Ascend NPUs on a single server. For intelligent interaction, we developed a semantic interaction engine powered by large language models. Taking the 176 km² entirety of Longhua District, Shenzhen City as a validation case, the system completed full-process technical verification spanning data acquisition, algorithm deployment, engine adaptation, and interactive integration, demonstrating stable support for 3 000 concurrent 2D data streams and 1 000 concurrent 3D real scene data streams. The system has achieved significant results in urban refined management and intelligent emergency response scenarios.

Key words: digital twin, fully domestic technology stack, Gaussian splatting, Ascend computing power, intelligent interaction

随着“数字中国”战略的深入推进，城市信息模型（city information model，CIM）平台已成为智慧城市建设的重要基础设施[1]，在城市规划、精细化治理以及应急响应等领域发挥着日益重要的作用[2-4]。然而，当前我国城市数字孪生平台的建设在核心技术体系、生产效率以及交互方式等方面仍存在诸多制约因素，主要表现为底层技术依赖、三维生产效率不足以及人机交互门槛较高等问题[5-13]。针对以上问题，本文提出一种基于全国产技术栈的城市智能孪生系统。该系统以自主可控渲染引擎SS Engine（数生引擎）为核心技术底座，实现了在“鸿蒙+昇腾”双生态环境下的城市级原生适配；通过重构适配国产算力平台的3DGS算法框架，将实景三维重建效率提升至小时级更新；结合大语言模型与智能体技术构建语义驱动的人机交互机制，实现从“自然语言描述”到“三维空间操作”的智能化转换。并以深圳市龙华区为应用验证区域，对系统在国产化适配、快速三维重建以及空间智能决策支持方面的实际效果进行了验证。

第一作者简介：陈锡创（1976—），本科，从事自主三维渲染引擎研发工作，E-mail: setrunk@163.com。
通信作者：梁铭（1984—），本科，从事城市实景三维、数字孪生技术研发与应用工作，E-mail: 975564414@qq.com。

1 系统总体设计

1.1 设计理念

系统以国产芯片与操作系统为底座，通过指令集与渲染算子深度适配实现软硬件协同优化，构建自主可控技术闭环；针对3DGS等高算力需求，设计“边缘采集—中心训练—全端渲染”分布式存算架构，依托CANN算子重构提升异构算力效率；顶层引入AI Agent控制层，将功能驱动架构升级为语义意图驱动的智能架构，支持自然语言解析与执行复杂城市治理任务，降低使用门槛并提升智能化决策能力。

1.2 系统逻辑架构

系统采用“五层两翼”架构，覆盖了从物理感知到智能决策的全过程（见图1）。

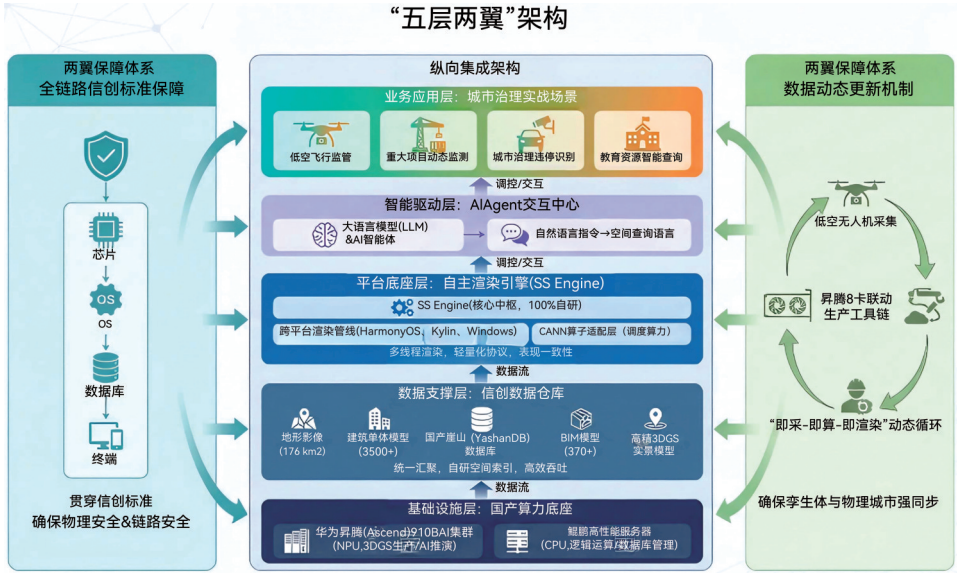


图1 系统总体架构（深圳实例）

1.2.1 功能分层

1）基础设施层（L0）。该层以华为昇腾AI集群与鲲鹏服务器构成统一算力池，其中昇腾NPU主要承担3DGS模型训练与AI推理任务，鲲鹏CPU则负责系统逻辑运算以及时空数据库管理，从而形成面向数字孪生应用的异构算力协同架构。

2）数据支撑层（L1）。该层基于国产崖山数据库（YashanDB）构建统一数据管理平台，存储覆盖全域176 km^{2}范围的地形影像数据、3 500栋建筑单体模型、370个BIM模型以及3DGS实景模型等多类型数据资源。同时，通过自研空间索引协议提升信创环境下的大规模空间数据访问效率，实现高并发数据吞吐与快速空间查询能力。

3）平台底座层（L2）。该引擎包含约26万行完全自主开发代码，构建了面向城市数字孪生场景的高性能渲染框架。

4）智能驱动层（L3）。该层通过集成大语言模型（LLM）与模型上下文协议（model context protocol，MCP）接口，将用户自然语言指令解析为结构化空间查询语言和引擎控制指令，从而实现业务应用与底层渲染引擎之间的语义桥接，显著降低系统使用门槛。

5）在顶层应用层（L4）。系统面向深圳市龙华区构建多维城市治理应用场景，通过将数字孪生平台与实际治理需求深度融合，形成数字孪生驱动的城市治理应用矩阵。

1.2.2 “两翼”保障体系

为确保城市智能孪生系统在安全性与持续更新能力方面的稳定运行，本文构建了由信创标准体系与数据动态更新机制组成的“两翼”保障体系，从技术规范与数据生产2个方面为系统运行提供支撑。

在系统安全保障方面，构建覆盖全链路的信息技术应用创新（信创）标准体系，实现从底层芯片、操作系统、数据库到终端设备的统一技术规范与安全适配。在数据更新保障方面，系统构建面向城市数字孪生的数据动态更新机制。依托低空无人机数据采集体系获取高频实景数据，并结合基于昇腾算力平台的8卡联动生产工具链，实现三维重建、模型更新与渲染发布的一体化处理流程，从而形成“即采—即算—即渲染”的数据动态循环，进而保持与物理城市之间的高时效同步关系。

2　关键技术

2.1　高性能渲染引擎架构

研究团队自主研发的SS Engine三维渲染引擎采用四层架构设计（图2），从底层硬件抽象到上层应用服务实现全程自主可控：

1）硬件抽象层（HAL）：封装昇腾/鲲鹏等国产芯片异构计算能力，提供统一GPU/CPU/DSP调度接口，屏蔽底层硬件差异。针对鸿蒙系统的分布式软总线特性，重构了GPU驱动调度模块，实现跨设备渲染任务分发。

2）渲染核心层：基于Vulkan/OpenGL现代图形API实现跨平台渲染管线，支持PBR物理渲染、延迟渲染[14]。针对国产GPU架构特性，优化了渲染状态机管理，减少驱动开销。

3）数据管理层：构建多源异构时空数据统一调度框架，支持倾斜摄影、BIM、点云、高斯泼溅、IoT实时流等多类型数据融合。

4）应用服务层：提供场景编辑、空间分析、可视化展示能力，通过MCP接口暴露相机控制、图层管理、属性查询等API供上层智能体调用。

在龙华区实践中，基于SS Engine、崖山数据库、华为鲲鹏架构等全自主可控技术体系，构建了全域全信创数字孪生平台。在国产信创环境下具备轻量化与高并发渲染能力，场景渲染的逼真度达到游戏引擎级别，如图3所示。



图2　SS Engine技术架构（深圳实例）

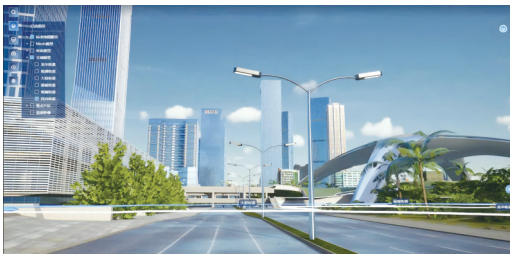


图3　龙华区全域全信创数字孪生平台（深圳实例）

2.2　适配国产算力的3DGS算法重构

3DGS技术是实现实景快速重建的关键。原生3DGS基于英伟达CUDA生态开发，其线程束调度、共享内存机制与昇腾NPU的达芬奇架构存在本质差异。本研究基于华为CANN架构进行算子级重构。

2.2.1　昇腾CANN算子重构机制。

昇腾处理器基于达芬奇架构，内部集成矩阵计算单元与向量计算单元，并通过CANN软件栈实现异构算力的统一抽象与调度[15]。CANN提供ACL（ascend computing language）接口用于算子级开发。然而，原生3DGS算法基于CUDA线程块模型与Tile-based光栅化策略，其计算组织方式与昇腾架构在并行调度和内存访问模式上存在明显差异，因此直接迁移无法运行。

针对上述问题，本文基于CANN底层接口对3DGS的关键计算流程进行了算子级重构，共开发16个核心算子，覆盖空间组织、光栅化渲染、反向传播及显存管理等计算阶段。

在空间组织阶段，优化Morton编码与基数排序适配昇腾HBM顺序访问特性；在光栅化渲染阶段，将高斯球投影计算映射至张量Tensor进行矢量化计算，结合Tile分块策略降低显存访问开销；在反向传播阶

段，对梯度计算进行解耦并引入动态损失缩放机制；在显存管理方面，引入动态瓦片划分与显存池化机制，减少频繁分配开销。

通过上述16个核心算子的全栈重构，本研究实现了3DGS算法在昇腾平台上的完整适配。图4展示了基于优化后算子库在深圳某城市场景的重建效果，该场景包含高层建筑群、在建工地、城市绿化等复杂要素，重建结果在建筑立面细节、玻璃幕墙反射、植被纹理等方面均达到高保真还原，验证了算子重构方案的有效性。



图4 基于昇腾生态的高斯建模效果（深圳实例）

2.2.2 分布式多卡协同机制

为进一步突破工程应用极限，系统实现了单台昇腾服务器8张算力卡的协同联动。由于原生3DGS算法依赖CUDA专有算子，无法直接在昇腾平台运行，本研究的优化效果通过与CUDA原生方案的跨平台对比来验证。

通过重构分布式训练梯度同步策略，采用基于环形通信的梯度聚合机制，将通信量均摊至各节点，消除单点瓶颈，解决了多卡环境下的负载均衡问题，实现了单台昇腾服务器8张算力卡的高效协同生产。

2.3 语义驱动的智能交互范式

2.3.1 智能交互引擎设计

为提升交互效率并降低使用复杂度，本文构建了语义驱动的智能交互引擎，实现从“手动操作”向“自然语言驱动”的交互模式转变，其核心是“自然语言”到“三维操作”的语义映射机制。

在语义理解阶段，系统集成大语言模型（large language model，LLM），对用户输入的自然语言进行解析，并提取操作类型、查询对象、空间范围及可视化方式等关键信息，从而生成结构化操作意图。在意图映射阶段，系统通过意图—API映射机制将结构化操作意图转换为可执行的引擎调用序列。该模块基于检索增强生成技术构建空间操作知识库，并通过向量检索匹配最相关的API组合。在执行与反馈阶段，系统调用底层引擎API完成操作，并将执行结果以可视化或文本形式反馈给用户，从而形成完整的人机交互闭环。

2.3.2 从功能驱动到意图驱动的交互方式转变

语义驱动的智能交互模式为数字孪生平台带来了新的应用方式[16-17]。传统数字孪生平台的交互方式依赖于多层菜单和工具栏，用户需要熟悉软件操作逻辑才能完成任务。本研究基于模型上下文协议（model context protocol，MCP）构建语义驱动的智能交互架构，将渲染引擎能力封装为遵循MCP规范的原子工具，通过大模型驱动工具编排与调用。

1）基于MCP规范的原子工具封装设计。系统在渲染引擎应用服务层暴露标准化的MCP服务端接口，将三维场景操作能力封装为标准化原子工具，涵盖相机控制、图层管理、空间分析、标记绘制与数据加载等，每类工具均规范描述函数签名与参数约束，以便于大模型准确理解函数用途并生成符合约束的调用参数。

2）智能体任务解析与编排机制。基于自研SSA-gent智能体框架，系统实现了“意图理解、任务分解、工具调用、结果合成”的完整闭环。当用户输入自然语言指令，系统依次经历意图识别、任务分解、工具调用与结果反馈四阶段，详见表1。

表1 SSAgent智能体任务执行流程（以“圈出花坛往南的学校”为例）

阶段	操作内容	关键输出
Step 1 意图识别	大模型解析用户自然语言指令，提取操作类型、空间范围、目标要素等结构化信息	意图标签：空间分析+可视化标记
Step 2 任务分解	将复合指令拆解为有序原子任务：①定位地物实体→②生成扇形查询区域→③筛选目标POI→④绘制空间标记	原子任务序列
Step 3 工具调用	智能体依逻辑依赖关系有序调用MCP工具接口：SpatialQuery.queryByName→ createSector→ intersect→ Annotation.addPolygon → addMarkers	空间分析结果+标注图层
Step 4 结果反馈	执行结果以可视化形式返回，同步驱动三维场景完成相机视角定位与图层渲染更新	三维场景更新

3）跨模态交互能力。系统支持“文本指令+语音输入”的多模态融合交互入口。用户通过语音下达“显示龙华区无证培训机构以及大浪街道有证办学、教育基地、无证办学机构”，系统能够自动解析区域范围与业务图层语义，完成多源数据查询、差异化的时空范围过滤、结果分类渲染及动态图例生成。相较于传统图形界面操作，该流程可减少约15步菜单点击与参数配置操作。

对于更复杂的分析型指令（如“对比分析地铁站周边500 m内电动车违规停放与周边商业密度的相关性”），智能体能够自主分解任务依赖关系，通过串

联调用数据加载、多级空间缓冲区分析、叠加统计计算与专题图渲染等多个 MCP 工具，完成从原始数据到可视化结论的全流程自动化生成。

3　应用实例

3.1　深圳龙华区全域信创数字孪生实践

深圳市龙华区作为全国首个鸿蒙+昇腾双生态城市级数字孪生试点，其核心任务是在全信创环境下，实现超大规模城市空间的精准呈现与智能治理。平台依托国产底座完成了对龙华全域 176 km^2 的数字底座构建，如图5所示。



图5　龙华“鸿蒙+昇腾”双生态数字孪生城市平台（深圳实例）

3.2　验证结果与分析

为验证系统的国产化支撑能力、三维重建效率以及智能交互性能，本文从系统性能、重建效率与用户交互3个方面进行了实验评估。

在国产技术栈支撑能力方面，经深圳市信息安全测评中心压力测试表明，系统在二维矢量与栅格数据场景下可支持3 000并发访问，在实景三维数据场景下支持1 000并发访问，渲染帧率稳定保持在30 FPS以上。同时，系统通过工信部电子五所信创测评，代码自主率达到100%。在稳定性测试中，系统连续运行720 h未出现内存泄漏问题，渲染线程CPU占用率始终保持在45%以下，表明系统在国产软硬件环境下具有良好的稳定性与运行效率。

在三维重建效率方面，选取深圳市龙华区商业区、住宅区和产业园区3个典型场景开展对比实验。针对约 1 km^2 复杂城市场景（约 1 000 张采集照片、389万高斯点），基于CANN算子重构后的单张昇腾耗时约 156 min，完成了从不可运行到生产可用的跨越，验证了国产NPU在三维重建领域的工程可行性；在8卡协同方案下，耗时缩短至41 min，加速比达3.8倍。跨三类典型场景的均值测试表明，8卡方案平均重建耗时约 50 min/km^2，相较于传统倾斜摄影建模（约40 h/km^2）效率提升约58倍。

在重建质量方面，峰值信噪比（PSNR）达28.3 dB，与CUDA原生方案持平。如图6所示，昇腾平台重建结果（图6b）与CUDA原生方案（图6a）在建筑细节、纹理清晰度与光照一致性等方面高度一致，证明了CANN算子重构的正确性与有效性。与传统倾斜摄影相比，3DGS在视觉真实感与渲染效果方面更优，但几何精度略低，更适用于动态监测与高频更新场景，传统倾斜摄影则更适合高精度测绘需求。



a CUDA原生方案　　b 昇腾优化方案

图6　高斯重建效果对比（深圳实例）

在智能交互效能方面，本文邀请20名无GIS背景的非专业用户完成三项典型任务，包括查找指定区域教育资源、测量2个地标之间的距离以及统计某区域建筑数量。实验将语义交互模式（自然语言输入）与传统GUI操作模式进行对比。结果显示，采用语义交互的实验组平均任务完成时间缩短62%，错误率降低47%，用户满意度评分提升1.8分（5分制）。用户实验结果表明，语义交互在涉及多步骤操作的复杂任务中优势更加明显，能够显著提升数字孪生平台的使用效率与用户体验。

3.3　典型应用场景

深圳市龙华区共有21个地铁站，地铁站出口周边电动车违规停放问题长期困扰城市管理部门，传统人工巡查模式存在发现滞后、定位不准、执法效率低等问题。本研究依托全国产技术栈数字孪生平台，将3DGS快速建模能力与AI智能识别技术深度融合，构建了实景采集—模型更新—智能识别—闭环治理的全流程数字化支撑体系。

在实景建模效率方面，系统对龙华区地铁站及重点区域实现了3 d一个周期的快速更新，截至2026年2月累计完成高斯建模472批次，模型加载时间小于3 s，空间测量平面误差小于0.5 m。相较于传统倾斜摄影数周的建模周期，更新效率大幅提升，满足了高频治理场景的实景基底需求。

在违停检测精度方面，基于3DGS多视角渲染图像的AI目标检测与三维反投影定位，违停车辆地理坐标定位误差控制在1 m以内，检测结果自动生成空间标注并推送至执法人员移动终端，实现从发现到派单的自动化闭环。

在智能交互效率方面，管理人员通过自然语言指令可在约8 s内获得完整可视化结果，对比传统GUI操作所需的约5 min与十余步菜单点击，效率提升显著；复杂分析报告（含空间统计、对比图表与趋势分析）的自动生成耗时约30 s。

该方案已完成在龙华区城管局的实际部署，累计规范挪移电动自行车17.8万辆，形成市容共治业务闭环。应用结果表明，3DGS快速更新、AI智能识别与语义驱动交互三项能力协同发挥作用，构成数据—模型—智能的完整闭环，为城市精细化管理提供了可复制、可推广的数字化支撑路径。

4 结语与展望

本文面向城市数字孪生自主可控建设需求，构建了基于全国产技术栈的城市智能孪生系统，并以深圳市龙华区为应用场景完成了从底层算力适配到智能交互的全链路技术验证。研究表明，自主研发的SS Engine渲染引擎能够在鸿蒙、麒麟等国产操作系统环境下稳定运行，验证了国产技术栈支撑城市级数字孪生平台部署的可行性。

未来，随着“人工智能+”战略的推进，基于国产技术栈的数字孪生体系将进一步向空间智能方向发展。同时，推动SS Engine部分核心模块开放共享，构建国产数字孪生开发者生态，将有助于提升我国地理信息技术体系的自主创新能力。

参考文献

[1] Shariatpour F, Behzadfar M, Zareei F. Urban 3D Modeling as a Precursor of City Information Modeling and Digital Twin for Smart City Era:A Case Study of the Narmak Neighborhood of Tehran City, Iran[J]. Journal of Urban Planning and Development,2024,150(2):19

[2] Deng T, Zhang K, Shen Z. A Systematic Review of a Digital Twin City:A New Pattern of Urban Governance Toward Smart Cities[J]. Journal of Management Science and Engineering,2021,6(2):125-141

[3] Xu Z, Coors V. Combining System Dynamics Model, GIS and 3D Visualization in Sustainability Assessment of Urban Residential Development[J]. Building & Environment, 2012,47(1):272-287

[4] Batty M. Digital Twins[J]. Environment and Planning B:Urban Analytics and City Science,2018,45(5):817-820

[5] Biljecki F, Ledoux H, Stoter J. An Improved LOD Specification for 3D Building Models[J]. Computers Environment and Urban Systems,2016,59:25-37

[6] Kolbe T H, Gröger G, Plümer L. City GML:Interoperable Access to 3D City Models[M].Van Oosterom P, Zlatanova S, Fendel E M. Geo-information for Disaster Management Berlin:Springer,2005:883-899

[7] Musialski P, Wonka P, Aliaga D G, et al. A Survey of Urban Reconstruction[J]. Computer Graphics Forum,2013,32(6): 146-177

[8] 章超权,黄宝玉,毛波. 三维城市模型快速可视化技术研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(12):9

[9] 单杰,李志鑫,张文元. 大规模三维城市建模进展[J]. 测绘学报,2019,48(12):19

[10] Kerbl B, Kopanas G, Leimkuehler T, et al. 3D Gaussian Splatting for Real-time Radiance Field Rendering[J]. ACM Transactions on Graphics,2023,42(4):14

[11] Tancik M, Casser V, Yan X, et al. Block-NeRF:Scalable Large Scene Neural View Synthesis[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). New Orleans:IEEE,2022:8248-8258

[12] Xiong H, Zhuge Y, Zhu J, et al. 3UR-LLM:An End-to-End Multimodal Large Language Model for 3D Scene Understanding[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2025, 27: 2899-2911

[13] Liang J, Hou S, Jiao H, et al. GeoGraph RAG:A Graph-based Retrieval-augmented Generation Approach for Empowering Large Language Models in Automated Geospatial Modeling[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2025,142:104712

[14] 郑纬民,翟季冬,郭崎. 智能计算系统[M]. 北京:机械工业出版社,2020

[15] 陈云霁,陈天石,郭崎,等. 深度学习处理器架构、编程与实现[M]. 北京:科学出版社,2018

[16] Mai G, Huang W, Sun J, et al. On the Opportunities and Challenges of Foundation Models for Geospatial Artificial Intelligence[J]. ACM Transactions On Spatial Algorithms and Systems,2024,10(2):1-46

[17] Hong Y, Zhen H, Chen P, et al. 3D-LLM:Injecting the 3D World into Large Language Models[C]//Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). New Orleans:Curran Associates,2023,36:20482-20494