

关于 CG 技术与数字孪生在交通 BIM 中的应用研究

方凯龙¹ 李萱宇¹ 阚忠鹏¹ 方丹丹¹

FANG Kailong LI Xuanyu KAN Zhongpeng FANG Dandan

摘要

依托 G5 京昆高速广绵扩容工程 LJ7-1 合同段的工程量数据清单管理系统, 剖析研究 CG 技术 (computer graphics, CG) 在项目中的技术应用, 利用计算机图形 CG 技术解决 BIM 模型与 GIS 数据在可视化交互应用中遇到的轻量化的技术难题, 通过借鉴主流游戏制作流程完成对项目的 BIM 模型的轻量化处理, 使得 BI 模型可以脱离专业的 BIM 设计软件, 应用于各种各样的信息化系统、软件平台, 大大拓展了 BIM 技术的应用场景。完成三维虚拟环境搭建、UI 交互设计以及资源优化, 最后通过蓝图开发与数据管理平台的数据接口对接, 完成数据在虚拟环境中的实时反馈交互。

关键词

CG 技术; BIM 应用; 数字孪生; 三维可视化; BIM 模型轻量化; 计算机图形图像技术

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.09.008

0 引言

近几年, 制造业在全球产业链的影响力不断加强。要打造数字经济新优势, 就要充分发挥海量数据和丰富应用场景优势, 促进数字技术与实体经济深度融合, 赋能传统产业转型升级, 催生新产业、新业态、新模式, 壮大经济发展新引擎。针对工程 BIM 技术的发展, 我国出台了各项政策。在新一轮的智能制造浪潮中, 数字化转型将为我国制造业高质量发展提供坚实基础。游戏的实时渲染、物理模拟、虚拟交互等技术将助力工业数字孪生, 以“数实融合”助力我国制造业的数字化转型, 计算机图形图像处理技术为人们的信息获取与解读提供了良好的技术支撑^[1]。

1 项目概况

G5 京昆高速广绵扩容工程, 起止桩号 K48+436 ~ K55+052.7, 全长 6.616 7 km, 全段均位于广元市剑阁县境内, 主要结构物包括: 桥梁 3 座, 其中大桥 1 座, 特大桥 2 座; 普安互通 1 处; 隧道 2 座; 涵洞 12 座。项目主要工程数量: 路基挖方: $9.67 \times 10^5 \text{ m}^3$, 压实填方: $8.27 \times 10^5 \text{ m}^3$; 隧道挖方 $5.12 \times 10^5 \text{ m}^3$; 混凝土: $4.17 \times 10^5 \text{ m}^3$ (未包含 $3.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 喷射混凝土); 钢筋: $4.9 \times 10^4 \text{ t}$ (含隧道钢筋); 其它钢材: $1.2 \times 10^4 \text{ t}$; 预制 T 梁: 799 片; 涵洞 12 座。依据 BIM 模型、设计图纸等多源数据融合生成工程量清单, 将数据结构化储存于数据中心, 并搭建基于 BIM+GIS 数据管控的可视化系统。

2 技术实现

在以往, BIM 模型是通过专业的 GIS 类软件进行展示, 可是由于技术发展越来越快, 人们对三维可视化表达的手法和渲染视觉呈现要求越来越高, 计算机图形技术逐渐被大家看到, 图形技术是构建“数字环境”的重要基础。一个 BIM “数字环境”的建设过程涉及建模、渲染、交互等工作, 这些图形技术结合计算机数据分析, 将助力解决工程管理中遇到的难题。

2.1 BIM 模型的建立

吴绍明等人^[2]将 BIM 和 GIS 的三维可视化技术应用到高速公路数字沙盘。本项目将涉及的桥梁、隧道、互通等设计数据, 通过 Bentley BIM 软件进行精确模型建立。同时, 环境地形模型建立采用 GIS 数据 + 卫星影像的方法重构三维地形模型。最后通过 GIS 软件导出。

2.2 三维模型的修正和轻量化处理

BIM 模型轻量化处理, 由于 BIM 模型存在高多边形三角面和模型布线不标准的情况, 为了能更好地在接下来的应用中发挥更多的价值, 处理优化模型是必要的。将三维 BIM 模型根据需求以 obj、fbx 或者 IFC 格式导出, 导入 Autodesk^[3]公司的产品 3DSMAX 中。在 3DSMAX 中, 以游戏模型建模的要求, 对 BIM 模型进行重拓扑, 从而达到模型面数的降低和三维模型几何结构布线的规范。通过 3DSMAX 完成对三维模型的顶点数、边数、步数、个数的优化^[4]。路面模型优化前 (如图 1) 有 81 696 个三角面, 优化过后 (如图 2) 只有 528 个三角面, 节约性能约 90%。

1. 四川公路桥梁建设集团有限公司勘察设计分公司

四川成都 610000

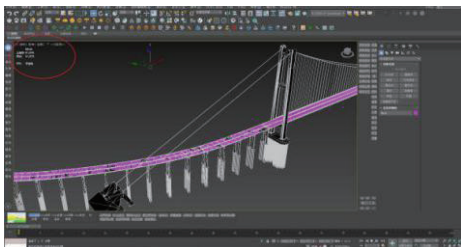


图1 模型优化

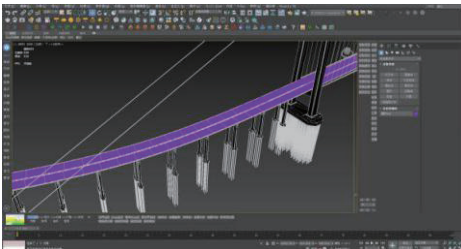


图2 模型优化后

2.3 分解模型 UV 绘制贴图

当把项目主体物路、桥、隧道的模型整理和优化完毕后，将进行 CG 游戏技术中的模型 UV 展平，这一步将影响模型贴图、材质与纹理的正确性^[5]。好的 UV 分解可以极大节约贴图大小，使模型用尽可能小的贴图清晰度表现所需要的视觉纹理效果。例如道路标线，目前大多数 BIM 模型解决标线的问题是通过 CAD 导入图纸后生成“体块”或“面片”模型放在路面的表面，这样的做法可以快速表现标线位置，但是并不符合实际，模型存在悬空在路面表面的效果，真实的标线也应该是油漆涂装在路面上，所以应该分解路面 UV 后绘制路面的标线，才可以节约一定的性能开销。图 3 就用实体模型制作标线，标线模型 13.65 万三角面，而图 4 中的模型则完全没有实体标线，通过拆分路面模型 UV 和一张 2048×204 清晰度的提前图来完成制作，节约模型性能开销。

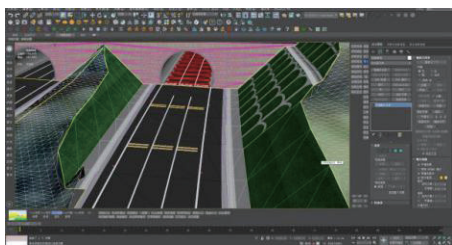


图3 模型路面及标线优化前

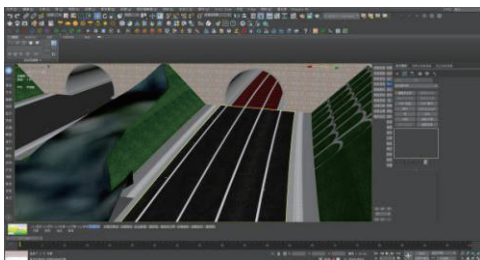


图4 模型路面及标线优化后

2.4 导入虚幻引擎前的项目设置

本项目选用 Epic 公司 Unreal Engine5 虚幻引擎^[6]作为开发的基础平台。将模型导入虚幻引擎前，需要根据项目的需求，简单为引擎进行项目设置。打开了引擎渲染项目的使用硬件光线追踪、打开支持硬件光线追踪、开启支持预烘焙距离场阴影贴图、打开生成网格体距离场等项目基础设置，为项目提供基础的设置环境。在后续制作中，兼顾视觉质量的同时尽可能最大优化整个系统。在项目设置中开启 Lumen 的渲染方式来作为整个项目的渲染模式。Lumen 可以在兼顾效果的同时做到实时渲染，目前它是 UE 中最好用的实时交互渲染方式，如图 5 所示。

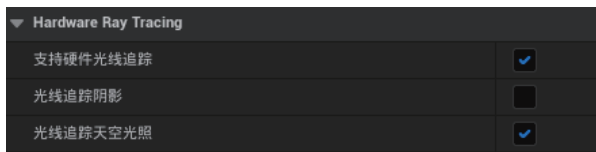


图5 引擎渲染设置

2.5 引擎中二次优化

将本文的模型从 BIM 软件或者 3DSMAX 中以 IFC 或 Datasmith 格式导入虚幻引擎后，针对硬件性能，对场景进行以下优化。

(1) 模型 LOD 设置：将模型设置为 Nanite 模型，让系统自动计算模型的 LOD 等级。这是虚幻引擎 5 的新功能，它是基于光线追踪的几何着色器，可以实现细节丰富、高效的大规模场景渲染。Nanite 的工作原理是将场景中的所有三角形分割成微小的片元，并将它们按照视线相关性进行排序和压缩，然后在 GPU 上进行光线追踪。这种方式可以处理高达数十亿个三角形，并且不需要任何预处理或缩放，因为 Nanite 会自动根据观察点的位置和方向进行适当的细节级别筛选。相比传统的渲染技术，如基于多边形的渲染，Nanite 可以更加精确地渲染场景中的每一个细节，而且 Nanite 是基于硬件加速的光线追踪，因此可以实现更高的渲染质量和更高的帧率，极大地节约模型需要在前期花大量时间优化的时间，通过引擎中对对象物体在屏幕中的占比大小来优化三维物体的三角面数量，从而提供更流畅的软件体验，如图 6 所示。

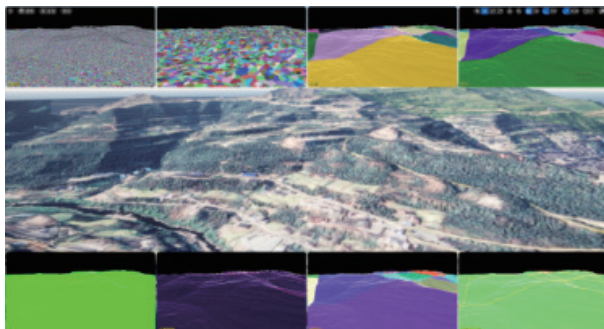


图6 Nanite 性能查看

(2) 贴图纹理优化设置：由于虚幻引擎在优化处理贴图纹理信息上面提供了虚拟纹理（virtual texturing）和 Mipmap 两种纹理处理方式，其中虚拟纹理的方式是通过将纹理数据分割为小块的 Tiles 并根据相机视角动态加载和更新来提供高质量的纹理细节，优势内存占用小，细节质量高，劣势是不适合静态纹理处理。相比静态纹理处理方面，Mipmap 就有很多优势，减少不必要的纹理采样和计算开销，提高了渲染性能，但是 Mipmap 也存在缺点，内存占用大、纹理失真是一个非常显著的问题，因此无论什么技术方式都存在两面性。在兼顾性能的同时尽可能将纹理处理到最优的状态，为此在材质蓝图中，本文针对此情况提出了关于高质量纹理和低质量纹理的切换方法，平衡了虚拟纹理和 Mipmap 的优缺点，如图 7 所示，从而达到技能优化内存且纹理不失真的效果。

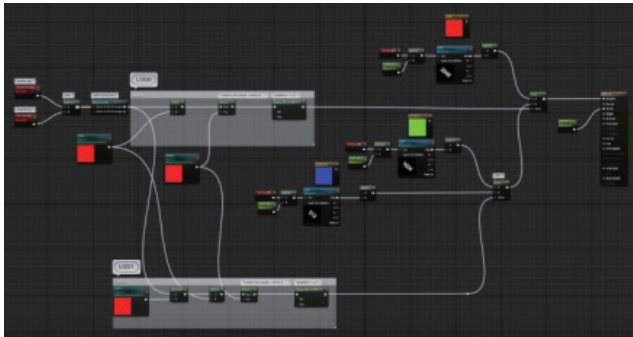


图 7 材质蓝图

把地形模型的贴图也设置成 LOD 等级，在虚幻材质球中进行材质蓝图的程序编写，使远离摄像头的地面纹理显示低分辨率贴图，把离摄像头特别近的设置为高分辨率贴图。贴图等级为 2048×2048、1024×1024、512×512。原理是对三种不同清晰度的贴图进行混合计算，通过在虚幻中将 camera position（相机位置）和 world position（绝对世界位置）相减后转换得到一个三维向量值，再将三维向量值通过除法和幂次方计算得到一个合理的数值，通过该数值去控制三种精度的贴图出现在虚拟世界中的位置，从而达到近处细节远处粗糙的效果，节约 GPU 的性能开销。

(3) 模型剔除设置：关于模型的剔除也是优化场景的关键，同样可以节约计算机对三维物体的渲染计算和内存释放。剔除距离体积（frustum culling）是一种优化技术，用于在渲染场景时排除不在相机视野内的物体。相机视锥体是一个以相机为原点的四棱锥形区域，只有位于这个区域内的物体才需要被渲染。遮蔽剔除（occlusion culling）是另外一种优化技术，用于检测在场景中被其他物体遮挡的物体，并且不对其进行渲染。这可以减少不可见物体的渲染开销。虚幻引擎提供了可视性和遮挡剔除两种剔除模型的方法，这些方法主要用于优化游戏性能，帮助开发者

优化 BIM 模型在场景中的显示数量，将有限的 GPU 性能发挥到可用的地方。每种方法都可以通过设置是否应绘制到屏幕上来减少三维空间中的可见 Actor 数量，从而达到优化性能的目的，图 8、图 9 分别为可视性剔除方法和遮挡剔除方法图示。

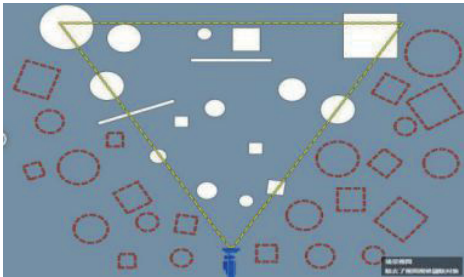


图 8 可视性剔除方法图示

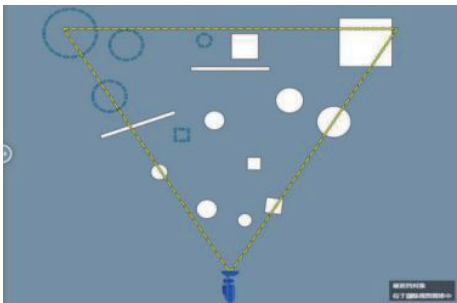


图 9 遮挡剔除方法图示

2.6 软件逻辑设计

在了解用户使用需求后，根据项目特点设计软件操作逻辑和功能开发。该软件主要以工程量清单管理作为主题，涉及功能主要包括视角功能、数据分析功能、清单管理功能与进度计划功能。其中，核心功能为数据分析和清单管理功能，内嵌包含项目介绍、变更统计情况、材料数量统计、动态成本偏差、项目计划、构建统计与构建树功能，图 10 为软件运行逻辑图。

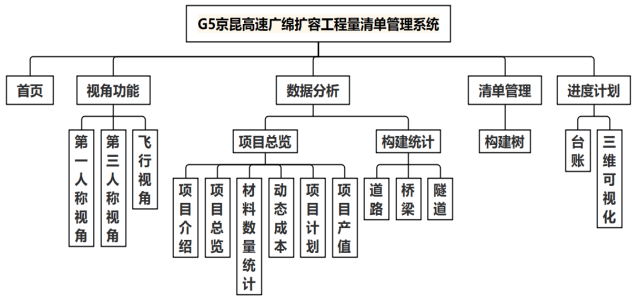


图 10 软件运行逻辑图

3 CG 技术在 BIM 应用中的优势分析

3.1 数字孪生模型框架

CG 技术及 Computer Graphic 计算图形，目前被大量运用在电影、游戏中。由于近几年工程 BIM 应用需求的不断提

高,数字孪生^[7-10]的技术概念被逐渐扩张应用,对三维可视化不仅仅局限在传统的设计软件中,而是更多的需求体现在现实物理空间与虚拟空间的一种数据感知和交互(如图11所示),从而达到物理空间的实例与虚拟空间三维对象的数据平行。数字孪生的概念最早出现于2011年,在2017年有学者提出数字孪生五维模型,对传统三维模型增加数据与服务两个新的维度。

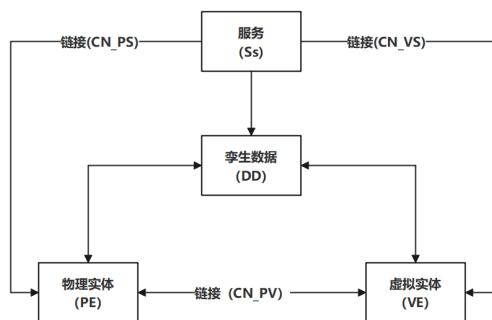


图 11 数字孪生概念框架

3.2 游戏引擎的优势

目前搭建数字孪生平台的技术主要有两大类型。第一类是基于GIS引擎开发和游戏引擎开发两种方式,由于GIS引擎对计算机图形处理能力的底层逻辑导致从视觉感官和交互体验开发的开放程度没有游戏引擎好,游戏引擎更加注重三维虚拟的仿真性,对计算机图形的利用程度更加成熟和深刻,因此更多的BIM应用选择了游戏行业的相关引擎作为底层平台来进行数字孪生开发。该技术路线运用了成熟的游戏技术,核心优势体现在强大的物理引擎渲染上,可以在优化BIM模型体量太大导致的硬件性能损耗的同时保持对三维空间物体视觉上的真实还原。不仅如此,通过游戏引擎可以更好地对三维空间进行交互功能开发、蓝图设计、数据分析、通信等。自带光线追踪技术、AI行为树、物理碰撞系统、Nanite、Lumen动态全局光照等技术,为用户呈现高品质的光线和材质模拟。同时,不管是扫描数据模型还是BIM数据模型,都无须再考虑多边形数量预算、多边形内存预算或绘制次数预算,节约了开发时间。程序语言逻辑方面以C++为底层的开发语言能让开发者更灵活地针对项目进行更为深度的功能开发、管线管理、内存分配等,同时强大的蓝图程序功能也可以为初级开发人员提供更快速入门的开发方式,提高生产效率。

4 总结与展望

G5京昆高速广绵扩容工程量清单管理系统融合参数化建模、GIS技术、游戏引擎技术和计算机图形技术等技术搭建的数字孪生平台,充分实现了BIM模型在实际应用中落地,

提升了用户对三维虚拟世界的视觉感官体验,同时通过底层语言的开发开放性,能更好地对数据模型进行数据收集、储存、筛选、数据分析、查询和结论支撑等功能应用开发,大大节约了开发时间,提升了用户体验,提升了综合管理服务能力,有效支撑了项目发展和决策。

参考文献:

- [1] 程学军,王鸿飞.计算机图形图像处理技术在视觉传达系统中的应用研究[J].自动化应用,2023,64(5):158-160.
- [2] 吴绍明,冯远鹏,闫怡雯,等.基于BIM+GIS的高速公路数字沙盘研究及应用[J].公路工程,2023,48(2):73-80.
- [3] 许利彤,开祥成,崔言继,等.基于Autodesk平台的山区隧道BIM应用研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(2):267-275.
- [4] 黄静,张红忠.3DSMAX在虚拟现实中的应用[J].测绘与空间地理信息,2013,36(2):124-126.
- [5] 杨一.公路工程BIM设计与游戏引擎可视化交互应用研究:以汶川至马尔康高速公路汶川枢纽互通式立交BIM咨询服务项目为例[J].四川水泥,2021(10):207-208.
- [6] 张明,郭亮,张蜀军,等.耦合GIS和游戏引擎的数字孪生系统构建与实现[J].地理空间信息,2022,20(5):116-120+153.
- [7] 张栋樑,王永志,廖少明,等.土木工程数字孪生建造技术研究进展[J].施工技术(中英文),2023,52(5):1-12.
- [8] 伍朝辉,刘振正,石可,等.交通场景数字孪生构建与虚实融合应用研究[J].系统仿真学报,2021,33(2):295-305.
- [9] 张枫,刘羽,陈文钊.数字孪生技术在交通运输体系建设中的应用[J].中国交通信息化,2022(S1):426-428.
- [10] 赵光辉,张琦,金波.元宇宙背景下的数字交通新模式[J].物流技术,2023,42(3):10-14+21.

【作者简介】

方凯龙(1990—),男,藏族,四川成都人,本科,三级游戏动漫师,研究方向:计算机图形学与BIM应用研发。

李莹宇(1990—),通信作者(email:583331654@qq.com),男,四川资中人,本科,工程师,研究方向:软件开发。

阚忠鹏(1999—),男,辽宁绥中人,本科,研究方向:UI、动画、游戏设计。

方丹丹(1993—),女,四川眉山人,专科,研究方向:交通技术资料档案管理。

(收稿日期:2024-05-28)