

顾及用户体验的三维城市模型自适应组织方法

吴 晨¹ 朱 庆^{1,2} 张叶廷¹ 许伟平¹ 谢 潇¹ 周 艳³

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,611756

3 电子科技大学资源与环境学院,四川 成都,611756

摘 要:传统基于“图层-对象”的组织方法,没有考虑三维城市模型的不同内容以及不同细节层次的粒度差异,导致在网络环境下的传输效率低,难以满足多用户并发访问的流畅可视化。深入分析了大范围漫游与小范围聚焦的用户体验特点,通过元数据统筹管理和对象离散化,即时响应用户请求,减少无效数据传输,保证了多用户并发环境下的高效调度和浏览。针对模型 LoD 和分解的对象,设计了结构统一的对象 ID,隐式存储关联关系并支持分布式模型存储管理。以分布式数据库 MongoDB 为平台进行实验,验证了本文方法的可行性和有效性。

关键词:复杂三维城市模型;用户体验;实时可视化;分布式数据组织

中图法分类号:P208

文献标志码:A

高效流畅的三维可视化是三维 GIS 的基本功能。面对成千上万且日益增长的访问用户,网络环境下数据服务器有限的性能和网络带宽与多细节层次三维模型传输之间的矛盾日趋严重。

随着网络地图从简单二维矢量向复杂三维模型发展,大规模复杂三维城市模型的存储与管理方法成为近期研究的焦点。现有的数据组织方法只是针对“图层-对象”一级数据的组织与管理^[1],没有充分考虑不同类型数据以及不同细节层次下表达粒度的不一致问题,导致数据调度粒度差异大,传输效率低^[2]。模型栅格化虽然平衡了调度粒度,却割裂了三维城市模型的完整性。为此,本文通过分析用户体验的特点,提出了顾及用户体验的复杂三维城市模型数据自适应组织方法。

1 用户体验与数据组织

用户体验是一种来自用户和人机界面交互过程的主观心理感受,UI 设计的人性化、操作的流畅性、反馈的即时性等都是决定用户体验质量优劣的关键因素。三维模型数据作为三维可视化的基础,其数据组织的优劣在一定程度上决定了用户体验的好坏。尤其在网络环境下,面对海量并

发用户,如何在带宽、I/O 吞吐等硬件条件有限的情况下,保证三维场景浏览的流畅性,成为数据组织亟需解决的问题。本文从用户体验的用户操作特点和视觉感知特点两方面组织数据,实现了海量三维城市模型数据的自适应可视化。

1.1 用户操作特点与元数据组织

用户三维可视化交互操作的最大特点是大范围漫游和小范围聚焦的无缝过渡^[3]。在定位到目标范围之前,用户的浏览操作存在许多无目的的拖放和漫游,会产生大量无效的数据调度,占用了大量网络带宽和内存资源,极大地延迟了目标对象的可视化表现。

针对上述用户交互操作体验机理,海量三维模型数据组织必须满足从宏观粗略模型到微观精细模型的快速检索。因此,将模型分割为索引元数据和实体数据。不同 LoD 模型提炼出同一个索引元数据。索引元数据通过内在关联关系映射关联到不同 LoD 的实体模型。将索引元数据按照地形的格网划分打包存储^[4],可有效地减少传输次数,便于地形和模型的同步调用。将小数据量的低精程度模型和元数据打包存储,通过低精细模型的快速传输和绘制,可提高用户的请求响应速度,减少用户的心理等待时间,为精细模型

收稿日期:2013-07-08

项目来源:国家 973 计划资助项目(2011CB302306);国家自然科学基金资助项目(41471332,41261086)。

第一作者:吴晨,博士生,主要从事三维 GIS 数据组织管理研究。E-mail: wuchen@whu.edu.cn

通讯作者:张叶廷,博士,副教授。E-mail: zhangyeting@263.net

的调度和可视化提供足够的缓冲时间。

1.2 用户视觉感知特点与对象离散存取

用户对视觉变量几何轮廓和纹理细节具有不同的认知权重。对城市空间结构和目标轮廓以及不同地物之间的空间关系进行识别、记忆并能够应用,快速生成认知地图(cognition map),符合人类空间认知的层次性,其核心是目标识别与空间关系判断^[5]。当用户浏览城市市场景时,首先是对城市整体布局的了解,包括道路的走向和房屋的位置等。当聚焦到某一个物体时,首先对其整体轮廓的识别,即外围的几何和拓扑,包括形状、尺寸、方向和空间关系等,然后关注更多的细节内容,包括材质颜色、纹理细节和属性信息等。

针对上述用户视觉感知的特点,将表达轮廓的几何和表达细节的材质纹理以及属性数据离散存储,通过几何的快速传输和绘制,让用户首先看到城市模型的位置、大小、形状和拓扑关系以及道路走向等,并在用户的大脑中形成一幅抽象的空间位置关系地图。用户根据目标地物同道路网络的空间拓扑关系或目标地物的轮廓特点,判断是否继续浏览当前区域或进行切换。当几何数据传输完成或用户停顿时间超过设定阈值,则根据模型的调度顺序,依次获取材质纹理并绘制。建立多级纹理LoD,每一级纹理烘焙成单张,减少传输次数。通过快速传输和绘制数据量最小的最粗一级纹理,即时响应用户请求,客户端根据策略(包括等待时间因子等)来判断是否调度更精细的纹理数据。

2 三维城市模型自适应组织方法

2.1 元数据层次结构组织

模型元数据按地形瓦片的四叉树结构进行组织。客户端获取模型瓦片数据,解析出每一个模型元信息和最粗一级的模型数据并可视化。随着视距的拉近,用户需要看到更精细的模型几何和模型纹理。为了减小精细模型的调度粒度,精细模型的几何、材质和纹理离散存储并渐进调度。模型几何对象存储几何对象ID、几何对象类型和几何实体数据。其中,几何实体包含关联的材质纹理ID。材质对象存储材质对象的ID以及材质的类型、名称和实体数据。材质类型包括简单材质、复杂材质和无材质。简单材质主要针对单个面、单张材质的情形,复杂材质针对单个面、多张材质混合的效果,而无材质则代表纹理图片信息。材质体可以包含另一个材质对象,如简单材质的材质体可以包含一个无材质对象,即纹理图片。

2.2 多层次ID结构设计

将三维城市模型分解为索引元数据、几何、材质和纹理时,割裂了其完整性。如何表达其关联关系,从逻辑上表现其完整性,并隐式组织其调度关系,是ID结构设计的关键点和难点。

MongoDB的ObjectID分布式唯一标识码共占用12个字节。其中,0~3字节是从标准纪元开始的时间戳,单位为秒;4~6字节是服务器主机标识,通常是机器主机名的散列值;7~8字节是同一台机器上多个实例的进程标识符;9~11字节是自增计数器。

该ID结构设计虽然保证了对象标识的唯一性,但存在以下两个问题:①元数据ID、几何ID和材质ID都单独生成,无关联性。因此,需要存储ID之间的映射关系。如模型有*i*级LoD,则元数据中需要存储*i*个几何ID;材质映射*j*级纹理,则材质中需要存储*j*个纹理ID。故存储的经济性不高。②无法检测ID是否重名。虽然该ID的设计方法极大程度地避免了ID同名,但不可避免地存在小概率的ID同名情况。该ID结构设计,需要遍历所有对象ID,才能检测ID是否同名。故成本太大,入库效率低。

为此,本文定义了一种多层次的ID结构,即纵向上关联各级LoD模型,横向上关联索引元数据、几何和多级材质纹理。其突出的优点是:在保证ID唯一性的同时,支持快速的重复检测,满足分布式模型数据生产的要求。

该ID结构只占用8个字节。其中,第0字节作为管理字节;第1~4字节存储随机变量,每个工作区里面的随机变量相同,该随机值等价于工作区;第5~7字节存储从0开始自增的序列。第1~4字节的随机变量,负责区分不同的工作区。当导入新工作区时,需将新工作区的随机变量与已经入库的工作区随机变量比较。若存在重复,则需要重新生产该工作区。该工作区随机变量占4字节32位,重复概率小,且以工作区为单位,易于查重。第5~7字节存储从0开始自增的序列。考虑到3字节24位(2^{24})远远大于设计的一个工作区生产的模型对象个数。第1~7字节可以保证一个工作区的模型对象ID的唯一,且为随机变量,便于进行ID查重。第0字节作为管理字节,主要负责元数据的管理,模型索引元数据ID的第0字节的1~3位,存储了该模型的LoD个数。若索引元数据ID第0字节1~3位值为*i*,则表示该模型有*i*-1级LoD;若将索引元数据ID中的这三位替换为 $[0, i-1]$ 中的值,则变成了各级LoD

中几何数据的 ID 值。这种 ID 设计方法,隐式表达了数据之间的关联关系,存储空间利用价值高,可极大地满足三维模型生产的需要。

2.3 分布式数据库存储结构设计

本实验平台采用分布式文件系统 MongoDB 数据库。MongoDB 是一个基于分布式文件存储的非关系型数据库,数据存取效率高。本文根据数据组织的逻辑模型,如图 1 所示,设计实现了基于 MongoDB 数据库的物理存储模型。

如图 1 所示。首先,以每个城市某一类地物为图层组织模型数据,按照“城市名_地物类型名”的命名规则来组织。如“Wuhan_road”和“Nanjing_building”等。为了保存图层信息,需要建立图层元数据管理对象。其次,针对每一个图层,根据本文的分析,分别建立索引元信息的瓦片集、几何数据集、材质数据集和属性集。针对图层间共享的模型对象,如城市小品路灯和护栏等,单独建立共享模型几何集和共享模型材质集。

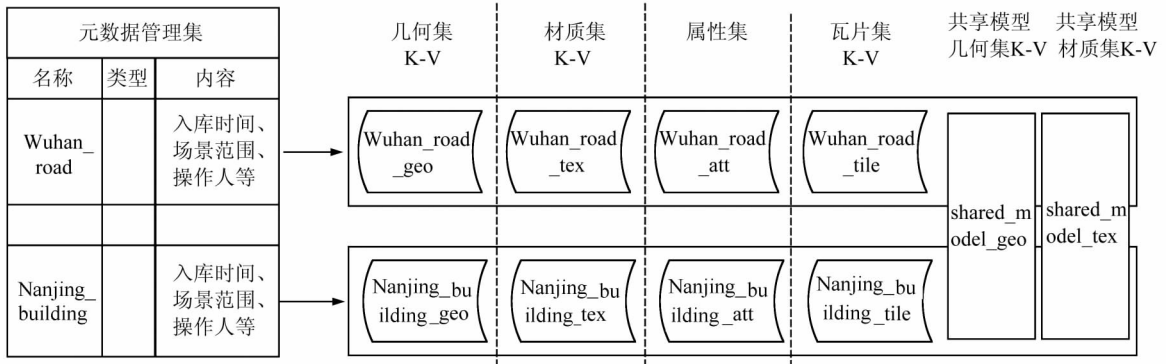


图 1 存储逻辑模型

Fig. 1 Logical Model of Storage

3 实验与分析

3.1 实验环境

本文的实验场景选择的是武汉市某中心区域,如图 2 所示,包含以下 3 类不同粒度大小的典型模型数据:① 大型建筑,几何粒度约 550 KB;② 中型居民楼,几何粒度约 150 KB;③ 城市小品,如路灯和垃圾桶等,几何粒度约 60 KB。实验场景覆盖面积 0.4 km²,模型对象 160 个,模型几何量 31 MB,模型纹理量 59 MB,模型被组织在一个格网内。软硬件配置情况为:数据库为 MongoDB 2.2.2 win64 版;客户端为 MongoDB C++ Driver 2.0.8 版;数据服务器 CPU 为 Intel X5650 处理器,内存为主频 1 600 MHz 12 GB,硬盘为 1 个 7 200 转 2TB 硬盘,操作系统为 Windows 7 的 64 位操作系统;网络为百兆局域网。

3.2 实验结果与分析

实验 1 对比现有“图层-对象”组织方法与本文组织的请求响应时间,结果如表 1 所示。从结果来看,本文方法在场景响应时间上,与原方法相比,响应速度明显提高,且内存缓存数据量小。主要由于对三维模型索引元数据和最粗一级模型 LoD 按照格网打包组织以后,只需将场景范围内

格网块取出并快速绘制最粗一级模型,不需将场景格网内模型对象完整取出。在表 1 中,本文方法所需传输的元数据和最粗一级模型仅 217 KB,而传输完整模型需要 90 MB。因此,本文方法响应所需传输的数据量小,响应的速度更快。

实验 2 对比了实验场景在不同组织方法下的无效数据传输量,结果如表 2 所示。从实验结果可以看出,用户切换场景的时间越短,本方法越能有效地减少无效数据传输量。从表 2 可以看出,在 3 s 时切换场景,减少了 73.33% 的无效数据传输;在 5 s 时切换场景,减少了 56.11% 的无效数据传输;在 10 s 时切换场景,减少了 15.79% 的无效数据传输。

表 1 响应时间对比

Tab. 1 Comparison Response Time

	传输数据量	响应时间/s
“图层-对象”组织方法	90 MB	11.96
本文组织方法	217 KB	0.042

表 2 数据传输量对比

Tab. 2 Amount of Data Transmission

	“图层-对象”组织方法			本文方法		
	3 s	5 s	10 s	3 s	5 s	10 s
几何传输量/MB	31	31	31	24	31	31
纹理传输量/MB	59	59	59	0	8.5	44.79

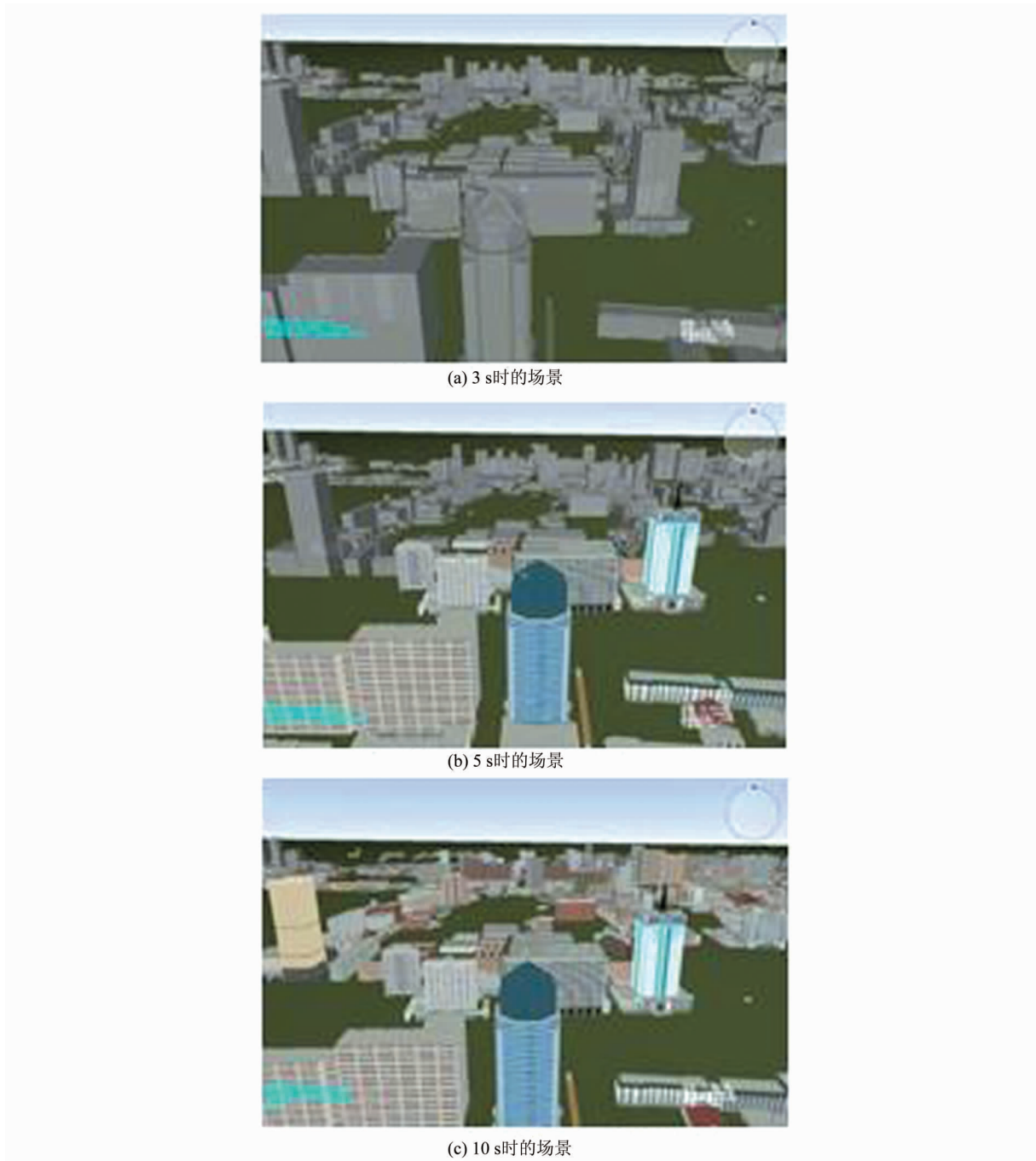


图2 测试场景调度流程

Fig. 2 Scheduling Process of Test Scenario

4 结 语

复杂三维城市模型的不同类型以及不同细节层次的粒度差异,导致模型调度粒度的不均匀,以及在互联网环境下传输的低效率,无法支持多用户并发访问的流畅可视化。本文通过对用户体验的分析,索引元数据的统筹管理,以及几何、材质、纹理的离散存储和渐进传输,平衡了调度粒度,提高了响应速度,减少了无效数据传输,大大

增强了互联网环境下多用户并发的实时可视化效率。

参 考 文 献

- [1] Xiong Hanjiang, Gong Jianya, Dai Xuefeng, et al. Three-dimensional (3D) Terrain Model Data Organization Method Oriented to Network Interactive Visualization [P]. China Patent, 2010101 07647, 2011-08-03(熊汉江,龚健雅,戴雪峰,等. 面向网络交互可视化的地面三维模型数据组织方法[P]. 中国专利, 201010107647, 2011-08-03)

- [2] Zhou Dongbo, Zhu Qing, Du Zhiqiang, et al. A Data Granularity and Structure Coherence Organization Method for Large-Scale 3D City Models[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(12): 1 406-1 409(周东波,朱庆,杜志强,等. 粒度与结构统一的多层次三维城市模型数据组织方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(12): 1 406-1 409)
- [3] Beard D V, Walker J Q. Navigational Techniques to Improve the Display of Large Two-dimensional Spaces[J]. *Behaviour & Information Technology*, 1990, 9(6): 451-466
- [4] Sun Min, Xue Yong, Ma Ainai. 3D Visualization of Large DEM Data Set Based on Grid Division[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2002, 14(6): 566-570(孙敏,薛勇,马蔼乃. 基于网格划分的大数据集 DEM 三维可视化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(6): 566-570)
- [5] Wan Gang, Gao Jun, Liu Yingzhen. Research on Cognitive Map Formation Based on Reading Experiments[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 339-346(万刚,高俊,刘颖真. 基于阅读实验方法的认知地图形成研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 339-346)

An Adaptive Organization Method for Complex 3D City Models Considering User Experience

WU Chen¹ ZHU Qing^{1,2} ZHANG Yeting¹ XU Weipin¹ XIE Xiao¹ ZHOU Yan³

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

³ School of Resource and Environment, University of Electric Science and Technology, Chengdu 611756, China

Abstract: The traditional method for visualization of 3D city models based on a “Layer-Object” does not consider the granularity differences in different data type and in different levels of detail, which results in the low transmission efficiency in the network environment and does not satisfy the need for smooth visualization with multi-user concurrent accesses. This paper analyzes the characteristics of a user experience including roaming over a wide range and focusing on small range, and proposes a method of using an index metadata to coordinate the organization and scheduling of model objects, which delivers instant responses to user requests, and at the same time, by decomposing model objects, decreases invalid data transmission. This paper describes the design of unified object ID structure to implicitly store the relationships of LoD models and decomposed objects to support distributed management. Finally, the validity and feasibility of this method are demonstrated through experiments on the platform of a distributed database MongoDB.

Key words: three-dimensional city model; user experience; real-time visualization; distributed data organization

First author: WU Chen, PhD candidate, specializes in data management of 3D GIS. E-mail: wuchen@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Yeting, PhD, associate professor. E-mail: zhangyeting@263.net

Foundation support: The National Program on Key Basic Research Project (973 Program) of China, No. 2011CB302306; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41471332, 41261086.