引文格式：刘乔阳,刘丹,王立刚,等. 实景三维数据调度优化方法研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):114-117. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.08.024

实景三维数据调度优化方法研究

刘乔阳[1]，刘　丹[1]，王立刚[1*]，高　宇[1]，张小璞[2]
（1. 宁夏回族自治区自然资源信息中心，宁夏 银川　750002；2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室，湖北 武汉 430079）

摘　要：随着实景三维技术的广泛应用，对数据调度效率的要求日益增加。针对当前实景三维数据调度效率低、响应慢等问题，通过三维模型轻量化技术减少模型数据量和要素数量，提升数据传输与渲染效率。同时，使用四叉树、八叉树和BSP树混合索引结构，有效解决数据渲染调度的延迟；并引入分布式调度策略支持任务并行处理，提高数据调度与计算速度。为验证这些方法的实际效果，开展了相关实验。实验结果表明，经过三维模型轻量化处理后，单体模型数据量减少了83%，Mesh模型数据量减少了67%，要素数量减少了63%。应用混合索引技术后，微观构建级数据的加载时间缩短至原来的1/4，分布式实景三维数据调度方法的实施，空间数据传输效率提升至原来的两倍以上。

关键词：实景三维；三维模型轻量化；混合索引；分布式调度
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0114-04

Research on Optimization Methods for Real Scene 3D Data Scheduling

LIU Qiaoyang[1], LIU Dan[1], WANG Ligang[1], GAO Yu[1], ZHANG Xiaopu[2]
(1. Ningxia Hui Autonomous Region Natural Resources Information Center, Yinchuan 750002, China;
2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: With the widespread application of real scene 3D technology, the demand for data scheduling efficiency is increasing. To address the issues of low efficiency and slow response in current real scene 3D data scheduling, we reduced model data volume and element quantity through 3D model lightweighting technology, enhancing data transmission and rendering efficiency. Meanwhile, by using a mixed indexing structure of quadtrees, octrees, and BSP trees, we effectively solved the delay in data rendering scheduling, and introduced a distributed scheduling strategy to support parallel task processing, improving data scheduling and calculation speed. To verify the practical effects of these methods, we designed and implemented relevant experiments. The results show that after 3D model lightweighting, the data volume of individual models decreased by 83%, Mesh model data volume by 67%, and element quantity by 63%. After applying the mixed indexing technology, the loading time of micro-level construction data is reduced to 1/4 of the original, and the implementation of distributed real scene 3D data scheduling method increases spatial data transmission efficiency to more than twice the original.

Key words: real scene 3D, lightweight 3D model, mixed index, distributed scheduling

近年来，国内外学者围绕实景三维数据调度开展了大量研究。武雪玲[1]等研究了数据存储结构，通过分层分块组织数据以提高读取效率；黄艳[2]等聚焦于数据预取与缓存策略，通过预测用户操作行为，提前加载可能需要的数据以缩短等待时间。此外，有研究探讨了网络数据传输优化方法，以提升数据传输的速度与可靠性。这些研究为实景三维数据调度方法的优化提供了重要参考[3-4]，但在实际应用中仍存在因庞大数据量而导致的系统响应缓慢、运行和传输效率低下的技术问题。

为解决上述问题，本文围绕实景三维数据高效应用从模型轻量化、高效索引、分布式调度3个方面开展研究，以压缩数据冗余和减少传输延迟，提升数据检索、读取和传输效率，进而实现实景三维数据高效渲染，助力成果应用，不仅具有重要的理论价值，也具有显著的实践意义[5-10]。

1　研究方法

1.1　三维模型轻量化技术

在实景三维应用中，海量的数据量常制约系统性能和传输效率。为此，通过数据模型结构优化和三维模型重复对象轻量化技术，大幅降低数据量，同时保持模型的可视化效果与空间精度。

1）数据模型结构优化技术。通过优化点、面和贴

项目来源：中国工程院院地合作项目（2023ZLZX0005）。
第一作者简介：刘乔阳（1990—），研究生，工程师，研究方向为时空信息应用，E-mail：liuqiaoyang@163.com。
通信作者：王立刚（1984—），硕士，正高级工程师，研究方向为自然资源信息化，E-mail：wangligang@nxgis.ntesmail.com。

图，减少顶点和面的数量，减轻数据存储和传输负担。

2）重复对象轻量化技术。针对植被模型、建筑模型、地形地貌等模型结构面过多且单独存储造成数据量极为庞大的问题，难以通过模型结构优化、贴图格式优化、纹理精度优化等方式来实现轻量化治理。因此，需对这些模型进行重新建模，采用点位信息结合三维模型库的方式，替代原有的一个植被模型对应一个.obj格式模型的数据组成方式，从而有效减少模型数据量，提升模型在平台中的加载效率。

1.2　混合索引构建技术

为了快速检索与高效读写实景三维数据，本文提出一种结合四叉树、八叉树及BSP树的混合索引方法，以满足从宏观到微观场景的多层级需求，同时实现室内外数据的无缝过渡。该方法在不同层级的索引结构设计上具有以下特点：在宏观地形级（如国家或省级范围），针对大区域尺度，采用基于经纬度的四叉树结构，递归分割空间数据，提升数据组织与检索效率；在中观城市级（如城市或街区范围），切换至八叉树索引结构，对街区及建筑物模型进行分割，增强局部区域数据的访问效率；对于微观构建（如室内与微观场景），则在八叉树叶子节点处挂接微观场景的BSP树索引，精细分割室内模型。

1）按四叉树递归分割。根据经纬度模型进行四叉树递归分割，达到八叉树的最大分割单元。

2）确定四叉树的最小分割单元[11]，即八叉树分割的最大单元。

3）按八叉树递归分割。对数据模型按照八叉树递归分割，直至达到小尺度街区及建筑物模型的最后一级，当数据层面没有可继续向下递归的LOD模型数据，即八叉树递归到叶子节点时，如图1所示。

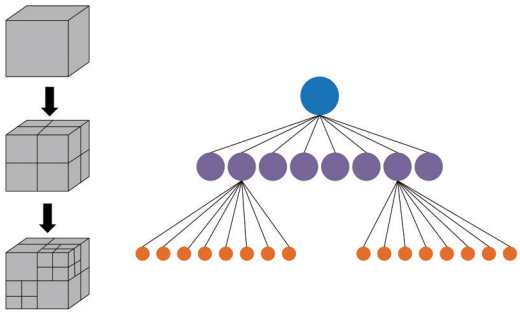


图1　八叉树分割方法

4）在八叉树叶子节点加挂BSP树。在八叉树叶子节点处，挂接该节点包围盒内的所有微观尺度室内模型数据，每个叶子节点均作为BSP树的根节点。

5）BSP树分割法。在构建BSP树的过程中，采用递归空间划分方法。首先，选取一个平面将空间划分为2个相对均衡的半空间；接着，对每个半空间重复划分，直至每个空间内仅包含一个多边形或无法进一步分割；随后，在树的节点中存储划分所得的多边形列表，并将子空间的多边形列表存在相应的子树节点中；对于包含多个多边形的节点，选取一个多边形作为分割标准，将空间划分为2个半空间，并将该多边形存储在节点内；最后，若节点仅包含一个多边形，则将其标记为叶节点，不再进行分割[12]，如图2所示。

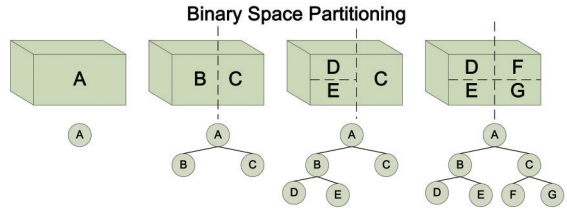


图2　BSP树分割法

在实际应用中，尽管计算最优平衡的BSP树较为困难，但可以通过公式（8）来评估分割平面的优劣，

$$\text{Value}=P-N+8\times S \tag{8}$$

式中，P、N和S分别为分割后正方向、负方向上的三角形数量以及被分割平面切开的三角形数量。选择Value值最小的平面作为最佳分割平面，以近似保证BSP树的平衡性。

1.3　分布式调度方法

为提升实景三维数据传输效率、缩短传输时间、优化资源分配并增强系统调度性能，本文基于分布式架构在计算与调度方面的技术优势，提出了一种实景三维数据分布式调度方法。该方法通过整合分布式存储与调度机制，实现了场景数据的高效调度与可视化，并显著提高了资源利用率。分布式存储的对象主要分为结构化数据与非结构化数据两类，针对不同数据类型的特点，分别设计并优化了相应的存储与访问策略，为数据调度提供基础支撑。

1）结构化数据的分布式存储。结构化数据具有明确的数据结构和格式，典型代表是关系型数据库中的表格数据。在分布式存储环境中，依据特定规则对结构化数据进行分片处理，并将分片后的数据分布存储到不同节点，可实现数据的并行访问与处理，显著提升数据存储和查询效率。本文通过构建PostgreSQL（开源对象关系型数据库管理系统）分布式集群，将要素库部署在多个节点上。利用多节点并行查询，显著提高了查询效率，实现高性能的通用查询功能。

鉴于当前地理要素数据量普遍不少于100万条，本文仅对数据库表进行了纵向剖分。设计了基于Postgres-XL（基于PostgreSQL的分布式数据库管理系统）

的分布式方案。Postgres-XL通过分离PostgreSQL的SQL（结构化查询语言）解析层与数据存取层，分别构建Coordinator（分布式数据库架构中的控制中心）节点和Datanode（分布式数据库架构中的数据存储和计算单元）节点[13]。多个Coordinator节点协同负责SQL解析、执行计划制定以及任务分发，多个Datanode节点负责实际的数据存取[13]。为了确保分布式环境下事务操作的正确执行，引入了GTM（全局事务管理）节点，并让所有节点配置了从属（slave）节点以避免单点故障。

Postgres-XL支持复制和分片2种数据分布模式。在复制模式下，同一表的数据在多个节点间存储副本[14]；在分片模式下，根据特定规则将表的数据分布存储于多个节点，实现数据的高效管理与访问。Postgres-XL的结构如图3所示。

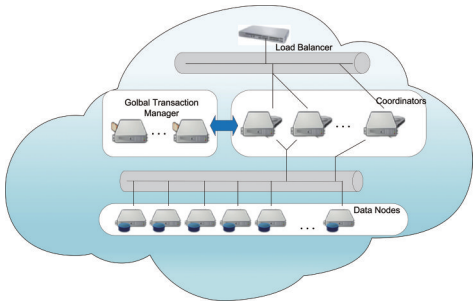


图3 地理要素库的分布式集群方法

2）非结构化数据的分布式存储。非结构化数据（如图片、视频、文档等）因缺乏固定的结构或格式而难以管理。为此，本文提出利用分布式文件系统或对象存储系统，将非结构化数据划分为多个数据块，并分散存储于不同节点，以提升数据存储容量与访问效率。在实景三维技术中，地理场景数据是典型的非结构化数据，其类型包括DOM（数字正射影像）、DEM（数字高程模型）、栅格电子地图、二维专题图、3DTiles（三维瓦片）、三维模型以及点云数据等。这些数据通常以散列文件或大文件形式存储在硬盘中，读取效率较低。因此，本文采用MongoDB（非关系型数据库系统）对这些数据进行存储优化。通过构建MongoDB的分布式集群，将不同数据类型分布存储于集群节点，从而提供高效的地理场景数据获取服务。

3）分布式数据调度。为提升数据调度效率，本文设计了一种分布式数据调度机制。该机制依托分布式任务调度器，合成负载均衡技术，均衡地将数据处理任务分配至各计算节点，以此提升系统的整体性能。其核心是根据用户请求和系统资源状况，合理分解与分配数据处理任务，并将其分配至合适的计算节点。具体而言，系统接收用户请求后，会对请求进行分析处理，依据调度算法将任务分配至各节点。

在并行集群系统中，采用集中式平衡调度算法。分为完全中心式和半中心式2种模式。完全中心式通过独立的负载平衡服务器来调度和分配任务，其实现过程较为简便。但当任务进程数量增多时，调度服务器易出现单点瓶颈，影响系统性能[15]。相比之下，半中心式通过分布式架构部分分担调度压力，有效提升了系统的扩展性与稳定性。

在实际应用中，实景三维数据库系统提供的数据密集型和计算密集型两类服务，其中：数据密集型服务侧重空间信息的共享与存取，通常产生大量网络通信流量且对响应速度要求较高；计算密集型服务更多是进行网络分析等空间分析任务，消耗大量的CPU和内存资源。为了同时满足这两类服务的需求，本文采用数据迁移与任务迁移相结合的双重迁移机制，以实现系统内部的负载均衡[16]。

2 实验与分析

为验证优化方法的有效性，以宁夏为研究区，本文实施了以下三项实验：一是轻量化实验，对单体模型和Mesh模型进行轻量化处理，对比处理后的数据传输效率；二是混合索引调度实验，对宏观地形级、中观城市级以及微观构建级数据进行了传统索引与混合索引检索时间的对比分析；三是调度实验，在相同环境下，比较地理要素数据在单机与分布式架构中的大规模数据传输效率。

2.1 轻量化实验

本次实验选取宁夏15 km^2的单体模型和12 km^2的Mesh模型进行了轻量化处理，其中，单体模型完成模型结构优化、贴图优化和重复对象轻量化，Mesh模型仅进行了模型结构优化。实景三维数据传输效率对比实验结果如下表1所示。

表1 实景三维数据传输效率对比实验结果

轻量化内容	原始数据量/GB	原始要素个数/个	处理后数据量/GB	处理后要素个数
模型结构优化	单体模型 0.69	3 792 084	0.69	3 603 416
	Mesh模型 14.40	7 893 064	4.80	2 960 812
贴图优化	17.80	931 473	5.01	34 205
重复对象轻量化	26.48	31 236 320	1.6	4 582 384

实验结果表明，通过对单体模型轻量化处理后，数据量较少（约82%），这主要归因于贴图优化和重

复对象轻量化，其中重复对象轻量化数据压缩率高达94%，要素个数减少85.3%；对Mesh模型进行模型结构优化后，要素个数减少约63%，效果显著。

2.2　混合索引实验

本实验评估混合索引（四叉树、八叉树、BSP树结合）的检索效率。

实验针对地形级、城市级、部件级数据，在无索引、传统索引和混合索引构建条件下，对检索调度效率的提升进行相关实验。

实验结果表明，宏观地形级数据在传统索引和混合索引下的检索调度效率无显著差距；中观城市级数据调度效率提升2.3 s，显著改善数据浏览体验；混合索引解决了微观构建级数据加载慢的问题，加载时间缩短4.5倍。此外，混合索引数据在实景三维平台上能够实现平稳切换和快速渲染。

2.3　分布式调度实验

本实验通过5台虚拟机（配置为2个4核2.0 GHz CPU、32 GB内存、2 TB硬盘），构建分布式集群。各节点安装Linux操作系统并配置高性能计算环境，分别将倾斜摄影模型瓦片等地理场景数据导入MongoDB分布式数据库集群，将房屋、道路等地理要素数据导入PostgreSQL分布式数据库集群。实验旨在比较单机环境与分布式架构中大规模数据请求传输效率，确保网络条件、数据量及请求数量相同，以对比2种架构的性能差异。实验结果如表2所示。

表2　实景三维数据传输效率对比实验结果/（条/s）

实验轮次	单台电脑速率	高性能集群速率
第一次测试	22 600	43 000
第二次测试	21 400	49 000
第三次测试	19 500	38 800
第四次测试	23 200	42 600
第五次测试	22 400	45 100
平均速度	21 820	43 700

实验结果显示，分布式集群在大规模数据传输的平均速率达到43 700条/s，是单机速率的2倍以上。这表明本文提出的分布式调度方法在数据传输效率上具有显著优势，尤其在处理海量空间数据时，其性能表现更加突出。

3　结　语

本文针对实景三维数据调度中存在的效率低、加载延迟及模型数据量庞大的问题，通过从三维模型轻量化、构建混合索引及分布式调度化3个方面开展研究。解决了数据量大、结构复杂和处理难度高的问题，显著提升了数据传输与渲染效率。

参考文献

[1] 武雪玲,李清泉,任福. 基于分层分块数据组织的双向A*算法[J]. 测绘信息与工程,2006,30(6):1-3

[2] 黄艳,张启坤,段赵磊,等. 基于缓存行为特征的线程数据预取距离控制策略[J]. 电子与信息学报,2015,37(7):1 633-1 638

[3] 张佳宁,沈慧,周广东. 结构监测无线传感网络数据传输优化方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2024,45(8):1 543-1 551

[4] 高艳. 基于分簇算法的传感器网络大数据传输优化方法[J]. 传感技术学报,2022,35(9):1 262-1 267

[5] 陈军,刘建军,田海波. 实景三维中国建设的基本定位与技术路径[J]. 武汉大学学报信息科学版,2022,47(10):1 568-1 575

[6] Stoter J E, Streilein A, Pla M, et al. Approaches of National 3D Mapping:Research Results and Standardisation in Practice[J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013, II-2/W1: 269-278

[7] 张帆,黄先锋,高云龙,等. 实景三维中国建设技术大纲(2021版)解读与思考[J]. 测绘地理信息,2021,46(6):171-174

[8] 陈军,王艳慧,武昊,等. 时空信息赋能高质量发展的基本问题与发展方向[J]. 时空信息学报,2023,30(1):1-11

[9] 王家耀. 关于地理信息系统未来发展的思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1 535-1 545

[10] 王苑楠,井发明,廖佳. 浙江省地方标准《三维数字地图技术规范》的研究[J]. 地理空间信息,2017,15(2):38-40

[11] 孙侨,朱凌玉,曹亚亮,等. 立体交通工程大体量三维空间数据管理方法研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2023,15(5):118-122

[12] 杨成杰,翁正平,张夏林. 基于BSP树的块体快速填充算法在矿山三维储量计算中的应用[J]. 金属矿山,2009(11):89-92

[13] 陈凡. 嵌入式系统可视化编译平台设计[J]. 电子技术与软件工程,2020,8(14):174-175

[14] 韩媛,王占昌,杨博,等. 浅谈基于Postgres-XL的分布式地质大数据集群架构[J]. 中国矿业,2017,26(增刊):83-86

[15] Wang L, Zhang Y. Optimization of Centralized Load Balancing Algorithms for Large-scale Distributed Systems[J]. AVE Trends in Intelligent Computing Systems, 2024, 10(4): 219-230

[16] 孟令奎,张文. 分布式空间数据库的动态负载平衡算法[J]. 计算机工程,2008,33(11):96-98