Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 7 Article 14

1-8-2019

Key Techniques of Remote Visualization of 3D Seismic Volume Supporting Multi-user

Lianen Ji
1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;;2. Beijing Key Laboratory of Petroleum Data Mining, Beijing 102249, China;

Zhao Ni
1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;;2. Beijing Key Laboratory of Petroleum Data Mining, Beijing 102249, China;

Shiyi Liang
1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;;2. Beijing Key Laboratory of Petroleum Data Mining, Beijing 102249, China;

Huang Bo
1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;;2. Beijing Key Laboratory of Petroleum Data Mining, Beijing 102249, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Key Techniques of Remote Visualization of 3D Seismic Volume Supporting Multi-user

Abstract

Abstract: During the remote visualization of large-scale seismic volume for multi-user concurrent interaction, traditional task scheduling approaches could lead to large amount of I/O operation and repetitive calculation of volume texture blocks. So, a more efficient multi-task scheduling strategy was proposed, *which rearranged the schedule order of volume rendering tasks through computing their viewpoint correlation*. Furthermore, *an optimized design of LRU based on parallel protection lock* was made. In order to improve the network transmission efficiency and quality of seismic visualization image simultaneously, and to meet the requirement of users to observe the region of interest (ROI) preferentially, *the progressive transmission technique with ROI-first* was developed. Experimental results show that the proposed methods can improve the hit rate of texture block buffer by 6.2%, reduce the average rendering time by 14%, and clearly show the visual results of seismic volume through only transmitting 44.5% of whole image data in the low-speed network.

Keywords

large-scale seismic volume, remote visualization, multi-viewpoint, multi-task scheduling

Recommended Citation

Ji Lianen, Zhao Ni, Liang Shiyi, Huang Bo. Key Techniques of Remote Visualization of 3D Seismic Volume Supporting Multi-user[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2540-2549.

This paper is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss7/14

第 30 卷第 7 期
2018 年 7 月

系统仿真学报©
Journal of System Simulation

Vol. 30 No. 7
Jul., 2018

支持多用户的三维地震体远程可视化关键技术

纪连恩[1,2]，赵妮[1,2]，梁适宜[1,2]，黄博[1,2]
（1. 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院，北京 102249；2. 石油数据挖掘北京市重点实验室，北京 102249）

摘要：在面向多用户的大规模地震体远程可视化中，针对传统任务调度策略会导致大量 I/O 操作和体纹理重复计算的问题，设计了*基于视点相关的体绘制任务重排算法*，改进了批量并行绘制任务调度策略，并进一步实现了*基于并行保护锁的 LRU 缓冲区更新策略*。为解决地震体可视化图像的传输效率与显示质量的矛盾，满足用户优先观察感兴趣区域的需求，设计了*基于感兴趣区域优先编码的地震体图像渐进式传输方法*。实验表明，该方法使纹理体块缓冲区命中率提升了 6.2%，平均绘制时间减少了 14%，低网速场景下传输 44.5%的图像数据即可清晰展示地震体可视化结果。

关键词：大规模地震体；远程可视化；多视点；多任务调度
中图分类号：TP391.9　　文献标识码：A　　文章编号：1004-731X (2018) 07-2540-10
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807014

Key Techniques of Remote Visualization of 3D Seismic Volume Supporting Multi-user

Ji Lianen[1,2], *Zhao Ni*[1,2], *Liang Shiyi*[1,2], *Huang Bo*[1,2]
(1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Beijing Key Laboratory of Petroleum Data Mining, Beijing 102249, China)

Abstract: During the remote visualization of large-scale seismic volume for multi-user concurrent interaction, traditional task scheduling approaches could lead to large amount of I/O operation and repetitive calculation of volume texture blocks. So, a more efficient multi-task scheduling strategy was proposed, *which rearranged the schedule order of volume rendering tasks through computing their viewpoint correlation*. Furthermore, *an optimized design of LRU based on parallel protection lock* was made. In order to improve the network transmission efficiency and quality of seismic visualization image simultaneously, and to meet the requirement of users to observe the region of interest (ROI) preferentially, *the progressive transmission technique with ROI-first* was developed. Experimental results show that the proposed methods can improve the hit rate of texture block buffer by 6.2%, reduce the average rendering time by 14%, and clearly show the visual results of seismic volume through only transmitting 44.5% of whole image data in the low-speed network.

Keywords: large-scale seismic volume; remote visualization; multi-viewpoint; multi-task scheduling

引言

对地震体数据进行三维可视化，可以使专业人员更加快捷的了解地质结构，有效定位油气开采区，预测油气产量。但随着地震勘探技术的发展，地震体数据规模越来越庞大，GB 级以上的数据亦很常见，计算复杂性越来越高，而野外实地作业时，仅能够携带存储性能和计算性能较低的移动设备，因此借助具有更高性能的服务器计算平台实现地震体数据的远程交互式可视化非常必要[1]。

收稿日期：2017-07-29　　修回日期：2017-11-29;
基金项目：国家自然科学基金(60873093)；
作者简介：纪连恩(1972-)，男，山东高唐，博士，副教授，研究方向为可视化技术、计算机图形学和人机交互；赵妮(1994-)，女，河北保定，硕士生，研究方向为可视化技术。

相对于本地处理，在面向多客户端的远程可视化应用中面临诸多挑战，特别是在系统架构设计、多视点并发服务和远程图像传输等方面如何兼顾可视化质量、处理性能和交互效率的平衡还需要深入研究。

本文基于 PC 服务器，将远程可视化技术应用于大规模地震体数据可视化，数据采用分层分块、多分辨率的八叉树组织结构[2]，服务端采用基于视点相关性的并行任务调度策略，提高体块缓存命中率，整体上提高了任务处理效率。为使缓冲区支持多任务并行处理，设计了基于并行保护锁的 LRU 缓冲区更新策略。为提高多个终端用户对可视化结果的并行观察和交互体验，设计了基于感兴趣区域优先编码的地震体场景图像压缩与渐进传输方法，将感兴趣区域进行优先编码与传输。在上述技术基础上，开发了系统原型，通过性能测试和评估表明能够较好的支持大规模地震体数据的远程交互式可视化。

1 相关工作

计算机网络技术的发展催生了远程三维可视化，它为实现移动式大规模数据处理与可视化提供了新的解决方案。根据服务端向客户端传输数据的不同，常见的三种远程可视化架构[3-7]分为传输原始数据、传输光栅化图像和传输原始数据与传输光栅化图像相结合三种。Bethel 等[3]提出了传输原始数据的远程可视化方法，解决了大规模数据存储问题，但这种方法要求客户端具备较高的图形计算能力。Lin 等[4]提出了一种利用 JPEG2000 压缩三维场景图像的方法，并使用渐进式技术进行传输，这种架构极大降低了对客户端的性能要求，但在交互过程中，由于每一帧的显示数据都依赖于服务端的传输，交互操作易受网络环境影响。金平等[6]提出了一种客户端利用简化的三维网格数据绘制场景，而服务端使用高精度数据绘制高精度场景图像并发送给客户端的远程可视化架构，使客户端可以快速观察低精度图像，又能在一定时间内观察到高精度绘制结果，但它没有考虑高精度图像的传输延迟。结合以上 3 种架构的特点，本文设计了原始数据与光栅化图像相结合的渐进式远程绘制架构，客户端交互过程中绘制简化体模型并进行显示，交互完成后渐进式显示服务端通过 JPEG2000 标准进行压缩的高精度绘制结果。

在可视化大规模地震体时无法将全部的体数据加载至内存进行绘制，通常采用分层分块的组织方式，并为原始数据以及纹理数据建立缓冲区[8-10]，再根据用户的观察视点对体块进行筛选，选择部分数据完成绘制任务。在用户视点发生变化时，绘制过程所需的体块也随之改变，需要在外存、内存和显存间进行数据加载和调度。

服务端为多用户提供远程可视化服务时，提高缓冲区命中率对于提高并发服务效率至关重要，需要选择一种合适的并行绘制任务调度策略[11-14]。最简单的任务调度策略是先来先服务 FCFS(First Come First Serve)，即按照任务请求到达时间的顺序进行调度，但一些缓冲区命中率高，不需要大量 I/O 操作的任务仍需等待到达时间早但 I/O 繁忙的任务，导致整体服务效率低。Rixner 等[11]提出了缓存命中优先的调度策略 FR-FCFS(First-Ready, First Come First Serve)，比较任务请求相对于缓存数据的命中率，命中率越高相应任务请求的优先级越高，这部分任务会被优先调度执行，这种调度方式利用了数据的特点，能够提高整体性能，但会导致命中率低的请求无限等待的问题，是一种局部的调度优化策略，忽视了系统的公平性。Mutlu 等[13]提出了基于并行性感知的任务请求批量调度方式 PAR-BS(Parallelism-Aware Batch Scheduling)，这种调度方式将任务队列中的请求按到达时间批量分组，前一组任务请求的优先级高于后一组的请求，但每组内部的任务请求可以按照任意的访存请求调度策略进行调度，这种调度方式减少了整体任务的执行时间，又不会造成 I/O 繁忙的任务无限等待的问题。本文在上述调度策略的基础上，通过计算不同视点下绘制任务之间的数据相关性来重新排

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss7/14
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807014

第 30 卷第 7 期 系统仿真学报 Vol. 30 No. 7
2018 年 7 月 Journal of System Simulation Jul., 2018

序任务队列，使视点相关性高的绘制任务相邻绘制，进一步提高了缓存命中率，并结合批量调度策略为绘制任务队列设置了公平性阈值，兼顾了系统性能与公平性。

常用的数据缓存更新机制包括 LRU(Least Recently Used，最近最少未使用)和 LFU(Least Frequently Used，最不经常使用)以及衍生出的若干内存更新策略[8]，可以有效提高缓存命中率，但这些更新策略基于串行任务而设计，没有考虑并发任务环境下的数据安全性。在地震体并行绘制过程中，为了避免缓冲区满载时绘制任务将其他并行绘制任务正在读取的纹理数据从缓冲区更新出去，本文设计了基于并行保护锁的 LRU 缓冲区更新策略。

在远程可视化中，为了利用有限的网络带宽为用户提供更好的服务体验，渐进式传输技术逐渐应用于各个领域[1]。典型的渐进式传输分为分层传输和分区传输，在对地震体数据的观测过程中，用户往往还会对其中的一部分更为关注，希望该部分可以更早地被显示出来并具有更多的细节信息，这部分区域被称为 ROI(Region of Interest)[15]，JPEG2000 标准支持渐进式传输，能够优先显示 ROI，实现分层传输和分区传输相结合，有效提升用户的交互体验。

另外，近年来基于云平台架构的远程可视化方法也得到探索和应用，例如，张繁等[16]通过 Spark 平台将热图分层次并行计算，提高了大数据可视化效率，为浏览器端大数据可视化提供了一个新的思路。Parsonson 等[17]在云端实现体绘制过程，将医学数据以体块的方式重新组织，分配给不同计算节点并行绘制，然后将图像通过 Internet 服务器传输给客户端。云平台有效扩展了可视化服务范围，但涉及较复杂的底层软硬件架构，且绘制方法与具体应用密切相关。本文重点研究基于 PC 服务器的多用户并行可视化方案与远程传输策略，提升普通计算平台下的地震体远程可视化服务质量，这些技术也能够进一步与云平台架构相结合。

2 远程可视化架构

大规模地震体可视化过程中，原始数据与产生的图元、纹理数据复杂且数据量大，不适于直接进行网络传输，此外，本文研究主要应用于野外实地勘探开采，所使用的网络带宽较低，且专业人员在实际操作过程中，更专注于地震体细节信息，而对调整视角过程中的可视化质量要求不高，因此，为了减小网络传输数据量、提升用户交互体验，本文采用传输原始体数据与传输光栅化图像相结合的渐进式远程可视化绘制架构，如图 1 所示。

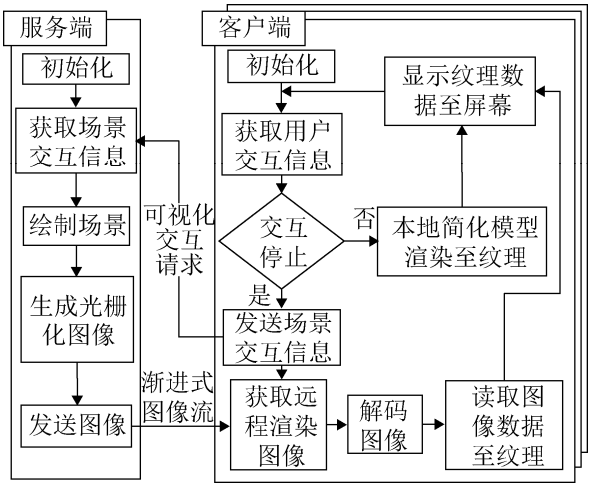


图 1 远程可视化混合绘制架构
Fig. 1 Hybrid rendering framework for remote visualization

当客户端首次使用某个数据集时，首先向服务端请求下载数据量较小、分辨率较低的地震体数据，并用该数据生成简化模型；在用户交互过程中，客户端使用已获取的地震体“简化模型”进行绘制并将结果显示给用户，保证用户交互的流畅性；当用户停止交互时，采用传输光栅化场景图像策略，向服务端请求当前观察角度下渲染后的高清晰度场景图像，提升可视化效果。而在场景图像传输过程中，采用渐进式传输技术将场景图像逐步发送至客户端，减少用户等待时间，并对用户感兴趣区域进行优先传输，保证在网络带宽有限的情况下，用户可尽早地获取所需的可视化结果，进一步提升交互体验。

3 多视点并行可视化

3.1 基于视点相关的并行绘制任务调度策略

多客户端远程可视化中每个用户都可通过操纵独立的视点对场景进行自由观察，而同一时刻，服务端处理的并行绘制任务数量有限，因此，构建支持多视点的远程可视化系统，需要考虑不同交互请求在服务端的绘制顺序问题。

如图 2 上部所示，FCFS 调度算法按照任务到达时间的先后顺序依次执行各个任务。问题是缓存命中率高的任务与缓存命中率低的任务平均绘制时间是相同的，不利于整体绘制性能的提升。

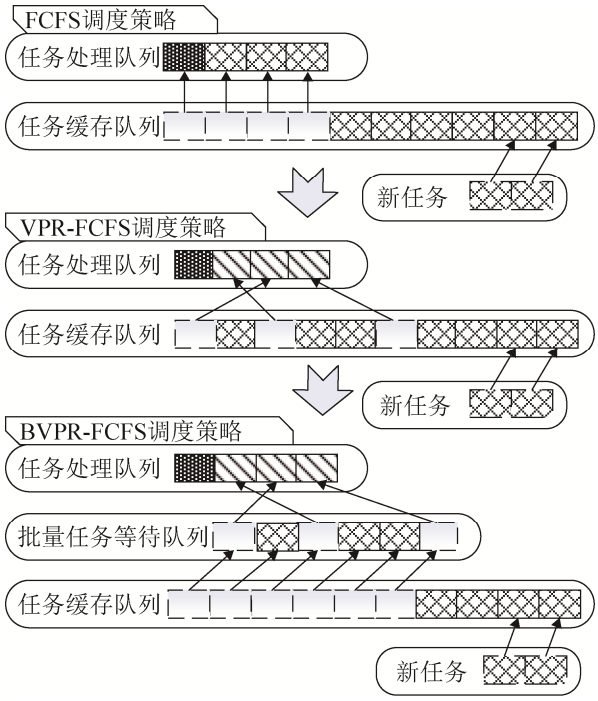


图 2 面向多客户端的调度策略优化过程
Fig. 2 Optimization process for multi-client scheduling strategy

参照 FR-FCFS 的思想，本文设计了 VPR-FCFS (Viewpoint Related-First Come First Serve)调度算法，如图 2 中部所示。在处理队列需要添加新任务时，将任务缓存队列中的任务和当前正在处理的任务进行相关性比较，相关性高的任务将被优先提供给处理队列。这样，当前绘制任务所需数据都在缓冲区中，优先绘制与当前任务数据相关性高的任务，可间接提高缓存命中率，提高整体绘制效率，而绘制任务之间的相关性可用视点相关性来计算。但这种优化会导致命中率低的请求无限等待的问题。

为解决上述问题，进一步设计了结合批量调度控制与视点相关的并行绘制任务调度策略 BVPR-FCFS(Batch Scheduling & ViewPoint Related-First Come First Serve)，如图 2 下部所示。通过增加一个批量任务等待队列，在处理队列需要添加新任务时，首先在批量任务等待队列内部对备选任务进行相关性计算，优先将相关性较高的任务提供给处理队列，实现等待队列组内排序，只有当前等待队列中的任务全部执行完成时，批量任务等待队列才会请求新的一组任务，保证了系统的公平性。

3.2 视点相关性计算

如图 3 所示，使用八叉树结构[2]对地震体块数据进行管理，任务绘制时体块数据与视点的距离越近则体块数据加载的越精细，体块分辨率越高，体块显示列表用于存储当前绘制任务需要的体块数据。当视点位置或方向发生改变时，新的绘制任务需要的体块数据随之改变，体块的显示列表也随之改变，因此绘制任务之间的数据相关性可用视点相关性来衡量。

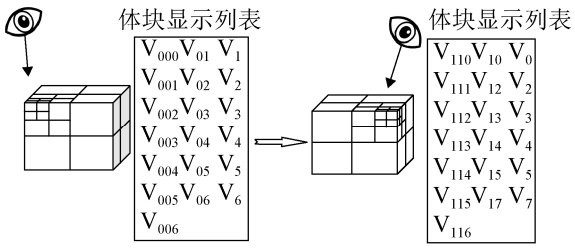


图 3 基于视点的体块选择及其显示列表
Fig. 3 Viewpoint-based volume block selection and corresponding display list

任意两个绘制任务之间的视点相关性用 α_{ij} 表示，计算视点相关性有两种方法：一种是直接比较法，绘制任务间体块列表中相互重叠的体块数据越多，则表明两个任务的数据相关性越大，采用遍历的方式对两个体块列表内容进行相互匹配，两个体块列表中体块数分别为 L_i 和 L_j，重合体块数为 L_{ij}

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss7/14
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807014

第 30 卷第 7 期 系统仿真学报 Vol. 30 No. 7
2018 年 7 月 Journal of System Simulation Jul., 2018

则两个绘制任务的视点相关性为：

$$\alpha_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i + L_j - L_{ij}} \tag{1}$$

当体块列表的长度为 n 时，直接比较法时间复杂度为 $O(n^2)$，当 n 较大时，实时计算耗时较多，将会造成任务调度时间延长。

第二种方法是预先对绘制任务间视点信息以及所需数据的相关性进行建模，并在实时绘制过程中利用该模型直接计算两个视点的数据相关性，将相关性计算的时间复杂度降为常数。

多层前馈神经网络(又称多层感知机，Multi-Layer Perceptrons，MLP)在具有一个包含足够多神经元的隐层时，便可以以任意精度逼近任意复杂度的连续函数[18]。因此，本文采用具有两层隐层的前馈神经网络来拟合绘制任务相关性计算模型，如图 4 所示。

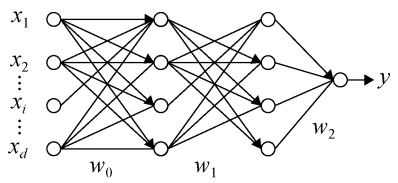


图 4 具有两层隐层的前馈神经网络结构
Fig. 4 Structure of the MLP with two hidden layers

首先根据应用需要随机采集典型的交互视点信息，生成体块列表，根据体块列表计算任务之间的数据相关性，将视点信息定义为 6 元组表示形式：

$$\boldsymbol{v} = (x_0, y_0, z_0, x_r, y_r, z_r) \tag{2}$$

式中：x_0，y_0，z_0 分别表示视点的 3 个位置分量；x_r，y_r，z_r 表示视点的 3 个方向分量，将任意 2 个绘制任务的视点信息组合为向量 $\boldsymbol{x}$ 构成神经网络的输入集：

$$\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{v_i}, \boldsymbol{v_j}) \tag{3}$$

将 $\boldsymbol{x}$ 和二者数据相关性 α_{ij} 添加到训练集中，而后对 $\boldsymbol{x}$ 进行前馈计算，神经网络的前馈过程计算公式如下：

$$h_0 = \tanh(W_0 \boldsymbol{x} + b_0) \tag{4}$$

$$h_1 = \tanh(W_1 h_0 + b_1) \tag{5}$$

$$\hat{y} = \tanh(W_2 h_1 + b_2) \tag{6}$$

式中：W_0 为第一隐层权重；b_0 为第一隐层偏差；h_0 为第一隐层向量；W_1 为第二隐层权重；b_1 为第二隐层偏差；h_1 为第二隐层向量；W_2 为输出层权重；b_2 为输出层偏差；$\hat{y}$ 为输出。

通过计算 $\hat{y}$ 相对于 α_{ij} 的均方误差，在误差范围内应用随机梯度下降算法对 W_0，b_0，W_1，b_1，W_2，b_2 进行调优直至模型收敛。模型收敛后，任意两个绘制任务间数据相关性可以通过该模型直接进行计算，经过有限次矩阵运算便可获得拟合的相关性结果，有效降低了实时计算开销。

图 2 中批量等待队列中的任务先经过视点相关性计算，根据相关程度有序移送至任务处理队列，再依次比较任务处理队列中当前绘制任务和其他并行绘制任务之间的视点相关性，按照相关性由高到低依次排序：

$$\alpha_{12} \geqslant \alpha_{13} \geqslant \alpha_{14} \ldots\ldots \geqslant \alpha_{1n} \tag{7}$$

同时，为了保证系统公平性，任务等待队列最大容量不超过阈值 max，根据实验结果，最终设定一个合适的阈值使命中率低的请求等待时间仍在容忍范围内。

3.3 基于并行保护锁的 LRU 缓冲区更新策略

当体块纹理数据缓冲区容量不足时，需要采取合适的更新策略进行空间管理，而纹理数据缓冲区又可能被多个绘制任务同时访问，每个绘制任务只有在获取全部所需纹理数据后才能进行体绘制，传统 LRU 更新策略在进行数据更新时无法保证正在使用中数据的安全性，因此需要对缓冲区添加并行保护机制。本文设计了基于并行保护锁的 LRU 缓冲区更新策略 PL-LRU(Parallel Lock-based Least Recently Used)来实现对数据的锁定。

如图 5 所示，体块 H 正在被一个绘制任务使用，但它同时是根据 LRU 更新策略计算出的满载时该被更新出去的体块，若缓冲区满载，其他并行绘制的任务请求加载数据时就会将该体块数据进行更新，导致该任务加载数据出错。添加并行保护

锁机制后，当该体块对应的纹理数据被新绘制任务使用时，其引用计数加一，对该体块进行保护，绘制任务完成后，其引用计数减一，改进后的 LRU 策略仅对引用计数为零的数据进行更新。

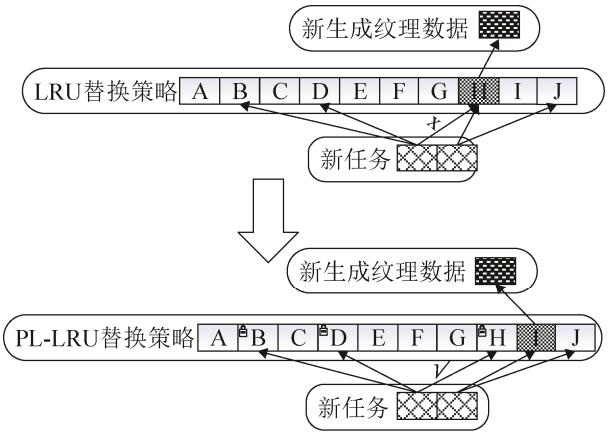


图 5 添加并行保护锁至 LRU 策略中
Fig. 5 Adding parallel protection lock to LRU

添加并行保护锁后控制缓冲区更新的伪代码描述如下：

输入：纹理缓存列表 TexList{T0,T1,.....Tn}，命中列表 HitList，未命中列表 NHitList

```
BlockList← getBlockList()；/*获取当前任务体块列表*/
compare(BlockList,TexList)；/*比较 BlockList 和 TexList 中的节点，初始化命中列表 HitList={H0,H1,.....Hn} 和未命中列表 NHitList={NH0,NH1,.....NHn}*/
FOR i=1 TO NHitList.length()  //遍历未命中列表
    produce(NHi)；  //  生成 NHi
    IF  TexList. isoverflow() //如果纹理缓冲区满载
        THEN LRUFind()；/*根据 LRU 更新算法找到应被更新体块 Ti*/
            WHILE Ti → refcount>0 /*引用计数不为 0 时重新计算 Ti*/
                Recal(Ti )；
            END WHILE
    END IF
    Ti←NHi；//加载未命中数据，更新 Ti
    Hn+1=←Ti；n++；//将 Ti 添加到 HitList
END FOR
FOR i=1 TO HitList.length()//缓冲区命中的体块数据
    Hi→refcount++ ；   //引用计数加一
END FOR
render() ；          //开始绘制
FOR i=1 TO HitList.length()    //绘制结束
    Hi→refcount-- ；   //引用计数减一
END FOR
```

另外，采用该并行保护锁机制后，绘制任务无需持有纹理数据缓冲区的“读”操作锁至绘制任务完成，只要绘制任务在对所需纹理数据添加引用后，便可释放该锁，而此时缓冲区的数据更新操作便可以获取“写”锁，实现数据的快速更新。该并行保护锁机制为实现读写分离提供了可能，即对未被使用的数据进行“写”操作时，不会影响正在使用中数据的“读”操作，提升了该缓冲区的并发读写能力。

4 基于感兴趣区域优先编码的图像渐进式传输与显示

在服务端并行为多用户提供远程绘制服务的过程中，除了优化和提高可视化绘制效率外，还需要进一步提升可视化结果的传输效率和图像质量，特别是考虑到野外作业环境下网络带宽有限，如何设计有效的图像压缩和传输策略来平衡对两者的需求对于提升用户的交互体验也至关重要。为此本文根据用户的交互操作，自动提取当前视点下的感兴趣区域，优先压缩和传输感兴趣区域图像，并与整体图像的多分辨率分层传输相结合。

4.1 地震体感兴趣区域选择与生成

在大规模地震体可视化过程中，距离视点越近的区域使用的体块分辨率越高，而这些分辨率高的

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss7/14
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807014

第 30 卷第 7 期 系统仿真学报 Vol. 30 No. 7
2018 年 7 月 Journal of System Simulation Jul., 2018

区域也往往是用户最为关心的区域，即 VOI(Volume Of Interest，感兴趣体)，因此，可将 VOI 投影到二维视口的区域作为图像感兴趣区 ROI，如图 6 中矩形框选区域所示。

由 VOI 计算 ROI 的伪代码描述如下：

输入：体块列表 BlockList

输出：ROI 压缩参数 maxX, maxY, minx, minY

```
VOIList←getvoiList(BlockList) ；  /* 获取 BlockList 中分辨率最高的体块保存至 VOI 列表*/
VList←getpointList(VOIList);/*遍历 VOIList 中体块顶点，得到顶点集合 VList{v0，v1,.....vn}*/
FOR i=1 TO VList.length()
    pi=T*vi ；        //对顶点进行投影变换
    IF pi→x>maxX   maxX ←pi→x；
    IF pi→y>maxY   maxY ←pi→y；
    IF pi→x<minX   minX ←pi→x；
    IF pi→y<minY   minY ←pi→y；
END FOR
normalize(maxX maxY minX minY )；/*将 ROI 边界标准化为 ROI 压缩参数*/
```

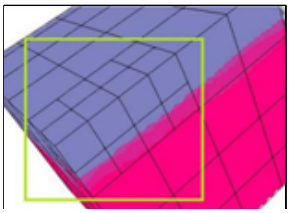
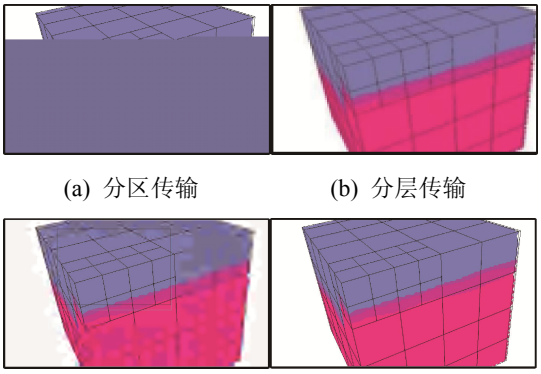


图 6　ROI 的选择
Fig. 6　Selection of ROI

4.2 渐进式网络传输与显示

远程可视化中图像渐进式传输可以按照分区传输和分层传输划分，如图 7 所示，图 7(a)展现了 JPEG 图像自上而下分区渐进式传输效果，传输过程中，用户无法获得地震体可视化场景的整体情况，必须等待全部图像数据传输完毕后才能进行场景分析判断，降低了用户交互体验。图 7(b)展现了分层渐进式传输的效果，即优先传输图像的轮廓信息，然后再传输图像的细节信息，将图像逐层进行细化，最终显示完整的图像。这种传输方式保证了用户在较短时间内可以观测到图像，一定程度上平衡了图像的传输效率和传输质量，但是这种方式对图像中所有区域无差别对待，不能优先观察更重要的区域。

本文使用分层分区相结合的方法，优先传输 4.1 节中生成的感兴趣区域图像，然后对非感兴趣区域逐层进行细化，如图 7(c)所示，渐进式传输时优先传输矩形框选的高分辨率感兴趣区域，然后对背景区域进行分层渐进式传输，最终传输完整的图像数据。



(a) 分区传输　(b) 分层传输
(c) 分层分区结合传输　(d) 完整图像数据

图 7　几种图像传输策略的效果对比
Fig. 7　Effect contrast of several image transmissions

JPEG2000 标准对图像渐进式传输提供了较好的支持，且支持部分区域优先传输，可以对不完整的码流进行解压缩，无需考虑数据截断问题，因此本文在该标准基础上设计了图像渐进式传输技术。

5　原型测试与性能分析

基于上述研究开发了面向大规模地震体远程可视化的原型系统，构建了实验环境进行测试和分析。服务端为图形工作站，CPU 为 Intel(R) Core™ i7-4702 HQ @2.20 GHz，内存容量为 16 GB，硬盘容量为 500 GB，硬盘转速为 7 200 rpm，显卡为 NVIDIA Quadro K1100 M。

客户端为多个便携式普通计算机，硬件配置相似，以其中一部为例作为说明：CPU 为 Intel(R)

Core™ i5 2410 M @2.30 GHz，内存为 4 GB，硬盘 750 GB 5400 rpm，显卡 NVIDIA GeForce GT520 M。

实验中的网络环境通过局域网进行模拟，将网络速度分别限制在 100 kb/s 和 500 k/s 两种情况。

5.1 并行绘制任务调度策略测试分析

测试过程采用的地震体数据采样点数为 970×1 028×1 024，其对应的八叉树结构文件大小为 5.26 GB，包含 5 395 个子体块。采集 10 个用户对该地震体数据的交互操作，随机抽取每个用户 50 次交互请求，作为仿真测试用例。

根据计算机硬件性能进行以下配置：每个绘制任务使用体块数量上限设为 200 个，纹理缓冲区容量设置为 600 个体块纹理数据，原始体块数据缓冲区容量设置为 2 000 个。服务端最大可并行执行的绘制任务数为 3，同时将批量任务等待队列最大容量设置为 10，然后启动测试。

多次测试的平均结果如表 1 所示，其中“总耗时”列表示从启动测试到所有场景绘制任务完成的时间。

表 1 任务调度策略测试
Tab. 1 Tests of different task scheduling strategies

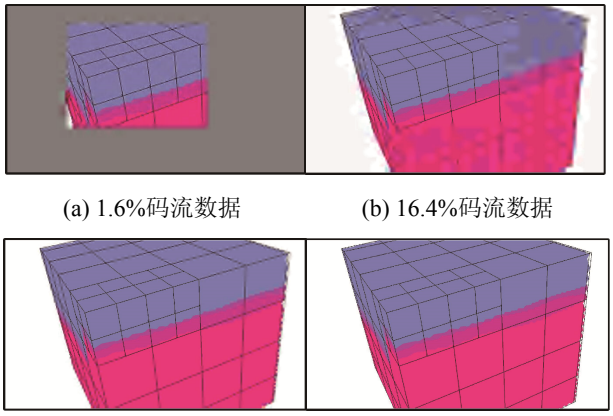
调度策略	体块请求总次数	未命中次数		总耗时/ms
		纹理数据缓冲区	原始数据缓冲区	
FCFS	80 443	46 907	6 868	85 336
在线匹配相关性	80 443	40 706	6 486	81 005
基于 MLP 的相关性	80 443	41 987	6 638	73 654

采用上述 3 种调度策略时，总的纹理数据命中率分别为 41.6%，49.4%以及 47.8%，基于 MLP 的方法比在线直接计算任务间视点相关性的方法在命中率上略有下降，但相对于 FCFS 策略仍提升了 6.2%。

从绘制任务处理效率角度来看，当前配置下可并行执行绘制任务数为 3，即为 3 倍计算资源，对测试数据进行分析可得，采用上述 3 种调度策略，不同视点下平均绘制时间分别为 512 ms，486 ms 以及 441 ms，可见在采用基于视点相关性的批量并行绘制任务调度策略时，绘制任务的处理速度也有相应的提升，基于在线数据匹配的方法处理时间降低了 5%，基于 MLP 的方法处理时间降低了 14%。随着地震体块数量和分辨率层次增加，该调度策略的优势将更加明显。在直接计算绘制任务的数据相关性过程中，使用体块列表相互匹配的方法计算量大且耗时多，而通过引入前馈神经网络 MLP 对相关性计算过程进行优化，可节约调度时间，但由于训练所得的相关性计算模型是对数据匹配方法的拟合，会存在一定的误差，因此命中率略有下降。

5.2 图像网络传输与显示质量分析

图 8 为基于 JPEG2000 的图像渐进式传输效果，客户端在接收到 1.6%的数据时便可显示用户 ROI 的大致情况；在接收到 16.4%的数据时，客户端已经可以获得整个地震体可视化的基本效果；而当接收 44.5%的数据时，地震体的可视化效果已可以清晰地在客户端进行显示，此时用户可以根据自身需求选择继续等待以获取更清晰的可视化结果，或者进行新的交互，请求新视点下的场景图像。



(a) 1.6%码流数据 (b) 16.4%码流数据

(c) 44.5%码流数据 (d) 完整码流数据

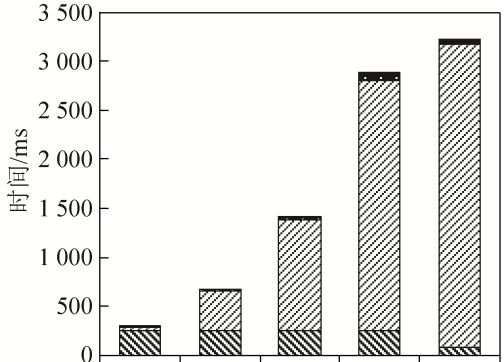
图 8 JPEG2000 图像渐进式传输
Fig. 8 Progressive transmission of JPEG2000 images

为模拟移动网络信号较差的野外环境，将网络速度限制为 100 KB/s 进行测试，图 8 所展示的各个渐进效果对应的传输时间如图 9 所示，可见在低

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss7/14
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807014

第 30 卷第 7 期 系统仿真学报 Vol. 30 No. 7
2018 年 7 月 Journal of System Simulation Jul., 2018

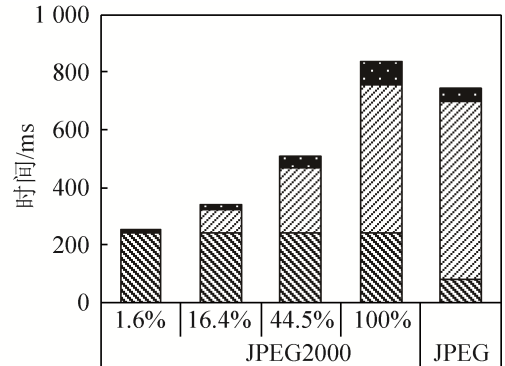
速网络环境中，使用 JPEG2000 标准对绘制场景的光栅化图像进行压缩处理，使图像传输效率更高。



	1.6%	16.4%	44.5%	100%	JPEG
	JPEG2000				
解压时间	1.3	12.3	37.7	83.4	47
传输时间	40	420	1140	2560	3100
压缩时间	242	242	242	242	78

图 9 100 KB/s 网络中可视化结果传输效率
Fig.9 Transmission efficiency of visualization results in 100 KB/s network environment

在网络速度为 500 KB/s 环境中对应的传输时间如图 10 所示，由此可见在高速网络环境中，使用 JPEG2000 标准对绘制场景的光栅化图像进行压缩处理，在渐进式传输中其效率相对更高，但在对完整可视化图像数据进行传输时其效率略低于使用 JPEG 标准的方式。



	1.6%	16.4%	44.5%	100%	JPEG
	JPEG2000				
解压时间	1.3	12.3	37.7	83.4	47
传输时间	8	84	228	512	620
压缩时间	242	242	242	242	78

图 10 500 KB/s 网络中可视化结果传输效率
Fig. 10 Transmission efficiency of visualization results in 500 KB/s network environment

综上所述，本文所研究方法在网络带宽有限的野外勘探中会有良好的可视化交互效果，高速网络下用户也可根据实际需求选择是否浏览更清晰的图像。

6 结论

本文针对野外开采作业中可携带的移动计算平台性能不足、网络带宽有限的问题，提出将远程可视化技术与大规模地震体绘制相结合的解决方案。通过对多客户端的多视点相关性进行分析，优化了并行绘制任务调度策略，实现了基于视点相关性的批量并行任务调度，有效提高了缓冲区数据复用率和命中率，整体上提升了绘制任务执行效率。设计的基于并行保护锁的 LRU 更新策略使缓冲区能够有效支持上述多个绘制任务并行访问。在有限网络带宽下，利用基于感兴趣区域优先编码的图像渐进式传输与显示，可优先浏览感兴趣区域和整体图像信息，提升了用户交互体验。根据上述研究实现了面向多用户的大规模地震体数据远程可视化原型系统，并对关键技术进行了测试和评估，验证了相关设计的合理性与有效性。进一步的工作将根据网络带宽和服务器渲染响应时间研究自适应的图像序列传输与缓存调度策略，并支持用户更灵活地选择和生成地震体感兴趣区，实现更高质量的远程可视化服务体验。

参考文献：

[1] 郑利平, 陈斌, 王文平, 等. 基于分布式渲染架构的远程可视化研究 [J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(7): 1438-1449.
Liping Z, Bin C, Wenping W, et al. Remote Visualization Based on Distributed Rendering Framework [J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(7): 1438-1449.

[2] Lamar E, Hamann B, Joy K. Multiresolution Technique for Interactive Texture-based Volume Rendering [C]// Proceedings of the IEEE Visualization Conference. Piscataway: IEEE, 1999: 355-361.

[3] Bethel W, Tierney B, Lee J, et al. Using High-Speed WANs and Network Data Caches to Enable Remote and

Distributed Visualization [C]//Proceedings of the ACM/IEEE Supercomputing Conference. Piscataway: IEEE, 2000: 28.

[4] Lin N H, Huang T H, Chen B Y. 3D Model Streaming Based on JPEG 2000 [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics (S0098-3063), 2007, 53(1): 182-190.

[5] Lamberti F. A Streaming-based Solution for Remote Visualization of 3D Graphics on Mobile Devices [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics (S1077-2626), 2007, 13(2): 247-260.

[6] 金平, 张海东, 齐越, 等. 基于远程渲染的三维模型发布系统 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(3): 337-341.
Ping J, Haidong Z, Yue Q, et al. Remote-Rendering Based 3D Model Publishing System[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(3): 337-341.

[7] Chen J, Yoon I, Bethel W. Interactive, Internet Delivery of Visualization via Structured Prerendered Multiresolution Imagery [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2008, 14(2): 302-312.

[8] 罗乐, 刘轶, 钱德沛. 内存计算技术研究综述 [J]. 软件学报, 2016, 27(8): 2147-2167.
Le L, Yi L, Depei Q. Survey on In-Memory Computing Technology [J]. Journal of Software, 2016, 27(8): 2147-2167.

[9] Patterson D, Anderson T, Cardwell N, et al. A Case for Intelligent RAM:IRAM [J]. IEEE Micro (S0272-1732), 1997, 17(2): 34-44.

[10] Murakami K, Inoue K, Miyajima H. Parallel Processing RAM Chip with 256Mb DRAM and Quad Processors [C]//Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference. Piscataway: IEEE, 1997: 228-229.

[11] Rixner S , Dally W J, Kapasi U J, et al. Memory Access Scheduling [C]//Proceedings of the 27th Annual International Symposium on Computer Architecture. New York: ACM, 2000: 128-138.

[12] Mutlu O, Moscibroda T. Parallelism-Aware Batch Scheduling: Enhancing both Performance and Fairness of Shared DRAM Systems [C]// Proceedings of the 35th Annual International Symposium on Computer Architecture. New York: ACM, 2008: 63-74.

[13] Hur I, Lin C. Adaptive History-based Memory Schedulers [C]//Proceedings of the 37th Annual International Symposium on Micro architecture. Piscataway: IEEE, 2004: 343-354.

[14] 高珂, 陈荔城, 范东睿, 等. 多核系统共享内存资源分配和管理研究 [J]. 计算机学报, 2015, 38(5): 1020-1034.
Ke G, Licheng C, Dongrui F, et al. Shared Memory Resources Allocation and Management Research on Multicore Systems [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(5): 1020-1034.

[15] 孙水发, 张华熊, 仇佩亮. JPEG 2000--新的静止图像压缩标准 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(11): 1339-1346.
Shuifa S, Huaxiong Z, Peiliang Q. JPEG 2000-The New Still Image Compression Standard [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(11): 1339-1346.

[16] 张繁, 袁兆康, 肖凡平, 等. 基于 Spark 的大数据热图可视化方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(11): 1881-1886.
Fan Z, Zhaokang Y, Fanping X, et al. Research on Heatmap for Big Data Based on Spark [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(11): 1881-1886.

[17] Parsonson L, Grimm S, Bai L, et al. Medical Imaging in A Cloud Computing Environment [C]//International Conference on Cloud Computing and Services Science. Setubal, Portugal: SCITEPRESS, 2011: 327-332.

[18] Hornik K, Stinchcombe M, White H. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators [J]. Neural Networks (S0893-6080), 1989, 2(5): 359-366.

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss7/14
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807014