

三维地学实体多粒度栅格剖分与布尔运算的并行算法

江锦成^{1,2}, 郭甲腾¹, 吴立新^{1,2}, 张荣兵¹, 杨宜舟¹

1. 东北大学资源与土木工程学院测绘遥感与数字矿山研究所, 沈阳 110819
2. 北京师范大学减灾与应急管理研究院空间信息科学与技术研究所, 北京 100875

摘要 三维栅格是空间单元属性插值与实体内部特征精细表达的理想模型, 但海量栅格单元的快速剖分与数据压缩成为其应用瓶颈。本文分析了三维地学实体模型三维栅格剖分的研究现状, 针对矢栅转换与数据存储的时间效率及空间节约问题, 面向多核 CPU 与计算集群新型硬件架构, 采用 MPI 并行技术, 设计了一种基于八叉树的地矿实体多粒度并行三重轴向扫描剖分算法 (P-TAS)。并面向矿山及地下工程开挖模拟与动态仿真需求, 设计并实现了基于多粒度栅格的三维模型布尔运算算法。测试表明, 该剖分算法的并行效率达 50%—60%, 数据压缩率达 80% 以上, 具有推广和应用价值。

关键词 三维地学模型; 数字矿山; 矢栅转换; 多粒度; 并行计算; 布尔运算

中图分类号 P208

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.35.002

Multi-granularity Rasterization and Boolean Operation Parallel Algorithm for 3D Spatial Entities

JIANG Jincheng^{1,2}, GUO Jiateng¹, WU Lixin^{1,2}, ZHANG Rongbing¹, YANG Yizhou¹

1. Institute for Geo-informatics & Digital Mine Research, College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China
2. Institute of Spatial Information Science and Technology, Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract 3D raster is an ideal model which performs really well at the aspects of detailed representation and spatial interpolation for internal attributes of spatial entities. However, due to the large scale of raster data, rasterizing efficiency and data compression still remain the bottlenecks in practical applications. The present situation of rasterization algorithms for 3D vector model was comprehensively reviewed. In order to improve the time efficiency of 3D vector-raster conversion and save storage space of raster data, a Parallel Ternary Axes Scan (P-TAS) algorithm, which could run on the new multi-core CPU and high performance computer cluster, was designed for transforming 3D vector model to raster model with Octree structure by using MPI parallel techniques. Furthermore, the Boolean operation algorithm for 3D spatial entities represented with multi-granularity raster was designed for the dynamic simulation of underground excavation process. The experiment results demonstrate that the parallel efficiency of P-TAS is about 50%—60% and the data compression ratio is about 80%. The high application values of P-TAS and Boolean algorithms proposed are proved up to the hilt.

Keywords 3D geosciences model; digital mine; vector-raster transformation; multi-granularity; parallel computation; Boolean operation

0 引言

三维栅格模型(又称体素、块段模型)数据结构简单、形

状规则、粒度灵活,适用于描述实体属性的非均匀空间分布,已广泛用于矿山储量计算、城市地下资源评估和有限元分

收稿日期: 2011-10-28; 修回日期: 2011-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001228); 国家高技术研究发展计划(863 计划) 主题项目(2011AA120302)

作者简介: 江锦成, 博士研究生, 研究方向为三维地学建模、复杂地理计算并行算法等, 电子邮箱: jiangjincheng0305@126.com; 郭甲腾(通信作者), 讲师, 研究方向为三维地学建模与空间分析、三维实体拓扑关系、复杂地理计算并行算法等, 电子邮箱: guojiateng@mail.neu.edu.cn

析。然而,在计算机中构建客观实体的三维模型,多通过采集其几何特征点作为最初的数据来源,进而采用一定的三维重构方法,由点到线、由线及面,最终形成基于点、线、面等几何要素组合表达的三维矢量模型,再经剖分和转换得到三维栅格模型。因此,高效率的矢栅转换算法成为其应用关键。

现有三维矢量模型的栅格剖分算法研究现状为:(1)在三维实体的复杂度方面,或只考虑了实体表面剖分^[1],或顾及了实体内部却未解决孔洞问题^[2],或顾及了孔洞剖分问题却未实现多粒度表达^[3];(2)在剖分时间效率和数据压缩方面,一些八叉树剖分算法^[4-8]的大规模精细剖分效率不高,已有学者采用并行技术对实体表面的八叉树剖分进行加速,如基于 GPU 重构三维实体表面的并行算法^[9]、基于八叉树雕刻的实时建模并行算法^[10]等,但均未考虑实体内部的精细剖分问题。

本文针对数字矿山、数字岩土等领域中的开挖模拟与采矿仿真需求,面向多核 CPU 和计算机集群硬件架构,在串行栅格剖分算法基础上,采用 MPI(Message Passing Interface) 技术设计实现了地矿体三维矢量模型的多粒度栅格剖分及实体布尔运算的并行算法,解决了含孔洞空间地矿体表面与内部的高效多粒度栅格剖分及实体开挖并行计算问题,实现了地矿实体的多分辨率快速可视化,可支持数字矿山及大型地下工程开挖过程的动态仿真。

1 地下工程开挖过程仿真的算法需求

在计算机中模拟地下工程的动态开挖过程,首先根据实测数据和设计数据,采用一定的建模方法^[11-14]建立被开挖体(如岩体、矿体)及开挖体(如隧洞、巷道)的三维矢量实体模型;然后按模拟精度需求将矢量模型转换为三维栅格实体模型,并采用多粒度层次结构组织数据,以减少开挖运算的内存开销、提高效率,实现开挖过程高效仿真。

如图 1 所示,地下工程动态开挖模拟主要分为 3 个步骤,需解决 3 个关键算法。

(1) 复杂实体栅格剖分,基于并行三重轴向扫描剖分算法(Parallel Ternary Axes Scan Algorithm, P-TAS)实现复杂实体模型的高效剖分。

(2) 多粒度栅格组织,基于八叉树结构,将单一粒度栅格转化为多粒度栅格,并利用 MPI 技术将计算任务分配给多个计算节点执行,实现多粒度栅格并行化构建。

(3) 栅格模型布尔运算,通过比较两个实体模型的八叉树层次结构,实现多粒度三维栅格模型的布尔运算。

2 并行算法设计

2.1 并行栅格剖分 P-TAS 算法

空间实体的三维栅格模型,可理解为一定栅格粒度下空间实体所包含栅格单元的集合体。因此,矢量实体的栅格剖分问题,可转化为判断待定栅格的中心点是否位于矢量实体

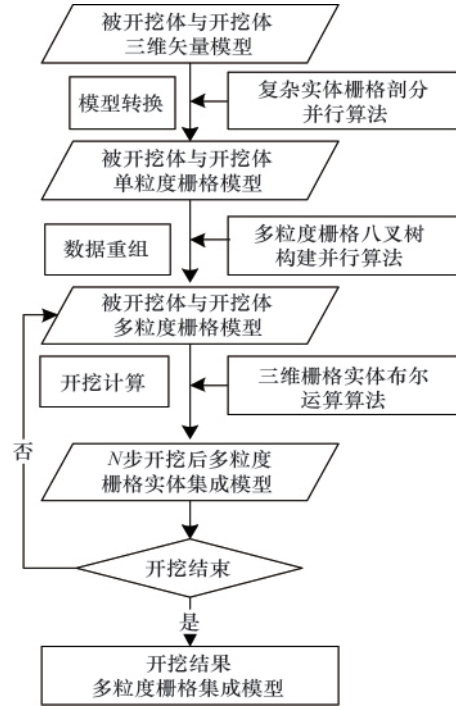


图 1 地下工程动态开挖仿真流程的关键算法
Fig. 1 Key algorithms in the process of dynamic excavation simulation for underground engineering

内部。基于三重坐标轴向扫描的 TAS 算法^[15]解决了以三角形为基本构模单元、内含孔洞的三维复杂实体模型栅格剖分问题,其基本原理和步骤如下。

(1) 栅格预剖分:确定栅格粒度和剖分基点,对实体模型的最小包围盒进行栅格预剖分,形成待定栅格集合。

(2) 交点扫描计算:如图 2 所示,构建一系列经过待定栅格中心、平行于三坐标轴方向的三组扫描直线,分别计算其与矢量模型所有三角形的相交情况,记录交点。

(3) 坐标区间数组构建:对于不含孔洞的实体,记录经过各栅格中心的三条扫描线与实体交点坐标的最小值($x_{min}, y_{min}, z_{min}$)和最大值($x_{max}, y_{max}, z_{max}$);对于含孔洞实体,需同时记录扫描线穿越孔洞边界的坐标区间。

(4) 内外栅格判定:若待定栅格中心点的坐标满足: $x_i \in [x_{min}, x_{max}]$ 且 $y_i \in [y_{min}, y_{max}]$ 且 $z_i \in [z_{min}, z_{max}]$,则其在实体内部,否则在外部;对于含孔洞实体,进一步判断孔洞坐标区间,以剔除孔洞内部栅格,最终完成栅格剖分。

TAS 为计算密集型算法,其计算任务集中在交点扫描计算和栅格判定两方面。因此,并行 P-TAS 算法需着重考虑计算任务的分配问题。设预剖分栅格集合三坐标轴方向的数目分别为 N_x, N_y, N_z ,计算进程数为 W ,则 $W-t$ 的交点扫描计算任务分配如下。

x 轴方向:令 $L_x=N_x/W$,在 Oyz 平面的扫描区域的范围是 $n_y \in [0, N_y-1], n_z \in [t \times L_x, (t+1) \times L_x]$;

y 轴方向:令 $L_y=N_y/W$,在 Oxz 平面的扫描区域的范围是

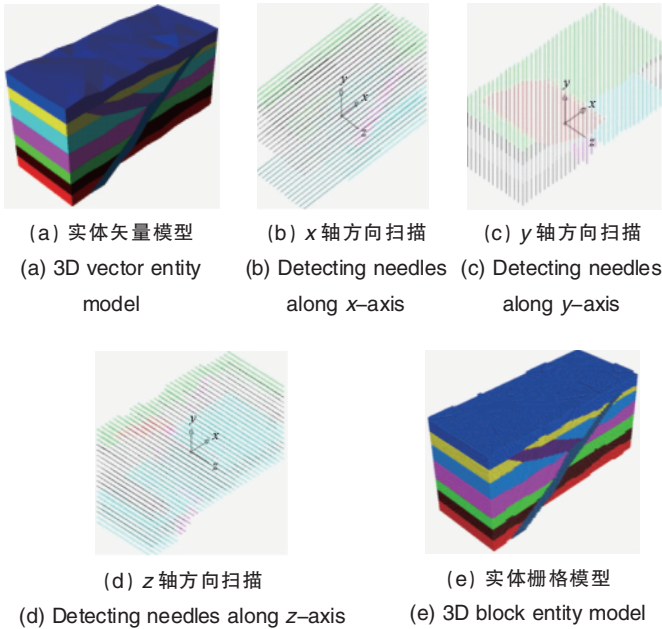


图2 TAS算法原理与三维地层模型剖分实例
Fig. 2 Principle of TAS algorithm and a division example of 3D strata model

$n_x \in [0, N_x - 1], n_z \in [t \times L_x, (t+1) \times L_x];$
 z 轴方向: 令 $L_z = N_z / W$, 在 Oxy 平面的扫描区域的范围是
 $n_x \in [0, N_x - 1], n_y \in [t \times L_z, (t+1) \times L_z];$
 待所有计算进程完成交点计算后, 各计算节点按组收集方式获取各计算进程的结果数据; 然后, 各计算进程并行判定所有栅格的属性。其中, $W-t$ 分配的计算区域是 $n_x \in [0, N_x - 1], n_y \in [0, N_y - 1], n_z \in [t \times L_x, (t+1) \times L_x]$ 。

2.2 多粒度栅格数据组织原理

本文采取“先剖分, 后合并”的思想, 即先采用 P-TAS 算法进行单粒度栅格剖分, 再根据栅格映射准则将所有栅格单元映射到八叉树结构中的相应位置, 并根据栅格合并准则“由下而上”递归合并所有子节点直至根节点, 最终形成八叉树结构的多粒度栅格模型。

(1) 栅格映射准则: 规定最小包围盒中坐标值 (x, y, z) 最小的栅格为剖分原点, 其三维栅格坐标为 $(0, 0, 0)$, 映射为八叉树中最左下角的叶子节点。已知栅格数目为 $N_x \times N_y \times N_z$, 令 $N_{\max} = \max(N_x, N_y, N_z)$, 则整棵八叉树的深度 $n = \lceil \lg N_{\max} \rceil$ ($\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算)。对于任意栅格单元 (栅格坐标为 (i, j, k)), 对应于八叉树的第 n 层的某个叶节点, 记从八叉树根节点到该叶节点路径上的第 h 层 ($1 \leq h \leq n$) 节点为 F_h , 则 F_h 与其兄弟节点的相对位置为 $((i \bmod 2^{n-h+1}) \div 2^{n-h}), (j \bmod 2^{n-h+1}) \div 2^{n-h}, (k \bmod 2^{n-h+1}) \div 2^{n-h}$, 式中 \bmod 为求余运算, \div 为整除运算。

(2) 栅格合并准则: 单一粒度的栅格存在两种属性, 即实体内部栅格和外部栅格, 分别对应黑栅格和白栅格 (图3)。合并时, 若子栅格全为黑栅格或白栅格, 其合并后父栅格属性仍为黑栅格或白栅格; 否则合并为灰栅格。

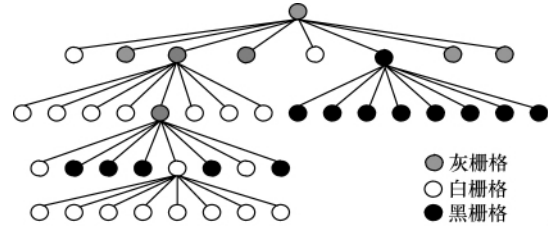


图3 八叉树合并准则
Fig. 3 Mergence criterion for Octree

2.3 多粒度栅格并行构建算法

多粒度栅格并行构建通过以下 3 个步骤完成 (图4)。

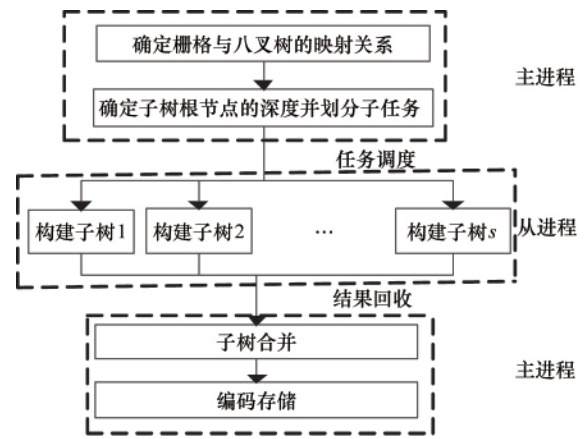


图4 多粒度栅格模型并行构建流程
Fig. 4 Parallel construction flow chart for multi-granularity raster model

(1) 主进程确定映射关系, 并根据从进程数划分子树。子树高度由八叉树整体高度减去子树根节点所处深度 m 得到。 m 可由下式计算而得:

$$m = \lceil \log_8 W \rceil \quad (1)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算, W 为参与计算任务的进程数。

(2) 主进程发送待构建子树的参量信息至各从进程, 从进程接收消息后并行构建子树。子树参量信息包括子树高度及左下角栅格坐标。

记从八叉树根节点到子树根节点路径上的第 h 层 ($1 \leq h \leq m$) 节点为 F_h , 设 F_h 在第 h 层栅格坐标系 (即 F_h 及其 7 个兄弟节点对应栅格所构成的栅格坐标系) 下的坐标为 (i_h, j_h, k_h) ($i_h, j_h, k_h = 0$ 或 1), 则子树左下角栅格在第 n 层原始栅格坐标系 (即第 n 层所有节点对应的栅格所构成的栅格坐标系) 下的坐标 (i_{n0}, j_{n0}, k_{n0}) 为

$$\begin{cases} i_{n0} = i_m \times 2^{n-m} + i_{m-1} \times 2^{n-m-1} + \dots + i_1 \times 2^{n-1} \\ j_{n0} = j_m \times 2^{n-m} + j_{m-1} \times 2^{n-m-1} + \dots + j_1 \times 2^{n-1} \\ k_{n0} = k_m \times 2^{n-m} + k_{m-1} \times 2^{n-m-1} + \dots + k_1 \times 2^{n-1} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 待各从进程完成子树构建后, 主进程回收各子树并将其合并为完整八叉树。

为提高算法并行效率,还应考虑最小通讯和负载平衡两个原则。

(1) 最小通讯,主进程在任务分配时只向从进程发送子树深度和左下角栅格坐标两个参数;回收计算结果时只接收子树根节点属性值参数,以此减少数据通讯,进而提高有效计算在整个算法流程中所占的比例。

(2) 负载平衡,根据计算环境可用的CPU核心数量和计算任务量,选择合理的进程数,并采用主从模式进行任务的动态调度。由于子任务总数 $s=8^m$ (m 为子树根节点所处的深度),因此实际并行计算中,进程数 W 总是小于等于子任务总数 s 。为避免任务粒度差异导致的各进程计算时间不均衡及部分进程空闲的情况,同一进程可连续执行多个子任务。

2.4 基于多粒度栅格的实体模型布尔算法

设实体 1 的栅格模型对应于八叉树 T_1 , 实体 2 的栅格模型对应于八叉树 T_2 , 则实体 1 和实体 2 的布尔运算可由以下步骤实现。

(1) 对于 T_1 上的某一黑节点 $P_1(P_1 \in T_1)$, 获取从根节点 O_1 到 P_1 的路径 O_1P_1 , 如图 5(a) 红色线段所示。

(2) 循 O_1P_1 路径沿深度方向搜索 T_2 各节点。若搜索深度小于 O_1P_1 且搜得黑节点 $P_2(P_2 \in T_2)$, 则记 P_2 为第一类节点, 如图 5(b) 所示; 若搜索深度小于等于 O_1P_1 且搜得白节点 $P_3(P_3 \in T_2)$, 则记 P_3 为第二类节点, 如图 5(c) 所示; 否则, 若搜索深度等于 O_1P_1 , 则搜得灰或黑节点 $P_4(P_4 \in T_2)$, 记 P_4 为第三类节点, 如图 5(d) 所示。

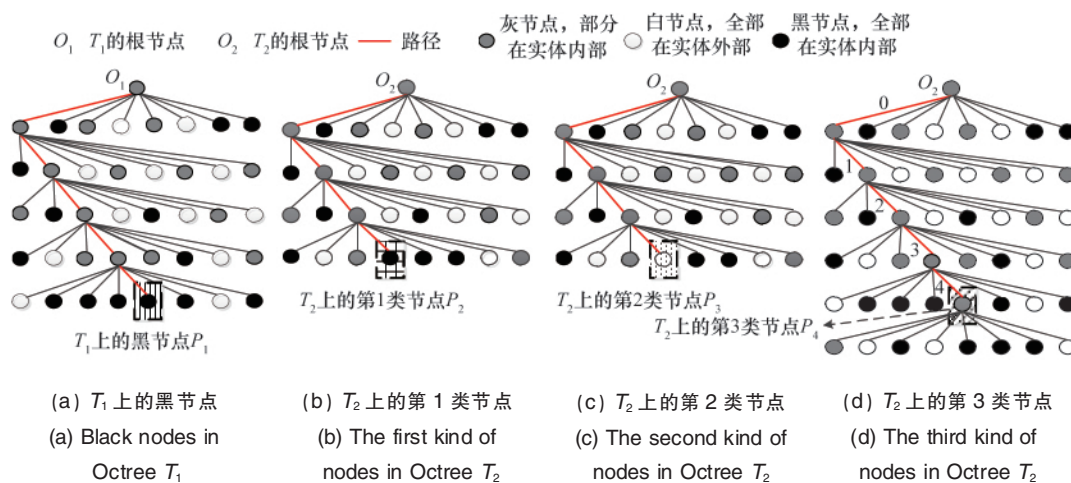


图 5 八叉树搜索结果的三类节点
Fig. 5 Three kinds of Octree searched nodes

(3) 对搜索到的节点进行差、交和并布尔运算。设 O_2P 为 T_2 中 O_1P_1 的对应路径, 以下给出针对不同类型节点的差、交和并运算方法。

① 第 1 类节点

差集运算: a, 令 $Q=P_2$; b, 为 Q 添加 8 个黑子节点 $Q_i(i=0, 1, \dots, 7)$; c, 令 $Q=Q_k, Q_k$ 为所有 Q_0-Q_7 中位于 O_2P 路径的节点; d, 重复步骤 b, c 直至路径 O_2Q 与 O_2P 重合; e, 将 Q 的属性设置为白节点。

交集运算: 记录节点 P_1 。

并集运算: 不作任何修改, 保持 T_2 结构不变。

② 第 2 类节点

差集运算: 不作任何修改, 保持 T_2 结构不变。

交集运算: 此时无交集, 不记录任何节点。

并集运算: a, 令 $Q=P_3$, 若路径 O_2Q 与 O_2P 重合, 则转到 e, 否则, 转到 b; b, 为 Q 添加 8 个白子节点 $Q_i(i=0, 1, \dots, 7)$; c, 令 $Q=Q_k, Q_k$ 为所有 Q_0-Q_7 中位于 O_2P 路径的节点; d, 重复步骤 b, c 直至路径 O_2Q 与 O_2P 重合; e, 将 Q 的属性设置为黑节点。

③ 第 3 类节点

差集运算: 将 P_4 的属性设置为白节点, 若 P_4 存在子孙节点则全部剔除。

交集运算: 记录以 P_4 为根节点子树的所有黑节点。

并集运算: 将 P_4 的属性设置为黑节点, 若 P_4 存在子孙节点则全部剔除。

(4) 重复执行前 3 步直至遍历完 T_1 上所有的黑节点。

差集和并集运算后的 T_2 上所有黑节点即为所求差集或并集; 交集运算中, 最后记录下的叶节点即为所求交集。

3 并行算法应用实例与测试分析

以沈阳市某小区地下停车场开挖工程仿真为例, 基于地质勘察钻孔数据, 采用广义三棱柱模型^[12-13](GTP)建立了该小区岩土地层的三维矢量实体模型(图 6(a)), 该模型包含 747 个采样点, 1550 个三角形。

基于该模型实例和多机多核硬件环境(节点数: 2; CPU: 2.00GHz; 内存: 2GB), 采用主从并行模式(主节点单核, 计算节点双核), 对本文提出的 P-TAS 并行多粒度栅格剖分和布

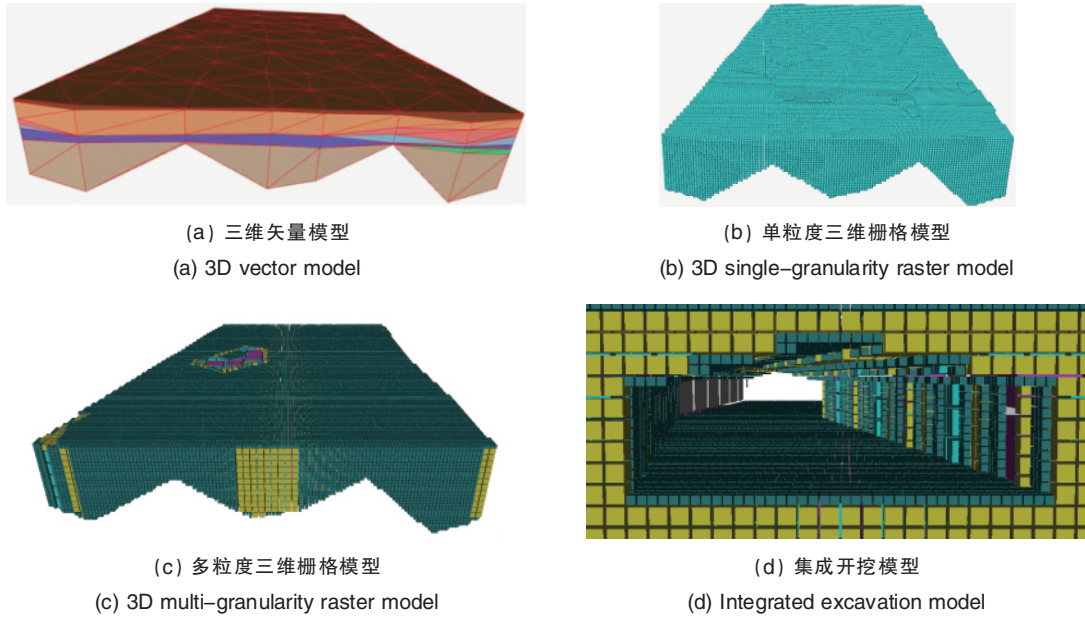


图 6 地下工程开挖模拟

Fig. 6 Excavation modeling of underground engineering

尔操作算法进行了时间效率和数据压缩效果测试,单粒度栅格模型、多粒度模型及集成开挖模型的可视化结果如图 6 (b)、6(c)、6(d)所示。

3.1 时间效率分析

衡量并行算法性能的主要指标为加速比和并行效率,其定义如下。

(1) 加速比,同一任务在单处理器系统和并行处理器系统中运行所消耗时间的比率。

$$S_p(q) = \frac{T_s}{T_p(q)} \quad (3)$$

其中, T_s 为单处理器系统执行时间, q 为处理器个数, $T_p(q)$ 为并行处理器系统执行时间。

(2) 并行算法效率,加速比除以处理器个数,它反映了并行处理器系统的执行效率。

$$E_p(q) = \frac{S_p(q)}{q} \quad (4)$$

采用上述评价指标,对 P-TAS 并行算法与同环境下的串行算法进行对比,测试数据及时间效率曲线参见表 1 和图 7。

由测试结果可知,P-TAS 算法可实现亿级栅格单元的稳态剖分,且在两节点三核环境下的加速比达到 1.6,并行效率

表 1 P-TAS 算法时间效率测试

Table 1 Time efficiency test of P-TAS algorithm

栅格粒度 / (m×m×m)	栅格数	串行时间/s	并行时间/s	加速比	并行效率
2.0×2.0×2.0	95676	3.760	2.280	1.65	0.550
0.5×0.5×0.5	5903370	58.984	35.195	1.67	0.557
0.2×0.2×0.2	90890756	377.944	223.643	1.69	0.563
0.1×0.1×0.1	726691164	1588.137	949.236	1.64	0.547

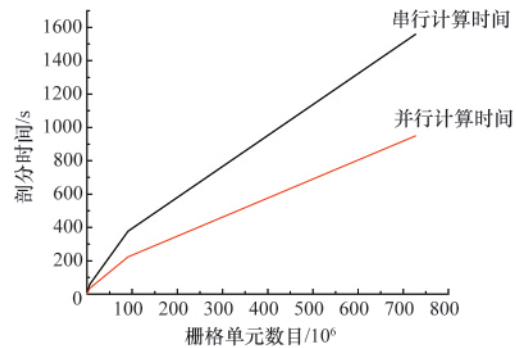


图 7 串行、并行算法时间效率比较曲线

Fig. 7 Efficiency comparison between S-P algorithms

为 55%。本次测试中,主节点负责任务的分配与数据回收,从节点负责剖分计算,因此,若增加从节点即计算节点数,并行效率仍有较大提升空间。

3.2 数据压缩率测试

采用不同的单元剖分尺寸,对不同栅格粒度下单粒度、多粒度模型的数据存储空间进行测试比较,测试数据及所得数据压缩率曲线参见表 2 和图 8。

表 2 多粒度栅格模型数据压缩率测试

Table 2 Compression ratio test of multi-granularity raster model

栅格粒度 / (m×m×m)	单粒度栅格数	单粒度数据存储量/KB	多粒度数据存储量/KB	压缩率
2.0×2.0×2.0	47487	1716	260	84.85%
1.0×1.0×1.0	371192	13413	1893	85.89%
0.5×0.5×0.5	2982746	107775	6108	94.34%
0.4×0.4×0.4	5824722	210464	9969	95.26%
0.3×0.3×0.3	1.29×10 ¹⁴	499043	17572	96.48%

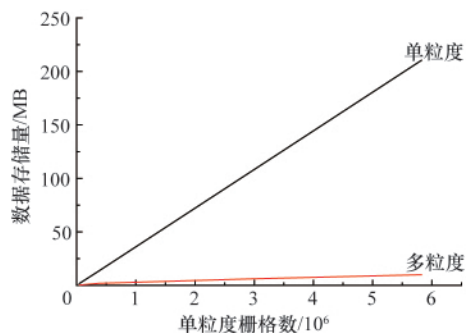


图 8 多粒度栅格模型数据压缩率

Fig. 8 Data compression ratio of multi-granularity model

由测试结果可知,采用八叉树结构的多粒度栅格模型,在确保精细度的前提下可对实体内部的多数栅格进行合并,显著减少了数据存储空间,压缩率达到 80% 以上,且压缩率随着数据规模的增大而增大。该方法可应用于海量栅格单元的多粒度组织、内存管理与数据存储。

4 结论

本文提出了一种面向多核 CPU 与计算集群硬件架构的空间实体多粒度栅格剖分并行算法及多粒度栅格模型布尔操作算法,并针对地下工程三维建模与动态开挖仿真应用,进行了多粒度栅格剖分、多分辨率可视化表达和开挖过程模拟计算。算法测试和应用结果分析表明:

(1) 在多核 CPU 与计算集群硬件环境下, P-TAS 并行剖分算法实现了亿级栅格单元的稳态剖分,且加速效果明显,主从模式单计算节点时并行效率达 50% 以上,若增加计算节点数,加速比及并行效率仍有提升空间;

(2) 采用多粒度栅格模型表达空间实体可显著压缩数据存储空间,压缩率达 80% 以上,且压缩率随栅格粒度减小和数目增多而显著提高,适用于精细尺度下地矿实体模型的多粒度数据组织。

本文提出的 P-TAS 并行多粒度栅格剖分与布尔操作算法,适用于多核 CPU 与计算集群环境下地矿及岩土工程开挖模拟,结合三维可视化技术可实现开挖过程的动态仿真和多分辨率表达。技术成果可推广应用于多机多核和计算集群等新型硬件体系结构下矿山井巷、交通隧道、城市地铁、地下空间等地下工程的开挖模拟与仿真分析。

参考文献 (References)

- [1] Huang J, Yagel R, Filippov V, et al. An accurate method for voxelizing polygon meshes[C]. ACM 1998 Symposium on Volume Visualization, New York, NY USA, Oct 24-24, 1998.
- [2] 陈学工, 邱华, 付金华, 等. 基于三角形不规则网模型的快速体素化方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(12): 3281-3287.
Chen Xuegong, Qiu Hua, Fu Jinhua, et al. Journal of Computer Applications, 2010, 30(12): 3281-3287.
- [3] Guo J T, Wu L X, Ma H B, et al. Regular hexahedron tessellation

- algorithm for 3D complex entity models with inside cavities [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, USA, July 25-30, 2010.
- [4] 何鑫, 王李管. 一种基于八叉树的地质体三维网格剖分方法 [J]. 金属矿山, 2008, 389(11): 66-70.
He Xin, Wang Liguang. Metal Mine, 2008, 389(11): 66-70.
- [5] 胡小红, 周旺, 黄临平, 等. 三维散乱点的八叉树建模及程序实现[J]. 科技广场, 2007(5): 41-43.
Hu Xiaohong, Zhou Wang, Huang Linping, et al. Science Mosaic, 2007 (5): 41-43.
- [6] 吴晓军, 刘伟军, 王天然. 基于八叉树的三维网格模型体素化方法[J]. 工程图学学报, 2005, 26(4): 1-7.
Wu Xiaojun, Liu Weijun, Wang Tianran. Journal of Engineering Graphics, 2005, 26(4): 1-7.
- [7] Pomno J J, Aldegunde M, Garcia-Loureiro A J. Optimization of an octree-based 3-D parallel meshing algorithm for the simulation of small-feature semiconductor devices [C]. International Conference on Parallel Computing in Malaga, Spain, September 13-16, 2005.
- [8] Tu T, O'Hallaron D R, Ghattas O. Scalable parallel octree meshing for terascale application [C]. 2005 ACM/IEEE Conference on Supercomputing, Washington, DC, USA, Nov 12-18, 2005.
- [9] Zhou K, Gong M M, Huang X, et al. Data-parallel octree for surface reconstruction [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 17(5): 669-681.
- [10] Soares L, Merrier C, Raffin B, et al. Parallel adaptive octree carving for real-time 3D modeling [C]. 2007 IEEE Virtual Reality Conference, Charlotte, NC, March 10-14, 2007.
- [11] 郑坤, 刘修国, 吴信才, 等. 顾及拓扑面向实体的三维矢量数据模型 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(3): 474-479.
Zheng Kun, Liu Xiuguo, Wu Xincan, et al. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(3): 474-479.
- [12] Wu L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geosciences modeling system [J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(4): 405-418.
- [13] Guo J T, Yang Y Z, Wu L X, et al. A novel method for modeling complex 3D geological body with stratal pinch-out [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, July 24-29, 2011.
- [14] 马洪滨, 郭甲腾. 基于剖面的面体混合三维地质建模研究[J]. 金属矿山, 2007(7): 50-52.
Ma Hongbin, Guo Jiateng. Metal Mine, 2007(7): 50-52.

(责任编辑 代丽)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。