

分区动态地形的一种时序模型

陈国军^{1,2} 赵沁平¹

¹(北京航空航天大学计算机学院 北京 100083)

²(中国石油大学计算机与通信工程学院 东营 257061)

(gjchen@mail.hdpu.edu.cn)

A Time Serial Model for Divisional Dynamic Terrain

Chen Guojun^{1,2} and Zhao Qinping¹

¹(School of Computer Science, Beihang University, Beijing 100083)

²(College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061)

Abstract In distributed virtual environment, terrain can be changed as a result of the interaction between the entity and the terrain. To maintain consistency and reliability of the simulation it is required to serialize and arbitrate terrain changes. A time serial model for divisional dynamic terrain is built according to terrain local modifications. The model is based on a collection of a divisional terrain data defined as simplicial complexes arranged into a partially ordered set by time and space. Features of the model are to provide an insertion of terrain modification and an extraction of terrain at a particular moment. Experimental results on real terrain data show that the algorithm based on one DAG improves the computing performance of an extraction of terrain.

Key words dynamic terrain; simplicial complexes; time serial model; virtual environment; distributed interactive simulation(DIS)

摘要 在分布式虚拟环境中,地形因实体作用发生变化.为了使各仿真节点的地形数据保持一致,需对各节点变化的数据时序化.根据地形局部变化特点,构造了多分区动态地形的时序模型.模型把子区域地形几何数据定义为单纯复合形集,按地形变化时间顺序和空间关系组织成一个偏序集.模型支持地形变化数据动态添加,指定时刻的地形提取.实验表明,基于 DAG 表示的地形抽取算法利用变化数据间的空间关系提高了计算性能.

关键词 动态地形;单纯复合形;时序模型;虚拟环境;分布式交互仿真

中图法分类号 TP391.9

1 引言

虚拟环境(virtual environment, VE)的高逼真度体现在图形表示和实体间交互作用两个方面.地形是 VE 中多数实体的支撑体,受力作用会引起地形的变化.如何逼真地修改地形已经引起广泛的研究^[1,2],并将其应用到分布式环境中,用于表现地形

的变化.在系统运行中高程值和颜色等属性发生改变的地形称为动态地形^[3,4].文献^[3,4]详细讨论了动态地形的绘制方法.在分布式交互仿真与训练系统中,包含有大量的仿真节点,地形数据在每个仿真节点有相同的备份.美国佛罗里达中央大学(University of Central Florida, UFC)仿真与训练学院(Institute for Simulation and Training, IST)的 E²DIS(environmental effects in DIS)及 DIS Land 专

家组提出支持分布式环境中的动态地形数据管理的需求有:允许实体修改本地地形数据;提供后加入实体获取地形的历史变化数据^[5]。在分布式环境中有许多不同种类的实体参与者,它们加入仿真演练的时间是任意的,因此对于任何时刻加入的参与者而言,需要获取当前环境中地形最新的数据才能保证地形数据的一致性。由于地形数据量大,仿真实体在动态加入仿真环境时,一次性从系统其他节点获取所有地形数据需要占用较多的网络资源,而用当前环境中的地形变化数据来更新本地的地形数据,数据量少代价小。演练回放时利用历史变化数据可以快速生成指定时刻的地形,避免了依次对地形交互事件的处理来生成地形。因此,需要管理仿真过程中地形变化历史数据。文献[6,7]采用日志方式记载地形变化数据。将地形的每一次变化数据按时间顺序分配序号,后加入仿真环境的节点根据本地的序号获取新的地形变化数据。日志方式没有考虑地形变化数据间的空间关系,导致在构造最新完整地形数据时计算量增大。

为了增强 VE 中地形交互的真实性,需要考虑地形的非几何属性(如纹理、地质情况、密度等),属性的不同通过几何区域区分。文献[8]研究了多属性地形的定义和生成方法。本文针对地形属性的区域特征及动态地形变化的特点,建立了一种分区的动态地形的时序模型,该模型可以动态增加新的变化数据,并能动态抽取任何时刻的地形数据。

2 分区地形的单纯复合形表示

地形数据用三角网来表示并渲染显示,多属性把地形划分成多个子区域,形成多个子三角网。受作用后,三角网局部区域的高度发生变化,导致三角网重构,变化前后的三角网在空间上存在依赖关系,本文采用单纯复合形表示地形三角网。

2.1 单纯复合形

地形表面通过三维空间三角形网表示,为了描述地形三角网及发生变化的三角网之间的关系,引入文献[9,10]中的拓扑几何相关的定义。

定义 1. 欧氏空间中与几何无关的 $K+1$ 个点的凸包称为 K 阶单纯形,简称 K 阶单形。当 $K=2$ 时 2 阶单纯形是三角形。

单纯形 σ 的内部指单纯形 σ 的内点的集合,记为 $\Theta(\sigma)$ 。如果单纯形 γ 的顶点都是单纯形 σ 的顶点,称 γ 是 σ 的面。

定义 2. 单纯复合形是单纯形的有限集,简称复

形^[9,10],记为 Δ ,且满足:

- (1) 对每一单纯形 $\sigma \in \Delta$, σ 的所有面也属于 Δ ;
- (2) 对任意单纯形 $\sigma, \tau \in \Delta$, 有 $\sigma \cap \tau = \emptyset$ 或 $\sigma \cap \tau \in \Delta$ 。

复形的域指所有单纯形的内点和边缘点的并,记为 $\diamond(\sigma)$ 。

定义 3. 复形交运算 \otimes ^[10]。

$$\Delta_i \otimes \Delta_j = \{\sigma \in \Delta_i \mid \exists \sigma' \in \Delta_j, \Theta(\sigma) \cap \sigma' \neq \emptyset\}.$$

定义 4. 复形并运算 \oplus ^[10]。

$$\Delta_i \oplus \Delta_j = \Delta_i - \Delta_i \otimes \Delta_j \cup \Delta_j.$$

对复形序列 $\{\Delta_0, \Delta_1, \dots, \Delta_i, \dots, \Delta_n\}$, 并操作 $\bigoplus_{i=0}^k \Delta_i$ 定义为^[10]

(1) 如果 $k=0$, 那么 $\bigoplus_{i=0}^k \Delta_i = \Delta_0$;

(2) 如果 $k>0$, 那么 $\bigoplus_{i=0}^k \Delta_i = (\bigoplus_{i=0}^{k-1} \Delta_i) \oplus \Delta_k$ 。

定义 5. 如果 $\Delta_i \oplus \Delta_j$ 是复形, 并且有 $\diamond(\Delta_i \oplus \Delta_j) = \diamond(\Delta_i) \cup \diamond(\Delta_j)$, 则称 Δ_i 与 Δ_j 相容。若有 $\Delta_i \otimes \Delta_j = \emptyset$, 则称 Δ_i 与 Δ_j 完全相容。

对序列 $\{\Delta_0, \Delta_1, \dots, \Delta_i, \dots, \Delta_n\}$, 若对任意 $k > 0$, 有 $\bigoplus_{i=0}^k \Delta_i$ 与 Δ_k 相容, 则称序列为相容序列。

2.2 多分区地形区域的表示与修改

地形的属性具有区域性^[8], 组成地形区域的几何数据是三角形集, 这些三角形集是 2 阶复形, 区域 i 用复形表示为 Δ_i 。区域划分与区域内三角形生成算法保证属性子区域是复形, 这里不做证明。根据属性区域定义^[8], 对区域 i, j 有:

$$\Delta_i \otimes \Delta_j = \emptyset, \Delta_i \oplus \Delta_j = \Delta_i \cup \Delta_j.$$

那么对整个区域的复形集 $\Sigma = \{\Delta_0, \Delta_1, \dots, \Delta_i, \dots, \Delta_n\}$, 有:

$$\Delta_0 \oplus \Delta_1 \oplus \dots \oplus \Delta_k = \Delta_0 \cup \Delta_1 \cup \dots \cup \Delta_k \text{ 且}$$

$$\diamond(\Sigma) = \diamond(\Delta_0 \cup \Delta_1 \cup \dots \cup \Delta_k),$$

分成的子区域是整个区域的划分, 各子区域间是完全相容的。

采用属性来描述定义地形, 使得地形区域划分为多个子区域, 每个子区域是一个复形, 这样地形的变化就体现在复形的变化上, 因此, 引入复形集操作。用 $p(\cdot)$ 表示复形的属性, 两复形集 Σ_i, Σ_j 中的复形分别有 m, m 个, 即

$$\Sigma_i = \{\Delta_i^1, \dots, \Delta_i^m\};$$

$$\Sigma_j = \{\Delta_j^1, \dots, \Delta_j^m\}.$$

定义 6. 复形集差操作 $-$ 。

$$\Sigma_i - \Sigma_j = \{\Delta_i^k - \Delta_j^l \mid p(\Delta_i^k) = p(\Delta_j^l),$$

$$k = 1, \dots, m; l = 1, \dots, m\} \cup \{\Delta_i^k \mid \exists \Delta_j^l \in \Sigma_j,$$

$$p(\Delta_i^k) = p(\Delta_j^l), k = 1, \dots, m; l = 1, \dots, m\}.$$

定义 7. 复形集交操作 \otimes 。

$$\Sigma_i \otimes \Sigma_j = \{\Delta_i^k \otimes \Delta_j^l \mid p(\Delta_i^k) = p(\Delta_j^l), k = 1, \dots, m; l = 1, \dots, n\}.$$

定义 8. 复形集并操作 \oplus .

$$\Sigma_i \oplus \Sigma_j = \Sigma_i - \Sigma_i \otimes \Sigma_j \cup \Sigma_j.$$

在仿真过程中,地形受作用发生变化,每次发生变化只是局部区域,如弹坑,这种变化导致区域内的高程数据发生变化,区域的变化结果导致三角形重

新划分,如图 1 所示,这里为了表示方便,采用投影平面表示.图 1(a)是变化前的 4 个属性的局部地形;图 1(b)表示受作用发生变形的区域;图 1(c)是(a)变化后的地形,若用 Σ_i 表示图 1(a)的地形;图 1(d)表示发生变化的一个三角剖分 Σ_j ;则图 1(c)表示运算 $\Sigma_i \oplus \Sigma_j$ 形成的地形.

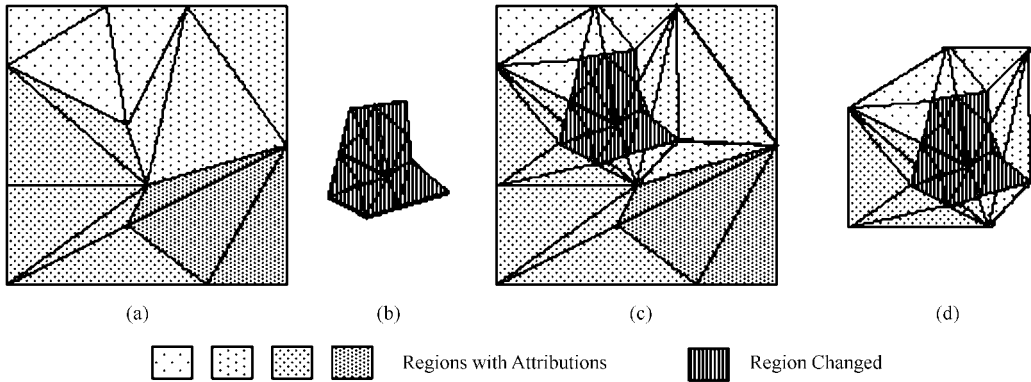


Fig. 1 Terrain changes. (a)Original terrain regions;(b)Region changed;(c)Terrain regions changed; and (d) Simplicial complexes for regions changed.

图 1 地形变化示例。(a)变化前的地形区域 (b)发生变化的区域 (c)发生变化的地形区域 (d)发生变化区域的单纯复形集

定理 1. 若 Σ 是变化前的地形, Σ_i 是发生变化的地形, 则 $\Sigma \oplus \Sigma_i$ 是变化后的地形, 且有 $\diamond(\Sigma) = \diamond(\Sigma \oplus \Sigma_i)$.

证明. 设受作用发生变化的区域为 r , 涉及到 k 个子区域, 如图 1(a), 记 k 个子区域对应的原始复形集 $\Sigma = \{\Delta_{r_1}, \dots, \Delta_{r_k}\}$, 其中每个子区域受作用部分发生变化, 如图 1(d)所示. 对每个子区域对应的复形 Δ_{r_i} , 变化使得 Δ_{r_i} 中部分三角形顶点的高程值发生变化, 导致三角形重新剖分, 设新的变化复形是 Δ_{r_i}' , 则 $\Delta_{r_i} \otimes \Delta_{r_i}'$ 是 Δ_{r_i}' 对应的原始地形复形, 所以新的子区域就是 $\Delta_r - \Delta_{r_i} \otimes \Delta_{r_i}' \cup \Delta_{r_i}'$, 即 $\Delta_{r_i} \oplus \Delta_{r_i}'$. 这样对应所有子区域复形集 Σ , 根据定义 $\Sigma \oplus \Sigma_i$ 就是经 Σ_i 变化后的地形如图 1(c)所示. 显然对 Σ 中每个复形 Δ_{r_i} 变化后的域未发生变化, 因此有 $\diamond(\Sigma) = \diamond(\Sigma \oplus \Sigma_i)$.

3 动态地形时序模型

地形的变化发生在小区域内, 把每次变化的数据按发生的时间顺序存储起来, 可以随时提供任何时刻的地形数据, 一般用来评估仿真过程中与地形相关的事件, 后加入仿真的实体获取历史变化数据及在演练回放时快速生成指定时刻的地形.

3.1 时序模型

我们定义时序模型: 地形定义域为 Ω , 二元组 $(T, <_t)$, 其中序列 $T = (\Sigma_0, \Sigma_1, \dots, \Sigma_t)$, Σ_0 是属性(多分区)地形的初始复形集, $\Sigma_i (i > 0)$ 是 $t > t_0$ (初始时刻)时刻变化的地形复形集, 且当 $j > i$ 时, 对应的时间 $t_j \geq t_i$, 时刻 t 变化的复形集有 $\Sigma_{t_0}, \Sigma_{t_1}, \dots, \Sigma_{t_m}, t_i = 1, \dots, t$, 满足 $\Sigma_{t_i} \otimes \Sigma_{t_j} = \emptyset$. $<_t$ 是满足下列条件的偏序关系:

- (1) $\diamond(\Sigma_0) = \Omega, \forall i = 1, \dots, t, \diamond(\Sigma_i) \subseteq \Omega$;
- (2) $\forall i, j = 1, \dots, t, i < j, t_i < t_j,$
 $\Sigma_i <_t \Sigma_j \Rightarrow \Sigma_i \otimes \Sigma_j = \emptyset$;

(3) 对新的变化 Σ , 加入到 T 中的末尾且至少存在一个 i 满足 $\Sigma_i \otimes \Sigma \neq \emptyset$.

条件 1 说明了地形变化的局部性, 条件 2 表示了变化数据的时间和空间顺序关系, 条件 3 保证了添加的变化地形存在与它相容的局部区域.

时序模型把地形的变化数据按时间次序组织起来, 建立了地形变化数据的空间和时间依赖关系, 这种依赖关系提供了提取任意时刻地形数据的依据.

根据定理 1, 时序模型中对于同时刻发生变化的不相交的地形区域, 与它们放在 T 中的次序无关.

推论 1. 交换律. 若 $\Sigma \oplus \Sigma_i$ 相容, $\Sigma \oplus \Sigma_j$ 相容, 且 $\Sigma_i \otimes \Sigma_j = \emptyset$, 则 $\Sigma \oplus \Sigma_i \oplus \Sigma_j = \Sigma \oplus \Sigma_j \oplus \Sigma_i$.

根据模型中各时间的地形变化数据, 可以通过

复形集 \oplus 运算获取指定时刻的地形完整描述.

定理 2. t 时刻的地形数据为 $\Sigma_0 \oplus \Sigma_1 \oplus \dots \oplus \Sigma_m$, 其中 t 时刻变化的复形为 $\Sigma_1, \dots, \Sigma_m (0 < l \leq m)$.

证明. 用数学归纳法. $t = t_0$ 时, 原始地形数据 Σ_0 成立. $t = t_1$ (第 1 次变化时间) 时, 假设此时变化的复形集是 $\Sigma_1, \dots, \Sigma_s$, 根据定理 1 有 $\Sigma_0 \oplus \Sigma_1$ 是 t_1 时刻只有 Σ_1 变化的地形, 同理 $(\Sigma_0 \oplus \Sigma_1) \oplus \Sigma_2$ 是发生变化 Σ_1, Σ_2 时的地形, 依次类推, t_1 时刻发生变化后的地形是 $\Sigma_0 \oplus \Sigma_1 \oplus \dots \oplus \Sigma_s$, 根据推论 1, $\Sigma_1, \dots, \Sigma_s$ 的排列次序不影响运算结果. 假设 $t = t_i$, 命题成立. 则 t 时刻发生变化之前的地形是 $\Sigma_0 \oplus \Sigma_1 \oplus \dots \oplus \Sigma_{i-1}$, 根据定理 1, t 时刻只有 Σ_i 变化的地形是 $\Sigma_0 \oplus \Sigma_1 \oplus \dots \oplus \Sigma_{i-1} \oplus \Sigma_i$, 依次类推, t 时刻发生变化后的地形是 $\Sigma_0 \oplus \Sigma_1 \oplus \dots \oplus \Sigma_m$.

3.2 DAG 表示

根据定理 2, 在给定满足模型中条件的地形变化序列情况下, 利用复形集的并操作可以抽取任何时刻的地形. 地形的变化具有局部性, 每次发生变化的区域相对整个地形区域来说很小, 也就是说有很大的区域未发生变化, 并操作在复形上运算就会导致较多的计算. 其原因是运算没有考虑子区域变化前后的空间关系, 因此我们可利用复形间的偏序关系建立空间关联关系, 减少无关的计算以提高地形抽取速度.

模型用 DAG (directed acyclic graph) 描述, 用弧来表示复形间的偏序关系, 对任意复形集 $\Sigma_i, \Sigma_j, i < j$, 若 $\Sigma_i \otimes \Sigma_j \neq \emptyset$, 则建立连接关系, 这样根据地形变化区域与时序模型定义建立 DAG. DAG 中的每个节点含有子区域地形所对应复形集的数据及相关的弧. 图 2 描述了地形变化的 DAG, 图 2(a) 中描述了含多个子区域的地形变化实例, 图 2(b) 是基于复形集的 DAG.

对模型的操作主要有变化数据的添加及确定指定时刻的地形等. 对新的变化 Σ_i , 若与模型中历史变化 Σ_j 存在 $\Sigma_i \otimes \Sigma_j \neq \emptyset, i \geq 0$, 则 Σ_i 与 Σ_j 用弧连接. 本文着重讨论如何根据原始地形数据和变化的数据抽取指定时刻的地形.

4 基于 DAG 的地形抽取算法

DAG 中顶点表示时刻 t 发生变化的地形数据, 顶点间的弧表示了地形变化区域间的时间和空间关系, 在 DAG 中保存这些数据和关系信息就可以利用这些数据抽取指定时刻的地形数据.

4.1 数据存储

地形时序模型中变化数据按地形变化时间次序组织. 在 DAG 中, 边表示了复形集间的空间和时间关系, 反映的是复形集间的整体变化关系, 如 Σ_0 和 Σ_1 , 但是它们之间在空间上来说变化的数据只体现在局部范围内, 如 Σ_1 只是 Σ_0 的一个子(属性)区域部分变化的数据, 但是 $\Sigma_0 \oplus \Sigma_1$ 运算要计算 Σ_0 中的每个三角形与 Σ_1 中三角形之间的关系. 我们看到 Σ_1 只是修改了 Σ_0 中的一个子区域的数据, 因此通过子区域可以减少计算. 图 2 中我们还可以看到 Σ_4 只修改了 Σ_1 中的部分数据, 而根据定理 2 抽取 Σ_4 变化后的数据要将 Σ_4 与子区域中的所有三角形计算, 实际上我们可以把 Σ_1 看做是 Σ_4 的原始地形, 先做运算 $\Sigma_1 \oplus \Sigma_4$, 然后再做其他运算, 从而减少计算量. 这样做的前提是除 Σ_1 外不存在 $\Sigma_i (i \neq 1)$, 使得 $\Sigma_i \otimes \Sigma_4 \neq \emptyset$.

定理 3. 结合律. 如果地形时序模型中 T 的复形集 $\Sigma_k, k > 1$, 存在惟一 Σ_i 使得 $\Sigma_i \otimes \Sigma_k \neq \emptyset$, 则有 $\Sigma \oplus \Sigma_i \oplus \Sigma_k = \Sigma \oplus (\Sigma_i \oplus \Sigma_k)$, 这里 $\Sigma \oplus \Sigma_i$ 是复形集.

由于 Σ_k 只修改 Σ_i , 因此在抽取 Σ_k 变化后的地

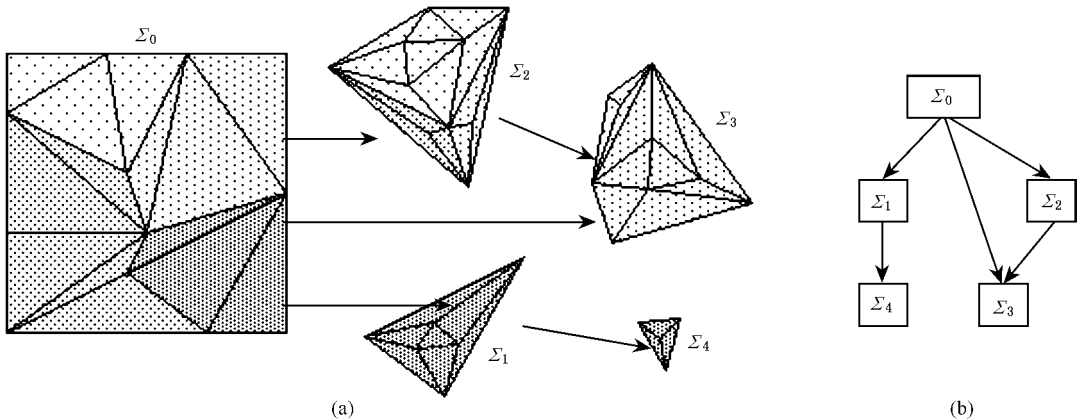


Fig. 2 DAG of terrain changes. (a) The order of terrain changes and (b) DAG for (a).

图 2 地形变化 DAG. (a) 地形的变化次序 (b) DAG 表示

形时, 可以先将 Σ_k 在局部区域内进行修改, 然后再作用到全局, 从而减少计算。

为了确定满足 $\Sigma_i \otimes \Sigma_k \neq \emptyset$ 的惟一性, 需保存 Σ_i 与 Σ_k 间的双向连接关系, Σ_k 前向指针指向 Σ_i , Σ_k 后向指针指向满足 $\Sigma_k \otimes \Sigma_l \neq \emptyset$ 的复形 Σ_l 。

4.2 算法描述

本节结合地形时序模型与 DAG 中顶点和弧数据的存储, 给出地形抽取算法。令 Σ_i 对应的时间为 $t(\Sigma_i)$, 初始时刻为 t_0 , 顺序表用来放指向顶点的指针, 并按时间先后排序。抽取 t 时刻地形的算法分为两个阶段, 第 1 阶段处理满足定理 3 的复形集, 第 2 阶段按定理 2 抽取 t 时刻地形。算法如下:

(1) 按广度优先扫描 DAG 中顶点, 如果结束转 (4); 否则对当前访问顶点 Σ_k , 若 $t(\Sigma_k) \leq t$, 同时只有一个前向指针 (即满足定理 3 的惟一性), 令指向的复形集为 Σ_i , 进行 (2) 处理, 否则在 $t(\Sigma_k) \leq t$ 情况下, 处理下一顶点;

(2) 计算 $\Sigma_i \oplus \Sigma_k$, 并修改 Σ_i 指向 Σ_k 的后向指针为 Σ_k 的后向指针;

(3) 若顶点 Σ_i 还满足 (1) 中的条件, 继续按 (2) 处理, 否则转 (1);

(4) 初始化顺序表为空, 原始 Σ_0 插入顺序表;

(5) 取出顺序表中的第 1 个元素 Σ_i , 并将 DAG 中相关地满足 $t(\Sigma_i) \leq t$ 的顶点插入顺序表中;

(6) 对 Σ_i 做处理: 若 Σ_i 为 Σ_0 , 则 $\Sigma = \Sigma_0$, 否则 $\Sigma = \Sigma \oplus \Sigma_i$, 计算时, 利用复形集 Σ 中各个复形的空间信息定位 Σ_i 中对应的子区域;

(7) 返回到 (5), 直到顺序表为空。

算法中步骤 (1)~(3) 为第 1 阶段处理, 步骤 (4)~(7) 为第 2 阶段处理。算法中利用顺序表排序进行时间管理, 保证先发生的变化先处理。

5 算法分析与实验

地形抽取算法中第 1 阶段处理满足定理 3, 第 2 阶段处理满足定理 2, 所以算法执行的结果是正确的。算法在第 1 阶段利用局部修改特性, 预先在小区域进行合运算, 减少了三角形的计算。第 2 阶段把复形合运算应用到地形子区域内, 同样缩小了运算的域空间。

设 DAG 中顶点个数为 n , 子区域个数为 p , 每个变化区域的三角形个数平均为 m , 第 1 阶段处理的顶点数为 l (即 DAG 中满足定理 3 的 Σ_k 个数), e 为 DAG 中弧条数。第 1 阶段的广度优先扫描图的时间复杂性是 $O(n + e)$ 。根据并运算 \oplus 定义及定理

3, l 个顶点并运算的时间复杂性是 $O(l \times m \times m)$ 。第 2 阶段处理 DAG 中剩余的 $(n - l)$ 个顶点, 插入排序的时间复杂性为 $O((n - l)^2)$ 及并运算处理的时间复杂性为 $O((n - l) \times m \times m)$ 。子区域个数 p 与 m 成反比。从中看出, 影响算法性能的主要参数有地形变化区域个数、子区域个数及满足定理 3 的区域个数。 n 对图优先扫描及插入排序的时间开销较小, 可以忽略不计。

实验中采用的微机配置为 Intel Pentium IV 1.6GHz, 256MB RAM。操作系统是 Windows XP, 开发软件是 VC6.0 和 OpenGL。地形数据规模为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。我们设计了两组实验来验证参数的影响。每组分别用两种方法抽取地形。根据定理 2 的公式和基于 DAG 的抽取算法。实验中使用的地形三角形个数为 522242。图 3 是在 5 个变化区域参数下, $l = 2$ 时, 子区域个数变化与时间的关系。从图中看出, 区域个数增加时间加剧减少, 但到一定程度后时间趋于稳定, 这是因为区域增加后, 导致变化的区域跨多个子区域。图 4 是在 p 固定为 6, 地形变化数 n 变化时, 满足定理 3 的 l 占变化数 20% 情况下抽取地形的时间开销。可以看出时间与 n 基本呈线性关系。

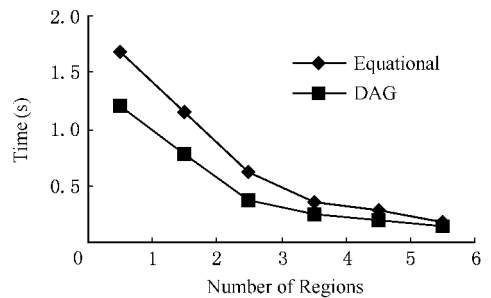


Fig. 3 Curves of time changing with p .
图 3 计算时间随属性区域数变化的曲线

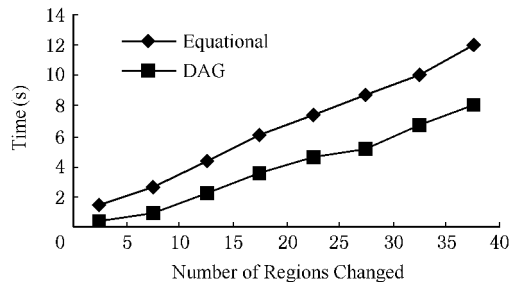


Fig. 4 Curves of time changing with n .
图 4 计算时间随地形变化数变化的曲线

6 结 论

本文对地形在仿真过程中局部变化的问题进行

了研究,提出了一种按时间变化次序及空间关系保存局部变化数据的时序模型,该模型可抽取任意指定时间的地形数据,从而能支持分布式环境中后加入仿真的实体获取最新的地形,保证地形数据的一致。给出模型的 DAG 表示正确体现了数据在时间和空间上的关系,优化了地形抽取算法的运算。实验结果表明,如果地形数据变化在满足定理 3 时,基于 DAG 表示的地形抽取算法计算量减少,且算法的计算时间与地形变化数呈线性关系。时序模型对分布式环境中保证地形数据一致提供了基本支持,如何管理分布式环境中地形变化时间及利用仿真实体的对地形的感兴趣层次来减少变化数据的存储容量^[11]是进一步研究的课题。

参 考 文 献

- 1 Xin Li, J. Michael Moshell. Modeling soil: Realtime dynamic models for soil slippage and manipulation. *Computer Graphics*, 1993, 24(4): 361~368
- 2 R. Nabil. Physically-based modeling and real-time simulation of terrain cratering and fragmentation due to explosions: [PH. D. dissertation]. Orlando: University of Central Florida, 2001
- 3 Y. F. He. Real-time visualization of dynamic terrain for ground vehicle simulation: [Ph. D. dissertation]. Iowa City: The University of Iowa, 2000
- 4 Wang Linxu, Li Sikun, Pan Xiaohui. Real-time visualization of dynamic terrain. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(11): 1524~1531 (in Chinese)
(王林旭,李思昆,潘晓辉. 动态地形的实时可视化. *计算机学报*, 2003, 26(11): 1524~1531)
- 5 C. Lisle, M. Altman, M. Kilby, *et al.* Architectures for dynamic terrain and dynamic environments in distributed interactive simulation. *The 10th Workshop on Standards for the Interoperability of Defense Simulations*, Orlando, FL, 1994
- 6 David Bakeman, Dale Miller, Steve Hues. Dynamic terrain from run-time modifications to pre-exercise tailoring. *The Fall Simulation Interoperability Workshop*, Orlando, FL, 1999

- 7 Dale D. Miller, David Bakeman, Steve Adelson, *et al.* Dynamic terrain in the environment federation. *The Spring Simulation Interoperability Workshop*, Orlando, FL, 2001
- 8 Chen Guojun. Description and generation of region-oriented multi-properties terrain. *Journal of System Simulation*, 2003, 15 (Suppl): 8~10 (in Chinese)
(陈国军. 面向区域的多属性地形定义与生成. *系统仿真学报*, 2003, 15(增刊): 8~10)
- 9 L. De Florian, E. Puppo, P. Magillo. A formal approach to multiresolution hypersurface modeling. In: W. StraBer, R. Klein, R. Rau eds. *Geometric Modeling: Theory and Practice*. Berlin: Springer-Verlag, 1997. 303~323
- 10 You Chengye. *Lecture Notes on Basic Topology*. Beijing: Beijing University Press, 1997. 169~178 (in Chinese)
(尤承业. *基础拓扑学讲义*. 北京: 北京大学出版社, 1997. 169~178)
- 11 F. Kuhl, R. Weatherly, J. Dahmann. *Creating Computer Simulation System: An Introduction to the High Level Architecture*. New Jersey: Pearson Education, 2000



Chen Guojun, born in 1968. Ph. D. Candideta Received his M.A's degree of Beihang University. His main research interests are computer graphics, scientific visualization and virtual reality.

陈国军, 1968年生, 博士研究生, 主要研究方向为计算机图形学、科学计算可视化和虚拟现实。



Zhao Qiping, born in 1948. Professor and Ph. D. supervisor of the School of Computer Science and Engineering, Beihang University. His main research interests are virtual reality, scientific visualization and artificial intelligence.

赵沁平, 1948年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为虚拟现实、科学计算可视化和人工智能。

Research Background

Serializing terrain changes is an important task in maintaining consistency of dynamic terrain in distributed simulation systems. In this paper, a time serial model for recording terrain changes is proposed. The changes data is defined as simplicial complexes and arranged into a partially ordered set by time and space. Using DAG storing changes improves computing performance of an extraction of terrain. Because of this characteristics, it has been applied to record terrain changes in virtual war environment successfully, and will be applied to maintaining consistency of dynamic terrain changes using HLA/RTI. This work is supported in part by the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under grant No. 2002CB312105, and in part by the Natural Science Fund of Beijing under No. 4042011.