

一种新的基于发散度函数的地形模型简化方法

张慧杰^{1),2)} 孙吉贵²⁾ 吕英华¹⁾ 吕楠²⁾ 王远志³⁾

¹⁾(东北师范大学计算机学院 长春 130117)

²⁾(吉林大学计算机科学与技术学院 长春 130012)

³⁾(安庆师范学院计算机系 安徽 安庆 246011)

摘 要 提出了一种新的地形模型简化方法,该方法是在隐式四叉树层次结构基础上,结合离散粒子群思想建立地形的简化模型.文中重新定义粒子为具有层次信息的特征点的集合,从而每个粒子与简化模型的一个候选解相对应.为了实现多个粒子的空间压缩和快速检索,给出了隐式四叉树层次结构的快速索引方法.此外提出了基于法向量夹角的发散度函数的误差计算方法,重新定义了既满足地形模型误差要求同时兼顾模型简化比例的粒子评价函数,使地形简化模型在保持细节特征和轮廓特征的同时获得了更优的简化比率和模型精度.最后采用最优粒子作为启发信息引导简化过程,因此多个粒子迅速收敛于最优简化模型,从而模型的简化效率大大提高.文中方法均在多个基准数据上进行实验研究,结果表明与经典层次简化方法相比,算法效率和模型精度均显著提高.

关键词 四叉树层次结构;简化模型;评价函数;离散粒子群算法;地形特征

中图法分类号 TP391

DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2009.00962

A New Simplification Method for Terrain Model Based on Divergence Function

ZHANG Hui-Jie^{1),2)} SUN Ji-Gui²⁾ LU Ying-Hua¹⁾ LU Nan²⁾ WANG Yuan-Zhi³⁾

¹⁾(College of Computer, Northeast Normal University, Changchun 130117)

²⁾(College of Computer Science & Technology, Jilin University, Changchun 130012)

³⁾(Computer Department of Anqing Normal College, Anqing, Anhui 246011)

Abstract This paper presents a fast simplification method for the terrain model using the discrete particle swarm algorithm based on the quad-tree hierarchical structure. What is new in this paper is that the particle has been redefined as a set of feature points. And then each particle presents a candidate solution of the approximation model. In order to compress those particles, a connotative quad-tree hierarchical structure and its index technology are proposed in this paper. Usually, an error measure is very important to an approximation. Therefore, this paper proposes a new divergence function, which is better to measure the surface of an approximation. Based on it, the evaluation function of particle is defined. Since both the detailed feature and the simplification ratio are also taken into account, the approximation is higher quality. Finally, the optimal particle is taken as the heuristic information to accelerate the simplification, so that these particles can converge rapidly to the optimal approximation. As a result, the method is of higher efficiency. By the experiments on many benchmark terrain models, the efficiency of the proposed method and the quality of approximations are improved greatly, compared with the typical hierarchical simplification algorithms.

收稿日期:2007-07-12;最终修改稿收到日期:2009-03-24. 本课题得到国家自然科学基金(60773097)、国家自然科学基金青年基金(60603030)、东北师范大学自然科学基金(20081003)和安徽省高校省级自然科学基金重点项目基金(KJ2008A18ZC)资助. 张慧杰,女,1975年生,博士研究生,讲师,主要从事计算机图形学、三维模型简化、地形模型多分辨率建模、3DGIS等方面的研究. E-mail: zhang-hj167@nenu.edu.cn. 孙吉贵,男,1962年生,博士,教授,博士生导师,主要从事人工智能、虚拟现实等方面的研究. 吕英华,男,1962年生,博士,教授,博士生导师,主要从事数字图像处理、计算机图形学等方面的研究. 吕楠,女,1979年生,硕士研究生,讲师,主要从事地形模型简化等方面的研究. 王远志,男,1977年生,硕士,副教授,主要从事计算机图形学与CAD等方面的研究.

Keywords quad-tree hierarchy; simplification model; evaluation function; DPSO algorithm; terrain features

1 引言

地形模型已经在三维游戏、飞行模拟训练、战场环境仿真、地理信息系统(GIS)、虚拟现实(VR)等领域有着非常广泛的应用. 目前地形模型的研究正在被拓展到航空航天、机载系统、GPS(Global Positioning System)、三维地形导航系统^[1]、3D 地形模型检索^[2]等应用领域. 由于数字摄影、测量等技术的发展,使得获取超大规模地形数据集的手段更加多样化,从而原始地形数据能够表现的细节也变得越来越复杂. 因此,地形模型的研究正面临两大挑战:一方面是庞大的数据集的绘制问题. 当采用三角形网格模型渲染地形时,每平方公里就需要数以百万计的三角形面片,从而导致了庞大的数据量. 这些复杂的模型对计算机的存储容量和处理速度提出了很高的要求;另一方面地形模型除了满足绘制要求以外,在地形导航、机载系统、模型检索系统等存储容量受到限制的具体应用领域,要求简化模型在有效降低模型复杂度的同时,能够提高简化模型的精度,尽量多地保留地形细节^[3]. 模型简化是解决这两个问题的共同手段,也就是采用带有不同细节层次(Levels of Details, LOD)的多分辨率模型代替原始模型. 然而,前者更侧重于满足图形硬件的渲染要求,所以对原始模型进行粗粒度的模型简化(Coarse Grained Simplification of Model, CGSM)^[4-7];而后者则要求简化算法具有较高的自适应性,因此进行细粒度的模型简化(Fine Grained Simplification of Model, FGSM)^[8-12].

CGSM 方法主要是将三角形组作为基本单位对原始数据进行简化处理,实现三角形的批量绘制. 原则是减少 CPU 的计算时间,将大量的三角形面片的绘制任务转移给图形处理单元(Graphical Processing Unit, GPU)去实现^[13-16]. 已有的 CGSM 方法包括 Ulrich 提出的 Chunked LOD 算法^[5]、Levenberg 提出的 Aggregated LOD 算法^[6]、Losasso 提出的 Geometry Clipmaps 算法^[14]、Schneider 提出的 Pressive Tile LOD 算法^[15]以及 Yotam 提出的 Seamless LOD 算法^[16]. 这些算法发挥了 GPU 的硬件优势,在绘制效率方面均取得了比较理想的效果,然而,仍普遍存在着两大主要问题:(1)对于模型无

限扩展的真实细节,采用粗粒度的简化方法最终可能使得三角形数量超过 GPU 的处理能力,无法仅通过硬件可编程技术来解决.(2)粗粒度的简化方法自适应能力差,即在三角形数量相等的条件下,对局部细节刻画的程度不够,所以相对于 FGSM 方法,CGSM 方法的模型精度较低.

FGSM 方法是以每个三角形为单位对地形模型进行简化,它是为解决早期图形硬件的渲染能力差的问题而提出的,所以算法本身在降低了模型复杂度的同时带来了较高的 CPU 开销,不能发挥现代图形硬件的优势. 然而,由于其细粒度简化的特性决定,该类算法在简化模型的精度、保持细节特征和自适应性等方面具有非常广阔的应用前景. Hoppe 提出的渐进网格算法是最具代表性的基于不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)的简化算法^[17],以后在此基础上又有其他算法被提出^[18]. 该类算法表现的地形特征非常灵活,但是很难与规则几何纹理结合,因此对于大规模地形模型一般不采用此类算法.

另一类重要的 FGSM 方法是针对规则网格(Regular Square Grid, RSG)数据的简化方法^[19-22],该类算法主要利用 RSG 数据规则分布的特点,将原始数据剖分成多分辨率的层次结构,最终实现模型简化的目的. 从剖分方式上主要包括三角形斜边细分算法^[22]和正方形四叉分割算法^[23-24]. 由于后者具有压缩存储以及剖分效率高的优点而被广泛采用. 此外,从求解过程角度该类算法可细分为自顶向下逐步求精算法^[23]和自底向上逐步简化算法^[24]. 其中四叉层次简化算法(Quad-tree Hierarchical Simplification Algorithm, QHSA)是一种被广泛采用的简化算法^[21],并且在简化比例和自适应性方面均取得了较好的效果. 但是,仍然存在 3 个方面不足:(1)在自适应简化过程中,由于逐层遍历处于不同细节层次的三角形,因而相对于 CGSM 方法,QHSA 算法效率比较低;(2)算法的自适应能力随着简化比率的增加迅速下降,最终将出现大面积的细节丢失;(3)由于逐层简化方法的限制导致误差评价方法单一. 所以,如何设计出自适应能力强、简化效率高的细粒度简化算法是关键所在.

鉴于此,本文结合离散粒子群优化(Discrete Particle Swarm Optimization, DPSO)思想,重新构

造了基于法向矢量的发散度误差评价函数,提出了一种新的地形模型简化方法.该方法是一种在 RSG 数据上的细粒度简化方法,但是与传统的层次简化方法有很大区别.我们采用地形特征作为启发信息指导简化过程,从而不再逐层简化而是根据启发信息实现模型的越层简化,因此,我们的方法在保证简化模型的自适应性和精度要求的同时大大提高了简化算法的效率.本文的贡献在于以下几点:(1)在隐式四叉树层次结构的基础上,建立了数据位置和模型层次之间的关系,利用该结构我们实现了粒子的压缩存储和模型信息的快速索引;(2)提出了覆盖区域法向矢量发散度函数的概念并给出了该函数的计算方法.由于该函数同时考虑了模型的全局特征和局部细节特征,因此本文的简化模型具有相当高的自适应性,也就是在简化比例很高的情况下我们的简化模型仍然能够保证细节不丢失,从而具有很高的模型精度;(3)在发散度函数和模型的简化比例基础上提出了粒子的评价函数,因此,与最优粒子对应的简化模型具有最理想的简化比例和模型精度;(4)结合模型简化问题重新给出了粒子结构与速度轨迹的定义,使粒子在引导策略下能够高效地向更理想的简化模型逼近,从而在相当短的时间内获得了最优的简化模型.

2 隐式四叉树层次结构

层次结构是建立多分辨率模型的基础,由于四叉树层次结构的剖分效率较高,因而被广泛采用.为了进一步节省存储空间,通常利用二维高程矩阵代替传统的四叉树数据结构,被称为隐式四叉树层次结构(Connotative Quad-tree Hierarchy, CQH).其中顶点的层次信息以及相邻顶点之间的连接关系都隐含在规则栅格中.目前大多数建立隐式四叉树的方法是对二维高程矩阵自顶向下递归细分,同时添加层次信息标记^[23];少数方法根据顶点位置来推导层次关系.后者可以节省存储空间,有利于简化算法的优化处理,但已有方法通常从大量规则中判断出层次信息,因此是以降低效率为代价的.

在本文中,我们采用了 CQH 结构,不同的是所有层次信息和节点信息不需要存储和标记,无需单独构造算法,可以在原始数据上生成多分辨率模型,这为后续特征点选择奠定了必备的基础.我们的 CQH 结构中所有节点的层次以及节点间的位置关系可以根据节点的当前位置单步换算得到,以下给

出了具体换算公式,并且通过实例验证,不难发现公式简单有效.

地形模型由空间中的节点构成,每个节点由 1 个中心顶点和 4 个边界顶点以及它们构成的 4 个三角形组成.在 CQH 中可以通过中心顶点索引 (i, j) 访问一个节点.以 $m \times m$ ($m=17$) 模型数据为例,图 1 直观地描述了 CQH 结构.黄色节点为 l_0 层节点,半径为 8 个单位长度;蓝色节点为 l_1 层节点,半径为 4 个单位长度;红色节点为 l_2 层节点,半径为 2 个单位长度;每个最小正方形表示 $l_{\log_2(m-1)-1}$ 中的节点.

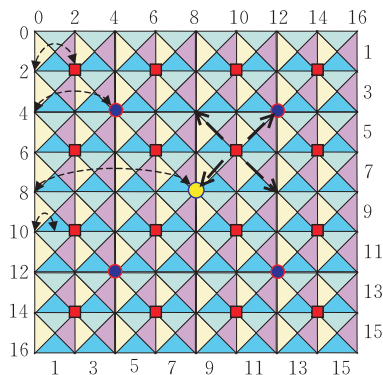


图 1 CQH 结构的节点与节点半径

设 N_{ij}^l 是第 l 层以 (i, j) 为中心的节点,由于 $l+1$ 层节点是由 l 层对应节点一分为四得到的,当 l 每增加一层,节点半径 r_l 就变为原来的一半,因此对任意节点 N_{ij}^l ,节点半径 r_l 与层次 l 具有如下关系:

$$r_l = (m-1)/2^{l+1} \quad (1)$$

索引 (i, j) 与 l 之间具有关系

$$\text{mod}(i/(r_l), 2) = 1 \quad (2)$$

其中 i 与 j 等效,即用 j 代替 i 同样适用.

以 17×17 的 CQH 结构为例,当 $l=0$ 时,数符集合为 $A_0 = \{8\}$;当 $l=1$ 时,数符集合为 $A_1 = \{4, 12\}$;当 $l=2$ 时,数符集合 $A_2 = \{2, 6, 10, 14\}$;当 $l=3$ 时也是最低层,数符集合 $A_3 = \{1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15\}$,那么 $A_0 \cup A_1 \cup A_2 \cup A_3$ 是 $1 \sim 16$ 数符全集.通过对式(2)进一步变换整理,可得,层次 l 是索引 (i, j) 中的 i (或者 j)的函数,满足:

$$l(i) = \log_2(m-1) - \log_2(i/\sigma_i) - 1 \quad (3)$$

其中 σ_i 是 i 的最大奇数因子.

显然,根据任意节点的索引通过简单计算可以获得节点的层次信息.

3 发散度误差评价函数

误差评价标准在模型简化中是一项重要的指

标,直接关系到简化效果的优劣.国内外许多文献阐述了基于高程差异的层次几何误差评价方法(Hierarchical Geometrical Error, HGE)^[21].这些方法在整体简化比率方面均取得了较好的效果,但是普遍存在以下问题:①由于采用基于点的高程差作为基本误差计算方法,所以在相同简化比率下局部精度不够;②存在误差判断冗余问题,即当最终简化面片所在层次与原始面片所在层次的差异超过两层以上时,中间部分每两层之间的误差判断是冗余的;③层间误差计算可能导致在每两层之间误差满足误差阈值要求的情况下,出现原始细节层次与简化层次之间的误差超出阈值范围的问题,因此造成细节丢失.针对以上问题我们提出了基于简化域的法向量发散度函数的误差评价策略(Divergence Function Error, DFE).

在我们的评价策略中实现了两个目标:(1)避免了重复误差计算,实现了越层简化;(2)建立了简化层次与原始细节之间的对应关系,实现保持细节的高精度误差计算.对于任意一个节点 N_{ij}^l , $0 \leq l \leq \log_2(m-1)-2$,我们将 N_{ij}^l 的三角形 t_{ijk}^l , $k=0,1,2,3$ 的覆盖区域称为简化域 SD_{ijk}^l .当 SD_{ijk}^l 满足简化要求时,我们称 SD_{ijk}^l 是激活的,否则称 SD_{ijk}^l 是非激活的.有时我们直接用 SD_{ijk}^l 表示 SD_{ijk}^l 区域内细节层次节点的索引集合.我们将每个简化域作为误差计算的基本单位,与传统的高程差计算方法不同,在每个简化域中我们采用三角形面片的法向量夹角作为基本误差计算方法.其优势在于我们的模型误差不仅包括单点的高程差异,而且包括每个高程点邻域的误差情况,因此能够更加真实地反映地形表面特征.当法向量夹角越大,即越发散,表明由这些三角形组成的地表特征越明显;反之地形比较平缓.如果夹角为 0,表明地形趋于平面.

由于 CQH 是一个以节点为单位的层次结构,所以每个简化域中的细节三角形具有两种不同的邻接关系,即属于相同节点和属于不同节点.具有不同邻接关系的三角形表现的地形的特征不同,前者表现一个节点内部的地形细节;后者则表现节点间地形的起伏程度.因此,我们进一步定义了内外邻接关系.

定义 1. 设 SD_{ijk}^l 是节点 N_{ij}^l 的简化域, $T_{ijk}^l = \{t_{ijk}^l | i, j \in SD_{ijk}^l, l < l' \leq \log_2(m-1)-1\}$ 是细节层次三角形集合,则称在集合 T_{ijk}^l 上的二元关系 $R_l = \{\langle t, t' \rangle | t, t' \in T_{ijk}^l \text{ 通过公共边相邻,且属于 } l' \text{ 层的同一个节点}\}$ 为内邻接关系;称在集合 T_{ijk}^l 上的二元

关系 $R_E = \{\langle t, t' \rangle | t, t' \in T_{ijk}^l \text{ 通过公共边相邻,且属于 } l' \text{ 层的不同节点}\}$ 为外邻接关系.

图 2 描述了简化域和细节三角形集合及其邻接关系的情况.以斜纹节点 N_A 的一个简化域为例:简化域为 SD_{441}^1 ;细节三角形集合 $T_{441}^1 = \{t_{111}^3, t_{112}^3, t_{130}^3, t_{131}^3, t_{132}^3, t_{133}^3, t_{150}^3, t_{151}^3, t_{152}^3, t_{153}^3, t_{170}^3, t_{171}^3, t_{231}^3, t_{232}^3, t_{250}^3, t_{251}^3\}$,其中的三角形两两相邻,用实线标识的为内邻接关系,虚线标识外邻接关系.为了降低计算复杂度,我们采用矢量的相似度代替法向量夹角的计算.设 \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 分别是相邻三角形的法向量,则相似度为 $\varphi(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) = (\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2) / (|\mathbf{n}_1| |\mathbf{n}_2|)$.在此基础上我们定义了反映地表细节的内邻接误差和外邻接误差.

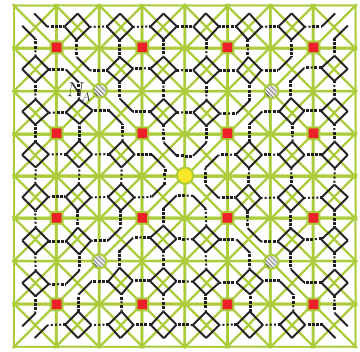


图 2 节点的 4 个简化域及邻接关系

定义 2. 设任意三角形 $t, t' \in T_{ijk}^l$, 并且满足 $\langle t, t' \rangle \in R_E$, 若 $\mathbf{n}_t, \mathbf{n}_{t'}$ 为对应法向量, 则称 $\Delta_{R_E} = \sum_{\langle t, t' \rangle \in R_E} \varphi(\mathbf{n}_t, \mathbf{n}_{t'}) / |R_E|$ 为简化域 SD_{ijk}^l 的外邻接误差.

定义 3. 设任意 $t_0, t_1, t_2, t_3 \in T_{ijk}^l$ 为节点 N_{ij}^l 的三角形, 若 $\mathbf{n}_{t_0}, \mathbf{n}_{t_1}, \mathbf{n}_{t_2}, \mathbf{n}_{t_3}$ 为对应三角形法向量, \mathbf{n}_{ave} 为以上 4 个法向量的平均法向量, l' 为细节层次, 则称 $\mathbf{n}_{t_0}, \mathbf{n}_{t_1}, \mathbf{n}_{t_2}, \mathbf{n}_{t_3}$ 与 \mathbf{n}_{ave} 的相似度的最大值为 N_{ij}^l 的内邻接误差. 第 l 层简化域 SD_{ijk}^l 的内邻接误差定义为

$$\Delta_{R_I} = 4 \sum_{N_{ij}^l \in SD_{ijk}^l} \max_{q=0}^3 (\varphi(\mathbf{n}_{t_q}, \mathbf{n}_{ave})) / |R_I| \quad (4)$$

显然, 内外邻接误差使简化模型保留了局部细节. 然而, 简化模型是用简化域代替原始细节层次, 因此简化域和细节三角形之间的误差是模型误差中更重要的因素, 它体现了地形的全局特征.

定义 4. 设 \mathbf{n}_N 是简化域 SD_{ijk}^l 平面的法向量, $N^{l'}$ 为简化域内细节层次节点, \mathbf{n}_{ave} 为 $N^{l'}$ 的节点平均法向量, 则称 $\Delta_G = 4 \sum_{N^{l'} \in SD_{ijk}^l} \varphi(\mathbf{n}_N, \mathbf{n}_{ave}) / |R_I|$ 为 SD_{ijk}^l

的全局误差.

由图 3(左)可以直观地看出,简化域的全局误差反映了使用简化域面片代替细节层次时产生的误差.图 3(右上)和图 3(右下)分别是外邻接误差和内邻接误差的示意图.可以看出具有邻接关系的三角形的法向量夹角越大,表明由这些三角形组成的地表细节特征越明显.

为了使简化模型既保留局部细节又兼顾全局特征,在外邻接误差、内邻接误差、简化域全局误差的基础上,我们提出了法向矢量发散度函数,定义如下.

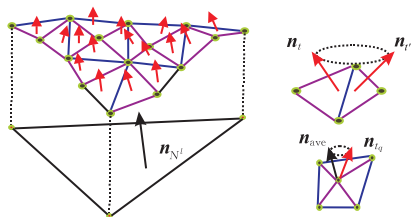


图 3 3 种邻接关系的对应误差

定义 5. 设 Δ_{R_E} 、 Δ_{R_I} 和 Δ_G 分别是简化域 SD_{ijk}^l 的外邻接误差、内邻接误差和全局误差,则称 $\theta(t_{ijk}^l) = \alpha_1 \Delta_{R_E} + \alpha_2 \Delta_{R_I} + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \Delta_G$ 为简化域的法向矢量发散度函数,其中 α_1, α_2 为权重因子.

通过设定 α_1, α_2 的值可以动态调节三种误差在发散度函数中的比例关系.由于全局误差在简化模型的精度方面起着主要作用,因此内外邻接权重因子 α_1, α_2 之和不应超过 0.5,在具体实验中通常远远低于 0.5.但是内外邻接误差在整体误差中又是一个对简化模型细节保留起着关键作用的部分,所以根据不同地势和数据源, α_1, α_2 的取值也会不同.不难发现,原则上对于地势变换缓慢,局部细节明显的大比例尺原始数据, α_1, α_2 的取值相对较大(如 Mount Rainier, α_1, α_2 之和为 0.3);相反小比例尺数据以及具有特殊平坦地势的数据, α_1, α_2 的取值相对较小(如青藏高原,数据间隔约 1km, α_1, α_2 之和为 0.1;Crater Lake, α_1, α_2 之和为 0.05).在本文的实验中,根据不同地形区域的地势特点,我们给出了 α_1, α_2 的具体值,均得到了较好的效果.

4 TMS-DPSO 算法

除了实现高精度模型,我们的另一个目标是提高简化模型的求解效率.粒子群优化算法是一种模拟鸟类觅食过程的群体智能进化计算技术,相对于其他搜索算法,其主要特点是收敛速度快.目前,在

很多领域得到了广泛的应用.如:我们改进了 PSO 算法用于解决约束满足问题^[25],而且引入 PSO 算法解决了自由作业排序问题^[26],Yin 将 DPSO 算法用在数字曲线的多边形拟合上^[27],Dozier 等人利用 PSO 算法解决入侵检测问题^[28].我们首次提出通过粒子群优化技术实现三维地形模型简化的思想^[29],但是算法细节和实验的关键问题没有被描述.在本文中,我们描述了地形模型简化-离散粒子群(Terrain Model Simplification-Discrete Particle Swarm Optimization, TMS-DPSO)方法,并且进行了详细的实验研究和算法验证.其重点在于如何利用粒子表现多分辨率简化模型,如何构造适合模型简化问题的最优粒子的评价策略,以及如何确定误差阈值和速度阈值.

设 N_{ij}^l 是 CQH 中的一个节点,由于 N_{ij}^l 对于最终的简化模型具有两种状态:成为简化模型的一部分;或者在简化过程中被简化掉.我们将一个节点是否参与简化模型的绘制的属性称为多分辨率简化模型的一个特征点,记作 $b(i, j) \in (0, 1)$.如果 $b(i, j)$ 状态为 1 表明该节点是简化模型的一部分;否则为 0,表明该节点被简化掉.因此一个 CQH 中所有特征点值为 1 的节点集合可以表示一个多分辨率的简化模型.

我们的 TMS-DPSO 算法的主要思想是将 CQH 结构作为原始搜索空间,每个粒子代表一个可能的简化模型.这些粒子记录它在搜索历史上最优的多个特征点信息,其中每个特征点与 CQH 的一个节点相对应.设每个粒子的每个特征点具有一个速度值,它表示该特征点对应的节点优先成为简化对象的概率.根据我们的评价策略,最优粒子代表模型质量最好、同时简化比例最高的近似模型.由于多个粒子共享这个最优的粒子信息,因此最终收敛于最优的简化模型.

4.1 粒子定义

为了适应地形网格模型简化问题,我们利用 CQH 结构定义粒子.在我们的算法中,每个粒子代表一个候选解,因此每个粒子与一个简化模型相对应.如果每个粒子都存储一个简化模型,那么数据量相当大甚至于超出内存的处理能力.因此我们利用一个二进制位来表示一个特征点,即仅记录 CQH 中对应节点的状态,那么粒子定义如下.

定义 6. 设 N_{ij}^l 是 CQH 中一个节点, $b_x(i, j)$ 是与 N_{ij}^l 对应的特征点, (i, j) 是 N_{ij}^l 和 $b_x(i, j)$ 的索引,则称

$$P_x = \{b_x(i, j) \in (0, 1) \mid 1 \leq i, j < m\}$$

为粒子, 其中 x 是粒子的序号, m 是 CQH 的行列数。

根据以上定义可知, 每个粒子都是多个特征点的集合, 其中每个特征点与 CQH 结构中的一个节点相对应, 特别是通过索引 (i, j) 可以快速获得层次 l (根据式(3)), 因此一个粒子能够表示模型的一个多分辨率的简化状态. 由于每个特征点仅占用一个二进制位, 所以可以将多个粒子压缩存储在一个 CQH 结构中. 以 4 个字节的数据类型为例, 每个 CQH 结构最多可以存储 32 个粒子. 由于多个粒子共用一个 CQH 结构, 同时为了便于节点检索和 TMS-DPSO 算法对简化模型状态的更新, 我们建立了与 CQH 对应的索引队列, 如下:

$$Q_{\text{CQH}} = \{(i, j) \mid N_{ij}^l\},$$

其中 m 是 CQH 的行列数, $1 \leq i, j < m, 0 \leq l < \log_2(m-1)-1$.

4.2 评价策略

粒子的评价函数是 DPSO 算法确定最优解的关键. 在 TMS-DPSO 算法中, 我们的评价函数考虑两个主要因素, 一方面根据我们提出的发散度函数确定模型的误差; 另一方面计算模型的简化比例. 我们认为在满足误差要求的情况下, 粒子表现的模型的简化比例越高, 该粒子越接近最优解; 如果不能满足误差要求, 则惩罚该粒子.

设 $E(P_x)$ 为当前粒子 P_x 的误差, $b_x(i, j) \in P_x$ 是与 N_{ij}^l 对应的特征点, 根据定义 5 分别计算每个节点 4 个简化域的发散度函数 $\theta(t_{ijk}^l)$, $k=0, 1, 2, 3$, 则 $E(P_x)$ 是所有特征值为 1 的节点的各简化域发散度函数最大值的均值. 如式(5)所示.

$$E(P_x) = \frac{\sum_{(i,j) \in Q_{\text{CQH}} \cap b_x(i,j)=1} \max(\theta(t_{ijk}^l))}{\sum_{(i,j) \in Q_{\text{CQH}}} b_x(i,j)} \quad (5)$$

设 e_{metric} 为误差阈值, 如果满足条件 $E(P_x) > e_{\text{metric}}$, 则当前粒子满足简化要求, 在这种条件下, 我们将粒子所表现的简化模型的简化程度作为评价粒子优劣的标准. 具体地, 粒子的评价函数 eva_x 计算方法如式(6)所示.

$$eva_x = \begin{cases} 1 - \left(\sum_{(i,j) \in Q_{\text{CQH}}} b_x(i,j) \right) / |Q_{\text{CQH}}|, & E(P_x) > e_{\text{metric}} \\ -E(P_x) / |Q_{\text{CQH}}|, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

众所周知, 误差阈值的设定通常也是模型简化

问题的一个难点, 为了通用性和客观性, 本文采用了将模型误差映射到屏幕的方式 (详见实验 5.1 式(8)和式(9)), 最终采用以像素为单位的屏幕误差阈值.

结合式(5)和式(6)可知, 算法在每次迭代时产生的最优粒子将是在满足误差精度要求的条件下简化比例最高的粒子. 由于我们采用前面提出的发散度函数计算模型误差, 因此最优粒子所表现的简化模型在模型精度、简化比例和细节特征几个方面将是最优的.

另外, 当粒子的特征和很大时, 不同粒子的评价函数值 eva_x 近似相等, 随着迭代次数的增加, 粒子的特征和变小, 此时不同粒子的评价函数值 eva_x 的差别变大. 当迭代次数达到一定深度, 各粒子的 eva_x 值又趋于相等时, 各粒子收敛在最优粒子周围, 显然这是启发式搜索中期望的特性. 从而我们可以求出每个粒子搜索历史上最优的状态和当前迭代次数下最优的粒子状态, 分别记作 P_x^g 和 P_g .

4.3 速度轨迹与状态更新

在 TMS-DPSO 算法中, 为了实现算法的快速收敛, 我们重新定义粒子的速度为粒子的特征点所对应的节点被优先激活的概率, 也就是当前粒子的特征点的速度超过速度阈值时, 则该特征点对应的节点优先实现越层简化.

设 v_{ij}^x 表示第 x 个粒子的特征点 $b_x(i, j)$ 的速度, 则第 x 个粒子的速度 $V^x = \{0 \leq v_{ij}^x \leq 1 \mid (i, j) \in Q_{\text{CQH}}\}$. 为了使每个粒子在下一次迭代时能够向更理想状态逼近, 我们利用 P_x^g 和 P_g 作为启发信息更新粒子的速度. 设 $b_x^g(i, j) \in P_x^g, b_g(i, j) \in P_g$, 则速度的更新如式(7)所示.

$$v_{ij}^x(t+1) = v_{ij}^x(t) + \rho_1(b_x^g(i, j) - b_x(i, j)) + \rho_2(b_g(i, j) - b_x(i, j)) \quad (7)$$

其中 ρ_1 和 ρ_2 是两个调节参数. 它们是算法调整求解的精确性和效率之间关系的重要因素. 针对模型简化的具体问题, 在实验中, 我们发现采用 $4 \times (1 - \exp(t/4))$ 作为参数的效果较为理想, 其中 t 为迭代次数.

根据粒子各个特征点的速度值, 我们可以确定优先简化的特征点, 即当 $v_{ij}^x > v_{\text{metric}}$ (速度阈值, 本文实验设为 0.5) 则置 $b_x(i, j)$ 为 1, 否则为 0. 根据 CQH 的特点可知同层节点构成封闭的地形空间, 且不同层节点中心顶点索引不重合, 因此我们在更新粒子特征点状态时不受层次限制. 只要在更新当前节点对应的特征点为 1 时, 将该节点简化域内更细节层次的所有特征点置 0, 就可以保证简化模型的

空间封闭性.

4.4 算法描述

TMS-DPSO 算法利用搜索策略实现三维地形的多分辨率简化模型,算法伪代码具体步骤如下.

输入. n 个粒子 P_x , 参数 $e_{\text{metric}}, V_{\text{metric}}, \text{simp}_{\text{ratio}}$

输出. 全局最优解 P_g

- 1. 置 $t \leftarrow 1, \rho_1 \leftarrow 4, \rho_2 \leftarrow 4$
置 n 个粒子的速度为 $(0,1)$ 之间的随机数
- 2. for 每个粒子
- 3. for 每个特征点
- 4. if $v_x > V_{\text{metric}}$ then
if $E(P_x) > e_{\text{metric}}$ then
置 $b_x(i, j) \in P_x \leftarrow 1$, 置 $b_x(i, j)$ 的所有子孙特征点 $\leftarrow 0$
else
置 $b_x(i, j) \leftarrow 0$
endif
endif
- 5. 评价当前全局最优粒子 P_g 和粒子 x 到目前为止的最优状态 P_x^g (根据式(5)和(6)计算)
- 6. if $eva_g \geq \text{simp}_{\text{ratio}}$ then 算法结束
- 7. 更新粒子速度(使用式(7))
- 8. 修正参数 $\rho_1, \rho_2 \leftarrow 4 \times (1 - \exp(t/4))$
- 9. 置 $t \leftarrow t + 1$
- 10. if $t < \text{iter}_{\text{max}}$ then 转步 2 else 算法结束 endif

在本文的 TMS-DPSO 算法中,我们首先初始化 n 个粒子,每个初始粒子是一个全分辨率(最细节层次)的 CQH 结构中的特征点集合,并且每个粒子采用一个 $0,1$ 之间随机数作为初始速度. 只有速度值大于阈值的粒子的特征点,我们才对其进行误差判断,因此大大减少了简化域误差的计算量. 经过第一次迭代以后每个粒子分别是状态不同的多分辨率 CQH 结构. 在以后的迭代中,根据我们提出的简化比例最高、精度最优的原则选出最优粒子,其他粒子将根据其自身的最优状态和全局最优粒子的状态更新特征点的速度. 然后根据新的速度是否大于阈值,更新粒子的状态. 由于每个粒子可以实现在多层之间进行更新,因此粒子能够迅速收敛于全局最优粒子附近. 根据式(5)和式(6),最优粒子对应一个具有较高的简化比例和模型精度的简化模型. 下面我们通过实验验证算法的有效性和收敛性.

5 实验验证

为了验证发散度函数和 TMS-DPSO 算法的有效性,同时测试算法的性能,我们对多个基准

(Benchmark)数据和其他具有明显地形特征的区域进行了实验研究和算法分析. 实验的硬件平台为 Pentium IV 3.0GHZ CPU,内存 1GB,显卡 GeForce5900fx 的微型计算机;采用 VC++ 作为语言开发工具. 实验基准数据包括:Mount Rainier、Crater Lake、Seattle,它们被很多文献多次采用^[9,30];除此以外,我们还对青藏高原、长白山火山口(以下称天池)等区域进行算法实验. 其中数据集 Mount Rainier 由 8193×8193 高程点组成,数据间隔为 10m;Crater Lake 由 4123×4207 高程点组成,数据间隔为 10m;部分 Seattle 数据集由 4097×4097 高程点组成,数据间隔为 30m;青藏高原是 GTOP30 数据(包括 43200×21600)的子集,数据间隔约为 1km;天池由 8702×5151 高程点组成,数据间隔为 10m.

5.1 发散度函数有效性验证

我们分别利用 Mount Rainier、Crater Lake、Seattle、青藏高原、天池数据对基于发散度函数的误差计算方法进行了实验验证,并将我们的 DFE 的误差计算方法与经典的层次几何误差 HGE 方法的结果进行了对比. 不失客观性,HGE 方法是按照经典层次几何误差思想在与本文算法相同硬件条件下编程实现的,因此结果难免有差异,在本文中仅作参考. 图 4 是对以上数据分别采用两种方法进行简化的结果. 从图中可以直观地看出,利用我们的 DFE 方法简化后,地形模型明显地保持了局部细节的特征,并且具有显著的地形自适应效果;而利用 HGE 方法简化后的实验结果中 Crater Lake 和天池地形出现了明显的局部细节特征丢失现象,Mount Rainier、Seattle 和青藏高原出现局部细节丢失同时又有局部地区网格过于密集的情况. 除此以外,在 Seattle 和青藏高原的两种方法对比中可以看到,二者的简化比率接近并且 HGE 略高的情况下,DFE 方法的自适应性明显高于 HGE 方法.

此外,我们在等价的误差阈值条件下对两种方法的简化比例和模型精度作了进一步的实验研究,由于不同的误差方法的阈值标准不同,我们建立了两种方法的误差阈值等价关系,同时为了具有视点相关的简化效果,我们采用屏幕误差作为最终的评价标准,也就是将我们前面计算的空间误差映射到屏幕,从而采用屏幕的像素数作为统一的误差标准,如式(8)所示.

$$\tau = \delta_e \times d / (|N - E| \cdot D) \times \lambda \tag{8}$$

其中 E 为视点, d 为视点到屏幕的距离, D 是通过视



图 4 DFE 方法与 HGE 方法误差计算效果图对比

点垂直屏幕的单位法向量, N 为顶点, λ 为单位距离屏幕像素个数, δ_e 为基于高程差的空间误差阈值, τ 为屏幕误差. 同时, 我们采用式(9)转换我们的发散度函数阈值 $\hat{\theta}$ 为空间误差阈值 δ_e .

$$\delta_e = \tilde{g} / \sqrt{(1 - \hat{\theta}) / (1 + \hat{\theta})}$$

(9)

其中 \tilde{g} 是网格平均尺寸. 下面我们从数值的角度进一步在简化比例与精度两方面对两种方法进行对比. 表 1 描述了误差阈值分别为 0.5 个像素、1 个像素、1.5 个像素时两种方法的简化比例和简化模型

表 1 DFE 方法与 HGE 方法简化比例对比表

数据源	原始三角形数(k 个)	算法	阈值 0.5(像素)			阈值 1.0(像素)			阈值 1.5(像素)		
			三角形数(k 个)	简化比例/%	方差 σ	三角形数(k 个)	简化比例/%	方差 σ	三角形数(k 个)	简化比例/%	方差 σ
Mount Rainier	65552	DFE	41953	36.0	0.02	31137	52.5	0.03	19207	70.7	0.04
		HGE	45886	30.0	0.10	34087	48.0	0.25	23926	63.5	0.30
Crater Lake	16392	DFE	7212	56.0	0.06	4327	73.6	0.08	639	96.1	0.09
		HGE	7704	53.0	0.29	4885	70.2	0.49	1065	93.5	0.60
天池	16392	DFE	7540	54.0	0.07	4065	75.2	0.09	1262	92.3	0.10
		HGE	8196	50.0	0.60	4327	73.6	0.70	1557	90.5	0.80
青藏高原	4100	DFE	2706	34.0	0.03	2173	47.0	0.05	1845	55.0	0.06
		HGE	2952	28.0	0.08	2312	43.6	0.26	1952	52.4	0.35
Seattle	4100	DFE	1702	58.5	0.01	845	79.4	0.02	144	96.5	0.03
		HGE	1792	56.3	0.05	951	76.8	0.10	308	92.5	0.20

5.2 TMS-DPSO 算法的性能分析和收敛性验证

为了更准确地验证本文提出的 TMS-DPSO 算法的有效性, 我们对每个地形数据在同等条件下重复实验 30 次, 以下实验结果数据均来自 30 次实验的均值. 由于粒子的每个特征点为 0 或 1, 因此当评价出最优粒子后, 其它粒子特征点状态会迅速得到更新. 然而, 对于不同数据和不同的粒子数量收敛速度也不同. 图 5 描述了屏幕阈值为 1.5 个像素时, 粒子数分别是 10, 20, 30, 40 的情况下, Crater Lake 地形模型的简化比例与迭代次数的关系. 不难看出当粒子数为 10 和 20 的情况, 收敛速度大约在迭代次数为 20~30 之间, 此时简化比例趋于平缓. 其它两种情况收敛速度相近, 但是当粒子数为 40 的情况简

与原始模型的方差结果, 可以看出, 对于相同原始数据模型, 我们的 DFE 方法得到的简化比例优于 HGE 方法, 且 DFE 方法的方差结果更小, 表明 DFE 的模型精度更高, 同时具有更好的自适应性. 这主要由于我们的 DFE 方法在保留足够多的地形细节和轮廓特征的同时简化掉不必要的三角形, 因此在获得更高的简化比例情况下, 仍然保持较高的模型精度. 从两种方法的模型方差数值上看, DFE 的精度更高.

化比例反而略低, 因此在具体实验中通常采用 30 个粒子完全满足我们的算法要求.

从图 5 中我们还可以看出在最初的迭代过程中模型的简化比例增加很快, 随着迭代次数的增加, 简化比例曲线变得逐渐平缓, 最终趋于稳定. 事实上当满足误差阈值要求时, 全局最优粒子的评价函数 eva_x 的值与简化比例等价, 因此图 5 曲线变化说明算法具有较好的收敛性.

此外, 为了进一步验证最优解的可信度, 我们引入离散熵函数评价粒子群中对于同一个特征点各个粒子之间的相关性, 我们采用式(10)^[27] 计算粒子群的熵值. $Pr(i, j)$ 是 CQH 中特征点 (i, j) 取 1 的粒子的个数与 n 个粒子的 CQH 中值为 1 的所有特征点数的比值, 所以 $Pr(i, j)$ 相当于特征点 (i, j) 被粒子选择的概率. $Pr(i, j)$ 值越大, 粒子群的熵值越小, 表明群中粒子之间的相关性越好, 反之粒子的相关性越差. 因此我们可以通过熵值验证粒子群的收敛性及收敛的最优解是否有效.

$$\left\{ \begin{aligned} Pr(i, j) &= \frac{\sum_{x=1}^n b_x(i, j)}{\sum_{(i, j) \in Q_{CQH}} \sum_{x=1}^n b_x(i, j)} \\ Entropy &= \sum_{(i, j) \in Q_{CQH}} -Pr(i, j) \log_2(Pr(i, j)) \end{aligned} \right.$$

(10)

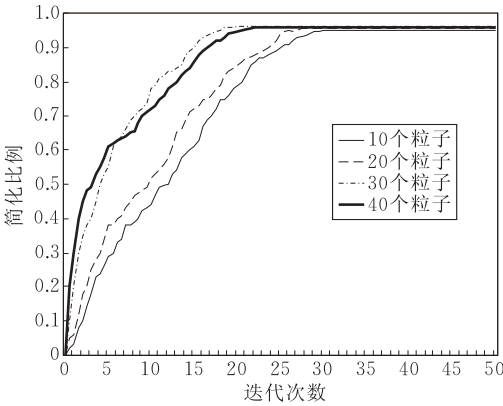


图 5 迭代次数与简化比例关系图

图 6 描述了多个数据模型随着迭代次数的增加粒子群熵值的变化,可以看出由于数据的规模和地形特征不同熵的变化也有所不同,但是 5 条曲线的走势近似相同,都是在迭代初始阶段熵值迅速下降,达到一定迭代次数趋于平缓,最终稳定在各自的水平线上.以 Seattle 数据为例,当迭代次数达到 10~15 次,熵值将保持在 2~2.3 之间,从而验证了多数粒子收敛于最优解.

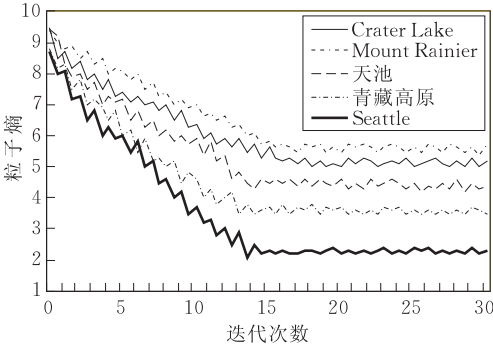


图 6 迭代次数与群熵值关系图

我们还分别利用以上地形数据在相同硬件条件下根据层次简化方法的思想实现了 QHSA 算法,由于硬件等客观因素,实验结果会有差异,因此在本文中仅作参考.我们从简化效率方面与 TMS-DPSO 算法进行了比较.由于 QHSA 算法采用逐层简化的方式实现简化模型,没有启发信息作为指导,所以在效率上 TMS-DPSO 算法优于 QHSA 算法.图 7 和图 8 描述了屏幕误差阈值为 1.5 个像素时,两种方法的模型简化比例随时间变化的曲线.可以看出对于 5 个数据源,TMS-DPSO 算法迅速收敛于一个稳定的简化比例水平,简化时间约 10~20s;而 QHSA 算法简化时间为 30s 以上,并且简化比例略低于 TMS-DPSO 算法,由此可见,相对于 QHSA 算法,TMS-DPSO 算法的效率更高.

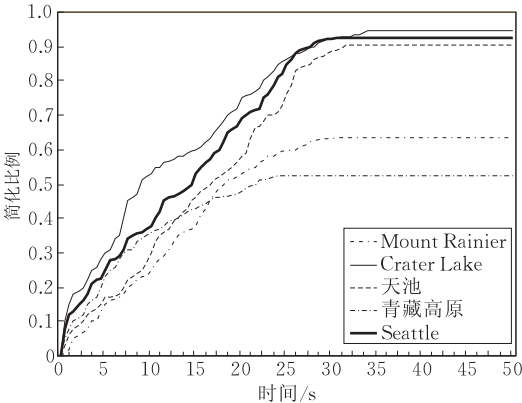


图 7 QHSA 算法简化比例与简化时间关系图

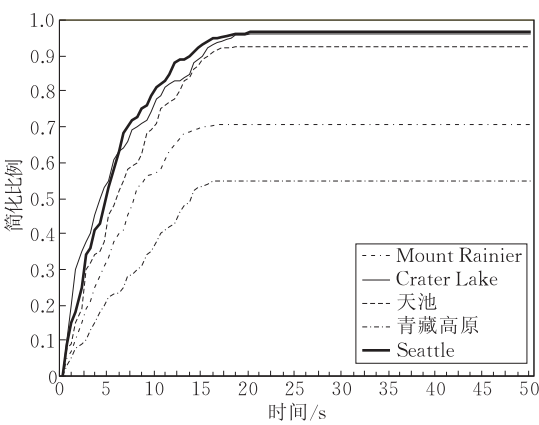


图 8 TMS-DPSO 算法简化比例与简化时间关系图

6 结 论

基于特征的地形模型简化技术不仅是大规模场景渲染的研究基础,在 3D 模型检索与导航以及地表水流模拟等研究领域也越来越受到关注,因此寻求一种明显保持细节特征和模型精度,同时具有较高的简化比例快速地形模型简化算法有着至关重要的意义.鉴于此,我们改变了经典的逐层遍历的简化模式,提出了层次模型简化技术与群智能算法相结合的模型简化离散粒子群算法,该算法具有较强的自适应特征保持特性,并且能够快速收敛于最优的简化模型.

为了实现以上特性,我们首先描述了隐式四叉树层次结构,并且详细阐述了相关索引技术和计算公式,因此获得了最大空间使用效率.同时隐式地保留了层次信息,因而加速了简化过程.其次,我们根据节点位置,将节点邻接关系划分为两类,在此基础上提出了基于法向矢量夹角的发散度函数误差计算方法,使得简化模型具有较高的精度和自适应性.最后,我们重新定义了粒子的结构,构造了基于发散度函数和简化比例的粒子评价标准,并且提出了适合粒子收敛的速度更新公式.因此,在最优粒子的引导下,模型满足精度要求的同时,具有高简化比例的粒子先被处理,实现越层简化,加快算法收敛速度.

本文算法在基准数据包括 Mount Rainier、Crater Lake、Seattle 以及青藏高原、天池数据上进行了实验研究.结果表明与 QHSA 方法相比,我们的算法保证模型精度和细节特征的同时,在简化效率和模型精度两方面均有显著提高.在相同误差阈值的条件下我们的算法生成的简化模型具有更优的简化比例.从而,验证了本文提出的方法在简化模型的质

量和算法效率两个方面均具有更好的性能.

参 考 文 献

- [1] Clark F O, Larry H M, John R W et al. Visual terrain mapping for Mars exploration. *Computer Vision and Image Understanding*, 2007, 105(1): 73-85
- [2] Xiao Jun, Zhuang Yue-Ting, Wu Fei. Recognition and retrieval of 3D terrain based on level of detail and minimum spanning tree. *Journal of Software*, 2003, 14(11): 1955-1963(in Chinese)
(肖俊, 庄越挺, 吴飞. 基于细节层次与最小生成树的三维地形识别与检索. *软件学报*, 2003, 14(11): 1955-1963)
- [3] Chang Y C, Sinha G. A visual basic program for ridge axis picking on dem data using the profile-recognition and polygon-breaking algorithm. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(2): 229-237
- [4] Yoon S, Salomon B, Gayle R. Quick-VDR: Out-of-core view-dependent rendering of gigantic models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2005, 11(4): 369-382
- [5] Ulrich T. Rendering massive terrains using chunked level of detail control//*Proceedings of SIGGRAPH2002*. San Antonio, Texas, USA, 2002: 1-14
- [6] Levenberg J. Fast view-dependent level-of-detail rendering using cached geometry//Gross M, Joy K I, Moorhead R J, eds. *Proceedings of the IEEE Visualization*. Los Alamitos, CA, USA, 2002: 259-266
- [7] Cignoni P, Ganovelli F, Gobbetti E. BDAM-batched dynamic adaptive meshes for high performance terrain visualization. *Computer Graphics Forum*, 2003, 22(3): 505-514
- [8] Guo Li-Zhen, Fei Guang-Zheng, Wang Wen-Cheng et al. A metric with texture feature integrated for model simplification. *Chinese Journal of Computers*, 2005, 28(6): 1054-1061(in Chinese)
(郭力真, 费广正, 王文成等. 结合纹理特征的模型简化误差度量算子. *计算机学报*, 2005, 28(6): 1054-1061)
- [9] Hwa L M, Duchaineau M A, Joy K I. Real-time optimal sdaptation for planetary geometry and texture: 4-8 tile hierarchies. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2005, 11(4): 355-368
- [10] Quan Hong-Yan, Zhang Tian-Wen, Dong Yu-Xin. A geometric model simplification method based on regions partition. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(10): 1835-1842(in Chinese)
(全红艳, 张田文, 董宇欣. 一种基于区域分割的几何模型简化方法. *计算机学报*, 2006, 29(10): 1835-1842)
- [11] Saux E, Thibaud R et al. A new approach for a topographic feature-based characterization of digital elevation data//*Proceedings of the ACMGIS*. Washington, USA, 2004: 73-81
- [12] Vivoni E R, Teles V et al. Embedding landscape processes into triangulated terrain models. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(4): 429-457
- [13] Clasen M, Hege H C. Terrain rendering using spherical clipmaps//*Proceedings of IEEE-VGTC Symposium on Visualization*. Lisbon, Portugal, 2006: 91-98
- [14] Losasso F, Hoppe H. Geometry clipmaps: Terrain rendering using nested regular grids//*Proceedings of the SIGGRAPH 2004*. Los Angeles, CA, USA, 2004: 769-786
- [15] Schneider J, Westermann R. GPU-friendly high-quality terrain rendering. *Journal of WSCG*, 2006, 14(1-3): 49-56
- [16] Yotam L, Zvi K, Jihad E S. Seamless patches for GPU-based terrain rendering//*Proceedings of the WSCG 2007*. Plzen Czech Republic, 2007: 201-208
- [17] Hoppe H. Smooth view-dependent level-of-detail control and its applications to terrain rendering//*Proceedings of the IEEE Visualization 1998*. North Carolina, USA, 1998: 35-42
- [18] Jordan G. Adaptive smoothing of valleys in DEMs using TIN interpolation from ridgeline elevations: An application to morphotectonic aspect analysis. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(4): 573-585
- [19] Li Sheng, Ji Jun-Feng, Liu Xue-Hui et al. High performance navigation of very large-scale terrain environment. *Journal of Software*, 2006, 17(3): 535-545(in Chinese)
(李胜, 冀俊峰, 刘学慧等. 超大规模地形场景的高性能漫游. *软件学报*, 2006, 17(3): 535-545)
- [20] Zhang L Q, Yang C J et al. Effective techniques for interactive rendering of global terrain surfaces. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 215-219
- [21] Zhang Hui-Jie, Sun Ji-Gui, Yu Hai-Hong, Qi Chang-Song. An efficient method for very large scale Out-of-core terrain visualization//*Proceedings of ICAT'06*. Hangzhou, China, 2006: 36-41
- [22] Duchaineau M, Wolinsky M. ROAMing terrain: Real-time optimally adapting meshes//*Proceedings of the IEEE Visualization*. Los Alamitos, CA, USA, 1997: 81-88
- [23] Lindstrom P, Koller D, Ribarsky W et al. Real-time continuous level of detail rendering of height fields. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'96)*, 1996, 30(3): 109-118
- [24] Pajarola R. Large scale terrain visualization using the restricted quadtree triangulation//*Proceedings of the IEEE Visualization 1998*. North Carolina, USA, 1998: 19-26
- [25] Yang Qing-Yun, Sun Ji-Gui, Zhang Ju-Yang. A hybrid particle swarm optimization for binary CSPs//*Proceedings of the ICIC2006*. Kunming, China, LNCS 4115, 2006: 39-49
- [26] Yang Qing-Yun, Sun Ji-Gui, Zhang Ju-Yang. A hybrid discrete particle swarm algorithm for open-shop problems//*Proceedings of the SEAL 2006*. Hefei, China, 2006: 158-165
- [27] Yin P Y. A discrete particle swarm algorithm for optimal polygonal approximation of digital curves. *Journal of Visual Communication & Image Representation*, 2004, 15(2): 241-260
- [28] Dozier G, Brown D, Hou H, Hurley J. Vulnerability analysis of immunity-based intrusion detection systems using genetic and evolutionary hackers. *Applied Soft Computing*, 2007, 7(2): 547-553

[29] Zhang Hui-Jie, Sun Ji-Gui, Liu Jin et al. A new simplification method for terrain model using discrete particle swarm optimization//Proceedings of the ACMGIS. Seattle, Washington DC, USA, 2007: 415-418

[30] Zhang Hui-Jie, Sun Ji-Gui, Lv Nan et al. A new seamless

multi-resolution simplification method for the terrain model//Proceedings of the Web Intelligence and Intelligent Agent Technology Workshops. Silicon Valley, CA, USA, 2007: 39-42



ZHANG Hui-Jie, born in 1975, Ph. D. candidate, lecturer. Her research interests include computer graphics, 3D model simplification, multi-resolution modeling for terrain, and 3D GIS.

SUN Ji-Gui, born in 1962, Ph. D. , professor, Ph. D.

Background

As one of important components of virtual reality, terrain model has been widely applied in numerous fields, such as movies, geographical information system (GIS), cartography, games and 3D models retrieval. However, the major challenge encountered in modeling terrain is that billion of samples are contained in large terrain height map. Thus, many scholars have taken GPU, which can greatly improve the rendering efficiency of the terrain. Even so, this technique can not be competent for rendering interactively the massive data in the terrain model by brute force.

Since the previous simplification algorithms adopt a strategy of traversing each level in the hierarchy of model, they can not effectively achieve a trade-off between efficiency of the algorithm and the quality of the approximations. This paper puts forward a fast simplification method for the terrain model. It is new and original to integrate the discrete particle swarm optimization with the hierarchical structure.

supervisor. His research interests include artificial intelligence, and virtual reality.

LU Ying-Hua, born in 1962, professor, Ph. D. supervisor. His main research interest is digital image processing.

LU Nan, born in 1979, master candidate. Her main research interest is 3D terrain model simplification.

WANG Yuan-Zhi, born in 1977, master, associate professor. His main research interest is computer graphics.

In detail, each particle is represented as an approximation using the hierarchical structure. By the evaluation function proposed in this paper, the optimal particle can be produced. The error measure strategy considered not only the detailed terrain feature, but also the global contour feature. Therefore, the approximation is of better quality and of higher adaptability. By the experiments conducted on many benchmark terrain models, it is showed that the algorithm is of higher efficiency, compared with other typical simplification methods.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under grant number 60773097 and 60603030, and Science Foundation for Young Teachers of Northeast Normal University (20081003). All the research results in this paper have been applied in an actual simulation training system about several different airplanes, and they are running well at present.