

文章编号:1673-5005(2009)05-0168-05

# 生成地形细节层次的粗糙度误差判据

陈国军<sup>1,2</sup>, 崔保磊<sup>1</sup>, 陈庆刚<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 计算机与通信工程学院, 山东 东营 257061;

2. 北京航空航天大学 虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191)

**摘要:** 误差判据是生成地形表面细节层次的核心问题,影响着三角形数目和地形三角形网的偏差。在分析各种误差判据计算结果的基础上,提出基于粗糙度的误差计算方法。采用表征地形起伏形状的粗糙度作为因子,建立误差评价函数,结合视点位置形成误差判据球,最后根据误差判据球生成地形细节层次模型。对误差判据改进后,适用于高空俯视地形及动态地形的细节层次技术(LOD)生成。试验表明,改进的粗糙度误差判据降低了地形网格中的三角形数量,对平坦地形的优化效率较突出。

**关键词:** 误差判据; 粗糙度; 误差判据球; 细节层次模型

**中图分类号:** TP 391 **文献标识码:** A

## Error metric with roughness of generating LOD of terrain

CHEN Guo-jun<sup>1,2</sup>, CUI Bao-lei<sup>1</sup>, CHEN Qing-gang<sup>1</sup>

(1. College of Computer and Communication Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University of Aeronautics Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Error metric is the key problem of generating level of detail (LOD) of terrain surface, which affects the number of triangles and the bias of triangular mesh. On the basis of analyzing various methods of calculating error metric, an improved calculation method of error metric based on the roughness was presented. The roughness was taken to be a factor which expresses the fluctuation of terrain, by which the error metric was calculated, the sphere of error metric was formed according to the position of eye point, The appropriate LOD model on every frame was chosen. The improved error metric applies to the high-altitude terrain overlooking and the generation of LOD in dynamic terrain. The experimental results show that the improved error metric reduces the required number of triangles, and fits the even terrain better.

**Key words:** error metric; roughness; sphere of error metric; LOD model

三维真实感地形的实时交互绘制是虚拟现实、地理信息系统、军事仿真等应用中的关键问题。与视点相关的连续细节层次技术(continuous level of detail, CLOD)<sup>[1-4]</sup>根据视点位置和地形起伏程度确定地形表面的细节层次。CLOD基于规则网构造地形表面,可以快速构建细节层次,实时性好<sup>[2,4]</sup>。利用几何误差判据、参照视参数和目标节点位置等,通过各节点误差与给定阈值的比较,决定三角形的分

裂和合并,从而生成地形表面的多分辨率模型<sup>[4]</sup>。现有的误差判据<sup>[2,4-8]</sup>一定程度上实现了细节层次(LOD)模型提取,但对局部粗糙或平坦的表面未能合理处理,存在局部细节失真或计算负荷较重等问题。对于动态地形,需要修正误差测度,以保证变化区域的正确绘制。当高空俯视地形时,需要突出绘制地形的高海拔区域,降低海拔区域的细节层次。笔者提出一种改进的误差判据计算方法,以合理生

收稿日期:2009-04-02

基金项目:国家“973”计划项目(2009CB320805);国家“863”计划项目(2009AA01Z333);中国石油大学博士基金项目

作者简介:陈国军(1968-),男(汉族),江苏如东人,副教授,博士,从事计算机图形学、科学计算可视化和虚拟现实等方面的研究。

成高空俯视及动态变化的地形多分辨率模型。

## 1 粗糙度误差判据

根据采样点的 DEM 高程数据,将平面正方形区域不断二叉划分,生成整个地形的静态全分辨率网格模型。在绘制地形时,根据视点位置自顶向下依据顶点的误差判据决定是否进行二叉划分,从而生成地形的多分辨率模型。误差值影响地形细节层次模型中三角形数目和逼近程度。

### 1.1 粗糙度量

地形粗糙度是反映地形局部起伏剧烈程度的特征量,对合理生成局部区域的三角形网有重要意义。起伏曲折的地形区域需要更精细的三角形网格表示,而平坦的地形区域需要更粗糙的三角形网格表示。地形的曲折程度可用粗糙度来表征,其大小对应地形的粗糙程度,值越大地形越曲折,值越小地形越平坦<sup>[9]</sup>。

三角形二叉树的最底层上所有叶子三角形组成了整个地形表面,为地形的全分辨率表示。地形粗糙度采用自底向上的方式计算,先计算所有最底层三角形的地形粗糙度(图1(a))。

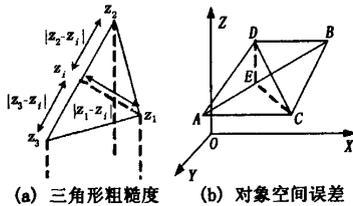


图1 三角形粗糙度误差判据

Fig. 1 Error metric with roughness of a triangle

用三角形各顶点和斜边中点的高程差表征单个三角形的粗糙度,计算式为

$$\begin{cases} Rh_i = (|z_1 - z_i| + |z_2 - z_i| + |z_3 - z_i|) / (3h), \\ h = \max(Z) - \min(Z), Z = \{z_1, z_2, z_3, z_i\}. \end{cases} \quad (1)$$

式中, $z_1, z_2, z_3$ 为三角形各顶点的高程值; $z_i$ 为三角形斜边中点*i*的高程值; $h$ 为整个地形最大和最小高程值之差,表征地形的高程范围; $Rh_i$ 表征单个三角形的粗糙度,值域为 $[0, 1]$ 。

计算出最底层三角形的粗糙度后,向上递归计算所有祖先三角形的粗糙度:

$$Rh_i = \begin{cases} Rh_i, & \text{若 } i \text{ 为叶顶点;} \\ \max(\max_{j \in C_i}(Rh_j), Rh_i), & \text{若 } i \text{ 为非叶顶点.} \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 误差判据计算

从三维几何空间来看(见图1(b)), $\Delta ABC$ 引入斜边  $AB$  的中点  $E$  后,分裂为2个子三角形: $\Delta AEC$ 和 $\Delta BEC$ 。由于  $E$  点是地形上的采样点,其实际高程值可能不是点  $A$  和点  $B$  的平均值,这样  $E$  点就偏离边  $AB$ 。因此, $\Delta ABC$  引入斜边的中点  $E$  后,实际分裂为2个子三角形: $\Delta ADC$ 和 $\Delta BDC$ 。产生的空间误差用顶点  $E$  在分裂前后(分裂后表示为点  $D$ )的高程值差的绝对值表示,即

$$\delta_D = |Z_D - (Z_A + Z_B) / 2|. \quad (3)$$

动态生成并绘制 LOD 网格模型时,由于涉及到透视投影,必须引入屏幕空间误差。如果  $P$  表示视点, $e$  表示视点, $\tau$  表示给定的屏幕像素误差, $d$  表示视点到投影平面的距离, $\Delta h$  表示对象空间误差,得出屏幕空间误差  $\rho$  计算公式<sup>[10]</sup>为

$$\rho = \Delta h d / (\tau \|P - e\|). \quad (4)$$

假设  $\lambda$  表示单位长度对应的像素个数, $\delta_i$  表示顶点  $i$  对应的对象空间误差, $P_i$  和  $e$  分别为顶  $i$  和视点在三维对象空间中的位置。在地形绘制过程中, $d$  和  $\lambda$  均为常数,每个顶点的  $\delta_i$  也是确定的。给定屏幕空间误差阈值  $\tau$ ,可得到

$$\|P_i - e\| = \delta_i d \lambda / \tau. \quad (5)$$

该式确定了三维空间中以顶点  $i$  为球心,半径为  $\delta_i d \lambda / \tau$  的球面,称之为顶点  $i$  的原始误差判据球<sup>[5]</sup>。当视点位于球面上时,对应于顶点  $i$  的屏幕空间误差  $\rho$  恰好等于  $\tau$ ;当视点进入球面内部时, $\rho > \tau$ ,顶点  $i$  应为活跃的,即  $i$  作为斜边中点将等腰直角三角形一分为二;当视点在球面外部时, $\rho < \tau$ ,顶点  $i$  应为不活跃的。因此,通过测试视点和球面的内外关系来确定顶点是否出现在三角网中。

### 1.3 嵌套误差判据球

设  $P_i$  和  $P_j$  分别为顶点  $i$  及其孩子顶点  $j$  的空间位置, $C_i$  为三角形二叉树中顶点  $i$  的孩子的集合, $Rh_i$  为粗糙度因子, $R_j$  为顶点  $j$  的嵌套误差判据球半径,则有

$$R_i = \begin{cases} r_i, & \text{若 } i \text{ 为叶顶点;} \\ \max\{r_i, \max_{j \in C_i}(\|P_i - P_j\| Rh_j + R_j)\}, & \\ \text{若 } i \text{ 为非叶顶点.} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)所定义的误差判据球为顶点的嵌套误差判据球。值域为 $[0, 1]$ 的  $R_h$  作为参数乘以父子距离  $\|P_i - P_j\|$ ,愈平坦的地形区域,粗糙度趋于0,误差

半径  $R$  愈小;愈曲折的地形区域,粗糙度趋于 1。

## 2 误差判据的应用

高空远距离俯瞰地形时,为防止轮廓细节失真,采用强制轮廓顶点活跃并减小低洼处误差判据的策略。动态地形中,动态扩展变化单元格的精度实现地形的实时变化。

### 2.1 高空区域轮廓处理

当高空远距离俯瞰时,起伏程度较小的区域不易看清细节,但需要表现高处陡峭的地形轮廓。为达到这种效果,需修正地形粗糙度计算方法,置高处陡峭三角形区域的节点活跃,强制绘制高处陡峭区域:

$$\|e - c\| > kd. \quad (7)$$

式中,  $c$  为地形中心。

视点位置距地形中心距离大于阈值  $D_f$  时( $D_f$  取  $k$  倍地形边长,  $k$  取大于 1 的数值),认为满足远距离条件,此时进行轮廓处理。根据父子分裂点的嵌套关系,仅判断所有叶子三角形的粗糙度是否满足陡峭条件。计算叶子三角形对应节点的粗糙度  $Rh$  的公式为

$$Rh = (\max H - \min H) / \sum_{i=1}^3 (h_i - \min H). \quad (8)$$

式中,  $h_i$  为叶子三角形各顶点高程值;  $\max H$ ,  $\min H$  分别为叶子三角形的最大和最小高程值。若叶子三角形的最大高程值大于最高点的  $1/2$ ,且直角顶点对应节点的粗糙度大于阈值  $\epsilon$  ( $\epsilon$  取小于 1 的正小数),则该叶子三角形对应的分裂点活跃,其所有祖先也递归置为活跃。

地形生成过程中,计算原始误差判据球半径时,若三角形的最大高程值小于最高点的  $1/2$ ,则将计算后的误差半径值降低为原来的  $k$  倍,  $k$  值域为  $[0, 1]$ ,在公式(5)的基础上,有

$$\|P_i - e\| = \delta_i d \lambda k / r. \quad (9)$$

### 2.2 动态地形

在动态地形应用中,原始采样数据一般精度低,当地形受作用发生形变时,形变区域需要更高的精度才能表现出形变效果。如果提高整个地形的分辨率会大幅提高地形的数据量,为此 He 提出了数据精度的动态扩展技术<sup>[7]</sup>。局部变化区域的数据精度扩展后,由于地形数据精度的变化,原地形数据中引入了新的顶点,扩展出更精细的三角形。新引入的顶点和三角形需要计算粗糙度和误差,同时因为地形的变化,原有的过渡区内的三角形粗糙度及顶

点误差也需要重新计算。计算新引入三角形的粗糙度及对应节点的原始误差判据球半径,依据节点间依赖关系由公式(6)自底向上嵌套计算判据球半径。为突出形变区域,对形变单元格的误差提高一定比例,增加误差判据球半径的大小,使得同视点下变化区域内的引入顶点较容易进入活跃状态。

## 3 试验结果与分析

测试改进的误差判据的性能,测试数据包括生成地形表面网中的三角形数目及精度,分别进行低空漫游、高空俯视及动态地形的对比实验。受物理内存的限制,本文中采用的网格尺寸为  $2049 \times 2049$ ,当地形大于  $2049 \times 2049$  时,位于视野里的数据有限,采用分块绘制可以突破计算机资源限制<sup>[11]</sup>,提高绘制速度。试验的软件平台为 Windows XP, Visual C++ 6.0 和三维图形标准库 OpenGL,显卡为 GeForce4 6200LE。实验地形数据来自文献[12],地形在  $X$  和  $Y$  方向上的采样间隔均为 20 m。设采样点数量  $N = (2^k + 1) \times (2^k + 1)$ ,算法中在存储空间上仅增加了节点粗糙度,空间复杂度仍为  $O(N)$ 。尽管在构造三角形二叉树时需要嵌套递归计算每个三角形节点的粗糙度,以及计算误差判据球半径时考虑粗糙度系数,但所用时间开销仍然基于二叉树的遍历,所以算法的时间复杂度为  $O(N)$ 。

### 3.1 试验 1:静态地形的粗糙度误差

试验比较了改进的粗糙度、Lindstrom<sup>[1]</sup>和许妙忠<sup>[9]</sup>3种计算误差方法,结果见图2。试验结果表明,本文算法比 Lindstrom 及许妙忠算法产生的三角形数目少,高程误差和 Lindstrom 算法相当。

### 3.2 试验 2:动态地形应用

对动态地形的变化区域 LOD 进行了试验对比。图3为演示系统生成的汽车车辙图像。图3(b)相对(a)采用了较少的三角形绘制形变地形,形变区域及过渡区的网格划分依然保持精细,且网格中不存在裂缝或 T 形交叉点。

### 3.3 试验 3:高空俯视地形

远景区域轮廓处理的对比试验示意图见图4。试验程序选取高处轮廓明显的 Ratcliff 地形,较远视点观察时出现高处尖端轮廓的消失(图4(a));采取陡峭地形处理后,顶端尖角得以突出绘制,低处三角形网格细节层次降低(图4(b))。

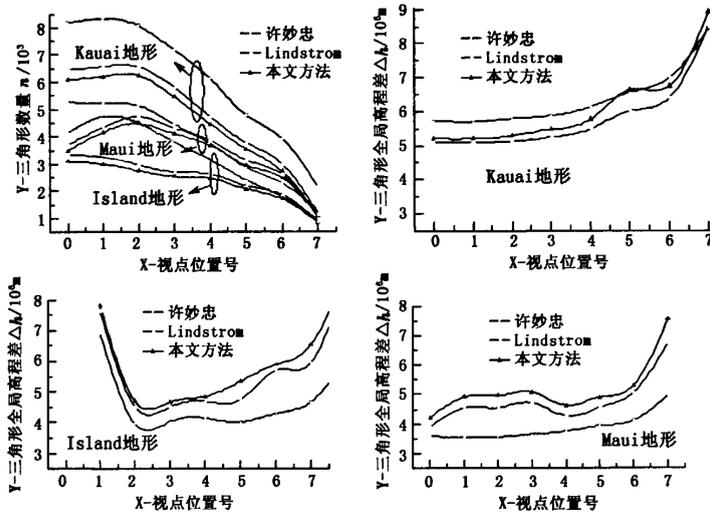


图2 三种地形三种方法的三角形数量与高程误差对比

Fig.2 Comparison of triangle number and height error in three kinds of DEM by three methods

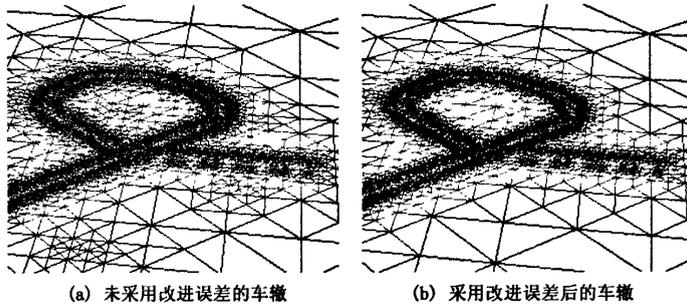


图3 改进误差前后的车辙对比图

Fig.3 Comparison of tire track before and after error improved

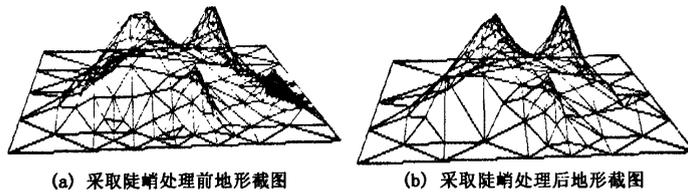


图4 Ratcliff地形的远景轮廓对比

Fig.4 Comparison of entire outline of Ratcliff terrain

### 4 结束语

针对地形绘制中三角形数目庞大的问题,给出了一种基于粗糙度的误差判据改进算法,该算法利用地形表面的曲折程度来调整误差判据的大小,更细致地选取不同的细节层次表示地形;应用于动态地形的绘制,结合单元格扩展技术,修正形变区域的误差判据;高空俯视时,突出绘制高处陡峭区域的轮廓,简化低海拔区域的细节层次,保证了地形轮廓的

完整性。试验结果表明,该算法可以有效地减少地形绘制所需要的三角形数目,而不会影响实时绘制的效率,对平坦地形优化效果较为突出。

#### 参考文献:

[1] LINDSTROM P, KOLLER D, RIBARSKY W, et al. Real-time, continuous level of detail rendering of height fields[C]//Proceedings of SIGGRAPH 96. New York: ACM Press, 1996:109-118.  
 [2] DUCHAINEAU M, WOLINSKY M, SIGETI D E, et al.

ROAMing terrain: real-time optimally adapting meshes [C]//Proceedings of the Conference on Visualization '97. Washington: IEEE Computer Society, 1997;81-88.

[3] HOPPE H. Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering[C]//Proceedings of the Conference on Visualization '98. Washington: IEEE Computer Society, 1998;35-42.

[4] LINDSTROM P, PASCUCCI V. Visualization of large terrains made easy[C]//Proceedings of the Conference on Visualization01. Washington: IEEE Computer Society, 2001;363-370.

[5] ROTTGER S, HEIDRICH W, SLUSALLEK P. Real-time generation of continuous levels of detail for height fields [C]//Proceedings of the Sixth International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization '98. Plzen-Bory: WSCG Society, 1998;315-322.

[6] BAO XIAO-HONG, PAJAROLA RENATO, SHAFAE MICHAEL. Smart: an efficient technique for massive terrain visualization from out-of-core [C]//Proceedings of Vision, Modeling and Visualization (VMV). Berlin: Springer Verlag, 2004;413-420.

[7] HE YE-FEI. Real-time visualization of dynamic terrain for ground vehicle simulation[D]. Iowa: The University of Iowa, 2000.

[8] 王林旭,李思昆,潘晓辉. 动态地形的实时可视化[J]. 计算机学报,2003,26(11):1524-1531.

WANG Lin-xu, LI Si-kun, PAN Xiao-hui. Real-time visualization of dynamic terrain [J]. Chinese Journal of Computers, 2003,26(11):1524-1531.

[9] 许妙忠. 大规模地形实时绘制的算法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2005,30(5):392-395.

XU Miao-zhong. Research on real-time rendering for large scale terrain[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005,30(5):392-395.

[10] 赵友兵,石教英,周 骥,等. 一种大规模地形的快速漫游算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2002,14(7):624-628.

ZHAO You-bing, SHI Jiao-ying, ZHOU Ji, et al. A fast algorithm for large scale terrain walkthrough[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(7):624-628.

[11] 殷媛,陈国军,吴威. 地形分块绘制中的边界裂缝处理算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(10):1557-1562.

YIN Yuan, CHEN Guo-jun, WU Wei. An algorithm of avoiding crack for rendering parting terrain[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(10):1557-1562.

[12] DISCOE Ben. Elevation file repository [EB/OL]. <http://www.vterrain.org/BT/index.html>, 2007-09-11.

(编辑 刘为清)

(上接第 167 页)

[7] 范洪生,叶震,侯保花. 基于公钥密码体制的 Kerberos 协议的改进[J]. 计算机技术与发展,2006,14(4):224-227.

FAN Hong-sheng, YE Zhen, HOU Bao-hua. Improvement of kerberos protocol based on public key cryptosystem[J]. Computer Technology and Development, 2006, 14(4):224-227.

[8] 何蕴婷,张宗福. 基于 PKI 的文件安全传输方案研究[J]. 电脑知识与技术,2008,3(5):885-887.

HE Yun-ting, ZHANG Zong-fu. Research on confident file transfer based on PKI[J]. Computer Knowledge and Technology,2008,3(5):885-887.

[9] Haidar Ali Nasrat, Abdallah Ali E. Formal modeling of PKI based authentication[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2009,235:55-70.

[10] [美]NASH Andrew, DUANE William, JOSEPH Celia, et al. PKI:实现和管理电子安全[M]. 张玉涛,陈建奇,杨波,等,译.北京:清华大学出版社,2002.

[11] 刘士栋,杨林,王建新. 分布式网络安全服务 Kerberos 和 PKI 比较分析[C]//信息产业部. 全国第八届通信保密与信息安全现状研讨会论文集. 成都:中国电子科技集团公司第三十研究所,2002:106-113.

(编辑 修荣荣)