

保持视觉特征的 LoD 模型简化算法研究

殷智慧^{1,2} 李朝奎^{1,2} 吴柏燕^{1,2} 杨 偶^{1,2} 杨 武^{1,2}

1 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室,湖南 湘潭,411201

2 湖南科技大学地球空间信息研究中心,湖南 湘潭,411201

摘 要:在考虑不严重影响画面视觉效果的前期下,提出了保持视觉特征的 LoD 模型简化算法,该方法能较好地解决复杂地形场景模型引起的绘制视觉失真问题。在保持视觉特征的前提下,引入顶点的曲度特征因子,通过限制狭长三角形的生成和标记色差明显的三角形,很好地保证了模型的几何和纹理特征。通过计算折叠代价的方法减少模型误差累积,有效地解决了影响视觉效果的问题。实验结果表明,在保证视觉特征的前提下,利用半边折叠算法简化模型,实现三维场景的地形绘制。

关键词:视觉特征;模型简化;半边折叠算法;视觉重要度

中图法分类号:P208; TP311 **文献标志码:**A

近年来,地形场景的实时绘制在 GIS、虚拟现实、地形仿真等领域得到了广泛的应用。为了在刻画细节的同时,加快绘制速度,许多学者提出了多种不同的 LoD 模型简化算法:细分法、采样法、删减法、边折叠简化算法等^[1]。这些简化方法绝大部分都可以归于顶点删除、边删除、三角形删除、面片删除等四类^[2]。文献[3]通过基于小波的方法生成 LoD 模型。文献[4-5]提出的采样算法,通过几何渐变法对 LoD 模型进行平滑处理,利用网格优化算法来重建三维模型。文献[6-8]提出累进网格法,通过加入颜色、纹理特征对网格模型进行简化。文献[9-10]提出的基于顶点对的收缩算法,利用二次曲面误差来度量简化模型的近似度。

LoD 模型边折叠简化算法是一种较为常用的网格模型简化算法^[11]。本文在研究边折叠算法理论的基础上,对边折叠算法进行改进,提出一种保持视觉特征的 LoD 模型简化算法。

元组 (V, E, T) 组成, V, E, T 分别代表顶点、边、三角形的集合。网格模型中其他参数的表示如下。

1) $v_i \{v_i \in V \text{ 且 } i \in [0, 1)\}$ 表示 M 上的一个点,其空间位置坐标为 (x, y, z) ,纹理坐标为 (u, v) ; Nv_i 表示 v_i 的一阶邻域。

2) $e_{ij} = (v_i, v_j)$ 表示网格模型中的一条带有属性的无向边; Ev_i 表示以 v_i 为初始点的有向边的集合; $\vec{e}_{ij} = \langle v_i, v_j \rangle$ 表示一条有向边, $\text{cost}(\vec{e}_{ij})$ 表示有向边的权,即半折叠代价。

3) $Tv_i (Tv_i \subseteq T \text{ 且 } i, j \in [0, s))$ 表示包含 v_i 的三角形集合; $Te_{ij} (Tv_i \subseteq T \text{ 且 } i, j \in [0, s))$, 它表示包含 e_{ij} 的所有三角形集合。若 Tv_i 中的所有三角形共面,则称点 v_i 是一个平坦点。

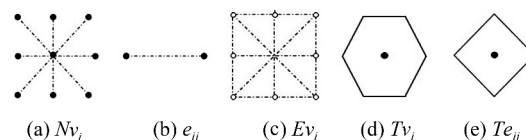


图 1 LoD 模型的数学描述

Fig. 1 Mathematical Description of LoD Model

1 模型简化原理

1.1 LoD 模型

如图 1 所示,设 M 是一个网格模型,它由三

从原始模型到生成最终的 LoD 模型,包括模型的简化、存储和提取,都是通过保留和替换一些三角形,达到简化模型的目的。最终得到的新模型需满足以下条件:多边形数目要尽可能低;并且

收稿日期:2013-05-22

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41271390);湖南省自然科学基金资助项目(12JJ9023);湖南科技大学研究生优秀学位论文培育基金资助项目(S120036);地理空间信息国家测绘局重点实验室开放研究基金资助项目(201330)。

第一作者:殷智慧,硕士生。研究方向为三维地理建模与并行计算。E-mail:zhihui61993@126.com

通讯作者:李朝奎,博士,教授。E-mail:chkl_hn@163.com

兼顾视觉效果尽可能好。边折叠和半边折叠算法最主要的区别是:半边折叠并不产生新的顶点,这样在存储的过程中减少了存储量。本文在分析两者优缺点的基础上,采用半边折叠策略,通过多次半边折叠操作,得到了一个多分辨率简化模型。两种折叠方法的比较见图 2。

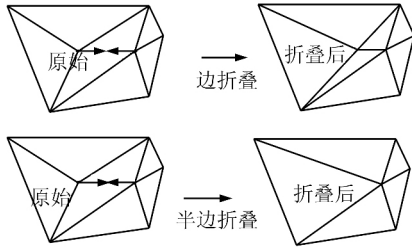


图 2 边折叠与半边折叠的比较

Fig. 2 Comparison to the Edge Collapse and Half-edge Collapse

1.2 基于半边折叠算法的 LoD 模型简化实现

为了能够很好地保持 LoD 模型的细节和纹理特征,避免由半边折叠操作引起的视觉效果问题,本文设计的算法在对模型进行 LoD 简化时,主要考虑了以下几个方面的问题。

1.2.1 顶点视觉重要度的度量方法

顶点视觉重要度决定了顶点的凹凸几何特性,根据顶点视觉特征因子和顶点曲度特征因子计算其值,可以判断顶点的凹凸性,并能够最大的保持顶点 v_i 的重要视觉特征^[12],其最大的优势是无论分辨率的高低,都可以很好地保持 LoD 模型的细节特征。

顶点 v_i 视觉重要度记作 Wv_i ,视觉特征因子记作 Kv_i ,曲度特征因子记作 $Kq(v_i)$,综合考虑视觉特征因子 Kv_i 和曲度特征因子 $Kq(v_i)$ 的共同作用,则顶点 v_i 视觉重要度记作 Wv_i ,则有:

$$Wv_i = (1 - \|Kv_i\|)Kq(v_i) \quad (1)$$

$$Kv_i = \frac{\sum_i S_{A_i} n_i}{\sum_i S_{A_i}},$$

$$Kq(v_i) = \sqrt{2H^2(v_i) - H_G(v_i)} \quad (2)$$

$$H(v_i) = \frac{1}{2A_{Mixed}} \sum_{j \in N_i} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}) \cdot (v_i - v_j) \quad (3)$$

$$H_G(v_i) = \frac{2\pi - \sum_{j=1}^n \theta_j}{A_{Mixed}} \quad (4)$$

式中, S_{A_i} 表示三角形 t_{A_i} (其中, $t_{A_i} \in T_{v_i}$) 的面积; n_i 表示三角形 t_{A_i} (其中, $t_{A_i} \in T_{v_i}$) 的单位法向

量; $H(v_i)$ 表示 LoD 模型中顶点 v_i 所对应曲面的平均弯曲程度; $H_G(v_i)$ 表示顶点 v_i 所对应曲面的总的弯曲程度; α_{ij} 和 β_{ij} 分别表示边 e_{ij} 所对应的两个角; θ_j 是三角形集合 T_{v_i} 中第 j 个三角形含有顶点 v_i 的那个顶角。

由此可知,若计算所得 Wv_i 最小,则顶点 v_i 所处地面最平坦;若计算所得 Kv_i 为 0 且顶点 v_i 所处平面平坦,则删除该点不会影响视觉。通过以上对顶点重要度的计算,可以很好地刻划和最大限度地保持顶点 v_i 的重要视觉特征,即使对于低分辨率的地物显示,也能很好地保持地物模型的每一个细节特征。

1.2.2 解决由误差累积造成的视觉误差

对同一地区多次执行半边折叠算法,在实现模型简化的同时,也会造成视觉误差^[14],因此,在计算中,采用增加误差累积因子(f_{v_i})和根据用户需求精确控制误差累积的方法来保持 LoD 模型的重要视觉特征。

设存在这样的两个优先队列 Que_1 和 Que_2 : Que_1 用来存放半边折叠代价大小; Que_2 用来保存发生改变但还未被删除的半边;另设 repetition 表示每条半边发生改变的次数,其初始值为 0; $Ev_j(\text{original})$ 表示半边折叠操作前以顶点 v_j 为初始的半边集合; $Ev_j(\text{new})$ 表示半边折叠操作后以顶点 v_j 为初始的半边集合; $Ev_j(\text{change})$ 表示发生改变但还未被删除的半边集合。则有:

$$Ev_j(\text{change}) = Ev_j(\text{new}) - Ev_j(\text{original}) \quad (5)$$

在每次执行半边折叠操作后,都可以动态地更新 Que_1 和 Que_2 ,这样可以很好地解决因多次折叠形成的误差累积造成的 LoD 模型简化过程中出现的视觉效果问题。

1.2.3 色异三角形纹理颜色值的计算

人眼对颜色的敏感度往往要超越对形状的敏感度,颜色变化剧烈的区域往往会产生更多的视觉特征^[15],故应该优先保留包含这些视觉特征的区域,因此,在计算折叠代价时引入色差因子,用来度量纹理图像中相邻三角形颜色的变化,能够很好地保持 LoD 模型的几何特征和纹理特征。

设色差因子为 $\text{ColorChange}(v_i, v_j)$,顶点为 v_i 、包含 e_{ij} 无向边的三角形集合中的任一个三角形为 t_q ,包含 v_i 顶点和 v_j 顶点的三角形集合中的任一个三角形为 t_p , v_i 、 t_q 、 t_p 所对应的纹理颜色值分别为 $[r, g, b]^T$ 、 $[r_q, g_q, b_q]^T$ 、 $[r_p, g_p, b_p]^T$,则有:

$$\text{ColorChange}(v_i, v_j) =$$

$$\sum_{p \in N_{ij}} (|r_q - r_p| + |g_q - g_p| + |b_q - b_p|) \quad (6)$$

若 $(|r_q - r_p| + |g_q - g_p| + |b_q - b_p|)$ 大于给定阈值,则可标记 t_p 为色差三角形,由于色差变化大的三角形已被标记,在删除三角形时,故可以通过优先保留色差变化大的三角形来更好地保留LoD模型相对重要的纹理特征。

$$D_{\text{difference}} = \frac{\sum_{i \in (Tv_i - Te_{ij})} (|e_1 - e_2| + |e_1 - e_3| + |e_2 - e_3| + |\angle A - \angle B| + |\angle A - \angle C| + |\angle B - \angle C|)}{n} \quad (7)$$

式中, $\angle A, \angle B, \angle C$ 表示新生成三角形的三个内角; e_1, e_2, e_3 分别表示新生成三角形的三条边; $D_{\text{difference}}$ 用来表示狭长三角形与等边三角形的差异程度,如果 $D_{\text{difference}} = 0$,则差异度为0,这是最理想的模型简化效果;否则,会由于狭长三角形的存在导致模型的失真,进而影响视觉效果。

2 算法实验

2.1 测试环境

本文使用VC++编程进行算法验证,采用OpenGL实现模型的显示。测试的机器是Intel(R)Pentium(R)2 CPU 2.80 GHz,内存1.5 G,操作系统是Windows XP。机器显卡为Radeon X1300/X1550 Series。

2.2 算法流程图和实现步骤

本文提出的算法在计算半边折叠代价时,考虑了色差因子 $\text{ColorChange}(v_i, v_j)$ 、形态质量因子 $D_{\text{difference}}$ 、顶点视觉特征因子 Kv_i 、顶点曲度特征因子 $Kq(v_i)$ 以及控制误差累积因子 $f v_i$ 等的影响,在保持视觉特征的前提下,通过删除代价最小的半边实现模型的简化。LoD简化模型的算法设计如图3所示。

2.3 实验及结果分析

基于半边折叠算法对模型进行简化,对模型表面变化大的部分,能够很好地保持其几何和纹理特征。为了验证算法的有效性,将本文算法与EFP(efficient and feature-preserving triangular mesh decimation)算法进行了比较。EFP算法的优点是顶点视觉重要度的计算方法简单,但无法很好地保持模型的一些重要几何、纹理特征,尤其对模型中分布不是很均匀的点和分布比较密集的点上的特征保持不是很理想^[17]。本文提出的保持视觉特征的LoD模型简化算法,在简化

1.2.4 狭长三角形的检查

在边折叠计算的过程中,顶点替换操作会引起部分三角形的变形(即产生狭长三角形),内角的变大或变小都可能引起模型逼真度的降低和视觉效果的不理想^[16],为保证原模型的特征,控制狭长三角形的出现是必须的。通过引入形态质量因子 $D_{\text{difference}}$ 来控制新顶点的位置,进而保证新生成的三角形接近于等边三角形,如式(7):

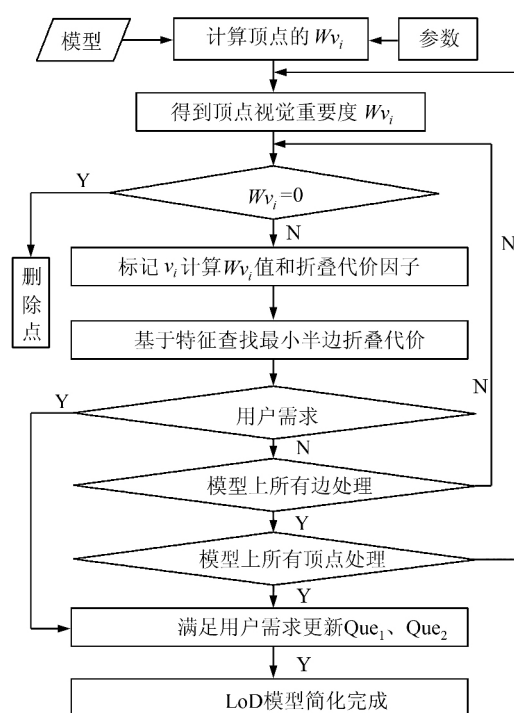


图3 LoD简化模型算法流程图

Fig. 3 Workflow of Simplified Algorithm of LoD Model

速度方面略低于EFP算法,但在简化模型视觉效果方面,远远优于EFP算法。本实验选取Rubby模型和地形模型进行实验验证,主要是基于视觉特征来验证算法是否能够很好地保持模型的重要视觉特征。

比较图4的几幅效果图,不难看出,采用本文算法,即使对初始模型进行大幅度简化,仍能较好地保持模型的几何、纹理特征;图5给出了两种算法下地形模型细分实现效果和渲染效果的对比,本文算法所绘制的三角形面片数略多于EFP算法,从而保留了较多的细节,较好地保持了视觉效果影响较明显的局部纹理细节,而采用EFP算法简化后的模型中,有些区域简化程度不够,有些区域则

丢失了局部纹理细节信息。表 1 分别采用两种算法对 Rubby 模型和地形模型的简化时间进行了比较。

综合图 4、图 5 和表 1,可以看出,本文算法虽然简化速度略低于 EFP 算法,但能够很好地保持模型的视觉特征,对模型顶点分布不均匀的情况,也能取得理想的效果,并且能够非常灵活地调整网格的稀疏程度来表现模型表面的曲率变化。对于平坦光滑的区域三角形面片数比较稀疏,而曲率变化大的区域,三角形面片数相对稠密很多,从而保证了简化后的模型仍保持原模型的视觉特征,避免了简化后的模型在视觉上的减弱与退化,符合模型简化的实质。

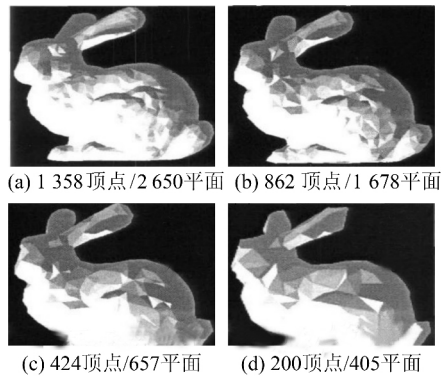


图 4 Rubby 模型不同简化程度的图像效果比较
Fig. 4 Comparison of the Image Effect of Rubby Simplified Model

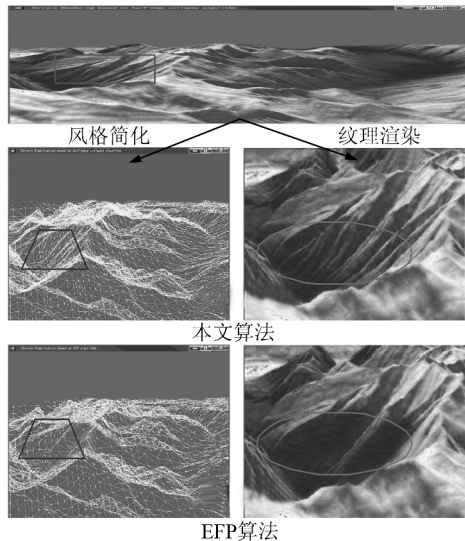


图 5 不同算法下地形模型简化效果图比较
Fig. 5 Comparison of Terrain Simplified Model Under Different Algorithms

3 结 语

本文分析了 LoD 模型简化过程中的若干关

表 1 时间效率的比较

Tab. 1 Comparison of Time Efficiency

数据	面片数	算法	初始时间/s	简化时间/s	总时间/s
Rubby 模型	3 574	EF 算法	2.579	6.362	8.941
		本文算法	2.581	6.391	8.972
地形模型	87 393	EF 算法	38.624	131.041	169.665
		本文算法	39.951	132.534	172.485

键技术,综合考虑顶点视觉重要度、误差累积、色异三角形、狭长三角形等因素,提出了基于几何纹理特征的 LoD 模型简化算法。该算法在保持模型视觉特征的基础上,既可运用于网格模型的简化,也可用于 LoD 模型的构建。但保持视觉特征的 LoD 模型简化算法还不够完善,对于处理超大规模的模型受到了一定的限制。对算法进行进一步改进和完善,并将其移植到集群环境中并行运行,是今后研究的重点和方向。

参 考 文 献

- [1] Huai Yongjian, Hao Chongyang, Luo Guan, et al. LoD and Polygon Simplification[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2001, S2: 26-29 (准永建,郝重阳,罗冠,等. LoD 和多边形表面简化[J]. 系统仿真学报, 2001, S2: 26-29)
- [2] Wang Guangxia, Zhu Changqing. LoD Modeling and Accuracy Analysis of Terrain Information[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2005, 35 (3): 228-232 (王光霞,朱长青. 地形信息的 LoD 建模及精度分析[J]. 测绘学报, 2005, 35(3): 228-232)
- [3] Wang Zhen. Research on the Generation and Simplification of LoD Terrain[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008 (王臻. 多分辨率 LoD 地形建模及简化技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2008)
- [4] Xie Zhigang, Luo Yiping, Xin Xianhui. A LoD Algorithm for Simplifying TIN Model[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2005 (5): 18-20 (解志刚,罗伊萍,辛宪会. 一种基于 TIN 模型的 LoD 简化算法[J]. 海洋测绘, 2005 (5): 18-20)
- [5] Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces[J]. *Computing Graphics Forum*, 1998, 17(2): 167-174
- [6] Zhu Chun. Study on the Surface Simplification Arithmetic of Three-Dimensional Geometrical Models [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006 (朱春. 三维几何模型的简化算法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006)
- [7] Otsu N. Threshold Selection Method from Gray-level Histogram[J]. *IEEE Trans on SMC*, 1979, 9 (1): 62-66

- [8] Silva F G M, Gomes A J P. Normal-based Simplification Algorithm for Meshes[C]. Proceedings of the Theory and Practice of Computer Graphics, Eurographics, UK, 2004
- [9] Chen Kun. Research and Implementation on the Algorithm of LoD Model Simplification[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009(程堃. LoD模型简化算法的研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2009)
- [10] Chong C S, Lee H P, Kumar A S. Geneticalgorithms in Mesh Optimization for Visualization and Finite Element Models[J]. *Journal of Neural Computing & Applications*, 2006, 15(3): 366-372
- [11] Ning Hui, Yuan Qingkai, Guo Xiaoyu, et al. A Terrain Simplification Method Based on Regular Grid[J]. *Applied Science and Technology*, 2009(4): 36-39(宁慧, 袁庆凯, 郭笑语, 等. 一种基于规则网格的地形简化算法[J]. 应用科技, 2009(4): 36-39)
- [12] Wang Fang, Cong Wenjing, Zhu Haitao. Research of Simplification Algorithm for Modeling Based on Normal Important Degree of Triangular Facets[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2011(7): 6-8(王芳, 丛文静, 祝海涛. 基于顶点法向量重要度的模型简化算法研究[J]. 计算机与数字工程, 2011(7): 6-8)
- [13] Meyer M, Desbrun M. Discrete Differential-geometry Operators for Triangulated 2-manifolds[C]. International Workshop on Visualization and Mathematics, Berlin, Germany, 2002
- [14] Du Xiaohui, Yin Baocai, Kong Dehui. Triangle Mesh Simplification Algorithm Based on Edge Collapse[J]. *Computer Engineering*, 2007, 12: 12-15(杜晓晖, 尹宝才, 孔德慧. 一种边折叠三角网格简化算法[J]. 计算机工程, 2007, 12: 12-15)
- [15] Song Yongli. Research and Implement on Large-Scale Terrain Realistic Rendering[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011(宋永利. 大规模三维地形场景真实感渲染的研究与实现[D]. 西安: 西安科技大学, 2011)
- [16] Zhang Biqiang, Xing Yuan, Ruan Xueyu. Mesh Simplification Based on Features Preserving and Triangles Optimization[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2004(8): 1 373-1 377(张必强, 邢渊, 阮雪榆. 基于特征保持和三角形优化的网格模型简化[J]. 上海交通大学学报, 2004(8): 1 373-1 377)
- [17] Hussain M, Okada Y, Nijim K. Efficient and Feature-preserving Triangular Mesh Decimation[J]. *Journal of WSCG*, 2004, 12(1): 167-174

Simplification Method for LoD Model with the Visual Features Preserved

YIN Zhihui^{1,2} LI Chaokui^{1,2} WU Baiyan^{1,2} YANG Ou^{1,2} YANG Wu^{1,2}

1 National and Local Joint Laboratory of Engineering about Geospatial Information Technology,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

2 Institute of Geospatial Information Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

Abstract: At present, there are a lot of problems with model simplification algorithms when rendering 3D geometric and terrain models testing the relationship between quality and the display effect. In order to maintain visual characteristics of the model, a reasonable implementation model for simplification is put forward. This model simplification algorithm solves the reflection of the LoD simplified model by introducing a vertex curvature characteristic factor, limiting narrow triangle formation and signing triangles whose color changed quite differently. Experimental results show that: the algorithm is efficient when guaranteeing the visual features of the simplified model, and can be used to the terrain rendering of 3D scene.

Key words: visual characteristics; model simplification; half-fold algorithm; visual importance

First author: YIN Zhihui, postgraduate, specializes in 3D GIS and parallel computing. E-mail: zhihui61993@126.com

Corresponding author: LI Chaokui, PhD, professor. E-mail: chkl_hn@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41271390; the Natural Science Foundation of Hunan Province, No. 12JJ9023; the Graduate Dissertation Cultivating Excellent Project of Hunan University of Science and Technology, No. S120036; the Open Found of Geospatial Information the State Bureau of Surveying and Mapping Laboratory, No. 201330.