

# 基于能量算子的三维空间实体 LOD 建模方法

王永志<sup>1</sup>, 李振朝<sup>1</sup>, 刘鹏或<sup>2</sup>, 王慧<sup>3</sup>

(1. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 石化盈科信息技术有限责任公司, 江苏 南京 210014;  
3. 江苏天地图地理信息工程技术公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 为解决当前多层次细节(LOD)建模方法没有将简化和细分相统一, 而造成细节层次模型特征表现不够丰富问题。将能量算子用于三维空间实体模型简化与细分, 提出了基于能量算子的三维空间实体 LOD 建模方法。该方法主要包括 3 个步骤: 模型能量算子计算、基于能量算子的模型简化和细分。实验表明, 该方法能够生成细节层次较为丰富的模型, 并具有良好的可视化效果和较高的精度。另外, 该方法研究成果可以应用于三维场景建模和智慧城市等领域。

**关键词:** LOD 建模; 能量算子; 三维空间实体模型; 简化算法; 细分算法

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)02-0247-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0735

## LOD Modeling Method for Three-Dimensional Objects with Energy Operator

Wang Yongzhi<sup>1</sup>, Li Zhenchao<sup>1</sup>, Liu Pengyu<sup>2</sup>, Wang Hui<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;  
2. Petro-CyberWorks Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210014, China;  
3. Jiangsu Map World Geographic Information Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Current level of detail (LOD) modeling methods do not combine simplification and subdivision, which results in models not being rich in detail level. Therefore, the energy operator was used to combine the simplification algorithm of a three-dimensional (3D) object model with the subdivision algorithm, and a LOD modeling method based on an energy operator was proposed for 3D objects. The method involves three major steps: calculation of energy operators for 3D models, model simplification and model subdivision based on an energy operator. Experiments show that this method can generate models with rich levels of detail and has good visualization effect and high accuracy. In addition, it can be applied to many fields such as 3D scene simulation and smart city.

**Keywords:** LOD modeling; energy operator; 3D spatial object model; simplification algorithm; subdivision algorithm

## 引言

随着三维激光扫描等高分辨率数据采集技术的发展<sup>[1-5]</sup>, 对于如何建立具有丰富的细节层次的三维空间实体模型提出了新的挑战。由于这些模型通常由较为复杂三角形网格构成, 对计算机的

渲染性能、传输带宽以及存储容量有很高的要求, 即使计算机硬件绘图技术一直在高速发展, 但是仍然不能有效应对上述挑战。LOD 建模的核心思想是以不同的细节层次来描述和表示同一场景下的不同物体, 它在三维空间实体几何模型的实时绘制方面发挥着重要的作用。在三维空间实

收稿日期: 2020-09-23

修回日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42061061); 江西理工大学清江青年英才支持计划资助(JXUSTQJB2018002)

第一作者: 王永志(1983-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为地学三维建模与虚拟地理环境、三维激光点云处理及应用。

E-mail: gisstarww@qq.com

体模型实际构建过程中,采用LOD建模技术生成不同层次的细节模型,能够保持良好的三维模型效果并具有较高的精度。由于三维空间实体模型的数据量逐渐增加,并且结构趋于复杂化<sup>[6]</sup>,同时其应用领域越来越广泛,例如在医学成像领域<sup>[7]</sup>、大规模地形可视化<sup>[8]</sup>和虚拟现实等领域。因此,三维空间实体LOD建模成为一个重要的研究方向。

目前,针对三维空间实体LOD建模提出了很多方法。绝大多数的方法根据其实现方式可以划分为模型简化和模型细分2大类型。对于模型简化方法,三维空间实体LOD模型的构建是在原始模型几何形状不发生改变的情况下,通过采用适当的算法,例如基于特征的方法<sup>[9]</sup>和递进网格法<sup>[10]</sup>,逐次减少模型表面细节,建立多个不同细节层次的几何模型来实现。模型简化方法可以被进一步划分为静态简化和动态简化2种类型。静态简化方法,例如具有结构感知的算法<sup>[11]</sup>、逐步求精法<sup>[12]</sup>和几何元素删除法<sup>[13-14]</sup>,是根据一定的简化原则,将原始的复杂度较高的模型精简成多分辨率的模型并存储。由于静态简化方法是对原始模型预先生成不同细节层次的模型副本,因此这些模型会导致较大的存储开销,并且在模型切换时会产生视觉跳跃感<sup>[15]</sup>。

动态简化方法,例如递进网格法、层次表示法<sup>[16]</sup>和基于视点的方法<sup>[17]</sup>,在进行三维空间实体LOD模型绘制时,根据模型的外部因素,例如视点距离、偏心率和运动速度等,实时构建不同细节层次的简化模型。动态简化方法具有较好的人机交互性,由于该方法是根据视点的变化实时动态生成细节层次模型,因此模型生成带来的时间开销巨大<sup>[18]</sup>。

模型细分方法,例如LOOP细分算法<sup>[19]</sup>和改进的蝶形细分算法<sup>[20]</sup>,是指应用一定的几何计算规则与拓扑规则,对构成三维空间实体模型的原始网格添加新的顶点与边线,把原始网格细化成更为密集的网格。模型细分方法可以划分为均匀细分和自适应细分2类。均匀细分方法,例如LOOP细分算法,是对构成三维空间实体模型网格中的每一个几何元素按照一定的细分规则同时

进行细分。该类方法得到的模型光滑性和连续性较好,但是其生成的模型数据量较大,这也需要耗费大量的存储资源和运算时间。

自适应细分算法首先通过一个判别准则,例如控制网格中离散点的曲率大小<sup>[21]</sup>或者局部多边形网格的共面程度<sup>[22]</sup>,来确定三维模型网格中哪些区域的网格单元需要进行细分,然后采用常规的细分方法进行网格细分。自适应细分算法能够降低模型数据量,在模型构建及绘制阶段的效率较高<sup>[23]</sup>。

当前的LOD建模方法没有将简化和细分相结合,只是对原始模型采用简化或者细分其中的一种操作生成多级细节层次模型,其细节层次不够丰富。然而,不同的三维空间实体其模型精细程度不同,并且构成三维空间实体模型的网格在模型的不同区域其密度是非均匀的。如果在进行三维空间实体LOD模型构建时不加以区分,采用单一的简化或者细分操作难以满足三维建模效果。因此,在考虑丰富模型细节层次的基础上,研究如何将简化和细分方法相结合进行三维空间实体LOD建模显得十分重要。

针对当前三维空间实体LOD建模细节层次不够丰富的问题,本文通过能量算子将模型简化和模型细分方法相结合,提出一种基于能量算子的三维空间实体LOD建模方法。该方法基于能量算子,通过设定不同的阈值系数,有选择地对原始模型进行简化或细分操作,可以对原始模型进行简化产生低精细程度的简化模型,也可以对原始模型进行细分以获得高精细程度的细分模型。

## 1 基于能量算子的LOD建模方法

### 1.1 基本思想及总体设计

不同的三维空间实体模型具有不同的精细程度,同一个三维空间实体模型的不同区域,其构成网格的密度也存在差异。对不同的三维空间实体模型采用单一的处理方法,以及对模型的不同

区域采用无区别的简化或者细分,将会导致建模效果难以满足要求。三维空间实体模型的网格密度和网格的重要性能够对模型的精细程度,以及模型不同区域的粗糙程度进行描述。将网格密度及重要性作为判断条件,对三维空间实体模型进行有区别的处理,可以改善三维空间实体LOD建模效果。因此,定义一个能量算子来表达网格密度及网格的重要性,并且将能量算子作为一个纽带使模型简化算法与细分算法相结合,共同应用于三维空间实体LOD建模,可以更好的满足三维空间实体LOD建模效果并提高模型精度。

新方法的总体流程主要包含3个步骤(如图1所示)。第1步,读取模型并计算其能量算子;第2步,基于能量算子的模型简化,在这一步骤,对三维空间实体模型中能量算子低于阈值的网格进行简化,产生低精细程度的简化模型;第3步,基于能量算子的模型细分,该过程主要是对能量算子高于阈值的网格采用优化后的改进蝶形细分算法进行细分,从而生成高精细程度的细分模型。

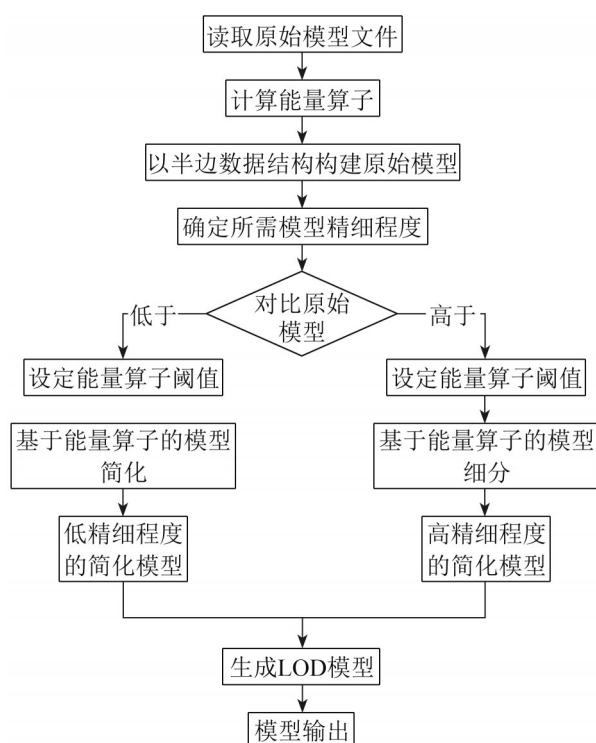


图1 LOD建模流程图

Fig. 1 LOD modeling flowchart

## 1.2 能量算子的定义和计算

能量算子能够对网格密度及其重要性进行表达,是对构成三维空间实体模型网格复杂度进行评价的参数。它可以通过三维空间实体模型顶点的一阶邻点和二阶邻点以及顶点之间的距离来定义,模型顶点的能量算子 $E_f(v)$ 可以通过式(1)和式(2)来表示:

$$E_f(v) = \left| \frac{\sum_{j=1}^{P_v} (v - v_j) \times \bar{L}_j}{\sum_{j=1}^{P_v} \bar{L}_j} \right| \quad (1)$$

$$\bar{L}_j = \frac{\sum_{j=1}^{P_j} L_j}{P_j} \quad (2)$$

式中: $P_v$ 为顶点 $v$ 的入度,即与一个顶点相连接的邻边的条数; $P_j$ 为与顶点 $v$ 相连的第 $j$ 个顶点 $v_j$ 的入度; $\bar{L}_j$ 为与细分网格单元中顶点 $v$ 相连接的顶点 $v_j$ 的所有入边的平均长度。

能量算子的计算步骤如下:

输入: 三维模型。

输出: 能量值。

step 1: 遍历模型网格单元,利用式(1)和式(2)计算网格单元顶点的能量值。

step 2: 计算网格单元的能量值。在Step1的基础上,将组成网格单元所有顶点的能量值相加。

step 3: 计算模型网格单元的平均能量值。

step 4: 建立并存储网格单元及其能量值的映射集合。

step 5: 为避免重复计算,存储好每个点及其能量值的映射集合。

## 1.3 基于能量算子的模型简化

模型简化是为了在尽量保留原有几何特征<sup>[24]</sup>和拓扑特征的基础上降低模型数据量,但是模型简化不可避免的会影响到模型的精度<sup>[25]</sup>。基于能量算子的三维空间实体模型简化可以分为5个主要步骤(见图2):①数据预处理。在这一步骤中,



首先读取三维空间实体模型，然后以半边数据结构进行存储；②阈值计算。存储三维空间实体模型之后，对网格单元进行遍历并计算网格各顶点的能量值，然后将网格单元3个顶点的能量值之和作为该网格单元的能量值，取模型所有三角网格单元能量值的均值乘以某一系数为模型阈值；③网格删除。遍历模型网格单元，当三角网格能量值低于所设定阈值时，表示该网格单元处于较为平滑区域，对其执行删除操作；④新顶点计算。采用三角形折叠简化法，在折叠过程中计算一个新顶点来代替折叠的网格单元；⑤拓扑重构。基于新顶点重构折叠区域的空间拓扑关系，并更新相应顶点与网格单元的能量值。

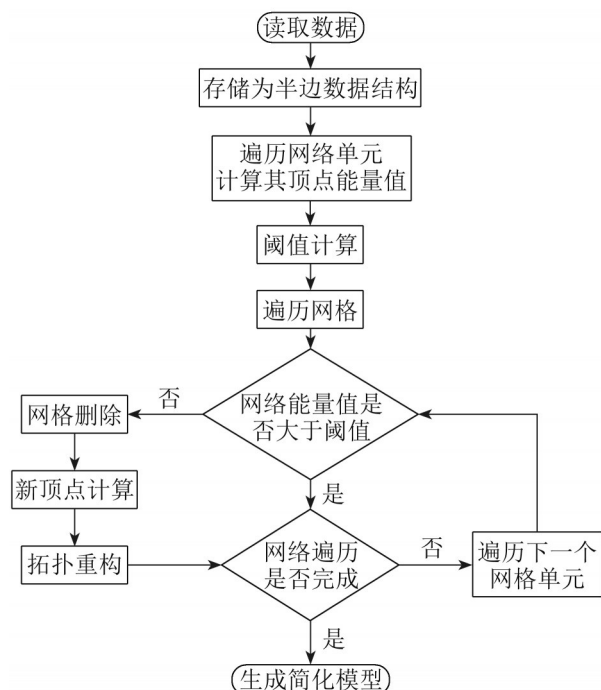


图2 模型简化流程  
Fig. 2 Model simplification process

## 1.4 基于能量算子的模型细分

在进行三维空间实体建模时，如果用户对模型的精细程度要求较低，可以使用简化算法，生成精细程度较低的简化模型。但当用户对建模的精细程度要求较高时，则需要对模型进行网格细分，生成高精细程度的三维空间实体模型。

网格细分是指在按照一定的细分规则在三维网格中增加新的顶点，并基于一定的拓扑规则重构原始顶点与新顶点间的拓扑关系，组成新的三维空间实体模型。由于改进蝶形细分算法对所有网格单元进行细分操作，数据增量较大，因此本文对该算法进行了优化，提出一种基于能量算子的三维空间实体模型细分方法。该方法将优化后的改进蝶形细分算法与能量算子相结合，在模型细分过程中以能量算子为判别标准，有选择地对三角网格单元进行细分，能够以较小的数据增量来提升模型的平滑性和特征性。

根据1.2节计算出能量算子并设定阈值，在确定所需要的模型精细程度高于原始模型精细程度，并且网格能量值大于阈值时，采用优化后的改进蝶形细分算法对模型进行细分。值得注意的是本文所提出的优化后的改进蝶形细分算法与原始的改进蝶形细分算法采用的几何规则相同，但是对其拓扑规则进行了优化。为解决单一网格细分后向周围网格过渡时较为突兀，从而造成的模型不平滑问题，优化后的改进蝶形细分算法扩展了拓扑重构的范围，将与细分网格共边的网格也纳入拓扑重构范围。采用优化后的改进蝶形细分算法进行模型细分可以分为如下2个主要步骤。

### 1.4.1 几何规则与新边点计算

改进蝶形细分算法对于网格内部的正则顶点与非正则顶点，以及网格边界上的边界顶点分别采用不同的细分规则。

(1) 当一条边归属于内部边，并且它的两个端点的价为6时，在这条边上插入新边点的几何规则与蝶形细分算法相同，如图3(a)所示。

(2) 当一条边归属于内部边，但是它的两个端点中至少有一个价不为6，即这条边存在非正则顶点，设非正则点的价为 $n$ ，则该条边上新边点由非正则点与其相邻顶点的线性几何平均得到，新边点插入权图，如图3(b)所示，其中权值为

$$n=3:S_0=\frac{5}{12}, S_1=S_3=\frac{1}{12}$$

$$n=4: S_0 = \frac{3}{8}, S_2 = \frac{1}{8}, S_1 = S_3 = 0$$

$$n \geq 4: S_i = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{4} + \cos \frac{2i\pi}{n} + \frac{1}{2} \cos \frac{4i\pi}{n} \right)$$

(3) 网格边归属于边界边, 其新边点插入的权图, 如图3(c)所示, 新边点计算公式为

$$V_E = -\frac{1}{16}(v_1 + v_4) + \frac{9}{16}(v_2 + v_3)$$

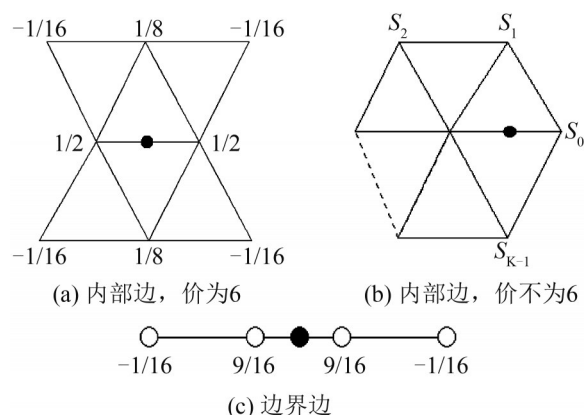


图3 改进蝶形细分算法权图  
Fig. 3 Weight map of improved butterfly subdivision algorithm

### 1.4.2 拓扑规则与新旧顶点连接

根据改进蝶形细分算法的几何规则确定需要进行细分网格的新边点之后, 采用优化后的拓扑规则进行新旧顶点的连接, 完善空间拓扑结构。

(1) 当三角网格单元能量值大于阈值时, 表示该网格单元特征性较强, 按照改进的蝶形细分几何规则加入新边点并相互连接, 将该网格单元细分为四个区域。

(2) 当三角网格单元能量值低于阈值时, 表示该网格单元特征性较弱, 分布较为均匀, 该网格本身不具有细分的意义, 但是由于三维空间实体模型是一个连续曲面, 为了保证细分后模型具有良好的平滑性, 对该网格是否执行细分需要参考其共边网格单元的特征性。如图4(a)所示, 三角网格单元 $(P_1, P_2, P_3)$ 的能量值低于阈值, 此时当其邻接网格单元中 $(P_1, P_2, P_4)$ 能量值大于阈值, 为使得 $(P_1, P_2, P_4)$ 的细分不至于突兀, 连接顶点 $P_9$ 与 $P_3$ 对 $(P_1, P_2, P_3)$ 进行细分; 类似的, 当 $(P_1, P_2, P_3)$ 周围有2

个能量值高于阈值的网格单元, 如图4(b)所示, 此时对 $(P_1, P_2, P_3)$ 按照图中虚线所示方式进行连接; 当 $(P_1, P_2, P_3)$ 周围共边网格单元能量值均高于阈值时, 对 $(P_1, P_2, P_3)$ 按图4(c)虚线所示进行连接。除上述3种空间关系外,  $(P_1, P_2, P_3)$ 的3个共边网格单元能量值均低于阈值, 此时 $(P_1, P_2, P_3)$ 不执行细分操作, 算法继续遍历下一网格。

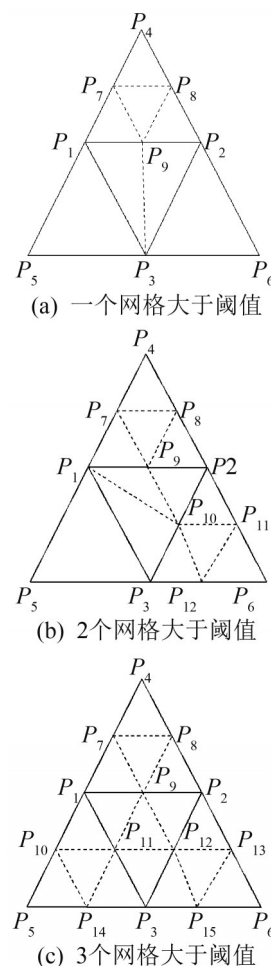


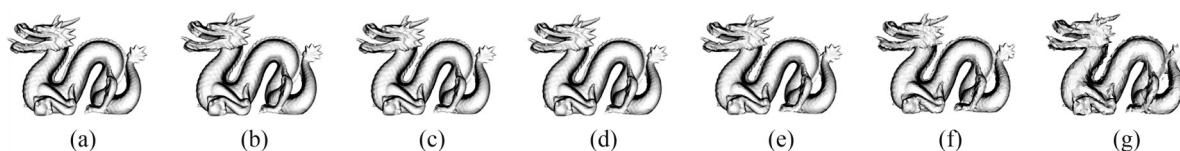
图4 三维空间实体模型拓扑结构图  
Fig. 4 Topological structures of three-dimensional object model

## 2 案例研究

本文将龙和笑佛这2个几何模型作为测试案例, 对所提出的新方法的有效性和实用性进行论证。研究环境采用一台处理器为 Intel(R) Core (TM) i5-4200U CPU @1.60 GHz 2.30 GHz 以及内存为8 G 的电脑。利用基于能量算子的LOD建模

方法,分别生成细分模型和简化模型,如图5(a)~(g)的龙以及图6(a)~(g)的笑佛。每一组图中(a)~(c)为细分模型,(e)~(g)为简化模型,(d)为原始模型。通过这些案例研究,可以发现新方法在进行三维空间实体LOD模型构建时具有良好的视觉效果。例如,将龙原始模型(图5(d))和细分模型(图5(a))相比较,可以发现细分后模型的网格数量从47 794增至187 918,能够以较小的数据增量实现

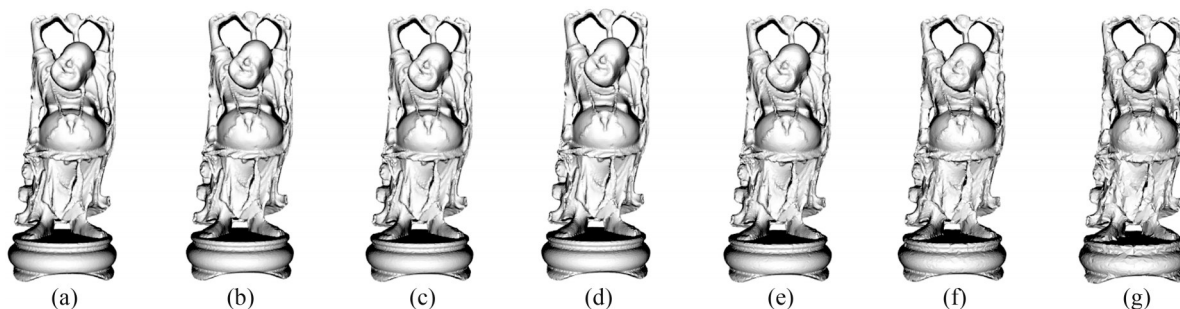
更加平滑的效果;原始模型与简化后的模型(图5(g))相比较,虽然网格数量减少到16 624,但是简化后的模型在细节特征保持方面仍然具有良好的表现,能够有效保持原始模型的特征。另外一组笑佛模型也具有相同的结果。因此,基于能量算子的三维空间实体LOD建模方法无论在模型细分还是简化方面均具有良好的建模效果。



注:(a)~(c)是网格数量分别为187 918,123 234,80 698个三角形的细分模型;(d)是网格数量为47 794个三角形的原始模型;(e)~(g)是网格数量分别为37 326,27 888,16 624个三角形的简化模型

图5 龙LOD模型

Fig. 5 LOD models of Dragon



注:(a)~(c)是网格数量分别为264 332,187 160,122 508个三角形的细分模型;(d)是网格数量为67 240个三角形的原始模型;(e)~(g)是网格数量分别为58 228,46 064,35 172个三角形的简化模型

图6 笑佛LOD模型

Fig. 6 LOD models of Happy Buddha

### 3 讨论

#### 3.1 效果及精度验证

为进一步验证新的LOD建模方法的效果以及精度,以斯坦福3D扫描存储库提供的三角网格数量为47 794的龙模型(图5(d))以及三角网格数量为67 240的笑佛模型(图6(d))为原始模型,使用新方法分别对其执行简化和细分操作,将新方法生成的模型和斯坦福3D扫描存储库提供的模型进行对比分析,对比分析的环境和案例研究中的环境相同。

利用新方法分别对原始的龙与笑佛模型进行简化和细分,使生成的模型和斯坦福3D扫描存储库提供的模型在网格数量方面具有同等级别。龙和笑佛模型图以及网格数量信息分别在表1和表2中展示。其中,第1列为模型的网格数量,第2列是使用新方法生成的模型,第3列为斯坦福3D扫描存储库提供的模型。新方法下面网格数量为1万的模型是通过简化算法生成的简化模型,而另外两组模型是细分模型。

以龙模型为例进行比较分析。通过表1可以看出在网格数量级别为1万的条件下,新方法构建的



表 1 龙模型对比图  
Table 1 Comparison of Dragon models








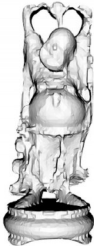




网格 数量(万)	模型来源	
	新方法	斯坦福扫描库
1		
20		
80		

表 2 笑佛模型对比图  
Table 2 Comparison of Happy Buddha

网格数量(万)	模型来源	
	新方法	斯坦福扫描库
1		
30		
100		

简化模型和斯坦福模型相比较为粗糙, 但整体上能够保持模型的特征, 由于斯坦福模型是通过扫描后获得的范围影像进行表面重建所构建的, 重

建时消除了范围数据中的异常值, 减少了噪声, 掩盖了范围图像之间的未对准, 并且隐藏了许多 3D 扫描过程中自然产生的错误。所以, 斯坦福模型和新方法简化的模型相比视觉效果更好。但是在同等级别网格数量的条件下, 新方法所构建的细分模型和斯坦福模型相比, 其建模效果相似。新方法构建的笑佛模型同样满足上述分析结果。

通过上述比较分析可以得出这样的结论: 基于能量算子的三维空间 LOD 建模方法既可以向下简化生成简化模型, 也可以向上细分构建出细分模型, 其生成的简化模型能够保持模型特征, 而细分模型能够使原始模型具有更加丰富的细节, 并且其细分模型具有良好的视觉效果。

在进行建模效果比较的基础上, 通过 Metro 工具分别对新方法生成的龙和笑佛模型以及斯坦福 3D 扫描存储库提供的龙和笑佛模型进行精度计算。Metro 工具允许采用表面采样方法来比较一对表面之间的差异(例如, 三角网格及其简化表示)<sup>[26]</sup>, 该工具通过计算 2 个网格表面的近似误差度量来评价两个网格表面的差异, 并且可以采用数值计算定量地比较两个近似的三角网格。因此, 可以使用 Metro 工具计算两种不同来源的模型与原始

模型之间的平均误差。龙模型和笑佛模型的平均误差统计信息如表3所示,图7和图8展示的是相对应的误差对比图。

表3 模型平均误差统计表  
Table 3 Statistics of average errors of models

网格数量(万)		平均误差( $\times 10^{-6}$ )	
		新方法构建的模型	斯坦福扫描库模型
龙模型	1	396	198
	20	31	74
	80	36	98
笑佛模型	1	299	169
	30	22	62
	100	24	100

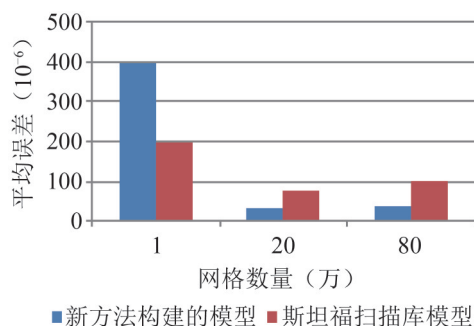


图7 龙模型平均误差对比图  
Fig. 7 Comparison of average errors of Dragon models

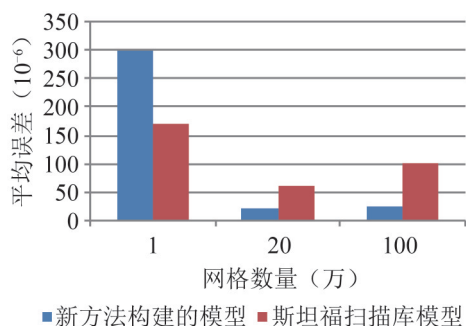


图8 笑佛模型平均误差对比图  
Fig. 8 Comparison of average errors of Happy Buddha models

同样以龙模型为例进行分析,从表3中可以发现,在网格数量为1万时,新方法构建的简化模型平均误差大于斯坦福模型,因为新方法中网格数量为1万的数据是对模型进行简化产生的,不可避免的会产生精度损失,而斯坦福模型是通过实体扫

描后获得的范围影像进行表面重建所构建的。但是,在20万和80万网格数量级别的条件下,新方法所构建的细分模型所产生的平均误差要小于斯坦福模型的平均误差。其中,在20万网格数量级别的条件下,新方法构建的细分模型的精度比斯坦福模型的精度提高了 $43 \times 10^{-6}$ ,而在80万网格数量级别的条件下,精度提高了 $62 \times 10^{-6}$ 。图7和图8对2种模型的平均误差进行了更加直观的对比,在图7中,蓝色柱状图代表新方法的平均误差,红色柱状图代表的是斯坦福模型的平均误差,从整体情况分析,在模型细分时蓝色柱状图代表的值低于红色柱状图的值。因此,可以得出这样的结论:在具有相同细节层次的条件下,新方法所构建的细分模型的精度要高于斯坦福模型。

### 3.2 阈值设置

在基于能量算子的三维空间实体LOD模型构建中(无论是进行模型简化还是模型细分),能量阈值都是一个关键的点,它对于建模效果有着重大的影响。基于能量算子可以精确地计算出模型中每一个网格单元的能量值,通过和能量阈值进行比较,来判断是否进行网格简化或者细分。在这项研究中,能量阈值可以通过ETC(energy threshold coefficient)乘以3D模型的网格单元能量均值获得。因此,获取能量阈值的关键是确定ETC的值。在进行三维空间实体模型细分时,ETC设置的越大,越少的网格参与细分,反之亦然。图9以笑佛模型为例展示了随着ETC的增大,网格数量逐渐减少,模型逐渐粗糙,而ETC和网格数量的关系如表4所示,当ETC为0.3时,笑佛模型网格数量为264 332;ETC增加至0.9时,网格数量减少到187 160;ETC设置为1.4时,网格数量减少到122 508;将ETC设置为2.0时,模型网格数量进一步减至84 544。而在进行模型简化时,ETC越大越多的网格单元被简化,反之亦然。因此,在进行基于能量算子的三维空间LOD模型构建时,选择一个合适的ETC是至关重要的。



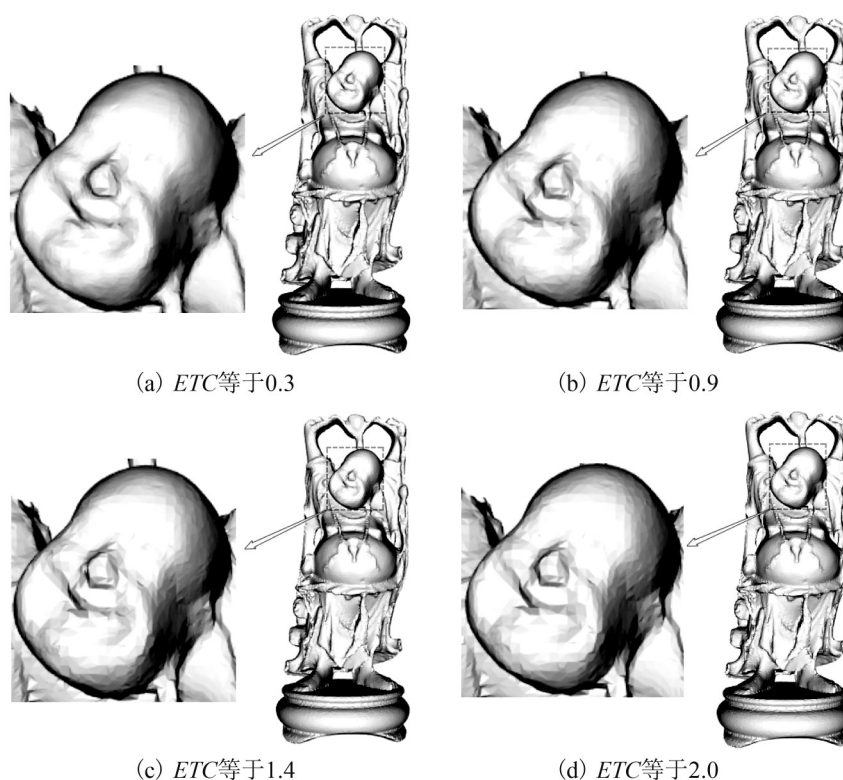


图9 不同ETC的笑佛细分模型

Fig. 9 Subdivision models of Happy Buddha at different ETC values

表4 ETC与网格数量关系表  
Table 4 Relation of ETC and grid quantity

ETC	0.3	0.9	1.4	2.0
网格数量	264 332	187 160	122 508	84 544

## 4 结论

本文提出了一种基于能量算子的三维空间实体LOD建模方法。通过能量算子将模型简化和细分方法相结合,共同应用于三维空间实体LOD建模。该方法可以根据实际需求设定不同的能量系数,使得原始模型既可向上进行细分生成较为精细的细分模型,也可以向下进行简化生成较为粗糙的简化模型。使用新方法进行LOD建模,能够保证原始模型在简化后保留重要的细节特征,同时,也能够保证原始模型在进行细分时实现良好的平滑性和较高的精度。使用龙和笑佛等多组模型作为研究案例证明了该方法的实用性。另外,将简化模型和细分模型分别与斯坦福3D扫描存储

库提供的模型相比较,证明了新方法在模型细分方面具有良好的建模效果和较高的精度,在模型简化方面精度有所欠缺,但是能够保持物体的重要细节特征。基于能量算子的三维空间实体LOD建模方法具有广泛的应用场景,例如在文物保护、智慧城市等领域。

## 参考文献

- [1] Wang Y, Zheng J, Wang H. Fast Mesh Simplification Method for Three-Dimensional Geometric Models with Feature-Preserving Efficiency[J/OL]. Scientific Programming (S1058-9244), 2019: 4926190(2019-02-03) [2020-09-12]. <https://doi.org/10.1155/2019/4926190>.
- [2] Nooruddin F S, Turk G. Simplification and Repair Of Polygonal Models Using Volumetric Techniques[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics(S1941-0506), 2003, 9(2): 191-205.
- [3] Yuan Y Z, Wang R, Huang J, et al. Simplified and Tessellated Mesh For Realtime High Quality Rendering [J]. Computers & Graphics(S0097-8493), 2016, 54: 135-144.
- [4] Liu X P, Lin L P, Wu j, et al. Generating Sparse

- Self-Supporting Wireframe Models For 3D Printing Using Mesh Simplification[J]. Graphical Models(S1524-0703), 2018, 98: 14-23.
- [5] Yu Z W, Wong H S, Peng H, et al. ASM: An Adaptive Simplification Method For 3D Point-Based Models[J]. Comput-er-Aided Design(S0010-4485), 2010, 42(7): 598-612.
- [6] 冯良波, 罗大庸. 3D多次模型简化算法的研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(4): 97-100.
- Feng Liangbo, Luo Dayong. Research on 3-D Model LOD Algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(4): 97-100.
- [7] Lee Sung Jun, Kim Jion, et al. Generation Method of 3D Human Body Level-of-Detail Model for Virtual Reality Device using Tomographic Image[J]. The Journal of Korean Institute of Next Generation Computing(S1975-681X), 2019, 15(4): 40-50.
- [8] 高勇, 刘家骏, 郭潇, 等. 面向大规模动态地形可视化的LOD组织与调度技术[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(1): 6-11.
- Gao Yong, Liu Jiajun, Guo Xiao, et al. A LOD Scheduling Method for Massive Dynamic Terrain Visualization[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(1): 6-11.
- [9] Yoon Y, Kim B C. CAD Model Simplification Using Feature Simplifications[J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems & Manufacturing(S1881-3054), 2016, 10(8): JAMDSM0099-JAMDSM0099.
- [10] Hugues Hoppe. Progressive Meshes[C] // Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1996: 99-108.
- [11] 张春森, 张会, 郭丙轩, 等. 城市场景结构感知的网格模型简化算法[J]. 测绘学报, 2020, 49(3): 334-342.
- Zhang Chunsen, Zhang Hui, Guo Bingxuan, et al. Structure-Aware Simplified Algorithm of Mesh Model For Urban Scene[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(3): 334-342.
- [12] Schmitt F J M, Barsky B A, Du W H. An Adaptive Subdivision Method For Surface-Fitting From Sampled Data[C] // Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1986: 179-188.
- [13] Schroeder W J, Zarge J A, Lorensen W E. Decimation of Triangle Meshes[C] // Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1992: 65-70.
- [14] Hoppe H, DeRose T, Duchamp, et al. Mesh Optimization [C] // Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1993: 19-26.
- [15] 张俊峰, 姚志宏. 基于四叉树孤立分割和屏幕误差的地形LOD算法[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(4): 666-671, 677.
- Zhang Junfeng, Yao Zhihong. LOD Algorithm of Terrain Based on Conservative Screen Error and Isolated Division of Quad-tree[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3): 666-671, 677.
- [16] Zheng X, Xiong H, Gong J, et al. A morphologically preserved multi-resolution TIN surface modeling and visualization method for virtual globes[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing(S0924-2716), 2017, 129(7): 41-54.
- [17] Isler V, Lau R W H, Green M. Real-Time Multi-Resolution Modeling For Complex Virtual Environments [C] // Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York: Association for Computing Machinery Press, 1996: 11-19.
- [18] 汤延辰, 郭星, 张功营, 等. 一种多控制因子LOD大规模地形绘制算法[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(4): 99-104.
- Tang Yanchen, Guo Xing, Zhang Gongying, et al. A LOD Large-Scale Terrain Rendering Algorithm with Multiple Control Factors[J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(4): 99-104.
- [19] 陈晨. 基于Loop细分模式的曲面造型和数控加工技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- Chen Chen. Research On Surface Modeling And Ne Processing Technology Based on Loop Scheme [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [20] Wang Q, Feng Y, Gao Y, Li Z, et al. Smooth Fillet-End Cutter Tool Path Generation Method On Triangular-Mesh Surface Based On Modified Butterfly Subdivision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology(S0268-3768), 2018, 98(9-12): 2831-2847.
- [21] 胡和平, 詹骞, 蒋洪波, 等. 自适应Catmull-Clark细分算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(10): 56-58.
- Hu Heping, Zhan Qian, Jiang Hongbo, et al. Adaptive Refinements In Catmull-Clark Subdivision Scheme[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science), 2002, 30(10): 56-58.
- [22] Zheng Xu, Kunio Kondo. Local Subdivision Process With Doo-Sabin Subdivision Surfaces[C] // Proceedings of the Shape Modeling International. Piscataway: IEEE Press, 2002: 7-12.
- [23] 魏子衿, 肖丽. 基于区域分解的并行动态LOD构建算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(6): 168-177, 197.

- Wei Zijin, Xiao Li. Parallel Dynamic Level-Of-Detailconstruct Algorithm Based on Domain Decomposition[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(6): 168-177, 197.
- [24] 车力, 唐德军, 李世民, 等. 一种视觉特征保持的网格模型简化方法[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(11): 2247-2254.
- Che Li, Tang Dejun, Li Shimin, et al. A Mesh Model Simplification Method Based on Visual Feature Preservation[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2247-2254.
- [25] 李明. 工程仿真精度可信的 CAD 模型简化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(8): 1363-1375.
- Li Ming. Review on Engineering Analysis Reliable CAD Model Simplification[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(8): 1363-1375.
- [26] Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces[J]. Computer Graphics Forum(S0167-7055), 1998, 17(2): 167-174.