

网格模型化简综述*

何晖光, 田捷, 张晓鹏, 赵明昌, 李光明

(中国科学院 自动化研究所 人工智能实验室, 北京 100080)

E-mail: hhg@sina.com; tian@doctor.com

http://www.3dmed.net

摘要: 网格模型的化简对于其存储、传输、处理以及实时绘制有着重要的意义.对国内外在这一领域的工作成果进行了较为系统的介绍,并对各方面典型算法的优缺点进行了分析,最后对这一技术的发展进行了展望.

关键词: 网格模型化简;多分辨率模型;层次细节模型

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

随着科学技术的进步,在计算机图形学、虚拟现实、计算机辅助设计技术、地理信息系统、医学图像系统等领域所构造和使用的模型越来越精细、越来越复杂,这些复杂的模型动辄就产生数以百万计的面片,而斯坦福大学的数字米开朗基罗计划(digital Michelangelo project)中著名的大卫(David)雕像的三角面片更是高达 20 亿^[1].这些复杂的模型对计算机的存储容量、处理速度、绘制速度、传输效率等都提出了很高的要求.然而在很多情况下,高分辨率的模型并不总是必要的,模型的准确度以及需要处理的时间也要有一个折衷,因此必须用一些相对简单的模型来代替原始模型,这就是对模型进行简化.模型化简是指在保持原模型几何形状不变的前提下,采用适当的算法减少该模型的面片数、边数和顶点数.化简对于几何模型的存储、传输、处理,特别是对实时绘制有着重要的意义.早在 20 世纪 70 年代,就有学者讨论网格模型的化简问题^[2],然而直到 90 年代以后,网格化简才得到深入的研究,并有了很多成功的应用.

网格模型化简算法分类有多种,如根据拓扑结构是否保持可以分为拓扑结构保持形^[3,4]和非拓扑结构保持形^[5,6];根据模型简化的过程可以分为逐步求精^[7,8]和几何化简^[9-11];根据误差可控性可分为误差受限^[4]和误差不受限^[9];根据视点相关性可以分为视点无关的化简^[3,9]和视点相关的化简^[12,13].

需要说明的是,这些分类方法都难以囊括所有的化简算法,同时有很多算法彼此交叉.本文首先介绍面片化简的原则和误差测度,然后从静态化简到动态化简这个顺序分别介绍各种算法,因为这种顺序体现了化简算法发展的过程.

1 化简原则和误差测度

由于网格模型大部分由三角面片表示,而且即使原始模型不是三角面片,也可以对其进行三角化,因此网格模型简化的本质是:在尽可能保持原始模型特征的情况下,最大限度地减少原始模型的三角形和顶点的数目.它通常包括两个原则:顶点最少原则,即在给定误差上界的情况下,使得简化模型的顶点数最少;误差最小原则,给定简化模型的顶点个数,使得简化模型与原始模型之间的误差最小^[14].

* 收稿日期: 2001-09-24; 修改日期: 2002-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60071002;60072007;69931010;60172057)

作者简介: 何晖光(1973 -),男,湖北麻城人,博士,助理研究员,主要研究领域为模式识别与图像处理,计算机图形学;田捷(1960 -),男,安徽芜湖人,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为模式识别与智能系统,计算机网络与多媒体;张晓鹏(1963 -),男,陕西西安人,博士,副研究员,主要研究领域为计算机图形学,科学可视化,虚拟内窥镜;赵明昌(1977 -),男,河南郑州人,博士生,主要研究领域为计算机图形学,科学可视化;李光明(1977 -),男,山东菏泽人,博士生,主要研究领域为计算机图形学,科学可视化.

误差测度是用来量化输入模型和输出模型的差异,它引导模型化简,使得化简后的误差在用户允许误差范围之内.误差测度包括外观相似测度和几何误差测度^[15].外观相似测度用来计算原始模型与简化模型投影到视平面的差异,它最符合人们的视觉习惯,但由于它需要从各个视点进行采样,计算量大,因此在实际应用中通常用几何相似测度来代替.一个经常用到的几何误差测度被定义为

$$E_{\max}(M_1, M_2) = \max\left(\max_{v \in M_1} d_v(M_2), \max_{v \in M_2} d_v(M_1)\right),$$

其中 $d_v(M)$ 表示一个顶点 v 到一个模型 M 的距离 ($d_v(M) = \min_{w \in M} \|v - w\|$, $\|\cdot\|$ 是两个向量的欧氏距离),这个误差用来测量两个模型之间的最大偏差,同样两个模型之间的平均偏差可以定义为

$$E_{\text{avg}}(M_1, M_2) = \frac{1}{w_1} \int_{v \in M_1} d_v^2(M_2) + \frac{1}{w_2} \int_{v \in M_2} d_v^2(M_1).$$

在这里, w_1 和 w_2 分别是 M_1 和 M_2 的面积.

几何相似测度还有一些其他类型的表述:如 Schroder 利用点到平面的平均距离作为局部误差测度来控制顶点的删除^[9], Turk 采用的是曲率度量^[16],周晓云利用特征角度作为误差测度^[17].

2 静态化简方法

早期的模型简化算法大多属于静态化简,它是根据一定的精简原则,由复杂模型构造出简单模型用于绘制,它只考虑模型自身的信息,与视点无关,也不能恢复原模型的信息.静态化简也可以构造多分辨率模型,但是它要事先存储多个不同分辨率的近似模型,需要占用较多的内存,而且在不同分辨率的模型进行切换的时候,由于相邻两层模型之间的面片数差别较大,因此会引起跳跃的感觉.

静态化简方法主要包括第 2.1 节~第 2.8 节所述的几种方法:

2.1 顶点聚类法

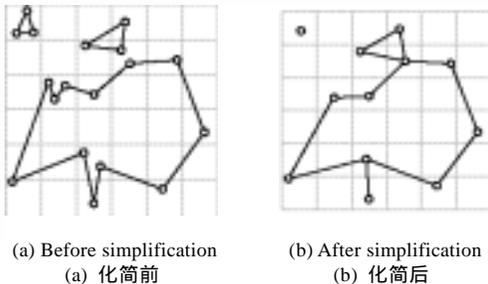


Fig.1 Vertex cluster
图 1 顶点聚类

顶点聚类方法^[5,18,19]首先用一个包围盒将原始模型包围起来,然后通过空间划分将包围盒分成若干个区域,这样,原始模型的所有顶点就分别落在这些小区内,将区域类的顶点合并成一个新顶点,再根据原始网格的拓扑关系对这些新顶点进行三角化,就得到简化模型,其过程如图 1 所示.这是一种通用的不保持拓扑结构的简化算法,它可以处理任意拓扑类型的网格模型,且速度较快.由于这个方法是把模型的包围盒均匀分割,所以无法保持那些大于分割频率的特征.同时新顶点的生成只是采取简单的加权平均,而没有较好的误差控制,因此这种方

生成模型的质量不高.Kok-Lim Low 和 Tiow-Seng Tan 改进了顶点聚类简化方法^[18],他们在保持原算法通用性的基础上,定义了一种更优的重要度.周昆等人采用了八叉树对网格包围盒作自适应划分,同时采用二次误差测度来控制新顶点的生成^[20].Peter Lindstrom 拓展了顶点聚类方法,且将其应用于超大规模网格模型化简^[21].

2.2 区域合并法

Kalvin 和 Taylor 提出了一种比较典型的区域合并方法^[4],该方法选择一个三角面为种子面,根据一定的准则将周围的面合并起来形成一个更大的面(称为超面),再将超面边界拉直,并对其重新三角化,从而达到面片化简的目的.这种算法可以由用户自己控制简化模型的误差,且可以保持模型的拓扑结构,但是由于无法避免带洞超面的产生,且重新三角剖分计算复杂,影响了算法的运行效率^[22].李捷、唐泽圣等人对此进行了改进,采用区域分割算法消除超面交界投影轮廓的自相交,而避免了带洞超面的产生,因此该算法的运行效率提高了 1 倍^[22,23].曹卫群采用高斯球的近似共面合并构建层次细节模型^[24].Hinker 和 Hansen 首先找出具有近似平行的法向的三角形,将其形成一个面片组,用重新三角化的方式进行区域合并^[25].Jonathan Cohen 等人提出了一个简化封套

(simplification envelopes)的框架,该算法可以保证化简在全局误差范围内进行,不改变原始模型的拓扑结构,同时可以很好地保持原始模型的尖锐特征^[14].Ciampalini 同时提供了全局误差和局部误差控制的简化方法,但是该算法在空洞填充过程中,并不能产生惟一优化的三角形剖分,同时基于全局误差的简化速度也太慢^[26].后来,Zhou 等人在其基础上作了改进^[27].

2.3 重新布点法

Greg Turk 在 1992 年提出了重新布点法(re-tiling)^[16],算法先将由用户指定数目的顶点根据各个三角面片的面积大小分布在模型表面上,其次根据模型表面上顶点之间的斥力以使顶点在表面上的分布更均匀,然后将模型上的原始顶点与新加入的顶点混合在一起进行三角剖分,最后将原始顶点一个个地删去,并及时地对删除顶点所造成的空洞进行三角化.Taosong He 等人则将模型转化为体数据表示,再对其低通滤波,从而生成较大体素单元的体数据,最后采用移动立方体法抽取等值面,从而得到化简模型,它可以有效地去除模型的高频细节^[28,29].

2.4 逐步求精法

逐步求精方法首先给出一个原始网格的逼近网格,然后逐步增加细节,并重新进行局部三角化,直到近似模型达到用户满意的精度为止^[7,8],它包括贪婪插入法和层次细分法.

贪婪插入法在每一次遍历过程中选择误差最大的位置作为插入新顶点的位置.Robert J.Fowler 和 James J.Little 等人首先使用一个 2×2 的滤波器来选择特征点并进行三角化,然后使用多次遍历的并行贪婪插入^[30].Leila De Floriani 等人介绍了一种串行贪婪插入算法^[31,32],后来又给出了构造 Delaunay 金字塔的算法^[33],Garland 和 Heckbert 在 1995 年实现了高效准确的贪婪插入算法^[34].

层次细分法是基于层次表示结构,采用分治策略来进行层次三角化,将模型上的表面根据其复杂程度分层次地组织成一棵树,从而可以快速地给出指定分辨率的模型.比较著名的细分模式包括 Catmull-Clark 模式^[35],Loop 模式^[36]以及 Doo-Sabin 模式^[37]等.由于细分方法不受控制网格拓扑的限制,可以对任意拓扑网格进行曲面造型,而且其递归结构与小波和多分辨率分析有着密切联系^[38],最近又有不少学者利用细分法构造多分辨率模型,其中有 Kobbelt 的 $\sqrt{3}$ 模式^[39]、Luiz Velho 和 Denis Zorin 的 4-8 模式^[40]、Lexing Ying 和 Denis Zorin 的非流形细分^[41]等.

2.5 几何元素删除法

1992 年,Schroeder 提出了顶点删除的网格简化方法^[9],此后,基于边折叠^[10]、基于三角形删除^[11]等几何元素删除的方法被相继提出.这些方法的共同特点是以几何元素的删除实现模型的简化,即根据原模型的几何拓扑信息,在保持一定的几何误差的前提下删除对模型几何特征影响相对较小的几何“图元”(点、边、面).下面将分别介绍顶点删除法、边折叠法(顶点对的删除)、三角形化简方法等.

2.5.1 顶点删除法

在三角网格中,若一顶点与它周围三角面片可以被认为是共面的(这可以通过设定点到平面距离的阈值来判断),且这一点的删除不会带来拓扑结构的改变,那么就可将这一点删除,同时所有与该顶点相连的面均被从原始模型中删除,然后对其邻域重新三角化,以填补由于这一点被删除所带来的空洞,如图 2 所示,继续这种操作直到三角网格中无满足上述条件的顶点为止^[9].

这种算法计算较快,也不需要占用太多的内存,但是由于重新三角化需要将局部表面投影到一个平面,这种算法只适用于流形,而且它在保持表面的光滑性方面存在一定困难^[15].随后又有算法对其改进,并提出了更精确的误差测度,这些算法可以生成较高质量的模型,但是需要花费更多的时间和空间^[26,42~44].国内在这方面的工作有文献[17,45]等.实际上,顶点删除与边折叠算法极为相似,通过边折叠来删除顶点比重新三角化要鲁棒得多^[15].

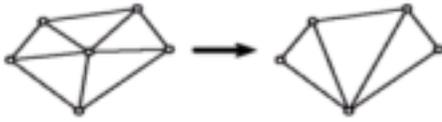
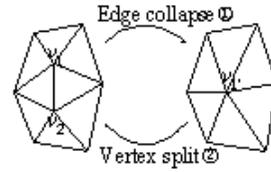


Fig.2 Vertex removal
图2 顶点删除



边折叠, 点分裂.

Fig.3 Edge collapse and vertex split
图3 边折叠与点分裂

2.5.2 边折叠法

边折叠简化算法是指,在每一次简化操作中以边作为被删除的基本几何元素(如图3所示).在进行多次的选择性边折叠后,面片就可以被简化到我们想要的任何程度了.点分裂是边折叠的逆变换,可以用来恢复被简化掉的信息.Hoppe 通过边折叠和点分裂构建了渐进网格(progressive mesh,简称 PM)模型,实现了多分辨率(multi-resolution)的层次细节模型(level of detail,简称 LOD)的实时生成^[3].

边折叠的关键是折叠的次序以及边折叠后新顶点的位置.Hoppe 在 1993 年采用能量优化的方式来确定折叠次序和新顶点的位置^[10].能量优化计算复杂,所需时间较长,但是生成模型的效果却是在所有化简方法中最好的^[46].Garland 和 Heckbert 在 1997 年提出了一种基于二次误差测度(quadratic error metric,简称 QEM)的化简算法^[47].QEM 算法误差测度是基于顶点到平面的距离平方和,该算法速度快,简化生成的模型质量仅次于 Hoppe 的能量优化方法,是一种非常有效的化简算法.Hoppe 将法向量、颜色以及纹理等信息加入到 QEM 算法中,然后采用叫作翼边(wedge)的数据结构来加以实现,也得到了较好的效果^[48].Lindstrom 和 Turk 在 1998 年用化简前后体积和面积的变化作为误差测度,也得到了与 QEM 类似的数学表达^[49],这种方法在计算边折叠队列和新顶点的位置时只需要网格模型面的连接信息和顶点的位置,所以此算法占用内存小,运算速度快.Cohen 等人采用边折叠简化结合连续映射来简化多边形网格^[50];Andre Guszic 定义了边的重要度,按照重要度从小到大的顺序来对合法的边进行删除^[51];Algorri 则通过确定模型的特征边来进行边折叠操作^[52];李现民采用改进的蝶形细分算法来计算新顶点的位置,效果较好,但是时间复杂度较高^[53].

2.5.3 三角形折叠简化方法

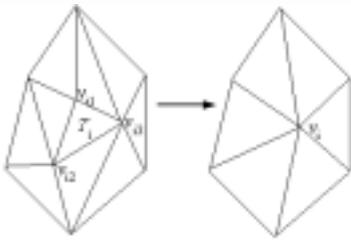


Fig.4 Triangle collapse
图4 三角形折叠

三角形折叠简化方法是指,在简化时三角面作为被删除的基本元素.它是边折叠算法的延续,如图4所示,一次三角形折叠可以删除4个三角形、两个顶点.

Hamann 将三角形的权重定义为等角度(equi-angularity)与曲率的乘积,然后对网格模型上的所有三角形按权重进行排序,并依次折叠,这样细长且低曲率的面首先被删除^[11];Tran S.Giang 等人也提出类似的三角形折叠简化算法,他们定义每个三角形的权重为该三角面的面积与曲率等因素的乘积^[54],这种算法复杂度较高,但是它可以较好地保持外形;Isler 等人则将边折叠与三角形折叠结合起来构造了半实时多分辨率模型^[55];周昆等人将三角形折叠与 QEM 算法结合起来,并给出了一种传递简化误差的

方法^[56];另外,根据细分曲面的特性,李桂清等人给出了一种基于细分规则的三角形折叠方法^[57],国内在这方面的工作还有文献^[56,58]等.

2.6 小波分解

小波分解方法为层次细节模型提供了一个完美的数学表达方式,它首先由 Lounsbery 和 DeRose 在 1994 年提出^[59].它的主要原理就是利用小波分析的方法将一个三维模型分解成低分辨率部分和细节部分,低分辨率部分是原始模型的一个子集,它的顶点为原始模型中对应顶点的邻域的加权平均,通常用低通滤波来实现,因此表现为低频信号;细节部分通常包含抽象的小波系数,这些系数通过高通滤波来得到,表现为高频信号.重建过程

就是通过选择适量的高频信号与低频信号以合成相应精度的三维模型,通过略去其余的更高频分量来达到简化的效果.这种方法简单、高效,但是它只适用于具有细分连通性的三角网格^[59].1995年,Matthias Eck等人改进了上述算法使其能够处理任意拓扑的网格^[60,61].小波分析在图形学中的应用除了面片化简以外,还广泛地应用于面片压缩、面片优化、面片编辑以及建立多分辨率细节模型等^[62].

2.7 动态化简方法

动态化简的基本思想是:在模型的化简过程中,可以实时地得到具有所需要的分辨率的近似模型.每个模型的化简程度由模型之外的因素决定,例如视点.动态化简一般是通过一些简单的局部的几何变换来实现,从而生成具有连续的不同分辨率的近似模型.动态化简是静态化简的延续,它的很多基本操作采用的是静态化简的方法.

2.7.1 层次表示法

Isler等人提出了一种混合方法来实现半实时的层次细节表示^[55],该算法预先产生几个关键的简化模型,并对其中的三角面按视觉重要度排序,在实时绘制中,选择一个比所需分辨率高的最简的逼近模型,并对该逼近模型按重要度从小到大的顺序删除三角面,直到满足当前精度为止,这样可以部分地解决计算量大的问题.R.Ronfard首先对每条边定义由于它的删除所造成的简化网格模型与原始网格模型之间的几何偏差,并将其按照从小到大进行排序,然后根据用户对模型复杂程度的需要,依次进行边删除操作,这个算法可以生成原始网格一系列连续的简化模型^[63].

2.7.2 渐进网格法

在动态化简中最著名的算法当属Hoppe在SIGGRAPH'96上提出的PM算法^[3],PM算法以边折叠和点分裂为基本操作,记录了模型简化过程中原顶点和新顶点位置以及顶点间的连接关系的变动信息,从而生成了一个由原始模型的最简化模型和一系列简化信息组成的PM表示模式,PM可以把任意拓扑网格表示为一种高效、无损且具有连续分辨率的编码.在实时绘制时,通过逆向跟踪简化信息序列,对每条简化信息执行点分裂逆操作,可以逐步恢复所删除的模型细节,实时得到原始模型的连续精度的简化模型,由此实现了LOD模型的平滑过渡.PM很大程度上克服了以往模型的平滑过渡方面的不足,可以支持不同细节的网格模型的实时生成.但是在实现同一网格不同区域多分辨率的细节的实时生成方面,PM仍缺乏有力的数据结构的支持,同时由于边删除的先后顺序与边的几何拓扑信息无关,因此在模型恢复的过程中必须进行逐一判断,而很难实现LOD模型的实时生成.陶志良针对PM的二义性,提出了支持快速恢复的可递进网格^[64].费广正则利用递进网格进行多层次模型编辑^[65].

2.7.3 基于视点的化简方法

1996年,Julie C.Xia提出了一种实时的基于视点的三角网格模型简化算法^[12],该算法可以实时地在同一模型的不同区域选择不同的精度层次;Hoppe定义了一个基于视锥模型表面法向和屏幕空间几何误差的细化标准,该标准包括视锥原则、面的方向性原则和屏幕空间几何误差原则,并利用此准则进行选择性的边折叠和点分裂,建立多分辨率的模型^[66];David Luebke等人采用八叉树将空间进行划分,当一个八叉树节点所对应空间的体积投影到屏幕上小于指定范围时,就将这个节点中的所有顶点折叠在一起,并删除所有的退化多边形^[67,68];李捷通过对模型中每个顶点的重要度进行排序,建立了视点参数与被选择的分辨率的直接关系,生成了实时连续多分辨率模型^[69];周昆则将视点无关与视点相关结合起来,生成混合多细节层次模型^[70].

2.8 其他方法

其他一些动态方法大多是针对特定情况的应用,Peter Lindstrom在SIGGRAPH'96上利用规则网格表示地表网格的连续层次细节模型,并且用一个可变的屏幕空间的阈值来界定投影图像的最大误差^[71].Chris Prince给出了对任意拓扑的大规模网格的渐进网格表示方法,在生成简化网格时使用层次简化和优化方法,在绘制网格时只调入局部网格数据^[72].1997年,Dieter Schmalstieg和Gernor Schaufler提出了一种被称为光滑层次细节Smooth LODS的表示方法,在这种表示方法中,大量较小的细节以数据流的方式组织起来,这样就可以从对象较粗的逼近网格开始逐步地细化以得到原始网格,这种方法给出了适合网络应用的渐进传输和编码,提供了交互选

择任意逼近质量的方法^[73].Leif P.Kobbelt 等人通过给出两个网格之间的不同隐含地引入细节信息,该细节是通过在一个面上沿着法向的射线来计算的^[74].Aaron Lee 提出了一个基于细分的位移表面表示方法,这种方法把一个复杂的表面网格模型表示为一个平滑的基网格模型上法向的标量位移^[75].IgorGuskov 提出的法向网格也是一种连续层次细节模型,其中每一个层次都是它的上一层的法向偏移^[76],随后他还提出了一种称为混合网格的层次细节表示方法^[77].

3 结 论

本文系统地介绍了网格模型化简的各种方法,需要说明的是,网格模型化简是与多分辨率模型以及网格压缩联系在一起的,出于篇幅的考虑,本文并没有介绍网格压缩,相关内容可见文献^[78].本文所介绍的分方法并不是绝对的,它只是反映了化简算法发展的过程,动态化简是在静态化简的基础上发展起来的,很多静态化简算法加以扩展就是动态算法,如 PM 算法,它的基本操作就是边折叠,然而通过构造 PM 模型表示就可以形成动态算法;QEM 算法是从顶点聚类发展过来的,它的操作是顶点对的删除,它又与边折叠非常相似.同时,各种方法是相互联系的,每个算法都有自己的特点,并针对特殊的应用,如基于全局误差的化简^[26]可以精确地控制化简误差的范围,基于能量优化的化简生成的图像质量最好^[3];而就速度而言,顶点聚类算法速度很快^[18],但是生成的图像质量不高;运算速度和图像质量上一个比较好的折衷是 QEM 算法^[47]和顶点删除法^[9].其中,QEM 算法和 PM 算法在最近几年研究得比较充分,因为 QEM 提供了一种可以快速计算的二次误差测度,而 PM 则为模型的多分辨率表示打下了基础.另外,通过细分法来构造多分辨率模型也得到了越来越多的重视,这是因为细分法很容易与小波分析联系起来,适用于任意拓扑网格.见表 1.

Table 1 Comparison of the character on typical mesh simplification methods

表 1 典型简化算法特征对比

Method		Character of method			Error		Character preserving			Multi-res	Speed
		Incre.	Adapted model	Entity	Glob./Loc./other	Bound	Topol.	Edge.	Vertex loc.	Out.	KT/S
V-Clust.	Vertex clustering ^[5]	No	Arbitrary	$V+E+F$	Local	Yes	No	No	Yes	No	180
	QEM ^[47]	Yes	Arbitrary	V -pair	Global	No	No	No	Yes	No	8.0~9.0
R-Merge.	Super face ^[4]	No	Arbitrary	F	Global	Yes	Yes	Yes	No	No	0.3~0.8
R-Tile. ⁽²¹⁾	Re-titling ^[16]	No	Arbitrary	V	Other	No	Yes	No	Yes	No	N/A
Refine. ⁽²²⁾	Adaptive subdivision ⁽²³⁾ [8]	Yes	Regular mesh ⁽²⁴⁾	—	Other	Yes	Yes	Yes	Yes	No	N/A
Wavelet ⁽²⁵⁾	Multi-res analysis ⁽²⁶⁾ [59]	Yes	Arbitrary	—	Other	Yes	Yes	No	Yes	Yes	0.04
Entity rem. ⁽³⁰⁾	Vertex remove ⁽²⁷⁾ [9]	No	Manifold ⁽³¹⁾	V	Other	No	Yes	No	No	No	2.0~2.5
	Edge collapse ⁽²⁸⁾ [50]	Yes	2d Manifold	E	Other	No	Yes	Yes	Yes	Yes	N/A
	Tri. col. ⁽²⁹⁾ [11]	Yes	2d Manifold ⁽³²⁾	F	Other	No	Yes	Yes	No	No	N/A
	Simp. env. ⁽³³⁾ [14]	No	Manifold	V	Local	Yes	Yes	Yes	No	No	0.07~0.09
	Mesh opt. ⁽³⁴⁾ [10]	Yes	2d Manifold	$V+E$	Other	No	Yes	Yes	Yes	No	0.008
	Prog. mesh ⁽³⁵⁾ [3]	Yes	2d Manifold	E	Other	No	Yes	Yes	Yes	Yes	0.04
Other	Normal mesh ⁽³⁶⁾ [76]	Yes	Semi-regular mesh ⁽³⁸⁾	V	Other	No	Yes	Yes	Yes	Yes	N/A
	Out of core ⁽³⁷⁾ [21]	Yes	Arbitrary	$V+E$	Other	Yes	No	No	Yes	No	100

化简算法, 算法特征, 化简误差, 网格特征保持, 多分辨率模型, 速度, 细节层次过渡, 适用的模型, 基本操作单元, 全局/局部/其他, 有界, 拓扑结构, 特征边, 顶点位置, 输出, 顶点聚类, 二次误差测度, 任意, 区域合并, 超面,⁽²¹⁾重新布点,⁽²²⁾逐步求精,⁽²³⁾自适应细分,⁽²⁴⁾正则网格,⁽²⁵⁾小波分析,⁽²⁶⁾多分辨率分析,⁽²⁷⁾顶点删除,⁽²⁸⁾边折叠,⁽²⁹⁾三角形折叠,⁽³⁰⁾几何元素删除,⁽³¹⁾流形,⁽³²⁾二维流形,⁽³³⁾简化封套,⁽³⁴⁾网格优化,⁽³⁵⁾渐进网格,⁽³⁶⁾法向网格,⁽³⁷⁾不能载入内存.

表 1 中 V 表示顶点, E 表示边, F 为面, KT/S 为千·三角面/秒.其中测试的硬件环境为普通 PC,PIII450/256M,在这些算法中,QEM、简化封套和面片优化都是开放源码的算法,我们直接使用原作者提供的源码来测试速度;

顶点删除、超大规模化简算法我们使用开放源码库 VTK^[81]中的实现来测试速度;顶点聚类、超面、多分辨率分析以及渐进网格算法使用我们自己的实现来测试速度.需要说明的是,由于实现细节上的差异,这里列出来的数字仅供参考;其余的几种算法速度标为 N/A,代表我们无法测试其速度.

随着可视化技术的发展,超大规模数据模型的化简越来越受到重视,由于模型数据量大,难以一次调入内存,因此如何优化内存管理是一件重要的工作.另外,误差测度的研究也是学者们一直研究的方向,由于模型的外观相似性是我们的最终目标,因此误差测度的选择目前有从几何误差测度向外观相似测度转化的趋势,但最关键的问题是,如何才能提高利用外观相似误差测度化简的速度,目前已有部分学者在这方面进行了探索^[79,80].

References:

- [1] Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., *et al.* The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. In: Proceedings of the Computer Graphics, SIGGRAPH 2000. 2000. <http://graphics.stanford.edu/papers/dmich-sig00/dmich-sig00.html>.
- [2] Clark, J.H. Hierarchical geometric models for visible surface algorithms. Communications of the ACM, 1976,19(10):547~554.
- [3] Hoppe, H. Progressive meshes. In: Proceedings of the SIGGRAPH'96. 1996. 99~108. <http://www.research.microsoft.com/research/graphics/hoppe/>.
- [4] Kalvin, A.D., Taylor, R.H. Surfaces: polygonal mesh simplification with bounded error. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996,16(3):64~77.
- [5] Rossignac, J., Borrel, P. Multi-Resolution 3D approximation for rendering complex scenes. In: Falcidieno, B., Kunii, T.L., eds. Proceedings of the 2nd Conference Modeling in Computer Graphics: Methods and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 453~465.
- [6] Luebke, D., Erikson, C. View-Dependent simplification of arbitrary polygonal environments. In: Proceedings of the Computer Graphics, Annual Conference Series, SIGGRAPH'97. 1997. <http://www.cs.virginia.edu/~luebke/publications/sig97.html>.
- [7] Schmitt, F., Barsky, B., Du, W.-H. An adaptive subdivision method for surface-fitting from sampled data. In: Evans, D.C., Athay, R.J., eds. Proceedings of the Computer Graphics (SIGGRAPH'86). New York: ACM Press, 1986. 179~188.
- [8] Heckbert, P.S., Garland, M. Survey of polygonal surface simplification algorithms. In: Proceedings of the SIGGRAPH'97, Multiresolution Surface Modeling Course. 1997. <http://citeseer.nj.nec.com/heckbert97survey.html>.
- [9] Schroder, W., Zarge, J., Lorensen, W. Decimation of triangle meshes. Computer Graphics, 1992,26(2):65~70.
- [10] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., *et al.* Mesh optimization. In: Proceedings of the SIGGRAPH'93. 1993. <http://citeseer.nj.nec.com/hoppe93mesh.html>.
- [11] Hamann, B. A data reduction scheme for triangulated surface. Computer Aided Geometric Design, 1994,11(2):197~214.
- [12] Xia, J.C., Varshney, A. Dynamic view-dependent simplification for polygonal models. In: Proceedings of the IEEE Visualization'96. 1996. http://www.cs.umd.edu/projects/gvil/papers/av_vd_vis.pdf.
- [13] Hoppe, H. Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering. IEEE Visualization, 1998. <http://research.microsoft.com/~hoppe/svdlod.pdf>.
- [14] Cohen, J., Varshney, A., *et al.* Simplification envelopes. In: Proceedings of the SIGGRAPH'96. 1996. <http://www.cs.unc.edu/~geom/envelope.html>
- [15] Garland, M. Multiresolution modeling: Survey & future opportunities. In: Proceedings of the Eurographics'99. 1999. <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/papers/STAR99.pdf>.
- [16] Turk, G. Re-Tiling polygonal surfaces. In: Proceedings of the Computer Graphics, SIGGRAPH'92. 1992. http://www.gvu.gatech.edu/people/faculty/greg.turk/my_papers/retile.pdf.
- [17] Zhou, Xiao-yun, Liu, Shen-quan. Polyhedral models simplification method based on feature angle criterion. Chinese Journal of Computers, 1996,19(supplement):217~223 (in Chinese).
- [18] Low, K-L., Tan, T-S. Model simplification using vertex-clustering. In: Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics, ACM SIGGRAPH'97. 1997. <http://www.comp.nus.edu.sg/~tants/Paper/simplify.pdf>.
- [19] Schaufler, G., Stürzlinger, W. Generating multiple levels of detail from polygonal geometry models. In: Göbel, M., ed. Proceedings of the Virtual Environments'95 (Eurographics Workshop). 1995. http://graphics.lcs.mit.edu/~gs/papers/01_lod_95.pdf.
- [20] Zhou, Kun, Pan, Zhi-geng, Shi, Jiao-ying. A new mesh simplification based on triangle collapse. Journal of Automation, 1999,25(1):1~8 (in Chinese).
- [21] Lindstrom, P. Out-of-Core simplification of large polygonal models. In: Proceedings of the SIGGRAPH 2000. 2000. <http://www.gvu.gatech.edu/people/peter.lindstrom/papers/siggraph2000/siggraph2000.pdf>.

- [22] Li, Jie, Tang, Ze-sheng. Realtime continuous level of detail rendering for 3D complex models. In: Shi, Jiao-ying, ed. Proceedings of the CAD&Graphics'97. Shenzhen: International Academic Publishers, 1997. 101~106.
- [23] Li, Jie, Tang, Ze-sheng. An improved greedy algorithm for simplification of triangular meshes. In: Shi, Jiao-ying, ed. Proceedings of the CAD&Graphics'97. Shenzhen: International Academic Publishers, 1997. 119~122.
- [24] Cao, Wei-qun, Bao, Hu-jun, Peng, Qun-sheng. A level of detail model by merging near-coplanar faces on Gauss sphere. Journal of Software, 2000,11(12):1607~1612 (in Chinese).
- [25] Hinker, P., Hansen, C. Geometry optimization. In: Proceedings of the IEEE Visualization'93. 1993. <http://www.acl.lanl.gov/Viz/abstracts/GeometricOptimization.html>.
- [26] Ciampalini, A., Cignoni, P., Montani, C., *et al.* Multiresolution decimation based on global error. The Visual Computer, 1997, 13(5):228~246.
- [27] Zhou, Shao-zheng, Klette, R. Multiresolution surface reconstruction: edge collapsing+simplification envelopes. Technical Report, CITR-TR-10/CS-TR-153, CITR, Tamaki Campus, University of Auckland, 1997.
- [28] He, Tao-song, Hong, Li-chan, *et al.* Voxel-Based object simplification. In: Proceedings of the IEEE Visualization'95. 1995. http://www.cs.umd.edu/projects/gvil/papers/he_voxel.pdf.
- [29] He, Tao-song, Hong, Li-chan, *et al.* Controlled topology simplification. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1996,2(2):171~184.
- [30] Fowler, R.J., Little, J.J. Automatic extraction of irregular network digital terrain models. Computer Graphics, 1979,13(2):199~207. <http://itc.fgg.uni-lj.si/data/cumincad/robots/eb8e.htm>.
- [31] de Floriani, D., Falcidieno, B., *et al.* A delaunay-based method for surface approximation. In: Proceedings of the Eurographics'83. 1983. 333~350. <http://citeseer.nj.nec.com/context/278483/0>.
- [32] de Floriani, D., Falcidieno, B., *et al.* Delaunay-Based representation of surfaces defined over shaped domains. Computer Graphics and Image Processing, 1985,32:127~140.
- [33] de Floriani, D. A pyramidal data structure for triangle based surface description. IEEE Computer Graphics and Applications, 1989, 9(2):67~78.
- [34] Garland, M., Heckbert, P.S. Fast polygonal approximation of terrains and height fields. Technical Report, CMU-CS-95-181, Department of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1995.
- [35] Catmull, Clark, J. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. Computer Aided Design, 1978,10(6):350~355.
- [36] Loop, C. Smooth subdivision surfaces based on triangles [MS. Thesis]. Utah: University of Utah, 1987.
- [37] Zorin, D. Subdivision zoo. In: Zorin, D., Schröder, P., eds. Subdivision for Modeling and Animation. Los Angeles, CA: ACM Press, 1999. <http://www.multires.caltech.edu/pubs/sig99notes.pdf>.
- [38] Gross, H., Gatti, R., Staadt, O. Fast multiresolution surface meshing. In: Proceedings of the IEEE Visualization'95. Atlanta, GA, 1995. 135~142. <http://citeseer.nj.nec.com/16573.html>.
- [39] Kobbelt, L.P. $\sqrt{3}$ -Subdivision. In: Proceedings of the Computer Graphics, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH 2000. 2000. <http://www.mpi-sb.mpg.de/~kobbelt/papers/sqrt3.pdf>.
- [40] Velho, L., Zorin, D. 4-8 subdivision. Computer Aided Geometric Design, Special Issue on Subdivision Techniques 2001. <http://www.visgraf.impa.br/People/lvelho/hp/publications.html>.
- [41] Ying, Le-xing, Zorin, D. Nonmanifold subdivision. <http://mrl.nyu.edu/publications/nonmanifold/nonmanifold.pdf>.
- [42] Soucy, M., Laurendeau, D. Multiresolution surface modeling based on hierarchical triangulation. Computer Vision and Image Understanding, 1996,63(1):1~14.
- [43] Klein, R., Liebich, G., Straber, W. Mesh reduction with error control. In: Proceedings of the Visualization'96. 1996. 311~318. <http://cg.cs.uni-bonn.de/docs/publications/klein-1996-mesh.pdf>.
- [44] Kobbelt, L., Campagna, S. A general framework for mesh decimation. In: Proceedings of the Graphics Interface'98. <http://www.mpi-sb.mpg.de/~kobbelt/papers/mesh.ps.gz>.
- [45] Pan, Zhi-geng, Ma, Xiao-hu, Shi, Jiao-ying. The automatic generation of multiple levels of detail in virtual environment. Journal of Software, 1996,7(9):526~531 (in Chinese).

- [46] Cignoni, P., Montani, C., Scopigno, R. A comparison of mesh simplification algorithm. *Computer & Graphics*, 1998. <http://citeseer.nj.nec.com/cignoni97comparison.html>.
- [47] Garland, M., Heckbert, P.S. Surface simplification using quadric error metric. In: *Proceedings of the SIGGRAPH'97*. 1997. 209~216. <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/papers/quadrics.pdf>.
- [48] Hoppe, H. New quadric metric for simplification meshes with appearance attributes. In: *IEEE Visualization 1999*. 1999. 59~66. <http://research.microsoft.com/~hoppe/newqem.pdf>.
- [49] Lindstrom, P., Turk, G. Fast and memory efficient polygonal simplification. In: *Proceedings of the IEEE Visualization'98*. 1998. 279~284. <http://citeseer.nj.nec.com/lindstrom98fast.html>.
- [50] Cohen, J., Manocha, D., Olano, M. Simplifying polygonal models using successive mappings. In: *Proceedings of the IEEE Visualization'97*. 1997. 395~402. http://www.cs.unc.edu/~geom/SUCC_MAP/succmap.pdf.
- [51] Gueziec, A. Surface simplification inside a tolerance volume. Yorktown: IBM Research Division T. J. Watson Research Center Research Report, RC 20440(90191), 1997.
- [52] Algorri, M-E., Schmitt, F. Mesh simplification. In: *Proceedings of the Eurographics'96*. 1996. <http://citeseer.nj.nec.com/context/852852/0>
- [53] Li, Xian-min. Simplification of triangular meshes and iso-surface extraction [Ph.D. Thesis]. Institute of Computing Technology, the Chinese Academy of Sciences, 2001 (in Chinese).
- [54] Gieng, T.S., Hamann, B., Joy, K.I., *et al.* Smooth hierarchical surface triangulations. In: *Proceedings of the IEEE Visualization'97*. 1997. <http://citeseer.nj.nec.com/context/490317/0>.
- [55] Isler, V., Lau, R.W.H., Green, M. Real-Time multi-resolution modeling for complex virtual environments. In: *Proceedings of the VRST'96*. Hong Kong, 1996. 11~19. http://www.cs.ualberta.ca/~woytiuk/hime/web_thesis/old/newestCh123.ps.
- [56] Zhou, Kun, Pan, Zhi-geng, Shi, Jiao-ying. Mesh simplification algorithm based on triangle collapse. *Chinese Journal of Computers*, 1998,21(6):506~513 (in Chinese).
- [57] Li, Gui-qing, Li, Xian-min, Li, Hua. Mesh simplification based subdivision. In: Pan, Yun-he, ed. *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design (CAID & CD'99)*. Bangkok: International Academic Publishers, 1999. 351~355.
- [58] Ma, Xiao-hu, Pan, Zhi-geng, Shi, Jiao-ying. Polyhedral model simplification method based on triangle removal criterion. *Chinese Journal of Computers*, 1998,21(6):492~498 (in Chinese).
- [59] Lounsbery, M., deRose, T. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type. Technique Report, Washington: University of Washington, 1994. <ftp://ftp.cs.washington.edu/pub/graphics/LounsPhd.ps.Z>.
- [60] Matthias, E., DeRose, T., Duchamp, T., *et al.* Multi-Resolution analysis of arbitrary meshes. In: *Proceedings of the Computer Graphics, Annual Conference Series, SIGGRAPH*. Los Angeles, 1995. 71~78. <ftp://ftp.cs.washington.edu/pub/graphics/TR950102.ps.Z>.
- [61] deRose, T., Lounsbery, M., Warren, J. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type. *ACM Transactions on Graphics*, 1997,16(1):34~73.
- [62] Stollnitz, E.J., deRose, T., Sallee, D.H. *Wavelets for Computer Graphics: Theory and Applications*. San Francisco, CA: Morgan Kaufman Publishers, Inc., 1996.
- [63] Ronfard, R., Rossignac, J. Full-Range approximation of triangulated polyhedra. *Computer Graphics Forum*, 1996,15(3):67~76.
- [64] Tao, Zhi-liang, Pan, Zhi-geng, Shi, Jiao-ying. A full reversible progressive meshes representation and its creation. *Journal of Software*, 1999,10(5):503~507 (in Chinese).
- [65] Fei, Guang-zheng, Wu, En-hua. LoD editing based on progressive mesh. *Chinese Journal of Computers*, 2000,23(9):953~959 (in Chinese).
- [66] Hoppe, H. View-Dependent refinement of progressive meshes. In: *Proceedings of the Computer Graphics, SIGGRAPH'97*. 1997. <http://research.microsoft.com/~hoppe/vdrpm.pdf>.
- [67] Luebke, D. Hierarchical structures for dynamic polygonal simplification. Technical Report, TR96-006, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 1996.
- [68] Luebke, D. A developer's survey of polygonal simplification algorithms. Technical Report, #TR97-045, Department of Computer Science, UNC, 1997.

- [69] Li, Jie, Tang, Ze-sheng. A real-time multiresolution modeling algorithm for 3D complex objects. Chinese Journal of Computers, 1998,21(6):481~491 (in Chinese).
- [70] Zhou, Kun, Pan, Zhi-geng, Shi, Jiao-ying. Smooth transition between levels of detail of models. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2000,12(6):463~467 (in Chinese).
- [71] Lindstrom, P., Koller, D., Ribarsky, W., *et al.* Real-Time, continuous lever of detail rendering of height fields. In: Proceedings of the SIGGRAPH'96. 1996. <http://www.gvu.gatech.edu/people/peter.lindstrom/papers/siggraph96/siggraph96.pdf>.
- [72] Prince, C. Progressive meshes for large models of arbitrary topology [MS. Thesis]. Washington: University of Washington, 2000.
- [73] Schmalstieg, D., Schaufler, G. Smooth levels of detail. Technique Report, TR-186-2-97-03, Vienna: Vienna University of Technology, 1997
- [74] Kobbelt, L.P., Bareuther, T., Seidel, H-P. Multiresolution shape deformation for meshes with dynamic vertex connectivity. Computer Graphics Forum, 2000,19(3):249~259.
- [75] Lee, A., Moreton, H., Hoppe, H. Displaced subdivision surfaces. In: Proceedings of the Computer Graphics, Annual Conference Series, SIGGRAPH. New Orleans, 2000. 85~94. <http://research.microsoft.com/~hoppe/dss.pdf>.
- [76] Guskov, I., Vidim, K., Sweldens, W., *et al.* Normal meshes. In: Proceedings of the Computer Graphics, Annual Conference Series, SIGGRAPH. New Orleans, 2000. 95~102. http://cm.bell-labs.com/who/wim/papers/normalmesh/normalmesh_lowres.pdf.
- [77] Guskov, I., Knodakovsky, A., *et al.* Hybrid meshes. <http://www.multires.caltech.edu/pubs/pubs.htm>.
- [78] Rossignac, J. Geometric simplification and compression. In: Proceedings of the SIGGRAPH'97. <ftp://ftp.cs.cmu.edu/afs/cs/project/anim/ph/paper/multi97/release/rossigna/simpcomp.pdf>.
- [79] Lindstrom, P., Turk, G. Image-Driven simplification. ACM Transactions on Graphics, 2000,19(3):204~241.
- [80] Zhou, Kun, Shi, Jiao-ying, Pan, Zhi-geng. Surface simplification with rendering error metrics. In: Peng, Qun-sheng, Li, Wei-qing, Yu, Jin-hui, eds. Proceedings of the 7th International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics. Kunming: International Academic Publishers, 2001. 125~131.
- [81] <http://www.kitware.com/vtk.html>.

附中文参考文献:

- [17] 周晓云,刘慎权.基于特征角准则的多面体模型简化方法.计算机学报,1996,19(增刊):217~223.
- [20] 周昆,潘志庚,石教英.一种新的基于顶点聚类的网格简化算法.自动化学报,1999,25(1):1~8.
- [24] 曹卫群,鲍虎军,彭群生.基于高斯球的近似共面合并层次细节模型.软件学报,2000,11(12):1607~1612.
- [45] 潘志庚,马小虎,石教英.多细节层次模型自动生成技术综述.中国图形图象学报,1998,3(9):754~759.
- [53] 李现民.三角网格简化及等值面抽取技术[博士学位论文].中国科学院计算技术研究所,2001.
- [56] 周昆,潘志庚,石教英.基于三角形折叠的网格简化算法.计算机学报,1998,21(6):506~513.
- [58] 马小虎,潘志庚,石教英.基于三角形移去准则的多面体模型简化方法.计算机学报,1998,21(6):492~498.
- [64] 陶志良,潘志庚,石教英.支持快速恢复的可逆递进网格及其生成方法.软件学报,1999,10(5):503~507.
- [65] 费广正,吴恩华.基于递进网格的多层次模型编辑.计算机学报,2000,23(9):953~959.
- [69] 李捷,唐泽圣.三维复杂模型的实时连续多分辨率绘制.计算机学报,1998,21(6):481~491.
- [70] 周昆,潘志庚,石教英.多细节层次模型间的平滑过渡.计算机辅助设计与图形学学报,2000,12(6):463~467.

A Survey on Mesh Simplification*

HE Hui-guang, TIAN Jie, ZHANG Xiao-peng, ZHAO Ming-chang, LI Guang-ming

(AI Laboratory, Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

E-mail: hhg@sina.com; tian@doctor.com

<http://www.3dmed.net>

Abstract: Mesh simplification is very important for storage, transmission, process, and real-time rendering. In this paper, the mesh simplification techniques are detailed and the typical methods are analyzed. The outlook of the future work is also given in the end.

Key words: mesh simplification; multi-resolution model; level of detail

* Received September 24, 2001; accepted April 25, 2002

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60071002, 60072007, 69931010, 60172057