

# 三维网格模型的分割及应用技术综述

孙晓鹏<sup>1, 2)</sup>      李 华<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院计算技术研究所智能信息处理重点实验室 北京 100080)

<sup>2)</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

(xpsun@ict.ac.cn)

**摘 要** 对三维网格模型分割的定义、分类和应用情况做了简要回顾, 介绍并评价了几种典型的网格模型分割算法, 如分水岭算法、基于拓扑和几何信息的分割算法等; 同时, 对网格分割在几种典型应用中的研究工作进行了分类介绍和评价. 最后对三维分割技术今后的发展方向做出展望

**关键词** 分割/分解; 三维分割; 形状特征; 网格模型  
中图法分类号 TP391

## A Survey of 3D Mesh Model Segmentation and Application

Sun Xiaopeng<sup>1, 2)</sup>      Li Hua<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

<sup>2)</sup>(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract** In this paper, we present a brief summary to 3D mesh model segmentation techniques, including definition, latest achievements, classification and application in this field. Then evaluations on some of typical methods, such as Watershed, topological and geometrical ! method, are introduced. After some applications are presented, problems and prospect of the techniques are also discussed.

**Key words** segmentation /decomposition; 3D segmentation; shape features; mesh model

### 1 引 言

基于三维激光扫描建模方法的数字几何处理技术, 继数字声音、数字图像、数字视频之后, 已经成为数字媒体技术的第四个浪潮. 它需要几何空间内新的数学和算法, 如多分辨率问题、子分问题、第二代小波等, 而不仅仅是欧氏空间信号处理技术的直接延伸<sup>[1]</sup>.

在三维网格模型已成为建模工作重要方式的今天, 如何重用现有网格模型、如何根据新的设计目标修改现有模型, 已成为一个重要问题. 网格分割问题由此提出, 并成为近年的热点研究课题<sup>[2-3]</sup>.

### 2 网格分割概述

三维网格模型分割(简称网格分割), 是指根据一定的几何及拓扑特征, 将封闭的网格多面体或者可定向的二维流形, 依据其表面几何、拓扑特征, 分解为一组数目有限、各自具有简单形状意义的、且各自连通的子网格片的工作. 该工作被广泛应用于由点云重建网格、网格简化、层次细节模型、几何压缩与传输、交互编辑、纹理映射、网格细分、几何变形、动画对应关系建立、局部区域参数化以及逆向工程中的样条曲面重建等数字几何处理研究工作中<sup>[2-3]</sup>. 同时, 三维网格模型的局部几何拓扑显著性也是对

收稿日期: 2004-03-09; 修回日期: 2004-07-08  
基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划重点项目(2001AA231031, 2002AA231021); 国家重点基础研究发展规划项目(G1998030608); 国家科技攻关计划课题(2001BA904B08); 中国科学院知识创新工程前沿研究项目(20006160, 20016190(C)).  
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

三维网格模型进行检索的一种有效的索引<sup>[4]</sup>.

与网格曲面分割有关、并对其影响巨大的一个早期背景工作是计算几何的凸分割,其目的是把非凸的多面体分解为较小的凸多面体,以促进图形学的绘制和渲染效率.该工作已经有了广泛的研究,但多数算法难以实现和调试,实际应用往往不去分割多面体,而是分割它的边界——多边形网格.多面体网格边界的分割算法有容易实现、复杂形体输出的计算量往往是线性的等优势<sup>[5]</sup>.

另外一个早期背景工作是计算机视觉中的深度图像分割,其处理的深度图像往往具有很简单的行列拓扑结构,而不是任意的,故其分割算法相对简单<sup>[6]</sup>.

三维网格模型的分割算法一般是从上述两类算法推广而来

心理物理学认为:人类对形状进行识别时,部分地基于分割,复杂物体往往被看作简单的基本元素或组件的组合<sup>[7-8]</sup>.基于这个原理,Hoffman等<sup>[9]</sup>于1984年提出人类对物体的认知过程中,倾向于把最小的负曲率线定义为组成要素的边界线,并据此将物体分割为几个组成要素,即视觉理论的“最小值规则”.由此得到的分割结果称为“有意义的”分割,它是指分割得到的子网格必须具有和其所在应用相关的相对尺寸和组织结构.

由于曲率计算方法不同,很多算法给出的有意义的分割结果也存在差异.诸多应用研究<sup>[10-14]</sup>证明,网格模型基于显著性特征的形状分割,是物体识别、分类、匹配和跟踪的基本问题.而有意义的分割对于网格模型显著占优特征的表示和提取、多尺度的存储和传输以及分布式局部处理都是十分有意义的.

## 2.1 网格分割的发展

较早的三维网格分割工作可以追溯到1991年,Vincent等<sup>[15]</sup>将图像处理中的分水岭算法推广到任意拓扑连接的3D曲面网格的分割问题上.

1992年,Falcidieno等<sup>[16]</sup>按照曲率相近的原则,把网格曲面分割为凹面片、凸面片、马鞍面片和平面片.1993年,Maillot等<sup>[17]</sup>将三角片按法向分组,实现了自动分割;1995年,Hebert等<sup>[18]</sup>给出了基于二次拟合曲面片的曲率估计方法,并把区域增长法修改推广应用到任意拓扑连接的网格曲面分割问题中;1995年,Pedersen<sup>[19]</sup>和1996年Krishnamurthy等<sup>[20]</sup>在他们的动画的变形制作过程中,给出了用户交互的分割的方法.

1997年,Wu等<sup>[3]</sup>模拟电场在曲面网格上的分布,给出了基于物理的分割方法;1998年Lee等<sup>[21]</sup>和2000年Guskov等<sup>[22]</sup>给出了几个对应于简化模型的多分辨率方法;1999年Mangan等<sup>[2]</sup>使用分水岭算法实现网格分割,并较好地解决了过分割问题;2001年,Pulla等<sup>[23-24]</sup>改进了Mangan的曲率估计工作;1999年,Gregory等<sup>[25]</sup>提出一个动画设计中的交互应用,根据用户选择的特征点将网格曲面分割为变形对应片;1999年,Tan等<sup>[26]</sup>基于顶点的简化模型建立了用于碰撞检测的、更紧致于网格曲面分割片的层次体包围盒.

2000年,Rossl等<sup>[27]</sup>在逆向工程应用中,在网格曲面上定义了面向曲率信号的数学形态学开闭操作,从而得到去噪后的特征区域骨架,并实现了网格分割;2001年,Yu等<sup>[28]</sup>的视觉系统自动将几何场景点云分割为独特的、用于纹理映射和绘制的网格曲面片二叉树;Li等<sup>[29]</sup>为了碰撞检测,给出了基于边收缩得到描述几何和拓扑特征的骨架树,然后进行空间扫描自动分割;Sander等<sup>[30]</sup>使用区域增长法,按照分割结果趋平、紧凑的原则分割、合并分割片.所有这些方法都是为了使分割的结果便于参数化,即只能产生凸的分割片.由此产生边界不连续的效果.2002年,Werghi等<sup>[31]</sup>识别三维人体扫描模型的姿态,根据人体局部形状索引进行网格模型的分割;Bischoff等<sup>[32]</sup>和Alface等<sup>[33]</sup>分别给出了网格分割片光谱在几何压缩和传输中的应用;Levy等<sup>[34]</sup>在纹理生成工作中,以指定的法向量的夹角阈值对尖锐边滤波,对保留下来的边应用特征增长算法,最后使用多源Dijkstra算法扩张分割片实现了网格模型的分割;2003年,Praun等<sup>[35]</sup>将零亏格网格曲面投影到球面上,然后把球面投影到正多面体上得到与多面体各面对应的网格模型分割,最后将多面体平展为平面区域以进行参数化,但其结果不是有意义的分割.

## 2.2 网格分割的分类

早期的网格分割算法多为手工分割或者半自动分割,近两年出现了基于自动分割的应用工作.从网格模型的规则性来看,可将分割算法分为规则网格分割、半规则网格分割和任意结构的网格分割算法,根据分割结果可以分为有意义的分割和非有意义的分割.同时,面向不同的应用目标出现了不同的分割策略(见第4节).

目前,网格分割的质量指标主要有三个方面:边界光顺程度、是否有意义、过分割处理效果.多数分

割算法以边界光顺为目标, 采用的方法有在三角网格上拟合 B 样条曲面然后采样<sup>[20]</sup>, 逼近边界角点(两个以上分割片的公共顶点)间的直线段<sup>[30]</sup>等. 近年来多数分割算法都追求产生有意义的分割结果. 对于过分割的处理方法目前主要有忽略、合并和删除三种方式.

多数三维网格分割算法是从二维图像分割的思想出发, 对图像分割算法作三维推广得到其三维网格空间的应用. 如分水岭算法<sup>[2, 15, 23-24, 36-39]</sup>、K-means 算法<sup>[40]</sup>、Mean-shift 算法<sup>[41]</sup>以及区域增长算法<sup>[18, 30]</sup>等. 同样, 与图像处理问题类似, 光谱压缩<sup>[33, 42-43]</sup>、小波变换<sup>[31]</sup>等频谱信息处理方法在三维网格分割中也有算法.

除此之外, 同时考虑几何与拓扑信息的分割会产生较好的结果. 这方面的工作主要有基于特征角和测地距离度量<sup>[44]</sup>、基于高斯曲率平均曲率<sup>[45-47]</sup>、基于基本体元<sup>[32]</sup>、基于 Reeb 图<sup>[48-50]</sup>、基于骨架提取和拓扑结构扫描<sup>[27, 29, 51-52]</sup>等使用三维网格曲面形状特征的算法.

作为网格模型的基础几何信息, 曲率估计方法目前主要为曲面拟合、曲线拟合以及离散曲率等三种. 其中曲面拟合法较为健壮, 但是计算量大; 离散曲率法计算量小, 但是除个别算法外都不是很健壮, 且无主方向主曲率信息; 曲线拟合的曲率估计方法则集中了上述两种方法的优势<sup>[3]</sup>, 实际研究中使用较多.

3 典型三维网格分割算法

3.1 分水岭算法

1999 年, Mangan 等<sup>[2]</sup>的工作要求输入的是三角网格曲面, 以及任何一种可以用来计算每个顶点曲率的附加信息(如曲面法向量等), 并针对体数据和网格数据给出了两种曲率计算方法; 但是分水岭算法本身和曲率的类型无关. 首先, 计算每个顶点的曲率(或者其他高度函数), 寻找每个局部最小值, 并赋予标志, 每一个最小值都作为网格曲面的初始分割; 然后, 开始自下而上或者自上而下地合并分水岭高度低于指定阈值的区域. 有时平坦的部分也会得到错误的分割, 后处理解决过分割问题. 分割为若干简单的、无明确意义的平面或柱面, 属于非有意义的分割.

Rettmann 等<sup>[36-37]</sup>结合测地距离, 并针对分水岭算法的过分割给出一个后处理, 实现了 MRI 脑皮层网格曲面的分割. 2002 年, Marty<sup>[38]</sup>以曲率作为

分水岭算法的高度函数, 给出了有意义的分割结果. 2003 年, Page 等<sup>[39]</sup>的算法同样只分割三角网格, 依据最小值规则, 他们试图得到网格模型高层描述. 其主要贡献为: 创建了一个健壮的、对三角网格模型进行分割的贪婪分水岭法; 使用局部主曲率定义了一个方向性的、遵循最小值规则的高度图; 应用形态学操作, 改进了分水岭算法的初始标识集.

文献[39]在网格的每一个顶点计算主方向和主曲率, 根据曲率阈值, 使用贪婪的分水岭算法分割出由最小曲率等高线确定的区域. 形态学的开闭操作应用于网格模型每个顶点的  $k$ -ring 碟状邻域, 闭操作会连接空洞, 而开操作会消除峡部. 创建了标识集后, 依据某顶点与其邻接顶点之间的方向, 由欧拉公式和已知主曲率计算该顶点在该方向上的法曲率从而得到在该方向上、该顶点与邻接顶点之间的方向曲率高度图, 并将其作为方向梯度. 对该顶点所在的标识区域使用分水岭算法得到分割片.

上述工作表明, 分水岭算法在改进高度函数的定义后, 可以得到有意义的分割效果.

3.2 基于拓扑信息的网格分割

基于几何以及拓扑信息的形状分割方法可以归结为 Reeb 图<sup>[50]</sup>、中轴线<sup>[52]</sup>和 Shock 图<sup>[53-54]</sup>等. 基于拓扑信息的形状特征描述主要有水平集法<sup>[55]</sup>和基于拓扑持久性的方法<sup>[56]</sup>.

1999 年, Lazarus 等<sup>[51]</sup>提出从多面体顶点数据集提取轴线结构, 在关键点处分割网格的水平集方法, 如图 1 所示. 这种轴线结构与定义在网格模型顶点集上的纯量函数关联, 称之为水平集图, 它能够

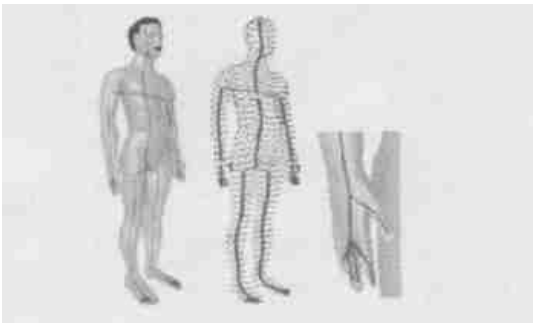


图 1 人体网格模型及其水平集图

文献[51]针对三角剖分的多面体, 使用与源点之间的最短路径距离作为水平集函数, 基于 Dijkstra 算法构造记录水平集图的结构树, 其根结点、内部结点和叶子分别表示源点、水平集函数的鞍点和局部最大值点. 该工作可以推广到非三角网格模型.

2001 年, Li 等<sup>[29]</sup>基于 PM 算法<sup>[57]</sup>的边收缩和

空间扫描, 给出了一个有效的、自动的多边形网格分割框架。该工作基于视觉原理, 试图将三维物体分割为有视觉意义和物理意义的组件。他们认为三维物体最显著的特征是几何特征和拓扑特征, 由此, 定义几何函数为扫描面周长在扫描结点之间的积分为骨架树中分支的面积; 定义拓扑函数为相邻两个扫描面拓扑差异的符号函数, 并定义了基于微分几何和拓扑函数的关键点。

文献[29]首先基于 PM 算法将每条边按照其删除误差函数排序, 具有最小函数值的边收缩到边中点, 删除其关联的三角形面片; 如果某边没有关联任何三角片则指定为骨架边, 保持其顶点不变; 循环上述过程, 得到一个新的、通过抽取给定多边形网格曲面骨架的方法。

其次, 加入虚拟边连接那些脱节的骨架边, 称这些虚拟边以及原有的骨架边组成的树为骨架树, 即为扫描路径。扫描路径为分段线条。

然后, 定义骨架树中分支面积(扫描面周长函数在扫描结点之间的积分), 分支面积较小的首先扫描, 以保证小的、但是重要的分割片被首先抽取出来, 以免被其他较大的分割片合并。

最后, 沿扫描路径计算网格的几何、拓扑函数的函数值。一旦发现几何函数、拓扑函数的关键点, 抽取两个关键点之间的网格曲面得到一个新的分割片。整个过程无需用户干涉。

2003 年, Xiao 等<sup>[48-49]</sup>的工作基于人体三维扫描点云的离散 Reeb 图, 给出了三维人体扫描模型的一个拓扑分割方法: 通过探测离散 Reeb 图的关键点, 抽取表示身体各部分的拓扑分支, 进而进行分割。

水平集法具有较高的计算速度和健壮的计算精度。基于拓扑持久性的方法结合代数学, 能更准确地计算形状特征, 但是没有解决分割问题<sup>[55-56]</sup>。

### 3.3 基于实体表示的网格分割

2002 年, Bischoff 等<sup>[32]</sup>把几何形状分割为表示其粗糙外形的若干椭球的集合, 并附加一个独立的网格顶点的采样集合来表示物体的细节。生成的椭球完全填充了物体的内部, 采样点就是原始的网格顶点。该方法的步骤如下:

Step1. 首先, 在物体原始网格的每一顶点上生成一个椭球, 或者随机在物体原始网格上采样选择种子点; 每个种子点作为球面上的一个顶点, 沿该点的网格法向做球面扩展, 直至与网格上另外一个顶点相交; 然后沿此两点的垂直方向将球面扩张为最大椭球, 直至与第三个网格顶点相交; 最后沿此三点平面的法向(即该三点所在平面的柱向)扩张, 直至

与第四个网格顶点相近, 由此得到一个椭球。

Step2. 对生成的椭球进行优化选择, 体积最大的椭球首先被选中, 以后每一次都将选出对累计体积贡献最大的椭球。如果有若干体积累计贡献相近的椭球同时出现的情况发生, 则最小半径最短的椭球被选出。为了简化体积累计贡献的计算, 对椭球体素化后计算完全包含在椭球内的体素的数目进行堆排序。发送方传送选出的椭球集合; 接收方得到包含基本几何和拓扑信息的椭球集合后, 使用 Marching Cubes 算法或者 Shrink-wrapping 算法抽取 0 等值面。显然即使部分椭球丢失, 工作依然可以继续; 因为椭球是互相重叠的, 抽取等值面不影响它们的拓扑关系, 而且如果重叠充分, 丢失少部分椭球不会影响重要形状信息的重构。如图 2 所示。

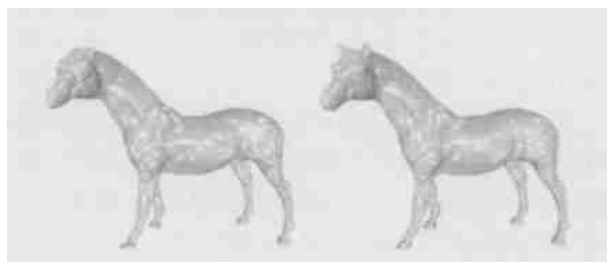


图 2 以不同数目椭球表示的网格分割

Step3. 在生成很好地逼近原始物体的初始网格后, 开始将采样点(即原始网格顶点)插入网格<sup>[58]</sup>。为了提高最终重构结果的质量, 由 Marching Cubes 算法生成的临时网格顶点在网格原始顶点陆续到来后, 最终被删除, 因为它们不是物体的原始顶点。

### 3.4 基于模糊聚类的层次分解

2003 年, Katz 等<sup>[44]</sup>提出了模糊聚类的层次分解算法, 算法处理由粗到精, 得到分割片层次树。层次树的根表示整个网格模型  $S$ 。在每个结点, 首先确定需要进一步分割为更精细分割片的数目, 然后执行一个  $k$ -way 分割。如果输入的网格模型  $S$  由多个独立网格构成, 则分别对每个网格进行同样的操作。分割过程中, 算法不强调每个面片必须始终属于特定的分割片。大规模网格模型的分割在其简化模型上进行, 然后将分割片投影到原始网格模型上, 在不同的尺度下计算分割片之间的精确边界。

文献[44]算法优点是: 可以对任意拓扑连接的或无拓扑连接的、可定向的网格进行处理; 避免了过分割和边界锯齿; 考虑测地距离和凸性, 使分割边界通过凹度最深的区域, 从而得到有意义的分割结果。分割结果适用于压缩和纹理映射。

## 4 三维网格分割应用

### 4.1 三维检索中的网格分割算法

在三维 VRML 数据库中寻找一个与给定物体

相似的模型的应用需求, 随着 WWW 的发展正变得越来越广泛, 如计算生物学、CAD、电子商务等。形状描述子和基于特征的表示是实体造型领域中基本的研究问题, 它们使对物体的识别和其他处理变得容易。因为相似的物体有着相似的分割, 所以分割结构形状描述子可以用于匹配算法。

中轴线、骨架等网格模型拓扑结构的形状描述子在三维模型检索中也得到研究, 它可以从离散的体数据以及边界表示数据(网格模型)中抽取出来。对于后者, 目前还没有精确、有效的结果<sup>[39]</sup>。但我们相信, 依据拓扑信息进行分割得到的分布式形状描述子也是一种值得尝试的三维模型检索思路。

2002 年, Bischoff 等<sup>[32]</sup>提出从椭球集中得到某种统计信息, 如椭球半径的平均方差或者标准方差, 以及它们的比率, 由于这些统计信息在不同的形状修改中都保持不变, 作为一种检索鉴别的标识的想法。但是没有严格的理论或者实验结果证明。

2002 年, Zuckerberger 等<sup>[59]</sup>在一个拥有 388 个 VRML 三维网格模型的数据库上, 进行基于分割的变形、简化、检索等三个应用。首先将三维网格模型分割为数目不多的有意义的分割片, 然后评价每一个分割片形状, 确定它们之间的关系。为每个分割片建立属性图, 看作是与原模型关联的索引, 当数据库中检索到与给定网格模型相似的物体时, 只是去比较属性图相似的程度。属性图与其三维模型的关联过程分为三步: (1)分割网格曲面为有限数目的分割片; (2)每一个分割片拟合为基本二次曲面形状; (3)依据邻接分割片的相对尺寸关系进行过分割处理, 最后构造网格曲面模型的属性图。

对分割片作二次拟合, 由此产生检索精确性较差的问题; 分割片属性图的比较采用图同构的匹配方法, 计算量较大, 且是一个很困难的问题; 从其实验结果看, 有意义的分割显然还不够, 出现飞机、灯座等模型被检索为与猫相似的结构; 区分坐、立不同的人体模型效果显然也很差等。

2003 年, Dey 等<sup>[4]</sup>基于网格模型的拓扑信息, 给出了名为“动力学系统”的形状特征描述方法, 并模拟连续形状定义离散网格形状特征。实验表明该算法十分有效地分割二维及三维形状特征。他们还给出了基于此健壮特征分割方法的形状匹配算法。

#### 4.2 几何压缩传输中的网格分割

健壮的网格模型压缩传输方法必须保证即使部分几何信息丢失, 剩下的部分至少能够得到一个逼近原始物体的重构, 即逼近的质量下降梯度, 要大大

滞后于信息丢失梯度。

无论是层次结构的还是过程表示的多边形网格模型, 它们的缺陷是: 严格的拓扑信息一致性要求顶点和面片之间的交叉引用导致即使在传输中丢失了 1% 的网格数据, 也将导致无法从 99% 的剩余信息里重建网格曲面的任何一部分。对此可以考虑引入高度的冗余信息, 即使传输中丢失一定额度的数据, 接收方依然可以重构大部分的几何信息。

问题的关键是将几何体分割为相互独立的大块信息, 如单个点, 这样接收方可以在不依赖相关索引信息的情况下, 重构流形的邻域关系。

为了避免接收方从点云重构曲面的算法变得复杂, 早期的健壮传输方法总假设至少整体拓扑信息可以无损地传送。一旦知道了粗糙的形状信息, 接收方可以插入一些附加点生成逼近网格。

2002 年, Bischoff 等<sup>[32, 58]</sup>在网格分割工作中将每个椭球互相独立地定义自己的几何信息。由于椭球的互相重叠, 冗余信息由此产生, 因此如果只有很少的椭球丢失, 网格曲面的拓扑信息和整体形状不会发生变化。冗余信息不会使存储需求增加, 因为每个椭球和三角网格中每个顶点一样, 只需要 9 个存储纯量。其传送过程如下: 种子点采样生成椭球集合; 传送优化选择的椭球子集; 接收方抽取等值面重构逼近网格; 以陆续到来的原始网格顶点替换临时网格顶点。

1996 年, Taubin 等<sup>[42]</sup>首先在几何压缩处理中提出光谱压缩, 其工作在三维网格模型按如下方式应用傅里叶变换: 由任意拓扑结构的网络顶点邻接矩阵及其顶点价数, 得到网格 Laplacian 矩阵的定义及由其特征向量构成的  $R^n$  空间的正交基底, 相对应的特征值即为频率。三维网格顶点的坐标向量在该空间的投影即为该网格模型的几何光谱。网格表面较为光顺的区域即为低频信号。

2000 年, Kami 等<sup>[43]</sup>将几何网格分割片光谱推广到传输问题上。光谱直接应用于定义几何网络的拓扑信息时, 会产生伪频率信息。对于大规模的网格, 由于在网格顶点数目多于 1000 时, Laplacian 矩阵特征向量的计算几乎难以进行, 因此该工作在最小交互前提下, 将网格模型分割为有限数目的分割片。该方法有微小的压缩损失, 且在分割片边界出现人工算法痕迹。

2003 年, Alface 等<sup>[33]</sup>提出了光谱表示交叠方法: 扩张分割片, 使分割片之间产生交叠。具体方法是把被分割在其他邻接分割片中的, 但与该分割片

邻接的三角片的顶点,按旋转方向加入到该分割片中,从而由于分割片重叠搭接产生冗余信息,并称这种分割片扩展冗余处理的光谱变换为交叠的正交变换.该工作在几何网格压缩和过程传输的应用中明显地改进了 Karni 等的工作.

显然上述工作的基础是良好的网格分割.建立分片独立的基函数将使得分割效果更为理想.

#### 4.3 纹理贴图网格中的网格分割

如果曲面网格的离散化是足够精细的,如细分网格,那么直接对顶点进行纹理绘制就足够了;否则就要把网格模型分割为一组与圆盘同胚的、便于进行参数化的分割片,再对每片非折叠的分割片参数化,最后分割片在纹理空间里拼接起来.

网格模型的分割显然会因其局部性而降低纹理映射纹理贴图、网格参数化的扭曲效果.面向纹理的分割算法一般要求满足两个条件:(1)分割片的不连续边界不能出现人工算法痕迹;(2)分割片与圆盘同胚,而且不引入太大的变形就可以参数化.不要求有意义的分割结果.

2001 年, Sander 等<sup>[30]</sup>基于半边折叠的 PM 算法,使用贪婪的分割片合并方法(区域增长法)对网格模型进行分割.首先将网格模型的每一个面片都看作是独立的分割片,然后每个分割片与其邻接分割片组对、合并.在最小合并计算量的前提下,循环执行分割片对的合并操作,并更新其他待合并分割片的计算量.当计算量超出用户指定的阈值时,停止合并操作.分割片之间的边界为逼近角点间直线段的最短路径,从而减轻了锯齿情况.

2002 年, Levy 等<sup>[34]</sup>将网格模型分割为具有自然形状的分割片,但仍然没有得到有意义的分割结果.为了与圆盘同胚,该算法自动寻找位于网格模型高曲率区域的特征曲线,避免了在平展区域内产生分割片边界,并增长分割片使他们在特征曲线上相交,尽量获得尺寸较大的分割片.

#### 4.4 动画与几何变形中的网格分割

影视动画制作中,多个对象间的几何变形特技使用基于网格分割的局部区域预处理.如建立动画区域对应关系,对多个模型进行一致分割,然后在多个模型的对应分割片之间做变形,将提高动画制作的精度和真实性;且每个“Polygon Soup”模型都可用来建立分割片对应;模型间的相似分割有利于保持模型的总体特征.目前,多数的自动对应算法精度较低,手工交互指定对应关系的效率又太低.

1996 年, Krishnamurthy 等<sup>[20]</sup>从高密度、非规

则、任意拓扑结构的多边形网格出发,手工指定分割边界,构造张量积样条曲面片的动画模型.

文献[20]首先在多边形网格的二维投影空间交互选择一个顶点序列,然后自动地将顶点序列关联到网格上最近的顶点上;对于序列中前后两个顶点计算在网格曲面上连接它们的最短路径;对该路径在面片内部进行双三次 B 样条曲面拟合、光顺、重新采样,得到分割片在两个顶点之间的边界曲线.但计算量的付出依然是非常昂贵的.

1999 年, Gregory 等<sup>[25]</sup>在两个输入的多面体曲面上交互选择多面体顶点,作为一个对应链的端点,对应链上其他顶点通过计算曲面上端点对之间的最短路径上的顶点确定,由此得到这些顶点和边构成的多面体表面网格的连通子图;然后将每一个多面体分割为相同数目的分割片,每个分割片都与圆盘同胚;在分割片之间建立映射、重构、局部加细,完成对应关系的建立;最后插值实现两个多面体之间的变形.

2002 年, Shlafman 等<sup>[40]</sup>的工作不再限制输入网格必须是零亏格或者是二维流形.该算法通过迭代,局部优化面片的归属来改进某些全局函数,因此与图像分割  $K$ -means 方法相近,属于非层次聚类算法.最终分割片的数目可以由用户预先指定,从而避免了过分割,且适用于动画制作的需求.

分割过程的关键在于确认给定的两个面片是否属于同一个分割片.其分割工作是非层次的,因为面片可能会在优化迭代中被调整到另外一个分割片去.

该工作表明,基于分割的变形对于保持模型的特征有着重要的意义.局部投影算法能够产生精细的对应区域,且能自动产生有意义的分割片.

#### 4.5 模型简化中的网格分割

网格简化是指把给定的一个有  $n$  个面片的网格模型处理为另一个保持原始模型特征的、具有较少面片、较大简化/变形比的新模型.

三维网格分割显然可以被看作是一种网格简化,其基本思想是在简化中增加一个预处理过程,先按模型显著特征将其分割为若干分割片,然后在每个分割片内应用简化算法,由此保持了模型的显著特征,如特征边、特征尖锐以及其他精细的细节.

例如,把曲率变化剧烈的区域作为分割边界,将曲率变化平缓的区域各自分割开来,就是基于曲率阈值的网格简化方法.网格曲面分割结果的分割片数目在去除过分割后被限制在指定的范围内.

2001 年, Garland 等<sup>[60]</sup> 基于顶点收缩的简化, 提出一种基于层次关系的面片聚类算法。其目标是为求交、碰撞检测、绘制、曲面简化等针对非常复杂的、计算量非常大的网格, 或者稠密点云的应用提供层次关系树, 以提高计算速度。

面片对的收缩是在网格的对偶图上以顶点对收缩的形式进行的, 原始网格的几何信息、拓扑信息没有任何变化。算法输入为三角网, 其对偶图结点数均为 3。随着收缩进行, 对偶图结点的度数发生变化。

文献<sup>[60]</sup> 给出了在求交、碰撞检测、曲面简化、多分辨率辐射度计算等方面的应用, 这些应用的共同特点是使用曲面的区域总体性质, 而不是曲面的精确几何信息。

## 5 结论及对未来工作的展望

从目前国内外研究及应用来看, 尽管对网格分割已经进行了大量的、面向不同应用问题的研究, 但是还没有一种适合所有应用的分割算法, 绝大多数算法都是针对具体问题提出的, 而且目前网格模型分割没有系统的评价准则。近年来, 基于心理学和视觉理论的有意义的分割已经成为分割算法的主要原则, 由此提出的过分割处理、分割片边界的位置是否位于凹度最深区域、是否光滑已成为广泛采样的衡量方法, 但较少考虑算法复杂度。

基于上述国内外研究工作, 我们已经提出网格模型的显著性分割树的概念, 并结合网格模型拓扑属性, 首先将其应用于三维模型检索, 以提高检索速度和精度。

基于三维网格模型分割, 借鉴网络分布式水印的思想, 可以建立更为健壮的、分布于三维网格模型各分割片上的数字水印<sup>[61]</sup>。

在 3D-GIS 中识别地形网格模型的工作, 将极大地得益于局部地物网格的分割, 同样也将促进精确规划探测器行走路线、预测地物碰撞。

网格模型的局部有意义特征物分割与识别工作的进一步研究, 与人工智能学科的结合, 是对未来 VR 研究工作的一个期望。

近年来, 网格参数化结合传统的参数曲面技术进行造型和编辑的工作较为多见, 但多数工作仍然依赖于手工分割。而如何对任意网格进行自动剖切, 自动四边界分割仍然是这项工作中的关键问题。

## 参 考 文 献

- [1] Schröder Peter, Sweldens Wim. Digital geometry processing [A]. In: Computer Graphics Proceedings Annual Conference Series ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 2001. Course Notes #50.
- [2] Mangan A, Whitaker R. Partitioning 3D surface meshes using Watershed segmentation [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1999, 5(4): 308~321.
- [3] Wu K, Levine M D. 3D part segmentation using simulated electrical charge distributions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(11): 1223~1235.
- [4] Dey T K, Giesen J, Goswami S. Shape segmentation and matching with flow discretization [A]. In: Proceedings of the 8th International Workshop on Algorithms and Data Structures (WADS), Ottawa, 2003. 25~36.
- [5] Chazelle B, Dobkin D P, Shouraboura N, *et al.* Strategies for polyhedral surface decomposition: An experimental study [J]. Computational Geometry: Theory and Applications, 1997, 7(4/5): 327~342.
- [6] Hoover A, Jean-Baptiste G, Jiang X. An experimental comparison of range image segmentation algorithms [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(7): 673~689.
- [7] Biederman I. Recognition-by-components: A theory of human image understanding [J]. Psychological Review, 1987, 94(2): 115~147.
- [8] Biederman I. Visual object recognition [J]. Visual Cognition, 1995, 2(4): 121~165.
- [9] Hoffman D D, Richards W A. Parts of recognition [J]. Cognition, 1984, 18(1): 65~96.
- [10] Cass T A. Robust affine structure matching for 3D object recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11): 1265~1274.
- [11] Chen Y, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images [J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145~155.
- [12] Loncaric S. A survey of shape analysis techniques [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(8): 983~1001.
- [13] Sclaroff S, Pentland A P. Modal matching for correspondence and recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(6): 545~561.
- [14] Weiss I, Ray M. Model-based recognition of 3D object from single vision [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(2): 116~128.
- [15] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6): 583~598.

- [16] Falcidieno B, Spagnuolo M. Polyhedral surface decomposition based on curvature analysis[ A]. In: Kunii T L, Shinagawa Y, eds. Proceedings of Modern Geometric Computing for Visualization[ C]. Tokyo: Springer-Verlag, 1992. 57~72
- [17] Maillot J, Yahia H, Verroust V. Interactive texture mapping[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Anaheim, California, 1993. 27~34
- [18] Hebert M, Homan R, Johnson A, *et al.* Sensor-based interior modeling[ A]. In: Proceedings of the American Nuclear Society 6th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Monterey, California, 1995. 731~737
- [19] Pedersen H. Decorating implicit surfaces[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 1995. 291~300
- [20] Krishnamurthy V, Levoy M. Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, New Orleans, Louisiana, 1996. 313~324
- [21] Lee W, Sweldens P, Schroder L, *et al.* MAPS: Multi-resolution adaptive parameterization of surfaces[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Orlando, Florida, 1998. 95~104
- [22] Guskov I, Vidimce K, Sweldens W, *et al.* Normal meshes[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, New Orleans, Louisiana, 2000. 95~102
- [23] Pulla S. Curvature based segmentation for 3-Dimensional meshes[ D]. Tempe, AZ: Arizona State University, 2001
- [24] Pulla S, Razdan A, Farin G. Improved curvature estimation for Watershed segmentation of 3-Dimensional meshes[ R]. Tempe, AZ: Arizona State University, 2001
- [25] Gregory A, State A, Lin M, *et al.* Interactive surface decomposition for polyhedral morphing[ J]. The Visual Computer, 1999, 15(9): 453~470
- [26] Tan T S, Chong C K, Low K L. Computing bounding volume hierarchy using simplified models[ A]. In: Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, Atlanta, Georgia, 1999. 63~69
- [27] Ross I, Kobbelt L, Seidel H P. Extraction of feature lines on triangulated surfaces using morphological operators[ A]. In: Proceedings of the AAAI Symposium on Smart Graphics, Stanford, California, 2000. 71~75
- [28] Yu Y, Ferencz A, Malik J. Extracting objects from range and radiance images[ J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, 7(4): 351~364
- [29] Li X, Woon T W, Tan T S, *et al.* Decomposing polygon meshes for interactive applications[ A]. In: Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, Research Triangle Park, North Carolina, 2001. 35~42
- [30] Sander P, Snyder J, Gortler S, *et al.* Texture mapping progressive meshes[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 2001. 409~416
- [31] Werghi N, Xiao Y. Posture recognition and segmentation from 3D human body scans[ A]. In: Proceedings of International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission[ C]. New York: IEEE Computer Society Press, 2002. 636~639
- [32] Bischoff S, Kobbelt L. Ellipsoid decomposition of 3D-models[ A]. In: Proceedings of International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission[ C]. New York: IEEE Computer Society Press, 2002. 480~488
- [33] Alfacc Patrice Rondao, Cayre Francois, Macq Benoit, *et al.* Lapped spectral decomposition for 3D triangle mesh compression[ A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing 2003, Barcelona, 2003. 781~784
- [34] Levy B, Petitjean S, Ray N, *et al.* Least squares conformal maps for automatic texture Atlas generation[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, San Antonio, Texas, 2002. 362~371
- [35] Praun E, Hoppe H. Spherical parameterization and remeshing[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, San Diego, California, 2003. 340~349
- [36] Rettmann M E, Han X, Prince J L. Watersheds on the cortical surface for automated sulcal segmentation[ A]. In: Proceedings of IEEE Workshop on Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis, Hilton Head Island, South Carolina, 2000. 20~27
- [37] Rettmann M E, Han X, Prince J L. Automated sulcal segmentation using Watersheds on the cortical surface[ J]. Neuro Image, 2002, 15(2): 329~344
- [38] Marty Kathleen. Segmentation of a human brain cortical surface mesh using Watersheds[ R]. Madison: University of Wisconsin, CS766 Final Project, 2002
- [39] Page D L, Koschan A F, Abidi M A. Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching Watersheds[ A]. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Madison, 2003. 27~32
- [40] Shlafman S, Tal A, Katz S. Metamorphosis of polyhedral surfaces using decomposition[ A]. In: Proceedings of Annual Conference of the European Association for Computer Graphics, Saarbrücken, 2002. 219~228
- [41] Shamir A. Feature-space analysis of unstructured meshes[ A]. In: Proceedings of IEEE Visualization, Seattle, Washington, 2003. 185~192
- [42] Taubin G, Zhang T, Golub G. Optimal surface smoothing as filter design[ R]. Yorktown, NY: Watson Research Center, RC-20404, 1996
- [43] Karni Z, Gotsman C. Spectral compression of mesh geometry[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, New Orleans, Louisiana, 2000. 279~286
- [44] Katz Sagi, Tal Ayellet. Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts[ J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 954~961



[ 45] Trucco E, Fisher R B. Experiments in curvature-based segmentation of range data[ J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(2): 177~182

[ 46] Zhang Y, Paik J K, Koschan A, et al. A simple and efficient algorithm for part decomposition of 3-D triangulated models based on curvature analysis[ A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing, Rochester, NY, 2002. 273~276

[ 47] Vivodtzev F, Linsen L, Bonneau GP, et al. Hierarchical iso-surface segmentation based on discrete curvature[ A]. In: Proceedings of the 5th Joint Eurographics-IEEE Symposium on Visualization, Grenoble, 2003. 249~258

[ 48] Xiao Y, Siebert P, Werghi N. A discrete Reeb graph approach for the segmentation of human body scans[ A]. In: Proceedings of the 4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Banff, 2003. 378~385

[ 49] Xiao Y, Werghi N, Siebert P. A topological approach for segmenting human body shape[ A]. In: Proceedings of Computer Analysis of Images and Patterns, Groningen, the Netherlands, 2002. 82~88

[ 50] Hilaga M, Shinagawa Y, Komura T, et al. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 2001. 203~212

[ 51] Lazarus F, Verroust A. Level set diagrams of polyhedral objects[ A]. In: Proceedings of the 5th Symposium on Solid Modeling and Applications, New York, 1999. 130~140

[ 52] Leymarie F, Kimia B. The shock scaffold for representing 3D shape[ A]. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Visual Form, Capri, 2001. 216~228

[ 53] Siddiqi K, Shokoufandeh A, Dickinson S J, et al. Shock graphs and shape matching[ J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 35(1): 13~32

[ 54] Sebastian T B, Klein P N, Kimia B. Recognition of shapes by editing shock graphs[ A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, Vancouver, 2001. 755~762

[ 55] Sethian J A. Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science[ M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000

[ 56] Edelsbrunner H, Letscher D, Zomorodian A. Topological persistence and simplification[ A]. In: Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Redondo Beach, California, 2000. 454~463

[ 57] Hoppe H. Progressive meshes[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, New Orleans, Louisiana, 1996. 99~108

[ 58] Bischoff S, Kobbelt L. Towards robust broadcasting of geometry data[ J]. Computers & Graphics, 2002, 26(5): 665~675

[ 59] Zuckerberger E, Tal A, Shlafman S. Polyhedral surface decomposition with applications[ J]. Computers & Graphics, 2002, 26(5): 733~743

[ 60] Garland M, Willmott A, Heckbert P. Hierarchical face clustering on polygonal surfaces[ A]. In: Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, Research Triangle Park, North Carolina, 2001. 49~58

[ 61] Praun Emil, Hoppe Hugues, Finkelstein Adam. Robust mesh watermarking[ A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 1999. 49~56



孙晓鹏 男,1968 年生,博士,副教授,主要研究方向为 CAD &CG、科学计算可视化、图像处理、ERP、软件工程等



李 华 男,1957 年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为 CAD &CG、网络虚拟现实、科学计算可视化、医学图像处理等(lihua@ict.ac.cn)