

数字几何处理研究进展

胡事民^{1),2)} 杨永亮^{1),2)} 来煜坤^{1),2)}

¹⁾(清华大学信息科学与技术国家重点实验室 北京 100084)

²⁾(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

摘 要 随着三维扫描获取技术的快速发展,三维数字几何模型已经成为一种新兴的数字媒体,在多个领域取得了广泛的应用.针对数字几何进行高效、鲁棒的处理,也成为近年来计算机图形学研究的热点问题.文中针对数字几何处理研究领域内的若干研究方向,按照数字几何的建模、分析、优化、应用等流程,分别进行分析,以期使读者对三维数字几何处理的研究进展有全面的了解,并对未来的研究工作有切实的帮助.

关键词 计算机图形学;数字几何

中图法分类号 TP391 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.01451

Research Progress of Digital Geometry Processing

HU Shi-Min^{1),2)} YANG Yong-Liang^{1),2)} LAI Yu-Kun^{1),2)}

¹⁾(National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

²⁾(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract With the fast development of 3D scanning techniques, 3D models are nowadays intensively used as an emerging type of digital media. Techniques for efficient and robust processing of digital geometry have also become an active area of research in computer graphics. In this paper, several research topics in digital geometry processing field is discussed. These topics almost cover the whole pipeline about modeling, analysis, optimization and applications of digital geometry. The goal is to provide the readers with a comprehensive study of digital geometry processing and hopefully it is helpful to their future research.

Keywords computer graphics; digital geometry

1 引 言

人类生存在一个信息高度发达的社会中,信息的表达形式多种多样,并且越来越丰富.音频、图像、视频等数字媒体以其表达信息的直观性和生动性,在人们的日常生活和工作中起到了至关重要的作用.20世纪90年代后期,随着三维扫描获取技术的发展,一种新的数字媒体形式,即数字几何,已经出

现在人们的视野当中,并在工业制造、数字娱乐、生物医药、数字文化遗产保护等方面取得了广泛的应用.随着数字几何应用范围的不断扩大,迫切需要一套面向数字几何获取建模、结构分析、数据优化等的处理技术,数字几何处理在这样的背景下应运而生.

数字几何描述的对象是三维形体,并且以三维曲面为主要表达形式.三维空间中的曲面一般可以表达为连续或离散的形式.连续形式主要包括参数曲面(包括在几何造型中常用的张量积样条曲面)、

收稿日期:2008-07-11;最终修改稿收到日期:2009-07-16. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2006CB303102)、国家自然科学基金(60673004,60628202)资助. 胡事民,男,1968年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学、几何处理、计算机动画、视频处理和计算机辅助几何设计等. E-mail: shimin@tsinghua.edu.cn. 杨永亮,男,1982年生,博士,研究方向为计算机图形学、几何处理等. 来煜坤,男,1980年生,博士,研究方向为计算机图形学、几何处理等.

隐式曲面和细分曲面,而离散形式主要包括网格和点云。在三维曲面的多种表达形式中,三角网格以其关联结构简单、表达能力丰富、绘制手段直接、便于扫描获取等优点得到了最为广泛的应用,也成为数字几何处理中研究得最多、最广泛的一类表达方式。本文也主要针对三角网格进行数字几何处理研究的分析和讨论。

本文基本按照数字几何建模、处理、应用的流程来组织,具体安排如下:在第2节,主要介绍对扫描仪获取的点云进行配准和网格重构;网格优化与参数化的研究会将在第3节中进行分析;对三维网格进行特征分析将在第4节中着重讨论;第5节主要介绍网格变形和快速建模;模型匹配和检索技术将在第6节中讨论,最后在第7节总结全文。

2 点云配准与网格重构

2.1 点云注册算法

由于扫描仪每次只能从一个固定视点方向获得几何深度信息,并且三维形体的不同部分可能在同一方向上存在遮挡,所以需要三维形体从不同角度进行扫描,从而获取其各个部分的点云(point cloud)数据。这些扫描数据之间有公共部分,而几何位置却存在于各自的局部坐标系下,彼此无法重合,需要在全局坐标系下对各片进行配准合并,以得到完整的三维模型点云数据。点云注册(registration)算法的目标就是求解使得多片点云精确配准所需要的刚体变换。该算法依照处理问题的不同可分为全局注册(global registration)和局部注册(local registration)。全局注册研究任意初始位置的两片(多片)点云之间的全局最优配准,为局部注册提供较好的初始位置。局部注册研究初始位置较好的两片(多片)点云如何进行精确配准。其中,两片点云之间的注册算法是多片点云注册的基础,在配准过程中,固定一片点云,另一片向其做刚体变换。

全局注册按照算法思路的不同可以分为投票法和特征对应法两种。投票法的主要思想是:利用刚体变换是一个有限维(6维)空间的特点,对两片点云中对应的不共线的三点,计算一个最佳的刚体变换使得点对配准,然后将该刚体变换记录在一个离散的6维刚体变换查找表中。当所有三点对应的刚体变换都保存在查找表中时,拥有最多记录的刚体变换是使最多点对重合的刚体变换,即为所求。投票法的代表性文章有文献[1-3]。

不同于投票法的穷举思想,特征对应法是通过两片点云上点的几何特征量来进行配准,几何特征相同的点被认为是对应点,前提是用于建立对应的特征量必须在刚体变换下保持不变。特征对应法使用的特征可分为高维特征量和低维特征量。高维特征量度量了点云上每一点的高维几何特征,是对该点几何信息的详细描述。基于此进行全局注册的代表性工作有文献[4],文章中使用 Spin Image 作为全局注册的特征量。高维特征的优点是区分度大,可以较为直接地建立特征对应,但是计算和存储的开销较大。与高维特征相对的是低维特征,低维特征一般选取模型表面曲率以及和曲率有关的几何信息作为特征量,容易计算、存储和比较。但是由于特征的维数较低,同一个点云表面可能有多个点拥有相同的低维特征,所以如何缩小低维特征的搜索空间,是使用低维特征量进行特征匹配所要着重研究的问题。最近,一种新的低维特征量——积分不变量(integral invariants)^[5]被应用在全局注册领域^[6-7],该特征量具有尺度特性、对噪声不敏感的优点,可以对点云表面特征进行鲁棒的识别和区分,保证了注册结果的可靠性。

和全局注册不依赖初始位置不同,局部注册要求有比较好的初始位置。点云的局部注册算法以优化衡量点云之间配准程度的函数为目标,采用迭代的方法,使得点云契合程度不断趋于局部最优。局部注册的最经典算法是迭代最近点法(Iterative Closest Point),即 ICP 方法^[8]。该方法每次迭代分为两步:首先求得运动点云中的每一点在固定点云中的最近点,将最近点作为其对应点;然后用四元数法求解使得对应点距离平方和最小的刚体变换。由于最近点并不是几何位置上精确的对应点,所以该方法需要迭代进行,使得点云之间的距离不断减小,直到达到收敛条件为止。与该方法平行发表的另一篇论文^[9]也采用了同样的算法框架,所不同的是在每次迭代的第二步,其求解刚体变换的目标是使得点到其最近点切平面的距离平方和最小。

后来发表的很多扩展 ICP 方法的局部注册文章均是在 ICP 算法框架下进行,不同主要体现在寻找对应点的策略以及度量点云之间距离的形式。文献[10]中总结了基于 ICP 算法的种种扩展,并提出迭代对应点(iterative corresponding point)应该是对 ICP 算法的一个更合适的称谓。由于 ICP 类的算法都是采用迭代收敛的框架,因此衡量算法质量的主要标准是收敛速度,即对于初始位置相同的

两片点云,每次迭代相对于前次迭代的残差之比.文献[10]中通过算法之间的实验结果比较,显示出ICP算法的收敛速度取决于两方面:即选取对应点的策略以及度量点云之间距离的形式.Pottmann等^[11]从理论上证明了ICP算法的线性收敛性,并将局部注册的问题抽象为如下式表示的优化问题:

$$F(\alpha) = \sum_i d^2(\alpha(x_i^0), \phi) \quad (1)$$

其中 α 代表注册求解的刚体变换, x_i^0 代表运动点云中的点, ϕ 表示固定点云曲面, d^2 表示从点 x_i^0 到固定点云 ϕ 的距离平方.优化目标是求解最优的刚体变换 α^* ,使得经过该刚体变换之后,运动点云上的点到固定点云的距离平方之和最小.其中 α 是一个 3×3 的正交旋转矩阵 \mathbf{R} 和一个 3×1 的平移向量 \mathbf{t} ,由于 \mathbf{R} 的行列之间满足正交性质,所以该问题是一个受限非线性优化问题(constrained nonlinear optimization problem).文献[11]中引入距离平方函数和刚体运动学的理论,将该优化问题的能量函数 F 进行了线性二阶近似,提出了基于Newton法的二阶收敛局部注册算法,并通过实验验证了理论结果.Huang等^[12]为了克服多片点云之间对应点缺乏整体契合约束的缺点,提出了一种新的基于整体拟合的注册算法,该方法在注册的过程中用一个整体隐式函数来拟合多片点云,然后将每片点云向该隐式函数所代表的原型曲面注册,拟合和注册过程迭代进行,最终不但能得到注册后的完整点云,也可同时获得整体拟合隐式曲面,重构出网格结构.

之前提到的注册算法均是利用部分点云之间的刚体变换进行拼合,即点云在变换后任意两点之间距离保持不变.这要求扫描实物本身在扫描过程中不会发生形变,这种约束一般是满足的.但如果扫描实物不是静态的物体(如人脸、人体等),而会在扫描过程中发生形变,在这种情况下,如果依然用刚体变换来求解注册,会产生非常大的注册误差,并对网格重构的质量产生严重影响(见2.2节).于是,非刚体注册(non-rigid registration)成为目前点云注册研究领域的热点问题.非刚体变换相对于刚体变换,旋转矩阵 \mathbf{R} 不受正交性质约束,变换的自由度更大.于是点云之间对应点的选取需要非常鲁棒,不正确的对应点将会造成非刚体注册点云退化的情况发生.

2.2 点云重构网格

三角网格是数字几何处理中最基本的几何表达方式,因此经过注册后的模型整体点云数据通常还需要由重构(reconstruction)算法构造成网格.在上

节中提到的单片扫描点云一般以深度图像的形式存在,因此可以由点阵序列直接构造网格,但这样的网格一般无法直接使用.一方面是因为单幅深度图像无法描述模型的整体几何形状,经过注册后深度图像之间的重合部三角化不唯一,需要重新进行构造;另一方面,在扫描过程中,三维实体的不同部分可能存在遮挡,使得原有单幅深度图像的三角化存在几何上的尖锐跳变,这种情况是不符合实际几何特征的.因此需要在多片扫描点云注册结束之后,重新构造三维网格结构.

从点云构造网格的关键在于如何由输入的离散点构造出其拓扑连接关系.常见的网格重构算法分为两种,一种是基于计算几何学的方法,另一种是基于隐式曲面的方法.

第1种方法基于计算几何理论,计算输入点云的Delaunay三角化或者其对偶的Voronoi图,然后利用这些图结构构造出点云中点的连接关系.代表性的工作有文献[13-17].这种方法通常认为输入点云中每个点都是重构网格的顶点,可以最大限度地保持重构网格和输入点云几何特征的一致性,算法的复杂度也取决于输入点云中点的个数,并且一些方法还可以根据点云采样率等条件对重构网格质量进行理论上的论证.这种方法的缺点是算法理论基于采样率、光滑性等假设,在实际中网格重构的效果往往依赖于输入点云的质量.所以对于含噪声的点云经常需要去噪后再进行重构,一种常用的去噪方法是基于MLS(Moving Least Squares)定义平滑的点集曲面(point set surface)^[18-19]及其扩展方法^[20-22].

第2种方法认为输入点云是三维空间中隐式函数0-等值面(zero level set)的采样,首先根据点云位置拟合出光滑的隐式函数,然后用轮廓面构造的方法将隐式函数的0-等值面离散化为三角网格.其中代表性的工作有文献[23-28].这种方法的优点是重构出的网格能够保证是闭合的,有严格的内部和外部之分;并且由于采用隐式函数作为中间表示,可以表达任意拓扑的曲面.缺点是算法复杂度取决于构造隐式函数以及生成轮廓面的复杂度,而非输入点云的规模;另外由于采用提取轮廓面的离散体方法^[29-31],使得生成的三角网格含有大量狭长的三角面片,可能需要根据后续应用进行网格重剖,见第3.3.1节.

随着扫描获取精度的提高,扫描点云的规模也随之增大,如何进行海量点云的网格重构是学者比较关心的问题.另外扫描点云常常含有噪音,如何使网格重构算法不受点云噪声影响,并且能够同时保

持几何细节,也是网格重构研究的热点.

2.3 网格修复

由于扫描获取的点云数据常常因为扫描实物的自身反射属性和周围环境的影响而含有噪声,并且注册算法造成的整体误差可能使合并后的点云无法精确契合,这都会给网格重构算法带来困难,使生成的网格含有几何错误或拓扑错误.另一方面,网格处理很多算法的效果会受到模型质量的影响,所以需要由对重生成成的网格进行几何及拓扑错误修复,以便更加方便和鲁棒地应用到后续的数字几何处理当中去.

几何错误指网格表面含有洞(hole)、自相交(self-intersection)、面片重合(face overlap)等几何位置缺失或者交叠.修复几何错误的方法按照直接操作对象的不同可分为基于网格的修复和基于体数据(volumetric data)的修复两种.基于网格的修复直接在网格上进行操作,判断错误位置,并显式地将错误去除,代表性的工作有文献[32-34].这类方法的优点是可以保持远离几何错误区域的网格结构不变,修复后的网格面片数量一般不会改变太多;缺点是由于修复过程精确依赖于几何位置的判断,容易受数值误差的影响,并且常常需要用户进行交互.另一种方法是基于体数据的几何错误修复方法,该方法首先将原有的网格转换为一种中间的体数据来表示,如均匀栅格(uniform grid)、八叉树栅格(octree grid),然后在体数据上进行修复操作,最后重构出网格,代表性的工作有文献[35-37].这类方法的好处是非常便于处理自相交和面片重合的情况,并且保证输出的网格是闭合的;缺点在于完全改变了原来网格的连接关系,会生成大量狭长的三角形.

拓扑错误是指重构的网格经常会含有多余的环(handle)、孤岛(island)和空洞(cavity),这些拓扑错误会极大影响网格简化、参数化等重要数字几何处理算法的效果,给实际应用带来了很大的困难.为此,常常需要对这些拓扑错误进行修复和去除,生成拓扑简单、易于处理的高质量网格.拓扑修复算法也可以分为基于网格和基于体数据两种.基于网格的方法直接在待修复的网格上进行操作,首先判断出现拓扑错误的位置,然后直接修改出错部分的拓扑,以达到去除拓扑错误的目的,相关的代表性工作有文献[38-40].这类方法的优点也在于网格拓扑正确的部分可以不做任何改变;缺点是在去除拓扑错误的同时可能会引入新的几何错误,并且算法往往基于遍历搜索和判别,计算复杂性高.基于体数据的拓扑修

复方法首先将网格模型转换为体数据,然后在体数据上寻找和去除拓扑错误,最后再将体数据转换回网格,代表性的工作有文献[35,41].体方法的优点是基于体数据来表示几何,可以利用较为鲁棒的拓扑操作和拓扑结构来进行拓扑修复,而且由于体数据有严格的内部和外部之分,不会在修复的同时引入新的几何错误;缺点是修复后的结果可能会引入新的环,并且由于采用体数据恢复网格,改变了原有网格连接关系,会生成大量的狭长三角形.最近,一种新的基于骨架利用八叉树层次体数据的拓扑修复方法^[42]被提出,该方法能够在去除拓扑错误的同时保证不引入新的几何和拓扑错误,并且由于利用八叉树多分辨率的体数据结构,可以高效地处理大规模网格数据.这种方法后来被扩展用于交互式的网格拓扑编辑^[43],为用户提供了更大的自由度.图1给出了文献[43]中基于草图的拓扑编辑的例子.

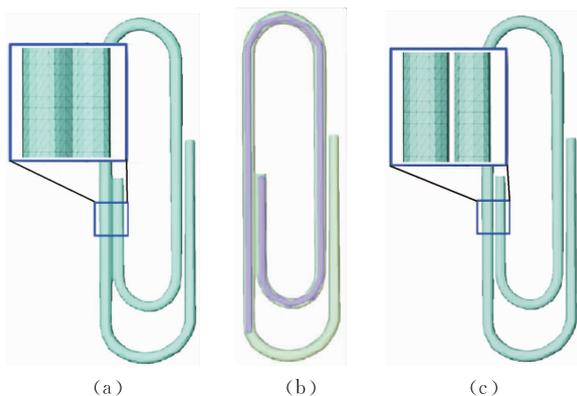


图1 在曲别针模型上基于草图的拓扑编辑(其中图(a)是原始模型,放大显示粘连部分;(b)是用户输入的草图,表示编辑后的拓扑;(c)是算法按照输入草图进行拓扑编辑的结果,放大显示的原始粘连部分被分开)

3 网格优化与参数化

网格优化和参数化是网格模型的基本处理工具.由于网格是由几何及拓扑连接关系共同决定的,网格优化可以只对几何进行调整,例如网格平滑,但往往需要同时对几何和拓扑连接进行调整,例如网格模型的简化和重剖.由于网格是嵌入在三维空间中的二维流形的离散表示,为了便于对其进行处理,需要将其映射到更简单的参数域上,因而参数化也是网格模型处理中的一个核心问题.

3.1 网格平滑

网格平滑具有多方面的用途,包括网格模型的

去噪、多分辨率分析等. 其中网格去噪与网格平滑既密切相关,又有所区别. 去噪主要针对的是去除那些由于扫描获取等的限制而使得获得的模型包含的随机噪声. 相对而言,网格平滑的概念适用的范围更广. 网格平滑早期的工作使用拉普拉斯平滑^[44]实现网格模型的平滑,将每个顶点移动到其邻域的平均位置. 这种方法速度快、容易实现,但是容易产生体积上的收缩现象. 网格平滑可以视作对网格的一种滤波,根据滤波器是否具有各向同性,可以把网格平滑方法分成各向同性滤波和各向异性滤波.

各向同性滤波方法在平滑时,使用的滤波器对各个方向的作用相同. Taubin^[45]的方法采用网格上信号处理的思想,通过结合使用具有正的和负的阻尼因子的两个滤波器以补偿体积的收缩,不过需要恰当地设置参数才能达到理想的效果. Desbrun 等人^[46]基于几何扩散和曲率流的思想,提出了使用隐式滤波的方法. 他们的方法通过对平滑后的模型进行整体缩放以保证体积不变. 国内在这方面取得了一定的研究成果. 刘新国等人^[47]在能量优化过程中保持面片中点不变,并通过迭代的方法求解. 李桂清^[48]将这一思想扩展到任意多边形网格的平滑上. 刘利刚等人^[49]采用带约束优化的方法进行网格平滑,通过求解稀疏线性系统,不需要进行迭代操作.

由于使用了各向作用相同的滤波器,各向同性滤波的方法相对简单,但是往往会造成平滑之后重要特征的丢失. 近年来的研究主要集中在各向异性滤波方法上. 这类方法包括使用各向异性几何扩散^[50-52]、使用位置和几何(法向)信息相结合的双边滤波器^[53-54]、先平滑法向并据此更新顶点坐标的二阶段方法^[55-58]、通过优化一个包含坐标和法向的能量方法^[59].

网格平滑是很多网格应用中需要的基本步骤. 在选择适当的方法时,需要考虑从速度和质量角度进行权衡.

3.2 网格简化

网格简化在保持几何尽可能接近的情况下,减少顶点、面片和边的数量,从而使模型能在相对低性能的计算机上绘制和处理. 通过网格简化还可以实现模型的多层次(Level of Details, LOD)表示. 网格简化方法可以大致分成 3 大类:(1) 基于顶点收缩的方法^[60-61]的一个基本操作步骤是删除一个顶点及其一环邻域内的所有面片,然后对产生的空洞进行重新三角化.(2) 基于边收缩的方法^[62-65]基本的步骤是把一条边的两个顶点收缩为一个顶点,删除该

边及其相邻的两个面片. 文献[63]中的方法提出记录边收缩过程的数据结构,从而实现一种基于简化的网格多分辨率表示,即累进网格. Garland 等^[64]提出的基于二次误差的方法,可以快速确定合理的边收缩顺序并计算新顶点的位置.(3) 基于面片收缩的方法^[66]每次简化操作删除一个面片,引入一个新顶点,并收缩与之相邻的各面片. 这 3 类网格简化方法中,基于边收缩的方法自由度最大,因而简化效果最好,但计算量也最大. 基于顶点收缩的方法计算量最小,但简化的效果也相对较差. 基于面片收缩的方法在效率和效果上都介于两者之间. 目前最广泛使用的网格简化方法是基于边收缩的方法. 通常的网格简化方法对于大多数模型都能取得较好的简化效果. 对于模型上包含的特征,使用诸如文献[64]的方法容易在简化过程中丢失,特别是简化到较少面片的时候. 文献[67]使用网格显著度(saliency)思想,把它与网格简化过程相结合,可以在简化过程中更好地保持特征.

3.3 网格重剖

网格重剖是数字几何处理中的一个基本问题. 在输入网格的基础上,保持几何信息基本不变的前提下对网格的几何采样、连接关系进行重构,使其满足应用的需要(如等边三角形)或更好地表示几何(如保证采样精度的前提下减少三角形数目). 根据生成的网格多边形的不同,常用的网格重剖可以分为三角网格重剖和四边网格重剖. 四边网格相比较传统的三角网格,在表示曲面上具有一系列优势:一方面,它们可以用更自然的方式表示主曲率结构,另一方面,边的方向与主曲率方向一致的四边网格是对曲面的一种更好的离散近似^[68],并且可以减少法向噪声^[69].

3.3.1 三角网格重剖

在文献[70]中研究了各向同性(等边)三角网格重剖. 作者采用误差扩散的方法来计算初始顶点分布,然后使用全局共形参数化和加权的中心 Voronoi 图(centroidal Voronoi Diagram)来改进顶点的位置. 最后,使用带约束的 Delaunay 三角化的方法构造重剖后的网格. 由于算法中使用了全局参数化,这个方法对于复杂拓扑的模型效果不理想. 在文献[71-72]中提出了一种改进的方法,通过一系列局部参数化代替全局参数化. Botsch 和 Kobbelt^[73]提出了有一种有效的启发式方法,通过迭代的局部更新操作获得各向同性的网格,这种方法对于比较光滑的模型取得了很好的效果. 即使采用曲率自适

应采样,根据曲率调整采样的密度^[70-72,74-75],这些方法仍不能很好地处理只有一个较大曲率值的情形.文献[76]中提出使用特征敏感度量下的各向同性三角网格重剖,在保持较规则的连接关系的基础上,对于特征区域具有更好的采样.

3.3.2 四边网格重剖

Alliez 等人^[77]提出了一种在输入网格参数域进行主曲率线积分的方法,并通过这些曲率线求交来构造四边主导网格. Marinov 和 Kobbelt^[78]的工作将这个推广为直接在输入网格上进行曲率线积分.曲率线积分的方法采用贪心策略来添加曲率线,因而不能保证全局上曲率线的均匀分布.即使经过了平滑,主曲率方向通常仍有奇异点.因此,Dong 等人^[79]建议使用光滑的调和标量场的梯度来代替主曲率方向.这种方法可以获得更规则的网格,但是需要用户干预并且结果不具有很好的特征敏感特性.

全局参数化是另一类有效地进行四边网格重剖的方法.几何图像^[80]将任何输入网格重剖为完全使用四边形的网格,这是通过将输入网格切割成拓扑圆盘(基本域),在方形参数域上对曲面进行参数化,并进行规则重采样.多片几何图像^[81]扩展了这个思想,通过将输入模型分成若干部分,并进行逐一参数化.这种方法可以显著降低参数化的变形,提高网格质量,但是需要拉紧(zippering)操作以保证重剖后的模型仍然是闭合的.在文献[82]中提出的周期全局参数化的方法,它将输入模型参数化并保证参数域内映射后的主方向与坐标轴的方向一致.这种方法需要依赖于非线性优化.在获得参数化之后,只要在参数域内规则采样即可获得重剖后的网格模型. Kälberer 等人^[83]改进了这种方法,他们的方法在2-流形的分支覆盖上将给定方向场转换为单一方向场,从而简化了算法实现并生成具有较少奇异点的四边网格.最近在文献[84]中提出的方法将对称方向场和全局参数化转化为混合整数问题,使得四边网格在

保持面片规则的情况下尽可能地与网格特征相符合.

当采用局部参数化进行网格重剖时,输入网格需要分解为一系列子网格,并且需要满足边界处的约束条件. Dong 等人^[85]提出了一种四边网格重剖算法,通过沿梯度场连接 Laplace 谱函数的极值点构造基四边网格.这种方法可以获得只含有较少奇异点的网格,其缺点是网格的边没有很好地与主方向保持一致.

在文献[86]中 Marinov 等提出了一种两阶段算法,在第一阶段中,使用类似于形状近似算法^[68]将输入网格分解为一系列的子网格,然后在每个子网格上应用组合优化的方法来构造输出网格.这种方法特别适合于生成较粗的四边网格.在文献[87]中 Canas 等提出了一种基于等值面提取(contouring)的方法,它可以以交互式的速率运行,但是以牺牲输出网格的质量为代价.在文献[88]中 Lai 等提出一种特征敏感四边网格重剖方法,通过局部迭代操作,生成网格边与主曲率方向一致的四边主导网格.

3.4 网格参数化

由于几何模型是嵌入在三维空间中的二维流形,相对于图像、视频,它本身不具备规则的参数域,这给三维模型的高效处理带来了很大困难.模型参数化研究三维空间中的曲面和某个更简单、更规则的二维参数域之间的一一映射.由于网格是一种分段线性的表示形式,网格参数化需要计算每个顶点对应的参数值,并利用线性映射关系确定整个曲面到参数域的映射.网格的参数化要求曲面与映射后的参数域之间是拓扑同胚的,理想的参数化应当是1-1映射,即要求不存在参数域的折叠现象.近年来,网格曲面的参数化取得了相当程度的进展,但是仍然有很多重要的问题值得进一步研究.根据参数域的不同,目前的参数化可以大致分成基网格参数化、平面参数化、球面参数化和其它参数化四种主要的类型,参见图2.



图2 不同类型的参数化:平面参数化^[89]、球面参数化^[90]、基网格参数化^[91]以及多立方体参数化^[92]

3.4.1 基网格参数化

基网格是指结构上比较简单的一个网格. 基网格参数化最早由 Eck 等人提出^[93]. Eck 的做法是采用了一种启发式的贪心策略来选择满足一定条件的基准面 (site face), 并通过它们构造一个 Voronoi 图. 基准面的选择保证了它的对偶图是一个原网格的 Delaunay 三角剖分, 这个三角剖分构成了参数化的基网格. 之后, 使用满足边界约束条件的调和映射 (harmonic mapping) 对内部的顶点计算参数化值. 这个方法最大的缺点是分片算法的不稳定以及分片和调和映射的时间代价比较高. Lee 等人^[94]提出了一种多分辨率自适应的曲面参数化方法 (简称 MAPS). 该方法首先采用基于 Dobkin and Kirkpatrick (DK) 的顶点删除方法对顶点进行移除, 使用局部共形映射把每个移除区域映射到平面上, 通过带约束的 Delaunay 三角化重新划分. 通过迭代这个过程, 得到一个基网格. 当层次简化过程结束时, 所有被删除的顶点都被参数化到基网格表面上. Khodakovsky 等人^[91]也是利用简化方法^[63-64]得到基网格. 这种方法生成的基网格边界并不完全事先决定. 在得到基网格后, 通过迭代的松弛 (relaxation) 操作, 使结果 (主要是指 patch 的边界处) 在全局意义下更加光滑, 更适用于几何体的变形等. 基网格参数化的好处是基网格保留了原网格的拓扑关系, 可以适用于高亏格的情形, 并且在几何上与原网格近似, 因而通常变形较小.

3.4.2 平面参数化

平面是二维形式中最简单的, 也是诸如纹理图像之类最自然的载体. 平面参数化可以根据把网格作为一个整体还是切分成很多部分而分为单片 (single-chart) 平面参数化以及多片 (multi-chart) 平面参数化. 使用越多的片来进行参数化, 产生的变形一般会越小, 但是参数化的结果连续性越差. 在平面参数化之前, 如果网格的亏格大于 0, 或为了减少映射变形, 一般都需要经过恰当的切割. 在此基础上, 平面参数化可分为固定边界和边界可变两种类型. 早期的研究多集中在有固定边界的情况下, 采用一定的度量标准进行相应的优化求解. 但是由于预先确定的边界可能与自然伸展情况相差较大, 因而往往导致大的变形; 近年来的一些方法则把边界作为求解结果的一部分, 因而变形更小. 边界固定的参数化方法通常把边界固定在预先指定的凸多边形上, Floater 提出的形状保持 (shape-preserving) 准则的参数化^[95], Floater 提出的均值 (mean-value) 参数

化^[96]以及 Sander 等人^[97]提出的极小化伸缩参数化. 其中, 文献^[97]的方法由于尽可能减少纹理的采样不足, 因而较适合于纹理映射, 不过, 由于使用了非线性映射, 因而计算代价较高.

边界自由的参数化方法包括: Lévy 等人^[98]的方法在离散条件下以最小二乘意义满足局部共形映射 (conformal map), 但是在一些情况下 (特别是指定较多的初始参数值的情况) 它所得到的外部边界可能会自交. Sheffer 等人基于角度的展开 (angle-based flattening, ABF) 方法^[99]也存在类似的边界自交问题, 并且计算量较高. 通过改进求解方法, 作者继而提出了关于该算法的一种实现方法 ABF++, 显著提高了计算效率, 并获得较理想的参数化效果^[100]. Lévy 等人提出的线性 ABF 方法, 通过对 ABF 进行线性近似显著提高了计算效率^[101]. Zigelman 等^[102]采用了快速的测地距离计算, 把参数化的问题转换为已知高维空间中顶点两两之间的距离, 计算低维 (平面) 中的最优表示的降维问题, 并通过多维标度法 (Multi-Dimensional Scaling, MDS) 这种数学工具加以求解. Desbrun 等人从离散微分几何出发, 通过最小化网格表面某些本质度量的参数化变形, 提出了网格的本质参数化算法 (intrinsic parameterization)^[103], 给出了平面参数化的一个很好的理论框架, 在实践上也得到很好的结果. Sorkine 等人的方法^[104]则可以看作是一种特殊的不固定边界的参数化方法.

平面参数化的优化目标应当是保长度的. 这就要求曲面本身是可展的, 这个约束通常都是不满足的, 因此, 需要考虑更弱一些的约束条件. 共形映射 (conformal mapping) 是理论上和实践上都很重要的一类映射. 它的特点是局部保角. 连续曲面到平面的共形映射可以证明总是存在的, 一些工作考虑了共形映射的离散实现^[89,98,103,105-108]. ABF^[99-101]也可以看作是共形映射的另一种离散近似, 另一类的优化目标是保面积, 与保角映射很少的自由度相比, 保面积的映射自由度很大, 所以一般需要添加其它的约束条件. 实际应用中多为两者之间的折衷, 如文献^[97]的极小化拉伸优化目标. 文献^[109]则以一些有物理基础的公理作为出发点, 给出了兼顾保长度、保角和保面积的一种优化目标, 并证明了最优解的存在性. 这种方法在实践中也得到较好的结果, 但是它导致的离散算法需要采用非线性优化来求解. 与很多方法不同的是, Gu 等人提出的基于离散调和 1-形式的方法^[89,105], Kharevych 等人提出的基于 circle

pattern 和非线性优化的方法^[106], Jin 等人提出的基于 circle packing 和 Ricci 流的方法^[107]可以处理任意拓扑的网格曲面, 实现所谓的全局参数化. 文献^[108]在文献^[107]工作的基础上, 计算极小化变形的离散共形映射, 取得了较好的效果.

3.4.3 球面参数化

对于亏格为 0 的闭曲面而言, 球面是最自然的参数域. 与基网格参数化、平面参数化相比, 球面参数化的研究相对要少得多, 起步也比较晚. 将亏格为零的三维模型进行直接球面参数化的方法大致可以分成 3 类: (1) 基于累进网格的方法. 这种方法首先由 Shapiro 和 Tal^[110]于 1998 年提出, 文献^[90, 111]继续发展了这一思路. 基本思想是: 通过不断的面片简化操作, 得到一个带有局部参数化信息的累进网格^[63-64], 然后通过不断地增加新的点(顶点分裂), 来得到球面上的参数化. 最后通过一个全局的优化过程来改善均匀性. 但是一般来说, 这种方法并不能保证得到的网格是一个嵌入(有效的球面参数化). (2) 球面松弛的方法. 基本思想是通过把网格的所有顶点投影到模型的最小包围球面上, 在固定若干顶点位置的基础上, 使用离散 Laplace 平均算子来不断松弛球面上其它顶点的位置, 直到实现球面参数化^[112-113]. (3) 基于凸组合的方法. Gotsman^[114]提出将应用于平面参数化的凸组合方法扩展到球面域中, 他们给出了非常简明的计算方法, 使用谱图论(spectral graph theory)证明了如下结论: 任给一个平面 3-连通的图, 顶点位置构成一个球面三角化(即三角形彼此不覆盖)的充分必要条件是每一个顶点由它相邻顶点的某一凸组合投影到球面上形成一个凸包. 由于需要投影操作, 该方法是非线性的, 因而计算复杂性很高. 文献^[115]中提出使用球坐标下的凸组合方法, 显著提高了计算效率. Gu 等人^[116]通过调和能量的方法, 构造球面共形映射, 保持映射前后局部的角度不变.

3.4.4 其它参数化

由于平面参数化往往具有较大的变形, 或需要引入不连续性. Tarini 等人^[92]提出使用多立方体(polycubes)作为参数域, 把曲面映射到与之具有比较一致的整体形状的多立方体上, 从而在保证映射连续性的基础上减少变形, 且适合于使用硬件进行纹理映射. Wang 等人^[117]针对不同亏格的模型使用不同的方法计算多立方体参数化, 并把它应用于样条拟合. 还有一类特殊的参数化考察两个曲面之间的直接映射^[118-119], 这类参数化尤其适用于进行曲

面间的变形(morphing)和曲面混合.

目前, 在参数化方面已有较多的研究工作, 但是针对一般模型, 获得最接近于等度量的快速参数化方法, 仍然是值得研究的问题. 另一个研究的方向是针对特定应用研究最有效的满足约束的参数化方法.

4 网格模型特征分析

特征(features)是几何模型的重要组成部分, 特征对于几何模型的外观以及准确表达几何模型都具有重要的作用. 本节讨论与特征分析相关的处理技术, 包括几何特征量的计算, 特征的提取与分析以及网格分割.

4.1 几何特征量的计算

微分几何在曲线和曲面的几何分析中起到了重要的作用. 对于曲线和曲面的局部性质的分析通常依赖于微分不变量, 例如曲率, 即使对于曲面的整体形状的分析也往往受益于这些微分量.

由于微分对噪声非常敏感, 所以在数字几何处理中, 应用基于微分不变量的算法之前, 往往需要对模型数据进行平滑去噪(参见 3.1 节). 但是使用去噪存在一个难点: 就是如何在保留模型细节的情况下去除噪声, 所以算法的适应性显得尤为重要, 常常需要研究某个尺度下的模型特征.

经典的微分几何不能直接用在特定的几何模型, 例如网格上. 所以人们提出了“离散微分几何”的概念, 在近期这是一个非常有趣并且实用的研究领域, 并且是对经典微分几何的扩展, 代表性的工作有文献^[52, 120-122]. 通过构造多层次网格, 离散微分几何的方法也可以得到多尺度(层次)上的曲率, 但这是以改变模型的几何为代价的. 一些离散微分算子也可以在不改变网格模型几何信息的情况下直接用于大尺度上^[121], 并且可以处理噪声数据^[52], 但是, 这些都不是离散微分几何的出发点和主要优势.

与离散微分几何相对应的, 可以使用积分不变量的思想对曲面的几何性质进行分析. Manay 等人^[123]提出使用积分不变量作为平面曲线的特征, 并把它应用于曲线的匹配. Clarenz 等人的方法^[124-125]通过考虑局部邻域的矩(moment)的方法来分析局部性质, 并用于鲁棒的特征区域提取, 这可以视作一种积分不变量的实现. 文献^[5]对积分不变量及其与微分量之间的关系进行了详细的分析, 文献^[126-127]则将积分不变量的思想与主分量分析(PCA)相结合, 可用于鲁棒地计算曲面的主曲率以

及主曲率方向。

4.2 特征的提取与分析

特征通常指曲面上具有至少一个较大的主曲率的区域。特征线(crestlines)是指(极大或极小)主曲率沿相应主曲率方向的极值点的连线(或主曲率沿着相应主曲率方向的方向导数的过零点)。特征提取特别是特征线的提取可以通过局部或全局拟合并在此基础上估计微分量的方法来实现^[128-131]。此外,基于离散微分几何的方法可以直接在网格上计算特征线,而不需要依赖于一个拟合或近似的步骤^[132]。Clarenz 等人的方法^[124-125]通过考虑局部邻域的矩的方法来分析局部性质,并用于鲁棒地提取特征区域。来煜坤等人^[76]通过分析欧氏空间和特征敏感空间之间曲面的映射变形实现鲁棒的特征提取。文献^[126]则使用基于 PCA 的积分不变量提取曲面上的特征区域。

与特征提取存在大量相关文献不同,特征的自动分类与编辑的工作要少得多。为了对特征整体形状进行分析,文献^[133]把数学形态学的方法推广到了曲面上。Clarenz 等人^[125]提出使用基于偏微分方程(PDE)的代数多栅格(multigrid)算法,计算一组多尺度基函数,并把它们用于特征敏感的曲面编辑。基于小球与曲面的交线的特性,Mortara 等人^[134]提出了一种方法,局部地把顶点分成若干种类型,这种分类过程仅考虑局部性质。文献^[76]的方法通过分析提取的特征区域的边界和骨架等信息,把特征分类为脊、谷、刺等类型,并用于特征的自动增强。

网格曲面上的旋转对称方向场对于很多图形学应用都是一个重要的基本步骤,例如非真实感绘制中使用的笔触和交叉线、曲面上纹理合成中的规则模式以及曲面参数化和网格重剖中使用的主曲率方向等,该问题在近年来得到研究者的广泛关注。对于网格曲面上的 N -路旋转对称方向场来说,最重要的需求是允许用户完全控制方向场的拓扑,包括奇异点的数目、位置和指数、闭路径的旋转次数^[135-136]。文献^[135]中的方法可以生成包含用户指定奇异点的方向场,但同时也会生成额外的奇异点,所以需要进一步使用奇异点对消除和奇异点移动操作来改进结果。Ray 等人^[136]首次得到了满足用户给定拓扑约束的方向场,但它需要用户给定一个初始的具有指定奇异点的方向场,在实际应用中,这是非常困难的一步。文献^[137]的方法可以自动在任意拓扑的网格曲面上生成符合用户给定的方向场拓扑限制的

N -路旋转对称方向场,用户可以完全控制奇异点的数量、位置和指数,环的旋转次数,并能交互式地对方向场进行编辑。

4.3 网格分割

与图像分割相比,关于网格分割的研究起步较晚,但是近年来的研究工作较多。基于不同的目的,现有的网格分割算法可以大致分为两大类:第 1 类致力于 CAD 模型的反向工程应用(例如文献^[138])。这类方法将模型分割成若干块,每一块可以由某一类型的数学曲面最佳拟合,例如平面、柱面等。第 2 类方法试图将“自然物体”分割成有意义的部分,这种分割希望与人的主观想法相一致。目前主流的网格分割工作基于迭代聚类方法。Shlafman 等人^[139-142]使用 k -均值聚类将模型分割成有意义的部分^[139-142]。Katz^[140]对此进行了改进,引入模糊聚类和极小边界切割来获得聚类之间更平滑的边界。自顶向下多层次的分割被用来分割具有固有层次关系的对象。这类方法的一个最明显的缺点是需要计算每两个面之间的距离,这使得直接处理大规模模型代价昂贵甚至难以承受。

此外,还可以使用其他不同的方法对网格模型进行分割。Yamachi 等人^[143]将均值偏移(mean shift)的无监督聚类方法应用于网格模型的法向上,实现模型的分割,这类方法的一个问题是容易将模型过度分割成比希望数目更多的片。Mangan 和 Whitaker^[144]采用分水岭算法对三角网格进行分割。Katz 等人^[145]提出了一种网格分割方法,基于多维标度法以及特征点与核心提取。这种方法在网格相对姿态发生变化时能获得较一致的结果。然而,由于使用了计算复杂的方法来求解特征点,限制了可以有效处理的模型规模。Mitani 等人^[146]提出了一种利用网格制作纸模型的技术,这可以视作一种特殊的网格分割方法,它生成自然的可展三角形条带。文献^[147]中通过把随机漫步模型应用于网格上,不仅能获得较好的分割结果,而且计算效率得到显著提高。

最近的工作^[148]对三维网格近年来的七种分割算法进行合并研究,同时和人们手工分割的结果按照一定的量化标准进行比较,结果表明不同的人对于大多数模型的手工分割具有很好的一致性,没有一种自动的分割方法可以在所有种类的网格模型上好于其它方法,而基于非局部形状特征的分割方法和手工分割的结果更加近似。

还有一些工作直接考虑交互式的网格分割. Lee 等人提出使用用户给定的引导线或自动提取的切割线进行网格分割的算法, 使用三维曲面上的 snakes 算法优化切割边界^[149-150]. Funkhouser 等人^[151]提出了一种直观的交互式网格分割工具, 在用户绘制的笔触引导下计算最优切割路径, 这一工具被应用在一个快速建模系统中, 该系统通过从模型数据库中提取数据并进行缝合快速生成新的模型. Sharf 等人提出了一种基于图切割 (graph-cut) 方法进行交互式网格分割的方法, 同样将其应用于“剪切与粘贴” (cut-and-paste) 系统中^[152].

包括网格分割在内的网格模型特征分析工具可应用在快速建模^[151]、特征增强^[76]等问题中, 也可用于改进传统几何处理问题的效果, 随着这方面研究的逐步深入, 这些工具将会在其它数字几何处理中取得更广泛的应用.

5 网格编辑和快速建模

5.1 网格变形

网格变形通常指在不改变网格拓扑连接关系的同时改变网格顶点的坐标, 使得原来网格模型的姿态发生变化. 网格变形技术在计算机动画以及网格建模方面有着非常重要的应用, 一直都是数字几何处理研究的热点. 网格变形方法大致可以分为如下 4 类: 基于骨架的变形 (又称蒙皮技术)、自由变形 (Freeform Deformation, 简称 FFD)、多分辨率网格变形和基于微分属性的网格变形.

基于骨架的网格变形源于 1998 年 Thalmann 的论文^[153], 这种方法主要用于处理可以由骨骼关节作为支撑的网格的形变. 基本思想类似于人体运动, 将网格表面的点 (皮肤) 关联到骨架结构, 网格变形由骨架的运动来带动. 带动的方式可由一组权值来设定, 过程是: 网格的点 p 对于每个骨架片段 k 有一个权值 ω_k , 表示该骨架片段对网格点运动的影响, 网格点变形后的位置 p' 是各骨架片段对其带动的加权平均, 可以用下式来表示:

$$p' = \sum_{k=1}^n \omega_k p \mathbf{M}_k \quad (2)$$

其中 \mathbf{M}_k 是骨架片段 k 的变换矩阵. 这种方法由于其直观性, 被成功地用于人体动画等具有骨架语义的变形, 并且由于其计算简单, 在游戏领域也得到了广泛的应用. 另外这种蒙皮技术还可以用于对运动

序列的压缩, 只需要记录骨架信息就可以迅速恢复出模型的形变. 这种技术目前已经得到了大量的应用, 特别是主流的建模软件 3Dmax、Maya 中, 对蒙皮技术都有非常好的支持. 应用该方法比较困难的一点是对于各骨架片段权值的选择 (见式 (2)), 权值设定的不同会直接影响变形结果的质量, 手工调节权值以得到满意的变形结果常常要花费大量时间, 并且需要经验指导. 因此对于权值的选择和调节是骨架变形研究的主要问题, 代表性的文章有文献^[154-157]. 最近, 清华大学严寒冰等^[158]提出了一种新的基于骨架的网格变形方法, 该方法操作的单元不是网格上的点, 而是组成网格体的单纯形. 相对于之前的基于骨架的变形方法, 该方法不需要对权值进行调节, 并且可以通过能量优化来避免关节交接处因为大尺度形变出现的不连续.

自由变形的算法思想来源于自由曲面建模, 变形的主要思想是将三维网格模型嵌入到一个较粗糙的控制网格中, 网格上的每一点都对应于控制网格中的一点, 该方法不直接操作原网格, 而是操作控制网格, 并通过原网格和控制网格之间的对应关系计算原网格的变形. 自由体变形最早在文献^[159]中提出, 控制网格是平行六面体. 后来经过文献^[160]的改进, 可以应用于棱柱和圆柱形状. Ju 等人^[161]提出了利用一般封闭三角形网格作为控制网格的自由体变形技术, 推广了自由体变形的适用范围. 文献^[162]中并不是简单地根据对应关系将控制网格的形变传递给原网格, 而是提出了一种基于拟线性最小二乘形变能量在控制网格子空间进行求解的策略, 从而可以提高能量优化过程的速度与稳定性, 并保持原网格变形过程中的几何特征. 图 3 是一个用文献^[162]中的方法生成的变形结果. Botsch 等人^[163]将原网格嵌入在刚性体栅格中并定义非线性弹性能量进行优化, 使得在形变较大的情况下可以得到更好的变形效果. 最近的工作^[164]将原网格根据空间连通性或者关节检测分成不同的刚性部分, 并将各部分嵌入到多栅格结构中分别进行控制, 使得变形的效果更加真实和自然. 还有一类自由体形变的方法的出发点并不是直接由控制网格形变得到原网格形变, 而是根据原网格上点变形位移的点约束, 反求出控制网格控制顶点的位移, 再根据控制网格的变形来带动原网格变形, 代表性的文章有文献^[165-166]. 自由体变形的的方法也已经被广泛应用于 3Dmax 和 Maya 等建模软件中.

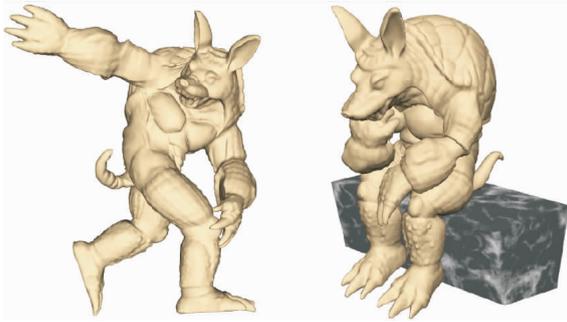


图 3 子空间求解拟线性最小二乘形变结果

多分辨率变形方法的目的是在大尺度上变形物体的同时保持几何细节. 该方法的主要思想是将原网格分解成基网格和层次细节网格. 变形施加在基网格上, 可以通过 FFD 或其他的方法来计算, 然后将几何细节重新添加到变形后的基网格上. 代表性的文章有文献[167-170]. 这种方法处理几何细节较好, 但是细节保持的效果很大程度上依赖于重新添加的准则, 在大尺度形变的情况下容易出现细节扭曲.

基于微分属性的网格变形是近年来研究的热点, 按照对微分属性的表示可以分为梯度法和 Laplacian 坐标法. 梯度法的主要思想是根据网格上诱导变形的目标梯度场, 在最小二乘拟合的条件下求解出匹配该梯度场的几何表示, 代表性的文章有文献[171-172], 后来文献[173]中提出了用多栅格 (multigrid) 的方法快速求解基于梯度的变形方法. Laplacian 坐标法用网格顶点上的 Laplacian 坐标来反映网格的微分属性, 使得变形后网格顶点的 Laplacian 坐标能够满足形变约束, 代表性的文章有文献[174-176]. 文献[177]将网格表面上的 Laplacian 坐标扩展到了体网格上, 提出了体 Laplacian 坐标变形方法, 减小了网格包围体上的扭曲, 提高了形变质量.

上面提到的基于微分属性的变形方法, 常常需要做某种线性近似, 从而可以利用线性系统 (linear system) 的快速求解来进行交互编辑. 但是大尺度形变从物理模型本质上看是一个非线性系统, 如何基于非线性形变模型提高大尺度形变的质量, 同时又能满足用户实时交互的需求, 是未来网格变形算法需要着重考虑的问题.

5.2 网格快速建模

传统的网格建模可以分为两大类, 一类是基于扫描获取设备, 从实物获得几何信息, 再经过注册、重构等数字几何处理技术生成网格; 第二类是借助建模软件来设计几何形状, 利用样条、细分曲面、布

尔运算等技术, 最后转化为网格. 这两种建模方法或依赖于扫描获取设备, 或需要有专门的训练和建模经验, 对非专业的人员来说难以独立进行. 最近, 基于数字几何处理技术, 出现了很多网格快速建模的方法, 这些方法由于其建模的直观、交互的方便, 已经成为网格建模技术的有益补充. 网格快速建模的方法大致可分为两大类: 基于草图的建模 (sketch based modeling) 和基于样例的建模 (example based modeling).

1999 年日本学者 Igarashi 等在 SIGGRAPH 上发表 Teddy 系统论文^[178]之后, 基于草图建模技术得到了广泛的重视. 该方法的出发点类似于简笔画, 用户在界面上勾画出可以描述物体形状的轮廓线, 然后由系统自动计算生成三维形体; 并且该系统设计了很好的交互编辑技术, 可以对生成的网格进行形状粘贴、剪切等操作, 增强了建模的可控性和生动性. 后来 Igarashi 又在 Teddy 系统的基础上进行扩展, 提出了 Chameleon^[179] 和 SmoothTeddy^[180] 两个改进系统, 主要支持建模过程中的颜色编辑和网格优化. 此前的建模系统均是在模型生成之后形状即被确定, 虽然可以进行诸如平滑这样的操作, 但并不能在生成的模型基础上进行大尺度变形, 最近一个称作 FiberMesh 的系统被提出^[181], 该系统可以根据输入的轮廓线或者模型表面曲线对已经生成的模型进行变形, 从而进一步增强了建模的可控性. FiberMesh 系统基于草图建模和编辑的流程如图 4 所示.

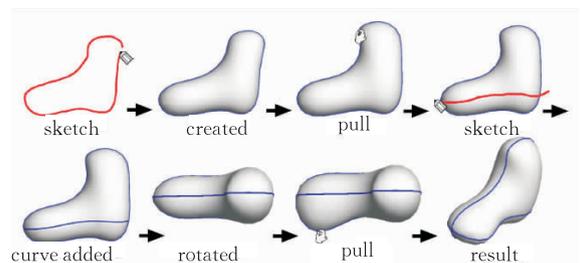


图 4 FiberMesh 系统建模和编辑流程

另一种快速建模方法是基于样例的建模, 该方法在 2004 年 SIGGRAPH 论文^[151]中被提出, 建模的背景是大规模资源库及其检索系统的建立 (见第 6 节). 在事先构建的三维模型型数据库的基础上, 用户可以通过关键字或特征 (包括形状轮廓、骨架以及模型实例) 查找相关模型, 然后交互式地进行编辑. 这种编辑不是仅仅依靠用户的想象, 而是在数据库中查找满足目标的其它模型并对目标模型的对应部分进行替换. 整个过程用户只需要进行有限的操作, 系统即可自动完成部分模型剪裁, 从部分模型到整

体模型的匹配检索,部分模型融合等过程.一个基于示例建模的例子如图 5 所示.



图 5 基于示例建模的例子

6 模型匹配与检索

随着扫描获取技术和三维建模技术的日益成熟,大量的三维模型被构建出来,其作为一种新的信息载体得到了越来越多的关注和应用.在丰富的模型资源中,三角网格以其表达几何的通用性和直观性,成为使用最广泛的一种模型格式.模型数量的增加给人们提出了这样的问题,如何从模型库中选取满足自己需要的模型.一个直观的想法是:对每个模型通过人工标注的方法生成若干关键字,然后用文本检索的技术来检索模型.这种方法效率高,但是无法表达模型本身所具有的几何、拓扑等特征.模型检索主要研究的问题就在于如何根据模型的内在特征衡量模型之间的相似性,即匹配程度,进而在模型库中检索与输入模型相似的模型.和基于内容的图像匹配相比,用于模型匹配的形状信息不需要额外抽取,也不会受到光照等环境因素的影响;另一方面,由于模型本身不具有图像那样的规则二维参数域,所以加大了特征匹配的难度.

模型检索的核心是如何选取特征描述符(feature descriptor),该描述符是模型内在特征的抽象描述,一般要求其于物体的旋转、平移、放缩无关.基于特征描述符,模型之间匹配程度的衡量可以转化为对特征描述符的比对.特征描述符的选取要考虑很多因素,其中最为关键的是计算效率和区分度两方面.根据特征描述符选取的不同特点,模型检索方法可大致分为全局几何特征方法、基于图特征

的方法、基于局部特征的方法 3 类.

全局几何特征方法的主要思想是将网格模型或者其包围的体作为一个整体来定义特征描述符,基本不考虑局部几何细节.这种方法或者直接定义一些反映网格模型全局特征的特征量^[182-184],或者根据模型上随机采样点之间距离、角度、面积等度量定义形状分布特征^[185-187],又或者通过划分网格内部所包围的空间进行空间映射^[188-190].基于全局几何特征的模型检索技术具有算法效率高、鲁棒性好的特点,但这类方法大都不支持三维模型的局部匹配,即部分模型到整体模型的匹配,并且对相同物体的不同姿态区分度大,语义信息受几何特征限制大.

和全局几何特征方法着重考虑几何特征不同,基于图的方法将三维模型的拓扑结构用图(如 Reeb graph、skeleton 等)表示后作为特征描述符,其中拓扑结构可以简单理解为模型整体的关联架构.这样,三维模型相似度的衡量就转换为图的匹配过程,代表性的文章有文献^[191-193].由于着重考虑拓扑特征,这种方法对姿态变化不敏感,但是图结构计算复杂,图匹配算法的效率也不高,并且易受拓扑噪声以及拓扑组成差异的干扰.

基于局部特征的方法着重考虑模型局部的几何特征^[194-196].局部特征由模型上一点及其周围临域的几何形状所决定,模型之间的相似度由局部特征描述符的匹配程度所决定,检索方法的主要区别就在于如何定义局部特征.这类方法的优点是考虑了模型的局部几何特征,一般可以支持局部匹配;缺点是计算量和存储量通常较大,对模型整体形状的区分度较小.

国内在模型检索方面也开展了相关工作,一种基于 Delta 函数和傅立叶变换的光线投射方法^[197]在 2004 年被提出,该方法可以解决之前球面调和函数方法中球函数的二义性的问题,使得算法更加鲁棒.2006 年,刘一等将形状分布的方法(shape distribution)进行了推广^[198],该方法将三维模型的局部特征以及它们的空间分布做了结合,进而利用直方图相交技术,将显性形状匹配转化为隐性形状匹配,以降低时间复杂度.最近,文献^[199]将文字信息检索技术引入到三维模型检索中,提出了“Shape Topics”的概念.该方法以文字信息检索为基础,构造适合部分相似性检索的相似性测度,可以有效地支持三维模型的局部形状检索.

在某些情况下,用户希望可以检索到三维模型的不同姿态,而对模型多种姿态不做区分的检索方法并不多.此外,目前大部分的检索方法对局部形状

检索支持不佳,有效的局部形状检索方法仍是值得研究的问题.另外,在大规模三维模型数据库中,利用形状描述符建立高效的索引结构以提高检索效率是一个需要解决的问题.

7 结 语

本文针对数字几何处理研究框架内的若干关键技术,按照数字几何的建模、分析、优化、应用等流程,分成点云注册与网格重构、网格优化与参数化、网格特征分析、网格编辑和快速建模、模型匹配与检索等五方面分别进行阐述和讨论,内容涵盖数字几何处理领域的大部分研究方向,研究工作的开展情况,以及未来有待解决的问题.希望读者通过本文对数字几何处理领域有更全面的了解和认识,并能对今后研究工作的开展有所帮助.

参 考 文 献

- [1] Stockman G. Object recognition and localization via pose clustering. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1987, 40(3): 361-387
- [2] Hecker Y C, Bolle R M. On geometric hashing and the generalized hough transform. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1994, 24(9): 1328-1338
- [3] Wolfson H J, Rigoutsos I. Geometric hashing: An overview. *IEEE Computational Science and Engineering*, 1997, 4(4): 10-21
- [4] Huber D, Hebert M. Fully automatic registration of multiple 3D data sets. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(7): 637-650
- [5] Pottmann H, Wallner J, Huang Q X, Yang Y L. Integral invariants for robust geometry processing. *Computer Aided Geometric Design*, 2009, 26(1): 37-60
- [6] Gelfand N, Mitra N J, Guibas L J, Pottmann H. Robust global registration//*Proceedings of the 3rd Eurographics Symposium on Geometry Processing (SGP'05)*. Vienna, Austria, 2005: 197-206
- [7] Huang Q-X, Flöry S, Gelfand N, Hofer M, Pottmann H. Reassembling fractured objects by geometric matching. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 569-578
- [8] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256
- [9] Chen Y, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images//*Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*. Sacramento, California, USA, 1991: 2724-2729
- [10] Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm//*Proceedings of the 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*. Quebec City, Canada, 2001: 145-152
- [11] Pottmann H, Huang Q-X, Yang Y-L, Hu S-M. Geometry and convergence analysis of algorithms for registration of 3D shapes. *International Journal of Computer Vision*, 2006, 67(3): 277-296
- [12] Huang Q-X, Adams B, Wand M. Bayesian surface reconstruction via iterative scan alignment to an optimized prototype//*Proceedings of the 5th Eurographics Symposium on Geometry Processing (SGP'07)*. Barcelona, Spain, 2007: 213-223
- [13] Boissonnat J-D. Geometric structures for three-dimensional shape representation. *ACM Transactions on Graphics*, 1984, 3(4): 266-286
- [14] Edelsbrunner H, Mücke E P. Three-dimensional alpha shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 1994, 13(1): 43-72
- [15] Amenta N, Bern M, Kamvyselis M. A new voronoi-based surface reconstruction algorithm//*Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'98)*. Orlando, Florida, USA, 1998: 415-421
- [16] Amenta N, Choi S, Choi S, Dey T K, Dey T K, Leekha N. A simple algorithm for homeomorphic surface reconstruction//*Proceedings of the 16th Annual Symposium on Computational Geometry (SCG'00)*. Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, 2000: 213-222
- [17] Amenta N, Choi S, Kolluri R K. The power crust//*Proceedings of the 6th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications (SMA'01)*. Ann Arbor, Michigan, USA, 2001: 249-266
- [18] Levin D. The approximation power of moving least-squares. *Mathematics of Computation*, 1998, 67(224): 1517-1531
- [19] Alexa M, Behr J, Cohen-Or D, Fleishman S, Levin D, Silva C T. Point set surfaces//*Proceedings of the Conference on Visualization'01*. San Diego, California, USA, 2001: 21-28
- [20] Dey T K, Sun J. An adaptive mls surface for reconstruction with guarantees//*Proceedings of the 3rd Eurographics Symposium on Geometry Processing (SGP'05)*, Eurographics Association. Vienna, Austria, 2005: 43
- [21] Lipman Y, Cohen-Or D, Levin D. Error bounds and optimal neighborhoods for mls approximation//*Proceedings of the 4th Eurographics Symposium on Geometry Processing (SGP'06)*, Eurographics Association. Cagliari, Italy, 2006: 71-80
- [22] Lipman Y, Cohen-Or D, Levin D. Data-dependent mls for faithful surface approximation//*Proceedings of the 5th Eurographics Symposium on Geometry Processing (SGP'07)*, Eurographics Association. Barcelona, Spain, 2007: 59-67
- [23] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, McDonald J, Stuetzle W. Surface reconstruction from unorganized points//*Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'92)*. Chicago, Illinois, USA, 1992: 71-78

- [24] Curless B, Levoy M. A volumetric method for building complex models from range images//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'96). New Orleans, Louisiana, USA, 1996; 303-312
- [25] Carr J C, Beatson R K, Cherrie J B, Mitchell T J, Fright W R, McCallum B C, Evans T R. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions//Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'01). Los Angeles, California, USA, 2001; 67-76
- [26] Turk G, O'Brien J F. Modelling with implicit surfaces that interpolate. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(4): 855-873
- [27] Ohtake Y, Belyaev A, Alexa M, Turk G, Seidel H-P. Multi-level partition of unity implicits. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 463-470
- [28] Ohtake Y, Belyaev A, Seidel H-P. A multi-scale approach to 3D scattered data interpolation with compactly supported basis functions//Proceedings of the Shape Modeling International (SMI'03). Seoul, Korea, 2003; 153
- [29] Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *SIGGRAPH Computer Graphics*, 1987, 21(4): 163-169
- [30] Kobbelt L P, Botsch M, Schwanecke U, Seidel H-P. Feature sensitive surface extraction from volume data//Proceedings of the SIGGRAPH'01. Los Angeles, California, USA, 2001; 57-66
- [31] Ju T, Losasso F, Schaefer S, Warren J. Dual contouring of hermite data//Proceedings of the SIGGRAPH'02. San Antonio, Texas, USA, 2002; 339-346
- [32] Barequet G, Sharir M. Filling gaps in the boundary of a polyhedron. *Computer Aided Geometric Design*, 1995, 12(2): 207-229
- [33] Borodin P, Novotni M, Klein R. Progressive gap closing for mesh repairing//Vince J, Earnshaw R eds. *Advances in Modelling, Animation and Rendering*. Springer Verlag, 2002; 201-213
- [34] Liepa P. Filling holes in meshes//Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing (SGP'03). Aachen, Germany, 2003; 200-205
- [35] Nooruddin F S, Turk G. Simplification and repair of polygonal models using volumetric techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2003, 9(2): 191-205
- [36] Ju T. Robust repair of polygonal models. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 888-895
- [37] Bischoff S, Pavic D, Kobbelt L. Automatic restoration of polygon models. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(4): 1332-1352
- [38] El-Sana J, Varshney A. Controlled simplification of genus for polygonal models//Proceedings of the IEEE VIS. Phoenix, Arizona, USA, 1997; 403-ff
- [39] Fischl B, Liu A, Dale A. Automated manifold surgery: Constructing geometrically accurate and topologically correct models of the human cerebral cortex. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2001, 20(1): 70-80
- [40] Guskov I, Wood Z J. Topological noise removal//Proceedings of the Graphics Interface 2001. Canadian Information Processing Society. Ottawa, Ontario, Canada, 2001; 19-26
- [41] Wood Z, Hoppe H, Desbrun M, Schröder P. Removing excess topology from isosurfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(2): 190-208
- [42] Zhou Q-Y, Ju T, Hu S-M. Topology repair of solid models using skeletons. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(4): 675-685
- [43] Ju T, Zhou Q-Y, Hu S-M. Editing the topology of 3D models by sketching. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 42
- [44] Field D A. Laplacian smoothing and delaunay triangulations. *Communications in Applied Numerical Methods*, Wiley, 1988, 4(6): 709-712
- [45] Taubin G. A signal processing approach to fair surface design//Proceedings of SIGGRAPH. Los Angeles, California, USA, 1995; 351-358
- [46] Desbrun M, Meyer M, Schröder P, Barr A H. Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow//Proceedings of SIGGRAPH. Los Angeles, California, USA, 1999; 317-324
- [47] Liu X G, Bao H J, Peng Q S, Heng P-A, Wong T-S. Constrained fairing for meshes. *Computer Graphics Forum*, 2001, 20(2): 115-123
- [48] Li G Q, Bao H J, Ma W Y. A unified approach for fairing arbitrary polygonal meshes. *Graphical Models*, 2004, 66(3): 160-179
- [49] Liu L G, Tai C-L, Ji Z P, Wang G J. Non-iterative approach for global mesh optimization. *Computer-Aided Design*, 2007, 39(9): 772-782
- [50] Bajaj C L, Xu G. Anisotropic diffusion of surfaces and functions on surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(1): 4-32
- [51] Clarenz U, Diewald U, Rumpf M. Anisotropic geometric diffusion in surface processing//Proceedings of IEEE Visualization, 2000; 397-405
- [52] Hildebrandt K, Polthier K. Anisotropic filtering of non-linear surface features. *Computer Graphics Forum*, 2004, 23(3): 391-400
- [53] Fleishman S, Drori I, Cohen-Or D. Bilateral mesh denoising. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 950-953
- [54] Jones T R, Durand F, Desbrun M. Non-iterative, feature-preserving mesh smoothing. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 943-949
- [55] Ohtake Y, Belyaev A, Bogaevksi I. Mesh regularization and adaptive smoothing. *Computer-Aided Design*, 2001, 33(11): 787-800
- [56] Shen Y, Barner K E. Fuzzy vector median-based surface smoothing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2004, 10(3): 252-265

- [57] Chen C Y, Cheng H Y. A sharp dependent filter for mesh smoothing. *Computer Aided Geometric Design*, 2005, 22: 376-391
- [58] Sun X, Rosin P, Martin R, Langbein F. Fast and effective feature-preserving mesh denoising. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(5): 925-938
- [59] Nehab D, Rusiniewicz S, Davis J, Ramamoorthi R. Efficiently combining positions and normals for precise 3D geometry. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 536-543
- [60] Schroeder W J, Zarge J A, Lorensen W E. Decimation of triangle meshes//*Proceedings of ACM SIGGRAPH*. Chicago, Illinois, USA, 1992: 65-70
- [61] Cohen J, Varshney A, Manocha D et al. Simplification envelopes//*Proceedings of ACM SIGGRAPH*. New Orleans, Louisiana, USA, 1996: 119-128
- [62] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T et al. Mesh optimization//*Proceedings of ACM SIGGRAPH*. Anaheim, California, USA, 1993: 19-26
- [63] Hoppe H. Progressive meshes//*Proceedings of ACM SIGGRAPH*. New Orleans, Louisiana, USA, 1996: 99-108
- [64] Garland M, Heckbert P S. Surface simplification using quadric error metrics//*Proceedings of ACM SIGGRAPH*. Los Angeles, California, USA, 1997: 209-216
- [65] Lindstrom P, Turk G. Fast and memory efficient polygonal simplification//*Proceedings of IEEE Visualization*. Research Triangle Park, North Carolina, USA, 1998: 279-286
- [66] Wu J H, Hu S M, Tai C L, Sun J G. An effective feature-preserving mesh simplification scheme based on face constriction//*Proceedings of Pacific Graphics*. Tokyo, Japan, 2001: 12-21
- [67] Lee C H, Varshney A, Jacobs D. Mesh saliency//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. Los Angeles, California, USA, 2005: 659-666
- [68] Cohen-Steiner D, Alliez P, Desbrun M. Variational shape approximation//*Proceedings of ACM SIGGRAPH*. Los Angeles, California, USA, 2004: 905-914
- [69] Botsch M, Kobbelt L. Resampling feature and blend regions in polygonal meshes for surface anti-aliasing. *Computer Graphics Forum*, 2001, 20(3): 402-410
- [70] Alliez P, Colin de Verdière È, Devillers O, Isenburg M. Isotropic surface remeshing//*Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*. Seoul, Korea, 2003: 49-58
- [71] Surazhsky V, Gotsman C. Explicit surface remeshing//*Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing*. Aachen, Germany, 2003: 17-28
- [72] Surazhsky V, Alliez P, Gotsman C. Isotropic remeshing of surfaces: A local parameterization approach//*Proceedings of the 12th International Meshing Roundtable*. Santa Fe, New Mexico, USA, 2003: 215-224
- [73] Botsch M, Kobbelt L. An intuitive framework for real-time freeform modeling//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. Los Angeles, California, USA, 2004: 630-634
- [74] Turk G. Re-tiling polygonal surfaces//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. Chicago, Illinois, USA, 1992: 55-65
- [75] Alliez P, Meyer M, Desbrun M. Interactive geometry remeshing//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. San Antonio, Texas, USA, 2002: 347-354
- [76] Lai Y K, Zhou Q Y, Hu S M, Wallner J, Pottmann H. Robust feature classification and editing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(1): 34-45
- [77] Alliez P, Cohen-Steiner D, Devillers O, Lévy B, Desbrun M. Anisotropic polygonal remeshing//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. San Diego, California, USA, 2003: 485-493
- [78] Marinov M, Kobbelt L. Direct anisotropic quad-dominant remeshing//*Proceedings of Pacific Graphics*. Seoul, Korea, 2004: 207-216
- [79] Dong S, Kircher S, Garland M. Harmonic functions for quadrilateral remeshing of arbitrary manifolds. *Computer Aided Geometric Design*, 2005, 22(5): 392-423
- [80] Gu X, Gortler S, Hoppe H. Geometry images//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. San Antonio, Texas, USA, 2002: 355-361
- [81] Sander P, Wood Z, Gortler S, Snyder J, Hoppe H. Multi-chart geometry images//*Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing*. Aachen, Germany, 2003: 146-155
- [82] Ray N, Li W C, Lévy B, Sheffer A, Alliez P. Periodic global parameterization. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(4): 1460-1485
- [83] Kälberer F, Nieser M, Polthier K. QuadCover—Surface parameterization using branched coverings. *Computer Graphics Forum*, 2007, 27(3): 375-384
- [84] Bommes D, Zimmer H, Kobbelt L. Mixed-integer quadrangulation//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2009*. New Orleans, Louisiana, USA, to appear
- [85] Dong S, Bremer P-T, Garland M, Pascucci V, Hart J C. Spectral surface quadrangulation. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 24(3): 1057-1066
- [86] Marinov M, Kobbelt L. A robust two-step procedure for quad-dominant remeshing. *Computer Graphics Forum*, 2006, 25(3): 537-546
- [87] Canas G D, Gortler S J. Surface remeshing in arbitrary codimensions. *The Visual Computer*, 2006, 22(9-11): 885-895
- [88] Lai Y K, Kobbelt L, Hu S M. An incremental approach to feature aligned quad-dominant remeshing//*Proceedings of the ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*. Stony Brook, New York, USA, 2008: 137-145
- [89] Gu X, Yau S. Global conformal surface parameterization//*Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing*. Aachen, Germany, 2003: 127-137
- [90] Praun E, Hoppe H. Spherical parameterization and remeshing//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. San Diego, California, USA, 2003: 340-349
- [91] Khodakovskiy A, Litke N, Schröder P. Globally smooth parameterizations with low distortion//*Proceedings of ACM SIGGRAPH*. San Diego, California, USA, 2003: 350-357

- [92] Tarini M, Hormann K, Cignoni P, Montani C. Polycube-maps. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 853-860
- [93] Eck M, Deroose T, Duchamp T et al. Multiresolution analysis of arbitrary meshes//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. Los Angeles, California, USA, 1995: 173-182
- [94] Lee A, Sweldens W, Schröder P et al. MAPS: Multiresolution adaptive parameterization of surfaces//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. Orlando, Florida, USA, 1998: 95-104
- [95] Floater M. Parameterization and smooth approximation of surface triangulations. *Computer Aided Geometric Design*, 1997, 14(3): 231-250
- [96] Floater M. Mean value coordinates. *Computer Aided Geometric Design*, 2003, 20(1): 19-27
- [97] Sander S, Snyder J, Gortler P, Hoppe H. Texture mapping progressive meshes//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. Los Angeles, California, USA, 2001: 409-416
- [98] Lévy B, Petitjean S, Ray N, Maillot J. Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. San Antonio, Texas, USA, 2002: 362-371
- [99] Sheffer A, Sturler E. Parameterization of faceted surfaces for meshing using angle-based flattening. *Engineering with Computers*, 2001, 21(3)
- [100] Sheffer A, Lévy B, Mogilnitsky M, Bogomyakov A. ABF++: Fast and robust angle based flattening. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(2): 311-330
- [101] Zayer R, Lévy B, Seidel H-P. Linear angle based parameterization//*Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing*. Barcelona, Spain, 2007: 135-141
- [102] Zigelman G, Kimmel R, Nirvati N. Texture mapping using surface flattening via multi-dimensional scaling. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2002, 8(2): 198-207
- [103] Desbrun M, Meyer M, Alliez P. Intrinsic parameterizations of surface meshes. *Computer Graphics Forum*, 2002, 21(3): 209-218
- [104] Sorkine O, Cohen-Or D, Goldenthal R, Lischinski D. Bounded-distortion piecewise mesh parameterization//*Proceedings of the IEEE Visualization*, 2002
- [105] Gu X, Wang Y, Yau S. Computing conformal structures of surfaces. *Communications in Information and Systems*, 2003
- [106] Kharevych L, Springborn B, Schröder P. Discrete conformal mappings via circle patterns. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(2): 412-438
- [107] Jin M, Kim J, Luo F, Gu X. Discrete surface ricci flow: Theories and applications//*Proceedings of the Mathematics of Surfaces*. Lecture Notes in Computer Science 4647. Sheffield, UK, 2007: 209-232
- [108] Yang Y L, Kim J, Luo F, Hu S M, Gu X. Optimal surface parameterization using inverse curvature map. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(5): 1054-1066
- [109] Clarenz U, Litke N, Rumpf M. Axioms and variational problems in surface parameterization. *Computer Aided Geometric Design*, 2004, 21(8): 727-750
- [110] Shapiro A, Tal A. Polygon realization for shape transformation. *The Visual Computer*, 1998, 14(8-9): 429-444
- [111] Zhou Kun, Bao Hu-Jun, Shi Jiao-Ying. A unified framework for digital geometry processing. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(9): 904-909(in Chinese)
(周昆, 鲍虎军, 石教英. 统一的数字几何处理框架. *计算机学报*, 2002, 25(9): 904-909)
- [112] Kobbelt L, Vorsatz J, Labisk U. A shrink-wrapping approach to remeshing polygonal surfaces. *Computer Graphics Forum*, 1999, 18(3): 119-129
- [113] Alexa M. Merging polyhedral shapes with scattered features. *The Visual Computer*, 2000, 16(1-2): 26-37
- [114] Gotsman C, Gu X, Sheffer A. Fundamentals of spherical parameterization for 3D meshes//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. San Diego, California, USA, 2003: 358-363
- [115] Yan Han-Bing, Hu Shi-Min. Convex combination spherical parameterization using spherical coordinates. *Chinese Journal of Computers*, 2005, 28(6): 927-932(in Chinese)
(严寒冰, 胡事民. 球面坐标下的凸组合球面参数化. *计算机学报*, 2005, 28(6): 927-932)
- [116] Gu X, Wang Y, Chan T F, Thompson P M, Yau S T. Genus zero surface conformal mapping and its application to brain surface mapping. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2004, 23(8): 949-958
- [117] Wang H, He Y, Li X, Gu X, Qin H. Polycube splines//*Proceedings of the ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*. Beijing, China, 2007: 241-251
- [118] Schreiner J, Asirvatham A, Praun E, Hoppe H. Inter-surface mapping. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 870-877
- [119] Kraevoy V, Sheffer A. Cross-parameterization and compatible remeshing of 3D models. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 861-869
- [120] Bobenko A, Schröder P. Discrete willmore flow//*Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing*. Vienna, Austria, 2005: 101-110
- [121] Cohen-Steiner D, Morvan J M. Restricted delaunay triangulations and normal cycle//*Proceedings of the ACM Symposium on Computational Geometry*. San Diego, California, USA, 2003: 312-321
- [122] Desbrun M, Grinspun E, Schröder P. Discrete differential geometry: An applied introduction//*Proceedings of the SIGGRAPH Course Notes*, 2005
- [123] Manay S, Hong B-W, Yezzi A J, Soatto S. Integral invariants signatures//*Proceedings of European Conference on Computer Vision*. Prague, Czech Republic, 2004: 87-99
- [124] Clarenz U, Rumpf M, Telea A. Robust feature detection and local classification for surfaces based on moment analysis. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2004, 10(5): 516-524

- [125] Clarenz U, Rumpf M, Telea A. Feature sensitive multi-scale editing on surfaces. *The Visual Computer*, 2004, 20(5): 329-343
- [126] Yang Y L, Lai Y K, Hu S M, Pottmann H. Robust principal curvatures on multiple scales//Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing. Cagliari, Italy, 2006: 223-226
- [127] Pottmann H, Wallner J, Yang Y L, Lai Y K, Hu S M. Principal curvatures from the integral invariant viewpoint. *Computer Aided Geometric Design*, 2007, 24(8-9): 428-442
- [128] Cazals F, Pouget M. Estimating differential quantities using polynomial fitting of sculating jets//Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing. Aachen, Germany, 2003: 177-187
- [129] Ohtake Y, Belyaev A, Seidel H-P. Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting//Proceedings of the ACM SIGGRAPH. Los Angeles, California, USA, 2004: 609-612
- [130] Stylianou G, Farin G. Crest lines for surface segmentation and flattening. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2004, 10(5): 536-544
- [131] Yoshizawa S, Belyaev A, Seidel H-P. Fast and robust detection of crest lines on meshes//Proceedings of the ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. Cambridge, MA, USA, 2005: 227-232
- [132] Hildebrandt K, Polthier K, Wardetzky M. Smooth feature lines on surface meshes//Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing. Vienna, Austria, 2005: 85-90
- [133] Rössl C, Kobbelt L, Seidel H-P. Extraction of feature lines on triangulated surfaces using morphological operators//Proceedings of the AAAI Symposium on Smart Graphics. Stanford, CA, USA, 2000: 71-75
- [134] Mortara M, Patane G, Spagnuolo M et al. Blowing bubbles for multi-scale analysis and decomposition of triangle meshes. *Algorithmica*, 2003, 38(1): 227-248
- [135] Palacios J, Zhang E. Rotational symmetry field design on surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 55
- [136] Ray N, Vallet B, Li W C, Lévy B. N -symmetry direction field design. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(2): 1-13
- [137] Lai Y-K, Jin M, Xie X, He Y, Palacios J, Zhang E, Hu S-M, Gu X. Metric driven rosy field design and remeshing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TVCG.2009.59>
- [138] Attene M, Falcidieno B, Spagnuolo M. Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives. *The Visual Computer*, 2006, 22(3): 181-193
- [139] Shlafman S, Tal A, Katz S. Metamorphosis of polyhedral surfaces using decomposition. *Computer Graphics Forum*, 2002, 21(3): 219-229
- [140] Katz S, Tal A. Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 954-961
- [141] Liu R, Zhang H. Segmentation of 3D meshes through spectral clustering//Proceedings of the Pacific Graphics. Seoul, Korea, 2004: 298-305
- [142] Lai Y K, Zhou Q Y, Hu S M et al. Feature sensitive mesh segmentation//Proceedings of the ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. Cardiff, Wales, UK, 2006: 17-25
- [143] Yamachi H, Lee S, Lee Y et al. Feature sensitive mesh segmentation with mean shift//Proceedings of the IEEE Shape Modeling International. Cambridge, MA, USA, 2005: 236-243
- [144] Mangan A P, Whitaker R T. Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1999, 5(4): 308-321
- [145] Katz S, Leifman G, Tal A. Mesh segmentation using feature point and core extraction. *The Visual Computer*, 2005, 21(8-10): 865-875
- [146] Mitani J, Suzuki H. Making papercraft toys from meshes using strip-based approximate unfolding//Proceedings of the ACM SIGGRAPH. Los Angeles, California, USA, 2004: 259-263
- [147] Lai Y K, Hu S M, Martin R, Rosin P. Fast mesh segmentation using random walks//Proceedings of the ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. Stony Brook, New York, USA, 2008: 183-191
- [148] Chen X, Golovinskiy A, Funkhouser T. Benchmark for 3D mesh segmentation. *ACM SIGGRAPH 2009*, 2009, to appear
- [149] Lee Y, Lee S, Shamir A et al. Intelligent mesh scissoring using 3D snakes//Proceedings of the Pacific Graphics. Seoul, Korea, 2004: 279-287
- [150] Lee Y, Lee S, Shamir A et al. Mesh scissoring with minima rule and part salience. *Computer Aided Geometric Design*, 2005, 22(5): 444-465
- [151] Funkhouser T, Kazhdan M, Shilane P et al. Modeling by examples//Proceedings of ACM SIGGRAPH. Los Angeles, California, USA, 2004: 652-663
- [152] Sharf A, Blumenkrants M, Shamir A et al. SnapPaste: An interactive technique for easy mesh composition. *The Visual Computer*, 2006, 22(9-11): 835-844
- [153] Magnenat-Thalmann N, Laperrière R, Thalmann D. Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping//Proceedings on Graphics Interface'88. Edmonton, Alberta, Canada, 1988: 26-33
- [154] Lewis J P, Corder M, Fong N. Pose space deformation: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation//Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'00), 2000: 165-172
- [155] Allen B, Curless B, Popović Z. Articulated body deformation from range scan data. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(3): 612-619
- [156] Mohr A, Tokheim L, Gleicher M. Direct manipulation of interactive character skins//Proceedings of the 2003 Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D'03). Monterey, California, USA, 2003: 27-30

- [157] James D L, Twigg C D. Skinning mesh animations//Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2005. Los Angeles, California, USA, 2005: 399-407
- [158] Yan H-B, Hu S, Martin R R, Yang Y-L. Shape deformation using a skeleton to drive simplex transformations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(3): 693-706
- [159] Sederberg T W, Parry S R. Free-form deformation of solid geometric models. *SIGGRAPH Computer Graphics*, 1986, 20(4): 151-160
- [160] Coquillart S. Extended free-form deformation: A sculpturing tool for 3D geometric modeling//Proceedings of the 17th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'90. Dallas, Texas, USA, 1990: 187-196
- [161] Ju T, Schaefer S, Warren J. Mean value coordinates for closed triangular meshes. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 561-566
- [162] Huang J, Shi X, Liu X, Zhou K, Wei L-Y, Teng S-H, Bao H, Guo B, Shum H-Y. Subspace gradient domain mesh deformation. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 1126-1134
- [163] Botsch M, Pauly M, Wicke M, Gross M. Adaptive space deformations based on rigid cells. *Computer Graphics Forum*, 2007, 26(3): 339-347
- [164] Xu W, Wang J, Yin K, Zhou K, van de Panne M, Chen F, Guo B. Joint-aware manipulation of deformable models//Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2009. New Orleans, Louisiana, USA, 2009, to appear
- [165] Hsu W M, Hughes J F, Kaufman H. Direct manipulation of free-form deformations//Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'92. Chicago, Illinois, USA 1992: 177-184
- [166] Hu S-M, Zhang H, Tai C-L, Sun J-G. Direct manipulation of FFD: Efficient explicit solutions and decomposable multiple point constraints. *The Visual Computer*, 2001, 17(6): 370-379
- [167] Taubin G. A signal processing approach to fair surface design//Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'95. Los Angeles, California, USA, 1995: 351-358
- [168] Zorin D, Schröder P, Sweldens W. Interactive multiresolution mesh editing//Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'97. Los Angeles, California, USA, 1997: 259-268
- [169] Kobbelt L, Campagna S, Vorsatz J, Seidel H-P. Interactive multi-resolution modeling on arbitrary meshes//Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'98. Orlando, Florida, USA, 1998: 105-114
- [170] Guskov I, Sweldens W, Schröder P. Multiresolution signal processing for meshes//Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'99. Los Angeles, California, USA, 1999: 325-334
- [171] Yu Y, Zhou K, Xu D, Shi X, Bao H, Guo B, Shum H-Y. Mesh editing with poisson-based gradient field manipulation//Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2004. Los Angeles, California, USA, 2004: 644-651
- [172] Rhaleb Zayer, Christian Rössl, Z K, H-P S. Harmonic guidance for surface deformation. *Computer Graphics Forum*, 2005, 24(3): 601-609
- [173] Shi L, Yu Y, Bell N, Feng W-W. A fast multigrid algorithm for mesh deformation. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 1108-1117
- [174] Alexa M. Differential coordinates for local mesh morphing and deformation. *The Visual Computer*, 2003, 19(2): 105-114
- [175] Lipman Y, Sorkine O, Cohen-Or D, Levin D, Rossel C, Seidel H-P. Differential coordinates for interactive mesh editing//Proceedings of the SMI'00. Genova, Italy, 2004: 181-190
- [176] Sorkine O, Cohen-Or D, Lipman Y, Alexa M, Rössl C, Seidel H-P. Laplacian surface editing//Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing(SGP'04). Nice, France, 2004: 175-184
- [177] Zhou K, Huang J, Snyder J, Liu X, Bao H, Guo B, Shum H-Y. Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 496-503
- [178] Igarashi T, Matsuoka S, Tanaka H. Teddy: A sketching interface for 3D freeform design//Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'99. Los Angeles, California, USA, 1999: 409-416
- [179] Igarashi T, Cosgrove D. Adaptive unwrapping for interactive texture painting//Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D'01). Research Triangle Park, North Carolina, USA, 2001: 209-216
- [180] Igarashi T, Hughes J F. Smooth meshes for sketch-based freeform modeling//Proceedings of the 2003 Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D'03). Monterey, California, USA, 2003: 139-142
- [181] Nealen A, Igarashi T, Sorkine O, Alexa, M. Fibermesh: Designing freeform surfaces with 3D curves//Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2007. San Diego, California, USA, 2007: 41
- [182] Zhang C, Chen T. Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation//Proceedings of the International Conference on Image Processing (ICIP'01). Thessaloniki, Greece, 2001: 935-938
- [183] Elad M, Tal A, Ar S. Content based retrieval of vrmf objects: An iterative and interactive approach//Proceedings of the 6th Eurographics Workshop on Multimedia. Manchester, UK, 2001, 107-118
- [184] Corney J, Rea H, Clark D, Pritchard J, Breaks M, MacLeod R. Coarse filters for shape matching. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 22(3): 65-74

- [185] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, Dobkin D. Shape distributions. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(4): 807-832
- [186] Ip C Y, Lapadat D, Sieger L, Regli W C. Using shape distributions to compare solid models//*Proceedings of the 7th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications (SMA'02)*. Saarbrücken, Germany, 2002: 273-280
- [187] Ohbuchi R, Minamitani T, Takei T. Shape-similarity search of 3D models by using enhanced shape functions//*Proceedings of the Theory and Practice of Computer Graphics (TPCG'03)*. Birmingham, UK, 2003: 97
- [188] Ankerst M, Kastenmüller G, Kriegel H-P, Seidl T. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases//*Proceedings of the 6th International Symposium on Advances in Spatial Databases (SSD'99)*. Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China, 1999: 207-226
- [189] Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors//*Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing (SGP'03)*. Aachen, Germany, 2003: 156-164
- [190] Kriegel H-P, Brecheisen S, Kröger P, Pfeifle M, Schubert M. Using sets of feature vectors for similarity search on voxelized cad objects//*Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD'03)*. San Diego, California, USA, 2003: 587-598
- [191] Siddiqi K, Shokoufandeh A, Dickinson S J, Zucker S W. Shock graphs and shape matching. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 35(1): 13-32
- [192] Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T, Kunii T L. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes//*Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'01*. Los Angeles, California, USA, 2001: 203-212
- [193] Sundar H, Silver D, Gagvani N, Dickinson S. Skeleton based shape matching and retrieval//*Proceedings of the Shape Modeling International 2003 (SMI'03)*. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2003: 130
- [194] Chua C S, Jarvis R. Point signatures: A new representation for 3D object recognition. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 25(1): 63-85
- [195] Johnson A E, Hebert M. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(5): 433-449
- [196] Huber D, Kapuria A, Donamukkala R, Hebert M. Parts-based 3D object classification//*Proceedings of the CVPR'02*. Washington, D. C. , USA, 2004: 82-89
- [197] Liu Y, Pu J, Xin G, Zha H, Liu W, Uehara Y. A robust method for shape-based 3D model retrieval//*Proceedings of the PG'00*. Seoul, Korea, 2004: 3-9
- [198] Liu Y, Zha H, Qin H. 2006. The generalized shape distributions for shape matching and analysis//*Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI'06)*. Matsushima, Japan, 2006: 16
- [199] Liu Y, Zha H, Qin H. Shape topics: A compact representation and new algorithms for 3D partial shape retrieval//*Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*. New York, USA, 2006: 2025-2032



HU Shi-Min, born in 1968, Ph. D. , professor. His research interests include digital geometry processing, video processing, rendering, computer animation, and computer aided geometric design.

YANG Yong-Liang, born in 1982, Ph. D. . His research interests include computer graphics, geometric modeling and processing.

LAI Yu-Kun, born in 1980, Ph. D. . His research interests include computer graphics, geometry processing and computer-aided geometric design.

Background

With the development of 3D acquisition techniques, 3D geometric models are more and more widely available. Thus it's ever demanding to process 3D geometric data in an efficient and reliable way. Research into digital geometry processing has become an active direction in recent years. A variety of algorithms have been proposed, with the potential applications of digital manufacturing, entertainment and cultural heritage protection etc. As a research field with quick evolution, it's a challenging task to have an overview idea of

various aspects of the direction. In this paper, the authors summarize the recent progress in digital geometry processing into a few topics, covering major problems in the digital geometry processing pipeline, namely modeling, analysis, optimization, and applications. The authors hope this work will be beneficial to researchers in the field. This work is partially supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2006CB303102) and National Science Foundation of China (No. 60673004, No. 60628202).