

三维模型检索中的特征提取技术综述

崔晨 石教英

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310027)

摘 要 介绍了三维模型检索的主要研究内容, 综述了三维模型检索中的关键技术——特征提取的研究现状, 通过对基于统计特征、骨架几何学的特征提取方法的综合比较与分析, 对各种特征提取技术进行了评价

关键词 三维模型; 检索; 特征提取
中图法分类号 TP391

Analysis of Feature Extraction in 3D Model Retrieval

Cui Chenyang Shi Jiaoying

(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract The main contents of 3D model retrieval are analysed and a survey on the key technology of feature extraction in 3D model retrieval based on statistic characteristics, skeleton, and geometry of object images is presented with a comparative evaluation of various approaches.


Key words 3D model; retrieval; feature extraction

1 引 言

随着三维扫描技术和计算机图形学的发展以及计算机性能的提高, 三维模型已成为继声音、图像和视频之后的第 4 种多媒体数据类型。对三维模型的使用与研究在娱乐、医学、机械工程、工业应用等领域得到了认同, 日益发达的互联网技术为人们对三维模型的共享和处理提供了条件, 使创建一个三维模型数据库变为可能, 这些都导致对三维模型应用需求的增长。面对庞大的三维模型数据库, 如何迅速查找到所需的模型正在成为继图像、视频检索之后的又一个热门课题, 它涉及了人工智能、计算机视觉、模式识别等领域。对三维模型的标准化描述和检索已被纳入 MPEG-7 的发展框架中。目前, 虽然已经有针对专用模型(如蛋白质分子结构的分类和查

询问题)的研究, 但绝大多数三维模型检索的研究都是针对通用模型进行的。同时三维模型描述方法多样, 如体素表示法、多边形网格表示、点集合表示等, 这也使得对三维模型特征提取的研究更加复杂。通常, 一个完整的模型检索系统包括如下几个方面:

(1) 三维模型的特征提取 由于绝大多数的三维模型是用于可视化, 因此表达三维模型的文件中往往只包含模型的几何属性(顶点坐标、法向矢量、拓扑连接等)和外观属性(顶点颜色、纹理等), 很少有适合自动匹配的高级语义特征的描述。如何合理地描述三维模型(即特征提取)成为三维模型检索课题首先要解决的问题, 它也是三维模型检索的难点。一个理想的特征描述符 SD (Shape Descriptor) 必须满足: 易于表达和计算; 不占用太多的存储空间; 适合进行相似性匹配; 具有几何不变性, 即对模型的平移、旋转、缩放等具有不变性; 具有拓扑不变性, 即当

原稿收到日期: 2003-06-05; 修改稿收到日期: 2003-12-01。本课题得到国家自然科学基金重点项目(60033010)和国家创新群体科学基金(20021201)资助。崔晨, 女, 1970 年生, 博士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、模式识别、科学计算可视化。石教英, 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为分布图形计算、科学计算可视化、虚拟现实、多媒体等。

相同模型有多个拓扑表示时, SD 应是稳定的; SD 对模型的绝大多数处理, 如子分、模型简化、噪声增减、变形等是鲁棒的; SD 必须具有惟一性, 即不同类型的模型对应的特征表示应该不相同。

(2) 相似性度量 检索的目的是找出与所给模型相似的模型集合, 因而对提取得到的特征如何进行相似性匹配是检索课题中要解决的第二个问题, 选择的度量方法必须适合匹配计算。

(3) 模型分类 由于三维模型资源庞大, 因此需要建立一个分类数据库以便提高模型查找效率, 该分类数据库必须适合用高级语义描述。当然, 对这个问题与相似性度量方法的研究有交叉的地方。

(4) 搜索方法的研究 尽管有了分类作基础, 但面对仍然庞大的数据库, 如何快速、有效地查找出相似的模型, 在人工智能和数据库领域中仍然是一个值得探讨的问题。

(5) 查询接口的设计 作为一个成熟的检索系统, 应该拥有良好的交互性能, 提供给用户方便的查询手段。通常, 查询输入可以通过文本与模型相结合的方法^[1-3]进行。对于查询模型的输入主要有两种途径: 文献[1]将已知的模型作为查询输入, 通知系统检索出相似的模型, 该方法的检索结果比较理想, 但是要求用户必须预先拥有某种模型的范例, 因此实际使用中不够灵活, 有一定的局限性; 文献[2]提供给用户一个绘图接口, 允许用户绘制所需查询模型的二维视图, 由系统根据视图自动生成三维模型。对于普通用户而言, 准确地绘制一个拓扑复杂、有洞或有许多分支的模型是比较困难的。实验表明, 目前该系统在这方面的性能不是非常理想。显然, 查询接口的设计也直接影响了系统的检索性能, 因此设计一个理想的查询接口在检索系统中非常重要。

(6) 检索性能的判断 对于三维模型的检索性能的判断, 主要从查全、查准、时间、资源消费等几个方面来衡量。目前的研究主要是用查全率和查准率两个参数来对检索性能进行评判。

总之, 如何提取模型的特征是三维模型检索首先需要解决的关键技术, 也是目前研究比较多的一个方面。

2 特征提取方法描述

从计算机图形学发展的初期开始, 多边形网格就是通用的三维模型的表示方法。尽管后来出现了更多的描述方法, 但由于多边形具有形状简单、便于

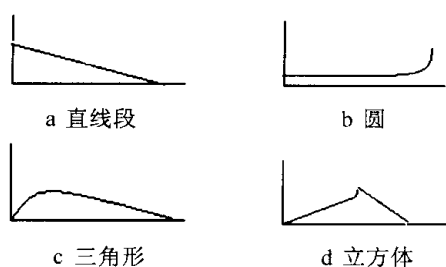
计算和处理等特点, 使得三维模型检索的研究者们更多的以多边形网格模型作为研究对象。文献[3-5]在 20 世纪 80 年代初就对三维模型形状特征的描述进行了研究, 但由于相关应用领域发展的滞后, 当时并未引起更多的关注, 直至 20 世纪末, 随着硬件条件的成熟和应用需求的发展, 关于三维模型特征提取方法的研究开始受到了人们的重视。目前, 三维模型特征提取方法主要分为三大类: 统计特征提取方法; 骨架提取方法; 基于几何学的提取方法。

2.1 统计特征提取方法

对一个三维模型进行参数化本身就是一个很复杂的问题, 同时由于三维表面有任意的拓扑, 使得一些在二维图像被使用的方法(如傅里叶变换)无法直接应用在三维领域。很多模型虽然满足了视觉效果, 但是大多数是退化的、不完整的, 最经典的如 Utah teapot, 是一个无底的茶壶; 又如 Stanford Bunny 是一个带有几个洞的兔子。对这些模型进行有意义的几何特征和形状信号的计算是很困难的, 因此从统计学的观点出发, 寻找出有意义的统计特征成了研究人员首先考虑的方法。目前的研究中主要使用了如下统计特征: 模型顶点间的几何关系(距离、角度、法线方向关系等), 模型顶点的曲率分布特征, 模型顶点的各阶统计矩以及各类变换特征系数等。

2.1.1 形状分布方法

形状分布方法主要描述了模型表面随机顶点间的特征关系, 相关特征如模型表面顶点的曲率分布、两个随机顶点间距离的概率分布等。不同的统计特征有着不同的特点, 但经过预处理之后大多数可以满足几何不变性^[6-13], 由于形状分布方法用模型表面的特征替代了模型几何体的特征, 因此大多数情况下更适合用于对模型进行粗分类。下面对一些有代表性的特征提取进行简单描述。Osada 等^[6]根据不同几何形体表面顶点间的相互关系呈现出不同的分布特征, 试图将一个任意的、可能退化的三维模型中复杂的特征提取转换成相对简单的形状概率分布问题。图 1a~1d 分别表示直线、圆、三角形、立方体上任意两点间的欧氏距离 D_2 的概率分布曲线。显然, 不同的形状呈现出不同的关于 D_2 的曲线特性, 以此作为模型的特征描述。文献[6]中还建议了其他特征, 如 A_3 (模型表面三个随机顶点间的角度)、 D_1 (模型质心至表面任意顶点间的距离)等。该方法计算简单, 对模型的平移、旋转、缩放等具有不变性, 对模型边界一些小的扰动具有较好的鲁棒性。

图1 欧氏距离 D_2 的概率分布曲线

文献[7-9]首先对模型进行规则分割(图2所示为对蛋白质分子进行的网状分割),将不同模型在相同的分割下可能呈现出关于某种特征的不同的分布特性(图3所示为蛋白质在各个区域中的顶点密度的直方图)作为模型的特征描述符。该方法没有对模型进行预处理,因此提取的特征仅具有平移、缩放不变性,但对模型边界小的扰动有较好的鲁棒性

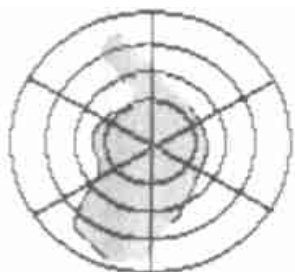


图2 网状模型

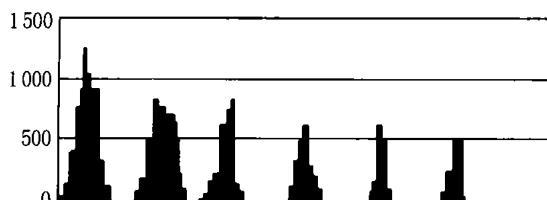


图3 形状直方图

文献[10-12]将模型的一些几何参数(如面积、体积以及构造一些特殊的矢量)作为特征向量。文献[12]用一个中心在模型质心的规则多面体(如十二面体)作为参考系,由质心至十二面体的顶点的方向作为特征矢量方向,沿着该矢量方向与模型的三角面片相交,取该方向截交长度最长的那个矢量进行归一化后作为模型的特征矢量;因此,描述一个模型仅需20个特征矢量。尽管该方法比较简单,计算量小,存储量少,但显然对模型特征的描述不够准确,同时对一些小的扰动很敏感,因此实验结果并不理想

Epaquet等^[13]的思想与上述方法类似,将模型顶点与模型的某些特征轴间的关系作为特征描述,提出了一种cord-based的方法。该方法首先用主元分析方法(Principle Component Analysis, PCA)^[14]对

模型进行规范化得到模型的三个主轴, cord则由模型的质心与模型顶点的连线定义。模型的特征描述由三部分组成: cord与模型的第一主轴之间的角度的分布直方图; cord与模型的第二主轴之间的角度的分布直方图; cord的长度分布直方图。显然,该方法的计算量比文献[7-12]大,但对模型描述的信息更丰富。

文献[15-17]将顶点的曲率作为特征提取研究的对象。Mahmoudi等^[16]尝试将三维模型的特征提取转换到二维平面上进行,提取二维视图上的边界点的曲率分布特征。为了减少由于模型在坐标系统中的方向、位置、尺寸给模型的特征提取带来的影响,对模型用PCA进行规范化的预处理。Mahmoudi等^[16]计算了模型的7个二维投影特征视图上顶点的曲率空间分布,其中3个为主要视图,另外4个视图为从属于三个主要视图的次要特征视图。视图投影的方向和数目直接影响了模型特征描述的精确程度,虽然原文中选择7个视图对比较规则的模型特征描述效果不错,但对拓扑复杂的模型效果并不理想。由于模型最终的特征表达是经过两次特征提取得到的,因此特征描述的精确度受到一定的影响;同时,该方法对模型噪声比较敏感。尽管该方法存在诸多需要解决的问题,但仍不失为一个好的思路。

Zaharia等^[17]提出用3D SSD(3D Shape Spectrum Descriptor)方法对三维模型进行描述,该方法避免了文献[16]中的二次特征提取,其主要思想是根据物体表面的一些局部几何属性(如某点的曲率)提供物体内在的形状索引(Shape Index, SI)描述。SI被定义为某点关于两个主要曲率的函数,则3D SSD被定义为SI在整个模型网格上的分布,用直方图表示。3D SSD对几何转换和比例缩放具有不变性,对一些易见的、显著的、有突起的特征,如convexity, concavity, rut, ridge, saddle描述准确。但该方法对模型的拓扑很敏感,对任意网格描述之前需进行规范化的预处理,预处理的过程较复杂且涉及到很多方面(如拓扑表示的不惟一性、网格的不规则采样,非定向网格,退化网格等均需经过预处理),因此该方法并不通用。但该方法的实验效果好,并被建议使用在未来的MPEG7中。

2.1.2 基于各种数学变换和矩的统计特征提取方法

在二维图像中,常用各种数学变换(如傅里叶变换、Hough变换)或各阶矩对图像进行描述,因而很多研究人员尝试着将这种思想应用到三维模型的特征描述上。

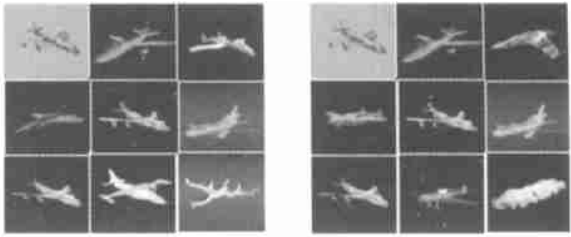
为了克服文献[12]中特征提取过于粗糙的缺点,文献[18-19]对模型首先进行球面参数化;然后沿着经、纬两个方向均匀采样,得到的球面傅里叶系数作为模型的特征描述符。这种方法可以实现多分辨率的特征表达,对模型表面小的扰动具有鲁棒性。在文献[18]中,还采用了矩作为模型的特征。从实验结果可以看出,球面傅里叶系数具有更好的检索性能。尽管这种基于射线的矩(ray-based)^[18]比文献[20]中的统计矩检索性能要强,但是参数化的过程中,存在不同的点映射在同一个球面点上的问题,对模型的表示不惟一。另外,高阶矩对模型表面小的扰动异常敏感。文献[21-29]与文献[18]思想类似,采用基于傅里叶变换与矩的思想对模型进行特征描述,在应用时傅里叶变换对边界的变化很敏感,矩则对物体的质量分布较为敏感,这些都影响了检索的效果。

文献[30]在假设三维模型可以用三维等高线描述的前提下,用傅里叶系数作为特征描述符。显然,这种方法无法从理论和实验上证明等高线就是三维模型的理想特征描述符,因此还需进一步研究。

Ohbuchi等^[31]在假设模型的质量分布是均匀的前提下,计算了模型相对三个主轴的惯量矩和模型表面顶点对三个主轴的距离分布。由于模型对轴会有一些小的变形,为了减少由此带来的影响,文献[31]采用了一种叠盖分析窗口的方法,增加算法对这种变形的鲁棒性。这种方法计算不复杂,对一些退化的模型也适用,但实验表明其对于具有旋转对称特征的模型效果更好些,而对其他特征的模型实验结果并不理想,因此该方法局限性比较大。

为了解决文献[17]中的3DSSD对拓扑敏感的问题,文献[32-33]给出了一种新的三维模型的特征描述符——O3DHTD(Optimal 3D Hough Transform Descriptor)。O3DHTD是基于Hough变换的思想而定义的,该思想在二维图像中已得到应用。文献[33]针对三角面片描述的三维网格模型,将三角形质心作为原始点集映射到某参数空间,通过Hough变换确定参数集合,以此作为模型的特征描述3DHTD(Hough Transform Descriptor)。3DHTD从本质上满足了拓扑不变性的要求,但并没有很好地解决几何不变性。为此,文献[33]采用了PCA方法对模型进行规范化处理,并对由于PCA方法所引起的新坐标系出现的48种可能情况都做了计算,保证了特征O3DHTD的几何不变性,获得最终的优化后的O3DHTD。由于文献[33]采用了一些优化处理,

导致特征提取的计算量较大;同时,该方法是对模型全局特征的描述,适合做全局匹配。图4a所示为基于O3DHTD对飞机模型的检索结果,图4b所示为基于3DSSD对飞机模型的检索结果。可以看出,O3DHTD比3DSSD检索性能好。



a 基于 O3DHTD 的检索 b 基于 3DSSD 的检索

注:左上角为查询模型

图 4 对飞机模型的两检索方法比较

2.2 骨架提取方法

由于用统计方法提取的特征无法对模型进行直观形象的可视化描述,因此骨架提取成为研究人员关注的第二类方法。骨架是对模型的主要特征的一种可视化描述,它符合人类的视觉特征。

在医学的虚拟内窥镜手术中,人们致力于研究如何提取管状器官的中轴线,并以此作为手术的导航。Amenta等^[34-35]首先计算出模型的Voronoi图,在此基础上计算出模型的骨架,它描述了模型的全局特征,但是Voronoi图的计算开销和存储量非常庞大,更适合实体模型,对于有孔、洞的模型还需特殊处理;同时,Voronoi图的构造对噪声非常敏感,边界上小的噪声常会导致密集的Voronoi图,增加了计算量,影响对模型特征的精确描述。因此,这种方法的实用性有待进一步研究。

与中轴变换^[36-37]的思想相似,文献[38-39]采用基于参数控制的瘦化算法对模型进行骨架提取,适合任何以体素描述的三维模型。该算法首先计算出模型的骨架节点,然后通过各节点构造出相应的骨架图形,即一个有向的非循环图。以此作为模型的特征描述,不仅适合全局匹配,也可进行局部匹配,如图5所示。该算法中骨架节点为模型局部的中心点,通过瘦化参数控制节点的密度,因此参数直接影响了模型骨架的提取质量。瘦化算法对噪声异常敏感,小的扰动会导致错误的骨架提取。同时,由于需要对每个体素的距离转换值进行递归计算和比较,因此这种算法的计算量很大。而关于如何选择瘦化参数文献[38-39]中没有给出理论的描述,这也是该算法的一个遗憾。

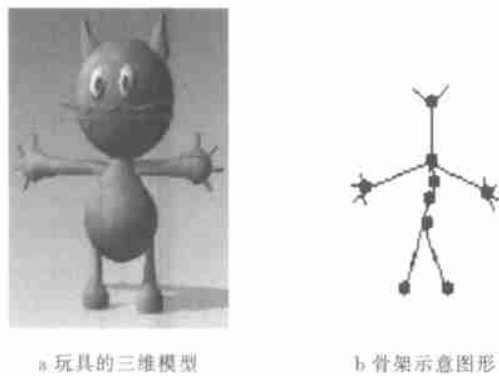


图 5 基于参数控制瘦化算法的模型骨架提取

文献[40-42] 采用了建立网格模型多分辨率 RG (Reeb Graph)的骨架提取方法. 一个定义在模型表面的连续标量函数为三维模型构造了一个二维的 RG 描述符, RG 不仅可以描述模型的特征, 同时还描述了模型的空间拓扑关系, 如图 6 所示

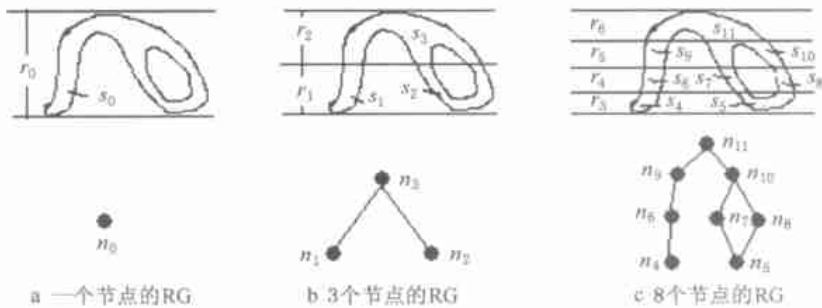


图 6 多分辨率 RG 的构造

2.3 基于几何学的特征提取方法

人类的相似判断是基于对物体在整体几何形体上的一种比较, Novotni 等^[43-44] 据此对三维模型直接进行几何相似判断. 其基本思想是将一物体 A (如图 7a 中的香蕉)与另一物体 B (如图 7a 中的苹果)重叠放置, 计算出物体 B 位于物体 A 之外的点到物体 A 的边界的距离分布特征, 构造出包含这些距离的直方图, 最后基于这些直方图计算一个量化的相似度量. 该方法适用于严格定义的封闭的多边形网格模型, 对刚度较大或变形较小的物体效果较好. 进行相似判断之前, 对模型需进行精确的重新定位和对准的预处理, 然后对模型进行边界提取. 如图 7 所示, 图 7a 中的香蕉和苹果质心重合, 图 7b 中香蕉和香蕉虽然质心重合, 但应如图 7c 所示, 两者的方向也需一致. 该方法适合进行模型的全局匹配, 如文献[44] 中对客户的脚进行三维扫描后进行模型重构, 然后将重构后的模型与鞋楦模型进行相似比较, 为客户制造更为符合个人的鞋子. 由于绝大多数的模型是不严格的, 如 Internet 上的模型通

不同分辨率节点图之间的节点具有父子关系, 直线表示了节点间的拓扑. 匹配策略由粗到精, 当父节点匹配时, 再进行子节点的匹配. 这种方法无论对模型的全局匹配和局部匹配都适用, 而且通过选择合适的连续函数构造出的 RG 具有平移、旋转不变性, 对由于模型简化、子分、网格重构等引起的连通改变是鲁棒的, 对模型变形引起的变化、噪声带来的影响不敏感. 该方法不仅能识别拓扑不同的模型 (如一个面包圈和球), 而且对于几何不同而拓扑相似的模型也能识别, 如弯曲的手指或伸直的手指. 由于 RG 的构造是基于连续标量函数进行的, 因此当模型存在两个分离的部分时 (如模型中包括两个分离的球), 该方法无法正确识别, 并且对边界敏感. 不同类型的模型必须采用适合的连续函数才能得到正确的 RG, 如文献[42] 中所用的 geodesic 距离函数并不适合于体素模型, 可能密度函数更适合.

常是退化的、松散的多边形集合, 所以该方法的应用受到很大的限制.



图 7 两个模型的预处理

3 各类方法比较与分析

无论是基于统计特征的方法还是骨架提取, 或基于几何学的方法, 都无法从理论上验证它们对模型特征描述的精确度, 更多的是从实验的结果来判断其优劣. 图 8 所示为对同一飞机模型用同一种度量方法在不同的统计特征描述下得到的查准率-查全率图. 三种特征描述符分别为: ray-based 的用球面调和函数提取的特征矢量 (rays-sh)^[18], ray-based

的矩(ray-moments)^[18], 统计矩(moments)^[20]. 图中的数字 66, 83, 31 代表该特征矢量的维数. 从图 8 中可看出: rays-sh 的检索效果较好, ray-moments 次之, moments 较差. 本文主要从各类方法自身的优点和局限性出发, 对它们进行分析, 分析结果如表 1 所示.

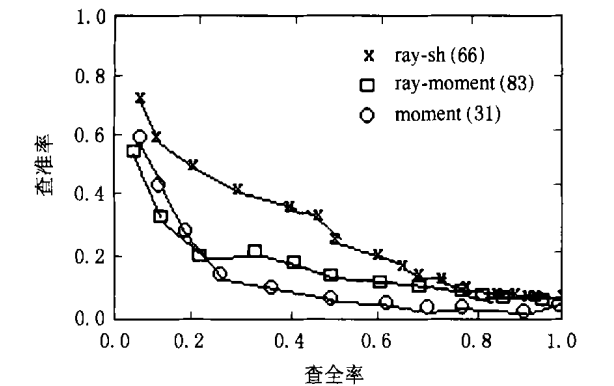


图 8 飞机的三种特征描述方法的查准率-查全率图

目前的统计方法都是针对多边形网格描述三维模型, 大多数统计特征的计算不复杂, 易于理解, 适合进行模型的全局匹配. 但是, 大多数统计特征带有随机性, 检索性能有时不稳定, 计算出的模型特

征无法可视化, 不适合局部匹配, 对原模型中丢失的特征信息也无法提取. 从实验结果看, 大多数统计特征比较适合对模型进行粗分类, 建立分类数据库. 同时, 为了保证方法本身对几何变换(如平移、旋转、缩放等)的不变性, 大多数统计方法对模型进行预处理时都采用 PCA(如 Karhunen-Loeve 变换), 但由此会带来如下问题:

- (1) 通过对相关特征值降序排列的方法标注出的主轴并不能总是保证理想的空间对应(例如, 对于同样放置在水平桌面上的一个高的玻璃杯和一个平坦的玻璃杯, 根据 PCA, 前者的主轴应是在垂直方向, 而后者应是水平方向, 而 PCA 重新定义新的坐标系统后, 将无法找到两者的相似性);
- (2) 将模型缩放到一个单位边界盒对局部变形十分敏感;
- (3) PCA 用模型表面特征替代了模型的体积特征, 丢失了很多信息;
- (4) 由于定义了新的坐标系统, 无法对原模型直接处理, 降低了特征描述的精确度.

表 1 各类方法分析

特征描述方法	适用模型	优点	局限性
统计特征	任意网格模型(对松散的、退化的模型也适用)	对模型要求不高、计算不复杂、易理解, 大多数满足几何不变性、大多数对边界噪声鲁棒、适合全局匹配	部分特征不稳定、表面特性替代了几何体特性, 丢失了一些特征, 部分特征对拓扑敏感, 大多数特征适合粗分类
骨架提取	体素模型、封闭的网格模型	直观(可视化)满足几何不变性, 适合全局和局部匹配	对模型要求较高、适合有关节或分支的模型、计算量大、对边界噪声敏感
基于几何学	刚度较大、变形较小、封闭的网格模型	原理简单, 符合人类的相似判断准则、适合全局匹配	对模型要求很高、不通用、计算量大、对预处理要求非常严格

因此, 尽管很多研究都采用 PCA 方法进行预处理, 但大多数研究对上述问题并没有给出解决方法, 因此对这种方法的缺陷必须有充分认识, 找出相应的解决措施才能进一步提高模型特征提取的精度.

骨架是对模型的主要特征的一种直观描述, 它符合人类的视觉特征, 由于匹配时采用的是节点属性和拓扑匹配, 因此适合全局和局部匹配; 对模型的几何变换(如旋转、缩放、平移等)是鲁棒的. 但进行骨架提取时对原始模型的信息要求比较严格(模型需是封闭的多边形网格或严格的体素描述), 例如, 对一个由松散的多边形组成的模型进行骨架提取是无意义的, 对一些退化的模型进行骨架提取则可能会导致不正确的结果; 同时, 由于骨架提取方法的不同, 有时对模型的一些噪声会异常敏感. 实验结果表明, 骨架更适合用来描述有关节或分支的模型.

方法, 仅适用严格定义的、具有一定刚度或变形较小的网格模型, 因此该方法的应用受到很大的限制. 由于采用的是模型边界的比较, 因此对模型预处理的要求较高, 要求模型的质心和方向完全一致, 同时边界提取也极大地增加了该方法的计算量.

每种方法都有各自的优缺点, 如何将它们综合考虑, 甚至引入文本注解的方法, 以进一步提高特征提取的精确程度, 或发现更新的特征描述方法, 是今后研究的方向. 同时, 每种特征的检索效果还与所采用的相似性度量方法有着极大的关系, 因此, 针对特征描述符的特性, 采用合适的相似性度量方法才能取得更好的检索效果.

4 总结和展望

三维模型的检索是近年来随着三维模型获取手

段的增强、增多以及互联网的发展而兴起的计算机图形学领域的一个新的研究方向,对其中一些关键技术的研究还不成熟,尤其对于模型的特征描述还需要进行大量的研究和实验,因为这是检索课题首先要解决的根本问题。已有的三类特征提取方法各有不同的优点和局限性,还没有好的通用方法对模型从低层视觉特征推出高层语义描述;相似性度量方法和人的感知仍有差异,索引结构的效率和精度还有待进一步研究;关于模型特征描述的精度的判断还缺少一个权威的、统一的评判体系,这些都是三维模型检索研究人员今后需要研究解决的问题。此外,对查询接口的设计也是未来的研究重点之一,如何设计出一个操作简便、通用性强的查询模型输入接口也是对检索系统性能评判的一个重要方面。目前研究人员大都致力于研究对三维模型(model)的检索,对三维物体(object)的检索基本没有涉及。因为object是比model具有更多细节层次、更多信息、更接近于真实世界的事物,对物体的检索应建立在模型检索的基础上。例如,几何形状相似的一只球和一个西瓜对模型检索而言是相似的;当加入诸如纹理、色彩、质感等信息后,从物体的检索来看它们却不匹配,这就是object和model检索的差别。对三维模型的检索目前还处于初步研究阶段,相关学科如计算机视觉、模式识别、人工智能等的不断发展也将对三维模型的检索起到很大的推动作用,希望在三维模型检索的研究基础之上能进一步延伸至三维物体的检索,尤其在医学领域,仅仅对模型的检索与识别还不够,必须加上物体的纹理、材质等特征才能使三维检索更好地得到应用。

参 考 文 献

- [1] Zhang C, Chen T. An active learning framework for content based information retrieval[J]. IEEE Transactions on Multimedia Special Issue on Multimedia Database, 2002, 4(2): 260~280
- [2] Funkhouser T, Min P, Kazhdan P, *et al.* A search engine for 3D models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(1): 83~105
- [3] Wallace T P, Wintz P A. An efficient 3-D aircraft recognition algorithm using normalized Fourier Descriptors[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1980, 13(3): 99~126
- [4] Sadjadi F A, Hall E L. Three-dimensional moments invariants[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, PAMI-2(2): 127~136
- [5] Lamdan Y, Wolfson H J. Geometric hashing: A general efficient model-based recognition scheme[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, Tampa, Florida, 1988. 238~249
- [6] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, *et al.* Shape distributions[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807~832
- [7] Ankerst M, Kastenmuller G, Kriegel H-P, *et al.* 3D shape histogram for similarity search and classification in spatial databases[A]. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Spatial Databases(SSD'99), HongKong, 1999. 207~228
- [8] Ankerst G, Kastenmuller, Kriegel H, *et al.* Nearest neighbor classification in 3D protein databases[A]. In: Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Systems for Molecular Biology(ISMB'99), Heidelberg, 1999. 34~43
- [9] Kastenmuller G, Kriegel H, Seidl T, *et al.* Similarity search in 3D protein databases[A]. In: Proceedings of German Conference on Bioinformatics(GCB'98), Cologne, 1998. 72~74
- [10] Vranic D V, Saupe D. 3D model retrieval[A]. In: Proceedings of the Spring Conference on Computer Graphics and its Applications(SCCG2000), Budmerice, 2000. 89~93
- [11] Zhang C, Chen T. Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation[A]. In: Proceedings of International Conference on Information Processing(ICIP), Thessaloniki, 2001. 935~938
- [12] Heczko M, Keim D, Saupe D, *et al.* A method for similarity search of 3D objects[A]. In: Proceedings of the BTW, Oldenburg, 2001. 384~401
- [13] Epaquet, Rioux M. A query by content system for three dimensional model and image databases management[A]. In: Proceedings of IEEE on Image and Vision Computing, Ottawa, 1997. 345~352
- [14] Vranic D V, Saupe D. Tools for 3D-object retrieval: Karhunen-Loeve Transform and spherical harmonics[A]. In: IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing(MMSP'2001), Cannes, 2001. 293~298
- [15] Mokhtarian F, Abbasi S. Robust and efficient shape indexing through curvature scale space[A]. In: Proceedings of the 6th British Machine Vision Conference, Edinburgh, 1996. 53~62
- [16] Mahmoudi S, Daoudi M. 3D models retrieval by using characteristic views[A]. In: Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition(ICPR2002), Quebec, 2002. 2: 457~460
- [17] Zaharia T, Preteux F. 3D shape-based retrieval within the MPEG-7 framework[A]. In: Proceedings of SPIE Conference On Nonlinear Image Processing and Pattern Analysis XII, San Jose, 2001. 4304: 133~145
- [18] Dietmar Saupe, Dejan V Vranic. 3D model retrieval with spherical harmonics and moments[A]. In: Proceedings of the DAGM 2001, Munich, Germany, 2001. 392~397
- [19] Dekubgette H, Hebert M, Ikeuchi K. A spherical representation for the recognition of curved objects[A]. In: Proceedings of IEEE 4th International Conference on Computer Vision, Berlin, 1993. 103~112

- [20] Paquet E, Murching A, Naveen T, *et al.* Description of shape information for 2-D and 3-D objects [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2000, 16(1): 103~122
- [21] Arber K, Snyder W E, Burkhardt H, *et al.* Application of affine-invariant Fourier descriptors to recognition of 3-D objects [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 640~647
- [22] Reeves A P, Prokop R J, Susan E, *et al.* Three-dimensional shape analysis using moments and Fourier descriptors [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1988, 10(6): 937~943
- [23] Rui Y, She A, Huang T S. A modified Fourier descriptor for shape matching in MARS [M]. In: S K Chang ed. *Image Databases and Multimedia Search*, Series on Software Engineering and Knowledge Engineering, No18, 1st ed. Singapore: World Scientific Publishing House, 1998. 165~180
- [24] Zhang D S, Lu G J. A comparison of shape retrieval using Fourier descriptors and short-time Fourier Descriptors [A]. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia (PCM01)*. Beijing, 2001. 855~860
- [25] Vamir D V, Saupe D. 3D shape descriptor based on 3D Fourier Transform [A]. In: *Proceedings of the EURASIP Conference on Digital Signal Processing for Multimedia Communications and Services (ECMCS 2001)*, Budapest, Hungary, 2001. 271~274
- [26] Canterakis N. 3D Zemike moments and Zemike affine invariants for 3D image analysis and recognition [A]. In: *Proceedings of the 11th Scandinavian Conference on Image Analysis*. Kangerlussuaq, Greenland, 1999. 85~93
- [27] Elad M, Tal A, Ar S. Content based retrieval of VRML objects: An iterative and interactive approach [A]. In: *Proceedings of the 6th Eurographics Workshop in Multimedia*, Manchester, 2001. 97~108
- [28] Prokopand R J, Reeves A P. A survey of moment-based techniques for unoccluded object representation and recognition [J]. *Graphics Models and Image Processing*, 1992, 54(5): 438~460
- [29] Chen C C. Improved moments invariants for shape discrimination [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(5): 683~686
- [30] Hao Zhang, Rugene Fiume. Shape matching of 3-D contours using normalized Fourier descriptors [A]. In: *Proceedings of Shape Modeling International 2002 (SMI' 02)*, Banff, 2002. 261~268
- [31] Ohbuchi R, Otagiri T, Ito M, *et al.* Shape-similarity search of three-dimensional models using parameterized statistics [A]. In: *Proceedings of the Pacific Graphics*. Beijing, 2002. 265~273
- [32] Ballard D H. Generalizing the Hough transform to detected arbitrary shapes [J]. *Pattern Recognition*, 1981, 13(2): 111~122
- [33] Zaharia T, Preteux F. Hough transform-based 3D mesh retrieval [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Vision Geometry*, San Diego, 2001. 4476: 175~185
- [34] Amenta N, Choi S, Kolluri R K. The power crust, union of balls and the medial axis transform [J]. *Computational Geometry: Theory and Applications*, 2001, 19(2/3): 127~153
- [35] Amenta N, Choi S, Kolluri R K. The power crust [A]. In: *Proceedings of the 6th ACM Symposium on Solid Modeling*, Ann Arbor, Michigan, 2001. 249~260
- [36] Sherbrooke E C, Patrikalakis N M, Brissan E. An algorithm for the medial axis transform of 3D polyhedral solids [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1996, 2(1): 44~61
- [37] Chuang J H, Tsai C H, Ko M C. Skeletonization of three-dimensional object using generalized potential field [J]. *IEEE Transactions on PAMI*, 2000, 22(11): 1241~1251
- [38] Sundar H, Silver D, Gagvani S, *et al.* Skeleton based shape matching and retrieval [A]. In: *Proceedings of the Shape Modelling and Applications Conference (SMI)*, Seoul, 2003. 290~308
- [39] Gagvani N. Parameter controlled volume thinning [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1999, 61(3): 149~164
- [40] Siddiqi K, Shokoufandeh A, Dickinson S, *et al.* Shock graphs and shape matching [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 35(1): 13~31
- [41] Shinagawa Y, Tosiya. Constructing a reeb graph automatically from cross section [J]. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1999, 11(6): 44~51
- [42] Hkaga M, Shinagawa Y, Kohmura T, *et al.* Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes [A]. In: *Computer Graphic Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles*, 2001. 203~212
- [43] Novotni M, Klein R. A geometric approach to 3D object comparison [A]. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Shape Modeling and Applications*, Genova, 2001. 167~175
- [44] Novotni M, Klein R. Geometric 3D comparison-an application [A]. In: *Proceedings of ECDL WS Generalized Documents 2001, Bonn*, 2001. 39~44