

# 一种基于2维多边形集相似性的3维模型检索方法

普建涛<sup>1)</sup> 刘一<sup>1)</sup> 辛谷雨<sup>1)</sup> 查红彬<sup>1)</sup>  
刘渭彬<sup>2)</sup> 上原祐介<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(北京大学视觉与听觉信息处理国家重点实验室,北京 100871)

<sup>2)</sup>(富士通研究开发中心有限公司因特网应用技术研究部,北京 100016)

<sup>3)</sup>(株式会社富士通研究所 IT Media 研究所言语处理研究部,日本 211-8588)

**摘要** 提出了一种基于2维多边形集相似性度量的3维模型检索方法,它的主要思想是用一组沿着特定方向的2维切片表示3维模型,其中这些2维切片由多个多边形组成,从而将3维形状之间的匹配问题转换为多边形集之间的相似性度量问题。这种方法涉及以下3个问题:切片方向的选择、切割方法和多边形集之间的相似性度量。针对这些问题,分别给出了相应的方法和规则,并通过实验验证了这种方法的有效性。

**关键词** 3维模型检索 相似性 几何形状 包围盒 切片

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)12-1437-06

## A 3D Model Retrieval Method Based on the Similarity Between 2D Polygon Sets

PU Jian-tao<sup>1)</sup>, LIU Yi<sup>1)</sup>, XIN Gu-yu<sup>1)</sup>, ZHA Hong-bin<sup>1)</sup>, LIU Wei-bin<sup>2)</sup>, UEHARA Yusuke<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(National Laboratory on Machine Perception, Peking University, Beijing 100871)

<sup>2)</sup>(Internet Application Laboratory, Fujitsu R&D Center Co., LTD, Beijing 100016)

<sup>3)</sup>(Language Processing Lab., IT Media Institute, Fujitsu Laboratories LTD., Japan 211-8588)

**Abstract** In this paper, we present an approach based on similarity measuring between 2D polygon sets for 3D model retrieval. The basic idea is to represent the 3D model by a series of slices composed of 2D polygon sets along certain directions. In this way, the shape-matching problem between 3D models is transformed into the similarity measuring between 2D polygon sets, in which three problems are involved: the selection of cutting directions, cutting methods and similarity measuring. To solve these problems, some strategies and rules are proposed, and their are proved by some experiments.

**Keywords** 3D model retrieval, similarity measurement, geometric shape, bounding box, slice

## 1 引言

3维模型在很多主流应用领域中扮演着非常重要的角色,比如机械制造、游戏、生物化学、医学、电子商务、艺术、虚拟现实等。如何快速、准确地找到所需要的模型就成为这些应用领域面临的一个关键问题。一般地,可以从多种角度对3维模型进行描述,比如颜色、纹理、功能、材料、几何形状等,但是只有几何形状才是描述3维模型的最有力方式,从人的

视觉感知方面来说,它也是最直观的一种描述形式。

针对3维模型检索问题,已提出了很多方法。如:形状分布方法,将形状匹配问题简化为一个概率分布的比较问题<sup>[1]</sup>;利用直方图表示3维模型特征(面积、体积等)的分布,通过对面积的分布进行归一化处理并计算L2差实现两个模型之间的形状匹配<sup>[2]</sup>;借助矩(Moment)的概念来描述形状特征之间的差异性<sup>[3]</sup>;根据物体表面法线向量的分布来刻画3维模型<sup>[4]</sup>;针对3D模型提出的基于区域的特征来描述3维物体的特征,如体积/面积比、矩的不变量、Fourier

变换系数等<sup>[5]</sup>;采用多种特征的组合来描述3维模型,具体特征包括张量、法线、体积、多边形顶点和多边形面等<sup>[6]</sup>。上述方法的一个共同特点就是统计多个全局特征来表示3维形状,比较容易实现、性能稳定并具有较好的变换不变性,但是在形状信息的表达方面并不完备,没有考虑局部特征,而且由于涉及的特征较多,在检索速度上会出现较大的延迟。

为此,Hilaga等人<sup>[7]</sup>提出了一种“拓扑匹配”的方法,通过比较多分辨率Reeb图进行相似性计算,Reeb图通过在3维形状上使用一个连续测地距离函数进行构造,在模型的具体匹配过程中采取了一种从粗到细的策略。最近,Sundar等人<sup>[8]</sup>基于骨架的概念提出了另外一种方法,将几何和拓扑信息以骨架图的形式进行编码,然后使用图匹配方法来对骨架进行匹配和比较。基于骨架的方法不仅刻画了3维物体的全局特征,同时还刻画了局部特征,不仅可以进行全局形状比较,而且还可以进行局部形状比较。但是,这类方法需要庞大的计算资源,很难应用于实时系统中,而且并不能保证骨架图中结点配准的准确性和稳定性。

为此提出了一种基于2维多边形集相似性的3维模型检索方法,它的主要思想是沿着一组可以唯一确定的3个正交方向对3维模型进行切割,从而将3维模型之间的匹配问题转换为2维多边形集之间的相似性度量问题。针对其中涉及的问题,同时分别给出了相应的算法与规则,并通过一些检索示例对这种方法的有效性进行了检验。

## 2 基于切片的形状表示

形状匹配的关键在于找到一种可以准确描述3维形状的形状表示形式。本文提出了一种基于切片的形状表示方法,将3维模型沿着特定方向进行切割,这样就将3维形状的匹配问题转换为2维切片之间的相似性比较,切片数量越多,也就越接近最终的模型形状。但是,这个过程涉及如下几个问题:

(1) 切割方向的选择 为了进行形状之间的相似性比较,对于任何一个模型,必须可以唯一确定一组正交方向。从人类的视觉感知角度来说,不同模型的切片序列必须具有相同的切割方向,这样才能保证模型之间相似性比较的可行性。

(2) 切割方法 这个步骤就是用一平面沿着特定方向将3维网格模型切成一系列切片,为了进

行相似性计算,还需要对这些相交点进行合理组织来表示切片的拓扑结构。例如,可以用一系列的封闭多边形表示切片,如图1所示。



图1 右图为左边所示模型在某个位置的切片

(3) 切片之间的相似性度量 一旦获得两个模型的切片序列,下一步就是度量它们之间的相似性,一方面需要寻找某些参数来描述切片的2维几何形状,另外一方面需要用量化的方法来度量这些切片序列之间的相似性。

## 3 切割方向的选取

确定切割方向的一种直观方式就是找到3维模型的一种包围盒,然后将包围盒的3条正交边方向作为切割方向。

到目前为止,最简单的一种包围盒是AABB,由于这种包围盒的边方向由世界坐标系的3个轴向决定,随着模型在空间中位置的不同,AABB的3条边方向也会随之改变。Gottschalk给出了一种基于统计方法计算包围盒的公式<sup>[9]</sup>,包围盒的3条边方向实际上是3维模型的3条惯性主轴,将这种方法称为惯性主轴方法(IPA)。

尽管惯性主轴方法可以获得一组唯一确定的正交轴,但是在很多情况下,这组正交轴与人类的视觉感知并不吻合,这样就无法从视觉感知角度对3维模型之间的相似性进行度量。为此,提出了另外一种称为最大法线分布(MND)的正交轴获取方法,正交轴向的确定是通过最大的法线分布来确定的。

(1) 对于每个三角形 $\triangle p^{(k)}q^{(k)}r^{(k)}$ ,其中 $k$ 表示第 $k$ 个三角形。可以计算出它的法向 $N^{(k)}$ ,它实际上是三角形任意两条边的叉乘:

$$N^{(k)} = \frac{p^{(k)}q^{(k)} \times q^{(k)}r^{(k)}}{\|p^{(k)}q^{(k)} \times q^{(k)}r^{(k)}\|} \quad (1)$$

(2) 计算出每个三角形 $a^{(k)}$ 的面积,并将法向相同或者相反的所有三角形面积累加起来。在这里,认为方向相同和相反的法线均具有同一种分布。

(3) 选取具有最大面积的法线分布所在方向为第1条主轴 $b^*$ ,然后从剩余的法线分布中找到具有第二大面积的法线分布方向,将该方向向垂直于点

主轴  $b''$  的平面投影,可以得到正交于  $b''$  的第 2 条主轴  $b''$ 。

(4) 对  $b''$  和  $b''$  进行叉乘,就可以得到第 3 条主轴  $b''' = b'' \times b''$ 。

(5) 为了确定包围盒的中心、半长以及主轴正向,可以将凸壳上的点投影到方向向量的方向上,然后找到每个方向上的最大值和最小值,这几个值就决定了包围盒的大小和位置。

最后,对于每一个惯性主轴,还需要确定正负方向。为此,提出了一个规则:距离中心较远的一侧为正向。

图 2(a)所示包围盒由惯性主轴方法得到的,而图 2(b)所示包围盒是用最大法线方法得到的,可以看出前者更符合人类的视觉感知。

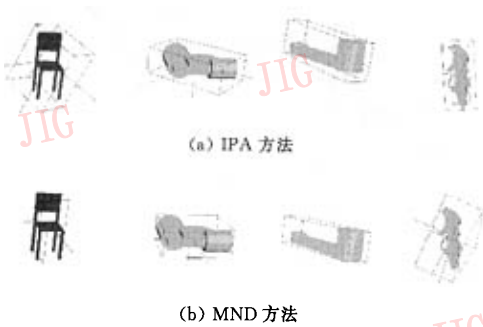


图 2 两种不同方法获得的包围盒示例

实验发现,对于具有明显法线分布的 3 维模型(比如 CAD 模型)来说,最大法线分布方法要好于惯性主轴方法。但是,对于没有明显法线分布的模型(如图 2 最右边一列)来说,由于法线分布的随机性,最大法线分布方法会失败。由于惯性主轴方法描述的是 3 维模型的质量分布情况,所以它可以找到质量分布的对称轴。这样,为了利用这两种方法各自的优点,提出了一种规则,根据模型体积大小在这两种方法之间进行切换,哪个包围盒的体积小就选择哪个包围盒。对这种规则的有效性,曾经用大量的模型给予了验证。

## 4 2 维切片序列的生成方法

对于网格模型来说,2 维切片序列的生成就是用—个平面沿着切割方向逐步与模型之间进行相交求解,最终会生成一系列交点。但是,由于生成的相交点之间并不存在明显的联系,所以还需要根据网格的连接关系对这些相交点进行组织,对于多边形

网格来说,一种直观的方式就是用多边形集对切片进行描述。为此,提出了一种算法,具体步骤如下:

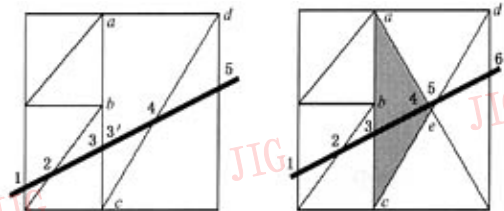
(1) 沿着每一个正交方向分别确定一组平面,这些平面等距且垂直于相应的方向;

(2) 依次计算出每个平面和多边形网格之间的交点序列,并将交点和相交的三角形分别存储在两个不同的数组  $S_{IP}$  和  $S_{IT}$  中。但是,对于同一交点,不能保存两次。

(3) 对于每一个切片,根据这些交点在模型表面之间的邻接关系,将这些交点组织成一组多边形集,具体步骤是:①从  $S_{IP}$  中随机选取一个点,并将它标志为访问过的点;②从剩余没有访问过的相交点中一次选取一个点,考察这个点是否与上一个点相邻,并将该点标志为访问过的点,而所谓相邻与否主要看这两个点是否位于  $S_{IT}$  中同一个三角形的两条不同边上,如果相邻,那么就可以判断这两个点是同一个多边形的两个相邻顶点;③用步骤①中选取的点作为基点,重复执行步骤②,直到  $S_{IP}$  中没有点可以满足步骤②中的条件,至此,所有访问过的点就形成了一个闭环,将它们作为一个多边形的顶点序列;④检查在  $S_{IP}$  中是否还存在没有访问过的点,如果有,那么从步骤①开始重复上述步骤,否则结束多边形集的生成过程。这样,就可以生成切片的一组多边形集,然后进入算法的下一阶段。

(4) 剔除非法多边形。很明显,一个多边形至少由 3 个顶点组成,所以如果存在只包含小于 3 个顶点的多边形,那么就将其剔除。

在执行完上述处理过程之后,就可以得到一系列由多边形组成的切片,但是这种方法只适合结构比较理想的网格模型。对于具有 T 型顶点和边裂缝的模型(如图 3 所示)来说,还需要进一步处理。



(a) T 型顶点

(b) 边裂缝

图 3 T 型顶点和边裂缝情形

中间的横截线表示切割平面。在图 3(a)中,中间的横截线表示切割平面。在图 3(a)中,顶点  $b$  是一个 T 型顶点,它属于左边的多边形顶点,但是却位于右边三角形  $acd$  的一条边上。在图 3(b)

中,灰色区域是边裂缝,它并不属于网格表面的一部分,在这个位置处,左右两边的多边形并没有很好地结合起来。

(1) T 型顶点。如图 3(a)所示,顶点  $b$  就是一个 T 型顶点,它属于左边的多边形顶点,但是却位于右边三角形  $acd$  的一条边上,点 1、2、3、4、5 分别是多边形网格和切割平面之间的相交点。在点 3 所在位置,存在两个重叠交点 3 和  $3'$ ,3 是切割平面和边  $bc$  之间的交点, $3'$  是切割平面和边  $ac$  之间的交点。根据算法步骤 2,只会保存其中的一个交点,而将另外一个交点扔弃掉。这样,如果保留交点 3,那么该算法就不会认为点 3 和 4 属于同一个多边形的两个相邻顶点,这是因为  $bc$  和  $cd$  不是同一个三角形的两条边。相反,如果保留点  $3'$ ,那么就会得到正确的结果。为了克服这种局限性,采取一种特殊的处理:如果存在两个相同的交点,那么同时保存这两个相交点所在的两条边,并对该点给予标识。当算法访问到该点的时候,算法就对交点所在的边进行检查,判断它们是否会属于同一个三角形。

(2) 边裂缝。如图 3(b)所示,灰色区域就是边裂缝,该区域并不属于网格表面的一部分,在这个位置处,左右两边的多边形并没有很好地连接起来。当访问到点 3 时,由于三角形  $ace$  并不是多边形网格的一部分,所以算法就不会将点 4 作为点 3 的一个邻接顶点。为此,增加一个判断:检查这两个点的所在边是否构成一个三角形,如果构成,那么就将这两个点作为一个多边形的邻接顶点。

至此,就可以针对任意的 3 维网格模型获取一系列由多边形集组成的切片序列,图 4 所示为采用这种方法获得的一些结果示例,分别由 13 个切片和 100 个切片组成。



图 4 切片多边形示例

## 5 2 维多边形集之间的相似性度量

从图 4 可以看出,由多边形集构成的切片序列可以表示 3 维模型在特定方向上的形状分布特征,因此可以将 3 维模型的检索问题转换为 2 维多边形集之间的相似性度量,如图 5 所示。

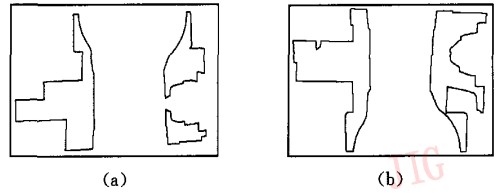


图 5 切片之间的相似性度量示意

针对单个多边形之间的相似性问题,已经提出了很多方法<sup>[10,11]</sup>,但是很难对它们进行扩展来处理多边形集之间的相似性。对此,在形状分布方法<sup>[1]</sup>的基础上,提出了一种 2 维形状分布方法,具体步骤如下:

(1) 对多边形边缘进行均匀采样 对于切片中的多边形集,采用了一种边缘均匀采样策略,如果边的总长度是  $L$ ,采样总点数为  $n$ ,那么对于由两个顶点  $A_i$  和  $A_j$  定义的边来说(其中  $i$  和  $j$  表示顶点序号),采样点数  $k$  和采样点的位置定义如下:

$$k = \frac{n}{L} \times \| A_i A_j \| \tag{2}$$

$$S_i = A_i + i \times \frac{L}{n} D_i$$

其中,  $D_i$  是从  $A_i$  到  $A_j$  之间的归一化向量,采样结果可以用图 6 示意。

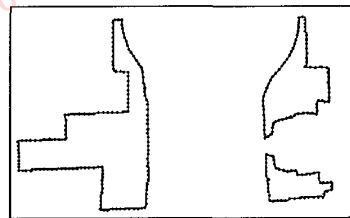


图 6 2 维采样结果示意

(2) 2 维形状分布的生成 Robert 等人介绍了 5 种形状函数  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 、 $A_3$ <sup>[1]</sup>,这里,采用了  $D_2$  函数计算距离分布,由于其他形状函数是针对 3 维情形设计的,所以在此并不适用。图 7 所示为图 5 中的两个多边形集的形状分布。

(3) 相似性度量 类似于三维情形,在进行相似性度量之前需要进行归一化处理。通常,归一化方

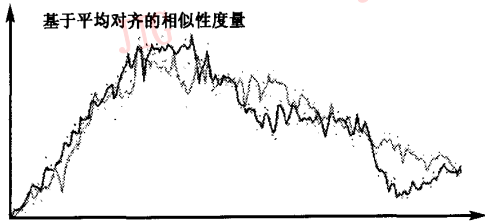


图 7 图 5 所示两个多边形的形状分布

水平轴表示两个随机点之间的距离,纵轴表示具有相同距离的线段数量。黑色曲线是图 5(a)的形状分布,灰色曲线是图 5(b)的形状分布。

法有以下两种:根据最大  $D_2$  距离值进行对齐;根据平均  $D_2$  距离值进行对齐。对于前者,必须对两个形状分布的最大值进行调整,使两者的最大值相同,而后者则是使两者的平均值相同,为了降低噪音的影响,这里采用了后一种方法。这样,最终的相似性可以按照下式进行量化计算。

$$S = \sum_{d=1}^3 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (s_{dij} - k_{dij})^2 \quad (3)$$

其中,  $d$  是切割方向的数量,在这里是 3,  $n$  是沿着一个方向的切片数量,  $m$  是形状分布曲线的直方图数量,  $s$  和  $k$  是特定距离上的概率分布数量。

这种基于切片相似性的方法具有和 3 维形状分布方法相同的优点,即容易实现;对几何噪音不敏感;具有 2 维旋转变换不变性;不需要寻找模型之间的特征对应。

## 6 实验结果与结论

文中的方法在 Windows 平台上用 C++ 语言实现,并对所有的函数进行了封装,可以很方便地由应用程序调用。为了测试这种方法的有效性,建立了 3 维模型库,包含 2700 个多边形网格模型,主要源于 3 维机械零件的模型组成,其中很多模型并不是理想的多边形网格形式,不仅网格中套有网格,而且还包含有一些退化现象,比如裂缝、自相交、多个表面等。图 8 所示为一些检索示例,可以看出,很大程度上,检索出的模型在形状上和人类的视觉感知效果存在着一定程度的近似。有些在视觉上完全不同的形状,主要源于内部存在网格结构。但是,这种方法依然存在一定的局限性。一方面,需要大量的计算时间,主要用于切割计算和不同多边形的识别,另外一个不足就是这种方法在本质上属于一种统计方法,通过统计模型在某个方向上的变化情况来实现模型相似性的检索。

为了降低检索时间,采用以下策略:在预处理的时候,沿着一个轴可以进行很多次切片操作,但是在检索过程中却采用非常少量的几次切片操作,比如仅进行 5~10 次的均匀切片操作。这些切片分别对应于预处理特征库相应位置上的切片。



(b) 检索出的前 6 个最为相似的模型

图 8 部分检索结果示例

基于 2 维切片之间的相似性度量给出的一种新的 3 维模型检索方法,其主要出发点是利用 2 维切片表示 3 维形状,具体包含以下 3 部分内容:(1) 提出了一种最大法线分布方法,主要用于确定与人类视觉感知相吻合的一组可以唯一确定的正交轴;(2) 提出了一种模型切割方法,针对任意的网格模型,可以准确确定切片中所包含的多边形集;(3) 针对多边形集之间的相似性问题,提出了一种 2 维形状分布方法。但是,这种方法依然不能度量模型之间局部形状的相似性,对于这个问题,将在未来的工作中给予关注。

### 参考文献

- 1 Robert O, Thomas F, Bernard C, et al. Shape Distribution[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807~832.
- 2 Mihael A, Gabi K, Hans-Peter K, et al. 3D Shape Histogram

- for Similarity Search and Classification in Spatial Databases[A]. In: Proceedings of 6th International Symposium on Spatial Databases[C], HongKong, China, 1999; 207~228.
- 3 Elad M, Tal A, Ar S. Content based retrieval of VRML objects-an iterative and interactive approach [A]. In: Proceedings of 6th Eurographics Workshop in Multimedia[C]. Manchester, UK, 2002; 107~118.
- 4 Horn B K P. Extended Gaussian images[A]. In: Proceedings of IEEE[C], New Orleans, USA, 1984,72: 1671~1686.
- 5 Zhang, C, Chen T. Indexing and retrieval of 3D models aided by active learning[A]. In: Proceedings of ACM Multimedia 2001 [C], Ontario, Canada, 2001; 615~616.
- 6 Motofumi T S. A Web-based retrieval system for 3D polygonal models[A]. In: Proceedings of Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference [C], Vancouver, Canada, 2001; 2271~2276.
- 7 Hilaga M, Shinaagagawa Y, Kohmura T, *et al.* Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series [C], Los Angeles, USA, 2001; 203~212.
- 8 Sundar H, Silver D, Gagvani, *et al.* Skeleton based shape matching and retrieval[A]. In: Proceedings of Shape Modeling International 2003[C], Seoul, Korea, 2003; 130~142.
- 9 Gottschalk S. Collision queries using oriented bounding boxes [D]. Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, North Carolina, 1999.
- 10 Esther M, Arkin L, Paul C, *et al.* An efficiently computable metric for comparing polygonal shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(3): 209~216.

- 11 Lun H T, Irwin K. A Two-stage framework for polygon retrieval [J]. Multimedia Tools and Applications, 2000, 11: 235~255.



**普建涛** 1974年生。2002年于北京大学计算机系获博士学位,北京大学视觉听觉信息处理国家重点实验室博士后。主要研究方向为计算机图形学、人机交互与虚拟现实技术。

E-mail: pjt@cis.pku.edu.cn



**刘一** 1983年生。现为北京大学视觉听觉信息处理国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为计算机图形学、3维数字几何处理和虚拟现实技术。

E-mail: mm@pku.edu.cn



**查红彬** 1962年生。教授、博士生导师。1990年在日本九州大学工学院获博士学位。主要研究方向为计算机图形学、计算机视觉、虚拟现实、智能机器人系统。

E-mail: zha@cis.pku.edu.cn