

3 维模型形状相似性比较算法综述

章志勇 许芸 凌云 王勋

(浙江工商大学计算机与信息工程学院, 杭州 310035)

摘 要 随着 3 维模型使用得日益广泛, 对 3 维模型检索系统的研究, 近年来日益受到了国内外广大研究人员的关注。3 维模型形状相似性比较算法是 3 维模型检索系统的主要研究问题之一, 很多学者对其进行了深入的研究并提出了很多算法。为了使人们对该领域现状有个概略了解, 首先介绍了 3 维模型检索系统, 同时回顾了近几年来 3 维模型检索技术的发展概况, 并且从 3 维模型检索系统实用性的角度分析了 3 维模型形状相似性比较算法所应该具备的特点; 然后对 3 维模型形状相似性比较算法进行了分类综述, 同时分析了它们的特点, 并对其中的一些算法进行了检索对比实验; 最后归纳了 3 维模型形状相似性比较算法研究所面临的困难和挑战, 指出了进一步研究此问题的发展空间, 并对此问题进行了展望。

关键词 3 维模型检索 各向同性变换 形状比较 旋转不变性

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)08-1317-09

A Shape-based 3D Model Matching Review and Research

ZHANG Zhi-Yong XU Yun LING Yun WANG Xun

(College of Computer Science & Information Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035)

Abstract Since more and more 3D models are developed for applications, the technique for content-based 3D model shape matching become more and more important, and researches have presented kinds of 3D model shape matching algorithms. In this paper, a comprehensive survey of the up-to-date methods and technologies for content-based 3D model shape matching algorithms is presented. The system framework of 3D model retrieval system is first introduced. Then the primary key techniques of 3D model shape matching, including anisotropy transform, coordinate normalization, online-based shape matching, topological-based shape matching, visual-based shape matching, and some. At experimental results with a 3D model database that contains 2 533 3D models, are analyzed the studying progress in this field. Proposes a few weaknesses in 3D model shape similarity matching research field, and future areas of research are also put forward.

Keywords 3D model Retrieval, anisotropy transform, shape matching, rotation invariant

1 引 言

鉴于 3 维模型在人们日常生活、CAD/CAM 计算机动画设计中均有广泛的应用, 因此如何在大量的 3 维模型中高效地检索需要的模型已经成为一个迫切需要解决的问题。目前, 国外对 3 维模型检索已经进行了比较广泛的研究, 例如出现了一些基于网络的 3 维模型检索系统^[1, 2], 并且在近年来的一

些高级别的图像图形会议上均有 3 维模型检索方面的文章发表。国内近几年来对 3 维模型检索系统的研究也取得了较大的进展。

众所周知, 3 维模型检索系统是一个庞大的系统 (如图 1 所示), 一般来说, 3 维模型检索系统包括模型数据库存储、特征提取、索引匹配、用户界面、用户反馈 (知识库) 等模块。其中, 3 维模型的特征提取和索引匹配是 3 维模型检索系统的主要部分之一。

收稿日期: 2006-04-03 改回日期: 2006-07-26

第一作者简介: 章志勇 (1976~), 男, 2000 年毕业于浙江大学机械能源学院获硕士学位, 2005 年获浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室博士学位, 主要研究方向为图像检索、3 维模型检索、数字图像处理。E-mail: zzy@mail.zjhu.edu.cn

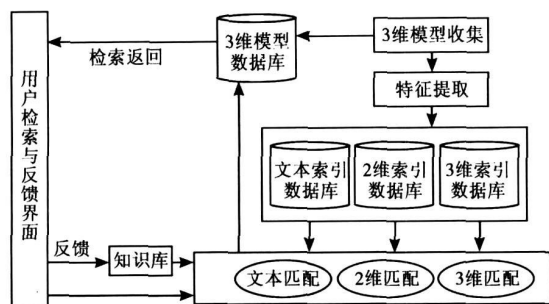


图 1 3维模型检索系统体系结构

Fig 1 3D model retrieval system architecture

3维模型的特征信息包括文本特征、2维(图像)特征和3维特征,它们分别对应了3维模型的文本索引、2维(图像)索引和3维索引。3维模型的文本索引匹配属于关键字匹配范畴;2维索引匹配主要是通过比较投影图像之间的相似性来获得3维模型的相似性;3维索引匹配是通过比较3维模型之间的形状特征来获得3维模型之间的相似性。由于3维模型数据库中的模型数量比较庞大,并且特征复杂,因此基于关键字的3维模型检索已经不能满足需要,如今基于内容的3维模型检索已成为3维模型检索的主要研究方向。由于3维模型的形状是3维模型的一个主要特征,因此3维模型的形状相似性比较已成为3维模型检索的一个主要研究内容。

对于3维模型检索系统来说,3维模型的形状相似性比较算法,除了要能较好地衡量3维模型的形状相似性以及具有较快的运算速度外,还需要具有如下一些特点:

(1) 算法对3维模型的几何条件没有限制,如3维模型的亏格(genus)数量的限制等,这也就是说,算法的几何可计算性要较好。3维模型检索系统需要存储各种形状的3维模型,如果对3维模型加以几何条件的限制,则会降低检索系统的实用性;

(2) 算法对3维模型的坐标系变换具有较好的鲁棒性,由于用户提供的3维模型与数据库中的3维模型以及数据库中不同的3维模型所处的坐标系极有可能不同,因此算法对3维模型的坐标系变换要有较好的鲁棒性;

(3) 算法对3维模型噪声、3维模型网格简化和网格细分要具有较好鲁棒性;

目前,很多学者针对3维模型形状相似性比较这个问题提出了很多种算法,这些算法根据其不同的特点可以进行不同的分类,其中常用的分类方法

有:①根据3维模型网格表示的种类可以将算法分为参数化曲面3维模型形状相似性比较算法、多边形网格3维模型形状相似性比较和多边形混合3维模型形状相似性比较算法;②根据算法利用的3维模型形状特征可以将算法分为基于轮廓的相似性比较算法、基于拓扑的相似性比较算法和基于投影的相似性比较算法。

由于参数化曲面和多边形网格之间在一般条件下可以相互进行转换,因此,若按模型网格表示的种类进行划分,则很多3维模型形状相似性比较算法可以同时属于不同的种类。3维模型的形状特征是3维模型的内在信息特征,它们之间的界限比较明显,本文将根据3维模型的形状特征对3维模型的形状相似性比较算法进行分类综述。

2 3维模型预处理

为了提高3维模型检索系统的检索准确性和检索效率,计算3维模型的形状特征之前一般需要对3维模型进行预处理。3维模型的预处理包括3维模型的坐标系归一化预处理和3维模型各向同性预处理。

2.1 3维模型坐标系归一化

3维模型形状相似性比较算法应该具有一个很重要的特性,即处于不同坐标系下的两个同样的3维模型应该具有相同的形状相似度。对于3维模型检索系统来说,由于用户给出的3维模型所处的坐标系与数据库中的3维模型所处的坐标系,以及数据库中不同的3维模型所处的坐标系极有可能不一致,因此在计算3维模型形状特征之前需要对3维模型坐标系进行归一化。

3维模型坐标系归一化包括坐标系原点归一化、坐标系比例归一化和坐标系方向归一化。对于坐标系原点归一化,可以采用3维模型重心平移的方法来调整坐标系的原点;对于坐标系比例归一化,可以通过对3维模型顶点的最大半径进行归一化来调整坐标系的比例。Kazhdan指出,这两种归一化方法都具有较好的鲁棒性^[3]。对于坐标系方向归一化,大部分文献采用了基于主元分析的方法来调整3维模型的坐标系方向,并且在具体的计算中使用了KI变换。

KI变换是以信号的均方差最小为理论基础的线性矩阵变化。由于3维模型的坐标系旋转变换是

一个非线性的变换, 因此 KI 变换对 3 维模型坐标系旋转归一化的鲁棒性较差。文献 [4] 对大量各种类型的 3 维模型在不同的坐标系方向状态下进行了 KI 变换, 变换后的结果证明了 KI 变换对 3 维模型坐标系方向的归一化是不稳定的, 此外, KI 变换对 3 维模型噪声、网格简化和细分的鲁棒性也较差。

由于主元分析理论本质上是一种线性变换, 因此使用主元分析对 3 维模型坐标系方向进行归一化的鲁棒性较差。如上所述, 对于 3 维模型检索系统来说, 与坐标系方向无关是 3 维模型形状相似性比较算法的一个重要特性, 本文对目前的文献按是否与 3 维模型坐标系方向无关进行了总结 (如表 1 所示)。

表 1 与坐标系旋转无关的算法总结
Tab 1 Rotation invariant algorithm

算法名称	文献
Spherical Harmonic	[3]
Shape Histogram (shells)	[5]
Shape Distributions	[6]
3D-Fourier Descriptors	[7]
3D-Zernike	[8]
MRGs	[9]

文献 [10], [11] 是先通过对所有视点的投影图像进行两两相似性比较, 然后取一个最小的相似距离作为 3 维模型之间的相似距离。从严格意义上讲, 这种两两比较的方法不具有坐标系旋转不变性, 但是当视点密度比较大时, 这种方法对 3 维模型坐标旋转变换还是具有较好的鲁棒性。

2.2 3 维模型各向同性预处理

Kazhdan 等提出了对 3 维模型进行各向同性预处理的观点 [12], 并且通过其检索系统进行了大量的检索实验, 实验结果表明各向同性变换预处理能提高 3 维模型检索系统的效率。设 $P = \{ P_1, \dots, P_j, \dots, P_n \}$ 为 3 维模型的顶点序列, 文献 [12] 提出的各向同性变换矩阵 C_P 如下所示:

$$C_P = \left[\sum_{j=1}^N (P_i - P_j)(P_i - P_j)^T \right]^{-1/2} \quad (1)$$

从文献 [12] 可以看出, 各向同性变换可以对经过比例变换的 3 维模型进行比例归一化 (如图 2 所示), 变换时, 先对 Bunny 模型进行 X 和 Z 轴的随机比例变换; 然后对变换后的模型进行各向同性变换。从变换结果可以看到, Bunny 模型得到了归一化。

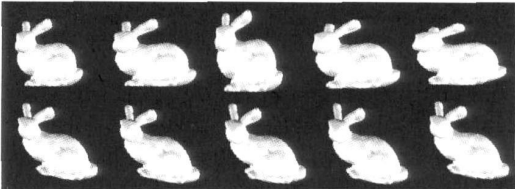


图 2 3 维模型各向同性变换
Fig 2 3D model anisotropy transform result

由于各项同性变换可以对 3 维模型进行比例归一化, 因此可以提高 3 维模型系统的检索准确性。但是文献 [12] 并没有分析 3 维模型坐标系旋转变换对各向同性变化的影响。实际上, 同样一个 3 维模型在不同坐标系方向下的各向同性变换的结果不一致, 其证明如下。

设 3 维模型 M , R 是旋转变换矩阵, M_R 是 M 旋转后的结果。又设 M 的各向同性变换矩阵为 C_M , M_R 的各向同性矩阵为 $C_{M_R}^R$ 。由式 (1) 可得

$$\begin{aligned} C_{M_R}^R &= \left[\sum_{j=1}^N R(P_i - P_j)(P_i - P_j)^T R^T \right]^{-1/2} \\ &= (R^T)^{-1/2} \left[\sum_{j=1}^N (P_i - P_j)(P_i - P_j)^T \right]^{-1/2} R^{1/2} \\ &= (R^T)^{-1/2} C_P R^{1/2} \end{aligned}$$

设 M_R^A 是利用 C_P^R 对 M_R 进行各向同性变换后得到的结果, 那么

$$M_R^A = C_P^R M_R = (R^T)^{-1/2} C_P R^{1/2} \cdot M$$

很显然, M_R^A 与 $R \circ C_P \cdot M$ 不相等, 这说明, 对 3 维模型先进行各向同性变换, 再进行坐标系旋转变换得到的结果与对 3 维模型先进行坐标系旋转变换, 再进行各项同性变换得到的结果不一致。因此, 各向同性预处理需要对 3 维模型进行坐标系方向归一化预处理, 而这正是 3 维模型检索面临的一个棘手的难题。通常可以在各向同性预处理之前, 先计算 3 维模型的形状相似性, 如果相似度超过一个阈值, 那么就不进行各向同性预处理, 否则就进行各向同性预处理。这样就可以比较有效地避免 3 维模型坐标系旋转变换带来的不利因素。

3 基于轮廓的形状相似性比较算法

基于轮廓的 3 维模型形状相似性比较算法是通过计算 3 维模型顶点和网格的分布特征来获得模型的形状相似性。目前, 这类算法有很多, 它们根据其

理论基础大致可以分为基于统计直方图的算法、基于扩展高斯图像的算法、基于函数分析的算法以及其他一些具有各自特点的算法。

3.1 基于统计直方图算法

基于统计直方图算法在 3 维模型形状相似性比较中得到了广泛的应用^[13~17]。直方图算法采用的统计量通常有顶点数量、顶点曲率、网格法线、网格曲率、网格面积和网格体积等。Osada 提出了一种形状分布直方图算法^[6], 这个算法首先用一个形状 (shape) 函数计算 3 维模型的形状分布, 然后统计形状分布特征直方图。该算法采用的形状函数是任意两个顶点之间距离。

由于统计直方图只能大致地衡量 3 维模型的整体形状, 它们并不能有效地计算 3 维模型的局部特征, 因此这类算法的 3 维模型检索准确率较低。此外, 顶点曲率和网格面法线对 3 维模型噪声、坐标系旋转变换的鲁棒性较差; 而且几何矩、顶点数量、网格面积和网格面体积对模型简化和细分的鲁棒性也较差。

3.2 基于扩展高斯图像算法

Horn 于 1984 年首先提出了扩展高斯图像 (extended Gaussian image, EGI) 的概念^[18]。EG 方法是将 3 维模型的每个网格映射为单位球面的一个向量, 这个向量的方向与网格法线的方向相同, 向量的模长等于网格的面积。由于 EGI 是一幅球面图像, 并且包含了 3 维模型网格的信息, 因此可以使用傅里叶分析、球面调和分析等方法来分析 EGI 的特征, 虽然可以通过比较 EGI 的相似性来获得 3 维模型的形状相似性, 但是 EGI 有一个缺陷, 即它只能唯一地表征凸多面体, 并不能唯一地表征凹面体。

为了使 EGI 能唯一地表征凹面体, 有些学者对 EGI 进行了改进。Matsuo 等使用 3 维模型网格的中心和网格的 EGI 来表征 3 维模型, 提出了 MEGI (more EGI) 模型^[19]。Xu 等人提出了 HEGI (Hierarchical EGI) 模型^[20], 该模型首先对 3 维模型进行分解, 然后计算每个分解部分的 EGI, 不同部分之间的相交曲线以及各个部分之间的关系。Moni 等提出了一种参数化 EGI 模型^[21]。Kang 等人提出了 The complex EGI 模型^[22]。

由于 EGI 包含了网格的法线方向, 因此它对 3 维模型坐标系旋转变换以及 3 维模型噪声的鲁棒性较差。此外, 由于 EGI 包含了网格的面积, 因此它对 3 维模型的网格细分以及网格简化的鲁棒性也较差。

3.3 基于函数分析算法

在基于轮廓的 3 维模型形状相似性比较中, 函数分析方法得到了比较广泛的应用。由于在实际中, 很多 3 维模型不符合函数分析的条件, 因此这类方法首先需要对 3 维模型进行采样, 并且采样要符合函数分析的要求。这种 3 维模型的采样过程对算法的检索准确性有较大的影响, 通常采样过程又称为体素化过程^[3]。

目前, 基于轮廓的 3 维模型形状相似性比较算法利用较多的分析函数有傅里叶分析^[7, 23~25]、球面调和分析^[3, 26, 27]以及小波分析等^[28, 29]。

Vranic 提出了一个基于 3 维傅里叶分析的算法^[23], 文献 [23] 采用的体素化过程大致是: 首先用一个立方体包围 3 维模型, 同时使立方体的 3 个面和模型坐标系的 3 个轴线平行, 然后把立方体划分为等份, 最后统计每个格子里的 3 维模型的表面积与模型总表面积的比例, 这些比例数值就是文献 [23] 3 维傅里叶分析的体素。这个算法对 3 维模型的噪声、模型的旋转变换以及 3 维模型的网格简化与细分的鲁棒性都较差。文献 [7] 使用傅里叶描述子来比较闭合 3 维轮廓线的形状相似性, 这个算法虽具有坐标系旋转不变性, 但是这个算法要求 3 维模型的轮廓线是闭合的。Richard 使用傅里叶描述子来描述 3 维模型的边界曲率, 以便获得 3 维模型的形状相似性^[24], 这个算法对模型的噪声、旋转变换以及网格简化和细分的鲁棒性也较差。文献 [25] 同时使用傅里叶描述子和几何矩来描述 3 维模型的相似性, 但是几何矩的计算量比较大, 并且与 3 维模型坐标系方向相关。

Michael 等人提出了一种基于球面调和分析特征向量的算法^[3], 这个球面调和分析特征向量具有 3 维模型坐标系旋转不变性的优点。Michael 通过计算 3 维模型与一组同心球的相交来对 3 维模型体素化, 其体素化的值是二值, 也就是非 0 即 1, 但这种体素化方法对 3 维模型噪声比较敏感, 并且不能有效地利用顶点的径向信息。Marcir 等人基于同样的球面调和分析特征向量, 提出了一种具有旋转不变性的 3D-Zernike 矩^[8]。这个算法是球面调和分析的扩展, 其计算比较复杂。文献 [26] 利用球面调和分析对原子模型的形状进行了分析。文献 [27] 首先对 3 维模型的最大半径顶点进行采样, 然后对采样进行球面调和分析, 最后通过球面调和分析系数来比较 3 维模型的形状相似性, 但这个算法不仅

不能有效利用 3 维模型内部顶点的信息, 并且球面调和分析与 3 维模型的坐标系方向相关。

小波分析在 3 维模型形状相似性比较中也得到了一定的应用^[28, 29], 但是小波分析不但对 3 维模型噪声、坐标系旋转变换、网格细分和网格简化的鲁棒性都不好, 并且小波分析对几何可计算性有较高的要求。

3.4 其他基于轮廓的形状相似性比较算法

除了上述几种算法外, 还有其他一些具有各自特点的基于轮廓的形状相似性比较算法^[30~36]。Flynn 通过对称均匀性来衡量 3 维模型的相似性^[30]。Kazhdan 等人提出了一种通过计算反射对称描述子来衡量 3 维模型相似性的方法^[31]。Krieger 等人使用了一种多参数函数来表示 3 维模型^[32]。这 3 种算法对 3 维模型的旋转变换、模型噪声、网格细分和简化的鲁棒性较差。孙晓鹏等通过比较 3 维模型的主曲线的相似性来获得 3 维模型的相似性^[33]。Li 等人计算 3 维模型的局部特征, 通过局部特征的相似性比较来获得 3 维模型的相似性^[34, 35]。

4 基于拓扑的形状相似性比较算法

基于拓扑的 3 维模型形状相似性比较算法是通过比较 3 维模型拓扑结构的相似性来获得 3 维模型形状的相似性。这类算法采用的方法主要有 Reeb 图和中轴线。

4.1 基于 Reeb 图的拓扑结构计算

由于 Reeb 图能较好地表达 3 维模型的拓扑结构, 因此它在 3 维模型的拓扑描述方面得到了比较广泛的应用。

Hilaga 中提出了一种多尺度 Reeb 图 (multiresolutional reeb graph MRGs)^[9], 文献[9]使用表面测地线距离作为 MRG 的 Morse 函数, 由于表面测地线距离不仅可以有效地克服模型噪声的干扰, 而且与 3 维模型的坐标系方向无关, 因此 MRGs 具有较好的噪声鲁棒性和旋转变换鲁棒性。但是文献[9]的算法要求 3 维模型是连通的 3 维模型。例如, 对于由 4 个轮胎加一个车身组成的组合汽车模型而言, MRG 的计算将会遇到很大的困难。由于文献[36]使用的 Morse 函数与 3 维模型坐标系旋转变换相关, 因此文献[36]提出的算法对 3 维模型旋转变换的鲁棒性较差。文献[37]提出了一种基于拓扑连接图的 3 维模型形状比较方法, 这个算法首先利用 3 维模型的曲面凹凸对 3 维模型进行分割,

然后计算每个分割部分的形状特征。这个算法是基于拓扑的形状相似性算法和基于轮廓的形状相似性算法的结合。但是这种 3 维模型的分割对曲面复杂的 3 维模型来说效果并不理想。

3 维模型 Reeb 图之间的相似距离计算是首先确定结点之间的对应, 然后通过计算结点之间的相似距离来得到 Reeb 图的相似距离。Reeb 图的旋转不变性与 Reeb 图的 Morse 函数有较大的关系, 一般而言, 如果 Morse 函数与 3 维模型的坐标系方向相关, 那么 3 维模型的 Reeb 图就与坐标系旋转相关。此外, 3 维模型的 Reeb 图与它的划分密度也有较大的关系。

4.2 基于中轴线的拓扑结构计算

除了 Reeb 图外, 3 维模型拓扑结构常用的表达方法还有中轴线图^[38, 39]。但是, 由于中轴线图的计算量很大, 可计算性较差, 不仅对 3 维模型的孔、洞比较敏感, 并且对 3 维模型噪声的鲁棒性也较差, 因此在 3 维模型形状相似性比较领域的应用较少。计算中轴线图之间的相似距离时, 首先要确定中轴线图的对应, 然后计算每个对应部分的相似距离, 最后才能得到中轴线图的相似距离。

5 基于投影的形状相似性比较算法

基于投影的 3 维模型形状相似性比较算法是通过比较 3 维模型的投影图像之间的相似性来获得 3 维模型的形状相似性。

Abler 等首先计算 3 维模型在 3 个坐标面上的投影, 然后使用傅里叶描述子来比较投影的形状相似性^[40]。Loffle 等人给出了一个基于投影的 3 维模型检索系统^[41], 这个系统通过比较用户给定的投影图像与 3 维模型在 3 个坐标面上的投影图像的相似性来对 3 维模型进行检索。这两种算法的 3 维模型的投影图像与坐标系方向相关。

Ohbuchi 等人提出了一种首先计算 3 维模型在 42 个视点方向上的正交深度投影, 然后计算每个正交深度投影的通用傅里叶描述子 (generic Fourier descriptors, GFD) 的算法^[19]。由于这个算法的正交深度投影图像包含了 3 维模型的深度信息, 因此它可以较好地比较 3 维模型的形状相似性。Chen 等人给出了一个基于投影的 3 维模型检索系统^[11]。该系统首先计算 3 维模型的一组二值正交投影图像, 然后使用 Zemlin 矩和傅里叶描述子来比较投影图像的形状相似性。

文献[10], [11]的算法通过对所有视点方向的投影图像进行两两比较来克服 3 维模型坐标系方向不一致, 当投影图像密度达到较高的时候, 这种方法具有较好的鲁棒性, 此外, 该算法对 3 维模型的噪声、简化和细分也具有较好的鲁棒性。

6 相似性度量

3 维模型特征计算通常得到一组特征向量, 而 3 维模型相似性比较算法则需要计算特征向量之间的相似距离。在 3 维模型形状相似性比较算法中, 常用的向量距离有 Euclidean 距离^[5]、Manhattan 距离^[11]、Minkowski 距离^[6]和 Hausdorff 距离^[42]。

设 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$ 分别是两个向量, 那么它们的 Euclidean 距离、Manhattan 距离、Minkowski 距离以及 Hausdorff 距离的计算公式如下:

(1) Euclidean 距离

$$D(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

从 Euclidean 距离公式可以看到, 向量的每个分量的权值相同。为了能体现每个向量的权重, 可以在 Euclidean 距离公式中加入相应的权值系统, 也就是加权 Euclidean 距离^[5], 其计算公式如下:

$$D(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n k_i (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

其中, k_i 是特征向量中每个分量的加权系数, k_i 可以根据特征向量的物理意义进行选择。

(2) Manhattan 距离

$$D(X, Y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (4)$$

(3) Minkowski N 次幂距离

$$D(X, Y) = \left(\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^N \right)^{1/N} \quad (5)$$

(4) Hausdorff 距离

$$D(X, Y) = \max_{x \in X} \min_{y \in Y} d(x, y) \quad (6)$$

从上述各种距离 $D(X, Y)$ 的计算公式可以看到, 向量的每个分量的权值相同。为了能体现每个向量的权重, 可以在距离公式中加入相应的权值系统, 也就是加权距离。

7 对比实验分析

为了检验各种算法的检索效果, 对 3 维模型检

索领域内引用率较高的一些算法进行了检索实验分析。实验采用一个包含 2533 个 3 维模型的数据库, 其中的 1253 个模型从 3Dcave 网址^[43]上免费下载, 其他 1280 个模型由 CAD&CG 国家重点实验室崔晨阳博士和其他人员提供。整个 3 维模型数据库由独立人员进行了 3 维模型分类。检索的采用了一个本机检索系统, 系统配置为 P3 600M, 内存为 256M。

本文对一组基于轮廓的形状相似性比较算法进行了检索实验, 这组算法分别是同心球直方图算法^[5]、几何形状分布直方图算法^[6]、最大半径球面调和和分析算法^[27]、具有旋转不变性的球面调和特征向量算法^[3]和扩展高斯图像^[18]的算法。在扩展高斯图像算法的检索实验中, 使用了与坐标系旋转无关的球面调和特征向量计算 EG 的特征, 整个实验结果如图 3 所示。

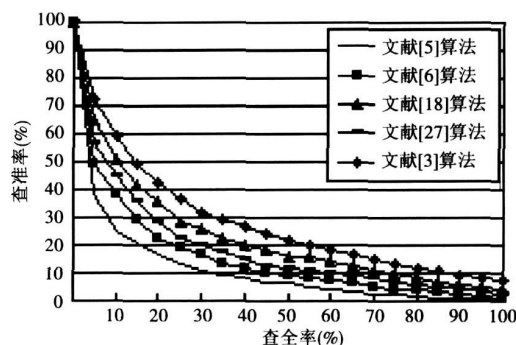


图 3 基于轮廓的算法的检索结果

Fig 3 3D model retrieval result of online-based 3D model matching algorithm

从图 3 可以看到, 文献[5], [6]的算法的检索准确性较低, 这个由于基于统计直方图的算法只能大致衡量 3 维模型整体形状, 它们并不能有效的比较 3 维模型的局部形状相似性。文献[27]的算法由于与坐标系旋转相关, 并且只是使用 3 维模型的最大半径顶点的特征, 因此这个算法的检索准确性也不理想。扩展高斯图像算法由于采用了具有旋转不变性的球面调和特征向量, 因此该算法对坐标系旋转具有较好的鲁棒性, 但是, 由于 EG 对凹面体不唯一, 因此, 这个算法检索效率一般。文献[3]算法的检索效率最高, 这个说明了球面调和特征向量能较好地用于 3 维模型的形状相似性比较。由于文献[3]的特征计算加检索时间不超过

6 §, 因此检索速度是可以接受的。

此外, 还对文献 [10], [11] 的算法进行了检索实验, 实验结果如图 4 所示。

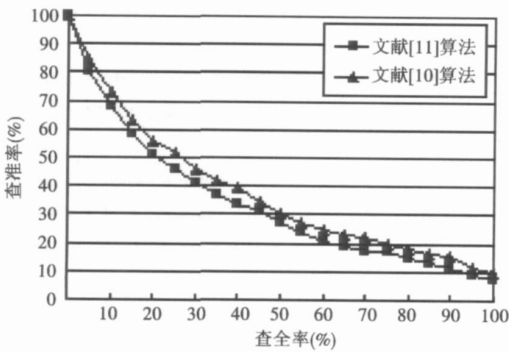


图 4 基于投影的算法的检索结果

Fig 4 3D model retrieval result of visual-based 3D model matching algorithm

从图 4 可以看到, 文献 [10] 算法的检索准确性要高于文献 [11] 算法的检索效率, 这个主要是因为文献 [10] 采用了正交深度投影作为 3 维模型的投影图像, 而文献 [11] 算法采用的是二值正交投影图像的缘故。文献 [10]、[11] 的检索准确性均好于文献 [3] 的检索准确性。此外, 在检索实验中, 由于文献 [10]、[11] 的特征计算加检索时间均不高于 8 §, 因此检索速度是可以接受的。

本文还对文献 [9] 的算法进行了 3 维模型检索实验, 但是由于这个算法要求 3 维模型是连通 3 维模型, 其对于非连通 3 维模型首先需要进行连通处理, 因此算法的计算复杂性比较高。实验结果如图 5 所示。从图 5 可以看到, 算法的检索实验效果并不是比较理想, 检索的准确性较低。

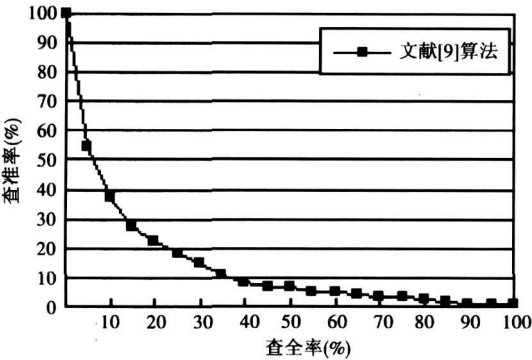


图 5 基于拓扑的算法的检索结果

Fig 5 3D model retrieval result of topological-based 3D model matching algorithm

8 总结与展望

综上所述, 3 维模型形状相似性比较算法是 3 维模型检索系统的一个主要研究内容。目前, 很多学者已提出了很多 3 维模型形状相似性比较算法, 这些算法从不同的角度分析 3 维模型的几何特征, 并比较 3 维模型的形状相似性。但是, 也可以看到, 大部分算法缺乏对 3 维模型进行整体到局部的形状相似性比较。此外, 大部分形状相似性比较算法并没有考虑将 3 维模型形状特征与 3 维模型的其他信息特征进行有机融合。

就 3 维模型的形状相似性比较而言, 笔者认为有以下几个方面需要进一步的研究和分析:

(1) 研究各种有效的 3 维模型形状相似性比较算法。虽然很多学者提出了很多高效的 3 维模型相似性比较算法, 但是继续研究和设计更加高效的 3 维模型形状相似性比较算法依然是 3 维模型检索系统的主要研究方向之一。3 维模型形状相似性比较算法包括 3 维模型形状特征计算和特征相似度计算两个部分, 而研究高效的 3 维模型形状特征计算方法以及与之相适应的特征相似度计算方法则是 3 维模型检索系统目前和以后重要的研究内容之一。

(2) 研究具有层次结构、能支持不同层次细节相似评价的表征结构。3 维模型的层次结构以及层次细节相似评价表征结构的研究内容主要包括: ①研究如何合理定义和划分 3 维模型的层次信息表征结构, 同时, 使所划分的层次信息表征结构能保证同一层次内的局部信息具有相对独立性, 不同层次内的信息具有关联性; ②研究使用 3 维模型的层次信息表征结构来比较 3 维模型之间的形状相似性。

(3) 3 维模型的形状相似性比较包括对等层次信息表征结构的相似性比较和不对等层次信息表征结构的相似性比较。通常可使用 3 维模型对等的层次信息表征结构来比较 3 维模型同一层次的相似性, 这样根据不同层次的信息表征结构就可以对 3 维模型进行局部到整体形状相似性比较。可使用不对等的层次信息表征结构来比较 3 维模型不同部分的形状相似性, 因不对等的层次信息表征结构的比较可以对 3 维模型进行局部与整体的形状相似性比较。

(4) 研究有效的 3 维模型的综合描述数据结构。3 维模型的形状特征只是 3 维模型特征的一个

方面, 而将 3 维模型形状特征与 3 维模型其他类型的特征信息进行有机的结合, 用于比较 3 维模型的相似性, 则是 3 维模型检索系统的重要研究方向之一。

3 维模型所内涵的信息有很多, 每种具体的信息又包含了不同细节层次的特征信息, 而把这些信息采用有效的数据结构综合在一起则是提高 3 维模型检索效率的一个有效途径。由于树形结构能有效地描述父子层次、兄弟对等层次这种类型的信息, 因此寻找有效的树形结构, 用于描述 3 维模型的各种特征信息是 3 维模型相似性比较算法的一个研究内容。将 3 维模型形状相似性比较算法所计算的 3 维模型形状特征有效地融合入 3 维模型综合描述数据结构不仅有利于提高 3 维模型的检索准确性, 同时也有利于 3 维模型检索反馈。

参考文献 (References)

- PSRAQ EB/OL. <http://shape.cs.princeton.edu/search.html>
- CCCQ EB/OL. <http://meku01.inf.uni-konstanz.de/>
- Michael K, Thomas F, Szirm R. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors [A]. In: Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing [C], Aachen, Germany, 2003. 156 ~ 164.
- Zhang Zhi-yong. Research on 3D Model Geometry Shape Similarity Matching [D]. Ph.D. Dissertation, Hangzhou: Zhejiang University, 2003. [章志勇. 3 维模型几何相似性比较的研究 [D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2005. 41.]
- Ankerst M, Kastenmuller G, Kriegel H P, et al. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases [A]. In: Proceedings of 6th International Symposium on Advances in Spatial Databases (SSD) [C], Hong Kong, China, 1999. 207 ~ 228.
- Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807 ~ 832.
- Zhang D S, Lu G J. A comparison of shape retrieval using Fourier descriptors and short time Fourier descriptors [A]. In: Proceedings of the Second Pacific Rim Conference on Multimedia [C], Beijing, China, 2001. 855 ~ 860.
- Marcin N, Reinhard K. 3D Zernike descriptors for content based shape retrieval [A]. In: Proceedings of the Eighth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications [C], Seattle, Washington, USA, 2003. 216 ~ 225.
- Hilega M, Shinagawa Y, Kolmura T, et al. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes [A]. In: Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2001) [C], Los Angeles, CA, USA, 2001. 203 ~ 212.
- Ohbuchi R, Akazawa M, Takei T. Retrieving 3D shapes based on their appearance [A]. In: Proceedings of the 5th ACM SIGMM International Workshop on Multimedia Information Retrieval [C], Berkeley, California, USA, 2003. 39 ~ 45.
- Chen D Y, Tian X P, Shen Y T, et al. On visual similarity based 3D model retrieval [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 223 ~ 232.
- Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Shape matching and anisotropy [J]. ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH), 2004, 23(3): 623 ~ 629.
- Mokhtarian F, Albasri S. Robust and efficient shape indexing through curvature scale space [A]. In: Proceedings of the 6th British Machine Vision Conference [C], Edinburgh, England, 1996. 53 ~ 62.
- Tange Kler J W, Velkamp C. Polyhedral model retrieval using weighted point sets [J]. International Journal of Image and Graphics, 2003, 4(1): 209 ~ 229.
- Vandewoort J P, Couillet V, Daoudi M. A practical approach for 3D model indexing by combining local and global invariants [A]. In: Proceedings of 1st International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission [C], Padova, Italy, 2003. 644 ~ 647.
- Zhang Zhi-yong, Pan Zhi-geng, Li L. Progressive similarity matching algorithm for 3D shape models [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(8): 1760 ~ 1765. [章志勇, 潘志庚, 李黎. 累进 3 维模型相似性匹配算法 [J]. 计算机辅助设计与计算机图形学学报, 2005, 17(8): 1760 ~ 1765.]
- Pan X, Zhang Y, Zhang S Y, et al. Radius normal histogram and hybrid strategy for 3D shape retrieval [A]. In: Proceedings of International Conference on Shape Modeling and Applications [C], Hangzhou, China, 2005. 372 ~ 377.
- Hom B. Extended Gaussian image [J]. Proceedings of IEEE, 1984, 72(12): 1671 ~ 1676.
- Hiroshi M, Akira J. 3D object recognition using MBGI model from range data [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition [C], Jerusalem, Israel, 1994. 843 ~ 846.
- Xu J, Suk M, Ranka S. Hierarchical EGI: A new method for object representation [A]. In: Proceedings of 3rd International Conference on Signal Processing [C], Beijing, China, 1996. 926 ~ 929.
- Moni S. A closed-form solution for the reconstruction of a convex polyhedron from its extended Gaussian image [A]. In: Proceedings of International Conference on Pattern Recognition [C], Atlantic City, New Jersey, USA, 1990. 223 ~ 226.
- Kang S B, Ikeuchi K. Determining 3-D object pose using the complex extended Gaussian image [A]. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Maui, HI, USA, 1991. 692 ~ 694.
- Vannic 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 [C], Budapest, Hungary, 2001. 271 ~ 274.
- Richard C W, Hemami H. Identification of three dimensional objects

- using Fourier descriptors of the boundary curve [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1974, 4(4): 371~378
- 25 Reeves A P, Prokop R J. Three dimensional shape analysis using moments and Fourier descriptors [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(6): 937~943.
- 26 Nelson L, Gewoff D E. Spherical harmonic molecular surfaces [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1988, 8(4): 42~50.
- 27 Vranic D V, Saupe D, Richter J. Tools for 3D object retrieval: Kahnen-Loeve transform and spherical harmonics [A]. In: Proceedings of IEEE Workshop Multimedia Signal Processing [C], Leipzig, Germany, 2001: 293~298
- 28 Gain J, Scott J. Fast polygon mesh querying by example [A]. In: Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '99) [C], Los Angeles, CA, USA, 1999: 241~247
- 29 Wu X, Bhanu B. Gabor wavelet representation for 3D object recognition [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 6(1): 47~64
- 30 Flynn P J. 3-D object recognition with symmetric models: Symmetry extraction and encoding [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(8): 814~818.
- 31 Kazhdan M, Chazelle B, Dobkin D, et al. A reflective symmetry descriptor for 3D models [J]. Algorithmica, 2003, 38(1): 201~225.
- 32 Kriegel H P, Schmidt T, Seidl T. 3D similarity search by shape approximation [A]. In: Proceedings of Fifth International Symposium on Large Spatial Databases [C], Berlin, Germany, 1997: 11~28.
- 33 Sun Xiaopeng, Li Hua. 3D shape description with principal curve [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(1): 14~20 [孙晓鹏, 李华. 均匀分割主曲线的三维形状描述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(1): 14~20]
- 34 Liu Y, Zha H, Qin H. Shape topics: a compact representation and new algorithms for 3D partial shape retrieval [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '06) [C], New York, USA, 2006: 539~542
- 35 Liu Y, Zha H, Qin H. The Generalized Shape distributions for shape matching and analysis [A]. In: Proceedings International Conference on Solid Modeling and Applications (SM '06) [C], Matsushima, Japan, 2006: 14~16.
- 36 Xiao Y, J. Werghi N, Sieben P. A topological approach for segmenting human body shape [A]. In: Proceedings of 12th International Conference on Image Analysis and Processing [C], Mantova, Italy, 2003: 82~87.
- 37 Pan Xiang, Zhang San-Yuan, Zhang Yin. 3D model retrieval based topology connection graph [J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(9): 1250~1255 [潘翔, 张三元, 张引. 一种基于拓扑连接图的三维模型检索方法 [J]. 计算机学报, 2004, 27(9): 1250~1255]
- 38 Foskey M, Lin M C, Manocha D. Efficient computation of a simplified medial axis [A]. In: Proceedings of the Eighth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications [C], Seattle, Washington, USA, 2003: 96~107.
- 39 Culver T, Keyser J, Manocha D. Accurate computation of the medial axis of a polyhedron [A]. In: Proceedings of Symposium Solid Modeling [C], Ann Arbor, Michigan, United States, 1999: 179~190.
- 40 Auber K, Snyder W E, Burkhart 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.
- 41 Löffler J. Content-based retrieval of 3D models in distributed web databases by visual shape information [A]. In: Proceedings of International Conference on Information Visualization [C], London, UK, 2000: 82~88.
- 42 Chen Ying, Hang Chongzhao. Improved 3D model matching based on Hausdorff distance [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(3): 326~331. [陈莹, 韩崇昭. 基于 Hausdorff 距离的 3 维模型匹配的改进方法 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(3): 326~331.]
- 43 3D Cafe EB/OL. <http://www.3dcafe.com>