

一种基于球面调和描述子的 3 维模型相似性比较算法

章志勇 杨柏林

(浙江工商大学计算机与信息工程学院, 杭州 310035)

摘要 提出了一种基于球面调和描述子的 3 维模型相似性比较算法。首先,对 3 维模型进行一分为二的递归分解,然后对每次递归分解得到的 3 维模型顶点集合进行球面映射得到其球面图像,最后计算所有球面图像的球面调和描述子得到 3 维模型的特征二叉树。通过对 3 维模型特征二叉树进行相似性比较可以得到 3 维模型的相似性。实验结果表明,该算法不仅能较好地比较 3 维模型相似性,而且对坐标系旋转变换、模型噪声、网格简化和细分具有较好的鲁棒性。

关键词 3 维模型检索 球面调和分析 特征二叉树

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)03-0541-05

A 3D Model Similarity Matching Algorithm Based on Spherical Harmonics Descriptor

ZHANG Zhi-yong, YANG Bai-lin

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

Abstract A 3D model similarity matching algorithm based on spherical harmonics descriptor is proposed in this paper. We first use recursive bisection to partition 3D models, and then we get spherical images by mapping partitions into concentric spheres, last we calculate spherical harmonics descriptors of spherical images to get feature binary trees of 3D models. We can get the similarity among 3D models by matching the similarity among feature binary trees. The experimental results indicate that this approach is robust against rotation transform, noise, model degeneracy etc., and achieves perfect performance.

Keywords 3D model retrieval shape matching Spherical Harmonics descriptors

1 引言

3 维模型在人们的日常生活、计算机动画设计和 CAD/CAM 中均有非常广泛的应用,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。3 维模型相似性比较算法是 3 维模型检索系统的主要研究方向之一,很多学者对此进行了研究,并且提出了很多算法。这些算法根据其计算的 3 维模型特征信息可以分为基于视觉的 3 维模型相似性比较算法、基于拓扑的 3 维模型相似性比较

算法和基于轮廓的 3 维模型相似性比较算法。

基于视觉的 3 维模型相似性比较算法通过比较 3 维模型在各个方向的视觉图像的相似性来获得 3 维模型之间的形状相似性。Chen^[1]首先计算 3 维模型一系列的二值正交投影图像,然后使用 Zernike 矩和傅里叶描述子来比较这些投影图像的相似性,最后通过投影图像的相似性来获得 3 维模型的形状相似性。基于视觉的 3 维模型相似性比较算法是从 3 维模型的视觉外观上比较 3 维模型的相似性,这种算法对于具有复杂内部结构的 3 维模型检索准确性较低。

基于拓扑的 3 维模型相似性比较算法通过比较

收稿日期:2005-08-29;改回日期:2005-12-12

第一作者简介:章志勇(1976~),男,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: firerain@cad.zju.edu.cn

3 维模型的拓扑结构特征来获得 3 维模型之间的相似性。Hilaga^[2] 首先使用表面测地线距离函数作为 Morse 函数来构建 3 维模型的多尺度 Reeb 图, 然后通过比较 3 维模型的多尺度 Reeb 图来获得 3 维模型的相似性。表面测地线距离函数不仅可以有效地克服模型噪声的干扰, 而且与模型坐标系方向无关。但是这个算法要求 3 维模型是连通 3 维模型, 如何有效地提取各种类型的 3 维模型的拓扑结构特征是这类算法的一个难点所在。

基于轮廓的 3 维模型相似性比较算法通过直接计算 3 维模型顶点和网格的分布来获得 3 维模型之间的相似性。这类算法能较好地比较具有复杂内部结构的 3 维模型的形状相似性。

统计直方图在 3 维模型的轮廓相似性比较中得到了较为广泛的应用^[3,4]。它具有计算速度快的优点, 但是这种方法只能粗略地比较 3 维模型的整体形状。扩展高斯图像 (EGI-extended Gaussian image) 在 3 维模型的轮廓特征计算中得到了应用^[5], 但是 EGI 并不能唯一地表征凹面体, 为此, 有些学者对 EGI 进行了改进^[6]。由于 EGI 包含了 3 维模型的网格面积和法线向量, 因此这种方法对模型的噪声以及网格简化和细分的鲁棒性较差。Vranic^[7] 采用球面调和系数来比较 3 维模型的轮廓相似性。由于球面调和系数与 3 维模型的坐标系方向相关, 因此 Vranic 在算法中采用主元分析来调整 3 维模型的坐标系方向, 但是基于主元分析的 3 维模型坐标系调整是不稳定的^[8]。Michael 使用了一种与 3 维模型坐标系方向无关的球面调和系数来比较 3 维模型的相似性^[8]。这个算法的体系化方法是计算 3 维模型与同心球的二值化相交, 这种体系化方法不仅对模型噪声的鲁棒性较差, 而且不能有效地利用 3 维模型的轮廓特征。小波分析在 3 维模型的相似性比较中也得到了应用^[9], 但是小波分析对模型的噪声、旋转、网格细分和简化的鲁棒性都不好。

对于 3 维模型检索系统, Kazhdan 提出了 3 维模型各向同性预处理的观点^[10], 并且认为各向同性预处理可以提高 3 维模型检索的准确性。

2 3 维模型相似性比较

2.1 球面调和描述子

球面调和描述子 (SHD-spherical harmonics

descriptor) 是球面坐标系上的一种函数描述子, 本文的球面坐标系如图 1 所示。

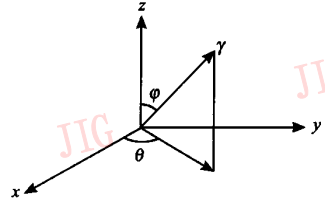


图 1 3 维模型坐标系

Fig. 1 Spherical coordinate

设球面信号为 $f(\theta, \varphi)$, 本文的球面调和描述子如下:

$$a_{n,m} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin(\theta) f(\theta, \varphi) \bar{Y}_n^m d\theta d\varphi \quad (1)$$

$$Y_n^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos(\theta)) e^{im\varphi} \quad (2)$$

$$SH_n(\theta, \varphi) = \sum_{m=-n}^n a_{n,m} Y_n^m(\theta, \varphi) \quad (3)$$

$$SHD = \left\{ \frac{\|SH_1(\theta, \varphi)\|}{\|SH_0(\theta, \varphi)\|}, \frac{\|SH_2(\theta, \varphi)\|}{\|SH_0(\theta, \varphi)\|}, \dots \right\} \quad (4)$$

式中, $P_n^m(x)$ 是拉各朗日多项式。

从 SHD 的计算公式可以看出, SHD 实际上是球面信号在每个频带 n 下能量总和的比例, 这个频带能量总比例和与 3 维模型的坐标系旋转无关, 并且与 3 维模型坐标系比例无关。

2.2 3 维模型特征二叉树

为了能对 3 维模型进行整体到局部的相似性比较, 设计了一种 3 维模型特征二叉树。在特征二叉树中, 不同层次的结点包含了 3 维模型不能细节层次的轮廓特征信息。如图 2 所示, 3 维模型特征二叉树的根结点是第 0 层结点, 它包含了 3 维模型的整体轮廓形状特征, 二叉树中层次越高的结点包含了 3 维模型越局部的轮廓特征信息。

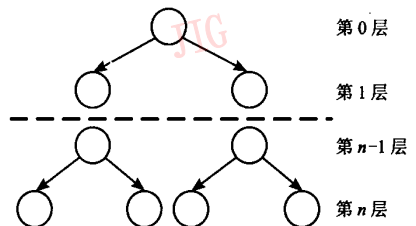


图 2 3 维模型特征二叉树

Fig. 2 Feature bin-tree of 3D model

首先对3维模型的顶点集合进行一分为二的递归分解,然后把分解后的顶点子集映射到一系列的同心球面上,可以得到一系列的球面投影图像,最后计算所有球面投影图像的SHD得到3维模型的特征二叉树。

设 p_c (下角c代表center)是3维模型中心, $L(p, p_c)$ 是模型顶点 p 和 p_c 的距离。顶点集合

$$P(r_1, r_2) = \{p \mid r_1 < L(p, p_c) \leq r_2, r_1 < r_2\} \quad (5)$$

记半径为 r_2 球面为 S_{r_2} ,首先把 S_{r_2} 按经纬线均匀划分,所有经纬网格的权值为0,然后把 $P(r_1, r_2)$ 的所有顶点按极坐标方向映射到球面 S_{r_2} 上,并且经纬网格的权值等于映射到经纬网格内的顶点的最大半径。这样可以得到球面投影图像 $PRO(r_1, r_2)$ 。

设特征二叉树的某个结点 K 包含的顶点集合为 $P(r_1, r_2)$,它的球面投影图像为 $PRO(r_1, r_2)$ 。设 $r = (r_1 + r_2)/2$,把 $P(r_1, r)$ 和 $P(r, r_2)$ 作为 K 结点的左右子结点的顶点集合,这样,采用极坐标方向投影就可以得到 K 左右子结点的球面投影图像 $PRO(r_1, r)$ 和 $PRO(r, r_2)$ 。

设 r_{min} 和 r_{max} 分别是3维模型顶点集合的最小半径和最大半径。把 $PRO(r_{min}, r_{max})$ 作为特征二叉树根结点的球面投影图像,然后采用上述递归细分方法,就可以得到一颗包含3维模型整体到局部轮廓特征的球面投影图像二叉树。

由于球面投影图像二叉树中的每一幅球面投影图像已经是按经纬线网格划分,因此可以首先使用式(1)计算球面投影图像的球面调和系数,然后根据式(3)计算 $SH_n(\theta, \varphi)$,最后根据式(4)可以得到球面投影图像的SHD。计算完所有球面投影图像的SHD后,就得到了3维模型的特征二叉树,这颗特征二叉树包含了3维模型的整体到局部的轮廓特征。

从上述3维模型特征二叉树的计算可以看到,3维模型的顶点分布密度对特征二叉树的鲁棒性有较大的影响,在计算3维模型特征二叉树之前需要对3维模型进行顶点采样,以提高3维模型的顶点分布密度。综上所述,本文的特征二叉树计算步骤如下:

(1) 对3维模型进行顶点采样,提高其顶点分布密度,从而提高3维模型顶点分布的均匀性。

(2) 对3维模型的顶点集合进行一分为二的递归分解,然后把分解得到的顶点子集映射到一系列

的同心球面上得到一系列的球面投影图像。

(3) 计算所有球面投影图像的球面调和描述子SHD,得到3维模型的特征二叉树。

3 3维模型检索实验分析

为了对比本文算法与其他一些文献算法的检索效果,实现了一个本机的3维模型检索系统,对本文的算法和其他一些文献的算法采用共同的3维模型数据库进行了检索实验,并且根据实验结果计算查全率(Recall)与查准率(Precise)的对比图,查全率和查准率的定义如下。

$$\begin{cases} Recall = \frac{\text{检索的相关模型}}{\text{数据库中所有相关模型}} \\ Precise = \frac{\text{检索的相关模型}}{\text{所有的检索返回模型}} \end{cases} \quad (6)$$

查全率用于衡量检索返回的正确模型占整个数据库相关模型的比例。查准率表示在所有检索返回结果中,正确检索的3维模型的比例。实验中,机器的配置为P III 600M, 256M内存。数据库包含了2533个3维模型,其中1253个模型从3Dcafe网址免费下载^[11],其他1280由CAD&CG国家重点实验室提供,整个3维模型数据库由独立人员进行了分类。

3.1 3维模型检索实验

对本文算法、几何分布直方图算法^[4]、球面调和特征向量算法^[8]和视觉图像算法^[2]进行了检索实验,实验结果如图3所示。从图3可以看到,由于查全率越大,检索系统需要返回的检索模型集合越大,因此查准率会随查全率单调下降。此外,本文算法与上述其他几种算法相比,3维模型检索的准确性有了较大的提高。与文献[8]的算法相对比,本文算法的检索准确性提高了

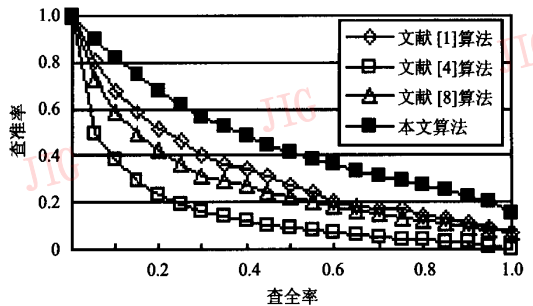


图3 3维模型检索实验结果

Fig.3 Retrieval performance result

18.6%，这个说明了本文算法的特征二叉树能较好地体现 3 维模型的轮廓特征。与文献[2]的算法相对比，本文算法的检索准确性提高了 12.3%，这说明了本文算法能较好地比较 3 维模型的内部结构的相似性。

3.2 鲁棒性实验

对本文算法进行 3 维模型坐标系旋转、模型噪声、3 维模型网格简化和细分鲁棒性实验。

(1) 模型噪声测试 首先对 3 维模型在 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向分别加入 -6% ~ +6% 的随机噪声，然后对加入噪声后的 3 维模型进行检索实验分析。如图 4 所示，图 4 是对 Bunny 模型加入噪声后的结果。

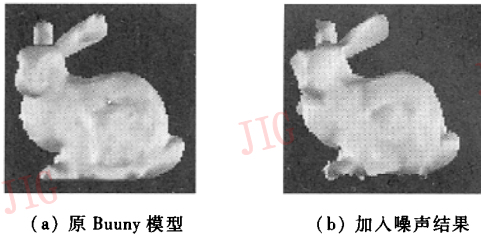


图 4 噪声加入结果

Fig. 4 Noise addition result

(2) 模型细分简化实验 首先对 3 维模型进行顶点简化，并且简化后模型的顶点数为原模型顶点数的 20% ~ 50%，然后对简化后的模型进行检索实验分析。图 5 是对 554 个顶点的 Bunny 模型进行简化后结果。

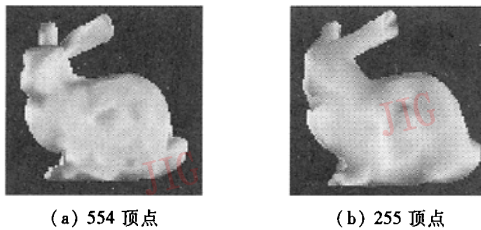


图 5 顶点简化结果

Fig. 5 Simplification result

(3) 坐标系旋转实验 首先对 3 维模型的 X、Y 和 Z 轴分别随机旋转一个角度，然后对旋转后的 3 维模型进行检索。

鲁棒性实验的结果如图 6 所示，从图 6 可以看到，算法对模型噪声、3 维模型坐标系旋转、模型网格简化和细分具有较好的鲁棒性。

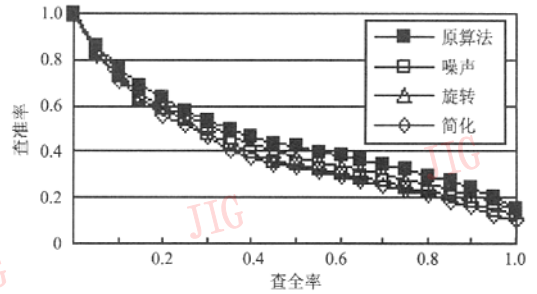


图 6 3 维模型检索鲁棒性实验结果

Fig. 6 Robustness evaluation

3.3 各向同性预处理检索实验

Kazhdan 提出了在 3 维模型检索系统中对 3 维模型进行各向同性预处理的观点，并且指出 3 维模型各向同性预处理可以提高 3 维模型检索的准确性^[10]。Kazhdan 提出的各向同性变换矩阵如下：

$$C_P = \left[\sum_{i,j=1}^N (p_i - p_j)(p_i - p_j)^T \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

采用文献[10]的方法对本文算法进行了各向同性预处理检索实验，并且把检索实验结果与图 3 检索实验结果进行了对比，实验对比结果如图 7 所示，图中 γ 为各向同性因子^[10]。

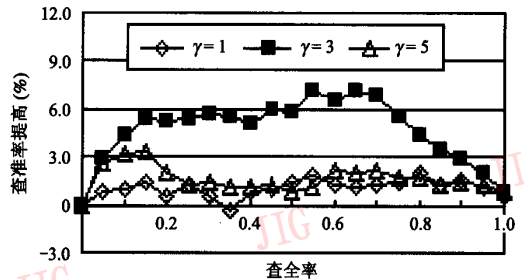


图 7 各向同性预处理检索实验结果

Fig. 7 Anisotropy experiment result

从图 7 可以看到，各向同性预处理可以提高本文算法的检索准确性，当指数等于 3 时，检索准确性在原来的基础上额外提高了将近 4.9%。

4 结论

在检索实验中，本文算法的 3 维模型特征计算的平均时间为 4.2s，根据 3 维模型的特征进行索引检索的平均时间为 1.1s；文献[8]的特征计算的平均时间为 3.8s，根据 3 维模型的特征进行索引检索的平均时间为 1.04s。从时间统计可以看到，本文

算法具有较好的运行速度。

从上述检索实验结果可以看到,本文提出的基于球面调和描述子的3维模型相似性比较算法可以较好地比较3维模型的相似性,并且具有较好的3维模型坐标系旋转变换、模型噪声、模型网格简化和细分的鲁棒性。此外,引入各向同性预处理可以提高本文算法的检索准确性。

参考文献 (References)

- 1 Chen D Y, Tian X P, Shen Y T, *et al.* On visual similarity based 3D model retrieval [A]. In: Computer Graphics Forum [C], Spain, Granada, 2003, 22(3): 223 ~ 232.
- 2 Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T, *et al.* Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH [C], Los Angeles, California, USA, 1999: 203 ~ 212.
- 3 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.
- 4 Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, *et al.* Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807 ~ 832.
- 5 Horn B. Extended gaussian image [J]. Proceedings of IEEE, 1984, 72(12): 1671 ~ 1686.
- 6 Hiroshi M, Akira I. 3D object recognition using MEGI model from range data [A]. In: IEEE International Conference on Pattern Recognition [C], Jerusalem, Israel, 1994: 843 ~ 846.
- 7 Vranic D V, Saupe D, Richter J. Tools for 3D object retrieval: Karhunen-loeve transform and spherical harmonics [A]. In: Proceedings of 2001 Workshop Multimedia Signal Processing [C], Cannes, France, 2001: 293 ~ 298.
- 8 Michael K, Thomas F, Szymon 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, Session 6: 156 ~ 164.
- 9 Wu X, Bhanu B. Gabor wavelet representation for 3D object recognition [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 6(1): 47 ~ 64.
- 10 Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Shape matching and anisotropy [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 623 ~ 629.
- 11 3Dcafe [DB/OL]. <http://www.3dcafe.com>.