

基于径向夹角直方图的3维模型检索

潘翔¹⁾ 郑河荣¹⁾ 陈启华²⁾

¹⁾(浙江工业大学软件学院, 杭州 310014) ²⁾(浙江工业大学教务处, 杭州 310014)

摘要 针对表面法向存在的姿态敏感问题,提出了以法向和极半径构造旋转不变的径向夹角几何特征。在此基础上,结合模型极半径定义径向夹角直方图应用于3维模型检索。算法首先对模型采用一系列同心球进行分解。对落入每个球环的点,计算径向夹角用于描述其局部几何属性。最后结合极半径和径向夹角构造旋转不变直方图特征。此外,针对网格表面点随机采样存在的分布不均匀问题,采用了体素化使采样点在表面分布更为均匀。实验结果表明,径向夹角直方图在检索准确率和检索效率方面要优于其他类似的直方图。

关键词 法向 极半径 径向夹角直方图 3维模型检索

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)08-1532-06

3D Shape Retrieval by Radius-angle Histogram

PAN Xiang¹⁾, ZHENG He-rong¹⁾, CHEN Qi-hua²⁾

¹⁾(College of Software, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

²⁾(Dean's Office, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract Generally, normal based shape histogram feature, such as Complex Extend Gaussian Image, is rotation-variant for 3D shape. This paper proposed a new kind of normal-based shape signature, namely Radius-Angle, which can remain invariant under rotation. Then, the Radius-Angle Histogram(RAH) is constructed to describe shape contents and used for 3D shape retrievals. The RAH shape descriptor first uses a series of concentric spheres to capture the point distribution information of the given model. Then for points in each concentric sphere, the Radian Normal-Angle is computed to extract the local geometry features. Finally, the Radius-Normal Histogram is constructed by using the extracted shape signatures. The proposed shape representation remains invariant under rotations. It can be generated from the given 3D model efficiently and easily as well. In addition, this paper discusses the point sampling result's affect on the final retrieving precision. The voxelization is used to make the sampled point more even over the surface, and better retrieving precision can be achieved by this process. the performance comparisons for the shape benchmark database have proven that the proposed algorithm can achieve better retrieving performance than other similar histogram-based shape representations.

Keywords normal, polar radius, radius-angle histogram, 3D shape retrieval

1 引言

随着激光扫描技术的发展以及计算机性能的提高,3维模型不仅在数量方面快速增长,而且应用领域也越来越广泛。在工业产品的模型设计、虚拟现

实、3D游戏、多媒体教学、影视动画、模拟仿真、分子生物学和3维地理信息系统等各个领域被广泛使用。统计发现,用户所需要的往往是一些已经存在或者是类似的3维模型。例如在CAD领域,66%的3维模型在2001年已经设计完成,而这种重复模型还会日益增加^[1]。因此,基于内容的3维模型检索

基金项目:浙江省自然科学基金项目(Y106203, Y106329);国家自然科学基金项目(60703001)

收稿日期:2006-09-18;改回日期:2007-04-03

第一作者简介:潘翔(1977~),男,讲师。2005年于浙江大学计算机学院获计算机应用专业博士学位。研究方向为图像处理、模式识别和多媒体信息检索。E-mail:panx@zjut.edu.cn

成为当前多媒体信息检索研究的热点问题之一^[2,3]。

对于 3 维模型检索,一个关键问题是如何提取能够描述模型形状信息的特征^[4-6]。其中,直方图是构造形状特征非常普遍的方法。直方图描述的共同特点是首先计算模型表面的几何信号值,然后定义量化区间数目(bins),统计落入每个区间的点数目,形成特征向量。尽管直方图描述的检索准确率要低于一些基于变换的形状特征,如 3 维 Zernike 矩等。但是直方图描述通常对局部噪声有较好的稳定性,而且计算复杂度低,因此被广泛应用于检索中的模型粗分类^[7]。应用于 3 维模型检索的直方图特征包括采用表面法向形成的扩展高斯图像(EGI)^[8],复扩展高斯图像(CEGI)是在 EGI 基础上,结合极半径形成直方图特征^[9]。形状直方图采用的几何信号是顶点几何位置和极半径^[10]。这些直方图特征不能满足旋转不变性,需要采用主向量分析进行姿态调整。但是主向量分析存在的主方向二义性使得部分同类模型在经过姿态调整以后不能得到相似的姿态,从而导致检索准确率的下降。因此,研究人员考虑采用旋转不变几何信号构造直方图特征。形状分布采用点之间的欧氏距离、夹角等几何特征^[11],角度距离(AD)则是在形状分布基础上,集成法向信息构造直方图^[12]。形状谱采用网格表面曲率几何特征^[13]。

本文提出的径向夹角直方图和复扩展高斯图像类似,采用的基本几何信号都是法向和极半径。但是和复扩展高斯图像不一样的是,我们不是直接采用法向分布作为直方图特征,而是根据法向和极半径定义径向夹角,然后采用极半径和径向夹角构造旋转不变直方图。采用径向夹角避免了法向分布敏感于模型姿态的问题,从而使构造的直方图具有旋转不变性。而且实验分析结果表明,径向夹角直方图可以获得比复扩展高斯图像更好的检索性能。此外,针对模型表面点采样问题,本文采用体素化方法进行后续处理,从而使采样得到的点更加均匀,能够进一步提高检索准确率。

2 预处理

对 3 维模型进行形状分析和匹配,预处理是不可或缺的一步。在这里,预处理主要包括表面点均匀采样和归一化处理。

3 维模型有不同的表示方法,其中 3 维网格模型表示是最常用的一种。而其他表示方法也可以非常容易地转换成网格模型。但是,对于 3 维网格模型,其表面顶点分布并不一定均匀,从而对检索性能造成一定的影响。图 1 给出了顶点分布不均匀的两个模型,可以发现,其顶点分布非常不均匀,有些顶点分布比较密集,而有些地方比较稀疏。对于同一个三角片内部的顶点,虽然法向是一致的,但是其他几何信号,如极半径,却存在很大的差异。

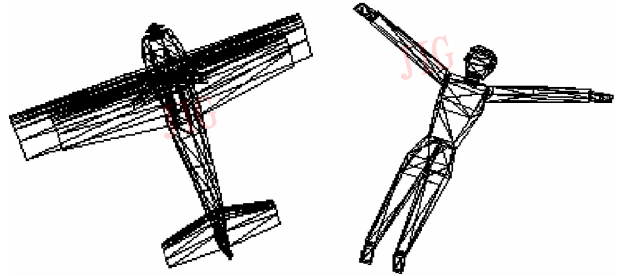


图 1 3 维模型表面顶点的均匀分布

Fig. 1 Uneven point over the 3D model surface

因此在构造直方图以前,需要对模型表面进行点采样,从而能够得到一个比较均匀的顶点分布。Osada 等人采用随机方法进行点采样^[11],这种方法通常会造局部顶点重叠或是采样点不均匀问题。在这里,借鉴体模型表示方法,在采用 Osada 等人的算法完成表面点采样以后,再通过体素化对采样点分布做进一步均匀化处理。整个算法流程总结如下:

- (1) 设定相对比较大的采样点数目以及体分辨率;
- (2) 采用 Osada 方法完成表面随机采样;
- (3) 根据设定的体分辨率,对采样点集合中的每一个点进行离散化。则重叠点会落入同一个体素中。对每个体素,若有多个点对应,则计算这些点的几何中心为产生的采样点,同时舍弃原始点。

对采样得到的点集合,使坐标原点和点集合的几何中心重合,同时使点集合的极半径最大为 1,从而完成平移和缩放归一化处理。

3 径向夹角直方图

设均匀采样得到的归一化点集合为 $PS = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_N\}$, N 是采样点的数目。对每个点

$p_i \in PS$, 其坐标和法向分别为 (x_i, y_i, z_i) 和 n_i 。由于每个采样点都是三角片内部一点, 其法向近似和三角片法向一致。而每个三角片的法向可以通过其 3 个顶点坐标计算得到, 从而得到其内部采样点 p_i 的法向方向 n_i 。如图 2 所示。其中, $|OA|$ 代表点到原点的距离, 记为极半径 r_i 。 r_i 具有旋转不变性。但是法向 n_i 不具有旋转不变性, 因此定义径向夹角 SP_i :

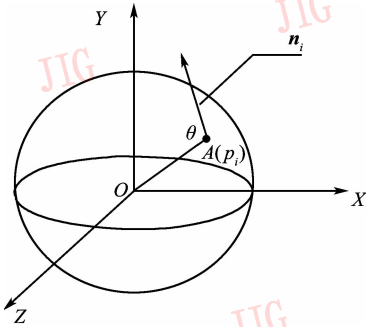


图 2 点 p_i 的极半径和径向夹角

Fig. 2 Polar radius and radius-angle of point p_i

$$SP_i = |\cos\theta| \tag{1}$$

这里, θ 为 AO 和法向的夹角。

尽管点 p_i 的法向和径向方向会随着模型姿态变换而改变。但是径向夹角却是和姿态无关的量。径向夹角在一定程度上反映了模型的形变程度, 这种形变程度说明该模型和球的相似程度。对于一个理想的球描述, 球面上任何一点的径向夹角将为 1。因为在这种情况下, OA 和 n_i 成一条直线, 角度为 180° , 其余弦值为 -1 。而随着径向夹角值的变化, 其形状也会发生改变。为了说明该问题, 计算每个模型的径向夹角平均值:

$$\overline{SP} = \frac{\sum SP_i}{N} \tag{2}$$

均值反映了模型的整体形变程度。从图 3 中可以发现, 球模型的均值最大, 而飞机模型的均值最小。主要是飞机模型其形状比较扁平, 和球模型相比较, 其形变程度最大。

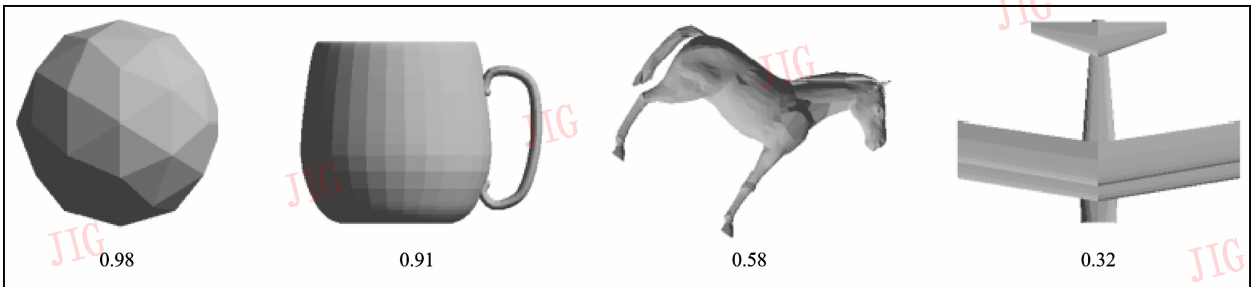


图 3 不同模型的径向夹角均值

Fig. 3 The mean value of radius-angle for different models

在得到径向夹角定义以后, 讨论如何采用极半径和径向夹角构造旋转不变直方图。首先以原点为球心, 做一系列同心球。进行球形分解可以获得点集合的一个空间分布情况。因为径向夹角并没有考虑点的空间分布, 通过这种划分, 可以把空间信息融入到直方图中。对落入每个球环中的点, 根据径向夹角构造直方图。设同心球的个数为 L_1 , 径向夹角量化区间个数为 L_2 , 对每个模型, 可以形成 $L = L_1 \times L_2$ 维径向夹角直方图形状特征, 记为

$$F = \{f_1^1, f_1^2, \dots, f_1^{L_2}, f_2^1, f_2^2, \dots, f_i^j, \dots, f_{L_1}^{L_2}\}$$

这里, i 表明该点所处的球环位置, j 是径向夹角量化区间位置。由于采用的几何信号具有旋转不变性, 因此构造的直方图也具有旋转不变性。

4 实验分析

操作系统为 Windows 2000 Professional。硬件为: 频率 1.7GHz 的 Pentium4 CPU, 内存为 512M。首先分析表面采样算法对检索结果的影响, 然后对类似直方图描述的检索性能进行比较。其采用的 3 维模型数据库为普林斯顿大学提供的 PSB 基准数据库, 并采用其提供的检索性能评价指标, 包括 Nearest Neighbor (NN), First Tier (FT), Second Tier (ST) 以及 Precision-Recall 曲线等^[7], 在这里, 采用其训练数据库得到最优检索参数 (主要是直方图量化区间选择), 并使用测试数据库中的 907 个模型进行检索性能比较实验。

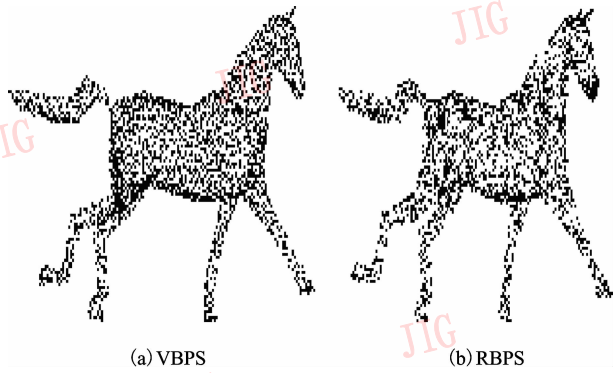


图 4 采样结果比较
Fig. 4 Sampling results

4.1 曲面采样对检索性能的影响

曲面采样能否得到比较均匀的点分布对检索性能有着明显的影响。采用 VBPS (Vox-based point sampling) 表示体素化后的结果,而 RBPS (Random-based point sampling) 表示 Osada 等人采用的随机采样算法。其中,VBPS 算法的初始化采样点数目为 20 000,体分辨率设定为 64,最终保留下来的采样点数目为 3 000 个点左右,如图 4(a)。而直接采用 RBPS 采样得到的 3 000 个点效果如图 4(b)。可以发现经过体素化算法得到的采样结果使采样点分布更为均匀。

以径向夹角直方图为特征提取方法,对基于两种采样方法的检索性能进行比较。其 Precision-Recall 性能如图 5 所示。可以发现,经过体素化后续处理后,检索准确率有着明显的提高。

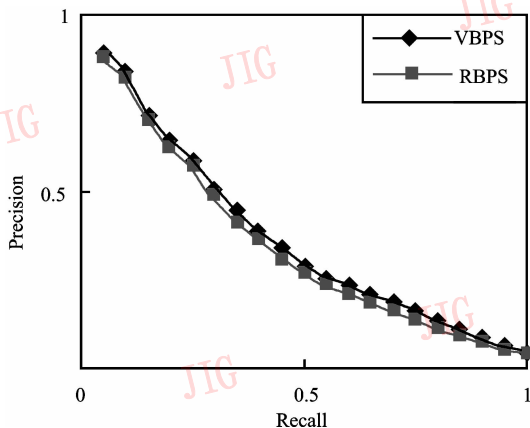


图 5 基于不同采样方法的检索性能比较

Fig. 5 Retrieving performance comparison by different sampling algorithms

4.2 检索性能比较

对径向夹角直方图 (RAH) 和一些类似的直方图描述进行检索性能比较。这些类似的直方图描述包括角度距离特征 (AD), 扩展高斯图像 (EGI), 复扩展高斯图像 (CEGI)。4 种直方图描述的一个共同特点是都采用法向作为基本几何信号。而除去 EGI 形状描述符以外,其他几种形状特征都在法向描述的基础上加入距离特征来提高检索准确率。为了保证提取的特征具有旋转不变性,EGI 和 CEGI 首先采用主向量分析进行姿态调整。为了比较的一致性,采样方法全部采用体素化采样方法;距离度量采用绝对值距离;形状特征归一化采用均值方法。采用 PSB 训练数据库得到最优参数。表 1 给出了不同直方图描述方法的检索性能比较 (Dim 表示特征维数)。

表 1 不同直方图描述比较

Tab. 1 Comparison of different histograms

特征	NN (%)	FT (%)	ST (%)	维数	时间 (s)
RAH	44.0	24.5	33.4	48	0.18
EGI	31.5	15.3	22.8	64	0.18
AD	39.3	21.3	30.4	64	0.32
CEGI	40.6	20.9	30.1	128	0.24

从表 1 可以发现,径向夹角直方图在检索准确率方面有比较明显的提高,但是在计算复杂度方面,却没有增加。直方图构造包含两方面耗时:一部分是计算表面信号的耗时;另一部分是采用表面信号构造直方图所需的耗时。而对于不同的直方图,其计算复杂度区别主要取决于计算表面信号所需的时间,因此对上述 4 种直方图计算表面信号所需的复杂度进行比较。假设采样得到的点数目为 N 个点。对于径向夹角直方图,对于每个点,计算其极半径和径向夹角,复杂度为 $O(2)$,因此其整体计算复杂度 $N \times O(2)$;对于角度距离特征,对每一点,需要计算其到任意一点的距离和法向夹角,需要进行 $O(2 \times (N - 1))$ 次计算,对每一点进行同样计算,其计算复杂度为 $N \times O(2 \times (N - 1))$;扩展高斯图像是把点映射到单位球上,对每一点需要计算其经度角和纬度角,其复杂度为 $N \times O(2)$;复扩展高斯图像是在扩展高斯图像基础上,再计算其极半径,其复杂度 $O(2 \times N + N)$ 。和扩展高斯图像相比较,尽管角度距离和复扩展高斯图像在检索准确率上也有明显的提高,但是这种提高是以时间复杂度为代价的。径向夹

角直方图不仅在检索准确率方面有明显的提高,而且在时间复杂度方面并没有任何增加。为了能够进一步说明径向夹角直方图在检索准确率方面的提高,图 6 给出了采用不同直方图描述得到的 Precision-Recall(PR) 曲线。可以进一步说明径向夹角直方图可以获得更好的检索准确率。

图 7 给出了部分检索结果实例。检索采用基于实例的方法,即用户给出一个查询模型,然后系统根据直方图特征计算数据库中的模型和查询实例的相似性。根据相似性从高到低进行检索。其中每行第 1 个模型是用户提交的查询实例,而后面是和查询实例相似度最高的 4 个模型。可以发现,检索出来的模型在形状上和实例有比较高的相似性。

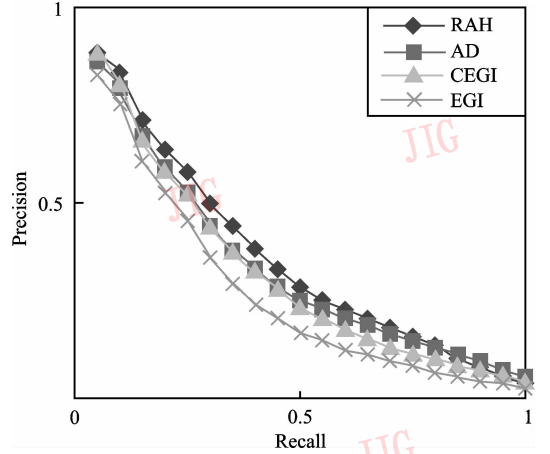


图 6 不同形状描述符的 PR 曲线

Fig. 6 PR curves for different shape descriptors

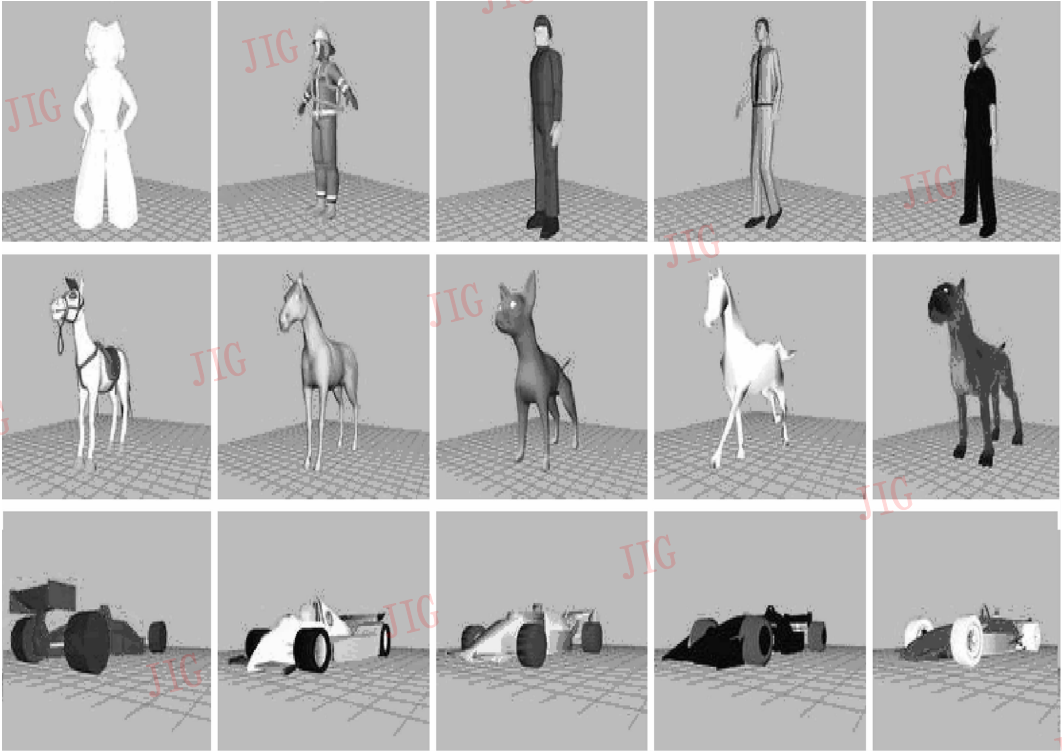


图 7 部分检索结果实例

Fig. 7 Some retrieving results

5 结 论

直方图是一种典型的形状特征描述方法。针对法向存在的姿态敏感问题,结合极半径提出了旋转不变的径向夹角几何特征。然后,根据径向夹角和极半径构造径向夹角直方图用于 3 维模型形状匹配

和检索。实验结果表明,径向夹角直方图可以得到比其他类似直方图描述更好的检索性能。而且径向夹角直方图特征构造过程简单,计算效率高,因此可以应用于检索中的模型粗分类。此外,论文通过体素化方法使表面点采样分布更为均匀,从而可以进一步提高检索准确率。

对于 3 维形状匹配和检索,采用单一形状特征

很难得到比较理想的检索准确率。因此,后续工作是如何集成多种形状特征用于3维检索。另一方面,当前检索研究只是通过形状相似性来得到检索结果,这种检索结果还难以满足用户需要。如何把用户感知信息融入到3维模型检索,形成3维模型语义检索,是后续要重点开展的研究。

参考文献 (References)

- 1 Iyer N, Kalyanaraman Y, Lou K. A reconfigurable 3D engineering shape search system part I: shape representation [A]. In: Proceedings of ASME DETC 03: Computers and Information in Engineering[C], Chicago, Illinois, USA, 2003: 2~6.
- 2 Vranic D. 3D Model retrieval [D], German: University of Leipzig, 2004.
- 3 Liu Y, Zha H, Qin H. The generalized shape distributions for shape matching and analysis [A]. In: Proceedings of International Conference on Shape Modeling[C], Matsushima, Japan, 2006: 16.
- 4 Cui Chen-yang, Shi Jiao-ying. Analysis of feature extraction in 3D model retrieval[J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2004, 16(7): 882~889. [崔晨阳, 石教英. 3D模型检索中的特征提取技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(7): 882~889.]
- 5 Tangelder J, Velkamp R. A survey of content based 3D shape retrieval methods[A]. In: Proceedings of International Conference on Shape Modeling[C], Genova, Italy, 2004: 145~156.
- 6 Yang Yu-bing, Lin Hui, Zhu Qing. Content-based 3D model retrieval: a survey [J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(10): 1297~1310. [杨育彬, 林琚, 朱庆. 基于内容的三维模型检索综述[J]. 计算机学报, 2004, 27(10): 1297~1310.]
- 7 Shilane P, Michael K, Patrick M, et al. The Princeton shape benchmark [A]. In: Proceedings of International Conference on Shape Modeling[C], Genova, Italy, 2004: 167~178.
- 8 Horn B. Extended gaussian images [J]. Proceeding of the IEEE, 1984, 72(12): 1671~1686.
- 9 Kang S, Ikeuchi K. Determining 3-D object pose using the complex extended gaussian image [A]. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Hawaii, USA, 1991: 580~585.
- 10 Ankerst M, Kastenmuller G, Kriegel H P, et al. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases [A]. In: Proceedings of International Symposium on Spatial Databases[C], Hong Kong, China, 1999: 207~226.
- 11 Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Matching 3D models with shape distributions [A]. In: Proceedings of International Conference on Shape Modeling and Applications [C], Genova, Italy, 2001: 154~166.
- 12 Ohbuchi R, Minamitani T, Takei T. Shape-similarity search of 3D models by using enhanced shape functions[A]. In: Proceedings of the Theory and Practice of Computer Graphics[C], Birmingham, UK, 2003: 97~104.
- 13 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[C], San Jose, CA, USA, 2001: 133~145.