

基于整数中轴骨架的 3 维模型检索算法

唐 勇 张学范

(燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要 针对 3 维模型检索算法性能较低的问题, 提出了一种基于整数中轴骨架的 3 维模型检索算法。在对 3 维模型进行姿态调整和各向同性预处理后, 提取模型的整数中轴骨架, 并记录每个骨架点相应的几何信息, 对提取的骨架按不同的空间区域划分, 形成模型骨架二叉树。为了能够描述骨架二叉树的不同节点对模型整体相似性匹配的影响程度, 为每个节点定义一个特征权值, 其大小由该节点对应的骨架区域大小所决定。最后, 采用由粗到细逐步淘汰的策略计算不同模型的相似度。对一个标准 3 维模型测试数据库的检索实验结果表明, 由于将模型的拓扑结构和统计特征相结合, 该算法可以得到较好的检索性能。

关键词 3 维模型检索 特征变换 整数中轴骨架 骨架二叉树

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)02-0302-05

3D Model Retrieval Based on Integer Medial Axis Skeleton

TANG Yong ZHANG Xue-fan

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract To improve the efficiency of 3D model retrieval, an algorithm for 3D model retrieval based on integer medial axis skeleton was proposed in this paper. The integer medial axis skeleton and the geometric information of skeleton point were obtained after the preprocessing of the model. The binary tree of this skeleton was acquired by decomposing the skeleton into a set of blocks by spatial region. To describe the influence of different node of the skeleton binary tree to the similarity matching, the feature weight was defined for each node. Furthermore, the weights were determined by corresponding skeleton region of the 3D model. Finally, a coarse-to-fine strategy was presented to calculate similarity between different 3D models. Differing from other algorithms applied in 3D model retrieval, this algorithm extracts statistical features as well as topological features. The experiments have been carried on a standard testing database of 3D models, and the results show that this algorithm can achieve better retrieving efficiency than other algorithms.

Keywords 3D model retrieval, feature transform, integer medial axis skeletons, skeletal binary tree

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 维模型在很多应用领域中扮演着非常重要的角色 (如工业产品的模型设计、虚拟现实系统、游戏设计、逆向工程以及仿真等), 但是构造一个真实感较强的模型是一项工作量巨大的任务, 目前在因特网和特定领域的数据库中存在数兆计模型,

且在源源不断地增加。如果能够重复利用已有模型, 就可大大减小模型设计的工作量, 因此对 3 维模型检索技术的研究已变得越来越紧迫和重要。

3 维模型检索的一个关键问题是如何快速、准确地找到所需要的模型。针对这个问题已提出了一些方法, 如形状分析方法, 将 3 维模型匹配问题简化为 2 维多边形集相似性问题^[1]; 利用直方图表示模型特征分布, 通过对面积的分布进行归一化处理并计算 L_2 差, 从而实现两模型之间的匹配^[2]; 利用数学

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60374042)

收稿日期: 2006-01-05 改回日期: 2006-10-09

第一作者简介: 唐勇 (1964~), 男, 教授。2005 年于燕山大学获机械电子工程专业博士学位。研究方向为虚拟现实技术及其应用、软件工程化技术和信息安全。E-mail: tangyong@ysu.edu.cn

变换进行特征提取, 如 Hough 变换、调和映射或矩。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, 但是没有考虑局部特征, 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, Xiao 采用了一种离散 Reeb 图 (DRG) 的方法来对人体模型的拓扑结构进行分析, 该算法采用高度函数作为 Morse 函数^[3]; Bespalov 提出了一种顶点的距离矩阵, 通过距离矩阵对 3 维模型进行分解来得到 3 维模型的 Reeb 图^[4]; 该算法与 3 维模型坐标系旋转无关, 但是这种算法计算复杂, 并且要求 3 维模型是连通模型; Foskey 采用中轴线的方法得到了手骨骼的骨架图^[5], 通过比较 3 维模型骨架图的拓扑结构获得 3 维模型的几何相似性, 但是 3 维模型的骨架图计算量很大, 计算复杂度高。

因此如何提高 3 维模型的检索性能, 就成了十分突出的问题, 文中提出一种基于整数中轴骨架的 3 维模型检索算法, 该算法的关键思想是通过整数中轴变换, 快速得到模型的中轴骨架。对骨架按区域划分, 构造骨架二叉树。同时根据该区域的大小定义每个节点的特征权值, 用于衡量其对 3 维模型整体相似性的影响程度。在对骨架二叉树匹配时, 采用由粗到细逐步淘汰的策略, 不断缩减待匹配模型的范围, 从而降低了模型匹配的时间。实验结果表明, 该算法可以得到较好的检索性能。

2 模型预处理

设两个待匹配 3 维模型 P 、 Q 的顶点分别为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 和 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, 顶点序列的坐标为 $p_i = \{p_x, p_y, p_z\}$ 和 $q_i = \{q_x, q_y, q_z\}$ 。

对于 3 维模型检索算法而言, 检索的准确性是评价算法好坏的关键指标之一。3 维模型检索的准确性除了取决于 3 维模型检索算法外, 还与 3 维模型的一些预处理相关。3 维模型预处理包括 3 维模型姿态调整和各向同性预处理两个部分。

2.1 姿态调整

对于同一种检索算法而言, 处于不同坐标系下的 3 维模型应该具有相同的相似度, 因此, 检索算法在计算 3 维模型几何特征之前应该对 3 维模型进行姿态调整, 使其坐标系一致。

采用主元分析法 (principal component analysis, PCA) 对模型进行姿态调整^[6]。该方法首先根据

3 维模型点集的协方差矩阵计算出相应的特征值 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$, 其对应的特征矢量为 (I_1, I_2, I_3) , 以 (I_1, I_2, I_3) 为新的坐标系, 对 3 维模型进行坐标变换, 得到变换后的坐标值。处理结果如图 1 所示。

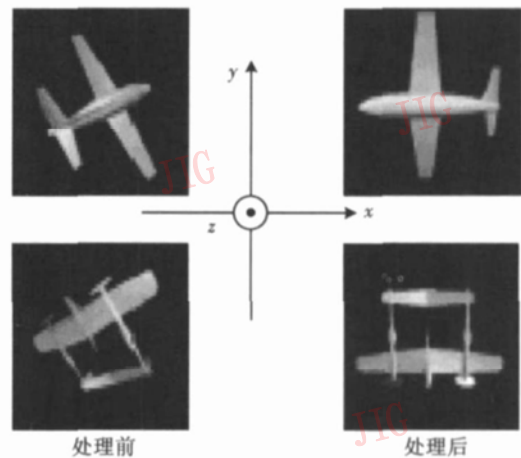


图 1 PCA 方法处理前和处理后的 3 维模型效果

Fig 1 3D models before and after PCA

2.2 各向同性预处理

在计算 3 维模型的相似度之前, 对模型进行各向同性预处理, 可以使得经过任意方向比例变换的模型比例归一化, 从而提高模型检索的准确性^[7]。采用如下变换矩阵 C_p 对 3 维模型 P 、 Q 做各向同性预处理:

$$\begin{cases} C_p = \left| \sum_{i,j=1}^n (p_i - q_j)(p_i - q_j)^T \right|^{1/2} \\ Q = C_p P \end{cases} \quad (1)$$

各向同性预处理结果如图 2 所示。

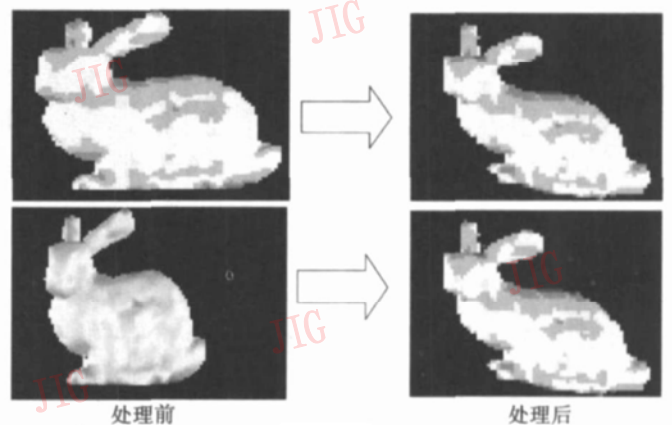


图 2 各向同性预处理的结果

Fig 2 The normalizing for isotropic scale preprocessing

3 骨架提取

设 r 是 3 维模型表面上的点, 由 Hesselink 的整数中轴算法^[8]可得:

若 $e \in E$, ($E = \{e \in I^3 \mid \|e\| = 1\}$), I^3 为模型内部的一个体素网格点, 则当 $m = r + \frac{1}{2}e$ 时

$$\|m - t(r + e)\| = \|m - t(r)\| \quad (2)$$

m 为整数中轴骨架上的一个骨架点, $t(r)$ 为点 r 的特征变换函数。

为了记录以骨架点 m 为球心的内接球的半径, 对整数中轴骨架进行改进, 定义一元函数:

$$\sigma_m = \|m - t(r)\| \quad (3)$$

σ_m 为骨架点 m 的权值。将所有骨架点连接起来形成加权骨架 H , 如图 3 所示。



图 3 骨架提取示意图

Fig 3 A schematics of extracting skeleton

4 模型匹配

4.1 生成骨架二叉树

设 Z_m 为骨架点 m 的 Z 轴坐标值。令

$$Z_{m \min} = \min\{Z_m \mid m \in H\} \quad (4)$$

$$Z_{m \max} = \max\{Z_m \mid m \in H\} \quad (5)$$

将骨架按 Z 轴坐标值划分为不同的区域 C_i , Z_{C_i} 为区域 C_i 在 Z 轴的上限 ($1 \leq i \leq n$), 如图 4(a) 所示。其中区域 C_{2i+1} 和区域 C_{2i+2} 沿 Z 轴平分区域 C_i , 如图 4(b) 所示。

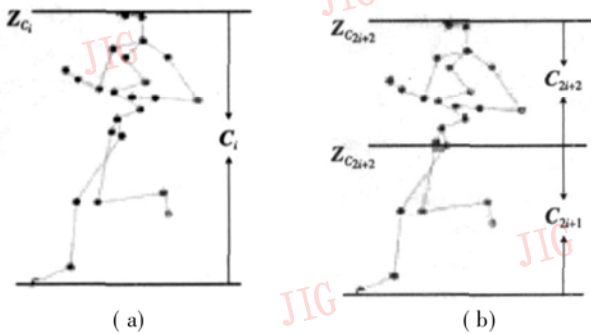


图 4 骨架区域划分示意图

Fig 4 A schematics of skeleton partition

将区域 C_i 视为二叉树节点 a_i , 其权值为

$$W_{a_i} = \sum_{m \in C_i} \sigma_m \quad (6)$$

假设二叉树根结点为 a_0 , 对于任一节点 a_i , a_{2i+1} 和 a_{2i+2} 分别为 a_i 的左右孩子节点, 且满足以下条件:

$$(1) Z_{C_{2i+1}} < Z_{C_{2(i+1)}}$$

(2) 若 $a_{2i+1} = 0$ 和 $a_{2(i+1)} = 0$ 则节点 a_i 为叶子节点;

(3) 若 $a_{2i+1} = 0$ 且 $a_{2i+2} \neq 0$ 则节点 a_i 的左子树为空; 若 $a_{2i+2} = 0$ 且 $a_{2i+1} \neq 0$ 则节点 a_i 的右子树为空。

4.2 匹配骨架二叉树

设 a_i 和 b_i ($0 \leq i \leq n$) 为 3 维模型 P, Q 对应的骨架二叉树中的节点, 则它们的相似度函数为

$$\text{sim}(a_i, b_i) = 1 - \frac{|W_{a_i} - W_{b_i}|}{W_{a_i}} \quad (7)$$

设 3 维模型 P, Q 的相似度函数为

$$SM(P, Q) = \sum_{i=0}^n \text{sim}(a_i, b_i) \quad (8)$$

但是, 在匹配过程中, 由于模型的不同部分对模型整体的相似性的影响不同, 因此对不同的 $\text{sim}(a_i, b_i)$ 赋予不同的权值 χ_i 对相似度函数加以改进, 改进的相似度函数为

$$SM(P, Q) = \sum_{i=0}^n \chi_i \cdot \text{sim}(a_i, b_i) \quad (9)$$

其中, $\chi_i = \frac{f(a_i)}{f(a_0)}$, $f(a_i)$ 表示对应节点 a_i 的区域大小, $f(a_0)$ 为整个区域的大小。

具体的匹配步骤如下:

(1) 定义域值区间 $g = [0, \beta]$, $\beta \in \mathbf{R}$; 生成两个骨架二叉树的根节点 a_0, b_0 , 若 $\text{sim}(a_0, b_0) \in g$, 则继续以下步骤, 否则匹配结束, 两个模型不相似;

(2) 若 a_i, b_i 为非叶子节点, 则生成 a_i, b_i 的左孩子节点 a_{2i+1} 和 b_{2i+1} , 若 $\text{sim}(a_{2i+1}, b_{2i+1}) \in g$, 则继续以下步骤, 否则匹配结束, 两个模型不相似;

(3) 若 a_i, b_i 为叶子节点, $\text{sim}(a_i, b_i) \in g$, 则该分支的匹配结束, 向上回溯到其父亲节点, 进行另一分支的匹配, 若 $\text{sim}(a_i, b_i) \notin g$, 则匹配结束, 两个模型不相似;

(4) 生成 a_i 和 b_i 的右孩子节点 a_{2i+2} 和 b_{2i+2} , 若 $\text{sim}(a_{2i+2}, b_{2i+2}) \in g$, 则继续以下步骤。否则匹配结束, 两个模型不相似;

(5) 若二叉树的任意节点 a_i 和 b_i 都满足: $\text{sim}(a_i, b_i) \in g$, ($0 \leq i \leq n$), 则两模型相似。

(6) 重复执行步骤 1 至步骤 5。

如图 5 所示的两个匹配二叉树, 首先 $\{a_0, b_0\}$ 构成匹配节点, 若 $sim(a_0, b_0) \in g$, 则匹配 a_1 和 b_1 , 否则匹配结束。

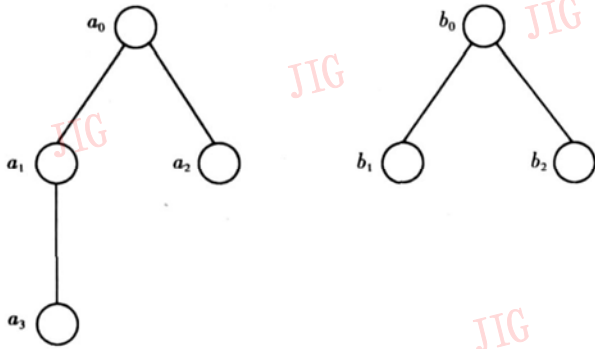


图 5 骨架二叉树匹配示意图

Fig 5 Matching between skeleton binary trees

5 实验结果与分析

为了测试算法的效果, 设计实验对本文方法、中轴骨架方法和形状分析方法的检索性能进行比较。实验在 Windows 平台上用 VC++ 6.0 语言实现, 3 维模型数据库采用普林斯顿大学形状分析小组提供的标准测试数据库^[9], 总共含有 907 个模型。采用典型的大家公认的 Precision-Recall 曲线来度量不同方法的检索性能, 3 种方法的检索性能曲线如图 6 所示。可以发现, 本文方法由于在拓扑结构的基础上融入了统计特征, 因此在检索性能上有明显提高。

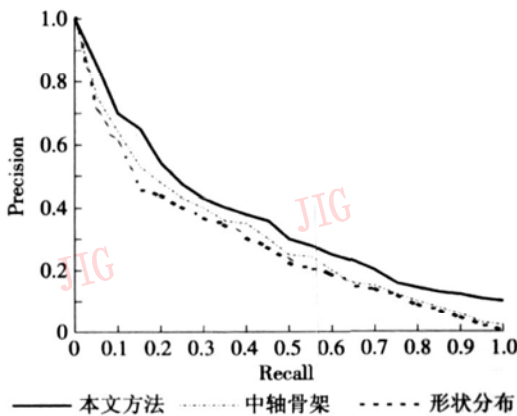


图 6 检索性能比较

Fig 6 Retrieving performance comparison of three methods

对于 3 维模型检索, 另外一个值得注意的问题是检索效率。如果检索时间过长, 导致实时性差, 即使检索准确率有了明显的改进, 那么实用性也不强。本文方法采用改进的中轴骨架提取方法, 虽然与传

统的中轴骨架方法相比降低了算法的复杂度, 但与形状分布方法相比在算法复杂度上有所增加, 因此比形状分布方法需要更多的检索时间。但是, 这种检索时间的差异很小, 不会被用户察觉。具体实验验证如下: 对一批模型数据 (40 个模型) 进行批处理, 得到总检索时间和平均检索时间, 检索时间如表 1 所示 (CPU: Pentium 4 2.4GHz 内存: 512MB, 检索时间包括打开文件读取模型数据的时间)。

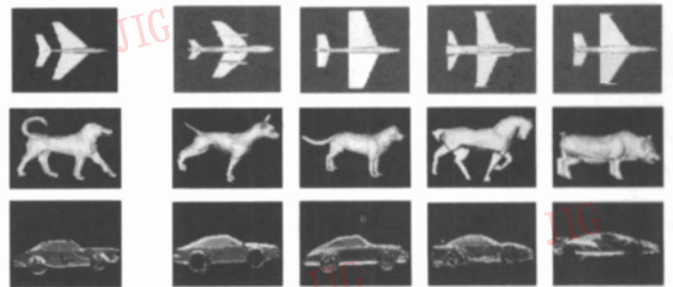
表 1 检索时间比较

Tab 1 Comparison of retrieving time

单位: s

| 检索方法 | 总检索时间 | 平均检索时间 |
|------|-------|--------|
| 本文方法 | 6 | 0.15 |
| 中轴骨架 | 6.96 | 0.174 |
| 形状分布 | 5.6 | 0.14 |

从表 1 中可以看出本文方法与形状分布方法相比, 虽然在检索总时间增多了 0.4s, 但是平均检索时间仅增多了 0.01s, 对于这种较小的时间差异用户是很难察觉到的。图 7 给出了部分检索结果。



(a) 输入模型 (b) 检索出的前 4 个最相似的模型

图 7 检索结果示例

Fig. 7 Results of the search experiment

3 维模型检索算法的抗干扰能力也是衡量算法性能的一个重要指标, 为了测试算法的抗干扰能力, 对 3 维模型 (图 8(a)) 做以下变形处理:

- (1) 加入噪声 3 维模型每个顶点的 x, y, z 坐标值, 加上一个随机数 (模型边界长度得 $-5\% \sim +5\%$), 如图 8(b);
- (2) 模型缺损 随机删减部分顶点 (占总顶点数的 10%), 如图 8(c)。

对变形后的 3 维模型进行检索试验, 其检索性能如图 9 所示。

由图 9 中可以看出, 本文算法在 3 维模型包含噪声或缺损部分顶点时, 仍可达到模型检索的目的。

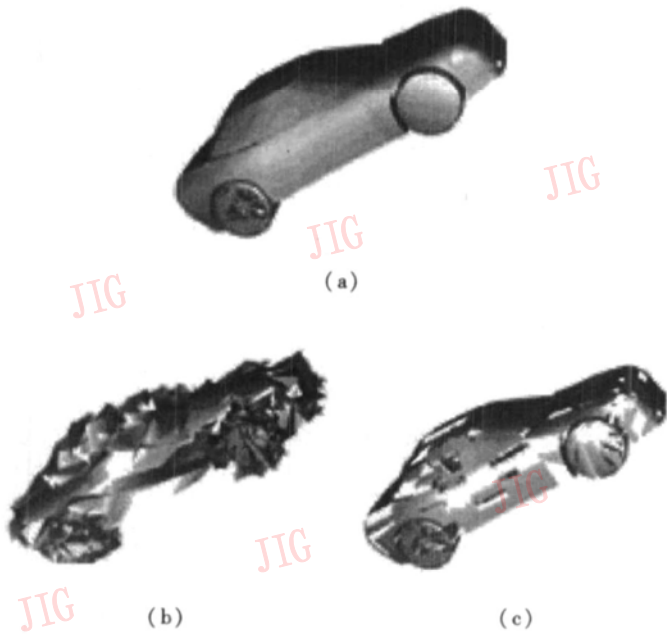


图 8 加入噪声和模型缺损

Fig. 8 Noise and decimation from original 3D model

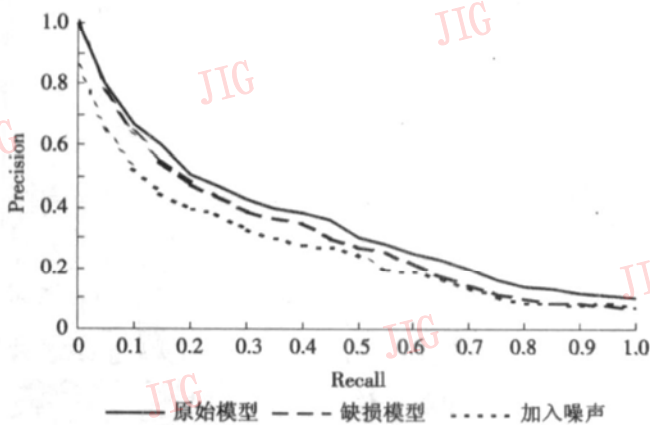


图 9 3 维模型抗噪声和缺损性能评价

Fig. 9 Robustness evaluation of noise and decimation

6 结 论

3 维模型检索技术是计算机图形学研究领域的一个重要课题。本文将 3 维模型的拓扑结构特征和统计特性相结合, 针对 3 维模型检索算法性能较低的问题, 提出了一种基于整数中轴骨架的 3 维模型检索算法。在对待比较模型进行姿态调整和各向同性预处理后; 对整数中轴骨架生成算法进行改进, 生成 3 维模型的整数中轴骨架, 在生成骨架的过程

中保留模型的拓扑信息和每个骨架点的几何信息; 在相似性匹配时, 提出了一种层次性匹配方法, 对生成的模型骨架采用由粗到细逐步淘汰的策略进行匹配, 逐步缩减待匹配模型的范围, 从而降低了模型匹配的时间。通过设计实验对本文方法的检索性能、检索时间和抗干扰能力进行测试, 实验结果表明该算法可以得到较好的检索性能。

参考文献 (References)

- 1 Pu Jian-tao, Liu Yi, Xin Gu-yu, *et al*. A 3D model retrieval method based on the similarity between 2D polygon sets [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(12): 1437~1442 [普建涛, 刘一, 辛谷雨等. 一种基于 2 维多边形集相似性的 3 维模型检索方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(12): 1437~1442]
- 2 Mihalek, Gabi K, Hans-Peter K, *et al*. 3D shape histogram for similarity search and classification in spatial database [A]. In: *Proceedings of 6th International Symposium on Spatial Database [C]*, Hongkong, China, 1999, 207~228
- 3 Xiao Y J, Wenghi N, Siebert 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
- 4 Bespalov D, Ali S, William C R, *et al*. Scale-space representation of 3D models and topological matching [A]. In: *8th ACM/SIGGRAPH Symposium on Solid Modeling and Applications [C]*, Seattle, Washington, USA, 2003, 208~215
- 5 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]*, Washington, DC, USA, 2003, 96~107
- 6 Vranic D, Aaupe D. 3D shape descriptor based on 3D fourier transform [A]. In: *Proceedings of EURASIP Conference on Digital Signal Processing for Multimedia Communications and Services [C]*, Budapest, Hungary, 2001, 271~274
- 7 Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Shape matching and an isotropy [J]. *ACM Transactions on Graphics (2004 SIGGRAPH)*, 2004, 23(3): 623~629
- 8 Hesselink W in H, Visser M enq Roerdink Jos B T M. Euclidean skeletons of 3D data sets in linear time by the integer medial axis transform [A]. In: *ISM' 2005 [C]*, Paris, France, 2005, 259~268
- 9 Shilane P, Michael K, Patrick M, *et al*. The Princeton shape benchmark [A]. In: *Proceedings of the International Conference on Shape Modeling [C]*, Genova, Italy, 2004, 167~178