

多封闭区间三维模型的骨架提取与检索

霍 磊¹, 吕学强¹, 张 凯²

(1 北京信息科技大学 网络文化与数字传播北京市重点实验室, 北京 100101;

2 北京市朝阳区市政市容管理委员会, 北京 100021)

摘 要: 提出了动态邻接封闭区间连接方法以及基于球面特征的检索方法. 依据模型封闭区间的位置关系以及所占比重对原模型的多个封闭区间进行连接, 将原模型合并成一个封闭区间, 计算模型各点的 μ 值, 即测地线距离函数值, 分裂区间, 聚合成骨架点, 去除冗余点得到连通的骨架; 以 μ 值最小的骨架点为球心, 在骨架上建立 N 个球面, 提取球面相交的特征用于检索. 实验结果表明, 本文算法能有效提取多封闭区间三维模型骨架, 提高三维模型的查准率.

关键词: 三维模型; 骨架; Reeb 图; 动态邻接封闭区间连接; 球面特征

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)01-0085-06

Skeleton Extraction and Retrieval of 3D Model with Multi-closed Sections

HUO Lei¹, LV Xue-qiang¹, ZHANG Kai²

(1 Beijing Key Laboratory of Internet Culture and Digital Dissemination Research,

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China;

2 Beijing Chaoyang District Municipal Commission of City Administration and Environment, Beijing 100021, China)

Abstract: This paper presents a method of dynamic connection of adjacent closed sections and a retrieval method based on spherical feature. Connect the closed sections by the position relationship and the proportion of the original model, merge the original model into one closed section, split the model according to the geodesic distance function value of each point, get the skeleton point from each section, and get the connected skeleton after removing the redundant points. Use the skeleton point of minimum geodesic distance function value as the center of the sphere, build some spherical surfaces on the skeleton, get the characteristics of the spherical intersection used for retrieval. The experimental results show that the method can extract the skeleton effectively and improve the retrieval precision.

Key words: 3D model; skeleton; reeb graph; dynamic connection of adjacent closed sections; spherical feature

1 引言

三维模型已广泛应用于医疗、电影、游戏、科学、建筑等领域. 为了充分利用已有的三维模型, 减少设计新模型的工作量, 快速、准确地对三维模型进行检索已经成为计算机图形学的主要内容之一.

三维模型的特征提取是三维模型检索的核心内容, 目前三维模型的特征提取方法主要分为 4 类:

(1) 基于统计的方法, 如张明等^[1]人提出的改进的 D1 形状分布方法. (2) 基于几何属性的方法, 如谭晓^[2]提出的基于球面调和函数分析的方法. (3) 基于图像的方法, 如赵仲孟^[3]等提出的基于二维投影点集的

收稿日期: 2014-02-23; 修回日期: 2014-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61271304); 北京市教委科技发展计划重点项目暨北京市自然科学基金 B 类重点项目(KZ201311232037); 北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目(IDHT20130519)

方法以及姜阳^[4]等提出的基于边界点描述符的方法。(4)基于拓扑的方法,如基于 Reeb 图^[5]的算法,该算法使用连续标量函数对三维模型表面各顶点计算函数值,将函数值相同且互相连通的顶点使用图的结点或边表示,得到 Reeb 图骨架。通过选取合适的连续函数,可以使所得到的 Reeb 图具有平移、旋转不变性。研究人员在连续函数的选择和优化上取得了一定的进展,如 Hilaga 等^[6]提出的多分辨率 Reeb 图(MRG)算法,该方法能够有效地表达三维模型的拓扑结构,但由于连续函数的要求,不能正确计算包含多个封闭区间的三维模型。

利用基于骨架的三维检索方法进行检索时,需要根据骨架提取三维模型的特征,并根据提取的特征计算模型之间的相似度。韩丽等^[7]提出一种融合骨架的拓扑特征与局部几何形状特征的方法。该方法根据模型骨架之间的连接信息建立骨架树,以骨架树每层结点的出度作为模型的拓扑特征,将骨架树各层拓扑特征的相似度作为骨架的拓扑相似度;提取骨架树每层结点的高斯曲率特征作为模型的局部几何形状特征以计算模型的几何相似度;根据拓扑相似度和几何相似度计算模型之间的相似度。张黎娜^[8]使用描述模型表面形状的显著性属性 Saliency 代替高斯曲率作为模型的局部几何形状特征,用以计算模型的几何相似度。基于骨架树的方法,其前提条件是保证建立的骨架树的层数一致,以计算骨架树各层的相似度,但是很多情况下无法保证得到的骨架树层数是一致的。

本文针对 MRG 算法无法正确处理多封闭区间三维模型的不足,根据模型中各封闭区间的位置等信息,提出了一种动态邻接封闭区间连接的方法,将原模型转化成只包含一个封闭区间的模型,并提取骨架用于检索。根据一定的规则删除骨架中的冗余点,得到有效的模型骨架。针对基于骨架树的检索方法无法正确计算层数不一致的骨架之间的相似度,本文提出基于球面特征的检索方法,根据骨架建立球面体系,使用球面相交次数以及球面之间的骨架点的曲率特性作为骨架的特征以计算相似度。

2 多分辨率 Reeb 图(MRG)算法

定义 1: Reeb 图^[5]

设 $\mu: C \rightarrow R$ 是定义在模型 C 上的连续函数,当且仅当下列条件成立

$$\begin{cases} \mu(p_1) = \mu(p_2) \\ p_1 \text{ 与 } p_2 \text{ 属于 } \mu^{-1}(\mu(p_1)) \text{ 的同一个连通空间} \end{cases} \quad (1)$$

Reeb 图是模型的商空间。

MRG 算法中使用的 μ 函数为测地线距离,定义如下:

$$\mu(p) = \sum_i g(p, b_i) * \text{area}(b_i) \quad (2)$$

式中, p 是模型的某个顶点, $g(p, b_i)$ 是 p 到基本点 b_i 的测地线距离, $g(p, b_i)$ 是基本点 b_i 所占的模型表面积。模型中每个顶点的 μ 值是该点到所有基本点的测地线距离之和。为了减少计算复杂度, MRG 算法使用最短路径来代替测地线距离。同时,在寻找基本点之前,需要对模型中过长的边进行切分。根据各个顶点的 μ 值,把模型分成 N 个区间,将属于同一个 μ 值区间且相互连通的点用一个骨架点来表示,并根据原模型顶点之间的连接关系,连接骨架点,得到模型的骨架。

韩丽等^[9]采用通过计算模型各顶点的高斯曲率获取约束点的方法,得到更加符合模型拓扑特征的骨架。

虽然高斯曲率约束的 MRG 算法所提取的骨架能较好地展现模型的拓扑特征,但由于 μ 值计算方法的限制,这种方法只能应用于模型本身互相连通的情况,对于包含多个封闭区间的三维模型,此方法无法有效的提取骨架。

3 动态邻接封闭区间连接的 MRG 方法

在计算 MRG 算法中各顶点的 μ 值时,使用 Dijkstra 最短路径算法计算两个点之间的最短路径来代替测地线距离,减少了计算的复杂度。由于 Dijkstra 算法要求模型本身为连通的,而一些三维模型并不符合这种要求,因此需要对不连通的模型进行处理。针对这一类模型,黄坤武等^[10]提出了一种简单的方法,即规定模型上某一封闭区间 A 的一个点 p 到其他封闭区间上的基本点的 μ 值为 0,封闭区间 A 上的其他点的 μ 值为这一点到 p 的测地线距离。此方法中,由于点 p 的选择是随机的,所以得到的 μ 值在很大概率下不符合模型本身信息。而且,对不同封闭区间提取出来的骨架点,无法计算骨架点之间的连接信息。

本文根据不连通模型的特征提出了动态邻接封闭区间连接的方法,能比较准确地将模型的各个封闭区间连接起来,形成一个封闭区间,以求得各个顶点的 μ 值。

3.1 动态邻接封闭区间连接

用 $M = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示模型的所有封闭区

间, n 为封闭区间的个数, 每个封闭区间用 M 中的一个分量 x_i 表示. 定义一个图 $G = \{V, E\}$, 它的每个顶点 V 表示模型中的封闭区间, 它的边 E 的权重表示两个封闭区间连接的概率. 假设表示图 $G = \{V, E\}$ 的权重矩阵是 $P = (p_{ij})_{n \times n}$, 其元素 p_{ij} 表示封闭区间 x_j 连接到封闭区间 x_i 的概率.

封闭区间 x_j 连接到封闭区间 x_i 的概率 p_{ij} 由封闭区间 x_i 的表面积 s_i 、封闭区间 x_i 与模型质心的距离 l_i 、以及封闭区间 x_j 与封闭区间 x_i 的距离 d_{ij} 决定, 即:

$$p_{ij} = \begin{cases} a \times \frac{s_i}{s_A} + b \times l_i + c \times d_{ij}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (3)$$

式中, s_A 表示三维模型各封闭区间的表面积之和. 集合 C 为已经互相连通的封闭区间的集合, 其初始元素 x_m 为三维模型各封闭区间中到模型质心距离最小的封闭区间, 以 C 中的封闭区间为起始, 寻找模型中能与其相连的最优封闭区间加入到 C 中.

定义 2 向量 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ 表示封闭区间是否在集合 C 中, 当封闭区间 x_i 在集合 C 中时, l_i 等于 1, 否则 l_i 等于 0, 即:

$$l_i = \begin{cases} 1, & x_i \in C \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

连接封闭区间时, 需要确定与集合 C 中封闭区间相连的最优封闭区间 x_g , 并且确定集合 C 中与区间 x_g 相连的区间 x_c . 因此, 将向量 L 的转置与 L 相乘构成 $n \times n$ 的矩阵, 并与权重矩阵 P 相乘, 得到未连通的封闭区间与集合 C 中封闭区间连接的概率矩阵 L' , 即:

$$L' = L^T \times L \times P \quad (5)$$

在矩阵 L' 中寻找最大的元素, 即概率最大的连接组合, 以确定 x_g 和 x_c .

动态邻接封闭区间连接的具体步骤如下:

(1) 计算矩阵 P 以及封闭区间 x_m , 将 x_m 加入集合 C ;

(2) 初始化向量 L ;

(3) 按公式(6)计算 L' , 矩阵 L' 中最大的元素为 L'_{ij} , 将区间 x_j 加入集合 C , 连接区间 x_j 与区间 x_i , 按公式(5)计算新的向量 L ;

(4) 重复步骤(3), 直到所有的封闭区间都加入集合 C .

MRG 算法中, μ 值的大小为使用 Dijkstra 算法求取的最短距离值, 当模型中一些封闭区间之间的连接面较大时, 为了避免 μ 值计算不准确, 连接两个

封闭区间时, 不仅要连接两个封闭区间之间距离最近的点对, 还要连接与最近距离差距较小的点对.

对多封闭区间模型进行连接时, 一方面要保证模型的所有封闭区间最终连接成为一个封闭区间, 另一方面要保证连接之后的模型尽量接近其在现实中的形态.

在对连接之后的模型使用 MRG 算法提取骨架的过程中, 两个相连的封闭区间的部分有一定概率被划分到同一个 μ 值区间中, 而这部分用同一个骨架点表示时, 极易造成提取出来的骨架不准确. 因此, 对划分到同一个 μ 值区间但属于不同封闭区间的点集, 需要使用不同的骨架点表示.

3.2 冗余骨架点的删除

当使用高斯曲率约束对分裂区间进行细分, 并对不同封闭区间的点集采用不同的骨架点进行表示时, 提取的骨架中会产生冗余点. 需要进行冗余骨架点的删除操作.

冗余骨架点主要分为三类:

- (1) 在同一条直线上存在多个骨架点;
- (2) 骨架点上延伸出多余的分支骨架与其他骨架重合;
- (3) 在某一区域骨架点过于密集;

对第(1)类点, 删除直线上不具有其他分支的点; 对第(2)类点进行删除; 对第(3)类点, 使用区域的几何中心点代替, 以保证骨架的有效性.

4 基于球面特征的检索方法

韩丽等^[7]使用根据骨架建立骨架树的方法来对三维模型进行检索, 这种方法需要保证每个模型建立起来的骨架树具有一致的层数, 即模型分裂 μ 值区间一致. 因此该方法并不适用于本文方法提取的骨架. 本文提出利用球面相交提取三维模型骨架特征的方法, 根据模型骨架建立一系列球面, 将骨架与球面的相交次数以及每两个球面之间骨架点的特性作为三维模型的检索特征.

4.1 球面体系的建立

MRG 方法中依据计算得到的 μ 值的大小将模型分为若干个 μ 值区间, 根据测地线距离的性质可知, μ 值是由模型的中间向四周逐渐递增的. 根据模型骨架建立 N 个球面, 其球心皆为 μ 值最小的区间提取出的骨架点, 记为 O . 最大球面(第 N 个球面)的半径 R 是所有骨架点到 O 的距离的最大值, 即:

$$R = \text{Max}(l(O, p_j)), j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其他球面的半径分别为

$$r_i = \frac{i}{N} \times R, i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (7)$$

式中, $l(O, p_i)$ 是 O 到骨架点 p_i 的距离, n 为骨架点的个数, r_i 是第 i 个球面的半径, N 为球面的个数。

4.2 拓扑特征和几何特征的提取

本文使用骨架与各个球面的相交次数作为骨架的拓扑特征 T_i 。

根据骨架抽取过程中得到的各个点的高斯曲率 K_G 计算每个骨架节点的曲率特性 $\text{Cur}(P)$, 并计算分布在每两个相邻的球面之间的所有骨架点的曲率, 将其作为骨架的几何特征 G_i 。由于曲率易受噪声影响, 因此先对曲率进行标准化处理^[5]。用处理后的曲率来计算骨架的几何特征。

$$T_i = \text{Cross}(i)$$

$$G_i = \sum_{j=1}^{\text{NUM}} \text{Cur}(P_j), P_j \in U \quad (8)$$

$$\text{Cur}(P) = \sum_{V_p \in S}^K (V_p), V_p \in S$$

式中, $\text{Cross}(i)$ 是骨架与第 i ($1 \leq i \leq N$) 个球面相交的次数, U 是分布在第 $i-1$ ($1 < i \leq N$) 个球面和第 i ($1 < i \leq N$) 个球面之间的骨架点的集合, 当 $i=1$ 时, U 是处于第一个球面内部的骨架点集合, S 是构成骨架点 P 的模型顶点的集合。

4.3 相似度的计算

根据得到的 T_i 和 G_i 计算两个模型 a 、 b 之间的拓扑相似性 $\text{sim}T$ 和几何相似性 $\text{sim}G$ 。

$$\text{sim}T = \frac{\sum_{i=1}^N T_{i_a} \times T_{i_b}}{\sum_{i=1}^N T_{i_a}^2 \times \sum_{i=1}^N T_{i_b}^2}$$

$$\text{sim}G = \frac{\sum_{i=1}^N G_{i_a} \times G_{i_b}}{\sum_{i=1}^N G_{i_a}^2 \times \sum_{i=1}^N G_{i_b}^2} \quad (9)$$

两个模型的整体相似性 $\text{sim}M$ 定义为:

$$\text{sim}M = \omega_T * \text{sim}T + \omega_G * \text{sim}G \quad (10)$$

式中, ω_T 和 ω_G 为权重因子, 且 $\omega_T + \omega_G = 1$ 。

在实际的检索过程中, 可以根据模型调节特征的权值 ω , 进而获得更好的检索效果。

5 实验结果与分析

5.1 骨架提取结果

本文使用基于高斯曲率约束的 MRG 算法^[9]与本文方法进行对比, 在 MRG 算法中, 计算顶点 μ 值时, 对于与基本点不在同一个封闭区间的点, 将其与这一基本点的测地线距离记为 0。

普林斯顿大学模型库中的第 114 号骷髅模型, 包含 2 910 个顶点、5 418 个三角面片, 64 个封闭区

间。使用 MRG 算法以及本文算法对此模型分别进行骨架提取, 所得到的骨架如图 1 所示。

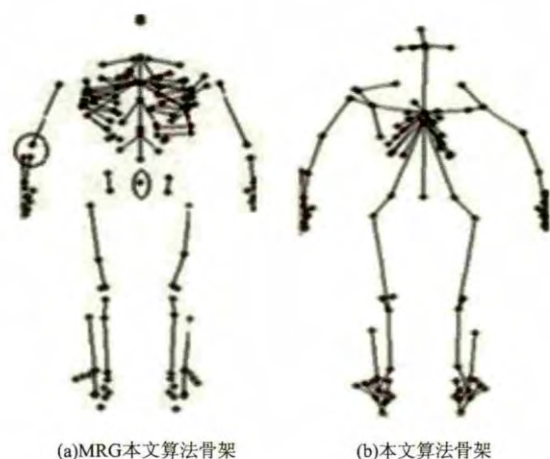


图 1 骷髅模型骨架

图 1(a)中可以看出, 由于单一封闭区间中的点缺乏其他封闭区间的信息, 采用原始 MRG 方法对一些封闭区间提取出的骨架呈封闭的球形, 尤其是模型封闭区间本身形状接近球形时。且一些封闭区间因为相比于整体模型所占的比例较小, 所以整个区间被划分到同一个 μ 区间中, 导致整个区间被聚合成一个孤立点, 而孤立点对骨架是没有意义的。

图 1(b)所示为本文方法提取出的骨架, 结果中只包含一个连通分量, 完整地表示了模型的拓扑信息。由于模型封闭区间的相连, 模型顶点的 μ 值计算正确, 能够得到正确的骨架, 而不是错误的球形骨架。占模型比例较小的封闭区间所得到的结果也不再是一个孤立点。

5.2 检索结果与分析

本文选取普林斯顿大学所提供的模型库中的 14 类共 150 个三维模型进行检索实验, 权重因 ω_T 和 ω_G 分别为 0.6 和 0.4。这 150 个模型中, 既有只包含数百个三角面片的, 也有包含数万面的。模型所包含的封闭区间数目, 从一个到上百个, 可较好的覆盖模型库。

分别对本文方法提取的骨架和基于高斯曲率约束的 MRG 方法提取的骨架使用基于骨架树的检索方法进行实验。图 2 所示为两种方法对昆虫类、鸟类、鱼类、哺乳动物类、骷髅类和人类的查准率查全率曲线。

从图 2 中可以看出, 对比使用基于骨架树的检索方法的两组实验, 本文方法提取的骨架在鱼类、哺乳动物类、骷髅类、人类中的检索效果要略好于高斯曲率约束的 MRG 算法。而对昆虫类和鸟类检索进

行检索时,本文方法效果在查全率达到一定值时要低于高斯曲率约束的 MRG 算法效果。

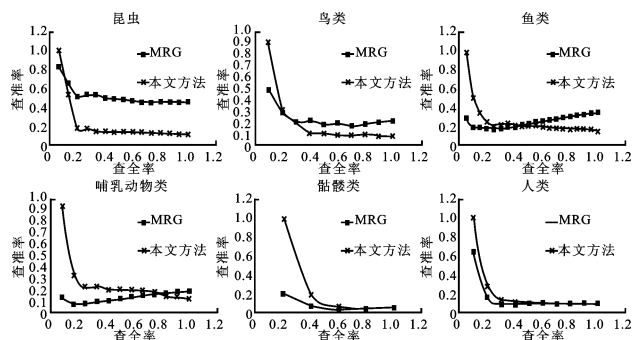


图2 查准率查全率曲线

为了证明基于球面特征的检索方法的有效性,本文对利用高斯曲率约束的 MRG 方法和本文方法提取的骨架分别使用基于骨架树的方法和基于球面特征的方法进行检索。图3所示为四种方法对昆虫类、爬行动物类、人类以及飞机类的查准率查全率曲线。

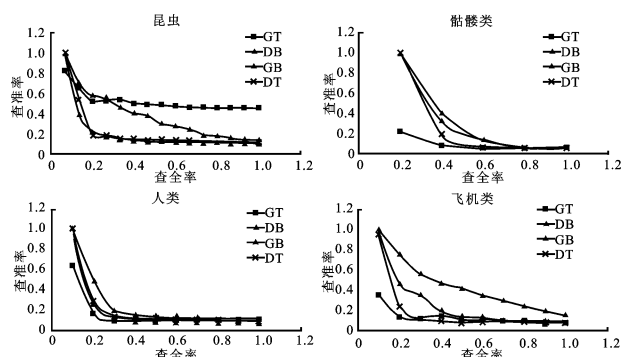


图3 四种方法的查准率查全率曲线

注:GT-MRG 骨架提取+骨架树检索;GB-MRG 骨架提取+球面特征检索;DT-本文骨架提取+骨架树检索;DB-本文骨架提取+球面特征检索

对比使用原始 MRG 方法提取骨架的两组实验,在除昆虫类其他三个类别中,使用球面特征的检索方法结果均优于使用基于骨架树的检索方法结果。在使用本文方法提取骨架的两组实验中,使用球面特征的检索方法结果在昆虫类、爬行动物类、人类、飞机类中均优于使用骨架树的检索结果。

对于昆虫类和自行车类,分析其所得的骨架树,发现模型所切割的封闭区间基本成一个模式,骨架树都是很简单的几个节点,甚至有很多模型的只是单一的一个节点,这样计算相似度时,就比较容易得到较高的相似度。而对于同为一类模型的13号蜘蛛模型,尽管其模型相似度很高,但因其只包含一个封闭区间,所以与其他模型的相似度非常低。本文算法

对昆虫类进行连接之后再行 Reeb 图提取与相似度计算,与本文算法在其他类型中的检索效果持平。如同属于昆虫类的12号和13号模型,12号模型包含10个封闭区间,而13号模型只包含1个封闭区间。高斯曲率约束的 MRG 方法得到的两个模型的相似度为0.0028,而本文方法得到的两个模型之间的相似度为0.8656。因此,虽然高斯曲率约束的 MRG 方法对昆虫与自行车的检索效果较好,但不能正确计算只包含单个封闭区间的模型和包含多个封闭区间模型之间的相似度。

本文算法对爬行动物类、飞机类中的检索结果有较大的提升,原因如下:

(1)在爬行动物类中,每个模型所包含的封闭区间较多,对模型进行连接之后,提取的 Reeb 图结构复杂,与其他类别模型的拓扑差异大,因此爬行动物类与其他类别的相似度较低。

(2)在飞机类中,模型差异较小,在进行连接之后,获得的 Reeb 图比较完整的保留了模型的拓扑结构,而文献[8]的方法所提取的 Reeb 图得到的拓扑结构并不完整。

为了说明本文方法的稳定性,采用不同的评价指标对上面所给四种方法进行评价。这里选择的评价指标有 FT (First Tier)、ST (Second Tier)、AP (Average Precision) 以及 $P@N$ (Precision @ N)^[11] 这几种。

表1所示是 FT, ST, AP, $P@N$ 评价指标结果。

从表1中可知,本文方法对这4种指标均具有稳定性。图4是四种方法在所有类别中的评价指标结果。

由图4可知,在 FT、ST、AP 以及 $P@N$ 四种评价指标下,使用本文骨架提取方法以及基于球面特征的检索方法结果均优于其他三种方法,因此本文方法在所有评价指标下具有稳定性。

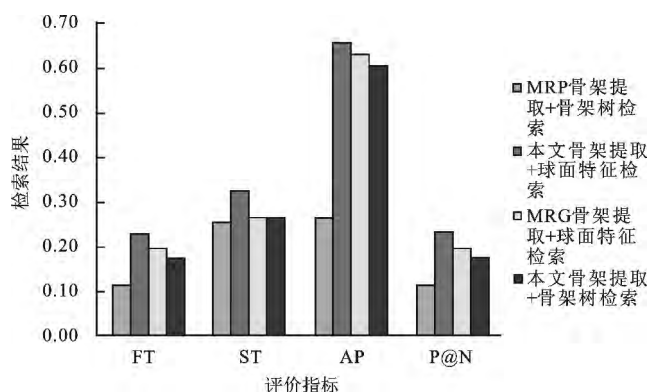


图4 四种方法在所有类别中的评价指标结果

表 1 四种方法在 14 类模型中的评价指标结果

指标	方法	昆虫	鸟类	鱼类	哺乳动物	骷髅类	人类	恐龙类	吉他类	手枪类	刀剑类	转椅类	瓶子类	飞机类	自行车类
FT	GT	0.51	0.13	0.06	0.01	0.08	0.11	0.07	0.06	0.01	0.05	0.02	0.02	0.06	0.27
	GB	0.17	0.21	0.12	0.14	0.28	0.15	0.16	0.23	0.26	0.21	0.27	0.19	0.25	0.22
	DT	0.16	0.16	0.2	0.18	0.2	0.14	0.16	0.12	0.19	0.15	0.2	0.2	0.14	0.22
	DB	0.36	0.2	0.24	0.16	0.28	0.19	0.23	0.2	0.12	0.12	0.28	0.16	0.39	0.23
ST	GT	0.58	0.39	0.56	0.03	0.08	0.14	0.12	0.12	0.01	0.05	0.04	0.09	0.27	0.56
	GB	0.27	0.25	0.21	0.19	0.28	0.22	0.22	0.31	0.34	0.25	0.32	0.26	0.3	0.37
	DT	0.27	0.2	0.36	0.33	0.32	0.23	0.23	0.21	0.22	0.22	0.21	0.28	0.19	0.38
	DB	0.48	0.35	0.38	0.23	0.32	0.26	0.31	0.26	0.15	0.14	0.41	0.24	0.55	0.36
AP	GT	0.62	0.33	0.28	0.1	0.2	0.39	0.23	0.07	0.02	0.23	0.09	0.24	0.26	0.47
	GB	0.49	0.62	0.43	0.72	0.93	0.66	0.76	0.64	0.66	0.81	0.71	0.62	0.62	0.56
	DT	0.51	0.68	0.41	0.48	0.78	0.61	0.56	0.53	0.71	0.71	0.73	0.63	0.73	0.67
	DB	0.59	0.62	0.41	0.72	0.93	0.73	0.72	0.63	0.85	0.86	0.62	0.66	0.63	0.63
P@N	GT	0.53	0.13	0.07	0.01	0.04	0.11	0.07	0.06	0.01	0.05	0.02	0.02	0.06	0.31
	GB	0.19	0.21	0.18	0.17	0.14	0.15	0.14	0.23	0.26	0.21	0.24	0.19	0.25	0.2
	DT	0.2	0.16	0.23	0.18	0.16	0.14	0.16	0.12	0.19	0.15	0.18	0.2	0.14	0.2
	DB	0.4	0.2	0.27	0.18	0.16	0.19	0.21	0.2	0.12	0.12	0.26	0.16	0.39	0.21

6 结束语

本文针对 MRG 算法不能正确提取不连通模型骨架这一弊端,提出了动态邻接封闭区间连接的方法,并根据得到的骨架提出了基于球面相交特征的检索方法.实验结果表明,本文方法性能稳定,检索结果较高斯曲率约束的 MRG 算法均有提升,在某些类别中提升效果明显.

进一步的工作要在取得较好的骨架的基础上,结合三维模型上的其他细节信息来计算三维模型之间的相似度,以提高检索准确率.

参考文献:

- [1] 张明,李娟.改进的三维模型形状分布检索算法[J].计算机应用,2012,32(5):6-9.
- [2] 谭晓.一种基于球面调和分析的三维模型检索算法[J].计算机工程与应用,2011,47(19):194-196.
- [3] 赵仲孟,聂丽娜,张选平.基于二维投影点集的三维模型检索算法研究[J].微电子学与计算机,2013,30(1):143-147.
- [4] 姜阳,吕学强,付成睿,等.基于边界点描述符的三维模型检索研究[J].微电子学与计算机,2013,30(8):71-74.
- [5] Siddiqi K, Shokoufandeh A, Dickinson S J, et al. Shock graphs and shape matching[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 35(1): 13-32.
- [6] Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T, et al. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes[C]//Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. Ohando, Florida, ACM, 2001: 203-212.
- [7] 韩丽,张黎娜,楚秉智.一种 MRG 骨架树的三维模型检索方法[J].计算机工程与应用,2011,47(31):167-170.
- [8] 张黎娜,韩丽,楚秉智.融合形状特征的 MRG 骨架树三维检索方法[J].计算机工程与设计,2011,32(7):2421-2423.
- [9] 韩丽,楚秉智,高小山.高斯曲率约束的 MRG 骨架提取优化算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(9):1227-1231.
- [10] 黄坤武,唐杰,武港山.改进的多分辨率 Reeb 图骨架抽取算法[J].计算机应用,2006,26(2):415-418.
- [11] Performance measures used [EB/OL]. [2013-12-10]. <http://give-lab.cs.uu.nl/SHREC/shrec2007/performanceMeasures.html>.

作者简介:

霍磊男,(1988—),硕士研究生.研究方向为多媒体信息检索与处理. E-mail:mailuo1988@163.com.
 吕学强男,(1970—),博士研究生,教授.研究方向为中文与多媒体信息处理.
 张凯男,(1985—),硕士研究生,工程师.研究方向为智能交通.