

基于混合签名的三维模型匹配算法

郭慧婷,况立群,韩 燮

(中北大学 计算机与控制工程学院,山西 太原 030051)

摘 要: 基于传统的 Reeb 图(RG)表示方法,提出一种新的 Reeb 图描述法,对 RG 进行参数化表示,加强了 RG 表示中的拓扑一致性,突出了模型的几何结构特征. 构建 RG 后,将其分割为多个 Reeb 图表,再经过拓扑化映射形成标准平面域,分别计算面积变化与角度变化,作为描述三维形状的特征的混合签名. 并利用该方法进行三维模型检索,提高模型间相似性估计的准确性,首先根据相应签名的最小差异,创建相应的 Reeb 图表对,然后通过匹配 Reeb 图表对,量化模型间全局相似度. 实验表明,相比较于其他方法,该检索方法更加高效、准确.

关键词: 三维模型;Reeb 图;Reeb 图表;表面参数化;混合签名

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)03-0115-05

3D Model Matching Algorithm Based on Hybrid Signatures

GUO Hui-ting, KUANG Li-qun, HAN Xie

(College of Computer and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: This study presents a new local feature matching approach based Reeb graph (RG). The central contribution is to reinforce the topological consistency of the graph-based description. the RGs are enriched with geometry signatures based on parameterisation approaches. After RG construction, the shape is segmented into Reeb charts of controlled topology mapped to its canonical planar domain. Then, two stretching signatures, corresponding to the area and angle distortion, are taken as three-dimensional-shape descriptor. The similarity estimation is performed in two steps. The first is forming the pairs of similar Reeb charts, according to the minimal distance between their corresponding signatures. Then to measure the global similarity which quantifies the similitude degree between all the matched Reeb charts. Retrieval experiments have shown that the proposed matching scheme provides an overall retrieval efficiency gain compared to recent advanced methods.

Key words: 3D model; Reeb graph; Reeb chart; surface parameterization; hybrid signatures

1 引言

随着三维数据获取及计算机技术的成熟,三维模型特征检索成为研究热点. 三维模型检索中,一些表达和描述三维形状的技术已取得很大的成就^[1],较早的一些研究是基于全局形状表示的,然而近几年三维匹配的核心技术偏向于局部形状描述.

基于图结构表示的局部特征匹配算法被广泛使用^[2],Reeb 图法是描述三维模型拓扑信息的一种重要手段,该方法可以提取模型的骨架特征,骨架能很

好地表示拓扑结构信息,忽略原模型中的冗余信息,提高存储空间利用率,是一种有效的拓扑描述符.

Hilaga^[3]等人在全局检索内容中提出了多分辨率 Reeb 图(MRG)的算法. Tung 和 Schmitt^[4]提出了扩展的 MRG 算法,通过增加几何和色度的分布特征充实拓扑标准,提高特征匹配准确性.

Reeb 图法也可以应用在三维模型的局部检索中,主要原理是将三维模型分割为一系列子部分,因为一些模型间的整体视觉差异性较大,可以对相似的子部分进行匹配. Biasotti^[5]提出扩展的 RG 算

法,计算等高线的有限集和子部分的球谐函数签名,该方法 RG 结构对等距变换具有鲁棒性,但球谐函数不具备该性质. Tierny^[6]提出改进的特征匹配方案,利用 Reeb 图表扩展签名处理局部形状检索问题,该方法在检索方面效果显著,但不足之处是拓扑形状描述的区别性较大,从而忽略局部细节特征.

本文提出依据 RG 表示的三维网格模型检索技术,本文方法相较于现有方法,检索更加准确、高效.

2 混合签名计算

Tierny 提出^[6]的基于 Reeb 图的检索方案中,采用重建参数技术的方法计算模型子部分的几何特征,三角网格表面 M 被分割为一系列的 Reeb 图表,包含盘状或环状的拓扑结构. 通过测量 Reeb 图表映射到标准平面域 D 的形变,将每一个 Reeb 图表展开为一个签名.

本文在 Tierny 方法的基础上,扩展了签名获取的方法,通过将 Reeb 图表映射到标准平面域,获得一对关于面积变化与角度变化的几何签名,相比较于 Tierny 方法,在模型匹配时使用几何签名作为局部特征进行相似性匹配,本方法通过使用一对关于 Reeb 图表的混合签名,可以同时解决全局与局部的相似性检测. 下面主要介绍 Reeb 图表的分割,并且通过模型表面参数化^[7]计算面积与角度的形变.

为了增强在刚性变换中的不变性和非刚性变换中的鲁棒性,利用基于测地线距离的 Morse 函数,将三角网格模型转换为 Reeb 图结构,引入一些视觉语义的分解方法^[8],提取特征点(一般位于明显部位末端),对网格模型的每个顶点 $v \in M$, $f(v) = f(v, v_f)$, v_f 是距离 v 点最近的特征点,图 1(a)中显示了 f 函数的等高线和特征点(指尖部位). 关于构建 Reeb 图的方法^[3]不做具体描述.

图 1(b)为一个双重 Reeb 图,图中每条边 E_i 聚合为一个节点, (c) 和 (d) 显示了原始手模型被分割为多个 Reeb 图表,事实上,Reeb 图表是对模型表面每个节点划分后的子部分.

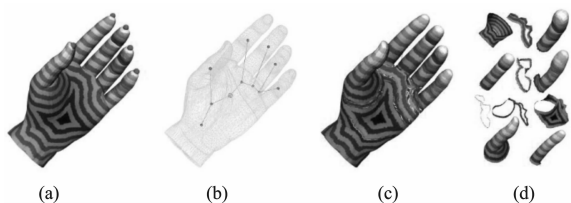


图 1 手模型分割为 Reeb 图表

2.1 面积签名

定义映射函数 $\Psi: M \rightarrow R(f)$ 为模型表面 M 上各顶点到其 Reeb 图 R 等价区域的映射, E_i 是相同 Reeb 图的边, 定义 $C_i = \Psi^{-1}(E_i)$, 为 Reeb 图表, 对应于模型表面分块. 每张 Reeb 图表通过其映射函数 Ψ_i 映射到标准平面域 D 上而被参数化, 因为保留了原始 RG 的特征, Reeb 图表具有圆状或环状拓扑结构. 在被函数 Ψ_i 映射之前, RG 的每条边 E_i 都具有两个极值, 这两个极值形成了 Reeb 图表 C_i 的封闭边界部分, 因此 Reeb 图表具有环状拓扑特性. 盘状 Reeb 图表是其中的一个特例, 如果 Reeb 图表邻接 f 函数的一个局部极值, 那么相关的边界将收缩围为一点, 这种情况下 Reeb 图表具有盘状结构.

在环状拓扑情况下, 定义 B_1 为环状 Reeb 图表 C_i 的最短边界, B_2 为相应的最长边界. 如图 2(a) 中, 函数 Ψ 将 B_1 映射为单位平面圆环 D_A 的内部边界, B_2 为外部边界, $\rho(v) \in (0, 1]$, 其为 Reeb 图表上 B_1 到任意一点 $v \in C_i$ 归一化后的 f 函数值的绝对差值, 可以发现 ρ 的子集同样具有环状拓扑结构, 随着参数 ρ 的增加, 子集部分的形状随之改变, 加剧了映射为 D_A 的引起的形变.

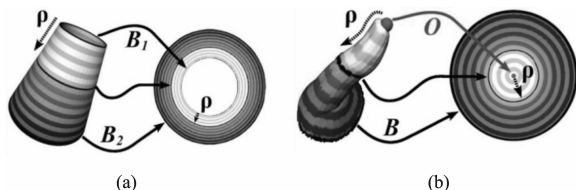


图 2 环状和盘状 Reeb 图表

因此, 为了掌握 Reeb 图表映射为 D_A 过程中的面积变化特征, 引入 Ψ_i 映射下的扩展签名 λ_{a_i} , 表示如下(1 是单位圆环的内部半径值):

$$\lambda_{a_i} = \frac{\text{area}(C_i)}{\text{area}(D_A)} = \frac{\text{area}(C_i(\rho))}{\pi(\rho+1)^2 - \pi} \quad (1)$$

对于一个圆盘状的 Reeb 图表 C_i , 定义 f 函数的局部极值为 O 点, B 为边界值, 如图 2(b) 中, 其 Ψ_i 函数将 O 映射为单位圆盘 D_D 中心, B 映射为 D_D 的边界, f 函数值的等高线被映射为 D_D 的同心圆. 同理, $\rho(v) \in (0, 1]$ 为 Reeb 图表上 O 到任意一点 $v \in C_i$ 归一化后的 f 函数值的绝对差值, 在映射过程中, 与面积变化相关的扩展签名为

$$\lambda_{a_i} = \frac{\text{area}(C_i)}{\text{area}(D_D)} = \frac{\text{area}(C_i(\rho))}{\pi\rho^2} \quad (2)$$

式中, $\text{area}(C_i)$ 代表 Reeb 图表 C_i 原始表面参数 ρ 的子集区域面积, $\text{area}(D_D)$ 表示单位平面圆盘上相应

的子集区域面积, $\text{area}(C_i)$ 可以通过计算相应模型表面三角网格的面积和得到。

图3显示了不同形状的物体的面积签名, 由于 f 函数是基于测地线距离的, 增强了在刚性变换中的不变性和非刚性变换中的鲁棒性^[9], 如图3(b)中, 拇指弯曲版本的签名和原始拇指的签名几乎是相同的, 此外, 签名还能够克服噪声的干扰, 如图3(a)所示。

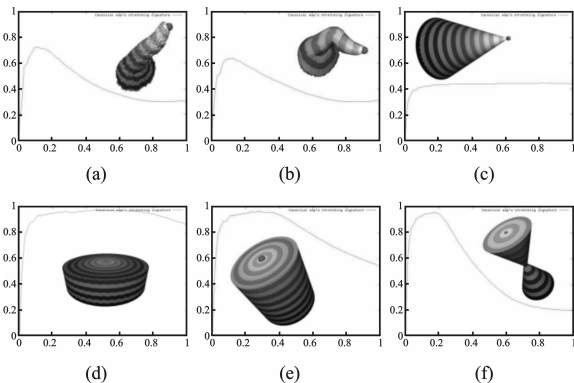


图3 各类 Reeb 图表的面积签名

面积签名和所表达的物体形状具有如下所述的关系, 图3(d)中, 当 ρ 值增加到 0.65 时, C_i 图表为平面, 因此当 $\rho = 0.65$, 其面积签名 λ_{ai} 趋向于 1; 当 Reeb 图表为一个圆锥体, 其面积签名 $\lambda_{ai} = \sin(\alpha)$, 其中 $\alpha = \text{atan}(r/h)$, r 和 h 为圆锥的半径和高, 因此, 如图3(c)中, λ_{ai} 趋于一个常数项; 当 Reeb 图表为图3(f)中类似瓶颈的形状时, 其面积签名趋向为 S 曲线。

2.2 角度签名

需要注意, Reeb 图表映射为标准平面域的过程中不仅会引起面积的变化, 同时还有角度的变化, 因此, 可以应用类似计算面积变化的方法, 引入计算关于角度变化的扩展签名^[10]。

定义 $\theta_{ci}(\rho)$ 是参数 ρ 的子集部分在原始分割表面 C_i 的角度, $\theta_D(\rho)$ 代表子集部分映射到标准平面域 D (单位圆盘或者单位圆环) 上的角度, $\theta_{ai}(\rho)$ 可以近似为 ρ 周围的所有角度之和, 如果 θ_k 是其中的角度之一, 则 $\theta_{ai}(\rho)$ 的计算公式为

$$\theta_{ci}(\rho) = \sum_k \theta_k \quad (3)$$

需要注意, 不同于 Reeb 图表 C_i , 对于任何节点 $v \in D$, 平面域角度和 $\theta_D(\rho)$ 会累加到 2π , 由于平面映射, 角度形变均匀分布在参数 ρ 周围, 因此, 关于角度形变的签名为

$$\lambda_{\theta_i} = \frac{2\pi}{\theta_{ci}(\rho)} \quad (4)$$

图4显示了不同形状, 原始图表的面积签名与角度签名, 图中虚线表示面积签名, 实线表示角度签名, 可以看出, 在 ρ 值较小时, 两个签名的值相近。另外, 当 ρ 值增加时, 角度签名的值保持稳定不变。角度签名是衡量 ρ 周围角度之和的量, 因此对于 ρ 值的变化不敏感。

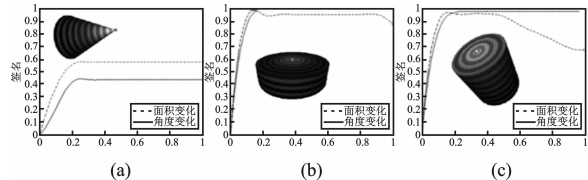


图4 面积签名与角度签名对比图

概括来讲, 查询模型 M_q 表示为 Reeb 图结构 R_q 后, 被分割为不同的 Reeb 图表, 每一个 Reeb 图表都具有其相关的属性特征, 具体而言, 将关于面积与角度的这对签名 $(\lambda_{ai}, \lambda_{\theta_i})$, 作为特征属性进行全局相似性度量, 下面将介绍如何得到全局相似性计算的度量方法。

3 全局相似性计算

这一部分进行原始查询模型 M_q 和匹配模型 M_c 之间的比较, 通过各自模型对应的 Reeb 图结构 R_q 和 R_c 计算相似性, 定义 Reeb 图表 $C_i \in R_q$ 与 $C_j \in R_c$ 之间的相似性为 $\text{sim}(C_i, C_j)$ 。两模型的 Reeb 图结构 R_q 和 R_c 之间的相似性 $\text{SIM}(R_q, R_c)$ 为每一对 Reeb 图表之间相似性的总和, 其中关键是找到待匹配的 Reeb 图表对。模型全局匹配算法如下。

```

Require: 包含一系列 Reeb 图表  $C_j$  的集合  $V$ ;  $V = C_1; \dots; C_n$ ;
1: 构造原始查询模型  $M_q$  的 Reeb 图  $R_q$ .
2: for all  $C_i \in R_q$  do
3:   计算混合签名对  $\lambda_{ai}$  和  $\lambda_{\theta_i}$ .
4:   for all 集合索引中的  $R_c$  do
5:     for all  $C_j \in V$  do
6:       计算  $\text{sim}(C_i, C_j)$ .
7:     end for
8:     选择  $C_j^* = \arg \min_{C_j \in R_q} (\text{sim}(C_i, C_j))$ .
9:     从  $V$  中移除  $C_j^*$ .
10:  end for
11: 根据每个图表  $C_i \in R_q$  的相似性  $\text{sim}(C_i, C_j^*)$  计算全局相似性  $\text{SIM}(R_q, R_c)$ .
12: end for
13: 根据  $\text{SIM}(R_q, R_c)$  值递减顺序将集合中的记录分类。
  
```

本文中, 对于待匹配的 Reeb 图表 $C_i \in R_q$, 在如下的相似性公式 sim 中, 选择 sim 值最高值的 C_j^* 与其进行匹配。

$$\text{sim}(C_i, C_j) = 1 - L_{\text{NI}}(C_i, C_j) \quad (5)$$

签名 C_i 和 C_j 的相差度为 L_1 , L_1 由上述的面积签名和角度签, 根据式(1)~(4), 对 L_1 标准化处理

后得到 L_{N1} , 即 L_{N1} 是 Reeb 图表对之间面积签名与角度签名相差度 L_1 的加权和, 因此 Reeb 图表 C_i 与其最接近的 Reeb 图表 C_j 之间的相似性度量为

$$\text{sim}(C_i, C_j^*) = 1 - \alpha \cdot L_{N1}(\lambda_{a_i}, \lambda_{a_j}) - (1 - \alpha) \cdot L_{N1}(\lambda_{\theta_i}, \lambda_{\theta_j}) \quad (6)$$

式中, $(0 < \alpha < 1)$ 决定了相似性 $\text{sim}(C_i, C_j^*)$ 计算中面积签名与角度签名各自的权重, 模型间整体相似性计算如下:

$$\text{SIM}(R_q, R_c) = \frac{\sum_{C_i \in R_q, C_j^* \in R_c} \text{sim}(C_i, C_j^*)}{|R_q|} \quad (7)$$

$|R_q|$ 是查询模型相应的 Reeb 图 R_q 分割为 Reeb 图表的个数, 整体的匹配方案如算法 1 所示.

4 实验结果

4.1 实验环境

本文匹配算法的时间复杂度, 执行时间是利用 Visual Studio 实现的, 源代码使用 C++ 编程, 硬件平台为英特尔酷睿 3 处理器, 内存为 2.0 GB, Win 7 操作系统的笔记本电脑; 根据原始查询模型表面的顶点数与数据库中的模型数量, 检索的平均处理时间不等.

在 Reeb 图的创建过程中, 利用测地线距离的积分, 保证了刚体变换的中的鲁棒性. 从有限特征点集中进行了积分运算, 保证了局部形变情况下的稳定性. 因此, 利用 f 函数计算出的拓扑骨架特征, 针对仿射变换和等距变换中具有不变性和鲁棒性的特点.

4.2 全局相似性

首先, 利用标准化的相差度, 比较 Reeb 图表的签名特征, 计算两模型间的相差度, 利用上述匹配算法匹配拓扑等价图表对, 最小化相差度, 从而减小模型间的总体差异, 最终计算出两个模型间的全局相似性 SIM. 由于本文混合签名的简明特性, 一旦计算出查询模型的 Reeb 图, 该模型和整个库模型之间模型形状比较可以快速实现.

图 5 显示了采用本方法对原始查询手模型进行检索的结果, 模型中相匹配的图表具有相同颜色, 可以注意到, 原始手模型的指手指部分与每一个匹配模型的手指部位进行了正确的配对, 模型的手掌部分也具有类似的情况, 表明了本文签名算法的有效性, 此外, 因为检索结果最佳的前几项手模型与查询模型相比较, 具有不同的姿态, 因此姿态的不同没有影响匹配的结果, 很显然本文混合签名算法具有姿态不变性.

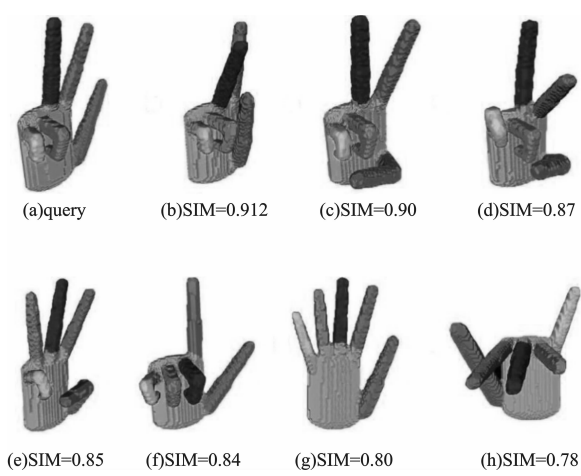


图 5 手查询模型匹配结果

4.3 局部相似性

图 6 显示了一个单独手模型与人体模型间的 Reeb 图表相似性匹配图, 模型中具有相同颜色的 Reeb 图表进行了匹配, 在图中可以观察到, 手模型的拇指部分与人体模型的拇指进行了正确匹配, 其余的手指部分虽然姿势不同, 但也进行了相互匹配, 在之后的工作中, 依据本算法的基础上, 在模型的局部匹配上提出改进, 比如在上述事例中, 可以对正确顺序的手指部位进行匹配.

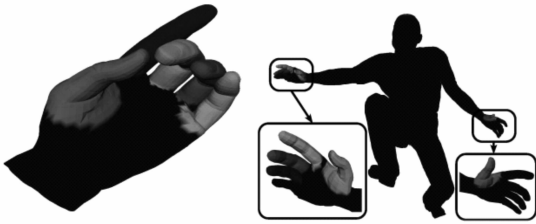


图 6 手模型与人体模型的相似性匹配

5 结束语

本文提出了一种新的基于内容的三维模型检索技术, 基于 RG 方法, 创建一种有效的局部形状描述符, 在匹配方案中, 构造原始查询模型的 Reeb 图结构, 将其分割为多个 Reeb 图表, 计算图表的签名对作为相似性度量中的属性特征, 上述实验结果表明, 此方法在有效性和准确性方面有突出的表现. 实验结果还表明, 在多种检索评估标准下, 与其他算法相比, 本文算法有很显著的性能改进.

本文算法还可以作进一步的研究, 之后工作中, 通过研究模型节点的长度值, 增加模型拓扑签名属性. 另外, 计划利用 Reeb 图算法, 提出动态网格匹配算法, RG 作为拓扑属性, 足够描述三维动态模型

的特征,这个研究主题也是三维模型检索方面的新方向.

参考文献:

[1] Lian Z, Godil A, Bustos B, et al. A comparison of methods for non-rigid 3Dshape retrieval [J]. Pattern Recognition,2013, 46(1):449-461.

[2] Biasotti S, Giorgi D, Spagnuolo M, et al. Reebgraphs for shapeanalysis and application[J]. Theory Computer Science, 2008, 392:5-22.

[3] Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T, et al. Topology matching for fullyautomatic similarity estimation of 3D shapes[J] . ACM SIGGRAPH, 2001:203-212.

[4] Tung T, Schmitt F. SHREC08 entry: shape retrieval of noisy watertight modelsusing a MRG[C]// IEEE Int. Conf. on Shape Modeling and Applications. New York:IEEE,2008:229-230.

[5] Biasotti S, Marini S, Spagnuolo M, et al. Sub-part correspondenceby structural descriptors of 3D shapes [J]. Computer Aided Design, 2006, 38 (9), 1002-1019.

[6] Tierny J, Vandeborre J P, Daoudi M. Partial 3D shape retrieval by Reeb patternunfolding [J]. Computer Graph Forum-Eurograph Assoc, 2009, 28 (1);

41-55.

[7] Lavoué G. Bag of words and local spectral descriptor for 3D partial shaperetrieval[C]//3DOR '11 Proceedings of the 4th Eurographics conference on 3D Object Retrieval. ACM,2011.

[8] Li B, Godil A, Aono M, et al. SHREC12 track: generic 3D shape retrieval[C]//Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval. Cagliariy, 2012: 19-126.

[9] Sun J, Chen X, Funkhouse T. Fuzzy geodesics and consistent sparsecorrespondences for deformable shapes[J]. Computer Graph Forum, 2010, 29(5): 1535-1544.

[10] Lok Ming Lui, Wei Zeng, Shing Tung. Shape analysis of planar multiply-Connected objects using conformal welding[J]. IEEE transactions on pattern analysisand machine intelligence,2013, 36(7):1384-1340.

作者简介:

郭慧婷 女,(1990-),硕士研究生. 研究方向为仿真与可视化. E-mail: 632491946@qq. com.

况立群 男,(1976-),副教授,硕士生导师. 研究方向为仿真与可视化、虚拟现实.

韩 雯 女,(1964-),教授,博士生导师. 研究方向为仿真与可视化、虚拟现实.

(上接第 114 页)

[8] Erup L, Gardner F M, Harris R. Interpolation in digital modems. II. Implementation and performance[J]. Communications IEEE Transactions on, 1993, 41(6): 998-1008.

[9] Harris F. Performance and design of Farrow filter used for arbitrary resampling[C]// Int Conf on Digital Signal Processing. IEEE,1997:595-599.

[10] 高志成,肖先赐. 高阶重采样滤波器的多项式近似实现[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(1):25-30.

作者简介:

李 浩 男,(1991-),博士研究生. 研究方向为无线通信信号处理. E-mail:1371184149@qq. com.

王志刚 男,(1967-),副教授,研究方向为宽带时域测试、无线通信信号处理.

王厚军 男,(1961-),教授,博士生导师. 研究方向为宽带时域测试、集成电路测试设计、现代信号处理与检测技术.