

用球面混合曲率图像比较三角网格模型的相似性

马元魁¹, 张树生², 白晓亮²

(1. 西安工业大学理学院, 710032, 西安;

2. 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 710072, 西安)

摘要: 针对现有相似性比较算法对模型的局部细节特征描述不足的现状, 提出了一种零亏格三角网格模型形状相似性比较的新方法. 在对三角网格模型进行姿势配准以后, 映射三角网格模型到单位球上, 并用多种曲率生成球面混合曲率图像, 然后用球面调和函数对其分解, 提取一维旋转不变的形状描述子进行相似性比较. 实验结果表明, 采用球面混合曲率图像可以对三角网格模型中不同类型的曲面进行清楚的区分; 文中提出的方法能更细致地区别三维模型, 对网格分辨率鲁棒且特征提取稳定, 因此可以提高三维模型检索的有效性.

关键词: 三角网格模型; 相似性比较; 球面混合曲率图像

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0097-05

Similarity Comparison of Triangular Mesh by Spherical Hybrid Curvature Image

MA Yuankui^{1,2}, ZHANG Shusheng², BAI Xiaoliang²

(1. Department of Mathematics and Physics, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China; 2. The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The existing current similarity comparison algorithms cannot describe local features of models in detail, a new shape similarity comparison method of zero-genus triangular mesh models is proposed. The model is mapped onto a unit sphere after pose alignment to generate the spherical hybrid curvature image, then is decomposed by spherical harmonic function, and one-dimensional rotation invariant shape descriptor is extracted for similarity comparison. It is shown that the spherical hybrid curvature image enables to clearly discriminate different types of 3D model surfaces with robust mesh resolution and stable feature extraction.

Keywords: triangular mesh; similarity comparison; spherical hybrid curvature image

三维模型检索作为一种管理和重用三维模型的重要技术是目前的研究热点, 多数的三维模型检索研究以三维模型的整体相似性为基础, 可以从整体形状的角度实现三维模型的管理及重用. 三维模型的相似性比较是三维模型检索的核心, 相似性比较算法根据使用的特征提取技术不同, 可以划分为空域空间、频域空间和基于图像的比较方法.

空域空间的比较方法是最直接比较方法, 大多数比较方法都是基于空域空间的. 基于空域空间的比较方法大多使用了统计学方法, 通过统计数据来描述模型的形状特征. 不同的比较方法使用了不同的统计计算方法, 典型方法包括形状直方图^[1]、点密度^[2]、加权点集^[3]、形状分布^[4]以及基于矩^[5]的方法, 其中使用最多、效果最好的方法是形状分布方

收稿日期: 2011-10-08. 作者简介: 马元魁(1980—), 女, 讲师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075336); 国家自然科学基金天元基金资助项目(11126199); 陕西省教育厅专项基金资助项目(09JK491).

网络出版时间: 2012-02-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120224.1036.001.html>

法. 形状分布方法的优点是不需要对模型进行对齐等预处理, 并且具有旋转不变性, 但缺点是要计算大量的统计数据, 因此比较的效率较低.

频域空间比较方法将三维模型转换到频域空间, 在频域空间提取特征进行比较. 频域空间比较方法有傅里叶变换^[6]、球面调和分析^[7]和小波变换^[8]等, 其中傅里叶变换和球面调和分析研究得较多. 不管是傅里叶变换还是球面调和分析方法, 其优点都是特征提取稳定, 比较效果在一定情况下好于空域方法.

基于图像的比较方法有基于二维视图、基于几何图像的比较方法^[9-10]等. 基于二维视图进行相似性比较的方法需要计算三维模型的多幅视图^[11]. Gu等^[12]提出了用二维几何图像表示三维网格, 算法需要把三维网格切开然后映射到单位正方形上. Laga等^[10]提出了一种基于几何图像的形状匹配算法, 然而, 相似的三维模型不能保证有相同的切割路径, 因为切割路径的选择有多种, 而不同的切割路径对应的几何图像是不同的. 扩展的高斯图像用法向量作为几何特征来比较形状的相似性, 但扩展的高斯图像对于非凸物体是不唯一的, 存在着歧义. Liu等^[13]提出了基于球面法向图像的形状相似性比较方法, 把三维网格模型的法向量经共形映射映射到单位球上, 不需要把网格切开, 而且每个形状的球面法向图像是唯一的. 另外, 最近有学者还提出了基于温度分布的形状描述子, 对三维模型进行了相似性比较^[14-15].

本文提出了基于球面混合曲率图像以及球面调和分析的形状相似性比较方法, 把三维网格的多种曲率特征经球面参数化映射到球面上, 映射是一一对应的, 而且球面混合曲率图像更能体现三维网格的几何特征, 所以能够更好地区别三维形状.

1 背景知识

1.1 姿势配准

姿势配准可以消除由不同姿势引起的特征向量的变化, 考虑的因素一般包括比例缩放、平移和旋转. 通过模型平移、旋转和缩放, 使相比较的模型位置、方向、大小调整为一致. 具体过程是: ①把三角网格模型的质心或者几何中心平移到原点; ②计算缩放因子, 对三角网格模型进行归一化; ③旋转三角网格模型, 使模型的3个主轴与坐标轴重合^[16-17].

1.2 球面参数化

为了分析三维物体的几何特征, 一般先映射物

体到平面域或球面域上, 然后在平面或球面上进行分析. 对于一个闭曲面, 映射到球上比映射到平面上产生的变形小. 由互联网或光学测量获得的三角网格模型多数是零亏格模型, 或很容易转化为零亏格模型(例如, 光学测量获得的模型经过简单的孔洞修补即可转化为零亏格模型), 对于大量零亏格的三维模型, 参数化到与它拓扑同胚的球面更为合理. 本文假设非零亏格三角网格模型已经转化为零亏格模型. 在现有球面参数化方法中, 累进网格参数化方法可以快速地处理复杂网格, 运算速度非常快, 所以本文采用周昆^[18]的累进网格参数化方法, 其算法如下.

步骤1 简化网格获得一个含有很少测量点的模型, 记录简化过程形成一个渐进网格.

步骤2 采用投影法完成简化后网格模型的球面参数化.

步骤3 通过点分裂操作还原网格模型, 同时计算新插入顶点的参数.

1.3 球面调和分析

三角网格模型被映射到球上以后, 用几何特征来作相似性比较. Schudy等^[19]利用球面调和分析把曲面表示成一个球面上的函数. 本文把映射到球面上的某个曲率特征展开成球面调和函数的一个线性组合, 即

$$f(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l C_l^m Y_l^m(\theta, \phi) \quad (1)$$

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \left(\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \right)^{1/2} P_l^m(\cos\theta) e^{im\phi} \quad (2)$$

$$P_l^m(x) = \frac{(-1)^m}{2^l l!} (1-x^2)^{m/2} \frac{d^{l+m}}{dx^{l+m}} (x^2-1)^l \quad (3)$$

$$C_l^m = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} Y_l^{m*}(\theta, \phi) f(\theta, \phi) \sin\theta d\phi d\theta \quad (4)$$

$$\theta \in [0, \pi]; \phi \in [0, 2\pi)$$

式中: $Y_l^m(\theta, \phi)$ 为 l 阶 m 次的球面调和分析的正交基; l 为频率带宽; m 为每个频带下的频率分量, 且 $|m| \leq l$; P_l^m 为 Legendre 多项式; C_l^m 为系数, 由式(4)惟一决定; $Y_l^{m*}(\theta, \phi)$ 为 $Y_l^m(\theta, \phi)$ 的复共轭.

复值球面调和函数可以组合成具有同样的正交性和完备性的实值函数, 实值球面调和函数更适合于描述实值曲面函数. 曲面函数往往被定义为固定 l 的实值球面调和函数的组合, 常用于形状分析和变形研究. 实值球面调和函数的定义如下

$$Y_l^m(\theta,\phi)=\begin{cases}2^{-1/2}(Y_l^m(\theta,\phi)+(-1)^mY_l^{-m}(\theta,\phi))=2^{1/2}N_l^m\cos(m\phi)P_l^m\cos\theta, & m>0\\Y_l^0(\theta,\phi)=N_l^mP_l^m\cos\theta, & m=0\\2^{-1/2}(Y_l^m(\theta,\phi)-(-1)^mY_l^{-m}(\theta,\phi))=2^{1/2}N_l^{|m|}\sin(|m|\phi)P_l^{|m|}\cos\theta, & m<0\end{cases}\quad(5)$$
$$N_l^m=\left(\frac{2l+1}{4\pi}\frac{(l-m)!}{(l+m)!}\right)^{1/2}$$

由 C_l^m 构成的向量在进一步的相似性比较中用于表示原形状的特征向量。

2 相似性比较

2.1 球面混合曲率图像

大多数机械零件都是由常见曲面如平面、球面、圆柱面等构成,常见曲面的曲率是它们的特征属性(见表 1)。虽然某种曲率相等的常见曲面可能类型不同,但是从多种曲率中任选 3 种取定以后,所对应的常见曲面类型一般只有一种。如高斯曲率等于 0 的常见曲面有平面与圆柱面,但最大主曲率 k_1 、最小主曲率 k_2 和高斯曲率 k_g 都等于 0 的常见曲面只有平面。因此,在此采用曲率混合映射法,而不是依靠单一曲率进行映射,这样可以对不同类型的曲面进行清楚的区分。

表 1 常用曲面的几何属性

曲面类型	k_1	k_2	k_g
平面	0	0	0
球面	$1/R$	$1/R$	$1/R^2$
圆柱面	$1/R_1$	0	0
圆锥面	$\cos\alpha/\rho$	0	0

注: R 为球面半径; R_1 为圆柱面半径; ρ 为圆锥面上的点所在纬圆的半径; α 为锥的半顶角。

本文用累进网格参数化方法把曲率映射到单位球上,球面混合曲率图像通过插值经度和纬度网格点生成,插值在球面三角形 $V_1V_2V_3$ 中的一个网格点为

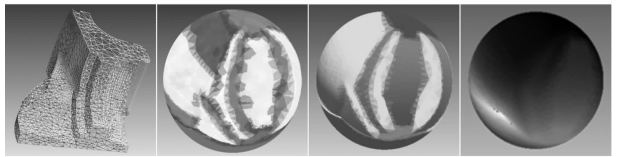
$$P=\frac{uV_1+vV_2+wV_3}{\|uV_1+vV_2+wV_3\|},\quad 0\leqslant u,v,w\leqslant 1,\quad u+v+w=1\quad(6)$$

其中 P 点处的曲率值通过插值原球面三角形 $V_1V_2V_3$ 顶点的曲率值得到。在曲率值和颜色之间建立映射关系,即可得到球面颜色值

$$(R,G,B)=255(K_1,K_2,K_g)\quad(7)$$

式中: K_1 、 K_2 、 K_g 分别表示经过归一化、直方图均衡等预处理后的最大、最小主曲率及高斯曲率。可以选择不同的曲率进行结合映射,以得到不同的颜色值。

与球面法向图像^[13]相比较,球面混合曲率图像保持了球面法向图像的优点,即通过映射一个闭曲面到球上变形较小,不需要把网格切开,避免了在相似形状模型中不同的切割路径带来的变化,而且不需要从球到多面体的映射。从图 1 中可以看出,球面混合曲率图像(SCI)比球面法向图像(SNI)及球面位置图像(SGI)具有更好的特性。在球面混合曲率图像中,不同类型的曲面对应了不同的颜色值,而三角网格模型被刻画得更加细致。



(a)Fan Disk模型 (b)SCI (c)SNI (d)SGI

图 1 Fan Disk 模型及其球面图像

2.2 特征提取与相似性比较

本文用球面调和函数分解球面混合曲率图像来进行相似性比较。根据球面调和变换的性质,在每个频带下的能量与球面信号的坐标系旋转变换无关,所以本文把能量大小作为特征向量,即定义模型的形状描述子 t_l 为 $f(\theta,\phi)$ 在 l 的能量

$$t_l=\left(\sum_{m=-l}^l|C_l^m|^2\right)^{1/2}$$

在实际应用中,一般使用前 N 个频带的球面调和和分析系数进行球面信号的近似重构。对于三维模型形状的相似性比较,一般选 $N=16$ ^[10],可使球面调和近似地重构原球面信号,相应地式(1)可以近似表示为

$$f(\theta,\phi)\approx\sum_{l=0}^{N-1}\sum_{m=-l}^lC_l^mY_l^m(\theta,\phi)$$

通过 $f(\theta,\phi)$ 的采样值来计算 C_l^m ,由此得到的特征向量为

$$\boldsymbol{T}=\{t_l\mid l=0,\cdots,N-1\}$$

本文采用最小二乘拟合方法求解线性方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}=\boldsymbol{B}$,以得到未知量 $C_l^{m[20]}$,其中

$$\boldsymbol{A}=(y_{i,j})_{k\times k};\quad \boldsymbol{X}=(x_i)_{1\times k}^T;\quad \boldsymbol{B}=(f_i)_{1\times k}^T$$

即

$$\begin{pmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \cdots & y_{1,k} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \cdots & y_{2,k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{k,1} & y_{k,2} & \cdots & y_{k,k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_k \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中

$$y_{i,j} = Y_l^m(\theta_i, \phi_i); j = l^2 + l + m + 1; \\ k = N^2; f_i = f(\theta_i, \phi_i)$$

输入球面采样点 (θ_i, ϕ_i) 以及对应的函数值 f_i ,即可得到由 C_l^m 构成的未知量

$$\mathbf{X} = (C_0^0, C_1^{-1}, C_1^0, C_1^1, C_2^{-2}, C_2^{-1}, C_2^0, C_2^1, C_2^2, \cdots, C_N^N)^T$$

由于稠密网格包含高细节的几何信息,对粗分类来说可能用不到,但多分辨率网格却有利于粗到细的分类,因此采用球面参数化的渐进网格.对于多分辨率网格来说,特征向量的大小是可缩放的,即短的特征向量用于第 1 层次分类,更长的向量用于细分类,这种缩放性通过变化球面调和函数的阶数的最大值就可以得到.

在得到模型的形状描述子之后,需要计算 2 个模型的相似度.本文采用 2 个模型 M_1, M_2 的形状描述子 $t_l^{M_1}, t_l^{M_2}$ 之间的欧几里得距离来刻画 2 个模型的相似度^[10],距离越小相似程度越高,即描述子之间的距离为

$$D(M_1, M_2) = \left(\sum_{l=0}^{N-1} (t_l^{M_1} - t_l^{M_2})^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

3 实验和讨论

以圆柱体为例,计算圆柱体与球体基于不同的球面图像的形状描述子之间的距离(见表 2),取球面调和函数的最高阶 $N=16$.从表 2 中可以看出,利用球面混合曲率图像得到的距离大约是利用球面法向图像、球面位置图像得到的距离的 10 倍,由此可以看出,球面混合曲率图像更能细致地刻画 2 个模型的不同.

为了验证算法,做了更一般的实验,在美国普渡大学 ESB(Engineering Shape Benchmark)模型库里对 Round Change At End 类的部分零件进行了相似性比较.表 3 给出了部分模型对应的球面混合曲率图像,以及 2 个模型的形状描述子之间的距离.表中球面混合曲率图像的方向与模型的方向基本一致,这样有利于观察相似模型的球面曲率图像的相似性.如第 1 组的第 1 个模型中间最长的圆柱面部分对应其球面混合曲率图像中大片的深灰色部分;第 1 组的第 2 个模型左上角的球冠对应其球面混合

曲率图像中左上角的浅灰色部分,在上述 2 幅图像中都可以看到深灰色部分与浅灰色部分,只是它们所占整幅图像的比例不同,这是因为它们所对应的模型上的曲面部分所占整个模型的比例不同所致.表 4 给出了用本文方法对 ESB 中 Round Change At End 类零件以及 T Shaped Parts 类零件进行比较的结果,表中从左到右按与索引模型的形状描述子之间的距离由小到大排列,比较结果符合实际.

表 2 圆柱体与球体的比较结果

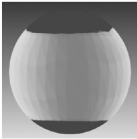
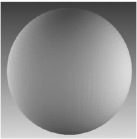
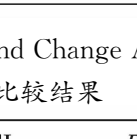
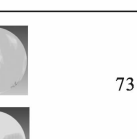
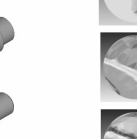
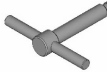
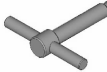
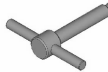
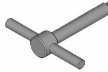
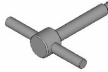
图像类型	圆柱体	球体	$D(M_1, M_2)$
SCI			3.051 240
			
SNI			0.499 709
			
SGI			0.495 533
			

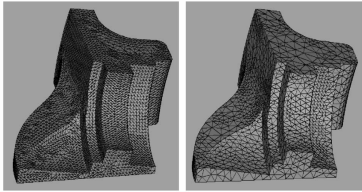
表 3 ESB 中 Round Change At End 类部分零件的比较结果

模型	SCI	$D(M_1, M_2)$
		73 693 900 000
		
		7.299 03
		
		781 115
		

因为本文球面混合曲率图像形成的过程中用到的球面参数化是基于渐进网格的思想,所以从本文的球面参数化方法中,可以得到同一个三角网格模型的不同分辨率的网格,如图 2 所示.实验表明,同一个三角网格模型的多分辨率网格模型都被归到了同一类,由此证明本文方法对网格的分辨率是鲁棒的.

表 4 ESB 中 Round Change At End 类以及 T Shaped Parts 类零件的比较结果

索引模型				比较结果		
						
ganter_din98	ganter_din98	ganter_din98D	ganter_din468	ganter_gn597	ganter_din_469	ganter_gn599
						
din6304	din6304	ganter_din6306- M60-90-E	ganter_din6304- M20-110-F1	ganter_din6304- M8-50-F1	ganter_din6306- M10-70-E	ganter_din6306- M6-40-E



(a)原始 (b)低分辨率

图 2 原始及低分辨率的 Fan disk 网格模型

4 结 论

本文基于球面混合曲率图像以及球面调和分
析,提出了三角网格模型形状相似性比较的方法. 在
对三角网格模型进行姿势配准以后,生成球面混合
曲率图像,进而利用球面调和函数进行分解,提取了
球面混合曲率图像的特征向量,并进行了相似性比
较. 实验发现,球面混合曲率图像比球面法向图像、
球面位置图像具有更好的特性,采用球面混合曲率
图像可以对三角网格模型中不同类型的曲面进行清
楚的区分. 因此,本文方法能够更细致地区别三维模
型,对网格分辨率鲁棒且特征提取稳定.

参考文献:

[1] ANKERST M, KASTENMLLER G, KRIEGEL H P, et al. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Large Spatial Databases. London, UK: Springer-Verlag, 1999: 207-226.

[2] SUZUKI M, KATO T, OTSU N. A similarity retrieval of 3D polygonal models using rotation invariant shape descriptors [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2000). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society Press, 2000: 2946-2952.

[3] TANGELDER J W, VELTKAMP R C. Polyhedral

model retrieval using weighted point sets [J]. International Journal of Image and Graphics, 2003, 3(1): 209-229.

[4] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807-832.

[5] SAUPE D, VRANIC D V. 3D model retrieval with spherical harmonics and moments [C]// Proceedings of the 23rd DAGM Symposium on Pattern Recognition. London, UK: Springer-Verlag, 2001: 392-397.

[6] VRANIC D V, SAUPE D. 3D shape descriptor based on 3D Fourier transform [C] // Proceedings of the EURASIP Conference on Digital Signal Processing for Multimedia Communications and Services (ECMCS 2001). Budapest, Hungary: Scientific Association for Info-communications, 2001: 271-274.

[7] VRANIC D V, SAUPE D. Description of 3D-shape using a complex function on the sphere [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo(ICME 2002). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society Press, 2002: 177-180.

[8] PAQUET E, RIOUX M. The MPEG-7 standard and the content-based management of three-dimensional data: a case study [C]// IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society Press, 1999: 375-380.

[9] MIN P, CHEN J, FUNKHOUSER T. A 2D sketch interface for a 3D model search engine [C] // SIGGRAPH 2002 Technical Sketches. New York, USA: ACM, 2002: 138-138.

[10] LAGA H, TAKAHASHI H, NAKAJIMA M. Spherical parameterization and geometry image-based 3D shape similarity estimation [J]. Visual Computer, 2006, 22(5): 324-331.

[11] CHEN D Y, TIAN X P, SHEN Y T, et al. On visual

- similarity based 3D model retrieval [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3):223-232.
- [12] GU Xianfeng, GORTLER S, HOPPE H. Geometry images[C]//Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 2002: 355-361.
- [13] LIU Shaojun, LI Jia. Genus-zero shape classification using spherical normal image [C]//18th International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society Press, 2006: 126-129.
- [14] SUN Jian, OVSJANIKOV M, GUIBA L. A concise and provably informative multi-scale signature based on heat diffusion [J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(5): 1383-1392.
- [15] FANG Yi, SUN Mengtian, RAMANI K. Temperature distribution descriptor for robust 3D shape retrieval [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society Press, 2011: 9-16.
- [16] VRANIC D V, SAUPE D. 3D model retrieval[C]//Proceedings of Spring Conference on Computer Graphics and Its Applications. Bratislava, Slovakia: Comenius University, 2000: 89-93.
- [17] VRANIC D V. 3D model retrieval [D]. Leipzig, Germany: University of Leipzig, 2004.
- [18] 周昆. 数字几何处理:理论与应用 [D]. 杭州:浙江大学, 2002.
- [19] SCHUDY R B, BALLARD D H. Towards an anatomical model of heart motion as seen in 4-D cardiac ultrasound data [C]//Proceedings of the 6th Conference on Computer Applications in Radiology and Computer-Aided Analysis of Radiological Images. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society Press, 1979: 145-150.
- [20] LI Shen, CHUNG M K. Large-scale modeling of parametric surfaces using spherical harmonics[C]//3rd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society Press, 2006: 294-301.

(编辑 管咏梅)