第38卷 第18期
Vol.38 No.18

计 算 机 工 程
Computer Engineering

2012年9月
September 2012

·开发研究与设计技术· 文章编号：1000—3428(2012)18—0258—04 文献标识码：A 中图分类号：TP301.6

基于复球面映射的产品形状相似性度量算法

戴立玲，谢李华，卢章平，袁 浩

(江苏大学图形技术研究所，江苏 镇江 212013)

摘 要：在产品外观设计专利侵权纠纷的判定中，缺乏科学、客观、定量的评判依据。为此，提出一种改进的基于复球面映射的产品形状相似性度量算法。以STL模型表征产品三维模型的几何形状特征，将模型表面面片映射到经过经纬划分的最小外接球上，得到包含面片法向、面积和空间位置信息的特征描述子，利用统计特征方法计算模型之间的相似度。实验结果表明，该算法具有较好的稳定性和可靠性。

关键词：产品形状相似度；外观设计；模型预处理；特征提取；球面映射；相似度计算

Metrics Algorithm of Product Shape Similarity Based on Complex Sphere Mapping

DAI Li-ling, XIE Li-hua, LU Zhang-ping, YUAN Hao

(Institute of Graphics Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

【Abstract】Scientific, objective, quantitative evaluation criterion are lack in product appearance design patent infringement judgment. In order to solve this problem, an improved metrics algorithm for product shape similarity based on complex spherere mapping is presented in this paper. Using STL model to characterize the product 3D model geometry features, a character description which containes the information of facets' normal, area and space position, obtains by mapping the model facets to the smallest circumscribed sphere. The similarity of models can be calculated by accumulating the similarity of model's each spherical unit. Experimental results show the stability and reliability of the algorithm are good.

【Key words】product shape similarity; appearance design; model preprocessing; feature extraction; sphere mapping; similarity calculation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.18.070

1 概述

随着人类物质文化生活水平的不断提高，人们在购买商品时，除了注重其质量和性能外，越来越注重其外形美观。由于外观设计能为工业产品生产者带来显著的经济效益，因此近年来我国外观设计专利的申请量飞速增长。与此同时，各民事主体之间发生的外观设计专利侵权纠纷不断增多。由于专利法规定的比较原则的局限性，因此给外观设计专利侵权纠纷案件的审理带来一定困难。

目前，专利法规定的判断外观设计相同或相近的方法有：(1)肉眼观察。(2)隔离观察，直接对比。(3)整体观察，综合判断[1]。这些方法都是以人的视觉的主观意见判断外观设计是否相同或相近，没有给出一个科学的、客观的、定量的标准，因此，判决结果很难让当事双方都信服。构成外观设计的要素有3种，即外观设计专利产品的形状、图案和色彩。在上述3种要素中，形状是最主要的，在侵权判定时，应以对比形状为主。对于三维模型形状相似性的研究，目前，主要集中在三维模型检索的应用上。按算法利用的三维模型形状特征描述符所表达内容，可将算法分为基于统计特性的形状相似性比较算法[2]、基于拓扑关系的形状相似性比较算法[3]、基于函数投影的形状相似性比较算法[4]、基于视觉特征的形状相似性比较算法[5]。这些算法追求的是效率和查全率，其精度不能满足辅助产品外观设计专利侵权纠纷判定的要求。

针对上述问题，本文提出一种改进的基于复球面特征映射的形状相似性度量算法。对产品形状的相似性进行定量的研究，为产品外观设计的侵权判定提供一种科学的、客观的、定量的评判依据。

2 算法设计

基于扩展高斯图像算法可以唯一地表征凸多面体的形状特征[6]，但不能唯一地表征凹面体。因此，不少研究人员对其特征描述符进行了改进，加入模型表面面片的面积和空间位置等信息，使其对非凸的物体也能很好表征出来。其中，文献[7]提出一种基于复球面映射的特征提取技术，并采用球面相关技术对模型进行相似性匹配取得了一定效果。其描述子定义式为：

$$CSF_{n_k} = A_K + iD_K \tag{1}$$

作者简介：戴立玲(1955－)，女，教授，主研方向：工程信息可视化，计算机辅助设计；谢李华，硕士研究生；卢章平，教授、博士生导师；袁 浩，副教授

收稿日期：2011-12-29 **修回日期：**2012-01-30 **E-mail：**xielihua19@163.com

其中，球面上每个点被扩展为一个复数点；点的实部由面片的法向 $\boldsymbol{n}_k$ 和面积 A_K 表示；点的虚部则由面片到原点的距离 D_K 表示，这种映射称为复球面映射。

在映射过程中，由于采用了模型的质心作为原点，因此给该方法带来了不稳定的性质；采样的不均匀有时会导致模型质心的变化，影响了球面映射的稳定；D_K 也会出现不唯一的情况，最终导致匹配结果的不准确。针对这些问题，本文采用模型的最小外接球球心作为原点，以面片到球面的距离作为点虚部对算法进行改进。

2.1 模型预处理

在本文中以 STL 模型表征产品三维模型的几何形状特征，其模型预处理步骤如下：

(1)模型的简化。由于本文的目的是给产品外观设计专利侵权纠纷判定提供一种科学、客观、定量的评判依据，因此所要处理的对象是同类产品中外观具有一定相似性的产品模型。而专利法规定在侵权纠纷判断过程中，应以产品外观作为判断的主体，以产品在视觉上的显著部位和创新部分作为判断的主要依据[1]。因此，在进行相似性度量之前，可以对产品模型进行适当的简化，除去模型上的噪声点、略去不易察觉部分的某些特征，可以降低模型的复杂度，节省运算时间，提高计算精度。

(2)确定模型的最小外接球。根据空间不共面的 4 个点，可以确定一个球的理论[8]可以在三角网格模型上找出不共面的 4 个点，使其在同一球面上。具体步骤如下：

Step1 找出模型上距离最远的 2 个点 A、B，如下：

$$H_1=\max\left\{d\mid d=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2+(z_i-z_j)^2}\right\} \tag{2}$$

以这 2 个点确定直线为 AB，记 A、B 坐标分别为：(x_1, y_1, z_1)、(x_2, y_2, z_2)。

Step2 找出模型上到直线 AB 距离最远的点 C，如下：

$$H_2=\max\left\{d\mid d=\frac{\sqrt{\begin{vmatrix}x_i-x_1 & y_i-y_1\\ x_2-x_1 & y_2-y_1\end{vmatrix}^2+\begin{vmatrix}y_i-y_1 & z_i-z_1\\ y_2-y_1 & z_2-z_1\end{vmatrix}^2+\begin{vmatrix}z_i-z_1 & x_i-x_1\\ z_2-z_1 & x_2-x_1\end{vmatrix}^2}}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}}\right\} \tag{3}$$

则以 ABC 确定一个平面，设其平面方程为：

$$AX+BY+CZ+D=0$$

Step3 找出模型上到平面 ABC 距离最远的点 D，如下：

$$H_3=\max\left\{d\mid d=\frac{|AX_i+BY_i+CZ_i+D|}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}\right\} \tag{4}$$

由 $ABCD$ 构成一个四面体。则这个四面体的最小外接球即为该模型的最小外接球。以该球的球心作为坐标原点，保证了模型的平移不变性。

(3)进行缩放变换。设最小外接球的半径是 R，则取缩放系数 $K=\frac{1}{R}$。对模型的所有顶点进行缩放变换：$P'=P\times K$。其中，P 为缩放变换之前三维模型的顶点坐标；P' 即为完成缩放变换之后三维模型的顶点坐标。同时也对外接球做相同的变换使其成为单位球。这样实现了模型的比例归一化。

(4)对模型进行姿态调整。由于本文是以辅助产品外观设计的侵权判定为背景而进行的研究，因此操作的对象都是外形比较相近的模型，所以，采用文献[9]提出的各向同性变换的方法，对其进行姿态调整便可得到较好效果。

2.2 特征提取

先将外接单位球进行划分，用 M 个经度和 $N-1$ 个纬度将球划分为 $M\times N$ 个单元，则每个单元(即在一定经纬度范围内)对应一个法线方向范围，同时，可以确定每个单元 C_{ij} 的质心坐标为 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})，单位复球面的经纬划分如图 1 所示。

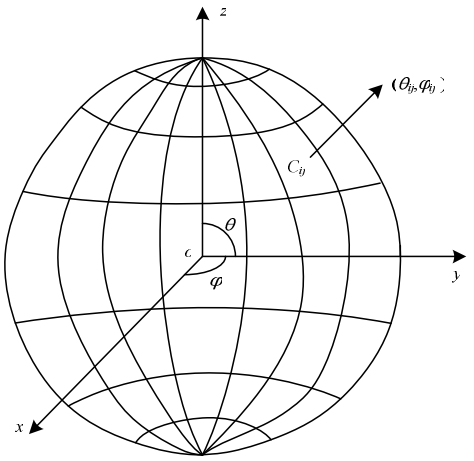


图 1 单位复球面的经纬划分

将模型表面面片映射到该单位球上，则表面面片法向量与球面单元法向量相同的个数就计为该单元的值。三维模型中三角面片示意图如图 2 所示。

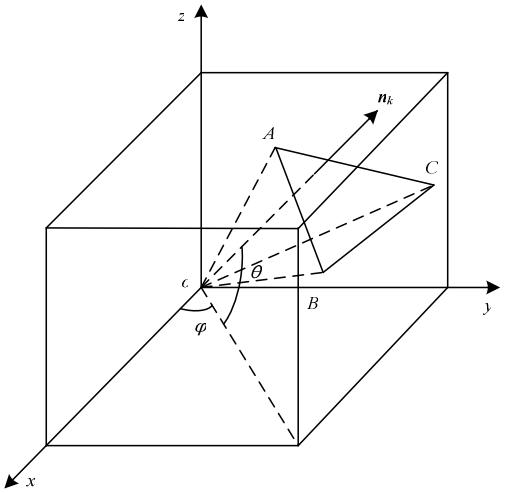


图 2 三维模型中三角面片示意图

由图 2 可知，在此假设为三角面片 ABC，其顶点坐标分别为：(x_1, y_1, z_1)、(x_2, y_2, z_2)、(x_3, y_3, z_3)，面片的法向为 $\boldsymbol{n}_k$，面片到球面的距离定义为面片质心到球面上相同法向量的单元的质心的距离 H_K，面片的面积为 S_K，则在单位

复球面上的映射点定义为：

$$MCSF_{\boldsymbol{n}_k}=S_K+iH_K \tag{5}$$

面片的法向定义为：

$$\boldsymbol{n}_k=(x_k,y_k,z_k)=(\theta_k,\phi_k) \tag{6}$$

其中，$x_k^2+y_k^2+z_k^2=1$；$\boldsymbol{n}_k$ 为单位法向量；(θ_k,ϕ_k) 为面片法向量的球面坐标表示。并且有：

$$x_k=\begin{vmatrix}y_2-y_1 & z_2-z_1\\ y_3-y_1 & z_3-z_1\end{vmatrix}$$

$$y_k=\begin{vmatrix}z_2-z_1 & x_2-x_1\\ z_3-z_1 & x_3-x_1\end{vmatrix}$$

$$z_k=\begin{vmatrix}x_2-x_1 & y_2-y_1\\ x_3-x_1 & y_3-y_1\end{vmatrix}$$

$$(\theta_k,\phi_k)=\left(\sin^{-1}(z_k),\tan^{-1}\left(\frac{y_k}{x_k}\right)\right) \tag{7}$$

面片质心 (x_c,y_c,z_c) 坐标为：

$$(x_c,y_c,z_c)=\left(\frac{x_1+y_1+z_1}{3},\frac{x_2+y_2+z_2}{3},\frac{x_3+y_3+z_3}{3}\right) \tag{8}$$

对应的球面单元的质心坐标为 (x_s,y_s,z_s)，则式(5)中面片面积 S_K 和面片到球面的距离 H_K 定义为：

$$S_K=\frac{\overline{AB}\cdot\overline{BC}\cdot\sqrt{1-\cos^2\alpha}}{2} \tag{9}$$

$$H_K=\sqrt{(x_s-x_c)^2+(y_s-y_c)^2+(z_s-z_c)^2} \tag{10}$$

由式(5)、式(9)、式(10)可得，这种映射同时包含了模型表面面片的法向、面积和空间位置信息，因此，更全面的描述了对象空间几何特征。即每一个表面面片都有且仅有一个映射描述子：$MCSF_{\boldsymbol{n}_k}=S_K+iH_K$ 与之对应。映射过程只需对模型所有面片进行一次扫描即可完成。

2.3 相似度计算

由于采用这种映射方法提取的模型特征是一些离散的量，因此可以采用统计特征的方法对其进行相似度的计算。

如图 1 所示，用 M 个经度和 N−1 个纬度将球划分为 $M\times N$ 个单元，则每个单元 C_{ij} 对应一个法线方向 $(\theta_{ij},\varphi_{ij})$，$(0\leqslant\theta\leqslant\pi,0\leqslant\varphi<2\pi)$。而这种划分可能会导致模型表面面片的法向的值不落在 $(\theta_{ij},\varphi_{ij})$ 值上，因此，要对 $(\theta_{ij},\varphi_{ij})$ 设一个小的阈值范围，即 $(\theta_{ij}\pm\omega,\varphi_{ij}\pm\varepsilon)$，$\omega$、$\varepsilon$ 是与 M 和 N 的选取相关的系数。当模型表面面片的法向落在这个小范围内时，视为法向是相同的。

把每一个表面面片的法向、面积和空间位置信息提取出来之后，要统计在每个球面单元 C_{ij} 内所具有法向相同的描述子个数。首先计算出每个小单元的相似度，再统计得出整体的相似度。

假设在 C_{ij} 这个单元里，模型 a 有 m 个法向相同的描述子：$MCSF_{\boldsymbol{n}_{ij}}^{a}=S_{ij}^{a_p}+iH_{ij}^{a_p}$，$p=1,2,\cdots,m$；模型 b 有 n 个法向相同的描述子：$MCSF_{\boldsymbol{n}_{ij}}^{b}=S_{ij}^{b_q}+iH_{ij}^{b_q}$，$q=1,2,\cdots,n$。首先按照面片间相对距离 $\Delta H=\min\left\{\left|H_{ij}^{a_p}-H_{ij}^{b_q}\right|\right\}$ 递增排序，并进行不重复的配对，再计算各对面片之间的相似面积，进而得出该单元内的相似度。

当 $m=n$ 时，正好可以配成 m 对。此时模型 a、模型 b 在单元 C_{ij} 的相似度 S_{ij} 为：

$$S_{ij}=\sum_{k=1}^{m}\frac{s_{ij}^{a_k}+s_{ij}^{b_k}-\left|s_{ij}^{a_k}-s_{ij}^{b_k}\right|}{S_a+S_b}\cdot\frac{H_{ij}^{a_k}+H_{ij}^{b_k}-\left|H_{ij}^{a_k}-H_{ij}^{b_k}\right|}{H_{ij}^{a_k}+H_{ij}^{b_k}} \tag{11}$$

其中，S_a、S_b 分别为模型 a 和模型 b 的总表面积。

当 $m\neq n$ 时(不妨设 $m>n$)，由 $\Delta H=\min\left\{\left|H_{ij}^{a_p}-H_{ij}^{b_q}\right|\right\}$ 取出前 n 对进行计算：

$$S_{ij}^{'}=\sum_{k=1}^{n}\frac{s_{ij}^{a_k}+s_{ij}^{b_k}-\left|s_{ij}^{a_k}-s_{ij}^{b_k}\right|}{S_a+S_b}\cdot\frac{H_{ij}^{a_k}+H_{ij}^{b_k}-\left|H_{ij}^{a_k}-H_{ij}^{b_k}\right|}{H_{ij}^{a_k}+H_{ij}^{b_k}} \tag{12}$$

在模型 a 中，剩下的 $m-n$ 个描述子分别与模型 b 中 ΔH 取得最大值的描述子(不妨设为 $MCSF_{\boldsymbol{n}_{ij}}^{b}=S_{ij}^{b_z}+iH_{ij}^{b_z}$)进行如下相似度计算：

$$S_{ij}^{''}=\frac{1}{2}\sum_{k=n+1}^{m}\frac{s_{ij}^{a_k}+s_{ij}^{b_z}-\left|s_{ij}^{a_k}-s_{ij}^{b_z}\right|}{S_a+S_b}\cdot\frac{H_{ij}^{a_k}+H_{ij}^{b_z}-\left|H_{ij}^{a_k}-H_{ij}^{b_z}\right|}{H_{ij}^{a_k}+H_{ij}^{b_z}} \tag{13}$$

此时模型 a、模型 b 在单元 C_{ij} 的相似度 S_{ij} 为：

$$S_{ij}=S_{ij}^{'}+S_{ij}^{''} \tag{14}$$

在计算出所有球面小单元 C_{ij} 内的相似度值之后，进行累加便得到整体的相似度。即模型 a、模型 b 的总相似度为：

$$S=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}S_{ij} \tag{15}$$

3 实验结果与分析

为验证本文算法的效果，以 VC++6.0 为开发平台，结合 Open GL 提供的图形库函数，对算法进行验证。以图 3 所示的罗技鼠标、键双行鼠标、花露水瓶为实验产品模型进行相似度计算。将最小外接球经纬划分为 100×100 个小单元，取 C_{ij} 对应法线方向 $(\theta_{ij},\varphi_{ij})$ 的阈值为：$\omega=0.005\pi$，$\varepsilon=0.005\pi$。实验模型简化如图 4 所示，图 5 为罗技鼠标与键双行鼠标相似性度量实验结果。



(a)罗技鼠标 (b)键双行鼠标 (c)花露水瓶

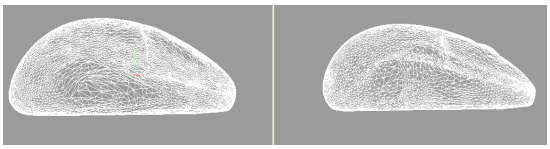
图 3 实验产品模型



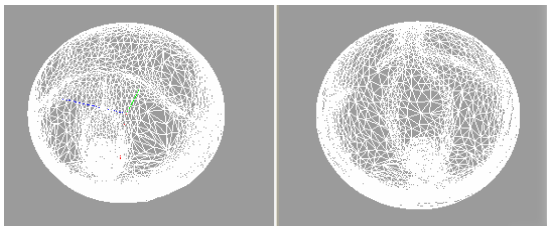
图 4 实验模型简化



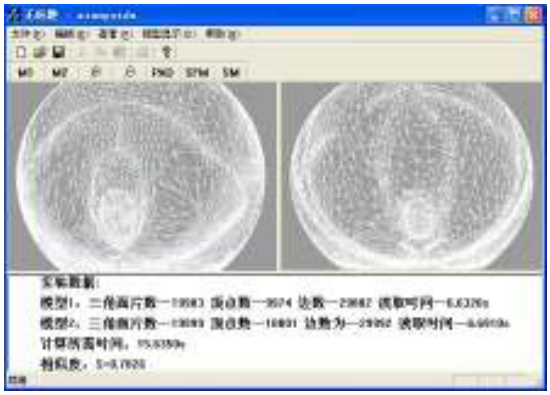
(a)载入模型



(b)姿态调整



(c)特征映射



(d)相似度计算

图 5　罗技鼠标与键双行鼠标相似性度量实验结果

图 4 略去不易察觉部分的一些细小特征；图 5(a)以模型的最小外接球球心作为坐标中心并完成比例缩放；图 5(c)为将模型表面的三角面片映射到最小外接球上，完成特征的提取。图 6 为罗技鼠标与花露水瓶相似性度量实验结果。

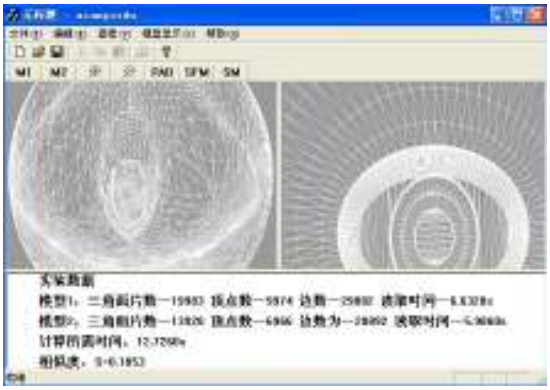


图 6　罗技鼠标与花露水瓶相似性度量实验结果

由图 5、图 6 可知，由三角面片数、读取时间、计算耗时等结果表明该算法具有较好的稳定性；由罗技鼠标与键双行鼠标的相似度为 0.782 6，罗技鼠标与花露水瓶相似性度为 0.185 3，表明该算法对产品模型的形状具有较强辨别能力，即实验结果具有较好的可靠性。

4　结束语

产品模型的形状是产品外观设计专利保护的重要特征之一，产品形状的相似度可以作为辅助产品外观设计专利侵权纠纷判定的重要依据。本文提出一种基于复球面映射的产品形状相似性度量算法。根据包含模型表面面片法向、面积和空间位置信息的特征描述子，对产品模型进行特征提取，用统计特征的方法实现相似度计算。实验结果表明，该算法对产品模型的形状具有较强的辨别能力，在辅助产品外观设计专利侵权纠纷判定中能发挥重要作用。外观设计包括形状、图案、色彩 3 个要素，如何把图案、色彩等属性加入到产品相似性比较中，将是今后的研究重点。

参考文献

[1] 冯晓青, 刘友华. 专利法[M]. 北京: 北京法律出版社, 2010.

[2] Wong Hau-San, Kent K T C, Horace H S, et al. 3D Head Model Classification by Evolutionary Optimization of the Extended Gaussian Image Representation[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(12): 2307-2322.

[3] 王　飞, 张树生, 白晓亮, 等. 拓扑和形状特征相结合的三维模型检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(1): 99-103.

[4] Saupe D, Vrani D V. 3D Model Retrieval with Spherical Harmonics and Moments[C]//Proc. of DAGM'01. Munich, Germany: [s. n.], 2001.

[5] Michael K, Thomas F, Szymon R. Rotation Invariant Spherical Harmonic Representation of 3D Shape Descriptors[C]//Proc. of Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing. [S. l.]: IEEE Press, 2003.

[6] Horn B. Extended Gaussian Image[EB/OL]. (2010-11-21). http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.18.3605.

[7] 崔晨旸. 三维模型检索中关键技术的研究[D]: 杭州: 浙江大学, 2005.

[8] 李嘉元. 过空间四点的球面方程和平面上点的圆的方程讨论[J]. 大理学院学报, 2003, 6(2): 61-62.

[9] Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Shape Matching and Anisotropy[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 623-629.

编辑　刘　冰