

文章编号:1001-9081(2006)04-0780-04

基于电场通量特征的 3D 模型检索方法

刘玉杰^{1,2,3}, 李宗民¹, 李 华²

(1. 中国石油大学(华东) 计算机与通信工程学院, 山东 东营 257062;

2. 中国科学院 智能信息处理重点实验室, 北京 100080; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

(yjliu@ict.ac.cn)

摘 要:对基于内容的三维模型检索的应用背景和现有算法进行了研究。结合物理学的基本原理,提出了一种静电场电通量描述子,在三维模型的模拟电场中设置测试球壳,计算各个测试球壳内部的电通量,用以描述三维模型。该描述子具有平移、旋转和缩放不变的特征,并对噪声有较强的鲁棒性。实验证明该描述子具有较强的检索能力。

关键词:电通量;3D 模型;检索

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Electric flux-based 3D model retrieval algorithm

LIU Yu-Jie^{1,2,3}, LI Zong-Min¹, LI Hua²

(1. School of Computer Science and Communication Engineering, China University of Petroleum, Dongying Shandong 257062, China;

2. Key Lab of Intelligent Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The retrieval methods and application of the content-based 3D model were investigated. A new 3D models electric flux descriptor was proposed on the basis of the electrical flux theory of electrostatics. The 3D model was supposed as charged body, then electrical flux was gotten by placing some testing concentric spheres around it. The electric flux descriptor is invariant to rigid transformations. Experiments show that it is a robust and effective method.

Key words: electric flux; 3D model; retrieval

0 引言

由于计算机软、硬件技术的发展,使得近年来 3D 模型也快速增长。如何充分利用已有的 3D 模型,提高 3D 模型利用率的问题也被提出来,要求我们能够提供简洁方便的 3D 模型分类检索方法。

3D 模型的底层特征包括颜色特征、纹理特征和形状特征。而相同的物体可能由不同的颜色和纹理来装饰,并且颜色和纹理在不同的光照条件和拍摄角度可能发生变化,而形状则表示了模型中有意义的关联区域和对象,形状特征总是保持稳定的。

针对三维模型检索问题,已经提出了很多方法^[1]。文献[2,3]分别获得了用于检索的 3D 不变量。文献[4]提出形分布方法,统计模型上随机采样点的几何特征的分布用于检索,实验证明算法简洁有效。文献[5]使用了 Zernike 多项式,构造一组不变量,用于模型检索。由于使用了几何矩,高阶多项式计算可能导致不稳定,所以高阶扩展受到限制。文献[6]的方法使用 3D 模型的骨架和拓扑结构作为模型特征,然后用 Reeb Graph 来存储,这种方法适用于有动作改变的模型。

文献[7]提出一种基于视觉相似性的 3D 模型比较算法。以 3D 模型的 20 个视图为基础来进行比较,并建立了一个界面友好的网络检索系统。文献[8]提出沿着三维模型的主轴切割模型以得到切片集合,基于这些二维多边形集相似

性度量的三维检索方法,并提出一种模型主轴的新的计算方法。文献[9]提出了三维极半径矩,并证明了这种矩具有平移、缩放和旋转的不变性,便于用于三维模型的识别。

本文结合物理学中的成果,使用电场的概念,假设 3D 模型为一个均匀带电体,然后分析该带电体的电场特征,并获取了电场的不变特征进行检索。实验证明这种特征是稳定、有效的,对模型具有一定的区分能力,而且计算简洁,维数容易扩展。

1 方法原理

在电学中,电荷均匀分布的任意带电体在自身空间周围所产生的静电场的分布是唯一的,而且该带电体与它在 3D 空间所产生的静电场是一一对应的。静电场只与该导体的大小,电荷密度的大小以及形状有关。所以,形状不同的均匀带电体在三维空间产生的电场分布是不同的,而根据电场的特征不同可以确定三维模型的形状不同。

电通量是通过任意曲面的电力线的数量度量,如图 1。

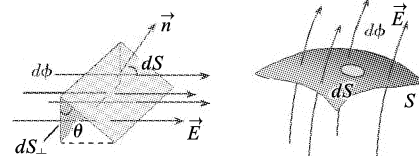


图 1 电场电通量

收稿日期:2005-10-24;修订日期:2005-01-09

基金项目:国家 863 计划资助项目(2001AA231031);国家重点基础研究发展规划资助项目(2004CB318000)

作者简介:刘玉杰(1971-),男,辽宁沈阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向:计算机图形学; 李宗民(1965-),男,山东聊城人,教授,博士,主要研究方向:计算机图形学、模式识别; 李华(1957-),男,山东长青人,研究员,博士,主要研究方向:计算机图形学。

dS 面元在垂直场强方向的投影是 dS_{\perp} , $d\phi = EdS_{\perp} = EdScos\theta = \vec{E} \cdot d\vec{S}$, 其中 E 是电场强度, \vec{n} 是 $d\vec{S}$ 面元的法线, θ 是 $d\vec{S}$ 面元法线与电力线方向夹角。穿过任意曲面的电通量 $\phi = \iint_S d\phi = \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \iint_S EdScos\theta$, 其中面元 dS 有两个方向, 而 $d\phi$ 也是可正可负。穿过封闭曲面的电通量是: $\phi = \oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$, 其中去曲面外发现方向为正方向。静电场的高斯定理中说明, 真空中穿过静电场任一闭合曲面的电通量, 等于包围在该面内的所有电荷代数和除以 ϵ_0 , 与面外电荷无关。

$$\phi = \oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \sum_{in} q/\epsilon_0 \quad (1)$$

其中 ϵ_0 是库仑常数。

2 方法介绍

本文使用电场电通量的概念来提取 3 维模型的特征, 然后进行模型分类、检索。主要的思想是假设被测试的 3 维模型是一个均匀带电的静电场, 然后在静电场设置多个测试球壳, 如图 2 所示, 计算静电场穿过每一个测试球壳的电通量, 作为 3 维模型的形状描述子, 我们称为电通量描述子。使用电通量描述子组成特征向量, 然后对不同模型的电通量描述子特征向量进行规范化, 再以规范的特征进行模型检索。

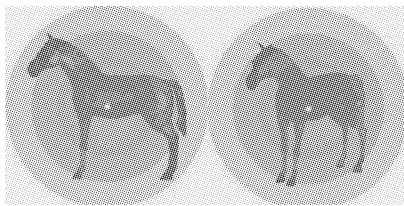


图 2 被测试模型和测试球壳

2.1 测试球壳设置

首先对不同方式表示 3 维模型进行体素化, 得到 3 维模型的体素信息^[10], 如图 3。

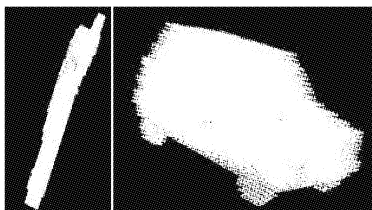


图 3 体素化后的模型

计算 3 维模型的几何矩, $l+m+n$ 阶的几何矩是由下面的积分来计算的。

$$M_{lmn} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1^l x_2^m x_3^n \rho(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3 \quad (2)$$

其中, $\rho(x_1, x_2, x_3)$ 是 3 维模型的密度函数。离散形式为:

$$M_{lmn} = \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^N x_{1i}^l x_{2j}^m x_{3k}^n \rho(x_{1i}, x_{2j}, x_{3k}) \quad (3)$$

其中, L, M, N 是 3 维模型在 x_1, x_2, x_3 上的体素的个数。

则该 3 维模型的质心坐标是由 0 阶和 1 阶几何矩来确定的, 是:

$$\bar{x}_1 = \frac{M_{100}}{M_{000}} \quad \bar{x}_2 = \frac{M_{010}}{M_{000}} \quad \bar{x}_3 = \frac{M_{001}}{M_{000}} \quad (4)$$

然后, 以 (x_1, x_2, x_3) 为中心, 设置多个同心测试球壳。测试球壳的设置方法是: 先计算出所有体素到中心的全部可能的距离, 再计算出最大距离 D_{max} , 计算 $d_{step} = D_{max}/n$, 其中 N 为测试球壳数, 然后分别以 $i \times d_{step}$ 为半径, 以 (x_1, x_2, x_3) 为球心设置测试球壳, $i = 1, \dots, n$ 。

2.2 电通量描述子的提取和规范化

分别计算静电场穿过个测试球壳的电通量。根据高斯定理, 静电场任一闭合曲面的电通量, 等于包围在该面内的所有电荷代数和除以 ϵ_0 , 与面外电荷无关。计算封闭球壳内电荷数目, 然后与常数相作用, 得到电通量描述子 $(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n)$, n 是测试球壳的数目。

由于不同的 3 维模型的仿真静电场的点电荷的个数不同, 所以需要对其进行规范化。计算仿真静电场的点电荷总数 N , 然后分别对每个测试球壳的电通量描述子进行归一化, 计算出规范化球壳的电通量后, 组成一个特征矢量 $(N\phi_1, N\phi_2, \dots, N\phi_n)$, 作为 3 维模型的电通量描述子。电通量描述子的分布用特征曲线来表示, 曲线的横坐标是特征的维数, 纵坐标是电通量特征分量的一阶差分。

表 1 测试模型

模型	数量
金字塔	3
茶壶	4
长方体	5
圆锥体	3
正八面体	8
圆柱体	7
圆环	4
球	4

2.3 电通量描述子检索

电通量描述子检索就是以电通量描述子为特征, 依次计算被检索 3 维模型和待检索 3 维模型之间的相似度, 然后根据大小来排序, 确定检索结果。相似度用两个模型之间电通量描述子的距离测度来衡量。

3 结果分析

本文使用 3D Max 制作了 41 个标准模型, 然后对模型进行体素化。在此基础上计算每一个模型的电场通量描述子。

3.1 不变性测试

图 4 是不同半径的球体的电场通量特征曲线。排除后面将要分析的分辨率的影响, 特征曲线的总体形状是一致的。

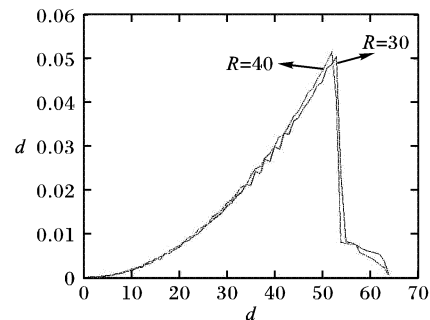


图 4 球 A ($R = 30$) 球 B ($R = 40$) 对应的特征曲线

图 5 是正八面体模型 A 进行旋转变换后的模型对应的特征曲线, 将模型 A 按 y 轴随机旋转得到模型 B, 再按 x 轴随机旋转得到模型 C, 再按 z 轴随机旋转得到的模型 D。从这四个模型得出特征曲线总体走向也是一致的。

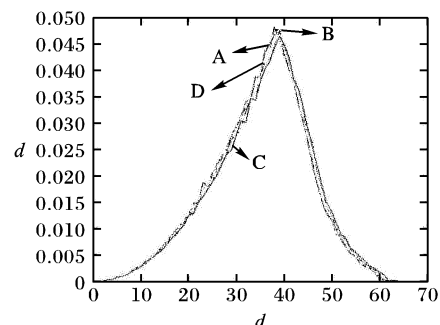


图 5 旋转不同角度的正八面体的特征曲线

由于在进行电场电通量描述子的提取时已经使用了模型质心, 对模型的平移进行了矫正, 再结合上述两种实验可以说

3.5 不同距离比较

把测试模型进行比较分类,然后将比较结果以矩阵的形式显示成图 8。横坐标从左向右分别对应 41 个不同模型,纵坐标从下到上对应同样的 41 个模型,模型分别按类来排列。图像中不同的颜色表示不同的相似性,深色代表获得的值比较小,浅色表示大的值。

采用如下几种不同的度量的定义来测试我们提取的特征在不同的度量下的检索能力^[11]。

(1) 明氏距离

$$D_q(X, Y) = \left(\sum_i |x_i - y_i|^q \right)^{1/q} \quad (5)$$

当 $q = 1$ 是曼哈顿距离,当 $q = 2$ 是欧氏距离。

(2) 兰氏距离

$$D(X, Y) = \sum_i \frac{|x_i - y_i|}{|x_i + y_i|} \quad (6)$$

(3) 特征向量夹角

$$\theta(X, Y) = \frac{\sum_i (x_i \times y_i)}{\sqrt{(\sum_i x_i) \times (\sum_i y_i)}} \quad (7)$$

(4) 相关系数

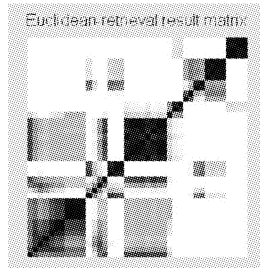


图 8 检索结果

$$C(X, Y) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_i (x_i - \bar{x})^2) \times (\sum_i (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (8)$$

(5) 豪斯道夫距离

$$H(X, Y) = \max(h(X, Y), h(Y, X)) \quad (9)$$

$$h(X, Y) = \max_{x \in X} \min_{y \in Y} \|x - y\|$$

从各个度量的比较结果看,曼哈顿距离、兰氏距离和豪斯道夫距离对不同模型的区分度比较低;欧氏距离、夹角和相关系数的区分能力较强,这三种度量基本能够准确的衡量模型之间的不同,本文选择欧氏距离作为模型检索的度量。

3.6 效率分析

本文提出的电场通量描述子,在计算描述子的时候,对模型每一个体素扫描两次,时间复杂度是 $O(n)$,其中, n 是体素个数;然后在对描述子规范化的时候,对描述子进行一次扫描,时间复杂度是 $O(m)$,其中, m 是描述子特征向量的维数,由于通常 $m \ll n$,所以,算法的时间复杂度是 $O(n)$ 。

3.7 实例测试

为了测试算法的作用,建立了一个小型的模型库,由 119 个模型组成,模型的具体类型如表 3 所示。表 4 给出了部分的检索结果,表明本算法的结果基本上与人的视觉感知相吻合。

表 3 测试模型

类别	手机	电壶	杯子	笔	鼠标	汽车
数量	82	5	3	4	4	21

表 4 实际模型检索结果

输入	检索结果(前9名)								

4 结语

本文在物理学静电场理论基础,提出一个描述 3D 模型的新的特征量——电场通量描述子。经过一个基本模型库和一个小型的实例模型库的测试,该特征量具有运算稳定,能够对基本模型进行识别,计算速度较快等特点。

针对大型的通用的模型库进行测试,检验其识别和检索的能力,对于实时检索系统的要求,速度还稍有不足,是需要改进的地方。

参考文献:

[1] JOHAN T, REMCO V. A survey of content based 3D shape retrieval methods[A]. International Conference on Shape Modeling[C]. Genova, IEEE Computer Society, 2004. 145 - 156.
 [2] LO CH, DON HS. 3-D Moment Forms: Their Construction and Application to Object Identification and Positioning[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1989, 11(10): 1053.
 [3] MAMISTVALOV AG. n-Dimensional Moment Invariants and Conceptual Mathematical Theory of Recognition n-Dimensional Solids[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1998, 20(8).
 [4] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distribu-

tions[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807.

[5] NOVOTNI M, KLEIN R. 3D Zernike Descriptors for Content Based Shape Retrieval[A]. the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications[C]. Seattle, ACM Press, 2003. 216 - 225.
 [6] HILAGA M, SHINAGAWA Y, KOHMURA T, et al. Topology Matching for Fully Automatic Similarity Estimation of 3D Shapes[A]. ACM SIGGRAPH[C]. Los Angeles, ACM Press, 2001. 203 - 212.
 [7] CHEN DY, TIAN XP, SHEN YT. Ming Ouhyoung, On visual similarity based 3D model retrieval[A]. European Association for Computer Graphics[C]. Granada, 2003. 223 - 232.
 [8] 普建涛,刘一,刘渭彬,等.一种基于二维多边形集相似性的三维模型检索方法[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(12): 1437.
 [9] LI ZM, ZHANG YZN, HOU KP, et al. 3D polar-radius invariant moments and structure moment invariants[A]. Proceedings of the 11th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns[C]. Beijing, 2005. 483 - 492.
 [10] 吴晓军,刘伟军,王天然,等.改进的基于欧氏距离测度网格模型体素化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(4): 592.
 [11] VELTKAMP R. Shape matching: similarity measures and algorithms [R]. Technical Report UU-CS-2001-03, Utrecht University, the Netherlands, 2001.