

基于极半径曲面矩的三维模型检索*

李宗民^{1,2+}, 刘玉杰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 257061)

²(中国科学院 计算技术研究所 智能信息处理重点实验室, 北京 100080)

3D Model Retrieval Based on Polar-Radius Surface Moment Invariants

LI Zong-Min^{1,2+}, LIU Yu-Jie¹, LI Hua²

¹(School of Computer Science and Communication Engineering, China University of Petroleum, Shandong 257061, China)

²(Key Laboratory Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-546-8397669, Fax: +86-546-8397669, E-mail: lizm@hdpu.edu.cn, http://www.upc.edu.cn

Li ZM, Liu YJ, Li H. 3D model retrieval based on polar-radius surface moment invariants. *Journal of Software*, 2007,18(Suppl.):71-76. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/s71.htm>

Abstract: In this paper, a 3D polar-radius surface moment is proposed, and is used for 3D model retrieval. 3D polar-radius surface moments are new moment invariants based on 3D polar-radius moments including the invariance on shift, rotation and scale transforms. Compared to previous methods to compute such moments, the computational complexity for calculating 3D moments can be decreased considerably. With the help of these moment invariants, the 3D models are distinguished accurately.

Key words: 3D model retrieval; 3D polar-radius moments; 3D polar-radius surface moments; invariant moments

摘要: 提出一种三维极半径曲面矩,并应用于三维模型检索.三维极半径矩是一种具有平移、旋转和缩放不变性的不变量,将三维极半径矩推广到三维极半径曲面矩获得了新的不变矩,该方法不需要将三角面片表示的三维模型数据体素化,从而提高了计算速度和计算精度.同时,基于这种三维极半径曲面矩的识别算法具有很好的识别率.

关键词: 三维模型检索;三维极半径矩;三维极半径曲面矩;不变矩

随着多媒体技术的发展和网络的普及,出现了第四种数字化多媒体——三维几何模型.由于三维模型具有更加丰富的视觉感知细节,因此在工业产品、虚拟现实、3D 游戏、影视动画、模拟仿真等领域得到了广泛应用.随着三维数据采集技术、三维图形建模方法及图形硬件技术的发展,在 Intel 网上已经发布了大量的三维几何模型库.目前进行高质量的三维建模往往需要花费大量的时间和精力,如果能够直接利用已有的模型,将节省大量开支,因此,如何对这些模型库中的三维模型进行高效的检索已经变得非常重要.由于大多数三维模型通常只包含几何和表面信息,缺少语义表达方式,因此,基于内容的三维模型检索技术成为目前研究的热点.三维模型检索技术大致分为 3 个部分:归一化、特征提取和相似性比较.其中特征提取是模型检索的关键技术.

矩方法是基于内容的三维模型检索中的一类重要方法,1962 年 Hu^[1]根据几何不变量理论提取了一系列不

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60533090, 60573154 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2004CB318000 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2007-04-15; Accepted 2007-11-25

变量用于二维模式识别,此后,矩在三维模型检索中也得到了应用.Elad 等人^[2]将 3D 几何矩用于三维模型检索.三维几何矩的定义如下所示:

$$m_{pqr} = \int_{\partial D} x^p y^q z^r dx dy dz \quad (1)$$

其中 ∂D 为三维模型 D 的表面, p, q, r 分别为各个坐标轴上的阶数.三维几何矩可看作是描述模型的函数 $f(x, y, z)$ 在多项式 $x^p y^q z^r$ 上的投影.几何矩中的基函数集 $\{x^p y^q z^r\}$ 只具有完备性,而不具备正交性.因此,几何矩对模型描述存在信息冗余.Teague^[3]提出使用正交函数作为基函数从而构造正交矩.Canterakis 结合球谐函数将 zernike 多项式从二维扩展到三维,从而定义了三维 zernike 矩^[4],Novotni 将三维 zernike 矩用于三维模型检索,并证明了 zernike 描述符在检索效率上要优于球谐描述符^[5].但由于 zernike 矩的计算使用了几何矩,从而导致高次多项式计算不够稳定,并且 zernike 矩计算复杂度较高.

我们曾提出了一种三维极半径矩,证明了这种矩具有平移、缩放和旋转的不变性,并且给出了 18 个不变矩表达式,可用于三维模型比较和识别^[6].本文在三维极半径矩的基础上进一步提出了三维极半径曲面矩,三维极半径曲面矩具有与三维极半径矩同样的不变性,能够达到同样识别区分的目的,但却提高了计算效率,计算复杂度从 $O(N^3)$ 降到了 $O(N^2)$,实验表明,三维极半径曲面不变矩具有较高的检索效率.

1 三维极半径矩

对于一个三维数据模型,设 $f(x, y, z)$ 是 (x, y, z) 处的灰度值,且点在物体区域内时 $f(x, y, z)=1$,其他情况 $f(x, y, z)=0$. (x_c, y_c, z_c) 为物体区域的形心, r 是物体区域中点到形心的距离,第 p 阶三维极半径矩定义为

$$M_p = \iiint_D r^p dV \quad (2)$$

其中, D 表示物体区域, $dV=rdrd\theta dz$ 为圆柱坐标下的体积单元, $r=\sqrt{(x-x_c)^2+(y-y_c)^2+(z-z_c)^2}$ 为极半径.

$$x_c = \frac{1}{V} \iiint_D x dV, y_c = \frac{1}{V} \iiint_D y dV, z_c = \frac{1}{V} \iiint_D z dV.$$

中心矩定义为

$$M_{cp} = \iiint_D (r - \bar{r})^p dV \quad (3)$$

其中, $\bar{r} = \frac{1}{V} \iiint_D r dV$.

归一化的矩、中心矩定义为

$$M_{np} = \frac{1}{V} \iiint_D \left(\frac{r}{\bar{r}} \right)^p dV \quad (4)$$

$$M_{ncp} = \frac{1}{V} \iiint_D \left(\frac{r - \bar{r}}{\bar{r}} \right)^p dV \quad (5)$$

对应离散的形式为

$$M_{np} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V \left(\frac{r_i}{\bar{r}} \right)^p \quad (6)$$

$$M_{ncp} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V \left(\frac{r_i - \bar{r}}{\bar{r}} \right)^p \quad (7)$$

其中, V 表示被检测物体包含的体素总和.

这里, M_{np} 和 M_{ncp} 具有平移、缩放和旋转的不变性.

2 三维极半径曲面矩及其不变量

对于由曲面片构成的三维数据模型,设 $f(x, y, z)$ 是 (x, y, z) 处的密度值,且点在曲面上时 $f(x, y, z)=1$,其他情况

$f(x,y,z)=0.(x_c,y_c,z_c)$ 为模型的形心; r 是面上的点到形心点的距离.

第 p 阶极半径曲面矩定义为

$$sm_p = \iint_D r^p dS \tag{8}$$

其中, $r=\sqrt{(x-x_c)^2+(y-y_c)^2+(z-z_c)^2}$ 为极半径.

$$x_c = \frac{1}{A} \iint_S x dS, y_c = \frac{1}{A} \iint_S y dS, z_c = \frac{1}{A} \iint_S z dS.$$

归一化的矩、中心矩定义为

$$sm_{np} = \frac{1}{A} \iint_S \left(\frac{r}{\bar{r}}\right)^p dS \tag{9}$$

$$sm_{ncp} = \frac{1}{A} \iint_S \left(\frac{r-\bar{r}}{\bar{r}}\right)^p dS \tag{10}$$

其中, A 为曲面 S 的面积,极半径均值 $\bar{r} = \frac{1}{A} \iint_S r dS$.

对应离散的形式为

$$sm_{np} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A \left(\frac{r_i}{\bar{r}}\right)^p \tag{11}$$

$$sm_{ncp} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A \left(\frac{r_i - \bar{r}}{\bar{r}}\right)^p \tag{12}$$

类似地,如果目标曲面形状均匀缩放 α 倍,则它的半径缩放 α 倍,面积缩放 α^2 倍.由此,不难证明归一化的曲面矩与中心矩具有平移、缩放和旋转不变性.

计算极半径曲面矩的算法步骤如下:

- (1) 取得三维模型的表面网格数据,包括顶点和三角形网格;
- (2) 取得曲面点数据,以此来获得三维模型的形心和表面积;
- (3) 根据形心值和表面积,计算三维模型的极半径均值;
- (4) 最后求得归一化后的极半径面矩和极半径中心面矩.

3 实验与结果分析

以下 5 组图,图 1~图 5 为三维模型动物的 5 组平面图像,图像均由 Vrm1 格式文件导出,其中各图中的(b)~(d)分别是(a)的原 Vrm1 格式文件中物体作旋转、缩放、平移后而导出的图像.图 1 模型总点数:3 493,面片数:6 520;图 2 模型总点数:784,面片数:1 328;图 3 模型总点数:2 129,面片数:4 034.图 4 模型表面总的三维坐标点个数:4 203,总的的面片数:1 928;图 5 模型表面总的三维坐标点个数:11 238,总的的面片数:6 902.

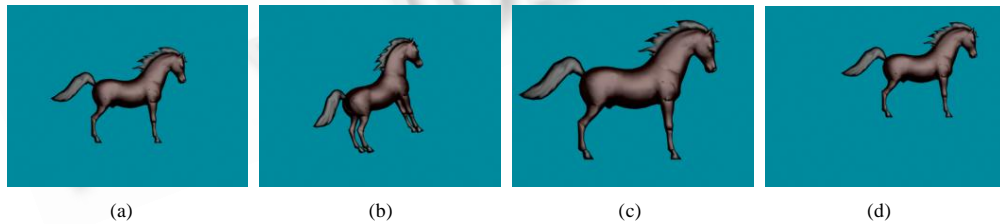


Fig.1 Horse1 model
图 1 Horse1 的图像

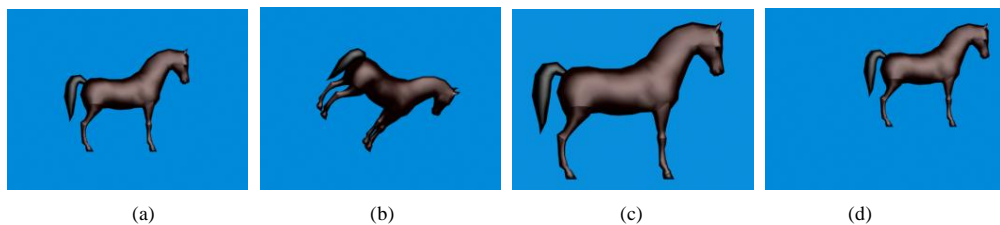


Fig.2 Horse2 model

图 2 Horse2 的图像



Fig.3 Horse3 model

图 3 Horse3 的图像



Fig.4 Bird11 model

图 4 Bird11 的图像

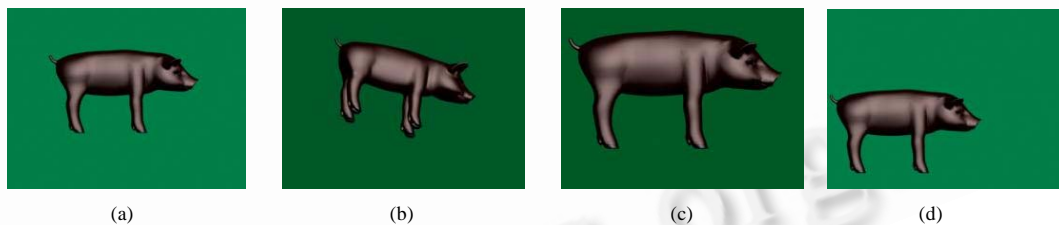


Fig.5 Pig2 model

图 5 Pig2 的图像

分别选取 5 组动物的(a)作为模板 1,模板 2,模板 3,模板 4,模板 5,利用一阶 Minkowski 相对度量方法来计算 5 组动物之间的距离 $d_{i,j} = \sum_{k=1}^n \frac{|X_{i,k} - X_{j,k}|}{\min(|X_{i,k}|, |X_{j,k}|)}$,其中取前 20 阶三维极半径曲面矩参与运算,结果见表 1.

从表 1 中可以看出,每个模板与其变换后的模型的距离最大为 14.870,阈值选为 50,很容易就与其他模型区分开来,识别率达到 100%.

Table 1 The distances between each pattern and models

表 1 5 组动物与模板之间的距离

| Patterns Models | Minkowski distances | | | | |
|--------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| | Bird11 (1) | Horse1 (2) | Horse2 (3) | Horse3 (4) | Pig2 (5) |
| bird11(1) | 0 | 1.96e+4 | 1.37e+6 | 2.67e+7 | 2.35e+5 |
| bird11_r(2) | 1.382 | 1.96e+4 | 1.37e+6 | 2.67e+7 | 2.35e+5 |
| bird11_s(3) | 0.306 | 1.96e+4 | 1.37e+6 | 2.67e+7 | 2.35e+5 |
| bird11_t(4) | 0.166 | 1.96e+4 | 1.37e+6 | 2.67e+7 | 2.35e+5 |
| horse1(1) | 1.96e+4 | 0 | 6.64e+2 | 7.34e+3 | 92.656 |
| horse1_r(2) | 1.96e+4 | 0.240 | 6.63e+2 | 7.33e+3 | 93.200 |
| horse1_s(3) | 1.96e+4 | 2.874 | 6.67e+2 | 7.34e+3 | 89.431 |
| horse1_t(4) | 1.96e+4 | 7.91e-3 | 6.64e+2 | 7.34e+3 | 92.675 |
| horse2(1) | 1.37e+6 | 6.64e+2 | 0 | 1.19e+2 | 1.84e+2 |
| horse2_r(2) | 1.37e+6 | 6.66e+2 | 2.324 | 1.22e+2 | 1.83e+2 |
| horse2_s(3) | 1.37e+6 | 6.69e+2 | 4.230 | 1.28e+2 | 1.90e+2 |
| horse2_t(4) | 1.37e+6 | 6.64e+2 | 3.72e-2 | 1.19e+2 | 1.84e+2 |
| horse3(1) | 2.67e+7 | 7.34e+3 | 1.19e+2 | 0 | 6.67e+2 |
| horse3_r(2) | 2.68e+7 | 7.35e+3 | 1.23e+2 | 14.870 | 6.82e+2 |
| horse3_s(3) | 2.67e+7 | 7.34e+3 | 1.20e+2 | 2.416 | 6.66e+2 |
| horse3_t(4) | 2.67e+7 | 7.34e+3 | 1.19e+2 | 5.87e-2 | 6.68e+2 |
| pig2(1) | 2.35e+5 | 92.656 | 1.84e+2 | 6.67e+2 | 0 |
| pig2_r(2) | 2.35e+5 | 92.804 | 1.84e+2 | 6.68e+2 | 8.93e-2 |
| pig2_s(3) | 2.35e+5 | 91.456 | 1.82e+2 | 6.68e+2 | 0.834 |
| pig2_t(4) | 2.35e+5 | 92.484 | 1.84e+2 | 6.67e+2 | 7.06e-2 |

4 结论和展望

本文将三维极半径矩推广到了三维极半径曲面矩,三维极半径曲面矩不仅能够用来识别由连续区域构成的三维模型,同时也可以用来识别分离区域组成的三维模型.这种曲面矩具有简洁的形式,且易于计算,不需要将三角面片表示的三维模型数据体素化,提高了计算速度和计算精度.实验表明,该不变矩具有较好的检索效率.

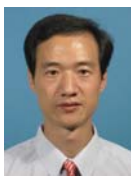
今后的工作主要集中在以下3点:(1) 在大型数据库中对更多的模型进行测试,增强基于三维极半径曲面矩的检索性能.(2) 采用不同的相似度测度方法.(3) 高阶矩的计算问题.

References:

- [1] Hu MK. Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Trans. on Information Theory*, 1962,8(2):179-187.
- [2] Paquet E, Rioux M, Murching A, Naveen T, Tabatabai A. Description of shape information for 2-D and 3-D objects. *Signal Processing: Image Communication*, 2000,16(1-2):103-122.
- [3] Teague M. Image analysis via the general theory of moments. *Journal Optical Society of America*, 1980,70(8):920-930.
- [4] Canterakis N. 3D Zernike moments and Zernike affine invariants for 3D image analysis and recognition. In: *Proc. of the 11th Scandinavian Conf. on Image Analysis*. 1999. 85-93.
- [5] Novotni M, Klein R. 3D Zernike descriptors for content based shape retrieval. In: *Proc. of the 8th ACM Symp. on Solid Modeling and Application*. ACM Press, 2003. 216-225.
- [6] Li ZM, Yu GB, Liu YJ, Li H. 3D polar-radius invariant moments and their application to 3D model retrieval. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2006,19(3):362-367 (in Chinese with English abstract).
- [7] Jr Healy D, Rockmore D, Kostelec P, Moore S. FFTs for the 2-sphere—improvements and variations. *The Journal of Fourier Analysis and Applications*, 2003,9(4):341-385.
- [8] Flusser J, Boldys J, Zitova B. Invariants to convolution in arbitrary dimension. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2000, 13(2):101-113.
- [9] Funkhouser T, Min P, Kazhdan M, Chen J, Halderman A, Dobkin D, Jacobs D. A search engine for 3D models. *ACM Trans. on Graphics*, 2003,22(1):83-105.

附中文参考文献:

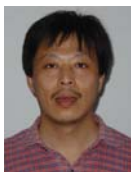
- [6] 李宗民,于广斌,刘玉杰,李华.三维极半径矩及其在三维模型检索中的应用. 模式识别与人工智能,2006,19(3):362-367.



李宗民(1965-)男,山东济南人,博士,教授,主要研究领域为计算机图形学,CAGD,模式识别.



李华(1956-)男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,计算机视觉,数字图像处理,虚拟现实.



刘玉杰(1971-)男,博士,副教授,主要研究领域为计算机图形学.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn