

# 一种结合局部对称的三维模型对齐方法

朱新懿 耿国华

(西北大学信息科学与技术学院 西安 710127)

**摘要** 对称是自然界大多数模型具有的一种特征属性。针对三维模型坐标归一化过程中模型的对齐问题,提出了一种结合局部对称的三维模型对齐方法。通过三维模型的 CPCA 坐标轴确立其初始姿态,提出局部对称长度比来度量三维模型的局部对称性。以此为依据将三维模型分成两类,对于具有大于或等于 2 个局部对称平面的三维模型,利用最大局部对称长度比来确立最终姿态;对于仅有 1 个或没有局部对称平面的三维模型,通过面积替换质量,将模型达到力矩平衡时的姿态确立为最终姿态。算法既考虑到了模型的对称性质,又考虑了非对称模型的处理。实验结果显示了算法的有效性。

**关键词** 三维模型检索,旋转归一化,主轴,对齐

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.058

## 3D Model's Alignment Approach Combining Partial Symmetry

ZHU Xin-yi GENG Guo-hua

(School of Information Science & Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract** Symmetry is an important attribute for most natural objects. Alignment of 3D model is a key preprocess step for 3D model retrieval. For this problem, an approach to align 3D model using partial symmetry was proposed. First, CPCA coordinate planes of a 3D model are computed to establish the model's initial pose. Then a new measure, which is called partial symmetry length ratio (PSLR), is introduced to judge the model's partial symmetry plane. If the model has more than 2 planes, the pose with maximal PSLR is the estimated pose. Otherwise, moment balance is used to estimate the model's final pose by computing area instead of mass. The algorithm takes into account both the symmetric nature of the model and the asymmetric model. The validity is showed by results demonstration.

**Keywords** 3D model retrieval, Rotation normalization, Principal axis, Alignment

## 1 引言

随着三维模型在游戏产业、计算机辅助设计等领域的大量使用,如何获取、描述、利用这些三维模型成为了一个亟需解决的问题。由于三维模型的采集设备、获取来源不尽相同,通常需要对这些三维模型进行归一化预处理,以减小模型的平移、旋转、比例变换等对相似性度量的影响。归一化有 3 个步骤:坐标系原点归一化、尺度归一化、旋转归一化(即对齐),其中旋转归一化是归一化问题中最难解决的问题。

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是对三维模型进行姿态估计的经典方法。在该方法的基础上, Vranic 等<sup>[1,2]</sup>利用三维模型重心替代模型中心提出了 CPCA 算法。另外一些学者引入了三维模型的其他一些性质,对模型进行姿态估计。如 Mohamed 等<sup>[3]</sup>引入了局部平移不变(Local Translational Invariance, LTI)的概念来描述三维模型在局部的平移不变性,同时给出标量(局部平移不变代价)衡量局部平移不变。算法首先在 CPCA 坐标系的基础上确立三维模

型的一个对称主轴,通过将三维模型绕该主轴旋转,计算每个角度的局部平移不变代价,值最大时的姿态即为三维模型的最终姿态。该算法比较适合一些具有局部平移不变形状的三维模型,但对于几乎没有局部平移不变形状的三维模型的效果较差。万丽莉<sup>[4]</sup>引入法线分布特征修正了 CPCA 的主轴,并对三维模型进行旋转归一化。Johan 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于最小投影面积的模型对齐方法,通过计算模型投影到平面的最小投影面积来确定坐标平面,进一步确定模型的坐标轴。还有一些方法<sup>[6-8]</sup>从三维模型的对称角度出发, Sfikas 等<sup>[9]</sup>首先计算模型的对称平面,利用角度、空间距离等定义模型与对称平面的距离,最小化该距离并修正模型姿态。Axenopoulos 等<sup>[10]</sup>利用模型的对称平面和多角度的二维视图对模型进行姿态估计,这些方法对三维模型进行了全局特征的提取,但从模型全局考虑对称性,缺乏模型局部特征的描述。

Thompson 指出,无数的生物、物理以及人造结构都以对称作为最基本的构造方式,人们对周围世界的理解绝大部分基于认知共享和重复结构<sup>[8]</sup>。Mohamed 等<sup>[3]</sup>根据平面对称

到稿日期:2014-04-14 返修日期:2014-08-02 本文受国家自然科学基金面上项目:自动颅像重合身份认证关键技术研究(61172170),陕西省自然科学基金:结合多特征的三维颅面相似性比较(2014JQ8315),西北大学科学研究基金:三维颅面几何相似性的研究(12NW03),西北大学博士科研启动基金:三维颅面几何相似性比较(PR12277)资助。

朱新懿(1979-),女,博士,讲师,主要研究方向为计算机可视化、医学图像处理,E-mail:xyzhu@nwu.edu.cn;耿国华(1955-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为智能数据处理。

性将三维模型划分为5类: $G_c$ (循环对称),经过一个固定轴有 $n$ 个对称平面,根据 $n$ 的奇偶性可分为2个子类: $G_c^{dd}$ 和 $G_c^{em}$ ;  $G_D$ (双面称),经过一个固定轴有 $n$ 个对称平面,并且固定轴和其中一个对称平面垂直,根据 $n$ 的奇偶性可分为两个子类: $G_D^{dd}$ 和 $G_D^{em}$ ;  $G_R$ (旋转对称),旋转对称的三维模型,可分为3个子类:四面体对称 $G_T$ 、八面体对称 $G_O$ 、二十面体对称 $G_I$ ;  $G_U$ (唯一对称),仅有唯一对称平面的三维模型;  $G_Z$ (无对称),没有对称平面的三维模型。对于部分的无对称的三维模型,它们的局部也是存在对称关系的。

此外,在现实生活中,一个物体要“站得稳”,必须得保持力矩平衡,这就要考虑到物体本身的质量。但由于三维模型由一系列三角面片构成,无法考虑模型本身的固有质量,这就造成了在对三维模型进行姿态估计时,单纯考虑力矩平衡会影响到实际效果。

基于此,本文首先从三维模型的局部对称性出发,提出局部对称长度比,用此标度量三维模型是否具有局部对称性。以此为依据将三维模型分成两类,对于具有大于或等于2个局部对称平面的三维模型,利用最大局部对称长度比来确立最终姿态;对于仅有1个或没有局部对称平面的三维模型,通过面积替换质量,将模型达到力矩平衡时的姿态确立为最终姿态。算法一方面考虑到了模型的对称性质,另一方面考虑了非对称模型的处理。实验结果显示了算法的有效性。

## 2 局部平面对称

### 2.1 几个定义

为了判断模型的局部对称情况,本节首先给出几个定义。

**定义1(局部对称面, Partial Symmetry Plane)** 三维模型的某个局部关于平面 $\gamma$ 对称,则称 $\gamma$ 为三维模型的局部对称面。

**定义2(局部对称长度  $PSL_{\gamma,n}$ , Partial Symmetry Length)** 如果三维模型 $M$ 的一个局部 $M_{local}$ 关于局部对称面 $\gamma$ 对称,在平面 $\gamma$ 上给出一个单位向量 $n$ ,将 $M_{local}$ 上的点 $v$ 投影到 $n$ 上,形成投影点 $v_{\gamma,n}=(n \cdot v)n$ ,这些 $v_{\gamma,n}$ 之间的最大距离即为 $PSL_{\gamma,n}$ ,如图1所示。对于一个三维模型 $M$ , $PSL_{\gamma,n}$ 的大小由该模型的某个局部对称面 $\gamma$ 以及向量 $n$ 决定。

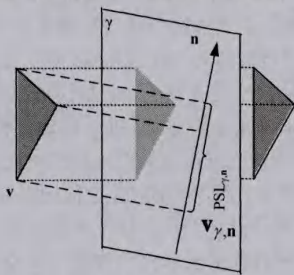


图1 局部对称长度

**定义3(局部对称长度比  $PSLR_{\gamma,n}$ , Partial Symmetry Length Ratio)** 将三维模型上全部的点在 $n$ 上投影,投影点间的最大距离记为 $L_{\gamma,n}$ ,则 $PSLR_{\gamma,n}=PSL_{\gamma,n}/L_{\gamma,n}$ 。

如果三维模型在方向 $n$ 上关于 $\gamma$ 对称的部分越多, $PSL_{\gamma,n}$ 越大,三维模型就更趋近于一个对称物体。

### 2.2 局部对称平面的查找

Minovic等<sup>[9]</sup>发现一个三维模型的某个CPCA坐标轴会与该模型的对称平面垂直。通过计算三维模型的CPCA主轴,判断该模型是否关于CPCA坐标平面对称,即可统计出

对称平面的个数 $N_{GA}(M)$ 。利用式(1)<sup>[3]</sup>可得到 $N_{GA}(M)$ 与各个类别三维模型之间的关系。

$$N_{GA}(M) = \begin{cases} 2^+, & M \in G_c^{em} \cup G_D \cup G_O \\ 1, & M \in G_c^{dd} \cup G_T \cup G_I \cup G_U \\ 0, & M \in G_Z \end{cases} \quad (1)$$

当 $N_{GA}(M)=2^+$ 时,该模型拥有多于1个对称平面,那么该模型容易被“摆正”,其坐标轴选取CPCA坐标轴即可;当 $N_{GA}(M)=1$ 时,该模型有1个对称平面,选取该面与坐标平面YOZ重合,模型的另外两个坐标面就需要依赖局部对称面来确定;当 $N_{GA}(M)=0$ 时,该模型没有对称平面,需要利用局部对称面来调整模型的态度。

本节首先给出模型 $M$ 是否关于平面 $\gamma$ 对称的判定公式,在此基础上给出 $\gamma$ 的查找方法,以便于在后期的计算中对模型进行归一化处理。

模型 $M$ 是否关于平面 $\gamma$ 对称的判定公式见式(2):

$$CSD_{\gamma}(M) = \frac{1}{S} \iint_{v \in M} d(v, M_{\gamma}) ds \quad (2)$$

$M_{\gamma}$ 表示 $M$ 关于 $\gamma$ 的对称模型, $d(v, M_{\gamma}) = \min_{v' \in M_{\gamma}} \|v - v'\|_2$ , $\| \cdot \|_2$ 表示L2范数距离,即 $M$ 上任一点 $v$ 到 $M_{\gamma}$ 上任一点 $v'$ 的最小距离。如果 $CSD_{\gamma}(M)=0$ ,则 $M$ 关于 $\gamma$ 对称。

局部对称面 $\gamma$ 的查找算法如下:

1. 计算三维模型的CPCA主轴 $e_1, e_2, e_3$ ,计算 $N_{GA}(M)$ ,参照式(1),仅针对 $N_{GA}(M)=0$ 和1时进行处理。 $N_{GA}(M)=1$ :三维模型至少有一个对称平面,将与该平面垂直的坐标轴记作对称主轴 $X$ 轴; $N_{GA}(M)=0$ :三维模型无对称平面,令 $e_1$ 为 $X$ 轴,其余的 $e_2, e_3$ 作为 $Y, Z$ 轴。

2. 将 $M$ 绕着 $X$ 轴旋转角度 $\theta_k$ 。

3. 沿着 $Y$ 轴的方向,每间隔 $\delta$ 作一个垂直于 $Y$ 轴的平面 $\pi$ ,求 $\pi$ 与 $M$ 相交的三角面片,过这些三角面片的中心 $c=(x_c, y_c, z_c)$ 建立与 $Z$ 轴垂直的平面 $\gamma: z=z_c$ ,判断这些三角面片是否关于 $\gamma$ 对称,若果对称,则记录值 $z_c$ ,如图2所示。

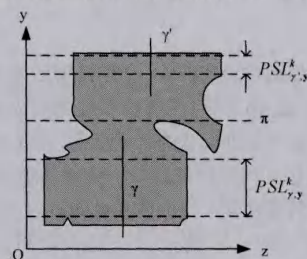


图2 局部对称面示意图

4. 如果两个相邻平面 $\pi$ 的 $z_c$ 值相等,可认为在这两个相邻 $\pi$ 形成的间隔内, $M$ 关于平面 $\gamma: z=z_c$ 局部对称。如图2所示,找到所有相邻的且 $z_c$ 值相等的平面 $\pi$ ,将 $\pi$ 间的最大间隔记为 $PSL_{\gamma,y}^k$ 。不同的 $\pi$ 对应的 $\gamma$ 不同,计算值最大的 $PSL_{\gamma,y}^k$ 及其对应的 $PSLR_{\gamma,y}^k$ ,分别记作 $PSL^k, PSLR^k$ 。

## 3 改进的力矩平衡

现实世界中,物体保持力矩平衡的姿态是一种常见的姿态。对于对称特征不明显的三维模型,本节引入力矩平衡来调整其姿态。考虑到三维模型本身没有质量,我们利用模型的面积进行替代计算。

对于一个三维模型 $M$ 和一个平面 $\gamma$ ,平面 $\gamma$ 将 $M$ 分成两部分 $M_1$ 和 $M_2$ ,如果这两部分的合力矩为零,则 $M$ 可以保持

静止。用  $S_i$  表示  $M_i$  的面积,  $g_{M_i}$  表示  $M_i$  的质心, 则  $M_i$  的力矩定义见式(3):

$$\tau_i = S_i(g_{M_i} - g_M) \quad (3)$$

判断三维模型  $M$  在平面  $\gamma$  处是否达到力矩平衡, 算法如下:

1. 求取  $M, M_1, M_2$  的质心,  $M$  的质心见式(4):

$$g_M = \frac{1}{S} \int S_i g_i \quad (4)$$

其中,  $S_i, g_i$  为  $M$  上某个三角面片的面积和质心。

2. 按照式(3)计算两部分的力矩, 如果  $\tau_1 + \tau_2 = 0$ , 则模型在此处达到力矩平衡。

平面  $\gamma$  的确定见第 4 节。

#### 4 姿态估计

本节给出对模型进行姿态估计的算法, 算法思路如下: 首先将模型的全局(局部)对称面依次确定为 YOZ、XOZ、XOY 坐标面, 当全局(局部)对称面  $< 3$  时, 对于剩余未确定的坐标面, 使用改进的力矩平衡方法确定这些坐标面。结合 2.3 节的算法, 求模型旋转矩阵的算法如下:

1. 计算三维模型的 CPCA 主轴  $e_1, e_2, e_3$ , 计算  $N_{GA}(M)$ , 针对  $N_{GA}(M)$  的不同取值, 参照式(1), 分别进行不同的处理, 得到三维模型的最优对齐坐标系初值  $R_{gr}(n_1; n_2; n_3)$ 。

$N_{GA}(M) = 2^+$ : 三维模型至少有两个对称平面,  $R_{gr} = (n_1; n_2; n_3) = (e_1; e_2; e_3)$ 。

$N_{GA}(M) = 1$ : 三维模型至少有一个对称平面, 将与该平面垂直的坐标轴记作对称主轴, 并令其作为  $X$  轴, 即: 如果  $e_1$  是对称主轴, 令  $n_1 = e_1, R_{gr} = (n_1; e_2; e_3)$ ; 如果  $e_2$  是对称主轴, 令  $n_1 = e_2, R_{gr} = (n_1; e_3; e_1)$ ; 如果  $e_3$  是对称主轴, 令  $n_1 = e_3, R_{gr} = (n_1; e_1; e_2)$ 。

$N_{GA}(M) = 0$ : 三维模型无对称平面, 令  $n_1 = e_1, R_{gr} = (n_1; e_2; e_3)$ 。

2. 设定阈值  $K, \delta$ , 令  $\theta_k = \frac{(k-1)\pi}{K}, R_k = R_{gr} \times$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_k) & \sin(\theta_k) \\ 0 & -\sin(\theta_k) & \cos(\theta_k) \end{bmatrix}, k=1, \dots, K.$$

3. 对于  $N_{GA}(M) \in \{0, 1\}$  的情况, 确定  $M$  的另外两个坐标轴:  $n_2, n_3$ 。按照 2.2 节的方法, 令  $k=1, \dots, K$ , 将  $M$  绕着  $X$  轴旋转角度  $\theta_k$ , 计算  $PSL^k, PSLR^k$ 。

4. 用平面  $z=0$  将模型分为两部分  $M_{z>0}$  和  $M_{z<0}$ , 按照式(3)计算两部分的力矩, 如果  $\tau_{z>0} + \tau_{z<0} = 0$ , 则模型在此处达到力矩平衡。

5. 对于所有的  $k$ , 重复步骤 2-步骤 4, 计算所有  $PSLR^k$  并记录模型位于力矩平衡时的位置  $k$  为  $k_{nb}$ 。

6. 令  $PSLR^{bmax} = \max_{1 \leq k \leq K} (PSLR^k)$ , 设定阈值  $\epsilon_1$ , 如果  $PSLR^{bmax} > \epsilon_1$ , 则认为三维模型存在局部对称并且局部对称能够影响到三维模型的形状, 确定旋转矩阵为  $R_{bmax}$ ; 如果  $PSLR^{bmax} \leq \epsilon_1$ , 则认为三维模型不存在局部对称或者局部对称不足以影响三维模型的形状, 用力矩平衡确定旋转矩阵  $R_{bmax} = R_{k_{nb}}$ 。  $R_{bmax}$  的第二列、第三列就是另外两个坐标轴:  $n_2, n_3$ 。

#### 5 实验结果

实验环境: CeleronM 1.6GHz CPU, 2GB Memory, Win-

dows XP, Matlab 7。

使用 PSB 数据库<sup>[10]</sup>和我们自己搜集的三维模型对这些模型进行实验。图 3 显示了本文算法的实验结果。

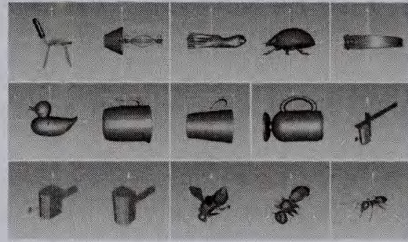


图 3 三维模型的对齐结果

可以看出, 3 个杯子朝向一致, 杯柄的放置位置一致, 这对后期的模型处理尤为关键。

图 4 显示了用 CPCA<sup>[1,2]</sup>, Mohamed 等<sup>[3]</sup>提出的 3 种形状描述符: 全局描述符 LTI-G、极值形状描述符 LTI-E、向量形状描述符 LTI-F, 万丽莉<sup>[4]</sup>, Johan 等<sup>[6]</sup>, Sfikas 等<sup>[9]</sup>以及本文算法对三维模型姿态估计得到的结果。LTI 算法的参数取值为:  $K=36, N=128, \epsilon=0.01$ 。本文算法的参数取值为:  $K=36, \delta=\sqrt{3}/128, \epsilon_1=0.2$ 。为便于比较, 在每一幅小图中显示了两个模型, 其中位于坐标原点的模型是姿态估计后的结果, 另一个是模型原始位置。

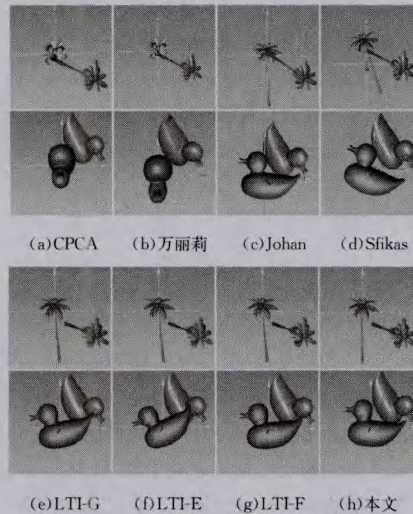
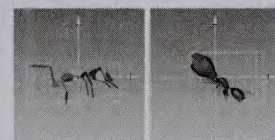


图 4 不同方法的比较

可以看出, 在处理具有仅有局部对称的椰树、仅有一个对称平面的鸭子模型时, 本文算法的效果更为理想。

对 PSB 数据库中的不同类别的模型进行对齐, 将结果人工划为两类: 较好对齐 (Well-aligned)、较差对齐 (Poorly-aligned), 如图 5 所示。



(a) 较好对齐 (b) 较差对齐

图 5 对齐结果分类

引入“理想对齐率 = 某类中较好对齐的模型数 / 该类别模

(下转封三)

- [2] 陈志敏,薄煜明,吴盘龙,等.基于自适应粒子群优化的新型粒子滤波在目标跟踪中的应用[J].控制与决策,2013,28(2):193-200
- [3] 卢锦,苏洪涛,水鹏朗,等.辅助粒子滤波实现天波超视距雷达弱目标似然比检测[J].西安交通大学学报,2013,47(8):93-97
- [4] Nummiaro K, Koller-Meier E, Van Gool L. An adaptive color-based particle filter[J]. Image and vision computing, 2003, 21(1):99-110
- [5] Pérez P, Hue C, Vermaak J, et al. Color-based probabilistic tracking[C]// Computer vision—ECCV 2002. Springer Berlin Heidelberg, 2002:661-675
- [6] 张晓伟,刘弘,孙玉灵.一种多特征自适应融合的球跟踪算法[J].计算机工程,2012,38(17):214-217,225
- [7] 陈刚,杨勇.一种自适应基于纹理和颜色特征的目标跟踪算法[J].智能计算机与应用,2013,3(2):54-57
- [8] 刘士荣,朱伟涛,杨帆,等.基于多特征融合的粒子滤波目标跟踪算法[J].信息与控制,2012,41(6):752-759
- [9] Ma Jia-qing, Han Chong-zhao. Visual tracking using particle filters based on data fusion[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(4):22-25
- [10] 高秀斌,丁盼盼,蒋长帅,等.一种基于多特征融合的粒子滤波目标跟踪算法[J].扬州大学学报:自然科学版,2013,16(1):57-60
- [11] 李成功,曹宁,王娴珏.基于特征融合的改进粒子滤波目标跟踪算法[J].科学技术与工程,2012,12(21):5337-5341,5346
- [12] Yuan Sheng-zhi, Li Jian-hua, Han Jian-li. An Adaptive Target Tracking Algorithm Based on Multi-Feature Fusion[C]//2010 International Conference on Biomedical Engineering and Computer Science (ICBECS). IEEE, 2010
- [13] 郑瑾,尤红建.基于Radon变换和Jeffrey散度的SAR图像变化检测方法[J].雷达学报,2012,1(2):182-189

(上接第279页)

型总数<sup>[3]</sup>,计算结果如表1所列。

表1 理想对齐率比较(%)

类别	CPCA	万	Johan	Sfikas	LTI-G	LTI-E	LTI-F	本文
昆虫	7	21.4	42.9	42.9	42.9	46.4	50	60.7
蜘蛛	0	13.7	27.3	27.3	27.3	27.3	45.5	54.5
桌子	89	93.3	93.3	100	93.3	100	100	100
颅骨	0	0	0	16.7	0	16.7	16.7	16.7
象棋	93.3	93.3	93.3	100	93.3	100	100	100

从表1可以看出,当三维模型具有多个对称面时,算法均取得了较好的效果;当三维模型形状趋于复杂时,算法对齐效果下降,但本文算法要优于其它算法。

在检索性能上,采用形状直方图<sup>[11]</sup>算法,参数设为5个球壳,经度分5块,纬度分8块,利用L1范式距离计算三维模型相似度,对上述算法进行测试。为了使绘图清楚,图6仅显示CPCA<sup>[1,2]</sup>和Mohamed等<sup>[3]</sup>的向量形状描述符LTI-F、万丽莉<sup>[4]</sup>、Johan等<sup>[5]</sup>、Sfikas等<sup>[9]</sup>以及本文算法的结果。可以看出,本文算法提高了检索准确率。

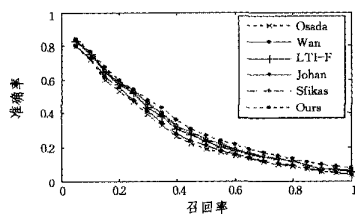


图6 检索性能比较

**结束语** 为了避免对称特征的局限性,本文利用CPCA坐标系,提出一个结合局部对称的三维模型对齐方法。将三维模型划分为两类:可通过局部对称进行对齐的模型和无对称特性的模型。具有局部对称性的三维模型利用最大局部对称长度比来确立最终姿态;否则将模型达到力矩平衡时的姿态确立为最终姿态。进一步的工作需要为无对称特性的模型寻找更为合适的姿态表达方法。

### 参考文献

- [1] Vranic D. 3D model retrieval[D]. Leipzig: University of Leipzig, 2004

- [2] Vranic D, Saupé D. 3D model retrieval[C] //Spring Conference on Computer Graphics and its Applications (SCCG2000). ACM, 2000:89-93
- [3] Chaouch M, Verroust-Blondet A. Alignment of 3D models[J]. Graphical Model, 2009, 71:63-76
- [4] 万丽莉.一种结合法线分布特征的三维模型旋转归一化方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(6):683-688
- [5] Johan H, Li Bo, Wei Yuan-min, et al. 3D model alignment based on minimum projection area[J]. The Visual Computer, 2011, 27(6-8):565-574
- [6] Joshua P, Philip S, Aleksey G, et al. A planar-reflective symmetry transform for 3D shapes[C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006. ACM, 2006:549-559
- [7] Michael K, Thomas F, Szymon R. Symmetry descriptors and 3D shape matching[C]// Eurographics Symposium on Geometry Processing. ACM, 2004:156-166
- [8] Kazhdan M, Chazelle B, Dobkin D, et al. A reflective symmetry descriptor for 3D models[J]. Algorithmica, 2004, 38(1):201-225
- [9] Sfikas K, Theoharis T, Pratikakis I. ROSy+: 3D Object Pose Normalization Based on PCA and Reflective Object Symmetry with Application in 3D Object Retrieval[J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 91(3):262-279
- [10] Axenopoulos A, Litos G, Daras P. 3D model retrieval using accurate pose estimation and view-based similarity[C]// Proceedings of the 1st ACM International Conference on Multimedia Retrieval. ACM, 2011:1-8
- [11] Thompson D W. On Growth and Form[M]. England: Cambridge University Press, 1961
- [12] Minovic P, Ishikawa S, Kato K. Symmetry identification of a 3-D object represented by octree[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(5):507-514
- [13] Princeton Shape Retrieval and Analysis Group. Princeton Shape Benchmark[DB/OL]. 2005-3-15. <http://shape.cs.princeton.edu/benchmark>
- [14] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions[J]. ACM Transaction on Graphics, 2002, 21(4):807-832