

基于局部特征匹配的旋转对称提取^①

白晓亮^② 贺 强^③ 张树生

(西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室 西安 710072)

摘 要 提出了一种基于局部特征匹配的旋转对称提取算法,为基于特征的逆向工程提供了一种新的对称约束的提取方法。该算法首先利用特征线将模型分割成对应各个特征类型的体素的集合;然后计算各个体素的形状分布曲线,通过形状分布曲线匹配的方式获取几何形状相似的体素,并利用最小包围盒从中提取大小相似的体素以构成对称体素的集合;最后利用迭代最近点算法计算对称体素的旋转对称信息并利用均值漂移算法优化提取的对称。实验结果表明,体素分割结果对应构成模型的各个特征,具有明显的工程语义,对称提取结果的误差较小并具有较强的鲁棒性。

关键词 旋转对称,分割,形状分布,迭代最近点,均值漂移,逆向工程

0 引 言

随着测量技术的发展,工程领域中的物体可以很容易地被数字化成三角网格模型。三角网格模型是逆向工程中常用的模型表示方法。重建这类三角网格模型的计算机辅助设计(computer aided design, CAD)模型对产品的质量检验、基于模型的创新设计等具有重要意义^[1]。由于功能和制造上的原因和美学上的考虑,通常几乎所有产品都显示出某种对称性。提取出模型中含有的对称并用于重建,才能得到符合设计意图的 CAD 模型。因此,对称是逆向工程需要关注的基本几何性质之一。常见的对称类型有反射对称、旋转对称和平移对称等,本文只关注其中的旋转对称。

对称作为物体的一项重要几何性质,在模型简化、识别和检索等领域具有重要的应用。文献[2]描述了一种平面反射的对称变换,并将这种对称变换应用于形状匹配、网格分割和自动的视点选择,然而该对称是针对整个模型的,计算量较大。文献[3]通过提取的对称面实现了模型的层次分割。该对称面对整体模型及其局部都是有效的,然而这种分割会破坏模型子结构的完整性。文献[4]提出了一种变换投票的方法来提取模型中的反射、平移、

旋转和缩放对称,但所有的变换都在同一空间投票,造成空间关系信息丢失,因此该方法适用于粗糙的、大尺度下的对称提取。由于在投票时只能利用曲率不同的顶点,限制了其在工程领域模型上的应用。文献[5]首先交互地选择对称的特征区域,然后利用迭代最近点算法对两个区域匹配,利用匹配的区域得到了对称面信息。该方法对称面提取的精确度与用户选取的对称子集紧密相关。文献[6]针对边界表示(boundary representation, B-rep)模型,提出一种利用对称来检测模型设计意图的算法。该方法在重建的 B-rep 模型上提取对称,由于重建过程并没有考虑对称,因此重建的 B-rep 模型的对称信息也是模糊的。即使准确地提取出了对称信息,也需要增加对称约束并在约束求解的基础上重构 B-rep 模型。本文针对逆向工程中对对称提取的算法较少,且提取的对称较少支持基于特征的 CAD 模型重建的现实情况,提出了一种面向机械领域的三角网格模型的旋转对称提取算法。该方法可在对应特征类型的子网格上提取对称,从而能降低对称提取的难度和不确定性;提取的对称层次较高,能直接应用于基于特征的 CAD 模型重建;提取的对称信息精确性高,且鲁棒性好,从而为特征间的几何约束的自动提取提供了一种新思路。

① 国家自然科学基金(60573177,51175434)

② 男,1975 年生,博士,讲师;研究方向:CAD/CAM;E-mail: bxl@nwpu.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: hqcq@mail.nwpu.edu.cn

(收稿日期:2011-05-30)

1 整体思路

如果两个几何体 A 和 B 是旋转对称的, 则 $A = R(n, c, \theta) \times B$, 其中 (c, n) 表示旋转轴, c 是轴线上任意一点, n 是轴线的方向, θ 是旋转角。逆向工程所处理的对象是通过测量得到的三角网格模型。三角网格是产品外形的一种离散表示, 因此不能精确地表达产品外形原有的性质。从具有对称性质的产品上获得的网格数据, 仍然保留了对称性, 但这种对称性不再精确。因此, 三角网格模型 A 和 B 是旋转对称的是指 A 关于旋转轴和旋转角进行坐标变换后的几何体 A' 与 B 能很好地匹配, 即对应点之间满足公式

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|p_i - R(n, c, \theta)q_i\|^2} < \varepsilon, \quad p_i \in A, q_i \in B \quad (1)$$

重建模型通常具有多种近似的、能反映设计意图的几何约束。约束的主体是构成模型的特征。将模型分割成对应特征类型的子网格, 称这样的子网格为体素, 即具有一定工程语义的元素。根据体素分割的顺序和布尔运算关系就可以构建模型的结构实体几何 (constructive solid geometry, CSG) 树。对体素进行 B-rep 重构并添加诸如对称的几何约束和一定的工程语义信息, 重构的 CSG /B-rep 混合模型就转化为特征模型。因此在重建模型的各个体素上进行对称的提取不仅提高了重建模型的层次, 而且相应的对称信息能更好地用于基于特征的 CAD 模型重建, 还能有效地减少其他几何约束对对称提取的影响, 从而降低提取的难度和不确定性。综上所述, 重建模型中的对称体素的几何形状必定是相似的且大小也是接近的。基于以上知识, 本文提出了旋转对称的提取流程, 如图 1 所示。

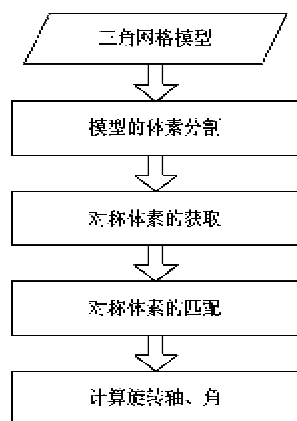


图 1 旋转对称的提取流程

2 相关算法

2.1 模型的体素分割

三角网格模型分割是逆向工程的关键技术之一, 也是本文旋转对称提取的前提。准确的分割离不开对设计意图的理解, 然而设计意图的理解目前还难以完全依赖计算机完成。为了能够更好地体现设计意图, 分割离不开人机交互。以上述观点为依据, 本文提出了一种多分辨率模型基础上的三角网格区域分割方法^[7]。该方法首先在三角网格的多分辨率模型基础上构建一个三维线框, 然后以三维线框为基础完成区域分割。该方法具有如下优点: (1) 对于简单模型, 可以高效自动地完成其区域分割, 算法具有较高的抗噪性; (2) 对复杂模型, 可以快速得到一个能够初步反映模型特征的三维线框, 在三维线框的基础上可以方便地通过人机交互使其更好地反映模型的设计意图, 从而可以更准确、快速地完成分割。

本文在其基础上完成有意义的体素分割, 具体流程如下:

步骤 1: 构建原始三角网格多分辨率表示模型。

步骤 2: 选择与原始网格误差小且无过渡面的中间网格。

步骤 3: 中间网格上首先利用二面角提取特征边, 将特征边投影回原始模型, 并根据曲率判定其有效性, 最后以特征边为基础形成三维线框。

步骤 4: 三维线框中的边向原始网格投影, 得到原始网格上的特征线, 用户交互确定能将模型分割成体素的特征线, 根据该特征线完成模型的分割。

2.2 对称体素的获取

根据本文的体素分割方法, 原始模型被分割成对应各个特征类型的体素。旋转对称这一重要的几何约束体现为: 如果两个体素是旋转对称的, 则其几何形状必定是相似的且空间大小也是近似相等的。因此, 对分割得到的体素进行几何形状的相似性比较和大小比较是对称提取的基础。

Osada 等^[8]提出的形状分布算法是一种简单而有效的三维模型相似性度量算法。该算法利用几何函数来计算网格模型顶点的形状特征, 统计相比较的两个模型表面样本点的几何函数值出现的次数, 并生成形状分布直方图。通过比较直方图的相似距离来获得模型间的几何相似性度量。形状分布算法用一个简单的几何函数, 如模型上任意两点之间的

距离就可以提供一个鲁棒的相似性比较,且对模型的旋转、平移和缩放等具有不变性。因此本文采用文献[8]的D2形状分布函数来得到体素的直方图。

得到每个体素的直方图后,采用平均值对齐的方法进行归一化,平均值为

$$l_{\text{aver}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n l_i \quad (2)$$

其中, $n = \frac{1024!}{2!(1024-2)!} = 523776$ 表示体素上随机取的1024个点两两之间形成的线段的数量; l_i 表示线段的长度。计算出平均长度后,以

$$l_{\text{bin}} = \frac{1}{N} l_{\text{aver}} \quad (3)$$

作为直方图水平轴的长度单位(区间),其中 N 为一常数,本文取值50效果较好。对任意两个相比较体素所形成的直方图 h_1, h_2 , 其相似性度量为

$$d(h_1, h_2) = \frac{1}{m_{\text{bin}}} \sum_{i=0}^{m_{\text{bin}}} |h_{1i} - h_{2i}| \quad (4)$$

m_{bin} 为两个直方图中区间数量较大的一个。使用式(4)实现直方图的相似性比较,提取出几何形状相似的体素。具体流程如下:

步骤1:以任意一个体素的直方图作为种子,计算它与其他直方图之间的相似性。根据相似性分类,将差异较小的聚为一类。

步骤2:对每类体素的直方图,计算相互之间的相似性及其相似性的均值。选择相似性与均值差异在给定阈值范围内的体素来构成几何形状相似的体素集合。

经过上述处理,得到的仅仅是几何形状相似的体素集合。而对称的体素不仅具有相似的几何形状,还应该具有相似的空间大小。因此,本文对几何形状相似的体素集合中的每个体素计算其空间包围盒的体积,剔除体积差异较大的体素,并按照包围盒的长、宽、高大小,分析体积相等的体素是否具有相似的空间分布,剔除其中差异较大的体素。经过以上步骤后,得到的体素集合称为对称体素的集合。

2.3 旋转对称的提取

旋转对称的体素,其重心会近似地分布在一个平面上,如图2所示。

本文首先利用旋转对称的这一性质来估算初始的旋转轴和旋转角。根据公式(1),旋转对称的提取即为 $R(n, c, \theta)$ 的求解,是一个典型的数据匹配问题。本文将 $R(n, c, \theta)$ 的求解转化为迭代最近点

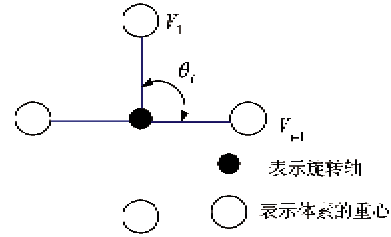


图2 旋转对称示意

(iterative closest point, ICP)算法中旋转矩阵与平移向量的求解,从而利用ICP算法提取了旋转对称。由于采用的是两两匹配的对称提取机制,会提取出多个差异较小的旋转轴,本文采用均值漂移方法聚类出最优的旋转轴。

2.3.1 初始旋转对称的估算

计算旋转对称体素集合中每一个体素的重心,设该集合中任意体素为 $V = \{v_i, i = 1, 2, \dots, n\}$, 则其重心为

$$\bar{v}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i v_i \quad (5)$$

其中, w_i 表示对应顶点的一阶邻接三角形的面积。旋转轴的方向为所有重心拟合平面的法向 $n_0(n_x, n_y, n_z)$ 。轴线上的固定点为重心的平均 c_0 。任意两个体素 V_i, V_j 绕旋转轴的旋转角度为

$$\theta_{i,j} = \arccos\left(\frac{c_0 \bar{v}_{ic} \cdot c_0 \bar{v}_{jc}}{|c_0 \bar{v}_{ic}| |c_0 \bar{v}_{jc}|}\right) \quad (6)$$

2.3.2 体素匹配的旋转对称提取

尽管旋转对称体素集合中的任意体素 V_1, V_2 大小、几何形状相似,但其顶点的分布并不均匀,造成对应点误匹配的概率增大且匹配的误差也较大。本文利用对称体素获取的过程中,在体素上采样的1024个点来替代原始顶点进行对应点的匹配,该采样点是利用蒙特卡罗法在体素表面按照等面积原则进行均匀采样的,因此对称的两个体素的采样点能更好地匹配,从而提高了对称提取的精度。ICP算法^[9]是解决数据匹配问题的标准算法。在较好的初始条件下,算法的收敛性可以得到保证,且可以获得较高精确性的匹配结果。

对 V_2 的1024个采样点利用初步估算的旋转轴和旋转角,计算其旋转变换后的体素 MV_2 。设 $v_j \in V_2$, 其变换后的点 $v'_j \in MV_2$, 则

$$v'_j = M_0(v_j - c_0) + c_0 \quad (7)$$

其中

$$M_0 = \begin{bmatrix} \cos\theta_{12} + n_x^2(1 - \cos\theta_{12}) & n_x n_y(1 - \cos\theta_{12}) - n_z \sin\theta_{12} & n_x n_z(1 - \cos\theta_{12}) + n_y \sin\theta_{12} \\ n_x n_y(1 - \cos\theta_{12}) + n_z \sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} + n_y^2(1 - \cos\theta_{12}) & n_y n_z(1 - \cos\theta_{12}) - n_x \sin\theta_{12} \\ n_x n_z(1 - \cos\theta_{12}) - n_y \sin\theta_{12} & n_y n_z(1 - \cos\theta_{12}) + n_x \sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} + n_z^2(1 - \cos\theta_{12}) \end{bmatrix}$$

将 V_1 与 MV_2 进行迭代最近点的匹配。ICP 算法的目标函数为

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|v_{1i} - (R(v_{2i}) + t)\|^2 \leq \varepsilon \quad (8)$$

通过迭代的方式获得最优的匹配,其输出是匹配好的数据,和伴随该过程的平移向量和旋转矩阵。式(8)中 m 是点的数量, v_{1i} 和 v_{2i} 是一一对应的匹配点对。两个体素之间的匹配已经得到了一个良好的初始变换 $R_0 = M_0$, $t_0 = c_0 - M_0 c_0$ 和两个对应的点集。利用文献[9]的方法进行迭代优化,设 R_n , t_n 为最后一次迭代的变换,则本文得到最终的旋转变换和平移向量为

$$\begin{aligned} R_i &= R_n R_{n-1} \cdots R_1 R_0 \\ t_i &= R_n R_{n-1} \cdots R_1 t_0 + R_n R_{n-1} \cdots R_2 t_1 + R_n R_{n-1} \cdots R_3 t_2 - \cdots + R_n t_{n-1} + t_n \end{aligned} \quad (9)$$

利用最终的旋转变换和平移向量即可反算出 V_1 , V_2 的旋转对称信息: $M = R_i$, $c = (I - M)^{-1} t_i$ 。

2.3.3 基于均值漂移的旋转轴优化

通过旋转对称体素的两两 ICP 匹配,本文得到了相应的旋转对称信息,即旋转轴和相应的旋转角度,表示为 $Axis_i = \{(n_i, c_i), \theta_i\}$ 。由于模型的离散性,尽管旋转对称的计算利用的是匹配的对称点,但这种对称是近似的,因此由两两匹配所确定的旋转轴构成了相差细微的轴线集合 $\{Axis_i, i = 1, 2, \dots, k\}$, 在 6 维空间中形成了一个重叠的小区域。本文利用 Mean shift^[10] 方法聚类出该区域的最优点作为最终的旋转轴。Mean shift 聚类过程是一个迭代的过程,其收敛性已经得到证明。该迭代过程可扩展到任意维数的数据模型,特别地,空间维数为 6 也成立。通过运行该过程,每个一般点都将收敛为一个稳定的点。这样由轴线集合确定的 6 维数据点集会收敛在真实的旋转轴所确定的点处。该迭代过程如下:

$$\begin{cases} y_i^{[t+1]} = m(y_i^{[t]}), t = 0, 1, 2, \dots \\ m(x) = \frac{\sum_{i=1}^k x_i g(\|x - x_i\|^2)}{\sum_{i=1}^k g(\|x - x_i\|^2)} - x \end{cases} \quad (10)$$

其中 $y_i^{[0]} = Axis_i$, $g(\cdot)$ 是高斯核函数,利用上述公式计算直至收敛,即可得到最优旋转轴 $\{c, n\}$ 。

3 试验结果及示例

本文算法利用 C++ 编程实现,通过对多个不同复杂程度的三角网格模型进行旋转对称提取,验证了本文算法。图 3 为其中一个典型的、含有旋转对称的三角网格模型的体素分割结果图。该图为原始模型及其分割的各个体素在渲染模式下的效果图,为方便后续体素的几何形状的相似性比较,给每个体素进行了编号。实验结果表明本文体素分割得到的体素对应构成模型的各个特征,具有明显的工程语义。

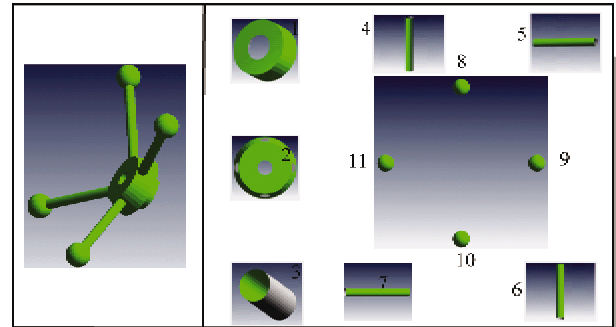


图 3 模型的体素分割

对每个体素可利用形状分布算法获得其直方图。通过本文算法得出:体素 1,3,4,5,6,7 具有最为相似的几何形状,体素 8,9,10,11 的几何形状也是相似的。表 1 为两个几何形状相似的体素集合中各个体素的包围盒数据。各个体素的形状分布曲线如图 4 所示。

表 1 体素的空间大小

体素	体素包围盒数据			
	长(mm)	宽(mm)	高(mm)	体积(mm ³)
1	53.951	53.903	24.000	69794.898
3	52.000	23.978	23.957	29870.929
4	133.119	15.999	15.977	34027.699
5	133.1197	15.994	15.984	34032.059
6	133.119	15.992	15.977	34011.119
7	133.121	16.000	15.981	34038.876
8	39.849	39.837	37.493	59519.799
9	39.965	39.835	37.504	59707.511
10	39.927	39.924	37.524	59816.686
11	39.939	39.828	37.483	59625.707

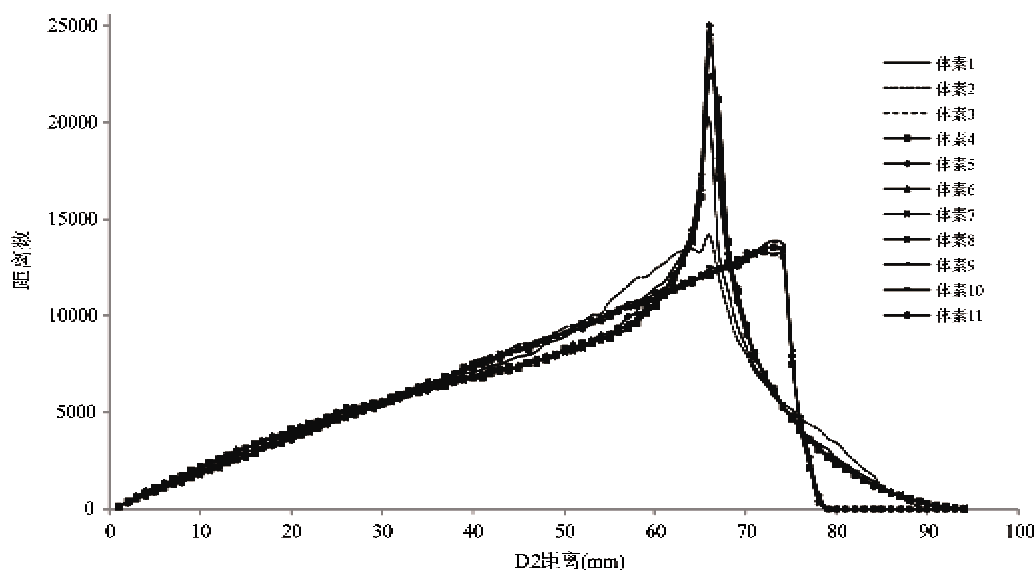


图4 各个体素的形状分布曲线

由此得出结论:体素 4,5,6,7 构成对称体素集合 1,体素 8,9,10,11 构成对称体素的集合 2。由于两个对称体素的集合都是关于同一个旋转轴旋转对称的,因此本文只利用了对称体素集合 2 的体素来提取相应的对称信息。图 5 为提取的旋转轴示意图,右侧为轴线方向的视图。表 2 为旋转轴的真实值和最终提取的结果。为了验证本文匹配算法的鲁棒性,对体素 10,11 分别添加两组均值为零,标准偏差 $\sigma = 2\%, 5\%$ 的高斯噪声,分别计算其旋转轴,结果如表 2。实验结果表明,即使在噪声较大的环境下,本文算法仍然能取得较好的结果。

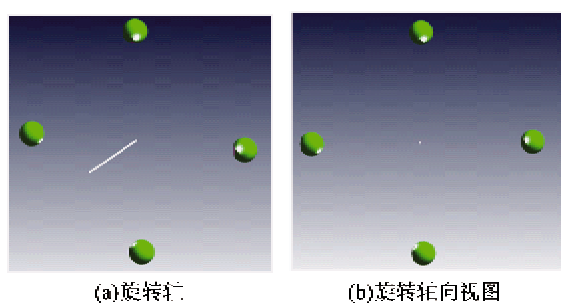


图5 旋转轴示意图

表2 旋转轴的计算结果

	轴的方向
真实的	(0,0,1)
本文优化的	$(-6.36e^{-5}, 1.75e^{-5}, 0.9999)$
$\sigma = 2\%$ 噪声下	(0.002, 0.0009, 0.9999)
$\sigma = 5\%$ 噪声下	(0.023, 0.0381, 0.9990)

4 结 论

针对逆向工程中基于特征的 CAD 模型重建的需要,本文提出了一种新的旋转对称提取算法。该算法首先将模型分解成一个个形状简单的、对应各个特征类型的体素,然后通过对体素进行几何形状和空间大小的相似性比较获取具有对称性的体素,最后利用局部匹配的方式计算出旋转对称信息并利用均值漂移算法优化提取的旋转轴。实验结果表明旋转对称提取的结果误差较小,并具有较强的鲁棒性,为基于特征的逆向工程提供了一种新的对称约束的提取方法,具有广泛的应用前景。从已有的工作发现,只有使逆向工程重建的 CAD 模型充分地反映原始的设计意图,才能在此基础上进行创新设计。特征间的几何约束是设计意图的重要体现,因此如何提取出特征间的其他类型的约束是逆向工程领域一个有意义的研究方向。

参考文献

- [1] Ye X Z, Liu H Z, Chen L, et al. Reverse innovative design—an integrated product design methodology. *Computer-Aided Design*, 2008, 40(7):812-827
- [2] Podolak J, Shilane P, Golovinskiy A, et al. A planar reflective symmetry transform for 3D shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3):549-559
- [3] Simari P, Kalogerakis E, Singh K. Folding meshes: hierarchical mesh segmentation based on planar symmetry. In: *Proceedings of the 4th Euro-Graphics Symposium on*

- Geometry Processing, Sardinia, Italy: Euro-Graphics Association, 2006. 111-119
- [4] Mitra N, Guibas L, Pauly M. Partial and approximate symmetry detection for 3D geometry. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3):560-568
- [5] 柯映林,朱伟东. 基于局部特征匹配的对称面提取算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(6): 1191-1195
- [6] Li M, Langbein F C, Martin R. Detecting design intent in approximate CAD models using symmetry. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(3): 183-201
- [7] 白晓亮,张树生. 多分辨率三角网格基础上的区域分割. *中国机械工程*, 2009, 20(9):1097-1101
- [8] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(4): 807-832
- [9] Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm. In: *Proceeding of the 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, Piscataway, USA, 2001. 145-152
- [10] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5):603-609

Rotational symmetry extraction based on local feature match

Bai Xiaoliang, He Qiang, Zhang Shusheng

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology,
Ministry of Education China, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract

An algorithm for extraction of rotational symmetry based on local feature match is presented to provide a new symmetric restriction extraction method for the feature-based reverse engineering. The algorithm can be described below: Firstly, a model is segmented into the set of voxels which are corresponding to each feature based on its feature lines. Then, for each voxel, a shape distribution histogram is calculated with the D2 shape distribution function. By comparing each pair of shape distribution histogram using well-know curve matching techniques, the voxels with the similar geometric shape are acquired and a set of symmetric voxels are constructed by the ones with a similar minimum bounding box. Finally, the symmetry is extracted by the algorithm of iterative closest point and optimized by the mean shift approach. The experimental result shows that the voxels of the segmentation corresponding to the features which are composed of the model have obvious engineering semantics and the extracted symmetry information is accurate and robust.

Key words: rotational symmetry, segmentation, shape distribution, iterative closest point, mean shift, reverse engineering