

逆向工程中一种鲁棒的平移对称提取算法

贺强, 张树生, 白晓亮

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 710072, 西安)

摘要: 为了解决逆向工程中平移对称提取的问题,提出了一种鲁棒的提取算法. 首先利用特征线将模型分割成体素的集合,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了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. 利用鲁棒的 PCA 方法估算对称体素的初步对称信息,在此基础上利用迭代最近点算法对提取的平移对称进行优化. 采用一个机械零件的三角网格模型进行实验的结果表明,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: 平移对称;分割;形状分布;逆向工程

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0070-06

Robust Algorithm for Translation Symmetry Extraction in Reverse Engineering

HE Qiang, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang

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

Abstract: To solve the problem of the translation symmetry extraction in reverse engineering, a robust algorithm is presented. The model is segmented into the set of voxels based on its feature lines, then for each voxel, the shape distribution histogram is calculated with D2 shape distribution function. Comparing each pair of shape distribution histogram by curve matching, the voxels with similar geometric shape are acquired and the set of symmetric voxels are constructed by ones having similar minimum bounding box. The initial symmetric information is estimated by the robust principle component analysis and optimized with the algorithm of iterative closest point. An experiment with triangular mesh model is conducted, and the result shows that the voxels of the segmentation corresponding to the features composed of the model demonstrate the obvious engineering semantics and the symmetrically extracted information gets accurate and robust.

Keywords: translation symmetry; segmentation; shape distribution; reverse engineering

在现实世界中,对称无处不在. 视觉上,对称影响人类对形状的感知和理解;工业上,由于功能、美学、加工等因素的影响,几乎所有的产品中都包含有对称元素,其中反射对称、平移对称和旋转对称最为常见. 面向制造领域的逆向工程是针对已有的产品重构其 CAD 模型,并在此基础上进行创新的过程. 目前,基于特征的逆向工程技术是研究的热点.

特征是模型的基本要素,在更高层次上体现了模型原始的设计意图. 同时,特征间的几何约束建立了特征之间的联系,使得模型成为特征的有机组合. 只有提取出模型中的特征及其相互之间的几何约束,才能充分地反映模型的设计意图,进而才能在此基础上对重建模型再设计,使得逆向设计的结果基于原型而又高于原型. 对称作为模型的整体几何

约束,反映了模型的高层次的功能信息,是设计意图的一个重要体现.同时,基于对称的模型重建可以极大地减少重建的工作量.因此,如何提取出模型中蕴含的对称是基于特征的逆向工程实现产品创新的关键要素之一,本文只讨论其中的平移对称的提取方法.

对称作为模型的一项重要几何性质,在模型简化、识别和检索等领域都具有重要的作用,因此对称的提取在三维模型的数字几何处理领域中得到越来越多的关注.文献[1]提出了一种变换投票的方法来提取模型中存在的对称,该方法能检测出模型中的平移、旋转、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,以致在出现多个对称的情况下不能提取出某个单独的对称.此外,该算法要求参与对称提取的顶点的曲率是不同的,因此该技术适用于粗糙的、大尺度下的对称提取,但不适用于工程中的常见几何形状.文献[2]利用鲁棒计算的对称面实现了模型的层次分解,但这是一种粗糙的分解,会破坏模型所含有的子结构的完整性.文献[3]通过模型特征线构成的子图来匹配出模型中重复出现的结构,该方法能在噪声环境下提取对称的结构,但却依赖特征线的提取和较好的初始估计,才能进行非线性的优化.文献[4]通过交互选择对称的特征区域,利用迭代最近点算法对 2 个区域进行匹配,并利用匹配的区域得到对称面信息,该方法提取的对称面的精确度与用户选取的对称子集紧密相关.文献[5]针对 B-rep (Boundary Representation) 模型,提出一种利用对称来检测模型设计意图的算法,该模型首先被分解成一个个部件,然后利用对称点对匹配的方式来提取部件间及其自身的对称,算法精确依赖对称的点对.对于逆向工程,文献[5]方法是在重建 CAD 模型的基础上提取对称的.由于重建过程并没有考虑对称约束,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.

针对逆向工程中对称提取的算法较少,且提取的对称也不能很好地支持体现设计意图的 CAD 模型重建.因此,本文提出了一种面向机械领域的三角网格模型的平移对称提取算法,为逆向工程中基于几何约束的特征重建奠定了基础.本文首先将模型分割成体素的集合,然后提取出几何形状、大小一致的体素集合,最后利用数据匹配技术提取出该集合中存在的平移对称.

1 整体思路

对称是一种等容映射,即对称的 2 个集合可以将其中的一个精确地映射到另一个之上.然而,三角网格模型是产品外形的离散表示,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,但这种对称性不再是点对之间精确的一一对应.因此,本文的对称定义如下:如果几何体 A 和 B 是对称的,则几何体 A 通过平移、旋转变换后得到的几何体 A^* 与 B 的所有对应点都能很好地匹配,即对应点之间的欧式距离小于给定误差值.对于平移对称,可以描述为一个种子部分加一个平移向量 t ,与种子平移对称的部分通过 t 变换后与种子所有的对应点都能很好地匹配.

通常,模型显示出多种近似的、能反映设计意图的几何约束,约束的主体是构成模型的体素,并且定义为具有一定工程语义的体积元素.因此,将模型分割成有意义的体素,在体素集合的基础上提取平移对称,不仅简化了对称提取的难度,而且相应的对称信息能更好地用于模型的重建.对称的体素的几何形状是相似的且大小也是接近的.基于以上知识,本文提出了平移对称提取流程,如图 1 所示.

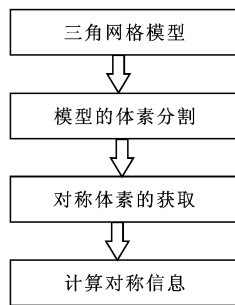


图 1 平移对称提取流程

2 相关算法

2.1 模型的分割

三角网格模型分割是逆向工程的关键技术之一,也是本文对称提取的条件.本文利用文献[6]的方法来完成模型有意义的体素分割.该方法首先在低分辨率的三角网格模型上提取特征线,然后将特征线映射到原始模型,经交互识别出能将模型分割成体素的体特征线,最后以体特征线为基础完成模型的分割.在提取模型的特征线时,首先需要识别出模型中的特征边,文献[6]仅仅利用二面角作为特征

边的判定依据,因此特征边提取的准确度有限;通过选取较为宽松的阈值范围,保证了真正的特征边都被识别出来,但识别出的特征边中不可避免地包含“伪”特征边.本文采用如下方式精炼该集合,获得了真正的特征边集合.

本文采用噪声鲁棒的网格曲率计算方法——法向量投票算法^[7]来计算顶点的法矢量和曲率信息,根据鲁棒顶点法矢的计算结果,重新更新三角形的法矢量,即三角形的法矢量为3个顶点法矢量的平均值.然后,按照文献^[6]的方法提取出初始的特征边集合.对模型中的每个顶点,选择2个主曲率 k_1 、 k_2 中绝对值较大的值作为该顶点的特征值,即

$$k(v) = \max(|k_1|, |k_2|) \quad (1)$$

取所有顶点的特征值中的最大、最小特征值的平均值作为初始阈值,将全部特征值按大于或小于初始阈值分类成2个部分,再分别求出各个部分特征值的平均值.以2个部分的平均值作为新的阈值重新对所有特征值进行分类,按照此方法迭代直至产生的新阈值不再变化为止.最后,得到的阈值即为特征顶点的阈值.在初始的特征边集合中,选择至少含一个特征顶点的边作为最终特征边的集合,将特征边投影到原始模型上,得到原始网格上的特征线,利用该特征线就可以完成模型的体素分割.

2.2 对称体素的获取

根据本文的模型分割方法,原始模型被分解成体素的集合.根据对称的定义,如果2个或多个体素是对称的,则其几何形状和大小必定是相似的.因此,从分割得到的体素集合中获取几何形状和大小都相似的体素是平移对称提取的基础.

Osada等人^[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,统计比较的2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,再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、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.

将得到的每个体素的直方图,采用平均值对齐的方法进行归一化,得到线段长度的平均值

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

式中: $n=((1\ 024!)/(2!))(1\ 024-2)! = 523\ 776$,表

示随机选取的1 024个点两两之间形成的线段的数量.计算出的平均长度将作为直方图水平轴的长度

$$l_b = \frac{1}{N} l_a \quad (3)$$

式中: N 为常数,本文取 $N=50$,其效果较好.对任意2个直方图 h_1 、 h_2 ,其相似度为

$$d_s(h_1, h_2) = \frac{1}{m_b} \sum_{i=0}^{m_b} |h_{1i} - h_{2i}| \quad (4)$$

式中: m_b 为2个直方图中区间数量较大的一个.用式(4)来实现直方图的相似性比较,提取出几何形状相似的体素集合.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 对每一类体素的直方图,计算相互之间的相似性及其相似性的均值.在给定阈值范围内选择相似性与均值差异的体素,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、高的大小,分析体积相等的体素是否具有相似的空间分布,以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.

3 对称提取

根据平移对称的性质和定义,提取体素的平移对称,其为获取对称体素间进行对称变换所需的平移向量.为了提取所关注的平移对称,首先需要提取2个体素的对称信息,进而判定其对称类型.如果体素 $V_1 = \{v_{1i}, i=1, 2, \dots, m\}$, $V_2 = \{v_{2i}, i=1, 2, \dots, m\}$ 是对称的,则

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|v_{1i} - (R(v_{2i}) + t)\|^2 \leq \epsilon \quad (5)$$

式中: R 是旋转矩阵.体素的顶点是一一对应的,若 $R \approx I, t \neq 0$,则 V_1 与 V_2 是平移对称的, I 为单位矩阵.由此可见,对称提取的过程即为 R 和 t 的求解过程,也是一种典型的数据匹配过程.

迭代最近点(ICP)^[9-11]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.ICP算法也有一定的局限性,该算法假设一组数据是另

一组数据的子集,并且在待匹配的数据在初始位置相差较大时,算法收敛速度慢,甚至会产生错误的匹配结果.本文对称提取过程中的数据匹配与已有的 ICP 算法有极大的不同,首先待匹配的体素已经处于同一坐标系下,只是经过了平移、旋转变换而形成了对称的空间分布,但直接利用欧式距离的方法则无法正确得到对应点对.如图 2 所示,对顶点 A 、 B 利用欧式距离寻找到的对应点都会是 O .文献[10]采用曲率、矩不变量等来判断 2 个点是否为对应点,而文献[11]利用高斯映射不变量来寻找对应点.对应点的判定方法虽然改进了 ICP 算法,但对平面、球面、柱面等形状,这类对应点的判定方法则无效,而本文对称提取的对象往往是由这些形状构成的.其次,ICP 算法通过迭代的方式获得最优的匹配,其输出是匹配好的数据,而本文的对称提取则需要伴随该过程的平移向量、旋转矩阵,并得到符合工程实际的构造对称的平移向量和旋转矩阵.本文采用一种新的匹配算法来提取对称信息,即:先对 2 个体素进行鲁棒的 PCA (Principle Component Analysis) 分析,利用协方差矩阵的 3 个特征向量构成的矩阵来初步计算 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{t}$;然后,建立一个体素顶点的 KD 树,对另一个体素进行坐标变换,再利用欧式距离来获取对应的点对;最后以上述结果作为 ICP 算法的输入,并得到最终的结果.

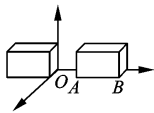


图 2 平移变换产生的 2 个长方体

3.1 鲁棒的初始对称提取

体素顶点集的协方差矩阵为

$$\mathbf{C} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i} \begin{bmatrix} w_1(v_1 - v_c) \\ w_2(v_2 - v_c) \\ \vdots \\ w_n(v_n - v_c) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} v_1 - v_c \\ v_2 - v_c \\ \vdots \\ v_n - v_c \end{bmatrix} \quad (6)$$
$$v_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i} \sum_{i=1}^n w_i v_i$$

式中: w_i 为顶点 v_i 的权值. V_1 、 V_2 的重心分别为 v_{1c} 和 v_{2c} ,协方差矩阵的 3 个单位特征向量构成的矩阵分别为 $\mathbf{H}_1(e_{11}, e_{12}, e_{13})$ 和 $\mathbf{H}_2(e_{21}, e_{22}, e_{23})$,则 2 个体素匹配的 $\mathbf{R}_0$ 和 $\mathbf{t}_0$ 的计算如下

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2^{-1}$$
$$\mathbf{t}_0 = v_{1c} - \mathbf{R}_0 v_{2c} \quad (7)$$

尽管 PCA 方法简单、快速,但它是在最小二乘方法的意义上去寻找模型顶点数据集的最优表示,

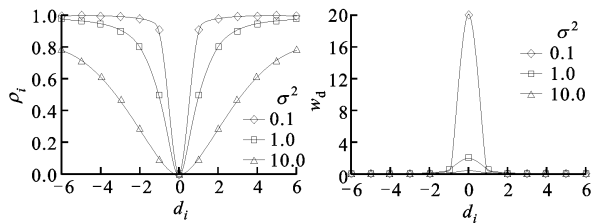
而最小二乘方法最大的缺点就是算法不鲁棒.因此,一个非对称的顶点就可能导致提取的对称不够精确.此外,对球体、圆柱体等体素进行 PCA 分析,其协方差矩阵的特征向量区别较小,体素间的特征向量不能得到正确的对应关系,因此直接采用式(7)不能得到正确的旋转矩阵和平移向量^[12].

针对特征向量相似所造成的对应关系具有模糊性的问题,首先保持 $\mathbf{H}_1$ 不变,计算 $\mathbf{H}_2$ 在 6 种不同情况,即 (e_{21}, e_{22}, e_{23}) 、 (e_{21}, e_{23}, e_{22}) 、 (e_{22}, e_{21}, e_{23}) 、 (e_{22}, e_{23}, e_{21}) 、 (e_{23}, e_{21}, e_{22}) 和 (e_{23}, e_{22}, e_{21}) 的 $\mathbf{R}_0$ 、 $\mathbf{t}_0$.对 V_2 进行相应的坐标变换,计算变换后与 V_1 所有顶点组成的点集的空间包围盒,选择包围盒体积最小的一组 $\mathbf{R}_0$ 、 $\mathbf{t}_0$.针对 PCA 方法不够鲁棒的问题,将对称的提取可以看作一个统计的拟合问题,它等价于从含有噪声的模型数据中合理估计出支持对称的数据. M 估计作为一种鲁棒的估计,通过定义一个优化的目标函数来取代最小平方函数,能有效减少偏差奇异点对拟合结果的影响.在对称提取中,对应点对的距离至关重要,因此本文选择对应点对的欧式距离作为 M 估计的参数,来重新计算每个顶点在协方差矩阵中的权值.通过迭代求解可使对称提取更加鲁棒.

M 估计通过最小化目标函数 ρ_i 来估计参数. M 估计的一个常用选择^[13]是

$$\rho_i = \frac{d_i^2}{\sigma^2 + d_i^2} \quad (8)$$

式中: d_i 表示对称点对的距离; σ 表示距离尺度. ρ_i 在 $\sigma^2=0.1, 1, 10$ 的拟合曲线如图 3 所示.一个离拟合曲线数倍远的点对拟合曲线基本上不产生任何影响,因为函数值接近 1,且随拟合曲线的距离变化非常缓慢,因此能有效地抑制外点的影响.



(a) 目标函数 (b) 权函数
图 3 M 估计的目标函数和权函数

根据 M 估计的性质,体素顶点面在对称提取中的协方差矩阵的权值为

$$w_d = \frac{1}{d_i} \frac{\partial \rho_i}{\partial d_i} = \frac{2\sigma^2}{(\sigma^2 + d_i^2)^2} \quad (9)$$

由于 σ 需要一个好的估计,典型的尺度估计在迭代

求解过程的每一步都要使用,因此定义中值函数为 M_d ,则一个流行的距离尺度估计为

$$\sigma^k = 1.482\ 6\ M_d(d_i^{k-1}) \tag{10}$$

式中: k 表示第 k 次迭代. 结合模型顶点的分布,得到最终的顶点在协方差矩阵中的权值

$$\omega_i = \omega_d \omega_s \tag{11}$$

式中: ω_s 是顶点一阶邻接三角形的面积,当 $k=1$ 时, $\omega_i=\omega_s$.

由于参与计算的体素具有相似的几何形状和大小,因此含有的非对称点相对较少,该过程通常只需要 1~2 次迭代就可获得较好的结果.

3.2 迭代的对称优化

经过鲁棒初始对称的提取,2 个体素之间的匹配已经得到了一个良好的初始变换 R_0 、 t_0 和 2 个对应的点集. 利用文献[11]的方法进行迭代优化,设 R_n 、 t_n 为最后一次迭代的变换,则得到的最终优化的对称信息为

$$\begin{aligned} R_t &= R_n R_{n-1}, \cdots, R_1 R_0 \\ t_t &= R_n R_{n-1}, \cdots, R_1 t_0 + R_n R_{n-1}, \cdots, R_2 t_1 + \\ &\quad R_n R_{n-1}, \cdots, R_3 t_2 + \cdots + R_n t_{n-1} + t_n \end{aligned} \tag{12}$$

4 实验结果

为了验证所提算法的有效性,采用一个典型的机械零件的三角网格模型进行实验,该模型体素分割的结果如图 4 所示. 图 4 为原始模型及其分割的各个体素在线框渲染模式下的效果图,为方便后续的形状比较,给每个体素添加了名称标签. 实验结果表明,体素分割的结果对应构成模型的各个特征,具有明显的工程语义.

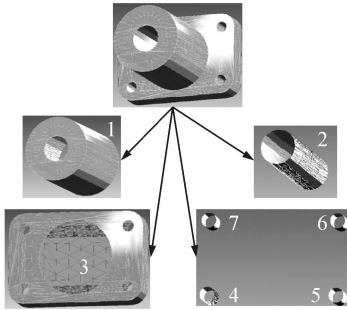


图 4 模型的体素分割

对每个体素利用形状分布算法获得直方图,各个体素的形状分布曲线如图 5 所示. 通过本文算法得到体素 4~体素 7 具有最为相似的几何形状,4 个体素空间包围盒的长、宽、高和体积分别为:

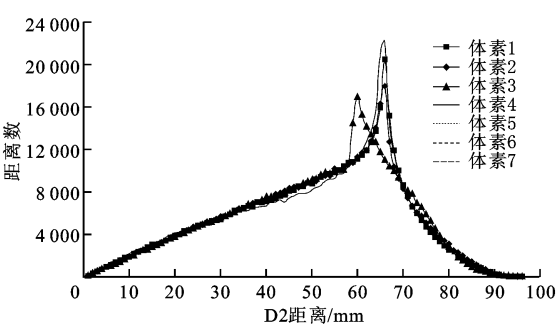


图 5 各个体素的 D2 距离形状分布曲线

(7.980 9,7.952 7,15.000 1,952.064 6);(7.980 9,7.952 8,15.000 0,952.064 6);(7.980 9,7.952 8,15.000 0,952.064 6);(7.980 9,7.952 8,15.000 0,952.064 6),由此得出体素 4~体素 7 是对称的. 体素 5~体素 7 与体素 4 匹配的结果分别为

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} 0.999 & 7.827 \times 10^{-7} & -0.019 \\ 4.411 \times 10^{-5} & -0.999 & -4.214 \times 10^{-7} \\ -0.019 & -4.214 \times 10^{-7} & -0.999 \end{bmatrix} \\ R &= \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.000 & 5.551 \times 10^{-7} \\ 0.000 & 5.551 \times 10^{-7} & 1.000 \end{bmatrix} \\ R &= \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.000 & 1.665 \times 10^{-16} \\ 0.000 & -1.665 \times 10^{-16} & 1.000 \end{bmatrix} \\ t &= \begin{bmatrix} -69.999 \\ 0.000 \\ 8.882 \times 10^{-16} \end{bmatrix}; \quad t = \begin{bmatrix} -69.999 \\ -40.000 \\ -8.882 \times 10^{-16} \end{bmatrix}; \\ t &= \begin{bmatrix} 0.000 \\ -40.000 \\ 3.553 \times 10^{-15} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

体素 5~7 与体素 4 匹配的对应点的均方差分别为 $3.242\ 47 \times 10^{-7}$ 、 $3.242\ 49 \times 10^{-7}$ 和 8.94×10^{-8} . 为了验证本文匹配算法的鲁棒性,对体素 4、7 分别添加两组均值为 0、标准偏差为 2%和 5%的高斯噪声,计算其匹配的结果分别为

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} 0.993 & -1.914 \times 10^{-5} & 0.082 \\ 0.081\ 9 & 0.997 & 0.007 \\ -0.082 & 6.334 \times 10^{-5} & 0.997 \end{bmatrix} \\ t &= \begin{bmatrix} 0.378 \\ -39.019 \\ -0.891 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$R = \begin{bmatrix} -0.994 & -0.003 & -0.077 \\ -0.077 & -0.997 & 0.005 \\ 0.078 & -0.001 & 0.997 \end{bmatrix}$$

$$t = \begin{bmatrix} 0.338 \\ -39.200 \\ -0.768 \end{bmatrix}$$

体素7和4匹配的对应点的均方差分别为0.1052和0.1108.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.由于 $R \approx I$,因此集合中的体素是平移对称的.

5 结 论

本文提出了一种可以应用于逆向工程的平移对称的提取算法.通过对模型进行体素分割,对体素间的几何形状、大小的相似性进行比较,将平移对称的提取问题转化成为在几何形状、大小相似的体素集合中提取相应平移向量的问题.实验结果表明,对称提取的结果误差较小,具有较强的鲁棒性,因此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,并具有广泛的应用前景.

参考文献:

- [1] MITRA N, GUIBAS L, PAULY M. Partial and approximate symmetry detection for 3D geometry [J]. ACM Transaction on Graphical, 2006, 25(3): 560-568.
- [2] SIMARI P, KALOGERAKIS E, SINGH K. Folding meshes: hierarchical mesh segmentation based on planar symmetry [C]//Eurographics Symposium on Geometry Processing. Sardinia, Italy: Eurographics Association, 2006:111-119.
- [3] BOKELOH M, BERNER A, WAD M, et al. Symmetry detection using line features [J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(2): 697-706.
- [4] 柯映林,朱伟东.基于局部特征匹配的对称面提取算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(6): 1191-1195.
KE Yinglin, ZHU Weidong. Study on symmetry plane extraction from point cloud based on local geometric symmetry [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(6): 1191-1195.
- [5] LI Ming, LANGBEIN F C, MARTIN R R. Detecting design intent in approximation CAD models using symmetry [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(3): 183-201.

- [6] 白晓亮. 逆向工程中的混合 CSG\B-rep 模型重建 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [7] PAGE D L, SUN Y, PAIK J, et al. Normal vector voting: crease detection and curvature estimation on large, noisy meshes [J]. Graphical Models, 2002, 64(3/4): 199-229.
- [8] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807-832.
- [9] RUSINKIEWICZ S, LEVOY M. Efficient variants of the ICP algorithm [C]//Proceeding of 3D Digital Imaging and Modeling. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 145-152.
- [10] GREGORY C S, SANG W L, DAVID K W. ICP registration using invariant features [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(1): 90-102.
- [11] 刘宇,熊有伦.基于法矢的点云拼合算法[J].机械工程学报,2007,43(8): 7-11.
LIU Yu, XIONG Youlun. Registration method for point clouds based on normal vectors [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 7-11.
- [12] NOVOTNI M, KLEIN R. A geometric approach to 3D object comparison [C]//Proceeding of Shape Modeling and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 167-175.
- [13] FORSYTH D A, PONCE J. Computer vision: a modern approach [M]. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2002: 447-480.

[本刊相关文献链接]

基于最小生成树的 R^* -树结点分裂算法. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 127-130.
海量信息异常检测问题的异常概率排序算法. 西安交通大学学报, 2011, 45(4): 36-40.
彩色图像分割中基于图上半监督学习算法研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(2): 11-14.
双选择性衰落信道下的改进型频域判决反馈均衡. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 67-71.

(编辑 管咏梅)