

基于形状分布的逆向工程体素识别方法*

Voxel Recognition for Reverse Engineering Based on Shape Distribution

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 罗刚 张树生 张开兴 白晓亮

[摘要] 提出了一种基于形状分布和特征技术的体素识别方法。该方法首先在体素三角网格模型上进行随机取点,然后计算随机点之间的欧氏距离,通过对距离值进行统计得到体素形状分布曲线。

关键词: 逆向工程 特征体素识别 形状分布曲线 函数距离

[ABSTRACT] A novel voxel recognition methodology using the concepts of feature-based technology and shape distributions is proposed. First, a uniformly distributed random point is obtained from a triangle mesh model. Then, the euclidean distance of any two random points is computed. A shape distribution curve is constructed by having a statistic of the distance values.

Keywords: Reverse engineering Feature voxel recognition Shape distribution curve Function distance

逆向工程技术是根据实物测量数据重构其 CAD 模型,运用现代设计理论、方法和技术对模型进行再设计,并与快速制造技术有机结合,最终制造出产品的一项技术。目前,逆向工程技术重构出的产品 CAD 模型通常为实体 B-rep 模型,这种基于“面”重构的实体模型信息表达层次低,重构的 B-rep 模型是一个整体的边界模型,它不能区分出零件中包含的具有不同工程寓意的几何体素(即几何特征),这与先进的特征造型技术思想极不吻合,也难以实现与现代 CAD/CAM 系统的集成。

基于“体”的逆向工程特征建模过程如图 1 所示,体素识别是进行模型重构的依据和桥梁。随着基于特征的逆向工程技术的出现,基于测量点的特征识别技术研究也越来越受到关注,研究人员主要采用的方法为神经网络法。文献 [2] [6] 采用神经网络法分别实现了 5 种和 9 种常见几何特征识别。神经网络特征识别方法避

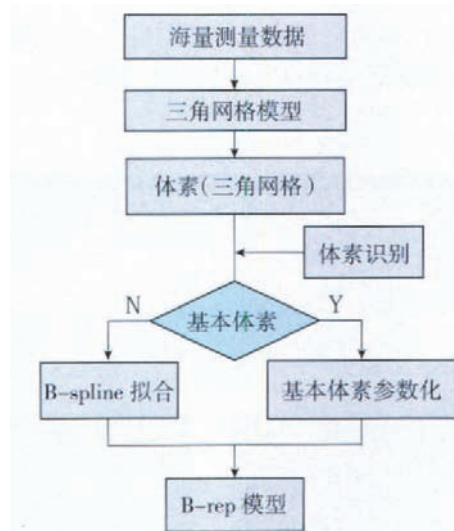


图 1 基于“体”的逆向工程建模示意图
Fig.1 Diagram of reverse engineering modeling based on voxel

免了复杂搜索匹配过程,具有训练学习功能,但是神经网络法处理逆向工程特征识别也有明显的缺点,在实际处理中,零件往往会出现磨损和缺口,神经网络法尚未解决非完整几何特征的识别问题,在处理带有倒角、倒圆等加工特征的几何特征识别时,神经网络法在特征定义与代码化的前处理过程方面比较复杂,特征类别的扩展性差。本课题提出采用一种基于形状分布的方法来解决逆向工程中非完整几何特征体素和带有倒角等加工痕迹的特征体素识别问题。该方法适合解决具有全局相似形状的物体的识别,对噪声不敏感,计算过程简单。

1 形状分布

形状分布 (Shape Distributions)^[1] 的目的是对三维物体的相似性进行简单而有效的度量。其主要思想是通过形状函数测量三维物体,即采用物体表面随机采样点间的几何属性(距离、角度等)的概率分布作为形状比较的基础,并通过计算概率分布曲线之间的函数距离做

* 国家自然科学基金(6053177)、国家 863 计划(2007AA04Z137) 资助项目。

出相似性判定。测量三维物体的 5 种形状函数 (A_3 、 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4) 见文献 [1]。

2 基于形状分布的体素识别算法

2.1 算法输入与输出

本算法输入为体素的三角网格模型,由对被测物的三角网格模型进行体素分割得到。本算法的输出为体素类型,即常见几何特征体素或一般体素。

2.2 算法步骤

采用形状分布进行体素识别的步骤可分为 4 步,流程图如图 2 所示。

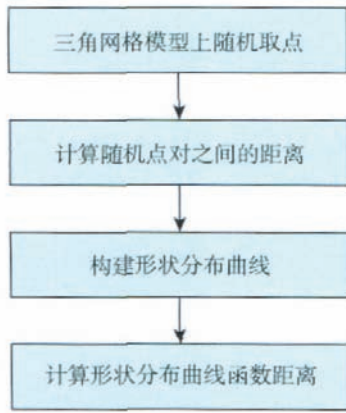


图 2 基于形状分布的体素识别算法流程图
Fig.2 Flow chart of voxel recognition algorithm based on shape distribution

2.3 三角网格模型上随机取点

为了在三角网格模型表面生成 N 个随机点。定义一个三角网格模型为 $S = \{T_1, \dots, T_i, \dots, T_k\}$, T_i 表示模型中的三角面片。应用蒙特卡罗方法,当某一区域内的点分布的概率与该区域的面积成比例关系时,定义这种分布是均一分布。

定义一个三角面片 $T = (P_1, P_2, P_3)$, 其面积可由

$$AT = \frac{\|(P_2 - P_1) \times (P_3 - P_1)\|}{2}$$

得到。相应地,三角网格模型的表面积可表示为

$$AS = \sum_{i=1}^k AT_i$$

随机取点过程可分为 2 个步骤:① 随机选取三角面片 T_j ; ② 在随机选取的三角面片 T_j 上随机取点。

随机选取三角面片 T_j 的概率可表示为

$$P(T_j) = \frac{AT_j}{AS}$$

如图 3 所示,把区间 $[0, 1]$ 分成 k 段,第 j 段与 $P(T_j)$ 在数值上相等。只要在 $[0, 1]$ 之间生成一个随机数,即能找到三角面片的索引号 j 。

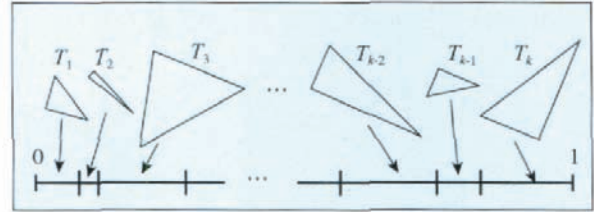


图 3 随机选取三角面片示意图

Fig.3 Sampling of random triangular faces

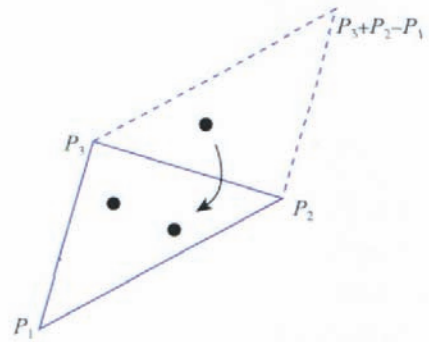


图 4 三角面片上随机生成点示意图

Fig.4 Sampling of random point in triangular face

在三角面片随机取点时,首先生成一个与 T_j 对应的平行四边形,如图 4 所示

随机点 P 的位置由下式得到

$$P = P_1 + s(P_2 - P_1) + t(P_3 - P_1)$$

s, t 是介于区间 $[0, 1]$ 之间的随机数。当 $s+t < 1$ 时, P 点即为所取随机点,否则只需 $(s, t) \rightarrow (1-s, 1-t)$ 。

2.4 计算随机点对之间的距离

在本课题的算法中,选用 D_2 形状函数进行计算。经过分析, D_1 分布包含的随机噪音较多, D_3 、 D_4 、 A_3 分布曲线过于平滑,对于不同的三维模型其形状区分能力有限^[1]。 D_2 形状函数在测量三维物体时,具有几何不变性,即对模型的平移、旋转和缩放具有不变性;拓扑不变性,即对相同模型的不同拓扑表示具有不变性。对于三角网格模型表面随机采到的 2 个点,我们计算它们之间的距离(即欧式距离),计算公式如下:

$$d^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2$$

当给定取样点的个数为 N 时,其计算复杂度为 $O(N^3)$ 。

2.5 构建形状分布曲线

通过对 D_2 进行分析可以发现,它存在 3 种可能:两点连线在物体内部(A)、两点连线在物体外部(B)、两点连线与物体表面相交(C),如图 5 所示。这一特性能够充分反映在机械零件加工中,如对于槽和型腔等与加工相关的几何特征,显然可以将 B 类看作是剔除的毛料。

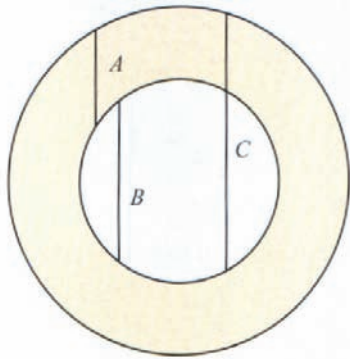


图 5 D_2 分类示意图

Fig.5 Diagram of D_2 classification

本课题采用线性八叉树剖分技术^[7]在网格模型中提取 B 类 D_2 距离的步骤描述如下:

STEP1: 把模型上一系列三角面片划分到不同的终端节点,从而在三角面片与线性八叉树的终端节点之间建立起联系。根据实际需要设置分割好的最小立方体中包含的三角面片数,确定分割结束点。

STEP2: 建立随机取样 2 点所在的直线方程。得到与直线相交的立方体的节点编号。

STEP3: 遍历立方体内包含的三角面片,得到直线与三角面片交点的个数。

STEP4: 当交点个数 > 2 时,确定连线类型为 C 类;当交点个数为 2 时,以连线中点为顶点作一条任意方向上的射线,若射线与模型的交点个数为奇数则连线类型为 A 类,否则为 B 类。交点个数的判断与 STEP2~3 相同。

2.6 比较形状分布直方图

EMD (Earth Mover's Distance) 距离^[8]是一种有效且正在被越来越广泛使用的集合间或向量间距离计算方式。它能只通过一次线性规划计算出 2 个具有不等(或相等)权值分布的不同(或相同)大小的集合或向量之间的距离。

其主要思想是把一个分布看作小山,另一个看作山谷,然后寻找从小山运土填平山谷所需要的最小功。定义从第 i 个方柱减去 d ,加到第 j 个方柱付出的代价为:

$$Work(d, i, j) = d \cdot |i - j|,$$

最后找出最小代价。

设 X, Y 为要比较的 2 个分布: $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ 和 $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ 。令 $c_{ij} = |i - j|$, 找到一个 f_{ij} , 使得

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} c_{ij}$$

的值最小。上式必须满足下面的约束

$$f_{ij} \geq 0,$$

$$\sum_{j=1}^m f_{ij} = x_i, \sum_{i=1}^n f_{ij} = y_j,$$

c_{ij} 为从第 i 个分量移到第 j 个分量的代价; f_{ij} 为从第 i 个分量移到第 j 个分量的量。这样,得到 EMD 距离为:

$$EMD(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} c_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} c_{ij}}{\sum_{j=1}^m y_j},$$

当 $m=n$ 时,令 $CDX(i) = \sum_{j=1}^i x_j$, 则

$$EMD(X, Y) = \sum_{i=1}^n |CDX(i) - CDY(i)|.$$

3 算法验证与实例

应用基于形状分布的体素识别算法,本课题建立了包含机械零件中常见的 9 种特征体素^[6]的目标特征库,包括:凸块、圆台、型腔、圆孔、台阶、直槽、T 形槽、燕尾槽和 V 形槽。建立目标特征库的作用有 2 个:① 作为体素特征识别的参照;② 作为验证体素分割结果正确与否的依据。体素分割是特征识别的前提,体素分割结束的依据为结果中不再包含基本特征。

本课题算法中取随机点数量为 $N=1\ 024$, 可得到 $\frac{1\ 024!}{2!(1\ 024 - 2)!} = 523\ 776$ 个点对距离值。为了计算和存储曲线的方便,算法中以直方图代替形状分布曲线。直方图以点对平均距离的 1/50 为区间宽度,对点对距离进行统计,如图 6 所示。X 轴表示点对距离值, Y 轴表示点对距离为某一区间的概率。

本课题中选取典型几何体素圆柱作为例子来说明本算法在识别几何特征体素中的应用。如图 7 所示, I~VI 分别为完整圆柱体、带圆倒角圆柱体、带直倒角圆柱体、带滚槽圆柱体以及带缺损圆柱体。

表 1 中的结果为上述 6 个体素与特征体素库中体素进行比较所得的 EMD 值,其中距离值越小表示 2 个

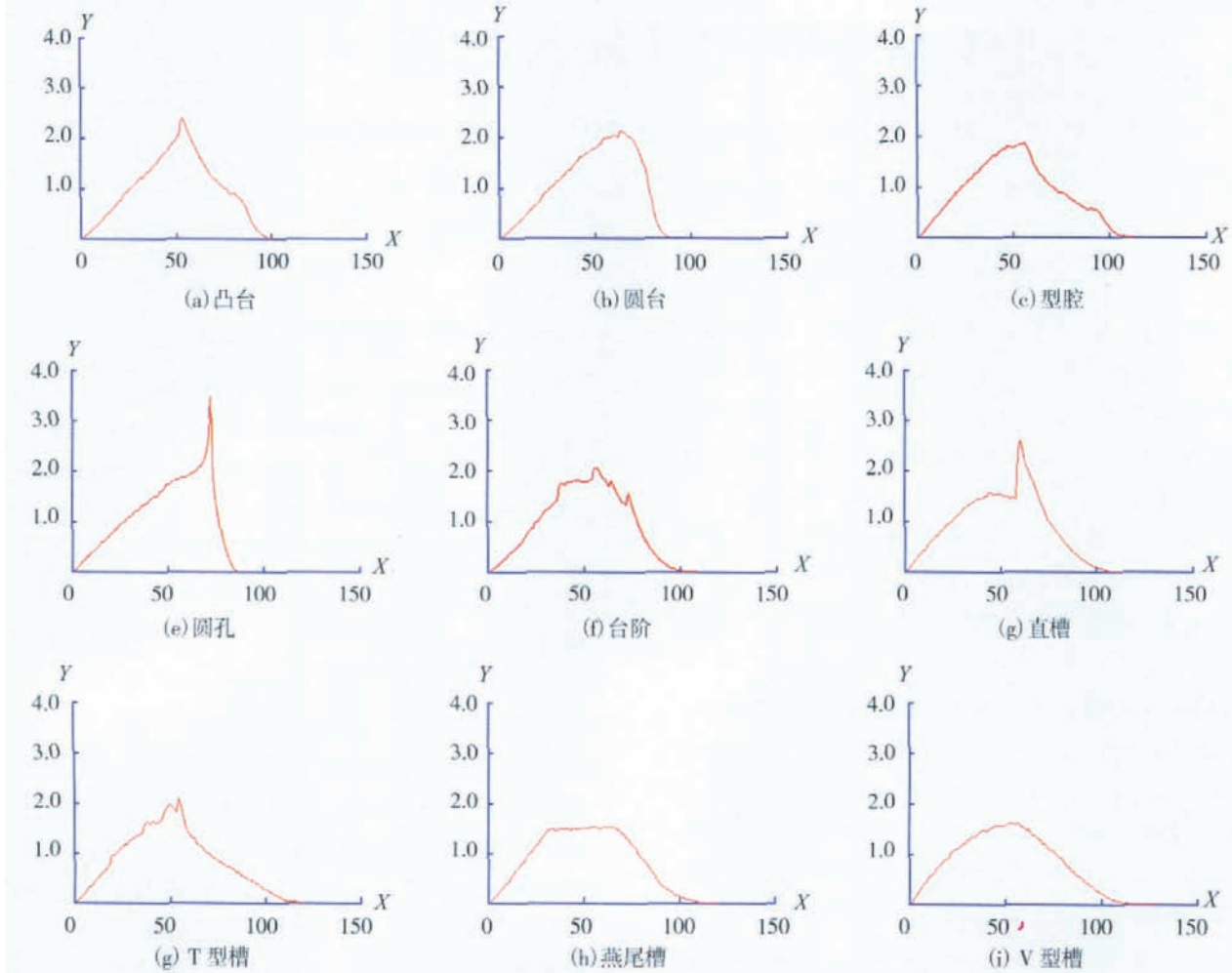


图6 预置体素库

Fig.6 Preset voxel library

表1 函数距离 EMD

形状编号	凸块	圆台	型腔	圆孔	台阶	直槽	T型槽	燕尾槽	V型槽
I	0.113 137	0.000 000	0.077 694	0.130 379	0.197 151	0.116 857	0.070 315	0.199 880	0.133 253
II	0.118 855	0.014 850	0.079 004	0.127 278	0.195 140	0.117 846	0.072 922	0.201 348	0.136 054
III	0.110 263	0.020 961	0.079 884	0.124 494	0.189 089	0.116 032	0.069 777	0.198 633	0.134 325
IV	0.109 605	0.032 754	0.072 667	0.137 332	0.202 207	0.118 469	0.072 936	0.201 773	0.132 394
V	0.106 281	0.022 320	0.079 989	0.126 570	0.195 234	0.121 494	0.075 511	0.203 217	0.139 933
VI	0.106 030	0.015 127	0.075 769	0.131 315	0.193 441	0.114 656	0.069 310	0.196 493	0.132 308

物体的相似程度越大。

II~VI中的圆柱特征体素外形上已经发生了改变,这种改变可能是由实际加工的需要造成的,也有可能是因为长期使用造成的磨损,还有可能是搬运中碰撞导致的破坏。这些问题的出现,使得逆向工程的建模过程变得复杂和不确定。从上表中的数据可以看出:①外形改

变后的圆柱特征体素与特征体素库中的体素进行函数比较时,与特征圆台体素间的EMD值最小(圆柱可看作特殊圆台);②与原圆柱特征体素的形状分布曲线的函数距离值最大偏差<3.3%。可以判定I~VI均为圆台体素。

(下转第81页)

须在数据库中定义工艺数据类以及类的属性。

4 集成方案的具体实现

本课题实现了 CAPP 集成的 PDM 软件 BITPDM, 是一个自主开发的产品数据管理系统, 提供了完整的企业级 PDM 解决方案。其中在 BITPDM 中嵌入了全局工艺规划单元, 目的是协调 CAPP 软件更好地满足 PDM 中的功能, 使全局的算法得以实现。实例中的 CAPP 系统是针对某兵器研究院开发的一种变批量生产 VPCAPP 系统的。该系统不过分追求工艺设计自动化, 而是着重提高工艺设计和管理的效益和水平, 重视 CAPP 与 CAD、PDM 的集成, 消除数据的重复输入, 提高与设计部门、生产管理部门的信息共享, 通过对工艺基础数据的采集、整理和规范化, 提高工艺设计标准化程度。

VPCAPP 与 BITPDM 的集成, 其部分功能如下:

① 复制信息功能。能把 BITPDM 中的零件属性信息复制到工艺设计系统中, 零件属性信息作为机械加工工艺卡片中的表头信息, 产品结构用来确定装配工艺过程与装配工序所需的零部件。

② 提取和管理数据功能。BITPDM 提取机械加工工艺过程卡片中的数据, 并对其进行管理, 同时 BITPDM 保存 CAPP 所生成的设备清单、刀具清单等, 以便给企业中的其他应用系统提供数据。具体实现办法是, 在 CAPP 的主菜单中添加一个“导出工艺”的菜单项, 通过“导入/导出”功能, 调用函数来实现工艺文档及数据的存储。

通过采用上述的策略和技术, 实现了以 PDM 为框架的 CAPP 系统的数据交互, 从而保证了产品数据的高效管理和共享的实现, 完成了 CAPP 信息管理的基础。

5 结束语

作为工程领域的集成框架和使能平台, PDM 管理企业内所有与产品相关的技术和过程, 为企业内应用系统的集成和数据传递提供了必不可少的支撑环境。在 PDM 与 CAPP 集成环境下, CAPP 从 PDM 获取需要的 CAD 数据和信息编制工艺, 并把工艺数据存储于 PDM 共享数据库中, CAM 等其他应用系统直接从 PDM 共享数据库中获取所需工艺信息, 从而有效地实现了企业产品信息的集成。

参 考 文 献

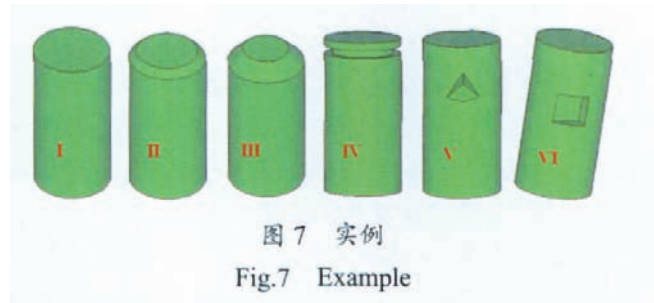
[1] 杨海成. 制造业信息化工程. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[2] 约瑟夫·萧塔纳. 制造企业的产品数据管理. 祁国宁, 译. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[3] 徐滨士, 梁秀兵, 李仁涵. 绿色再制造工程的进展. 中国表面工程, 2001 (2): 1-5.

(责编 恒之)

(上接第 77 页)



4 结束语

本课题提出的基于形状分布的体素识别方法, 能够解决逆向工程中非完整几何特征体素和带有倒角等加工痕迹的特征体素的识别问题。在实际应用中, 表现出对由人为或加工造成的特征体素外形改变(缺口、倒角、滚槽等)具有较强的识别能力, 在识别自动化程度上有一定提高。

参 考 文 献

[1] Robert Osada, Thomas Funkhouser, Bernard Chazelle, et al. Shape distributions. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807-832.

[2] Jun Y, Raja V, Park S. Geometric feature recognition for reverse engineering using neural networks. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17 (6): 462-470.

[3] Huang Jianbing. Geometric feature extraction and model reconstruction from unorganized points for reverse engineering of mechanical objects with arbitrary topology[D]. The Ohio State University, 2001.

[4] Thompson W B, Owen J C. Feature-based reverse engineering of mechanical parts. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15 (1): 57-66.

[5] 崔晨阳, 石教英. 三维模型检索中的特征提取技术综述. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16 (7): 882-889.

[6] 谭昌柏, 周来水, 安鲁陵, 等. 逆向工程中基于 BP 网络的自动特征识别器的设计与实现. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17 (10): 2 305-2 311.

[7] 刘晶, 张定华. 一种快速计算空间点到 STL 模型距离的方法. 中国机械工程, 2006, 17 (3): 271-274.

[8] 陈纯. 计算机图像处理技术与算法. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(责编 玉龙)