

三维 CAD 模型检索技术研究现状与发展分析*

张开兴¹ 张树生² 刘贤喜¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

摘要: 对目前三维 CAD 模型检索技术的研究现状和发展趋势进行了阐述。首先给出三维模型检索的体系结构, 并从文本检索、内容检索和语义检索 3 方面对三维 CAD 模型检索技术国内外研究现状进行了全面论述; 分析总结了现有三维 CAD 模型检索系统及三维 CAD 模型检索技术的应用; 最后对三维 CAD 模型检索技术存在的问题及未来的发展方向进行了展望。三维 CAD 模型检索技术将为概念设计、详细设计、工艺/工装设计等产品各设计阶段提供全方位的检索支持手段, 可有效促进企业产品模型相关设计和制造信息的重用。

关键词: 三维 CAD 模型 内容检索 语义检索 重用

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0256-08

Current Research and Future Development of 3-D CAD Model Retrieval

Zhang Kaixing¹ Zhang Shusheng² Liu Xianxi¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A comprehensive survey of the up-to-date methods and technologies for 3-D CAD model retrieval was presented. Firstly, the architecture of 3-D CAD model retrieval system was introduced, and a detailed survey on current 3-D CAD model retrieval was given from text-based retrieval, content-based retrieval and semantic-based retrieval. Then, the existing 3-D CAD model retrieval system and the application of 3-D CAD model retrieval were also introduced. Finally, some challenges and the future directions of 3-D CAD model retrieval were indicated. The proposed CAD retrieval technology provided fully retrieval support for conceptual design, detailed design, polytechnical design, and product design. It also enforced the capability of enterprise product model designing and reuse of manufacturing information.

Key words: 3-D CAD model Content-based retrieval Semantic-based retrieval Reuse

引言

基于三维模型的产品设计与制造已成为我国制造业的主流模式, 由于产品三维模型具有可视化、数字化和虚拟化等特点, 使其成为产品开发各环节 (CAD、CAE、CAPP、CAM 等) 不可或缺的基础载体^[1]。研究和统计分析表明, 在新产品开发中, 约 40% 是重用过去的部件设计, 约 40% 是对已有设计部件的微小修改, 而只有约 20% 是完全新的设计^[2]。因此, 方便、准确、快速地获取已有产品三维模型的相似性设计成果, 并加以有效重用, 是提高设计效率、缩短产品开发周期的关键之一, 通过三维模型检索技术可以实现企业产品三维模型资源的多粒度、精确化、个性化快速聚类, 为产品设计过程中各类设计成果的重用提供一种全新的支持手段。

迄今为止, 在通用领域已有 30 多种检索算法被相继提出, 但是由于 CAD 模型的特殊性, 如 CAD 模型由规则的点、线、面及自由曲面组成, 包含很多特

收稿日期: 2012-08-10 修回日期: 2012-10-08

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目 (2011BAD20B01)

作者简介: 张开兴, 讲师, 博士, 主要从事计算机辅助设计和制造业信息化研究, E-mail: zkxoffice@gmail.com

通讯作者: 刘贤喜, 教授, 博士生导师, 主要从事农业 CAD/CAM 和虚拟现实技术研究, E-mail: wjbliu@sdau.edu.cn

征及语义信息,边界轮廓线明显等特点,通用领域的检索算法不完全适合于 CAD 领域。通过三维 CAD 模型检索技术可以实现企业信息的检索与重用,能更好地对企业产品数据信息进行管理,因此,研究先进、实用的 CAD 模型检索技术具有重要的理论意义和应用价值。本文将从三维 CAD 模型检索的体系结构、研究现状、检索系统、技术应用及发展趋势等方面进行论述。

1 三维 CAD 模型检索体系结构

三维 CAD 模型检索技术是利用能够反映 CAD 模型文本、形状、特征及语义信息自动建立索引,从而达到检索三维模型的目的。其通常包括模型库组织、预处理、特征提取、相似性度量、索引结构、用户查询接口、相关反馈等多项关键技术。

三维 CAD 模型检索首先从 CAD 模型中自动计算并提取特征信息,建立模型的信息索引,然后在多维索引空间中计算待查询模型与目标模型之间的相似程度,实现对三维模型数据库的浏览和检索,检索系统的框架如图 1 所示,通常一个完整的模型检索系统主要包括以下几方面:

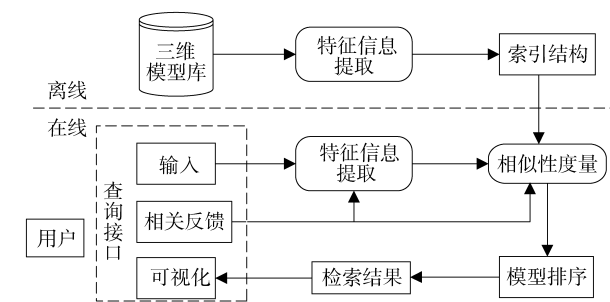


图 1 检索系统的体系结构
Fig.1 Architecture of retrieval system

(1)信息提取:CAD 模型包含的信息由文本、几何形状、拓扑结构、表面信息及特征语义等信息,这些信息往往比较复杂且不易获得,因此有效地提取这些信息来描述 CAD 模型成为三维 CAD 模型检索首先要解决的问题,同时也是一个难点。

(2)相似性度量:信息提取是三维模型检索的前提条件,相似性度量则是使提取的信息得到正确应用的保证。选择适当的度量尺度,将查询模型的特征与待查询的数据库中模型特征进行比较,用相似性、相异性度量尺度计算两个模型对应特征之间的距离,从而得到两个模型之间的相似性。

(3)索引结构:面对庞大的三维模型数据库,必须建立快速、有效的索引结构。

(4)用户查询接口:一个好的检索系统应该拥有交互性能,为用户提供方便的查询和浏览。其中,

用户查询接口对模型检索系统的可用性和检索性能有较大影响。目前的检索方式有:文本关键字的检索、手工绘制 2D 草图的检索、手工绘制 3D 草图的检索、3D 模型实例的检索、语义查询和混合检索。

(5)检索性能评价:主要是考察检索结果是否与用户的期望相接近,是否满足用户的需求。由于受用户主观性及检索中“相关模型”的判断和定义不明确的影响,目前还缺乏比较客观有效的评价准则。现有评价标准都是基于模型定义明确并且类别划分清楚的模型库,检索系统可以通过查全率和查准率曲线^[3]、E 测度^[4]等指标实现性能的评价。

2 三维 CAD 模型检索技术现状

目前国内外很多学者对三维模型检索算法进行了不同的分类和比较^[2, 5~9],本文总结、归纳和整理它们的优点,根据研究对象性质特点、特征提取的方法类型,从文本检索、内容检索和语义检索三方面对目前三维 CAD 模型检索技术国内外研究现状进行分析总结。

2.1 基于文本关键字的模型检索

基于文本关键字的检索主要应用于企业产品数据管理(PDM)系统中,但其检索能力有限,因为三维模型很难用语言文字准确表达;文字的描述是一种特定的抽象,如果描述的标准改变,则相应的描述标签也得重新制作才能适合新的查询要求;文字标签是人为制作的,受主观因素的影响很大,不同的观察者或同一个观察者在不同的条件下对同一个三维模型可能给出不同的描述,因而不够客观,没有统一标准,甚至会自相矛盾;受标签使用语言种类的限制。由于上述原因,基于文本关键字的检索方式可靠性和检索效率不高。

2.2 基于内容的模型检索

按照特征的表达形式及处理方式不同可以将基于内容的三维模型检索技术分为:统计学的方法;抽象图的方法;投影的方法;函数变换的方法;外观属性的方法。

(1)基于统计学的方法

目前对三维模型的参数化仍是一个很复杂的问题,同时由于三维表面有任意的拓扑,导致一些广泛适用于二维图像的特征提取方法无法直接推广至三维领域。因此,从统计学的观点出发,寻找有区分能力的统计数据成为对三维模型进行特征提取的首选思路。

Osada 等^[10]用表面两个随机点间的距离作为度量尺度,并构建形状分布曲线,通过曲线的比较来实现模型相似性比较。为了增强距离描述符的表征能

力,Ip 等^[11]提出根据两点间连线是否仅仅经过模型内部、外部或全经过将距离分为 IN、OUT、MIXED 3 种,通过这种处理,有效地提高了形状分布算法的检索精度;王洪申等^[12]根据随机线段按其端点法向与线段形成的角度进行分类,将一个三维模型表达为 3 个形状分布曲线,提高了检索能力。

Ankerst 等^[13]通过对三维模型形状信息进行相应的分割,统计落在每个分割单元中的数量,绘制成直方图,通过直方图的比较实现模型的相似性比较;Ohbuchi 等^[14]提出利用惯性矩、平均距离和距离方差 3 个统计量共同组成特征描述符来实现检索的算法。

基于统计学的方法原理简单明了,计算快速,但往往只适合于全局特征的描述,对于模型中在设计上截然不同的局部区域无法有效地区分,但由于检索速度快,因此该类算法得到了深入研究和改进。

(2) 基于抽象图的方法

基于图的方法试图用一个图从三维模型中提取其几何意义,从而显示模型各部分之间的相互连接关系。该类方法更注重提取模型的拓扑结构,主要包括:Reeb 图、模型图和骨架图。

Reeb 图是一个定义在物体上的连续函数所确定的三维物体的拓扑、骨架结构。Hilaga 等^[15]提出了基于多分辨率 Reeb 图的三维模型检索算法;Tung 等^[16]提出增广 Reeb 图 (Augmented Reeb Graphs),将更多的几何特征用于局部属性的描述。Reeb 图能够反映模型的拓扑性质,对于不同姿态的同一物体,其 Reeb 图表示是相同的,如不同姿态的青蛙。但当节点数较多时会使匹配时间增加很快,且对模型表面形状特征丢失较多。

模型图通常将实体 B-rep 模型数据结构中的面表示成节点,将面间的交线作为边,模型通过图来比较它们的拓扑结构。El-Mehalawi 等^[17]针对工程领

域的 B-rep 模型提出了基于属性邻接图的检索算法;Marini 等^[18]提出首先对多边形网格模型进行分割,然后利用图匹配的方法来实现模型的局部相似性匹配;王玉等^[19]通过构造 CAD 模型图,利用图的特征向量作为自组织特征映射神经网络的输入,借助神经网络进行 CAD 模型的自动聚类。基于模型图的方法能对模型的几何和拓扑信息进行有效描述,适合 CAD 领域的模型,不适合通用领域的模型。

骨架图是模型的一种抽象图,能够反映模型拓扑信息。该类方法通常是先将模型细化,使模型以体素宽度表达物体,形成骨架图,然后比较骨架图间的相似程度。Sundar 等^[20]提出利用基于参数控制的细化算法对模型进行骨架提取,该方法适合体素模型;Gao 等^[21]提出了基于蔓延的实体模型骨架生成方法,并将其用于三维模型的相似性比较。

基于抽象图的方法能较好地描述模型的细部结构,并能表达适当的语义信息,实现模型的局部匹配。但通常此类方法的缺点是计算和存储复杂,要实现两个图完美匹配的计算通常是 NP 问题,算法的通用性较差。

(3) 基于投影的方法

基于投影的方法通过对一个三维模型进行多个视角的投影,得到多个二维投影视图,将三维模型的比较转换成二维投影视图的比较。

Abbasi 等^[22]给出了如何从投影视图中选择最优视图来用于三维模型的比较;Chen 等^[23]提出了利用物体所在正十二面体的 20 个顶点放置摄像机提取三维模型光场特征的检索算法,对每个三维模型从固定的 10 个光场进行正交投影,每个光场用 10 个视图组成一个光场描述子,通过提取二维 Zernike 矩特征和二维 Fourier 特征实现模型视图之间的比较,如图 2 所示,该方法符合人对物体的视觉感知,普遍认为光场描述子的方法是效果很好的

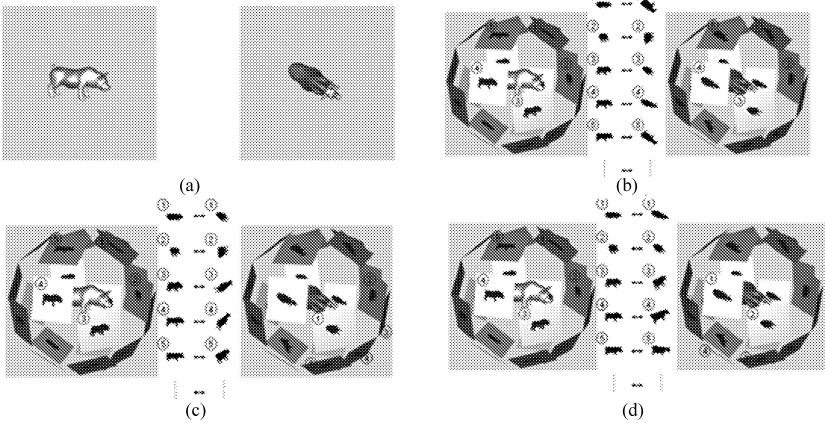


图 2 光场描述子示意图
Fig.2 Light field descriptor diagram

三维模型检索算法。

基于投影的方法将三维模型表示为多个二维的投影,在二维空间实现三维模型相似性的匹配,使检索的复杂度得到有效的降低。但该类方法如果投影所取的二维图象数量过多,会使计算量剧增。

(4) 基于函数变换的方法

该类方法一般是通过函数变换将三维模型的空间信息转化为频率信息,将3D模型分解成一组谐波分量,在频域空间提取特征实现检索。函数变换主要有:傅里叶变换、球面调和分析和小波变换。

Vranic等^[24]首先对模型进行规范化和体素化处理,然后对通过体素模型的傅里叶变换实现检索;Vranic等^[25]将球面调和变换用于三维模型特征的提取,Kazhdan等^[26]改进了该方法,使其与旋转无关;Paquet^[27]用小波变换的方法实现三维模型的特征描述,先对三维模型进行PCA调整和体素化处理,然后再在3个轴向进行小波变换,得到小波系数。从而实现三维模型的相似性比较。

基于函数变换的方法通常效果较好,但模型处理复杂,往往需要首先对模型进行规范化和体素化处理,计算量较大。

(5) 基于外观属性的方法

三维模型的外观属性是指模型的颜色、纹理、材质、反射系数等^[28],通过提取这些属性实现检索。由于三维模型外观属性的复杂性和多样性,外观属性特征提取的研究并未得到充分的发展。

2.3 基于语义的模型检索

由于三维CAD模型的复杂性及机器理解人类认知的困难性,在低层特征和高层语义之间存在“语义鸿沟”问题,本文将从基于相关反馈、主动学习和高层语义信息等方面对基于语义的三维模型检索研究现状进行分析。

(1) 基于相关反馈、主动学习的方法

相关反馈是借鉴了图像检索中的思想,通过在检索过程中融入用户感知信息,以提高检索准确率。反馈技术通过用户对检索结果的标注,表明用户对当前检索结果的满意度。相关反馈方法可以分为两大类^[8]:查询优化方法和分类器的方法。

查询优化法是通过不断优化相似计算中的各种权值,改变相似度量公式,使其能够更好地按照用户的意图表达相似度。Wang等^[29]通过归一化调整不同特征权值得到反馈结果,并应用到CAD模型检索中;Papadakis等^[30]利用伪反馈技术进行三维模型检索。分类器的方法是以用户反馈标记的正例和反例作为训练集,通过支持向量机分类器实现检索。Elad等^[31]采用支持向量机的方法首次将相关反馈

技术应用于VRML模型检索;Leifman等^[32]把学习特征子空间的概念应用于三维模型检索,结合偏离判断式分析和线性判断式分析方法建立相关反馈机制。

相关反馈技术在检索时必须不断重复进行,直到用户满意为止,无法建立一种长期的学习机制。因此,通过主动学习来挖掘高层语义信息,把模型归入不同的类别中。Ohbuchi等^[33]提出采用无监督学习提高三维模型检索性能;Hou等^[34]采用支持向量机对模型进行检索和聚类,这些方法都是基于低层特征进行聚类,得到的类别不一定是人所能理解的高层语义类别。

总的来说,在三维模型检索领域相关反馈和主动学习研究还处于起步阶段,以低层特征为基础进行语义挖掘和检索无法很好地解决语义鸿沟问题。

(2) 基于高层语义的方法

无论是基于内容的检索还是基于相关反馈、主动学习的检索,提取和使用的信息均是较低层次的信息。对于三维CAD模型来说,高层语义信息包括模型的特征信息、毛坯类型、热处理方法、加工要求等工艺信息。

在机械工程领域,特征能够实现模型特定的功能,是CAD模型最小单位的语义“特征”。Cicirello等^[35]通过自动识别方法来构建基于加工特征的模型依赖图,并利用非精确图匹配方法对CAD模型进行特征间的相似性评价;Ramesh等^[36]通过体分解方法识别模型的加工特征,通过特征的类型、方向、数目等7个特征的比较来对模型进行相似性评价;Bai等^[37]提出一种面向设计重用的三维CAD模型可重用区域提取及表征方法,通过树匹配算法实现由简单查询实例到完整可重用区域的局部检索;Li等^[38]提出基于特征依赖有向无环图等方法,逐层移除特征依赖图细节特征,通过得到的简化模型来实现整体检索,去除特征依赖图中关键特征节点的形式来提取潜在的可重用匹配区域,通过对潜在匹配区域的比较实现局部检索。

机械工程领域的模型不仅包含模型的形状信息,还隐含着丰富的设计、工艺、制造等方面的工程语义信息,在检索的过程中通过有效集成这些语义信息,达到CAD领域检索的需求。张汝珍等^[39]提出一种集成产品信息模型的设计资源检索算法,通过模型的功能、属性信息实现快速检索;刘雪梅等^[40]提出了面向工程重用的三维零件库服务系统框架及关键技术,给出了工程语义信息的分类及在检索的过程中的应用;胡伟等^[41]提出基于有向模糊图的产品系统结构相似度计算模型,利用产品各系

工艺/工装相似性之间的必然联系,准确定位和有效重用已有的工艺/工装设计信息,实现快速工艺设计和工装设计。

4.2 为企业数据管理提供了新手段

与 PDM 系统结合:目前,商品化的 PDM 系统广泛采用树形结构将模型数据和文档组织起来,同时提供了良好的版本控制能力,其通常采用基于文件名或文档内容的检索,为了搜索以往的模型,用户必须熟练掌握文档的命名规则,而设计人员重视的是产品设计本身,往往不关注模型信息管理,因此文档的命名不能有效表达模型,导致 PDM 中的检索技术缺乏实用性。而通过三维模型检索技术不但可以从零件整体形状考虑,而且可以精确到零件的局部几何结构或特征层次,能够实现细粒度和高精度的匹配,这是现有的产品数据管理软件难以做到的。通过三维模型检索技术与 PDM 系统的结合,可以将相关的各类信息以三维模型为载体关联起来,快速、准确、直观地展现给用户。

自动分类:由于标准件的使用日益频繁,根据形状或语义对零部件模型进行分类已日益重要。通过三维模型检索技术可以实现在不产生费用及无需专业技术的情况下将模型进行自动分类。即使同一个模型使用了不同的语言进行了不同命名,仍可归为一类。同时,通过模型的自动归类可以在加工中将零件分组加工,减少机床和刀具的更换,有利于实现专业化协作生产,提高生产效率。

4.3 为实现成本及维修评估提供了新技术

零件的加工成本主要由零件所包含的特征(方向、类型、体积等)决定^[52],因此,通过三维模型局部特征检索可以实现零件成本评估,用已有模型成本作参照,来评价新模型的成本,会使零件成本评估工作变得简单快速。在产品维修中,通过三维模型检索技术可以帮助维修人员准确找到相同的备用件或相似的代用件,并能够快速检索到相关的技术资料,这些资料对产品维修人员有很好的参考借鉴作用,并能帮助人们评估维修后的效果,有效减少维修时间,提高维修质量。

通过三维 CAD 模型检索技术可充分挖掘和发现企业日益丰富的三维 CAD 模型资源及其关联的各类信息所蕴藏的巨大潜能,提升我国制造业新产品开发和快速响应市场需求的能力,促进知识工程在企业的推广和应用。

5 展望

三维 CAD 模型检索技术涉及到计算机图形/图

像学、计算机视觉、模式识别、机械设计和制造等多个领域的知识,是一个十分复杂的研究课题。目前,虽然取得了一些研究成果,但尚有一些问题需要进一步的深入研究和探讨:①高效的三维 CAD 模型检索算法。三维 CAD 模型不同于通用领域的三维模型,如何根据 CAD 模型的特点及检索需求,提供更符合 CAD 领域及用户需求的检索算法;面对企业庞大的模型库,如何更高效、更精确地检索三维 CAD 模型,改善和提高检索效率,这些都是今后值得研究的问题。②三维 CAD 模型局部检索技术。对于制造型企业来说,设计人员往往更关注局部结构,局部结构的相似性更具有重用价值。如何根据不同企业不同用途的 CAD 模型库去定义不同的局部结构;如何在庞大的 CAD 模型库中自动提取和发现局部结构以及如何更有效地检索局部结构,需要进行进一步的研究。③三维 CAD 模型语义检索技术。鉴于三维 CAD 模型的复杂性及机器理解人类认知的困难性,在低层特征和高层语义之间存在“语义鸿沟”。如何在相关反馈算法中寻找更好的目标函数来表达用户的需求和喜好;如何利用主动学习算法来提高语义分类的准确性;如何提取 CAD 模型中的制造语义信息,并与 CAD 模型进行关联对应;如何根据不同阶段的设计需求(概念设计、详细设计、工艺/工装设计等)提供不同的语义检索支持;如何实现基于 MBD 技术的语义检索和重用;如何将本体技术更好的引入到语义检索中,逐步消除“语义鸿沟”,这些都是未来三维 CAD 模型语义检索研究和发展的方向。④自由曲面模型的检索技术。自由曲面在工程和日常生活中应用越来越广泛,但目前关于自由曲面模型相似性评价和检索的研究较少,是值得进一步研究的方向之一。⑤面向三维场景及虚拟装配的检索技术。虚拟三维场景及装配环境中往往由许多复杂的三维模型组成,如何从复杂的虚拟环境中准确高效的识别并检索出其中的三维模型是未来的研究方向之一。⑥语义知识挖掘。CAD 模型中蕴含着大量的语义知识,这些语义知识的发现和挖掘对于 CAD 模型检索和重用具有重要意义,因此,语义知识的挖掘是值得深入研究的问题。

6 结束语

介绍了三维 CAD 模型检索技术的体系结构,并对目前国内外一些优秀的检索算法进行归纳整理,比较它们的优缺点,然后对三维 CAD 模型检索系统及应用进行讨论,最后对目前三维 CAD 模型检索研究中存在的问题和未来的发展方向进行了展望。

参考文献

- 1 张开兴, 张树生, 李亮. 基于蚁群算法的三维 CAD 模型检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(4): 633 ~ 639.
Zhang Kaixing, Zhang Shusheng, Li Liang. A method of 3D CAD model retrieval based on ant colony algorithm [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(4): 633 ~ 639. (in Chinese)
- 2 Iyer N, Jayanti S, Lou K, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends [J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(5): 509 ~ 530.
- 3 Huijsmans D P, Sebe N. Extended performance graphs for cluster retrieval [C] // Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on CVPR, 2001, 1: 26 ~ 31.
- 4 Shilane P, Min P, Thomas A, et al. The Princeton shape benchmark [C] // Proceedings of International Conference on Shape Modeling, 2004: 167 ~ 178.
- 5 白静. 面向设计重用的三维 CAD 模型检索[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
Bai Jing. Design reuse oriented 3D CAD model retrieval [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- 6 Bustons B, Keim D, Saupe D, et al. Feature-based similarity search in 3D object databases [J]. ACM Computing Surveys, 2005, 37(4): 345 ~ 387.
- 7 Tangelder J, Velkamp R. A survey of content based 3D shape retrieval methods [J]. Multimedia Tools and Applications, 2008, 39(3): 441 ~ 471.
- 8 程言志. 基于形状及表面属性三维模型检索中若干问题的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
Cheng Yanzhi. Research on some problems of 3D model retrieval based on shape and surface properties [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 9 胡保坤. 三维模型内容检索中的相关反馈和长期学习研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Hu Baokun. Research on relevance feedback and long-term learning in content based 3D model retrieval [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- 10 Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807 ~ 832.
- 11 Ip C Y, Lapadat D, Sieger L, et al. Using shape distributions to compare solid models [C] // SMA '02: Proceedings of the 7th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. New York: ACM Press, 2002: 273 ~ 280.
- 12 王洪申, 张树生, 张开兴, 等. 基于法向分类的三维模型形状分布检索算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(6): 1 187 ~ 1 193.
Wang Hongshen, Zhang Shusheng, Zhang Kaixing, et al. Shape distributions retrieval algorithm of 3D CAD models based on normal direction [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(6): 1 187 ~ 1 193. (in Chinese)
- 13 Ankerst, Kastenmüller G, Kriegel H P, et al. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases [C] // SSD'99: Proceedings of the 6th International Symposium on Advances in Spatial Databases. London, UK, Springer Verlag, 1999: 207 ~ 226.
- 14 Ohbuchi R, Otagiri T, Ibato M, et al. Shape-similarity search of three-dimensional models using parameterized statistics [C] // Pacific Graphics 2002, 2002: 265 ~ 274.
- 15 Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes [C] // SIGGRAPH 2001, 2001: 203 ~ 212.
- 16 Tung T, Schmitt F. Augmented reeb graphs for content-based retrieval of 3D mesh models [C] // Proceedings of International Conference on Shape Modeling Applications, 2004: 157 ~ 166.
- 17 El-Mehalawi M, Miller R A. A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. part I: representation [J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(1): 83 ~ 94.
- 18 Marini S, Biasotti S, Falcidieno B. Partial matching by structural descriptors [EB/OL]. [2007-08-31]. <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2006/651>.
- 19 王玉, 马浩军, 何玮, 等. 机械 3 维 CAD 模型的聚类 and 检索 [J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(6): 924 ~ 928.
Wang Yu, Ma Haojun, He Wei, et al. Clustering & retrieval of mechanical 3D CAD models [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(6): 924 ~ 928. (in Chinese)
- 20 Sundar H, Silver D, Gagvani N, et al. Skeleton based shape matching and retrieval [C] // Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications, 2003: 130 ~ 139.
- 21 Gao W, Gao S M, Liu Y S, et al. Multiresolutional similarity assessment and retrieval of solid models based on DBMS [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9): 985 ~ 1 001.
- 22 Abbasi S, Mokhtarian F. Automatic view selection in multi-view object recognition [C] // Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition, 2000, 1: 13 ~ 16.
- 23 Chen D Y, Tian X P, Shen Y T, et al. On visual similarity based 3D model retrieval [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 223 ~ 232.
- 24 Vranic D, Saupe D. 3D shape descriptor based on 3D Fourier transform [C] // Proceedings of IEEE EURASIP Conference on Digital Signal Processing for Multimedia Communications and Services, Budapest, Hungary, 2001: 271 ~ 274.
- 25 Vranic D, Saupe D. Description of 3d-shape using a complex function on the sphere [C] // Proceedings of IEEE International

- Conference on Multimedia and Expo, Lausanne, Switzerland, 2002: 177 ~ 180.
- 26 Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors [C] // Proceedings of ACM/Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2003: 167 ~ 175.
- 27 Paquet E, Rioux M, Murching A, et al. Description of shape information for 2-D and 3-D objects [J]. Signal Processing: Image Communication Journal, 2000, 16(1 ~ 2): 103 ~ 122.
- 28 Suzuki M T. A web-based retrieval system for 3D polygonal models [C] // Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001: 2 271 ~ 2 276.
- 29 Wang J L, He Y J, Tian H S, et al. Retrieving 3D CAD model by freehand sketches for design reuse [J]. Advanced Engineering Informatics, 2008, 22(3): 386 ~ 392.
- 30 Papadakis P, Pratikakis I, Trafalis T, et al. Relevance feedback in content-based 3D object retrieval: a comparative study [J]. Computer-Aided Design and Applications, 2008, 5(5): 753 ~ 763.
- 31 Elad M, Tal A, Ar S. Content based retrieval of VRLM objects-An iterative and interactive approach [C] // Proceedings of the 6th Eurographics Workshop on Multimedia. Manchester, UK, 2001: 107 ~ 118.
- 32 Leifman G, Meir R, Tal A. Semantic-oriented 3D shape retrieval using relevance feedback [J]. The Visual Computer, 2005, 21(8): 865 ~ 875.
- 33 Ohbuchi R, Kobayashi J. Unsupervised learning from a corpus for shape-based 3D model retrieval [C] // Proceedings of the ACM International Workshop on Multimedia Information Retrieval. Santa Barbara, CA, USA, 2006: 163 ~ 172.
- 34 Hou S, Lou K, Ramani K. SVM-based semantic clustering and retrieval of a 3d model database [J]. Computer Aided Design and Application, 2005, 2(2): 155 ~ 164.
- 35 Cicirello V, Regli W C. Machining feature-based comparisons of mechanical parts [C] // International Conference on Shape Modeling and Application, Genova, Italy, 2001: 176 ~ 185.
- 36 Ramesh M, Yip-Hoi D, Dutta D. Feature based shape similarity measurement for retrieval of mechanical parts [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2001, 1(3): 245 ~ 256.
- 37 Bai Jing, Gao Shuming, Tang Weihua, et al. Design reuse oriented partial retrieval of CAD models [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(12): 1 069 ~ 1 084.
- 38 Li Ming, Fuh J Y H, Zhang Y F, et al. General and partial shape matching approaches on feature-based CAD models to support efficient part retrieval [C] // Proceedings of ASME DETC 2008 Computers and Information in Engineering (CIE), Brooklyn, New York, USA, 2008.
- 39 张汝珍, 周雄辉. 基于集成产品信息模型的设计资源检索算法 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(8): 1 248 ~ 1 251.
Zhang Ruzhen, Zhou Huixiong. A design resource retrieval algorithm based on integrated product information model [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2007, 41(8): 1 248 ~ 1 251. (in Chinese)
- 40 刘雪梅, 李爱平. 面向工程重用的三维零件库服务系统 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(7): 1 371 ~ 1 377.
Liu Xuemei, Li Aiping. 3D parts library service system for engineering reuse [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(7): 1 371 ~ 1 377. (in Chinese)
- 41 胡伟, 胡国清, 魏昕, 等. 基于图论的产品实例检索结构相似度分析 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 184 ~ 188.
Hu Wei, Hu Guoqing, Wei Xin, et al. Structural similarity analysis in case retrieval using graph theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 184 ~ 188. (in Chinese)
- 42 Tsai C-Y, Chang C A. A two-stage fuzzy approach to feature-based design retrieval [J]. Computers in Industry, 2005, 56(5): 493 ~ 505.
- 43 刘志鹏. 基于多层次知识表示的三维CAD模型检索技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Liu Zhipeng. Research on 3D CAD search technology based on multi-level knowledge representation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- 44 Li Z J, Raskin V, Ramani K. Developing ontologies for engineering information retrieval [J]. IASME Transactions Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2008, 8(3): 1 ~ 13.
- 45 Albertoni R, Papaleo R, Pitikakis M. Ontology-based searching framework for digital shapes [M] // Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3762: 896 ~ 905.
- 46 Attene M, Robbiano F, Spagnuolo M. Part-based annotation of virtual 3D shapes [C] // Proceedings of the International Conference on Cyberworlds. Hannover, Germany, 2007: 427 ~ 436.
- 47 Gutierrez M, Garca-Rojas A, Thalmann D. An ontology of virtual humans incorporating semantics into human shapes [J]. The Visual Computer, 2007, 23(3): 207 ~ 218.
- 48 <http://shapelab.ecn.purdue.edu>
- 49 <http://edge.cs.drexel.edu>
- 50 http://www.cadenas.cn/index_main.asp
- 51 <http://www.shapesearch.net>
- 52 Cardone A, Gupta S K, Karnik M V. Identifying similar parts for assisting cost estimation of prismatic machined parts [C] // Proceedings of the ASME Design for Manufacturing Conference, Salt Lake City, Utah, 2004.