

# 三维 CAD 模型检索综述

路 通

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

**摘 要** 对三维 CAD 模型检索研究现状进行了深入和系统的综述。CAD 模型检索可划分为两个层次:基于视觉相似性的三维 CAD 模型检索、面向语义与功能描述的三维 CAD 模型检索。分别分析了两种检索层次下 CAD 模型的检索方法。在此基础上总结了三维 CAD 模型检索评测基准库、评测方法等。最后展望了现有研究中的难点及进一步的研究方向。

**关键词** 三维 CAD 模型,视觉相似性,检索,形状匹配,近似度,基准库

**中图法分类号** TP391.41 **文献标识码** A

## Retrieval of 3D CAD Models: Survey

LU Tong

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract** A comprehensive survey on the up-to-date retrieval methods for 3D CAD models was presented. Due to the great differences in representations and retrieval algorithms between 3D CAD models and other general models, CAD models retrieval is divided into two hierarchies: visual-similarity-based retrieval and semantic-functional-descriptions-based retrieval. Representations and algorithms of each hierarchy were discussed and analyzed systematically. Benchmarks and evaluations of 3D CAD model searching methods were summarised. Finally existing difficulties and future research were discussed.

**Keywords** 3D CAD models, Visual-similarity, Retrieval, Shape matching, Similarity, Benchmark

## 1 引言

包括图像、图形、视频在内的面向内容的可视媒体识别与检索一直是研究热点之一<sup>[1]</sup>。近几年来随着三维获取设备及相关软件技术的不断发展,各种应用对三维数据描述的需求开始迅速增加,生物分子、机械工程、三维游戏、服装设计、虚拟现实场景建模、建筑设计及室内装潢等众多领域都逐步建立了相关模型库,且其中的三维模型数量仍在不断扩充。与此相应,面向内容的三维模型检索也逐步成为研究热点之一<sup>[2,3]</sup>,近年来提出了多种不同类型的模型检索方法。

根据三维模型表示方法、应用场合及检索需求的不同,三维模型检索大体上可划分为两类:三维通用模型检索及三维 CAD 模型检索。通用模型检索一般不涉及领域知识,侧重于从几何形状描述角度分析,通过几何比较、统计分析等方法,在提取通用模型形状描述子的基础上完成比较与检索<sup>[4-8]</sup>。较早开展这方面工作的研究机构包括美国普林斯顿大学<sup>[9]</sup>、德国 Konstanz 大学<sup>[10]</sup>、日本东京大学<sup>[11]</sup>等。

三维 CAD 模型检索与通用模型检索存在较大区别。首先,三维 CAD 模型与三维通用模型在表示上差异较大。通用三维模型一般采用多边形网格表示;而 CAD 模型表示具有多样性,如逆向工程中的点云表示、多边形网格表示、商品化

CAD 系统所支持各类几何造型表示(主要采用实体模型表示方法,如空间位置枚举、构造实体几何及边界表示<sup>[7]</sup>),此外还包括特征造型表示(包含各类几何及非几何参数约束、产品管理信息等)。其次,由于表示方式、应用需求的不同,两类模型在检索机制上也存在较大区别。通用模型检索侧重于研究全局几何推理及相似度计算,但由于缺乏相应局部细节表示及相应领域知识,通用模型检索方法一般难以完成特定语义信息提取和细节匹配。而三维 CAD 模型检索除考虑模型全局几何形状信息外,更侧重于与语义相关的特征识别、局部细节检索及拓扑关系分析。第三,CAD 模型检索由于主要用于解决设计、加工、制造等整个产品生命周期内的多种工程应用问题,因此所涉及的领域知识、检索需求等均有别于通用模型检索。除此之外,两者在模型测试基准库的建立与评测等方面也存在较大差异<sup>[28,104]</sup>。正是由于上述区别,许多通用模型检索算法、评测基准库等并不完全适用于 CAD 模型检索。目前开展三维 CAD 模型检索较活跃的研究机构包括美国 Purdue 大学 PRECISE 研究所<sup>[12]</sup>、美国 Drexel 大学<sup>[13]</sup>、中国台湾国立大学<sup>[14]</sup>等。

事实上,随着三维 CAD 模型在数量及复杂性上的迅速增加,三维 CAD 模型复用与检索问题已日益突出<sup>[15,16]</sup>。据统计,设计者在设计 CAD 模型时,平均要花费 60% 的工作时间

到稿日期:2011-05-10 返修日期:2011-09-15 本文受国家自然科学基金(61003113,61021062),江苏省自然科学基金(BK2009082),国家 973 项目(2010CB327903)资助。

路 通(1976-),男,博士,副教授,主要研究领域为计算机图形学、CAD,E-mail:lutong@nju.edu.cn.

在以往产品信息的检索与比较<sup>[17]</sup>上。Gunn 则进一步指出,进行新产品设计时,仅约 20%来自真正的创新,40%可从现有设计中获取,另外 40%则可在修改现有设计的基础上获得<sup>[18]</sup>。Ullman<sup>[19]</sup>认为,超过 75%的新设计包含着对以往设计知识的检索与复用。因此,在分析 CAD 模型表示的基础上,深入研究适合于 CAD 模型的检索机制及相关性能评测方法,具有重要的理论价值与实际意义。

本文首先简要介绍目前三维 CAD 模型检索研究的现状。结合 CAD 模型检索的不同特点,本文将 CAD 模型检索划分为两个层次:基于视觉相似性的三维 CAD 模型检索、面向语义与功能描述的三维 CAD 模型检索,并分别对两种检索层次下 CAD 模型检索方法进行综述。与此相应,由于模型比较一般通过特征描述子来完成,本文将 CAD 模型特征描述也划分为两类:一类包括基于视觉相似性且领域无关的通用型特征,另一类则是面向工程领域、可适应制造或加工需求的语义特征。在此基础上对三维 CAD 模型检索评测基准库、评测方法进行总结。最后对目前各类三维 CAD 模型检索方法的检索能力、开销等进行量化比较,在此基础上指出现有方法所面临的主要困难,并对进一步深入研究的方向进行展望。

## 2 三维 CAD 模型检索概述

三维 CAD 设计正逐步应用到诸多工程领域。据统计,在磨具制造业中,2001 年三维 CAD 建模比例已达 66%,这一比例在 2003 年进一步上升至 80%<sup>[20]</sup>。CAD 模型在数量与复杂性上日益增加,但其自动检索、分类等相关研究相对滞后,进而产生了模型爆炸(3D model explosion)问题<sup>[21]</sup>。CAD 模型检索正是为从规模日益增大的模型数据库中快速获取符合特定描述(如几何形状、加工特征、拓扑结构等)的相似模型,进而实现模型复用而提出的。

CAD 模型检索最简单的方式是根据文件名、部件编号或所在环境的关键字描述完成检索。该方式在某些产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)系统中已得到支持与应用。但命名存在一定的主观性,难以为用户熟知,且其名称也可能随时间变化而发生改变,因此该方式显然无法满足模型检索的需要。

进一步的 CAD 模型检索可划分为两个层次:基于视觉相似性的三维 CAD 模型检索及面向语义与功能描述的三维 CAD 模型检索。基于视觉相似性的 CAD 模型检索方法一般可独立于领域知识,侧重于通过函数投影、统计分析、拓扑结构比较等方法提取 CAD 模型的全局几何描述、形状特征等,在此基础上生成多维空间中的特征描述子,最后在该多维特征空间中通过比较特征描述子来完成模型检索。如 Founkhouer 等人<sup>[22]</sup>利用球面调和函数(spherical harmonic)得到一组旋转不变的频率函数,并以此作为比较依据;Novotni 等人<sup>[23]</sup>则将二维 Zernike 矩方法推广到三维,用于模型不变性检索;Hilaga<sup>[24]</sup>等人通过测地距离函数生成多分辨率 Reeb 图来提取模型拓扑结构完成比较等。面向语义与功能描述的 CAD 模型检索则在结合领域知识的基础上完成模型相似度计算、自动分类与索引等。其中制造/加工特征识别基础上的模型检索方法侧重于结合 CAD 模型各类制造及加工特征的定义与表示,从模型几何描述中提取其底层语义特征,然后据此完成模型比较。如 Ei-Mehalawi 等人<sup>[24-26]</sup>在提取 B-Rep

表示的 CAD 模型的面、边、顶点、壳等拓扑结构的基础上,生成属性图描述(attribute graph)后用于特征识别及模型检索;Ramesh 等人<sup>[27]</sup>使用最大单元凸分解法(maximal cell convex decomposition)将各分解单元映射到制造特征库以完成模型比较等。

本文讨论的检索算法主要面向边界表示(B-Reps)、CSG 表示、体素表示、多边形网格及特征造型表示的 CAD 模型。其中边界表示具有唯一性,为各主流的商品化 CAD 系统支持,如 Pro/Engineer<sup>TM</sup>、I-DEAS<sup>TM</sup>、SolidWorks<sup>TM</sup>等;逆向工程等应用中使用的网格及体素表示的 CAD 模型,可通过形状分布等算法进行特征提取与比较<sup>[29-36]</sup>,使用也较为广泛。此外,STEP(standard for the exchange of product model data,产品数据交换标准)<sup>[37-40]</sup>是用于描述 CAD 模型产品生命周期的完整数据(如集合与制造信息)的相关国际标准,其中 STEP41 给出了产品描述定义<sup>[37]</sup>,STEP42 定义了产品集合和拓扑表达<sup>[38]</sup>,STEP45 给出了产品材料相关描述<sup>[39]</sup>,STEP203 则在 B-Reps 表示的基础上定义了模型表示<sup>[40]</sup>。与其它 CAD 数据规范(如 IGES)相比,STEP 标准在数据表达与交换上改进较大,因而在面向语义及功能描述的检索系统中得到应用。特征造型表示则与所使用的商品化 CAD 系统相关,一般以参数化约束方法描述 CAD 模型各类几何及非几何特征。

## 3 基于视觉相似性的三维 CAD 模型检索方法

基于视觉相似性的检索方法以提取 CAD 模型全局形状描述及几何特征等为出发点,在此基础上生成多维空间中的全局特征描述子,之后在该多维特征空间中通过比较全局特征描述子,来完成基于视觉相似性的模型检索。该类方法具有适用范围广、计算效率高等优点,适合于对大规模 CAD 模型数据库进行全局特征提取基础上的初步、粗略的分类或检索。

### 3.1 基于全局几何结构提取的 CAD 模型检索

提取全局几何结构描述是 CAD 模型检索的常用方法之一,其基本思想是根据给定的 CAD 模型表示,提取其中的各种几何参数或结构描述,以简化模型的复杂数据描述,实现快速检索的目的。

基于全局几何结构提取的方法可分为两个层次:几何参数提取及结构特征简化。其中,几何参数提取侧重于提取与计算 CAD 模型的几何描述参数。如 Corney 等人<sup>[41]</sup>使用凸包特征(convex hull features)表征给定的三维模型,计算其紧致性(compactness,模型的体积平方与表面积立方之比值)和卷缩性(crinkliness,模型表面积和与该模型具有相同体积的球体的表面积之比值)等;另外一些方法则计算模型表面积、包围盒纵横比、表面积与体积比等几何参数<sup>[42-44]</sup>,并据此区分不同的三维模型。基于几何参数描述的方法计算简单,较适用于 B-Reps 表示的 CAD 模型检索,但对近似模型区分度较差。

结构特征简化则提取几何模型的矩(moments)、骨架图(skeletal graph)等在全局几何结构简化基础上的特征描述,以适应模型不变性检索。该类方法适用于体素表示及多边形网格表示的 CAD 模型检索。其中,Sadjadi 最早将矩不变量推广到三维空间<sup>[45]</sup>,给定三维模型  $\rho(x_1, x_2, x_3)$  的  $p+q+r$

阶矩可按下式定义:

$$m_{xyz} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^i y^j z^k \rho(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3 \quad (1)$$

Elad 等人<sup>[46]</sup>用矩方法对多边形网格表示(VRML 格式)的三维模型检索进行了实验,认为使用 4 到 7 阶矩特征描述即可较好地地区分三维模型。检索中的用户交互可使用基于支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的相关反馈算法来进一步提高模型检索效率。该方法同样可应用于 CAD 模型检索。Ohbuchi 等人<sup>[47]</sup>在提取三维模型主轴基础上计算其惯性矩;Novotni 等人则在球谐函数基础上<sup>[48,49]</sup>进一步提出基于三维 Zernike 矩不变函数的特征描述方法,首先将多边形网格表示的三维模型体素化,然后在对各体素规范化的基础上计算其几何矩及三维 Zernike 矩,最后检索 1814 个不同类型的三维模型。其结果表明三维 Zernike 矩对几何变形鲁棒性较好,且由于 Zernike 矩的各多项式正交,因此相对其它矩方法(如 Legendre 矩等)而言其检索性能较好。由于矩的不变性特征,矩方法一般不需要先对模型做坐标标准化变换。

结构特征简化的另一个途径是提取 CAD 模型骨架特征描述。Sundar 等人<sup>[50,51]</sup>使用的距离变换(distance transform)方法,首先对三维模型中的各体素分别计算其距离变换值及 26-邻域的平均距离变换值,以两者的差值表征该体素对边界覆盖的权重;其次按该权值降序排序后分别应用细化算法(thinning)、聚类算法(clustering)得到无连接骨架点(skeletal points);接下来使用最小生成树算法(minimum spanning tree, MST)连接骨架点并得到三维模型的骨架图表示(skeletal graph)。最终的模型检索则在骨架图基础上通过图同构(graph isomorphism)算法实现。该方法可从全局几何结构及局部形状相似性两个方面比较三维模型,其主要的缺点在于容易将简单形体匹配为复杂形体的局部特征、易受噪音干扰等。Iyer 及 Luo 等人<sup>[52,53]</sup>首先将 B-Reps 表示的 CAD 模型转换为体素表示,然后使用细化方法将体素模型转换为细化骨架,最后将 CAD 模型的细化骨架转换为骨架图进行比较。该骨架图由节点、边和环组成,其中边表示 CAD 模型中的独立几何实体、环表示模型中的洞。该骨架图较好地描述了 CAD 模型的结构组成,同时数据量比原 B-Reps 表示大幅减少了。但实验中也发现,部分机械 CAD 模型以细化方法得到骨架图后,与原始模型形状并不对应(如壳体),检索准确率不高。此外, Kim 等人<sup>[54]</sup>使用中轴变换与扩张方法生成骨架图进行检索;Nagasaka 等人<sup>[55]</sup>使用距离变换方法生成骨架图后,将每个骨架以 126 个叶节点表示,并以前馈神经网络方法(back-propagation neural network)进行学习与分类。其它的结构特征简化方法还包括分支点骨架(shock scaffold)<sup>[56]</sup>、变形区域(deformable regions)<sup>[57]</sup>等。

基于全局几何结构提取的 CAD 模型检索方法计算简单,一般不需要进行模型坐标标准化,且较好地描述了模型的全局几何及结构特征,数据量小、检索速度快。其主要缺点在于一般需要将其它表示的 CAD 模型体素化,数据存储空间开销较大,且检索精度受体素化分割算法及体素化分辨率影响。此外,各种模型噪音也会影响检索准确率。

### 3.2 基于全局统计特征提取的 CAD 模型检索

全局统计特征方法中,统计特征直方图比较是 CAD 模型检索的常用手段之一。该方法以不同函数计算模型取样点

的角度、距离、面积、体积等几何及形状分布特征,并通过比较直方图来计算三维模型的相似度。适用于该类方法的 CAD 模型表示方法一般包括多边形网格表示、体素表示及边界表示。

Osada 等人<sup>[58,59]</sup>最初采用形状分布方法比较多边形网格表示的通用三维模型,该方法在模型表面随机取样并以几何函数计算取样点特征,对各特征值做规范化后计算其形状特征分布直方图,最后以  $L_N$  范数计算形状分布直方图之间的相似距离,以此作为三维模型的相似度。Osada 等人实验了 5 种几何函数,包括 3 个取样点构成的角度(A3)、取样点到中心距离(D1)、任 2 个取样点距离(D2)、3 个取样点组成的三角面片面积(D3)及 4 个取样点的四面体体积(D4),其中以 D2 鲁棒性和效率较好。Ip 等人<sup>[60]</sup>进一步提出以 B-Reps 表示的、基于形状分布的 CAD 模型检索方法。该方法按取样点对连线与实体模型空间的位置关系(实体内、实体外或穿越实体模型),对同一 CAD 模型分别计算 3 种 D2 分布直方图后进行比较。此外,Ohbuchi 等人<sup>[61,62]</sup>在 D2 函数的基础上,同时计算一对取样点的距离及取样点所在表面之间的夹角,并生成角度-距离(Angle-Distance, AD)分布直方图及绝对角度-距离(Absolute Angle-Distance, AAD)分布直方图,以此作为模型检索依据。其中 AAD 通过取表面法向内积绝对值得到,以提高对质量较差的三维模型检索的鲁棒性。该类方法无需对模型进行预处理,满足平移、旋转、缩放不变性。

Kriegel 等人<sup>[31]</sup>首先使用等份空间划分方法将 CAD 模型边界表示转换为体素表示,以简化模型描述;在将各体素关联至直方图一到多个区间后,逐一取表面边界处体素,并依次以该体素中心及给定半径生成体素化三维球体(3D voxelized sphere),再计算位于该球体内的所给 CAD 模型各体素数目占球体体素的比例,以该比例值大小表征该表面体素处的凹凸情况,并将其转换到对应直方图区间作为模型检索特征向量。该方法可通过控制体素划分粒度来产生不同维数的检索特征向量,但过粗的划分粒度会影响检索结果的精确性,划分过细则导致检索效率降低。Ankerst 等人<sup>[63]</sup>则先对蛋白质分子模型实施主元变换(Principle Axes Transform),然后围绕质心将模型划分为一系列扇区,以此计算形状直方图。

全局统计特征比较方法较好地提取了 CAD 模型的特征分布情况,能表达模型数据的分布特点,且一般对平移、旋转、缩放变换具有不变性,对模型中的重叠、裂缝、噪音等也具有一定的鲁棒性。其缺点主要是只能完成全局特征提取及分析,对相似模型区分能力不足,且缺乏细节检索能力。一些改进包括应用三维形状上下文(3D shape contexts)<sup>[64]</sup>来检索三维模型等。

### 3.3 基于投影视图的 CAD 模型检索

投影视图方法一般生成三维模型的函数投影图、形态图(aspect graphs)等,并以此作为三维模型的检索依据。该方法尤其适用于工程领域对 CAD 模型的检索,如可在生成三维 CAD 模型的二维投影图基础上与现存的大量二维工程图比较(包括矢量图及扫描位图),从而通过三维 CAD 模型与二维工程图之间的间接关联来实现设计复用,进而大大拓宽三维 CAD 模型检索的应用范围。

Horn<sup>[65]</sup>最初采用扩展高斯球(extended Gaussian sphere)方法表征 B-Reps 边界表示的 CAD 模型的几何特征。

该方法将模型各表面映射到单位球面上对应的特征向量,其中向量方向与表面的法线同向,模长等于表面面积。Wong 等人<sup>[66]</sup>利用扩展高斯球比较三维模型的几何相似性,但该方法仅适于凸几何体,对于含凹面的几何模型,其投影扩展高斯图像并不唯一。Xu 等人<sup>[67]</sup>、Matsuo 等人<sup>[68]</sup>分别提出了改进的扩展高斯投影方法,以唯一表示含凹面几何体。该类方法的主要缺点是模型噪音敏感,且不具有旋转独立性。

Funkhouser 等人<sup>[22]</sup>利用球面调和函数对体素化后的三维模型首先划分一组同心球面,然后计算所有与同心球面相交的体素的球面调和特征向量来比较三维模型。该方法具有旋转不变性,但体素化及取样过程容易受到噪音干扰。Pu 等人<sup>[69,70]</sup>则针对二维工程图及三维 CAD 模型提出 2.5 维球面调和函数(2.5D spherical harmonics)。该方法将三维模型首先通过姿态估计算法(pose estimation)转换为二维三视图,然后计算各视图的包围盒,并以包围盒为底面生成一个半球体(球半径为二维视图包围盒对角线长度,球心为包围盒质心),接下来从二维视图质心出发在随机方向生成光线,并与其外围边界相交于若干点。最后对这组相交点实施球面调和变换,得到形状特征描述,并根据其 L1 距离计算其三维模型的相似度,其中最匹配的两个二维视图称为主匹配视图(principal matching views)。最近,Pu 等人<sup>[71]</sup>在 2.5 维球面调和函数基础上利用二维草图输入对三维 CAD 模型进行检索。Hou 等人<sup>[72]</sup>则进一步使用组合分类器对用户手绘二维草图所属预定义输入类别计算概率值,并使用支持向量机产生相应形状特征描述,在此基础上实现三维 CAD 机械部件检索。Min 等人<sup>[2]</sup>将三维模型从不同视点投影为多个二维视图,并将其与用户输入的二维草图进行相似性比较<sup>[22]</sup>。Cyr 等人<sup>[73]</sup>则将三维模型每隔 5 度计算一个二维投影视图,并按视图之间的 Euclidean 距离聚类,得到一组二维形态图,作为三维模型特征描述。

除此之外,Vranic 等人<sup>[74]</sup>使用三维傅立叶分析方法比较体素表示的三维几何模型,但对模型旋转鲁棒性较差;Zhang 等人<sup>[75,76]</sup>使用短时傅立叶描述子(short time Fourier descriptor)比较三维形状几何相似性,但要求其轮廓闭合。一般而言,傅立叶描述子算法需要首先完成体素化,且限制较多。其它一些用函数投影检索三维模型的方法还包括小波分析方法<sup>[77]</sup>、旋转投影方法<sup>[78]</sup>、Shading 函数<sup>[79]</sup>等。

基于投影视图的模型检索方法通过对某函数模型的投影特征向量来区分三维模型,其优点在于二维视图比较复杂度较低、计算效率高,但同时该方法也存在函数投影时限制条件多、对旋转敏感、对噪音及网格细分或网格简化模型鲁棒性较差,以及需要体素化等优点。同时函数投影过程中也容易丢失原始几何或拓扑信息,使得 CAD 模型的细节及局部检索能力降低。

### 3.4 基于拓扑结构分析的 CAD 模型检索

从 CAD 模型的拓扑结构分析入手,提取其不同组成成分之间的拓扑连接及结构关系,在此基础上结合 CAD 模型应用上下文环境对 CAD 模型功能及其语义进行推理,可较好地适应检索需求<sup>[80]</sup>。此外,模型拓扑结构不仅能有效描述其局部细节和全局结构特征,且在经旋转、拉伸或网格简化、细分、变形等操作后,仍具有很好的稳定性<sup>[90]</sup>。因此,拓扑结构分析成为面向语义与功能描述的 CAD 模型检索的另一个重要途

径。

Mohamed 等人<sup>[25,26]</sup>首先将 STEP 格式的 CAD 模型转换为表示其拓扑结构的属性图(attributed graph),其中顶点对应模型的面,顶点连线对应模型的边,模型的一些原始空间几何信息则以属性值方式结合在属性图中;之后在该简化拓扑结构描述的基础上,通过非精确图匹配方法(inexact graph matching)比较 CAD 模型,以提高检索效率,并避免出现精确匹配中可能出现的各种组合问题;但 B-Reps 表示基础上的拓扑图比较对大型复杂模型而言效率较低<sup>[21]</sup>。类似地,Biasotti 等人<sup>[81,82]</sup>在所给模型基础上构造了包含顶点、边、面及其拓扑结构的有向无环 M-graph 图,并在该拓扑结构基础上利用最大共同同构子图方法比较三维模型。近来,华中科技大学的陶松桥等人<sup>[107]</sup>提出了基于非精确图匹配的 CAD 模型检索方法,其通过构造相容矩阵来避免具有 NP 复杂性的精确图匹配;西北工业大学的张开兴等人<sup>[108]</sup>利用属性图同构实现了三维 CAD 模型的局部匹配算法;Pan 等人<sup>[83]</sup>对多边形网格表示的三维模型首先计算面片的平坦度信号值,然后采用改进的分水岭算法重新分割模型,并利用各曲面片连接关系构造其拓扑连接图,以拓扑连接图的相似性来度量模型近似度。Meng 等人<sup>[84]</sup>以三维变形(3D morphing)为基础,为每个多边形网格表示的三维模型构造两个空间特征图(spatial feature maps),以描述其面片的拓扑结构,同时在空间特征图中保留面片的几何及空间信息,然后对空间特征图使用傅立叶变换来比较三维模型。相对于其它几何比较方法而言,该方法的主要优点是利用了拓扑特征,同时对自由旋转、映射及缩放具有不变性。

Reeb 图则是描述拓扑结构并用于模型检索的另一个研究热点。Reeb 图中每个连通区域具有相同 Morse 函数值,可用单一节点表示。Hilaga 等人<sup>[24]</sup>以测地距离函数为基础,按三维模型测地距离的不同进行不同密度的划分,并在此基础上得到不同分辨率的 Reeb 图(multi-resolution Reeb graphs, MRG),用以进行由粗到细、基于多分辨率拓扑结构描述的三维模型比较。该方法可有效提高大型模型数据库的检索效率。Bespalov 等人<sup>[85]</sup>将多分辨率 Reeb 图应用于复杂 CAD 模型的检索,实验结果表明该方法具有一定的区分能力,但同时发现其对拓扑结构上的细微变化不具有鲁棒性。Chen 等人<sup>[86]</sup>在模型预处理、精确检索等方面对 MRG 做出了进一步优化。

一般而言,拓扑结构包含了模型各拓扑元素及其相互关系,同时一定程度上可用于描述模型内部结构<sup>[87]</sup>,并可进一步结合实际应用、融合其上下文环境,以进一步提高检索效率,因此该方法是 CAD 模型精确检索的重要手段之一。

总体而言,基于视觉相似性的三维 CAD 模型检索在体素表示、多边形网格表示或 B-Reps 表示基础上,通过提取模型全局几何或结构特征、统计分布特征及投影视图、拓扑结构等方法计算模型相似度,其方法易于实现、通用性强,适合于对模型数据库实施初步分类与检索。但基于视觉相似性的检索方法往往缺乏几何模型的细节检索能力,因而无法实现细节检索以及面向 CAD 模型语义或功能描述的检索。

## 4 面向语义与功能描述的三维 CAD 模型检索方法

CAD 模型在工程领域中一般有特定的设计、制造或应用

上下文环境,因此三维 CAD 模型中的各种制造与加工特征、属性、功能等语义信息可作为 CAD 模型检索的重要依据。该类方法主要针对 B-Reps 及 CSG 描述的几何造型表示、包含各类几何及非几何属性与约束的特征造型表示等,适用于语义提取基础上的进一步精确匹配与检索。

#### 4.1 基于制造/加工特征识别的三维 CAD 模型检索方法

制造或加工的特征识别技术在 CAD 领域应用较早,并可进一步扩展到三维 CAD 模型的检索与分类中。一般可认为该类特征与领域知识或特定应用相关,且对 CAD 模型而言具有特定的工程意义<sup>[16]</sup>。因而基于制造或加工特征识别的 CAD 模型检索,实际上是在模型形状分析基础上,通过提取具有特定工程语义的几何成分来完成的。由于各实际应用的需求不同,因此该类特征的具体定义亦可能有区别。

Kyprianou<sup>[88]</sup>较早采用句法模式识别方法(syntactic pattern recognition)识别模型特征。该方法首先将 B-Reps 表示的 CAD 模型转换为面-边结构图,其中节点表示模型中的面,节点间的连线表示模型中的边并标注其凹度(concavity);然后搜索图中所有的边及回路,并以凸起、凹进及光滑 3 种结构化原语分类,在此基础上构造特征语法(feature grammars)并完成特征识别。该方法的缺点在于所构造的面-边结构图相对简单、特征描述范围有局限性。Falcidieno 等人<sup>[89]</sup>对此做了改进,构造了结构化邻接面超图(structured face adjacency hypergraphs,FAH)。FAH 中的每个邻接面定义为一个三元组 $(N, A, H)$ ,其中  $N$  为 FAH 中对应于模型面的节点集合, $A$  为 FAH 中对应于模型边的连线集合, $H$  为超弧(hyperarcs),在 FAH 中表示模型顶点与其邻接面的关联关系。然后在 FAH 基础上,识别诸如棱形凸起、凹进等特征;最后生成层次式的 SFAH 图(其中节点表示识别出来的特征,边表示特征的邻接关系),用以进一步完成 CAD 模型比较。但 FAH 表示不能识别沟槽、阶梯等特征,因而应用于模型检索有一定的条件限制。Fields 等人<sup>[90]</sup>在 FAH 基础上进一步提出了有向邻接面图(oriented face adjacency graph,OFAG)。与 FAH 不同的是,OFAG 中任两个节点之间有两个有向连线,且分别增加凸起、凹进参数(如面相交位置信息等),其识别的特征范围有所增加。Cicirello 等人<sup>[91]</sup>首先将 B-Reps 表示的 CAD 模型映射到 STEP224 所定义的加工特征,然后对该组特征定义模型附属图(model dependency graph,MDG)。MDG 实际上表示了所给 CAD 模型的各设计特征及其相互依赖关系,其中节点表示设计特征,边表示特征之间的空间关系。MDG 是一个有向无环图,边的方向表示在设计流程中的特征应用次序。两个 CAD 模型比较则通过计算各自 MDG 所对应的无向 MDG 的最大共同子图(largest common sub-graph)来完成。该方法特征定义明确、检索标准一致;主要缺点是 MDG 图的结构和特征识别次序有关,因而 CAD 模型和 MDG 图之间不具备一一对应关系。Joshi 等人<sup>[92]</sup>首先将 B-Reps 表示的 CAD 模型转换为属性邻接图(attribute adjacency graph,AAG),并事先在 AAG 基础上定义一系列特征描述,以此作为所给 CAD 模型的特征识别依据。总体而言,该类方法一般从三维模型出发,通过基于图的算法完成特征识别与模型比较,可直接利用图论、拓扑学中的相关算法,使用范围较广。基于图的特征识别及模型检索方法的主要缺点是 CAD 模型转换为图表示会丢失部分几何信息,且该转换过程

难以保证唯一性;对于复杂 CAD 模型而言,其计算复杂性较高。该类方法的另一个潜在缺陷是通常无法识别 CAD 模型中的一些相交特征。

除基于图的方法外,Ramesh 等人<sup>[93]</sup>使用最大单元凸起分解方法(maximal cell convex decomposition)将 CAD 零件模型分解为一组凸起单元,然后将该组单元映射到用户可交互的加工特征库中,在此基础上分别以特征存在性、特征数量、特征方向、特征尺寸、方向分布、尺寸分布及关联方向表征各特征,最终以该组表征值的近似度之和作为 CAD 模型相似度来完成模型检索。其它方法还包括基于规则<sup>[94]</sup>、基于贝叶斯网<sup>[95]</sup>、基于空间推理的特征识别方法<sup>[96]</sup>等。

#### 4.2 基于产品信息的三维 CAD 模型检索方法

在工程领域中,CAD 模型一般在 3 个环节流通与使用:产品设计、工艺设计及制造。计算机辅助工艺设计(Computer Aided Process Design,CAPP)是从模型的产品设计到最终生产与制造的桥梁,其中包含模型几何信息及各种加工工艺信息,可作为面向语义与功能描述的 CAD 模型检索重要补充途径之一。基于工艺设计信息的模型检索方法一般与特定工程领域相关。

Zhou 等人<sup>[97]</sup>认为仅从 CAD 模型难以自动提取出各种应用所需信息,从而提出了 CAD 与 CAPP 双向整合基础上的设计、制造与加工特征识别,及自动参数提取、流程设计方法。Kalyanapasupathy 等人<sup>[98]</sup>从数据交换标准 STEP 出发,在 CAPP 中成组技术(group technology,GT)的基础上,开发了一个基于 Internet 的产品数据交换系统,并将其应用于比较形状近似的 CAD 产品。成组技术包含了 CAD 产品的尺寸、形状、设计及制造属性等的描述,且模型相似性计算可划分为两种,即基本相似性(基于几何、形状、尺寸、功能等的相似性)和扩充相似性(基于生产及加工工艺、管理等的相似性),因而基于成组技术的 CAD 模型比较应用范围较广,比较依据的选择较为灵活。Hermann 等人<sup>[99]</sup>开发了一个基于 CAPP 和用户定义的相似 CAD 模型比较系统。该系统要求用户首先定义模型设计属性(几何属性)、工艺属性及两者间的映射函数(其假设条件是两者具有一一对应关系),最后由用户给定近似度比较方法并完成模型比较。此外,Iyer 等人<sup>[100]</sup>使用成组技术开发了一个产品设计决策支持系统,其核心是两阶段的模型比较方法:首先由用户提交查询条件(如面的数量等),然后在所返回的模型中利用设计信息进行细化检索。此外,浙江大学的高曙明等人<sup>[106]</sup>、刘玉生等人<sup>[109]</sup>分别针对异构 CAD 特征信息交换、模型驱动的复杂产品系统设计建模进行了综述。

特征造型也是 CAD 模型常用表示方法之一,其主要优点在于可从形状特征、精度特征、材料特征、技术特征及管理特征 5 个层次定义 CAD 模型参数化约束;因此从特征造型表示中保留的相关语义信息出发,可通过预定义特征参数描述的比较来完成满足特定需求的 CAD 模型检索。

相对而言,基于产品信息的 CAD 模型检索方法需要结合更多的工程领域知识及上下文环境,同时可利用的模型生命周期信息更多,可作为与各实际应用相结合的 CAD 模型检索的重要补充手段。

总体而言,面向语义及功能描述的 CAD 模型检索方法是在领域知识的基础上,充分利用产品的设计、制造或加工特

征、上下文环境及工艺流程信息,从特征识别、预定义特征约束参数集分析、工艺信息及产品属性比较等角度完成模型比较与检索。由于该类方法考虑到 CAD 模型的工程应用描述,可作为面向内容的 CAD 模型精确检索及设计复用的主要依据。

### 5 三维 CAD 模型检索基准库

如前所述,由于 CAD 模型检索的特殊性,其检索算法、评测基准库与通用模型存在较大差异。目前,通用模型的收集一般以爬虫方式通过 Internet 收集,涉及范围广、表示方式多样,且许多模型存在裂缝、噪音乃至各种错误,质量不一<sup>[2,100]</sup>,难以作为评测基准。Shilane 等人<sup>[101]</sup>在其收集的模型基础上进一步开发了普林斯顿形状基准(Princeton Shape Benchmark),一定程度上对通用模型做出了分类及规范化。其它一些通用模型测试基准库包括 AIM@SHAPE<sup>[97]</sup>等,但该类基准库由于其模型表示方式单一、质量参差不齐、模型表示过于抽象,尤其是没有考虑到 CAD 模型的工程应用特点(如需要结合模型的物理实现,一般不能仅由主观分类,需结合制造工艺,且存在多种分类标准等),因而并不适用于 CAD 模型检索评测。

针对 CAD 模型的表示与检索特点,结合 CAD 模型在工程领域中的实际应用,最近逐步提出了用于评价 CAD 模型检索的基准库<sup>[28,102-104]</sup>。Bespalov 等人<sup>[28,101]</sup>对典型 CAD 模型划分类别,并在此基础上提出了 CAD 模型基准库 NDR(National Design Repository)。该基准库包含了 4 种数据集,共 700 多个各类代表性 CAD 模型,具体包括 LEGO<sup>®</sup>模型数据集(40 个)、实际工程产品模型数据集(180 个),以及按功能分类的模型数据集(70 个)、按制造分类的模型数据集(110 个)。NDR 采用的模型表示方法包括 B-Reps 实体模型表示(STEP 及 IGES 规范)、表面模型表示(VRML、STL 格式)。CAD 模

型的检索结果通过绘制 RP 对比图来衡量,其中查全率(R)及查准率(P)的定义分别为:

$$\text{查全率} = \frac{\text{正确检索的相关模型}}{\text{所有相关的模型}} \quad (2)$$

$$\text{查准率} = \frac{\text{正确检索的相关模型}}{\text{检索返回模型}} \quad (3)$$

其中,查全率表示返回的正确模型占整个相关模型的比例,用以衡量检索出正确结果的能力;查准率表示在所有检索返回结果中正确检索的模型比例,用以衡量检索的精确性。

Jayanti 等人<sup>[103,104]</sup>提出了工程形状基准 ESB(3D engineering shape benchmark),在 NDR 基础上进一步完善了模型分类和模型数量。ESB 结合了 CAD 模型的设计标准、形状特征、产品设计工艺等多方面信息,在此基础上提出了共 42 类、801 个 CAD 模型组成的测试基准库,并对一些典型的检索方法进行了测试。

随着 CAD 模型在工程应用中的不断发展,各测试基准库仍在不断变化。同时,由于相似的 CAD 模型在不同应用场合下可能有不同的分类方法,测试基准库乃至检索效率的衡量方法仍需不断完善。

**结束语** 随着三维 CAD 模型库的不断扩大大、三维 CAD 设计及相关应用的不断普及,以模型复用为主要目标的三维 CAD 模型比较与检索研究正受到越来越多的重视。本文对现有的三维 CAD 模型检索方法做了系统介绍。表 1 给出了现有各类典型方法在检索描述子类型、检索能力及检索开销等方面的数据比较。其中检索能力以是否可实现全局检索、细节检索或多分辨率检索来衡量,检索开销则主要考虑该方法生成对应的描述子的时间开销以及通过该类描述子实现模型近似度比较的时间开销。各方法针对不同表示的 CAD 模型;但某些情况下,一些 CAD 模型表示方法间也可作转换,如比较常见的 B-Reps 表示可通过体素化算法转换得到体素化表示,或通过网格化算法生成多边形网格表示。表中的“N/A”表示具体数据未知。

表 1 典型三维 CAD 模型检索方法比较

Category	Method	CAD Model		Retrieval Capability				Retrieval Cost	
		Representation	Descriptor	Global	Local	Multiresolution	Semantics	Computation cost	Comparison cost
几何结构分析方法	Convex hull	B-Reps CSG	Compactness/crinkliness	Yes	No	No	No	O(N)	O(1)
	Moments	Voxel-based	moments	Yes	No	No	No	O(N <sup>3</sup> )	O(N)
		Polygon-based							
统计方法	Skeletal graph	Voxel-based	Skeletal graphs	Yes	No	No	No	O(N <sup>3</sup> )	N/A
		Polygon-based							
函数投影视图方法	Spherical harmonics	B-Reps	D1/D2/D3/D4 histogram	Yes	No	No	No	O(SlogN)	O(N)
		Voxel-based						S 为取样点数, N 为面或体素数量	
		Polygon-based						O(N <sup>3</sup> K)	O(N)
拓扑关联分析方法	Reeb graph	B-Reps	Spherical harmonics	Yes	No	No	No	O(N <sup>3</sup> K)	O(N)
		Polygon-based	descriptors					K 为调和函数数量, N 为体素化后体素数	
语义特征识别方法	AAG	B-Reps	Reeb graph	No	Yes	Yes	No	O(NlogN)	O(M · N)
		Polygon-based							
加工工艺分析方法	GT	B-Reps	Mechanical features	No	Yes	No	Yes	N/A	N/A
		STEP Feature Model	Knowledge	No	No	No	Yes	N/A	N/A

从表 1 可见,总体上目前仍缺乏一种可较好地适应各类 CAD 模型的检索算法。现有的 CAD 模型检索方法遇到的主要困难包括如下几个方面。首先,CAD 模型检索既需考虑整体形状及拓扑关系上的相似性,又需考虑局部制造或加工特征的一致性,但现有的三维 CAD 模型检索方法往往难以同时

兼顾全局检索与局部检索需求。其次,CAD 模型检索一般与工程应用相结合,相对而言,其对检索精确度要求较高,且很多情况下需在结合领域知识基础上,进一步完成面向语义与模型功能描述的检索,从而使其复杂性进一步增加。第三,现有的 CAD 模型分类方法、模型语义描述和定义等尚无统一、

明确的定义,模型检索往往带有一定的主观性,由此也给 CAD 模型检索的算法设计、基准库生成、性能评测等方面带来了一定的困难<sup>[28]</sup>。最后,各类商品化 CAD 系统所生成的 CAD 模型数据表达上存在一定差异,而 STEP、IGES 等产品数据交换标准仍存在诸多局限性,模型比较和检索过程中,需对模型几何表示、制造或加工特征识别定义等进一步做规范化和标准化,由此可能导致模型比较过程中精确度有所下降。

正是由于 CAD 模型本身的特殊性,因此仍存在很多值得进一步深入研究的问题。

(1) 现有各种 CAD 模型表示并不完全满足模型比较与检索需求。给定任意一个 CAD 模型的形状,理想的表示方法应同时满足以下条件:a)完备性,即该表示方法能描述各种所给形状;b)形状与表示之间的对应关系;c)鲁棒性,尤其是形状的细微变化不应导致表示上大的变化;d)对相似形状的敏感性;e)有效性;f)支持多分辨率检索;g)局部细节的描述能力等。实际上,目前尚无一种统一的、可同时满足上述条件的 CAD 模型表示方式。如何从现有 CAD 模型的各种表示方法出发,进一步提取出符合上述检索需求的描述信息,并在此基础上生成新型 CAD 模型表示方法,仍有较大的研究空间。

(2) 进一步研究面向内容的 CAD 模型约束知识提取、分类和描述方法。CAD 模型实质上是在三维空间中描述产品形状构造、尺寸参数与空间组成等信息的一种载体,其中所包含的各设计元素之间的尺寸与几何约束关系、模型各组成部分之间的拓扑约束关系、模型所表达的特征描述和语义信息等,均以显式或隐式方式蕴含于三维模型的几何及非几何描述中。需进一步研究 CAD 模型中典型的知识表达与构成方法,如各种基本图元的可视图形表达知识;各种尺寸(如线性尺寸、直径尺寸、半径尺寸、倒角尺寸、角度尺寸等)的表达方法;各种隐式约束(如对称轴、常用几何结构)的可视图形表达方式;包含底层视觉语义的各种 CAD 模型制造或加工特征(如凹凸特征、斜切面、梯形面、倒角等)的结构化描述;领域知识基础上面向内容的融合几何、拓扑与特征的整体化知识表示方法等,并在此基础上设计不同层次的检索算法,从而进一步提高三维 CAD 模型比较与检索的自适应性和鲁棒性。

(3) 基于特征造型表示的三维模型检索仍需进一步研究。相对 STEP 而言,特征造型表示可有效传递设计参数,且能保留设计人员的设计意图及设计历史,从而在较高层次上定义了产品数据交换的相关依据,可更有效地指导 CAD 模型检索。但目前各类特征仍无统一的形式化定义,因此各 CAD 系统特征造型结果存在一定的差异。可从特征造型表示与功能映射定义、数据交换质量分析等角度进一步深入研究特征模型基础上的 CAD 模型检索方法。

(4) 三维 CAD 模型检索的界面与用户接口设计仍需进一步研究。目前三维 CAD 模型的检索主要通过提交三维模型样例、模型比较来实现,辅以关键字检索、二维视图或手绘草图检索等方式,但对于 CAD 模型的设计复用目标而言,仍需结合 CAD 领域中的参数化约束、特征造型等方法,给出更灵活的、在形状基础上且面向功能描述的多样化用户查询与检索途径。此外,以 CAD 模型特征分析、语义理解为基础的相关反馈技术需深入研究,以在学习用户交互操作的基础上,采用自上而下与自下而上相结合的模糊推理机制,结合模型的几何约束、拓扑关联与特征语义分析,进一步提高检索效率与

准确率。

(5) 三维 CAD 模型比较与检索的评价方法仍有改进空间。目前的 CAD 模型检索查全率/查准率评价方法相对而言不够细化、主观性较强,缺乏对 CAD 模型检索特点的针对性。较好的改进方法是给出综合几何相似度、拓扑结构比较与特征语义分析,且同时具备描述模型全局形状比较、局部细节比较能力的整体评价方法,以细化检索粒度,适应用户的不同检索需求。

## 参 考 文 献

- [1] Aigrain P, Zhang H, Petkovic D. Content-based representation and retrieval of visual media; a state-of-the-art review[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 1996, 3: 179-202
- [2] Min P, Halderman A, Kazhdan M, et al. Early experiences with a 3D model search engine[C]// *Proceedings of Web3D Symposium*. 2003: 7-18
- [3] Johan W H T, Remco C V. A Survey of content based 3D shape retrieval methods[C]// *Proceedings of Shape Modeling International*. 2004: 145-156
- [4] Campbell R, Flynn P. A survey on free-form object representation and recognition techniques[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 81(2): 166-210
- [5] 杨育斌, 林琨, 朱庆. 基于内容的三维模型检索综述[J]. *计算机学报*, 2004, 27(10): 1297-1310
- [6] 郑伯川, 彭维, 张引, 等. 3D 模型检索技术综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(7): 873-881
- [7] Adán A, Adán M. A flexible similarity measure for 3D shapes recognition[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(11): 1507-1520
- [8] Min Patrick, Kazhdan M, Funkhouser T. A comparison of text and shape matching for retrieval of online 3D models[C]// *Proceedings of European Conference on Digital Libraries*. Bath, UK, 2004: 209-220
- [9] <http://shape.cs.princeton.edu/search.html>
- [10] <http://3d-search.itl.gr/3dsearch.html>
- [11] <http://www.trl.ibm.com/projects/3dweb/SimSearch-e.htm>
- [12] <https://engineering.purdue.edu/PRECISE>
- [13] <http://gicl.mcs.drexel.edu/>
- [14] [http://3d.csie.ntu.edu.tw/~dynamic/cgi-bin/DatabaseII\\_v1.8/](http://3d.csie.ntu.edu.tw/~dynamic/cgi-bin/DatabaseII_v1.8/)
- [15] Cardone A, Gupta S, Karnik M. A survey of shape similarity assessment algorithms for product design and manufacturing applications[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2003, 3: 109-118
- [16] Ji Q, Marefat M. Machine Interpretation of CAD data for Manufacturing Applications[J]. *ACM Computing Surveys*, 1997, 24(3): 264-310
- [17] Leizerowicz W, Lin J, Fox M S. Collaborative design using WWW[C]// *Proceedings of the WET-ICE'96(CERC)*. University of West Virginia, 1996
- [18] Gunn T G. The mechanization of design and manufacturing[J]. *Scientific American*, 1982, 247(3): 86-108
- [19] Ullman D G. *The mechanical design process*(2nd edition)[M]. New York, McGraw-Hill, 1997
- [20] Christman A. It is all about the geometry. *Moldmaking technology magazine*[J]. PA, Communication technologies, 2001
- [21] 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
- [22] Funckhouser T, Min P, Kazhdan M, et al. A search engine for 3D models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(1): 83-105
- [23] Novotni M, Klein R. 3D zernike descriptors for content based shape retrieval[C]//Proceedings of ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. Washington, USA, 2003; 216-225
- [24] Hilaga M, Shinagawa Y, et al. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes [C] // ACM SIGGRAPH. 2001; 203-212
- [25] El-Mehalawi M, Miller A. A database system of mechanical components based on geometric and topologic similarity. Part I: representation[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(1): 83-94
- [26] El-Mehalawi M, Miller A. A database system of mechanical components based on geometric and topologic similarity. Part II: indexing, retrieval, matching and similarity assessment[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(1): 95-105
- [27] Remesh M, Yip-Hoi D, Dutta D. Feature based shape similarity measurement for mechanical parts[J]. ASME J Comput Inf Sci, 2001, 1(3): 245-256
- [28] Bepalov D, Ip Y, Regli W, et al. Benchmarking CAD search techniques[C]//Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. 2005; 275-286
- [29] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807-832
- [30] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Matching 3d models with shape distributions[C]//Proceedings of International Conference on Shape Modeling and Applications. Italy, 2001; 154-167
- [31] Kriegel H-P, Kröger P, Mashael Z, et al. Effective similarity search on voxelized CAD objects[C]//Proceedings of 8th International Conference on Database Systems for Advanced Applications. Japan, 2003; 27-36
- [32] Huang J, Yagel R, Filippov V, et al. An accurate method for voxelizing polygon meshes[C]//Proceedings of IEEE Symposium on Volume Visualization. New York, NY, USA, 1998; 119-126
- [33] Kriegel H P, Brecheisen S, Kröger P, et al. Using sets of feature vectors for similarity search on voxelized CAD objects[C]//Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. San Diego, California, 2003; 587-598
- [34] Liu W, He Y J. Representation and retrieval of 3D CAD models in parts library[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007(online)
- [35] Kak A C, Vayda A J, Cromwell R L, et al. Knowledge-based robotics[J]. International Journal on Product Research, 1988, 26(5); 707-734
- [36] Mokhtarian F, Mackworth A K. A theory of multiscale curvature-based shape representation for planar curves [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(8): 789-805
- [37] ANS US PRO/IPO-2000-021-1994 (ISO 10303-021). Product data exchange using STEP PDES part 21-implementation method; clear text encoding of the physical file exchange structure[S]. UP Product Data Association, 1994
- [38] ANS US PRO/IPO-2000-042-1994 (ISO 10303-042). Product data exchange using STEP PDES part 42-integrated generic resources; geometric and topological representation[S]. US Product Data Association, 1994
- [39] ANS US PRO/IPO-2000-043-1994 (ISO 10303-043). Product data exchange using STEP PDES part 43-integrated generic resources; geometric and topological representation[S]. US Product Data Association, 1994
- [40] ANS US PRO/IPO-2000-203-1994 (ISO 10303-203). Product data exchange using STEP PDES part 203-integrated generic resources; geometric and topological representation[S]. US Product Data Association, 1994
- [41] Corney J, Rea H, Clark J, et al. Coarse filters for shape matching [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 22(3): 65-74
- [42] Novotni M, Klein R. A geometric approach to 3D object comparison[C]//Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications. 2001; 167-175
- [43] Zhang C, Chen T. An active learning framework for content-based information retrieval[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2002, 4(2): 260-268
- [44] Rea H, Corney J, Clark D, et al. Part sourcing in a global market [C]//Proceedings of ICeCE'01. Beijing, China, 2001
- [45] Sadjadi F A, Hall E L. Three-dimensional moment invariants [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, 2(2): 127-136
- [46] Elad M, Tal A, Ar S. Content-based retrieval of VRML objects: an iterative and interactive approach[C]//Eurographics Multimedia Workshop. 2001; 97-108
- [47] Ohbuchi R, Otagiri T, Ibatto M, et al. Shape-similarity search of three-dimensional models using parametrized statistics [C] // Proceedings of Pacific Graphics. China, 2002; 265-274
- [48] Novotni M, Klein R. Shape retrieval using 3D Zernike descriptors[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(11): 1047-1062
- [49] Novotni M, Klein R. 3D Zernike descriptors for content based shape retrieval[C]//Proceedings of ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. Washington, 2003; 216-225
- [50] Sundar H, Silver D, Gagvani N, et al. Skeleton-based shape matching and retrieval[C]//Proceedings of Shape Modeling and Applications. Korea, 2003
- [51] Gagvani N, Silver D. Parameter controlled volume thinning[J]. Graphical Models and Image Processing, 1999, 61(3): 149-164
- [52] Iyer N, Kalyanaraman Y, Lou K, et al. A reconfigurable 3D engineering shape search system, Part I; shape representation[C]//Proceedings of ASME DETC 03 Computers and Information in Engineering(CIE) Conference. Chicago, IL, 2003
- [53] Lou K, Jayanti S, Iyer N, et al. A reconfigurable 3D engineering shape search system, Part II; database indexing, retrieval and clustering[C]//Proceedings of ASME DETC 03 Computers and Information in Engineering(CIE) Conference. Chicago, IL, 2003
- [54] Kim D, Yun D, Lee S. Graph representation by medial axis transformation for 3D image retrieval [C] // Proceedings of SPIE. CA, 2001, 4289; 223-230
- [55] Nagasaka Y, Nakamura M, Murakami T. Extracting and learning geometric features based on a voxel based mapping method for manufacturing design[C]//Proceedings of IPPM. 2001; 1-10
- [56] Leymarie F, Kimia B. The shock scaffold for representing 3D shape[C]//Proceedings of International Workshop on Visual Form. Italy, 2001; 216-228
- [57] Basri R, Costa L, Geiger D, et al. Determining the similarity of deformable shapes[J]. Vision Research, 1998, 38(15/16): 2365-2385

- [58] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Matching 3D models with shape distributions[C]//Proceedings of Shape Modeling International. Genova, Italy, 2001:154-166
- [59] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(4):807-832
- [60] Ip C Y, Lapadat D, Sieger L, et al. Using shape distributions to compare solid models[C]//Proceedings of ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, 2002:273-280
- [61] Ohbuchi R, Minamitani T, Takei T. Shape similarity search of 3D models by using enhanced shape functions[C]//Proceedings of Theory and Practice in Computer Graphics, Birmingham, UK, 2003
- [62] Ohbuchi R, Takei T. Shape similarity comparison of 3D shapes using alpha shapes[C]//Proceedings of Pacific Graphics. Canada, 2003:293-302
- [63] Ankerst M, Kastenmüller G, Kriegel H-P, et al. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1999, 1651:207-226
- [64] Körtgen M, Park G-J, Novotni M, et al. 3D shape matching with 3D shape contexts[C]//Proceedings of the 7<sup>th</sup> Central European Seminar on Computer Graphics. Slovakia, 2003
- [65] Horn B. Extended Gaussian image [J]. *Proceedings of IEEE*, 1984, 72(12):1671-1686
- [66] Wong H S, Cheung K K T, Horace H S I. An evolutionary optimization approach for 3D human head model classification[C]//Proceedings of the 5<sup>th</sup> ACM SIGMM International Workshop on Multimedia Information Retrieval. Berkeley, California, 2003:94-101
- [67] Xu J, Suk M, Ranka S. Hierarchical EGI: a new method for object representation[C]//Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Signal Processing. Beijing, China, 1996, 2:926-929
- [68] Matsuo H, Iwata A. 3D object recognition using MEGI model from range data[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition. Jerusalem, Israel, 1994:843-846
- [69] Pu J T, Ramani K. A 3D model retrieval method using 2D free-hand sketches [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3515:343-347
- [70] Pu J T, Ramani K. On visual similarity based 2 D drawing retrieval [J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(3):249-259
- [71] Pu J T, Ramani K. An Integrated 2D and 3D Shape-based Search Framework and Applications [J]. *Computer Aided Design and Applications*, 2007, 4(6):817-826
- [72] Hou S, Ramani K. Classifier combination for sketch-based 3D part retrieval [J]. *Computers and Graphics*, 2007, 31(4):1-12
- [73] Cyr C, Kimia B. 3D object recognition using shape similarity-based aspect graph [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. Vancouver, Canada, 2001:254-261
- [74] Vranic V, Saupé D. A feature vector approach for retrieval of 3D objects in the context of MPEG-7 [C]//Proceedings of Virtual Environments and Three-Dimensioning Imaging. Greece, 2001:37-40
- [75] Zhang H, Fiume F. Shape matching of 3D contours using normalized Fourier descriptors [C]//Proceedings of International Conference on Shape Modeling and Applications. Banff, Canada, 2002:261-271
- [76] Zhang D S, Lu G J. A comparison of shape retrieval using Fourier descriptors and short-time Fourier descriptors [C]//Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia. Beijing, 2001:855-860
- [77] Gain J, Scott J. Fast polygon mesh querying by example [C]//SIGGRAPH99. 1999:241-247
- [78] Johnson A, Herbert M. Using spin-images for efficient multiple model recognition in cluttered 3D scenes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, 1999, 21(5):433-449
- [79] Saupé D, Vranic D. 3D model retrieval with spherical harmonics and moments [C]//Proceedings of Germany DAGM Conference. Munich, Germany, 2001:392-397
- [80] Attene M, Biasotti S, Mortara M, et al. Computational methods for understanding 3D shapes [J]. *Computers & Graphics*, 2006, 30(3):323-333
- [81] Biasotti S, Marini S, Mortara M, et al. 3D shape matching through topological structures [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, 2886:194-203
- [82] Biasotti S, Marini S, Mortara M, et al. An overview on properties and efficacy of topological skeletons in shape modeling [C]//Proceedings of the Shape Modeling International. 2003:245-256
- [83] 潘翔, 张三元, 张引, 等. 一种基于拓扑连接图的三维模型检索方法 [J]. *计算机学报*, 2004, 27(9):1250-1255
- [84] Meng Y, Indriyati A, Wee K L, et al. 3D Model retrieval with morphing-based geometric and topological feature maps [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Nice, France, 2003:656-661
- [85] Bespalov D, Shokoufandeh A, Regli W C. Reeb Graph-based Shape Retrieval for CAD [C]//Proceedings of DETC 2003 ASME Design Engineering Technical Conferences. Chicago, USA, 2003:2-6
- [86] Chen D Y, Ouhyoung M. A 3d object retrieval system based on multi-resolution Reeb graph [C]//Proceedings of Computer Graphics Workshop. Taiwan, China, 2002:16
- [87] 万丽莉, 赵沁平, 郝爱民. 一种基于部件空间分布的三维模型检索方法 [J]. *软件学报*, 2007, 18(11):2902-2913
- [88] Kyprianou L K. Shape classification in computer-aided design [D]. U K: Cambridge University, 1980
- [89] Falcidieno G, Giannini F. Automatic recognition and representation of shape-based features in a geometric modeling system [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Process*, 1989, 48(10):93-123
- [90] Fields M C, Anderson D C. Fast feature extraction for machining applications [J]. *Computer-Aided Design*, 1994, 26(11):803-813
- [91] Cicirello V, Regli W C. Machining feature-based comparisons of mechanical parts [C]//Proceedings of ACM International Conference on Shape Modeling and Applications. Genova, Italy, 2001:176-185
- [92] Joshi S, Chang T C. Graph-based heuristic for recognition of machined features from a 3D solid model [J]. *Computer-Aided Design*, 1988, 20(2):28-66
- [93] Ramesh M, Yip-Hoi D, Dutta D. Feature based shape similarity measurement for mechanical parts [J]. *ASME J Comput Inf Sci*, 2001, 1(3):245-256
- [94] Dong X, Wonzny M. FRAFES, a frame-based feature extraction system [C]//Proceedings of International Conference on Computer Integrated Manufacturing. Troy, NY, 1988:296-305

- and Computer Sciences, 1982, 11: 341-356
- [2] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [3] Ahlqvist O, Keukelaar J, Oukbir K. Rough classification and accuracy assessment [J]. *International Journal Geographical Information Science*, 2000, 14: 475-496
- [4] Ahlqvist O, Keukelaar J, Oukbir K. Rough and fuzzy geographical data integration [J]. *International Journal Geographical Information Science*, 2003, 17: 223-234
- [5] Aldridgr C H. A theory of empirical spatial knowledge supporting rough set based knowledge discovery in geographic databases[D]. New Zealand: University of Otago, 1998
- [6] Bittner T, Stell J. Stratified rough sets and vagueness [C]//Kuhn W, Worboys M F, Timpf S, eds. *Spatial Information Theory. Proceedings of International Conference on Foundations of Geographic Information Science (COSIT 2003)*. Kartause Ittingen, Switzerland, September 2003, 2825: 270-286
- [7] Wang S L, Li D, Shi W Z, et al. Geo-rough space [J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2002, 6: 54-61
- [8] Worboys M F. Computation with imprecise geographical data [J]. *Computers Environment, Urban Systems*, 1998, 22: 85-106
- [9] Bardossy A, Samaniego L. Fuzzy rule based classification of remotely sensed images [J]. *IEEE Transaction on Geoscience, Remote Sensing*, 2002, 40: 362-374
- [10] Benediktsson J A, Swain P H, Erson O K. Neural network approaches versus statistical methods in classification of multi-source remote sensing data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28: 540-552
- [11] Ji M. Using fuzzy sets to improve cluster labelling in unsupervised classification [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24: 657-671
- [12] Kavzoglu T, Mather P M. The use of backpropagating artificial neural networks in land cover classification [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24: 4907-4938
- [13] Leung Y, Leung K S. An intelligent expert system shell for knowledge-based geographic information systems: 1. the tools [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1993, 7: 189-199
- [14] Leung Y, Leung K S. An intelligent expert system shell for knowledge-based geographic information systems: 2. some applications [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1993, 7: 201-213
- [15] Paola J D, Schowengerdt R A. A detailed comparison of back-propagation neural network, maximum likelihood classifiers for urban land use classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience, Remote Sensing*, 1995, 33: 981-996
- [16] Wang F. Improving remote sensing image analysis using fuzzy information representation [J]. *Photogrammetric Engineering, Remote Sensing*, 1990, 56: 1163-1169
- [17] Wang S L, Wang X Z, Shi W Z. Development of a data mining method for land control [J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2001, 4: 68-76
- [18] Worboys M F. Imprecision in finite resolution spatial data [J]. *GeoInformatica*, 1998, 2: 257-279
- [19] Leung Y, Fung T, Mi J-S, et al. A rough set approach to the discovery of classification rules in spatial data [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2007, 21: 1033-1058
- [20] Leung Y, Manfred M F, Wu W-Z, et al. A rough set approach for the discovery of classification rules in interval-valued information systems [J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2008, 47: 233-246
- [21] Yao J T. Recent developments in granular computing: A bibliometrics study [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Granular Computing*. Hangzhou, China, Aug. 2008: 74-79
- [22] 苗夺谦, 王国胤, 刘清, 等. 粒计算: 过去、将来与展望[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [23] 张铃, 张拔. 问题求解理论及其在应用: 商空间粒度计算理论及其在应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007
- [24] Wu W-Z, Leung Y. Theory and applications of granular labelled partitions in multi-scale decision tables [J]. *Information Sciences*, 2011, 181: 3878-3897
- [25] Congalton R G, Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices [M]. Boca Raton: Lewis Publications, 1999

(上接第 22 页)

- [95] Ji Q, Marefat M. Extracting and identifying form features: a Bayesian approach [J]. *Computer-Aided Design*, 1995, 27 (6): 435-454
- [96] Vandenbrande J, Requicha A. Spatial reasoning for the automatic recognition of machinable features in solid models [J]. *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, 1993, 15(12): 1269-1285
- [97] Zhou X H, Qiu Y J, Hua G R, et al. A feasible approach to the integration of CAD and CAPP [J]. *Computer-Aided Design*, 2007, 39(4): 324-348
- [98] Kalyanapath V, Lin E, Minis I. Group technology code generation over the internet ETC97/CIE-4290 [C]//*Proceedings of ASME Design Engineering Technique Conferences*. Sacramento, CA, 1997: 14-17
- [99] Hermann J W, Singh G. Design similarity measures for process planning and design evaluation [R]. TR97-74. University of Maryland, 1997
- [100] Iyer S, Nagi R. Identification and ranking of similar parts in agile manufacturing [C]//*Proceedings of the 4<sup>th</sup> Industrial Engineering Research Conference*. 1995
- [101] 崔晨阳, 石教英. 三维模型检索中的特征提取技术综述 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(7): 882-889
- [102] Shilane P, Min P, Kazhdan M, et al. The princeton shape benchmark [C]//*Proceedings of the Shape Modeling Int'l 2004*. Los Alamitos, 2004: 167-178
- [103] <http://shapes.aim-at-shape.net/>
- [104] Jayanti S, Kalyanaraman Y, Iyer N, et al. Developing an engineering shape benchmark for CAD models [J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(9): 939-953
- [105] <http://www.designrepository.org/datasets/>
- [106] 高曙明, 何发智. 异构 CAD 系统集成技术综述 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, 21(5): 561-568
- [107] 陶松桥, 王书亭, 郑坛光, 等. 基于非精确图匹配的 CAD 模型检索方法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(3): 545-552
- [108] 开兴, 张树生, 白晓亮, 等. 一种属性图同构的三维 CAD 模型局部匹配算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(11): 56-60
- [109] 刘玉生, 蒋玉芹, 高曙明. 模型驱动的复杂产品系统设计建模综述 [J]. *中国机械工程*, 2010, 21(6): 741-749