

文章编号:1001-9081(2016)06-1599-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.06.1599

基于网络本体语言的三维计算机辅助设计主模型相似性计算方法

钟艳如¹, 梁毅芳^{1*}, 许本胜², 曾聰文¹, 卢宏成¹, 吴帆¹, 赵争君¹

(1. 广西高校图像图形智能处理重点实验室(桂林电子科技大学), 广西 桂林 541004;

2. 桂林航天工业学院 机械工程学院, 广西 桂林 541004)

(* 通信作者电子邮箱 672427081@qq.com)

摘要:为了提高三维计算机辅助设计(CAD)模型重用效率,针对当前三维模型检索系统中语义表达不足问题,提出了一种基于网络本体语言(OWL)表示模型语义的相似性计算方法。首先,将三维CAD产品主模型转化成以概念属性特征为基础语义对象的结构化表示模型;然后,从OWL表示模型中提取用于评价两个模型相似性的特征语义信息,构建可量化的相似元集,借助于图同构思想和Tversky算法给出了一种加权相似性计算方法;最后,通过实例验证了所提方法的有效性和可行性。实验的定量评价结果表明,该评价基准从对象本身转为两个对象特性的语义描述,能够客观反映两对比模型的相似程度。

关键词:网络本体语言语义;相似性计算;产品主模型;模型重用;结构化

中图分类号: TP391 **文献标志码:**A

Similarity measure method for 3D CAD master model based on Web ontology language

ZHONG Yanru¹, LIANG Yifang^{1*}, XU Bensheng², ZENG Congwen¹, LU Hongcheng¹, WU Fan¹, ZHAO Zhengjun¹

(1. *Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Intelligent Processing of Computer Image and Graphics*

(Guilin University of Electronic Technology), Guilin Guangxi 541004, China;

2. *School of Mechanical Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin Guangxi, 541004, China*)

Abstract: To promote the model reuse efficiency of 3D Computer Aided Design (CAD), aiming at the flaw of semantic expression in previous 3D model retrieval systems, a similarity measure method based on model semantic representation of Web Ontology Language (OWL) was presented. Firstly, 3D CAD master model was transformed into structuralized representation model with class-property feature as its basic semantic object. And then, the feature semantic information for matching two models was extracted from OWL representation model to be a quantitative similarity unit. And a method of total weight combining subgraph isomorphism and Tversky algorithm was proposed for similarity measure. Finally, the experiment verified the feasibility and effectiveness of the proposed method. The comprehensive quantitative assessments of the experiment show that the proposed method makes the evaluation benchmark switch from the object itself to the set of semantic description of two object properties, and can objectively reflect the similar degree of the two contrast models.

Key words: Web Ontology Language (OWL) semantics; similarity measure; product master model; model reuse; structuralization

0 引言

研究统计表明,在新产品开发设计中,约40%是重用过去的模型设计,约40%是对现有部件的变型设计,而只有20%是全新设计^[1]。准确获取和重用已有的相似性设计的产品主模型,是实现产品快速设计、提高产品开发效率和质量的首要步骤。然而,在现有的信息检索系统直接对任意两个三维计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)模型,完全自动识别出两者相似性实现产品模型检索是比较困难的。在产品设计制造中,企业者更多关注局部特征显著的主模型,

主模型相似性匹配比工艺设计加工的整体相似性匹配实用价值更佳,实现的难度也更大。

除了传统基于关键字、词信息检索之外,基于相似性计算的三维模型检索方法也得到了诸多的关注和研究。周炜等^[2]对装配体中零件的连接关系进行分类,构建了基于关系相似性的装配体检索方法;陶松桥等^[3]采用属性化特征邻接图的表示模型,提出了一种基于装配关系相似度的模型检索方法;Li等^[4]以设计特征和特征间的依赖关系构建特征依赖有向图作为基本结构,计算D2形状向量间的距离相似性完成模型检索;王飞等^[5]提取CAD模型的边界表示法

收稿日期:2015-11-30;修回日期:2016-01-11。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61562016);广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFDA118039);桂林电子科技大学博士科研启动项目(UF14019Y);广西研究生教育创新计划资助项目(YCSZ2015148);桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(YJCXS201540)。

作者简介:钟艳如(1965—),女,江西宜春人,教授,硕士,主要研究方向:描述逻辑、变型设计、语义互操作性;梁毅芳(1990—),男,广东清远人,硕士研究生,主要研究方向:语义相似性、变型设计;许本胜(1980—),男,湖北黄石人,副教授,硕士,主要研究方向:计算机辅助设计、计算机辅助制造、数字化设计;曾聰文(1972—),男,江西鹰潭人,副教授,博士,主要研究方向:图形图像、智能计算;卢宏成(1991—),男,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向:公差综合优化;吴帆(1990—),男,广西灌阳人,硕士研究生,主要研究方向:产品数据管理;赵争君(1991—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向:计算机辅助设计、变型设计。

(Boundary Representation, B-Rep)信息构建面节点图,结合子图同构算法实现模型的局部结构检索。黄瑞等^[6]以制造特征为基础语义对象,提出了一种融合制造语义的三维 CAD 模型检索方法。但总体来说,基于文本或内容的检索方法缺乏模型深层的语义信息表述,还不能满足产品快速设计的应用。对信息检索的研究逐步转向模型语义检索,对三维模型特征描述不能局限于底层几何形状信息的相似程度,还需考虑其应用中的工程语义上的相似性。

借鉴上述方法的优点和不足,为了更好地满足个性化三维产品模型的快速设计需要,本文提出了一种基于网络本体语言(Web Ontology Language, OWL)语义特征的相似性计算方法。该方法构建了一个统一的结构化三维 CAD 语义表示模型,将用户查询信息和资源库主模型信息转换成相应的结构化对象语义表示模型,最后根据 OWL 语义特征计算模型相似性。

1 构建 CAD 模型表示技术

在过去的学习研究中,相似性主要针对两个对象本身共性比例问题研究,对相似信息作分类处理再利用。几个世纪以来,心理学家和人工智能研究者都致力于事物相似性认知的可形式化和可计算性^[7]。从知识工程的角度探讨,对象在某一方面的相似性等同于对象在某种描述方法下的相似性。在知识库层面,相似性不再被视为对象间的关系,而是两个对象表述间的关系。因而,相似性计算目标是从两个比较对象的逻辑描述中计算相似性。语义相似性计算包含了三个要素:对象、语义和相似性。本文研究的对象是三维 CAD 模型;语义是描述对象所使用的方法;相似性可根据对象的描述得到定性或定量的评价。随着本体技术在知识表达和共享方面的应用不断深入,利用本体描述事物对象的语义表示得到了越来越多研究学者的认可^[8-10]。本体的知识表达支持逻辑推理和验证。OWL 是万维网联盟 (World Wide Web Consortium, W3C)组织推荐的本体表述语言,是一种建立在描述逻辑基础之上的,具有更强机器解释能力的语言。采用 OWL 形式化描述对象更为规范,语义明确,并且计算机可理解、可量化计算。

1.1 相关定义

个性化三维 CAD 模型信息主要由联动特征和联动语义信息构成。联动特征是能够表示一定联动语义的基本单元,而联动语义是与特征联动设计密切相关的语义信息,例如联动元件特征本身的尺寸和公差、特征间联动关系等。联动语义具有特征内和特征间的两种表现形式。特征内关联表现在联动特征元件自身具备的基本属性,如元件对齐基准、内外径、名义厚度等;特征间关联表现在联动特征间的关联关系(当前主要考虑尺寸联动关系)。用 OWL 表述抽象的结构化三维 CAD 主模型,基本元件可以提炼为本体中的概念或类(Class),将联动语义抽象为本体中的属性,其中数据类型属性(Datatype Property)表述特征内联动语义,对象属性(Object Property)表述特征间联动语义。借助类似子图同构思想,将用户局部信息相似匹配整体模型的工程意图,并采用本体描述语言 OWL 对结构化三维 CAD 模型进行表示。

对于子图同构的思想,首先给出了图论中的相关概念。

定义 1 图同构。设 $G_1 = \langle V_1, E_1 \rangle, G_2 = \langle V_2, E_2 \rangle$ 为 2

个无向图(2 个有向图),若存在双射函数 $f: V_1 \rightarrow V_2$,对于 $v_i, v_j \in V_1$, $(v_i, v_j) \in E_1(\langle v_i, v_j \rangle \in E_1)$, 当且仅当 $(f(v_i), f(v_j)) \in E_2(\langle f(v_i), f(v_j) \rangle \in E_2)$, 并且 (v_i, v_j) ($\langle v_i, v_j \rangle$) 与 $(f(v_i), f(v_j))$, ($\langle f(v_i), f(v_j) \rangle$) 的重数相同,则称 G_1 与 G_2 是同构的。

定义 2 子图同构。给定标号图 G_1 与 G_2 ,若 $\exists G \subseteq G_1$ 而且 G 与 G_2 同构,则称 G_1 与 G_2 是子图同构的。

定义 3 三维 CAD 主模型。三维 CAD 零部件主模型(Master Model, MM)(或称原始模型)是利用一些关键属性参数 Parameter 描述零部件(或称元件 Element)外形和尺寸关联关系 Relation。在产品模型设计过程中,只需要在主模型中输入一组数值就可以派生出零部件的一个变型体,再对变型体作细小调整得到满足用户需求的产品模型^[11]。形式化定义 $MM = \{E, P, R\}$, 其中: E 表示主模型元件类, P 表示元件自身属性的尺寸参数, R 表示元件间的尺寸联动关系。

定义 4 基于 OWL 表示三维 CAD 产品模型。产品本体描述中主要使用本体的类(Class_c)和属性关系(包含对象属性 Object_Property_c 和数据类型属性 Datatype_Property_c)表达抽象事物。三元组 CAD 模型 M 可形式表达为:

$$M = \{ C_c, DP_c, OP_c \}$$

其中: C_c 为三维 CAD 产品模型 M 的元件类; DP_c 为数据类型属性; OP_c 为对象属性。在本体工具 Protégé 中 OWL 表示的结构化三维 CAD 产品语义信息片段如下:

```
<owl:Class rdf:about = "#Barrel_Cylinder" >
    //联动模型元件类的本体描述
    <rdfs:subClassOf rdf:resource = "#CylinderShell"/> </owl:Class>
    <owl:ObjectProperty rdf:ID = "has_constraint" > //对象属性
    <rdfs:range rdf:resource = "#horizontal_vessel"/>
    <rdfs:domain rdf:resource = "#horizontal_vessel"/>
</owl:ObjectProperty>
<owl:DatatypeProperty rdf:ID = "ODiameter_of" > //数据属性
    <rdfs:domain rdf:resource = "#horizontal_vessel"/>
    <rdfs:range rdf:resource = "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
</owl:DatatypeProperty>
...

```

根据定义 3 和定义 4,针对实例化 CAD 产品主模型,本体采用 OWL 类下的实例个体(Individuals)表征主模型 MM 的具体联动元件 E ,用数据属性集(Datatype_Properties)表征元件尺寸参数属性特征,用对象属性集(Object_Properties)表征元件间尺寸联动关系 R 语义特征。

定义 5 基于 OWL 表示实例化三维 CAD 产品语义模型。CAD 产品实例模型包含了个体集 I 和属性关系集 DP 和 OP 。根据定义 4,CAD 实例模型 $M(M)$ 可表示为:

$$M(M) \subseteq \sum I(C_i) \cap \sum DP(Ind_j, data) \cap \\ \sum OP(Ind_k, Ind)$$

其中: $i \in [1, n], j, k \in [1, m]$; $\sum I(C_i)$ 表示实例模型 M 的联动元件个体集, C_i 是第 i 个元件类名; $\sum DP(Ind_j, data)$ 表示实例模型 M 的数据属性集, Ind_j 是第 j 个实例个体,而 $data$ 是具体的属性值; $\sum OP(Ind_k, Ind)$ 表示实例模型 M 的对象属性集, Ind_k 是第 k 个实例个体,而 Ind 是模型 M 的所有实例个体集(即 $\sum I(C_i)$); n 表示构成实例模型 M 的基本元件类

的数目; $m = \text{count}(I(C_i))$ 表示元件类 C_i 实例个体集的基本数。

通过定义 5 实现了 OWL 语义表示模型对相似性度量对象的规范化表述。针对快速检索模式下,本文研究的个性化三维 CAD 产品重点考虑联动尺寸之间的约束关系。在检索可满足用户真实意图的主模型时,提取模型 M 下的实例个体集 I 和表征个体间装配联动约束关系的对象属性 has_constraint 作为模型的语义相似性计算因子。

1.2 模型量化

为了更好评价模型的相似程度,对语义特征因子作进一步的量化处理。在考虑局部结构相似情况下,联动特征间的联动方向不影响结构特征的相似性,两个对比模型在结构上仍保持一致性。如图 1 所示,尽管元件联动约束关系图有差异,但模型结构是没有发生改变的。

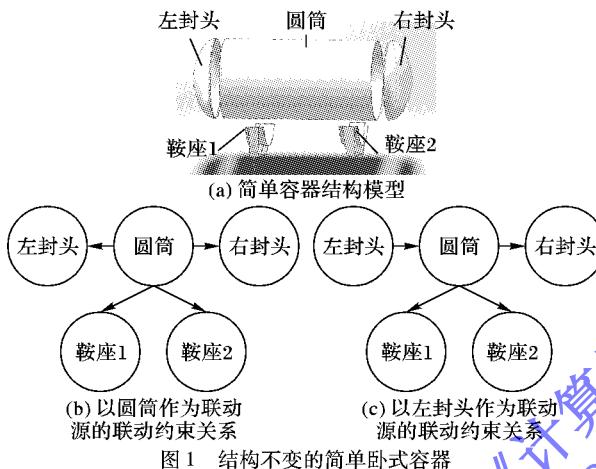


图 1 结构不变的简单卧式容器

对语义特征量化规定如下:

规定 1 $\text{has_constraint}(Ind_i, Ind_j) = \text{has_constraint}(Ind_j, Ind_i)$ 且 Ind_i 和 Ind_j 为不同的实例个体。表明本研究的相似性度量方法不考虑联动方向的影响因子。

规定 2 $\sum I(C_i) = \sum n_i \cdot \text{Class}_i(p)$, 其中 $n_i \cdot \text{Class}_i(p)$ 表示零部件类 C_i 实例个体总数为 n_i 。

规定 3 $\sum \text{has_constraint}(Ind_k, Ind) = \sum k \cdot \text{has_constraint}(C_i, C_j)$, 其中 $k \cdot \text{has_constraint}(C_i, C_j)$ 表示零部件类 C_i 和 C_j 的实例个体集构成 k 对联动约束关系。

定义 6 CAD 实例量化模型。通过上述原则规定 1~3 完成了对三维 CAD 产品的语义特征量化,根据定义 5 得到简化后的结构化三维 CAD 实例量化模型 SimplifiedModel (M) (以下简称 $SM(M)$) 表示为:

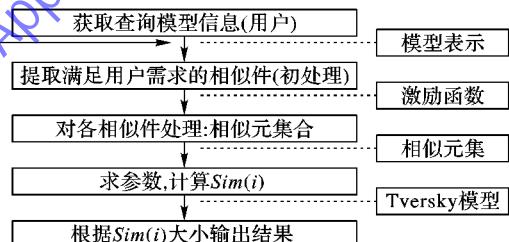
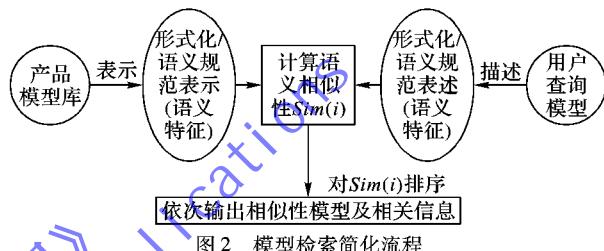
$$SM(M) \subseteq \sum n_i \cdot \text{Class}_i(p) \cap \sum k \cdot \text{has_constraint}(\text{Class}_i, \text{Class}_j)$$

定义 1~6 完成了基于 OWL 语义表示模型对两个度量对象的结构化和规范化的表述,作为下文的相似性计算理论基础。基于 OWL 语义表示的结构化三维 CAD 模型综合考虑了查询用户输入信息的有限性和随意性。对于一个用户来说,不可能把产品模型的所有实例个体属性信息描述完整。因此,在具体细化的实例表示模型中重点考虑主体零部件类实例个体 I 和具有丰富联动语义的对象属性 has_constraint 进行描述,最终通过基于语义特征的相似性计算方法实现了局部

信息对用户真实意图的整体模型相似性的匹配优化。

2 设计相似性计算方法

产品装配体主模型检索技术是实现装配体模型重用的重要途径之一。从模型检索的一般流程(如图 2 所示)分析可知,模型语义相似性的计算是检索算法中的核心内容之一。本研究采用本体描述语言 OWL 对三维 CAD 产品模型和用户查询模型信息进行形式化的表述,并提取了模型的重要语义特征作为相似性的计算因子。借助于图同构的思想,在相似件提取时选用合适的激励函数,弥补用户输入的局部信息对整体相似性计算的影响,最大限度满足用户真实的完整需求,实现更优主模型匹配效果。引入心理学对比模型 Tversky 进行语义相似性计算,优化参数加权汇聚各个语义特征相似值最终得到总体模型相似值。相似性计算步骤流程如图 3。



2.1 相似件获取

根据相似性计算步骤流程,构建了 CAD 产品本体(如图 4 为本体元件类部分层次和属性分类),收集用户兴趣信息构建用户查询模型,查询模型和目标产品模型均由 OWL 类下的实例个体集 I 、属性关系集 DP 和 OP 进行结构化的表述。例如,某企业用户在压力容器三维产品模型设计中,输入了如图 1 结构的简单卧式容器模型的部分需求信息,作为用户输入的查询模型 Q 必须进行形式化的语义表示才能从产品库中获得满足用户真实意图的主模型,以便下一步的产品设计。

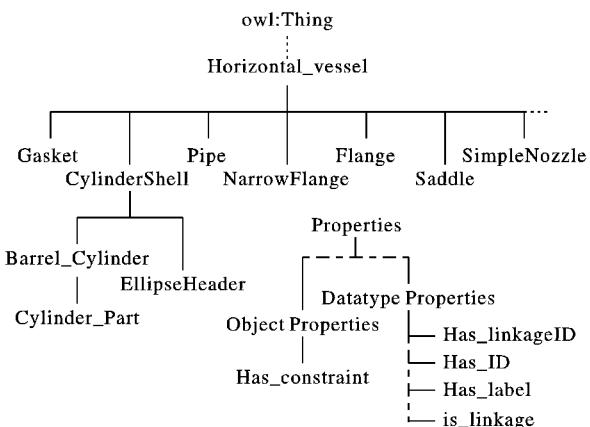


图 4 元件类部分层次以及属性分类

注: Gasket 垫片; CylinderShell 圆筒壳; Barrel_Cylinder 圆筒; Cylinder_Part 筒体; EllipseHeader 椭圆形封头; Pipe 接管; NarrowFlange 窄面法兰; Flange 法兰; Saddle 鞍座; SimpleNozzle 一般管口; Has_constraint 联动约束属性; Has_linkageID 父联动源 ID 号; Has_ID 联动元件 ID 号; Has_label 联动层次标签号; is_linkage 联动源标签。

根据定义 6 的 $SM(M)$ 将查询模型 Q 表述为:

$$\begin{aligned} SM(Q) \subseteq & 1. \text{Barrel_Cylinder}(p) \cap 2. \text{EllipseHeader}(p) \cap \\ & 2. \text{Saddle}(p) \cap 2. \text{has_constraint}(\text{Barrel_Cylinder}, \\ & \text{EllipseHeader}) \cap 2. \text{has_constraint}(\text{Barrel_Cylinder}, \text{Saddle}) \end{aligned}$$

从已有模型库中获取相似主模型匹配集,在初处理阶段主要考虑目标模型和用户查询模型在各类零部件实例个体的包含程度,产品库中目标主模型包含查询模型的实例个体数目越多,两者相似的可能性越大。可根据式(1)得到第 i 个相似件:

$$q(i) = k/(N + n - k); n < N \quad (1)$$

其中: N 是第 i 个相似件模型 M_i 实例个体集的数目; n 是查询模型 Q 实例个体集的数目; k 为两对比模型的共同实例个体的数目。

由于用户输入信息的局限性使得 k 相对较小,导致 $q(i)$ 整体值变小。为了弥补用户的局部信息对整体相似性的影响,

选用激励函数 $Q(i) = \frac{1 - e^{-5 * q(i)}}{1 + e^{-5 * q(i)}}$ (如图 5) 调整相似件 $q(i)$,

计算值适度地扩大相似件模型集匹配范围,以寻找可能更优的主模型进行下一阶段产品设计。

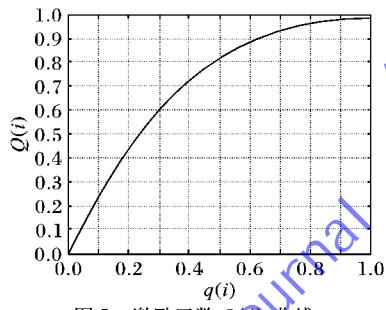


图 5 激励函数 $Q(i)$ 曲线

从图 5 分析可知,假设最终的目标模型信息是 1,在 $Q(i)$ 激励下将用户输入的查询模型对比信息由 $q(i) = 0.3$ 可以调整到 $Q(i) = 0.635$,这样有效避免用户输入信息的不足影响最终匹配效果,从而快速获取可能性更大的目标模型集合。

2.2 语义相似性计算

基于 OWL 语义相似性计算方法考虑了整体共性和局部差异性。通过本体语言 OWL 语义表述两个度量对象,从对象的逻辑描述中计算相似性。心理学上的 Tversky 模型最初是采用集合描述对象特性,定义了相似性由对象的共性和差异性确定。因此,本文研究引用心理学对比模型 Tversky 的标准式^[12],并作微小简化如下所示:

$$\text{Sim}_{\text{Tversky}}(Q, M_i) = \frac{f(Q \cap M_i)}{f(Q \cap M_i) + \theta \times f(Q - M_i) + (1 - \theta) \times f(M_i - Q)} \quad (2)$$

其中:规定 $\theta = Q(i)$; $f(M_i \cap Q)$ 表示查询模型 Q 和目标模型 M_i 的公共特性; $f(Q - M_i)$ 表示 Q 对 M_i 的差异特性; $f(M_i - Q)$ 表示 M_i 对 Q 的差异特性; θ 表示关注因子,充分考虑局部差异对整体的影响。当 θ 远大于 0.5(即用户局部输入信息较

为丰富)更多关注的是目标模型的差异性;当 θ 远小于 0.5 时更多关注查询模型的差异性。

根据定义 6 对 $SM(M)$ 的形式化描述,模型实例个体集 I 和属性集中的装配联动约束关系 has_constraint 作为相似性计算的语义特征。考虑到实例个体集和属性关系集可能存在大比例差异造成目标模型相似性计算误差,两个结构化三维 CAD 模型的相似性应当由各个语义特征的相似性最优值汇聚来确定。因此,本文研究分别计算模型实例个体集相似值和属性集相似值,最终通过优化参数加权汇聚成总体相似值。

1) 个体集相似程度 $\text{Sim}_{\text{Tversky_Ind}}(Q, M_i)$ 。

首先通过三维 CAD 模型,基于 OWL 的三维模型 $SM(M)$ 的形式化表述中提取个体集 $I(M)$;然后计算个体相似元集;最后通过式(2)得到个体集相似值 $\text{Sim}_{\text{Tversky_Ind}}(Q, M_i)$ 。

2) 属性集相似程度 $\text{Sim}_{\text{Tversky_Pro}}(Q, M_i)$ 。

首先通过三维 CAD 模型,基于 OWL 的三维模型 $SM(M)$ 的形式化表述中提取属性集 $P(M)$;然后计算属性相似元集;用式(2)得到属性集相似值 $\text{Sim}_{\text{Tversky_Pro}}(Q, M_i)$ 。

3) 总体相似性 $\text{Sim}(Q, M_i)$ 。

两个结构化三维 CAD 模型的相似性定义为各个语义特征集的相似性之和,通过加权汇聚个体集和属性集的相似度值得到总体的相似值。即:

$$\text{Sim}(Q, M_i) = \alpha \text{Sim}_{\text{Ind}}(Q, M_i) + \beta \text{Sim}_{\text{Pro}}(Q, M_i) \quad (3)$$

权重参数 α, β 的值与各自的语义项有关,本文研究采用改进的 Sigmoid 函数 $\text{sig}(x) = 1/(1 + e^{-10(x-0.5)})$ 计算权重。该函数以 0.5 为基准,相似值大于 0.5 的项得到较大的权重;反之,权重值较小。不难理解,给相似度高的项赋予较大的权重是合理的,完全符合人类的心理认知。最终,归一化后求解得到参数 α, β 。

3 算例验证与讨论

选择两个三维 CAD 模型,通过它们之间的相似性比较过程和结果来验证本文研究提出的相似性计算方法。图 6(a)中的查询模型 Q 是由用户输入信息(鞍座 $\times 2$, 椭圆形封头 $\times 2$ 和圆筒壳 $\times 1$ 以及它们之间的装配联动关系)描述得到的三维 CAD 模型;图 6(b)目标模型 M_i 是产品库中的一个 CAD 主模型,主要由鞍座、封头、圆筒、法兰连接和一般管口等 14 个零部件组成。

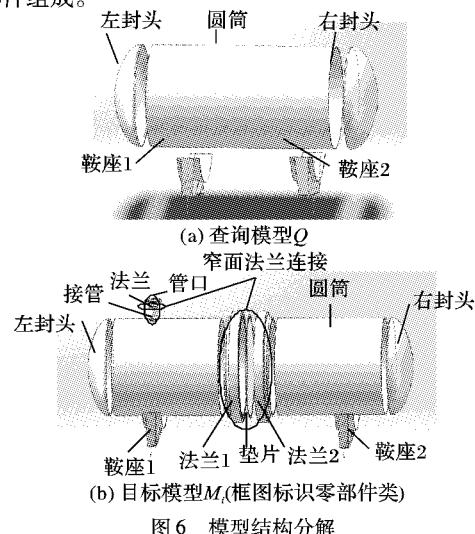


图 6 模型结构分解

用定义6量化模型 $SM(M)$ 进行形式化表述,按照本文基于语义特征的相似性计算方法度量两CAD模型相似性。

第1步 基于OWL的模型语义表示。

1)查询模型 Q 语义表述:

$SM(Q) \subseteq 1. Barrel_Cylinder(p) \cap 2. EllipseHeader(p) \cap 2. Saddle(p) \cap 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, EllipseHeader) \cap 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, Saddle)$

2)目标模型 M_i 语义表述:

$SM(M_i) \subseteq 2. Barrel_Cylinder(p) \cap 2. EllipseHeader(p) \cap 2. Saddle(p) \cap 2. NarrowFlange(p) \cap 3. Flange(p) \cap 1. Gasket(p) \cap 1. SimpleNozzle(p) \cap 1. Pipe(p) \cap 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, EllipseHeader) \cap 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, Saddle) \cap 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, NarrowFlange) \cap 3. has_constraint(NarrowFlange, Flange) \cap 1. has_constraint(NarrowFlange, Gasket) \cap 1. has_constraint(Flange, Gasket) \cap 1. has_constraint(Barrel_Cylinder, SimpleNozzle) \cap 1. has_constraint(SimpleNozzle, Pipe) \cap 1. has_constraint(SimpleNozzle, NarrowFlange) \cap 1. has_constraint(Flange, Pipe)$

第2步 获取相似件。

根据式(1)得到 $q(i) = 0.357$,由激励函数调整到 $Q(i) = 0.713$ 。由于 $Q(i)$ 大于阈值0.5,可将模型 M_i 加入匹配模型集合中,以便检索出最佳主模型。

第3步 计算语义特征相似值。

分别从度量对象的形式化表述中提取模型实例的个体集和属性集,构建两种语义特征(个体集 I 和对象属性集 $has_constraint$)的相似元集,根据式(2)计算各个语义特征的相似性。

1)提取个体集:

$I(Q) = 1. Barrel_Cylinder(p) \cap 2. EllipseHeader(p) \cap 2. Saddle(p)$

$I(M_i) = 2. Barrel_Cylinder(p) \cap 2. EllipseHeader(p) \cap 2. Saddle(p) \cap 2. NarrowFlange(p) \cap 3. Flange(p) \cap 1. Gasket(p) \cap 1. SimpleNozzle(p) \cap 1. Pipe(p)$

2)构建个体相似元集:

$|I(Q) \cap I(M_i)| = 5; |I(Q) - I(M_i)| = 0; |I(M_i) - I(Q)| = 9$ 。令 $\theta = 0.713$,将各项代入式(2)得到 $Sim_{Tversky_Ind}(Q, M_i) = 0.659$ 。

3)提取属性集:

$P(Q) = 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, EllipseHeader) \cap 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, Saddle)$

$P(M_i) = 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, EllipseHeader) \cap 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, Saddle) \cap 2. has_constraint(Barrel_Cylinder, NarrowFlange) \cap 3. has_constraint(NarrowFlange, Flange) \cap 1. has_constraint(NarrowFlange, Gasket) \cap 1. has_constraint(Flange, Gasket) \cap 1. has_constraint(Barrel_Cylinder, SimpleNozzle) \cap 1. has_constraint(SimpleNozzle, Pipe) \cap 1. has_constraint(Flange, Pipe) \cap 1. has_constraint(SimpleNozzle, NarrowFlange)$

4)构建属性相似元集。

$|P(Q) \cap P(M_i)| = 4; |P(Q) - P(M_i)| = 0;$

$|P(M_i) - P(Q)| = 1$ 。 $\theta = 0.713$,将各项代入式(2)得到 $Sim_{Tversky_Pro}(Q, M_i) = 0.559$ 。

第4步 汇聚成总体相似值。

首先求出式(3)的优化参数,最后计算总体相似值。

$$\alpha = \frac{\text{sig}(\alpha)}{\text{sig}(\alpha) + \text{sig}(\beta)} = 0.564$$

$$\beta = \frac{\text{sig}(\beta)}{\text{sig}(\alpha) + \text{sig}(\beta)} = 0.436$$

因而,总体相似性为 $Sim(Q, M_i) = 0.615$ 。

从上述的相似性比较过程和结果来看,计算方法的核心部分在于结构化三维CAD模型的表示。而本文研究的工作在于,提出了一种统一的基于OWL语义表示模型对三维CAD产品模型进行规范化表述,随后给出了基于语义特征的相似性计算方法。该方法的优点也是很明显的。一方面,算例中查询模型和目标模型 M_i 本身在零部件组成的实例个体数目比例上可能是较小于0.5(即 $q(i) = 0.357$)。由于这两个模型的元件个体间的联动语义密切相近,通过本文提出的基于OWL语义表示的相似性计算方法度量两个模型总体相似性为0.615,说明本文的方法考虑了用户输入的局部语义信息对整体模型相似性的影响。另一方面,相似性评价的基准从两个对象本身转化为两个对象特性的表述,基于OWL的三维CAD模型表示提取了模型的重要语义特征作为相似性计算因子,总体模型相似度由各个语义特征的相似性总和构成。计算时间复杂度主要集中于相似件匹配集的获取和相似元集的计算,大约为 $O(n) + O(3n * (k^2 + k))$ 。其中: n 是产品模型库中目标主模型总数量; k 是CAD产品设计元件类数目。企业中大多数的CAD产品对于模型语义特征数量是有限的,而且模型包含的零部件实例个体和装配联动约束关系的数量都是在有限范围内,计算机均可快速处理。因此,本文研究提出的基于OWL的三维CAD主模型相似性计算方法是可行的。

4 结语

针对变型设计中检索语义表达不足,难以实现快速有效的模型重用设计的问题,本文提出了一种基于OWL的三维CAD主模型相似性计算方法。该方法采用本体语言OWL逻辑描述两个对象的特性,以集合的方式计算模型语义相似性,并用实例验证了方法的可行性和有效性。计算方法采用优化权重参数 α, β 加权汇聚模型实例个体集和属性集的相似值来衡量总体相似性,关注因子 θ 体现了模型的整体属性特征和差异程度,可以有效避免遗漏一些相关信息同时也能够用局部语义信息对整体模型相似性的预测。本文研究能够为今后三维模型检索和数据信息合并中语义相似性的计算研究提供参考,为下一步研究CAD模型语义检索的应用提供理论支持。当然,随模型库数据海量剧增,该方法计算复杂度也会相应增加。为减少计算开销,在今后研究中也将从构建索引表和并行计算两个角度探究算法优化实现的可能性。

参考文献:

- [1] IYER N, JAVANTI S, LOU K, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends [J]. Computer Aided Design, 2005, 37(5): 509–529.
- [2] 周炜, 郑建荣, 颜建军. 基于子图同构与事例匹配的装配体局部结构相似性分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22

- (2): 299 – 305. (ZHOU W, ZHENG J R, YAN J J. Local matching of assemblies based on subgraph isomorphism and case matching [J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2010, 22(2): 299 – 305.)
- [3] 陶松桥, 黄正东. 基于属性邻接图匹配的装配体模型检索方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(2): 297 – 304. (TAO S Q, HUANG Z D. Assembly model retrieval based on attributed relational graph matching [J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2011, 23(2): 297 – 304.)
- [4] LI M, 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 the 28th Computers and Information in Engineering Conference. New York: ASME, 2008, 3: 121 – 130.
- [5] 王飞, 张树生, 白晓亮, 等. 基于子图同构的三维 CAD 模型局部匹配 [J]. 计算机辅助设计和图形学学报, 2008, 20(8): 1078 – 1084. (WANG F, ZHANG S S, BAI X L, et al. Local matching of 3D CAD models based on subgraph isomorphism [J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2008, 20(8): 1078 – 1084.)
- [6] 黄瑞, 张树生, 白晓亮, 等. 融合制造语义的三维 CAD 模型检索方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6): 1177 – 1185. (HUANG R, ZHANG S S, BAI X L, et al. Manufacturing semantics based 3D CAD model retrieval method [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6): 1177 – 1185.)
- [7] 邱明. 语义相似性度量在设计管理系统中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 1 – 3. (QIU M. Semantic similarity measures and its use in design management system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 1 – 3.)
- [8] HU B, DASMAHAPATRA S, LEWIS P, et al. Ontology-based medical image annotation with description logics [C]// Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003: 77 – 82.
- [9] HUWANG M, KONG H, KIM P. The design of the ontology retrieval system on the Web [C]// Proceedings of the 2006 8th International Conference on Advanced Communication Technology. Piscataway: IEEE, 2006, 3: 1815 – 1818.
- [10] MAGUITMAN A G, MENCZER F, ERDINC F, et al. Algorithmic computation and approximation of semantic similarity [J]. World Wide Web, 2006, 9(4): 431 – 456.
- [11] 祁国宁, 顾新建, 谭建荣. 大批量定制技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 126 – 130. (QI G N, GU X J, TAN J R. Technology and Application of Mass Customization [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 126 – 130.)
- [12] TVERSKY A. Features of similarity [J]. Psychological Review, 1977, 84(4): 327 – 352.

Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61562016), the Natural Science Foundation of Guangxi (2014GXNSFDA118039), the Doctoral Research Start-up Funds of Guilin University of Electronic Technology (UF14019Y), the Innovation Project of Guangxi Graduate Education (YCSZ2015148), and the Innovation Project of GUET Graduate Education (YJCXS201540).

ZHONG Yanru, born in 1965, M. S., professor. Her research interests include description logic, variant design, semantic interoperability.

LIANG Yifang, born in 1990, M. S. candidate. His research interests include semantic similarity, variant design.

XU Bensheng, born in 1980, M. S., associate professor. His research interests include computer aided design, computer aided manufacturing, digital design.

ZENG Congwen, born in 1972, Ph. D., associate professor. His research interests include graphics and image, intelligent computing.

LU Hongcheng, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include tolerance synthesis optimization.

WU Fan, born in 1990, M. S. candidate. His research interests include product data management.

ZHAO Zhengjun, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include computer aided design, variant design.

(上接第 1598 页)

- [12] TJHI W-C, CHEN L H. A new fuzzy co-clustering algorithm for categorization of datasets with overlapping clusters [C]// ADMA 2006: Proceedings of the Second International Conference on Advanced Data Mining and Applications, LNCS 4093. Berlin: Springer, 2006: 328 – 339.
- [13] 库波, 晁学鹏. 一种用于网站用户行为分析数据的可扩展协同聚类算法 [J]. 科技通报, 2013, 29(2): 67 – 69. (KU B, CHAO X P. Scalable co-clustering algorithm application in behavior analysis of website users [J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(2): 67 – 69.)
- [14] 王明文, 陶红亮, 熊小勇. 双向聚类迭代的协同过滤推荐算法 [J]. 中文信息学报, 2008, 22(4): 61 – 65. (WANG M W, TAO H L, XIONG X Y. A collaborative filtering recommendation algorithm based on iterative bidirectional clustering [J]. Journal of Chinese Information Processing, 2008, 22(4): 61 – 65.)
- [15] LIANG C Y, LENG Y J. Collaborative filtering based on information-theoretic co-clustering [J]. International Journal of Systems Science, 2014, 45(3): 589 – 597.
- [16] HetRec2011. Datasets [EB/OL]. (2014-06-08) [2015-06-08].

<http://grouplens.org/datasets/hetrec-2011/>.

- [17] SYMEONIDIS P, NANOPoulos A, MANOPOULOS Y. A unified framework for providing recommendations in social tagging systems based on ternary semantic analysis [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010, 22(2): 179 – 192.

Background

This work is partially supported by the Construction Project of Dominate Subjects in Colleges and Universities in Jiangsu, the Jiangsu "Six Talent Peaks" High Level Talent Project.

DING Xiaohuan, born in 1991, M. S. candidate. Her research interests include data mining.

PENG Furong, born in 1987, Ph. D. candidate. His research interests include data mining, recommendation system.

WANG Qiong, born in 1981, Ph. D, associate professor. Her research interests include pattern recognition, intelligent system.

LU Jianfeng, born in 1969, Ph. D., professor. His research interests include intelligent system, data mining.