

基于约束参数化的设计技术研究现状分析

董玉德^{1,3)} 谭建荣²⁾ 赵 韩³⁾

¹⁾(中国科学技术大学计算机系, 合肥 230052)

²⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

³⁾(合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

摘要 系统分析了基于约束的参数化设计技术的研究现状. 首先指出早期 CAD 系统初级参数化的主要缺陷; 根据参数化设计方法在不同时期的主要特点, 回顾了参数化设计的发展过程. 参数化方法被划分为程序参数化、在线交互参数化和基于自组织方式的离线参数化. 在线交互参数化方法中, 重点探讨了初等方法、变量几何法、人工智能法和构造过程法的原理和特点, 并在人工智能法中介绍了基于知识的几何推理法、基于自由度分析的约束传播法和基于神经网络的自学习方法, 给出了基于自组织方式离线参数化方法的主要步骤和特点. 最后阐明了各种参数化方法存在的问题, 以及该技术将来的发展方向.

关键词 在线参数化设计 离线参数化设计 几何推理 约束

中图分类号: TP391.72 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)06-0532-07

The Analysis of Research Status for Based-Constraint Parametric Design

DONG Yu-de^{1,3)}, TAN Jian-rong²⁾, ZHAO Han³⁾

¹⁾(Department of Computer, University of Science and Technology of China, HeFei 230052)

²⁾(State Key Lab. of CAD&CG, ZheJiang University, HangZhou 310027)

³⁾(School of Mech. And Auto. Eng., Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract The analysis of research status for based-constraint parametric design is given. This article gives main limitations for early CAD system firstly, then reviews the development process of parametric design by main features in different phases. Parametric design methods are divided into program parametric design, on-line alternating parametric design and off-line parametric design. The principles and features are given for primary method, variational geometry method, artificial intelligence method and constructional process method, in the same time, some representative methods, such as geometry reasoning based on knowledge, constraint promulgation based on freedom analytical, are introduced in artificial intelligence method. Main processes and features for off-line parametric design are given. In the end, the article analyzes the current research situation, problems in different parametric methods and research direction in the future work.

Keywords On-line alternating parametric design, Off-line parametric design, Geometry inference, Constraint

0 引言

参数化设计作为产品建模的一个重要手段在系列化产品设计中得到较好的应用. 早期的 CAD 系统是先绘制出图形, 然后通过人机交互进行尺寸标注, 由于系统是用固定的尺寸值定义几何元素, 因此

设计者只有对产品的形状、大小、各种属性有了完整的构思后, 才能用计算机生成和输出图形, 但在其几何模型数据库中只有图素的几何信息, 各图素之间没有约束关系, 系统缺乏对非图形信息, 如设计知识、设计约束、功能条件等的表达和处理能力, 修改设计变得相当困难. 这种设计方法只存储了设计的最后结果, 而丢失了设计的过程信息. 其缺点主要表

现在^[1]:(1)不支持草图设计;(2)不能支持全部设计过程,而一个机械产品的整个设计过程包括功能设计、概念设计、初步设计和详细设计等不同阶段;(3)缺乏对产品内部不同组件关系的表示,不同的组件之间无明显的约束关系,不支持并行设计;(4)信息表达不完整,产品的设计过程可看作产品数据的逐步求精过程,在不同的设计阶段表现出不同的设计属性,另一方面,这些数据信息又表现出多样性;(5)不能进行变动和系列化设计,而绝大多数的设计都是属于改进型的设计.参数化设计正是针对这些不足应运而生的.参数化设计将产品的定义、功能、特性、形状等属性通过约束表示出来.设计过程是构思设计要求、提出产品功能、给出相应的结构和几何约束,最后形成设计对象,而不同的设计过程又是不断循环,直到符合设计结果为止.基于约束的参数化产品设计过程如图1所示,产品的整个设计过程就是约束规定、约束变换求解以及约束评估的约束求精过程.

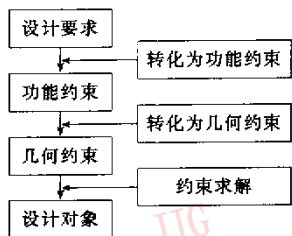


图1 基于约束的参数化产品设计过程

而参数化设计不仅记录了必要的几何信息,而且还保留了图形的拓扑结构,以及各种设计知识、设计约束等信息,对结构相同而尺寸不同的产品,就可用同一参数化模型描述其几何形状,当产品因某些定形定位参数发生变化而导致产品的局部形状的改变时,系统能维护原有的设计意图,在满足原有约束关系不变的条件下,自动生成新的图形,实现参数化设计.

1 参数化设计的发展过程

根据参数化设计方法在不同时期的主要特点,可以将参数化的研究分为以下几个阶段:

(1) 60~70年代中的萌芽期

这一阶段以 Sutherland 为代表,他在 Sketchpad(1963)系统^[2]中提出利用约束作为辅助手段进行零件的生成,但没有使用约束定义和修改几何模

型,对模型的修改只是一个单向过程,一旦模型生成后约束不能反过来限制模型.

(2) 70年代后~80年代初的开创时期

提出了一些参数化设计的基本思想和理论,并逐渐形成了不同的参数化方法.以 Hillyard 提出变量几何和几何约束思想,并由 Gossard 及其研究小组进一步发展和完善了这一方法为标志.

美国的 Robert Light 和 David Gossard(1982)提出修改实体的变量几何法,将尺寸约束等式划分为水平距离、垂直距离、线性距离、点线距离和角度尺寸等多种类型,利用一柔性过程来定义和修改几何模型,尺寸变量决定几何模型的形状和大小,通过修改尺寸变量来修改模型,并将该方法应用于草图和系列化零件的设计^[1].

(3) 80年代中期~90年代初的发展时期

这一时期的一个重要特征是将 AI 技术引入参数化设计中,人们分别将几何推理、神经网络等人工智能方法应用到设计中去,同时,将参数化技术应用到实体造型,形成了特征造型技术,以 Aldefeld、Suzuki、Verroust 提出的基于专家系统的方法为主要代表.

Aldefeld(1988)提出了一种基于符号操作和推理机处理一般几何模型的方法,二维几何模型被表示成一系列几何元素集和定义约束计划的原子规则集,他将约束分为结构约束与公制约束,并用一阶谓词表示这些约束,通过构造计划、规则库与推理机进行求解^[3].

Kondo(1990)将约束与对模型的操作联系起来,几何关系是由对模型的操作顺序确定的,能够根据尺寸的变化对模型进行修改.基于这种构造过程的几何造型系统 PIGMOD 可应用于线框、曲面和实体模型^[4].

日本东京大学 Suzuki(1990)用规则来表示二维尺寸约束,用约束传播等技术进行模型参数化,给出了几何模型和约束的逻辑框架,以及几何推理机制^[5].

西班牙 Catalunya 工业大学 Solano(1994)提出一种基于约束的构造过程的参数化设计方法,它不仅可以支持多维设计(1D/2D/3D),而且还可以支持变拓扑结构设计^[6],同时给出了模型的定义语言、系统的结构和模型的内部表示.

(4) 90年代中期至今

基于知识的参数化理论逐渐完善,参数化方法

在实践中得到广泛应用.这一阶段以利用图表示的基于知识的几何推理法和 Gao Xiao-Shan 提出的约束传播法为主要代表.

韩国 Pohang 大学 Lee Jae Yeol(1996)提出利用图表示基于知识的几何推理方法,将完备的约束设计模型和几何规则表示成图,从设计图选择出适当的子图以得到新的事实,并在规则图中搜索子规则图去匹配模型中的子图^[7],目的是改善推理过程,节省推理时间.

西班牙 Catalunya 大学 Joan-Arinyo R(1997)等提出了一个基于规则的几何约束求解器,应用对象为 2 维几何体.求解过程分为两个阶段,第 1 阶段为建立构造步骤序列;第 2 阶段则是根据当前尺寸值和构造步骤生成几何对象的实例^[8].该方法实质上是一种基于图和规则的构造过程方法,原型系统通过 Prolog 语言实现,分析器采用前向推理,而构造器则是一个简单的函数语言解释器.

中科院系统所 Gao Xiao-Shan 和美国 Wichita 国立大学 Chou Shang-Ching(1998)在几何约束求解系统中,提出了一种全局传播法和代码计算法,该方法对局部传播方法进行扩展,全局传播法在确定一个几何元素对象的位置时是从几何元素集中的已知元素推理而来的,推理过程中不仅使用了显式约束,而且还有约束信息中的隐含约束,并且能判定一几何对象是过约束,还是欠约束^[9].

Lee Jae Yeol 给出一种基于自由度分析(degree of freedom analysis)的约束分析与求解方法^[10],构造与约束分析同步进行,求解算法稳定,并且已运用于机构的运动模拟.

国内近年来对参数化的研究也显示出较高的热情,相继开发出一些具有较高技术水平的商品化软件,在几何约束的表示和求解方面,提出了各种新方法和思路.

浙江大学董金祥教授,葛建新博士提出变参绘图系统中一种约束求解新方法^[11,12],采用该方法,不但可以通过分解和排序来提高求解速度,而且可以通过快速指出约束不足和约束过载来提高灵活性和可靠性.

山东大学孟祥旭教授采用扩展的有向超图结构(Extended directed hypergraph)建立了支持尺寸约束、几何约束和拓扑结构约束的参数化图形表示模型^[13],利用交互构造的图形对象的依赖关系建立参数化图形约束关系的求解次序,在超图中采用有向

边依次连接图形对象构成求解次序,由于图形构造的每一步都保证约束的一致性,因此不会出现过约束或欠约束的情况.同时,针对约束耦合程度高的循环约束情况,采用约束关系自定义机制和约束模型的递归求解机制,支持变结构参数化模型.

清华大学张国伟等提出了一种基于自由度分析的约束传播算法^[14],求解二维参数化设计中所建立的几何约束模型.用约束图表示几何元素及它们之间的约束关系,用规则图来表示求解推理的过程,采用了基于规则的推理与数值计算相结合,基于自由度分析的约束求解策略.

浙江大学谭建荣教授等针对现有在线参数化方法的不足,提出了模型建立和求解相分离的离线式参数化方法^[15,16],基本思路是根据工程制图规则和尺寸与图形的本质联系,自动建立尺寸与图形的约束关系,并探讨了工程图约束信息自组织原理和方法.

2 参数化的主要方法

2.1 程序参数化

在各种参数化方法中,程序参数化方法是早而又最常用的一种方法,并在标准件、常用件的设计中得到较好的应用.程序参数化方法是和交互式参数化方法相对应的一类方法,它允许有经验的用户或二次开发软件工程师采用系统提供的内嵌编程语言或二次开发语言接口来定义产品的参数化模型,并支持对参数化模型库的建立、管理和使用.

由于不同的用户要求系统具有不同的常用模型库或标准模型库,而系统又不可能为不同的用户提供所有内建的常用模型,因此,对于这个问题程序参数化功能是重要的弥补手段,用户可通过编程方法来建立自己的参数化常用软件库或参数化标准库,进而可使系统用户化.

2.2 在线交互参数化

在线交互参数化方法模型的生成和约束的施加是交互进行的,重要特点是约束随着模型的产生而形成,模型又跟着约束的改变而变化.约束可以在模型的生成过程中由用户指定,也可以隐含在模型中.根据约束求解方式的不同,又可将其分为初等方法、变量几何法、人工智能法、构造过程法.

2.2.1 初等方法

初等方法利用预先设定的算法,求解一些特定的几何约束,求解的灵活性比程序参数化方法有所改

进,具有一定基于约束的设计思想,但在理论和应用方法上都很不完善.这种方法简单、易于实现,但在当时,这种方法仅适用于只有水平和垂直方向约束的场合^[17],但经过 10 多年的发展,该方法已吸收其他求解方法的优点,应用范围也得到了很大的拓宽.

2.2.2 变量几何法(代数法)

这是一种面向非线性方程组整体求解的代数方法,它将几何形状看作是一系列特征点,把约束关系转换成以特征点坐标为变元的非线性方程组,通过 Newton-Raphson 法叠代求解,从而确定出几何细节. Kondo^[18-19], Alasdair^[20], Robert Light^[21] 方法均属于变量几何法.

2.2.3 人工智能法

人工智能法就是将 AI 技术引入参数化设计中,进一步提高对模型求解的智能化程度.根据推理方法的不同又可分为基于知识的几何推理法、基于自由度分析的约束传播法、基于神经网络的自学习方法等.

(1) 基于知识的几何推理法

基于知识的几何推理法又可根据在推理过程中所应用方法的不同,将其分为基于专家系统的方法和基于图和规则的方法两类. Aldefeld^[3], Suzuki^[5], Verroust^[22] 提出的属于基于专家系统方法,而 Lee Jae Yeol^[7] 等提出的属于基于图和规则相结合的方法.

① Aldefeld 方法^[3]

基于专家系统方法的基本思想就是将几何元素之间的约束关系用一阶逻辑谓词描述,存入知识库中,系统从知识库中提取出有关信息,通过推理机逐步推导出几何细节.

Aldefeld 采用一个基于符号推理和操作的专家系统,基本思想是从现有的已知约束中派生出尽可能多的知识.因此每当一个新的约束得到后,推理过程启动,所有规则循环使用,直至没有新的事实产生.

约束处理分为 2 个阶段,并将变量几何法和约束传播法有机结合起来.在第 1 阶段进行前向推理,以传递用户所引入的约束,传递是以符号的方式进行的,并用来建立第 2 阶段的计算方案;第 2 阶段为推理史输出重建步骤,把规则名翻译成相应的处理过程,形成构造计划,一步步执行,从而构造出整个几何体.

② Lee Jae Yeol^[7]方法

Lee Jae Yeol 用图的表示来改善推理过程,通

过搜索与匹配规则求解未知元素,它将完备的约束设计模型和几何规则表示成图,从设计图选择出适当的子图以得到新的事实,并在规则图中搜索子规则图去匹配模型中的子图.他将求解中应用的规则分成两种类型:(1)规则图中包含 1 个已定义节点和部分定义节点,或者 1 个部分定义节点和 1 个未定义节点,1 条连接弧;(2)规则图中包含 2 个已定义节点,1 个未定义节点,2~3 个连接弧.

(2) 基于自由度分析的约束传播法

约束传播作为约束推理方法的一种,在参数化设计中得到广泛的应用,约束表示易于理解、编码及有效实现,它允许以说明性的方式来表达领域知识,表达能力强,应用程序只需指定问题的目标条件及数据间的相互关系;允许变量的域包含任意多个值,而不像命题只取真假二值,因此它保存了问题的一些结构信息,如变量域的大小、变量间的相关性,从而为问题求解提供启发式信息;易于并行实现,因为约束传播网上的信息传播可以认为是同时的;适合于递增型系统,约束可以递增式地加入到约束网络;易于与领域相关的问题求解模型相衔接.文献[9]、[10]、[12]、[14]等提出的方法均属于这一类.

葛建新^[12]在他的方法中首先是生成一无向图,在该图中,节点表示变量和常量,而边则表示这些变量和常量间的关系;传播方法是使无向图变成有向图,基本思想是几何元素的确定过程也就是该元素自由度下降的过程,当自由度降为零时,该几何元素也就完全确定下来;搜索过程是不停地获得可用约束并加以应用,以减少该约束待定几何元素自由度,通过对几何元素自由度的跟踪,可以完成对约束集合合法性的检测,求出约束过载节点和约束不足节点.

(3) 基于神经网络的自学习方法

在产品结构设计过程中,根据提供的某些同类结构样例,通过神经网络训练自学习的方式,从中自动提取其中隐含的规律及约束状况,以网络连接权的形式建立定义尺寸参数与产品结构特征点之间的映射关系,这在本质上和求解多个约束方程组呈现出一定的相似性,只不过方程组的建立是严格按照几何约束和尺寸约束建立起来的.文献[23]、[24]中的方法均属于这一类.

在用神经网络对模型进行训练时,将一组尺寸数据作为输入向量,选定与此相对应的另一组结构特征点作为目标向量.在输入向量矩阵中,列元素对应着样本输入向量,行元素对应着各驱动尺寸参数,

例如,第 I 列代表第 I 个样本向量,第 J 行分别代表各个样本实例的第 J 个驱动尺寸参数.而在各特征点坐标构成的目标向量矩阵中,第 I 列元素对应着第 I 个样本的输出坐标向量,第 J 行元素分别对应各特征点的坐标分量,其中,当 J 为奇数时,对应 X 坐标分量,当 J 为偶数时,对应 Y 坐标分量.

2.2.4 基于构造过程法

该方法记录了用户在交互造型过程中的每一步骤,每一步的造型动作都有相应的几何约束与其对应,采用一种参数化履历机制,通过记录作图过程中几何体素生成的先后顺序及连接关系,来捕捉设计者的意图.文献[4]、[6]、[8]、[25]中提出的构造过程法适用于结构相同而尺寸不同的系列化零件的设计.

2.3 基于自组织方式的离线参数化

针对现有在线参数化方法的不足,文献[16]、[27]提出了一种比在线参数化方法更有普遍意义的基于自组织方式的离线参数化方法,这种方法最重要的特征是参数化过程与图形一开始的生成过程是无关的,原理上适用于任何图形系统生成的图,作图过程与对图的理解是相分离的,本质是通过对图形约束信息的自动组织,识别和理解尺寸对图形的约束关系,从而进行参数化联动.

(1) 数据转换 将几何数据库中各图形实体数据转换到具有能存放约束信息的面向对象数据库中.

(2) 尺寸约束识别 以字符串为核心,通过模式识别和判决树,提取尺寸框架;识别尺寸对应的几何元素,建立尺寸与图形的内在联系;根据各尺寸之间的约束关系和图形的对应关系,建立尺寸链;运用尺寸树的方法,识别各尺寸的相对基准,建立尺寸的约束模型.

(3) 几何约束识别 通过图形中各几何元素之间的位置关系,自动识别图形的拓扑约束和几何约束,对于多视图进行自动划分,并根据投影关系,建立各个几何元素之间的投影对应关系,识别剖面线与剖面区.

(4) 建立约束模型 在完成尺寸约束和几何约束识别后,用一个统一的数据结构建立图形的约束关系,实现约束信息和数据的共享,同时检测图形的约束情况,若出现约束不满足情形,则重新修改.

(5) 基于约束的几何推理 利用识别的信息建立数据库,同时根据工程图中常用的各种约束关系建立规则库;采用正向推理和反向推理相结合的推

理策略.

(6) 图形重建 按照尺寸驱动图形的原理,根据尺寸的相对基准关系,按其在尺寸链上的顺序进行逐层推理,根据图形的各种约束关系,确定图形中几何元素的位置.在图形重建与参数化之后,自动实现图形中尺寸的重新标注,当有不合理标注时,采用交互方式修改.

通过对自组织方式离线参数化原理的分析,可以看出,这种方法的优点主要表现在:

(1) 这种参数化方法与工程图的作图方式或软件系统是无关系的,从原理上说,不论采用什么软件系统、什么方式产生工程图,通过识别和理解都能进行参数化.这不仅提高了设计水平,拓宽了系统的应用面,而且使得软件系统有更好的通用性和继承性.

(2) 由于自组织方式的离线参数化是通过对图形的识别、理解和推理方式进行参数化的,因此提供了对非参数化图形的参数化方法.

(3) 基于自组织方式的离线参数化大大减少了设计者的参与程度,操作过程简单,对设计者要求不高.

3 参数化设计中存在的问题

经过30多年的发展,参数化技术从无到有,从简单到复杂,从单一到混合,并在实践中得到了卓有成效的应用,参数化设计的理论和方法都得到较大的发展和完善.但从目前国内外发表的文献来看,还没有哪一种方法已经完全实现了Roller当初提出的一个理想的基于约束参数化系统应具备的7个要素^[26],现有参数化方法存在的问题主要表现在以下几个方面:

(1) 在约束求解方法上,由于每种求解原理本身的局限性,导致了在各种方法中都有本身无法克服的困难:

① 程序参数化方法对用户编程水平要求较高,交互功能差,没有用尺寸进行实时驱动的有效方法,对模型的修改范围受到限制,如果要修改模型,只能修改源程序,重新编译后运行.

② 变量几何法难以避免数值法求解稳定性差的缺点,方程组整体求解的规模和速度难以得到控制,且叠代初值的选取在很大程度上也会影响算法的成败,当图中的实体和变量个数很大时,求解的效率难以提高.由于该方法将几何形状看作是一系列

特征点,约束关系转换成以特征点坐标为变元的非线性方程组时,将一些隐含的约束信息丢失,从而导致无法处理几何约束的二义性问题。

③ 几何推理法能有效处理欠约束和过约束,但无法适应交互作图过程,基于专家系统的推理方法由于系统本身的庞大更不适应于交互作图,对于复杂约束问题,一般仍需要辅以必要的数值求解手段。当图形中要处理的几何元素过多时,用户输入的命令得不到及时的响应,应用该方法的有效性还取决于系统中知识库的完备性;约束传播法对约束方程十分敏感,同样的约束集以不同的次序传播,可能会产生不同的图形,甚至无解,当存在多解时,输出结果难以预料。

④ 构造过程法必须严格遵循构造过程。灵活性和柔性不足,对于那些设计要求不断变化的情形,则不大适用,而且难以用于早期 CAD 系统生成的图形,同时,无法处理约束耦合程度高的循环约束。

⑤ 基于神经网络的自学习模式的参数化方法对训练样本的数量有一定的要求,同时,当图形较为复杂时,如何控制网络的层数和隐层中神经元的个数还有待于进一步研究。

⑥ 离线参数化方法尽管实现了模型建立和求解过程的分离,但由于采用的全约束识别方法,当模型较复杂时,约束识别的难度大,因此如何提高识别和理解的层次,还有待于进一步探索。

(2) 在线交互参数化是在模型建立的过程中同步施加约束。生成图形时,用户必须按照一定的规则顺序进行输入,即图的有序性必须通过用户操作的有序性来保证,这样导致了操作过程繁琐,对用户要求高。同时,由于参数化原理和实现方法的不同,导致了不同 CAD 系统中参数化功能的通用性和兼容性差。

(3) 目前国内外研究主要集中于图满足约束完备条件下的约束求解方法,而对约束奇异——欠约束和过约束问题,尤其是欠约束问题讨论较少,同时,欠约束情形在产品的早期设计阶段,如概念设计阶段普遍存在。因此,如何在欠约束情形下进行参数化设计就具有重要意义。

(4) 如何将参数化设计贯穿于设计过程,并和产品的功能设计联系在一起,使设计者有更大的修改自由度,不仅可以进行系列化产品的设计,还能进行变结构产品的参数化设计,当改变产品的功能时,相应的结构也能随之变化。

4 结束语

参数化设计作为机械 CAD 的一项关键技术,它贯穿于从概念设计到详细设计的全部过程,今后这方面的研究可在以下几个方面展开:

(1) 欠约束问题的有效处理 欠约束在产品的概念设计,如草图设计阶段非常多见,文献[27]试图通过对隐式约束优先级的划分,将优先级高的隐式约束强制成显式约束,来表达图变参后的设计意图,但尽管这样还是存在多解的可能,因此,如何有效解决欠约束图的参数化还有待于进一步探索。

(2) 参数化设计应当与产品功能设计联系在一起 产品设计本身就是一个创新过程,为实现特定的功能机械产品多种多样,产品的功能是和其特定的结构联系在一起的,不同行业的产品又有其特定的设计要求,而现有参数化方法都是针对通用领域的,因此,如何将参数化设计与每个特定的领域联系起来就有重要意义,一方面要开发一些面向不同行业的参数化图形库,另一方面要将不同领域的设计知识与参数化过程联系起来。

(3) 参数化设计要向系统集成化方向发展 以关系数据库为驱动源的参数化设计为零件、组件、装配体以及产品管理信息的一体化设计提供了信息基础,随着数据库技术的发展,尤其是多层客户/服务器数据库技术的成熟,其为同一产品在不同地点、不同时间的并行设计提供了保障。

(4) 研究协同设计环境下基于约束的参数化设计模型 现有参数化方法中,约束模型的建立与求解都是基于单用户环境,是一种集中式的约束管理,它仅支持“人-机”交互,远未实现设计者之间的交互,尽管 Pro/Engineer 采用全关联、单一的数据结构,实现零件、部件和产品的双向关联,但不同的设计者之间却是相互独立的,不能完成多用户之间的协同设计。在复杂产品的参数化设计中,各种设计任务在不同的设计者之间如何分配;零件、部件、装配体中存在的局部约束和整体约束如何进行协同求解;各种设计进程如何管理;约束信息在网—络系统中如何存放等一系列问题,都有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Robert Light, David Gossard. Modification of geometric models through variational geometry [J]. Computer Aided Design,

- 1982,14(4):209~214.
- 2 Sutherland I E. Sketchpad: a man-machine graphical communication system[D]. MIT, 1963
 - 3 Aldefeld B. Variation of geometric based on a geometric-reasoning method[J]. Computer-Aided Design, 1988, 20(3): 117~126.
 - 4 Kondo Koichi. PIGMOD: parametric and interactive geometric modeler for mechanical design [J]. Computer-Aided Design, 1990,22(10):623~644.
 - 5 Suzuki H, Ando H, Kimura F. Geometric constraints and reasoning for geometrical CAD systems [J]. Computers & Graphics, 1990,14(2):211~224.
 - 6 Solano Lluís, Pere Brunet. Constructive constraint-based model for parametric CAD systems [J]. Computer-Aided Design, 1994,26(8):614~621.
 - 7 Lee Jae Yeol, Kwangsoo Kim. Geometric reasoning for knowledge-based parametric design using graph representation [J]. Computer-Aided Design, 1996,28(10):831~841.
 - 8 Joan-Arinyo R, Soto A. A correct rule-based geometric constraint solver[J]. Computers & Graphics, 1997, 21(5): 599~609.
 - 9 Gao Xiao-Shan, Chou Shang-Ching. Solving geometric constraint systems. I. A global propagation approach[J]. Computer-Aided Design, 1998,30(1):47~54.
 - 10 Lee Jae Yeol, Kwangsoo Kim. A 2-D geometric constraint solver using DOF-based graph reduction[J]. Computer-Aided Design, 1998,30(11):883~896.
 - 11 董金祥,葛建新等. 变参绘图系统中约束求解的新思路[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,1997,9(6):513~519.
 - 12 葛建新. 新一代造型系统的研究和实现[D]. 杭州:浙江大学研究生院,1993.
 - 13 孟祥旭,汪嘉业,刘慎权. 基于有向超图的参数化表示模型及其实现[J]. 计算机学报,1997,20(11):982~988.
 - 14 张国伟,秦士存,俞新陆. 以尺寸驱动为核心的参数化图形库管理系统的设计[J]. 机械设计与研究,1998,(2):23~25.
 - 15 张东亮,谭建荣,周广仁等. 基于尺寸约束离线形成的参数化驱动方法[J]. 计算机学报,1996,19(12):916~922.
 - 16 谭建荣,张东亮,彭群生. 基于约束关系的自组织的离线参数化技术[J]. 自然科学进展——国家重点实验室通讯,1996,6(6):734~740.
 - 17 Fitzgerald W. Using axial dimensions to determine the proportions of line drawing in computer graphics[J]. Computer-Aided Design, 1981,13(6):277~282.
 - 18 Kondo Koichi. PIGMOD: parametric and interactive geometric modeler for mechanical design [J]. Computer-Aided Design, 1990,22(10):623~644.
 - 19 Kondo K. Algebraic method for manipulation of dimensional relationships in geometric models, Computer-Aided Design [J]. 1992,24(3):141~147.
 - 20 Buchanan S Alasdair, Alan de Pennington. Constraint definition system: a computer-algebra based approach to solving geometric-constraint problems [J]. Computer-Aided Design, 1993,25(12):741~750.
 - 21 Robert Light, David Gossard. Modification of geometric models through variational geometry [J]. Computer-Aided Design, 1982,14(4):209~214.
 - 22 Verroust A, Schonek F, Roller D. Rule-oriented method for parameterized Computer-Aided Design [J]. Computer-Aided Design, 1992,24(10):531~540.
 - 23 Chen L, Luo H etc. A novel algorithm for geometric constraint satisfaction [A]. In: The Fourth international Conf. On CAD/CG[C], Wuhan, P. R. China, Oct. 1995:856~859.
 - 24 刘衍聪. 产品信息建模中的生物型与自组织理论,方法及其应用研究[D]. 杭州:浙江大学研究生院,1998.
 - 25 Roller D. An approach to computer-aided parametric design[J]. Computer-Aided Design,1991,23(5):385~391.
 - 26 Roller D, Schonck F, Verroust A. Dimension-driven geometry in CAD: a survey, in theory and practice of geometric modeling [M]. Berlin:Springer-Verlag, 1989:509~523.
 - 27 董玉德. 面向离线参数化的图形理解与自组织理论、方法及关键问题研究[D]. 杭州:浙江大学研究生院,2000.



董玉德 1966年生,副教授,现为中国科学技术大学计算机系博士后. 主要研究方向为计算机辅助设计与图形学、协同设计. 发表论文 30 余篇.



谭建荣 1954年生,教授,理学博士,博士生导师. 目前主要从事产品信息建模、工程信息可视化等方面的研究. 发表各类学术论文 110 余篇.



赵韩 1957年生,1990年获丹麦奥尔堡大学博士学位,现任合肥工业大学机械与汽车工程学院院长、教授、博士生导师. 研究方向为机械学、现代设计理论与方法、磁力机械学. 发表论文 60 余篇,出版专著 1 部,参编著作 3 部.