

一种欠约束草图求解方法的研究

董玉德^{1,3)} 谭建荣²⁾ 赵 韩³⁾ 李道伦¹⁾

¹⁾(中国科技大学计算机系,合肥 230052) ²⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室,杭州 310027)

³⁾(合肥工业大学数字化设计与制造省重点实验室,合肥 230009)

摘要 基于约束的参数化描述及求解是计算机辅助设计研究的一个热点,欠约束图的求解是参数化设计的基本问题,为了提高欠约束草图求解的参数化设计效率,提出了一种基于隐式约束优先级的欠约束草图求解方法,并首先给出了欠约束图求解的一般方法以及欠约束图的基本特征,提出了利用隐式约束去匹配缺少的显式约束;然后将隐式约束按照一定的规则分成不同的优先级,再利用优先级高的隐式约束去匹配变动约束图中的欠约束,直到完成约束图的有向化;最后,探讨了无尺寸约束图有向化过程中的基本特点,并给出了无尺寸约束图的求解算法和应用实例。实例应用结果表明,效果较好。

关键词 参数化设计 欠约束 约束图 有向约束图

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)07-0878-08

A New Method for the Solution of Under Constraint Graph in Sketch Drawing

DONG Yu-de^{1,3)}, TAN Jian-rong²⁾, ZHAO Han³⁾, LI Dao-lun¹⁾

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

²⁾(State Key Laboratory of CAD&CG, ZheJiang University, Hangzhou, 310027)

³⁾(Province Key Laboratory of Digital Design & Manufacture, HeFei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract Constraint-based parametric description and inferring is one of the host spot in the research of computer-aided design, the solution to under constraint graph is a basic question in parametric design, this paper presents a series of solving methods for sketch drawing based on the priority of under constraint. This article gives general methods for under constraint graph and its basic features firstly, a new method for the solution to under constraint graph in sketch drawing is put forward, in which required apparent constraints are replaced by concealed constraints. The directed process of constraint graph is completed by picking concealed constraints of adjacent entities in sketch of few or no dimensions. In this paper, the priority of concealed constraint is given by the different constraint types and constructing orders, and some more priority concealed constraints are forced into obvious ones by the need number of constraint for every node in constraint solution process.

Keywords parametric design, under constraint, constraint graph, directed constraint graph

1 引言

约束传播作为约束推理方法的一种,由于约束表示易于理解、编码及能有效实现,因此在参数化设计中已得到广泛的应用。在基于自由度分析的约束传播法中,约束求解过程是通过计算约束图中每个节点所

表示实体的约束度,并通过对约束度和自由度的比较来判断约束图是否可解。该方法的基本思想是根据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的原理,而搜索过程则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,然后通过对几何元素自由度的跟踪,就可以完成对约束集进行合

法性的检测,以便求出约束过载节点和约束不足节点。由于有向图的各个节点标识了该节点在约束图有向化过程中的求解顺序,且各节点之间的关系可以被递增式求解,因此利用约束集维护算法可对图纸进行局部修改。一般把约束图中存在过约束节点和欠约束节点作为一种约束奇异问题^[1]。在几何推理过程中,由于求解未知节点一般都是由已知节点根据节点之间的已知约束来进行的,因此,在约束求解中如何处理约束奇异问题就关系到求解效率的高低以及求解过程能否顺利进行^[2]。

过约束问题的处理相对简单一点,因为在无向约束图到有向约束图的转化过程中,如果检测到某一节点的约束度等于其自由度^[3,4],且这时仍然有该节点与邻节点之间的约束没有被遍历,那么就可表明该节点是过约束节点,而未被访问的邻节点和该节点之间的弧所代表的约束就是过约束,这时就可省略这些过约束,也就是在求解的过程中不考虑过约束,或提示设计者删除这些过约束^[5]。

而对欠约束问题的处理可以分为修改约束和使用隐式约束处理两种策略,其中修改约束就是通过交互方式给约束不足节点追加约束,直至该节点约束满足为止,这种约束处理和其他方法相比虽没有本质区别,但其缺点是用户修改不方便,而且大大降低了参数化设计效率^[6]。

2 约束完备性的判定

2.1 基本术语^[4,7~9]

为叙述方便,一些基本术语介绍如下:

(1)几何元素自由度 几何元素自由度是指几何元素内部最少自由变量的个数,记为 $D_{\text{Free}}(e)$,其中 e 为一特定的几何元素。工程图中常用的几何元素点 (x, y) 、直线 $(\text{start}_x, \text{start}_y, \text{end}_x, \text{end}_y)$ 、弧 $(\text{center}_x, \text{center}_y, r, \text{start}_x, \text{start}_y)$ 和圆 $(\text{center}_x, \text{center}_y, r)$ 的自由度分别为 2、4、5 和 3。

(2)几何元素约束度 几何元素约束度是指由于约束的施加使几何元素内部最少自由变量减少的个数,记为 $D_{\text{Control}}(e)$,其中 e 为一特定的几何元素。工程图常见几何约束中的距离约束、角度约束和圆弧约束都将产生被约束元素的约束度,例如,二邻接几何元素的约束度等于 2,而存在一定距离两点的约束度等于 1,垂线或水平线的约束度均等于 1 等。

(3)几何元素过约束 过约束是指几何元素的约束度大于该几何元素的自由度时的约束状态。

(4)几何元素欠约束 欠约束是指几何元素的约束度小于该几何元素的自由度时的约束状态。

(5)完全已知几何元素 当一几何元素的自由度等于约束度时,即称之为完全已知几何元素,推理求解均是从已知元素开始的,其在约束图中可用粗线节点标识。

(6)完全未知几何元素 当一几何元素的约束度等于零时,即称之为完全未知几何元素,推理求解的目标就是变完全未知几何元素为完全已知几何元素,在约束图中可用细线节点标识。

(7)部分未知几何元素 当一几何元素的约束度小于其自由度时,即称之为部分未知几何元素,其在约束图中可用虚线节点标识。

(8)局部约束完备 指在约束图的某一局部中,所有元素的自由度之和等于其约束度之和,并且任一几何元素的自由度等于其约束度的情况。

(9)局部约束不完备 指在约束图的某一局部中,所有元素的自由度之和等于其约束度之和,并且存在若干几何元素的自由度不等于其约束度的情况。

(10)整体约束完备 指在一工程图的所有几何元素集中,所有元素的自由度之和等于其约束度之和,并且满足局部约束完备的情况。

2.2 约束关系求解的基本规则

根据实际求解的各种可能,在 Lee 的约束规则分类^[6]的基础上,本文将约束关系求解规则类型分为以下 3 类:

(1)约束规则类型 1

指包含一个完全已知几何元素或部分未知几何元素、一个部分未知几何元素或完全未知几何元素,且二元素之间有 1 个连接弧的约束规则,例如,已知点 P 的位置,且在直线 L 上,同时给定 L 的方向,这时就可确定 L 的系数。

(2)约束规则类型 2

指包含两个完全已知几何元素、一个完全未知几何元素,且三元素之间有 2~3 个连接弧的约束规则。例如,一直线和二弧同时相切,给定 2 个弧的参数和直线与弧的相切类型,这时就可确定直线段的两个端点。

(3)约束规则类型 3

指包含 3 个完全已知几何元素、一个完全未知几何元素,且 4 元素之间有 3 个连接弧的约束规则,

例如,已知3条直线段,1个圆和这3直线均相切,这时就可以唯一确定圆的参数。

2.3 几何元素集约束完备性

在一局部图中,假设构成该图的几何元素集中有 m 条直线、 n 条弧、 r 个圆,则其约束集中存在平行约束数为 x ,垂直约束数为 y ,共点约束数为 z ,水平约束数为 p ,铅垂约束数为 q ,距离约束数为 u ,角度约束数为 v ,基准约束数为2,由以上分析可知,该局部几何元素集构成的图的总自由度和总约束度分别为

$$\dot{D}_{\text{Free}} = 4m + 5n + 3r$$

$$\dot{D}_{\text{Control}} = x + y + 2z + p + q + u + v + 2$$

在自由度的计算中,还必须注意到平行约束、垂直约束、水平约束、铅垂约束和角度约束对约束实体约束度的重复计算,例如,当二直线平行时,如果一直线的角度已知,则在给另一直线施加约束度时,就不能再重复计算角度约束。但是 $\dot{D}_{\text{Free}} = \dot{D}_{\text{Control}}$ 并不能保证该局部几何元素约束集是完备的,还必须检查每个几何元素的约束度,只有当其约束度正好等于该元素的自由度时,才能保证其约束的完备性。

2.4 有向约束图

描述图中的所有约束以及各节点求解顺序的有向图称为有向约束图。这样通过有向约束图,一方面可以完成对图几何约束完备性的判定,而且当存在欠约束或者过约束时,利用约束图就可以指出存在不完备约束的节点,另一方面,在约束图建立的过程中,由于已经完成了对每个节点求解顺序的判定,因此,利用约束图和每个连通图就可以对图进行变参求解,但当修改一尺寸变量时,还要根据该变量在约束图中节点的位置和该节点在约束图中的求解顺序来变动该尺寸变量所约束的图形元素。

3 欠约束求解的算法原理

欠约束问题本质上就是缺少显式约束(如图1所示),而解决欠约束问题还要回到图形本身。众所周知,当一幅图存在时,约束关系已隐含在图形中,其中包含尺寸约束和结构约束,且这些约束是因图形的存在而存在,但由于设计者完成这样一幅草图时,并没有强调各隐式约束的优先级关系,即这些隐式约束在设计者眼中的“地位”是平等的,因此在保证图形拓扑结构关系不变的情况下,变动其中任意几个隐式约束都能得到同样的结果。增加尺寸标注等显式约束就是为了更进一步明确约束关系,而且

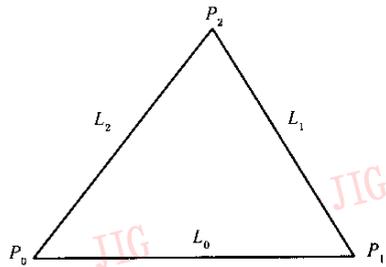


图1 无尺寸约束图形

显式约束的优先级要高于隐式约束,如果能利用隐式约束信息,那么就可相应减少求解过程中需要的显式约束,从而可为解决欠约束问题提供一新的途径。这样,解决欠约束问题的实质就是如何有效利用隐式约束的问题。

利用隐式约束来代替显式约束,其关键是确定不同隐式约束在求解过程中的优先级,本文主要采取以下原则^[9]:

(1)隐式约束所约束对象的属性在求解的过程中一般应不变化,例如,水平线、铅垂线求解后仍然是水平线、铅垂线,共端点的二直线变动后仍然共端点等,而且仍保持端点原来的连接次序;(2)隐式约束的引用应按需变化,即当一个节点处于欠约束状态时,应根据节点的自由状态引用可限制该状态的隐式约束,例如,当修改一条水平线时,如果该线的一端点已知,这时,修改对象的几何属性可确定为该线的长度,而“水平”约束则被认为优先级高的约束;(3)当存在多个隐式约束时,则引用其中的若干个约束应可使欠约束节点所表示的实体得到稳定,这时可根据约束图中每个节点与邻节点的约束构造顺序来决定引用隐式约束的顺序,这是求解欠约束问题的关键。

图2(a)显然是一个欠约束图,因为在该图中只有一个显式约束,即尺寸 d ,所以在约束图的有向化过程中,其优先级最高。当变动该尺寸时,假设基准点选为 P_0 ,根据识别的隐式约束,可变动对象只能是点 P_1 ,而其他和显式约束约束对象没有直接联系的实体一般不变化。

图2(b)也是一个欠约束图,即只有一个显式约束尺寸 H ,其工程语义为点 P_2 和直线 L_0 的距离,如果选取直线 L_0 为基准,那么这时可变动对象为点 P_2 ,但在直线的一侧和该直线距离为 H 的点在一直线上,这时如何确定该点的位置,其关键在于使用哪个隐式约束,也就是优先级最高的隐式约束。和点 P_2 相关的隐式约束有:(1)点 P_2 是直线 L_1 和 L_2 的

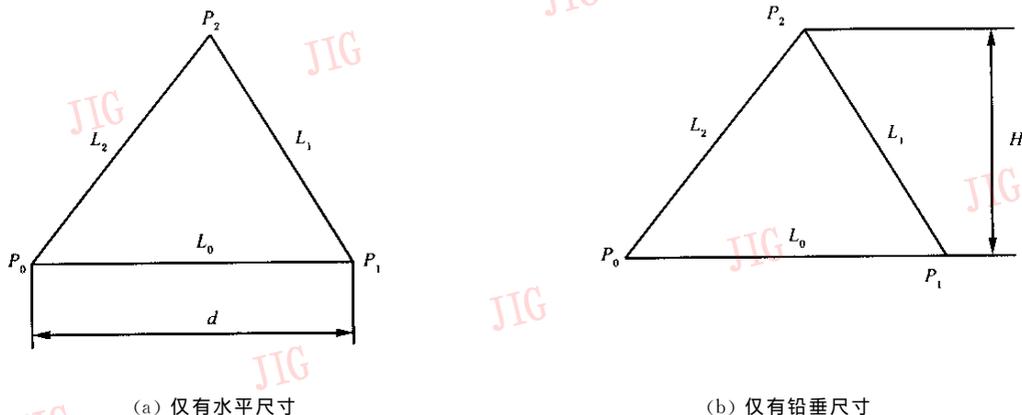


图 2 欠约束图

共端点;(2)当二直线共端点时,由识别程序可得到点 P_0P_2 构成的直线 L_2 与直线 L_0 之间存在的一初始默认角度;(3)点 P_1P_2 构成的直线 L_1 与直线 L_0 之间也存在一初始的默认角度。很显然在约束图的构造和求解过程中,隐式约束(1)是不会变化的,而隐式约束(2)、(3)中的任一个都可使点 P_2 得到稳定,这时是使用隐式约束(2),还是使用隐式约束(3)就要看在约束图构造过程中这两个隐式约束形成的

先后顺序,若隐式约束(2)在先,则使用隐式约束(2),若隐式约束(3)在先,则使用隐式约束(3)。

从以上分析过程可以看出,欠约束图的求解可能存在多种结果,但其原理在本质上和一般有效约束图的求解是一样的,只是在约束图的求解过程中,把一些欠约束用隐式约束来代替,其实质就是把部分隐式约束强制成显式约束。表 1 给出了不同隐式约束的优先级顺序。

表 1 隐式约束的优先级

优先级	约束类型	约束
1	对称约束	点对点、线线对称、圆弧对称、圆圆对称
	共点约束	二直线共端点、点在直线上(起点、终点、中点)、点在圆弧上(包括弧心)、点在圆上(圆心、4个关键点)
	平行约束	二直线相平行
	垂直约束	二直线相垂直
	水平约束	直线处于水平位置
	铅垂约束	直线处于铅垂位置
	相切约束	直线与圆相切、直线与弧相切、圆与圆相切、圆与弧相切
	距离约束	二点之间距离、点与线距离、线与线距离
2	等同约束	二直线相等、二圆弧相等、二圆相等
	角度约束	共点直线间的角度(90° 、 180° 、 270° 除外)
	相交约束	直线与直线相交、直线与圆弧相交、二圆弧之间相交、二圆之间相交
3	点类型约束	点在平面中的坐标
	直线类型约束	直线两个端点、一个端点、直线长度、直线、一个端点、线长、另一端点的 X/Y 坐标
	圆弧类型约束	圆心与半径、圆弧上的 3 个点、圆弧上的开始点、中心点、终点、圆弧上的开始点、中心点、角度、圆弧上的开始点、中心点、圆弧长度、圆弧上的开始点、终点、方位、开始点、终点、半径
	圆类型约束	圆中心、半径、圆周上的两个切点、圆中心、直径、圆周上的 3 个切点、圆周上的两个点、圆周上的 3 个点

4 欠约束图求解算法

从前面介绍的隐式约束引用规则可以看出,不同的隐式约束引用顺序将导致不同的求解结果,但

往往只有一种结果是符合设计意图的,这样,决定隐式约束使用顺序的构造规则就显得特别重要。以下以一个实例来说明欠约束图的求解过程。

图 3 是一个随手勾画的草图,它不仅是一个单连通图,而且是典型的欠约束图,即在图中没有显式

的尺寸约束,图 4 是约束图。在对该图变动求解过程中,为了保持图的拓扑结构不变,只有将各相关图元之间的隐式约束作为限制条件,才能完成变参求解。图 3 的隐式约束及其优先级排序如表 2 所示。

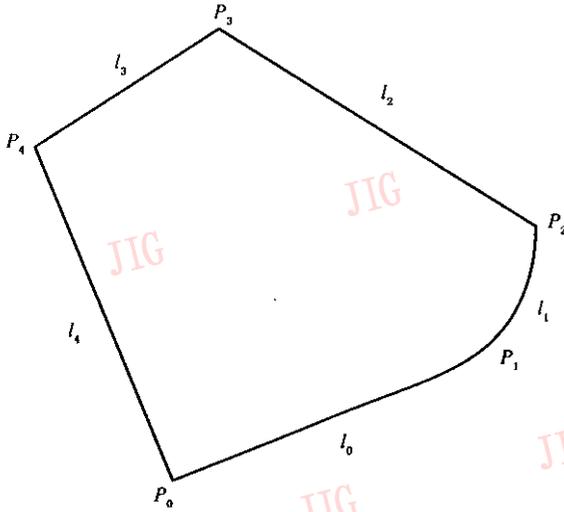


图 3 随手构画的草图

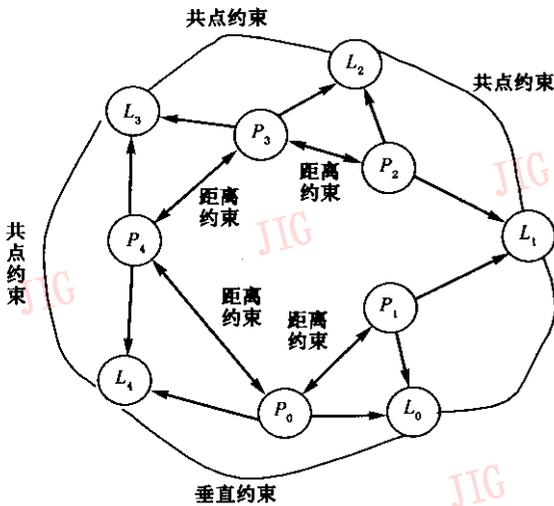


图 4 约束图

表 2 图 3 中的约束分类

优先级	隐式约束
1	共点约束 $(l_0, l_1) \rightarrow P_1$ $(l_1, l_2) \rightarrow P_2$ $(l_2, l_3) \rightarrow P_3$ $(l_3, l_4) \rightarrow P_4$ $(l_4, l_0) \rightarrow P_0$
2	垂直约束 $(l_0 \perp l_4)$ 相切约束 $\infty(l_0, l_4)$
2	相连约束 $l_4 \rightarrow l_0 \rightarrow l_1$ $l_0 \rightarrow l_1 \rightarrow l_2$ $l_1 \rightarrow l_2 \rightarrow l_3$ $l_2 \rightarrow l_3 \rightarrow l_4$ $l_3 \rightarrow l_4 \rightarrow l_0$
3	类型约束 直线段 $l_0(P_0, P_1)$ $l_2(P_2, P_3)$ $l_3(P_3, P_4)$ $l_4(P_4, P_0)$ 圆弧段 $l_1(P_1, P_2, r)$

隐式约束的识别与连通图的建立同时进行,其中连通图的建立仍然采用改进的宽度优先搜索算法,当一条边生成时,随即进行该边与前驱图元隐式约束关系的识别,一旦连通图建立完毕,隐式约束也就识别完成。有了隐式约束和连通图信息就可得到相应的约束图和有向约束图,同时在有向约束图中标记每个节点的求解顺序及其求解方法,这种约束图和有向约束图的建立过程和前面介绍的一般图的有向约束图的建立过程及方法是一样的,这里不再赘述。欠约束图的求解算法描述如下:

无尺寸欠约束图的求解算法还是基于约束传播的思想^[10],是一个有序化的过程。由于在约束图的每个节点中有该节点所代表实体与相邻实体之间的约束关系,且这些约束都是以隐式形式存在的,因此在约束图的建立过程中应给每个隐式约束赋予不同的优先级。系统是按照节点之间的约束优先级顺序和变动节点所表示的实体进行推理的,并根据隐式约束在推理中所起的作用将它们分为 unused、used 和 using3 类:即未使用过的,使用过的和正起作用的隐式约束 3 类。而将几何元素分为 unafect 和 affect 两种,即未影响元素和影响元素两种,前者指不受相邻节点的变化而变化,而后者指随相邻节点所表示元素的变化而变化。另外,在推理过程中,将被搜索过的 affect 几何元素标志为 mark,而将未搜索过的 affect 元素标志为 unmark。

推理算法的基本步骤可表述如下:

(1) 初始化各种标志,设所有几何元素为 unafect 和 unmark,所有的隐式约束标志为 unused,并对节点之间的所有隐式约束进行优先级排序;

(2) 选取变动节点所代表的几何元素作为图形的初始基准,先将该几何元素标志置为 affect,并将已求节点数 know_node_num 设置为 1;

(3) 将与 affect 元素相关约束中的 unused 隐式约束的标志置为 using;

(4) 按如下步骤搜索每个 affect 和 unmark 元素及其与 affect 元素相关的隐式约束:

① 按约束优先级顺序,对每个隐式约束,找出它所约束的另一几何元素;

② 若该几何元素的标志为 unafect,则查看能否根据该隐式约束和当前节点的变化推出该几何元素也必需发生变化,如果能得出该几何元素必需发生改变,则将该几何元素标志为 affect,而将隐式约

束标志为 used,并将参数 know_node_num 增加 1;

③ 如果相邻节点搜索完毕,则将当前正被搜索的几何元素设置为 mark,再去搜索下一个 affect 几何元素;

(5) 如果 know_node_num 等于约束图中全部节点数总和,则说明求解成功,否则求解失败,并指出 unknow 几何元素;

欠约束图的有向化细节和完全基于尺寸约束图的有向化转化在某些细节还是有一定的区别的^[11],尤其是对完全无尺寸约束图,这主要表现在:

(1) 无尺寸欠约束图的变动源多样,不同于有尺寸约束图变动参数只能是被标注的尺寸。例如图 3 中,直线可变动参数可为两个端点、直线的长度以及角度,而圆弧可变动参数则为圆弧的圆心、半径、起点和终点,这种变动源的多样化决定了求解可运用方法的多样化。

(2) 无尺寸约束图的变动对象比较明确,而不同于有尺寸关联的约束图,其变动尺寸所约束的实体还有待于进一步推理求得,用户点取的目标就是要修改的实体,如直线的端点、长度,圆弧的圆心、半径;

(3) 无尺寸欠约束图的被变动对象以及被关联变动对象一般在连通图中多是相邻实体,而非相邻元素的约束则通常不发生变化,且在求解过程中也不发生作用。如图 3 中 l_0 与 l_1 相邻、 l_0 与 l_4 相邻, l_0 的变化就有可能影响到 l_1 、 l_4 的改变,而 l_0 中 P_0 的变化对 L_2 就没有影响,除非人为指定了二者之间的约束关系,如等同、平行关系等,这种变化特性就给变参求解提供了一个基础——利用不变的实体和相应的求解规则去求解由于变动实体所引起的关联变化;

(4) 无尺寸欠约束图的有向化路径的不确定性:它不同于基于尺寸约束图是根据尺寸变量和原有的拓扑结构去求解未知节点,而是要根据变动节点的属性去确定求取相邻未知节点的方法,也就是说,从一个节点到另一个节点之间存在多条路径,例如,由直线 L_4 中的端点 P_0 求取另一端点 P_4 可以根据 L_4 的原来角度和变化后的长度来确定端点 P_4 ,或者由点 P_0 作一垂直于 L_0 的直线 L_4 ,同时和直线 L_3 相交来求取端点 P_4 。

从无尺寸约束图的求解算法和变动特性可以看出,其变动过程都是从修改节点所表示的几何元素开始,然后根据与邻节点的约束关系逐渐推导出被

变动节点。尽管在求解的一开始所有节点都是已知的,但由于被修改节点所表示元素的变动和约束关系导致相邻节点的变化,而被变化的节点又由于下一个邻节点的约束关系引起新的变动,例如,直线的端点发生变化,而该端点又是另一弧的起点,而弧的端点又依附于弧,这样当端点发生变化时,则弧的属性必然发生变化。这种传播过程直到无节点变化为止。根据隐式约束在传播过程中的约束优先级的大小可将传播过程分为以下 3 种情形:

(1) 约束传播只在两个邻节点之间进行,而不会传到第 3 个节点,这时节点所代表几何元素的变化只引起低优先级约束的变化,其传播过程最简单;

(2) 约束传播在 3 个以上节点之间进行,而约束的变化也在相邻节点之间依次进行,其类似于一种链式传播形式;

(3) 约束传播在 3 个以上节点之间进行,而约束的变化不仅在相邻节点之间依次进行,而且在不相邻节点之间约束也发生变化,其类似于多个约束链同时传播,这种跨节点约束关系的变化一般多是在草图的绘制过程中强制的约束关系,如不在同一连通图中的 2 条平行直线,若修改一条线的角度,则另一条直线也要做相应的变化。

为了简化图的表示,图 5 给出了改变直线 L_0 的端点 P_0 的有向约束图。图中每个节点中的数字表示该节点在图求解过程中的顺序,从图中可以看出,由于节点 l_3 、 P_3 、 l_2 、 P_2 在图的变动过程中没有发生变化,因此可把它们作为求解过程中的已知节点,未知节点求解过程中所应用的方法如下:

F_0 : 给定平面上一新点的坐标,以确定点 P_0 的

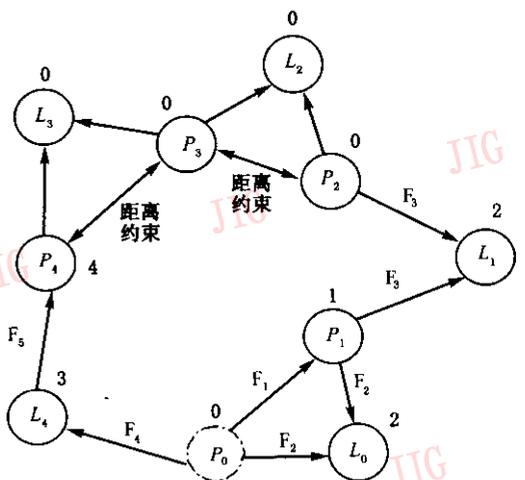


图 5 变动点 P_0 后约束图到有向约束图的转化过程

位置;

F_1 : 过点 P_0 作一直线相切于弧 L_1 , 切点即为所求点 P_1 , 在求切点的过程中还包含对符合相切条件的两个切点的取舍;

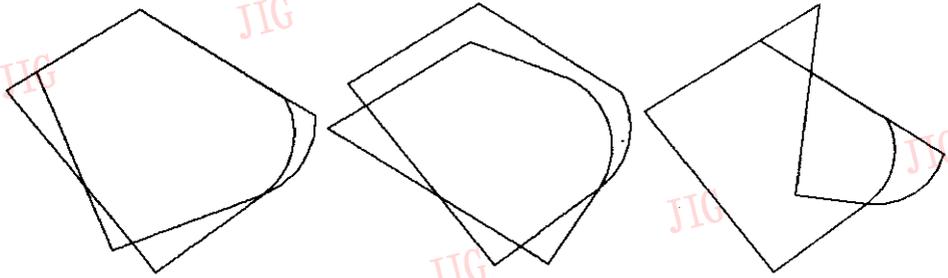
F_2 : 由已知直线的二端点 P_0 、 P_1 确定直线 L_0 ;

F_3 : 由圆弧的半径、两个端点 P_1 、 P_2 确定圆弧 L_1 , 同时还要根据点 P_1 、 P_2 所在的起点和终点位置进行圆弧段的取舍;

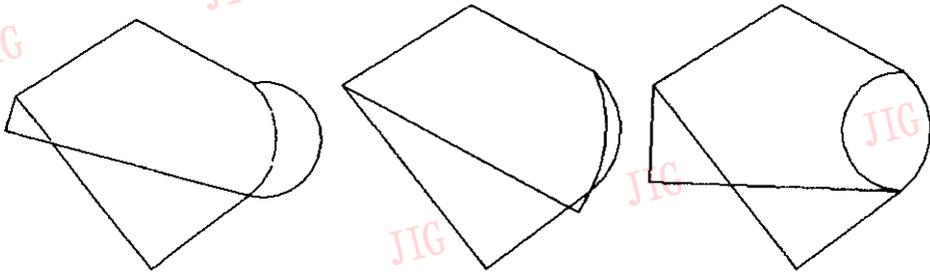
F_4 : 过点 P_0 作一直线 L_4 垂直于直线 L_0 ;

F_5 : 求直线 L_4 和直线 L_3 的交点 P_4 ;

图6为二组变参后的无尺寸约束图形结果图, 图6(a)是变动直线 l_0 和 l_4 的端点 P_0 在不同位置时的情形, 而图6(b)则为变动弧 l_2 半径和弧心位置的3种不同情况。由图6(a)、图6(b)可知, 这两种情况尽管在图的局部元素之间的拓扑关系保持不变, 但图的整体拓扑结构关系已发生了变化。



(a) 变动端点 P_0 后的3种结果图



(b) 变动弧 l_2 半径和弧心位置的3种结果图

图6 无尺寸约束图形的不同变化结果

5 结束语

本文讨论了欠约束草图求解的基本方法。欠约束图的求解过程在本质上和约束完备图的求解过程是一样的, 其唯一区别在于要根据设计者的设计意图从图的隐式约束中提取出显式约束, 以便让变参后的约束图变化结果(如拓扑结构), 与设计者的本来设计意图保持一致。其中的一个关键问题是要给出不同隐式约束的优先级, 本文不仅提出了隐式约束的优先级, 而且还根据这种隐式约束的优先级对约束图进行了有向化, 最后论文给出了一欠约束草图的求解过程实例。

参考文献

1 Aldefeld B. Variation of geometries based on a geometric reasoning method[J]. Computer-Aided Design, 1988, 20(3):

117~126.

- 2 Verroust A, Schonek F. Rule-oriented method for parametrized computer-aided design [J]. Computer-Aided Design, 1992, 24(10):531~540.
- 3 Gao Xiao-shan, Chou Shang-ching. Solving geometric constraint systems (1): A global propagation approach [J]. Computer-Aided Design[J], 1998, 30(1):47~54.
- 4 董金祥, 葛建新, 高屹等. 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.
- 5 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.
- 6 Lee Jae-yeol, Kim Kwangsoo. Geometric reasoning for knowledge-based parametric design using graph representation [J]. Computer-Aided Design, 1996, 28(10):831~841.
- 7 Kramer G. Solving geometric constraint systems [M]. Cambridge, Massachusetts USA: MIT Press, 1992.
- 8 董玉德, 谭建荣. 有向图几何约束搜索技术的研究[J]. 模式识别与人工智能, 1998, 11(3):359~364.
- 9 Dong Yu-de, Zhao Han. A new Algorithm for the solution of under constraint graph in sketch drawing[J]. CADDM, 2001,

11(1):26~32.

- 10 董玉德,谭建荣,赵 韩等. 基于约束参数化设计技术的研究现状分析[J]. 中国图象图形学报,2002,7A(6):532~538.
- 11 Dong Yude,Zhao Han,Tang Jianrong. Research on search and recognition for constraint based on comprehension of graph[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003,16(1):42~45.



董玉德 1966 年生,2000 年获浙江大学博士学位,2003 年 5 月在合肥工业大学完成博士后研究,现任合肥工业大学机械与汽车工程学院副教授,硕士生导师。主要研究方向为计算机辅助设计与图形学、协同设计。主持安徽省自然科学基金、安徽省教委科研基金和企业联合科研项目 6 项,获高校科技进步一等奖 1 项。在各类学术刊物上发表论文 40 余篇,EI 收录 10 篇,出版著作 3 部,参编著作 1 部。

E-mail:dongyud@ustc.edu.cn



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 150 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。参加和主持过国家自然科学基金、国家重点项目攻关等 20 多项课题,获省部级科技进步一等奖 1 项,二等奖 3 项,三等奖 2 项。发表论文 60 余篇,出版专著 1 部,参编著作 3 部。

李道伦 1972 年生,1998 年获合肥工业大学计算数学专业硕士学位,现为中国科学技术大学计算机科学与技术系讲师,在职博士生。主要研究方向为计算机辅助设计、图像理解及神经网络等。