

基于几何推理的布局设计新方法*

袁苗龙 周 济

(华中理工大学 CAD 中心 武汉 430074)

摘要 面向约束的布局设计问题一直是布局研究的热点,本文提出了一个基于几何推理的布局设计生成算法,其最大优点就是充分利用参数化设计的优点,建立了影响布局设计的变量之间的关系,该算法具有较强的柔性,易于扩充,并支持约束一致性检测和影响布局设计参变量的局部修改,算法已在作者研制的车身内布置设计系统中得到了较好的应用。

关键词 布局设计,几何推理,几何约束,参数化设计。

中图法分类号 TP391

布局问题是一个复杂的组合优化问题,对它的研究目前大多为启发式方法。^[1~3]在传统的 CAD 系统中,布局设计很少作为一个重要领域的设计问题来解决,一般只采用参数化设计并辅以复杂的交互手段来产生影响布局效果的主要参变量,采用这种方法只能处理极简单的布局问题,很难捕捉设计师的设计意图,也难以支持设计过程的管理。胡慧中^[4]等提出的布局模型立体正交结构图(SOSG)限于立方块的布局,Chen^[5]等人给出了矩形容器及物体的线性混合整数规划的布局问题,布局物体数目少,但约束数目却很大,布局问题目前主要有以下问题:

(1) 布局对象结构形状复杂,难以精确数学建模,一般不同的布局问题采用不同的复合建模策略。

(2) 布局信息难以表达,还有领域性问题带来的困难。

(3) 设计的三维特征和约束的复杂性,难以用精确的代数方程求解。

(4) 布局信息提取、自动描述、转换等技术难以实现。

基于约束的布局设计方法,其最大优点就是建立了影响布局设计的变量之间的关系,同时又是约束驱动,具有较强的自适应性和灵活性。本文提出的基于约束的布局设计方法,充分利用参数化设计的优点,并提出了一个基于几何推理的生成新算法,该算法易于扩充,支持约束一致性检测、并支持布局设计的局部参变量修改,算法已经在我们研制的车身内布置设计系统中得到了较好的应用。

* 本文研究得到国家 863 高科技项目基金资助。作者袁苗龙,1970年生,博士,主要研究领域为 CAD,智能设计, CAD/CAM 集成。周济,1946年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为 CAD,优化设计,智能设计。

本文通讯联系人:袁苗龙,武汉 430074,华中理工大学 CAD 中心

本文 1997-01-13 收到修改稿

1 基于约束的布局设计模型

假定布局空间和布局物体都已知,分别定义为: $LS, \sum_{i=1}^n P_i, N$ 表示布局物体的数目.

布局求解问题实质上是布局物体的布局求解顺序和定位方法的确定问题. 布局求解顺序的确定要考虑到一定的经验、法则并加上一些约束的影响,并利用其它约束对该顺序进行调整,最终形成一个有序集合. 在已知布局顺序的基础上,布局设计生成算法通过约束检测与求解,逐步确定满足约束的布局物体. 因此,如何对布局中的约束进行描述,对整个问题的求解起着关键作用. 本文定义如下

$$type(void * P_1 \rightarrow ele1, void * P_2 \rightarrow ele1, struct DimGraph * dim) \quad (1)$$

其中 *type* 为约束类型,如: *co_型*、*distance_型*、*angle_型*、*tangent_型* 等,本文共用了 27 种约束, $P_1 \rightarrow ele1, P_2 \rightarrow ele1$ 指满足某一关系的特定元素, *dim* 为影响布局设计的参变量的数据结构,当被 *co_型*、*tangent_型* 等约束时,令 $dim = NULL$.

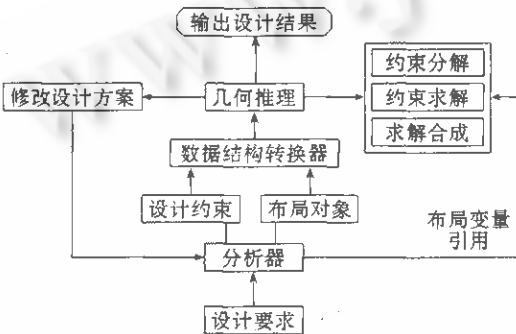


图1 面向约束的布局设计模型

布局设计中,受约束的元素包括几何元素、拓扑元素、语义变量以及这些元素的领域属性,因而用这种表示方法可以将布局物体及它们的相互位置关系进行描述. 一般表示成四元组形式:

$$LS = (\sum P_i, F, C, X).$$

F 为求解约束的方法集, *C* 为约束集, *X* 为影响布局设计的主要参变量集. 在进行设计过程中,通过约束进行几何推理,逐步推进设计过程,直到完全确定所有布局

物体的位置为止. 图 1 给出了面向约束的布局设计模型. 设计要求经由分析器过滤出抽象的设计约束和布局设计对象,经数据结构转换器转化为具体几何约束求解的布局信息,然后进行几何推理,逐步确定布局物体的位置.

2 几何推理算法

2.1 相关概念和标记

在给出详细算法之前,先引入相关概念和标记.

定义 1. 直接约束 *C*: 两布局物体之间必须首先满足的一种约束关系. 例如,在车身内布置中,当布局座椅时,首先必须满足的就是座椅定位在地板这个约束,然后再考虑与驾驶员的关系.

定义 2. 布局物体集的半序关系 $<$. 在设计中,布局物体求解的先后顺序关系用符号 $<$ 表示. 假定 $P_i < P_j$, 则保证 P_i 在 P_j 之前求解. 该关系满足自反性、传递性和反对称性,因此是一种半序. 本文假定 $P_i < P_j$ 等价于 $P_j > P_i$.

定义 3. 布局物体 P_j 的前序集和后序集. 布局物体的前序集和后序集分别定义为

$$PRED(P_j) = \{P_i | P_i < P_j, i \neq j\}$$

$$SUCC(P_j) = \{P_i | P_i > P_j, i \neq j\}$$

前后序集确定了布局物体的求解顺序,即任何物体必须在 $PRED(P_j)$ 求解之后和 $SUCC(P_j)$ 求解之前进行求解.

定义 4. 布局物体 P_j 的前序约束集、后序约束集和布局参考集分别定义为

$$CPRED(P_j) = \{P_i | P_i < P_j \text{ 且 } C(P_i, P_j), i \neq j\}$$

$$CSUCC(P_j) = \{P_i | P_i > P_j \text{ 且 } C(P_i, P_j), i \neq j\}$$

$$PSET(P_j) = \{P_i | \text{与 } P_j \text{ 有直接约束的所有布局物体}\}$$

$CPRED(P_j)$ 和 $CSUCC(P_j)$ 分别指定了在 $PRED(P_j)$ 和 $SUCC(P_j)$ 中与 P_j 有直接约束的集合.

从以上定义可以看出, $PSET(P_j) = CPRED(P_j) \cup CSUCC(P_j)$.

定义 5. 布局物体 P_j 的绝对状态向量定义为:布局物体 P_j 及 P_j 之前已布局过的物体 P_1, P_2, \dots, P_{j-1} 是否满足所有约束的 n 维向量表示,记为 $ASV(P_j) = (x_1, x_2, \dots, x_j, 0, \dots, 0)$, 其中

$$x_j = \begin{cases} 0 & P_j \text{ 未满足任何约束} \\ 1 & P_j \text{ 已满足部分约束} \\ 2 & P_j \text{ 已满足全部约束} \end{cases} \quad \text{其中 } P_i < P_j \quad (2)$$

显然, $x_1, x_2, \dots, x_{j-1} = 1$, 或 2.

定义 6. 布局物体 P_j 的相对状态向量定义为: P_j 与其某一参考布局物体 P_i 是否满足对应约束的 n 维向量表示,其中除第 i, j 个元素为非零外,其余都为零. 记为

$$RSV(P_{ij}) = (0, 0, \dots, x_i, \dots, x_j, 0, \dots, 0) \quad (3)$$

显然,以下 $RSV(P_{ij})$ 有 4 种可能:

$$\textcircled{1} RSV(P_j) = (0, 0, \dots, 2(i), \dots, 0, 1(j), 0, \dots, 0, \dots, 0)$$

$$\textcircled{2} RSV(P_j) = (0, 0, \dots, 2(i), \dots, 0, 2(j), 0, \dots, 0, \dots, 0)$$

$$\textcircled{3} RSV(P_j) = (0, 0, \dots, 1(i), \dots, 0, 1(j), 0, \dots, 0, \dots, 0)$$

$$\textcircled{4} RSV(P_j) = (0, 0, \dots, 1(i), \dots, 0, 2(j), 0, \dots, 0, \dots, 0)$$

一般地,如果 $x_i = 1, x_j$ 自动取 1; 如果 $x_i = 2$, 则把 P_i 与 P_j 的约束分解成子约束,然而调用函数 $cal_freedom(P_i \rightarrow ele1, P_j \rightarrow ele1, freedom, dim, matrix)$ (此函数是具体计算自由度 $freedom$ 的值,例如,两个平面共面(*co-plane*),则平移的自由度减少 1,旋转自由度减少 2,不再论述). 当自由度 $freedom$ 的平移自由度和旋转自由度都为 0 时, $x_j = 2$, 否则 $x_j = 1$, 记这个过程为 f_j , 并继续下一步,这样就可以算出 $ASV(P_j)$.

记 $\mu: RSV(P_{ij}) \rightarrow ASV(P_j)$, 则 μ 是确定 $ASV(P_j)$ 的值的映射,显然, μ 为 f_j 的递归合成,记为 $\mu = f_i \circ f_{i-1} \circ \dots \circ f_1$, 设 P_j 为一布局物体,在 $PSET(P_j)$ 中一元素 P_i , 我们只考虑 $P_i \in CPRED$, 因为如果 $P_i \in CSUCC$, 则方法类似.

2.2 几何推理算法

几何推理是整个布局设计过程的核心,几何推理的速度和稳定性决定原型系统的效率. 目前国内外对二维情形下几何推理的研究已取得了不少进展.^[6~8] 但对三维问题很少涉及. 本文针对三维几何布局问题,在现有参数化设计技术的基础上,提出了一种新的几何推理方

法. 该方法提高了布局设计的自动化程度, 同时将尺寸参变量变动后的限制在局部范围内. 该算法分为两部分.

算法 1. 确定布局物体的求解顺序算法, 记 $fun_order()$

(1) 完成初始化工作, 并对每一布局物体 P_j 做以下工作:

建立三元组 $LD = (P_j, PRED(P_j), SUCC(P_j))$,

令 $PRED(P_j) = \emptyset, SUCC(P_j) = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$,

$ASV(P_j) = (0, 0, \dots, 0), RSV(P_j) = (0, 0, \dots, 0)$;

(2) 根据一定的经验和法则, 初始决定布局顺序(用户输入), 并算出相应的 $PRED(P_j), SUCC(P_j)$;

(3) 对每一布局物体 P_j , 找出 $PSET(P_j)$, 并对 $PSET(P_j)$ 中的每一布局物体 P_m , 计算出 $CPRED(P_m), CSUCC(P_m) (m < j)$;

(3.1) 对 $CPRED(P_m)$ 的每一 P_n (要确定 $CPRED(P_m)$ 的求解顺序), 调用 $f_n: (RSV(P_{nj}))$, 算出 x_n , 并根据判断规则①~④判断 P_m 的约束满足程度.

如果 $x_n = 2, PRED(P_j) = PRED(P_j), CPRED(P_m) = CPRED(P_m) + P_n$. ($CPRED(P_j) + P_m$ 表示把 P_m 增加到 $CPRED(P_n)$ 的最后, 同样 $P_n + CSUCC(P_n)$ 表示把 P_m 增加到 $CSUCC(P_n)$ 的最前), 转(3);

否则 $PRED(P_j) = PRED(P_j) + P_n, CPRED(P_m) = CPRED(P_m)$ 转(3.1);

(3.2) 对 $CSUCC(P_m)$ 的每一 P_n (要确定 $CSUCC(P_m)$ 的求解顺序), 调用 $f_n: (RSV(P_{nj}))$, 算出 x_n , 并根据判断规则①~④判断 P_m 的约束满足程度.

如果 $x_n = 1, SUCC(P_j) = P_n + SUCC(P_j), CSUCC(P_m) = P_n + CSUCC(P_m)$, 转(3);

否则 $P_n + SUCC(P_j) = SUCC(P_j), CSUCC(P_m) = CSUCC(P_m)$ 转(3.2).

(4) 输出 LD . 可获得求解顺序.

我们通过上述算法得到驾驶室内布置设计中部分布置物与人体模型的求解顺序:

$$\begin{aligned} floor \rightarrow pedal \rightarrow human \rightarrow chair \rightarrow human \rightarrow steer \rightarrow human \\ floor \rightarrow human \quad floor \rightarrow human \end{aligned} \tag{4}$$

算法 2. 几何推理算法

(1) 建立已经定位的布局物体表, 记为 KPT , 尚未定位的布局物体表, 记为 UPT, UPT, KPT 为一堆栈, 其初始元素为用户给定的初始条件, 有本文开始假定, 知 $KPT \neq \emptyset$.

(2) 从 UPT 中弹出一元素, 记为 P_j , 调用 $fun_order()$, 确定某一参考布局物体 P_i , 显然 $P_i < P_j$, 先分解 P_i, P_j 的直接约束集为 add/or 结构的子约束集, 并相继调用且 $solve_type(P_i \rightarrow ele1, P_j \rightarrow ele1, freedom, dim, matrix)$ (此函数是具体解决式(1)型约束的方法, 根据自由度 $freedom$ 的减少而逐步确定 $matrix$. 在原型系统中作了具体的实现, 本文不再论述), 计算出 $ASV(P_j)$, 定位矩阵 $matrix$, 自由度 $freedom$, 布局变量结构 dim , 并赋进相应结构中. 根据式①~④, 可知 P_i 和 P_j 存在 4 种情况:

(2.1) P_i 已定位, P_j 也可定位, 则把 P_j 压进 KPT , 标记 $ASV(P_j)$, 转(2);

(2.2) P_i 已定位, P_j 只满足部分约束(未满足部分约束), 这时, 函数 $solve_type(P_i \rightarrow ele1, P_j \rightarrow ele1, freedom, dim, matrix)$ 作了缺省处理, 使 P_j 处于临时状态, 标记 $ASV(P_j)$, 转(2)后, 情况变为(2.3)、(2.4)两种;

(2.3) P_i 尚未定位, P_j 相对 P_i 已固定, 标记 $ASV(P_j)$, 把 P_i, P_j 看成 $P_j, solve_type(P_i \rightarrow ele1, P_j \rightarrow ele1, freedom, dim, matrix)$ 函数时, 按约束信息自动取不同的约束元素, 且 $ASV(P_j) = ASV(P_i)$ 转(2.2);

(2.4) P_i 尚未定位, P_j 相对 P_i 只满足部分约束(未满足其它约束), 标记 $ASV(P_j)$, 这种情况不可能出现到最后, 假设到 $P_l, j < l < n$, 此时情形转为(2.1)、(2.2)、(2.3)的其中一种, 并继续此过程, 直到 P_l 前的所有布局物体都定位为止.

(3) 判断约束不足的情况. 可以根据约束类型来确定自由度的下降, 来判断约束不足的情况. 当求解所有 P_j 与所有 P_i 的子约束后, 如果 P_j 的平移自由度, 旋转自由度中有一个为非零, $solve_type(P_i \rightarrow ele1, P_j \rightarrow ele1, freedom, dim, matrix)$ 作了缺省处理, 若不符合布局设计要求, 则提示用户作交互修改. 对循环约束, 由于其复杂性, 这种情况在布局问题求解中是很少出现的.

(4) 循环过程(2), 直到所有布局物体都定位为止.

上述几何推理算法与基于符号和代数的推理方法相比,较大程度地提高了求解的效率.该算法的推理时间与布局物体的数目呈线性关系,特别是对较为复杂的三维布局模型尤为明显.该算法还具有较强的通用性.

3 设计举例

以汽车驾驶室内部布局为例,由于车身内部的各部件的几何描述的复杂性,同时又要考虑人机工程学的要求,这给驾驶室内部布局设计带来很多困难.车身内部尺寸参数是相互制约、整体协调的,驾驶室内部布局的好坏,在很大程度上决定了车身设计的成败.基于几何推理的求解任务就是通过几何约束推理出每一布局变量的值,使之满足设计中的每一个约束.其最大优点就是建立了变量之间的关系,同时又是约束驱动,具有较强的自适应性和灵活性,这一点正是驾驶室内布置方案设计所需要的.

图 2 中,(a)是一个没有经过几何推理的汽车驾驶室内部的原始布局线框图,(b)是经过上述算法得到的汽车驾驶室内部的原始布局线框图,(c)为(b)的浓淡图.

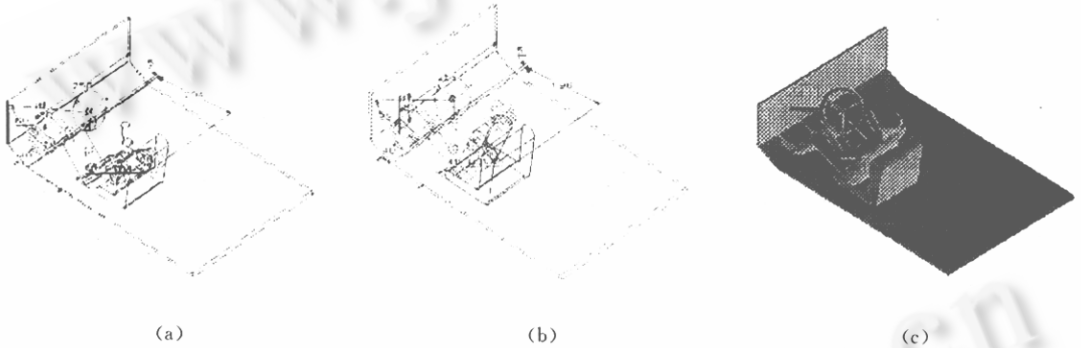


图 2

4 结 论

本文在研究国内外布局设计领域的有关技术上,利用参数化设计的优点,提出了一个新的几何推理算法,该方法提高了布局设计的自动化程度,同时支持布局设计的局部优化生成,大大减少了布局设计师的工作强度,同时又能捕获设计意图.该算法已在 TATUNG 工作站上用 C 语言实现,是我们目前正在研制的车身内布置设计系统中的关键技术.

参考文献

- 1 Bischoff E E *et al.* A comparative evaluation of heuristics for container loading. *European Journal of Operational Research*. 1990, **44**:267~276.
- 2 Montreuil B. Requirements for representation of domain knowledge in intelligent for layout design. *Computer-Aided Design*. 1990, **22**(2):97~108.
- 3 Krishnamuti R. 3-rectangulation; an algorithm to generate box packings. *Environment and Planning B*, 1979, **6**:331~352.
- 4 胡慧中等. 一种立体空间布局模型及布局算法. *计算机学报*, 1994, **17**(11):835~841.
- 5 Chen C S *et al.* An analytical model for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*.

- 1995, (2): 221~226.
- 6 高曙明等. PAD——一个基于几何推理的参数化设计系统. 计算机辅助设计与图形学学报, 1995, 7(2): 123~129.
- 7 葛建新等. 基于约束的形状自动求解新算法. 计算机学报, 1995, 18(2): 114~126.
- 8 Roller D. An approach to computer aided parametric design. *Computer-Aided Design*, 1991, 23(5): 385~391.

A NOVEL METHOD FOR LAYOUT DESIGN BASED ON GEOMETRIC REASONING

YUAN Miaolong ZHOU Ji

(CAD Center Huangzhong University of Science and Technology Wuhan 430074)

Abstract The constraint-oriented layout design problem is one of the hot spot in the research of layout field. This paper presents a layout generation algorithm based on geometric reasoning. Using the advantage of the parametric design, the algorithm sets up the relations between the parameters which determine the result of the layout design, also it has several advantages in flexibility, expansibility, local modification of the main parameter which is able to check the consistency of the constraints. The algorithm has been successfully applied to the cab interior layout design system.

Key words Layout design, geometric reasoning, geometric constraints, parametric design.

Class number TP391