

家装 CAD 中基于几何约束的 交互语义分析算法

关承恩¹ 戴国忠² 滕东兴² 张凤军²

(1. 中国科学技术大学, 合肥 230027;

2. 中国科学院软件研究所, 北京 100080)

摘 要: 阐述了几何约束的含义及其分类, 分析了几何约束在家装 CAD 中的重要性以及家装 CAD 中应用几何约束的实现难点, 给出了基于网格的前处理算法、基于约束优先级的交互语义分析算法和语义分析的后处理算法。基于网格的前处理算法可以对离散点进行自适应校正, 对数据进行动态更新, 对水平、垂直的处理十分方便; 基于约束优先级的交互语义分析算法可以自动捕捉用户的语义、处理几何对象之间的关系, 建立房屋的拓扑结构; 语义分析的后处理算法负责分析拓扑结构, 自动添加房间构件, 自动实施部分装修功能。最后提供了一个实例, 表明基于该算法的家装 CAD 系统在实际应用有良好的效果。

关 键 词: 计算机应用; 交互语义分析; 几何约束; 家装 CAD

中图分类号: TP 391

文献标识码: A

文 章 编 号: 1003-0158(2003)03-0021-10

几何约束是指几何约束系统中几何元素之间固有的约束关系, 它反映了产品在工程语义上的设计要求, 一般以几何设计参数为变元的约束方程式的形式提供。几何约束包含两种类型: 结构约束和尺寸约束。结构约束是指几何元素之间的拓扑结构关系, 描述了几何元素的空间相对位置和连接方式, 其属性值在参数化设计过程中保持不变。它在工程图中往往是隐含的, 并不明确给出, 如平行、垂直、共线、相切等。尺寸约束是通过图上的尺寸标注表示的约束, 例如距离、角度等。几何元素间的约束关系是由系统自动维护, 而不是由用户给出或调用某种处理程序来保持。在编辑几何元素的过程中, 可能出现过约束(over-constrained)和欠约束(under-constrained)两种情况, 过约束指多种几何约束同时满足导致冲突的情况, 欠约束指几何约束不足, 导致工程图中部分尺寸无法确定的情况^[1]。

几何约束从发展初期到现在一直在用户接口以及交互领域扮演重要角色^[2]。一旦几何元素间的关系被指定为几何约束, 求解程序将自动在后续工作中维护该关系, 几何元素的属性

收稿日期: 2002-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60033020); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2001AA114170)

作者简介: 关承恩(1975-), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 主要研究领域为计算机辅助设计、图形学等。

(如位置和方向)将被正确设定。在当今的计算机交互绘图中,特别在非专业人员操作的绘图系统,如家装 CAD 系统中,更强调智能分析用户的输入,以减少用户的工作量。通常的方法是利用几何约束将工程设计知识与几何学、拓扑联系起来,运用几何推理,通过已知节点和几何元素间的位置关系求得未知节点。本算法的目的是尽量减少用户的干预,由 CAD 系统对整个系统的约束集进行分析和求解,并根据求得的数据,分析其拓扑结构,超前进行相关操作。为了实现上述各种意图,约束机制的引入就显得尤为重要。本文侧重于解决几何约束中的结构约束问题,目的是为了保证拓扑结构的正确性;对于尺寸约束问题的解决,一部分是通过网格捕捉实现,另一部分则作为后续的详细设计来解决。

在已经存在的交互绘图系统中,对于包含在几何约束系统中的几何元素,它们之间的关系求解通过以下两种方式得到:通过矩形网格;通过对几何约束满足问题(Constraint Satisfaction Problem, CSP)的求解。这两项技术都存在一定的局限性。矩形网格技术只能对特定关系中的一小部分进行识别。求解几何约束满足问题技术虽然功能强大,但是当多种约束同时满足时需要用户指定额外的语义,并且这些语义通常难于理解,操作起来也很费时,另外如何让用户简单地指定、调试和编辑约束模型也是难点之一^[3]。而在家装 CAD 绘图领域,由于用户通常不具备专业计算机知识,所以不应该由用户负责对交互语义的判断,同时由于墙体连接点的特殊逻辑含义的存在,对点元素和线元素之间的精确关系的保持提出了特殊要求。本文根据这些新的要求,提出了综合矩形网格和约束优先级的交互语义分析算法。

1 家装系统中几何约束的特点

1.1 家装 CAD 系统的功能

家装设计领域有大量的从业人员在用手工绘图,这样既效率低下,又不能够重用以前的设计结果。家装 CAD 系统提供了大量简便的交互手段和丰富的功能。具体包括:

(1) 2D 和 3D 图形的相互转换。设计过程是反复修改、逐步逼近的过程。房屋的结构设计主要用二维图形,设计结果的查看需要三维图形,2D 与 3D 图形进行相互转换,为设计绘图提供极大方便。

(2) 参数化设计功能。参数化设计一般是针对图形对象的结构形状比较定型,可以用一组参数来约定尺寸关系,主要用于家具尺寸的缩放。在参数化设计的过程中,用户无需进行干预,由 CAD 系统对整个图形对象的约束集进行分析和求解。

(3) 三维几何模型的显示处理功能。系统应具备动态显示模型、消隐、渲染、贴纹理的能力,以便设计者能直接观察、构思和检验设计结果、解决三维几何模型设计的复杂空间布局问题。

(4) 图形处理功能。包括画图、编辑功能,图形输出,标准图形文件的读入。

1.2 几何约束在家装 CAD 中实现的难点

家装 CAD 系统中的二维部分负责向三维场景提供数据,因此二维数据的产生必须是精确的,这就意味着点、线段、曲线之间必须保持特定的关系。为了方便用户使用,将用户在交互过程中的输入减至最低,就要求系统在没有用户的干预下应该能自动保持几何对象之间的关系。

在上述情况下,必须采用基于几何约束的方法,才能自动完成预定功能,而基于几何约

束的系统难于控制。首先是当存在过约束情况时,约束求解问题无解,出现这类问题的原因可能是约束之间的相互作用,因此也就难于判断和调试^[4]。如果多种约束关系同时满足,为了使求解结果尽量符合设计意图,一方面需要从有效的求解序列集合中寻找尽量符合设计意图的求解序列,另一方面需要在求解过程中从多个可能解中寻找尽量符合设计意图的解^[6]。即使是能够找到一个解,系统也必须帮助用户理解怎么样和为什么到达了一个新的状态。尤其是在新的状态并不是用户所希望的状态时,此项任务显得更为重要和困难。造成这种状态差别的原因可能是由于约束模型中的错误,也可能是求解程序错误地选择了约束的类型。其次是用以表示约束关系的一组非线性联立方程组通常有多个解,具体表现在可能存在多个求解序列。最后是为了满足一种约束关系,可能同时移动许多点,这将彻底改变整个场景^[3]。因此在家装 CAD 系统二维部分中,表示和控制所有的约束和可能的结果是非常困难的。从多种约束关系中提取出最正确的约束关系,必须对约束关系区分优先级别,从而判断用户语义的强弱。基于工程知识的几何约束关系表示、几何约束满足问题的求解和将约束关系映射到用户语义分析是其中的难点。

2 交互语义分析模型的建立

2.1 基于优先级的几何约束关系的分析

几何约束系统可以用有向图的形式表示, $G=(V, C)$ 中几何元素以图的顶点表示,而几何元素之间的几何约束关系以图的边表示,则一个几何约束系统就可以利用图来等价表示,称为约束图。几何元素集 V 中的几何元素与约束图中的顶点一一对应,约束集 C 中的约束关系与约束图中的边一一对应。对于通过求解约束满足问题得到的图的顶点,它的入度数至少为 1。如图 1 所示,从 p_1 开始,通过水平约束和距离约束 d ,得到 p_2 。以此类推,得到求解次序 $p_1 \quad p_2 \quad l_1 \quad l_3 \quad p_3 \quad l_2$ 。

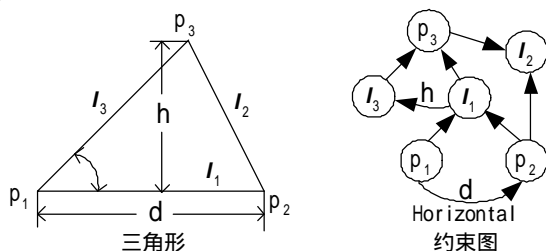


图1 几何约束系统的约束图表示

基于 1.2 节所述的几何约束在家装 CAD 中实现的难点,本节提出基于优先级的约束表达方式。一旦出现多种约束同时满足的情况,求解程序将按照约束优先级由高到低的顺序来求解,从而方便地处理过约束问题。与此同时,由于最初的输入总是存在的,即使后续处理未改变最初的输入,也不可能出现欠约束的情况。根据家装 CAD 系统的特殊需求,将对象之间的关系依据构造时所需的输入参数个数为 0 个、1 个、2 个分为以下 3 组构造形式。

构造 0 通过已知 x 或 y 坐标,构造一条水平或者垂直的直线。

构造 1 通过点 A ,构造一条经过 A ,具有指定斜率或者角度,到 A 的距离为已知量的线段,或者以 A 为圆心,指定长度为半径的圆。

构造 2 通过点 A 和 B , 构造线段 AB , 或者构造平行于 AB , 到 AB 的距离为已知量的直线, 或者构造 AB 的中点。

家装 CAD 系统中, 用户在二维部分的主要任务是建立房间的拓扑结构, 特别是在绘制草图时, 由于没有尺寸的显式约束, 拓扑结构的保持完全要利用相邻几何元素之间的隐式约束, 例如垂直、水平、相交等。在添加墙体的操作中, 有如下 3 类几何约束关系要求: 保持新墙体加入时的原有方向; 为了保持新墙体加入时的方向, 在不改变已有墙体方向的前提下, 可以修改已有墙体的数据, 使得墙体连接点能够合一; 已有墙体连接点到新墙体端点的距离小于指定误差, 并且已有墙体连接点的改变会影响原有墙的水平或垂直方向时, 改变新墙体的数据。根据以上分析的家装 CAD 系统中对数据的特殊需求, 以及几何对象间的约束关系, 按优先级由低到高的顺序, 对几何约束满足问题的求解作如下表达:

(1) 保持新建的水平墙和垂直墙的原有方向, 由构造 0 实现, 如图 2(a)所示。

(2) 新建墙的水平或垂直方向不变, 改变已有墙体的数据并且已有墙体原来垂直或水平方向不变, 由构造 0 和构造 1 实现, 如图 2(b)所示。

(3) 已存在墙的端点不可变, 且该端点距离新加入墙端点的距离小于指定误差, 则新建墙的端点数据改变, 由构造 3 实现, 如图 2(c)所示。

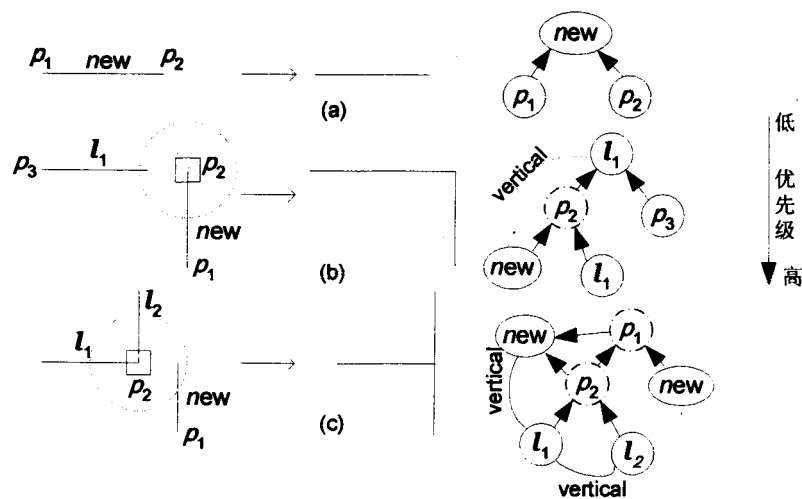


图2 约束关系分类示意图及约束图

在图 2 中, 以虚线标识的图的顶点意指该节点所代表的数值原本存在, 但经过约束满足问题求解之后可能发生变化。

在约束关系表达图 2(a)中, 绘制一条水平线时, 即使有的倾斜, 只要其与水平线的夹角在误差域值之内, 系统也会认为用户在绘制一条水平线。但是用户绘制水平线时所允许的偏差也是有限的, 当超过了某个限度的时候, 系统会认为用户绘制一个与水平线有一定倾角的直线。在约束关系表达图 2(c)中, 之所以 p_2 的坐标不变, 是因为不相邻的几何元素之间可能存在隐式的结构约束, 例如在 l_1 的另外一个端点可能存在一条线段 l_3 平行于 l_2 。如果改变 p_2 的坐标, 将影响到 l_2 的方向, 进而影响到 l_2 与 l_3 的平行关系, 故 p_2 的坐标不变。new 的端点坐标调整到 p_2 之后, new 原本铅垂的方向改变, 所以调整 new 的另外一个端点 p_1 , 以保证 new 的原有方向^[5]。

2.2 交互语义分析模型的表达

对于使用系统的用户，所能用到的语义有如下两大类。

(1) 建立房屋拓扑结构时需要分析的语义

- 1) 画单独一堵墙(游离墙)，例如水平墙或者垂直墙；
- 2) 用一堵墙将另外两堵墙连接起来，并保证新建墙的方向；
- 3) 用一堵墙将另外两堵墙连接起来，并保证原有墙的方向。

(2) 对当前拓扑结构的分析和相应处理

- 1) 针对当前房屋的设计进度，自动添加房间构件；
- 2) 对于加入的门窗等构件，自动进行后续装修。

针对上述的两类语义分析，分别做如下说明。房屋拓扑结构的建立是通过分析新建墙与已存在墙的几何约束关系来实现的，此过程的主要出发点是墙体连接点，它的含义是两堵或者两堵以上的墙的交点。对于不与其它墙体发生任何关系单独一堵新建墙，不进行处理，直接生成墙体数据即可。一旦新建墙的端点靠近墙体连接点，即上述(1)\2)和(1)\3)两种情况，此时要么墙体连接点数据调整，要么新建墙的端点数据调整，以保证墙体连接点的逻辑含义，具体调整哪一部分数据，按照2.1节所述的几何约束关系的优先级来区分，找到对应的约束关系之后，进行相应的求解，调整对应数据，即可建立几何对象间的正确关系。更复杂的语义动作可以由以上3种语义组合生成。如图3所示，图3(a)中两个墙体连接点由于不可调整，故新建墙体校正到墙体连接点上，如图3(b)所示，由于上部的墙体连接点可以调整，且不影响已存在的墙体的水平方向，故可调整至新建墙体的端点上。

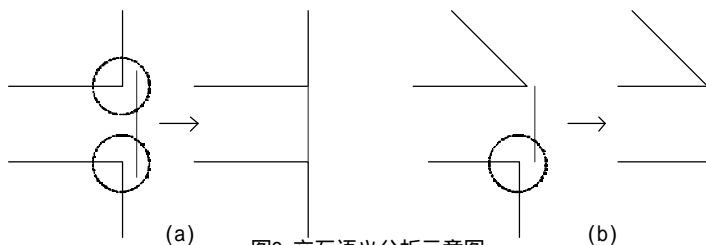


图3 交互语义分析示意图

对当前拓扑结构的分析和相应处理，是在拓扑结构建立的基础上，分析由几何对象组成的整体的房屋模型，应用工程知识，推断用户下一步将要进行的动作。例如，在由墙体围成的封闭空间，在逻辑意义上已经是一个房间，那么对房间的基本操作应该在房间形成的瞬间自动完成，而不是等到用户去手动实施该操作。对房间的操作主要是踢脚线的加入，光照效果的生成。这样就实现了真正的人机交互，用户不断输入墙体的起点和终点坐标，系统对其进行处理，建立房屋拓扑结构，自动进行部分装修，从而大大减少用户的输入。图4所示为交互语义分析模型表达图。

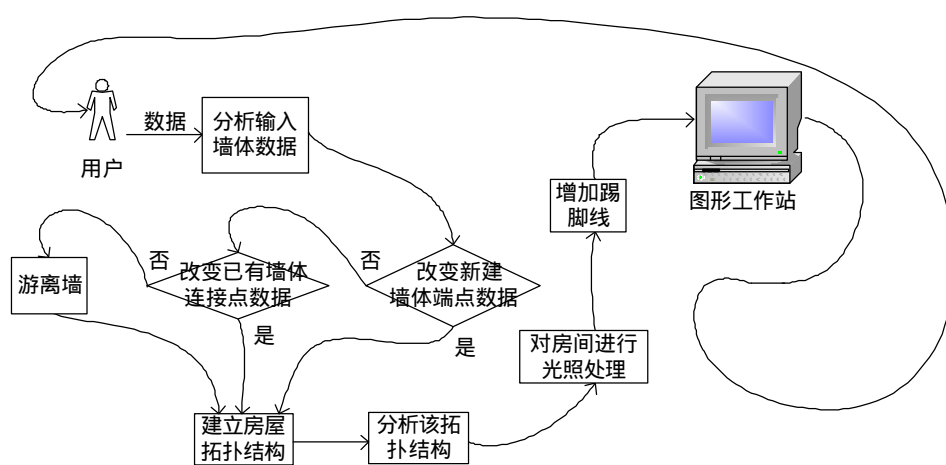


图4 交互语义分析模型表达图

3 交互语义分析的算法

3.1 基于网格的前处理

在进行计算机交互式绘图中，当用户进行徒手绘图的过程时，输入的数据任意的。这样的会对有效点的捕捉带来不便，例如当处理两个坐标接近一致的节点时，由于两个坐标间存在一定的距离，造成在比对两个坐标时会产生相反的结果。为此，本节利用网格剖分，对输入数据进行预处理，将原本连续的输入域离散化为由网格单元组成的集合。本小节所述的处理只限于预处理，在后续计算中，数据可能发生变化。

以墙体宽度的一半为单位(unit)，将二维交互绘图的场景分成网格，此网格只是对数据进行预处理，即对输入数据做局部调整，故不会显示在交互式场景中，用户也不能干预。对 x 、 y 坐标作如下 3 步处理：

$$\text{令 } countx = \left\lfloor \frac{x}{unit} \right\rfloor, \text{ county} = \left\lfloor \frac{y}{unit} \right\rfloor$$

$\text{if } x - countx * (unit + 1/2) \text{ then } x = unit * (countx + 1) \text{ else } x = countx * unit$

$\text{if } y - county * (unit + 1/2) \text{ then } y = unit * (county + 1) \text{ else } y = county * unit$

在输入墙体坐标之后，前处理程序经过上面 3 步，将 x 、 y 坐标调整到距离其最近的网格上，为网格单位的倍数。如图 5 所示，前处理程序将输入坐标向 x 、 y 坐标系正方向调整至相应的网格上。处理之后的坐标值由于是单位的倍数，原本接近的特征点就可以完全重合。前处理程序也因此可以承担部分交互语义的实现，例如图 5(c)所示，网格之外的墙体由于前处理程序的调整，使得两堵墙实现相交，并且保持原有墙与新建墙的方向不变，而这正是用户想要输入的信息。

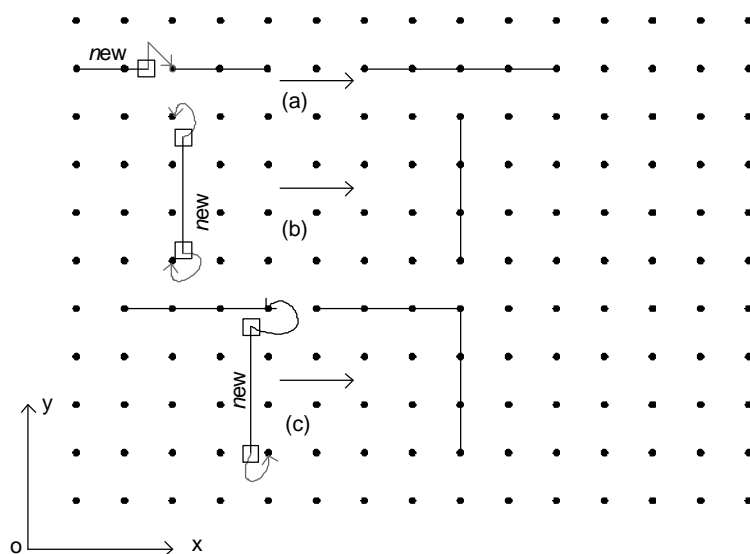


图5 基于网格的前处理示意图

3.2 利用约束知识建立房间拓扑结构

在用户进行计算机绘图时，通过鼠标或者笔的交互方式输入新建墙的起点和终点坐标之后，对其进行前处理，输出离散化的坐标，如图5(a)所示。对输出两坐标组成的线段，与已经存在的所有墙体求交点，查看是否被截断。如果被截断，则输出被截断后的线段的端点坐标。此时可以利用2.1节所述的约束关系，对新建墙的端点坐标进行处理。具体处理分3种情况：游离墙，保持墙体方向不变，如图2(a)所示；与其它墙体相交，改变其它墙体的坐标不影响其原有方向，则调整其它墙体的坐标，如图2(b)所示；与其它墙体相交，但改变其它墙体的坐标影响其原有方向，则调整新建墙体的坐标，如图2(c)所示。此处所运用几何约束的优先级，对3种坐标调整动作进行排序，具体如图4所示的过程，一旦优先级高的约束关系满足之后，就直接建立房屋拓扑结构，而不再检测优先级低的约束关系。

图6(b)所示为通过以上处理之后得到的拓扑结构。由于墙体具有一定的宽度，那么就涉及内外墙面的区分，将由墙体线段围成的多边形向内法线方向移动 $1/2$ 墙宽，即形成内墙面，向外法线方向移动 $1/2$ 墙宽，即形成外墙面，如图6(c)所示。图6所示为拓扑结构的建立过程。房间检测时所采用的方法不是根据墙体直接查找^[8]，而是根据墙面的顶点来寻找闭合空间，由于墙面顶点只能是两个墙面的公共交点，故不存在任何二义性。如果该闭合空间内不含有墙体顶点，则该闭合空间为最小闭合空间，是待查找的房间，否则不是房间。如图6(c)所示，由外墙面围成的闭合空间内包含墙体连接点，所以它不是房间；而由内墙面围成的闭合空间则形成房间。

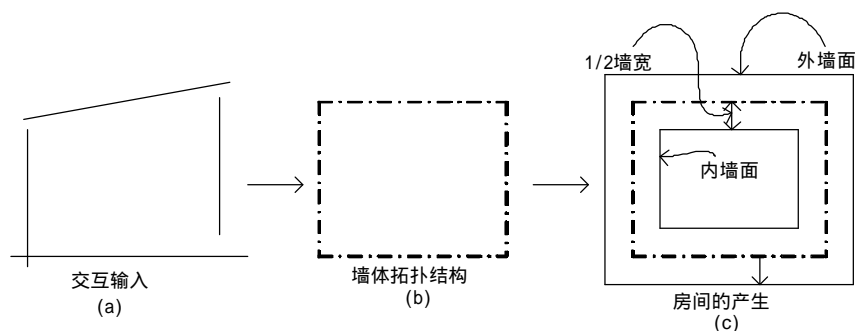


图6 拓扑结构建立过程

3.3 语义分析后处理算法

本节分析 3.2 节建立房间拓扑结构，从中提取出当前的设计进度信息，由此推断用户的下一步可能进行的操作，并具体执行该操作。此处需要将工程知识和人的思维结合在一起，例如，一旦房间产生之后，用户可能得到房间的雏形，如果这个过程是在没有用户的干预自动完成的话，那么这将是一个具有一定智能的家装 CAD 系统。从工程上讲，一个房间是应该有踢脚线，有一定光照，墙面有纹理等等，这些处理对于一个房间来讲是必须的。

用户语义的分析过程为如下 5 步：

- (1) 分析房屋拓扑结构，检测是否有房间；
- (2) 如果不存在房间，转 (5)；
- (3) 在房间中加入踢脚线，添加光照和墙面有纹理；
- (4) 如果房间存在类型，例如卧室或者客厅，则套用相应的布局模式，进行预装修；
- (5) 返回，重新等到用户的输入。

3.4 实 例

由于交互语义的分析模型的实现始终是在后台进行，不可能通过显示的交互实例来观察语义的分析过程，故通过图 7 来示意交互语义分析前后的结果。其中矩形为墙体，标号为墙体加入顺序，黑点为墙体端点或墙体连接点。图 8 为实际的系统中应用上述算法进行处理后，所实际产生的结果，其中二维和三维部分是联动的，即二维部分的任何修改将在三维部分立即得到体现。在二维平面上建立前 3 堵墙时，由于没有围成一个房间，故在三维部分显示的只是 3 堵墙（如图 8(a)、8(b)和 8(c)所示），在加入第 4 堵墙之后，形成了一个封闭空间，在逻辑意义上即产生一个房间，故自动进行相应的装修动作（如图 8(d)所示）。在加入门和窗之后，自动进行包门和包窗的动作（如图 8(e)所示）。

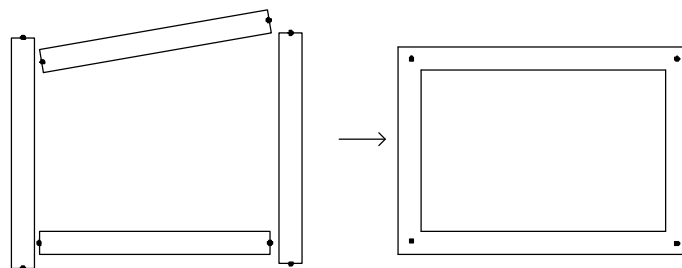


图7 实例示意图

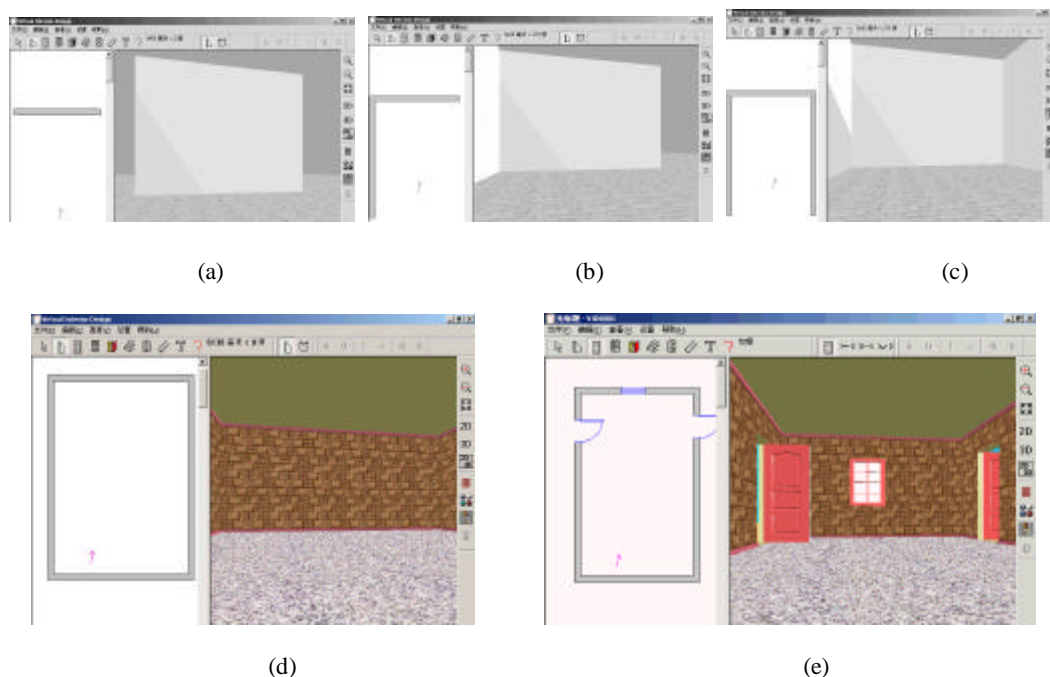


图 8 实际系统示意图

4 结 论

笔者从几何约束的含义及其在家装 CAD 中的重要性出发,根据家装 CAD 中应用几何约束的实现难点,构造了基于网格的前处理算法、基于约束优先级的交互语义分析算法及语义分析后处理算法。上述算法完成对用户语义的分析,建立房间拓扑结构。在分析拓扑结构的基础上,自动完成部分装修功能。该算法实现了家装领域内在如下两方面的语义分析: 建立房屋拓扑结构; 房间构件的自动添加。该算法综合了网格运算和约束的优点,以家装 CAD 系统的实际需求为基础定义的 3 种基本约束类型能方便快捷地处理欠约束、过约束等多种约束情况;并以拓扑结构为基础,智能分析用户的语义,减少用户的输入,实现真正的人机交互。最后提供的实例表明基于该算法的家装 CAD 系统在实际应用中取得了满意的效果。

参 考 文 献

- [1] 孙家广. 计算机辅助设计技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 215~227.
- [2] Sutherland I E. Sketchpad: A man-machine graphical communication system [A]. In Proc. AFIPS Spring Joint Conf [C]. 1963, 329~346.
- [3] Eric Bier, Maureen Stone. Snap-Dragging [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1986, 20(4): 233~240.
- [4] Michael Gleicher, Andrew Witkin. Drawing with constraints [J]. The Visual Computer, 1986, 20(4): 233~240.
- [5] Dong Yude, Zhao Han, Tang Jianrong. A new algorithm for the solution of under constraint graph in sketch drawing [J]. CADDM, 2001, 11(1): 26~32.

- [6] 袁 波, 李彦涛, 胡事民, 等. 一种几何约束系统分解算法[J]. 清华大学学报, 2000, 40(1): 65~67.
- [7] Sherman R Alpert. Graceful interaction with graphical constraints [J]. IEEE Computer Graphics and Application, 1993, 13(2): 82~91.
- [8] Rick Lewis, Carlo Sequin. Generation of 3D building models from 2D architectural plans [J]. Computer-Aided Design, 1988, 30(10): 765~779.

Geometric Constraint-Based Interactive Semantic Analysis Algorithm in Home Decoration System

GUAN Cheng-en¹ DAI Guo-zhong² TENG Dong-xing² ZHANG Feng-jun²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Institute of Software, The Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: The signification of geometric constraint and its classification are introduced , the importance of geometric constraint and its implementation difficulties in home decoration system are discussed. Then three successive algorithms are established. The algorithm of data adjustment based on grid can adjust discrete point itself, dynamically update data, it is convenient to handle horizontal line and vertical line. The algorithm of user's interactive semantics analysis based on constraint priority can catch user's semantics automatically, handle geometric objects' relations and build the topology of home. Later transactions analyze the topology, add widgets to home and partially decorate home automatically. At last an instance is provided which shows that the decoration system using this algorithm has achieved satisfying effects.

Key words: computer application; interactive semantic analysis; geometric constraint; home decoration CAD