

基于特征线素的三维建筑表意性建模^{*}

吴康乐, 张宏鑫⁺, 李姬妹, 钱博磊

(浙江大学 计算机辅助设计与图形学国家重点实验室, 浙江 杭州 310058)

Fe-Wires: An Approach of Expressive 3D Architecture Modeling

WU Kang-Le, ZHANG Hong-Xin⁺, LI Yuan-Shu, QIAN Bo-Lei

(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhx@cad.zju.edu.cn

Wu KL, Zhang HX, Li YS, Qian BL. Fe-Wires: An approach of expressive 3D architecture modeling. *Journal of Software*, 2010,21(Suppl.):75-85. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10009.htm>

Abstract: In this paper, a light weight architecture modeling approach based on feature wires is proposed, which is called Fe-Wires. The approach is a procedural modeling method based on shape grammar. In the method, 3D models are reconstructed based on inputting and manipulating feature wires of architecture objects to overcome the interaction weakness of original rule-based approaches. To interactively tuning complex architecture models, we present a global deformation model which uses axis-aligned spring constraints. Different from previous nonlinear optimization methods, our approach only need to solve a convex quadratic problem which can be efficiently solved in real time. The presented experiments show that our method can be applied on the real applications for interactive modeling inner and outer part of buildings.

Key words: 3D architecture modeling; shape grammar; feature wires; deformable editing

摘要: 提出了一种基于特征线素的轻量级三维建筑交互建模方法,称为 Fe-Wires 方法.该方法是一种基于形状文法的过程式建模方法,通过间接地输入和操纵建筑对象的特征线条来重构模型,克服了原有基于规则的建模方法交互能力弱的缺点.为了便于对复杂建筑对象进行交互调整,给出了基于轴向弹性约束的整体形变模型.区别于传统非线性约束求解方法,该方法只需求解一个二次凸规划问题,具有很高的求解效率.实验结果表明,该方法适用于建筑室内外交互建模的实际应用.

关键词: 三维建筑建模;形状文法;特征线素;形变编辑

人类的生产与生活不可避免地依存于一定的建筑环境.为此,在全球信息化的背景下,大到城市规划、灾难安全预案、反恐快速反应,小到家庭装修、管线维护甚至虚拟游戏场景的设计,人们都希望获取数字化的三维建筑模型信息来辅助决策和分析.同时,以 Google Earth 为代表的全球 3D 地理信息系统(GIS)的迅猛发展,使得人们更为迫切地想通过三维信息的交互,与整个世界互联.另一方面,图形信息获取的设备发展,特别是数码相机和图像扫描的普及以及三维激光扫描的使用,刺激了基于建筑模型信息的虚拟现实应用发展.因此,三维建筑模型的创建与编辑成为当前计算机图形学研究中的一个重要课题.

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.61070073 (国家自然科学基金); the National Key Technology R&D Program of China under Grant No.2007BAH11B00 (国家科技支撑计划项目); the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China under Grant No.Y1080669 (浙江省自然科学基金)

Received 2010-05-15; Accepted 2010-08-16

三维建筑建模的复杂性,使得该问题的研究与应用都存在着巨大的挑战.首先,三维建筑模型结构的复杂性,造成普通人群即使借助于计算机系统对其直接认知仍然存在困难.由此,对于三维建筑模型信息,如何进行合理地表示、编辑与存储,从而有助于高效地分析与应用成为一个科学问题.其次,三维建筑模型的交互设计具有高度的复杂性.现有主流商用专业建模软件,如 AutoCAD、Maya 等,虽然功能强大且精度高,却因操作复杂、学习门槛高以及建模效率低等弊端,一直未能很好地适用于各类建筑相关的虚拟现实应用.可以看到,这不仅是因为传统建模系统未能针对建筑模型结构复杂以及功能性强的特点设计出有效的表示与处理方法;而且由于传统方法一直拘泥于点、线、面等基本几何元素提供通用三维操纵与交互,缺乏有效直观的、能承载高层语义信息的三维交互方法.值得指出的是,即使是 Google 公司推出的 SketchUp 软件仍旧属于传统建模软件的范畴,因此仍然无法很好地解决以上提出的问题.

事实上,在诸多与三维建筑有关的虚拟应用中,用户的主要目的是能高效清晰地表达、展现与分析建筑空间关系,包括建筑本身各个元素之间的内在联系.本文中,我们把这种“快捷+达意”的建模诉求称之为:表意性.基于这一理念,本文提出一种轻量化的交互式建筑建模方法,我们的工作主要有以下 3 方面贡献.首先,为了化解三维建筑表示的复杂性,将其建模特征与一组三维线素,借助于过程式的建模规则融合在一起.其次,基于此提出了一套基于特征线素的三维建筑交互设计范式.最后,我们针对三维建筑变动编辑的难点问题,创新地提出了一种轴向弹性约束模型,对建筑部件之间的几何关联关系可进行统一地建模和高效地优化求解.

1 相关工作

当前最为有效的建筑建模方法是基于形状文法(shape grammar)的过程式建模.该类研究以 Müller 和 Wonka 及其合作者为代表,他们以 George Stiny 发明的形状文法^[1]为基础,将建筑学的专业知识引入到面向图形学应用的三维建筑自动生成^[2].这类方法具有表示紧凑、泛化能力强等特点,因而在好莱坞电影制作以及建筑设计中都得到了广泛的应用.但美中不足的是,所需的计算模型与规则设定,只适合于专业人士理解与运用,大大限制了该方法的应用范围.虽然其后,Lipp 等人试图在形状文法建模技术中引入交互式设计方法^[3],仍然存在实现复杂、对建筑模型修改不直观等缺点.

为能化解直接人机交互带来的困难性,部分研究者则采用图像作为参考信息,与构造规则相结合,用于半自动的三维建筑模型生成^[4,5].类似地,Chen 等人采取草图交互手段^[6],通过概率模型识别用户交互意图,驱动相关建模规则,最后生成风格化的三维建筑.由于主要面向处理建筑物的外立面信息,因此此类方法并不涉及建筑物内的内容创建.但是,本文课题的应用背景恰需要做到对建筑内外部都能够进行高效地建模,所以如何合理地运用基于规则的建模方法并融合交互设计带来了挑战.

传统的特征造型方法^[11],通过各种参数来定义几何形状和约束关系,曾被广泛地应用于各类机械和建筑设计.然而,具体形状参数的定义甚为复杂,并未能有效化解三维建筑表示的复杂性.同时,三维模型的创建通常需要构造复杂的几何约束模型,而且大多数场合只能针对特殊情况给出近似的优化求解^[12],因而此类方法的研究一直进展较为缓慢.

本文方法主要受 Gal 等人“iWires”三维网格变形方法^[7]的启发.这一方法的主要思想是先提取三维网格模型的特征线段,进一步作轻量级的几何形状分析,获取局部几何正则性、形状关联等关系.然后,用户操纵部分特征线框的形变,与此同时 iWires 系统根据几何关联关系,通过优化特征线的变形过程,自动地推演出整个模型的形变变化,达到变动设计的目的.这一通用三维建模方法隐含地恢复了三维网格模型构建过程中的建模语义,而本文方法中我们在建模过程中就直接精确地记录下建模语义,用于后续的编辑重用.再者,由于建筑建模本身的结构化构造特点,本文的重点是如何将这种“分析+建模”的思想与基于形状文法的过程式建模结合起来,构造高效三维建模方法.

Cabral 等人提出了保持结构的纹理建筑场景形变方法^[8].这是一个将几何和纹理操作耦合在一起的建筑场景编辑方法.该方法构造了结构的优化模型,指定地面方向或墙壁的垂直角度等各类几何约束条件.但是,该论文的讨论重点是讨论如何在形状变动设计中,解决贴图纹理的变形问题.另一方面,该方法对于室内对象通过三

角形角柱相连求解,算法复杂性高而且并不适用于建筑内部布置.

2 方法概述

通过长期的生产实践,人们对三维建筑的构造总结出了一条普适的规律,即:三维建筑模型通常可以由一组特定的线条描述出来.这一原理被广泛地运用于绘画与建筑概念设计中.例如,在建筑绘图设计中,常通过描绘顶视、侧视等各类平面视图,用简单的线条来表示建筑单元(内外墙、门窗、通道以及楼梯等)的定位与构造.在本文中,我们将这些建筑建模中的抽象建模特征线条称为特征线素(feature wires)或简称为 Fe-Wires,而所提出的建模方法命名为 Fe-Wires 方法.

正是根据上述原理,我们提出了表意性建筑建模方法,通过保持特征线条及其相互关系,运用形状文法规则高效地生成三维模型.对于用户来说,则可降低建模劳动强度,从本质上把握三维建筑模型的生成和编辑.图 1 展示了我们方法的整体流程,该系统主要由两部分组成:

(1) 建筑模型创建.用户交互地逐一输入特征线素,系统通过解析用户的输入与调整线素,并调用相应建模规则,从而生成所需建筑模型.

(2) 建筑形变编辑.用户交互地调整部分特征线素,系统调用本文所提出的轴向弹性约束形变,更新线素的几何,进而对已创建的三维建筑进行所设想的修改.

在此系统中,用户只工作于建筑建模的语义层面,而不用涉及点线面、面片求交等各类底层的细节几何操作.

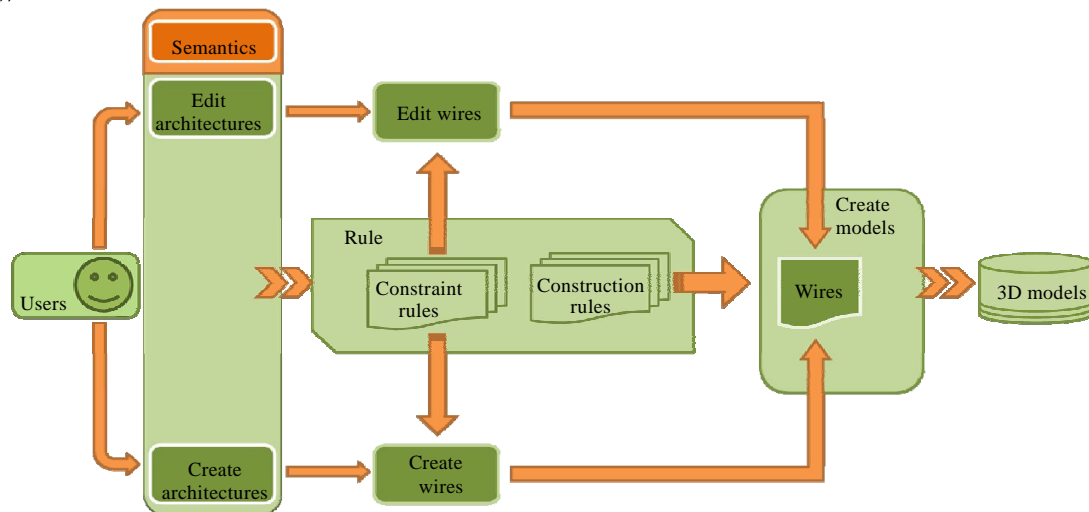


Fig.1 Workflow of Fe-Wires

图 1 Fe-Wires 方法的整体流程框架

3 建筑模型创建

在 Fe-Wires 方法中,三维建筑模型的创建是通过解析用户所输入的特征线素来完成的.这些输入的特征线素与对应的建筑建模语义命令(如构建地面,构建门窗等)以及建模规则相关联.采用特征线素作为三维建模交互的核心具有诸多优点.这样,可以很好地对建筑单元进行直观地定位,给定形状的尺寸、比例以及方向等参数,也减轻了用户的交互操作负担.

3.1 三维建筑建模的构造规则

受 Müller 等人工作的影响^[2],我们在 Fe-Wires 方法中将三维建筑模型视为由一组过程式建模规则迭代生成的结果.首先,我们将建筑建模的各种部件与元素,包括地面、墙壁、门、窗以及阳台等等,定义为形状单元.一个

形状单元可表达为一个四元组 $S=(N,G,B,P)$,其中 N 表示对象名称; G 表示单元的几何信息,本文中特指为多边形网格曲面; B 为带方向的几何包围盒,用于指定单元的位置、体量;而单元的其他属性包括建筑建模相关的纹理、材质等信息用 P 表示.其次,因本文方法主要应用于轻量级的快速建模,为此将特征线素 Fe-Wire 表示为由三维空间顶点序列 $W = \{p_i \in R^3 | i = 0, 1, \dots, n\}$ 所定义的一条分段线性折线,该折线允许封闭或不封闭.特别地,当一条 Fe-Wire 是由 4 个共面顶点所围成的封闭矩形时,称之为特征矩形,或简称为 Fe-Rect.

进一步,我们定义建模规则的范式为

$$id : pred : command : cond \rightarrow successor : prob \quad (1)$$

其中 id 表示规则的序号, $pred$ 是一个字符串用以表示将被作用规则的一个或一组形状单元, $cond$ 是标记为 $pred$ 单元的参数, $command$ 是建模命令, $successor$ 是根据规则取代 $pred$ 的一个或者多个形状单元.范式的最后一项 $prob$ 是概率判断条件,目的是引入建模的随机性,特别是纹理的随机性.

本文实现的 Fe-Wires 方法,在用于生成现代建筑建模时,主要采用表 1 所示的一组规则,称之为 Fe-Wires 构造规则.在构建墙体和地面时,Fe-Wire 主要用于指定单元的基线(footprint);而在构建门、窗、楼梯以及一般物体时,我们主要采用 Fe-Rect 来指定包围矩形.在表 1 中,Cond 一栏中的 Intersect 是一个求交判断函数,表示如果特征线素与形状单元有交点时返回 true,否则 false.另外,带有“with hole”的 $successor$ 表示系统自动根据求交结果,在对应形状单元的多边形网格上开洞.

Table 1 Example of construction rule for modern architecture in Fe-wires

表 1 Fe-wires 系统用于生成现代建筑的主要构造规则示例

Id	pred	Command	Cond	successor
1.	Field	Add		Field, Building
2.	Building	Add		Building, new Floor
3.	Floor	Add		New Floor
4.	Fe-wire	Wall	Floor	Wall
5.	Fe-wire	Ground	Floor	Ground
6.	Fe-wire, Wall	Window	Intersect	Window, Wall with hole
7.	Fe-wire, Wall	Door	Intersect	Door, Wall with hole
8.	Fe-wire, Wall	Balcony	Intersect	Balcony, Wall with hole
9.	Fe-wire	Object	Intersect(wall): Intersect(ground)	Object on wall: Object on ground
10.	Fe-wire, Ground	Stair	Intersect	Stair, Ground with hole
11.	Fe-wire	Hole	Intersect(wall): Intersect(ground)	Wall with hole: Ground with hole

在方法中,如果一个生成规则的 $pred$ 包含一个 Fe-Wire,系统会对该 Fe-Wire 先执行对应的约束性规则.约束性规则主要是为了能调整用户输入的特征线素,使之达到共面、平行、垂直等约束,以满足后续生成规则的需求.约束性规则起到了辅助用户调整输入的作用,简化了交互过程.

值得指出的是,区别于 Müller 等人所提出的 CGA 规则^[2],本文的建模规则引入了 $command$ 选项,以体现用户的精确交互语义.Müller 等人的 CGA 规则主要侧重于自动地生成建筑模型,因此 CGA 规则主要包含替代与分裂规则.在代入初始形状之后,根据对应规则不断重复扫描来串行地解析,直到无法迭代解析时输出结果.然而,我们的方法主要侧重于交互设计,需要能精准地响应用户建模意图.为此我们引入 $command$ 选项,将图形界面中的按钮命令与之配合,参与规则的解析过程.由此,Fe-Wires 方法中用户的交互过程实际与规则解析过程是同步进行的,而并非重复串行解析.另外,Fe-Wires 方法主要通过交互地输入 Fe-Wire,避免了 CGA 规则定义时大量出现的参数设定,可以简化建模设计过程,突出了方法的表意性.

3.2 基于规则的交互设计

由于规则的引入,Fe-Wires 方法在牺牲了一定建模自由度的情况下,可带来极大的建模便利,提高了建模效率.为了便于交互和理解,用户在此环境中只需按照固定的方法输入特征线素即可.例如,为构建图 2(b)中所示的简易民房模型时,Fe-Wires 方法由以下 3 步交互即可完成.首先,系统依次缺省自动生成 Field, Building 和 Floor 形状单元各一个.然后,在顶视图情况下,输入特征线素 W_1 ,接着依次点击 Ground, Wall 和 Roof 按钮即可分别构

建起墙壁、窗户以及屋顶.最后,在墙面的约束条件下,依次点击 **Ground** 和 **Wall** 按钮后,在墙面上依据几何求交操作输入两个特征矩形 W_2 和 W_3 ,即可分别得到窗和门.运行我们的实验系统,这一建模过程可在几分钟内完成.即使是较为复杂的楼群模型,也可通过楼层的复制等操作来完成.

由以上交互生成过程可知,实际的建模过程等价地构造了一个树形结构.我们将此称为规则生成树,如图 2(c)所示.在此规则生成树中,节点为形状单元用于表征建筑的局部,而节点之间的有向边就是一个生成规则.显然,如果每增加一个节点就重新构造整个场景,即需反复地重新生成整棵树结构,这样会延长建模系统的交互响应时间.为了避免该处理瓶颈,我们策略是由当前编辑节点回溯到其父节点,解析除需要最小更新的树分支进行部分重构,以提高交互地响应速度.例如在图 2 中,如需改变窗体的位置,只需刷新其父节点墙体,然后重构受影响的窗体和门即可.

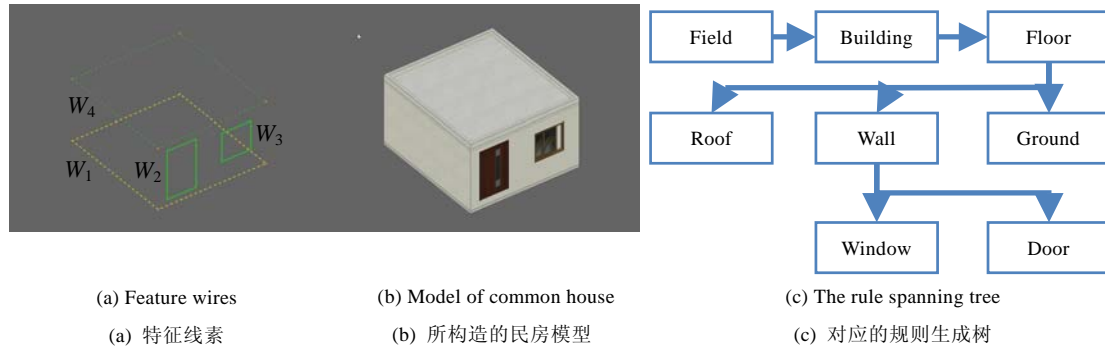


Fig.2 Use Fe-Wires to build a house
图 2 用 Fe-Wires 方法构建简单民房示意

4 模型形变编辑

在获得初始的三维建筑模型以后,用户往往需要根据实际应用来修正建筑的整体体量与比例,也需要对建筑元件与室内布置进行调整.注意到建筑元素之间存在复杂的关联关系,通俗地讲是“牵一发而动全身”.因而,所涉及的编辑操作并非简单整体几何缩放所能做到的.在一般的等比例缩放情况下,也无法添加必要的约束,而且也无法处理外墙是矩形之外的一般非规则情况.再者,由于 **Fe-Wires** 方法着眼于表意性建模,用户输入常较为随意.为了能达到一定程度的精确性,模型创建后的变动调整过程不可或缺.为此,在 **Fe-Wires** 方法中我们引入基于约束的建筑模型形变编辑功能.

建筑外立面以及房间的布局,为了达到实用以及美观整洁,常需依据一定地约束条件进行各类元素的布置.例如,窗户需要有一定的离地高度,门窗宽度的设定也有一定的限制.在做楼层规划(floor planning)时,家具之间平行放置并与隔墙保持固定的间距.当房间的体量(面积)可能会被减少或增加时,内部家具的位置必须作适当的调整,才能使得房间继续保持原有的设计效果.因而,在建筑模型的变动编辑中,用户面临着这样一个问题:当总体外围形状发生改变时,如何调整其内部的建筑单元和家具布置的位置与尺度改变,并能同时保持原有各类有语义的约束条件.

注意到在我们的表意性建模方法中,三维建筑的创建取决于特征线素的给定.因此,对应的,我们希望将整个建筑的布局形变问题,转化为在约束条件下对特征线素族作优化调整,并在此基础上进行重建.这一想法可以视为是对上一节所描述约束性规则的推广,而统一到 **Fe-Wires** 方法中去.设特征线素组所对应的顶点集合为

$$K = \{ \mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i) \in \mathbf{R}^3, i = 1, 2, \dots, n \},$$

那么,从计算的角度来看,用户所希望的形变结果对应于寻找最优化的目标函数 $F(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n)$.同时,所需的建筑形变过程中的约束条件,可通过设定对应的优化约束条件 $\mathbf{G}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n) \geq \mathbf{0}$ 达到.这里,约束条件 $\mathbf{G}(\cdot)$ 通常是一组非线性向量值函数^[7,8],用于表征特征线素的各类对齐、距离锁定、平行与直角等约束.

然而,已有研究结果表明,当 $F(\cdot)$ 和 $G(\cdot)$ 均为高次非线性时,求解过程非常复杂;即使是求近似解,计算代价仍旧非常高^[12].为此,问题解决的关键是找到合适的目标函数 $F(\cdot)$ 和约束函数 $G(\cdot)$,来降低算法复杂度,同时又能切合三维建筑应用实际.这启发我们提出以下的轴向弹性约束模型.

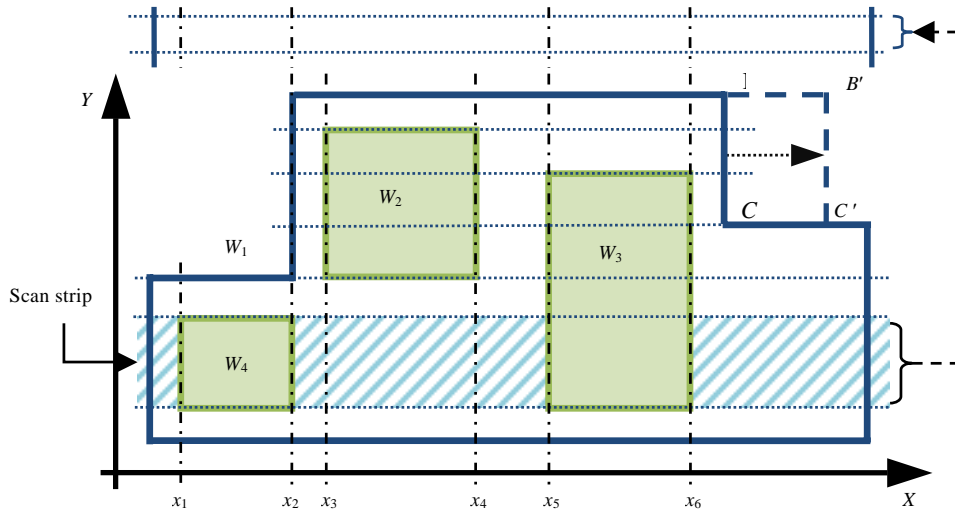


Fig.3 Deformation under X-aligned spring constraints

图3 沿 X-轴向上的弹性约束形变分析

4.1 轴向弹性约束形变

为了说明该模型,我们以图3中平面情况下的室内布置为例.假设特征线素 W_1 对应于生成房间的地面单元 S_1 , W_1 内部有特征矩形 $W_i(i=2,3,4)$,分别为对应于生成地面上的3个家具单元 S_i .家具 S_i 的布置位置遵循上文指出的各种约束.当调整特征线素 W_1 某条边 BC 至 $B'C'$ 时,地面发生局部的尺度变化.用户希望内部的家具布置也能随之改变.

通常用户希望调整的结果是直观上符合某种弹性形变的变化,这时物体之间形成一种弹性的互斥和拉动关系.基于这一直观认识,我们在 Fe-Wires 方法中构造如下的物理似然模型:假设形状单元之间存在弹性互斥的虚拟弹簧,而单元内部也存在着弹性性质.用户的调整结果被视为在各个弹性体相互作用下形变的平衡结果.这些用户通过设定弹簧的位置、系数来控制各个特征线素之间的约束,从而改变家具与房间边界的约束.注意到,室内单元往往都是与坐标轴平行布置的,所以形变调整首先能保证这个约束.另一方面,如果我们构建基于有限元方法的一般弹性形变,那么为了保持矩形单元的直角关系,不可避免地需引入非线性约束关系.这样的解决方案往往计算量大且不稳定,同时也无法满足交互响应的要求.

基于以上两点考虑,我们简化通用的材质弹性模型,假设虚拟弹簧都是沿着坐标轴向进行分布的.进一步地,我们可分别在 X-轴和 Y-轴方向实施相关的形变分析.例如,图3即给出了上述沿 X-轴方向进行形变分析的示意图.我们的方法,首先提取相关特征线素 $W_i(i=1, \dots, 4)$ 中的所有顶点 X-轴坐标作为未知变量;然后提取所有顶点 Y-轴坐标进行排序,从而获得一系列平行于 Y-轴的扫描线位置.每相邻两扫描线,即可构造一个扫描带.由此,我们以扫描带为基本单元构建弹性分析的方法.

剔除没有未知变量的扫描带,在最简单情况下,一个扫描带中存在一个需要变动的 x 轴坐标.记 x 为某条垂直边的初始坐标,该边左右两边的分别记为弹簧 K_0 和 K_1 , k_0 和 k_1 分别为两者的弹性系数.设 L 为弹簧 K_0 的左端点坐标, R 为弹簧 K_1 的右端点坐标.进一步,记加*的符号表示形变后各点坐标位置.根据胡克定律,我们有:

$$k_0[(x^* - L^*) - (x - L)] = k_1[(R^* - x^*) - (R - x)] \quad (2)$$

当有多条垂直边位于同一扫描带时,设其对应初始坐标是 $x_i(i=1, 2, \dots, n-1)$.则在每一条垂直边处,都可定义一个以上的胡克定律等式来确定形变后的垂直边坐标 x_i^* ,即:

$$k_i[(x_i^* - x_{i-1}^*) - (x_i - x_{i-1})] = k_{i+1}[(x_{i+1}^* - x_i^*) - (x_{i+1} - x_i)] \quad (3)$$

为了统一起见,令 $L=x_0, R=x_n$ 为两端的端点条件.假设形变后,我们保持左端不变即 $L^*=L$,而右端位置改变至 $R^*=R+D$.那么在已知所有弹性系数 $k_i(i=1,2,\dots,n)$ 的情况下,根据以上 $n-1$ 个弹性平衡的线性方程,可唯一地解出 $n-1$ 个未知坐标 x_i^* .

重复以上过程,每一个扫描带均可写出一组线性的弹性平衡方程组.我们将所有扫描带的方程联立在一起,可得:

$$\mathbf{Ax}^* = \mathbf{b},$$

其中,向量 \mathbf{x}^* 表示形变后各条线段的坐标, \mathbf{A} 为弹性系数矩阵,向量 \mathbf{b} 根据已知的端点和初始条件得到.然而,可观察到同一条垂直线段常同时属于数个扫描带,即未知数个数要小于方程个数,这是一个过约束问题.由此,我们提出建筑形变的目标就是最小化以下目标函数:

$$F(\mathbf{x}^*) = \|\mathbf{Ax}^* - \mathbf{b}\|^2 \quad (4)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示向量的 2-范数.因为这是一个最小二乘问题,可知其最优解是 $\mathbf{x}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$.

可知,上述过程定义了一个没有任何约束的形变,其结果坐标并不能保证是满足建筑创建的语义环境.仔细分析建筑元素以及内在家具对象的布局,从几何层面可抽象为以下 3 种约束关系:(1) 建筑元素之间的距离;(2) 建筑元素与墙体之间的距离;(3) 建筑元素本身的规格大小,即尺度.当建筑局部需进行形变编辑时,上述指定的距离或尺度应当遵循的约束有——不变(锁定)、大于最小值以及小于最大值这 3 种情况.这 3 种情况分别对应于:

$$x_i^* - x_{i-1}^* = \gamma_i; x_i^* - x_{i-1}^* \geq \alpha_i; x_i^* - x_{i-1}^* \leq \beta_i \quad (5)$$

另外,由于这些垂直线段还需保持序列关系,因此有约束 $x_i^* - x_{i-1}^* \geq 0$.根据以上分析,即可定义出相关均为线性的约束不等式和等式,简记为 $\mathbf{G}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \geq 0$.由此,我们的轴向弹性约束模型导出了一个标准的二次规划问题:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{x}^*} F(\mathbf{x}^*) = \min_{\mathbf{x}^*} \frac{1}{2} (\mathbf{Ax}^*)^T \mathbf{Ax}^* - \mathbf{b}^T \mathbf{Ax}^* \\ \text{s.t. } \mathbf{G}(\mathbf{x}^*) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

由于 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 是半正定的,所以该问题是一个凸问题.注意到一般建筑模型中的未知数个数普遍规模在 1 000 以下,可采用有效集法进行高效地求解^[13].总结上述讨论,以上过程可用算法 1 描述.

同样地,我们可以对 Y -轴方向实施同样的扫描带转化,然后求解对应的二次规划问题.这样每次我们分别对 Y -轴和 X -轴两个方向进行求解即可更新场景.当然,一种可选的策略是将两个二次规划问题合并,即设定优化目标函数:

$$F_x(\mathbf{x}^*) + F_y(\mathbf{y}^*) \quad (7)$$

并将两个方向的约束条件合并,然后求解一次优化问题.这种可选策略可以同时最小化两个方向上的形变.

本文方法可视为有限元方法求解方法^[9]的特例.但值得注意的是,本文通过扫描线方法,简化了原有的有限元模型,相当于将高维弹性模型投射到一组相互关联的一维情况求解.然而,这样的简化恰可避免为保持矩形线框形状所需引入的非线性约束条件,极大地改善了求解效率.

算法 1. X -轴向弹性约束算法.

(1) 提取该平面内所有特征线素顶点的 y 值,构造扫描线集合.每相邻两条扫描线形成一个扫描带 $B_i(i=1,\dots,n)$;

(2) 提取该平面内所有特征线素中与 X -轴垂直边的 x 值,构造未知变量的集合 x ,并初始化所有虚拟弹簧集合 $\{K_i\}$;

(3) 对每个扫描带进行扫描,根据初始位置查找对应的 K 值,列出方程(公式(3))以及约束方程(公式(5));

(4) 重复步骤(4)直到扫描结束,构造出矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{b} 以及约束矩阵 \mathbf{G} ;

(5) 求解二次规划问题(公式(6)),获取 x^* .

更新所有相关特征线素 W_i 及所有的虚拟弹簧位置.

4.2 弹性系数的设定讨论

在本文提出方法中,弹性系数的选取对形变结果起到了关键作用.正如附带视频中所演示的,设定越大的弹性系数,那么弹簧两端的端点位置形变越小.为了能模拟一定的非理想弹性体,Fe-Wires 方法还可设定弹簧允许形变的最大、最小值或设定为刚性(即固定值),这些弹性设定对于实际形变编辑可带来巨大方便.

在缺省情况下,为减轻用户的交互负担,我们系统中弹性系数 $k_i=1$.然而采用此设定时,虽然在大多数情况下能适用,但根据公式(3),未必能做到等比例的均匀缩放.幸运的是,我们注意到在每一扫描带实质上就是一个弹簧串联系统.将该弹性系统等价地看成一个弹簧,则根据弹性力学可导出:串联系统的弹性系数 k 就是各段串联弹簧弹性系数 $k_i(i=1,2,\dots,n)$ 的调和平均,即

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (8)$$

为此,如果用户想做到整个扫描带均匀缩放,记对应的位置点位置是 $x_i(i=0,1,\dots,n), x_0=L, x_n=R$,则可设定第 i 段的弹性系数 k_i 为

$$k_i = k \frac{\xi}{l_i}, \quad l_i = x_i - x_{i-1}, \quad \xi = \sum_{i=1}^n l_i = R - L \quad (9)$$

因为当该扫描带左端保持不变,右端拉长至 $R^*=R+D$ 时,由公式(3)可解得:

$$l_i^* = x_i^* - x_{i-1}^* = l_i + D \frac{l_i}{\xi}.$$

由此可解决弹簧的均匀缩放问题.

5 实验结果

本文提出的方法非常易于实现,我们使用 C/C++ 以及 Qt 4.3,在主流微机的 Windows 7 平台下实现了所有算法.本文中的实验例子均由我们开发的 Fe-Wires 实验系统生成,其交互过程达到实时响应,请参见附件中的视频演示**.在系统中,门、窗以及室内摆设由专业人员事先建模后转换成系统专有格式导入.除此以外,建筑场景整体均由本文的过程式建模方法生成,包括墙体的构建、开洞等.区别于 CGA 规则,虽然我们在实现 Fe-Wires 方法时保留了立面(façade)这一数据结构,但是只直接在立面上抠洞.Müller 等人的方法^[2]需先分裂该立面,然后再替换相应形状单元.因此,我们的构造方法几何表示更为紧凑,在纹理内存处理的消耗上也可得到降低.

采用 Fe-Wires 方法后,建筑场景数据采用 XML 格式保存,因只需要保存相关基于建模规则的语义信息,所以文件存储需求小,适于基于网络的信息传播和共享.同时,因为记录的是场景的语义构造信息,所以修改起来相当便捷.每个形状单元 S 均可直接在三维环境中修改属性,以根据实际应用情况变换风格,达到表意性建模的要求.

图 4 与图 5 给出了两个实际建模的例子,分别体现了本文方法应用于复杂室内布置与多层设计以及建筑群的建模.在图 4 中,用户通过导入图像格式的平面图,在其基础上交互式地输入各种特征线素,大约在 20 分钟内即可完成建模.当然,这种交互方式将来可通过与自动/半自动地平面图识别方法^[10]相结合,进一步提高建模效率.在图 4(c)中,我们采用了图层复制命令来生成多层结构.图 5(a)是一个输入的单层楼样例,在外墙的推拉编辑过程中,我们将本文的弹性形变方法用于每个外墙立面,这样每个窗体会同步的拉升变形.为此我们追加了一个形变-分裂规则到建模系统中,使得过长的窗体分裂成多个重复窗体,最后得到图 5(b).这种方法在实际构造大规模住宅楼群和办公楼时非常实用.

** 高清版视频可从 <http://www.cad.zju.edu.cn/home/zhx/projects/fe-wires/demo.mp4> 下载.



Fig.4 Workflow of build common residence
图 4 普通住宅建模示例



Fig.5 Workflow of build Office building
图 5 办公楼群建模示例

表 2 给出了采用本文方法进行形变编辑的时间统计.在这些例子中我们不仅对每一个层面,而且对存在门窗的墙体立面也运用了形变方法进行同步调整.从例子中可以看出,所需求解得二次规划问题,不仅与未知数个数相关,也与场景的复杂度(即约束的个数)密切相关.由于无须求解复杂的非线性约束情况,所以系统整体响应时间非常短,完全满足了交互需求.值得指出的是,形变时用于构建外墙的特征线素不必平行于坐标系.系统通过扫描线处理,自动将其离散转换为垂直情况.在附带的视频中还演示了通过追加少量虚拟弹簧设定来调整形变的例子,可保证建筑整体的和谐与一致.

Table 2 Deformation time statistics

表 2 建筑模型形变编辑的时间统计

场景	对应图示	形状单元个数	未知变量个数	计算时间(毫秒)		
				初始化	二次规划求解	总时间
E 形	所附视频	6	12	0	2	2
普通住宅 1	图 4(b)*	18	40	11	38	49
普通住宅 2	图 4(b)	38	57	18	58	76

其中,普通住宅 1 是通过裁剪图 4(b)中的部分地面对象得到.

6 结论与未来工作

本文给出了一种新颖的表意性三维建筑建模方法,以应用于实际需要快速建模的场合.本文的方法是一种

基于规则的过程式建模方法,因此用户可直接面向语义层面进行直观建模,提高了建模效率.由于我们抓住了特征线素这一建筑建模的关键,从而找到了建筑规则建模与三维人机交互的联系点,构建了一套合理的解决方案.本文提出的 Fe-Wires 方法可克服原有 CGA 规则交互性弱的缺点.为了解决建筑建模中常用的形变调整难点,本文提出了采用轴向弹性约束模型的精简求解方案,可以极大地降低交互建模时的后台计算量.这一形变方法本质上就是一个全局的约束性规则,可优化特征线素的调整.由于采用基于文法规则的过程式构造,本文方法可通过修改规则而非常易于扩展,也可方便地通过修改参数属性来进行三维模型数据的重用.

值得一提的是,本文所提出的技术已经融入到我们实际开发的三维建模软件系统 CEMO 当中.它的目的是为公共安全应用提供快速建筑建模和分析工具,主要关注建筑的整体结构以及门窗等的通道分布.目前该系统已经成功地应用于杭州市公安局及其下属的特警支队.在该单位,警员同志一般通过 1 小时左右的培训,即可掌握 CEMO 系统操作并运用于日常的训练和警务工作.

本文未来的工作主要有 3 个方面.其一是探索更为广泛的建模规则.特别对于现代框架结构建筑,其规律性很强.我们拓展基于特征线素的交互式设计方法,探索相关建筑风格化的课题,这将是极为有趣的交叉性研究课题.其二是与几何重建问题相结合.我们试图探索如何将我们的交互式建模手段,数字图像数据相结合,做到室内外场景的渐进式地重建.其三是考虑物理层面的材质、应力等约束条件,以及其他的语义信息,可用于优化建筑的构造过程,以此来创建更为合理的三维建筑模型.总之,三维建筑建模技术的研究大有可为,也会因此帮助人们更好的理解建筑,应用于实际生活.

致谢 感谢不具名评审专家的有益评审意见.感谢杭州市公安局秦旭东警官对于 CEMO 软件所作的有益讨论和大量耐心测试.

References:

- [1] Stiny G. Introduction to shape and shape grammars. *Environment and Planning B*, 1980,7(3):343-351.
- [2] Müller P, Wonka P, Haegler S, Ulmer A, Van Gool L. Procedural modeling of buildings. *ACM Trans. on Graphics*, 2006, 25(3):614-623.
- [3] Lipp M, Wonka P, Wimmer M. Interactive visual editing of grammars for procedural architecture. *ACM Trans. on Graphics*, 2008, 27(3):1-10.
- [4] Müller P, Zeng G., Wonka P, Van Gool L. Image-Based procedural modeling of facades. *ACM Trans. on Graphics*, 2007, 26(3):1-9.
- [5] Liu H, Zhang H-X, Bao H-J. Semiautomatic rule assist architecture modeling. In: *Proc. of the ICEC*. 2007. 315-323.
- [6] Chen X, Kang SB, Xu Y, Dorsey J, Shum H. Sketching reality: Realistic interpretation of architectural designs. *ACM Trans. on Graphics*, 2008,27(2):1-15.
- [7] Gal R, Sorkine O, Mitra NJ, Cohen-Or D. iWIRES: An analyze-and-edit approach to shape manipulation. *ACM Trans. on Graphics*, 2009,28(3):1-10.
- [8] Cabral M, Lefebvre S, Dachsbacher C, Drettakis G. Structure-Preserving reshape for textured architectural scenes. *Computer Graphics Forum*, 2009,28(2):469-480.
- [9] Harada M, Witkin A, Baraff D. Interactive physically-based manipulation of discrete/continuous models. In: Mair SG, Cook R, eds. *Proc. of the 22nd Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM, 1995. 199-208.
- [10] Lu T, Tai CL, Yang HF, Cai SJ. A novel knowledge-based system for interpreting complex engineering drawings: Theory, representation and implementation. *IEEE TPAMI*, 2009,31(8):1444-1457.

附中文参考文献:

- [11] 高曙明,彭群生.一种适用于特征造型的参数化设计方法. *计算机学报*,1996,19(4):300-307.
- [12] 高小山,蒋鲲.几何约束求解研究综述. *计算机辅助设计与图形学学报*,2004,16(4):385-396.
- [13] 袁亚湘,孙文瑜.最优化理论与方法.北京:科学出版社,2006.



吴康乐(1986-),男,浙江台州人,硕士生,主要研究领域为基于草图的三维建模.



李嫒姝(1987-),女,硕士生,主要研究领域为计算几何.



张宏鑫(1975-),男,博士,副教授,主要研究领域为计算机图形学,几何造型.



钱博磊(1988-),女,硕士生,主要研究领域为计算几何.