

# 基于复合模型的家居场景生成方法

刘米兰<sup>1),2),3)</sup> 蒋浩<sup>1),2)</sup> 毛天露<sup>1),2)</sup> 王兆其<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院计算技术研究所前瞻研究实验室 北京 100190)

<sup>2)</sup>(移动计算与新型终端北京市重点实验室 北京 100190)

<sup>3)</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 室内三维场景生成技术近年来已得到广泛应用,但如何高效和自动化地生成场景元素的空间组织,仍然是个具有挑战性的问题.为了在给定的目标空间中快速生成符合日常生活规范的家居场景,提高室内场景建模的效率,该文基于室内设计领域的住宅空间家具配置流程,提出用于布局计算的复合模型,处理场景元素的组织和布局问题.具体地,该复合模型将室内场景中的对象分为代理区域和场景元素两个层次,首先以代理区域为单位,依据人体工程学的布局规则在目标空间中进行自动布局计算,然后通过案例库搜索,在代理区域中适配具体的场景元素,形成完整的家居场景.实验表明,与以家具为个体进行自动布局计算的方法相比,用代理区域代理一组家具进行布局减少了目标空间中参与布局的个体数目,降低了布局复杂度,在相同的运行时间下,能得到更为合理的布局结果.通过基于复合模型的家居场景生成方法,用户只需提供户型结构数据,而无需提前一一指定具体的家居元素,能给用户使用带来较大便利.

**关键词** 室内建模;自动布局;三维场景;复合模型;随机优化

**中图法分类号** TP391 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2017.02533

## Composite Model for Home Furnishing Generation

LIU Mi-Lan<sup>1),2),3)</sup> JIANG Hao<sup>1),2)</sup> MAO Tian-Lu<sup>1),2)</sup> WANG Zhao-Qi<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(Advanced Computing Research Laboratory, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

<sup>2)</sup>(Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190)

<sup>3)</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** Indoor scenes generation technique is widely used in recent years. How to generate spatial organization of scene elements efficiently and automatically is full of challenge. In order to generate indoor scenes which conform to the daily life in the given objective space quickly, and increase the efficiency of interior modeling, the composite model for home furnishing generation was proposed. It is based on furniture configuration process. Specifically, the composite model divided the objects in indoor scenes into two levels, one is named patch, which is a kind of area have a certain residential behavior, the other is named scene element means specific object in the scene. Firstly, the composite model takes patch as a unit, and automatically calculates the layout of patches according to the ergonomic factors by stochastic optimization. Then, it fills appropriate furniture set in the patch by searching in the patch case database, and forms a complete indoor scene. The experimental results show that, comparing to the methods which take furniture as unit to the layout calculation, our method reduces the complexity of layout calculation since the patch representing a set of furniture reduces the number of layout object, and can generate indoor object layout more rational in the same

收稿日期:2015-07-21;在线出版日期:2016-01-07. 本课题得到国家自然科学基金(61100086)、国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2013AA013902)资助. 刘米兰,女,1986年生,博士研究生,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究方向为虚拟现实、三维场景建模技术. E-mail: liumilan@ict.ac.cn. 蒋浩(通信作者),男,1982年生,博士,助理研究员,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究方向为虚拟现实、智能人机交互. E-mail: jianghao@ict.ac.cn. 毛天露,女,1977年生,博士,副研究员,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究方向为虚拟现实、群体仿真. 王兆其,男,1966年生,博士,研究员,博士生导师,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究领域为虚拟现实、智能人机交互技术.

runtime. Through this method, the users only need to provide the room's floor plan, without appointing the specific scene elements one by one in advance, bringing convenience to users.

**Keywords** interior modeling; automatic layout; 3D scenes; composite model; stochastic optimization

## 1 引言

随着计算机图形学与虚拟现实技术的飞速发展,室内场景的数字三维模型越来越多地应用到各种领域,例如三维游戏、虚拟楼盘展示、虚拟家装设计等.以虚拟家装设计的应用为例,用户可以通过这个虚拟现实技术与网络技术结合的平台设计住宅的装修,最终得到一个内容丰富的家居场景.在实际应用中,选定一个待装修的房间之后,用户一般还需要选择家具、物品模型依次拖拽到房间内,再依次调整家具、物品的位置和朝向,其操作时间和房间内家具、物品的数量成正比.经统计,普通用户完整设计一套三室两厅的住宅装修与布局需要近十个小时,可见复杂的三维场景建模需要大量时间.对于设计师来说,要完成大量样板房的装修与家具布局设计,更加需要新的方法提高室内场景建模效率.

除了家装设计,在室内场景建模的其他应用领域,也存在相同的问题.由于室内场景物体种类和数目繁多,难以组织管理,导致自动化室内建模发展较慢,室内场景建模不得不依赖于用户手工交互,然而为每个房间手工建模耗时较大,如果能在短时间内生成具有丰富细节的室内场景模型,将会减少众多应用领域的建模成本.

室内场景中物体的布局是表现室内场景细节的重要部分,不少学者对室内家具布局计算方法进行了研究. Bukowski 等人<sup>[1]</sup>提出物体关联约束后,多名学者基于该概念开发了不同的家具布局系统<sup>[2-6]</sup>. 该类系统主要针对物体和物体之间的联系,建立物体布局需要满足一些约束,比如物理约束、表面接触约束、几何约束等,对场景元素的功能用途及整体布局等方面缺乏考虑. 近年来,有学者将人体工程学等相关领域的知识融入到室内家具布局问题中,基于经验知识进行家具布局<sup>[7-8]</sup>. 该类方法需要用户提前指定参与布局的家具和家具的初始位置,将家具作为个体进行布局计算,是一种自底向上的方法,并且当家具个数较多时,布局优化求解的复杂度也较高,在复杂的目标空间下直接优化家具布局的效果不太理想.

为了在给定的目标空间中快速生成符合日常生活规范的家居场景,降低室内场景建模的时间成本,

本文采用自顶向下的思路,提出一种用于家居场景生成的复合计算模型,从具有一定使用功能的室内区域和具体家居元素两个层次出发,在用户给定的户型结构中,经过案例库的引导,自动生成符合日常生活规范的家居场景,符合室内设计领域的设计准则和家具配置流程.

本文第 2 节对室内场景生成的相关工作进行阐述;第 3 节介绍用于家居布局计算的复合模型以及家居场景生成的步骤与方法;第 4 节展示本文方法的实验结果;第 5 节对全文进行总结和展望.

## 2 相关工作

三维室内场景由大量物体与物体间的空间关系以及物体的布局来表现,上述物体统称为场景元素.如何高效和自动化地生成场景元素的空间组织,已成为近年来虚拟现实领域的研究热点之一.根据场景元素是否已知,可以将空间组织的生成方法分为自动布局方法和场景合成方法两大类.

### 2.1 自动布局方法

自动布局方法是在有限的空间内,为已知的场景元素通过一定的算法计算出合理的位置.这类方法一般通过表面约束、支撑约束和排斥约束等描述物体之间的位置关系,通过预定义的规则将物体摆放到场景中.

Kjølaas<sup>[9]</sup>开发的家具自动布局系统根据预定义的布局规则依次将布局子空间分配到房间内合适的位置,再用同样的规则对子空间内的家具进行布局,该方法仅限于解决矩形空间中的布局问题. Sanchez 等人<sup>[4]</sup>采用空间表达术语描述布局的几何约束,将其转换成数学表达式,使用遗传算法求解具有约束的物体布局问题,可以得到丰富的布局结果,但也可能出现无解的情况. Yu 等人<sup>[7]</sup>和 Merrell 等人<sup>[8]</sup>基于室内设计的实际经验建立布局准则,通过用户指定参与布局的家具和家具的初始位置,对初始布局迭代地进行随机优化,直至得到满足要求的布局,这两个方法依赖于用户的前期输入,在布局空间狭小的情况下难以得到全局最优解.

### 2.2 场景合成方法

场景合成方法是在一定的空间内,根据对场景

的描述,通过搜索场景数据库生成符合预期要求的目标场景。

WordsEye<sup>[10]</sup>和Swan<sup>[11]</sup>将输入的文本通过语法分析和语义理解自动转化为二维图片或三维场景,依赖于用户对场景的完整描述以及自然语言处理的能力。江澜等人<sup>[12]</sup>定义了场景属性,构建了三维场景实例库,通过用户输入目标场景的相关属性在实例库中自动搜索与目标场景最相似的场景,依赖于用户对场景的详细描述。Fisher等人<sup>[13]</sup>要求用户提供少量场景实例用于说明希望得到的场景类型,通过机器学习的方法,最终生成与输入实例相似的多样化的场景。Xu等人<sup>[14]</sup>通过分析用户提供的草图,在三维空间计算草图中所有物体精确的位置,在模型库中搜索各物体对应的三维模型,形成三维场景,该系统主要针对室内家具摆放,与文献<sup>[13]</sup>一样只考虑了小规模物体组群,如书桌场景,没有涉及整个房间的布局。

综上所述,自动布局方法可以对用户指定的物

体自动地进行布局计算,不能改变参与布局的物体,当物体个数过多或者布局空间狭小时容易导致约束冲突。场景合成方法可以按照目标生成多样化的同类型场景,但依赖于用户对场景的详细描述。

本文拟结合以上两类方法,将日常生活规范转化为预定义规则,对家居场景的组成元素进行自动布局计算,得到各类元素所在位置之后,通过场景数据库搜索得到具体的物体模型,生成最终的家居场景。

### 3 基于复合模型的家居布局

如何在给定的空间中生成符合日常生活规范的家居场景,是本文要解决的问题。如图1所示,家居场景由户型结构数据和室内家具模型组成,室内家具模型是构成场景的基本元素,称之为场景元素。在已知户型结构的情况下生成室内家具的布局,相当于在一个场景的目标空间中配置场景元素,其中包括对场景元素位置的安排与具体元素的选择两方面。

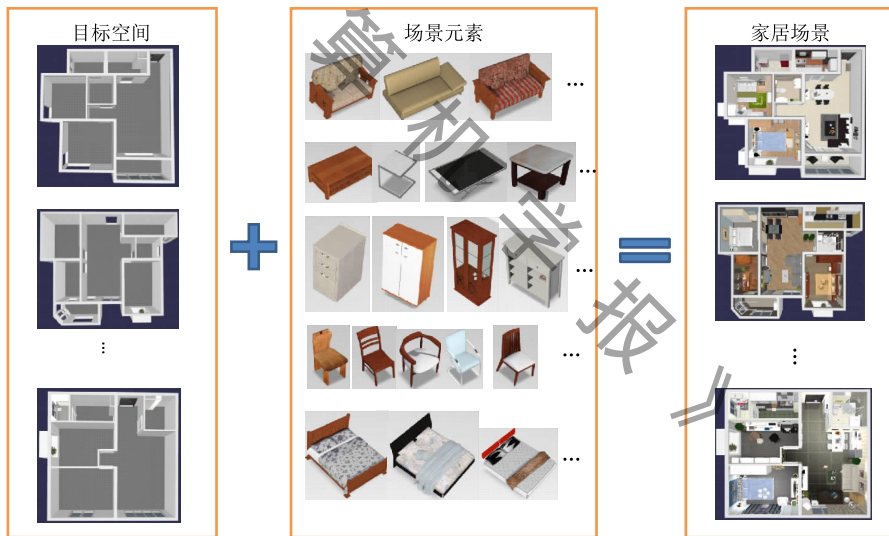


图1 家居场景构成

与现有方法中同时对所有场景元素进行布局优化的方式不同,本文遵循室内设计领域的住宅空间家具配置流程<sup>[15]</sup>,从具有一定居住行为和使用功能的室内区域和可配置的具体场景元素两个层次出发,构建用于布局计算的复合模型,生成符合日常生活规范的家居场景。

#### 3.1 复合模型概述

在室内设计领域,住宅室内家具配置的过程遵循自顶向下逐步求精的思路,首先确定一个房间具有哪些功能,接着根据房间结构划分功能区域,确定功能区域的大小和位置,最后选择尺寸合适的家具布置在相应的功能区域中。借鉴这种思想,本文提出

用于布局计算的复合模型,处理场景元素的组织和布局问题。

本文的场景元素是指室内场景中的家具、家电、摆件等物品。在场景元素之上,本文定义了代理区域,包含了共同完成一定使用功能的一组家具和物品,例如餐桌和餐椅共同完成用餐功能,具有用餐功能的代理区域包含一个餐桌和若干个餐椅。

如图2所示,在本文定义的复合模型中,目标空间中存在一个或多个代理区域,首先以代理区域为单位在目标空间中进行自动布局计算,然后通过案例库搜索,在代理区域中适配具体的场景元素,形成完整的家居场景。

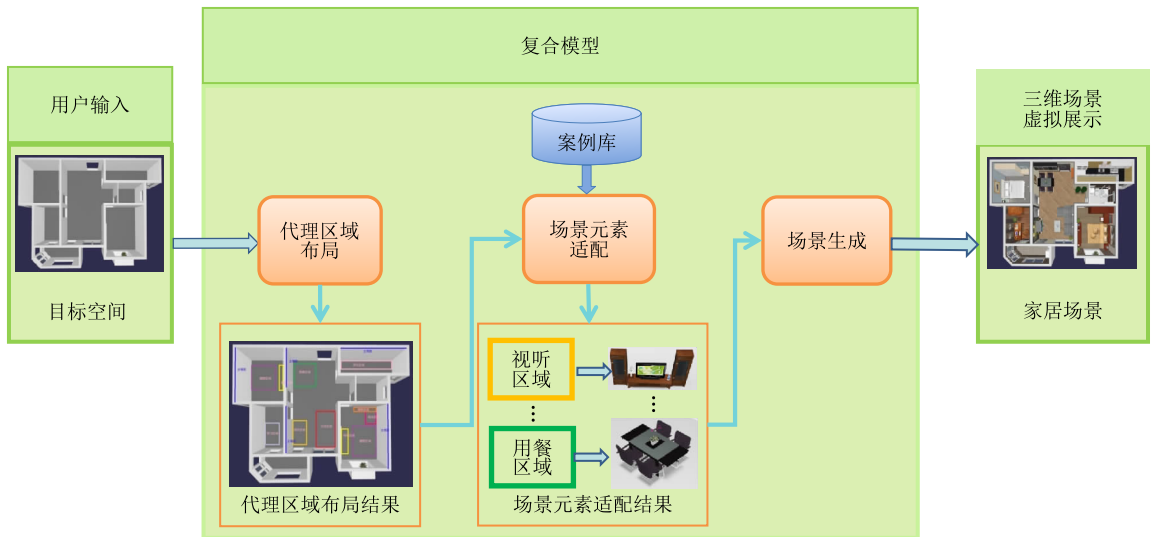


图 2 复合模型示意图

### 3.2 代理区域布局

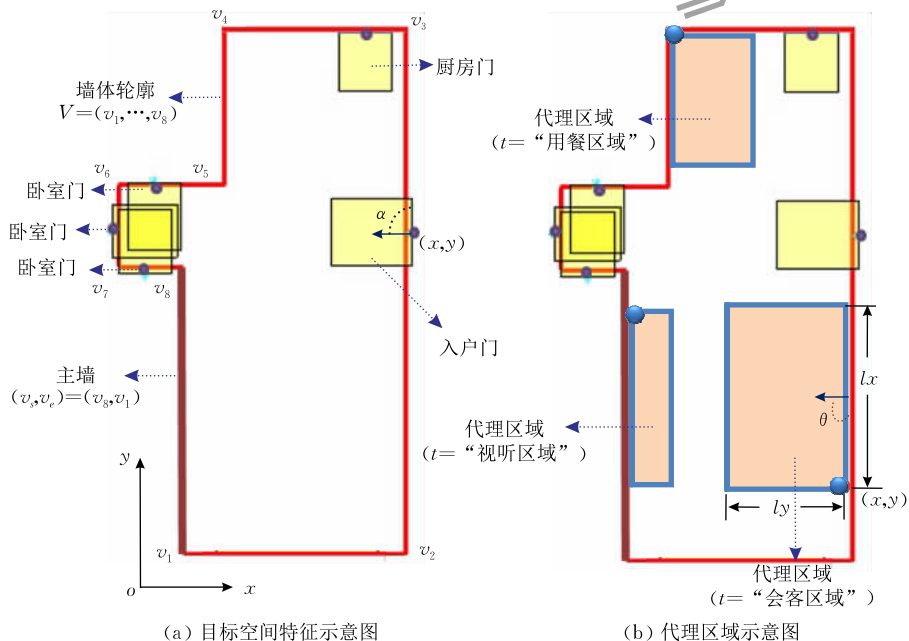
代理区域在目标空间中的布局问题,本质上是计算代理区域在目标空间中的最佳分布位置.本文借鉴文献[7-8]的思想,从生活经验和室内设计学中提取先验知识与功用需求作为规则,并将其转化为约束代价函数,将计算满足规则的解的过程等价于求代价函数最小化的问题.

#### 3.2.1 布局问题描述

代理区域在目标空间的布局可抽象为二维平面上的矩形物体在特定结构的布局容器中自动布局的问题.

本文定义代理区域在目标空间中的布局  $L = (P, R)$ .  $P$  为代理区域集合,  $P = \{P_1, \dots, P_i, \dots,$

$P_n\}$ , 第  $i$  个代理区域  $P_i = (t, x, y, \theta, lx, ly)$ , 具有的属性包括功能类型  $t$  (例如会客区域、用餐区域等)、位置  $(x, y)$ 、朝向  $\theta$ 、长  $lx$ 、宽  $ly$ , 用矩形表示. 如图 3 所示, 该矩形角上圆点所在的坐标为对应代理区域的位置, 在矩形的局部坐标系中, 该圆点是矩形的左下角.  $R$  为目标空间的特征集合,  $R = \{V, W, D\}$ ,  $V = \{v_1, \dots, v_m\}$  是目标空间投影到  $xoy$  平面上的多边形顶点集合, 相邻两个顶点及其连接的边表示一面墙;  $W = \{(v_s, v_e) | s, e \in \{1, \dots, m\}\}$  是主墙 (见下一节介绍),  $(v_s, v_e)$  是主墙的起点和终点;  $D = \{D_1, \dots, D_r, \dots, D_l\}$  是门, 第  $i$  个门  $D_i = (x, y, \alpha)$ , 由门洞的中心坐标在  $xoy$  平面上的投影及门的朝向表示. 布局场景示意图如图 3 所示.



(a) 目标空间特征示意图

(b) 代理区域示意图

图 3 布局场景示意图

### 3.2.2 约束函数

约束函数描述的是代理区域的布局对布局约束的满足程度,对于家居场景,场景元素的布局要同时满足功能和视觉两方面的约束. 功能约束衡量布局方案对人们室内活动支持程度的好坏,视觉约束关心布局作为视觉构图带给人们的感受<sup>[8]</sup>. 本文定义了7个约束函数,分别从代理区域与墙的关系、与门的关系以及与代理区域之间的关系等方面约束代理区域的布局,约束函数的函数值越低表示对约束满足得越好,约束函数加权求和,构成要求解的目标函数,用于量化布局的好坏程度. 下面给出每个约束函数的定义.

约束1. 穿墙约束. 布局物体必须在布局容器内部,这是布局问题中最基本的约束. 在代理区域布局的问题中,该约束对代理区域穿透到墙外的情况进行惩罚,由表示代理区域的矩形与表示房间轮廓的多边形求差所得的面积描述:

$$C1(L) = \sum_i A(P_i - R) / \sum_i A(P_i),$$

其中,  $A(\cdot)$  是多边形面积计算函数.

约束2. 重叠约束. 在布局问题中,布局物体互相不能重叠,也是一条基本的约束. 在家居布局中,代理区域重叠将导致区域内家具的功能发挥和居住者的通行受到影响,因此要避免代理区域重叠的情况发生. 该约束用代理区域之间相交的面积描述:

$$C2(L) = \sum_{1 \leq i, j \leq n, i < j} A(P_i \cap P_j) / \sum_i A(P_i).$$

约束3. 通行约束. 为了保证居住者在室内的通行畅通,门的区域不能被其他物体遮挡. 门的区域包括两方面:门打开和关闭需要占用的区域,以及连接房间内每个门的通道所占用的区域. 该约束函数为

$$C3(L) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l A(P_i \cap D_j) + \sum_{i=1}^n A(P_i \cap Path) / \sum_{i=1}^n A(P_i).$$

约束4. 主墙约束. 住宅空间中一般有一面最引人注目的墙作为主题墙,成为人们视觉的聚集点,例如客厅中的电视墙. 代理区域的功能类型决定了它与主墙的约束:面对,背对或无约束. 该约束函数为

$$C4(L) = \left| \sum_i r_i \cdot (\theta - (r_i + 1) \cdot \pi / 2) \right|,$$

其中  $r_i = 1$  表示代理区域  $P_i$  有面对主墙的约束,  $r_i = -1$  表示背对主墙,  $r_i = 0$  表示没有主墙约束.

约束5. 靠墙约束. 基于对现实中家居场景的观察,房间中绝大多数的功能区域都是依墙而设的,

因此本文方法默认所有代理区域具有靠墙的约束. 该约束函数用代理区域背面与最近墙的距离来描述:

$$C5(L) = \sum_i dis(P_i),$$

$$dis(P_i) = \begin{cases} 0, & 0 \leq d_i \leq d_{\max} \\ 1 - (d_{\max} / d_i)^2, & d_i > d_{\max} \end{cases},$$

其中,  $d_i$  是第  $i$  个代理区域背面与墙的距离,  $d_{\max} = 0.1$ , 对应现实世界中的 10 cm.

约束6. 成对约束. 根据使用功能,有些代理区域常常成对出现,服从成对的朝向和距离约束,例如视听区域和会谈区域要面对面,距离在 2.5 m 左右. 对此,本文预定义了一些代理区域的成对关系,具有成对关系的区域要满足成对约束,约束函数从成对区域的相对距离和相对角度两方面进行描述:

$$C6(L) = \sum_{j=1}^{np} |d_j - \bar{d}_j| + \sum_{j=1}^{np} |\theta_j - \bar{\theta}_j|,$$

其中,  $np$  是具有成对关系代理区域的对数,对于第  $j$  对代理区域,  $d_j$  是它们之间的距离,  $\bar{d}_j$  是预定义的平均距离,  $\theta_j$  是相对角度,  $\bar{\theta}_j$  是预定义的平均角度.

约束7. 尺寸约束. 基于对使用舒适度的考虑,室内设计领域对家具占房间的面积有比例上的要求<sup>[16]</sup>,本文据此约束代理区域的尺寸,使得代理区域的总面积占目标空间面积的比例满足使用舒适度的需求. 约束函数为

$$C7(L) = \begin{cases} 1 - (S / s_{\min})^2, & S < s_{\min} \\ 0, & s_{\min} \leq S \leq s_{\max} \\ 1 - (s_{\max} / S)^2, & S > s_{\max} \end{cases},$$

$$S = \sum_i A(P_i) / A(R),$$

其中,  $s_{\min} = 0.4$ ,  $s_{\max} = 0.55$ , 分别为根据文献<sup>[16]</sup>设置的家具房间面积比的最小值与最大值.

综合以上7种约束函数,经过线性组合,得到总

的代价函数,  $C(L) = \sum_{i=1}^7 w_i C_i(L)$ ,  $w_i$  表示对应项的权重.

### 3.3 代理区域布局优化算法

空间布局问题是一个组合优化问题,在优化算法的选择方面,由于遗传算法具有大范围全局搜索的能力,具有潜在的并行性,可进行多值比较,鲁棒性强,因此本文选用遗传算法对目标函数进行求解.

本文要求解的目标函数是3.2.2小节提到的代价函数  $C(L)$ ,目标是使得代价函数最小化. 求解流程如图4所示,首先随机生成一组初始解作为初始种群,接着计算种群的适应度,由当前的目标函数值得到,然后进行选择、交叉、变异等遗传操作,得到新

解,如果满足结束条件,输出最优解,否则继续进行遗传操作,直至达到满足结束的条件为止.本文的遗传操作是根据布局问题设计的,通过对布局对象调

整位置和角度,在目标空间中产生新解.调整方式包括对某个布局对象进行移动、旋转、缩放,交换一对布局对象的位置和角度等.

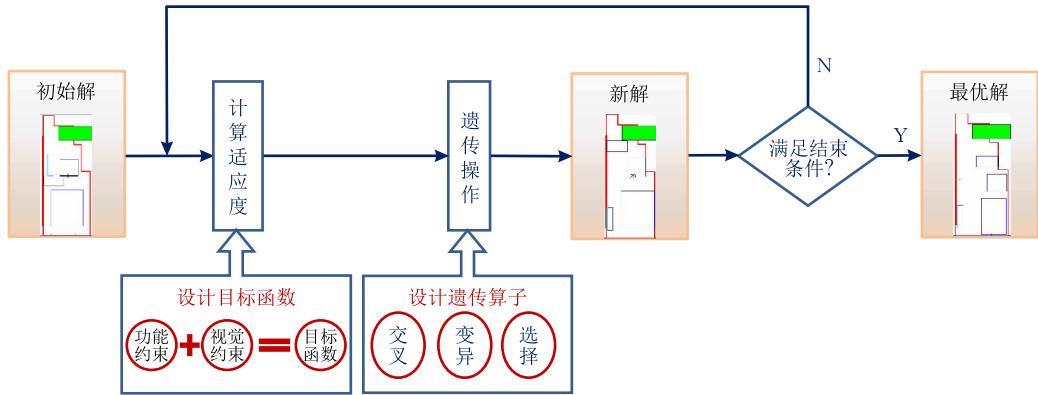


图 4 代理区域布局求解流程

该遗传算法的伪代码如算法 1 所示.

**算法 1.** 用于代理区域布局优化的遗传算法.

输入: 目标空间特征集合  $R$ , 代理区域集合  $P$

输出: 代理区域在目标空间中的布局  $L$

算法描述:

1. 初始化参数: 交叉概率  $P_c$ , 变异概率  $P_m$ , 种群规模  $M$ , 终止进化的代数  $T$ ;
2.  $t=0$ ;
3.  $Code\_P \leftarrow Encode(P)$ ; /\* 对输入的一个初始解编码 \*/
4.  $Best \leftarrow Code\_P$ ;
5. FOR  $i=1$  TO  $M$
6.  $InitPop(i) = RandomChange(Code\_P)$ ;  
/\* 生成  $M$  个解, 作为初始种群 \*/
7. END FOR
8.  $Pop(0) \leftarrow InitPop$ ;
9. WHILE  $t < T$
10. IF  $random(0,1) < P_c$
11. Crossover operation to  $Pop(t)$ ;
12. END IF
13. IF  $random(0,1) < P_m$
14. Mutation operation to  $Pop(t)$ ;
15. END IF
16. Evaluate fitness of  $Pop(t)$ ;
17.  $Pop(t+1) \leftarrow SelectOperation(Pop(t))$ ;
18.  $Cur\_Best = Find\ the\ best\ of\ Pop(t+1)$ ;
19. IF  $Fitness(Cur\_Best) > Fitness(Best)$
20.  $Best \leftarrow Cur\_Best$ ;
21. END IF
22. END WHILE
23.  $Best\_P = Decode(Best)$ ;
24.  $P \leftarrow Best\_P$ ;  $L \leftarrow (P, R)$ ;

### 3.3.1 编码方案

布局方案由目标空间的特征集合和参与该布局的所有代理区域的相关参数构成,一个布局方案对应一个解.由于在求解过程中目标空间的特征集合不变化,因此只需要保留代理区域相关参数作为解,对应遗传算法中的“染色体”.

本文以实数编码的形式把布局问题的解表示成基因型串结构数据,每一个参数对应遗传算法中的“基因”.编码形式如图 5 所示.

	代理区域1					...	代理区域 $n$				
编码:	$x_1$	$y_1$	$\theta_1$	$L_{x_1}$	$L_{y_1}$	...	$x_n$	$y_n$	$\theta_n$	$L_{x_n}$	$L_{y_n}$

图 5 布局问题的编码方案

### 3.3.2 适应度函数

本文的目标函数是 3.2.2 节所定义的代价函数  $C(L)$ ,优化目标是求目标函数的全局最小值,而计算个体适配值的适应度函数要求非负,并且适配值越大表明个体越优秀,因此要将解空间中的目标函数值  $C(L)$  转换为搜索空间中的个体适应度函数值  $F(L)$ ,转换方式如下:

$$F(L) = \begin{cases} C_{\max} - C(L), & \text{如果 } C(L) < C_{\max} \\ 0, & \text{如果 } C(L) \geq C_{\max} \end{cases}$$

### 3.3.3 遗传操作

本文的遗传操作包括交叉、变异和选择.系统通过遗传操作调整布局对象的角度和位置,在目标空间中产生新解.

交叉操作是产生新个体的主要方法,决定遗传算法的全局搜索能力.为了保证新产生个体的多样性以及新的基因值在给定区间范围内,本文采用算数交叉方法,用两个个体的线性组合产生出两个新

个体,其结果相当于在两个布局方案中交换同类别代理区域的相关参数.算数交叉方法如下:

$$\begin{cases} X_A^{\text{new}} = \alpha X_B^{\text{old}} + (1-\alpha) X_A^{\text{old}} \\ X_B^{\text{new}} = \alpha X_A^{\text{old}} + (1-\alpha) X_B^{\text{old}} \end{cases}$$

其中  $X$  为个体,  $\alpha$  为  $(0,1)$  范围内的随机数.

变异操作是产生新个体的辅助方法,决定了遗传算法的局部搜索能力.为了维持群体的多样性并且保证局部搜索的精确性,本文采用均匀变异和非均匀变异结合的方法进行变异操作.每次操作先随机选择一个基因位,并在给定的区间范围内改变该基因位对应的值.在遗传算法初期运行阶段采用均匀变异,即以变异概率  $Pm$  从对应基因的取值范围内取一随机数来代替原有的基因值,使得个体在搜索空间内自由移动,增加群体的多样性;在遗传算法后期运行阶段采用非均匀变异,对原有的基因值做一个随机扰动,以扰动后的结果作为变异后的新基因值,使得最优解的搜索过程更加集中在一个区域内.设个体  $X = x_1 x_2 \cdots x_k \cdots x_n$ , 变异点为  $x_k$ , 其取值范围为  $[U_{\min}^k, U_{\max}^k]$ , 在该点进行交叉变异操作之后,可得到一个新的个体  $X = x_1 x_2 \cdots x'_k \cdots x_n$ . 均匀变异的方式为  $x'_k = U_{\min}^k + r(U_{\max}^k - U_{\min}^k)$ ,  $r$  为  $[0, 1]$  范围内符合均匀概率分布的一个随机数;非均匀变异的方式为  $x'_k = x_k + \delta x$ ,  $\delta x \sim N(0, \sigma^2)$ ,  $\sigma = 0.3$ . 变异操作的结果相当于改变一个代理区域的某个参数,使得该代理区域的位置、朝向或者尺寸发生改变.

选择操作用于确定如何从父代群体中选择哪些个体遗传到下一代群体中.本文采用的种群规模为 40,先选择父代群体中适应度最好的 1 个个体保留到下一代,再通过轮盘赌的方式选择 39 个适应度好的个体保留下来,个体被选中的概率与其适应度大小成正比.

本文通过多次实验,最终采用的变异概率、交叉概率分别为 0.85 和 0.9,迭代次数为 100,代价函数的权重  $w_1 = 5000$ ,  $w_2 = 600$ ,  $w_3 = 600$ ,  $w_4 = 1500$ ,  $w_5 = 1000$ ,  $w_6 = 110$ ,  $w_7 = 50$ .

### 3.4 场景元素适配

代理区域只是一组场景元素的抽象,在布局好的代理区域中适配上具体的场景元素,才能得到完整的家居场景,这个过程相当于在房间的功能区域中配置具体的家具.

共同完成某种功能的家具组合构成代理区域,本文用语义文件描述家具组合的属性,包括家具组

合的功能类型、各家具的类别以及家具组合的尺寸.尺寸由家具三维模型组合的包围盒在  $xoy$  平面上投影的长和宽进行描述,存储在案例库(见 4.2 节介绍)中.

场景元素适配过程是根据代理区域的功能类型和尺寸,在案例库中搜索功能类型相同并且尺寸最为接近的家具组合,适配到代理区域中.尺寸要求从长宽两个维度分别接近目标的长宽,如图 6 所示,本文将这个搜索问题转化为在二维平面上已知的点集(空心点)中搜索与目标点(实心点)距离最近的点,采用基于有界  $k-d$  树的最近点搜索算法<sup>[17]</sup>进行求解.根据搜索结果,将其对应的家具组合布置在相应的代理区域中,形成完整的家居场景.

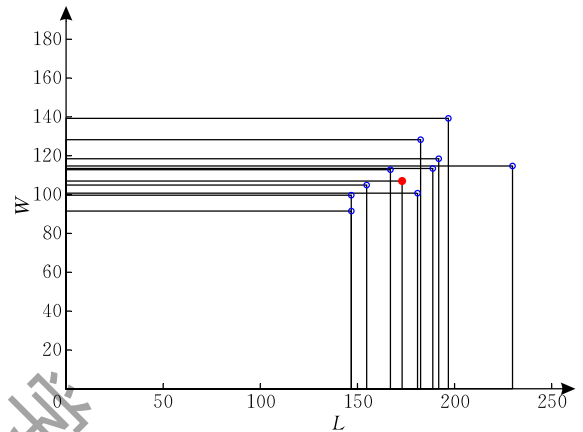


图 6 搜索最近距离点示意图

## 4 实验及结果

首先,我们介绍实验环境和预处理过程,然后用 5 组实验对本文方法的有效性进行验证,最后对算法的适用情况进行讨论.

### 4.1 实验环境

在前述方法的基础上,我们基于 Matlab 和 VS2008 平台开发了虚拟现实家装系统,硬件环境为 3.4GHz Intel(R) Core(TM) i7-2600 CPU,4GB RAM 的 PC 机.该虚拟现实家装系统包含 100 个设计师制作的家居设计案例(如图 7 所示),家居设计案例包括客厅、卧室等不同功能的房间,客厅的面积约  $32\text{m}^2$ ,包含家具 10 个到 25 个不等;卧室面积约  $12\text{m}^2$ ,包含家具 4 个到 10 个不等.

本文的代理区域布局优化算法和场景元素适配算法均在 Matlab 环境下实现,3D 场景展示在 VS2008 环境下实现.



图 7 家居设计案例示意图

### 4.2 预处理

在进行家居场景生成计算之前,要对家居设计案例进行预处理,构造代理区域案例库.

首先,我们通过鼠标拾取的方式在家居设计案例中手工选择一组家具形成代理区域(如图 8 所示).从 100 个家居设计案例中选取出来的所有代理区域的相关信息被组织成 xml 格式的语义文件.代理区域的相关信息包括功能类型、与主墙的关系、尺寸、家具成员等.



图 8 代理区域案例库示意图

接着,系统根据语义文件的内容统计每一类代理区域的尺寸信息,即该类代理区域长度和宽度的最大值、最小值和均值.

以上两个步骤收集的信息构成代理区域案例库,代理区域布局和场景元素适配过程均需要从代理区域案例库中得到相关信息.实际操作中,一次预

处理生成的代理区域案例库可以重复使用,因此只需要进行一次预处理即可.

### 4.3 典型目标场景生成

我们针对不同户型结构的目标场景进行了实验,以客厅场景为例,客厅具有会客、视听娱乐、用餐等功能,因此在目标空间中设置了会客、视听和用餐等 3 个代理区域.系统首先经过自动布局计算,得到这 3 个区域的最优位置,然后经过场景元素适配,得到具有家具、物件等细节的家居场景.如图 9 所示,图(a)是代理区域自动布局的结果,图中外围折线框表示目标空间的轮廓,透明矩形区域表示门,虚线部分表示门与门之间的通道,渐变色填充的区域是不同类型的代理区域.经过自动布局计算之后,3 个代理区域都满足了靠墙约束、通行约束等约束,其中视听区域和座谈区域还同时满足了主墙约束和成对约束;图(b)是经过场景元素适配之后的三维场景.

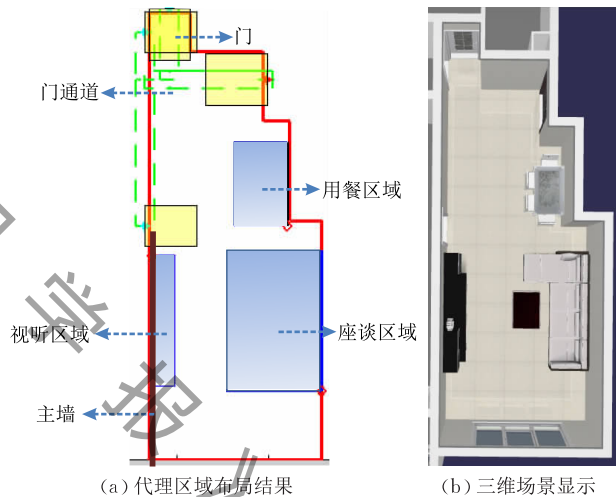


图 9 客厅场景生成示例图

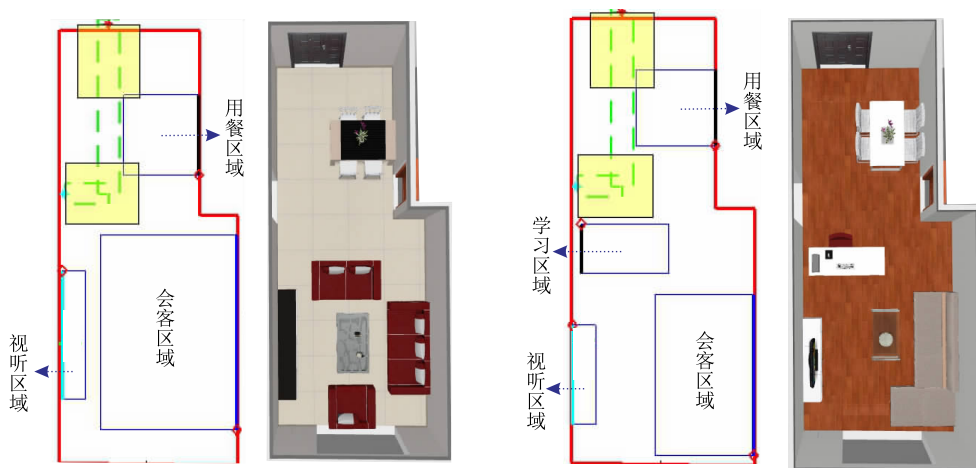
### 4.4 相同目标空间设置不同代理区域

我们在一个目标空间中指定了不同类型的代理区域,如图 10 所示,在同一个客厅中,(a)设置了会客区域、视听区域和用餐区域,(b)在此基础上增加了一个学习区域.用户只需设置代理区域的类型,其尺寸和位置都是在自动布局计算中动态调整的,最后适配的家具会随代理区域的最终尺寸在模型库中搜索获得.实验结果表明,本文能根据用户设置,在相同的目标空间生成多样化的场景结果.

### 4.5 不同目标空间的场景生成

图 11 展示了在不同目标空间中生成的场景,(a)~(d)展示的是客厅场景,(e)~(h)展示的是卧室场景.实验结果表明,本文方法能在不同类型的目标空间中生成符合不同功能要求的家居场景,在轮廓不规则、复杂的户型结构下(如(c)、(d)的客厅场





(a) 目标空间中设置了3个代理区域

(b) 目标空间中设置了4个代理区域

图 10 相同目标空间生成不同的场景



(a) 客厅场景1

(b) 客厅场景2

(c) 客厅场景3

(d) 客厅场景4

(e) 卧室场景1

(f) 卧室场景2

(g) 卧室场景3

(h) 卧室场景4

图 11 不同目标空间中的场景生成

景),也能生成布局比较合理的家居场景.

#### 4.6 与设计师设计的场景比较

传统的虚拟家装设计过程需要用户指定所有室内物品并手动设置所有物品的位置和朝向,以一套三居室的住宅为例,完成整套房屋的室内设计与家装布置用传统的方法需要耗时约 9 h,采用本文方法只需 1 h 左右,大大减少操作时间,降低设计难度.



(a) 本文方法生成的场景



(b) 设计师设计的场景

图 12 与室内设计师设计的结果对比

#### 4.7 与现有方法比较

我们进行了大量实例测试验证本文方法的时间性能和布置效果,主要与参考文献[8]的方法进行比较.文献[8]使用模拟退火算法对目标空间中场景元素的初始布局进行布局优化,场景元素是家具.

针对同一个目标空间,我们设置了同一组待布局的场景元素,使用 3 种方法进行场景生成:首先,我们实现了文献[8]的算法,预先定义场景元素间的相对关系、构造代价函数,用模拟退火算法对场景元素的初始布局进行优化(简称方法 1);其次,我们用本文方法定义代理区域、构造代价函数,用模拟退火算法对代理区域的初始布局进行布局优化,再在布局完成的代理区域中适配场景元素(简称方法 2);最后,用本文方法进行代理区域布局和场景元素适配.模拟退火算法所用的参数如下:初始温度为 100,温度衰减率为 0.99,迭代次数为 500,参数详细介绍见本文第 3.3 节.

图 12 展示了在相同的目标空间内,本文方法生成的家居场景与设计师设计的家具布局方案的结果对比.在本例中,设计师设计的布局方案对应的代价函数值为 0.2848,本文方法生成的布局方案对应的代价函数值为 0.012,略优于前者.该实验结果表明,用户在不具备室内设计功底的前提下,也能得到与专业室内设计师设计效果相似的结果.

图 13 展示了两个不同目标空间分别使用上述 3 种方式生成的家居场景.由于本文以代理区域作为布局对象,用代理区域代理一组家具进行布局优化,与方法 1 相比,减少了目标空间中布局对象的数目,布局对象之间的约束条目也相应减少,因而降低了问题求解难度;同样用遗传算法,本文方法的求解时间也大幅下降.针对代理区域布局,模拟退火算法采用单个个体进行进化,而遗传算法采用种群进行进化,本身存在并行的特性,在相同数量级的迭代次数下,本文方法能得到更合理的结果.表 1 和表 2 是针对图 13 第 1 行所示场景用 3 种方法运行的结果说明,由于遗传算法和模拟退火算法都具有随机性,每种方法运行了 10 次,表中的平均值是对 10 次运行结果进行计算的.因为方法 1 的布局对象是家具,代价函数与方法 2 和本文方法无可比性,因此运行结果的代价函数只在方法 2 和本文方法之间进行对比.



图 13 本文方法与方法 1 和方法 2 运行结果对比

表 1 本文方法与方法 1 和方法 2 运行时间对比

方法	运行时间 最大值/s	运行时间 最小值/s	运行时间 平均值/s
方法 1	225.9	196.5	217.3
方法 2	50.4	43.3	46.7
本文方法	52.8	47.5	50.3

表 2 本文方法与方法 2 结果代价函数值对比

方法	代价函数 最大值	代价函数 最小值	代价函数 平均值
方法 2	1384.2	840.8	1047.30
本文方法	75.9	43.2	52.74

#### 4.8 适用情况讨论

本文方法所涉及的目标空间适用于绝大多数现实生活中常见的户型, 包括墙体互相垂直的常规户型(如图 11 中的(a)、(b)、(e)、(f)所示), 也包括两墙夹角为锐角(如图 11 中的(c)所示)和一面墙为弧形(如图 11 中的(d)所示)的不规则户型, 其中弧形

的墙由若干相连的线段近似. 由于本文 3.2.2 小节提及的主墙约束要求代理区域与主墙的平行关系, 因此要求主墙为长度不小于 1.5 m 的直线段.

实验证明, 本文方法能够在复杂的、不规则的户型结构中生成较合理的家具布局结果.

## 5 总结与展望

本文提出并实现了一种基于复合模型的家居场景生成方法, 用户只需提供户型结构数据, 而无需提前指定具体的场景元素, 通过复合模型计算获得内容丰富的家居场景, 使得场景元素的布局符合日常生活规范.

与传统的布局优化方法相比较, 本文不是将单个家具作为个体进行布局优化, 而是用代理区域代理一组家具进行布局, 减少了目标空间中参与布局

的个体数目,降低了布局难度;代理区域代理的是一组共同提供某种功能的家具,这组家具作为一个整体进行布局,符合常理,能减少不合理布局的可能性. 本文根据功能用途将场景元素划分为代理区域和基本元素两层结构,先处理代理区域的布局,后生成代理区域中的基本元素,符合室内设计领域的家居流程,体现了自顶向下逐步求精的思想,可以从家居布局扩展到其他类型的场景布局,如写字楼、工厂、商场等.

由于本文的实验在 Matlab 环境中运行,因此运行时间较长,今后移植到 Visual C++ 平台运行可达到实时操作的效果.

本文提出的基于约束的代理区域布局,存在一定的局限,因为约束定义不完善会导致生成不合理的布局. 如果可以通过统计已有的案例数据,得到更多的布局规律,并根据规律构造布局约束模型,用于指导物体的布局计算,将提高布局结果的合理性. 如何从已有布局案例的数据中学习到场元素布局应遵循的规律和约束,是值得进一步探索的问题.

## 参 考 文 献

- [1] Bukowski R W, Sequin C H. Object associations: A simple and practical approach to virtual 3D manipulation//Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics. Monterey, USA, 1995: 131-138
- [2] Xu K, Stewart J, Fiume E. Constraint-based automatic placement for scene composition//Proceedings of the Graphics Interface. Calgary, Canada, 2002: 25-34
- [3] Akazawa Y, Okada Y, Nijima K. Automatic 3D scene generation based on contact constraints//Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence. Limoges, France, 2005: 593-598
- [4] Sanchez S, Le Roux O, Luga H, et al. Constraint-based 3D object layout using a genetic algorithm//Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence. Limoges, France, 2003
- [5] Larive M, Le Roux O, Gaildrat V. Using meta-heuristics for constraint-based 3D object layout//Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence. Limoges, France, 2004: 11-23
- [6] Germer T, Schwarz M. Procedural arrangement of furniture for real-time walkthroughs. Computer Graphics Forum, 2009, 28(8): 2068-2078
- [7] Yu L F, Yeung S K, Tang C K, et al. Make it home: Automatic optimization of furniture arrangement. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 86:1-86:12
- [8] Merrell P, Schkufza E, Li Z Y, et al. Interactive furniture layout using interior design guidelines. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 87:1-87:10
- [9] Kjølaas K A H. Automatic Furniture Population of Large Architectural Models [M. S. dissertation]. Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA, 2000
- [10] Coyne B, Sproat R. WordsEye: An automatic text-to-scene conversion system//Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA, 2001: 487-496
- [11] Lu Ru-Qian, Zhang Song-Mao. From story to animation—Full life cycle computer aided animation generation. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(3): 321-348(in Chinese)  
(陆汝钤, 张松懋. 从故事到动画片——全过程计算机辅助动画自动生成. 自动化学报, 2002, 28(3): 321-348)
- [12] Jiang Lan, Yue Xiao-Li, et al. A system for case-and-constraint-based conceptual design method for 3D scenes. Computer Science, 2008, 35: 227-232(in Chinese)  
(江澜, 岳小莉等. 基于实例和约束的三维场景概念设计和系统实现. 计算机科学, 2008, 35: 227-232)
- [13] Fisher M, Richie D, Savva M. Example-based synthesis of 3D object arrangement. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): 135:1-135:11
- [14] Xu K, Chen K, Fu H B, et al. Sketch2Scene: Sketch-based co-retrieval and co-placement of 3D models. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 123:1-123:12
- [15] Liu Min. The Research of Furniture Disposing in Residential Interior [M. S. dissertation]. Beijing Forestry University, Beijing, 2006(in Chinese)  
(刘敏. 住宅室内空间的家具配置研究[硕士学位论文]. 北京林业大学, 北京, 2006)
- [16] Mei Jian-Ping. The Research of the Furniture Configuration and Comfort Level of the Urban Residential Interior [M. S. dissertation]. Nanjing Forestry University, Nanjing, 2006 (in Chinese)  
(梅剑平. 城市住宅空间的家具配置及其舒适度研究[硕士学位论文]. 南京林业大学, 南京, 2006)
- [17] Liu Yu, Xiong You-Lun. Algorithm fo searching nearest-neighbor based on the bounded k-d tree. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2008, 36(7): 73-76(in Chinese)  
(刘宇, 熊有伦. 基于有界 k-d 树的最近点搜索算法. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 73-76)



**LIU Mi-Lan**, born in 1986, Ph. D. candidate. Her research interests include virtual reality and 3D interior modeling.

**JIANG Hao**, born in 1982, Ph. D. , assistant professor. His main research interests include virtual reality and intelligent human-computer interaction techniques.

**MAO Tian-Lu**, born in 1977, Ph.D. , associate professor. Her main research interests include virtual reality and crowd simulation.

**WANG Zhao-Qi**, born in 1966, Ph.D. , professor, Ph.D. supervisor. His main research interests include virtual reality and intelligent human-computer interaction techniques.

## Background

This article focuses on the indoor scene generation problem in interior modeling. Indoor scenes are widely used in numerous fields, and how to generate indoor scenes efficiently and automatically is full of challenge. In this research area, many researchers paid attention to automatic furniture arrangement. Existing methods for indoor scene generation have considered geometry and physical constraint between objects, and some methods take ergonomic factors into account recent years. These methods can generate realistic indoor scenes, but most of them rely on the scene elements which were assigned by users, and are complex to operation.

Our method based on furniture configuration process in the field of interior design, considers the patch which have a certain residential behavior and specific scene elements two levels, can automatically generate indoor scenes conform to the daily life. Through this method, the user only need to provide the room's floor plan, without specifying the specific scene elements one by one in advance, bringing convenience to users.

This work was supported by the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (No. 2015AA016405), and the Natural Science Foundation of China (Nos. 61100086, 61532002).