

8-13-2020

Online Furniture Layout Method Based on Case-based Reasoning and Distance Fields

Peihua Song

School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Jinyuan Jia

School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Online Furniture Layout Method Based on Case-based Reasoning and Distance Fields

Abstract

Abstract: A furniture layout method based on case-based reasoning and distance fields was proposed to meet online real-time response requirements. *Three partial layout modes were summarized. Coupling layout mode was solved using case-based reasoning combined and mathematical model; matrix layout mode and furniture spacing algorithm were proposed; enclosed layout mode was solved using a personification rules and energy distribution function based on distance fields. Scene layout was divided into several partial layout modes, which were solved and synthesized.* Experimental results show that effect of the method is similar to the real design case, and the method is robust, and the method computation time can meet the real-time response requirements of the online furniture layout.

Keywords

furniture layout, layout mode, Case-based Reasoning, distance fields

Recommended Citation

Song Peihua, Jia Jinyuan. Online Furniture Layout Method Based on Case-based Reasoning and Distance Fields[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2438-2447.

基于案例推理及距离场的家居在线布局方法

宋佩华, 贾金原

(同济大学软件学院, 上海 201804)

摘要: 针对家居在线自动布局的实时响应等需求, 提出了基于案例推理及距离场的布局方法。归纳出耦合型、矩阵型和围合型三种局部布局模式。通过构建数学模型, 将其与案例推理技术结合求解耦合型布局模式; 给出了矩阵型布局模式求解算法; 应用距离场拟合出室内地面能量分布函数, 结合拟人摆放规则对围合型布局模式进行求解。然后, 将场景布局问题分解成若干个局部布局模式, 对其进行求解、组合, 得到该场景的布局。通过实验验证, 该方法布局结果与真实案例相近、鲁棒性强、运行时间可满足在线布局的实时响应需求。

关键词: 家居布局; 布局模式; 案例推理; 距离场

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2016)10-2438-10

Online Furniture Layout Method Based on Case-based Reasoning and Distance Fields

Song Peihua, Jia Jinyuan

(School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A furniture layout method based on case-based reasoning and distance fields was proposed to meet online real-time response requirements. Three partial layout modes were summarized. Coupling layout mode was solved using case-based reasoning combined and mathematical model; matrix layout mode and furniture spacing algorithm were proposed; enclosed layout mode was solved using a personification rules and energy distribution function based on distance fields. Scene layout was divided into several partial layout modes, which were solved and synthesized. Experimental results show that effect of the method is similar to the real design case, and the method is robust, and the method computation time can meet the real-time response requirements of the online furniture layout.

Keywords: furniture layout; layout mode; Case-based Reasoning; distance fields

引言

家居布局广泛存在于室内设计、三维游戏场景构建等行业中, 相比人工摆放家具存在重复操作、耗费时间等不足, 自动布局具有减轻工作量、提高工作效率等优势。家居自动布局具有重

要的理论研究与实际应用价值, 颇受相关学者的关注, 特别是近几年, 国际 SIGGRAPH 会议中有学者对该问题作进一步的探讨^[1-2], 国内也不断有学者对该问题进行研究^[3-4]。

随着“互联网+”行动的推进、面向移动互联网的 3D 技术快速发展, 在线室内设计平台以其不用安装庞大的离线软件、设计更加便捷等优势快速兴起, 如国外的 Autodesk 公司和国内的酷加乐公司都推出了在线室内设计平台^[5-6]。

在线室内设计平台的涌现, 使得家居在线自动布局的需求紧随出现, 但当前很多自动布局算



收稿日期: 2016-05-31 修回日期: 2016-07-14;
基金项目: 国家自然科学基金(61272270);
作者简介: 宋佩华(1982-), 男, 江西抚州, 博士生, 研究方向为虚拟现实、优化计算技术; 贾金原(1963-), 男, 山东乐陵, 博士, 教授, 研究方向为 Web Graphics、分布式虚拟现实。

<http://www.china-simulation.com>

• 2438 •

法是离线的^[1-4], 且计算量较大、较难满足在线布局的实时响应需求。家居在线自动布局面临的主要挑战是: 布局算法需满足布局效果好、实时响应速度快、鲁棒性强。

为此, 本文跳出传统布局方法只使用单一算法的局限, 采用多种算法组合的思路进行求解, 贡献主要包括: (1) 归纳出适合在计算机上实现的三种局部布局模式; (2) 构建了耦合型布局模式的数学模型, 提出了基于案例推理的耦合型布局模式求解算法; (3) 拟合出室内地面的能量分布函数, 提出基于距离场的围合型布局模式求解算法。

1 相关工作

目前, 已有多种方法应用于求解家居布局问题, 代表性的有: 辅助家居布局方法, 基于智能算法的家居布局方法, 基于案例检索的家居布局方法。

(1) 辅助家居布局方法, 是早期家居布局常用的方法, 通过实现家具间约束条件或提示性操作, 协助用户控制家具运动行为, 将家具快速精准定位, 帮忙用户提高室内布局的效率, 该类方法以用户为中心, 起协助用户设计作用^[7-8]。

(2) 基于智能算法的家居布局方法, 通过设置家具与家具、家具与布局场景墙体间距离、角度和对称性等规则值, 根据这些规则给出评价函数; 当家具在不同位置时, 根据评价函数会得一个评价价值, 运用智能算法对家具位置进行优化。目前应用到家居布局的智能算法主要有模拟退火算法、遗传算法和粒子群算法^[1-4,9-10]。文献[3]根据分治算法的思想, 提出层次优化思想化解约束冲突并采用粒子群优化算法解决布局优化问题, 该算法比文献[1]在运行时间效率上有较大的提高。文献[10]研究船舶居住舱室布局问题, 通过人工设置舱室墙壁的能量值, 从而将问题转化为一个求解能量值最大化的问题, 并通过遗传算法进行优化, 但该算法中舱室墙壁的能量值需要人工进行设置。

该类算法布局结果依赖于布局开始时设置的规则值, 当家具大小、场景大小和功能发生变化时, 规则值也需要进行重新设置。同时, 该类算法还存在智能算法参数设置的问题, 因为不同布局场景中, 场景、家具的信息都不相同, 很难用相同的参数进行求解, 很多情况下需要凭借人工经验进行参数设置, 参数不合适, 可能达不到理想的布局效果。

(3) 基于案例检索的家居布局方法。将家具的约束关系通过编码存放在案例库中, 文献[11]是用家具包围盒六个面之间的距离等约束关系表示布局, 将约束关系存放在案例库中, 当用户输入布局家具时, 可以从案例库检索出一个布局案例, 但该算法用家具之间面与面的约束关系不能表示出同一个面放置多个家具等复杂的布局关系, 也未考虑场景中场景门窗位置等发生变化时的布局情况。文献[12]也是用家具包围盒六个面之间的约束关系表示布局, 并通过搜索具有父子关系的家具不断调整其位置, 最后生成布局。

将已经设计好的局部功能模块(场景)存放在案例库中。文献[4]通过划分房间的功能区, 制定功能区布局规则和布局评价函数, 并用智能算法对功能区位置进行优化, 最后根据功能区大小从后台检索出该功能区的布局家具。文献[13]提出了运用模板的思想解决布局问题, 该方法先将每个室内空间功能进行人工定位, 再将数据库中相应的布局功能模块放置在当前室内, 并通过缩放, 移动和舍弃等操作调整布局功能模块。文献[14-15]通过对用户输入的场景或家具进行分析, 并检索后台类似场景或家具, 最后生成场景。该类算法本质上为当前场景推荐生成一个布局方案, 场景中家具并非由用户选定, 对用户操作有一定限制。

2 家居布局模式

本文研究的布局问题是: 用户通过在线平台, 将家具拖放至三维场景, 利用自动布局方法能把这些家具摆放到合适的位置。其中, 场景是

指人们日常生活中的餐厅、客厅、卧室、教室和会议室(以下简称“室内”);家具是指广义上家具概念,包括家具、家电等场景内物品;摆放到合适的位置是指布局需满足人体工程学和室内设计基本规范^[16-17]。

2.1 局部布局模式

文献[16]提出了多种设计空间模型,为了更好地在计算机上实现这些空间模型,本文对其进行了改进和归纳,抽取出了三种局部布局模式。如图 1 所示。

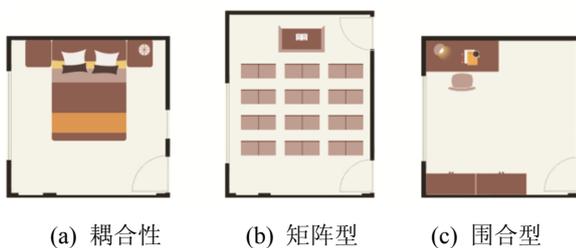


图 1 局部布局模式

耦合型布局模式:在特定的环境中,相关联的家具摆放时,家具(或场景、或家具组合)与家具(或家具组合)之间需要保持特定位置关系,如图 1(a)的床和床头柜;该模式包含了文献[16]中的线性结构、轴心结构、序列型、主从型、并列型、包容型和邻接型设计空间模型。

矩阵型布局模式:将多个相同的家具(或家具组合)摆放在一个矩形区域中,并要求家具之间距离满足人体工程学中的最小距离,如图 1(b)中教

室中的课桌;该模式对应文献[16]中的栅格型设计空间模型。

围合型布局模式:在一个指定的区域摆放家具(或家具组合)时,优先在拐角处摆放,再沿墙边摆放,最后往中间区域摆放,如图 1(c)中书房沿墙摆放书柜。

2.2 全局布局模式

全局布局模式指场景中所包含局部布局模式的组合,用分治思想,将客厅等场景常见的全局布局模式进行分解,其包含局部布局模式见表 1。

场景	全局布局模式
客厅、餐厅	耦合型布局模式
卧室	耦合型布局模式+围合型布局模式
教室、会议室	耦合型布局模式+矩形型布局模式
	耦合型布局模式+围合型布局模式

2.3 布局方法总体框架

本文布局方法总体思路:先根据场景及家具信息,从表 1 中选择相应的全局布局模式;再对全局布局模式包含的局部布局模式进行求解(先对场景中符合耦合型布局的家具进行求解布局,再对符合矩形型或围合型布局模型的家具求解布局);最后对这些局部布局模式的求解结果进行组合,得到当前场景的布局。本文布局方法的总体框架见图 2。

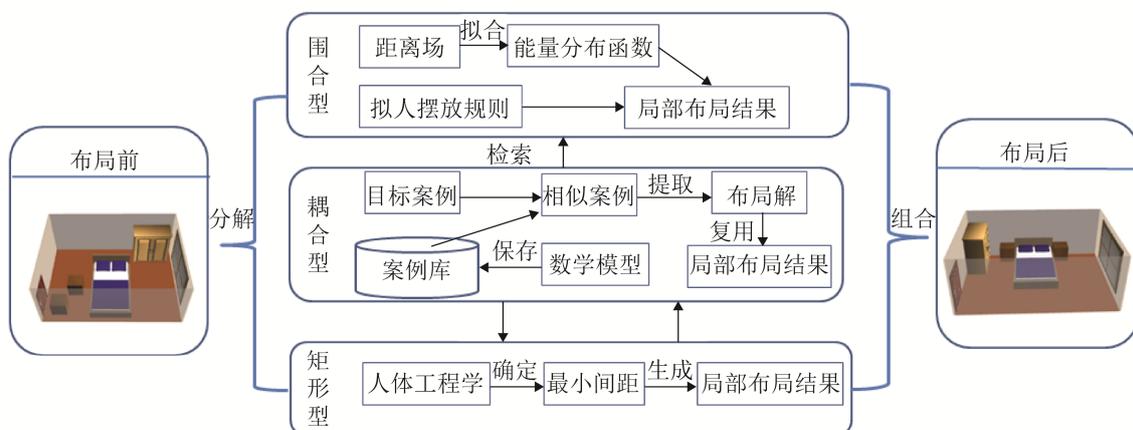


图 2 布局方法总体框架

3 耦合型布局模式求解算法

3.1 耦合型布局模式的数学模型

耦合型布局模式的数学模型作用: 表示耦合型布局模式中家具之间的布局关系。耦合型布局模式包含 1 件主家具和 n 件相同的附属家具(用 k 表示附属家具的编号, $k=1, \dots, n$), 主家具包含 n 个布局点, 每件附属家具具有 1 个布局点。耦合型布局模式布局过程为: 先将附属家具进行旋转, 然后找到主家具、附属家具的布局点, 最后通过两个布局点之间的距离变换得到布局结果。

如图 3(a)所示, 家具用轴对齐包围盒代表, l, w, h 表示家具的长宽高, 长度矩阵 $S = (l/2, h/2, w/2)^T$, S_0 为主家具的长度矩阵, S_k 为附属家具 k 的长度矩阵; $P = (x, y, z)^T$ 为家具在场景中的位置即包围盒底面矩形中心点的位置, P_0 为主家具的位置, P_k 为附属家具 k 的位置; a 为家具在其位置处围绕 Y 轴方向旋转的角度, $a = \{0, 90, 180, 270\}$, a_0 为主家具的旋转角度, a_k 为附属家具 k 的旋转角度。附属家具 k 与主家具的布局关系用数学模型表示如下:

$$\begin{aligned} P_k &= G_k + T_k + D_k, \\ G_k &= M_k S_k, \\ T_k &= P_0 + R_k S_0. \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $G = (g_{ij})_{3 \times 1}$, G_k 为附属家具 k 的布局点; $T = (t_{ij})_{3 \times 1}$, T_k 为主家具相对附属家具 k 的布局点; $D = (d_{ij})_{3 \times 1}$, D_k 为附属家具 k 布局点的距离矩阵; $M = (m_{ij})_{3 \times 3}$, M_k 为附属家具 k 布局点的变换矩阵; $R = (r_{ij})_{3 \times 3}$, R_k 为主家具相对附属家具 k 布局点的变换矩阵; P_0, S_0, S_k 为已知量; a_k, M_k, R_k, D_k 根据布局及人体工程学进行设置^[16-17]。

如图 3(a), (b)所示, 桌子(主家具)与椅子(附属家具)构成耦合型布局模式, $P_0 = (0, 0, 0)^T$, $a_0 = 0$, $a_1 = 180$, T_1 为桌子相对椅子的布局点, G_1 为椅子布局点; 在图 3(c)中, P_1 为椅子布局后的位置, 设两蓝色点的距离为 d_z , 则 $D_k = (0, 0, d_z)^T$, 若 d_z 等于正无穷大, 则从主家具中心点沿 Z 轴正方向发

射一条射线, 通过射线与墙体交点对附属家具的位置进行推算, 其他情况以此类推。

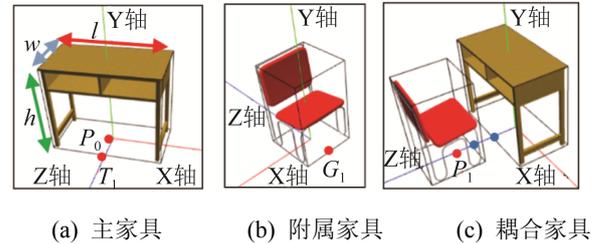


图 3 耦合型布局模式相关信息

在图 4(a), (c)为初始布局, 床是主家具, 床头柜是附属家具; 床与床头柜布局数学模型 (Mathematical Modeling of Bed, MM_BED) 的参数如下:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0, a_1 = 0, a_2 = 0 \\ R_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ R_2 &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

图 4(b), (d)为用 MM_BED 运算后的布局结果, 可以看出: 变更家具大小, 由耦合型布局模式的数学模型计算得到的布局结果仍然满足设计需求, 说明该数学模型鲁棒性强, 也验证了数学模型的正确性。

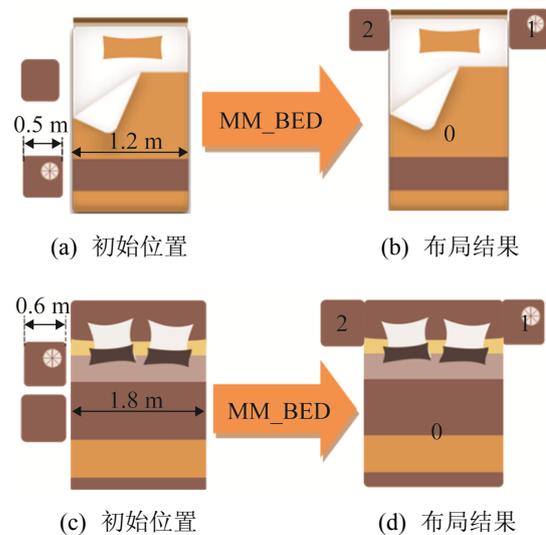


图 4 应用 MM_BED 布局结果

3.2 基于案例推理的耦合型布局模式算法

本文应用案例推理算法^[18]求解耦合型布局模式，其关键问题描述如下：

3.2.1 布局案例表示

布局案例表示：由布局问题描述和布局解描述两部分组成。其中，布局问题描述是由主家具、附属家具的长宽高构成，用向量 $\mathbf{q}=(l_0, w_0, h_0, l_1, w_1, l_1)^T$ 表示；布局解是由耦合型布局模式的数学模型参数构成。

布局案例名称：由主家具名称、附属家具名称和附属家具数量构成。

3.2.2 布局案例检索

用欧氏距离表示两个案例之间相似度，距离越小表示两案例越相似，本文采用最近邻算法(K-Nearest Neighbor algorithm, K=1)对布局案例进行检索：

$$\min_i \{ \text{Dis}(\text{case}_0, \text{case}_i) = (\sum_{j=1}^6 (q_{0,j} - q_{i,j})^2)^{1/2} \} \quad (2)$$

式中： case_0 表示待布局家具； $i=\{1,2,\dots,n\}$ ， n 表示与 case_0 具有相同名称的案例数量， case_i 表示在数据库中与 case_0 具有相同名称的布局案例； \mathbf{q}_0 表示 case_0 问题描述， $\mathbf{q}_{0,j}$ 表示 case_0 问题描述向量的第 j 个分量值； \mathbf{q}_i 表示 case_i 问题描述， $\mathbf{q}_{i,j}$ 表示 case_i 问题描述向量的第 j 个分量； $\text{case}_{\text{best}}$ 为从案例库中查找到与 case_0 最相似的案例，将 $\text{case}_{\text{best}}$ 的布局解和 case_0 的相关信息($\mathbf{P}_0, \mathbf{S}_0, \mathbf{S}_k$)代入数学模型中进行运算，可得到 case_0 布局结果。

将案例数据库表中的“案例名称”字段设置为索引，使用索引可快速访问到数据库表中具有相同名称案例的信息；同时，由 3.1 小节可知，只需在案例数据库中存放 1 个布局案例(n 等于 1，布局解为 MM_BED 的参数)就可以求解出 1 张床和 2 个床头柜的布局问题，所以本文用最近邻算法搜索速度很快。

3.3 布局场景与家具的耦合布局模式

布局场景与部分家具(家具组合)也会存在耦合关系，现将的教室等场景与家具耦合的部分规则归纳如下，本文实验部分也是基于这些规则。

(1) 场景的门和窗户对家居布局没有影响，或影响很小可以忽略不计，可直接运用 3.2.1 小节的案例表达。教室：如图 5(a)教室与讲台构成耦合型布局模式，讲台位置由讲台大小和教室大小决定。会议室：如图 5(b)会议室与会议桌构成耦合型布局模式，会议桌可放置在房间中心位置。

(2) 场景的门、窗对家居布局有影响，案例表达中需加入门、窗户栅格化后的位置信息，如图 5(c)中，房门在位置 3 处，窗户在位置 8 处。客厅：如图 5(d)的客厅与沙发构成耦合型布局模式，沙发与窗户位置相关，沙发一般放置窗户旁边。卧室：如图 5(e)的卧室与床构成耦合型布局模式，床的位置与门、窗户位置相关。一般将床的方向与窗户方向平行，床与窗户之间的间距 d 的大小与卧室大小相关。

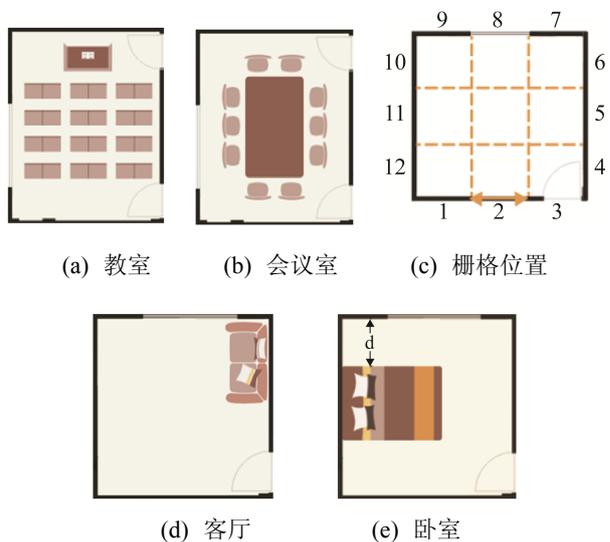


图 5 布局场景与家具的部分耦合规则

3.4 耦合型布局模式求解算法

耦合型布局模式求解过程见算法 1。

算法 1：耦合型布局模式求解算法

输入：待布局的耦合型家具 case_0

输出: case₀ 的布局结果

- 1 从案例库中查找与 case₀ 相同名称的案例集合 case_i;
- 2 用最近邻算法在 case_i 中查找出最相似的案例 case_{best};
- 3 获取案例 case_{best} 的耦合型布局模式数学模型参数;
- 4 将 case_{best} 数学模型参数赋值给 case₀;
- 5 case₀ 将其相关信息和数学模型参数代入数学模型进行运算;
- 6 得到 case₀ 的布局。

4 矩阵型布局模式求解算法

文献[11]给出了在矩形区域放置相同家具的求解方法, 考虑的是将家具沿室内中心向外扩的方式进行摆放。但实际生活中, 矩阵型家具摆放一般是考虑将家具沿墙体摆放, 本文考虑的也是将家具沿墙体摆放成矩形型。

如图 6 所示, 设有一个起始点在 (x_s, z_s) , 长为 l_r , 宽为 w_r 的矩形区域, 需要将 n 件相同家具(或家具组合)摆放到该矩形区域, 使家具摆放成矩形型布局, 家具包围盒的长宽高为 l, w, h , X、Z 轴方向家具间最小间距分别用 g_1 、 g_2 表示。X、Z 轴方向实际间距 g_3 、 g_4 , 其中 $g_3 \geq g_1$, $g_4 \geq g_2$ 。其中, 用户可以自行设置 g_1 、 g_2 的值。也可将常见的需矩阵型布局家具大小及其 g_1 、 g_2 值存放在数据库中, g_1 、 g_2 由人体工程学确定; 当用户需对待布局家具进行矩阵型模式布局时, 从数据库找到与待布局家具大小最相近的家具, 将其 g_1 、 g_2 值作为待布局家具的最小间距值。

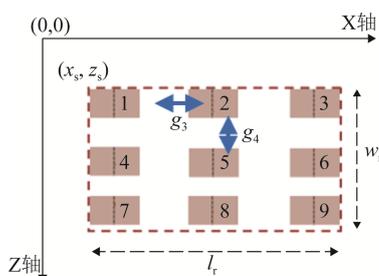


图 6 矩阵型布局模式

设矩形区域沿 X 轴方向一行可以放置 m 件家具, m 为正整数, 则得到不等式: $(m-1) \times g_1 + m \times l \leq l_r$, 由此可计算出 m , 再根据 m 可得到 $g_3 = (l_r - m \times l) / (m - 1)$ 。矩阵型布局模式求解时, 先将家具先沿 X 轴方向摆放, 后沿 Z 轴方向的顺序依次摆放(如图 6 所示, 家具的摆放顺序为 1, 2, ..., 9), 其计算过程见算法 2。

算法 2: 矩阵型布局模式求解算法

输入: 矩阵布局区域信息, n 件相同的待布局家具

输出: 家具在矩形区域中的布局

- 1 计算 g_1 , g_2 , g_3 ; 初始化 $g_4 = g_2$, 放置行数 $row = 0$;
- 2 FOR $i = 1$ TO n
- 3 IF i 等于 1 THEN
- 4 根据 (x_s, z_s) 放置第一个家具;
- 5 ELSE IF 当前家具超出矩形布局区域 THEN
- 6 $row = row + 1$;
- 7 根据 (x_s, z_s) , row 和 g_4 , 确定家具 i 的位置;
- 8 ELSE
- 9 根据家具 $(i-1)$ 的位置和 g_3 , 确定家具 i 的位置;
- 10 END IF
- 11 END IF
- 12 END FOR

5 围合型布局模式求解算法

文献[10]通过人工对舱壁设置能量值, 因布局环境大小、门窗位置等不同, 人工设置墙壁的能量值工作量大且繁琐, 为此本文提出基于距离场的围合型布局模式求解算法。

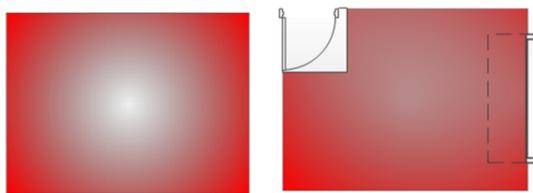
5.1 室内地面能量分布函数

文献[19]指出距离场是一种标量场, 它反映了空间中任意一点到一个给定物体表面的最短距离。本文对室内地面的距离场定义如下:

现有一个长为 l_{room} ，宽为 w_{room} ，高为 h_{room} 的矩形地面室内空间， (x, z) 表示室内地面上任意一点的位置，室内地面中心定义为 $(x_{c,1}, z_{c,1})$ ；室内有 1 个房门，房门在地面上的位置为 $(x_{c,2}, z_{c,2})$ ；室内有 1 个窗户，窗户在地面上的位置为 $(x_{c,3}, z_{c,3})$ 。 $V(x, z)$ 表示室内地面 (x, z) 位置处在距离场中的能量值，定义如下：

$$V(x, z) = \sum_{i=1}^3 w_i ((x - x_{c,i})^2 + (z - z_{c,i})^2)^{1/2} \quad (3)$$

式中： w_i 为距离权值，将公式(3)计算得到地面能量值映射为颜色值并用图显示出来，可以直观表现出地面的能量分布。如图 7 所示。



(a) 未考虑门窗能量图 (b) 考虑门窗能量图

图 7 地面能量分布图

如图 7 所示，红色表示该处能量值较高，适合摆放家具；白色表示该处能量值较低，不适合摆放家具；在图 7(a) 中 $w_1=1, w_2=0, w_3=0$ ，只考虑将家具沿墙摆放；在图 7(b) 中 $w_1=1, w_2=0.5, w_3=0.5$ ，考虑了门和窗的影响情况，在卧室中可以采用该能量分布图。从上述可知，通过调节参数 w_i ，可拟合出不同的能量分布图，以满足不同场景布局需求。

5.2 家具的能量值

家具的能量值：表示该家具所占据室内地面上所有能量值的总和。如图 8 所示， (x_u, z_u) 为家具包围盒底面矩形的左上角点在室内地面的位置， l, w 为家具包围盒的长宽。

家具在室内地面的能量值用 $E(x_u, z_u)$ 表示，定义如下：

$$E(x_u, z_u) = \sum_{x=x_u}^{x_u+l} \sum_{z=z_u}^{z_u+w} V(x, z) \quad (4)$$

式中，当家具发生以下四种情况时，家具的能量值为零：(1) 家具与房门矩形框发生碰撞，房门

矩形框即图 7(b) 中包含门的白色矩形框；(2) 家具与图 7(b) 中窗户虚线框发生碰撞，且家具高度大于窗户规定遮挡高度；(3) 家具与已经固定好位置的家具发生碰撞。固定好位置家具包括：已应用耦合型布局模式求解得到的家具，已应用围合型布局模式求解得到的家具；(4) 家具与已经固定好位置的家具活动空间发生碰撞，如衣柜的正前方为其活动空间范围。

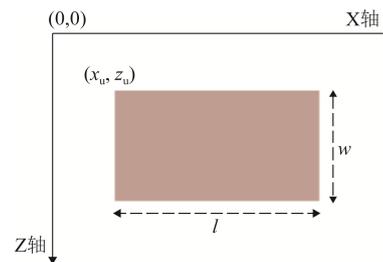


图 8 家具包围盒底面矩形信息

5.3 家具能量值最大化

在室内地面搜索一个位置，使家具能量值达到最大，这一过程称为家具能量值最大化，形式化表示如下：

$$\max_{x_u, z_u} E(x_u, z_u) \quad (5)$$

为了扩大搜索家具能量值最大化的位置范围，可将家具旋转 90° 。同时，为了提高计算效率，可利用家具上一位置的能量值推导出当前位置能量值。家具在室内地面任何位置初始化 $E(x_u, z_u)$ 值均为 0， $E(x_u, z_u)$ 按如下算法计算：

(1) 若 $E(x_u-1, z_u) > 0$ ，则：

$$E(x_u, z_u) = E(x_u-1, z_u) - \sum_{z=z_u}^{z_u+w} V(x_u-1, z) + \sum_{z=z_u}^{z_u+w} V(x_u+l, z) \quad (6)$$

(2) 若 $E(x_u, z_u-1) > 0$ ，则：

$$E(x_u, z_u) = E(x_u, z_u-1) - \sum_{x=x_u}^{x_u+l} V(x, z_u-1) + \sum_{x=x_u}^{x_u+l} V(x, z_u+w) \quad (7)$$

(3) 若 $E(x_u-1, z_u)$ 与 $E(x_u, z_u-1)$ 都等于 0，则按公式(4)计算。

5.4 卧室家具布局问题形式化描述

现用图 7(b)的能量分布函数求解卧室的布局问题, 若室内有 n 件待布局家具(不包括已经用耦合型布局模式求解得了摆放位置的家具, 如卧室中的床), 需要将其布局成围合型模式, 现将其转化为求解所有家具在室内的位置, 使这些家具在室内能量值之和最大化的问题, 见公式(8)。

$$\max_{x_u, z_u} \sum_{k=1}^n E(x_{u,k}, z_{u,k}) \quad (8)$$

式中: k 为家具的编号($k=1, 2, \dots, n$); $E(x_{u,k}, z_{u,k})$ 表示家具 k 的能量值。公式(8)中还需要满足如下约束条件: 家具之间不发生重叠干涉; 家具可见性(高度值大的家具不能挡住高度值小的家具), 高度值大的家具不能挡住窗户等室内设计原则。

5.5 卧室拟人家具摆放规则

文献[20]提出的拟人算法核心思想是将日常生活中的经验运用到问题求解中。本文提出了卧室拟人家具摆放规则, 并结合能量分布函数对公式(8)即卧室的布局进行求解。拟人家具摆放规则解决的问题是: 如何确定哪个家具先摆放, 哪个家具后摆放。

根据实际室内设计经验, 拟人家具摆放规则思想为: 先设置面积阈值 AT (Area Threshold)和高度阈值 HT (Height Threshold); 若家具面积大于 AT , 同时高度大于 HT , 则将这些家具优先摆放, 按面积从大到小顺序摆放; 其次再摆放面积大于 AT 的家具, 按面积从大到小顺序摆放; 最后摆放其他家具。如现卧室中有小凳子、衣柜、化妆台, 则先摆放衣柜, 再摆放化妆台, 最后放置小凳子。

5.6 卧室的围合型布局模式求解算法

卧室的围合型布局模式求解算法的具体计算过程见算法 3。

算法 3: 卧室围合型布局模式求解算法

输入: n 件家具, 卧室大小、门、窗位置信息

输出: 家具在卧室中的布局

```

1 根据距离场, 计算室内地面能量分布  $V(x, z)$ ;
2 使用卧室拟人家具摆放规则确定家具摆放顺序;
3 FOR  $i=1$  TO  $n$ 
4 计算家具  $i$  能量最大化的能量值  $E(x_u, z_u)$ ;
5 IF  $E(x_u, z_u) > 0$  THEN
6 家具  $i$  位置为  $(x_u, z_u)$ ;
7 ELSE
8 家具  $i$  摆放失败, 将该家具放置到当前卧室的外部;
9 End IF
10 ENF FOR
11 得到所有家具布局位置。

```

6 实验结果与分析

6.1 实验环境

本文使用 VS2015, 数据库使用 Microsoft SQL Server 2012, 前台显示用 WebGL 引擎 Three.js 编写, 后台使用 C# 语言编写了一个三维家居在线自动布局平台, 并在平台中实现了本文布局方法。实验场景包括餐厅、会议室、客厅、卧室和教室, 家具模型来自 3dwarehouse 模型库^[21]。实验计算所使用的计算机为: 普通笔记本 PC、操作系统 Window 8 64bit、CPU 主频双核 2.6GHz、内存 4G、Chrome 浏览器。

6.2 实验过程及结果

为了验证布局方法有效性, 从真实室内设计案例(或真实场景)中提取出主要家具及场景信息, 在布局平台中选择对应的家具和场景, 并附加茶杯、书等物品, 用本文方法对这些家具进行布局。

如图 9(a)~(e)为真实设计案例, 其中图 9(a)、(b)来自文献[17], 图 9(c)、(d)来自某楼盘的一个室内平面设计图^[22], 图 8(e)是拍摄某教室的相片^[23]。图 9(a')~(e')为运用本文方法计算后得到的布局结果。

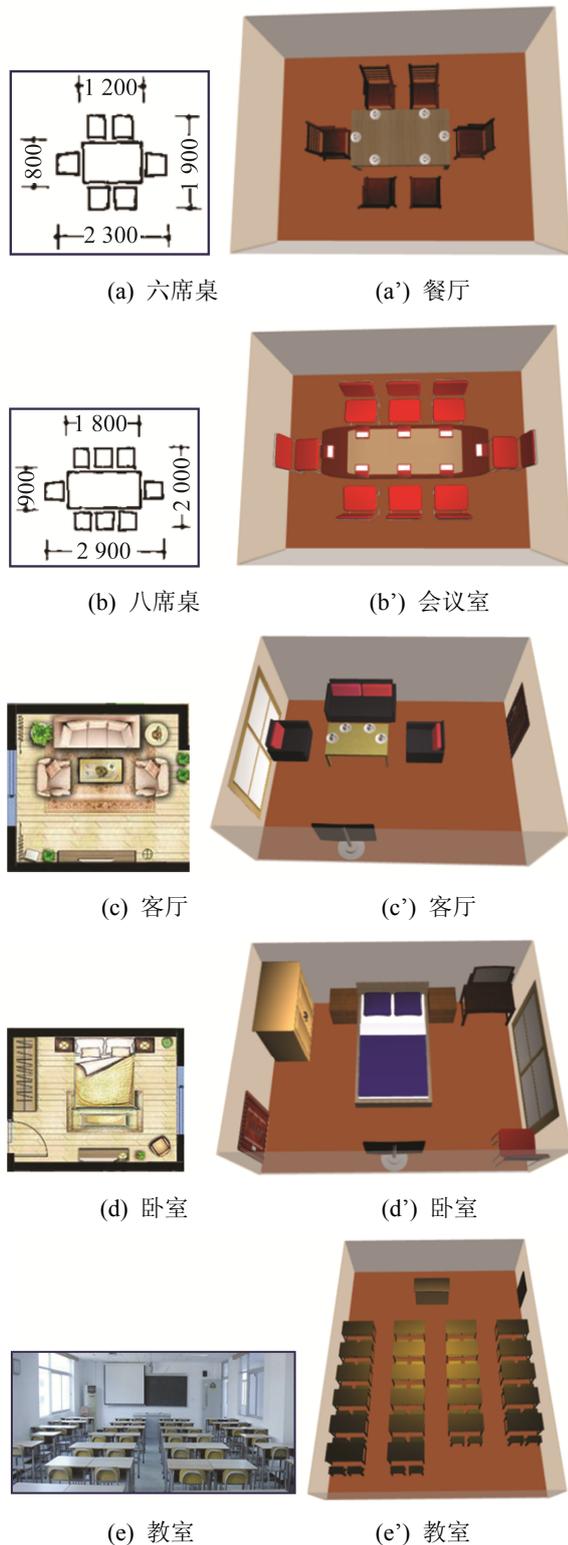


图9 布局结果

各场景中家具的数量信息,全局布局模式和本文布局方法运行时间见表2。

表2 实验计算结果

场景	全局布局模式	家具总数量	布局方法运行时间/s
餐厅	耦合型	13	0.117
会议室	耦合型	17	0.135
客厅	耦合型	9	0.551
卧室	耦合型+围合型	7	0.637
教室	耦合型+矩形型	67	0.173

6.3 实验结果分析

从实验结果可以得出如下结论:(1) 本文方法布局结果和设计师的设计案例(或实际场景布局)效果相近。(2) 布局方法在 1s 时间之内可以得到布局结果,其运行时间可满足在线布局实时响应的需求。(3) 布局方法能自适应场景大小、门窗位置、家具大小等变化,布局方法鲁棒性强。

7 结论

相比传统的布局方法对不同场景都采用同一种布局算法,本文跳出这一局限,对不同场景分别采用多种算法组合的思路进行求解。首先,通过分析了人们日常生活中的餐厅、客厅、卧室、教室和会议室的布局规律,归纳出耦合型、矩阵型和围合型三种最常见的局部布局模式。然后,通过构建耦合型布局模式的数学模型、案例推理技术、距离场、拟人家具摆放规则、人体工程学等对这三种局部布局模式分别提出了的相应求解算法。最后,根据用户给定的场景布局相关信息,将其布局问题分解成若干个局部布局模式,并对这些局部布局模式进行求解、合并,从而得到当前场景的布局。

从实验结果可知,本文布局方法的布局效果与实际设计案例相近、鲁棒性强、运行时间可满足在线布局实时响应的需求。如何快速在线实现办公室、商场等三维场景中家具(或物品)的自动布局,将是值得进一步探索的问题。

参考文献:

- [1] Yu L F, Yeung S K, Tang C K, et al. Make it home: automatic optimization of furniture arrangement [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2011, 30(4): Article No.86
- [2] Merrell P, Schkufza E, Li Z Y, et al. Interactive furniture layout using interior design guidelines [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2011, 30(4): Article No.87
- [3] 陈光明, 李桂清, 刘培, 等. 家居布局的层次化约束及其粒子群优化 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(10): 1603-1612.
- [4] 刘米兰, 蒋浩, 毛天露, 等. 基于复合模型的家具场景生成方法 [J]. 计算机学报, 2016, 39: No.2.
- [5] Homestyler home design. [EB/OL]. (2016-01-01) [2016-05-20]. <http://www.homestyler.com>
- [6] 酷加乐在线室内设计. [EB/OL]. (2016-01-01) [2016-05-20]. <http://www.kujiale.com/>
- [7] 王亮, 付永刚, 纪连恩, 等. 基于约束语义的双手交互场景布局系统 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(8): 1243-1249.
- [8] Uthor A, Epartment D, Cience S, et al. 3D Scene Manipulation with 2D Devices and Constraints [C]// Proceedings of Graphics Interface 2001. Canada: Canadian Information Processing Society, 2000: 135-142.
- [9] Akase R, Okada Y. Automatic 3D Furniture Layout Based on Interactive Evolutionary Computation [C]// Proceedings of the 2013 Seventh International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems USA: IEEE Computer Society, 2013: 726-731.
- [10] 王运龙, 王晨, 纪卓尚, 等. 船舶居住舱室智能布局优化设计方法研究 [J]. 中国造船, 2013, 54(3): 139-146.
- [11] Akazawa Y, Okada Y, Nijima K. Automatic 3d scene generation based on contact constraints[C]//Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence. Limoges, France, 2005: 593-598
- [12] Germer T, Schwarz M. Procedural Arrangement of Furniture for Real-Time Walkthroughs [J]. Computer Graphics Forum (S0167-7055), 2009, 28(8): 2068-2078.
- [13] Kjolaas K A H. Automatic furniture population of large architectural models [D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [14] Fisher M, Ritchie D, Savva M, et al. Example-based synthesis of 3D object arrangements [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2012, 31(6): 439-445.
- [15] Xu W, Wang B, Yan D M. Wall grid structure for interior scene synthesis [J]. Computers & Graphics (S0097-8493), 2015, 46: 231-243.
- [16] 刘旭. 图解室内设计分析 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [17] 张绮曼, 潘吾华. 室内设计资料集 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [18] Kolodner J L. An introduction to case-based reasoning [J]. Artificial Intelligence Review (S0269-2821), 1992, 6(1): 3-34.
- [19] 刘刚, 王锐, 鲍虎军, 等. 一种可见外壳生成算法 [J]. 软件学报, 2002, 13(9): 1823-1829.
- [20] 黄文奇, 何琨. 求解长方体 Packing 问题的纯粹拟人算法 [J]. 中国科学(F 辑:信息科学), 2009, 39(6): 617-622.
- [21] 3D Warehouse. [EB/OL]. (2016-01-01) [2016-05-20]. <https://3dwarehouse.sketchup.com>.
- [22] 搜房网.[EB/OL] (2016-01-01) [2016-05-20]. http://weilajiequls021.fang.com/photo/d_house_161063682.htm
- [23] 百度百科, 教室. [EB/OL]. (2016-01-01) [2016-05-20]. <http://baike.baidu.com>.

(上接第 2437 页)

- [14] V Kumar, D Burns, D Dutta, et al. A framework for object modeling [J]. Computer Aided Design (S0010-4485), 1999, 31(5): 541-556.
- [15] V Kumar, D Dutta. An approach to modeling & representation of heterogeneous objects [J]. Journal of Mechanical Design (S1050-0472), 1998, 120(12): 659-667.
- [16] 吴晓军, 刘伟军, 王天然, 等. 距离场定义下异质材料 CAD 信息建模方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(2): 313-318.
- [17] S H Choi, K T Kwok. A tolerant slicing algorithm for layered manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal (S1355-2546), 2002, 8(3): 161-179.
- [18] Sébastien Labbé, Jean-Pierre Gallois. Slicing communicating automata specifications: polynomial algorithms for model reduction [J]. Formal Aspects of Computing (S0934-5043), 2008, 20(6): 563-595.