

8-13-2020

## Evaluation Method for Interior Layout Based on Voronoi Diagram

Milan Liu

*1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;; 2. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China;; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

Jiang Hao

*1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;; 2. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China;;*

Tianlu Mao

*1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;; 2. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China;;*

Zhaoqi Wang

*1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;; 2. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, 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.

---

## Evaluation Method for Interior Layout Based on Voronoi Diagram

### Abstract

**Abstract:** Three-dimensional interior model can be used to guide the indoor objects layout in real life. It is hard to evaluate an interior layout by a precise data because of the polymorphism and fuzzy of the evaluation problem of interior layout itself. In order to evaluate an interior layout objectively from the user's view, *an evaluation method for interior layout was proposed based on Voronoi Diagram. This method combined the knowledge of interior design and robot path planning, and generated moving lines in the scene by Voronoi Diagram. It could evaluate the interior layout objectively from aspects of patency, smoothness of moving lines.*

### Keywords

Voronoi Diagram, interior layout, moving lines, evaluation for layout

### Recommended Citation

Liu Milan, Jiang Hao, Mao Tianlu, Wang Zhaoqi. Evaluation Method for Interior Layout Based on Voronoi Diagram[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2356-2362.

# 基于 Voronoi 图的室内布局评价方法

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>

(1.中国科学院计算技术研究所, 北京 100190; 2.移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 三维室内模型可以用于指导现实生活中的室内物体布局。由于室内场景布局问题自身的评价指标存在多态性和模糊性, 难以用精确的数据来评价一个室内场景布局方案的优劣。为了从使用者的角度对室内场景布局进行客观的评价, 提出一种基于 Voronoi 图的室内布局评价方法, 结合室内设计领域和机器人路径规划领域的知识, 使用 Voronoi 图在室内场景中规划动线, 用仿真计算的方法从场景中动线的通畅度、平滑度以及区域分布均匀度等方面对场景布局方案进行客观评价。

**关键词:** Voronoi 图; 室内布局; 动线; 布局评价

中图分类号: TP391      文献标识码: A      文章编号: 1004-731X (2016) 10-2356-07

## Evaluation Method for Interior Layout Based on Voronoi Diagram

Liu Milan<sup>1,2,3</sup>, Jiang Hao<sup>1,2</sup>, Mao Tianlu<sup>1,2</sup>, Wang Zhaoqi<sup>1,2</sup>

1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Three-dimensional interior model can be used to guide the indoor objects layout in real life. It is hard to evaluate an interior layout by a precise data because of the polymorphism and fuzzy of the evaluation problem of interior layout itself. In order to evaluate an interior layout objectively from the user's view, an evaluation method for interior layout was proposed based on Voronoi Diagram. This method combined the knowledge of interior design and robot path planning, and generated moving lines in the scene by Voronoi Diagram. It could evaluate the interior layout objectively from aspects of patency, smoothness of moving lines.

**Keywords:** Voronoi Diagram; interior layout; moving lines; evaluation for layout

## 引言

三维室内场景模型可以用于指导现实生活中的室内物体布局。布局是否合理, 最终是由居住空间的使用者感受决定的。对于家具布局的评价, 目前的方法一般是结合人类工程学、美学等领域知识定义代价函数, 用代价函数表示约束, 然后对多个

函数的加权和求解全局最优解<sup>[1-2]</sup>。由于室内场景布局问题自身的评价指标存在多态性和模糊性, 使得布局方案的评价十分困难, 难以用精确的数据来评价一个室内场景布局方案的优劣。单个代价函数的函数值只能体现它所代表的约束满足的程度, 总体的目标函数值反映不出每项具体约束的满足情况。同时, 自动生成的室内场景布局难以得到最优配置, 即使在所有预定义约束都满足的情况下, 也有可能在实际使用中出现问题。因此, 从使用者的角度分析布局是否合理, 是结合实际生活的重要一环。

在室内设计领域, 动线是一个重要的概念。动



收稿日期: 2016-05-09      修回日期: 2016-07-22;  
基金项目: 国家自然科学基金(61532002); 863 计划  
(2013AA013902, 2015AA016405);  
作者简介: 刘米兰(1986-), 女, 湖南湘潭, 博士生,  
研究方向为三维场景建模技术; 蒋浩(通讯作者  
1982-), 男, 湖南株洲, 助理研究员, 研究方向为虚拟  
现实、智能人机交互。

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

• 2356 •

线, 又称流线, 是指人在室内室外移动的点与点之间的连线, 简单来说就是人在屋子里从一个功能区域到另一个功能区走动的路线。动线是分割空间的依据, 流畅不迂回的动线才能提升居住品质<sup>[3]</sup>。

Voronoi 图是一个关于空间划分的基础数据结构, 通常以直线距离作为度量, 对平面进行区域分割。Voronoi 图可以在具有障碍物的环境中规划路径<sup>[4]</sup>, 因而在机器人路径规划中有普遍的应用: 将障碍物看成质点, 则机器人沿着障碍物的 Voronoi 图的边行走是最安全的<sup>[5]</sup>。

为了从使用者的角度对室内场景布局进行客观的评价, 本文提出一种基于 Voronoi 图的室内布局评价方法, 结合室内设计领域和机器人路径规划领域的知识, 用仿真计算的方法从场景中动线的通畅度、平滑度以及区域分布均匀度等方面对场景的布局方案进行客观评价。

## 1 Voronoi 图简介

Voronoi 图(Voronoi Diagram, 后简称 V-图)是由俄国科学家 M.G.Voronoi 于 1908 年发现并以他名字命名的, 是一个关于空间划分的基础数据结构。在 V-图中, 被用来划分空间的各个基本图形元素一般称为站点(site), 站点可以是一个点, 一条线段或者一个凸多边形。V-图根据站点的位置将场景划分为若干 V-区域(region)的集合。每个 V-区域是到一个站点比其他站点更近的点的集合; V-边(edge)是 V-区域的边界, 其上每个点到相邻两个站点的距离最近且相等; V-顶点(vertex)是两条或更多条 V-边的交点, 它到三个或三个以上站点距离最近且相等。

由于 V-图在描述场景的特殊能力, 它在计算几何及相关领域有重要的研究意义和应用价值, 例如中轴计算, 图像分割、碰撞检测, 路径规划等。其中, 在路径规划应用中, 要解决的问题是已知平面上或空间中的若干障碍物, 给出 agent 从一个位置到另一个位置的安全或最优路径, V-图中一个站点通常代表一个障碍物, 并将 V-顶点作为指导

agent 全局规划的路径点, 通过 V-边连接路径点, 构建路径图。由于路径图中的路径是 V-边, 而 V-边是障碍物离散中心的中垂线, 这样能保证 agent 在运行过程中最大程度地远离障碍物<sup>[6]</sup>, 因此 agent 沿着障碍物的 V-图的 V-边行走是最安全的<sup>[5]</sup>。正是因为 V-图在表示空间关系的独特优势, 闫浩文等<sup>[7]</sup>在其论文中对其理论依据有严格的论述, 本文研究的路径评价问题采用 V-图的方法。

## 2 本文方法

本文提及的室内场景由目标空间和场景元素构成, 目标空间是房间轮廓内部的空间在  $xoy$  平面上的投影, 场景元素是房间轮廓内部的地面物体在  $xoy$  平面上的投影。现实生活中, 有一些共同完成某一种功能的家具会成组出现, 例如餐桌和餐椅, 沙发和茶几等, 本文将这些成组出现的家具组合称为功能区域, 家具组合的包围盒轮廓在  $xoy$  平面上的投影为对应功能区域的轮廓。本文思路如下:

首先, 在室内场景中构造 V-图。V-图的站点由表示功能区域的矩形和表示墙的线段组成。本文采用文献[8]的方法根据站点生成 V-图, 由光栅图表示。

接着, 获取室内场景中的路径。在目标空间范围内的 V-边均为可行走路径。选定起点和终点, 在 V-顶点集合上搜索分别离起点和终点最近的 V-顶点作为近似起点和近似终点, 并在这两点之间搜索 V-边, 合并成路径。

最后, 对路径进行评价。本文通过定义动线通畅度、平滑度、区域分布均匀度等评价指标, 从不同的方面对场景布局进行客观评价。

## 3 场景 V-图构造

### 3.1 V-区域构造

为了在已布局的场景中进行路径规划, 本文将功能区域和墙作为障碍物, 采用文献[8]的方法, 以障碍物为站点生成场景的 V-图。

首先,将各个表示功能区域的矩形和表示墙的线段创建为站点对象。如图 1(a)所示,白色线框代表的是目标空间的轮廓,即房间的墙体轮廓,黑色线框的矩形代表功能区域。

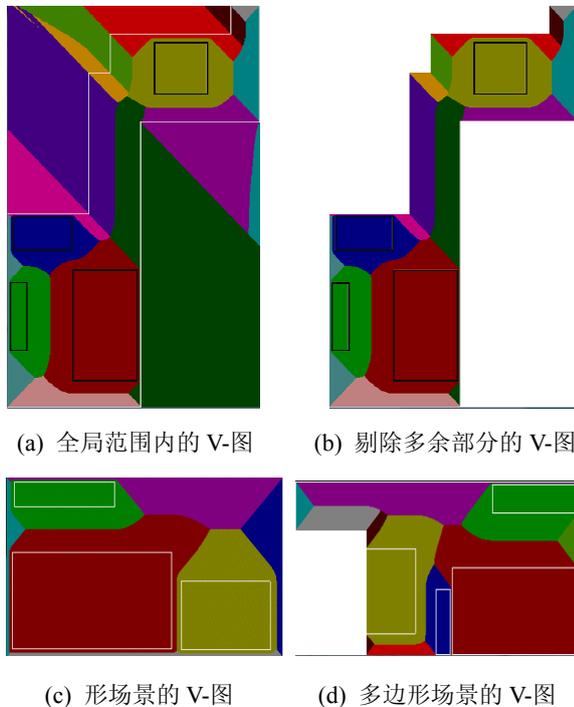


图 1 室内场景生成 V-图示例

接着,为场景中的每个站点分配唯一的颜色和相应的距离函数。不同类型的站点对应不同的距离函数。对于点来说,距离函数是一个圆锥,如图 2(a)所示;对线段来说,距离函数由三部分组成:线段本身和两个端点,端点和一般的点一样,距离函数表示为圆锥,线段本身的距离函数被表述为两个矩形,线段是这两个矩形其中的一条边<sup>[8]</sup>;对于凸多边形来说,它被分解成线段的并集,距离函数由共享同一颜色的边线段的距离函数组合而成。

由于该方法将场景分割为离散、均匀、独立的正方形 cell,每个 cell 的中心点作为场景中的一个采样点,因为 cell 的独立性,可使用 GPU 的高效并行性进行加速计算。具体的,将所有不同颜色的 3D 多边形网格放入 GPU 中,使用一组并行投影,每个 cell 被渲染成支配它的 cell 的颜色。于是,能从帧缓存中得到近似的离散化的 V-图,从深度缓

存中得到每个 cell 的间隙值<sup>[9]</sup>。

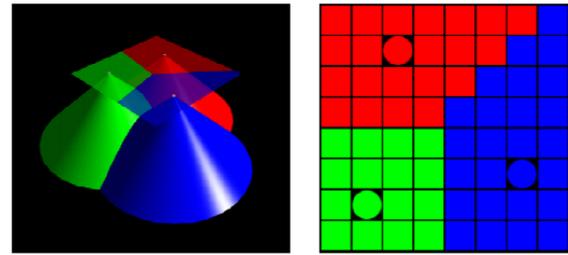


图 2 V-图网格划分示意图<sup>[9]</sup>

此时,得到的是目标空间轴向矩形包围盒范围内的 V-图(如图 1(a)所示),为了得到目标空间范围内的 V-图(如图 1(b)所示),还需要将目标空间范围外的部分剔除掉。剔除多余 V-图的步骤如下:

- 1) 从目标空间轮廓中提取出平行于 x 轴的线段(简称水平线段)
- 2) 将水平线段按纵坐标从大到小排序。
- 3) 对每条水平线段判断上方是否有其他线段,如果没有,则用白色矩形覆盖。
- 4) 对每条水平线段判断下方是否有其他线段,如果没有,则用白色矩形覆盖。

### 3.2 获取路径

由于生成的 V-图是光栅图,不能直接获取 V-边的信息,因此要在矩形图像中通过比对每个像素点与相邻像素点的像素值来提取 V-边,进而在 V-边上获取路径。获取路径的步骤如下:

- 1) 提取所有 V-边

对于 V-图上每一个像素点,与其 4-邻域中的四个像素点比较像素值,如果 4-邻域中有像素点的像素值与该点的像素值不相同,则将这两个点标记为 V-边上的点。所有被标记的点构成集合  $V_E$ ,如图 3(b)中目标空间内部的白色曲线所示。

- 2) 设置起点与终点

如图 3(c)所示,在场景中设置起点  $S$  和终点  $E$ ,分别用宽度优先搜索算法,在  $V_E$  中搜索与起点最近的点作为近似起点  $S'$ ,以及与终点最近的点作为近似终点  $E'$ 。

### 3) 分段获取路径

在 V-图中用宽度优先搜索算法, 搜索  $S$  到  $S'$  之间的像素点的集合, 记为  $P_1$ , 搜索  $E'$  到  $E$  之间的像素点的集合, 记为  $P_3$ ; 在  $V_E$  中搜索  $S'$  到  $E'$  之间的像素点的集合, 记为  $P_2$ 。

### 4) 合成完整路径

将  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  集合合并, 得到从起点到终点的完整路径, 即  $Path = P_1 \cup P_2 \cup P_3$ , 如图 3(c) 中虚线框中的黑色曲线所示。

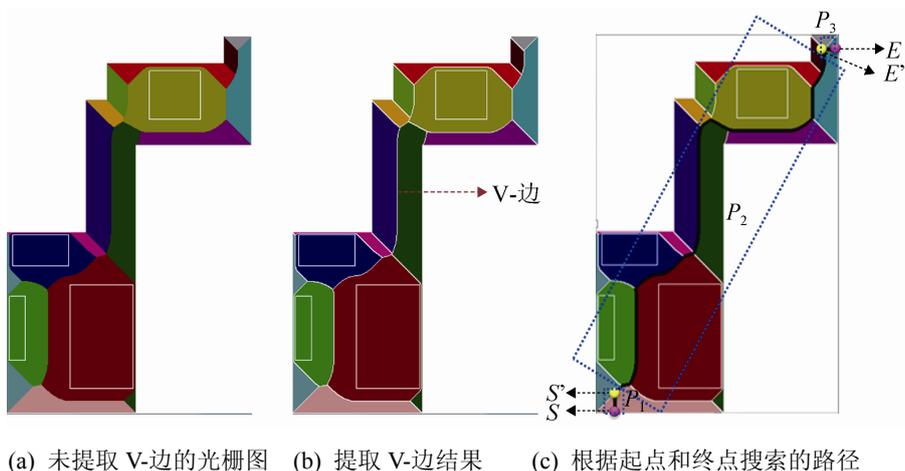


图 3 获取路径示意图

## 4 评价指标

在室内设计领域, 通过分析动线可以对居室空间布局的质量作评价: 当居住者从室内的一个点移动到另一个点, 路线越平坦, 通行面积越宽敞越好。动线是指人在室内室外移动的点与点之间的连线, 简单来说就是人在屋子里从一个功能区域到另一个功能区走动的路线<sup>[3]</sup>。人们在房间内的主要活动路线就是房间门与功能区域之间、功能区域与功能区域之间的路线, 因此, 本文将动线定义为在 V-图中连接房间门和功能区域的路径。

对于路径规划, 本文考虑三个评价指标: 路径通畅度、平滑度和区域分布均匀度。

### 4.1 路径通畅度

通畅度用于衡量路径的通畅程度, 人在该路径上行走时, 触碰的障碍物越少越好。受到文献[10]启发, 我们将人近似为一个直径为 0.6 m 的圆盘, 在场景中模拟该圆盘沿着动线移动的状况, 统计圆盘与障碍物碰撞的次数。

具体实现中, 我们对于动线上的每个点做一

条垂直于运动方向(即起点到终点方向)的长度为 0.6 m 的线段(如图 4 中短线段所示), 即人体通行的宽度, 判断该线段是否与功能区域或者房间轮廓相交, 相交的点数越少, 则通畅度越高。

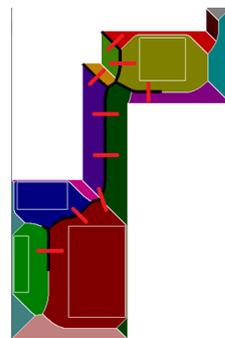


图 4 路径通畅度示意图

### 4.2 路径平滑度

平滑度用于衡量路径的柔顺程度, 人在该路径上行走时, 偏转越少越好。我们在路径上每隔  $k$  个像素点采样一次, 将路径分为  $m$  条路径段, 即用路径段与路径段之间的偏转角度的大小来计算<sup>[11]</sup>。偏转角度大小表示拐点的平滑程度, 由于每一段路径都有起点与终点, 根据斜率可以计算它们在

$[0, \pi]$ 上表示的方向, 计算角度的差值即可得到偏转角度。本文采用偏转角度的平均余弦值来度量平滑度  $S$ , 计算公式为:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \cos \theta_i}{m-1}, \text{ 其中 } \cos \theta_i = \frac{\mathbf{p}_{i+1} \cdot \mathbf{p}_i}{|\mathbf{p}_{i+1}| \cdot |\mathbf{p}_i|}$$

式中:  $\mathbf{p}_i$  为表示第  $i$  段路径的向量。由于余弦函数在  $[0, \pi]$  区间单调递减, 因此余弦值越大, 路径越平滑。

### 4.3 区域分布均匀度

分布均匀度用于衡量功能区域的分布是否均匀, 由以功能区域为站点的 V-区域面积之和与房间总面积之比求得, 该比例越大越好。如图 5 所示, 彩色部分是功能区域的 V-区域, 灰色区域与黑色区域的并集的面积是房间总面积。

## 5 实验及结果

我们在硬件环境为 3.4GHz Intel(R) Core(TM) i7-2600 CPU, 4GB RAM 的 PC 机上, 用 VS2008

平台实现了文献[8]构造 V-图的方法。为了获取 V-边, 我们为每个站点绑定一个唯一的颜色, 从 GPU 的帧缓存中读取 V-图的颜色纹理, 通过查询颜色纹理获取 V-边信息。

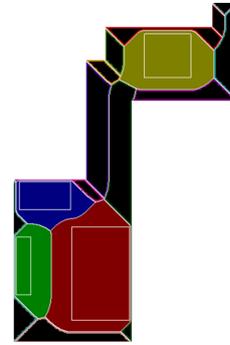


图 5 区域分布均匀度示意图

我们针对同一个目标空间的几个不同布局场景分别构造了 V-图, 分析这几个布局的路径通畅度、平滑度和区域分布均匀度, 实验结果如图 6~8 和表 1 所示。

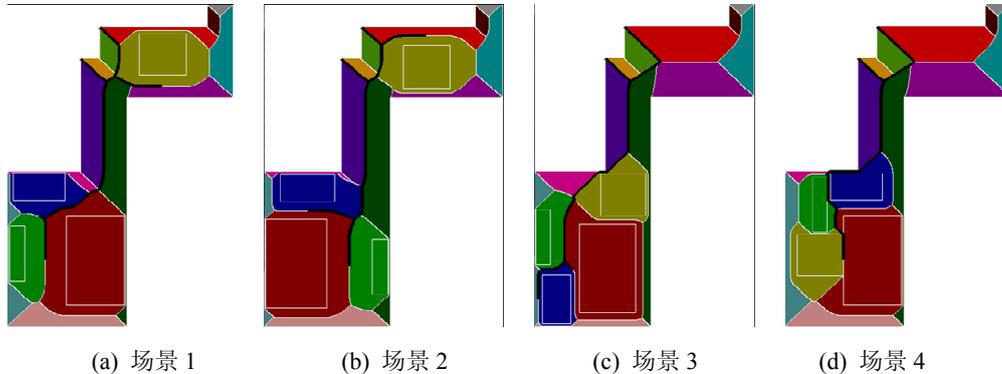


图 6 路径通畅度比较

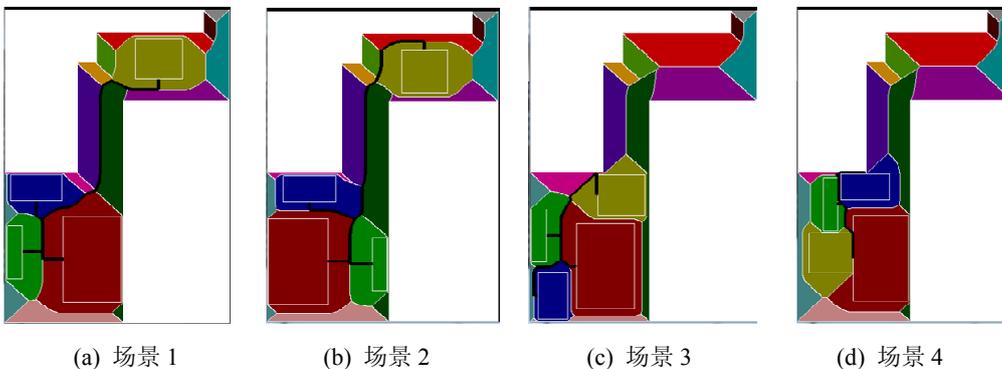


图 7 路径平滑度比较

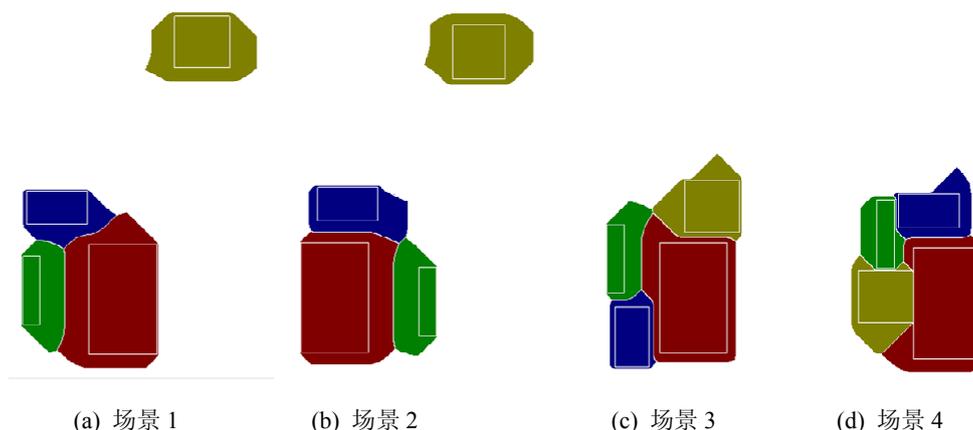


图 8 区域分布均匀度比较

表 1 同一个目标空间中四个不同布局的布局评价结果

评价指标	场景				结论(从优到劣)
	1	2	3	4	
路径通畅度	81	60	175	271	(b)>(a)>(c)>(d)
路径平滑度	0.96	0.97	0.94	0.95	(b)>(a)>(d)>(c)
区域分布均匀度	0.59	0.58	0.49	0.43	(a)>(b)>(c)>(d)

为了验证本文方法计算结果的正确性,我们邀请了 10 位被试者进行了主观测评实验,对图 6~8 所示的场景,分别从路径通畅度、平滑度和区域分布均匀度三个方面给场景布局打分,打分为 1~4 之间的自然数,4 分表示最好。综合所有被试者的得分,得到每个场景分别在路径通畅度、平滑度以及区域分布均匀度三个方面的得分,结果如表 2 所示。综合表 1 和表 2 可见,本文方法计算的结果和主观测评的结果基本一致。

表 2 主观测评结果

评价指标	场景				结论(从优到劣)
	1	2	3	4	
路径通畅度	3.3	3.7	2	1	(b)>(a)>(c)>(d)
路径平滑度	2.8	3.8	1.4	1.2	(b)>(a)>(d)>(c)
区域分布均匀度	3.2	3.6	1.8	1	(b)>(a)>(c)>(d)

## 6 结论

针对室内布局评价的问题,本文提出一种基于 Voronoi 图的室内布局评价方法,使用 Voronoi 图

在室内场景中规划动线,分析动线的相关性质,从动线的通畅度、平滑度以及功能区域的分布均匀度等方面客观地评价该场景的通行能力。其评价结果可用于改进布局方案。

本文方法还存在一定的局限性。目标空间范围外部分的剔除算法,只适用于目标空间轮廓为简单正交多边形,并且水平方向上没有凹陷的空间区域,未来工作中将对此算法进行改进。另外,本文的室内布局评价只考虑了动线的通畅度、平滑度等指标,而室内家具的摆放对室内通风、采光等方面也具有一定影响,这些因素也决定了居住者的舒适度,可以作为室内布局是否合理的评价指标。因此,在未来的工作中,将结合室内设计相关领域的知识,增加室内布局在通风、采光等方面的评价。

## 参考文献:

- [1] 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): No.87.
- [2] 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): No.86.
- [3] 刘敏. 住宅室内空间的家具配置研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [4] 董雪. 障碍 Voronoi 图性质及其应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.
- [5] 刘金义, 刘爽. Voronoi 图应用综述 [J]. 工程图学学报, 2004, 25(2): 125-132.

(下转第 2368 页)