室内数字三维场景评估方法

张浩然[1)], 张少魁[1)*], 孙博远[2)], 林鑫杰[1)], 刘家宏[1)], 陈学斌[3)], 陈境焕[3)], 张松海[1)]

[1)] (清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)
[2)] (清华大学工程物理系 北京 100084)
[3)] (广州极点三维信息科技有限公司 广州 510308)
(shaokui@bnu.edu.cn)

摘 要: 场景生成需要度量指导场景的优化. 由于场景度量以场景优化为目的, 并且度量结果对人类通常较难解释, 因此缺乏专业室内设计背景的人需要通过场景的定量评估来理解一个房间功能、美学和人因因素的合理性. 文中提出用于自动评估室内三维场景的 10 项评估指标, 包括功能、美学和人因 3 个评价维度. 首先, 从场景物件的使用性与功能关联出发, 通过可达性、可见性、开阔度、关联关系和功能比例来衡量场景的功能质量; 其次, 基于场景平面构图和人视点视野, 使用平衡性、齐整度与和谐性度量场景的美学质量; 最后, 根据人类活动模拟, 采用流线合理性和活动舒适度评估人因质量. 所提评估方法能通过分项指标展示输入场景的优缺点, 为场景优化和设计迭代提供参考. 选取 3D-Front 数据库的 50 个场景进行对比评估, 实验结果表明, 采用该方法进行室内场景评估的效果与专业设计师水平相当, 二者平均评分差异为 0.133~0.220, 且评估结果的有效性受到专业设计师和普通用户的肯定; 在与 PlanIT 和 HAISOR 的对比实验中, 基于所提评估方法的场景生成技术在用户评估中获得了更高的功能、美学、人因和总体评分, 在度量场景上更加合理.

关键词: 场景生成; 场景评估; 场景度量; 空间推断
中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2024-00352

The Evaluable Measurements for Interior Digital 3D Scenes

Zhang Haoran[1)], Zhang Shaokui[1)*], Sun Boyuan[2)], Lin Xinjie[1)], Liu Jiahong[1)], Chen Xuebin[3)], Chen Jinghuan[3)], and Zhang Songhai[1)]

[1)] (*Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing* 100084)
[2)] (*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing* 100084)
[3)] (*Guangzhou 3D Extremity Technology Co., Ltd., Guangzhou* 510308)

Abstract: Scene synthesis needs measurement for optimization. For such measurement is aimed mainly at scene optimization, and measurement results are difficult for human to interpret, people without professional interior design background need quantified evaluation to understand how a room is functionally/aesthetically/ergonomically reasonable. This paper introduces ten metrics for automatic evaluation of interior 3D scenes, comprising three aspects: functionality, aesthetics and ergonomics. First, starting from the usability and functional relation-

收稿日期: 2024-07-03; 修回日期: 2024-09-09. **基金项目**: 国家重点研发计划(2021ZD0112902); 国家自然科学基金(62132012, 62361146854); 清华大学腾讯互联网创新技术联合实验室项目; 第十届中国科协青年人才托举工程项目(YESS20240286); 中国博士后科学基金资助项目(2024M751696); 国家资助博士后研究人员计划(GZB20230353); 清华大学 SRT 创新计划专项(2421T0278, 2421T0277, 2411T0372, 2411T0371). **张浩然**(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为三维场景生成; **张少魁**(1995—), 男, 博士, 副教授, CCF 会员, 论文通信作者, 主要研究方向为三维场景布局和交互; **孙博远**(2003—), 男, 在校学生, 主要研究方向为三维场景生成; **林鑫杰**(2004—), 男, 在校学生, 主要研究方向为三维场景生成; **刘家宏**(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为三维场景生成; **陈学斌**(1982—), 男, 学士, 系统架构师, 主要研究方向为 CAD&CG、深度学习; **陈境焕**(1993—), 男, 硕士, 系统架构师, 主要研究方向为计算机图形学、深度学习; **张松海**(1978—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实、图像/视频处理.

ships of scene objects, scene functionality is assessed using accessibility, visibility, clearance, pairwise relationship and functional proportion. Second, considering layout composition and human perspective, scene aesthetics is evaluated by balance, alignment and harmony. Third, based on human activity simulations, ergonomic factors are analyzed by evaluating circulation and activity convenience. The proposed evaluation method can highlight the strengths and weaknesses of input scenes through individual evaluation metrics, aiding in scene optimization and design iteration. A comparison evaluation is conducted on 50 scenes from 3D-Front database, and the experimental results demonstrate that the proposed method for indoor scene evaluation performs at a level comparable to that of professional designers, with an average scoring difference ranging from 0.133 to 0.220. The validity of the evaluation results is confirmed by both professional designers and general users. In comparative experiments with PlanIT and HAISOR, the scene generation technique based on the proposed evaluation method achieves higher scores in functionality, aesthetics, ergonomics and overall evaluation, indicating a more reasonable approach to scene assessment.

Key words: scene synthesis; scene evaluation; scene measurement; spatial inference

数字三维场景在虚拟现实[1]、艺术[2]、建筑[3]、室内设计[4]等众多领域起着至关重要的作用. 场景生成技术[5]能够在短时间内自动生成大量三维场景, 降低人工创建场景的成本. 然而, 现有的工作往往更加注重提升场景生成的规模与自动化程度[6-7], 生成场景在具有一定合理性的同时, 可能在美学、人因等方面存在缺陷. 因此, 为了保障生成场景各方面的质量, 需要从功能、美学和人因角度对三维场景进行多方面评价.

1　相关工作

本文工作主要涉及场景生成和场景评估. 前者需要通过场景质量的量化评价生成三维场景; 后者虽然有着明确的评估标准, 但是尚未建立包含功能、美学和人因工程学在内的完善评估体系.

1.1　场景生成

众多场景生成方法都依赖先验数据生成新的三维场景. 场景生成技术本质上是通过建立一系列先验知识, 评估现有物体如何与这些先验知识相匹配[7-9]. 先验可以分为基于规则的先验、数据驱动的先验和神经先验[5]. 通常, 场景生成过程根据先验进行场景计算, 如桌椅之间的相对位置关系是否符合空间分布[7].

基于规则的先验通常是手动设置的. Yu 等[10]设置了空间关系、层次关系和成对关系, 并使用模拟退火法生成具有此类先验的场景; 同样, Merrell 等[11]设定功能和美学标准, 为交互式房间布局生成建议; Zhang 等[12]使用基于规则方式生成商业场景.

数据驱动的先验从数据集中学习, 利用高斯混合模型[13]或神经网络方法[9]得到场景数据分布知识. Ma 等[14]学习物件的共现概率和空间布局, 利用动作模型向场景不断添置物件; Zhang 等[15]根据房间形状和物体之间的空间先验, 交互生成场景; 一些方法基于人类活动提取关系图[8], 或根据对象关系标注场景图像, 通过学习来调整物件摆放位置[16]; Zhang 等[17]从数据中构建连续的物件群组, 以交互方式将物件组添加到场景中.

为了纳入更多隐含信息, 神经先验被应用于复杂场景中. Wang 等[18-19]利用场景顶视图训练卷积神经网络先验来生成新场景, 并在之后的工作中构建基于关系图和神经先验的生成框架; Li 等[20]注意到室内场景的层次结构, 通过训练递归神经网络进行物件分组和场景生成; Zhang 等[21]使用前馈神经网络将先验分布映射为场景物件分布; Leimer 等[22]将专家知识与基于 Transformer 架构的数据驱动生成器相结合, 从有缺陷的数据中生成新的布局.

此外, 还有一些生成方法无须事先学习. Xie 等[23]通过上下文比较和输入场景随机化创建新场景; Weiss 等[6]应用多重空间约束, 实现了大规模场景的连续优化.

虽然基于规则的先验和数据驱动的先验都在物件层面表示场景关系, 专注于物体之间的空间关系[12], 用于对物体进行变换[15]; 但在现实情况下, 应当从整体出发评估场景. 尽管神经网络具备接受整个场景作为输入的能力, 但人们对神经网络

的运作过程并不清晰, 其评估过程缺乏可解释性.

1.2 场景评估

已有的场景评估工作关注场景的丰富性、准确性和合理性[24]. Li 等[20]通过计算物件的共现频率度量生成场景集与训练集的相似度, 并使用图核度量场景的相似度和丰富性; Wald 等[25]在场景理解的任务中度量点云转换为关系图的准确性; Hu 等[24]利用基于注意力图的网络估计场景合理性. 但是, 以上工作主要度量整体指标, 对于具体指标讨论较少.

在度量场景的质量时, 一些研究通过用户实验评估生成场景的自然程度[26]或者生成结果的可信度[13]; 同时, 成本函数常被用于量化评估指标. Yu 等[10]提出了环绕物件的可达空间模型, 评估场景物件的可达性和可见性, 同时利用物件对的空间先验评估关联物件的约束关系; Merrell 等[11]额外引入视觉评估项来度量场景的视觉质量, 包括平衡性、齐整度和视觉重心度量, 但对人因评估关注较少; Fisher 等[27]从人类活动出发, 根据人类代理模型的交互性评估生成场景的质量; Fu 等[28]引入通风和照明因素评估活动过程的环境质量, 但该方法侧重于环境评估, 较少关注房间布局的功能和美学质量. 综上所述, 需要建立从功能、美学和人体工程学等多个维度进行评估的完整系统.

2 本文方法

本文提出室内数字三维场景评估方法, 为了构建可解释的场景评估体系, 提出包含功能、美学和人因 3 方面的评价维度, 共计 10 项自动评估室内三维场景的指标, 该方法的框架如图 1 所示. 评估框架包括先验提取、场景度量和度量分布 3 个部分. 场景评估前需要从三维场景数据集提取先验数据(左中), 并统计评估指标度量值的分布. 对于输入场景, 首先度量 10 项功能、美学和人因准则的评估指标(右上). 功能准则包括可达性、可见性、开阔度、关联关系和功能比例; 美学准则包括平衡性、齐整度与和谐性; 人因准则包括流线合理性和活动舒适度. 然后根据数据库度量值分布计算结果(右下). 评估结果包含 10 个维度(左下), 具有较好的可解释性.

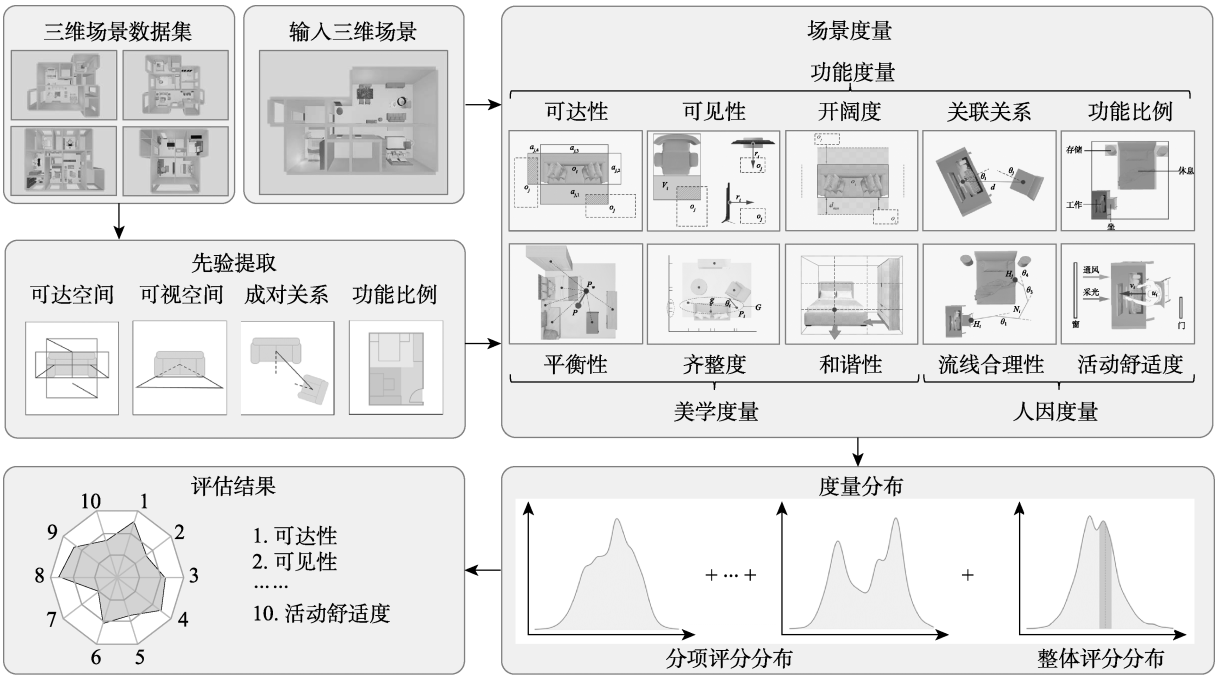


图 1 本文评估方法框架

在功能方面, 通过考察场景物件的功能完备性, 为每个物体类别定义可达空间、可视空间、功能空间、开阔度、关联关系和功能比例. 其中, 可达性指标衡量某个物体可达空间与周边环境的冲突程度; 可见性指标关注物体在特定方向上的可视空间(如电视正面)与环境的冲突; 开阔度指标基于物体间功能空间重叠区域的大小计算, 确保物体周边区域通行无阻; 关联关系指标利用数据集中提取的空间关系先验知识, 计算物体对的相对距离和朝向与先验的差异, 衡量物体组合是否合

理; 功能比例指标则用于评估家具所呈现的房间功能与其原本用途的契合程度.

在美学方面, 从几何角度评估室内场景的视觉质量. 平衡性指标通过衡量物体面积加权中心点相对于房间中心点的偏移程度进行评估; 齐整度指标通过聚类来评估物体与物件簇整体方向的偏离程度; 在和谐性指标的计算中, 选取房间内的若干良好视点, 评估从虚拟摄像机获取的场景视图.

在人因方面, 通过模拟人类活动考察场景质量. 在流线合理性指标中, 使用快速搜索随机树(rapidly-exploring random tree, RRT)算法[29]模拟用户在特定布局中的可能活动流线, 并对流线进行评估; 在活动舒适度指标中, 考察用户在场景中的可能活动, 并计算照明和通风条件是否能够满足不同活动的需求.

本文基于 3D-Front 室内场景数据库[30](简称 3D-Front 数据库)提取评估准则相关的先验知识, 如各类别物件的可达空间和可视空间大小、特定物体对之间的最佳距离和方向, 以及房间类型对应的期望功能等. 基于先验, 对数据集中各指标的频率分布进行统计, 并使用核密度估计得到不同指标的评估得分分布. 对于某个待评估的输入场景, 首先计算 10 项指标的原始得分; 然后结合数据集得分分布计算指标的最终评分; 最终评分通过 10 项指标分别呈现, 能够清晰地展示输入场景的优点和不足之处. 在场景评估的后续任务中, 设计师可以从分项评估值中较为直观地得知场景的优势与不足之处, 对场景进行有针对性的设计; 在场景生成任务中, 评估数据可以被用作场景优化的依据.

本文方法的关键是确保算法评分与专业设计师的标准一致. 在评估函数中设置多个可调整参数, 同时邀请 5 位来自室内设计公司的专业设计师, 协助调整评估系统的参数设置, 使其尽可能地接近专业设计师的评估水准. 具体参数设置见附录 A 表 A1.

通过 2 项用户实验, 验证本文评估准则的有效性. 首先将专业室内设计师的评估与算法指标进行比较, 结果表明, 本文指标具有与设计师相当的评估能力; 其次将评估指标适配场景生成框架, 并与现有生成方法比较, 结果表明, 本文方法能较好地度量生成场景质量.

本文提出面向功能、美学和人因的室内数字三维场景评估方法. 首先基于规则和数据分布进行多角度的场景质量评估, 并定量表示评估结果, 该过程具有较强的可解释性; 然后结合物件局部和场景整体构建综合的场景功能质量评估准则; 再综合平面构图评估和人视点图像内容评估, 提出多角度的场景美学质量评估方法; 最后结合人类活动模拟和环境模拟, 通过度量活动主体的流线和客观环境的舒适度, 整体评估场景的人因质量.

3　功能准则

功能性评估是室内场景评估的首要步骤. 场景功能性从物件、物件对和房间整体 3 个层面进行评估. 物件功能性评估涉及物件的可达性、可见性和周边空间的通畅度; 物件对评估针对桌椅等具有较为紧密联系的物件对的空间关系; 房间整体功能性评估则根据室内使用功能比例与预期的差距进行.

3.1　可达性

房间功能的合理性在很大程度上依赖室内物件的可使用性, 即使用者可以较为容易地到达并使用物件, 而使用者能够使用物件的平面区域即为从物件出发的可达区域. 基于 Yu 等[10]提出的可达空间模型, 从物件的平面包围盒向四周扩展一定距离, 将该范围作为物件的子可达空间, 并将第 i 个物体 o_i 本身包围盒投影区域记为 A_i, 第 k 个子可达空间记为 $A_{i,k}$. 图 2 所示为该过程的示意图.

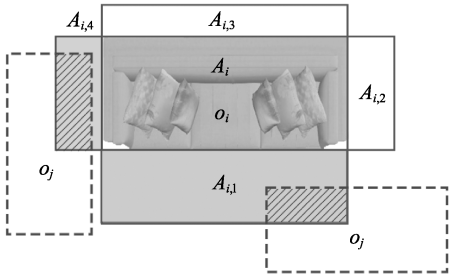


图 2　可达性评估示意图

由于物件的使用方式存在差异, 因此不同物件的可达空间大小也有所不同; 另外, 不同方向上的可达空间的优先度也存在差异. 针对这些差异, 从 3D-Front 数据库中统计了各类物件在四周方向与其他物件的平均最小距离, 并利用此距离确定可达空间的范围; 根据使用经验, 也人工地指定了每类物件可达空间的权重 $\omega_{i,k}$.

在评估过程中, 使用面积衡量每个物体的可达空间与其他物体及墙体的冲突程度, 并且冲突面积的最终计算受到 $\omega_{i,k}$ 影响. 当冲突面积超过子可达面积的占比阈值 ρ 时, 该子可达空间将被设

置为不可达. 最终, 该子空间的成本函数计算由可达物体的冲突面积与不可达物体的可达面积共同影响. 为了考察物件的 $A_{i,k}$ 是否与周边家具 A_j 和墙体所占空间 W 产生冲突, 根据冲突面积设定可达性成本函数为

$$C_{\mathrm{a}}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{4}\omega_{i,k}\,f\left(A_{i,k},\bigcup_{j\neq i}A_j,\rho,\delta\right)\Big/\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{4}\left|A_{i,k}\right|;$$

其中,

$$f\left(A_{i,k},\bigcup_{j\neq i}A_j,\rho,\delta\right)=\begin{cases}\left|A_{i,k}\cap\left(\bigcup_{j\neq i}A_j\cup W\right)\right|, & \text{if } \dfrac{\left|A_{i,k}\cap\left(\bigcup_{j\neq i}A_j\cup W\right)\right|}{\left|A_{i,k}\right|}<\rho\\ \delta\left|A_{i,k}\right|, & \text{else}\end{cases}.$$

为了实现评估过程的可编辑性, 允许用户改变特定物件不同方向的 $\omega_{i,k}$, 以调整可达性计算的优先级, 或通过改变 ρ 和系数 δ 调整不可达空间对结果的影响.

3.2 可见性

一些特定类别物件的可使用性依赖正面空间是否未被其他物件阻挡, 如电视前方一定距离内不应放置家具, 否则会影响正常观看, 将此距离称为可视距离. 如图 3 所示, 通过度量可视距离内的空间与周边环境的冲突, 考察这类物件的功能性质.

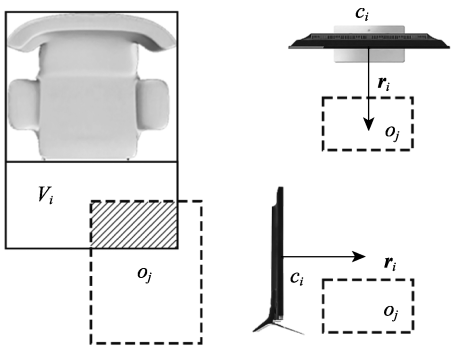


图 3 可见性评估示意图

采用类似可达性的计算方法, 考察物件 i 的可视空间 V_i 与周边家具和墙体的重叠面积; 由于电视等家具需要物理意义上的可见, 因此可以从物件正面发出大量射线, 通过计算射线与其他物件的碰撞情况来近似判断该物体是否可见. 选择需要物理可见的物件在正面均匀采样, 以某一点 c_i 为起点, 表面法向 $\boldsymbol{r}_i$ 作为方向发出射线. 对于所有射线, 若被遮挡的数量比例大于设定比例 α, 则判定物件 o_i 不可见, 并令可视函数 $I\left(o_i,\alpha\right)=1$; 若 o_i 可见或不属于需要物理可见的物件类别, 则令 $I\left(o_i,\alpha\right)=0$. 最终, 可见性评估函数由可视空间评估项 C_{va} 和可见性评估项 C_{vi} 构成, 公式为

$$C_{\mathrm{v}}=\lambda_{\mathrm{v}}C_{\mathrm{va}}+(1-\lambda_{\mathrm{v}})C_{\mathrm{vi}};$$

其中,

$$C_{\mathrm{va}}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\left|V_i(\mu)\cap A_j\right|+\left|V_i(\mu)\cap W\right|\right)\Big/\sum_{i=1}^{n}V_i(\mu),$$

$$C_{\mathrm{vi}}=\sum_{i=1}^{n}\eta I(o_i,\alpha)V_i(\mu)\Big/\sum_{i=1}^{n}V_i(\mu).$$

为了获得各类物件的可视距离, 从室内场景数据库中统计主物件与其他物件的平均最小正面距离, 近似地生成可视空间. 评估函数包含多个参数: 可视空间系数 μ 允许用户调整可视空间的大小, 遮挡比例 α 用于控制物件物理可见性的判定条件, 不可见系数 η 用于调整不可见物体对于评估结果的贡献.

3.3 开阔度

一个功能合理的房间允许使用者自由活动, 而人体活动空间的最小尺寸 $d_{\min}$ 约为 0.5 m, 因此可以通过衡量物件周边空间是否允许人的正常通行来度量房间的开阔性, 如图 4 所示. 与可达性相比, 开阔性更强调物件周边空间的连续性.

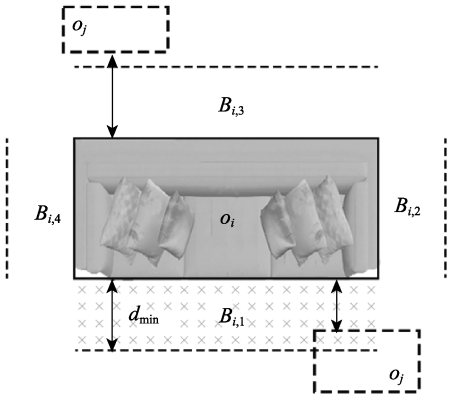


图 4 开阔性评估示意图

计算开阔度成本函数时, 将场景布局投影于 XoZ 平面, 定义地面物体 o_i 的周边空间 $B_{i,k}$ 为包围盒第 k 条边界向外扩展 $d_{\min}$ 得到的矩形区域, 评估物件周边空间 $B_{i,k}$ 与其他物体投影区域 A_j 以及墙体所占空间 W 的冲突程度. 由于物件对开阔性的影响程度与面积成正比, 将物件面积作为权重对冲突成本进行平均. 最终, 开阔性成本函数为

$$C_{\mathrm{c}}=\sum_{i=1}^{n}\left|A_i\right|\sum_{k=1}^{4}R\left(B_{i,k},\bigcup_{j}A_j,W\right)\Big/\sum_{i=1}^{n}\left|A_i\right|;$$

其中，当 $B_{i,k}\cap\left(\bigcup_j A_j\right)\neq\varnothing$ 或 $B_{i,k}\cap W\neq\varnothing$ 时，设重叠函数 $R\left(B_{i,k},A_j,W\right)=\nu$，即物件周边空间一旦与其他物件或墙体发生重叠，就认为该部分是不可通行的；若无重叠，则 $R\left(B_{i,k},A_j,W\right)=0$．设计师可改变 ν 的取值以调整重叠范围的影响程度.

3.4　关联关系

在局部范围内，关联物件摆放的方向和位置往往存在空间关联，如书桌与座椅的相对距离和朝向总倾向于落在某个距离和角度区间内．在一个布置合理的房间中，物体之间的功能往往是相联结配套的，为了更好地发挥物体的功能，需要同时考察该物体是否与其他物体存在成对的关联关系，以及检查物体对的位置和角度关系是否符合先验，如图 5 所示.

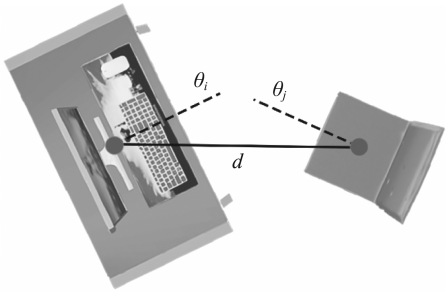


图 5　关联关系评估示意图

先验数据提取应当筛选具有相关性的物件距离和朝向关系，并统计距离和朝向的合理区间．对于距离关系，计算任意物件对的距离，并使用 Shapiro-Wilk 检验方法[31]筛选数据，将服从正态分布的数据均值记为 μ，标准差记为 σ，取 $[\mu-\sigma,\mu+\sigma]$ 作为合理区间，最终得到物体 o_i 与 o_j 对应类别的先验距离范围 $\left[m_{i,j},M_{i,j}\right]$．对于角度关系，选取存在距离关联的物件对，采用类似的方法统计角度数据，并取统计频率较高的方向作为先验角度 $\overline{\theta}_{i,j}$.

在评估过程中，定义距离成本函数 C_{pd}，参考文献[11]比较关联物件的距离 d 与先验距离范围 $[m,M]$ 的相对偏差；定义角度成本函数 C_{pa} 为关联物件对的相对朝向 θ 与先验朝向 $\overline{\theta}$ 的余弦差异．假设场景中存在 n 对关联物件，物件关系的成本函数为

$$C_{\mathrm{p}}=\frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\lambda_{\mathrm{p}}C_{\mathrm{pd}}\left(o_i,o_j\right)+(1-\lambda_{\mathrm{p}})C_{\mathrm{pa}}\left(o_i,o_j\right)\right);$$

$$C_{\mathrm{pd}}\left(o_i,o_j\right)=\begin{cases}\left(\dfrac{d_{i,j}}{m_{i,j}}-1\right)^2, & d<m\\ 0, & m\leqslant d<M\\ \left(\dfrac{M_{i,j}}{d_{i.j}}-1\right)^2, & d\geqslant M\end{cases},$$

$$C_{\mathrm{pa}}\left(o_i,o_j\right)=\frac{1-\cos\left(\theta_{i,j}-\overline{\theta}_{i,j}\right)}{2}.$$

3.5　功能比例

直接度量房间家具表现出的功能 $\boldsymbol{F}_i$ 与房间类型对应的功能 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{r}}$ 之间的差异．一个房间的功能层级分为物件层级、动作层级和活动层级．其中，物件层级功能包括支撑、存储和照明；动作层级功能包括坐和躺卧；活动层级功能包括进餐、工作、休息和梳洗．图 6 展示了某卧室的物件功能划分.

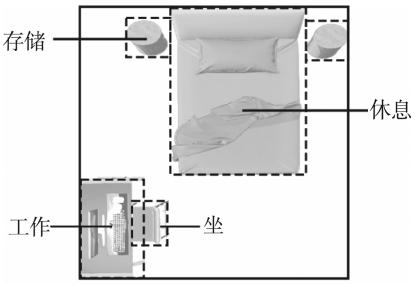


图 6　功能性评估示意图

根据以上 9 种功能，定义一个房间或物件的功能为 $\boldsymbol{F}=\left(f_1,f_2,\cdots,f_9\right)$；其中，$f_i\geqslant 0,\sum_{i=1}^{9}f_i=1$．对于每个物件 o_i，都将其对应于具体的语义类别 c，并手动指定该类的功能 $\boldsymbol{F}_c$．在此基础上，以面积为权重，统计数据库中不同类型房间的期望功能构成 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{r}}$．功能比例指标的成本函数为

$$C_{\mathrm{f}}=\left\|\boldsymbol{F}_{\mathrm{r}}-\sum_{i=1}^{n}|A_i|\boldsymbol{F}_c\Big/\sum_{i=1}^{n}|A_i|\right\|.$$

4　美学准则

在室内设计的过程中，设计师通常从正交俯视和人视点 2 种角度进行设计现状的评估．前者对应室内平面设计，后者对应特定视角下的针对性设计．基于此，对于室内场景的美学性质，本文从平面投影和人视点 2 个角度进行评估，其中，平面评估包括平衡性和齐整度的度量，人视点评估包括对视点画面进行布局、构图方面的和谐性评估.

4.1 平衡性

好的室内平面构图应当平衡有序，家具布局整体平衡，家具摆放应与场景格局形成良好的呼应. 如图 7 所示，选取物件中心点 $\boldsymbol{p}_i$，以面积 $|A_i|$ 为权重计算物件组的质心，比较其与房间质心 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{r}}$ 的距离差异；并利用房间对角线 d_{r} 进行归一化，消除房间大小的影响. 平衡性成本函数为

$$C_{\mathrm{b}}=\frac{1}{d_{\mathrm{r}}}\left\|\boldsymbol{p}_{\mathrm{r}}-\sum_{i=1}^{n}|A_i|\boldsymbol{p}_i\Big/\sum_{i=1}^{n}|A_i|\right\|.$$

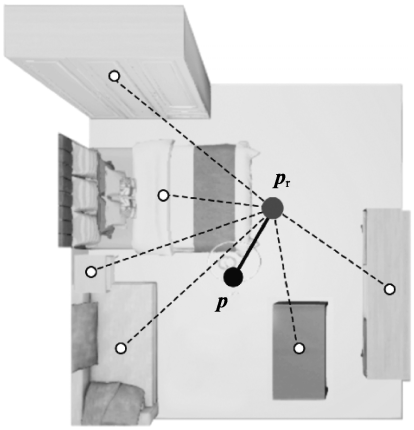


图 7 平衡性评估示意图

4.2 齐整度

齐整度指标评估室内家具、装饰等布局元素的位置和方向是否整齐，是室内美观性评估较为重要的度量因素. 本文使用基于 DBSCAN 聚类的度量方法[32]，如图 8 所示，从位置和方向 2 个方面度量一致性.

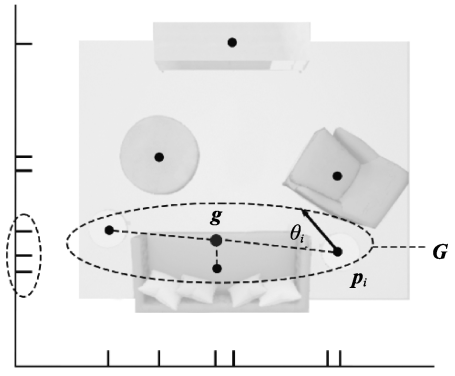


图 8 齐整度评估示意图

首先将物件 o_i 简化为中心点 $\boldsymbol{p}_i$，方向记为 $\hat{\boldsymbol{p}}_i$. 位置一致性度量中，本文从 XoZ 平面的 2 个方向分别聚类. 以 z 方向上邻域半径为 ε 的簇 $G_{\mathrm{z}}=\left\{\boldsymbol{p}_{i,z}\middle|\left\|\boldsymbol{p}_{i,z}-\boldsymbol{g}_z\right\|\leqslant\varepsilon\right\}$ 为例，根据簇内点 $\boldsymbol{p}_{i,z}$ 到簇中心 $\boldsymbol{g}_z$ 的距离量化 z 方向的对齐成本，定义成本函数 L_z 为

$$L_z(G_z)=\sum_{i=1}^{n}\min\left(1,\frac{\left\|\boldsymbol{p}_{i,z}-\boldsymbol{g}_z\right\|}{\varepsilon}\right).$$

方向一致性度量考虑簇内点方向的差异. 对于簇 G，$|G|$ 表示簇内点的数量，$\boldsymbol{g}$ 表示簇内点的平均方向，取 $\|\boldsymbol{p}_i\cdot\boldsymbol{g}\|$ 的小数部分度量点方向与簇方向是否符合正交关系，定义方向成本函数 D 为

$$D(G)=\frac{1}{4|G|}\sum_{i=1}^{n}\left(1-\{\boldsymbol{p}_i\cdot\boldsymbol{g}\}\right)^2.$$

将不在任何簇内的点定义为噪声点，记为 $\boldsymbol{q}$，将所有簇的簇内点的平均方向记为 $\boldsymbol{g}_{\mathrm{a}}$. 考虑不同簇之间、簇与噪声点之间的方向差异. 假设场景内有 n 个噪声点、m 个簇，定义噪声占成本函数 D_{noise} 为

$$D_{\mathrm{noise}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(1-\{\boldsymbol{q}_i\cdot\boldsymbol{g}_{\mathrm{a}}\}\right)+\sum_{k=1}^{m}\left(1-\{\boldsymbol{g}_k\cdot\boldsymbol{g}_{\mathrm{a}}\}\right)}{m+n};$$

其中，$\boldsymbol{g}_{\mathrm{a}}=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}\boldsymbol{g}_k$.

最终，总成本函数为

$$C_{\mathrm{al}}=\lambda_1\sum_{k=1}^{m}\left(L_x(G_{k,x})+L_z(G_{k,z})\right)+$$

$$\lambda_2\sum_{k=1}^{m}\left(D_x\left(G_{k,x}\right)+D_z\left(G_{k,z}\right)\right)+\lambda_3 D_{\mathrm{noise}};$$

其中，$\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3=1$.

4.3 和谐性

场景和谐性在很大程度上取决于使用者在人视点观察到室内图像的美观性，本文使用 Zhang 等[33]提出的室内摄影视点寻找算法选取室内的最佳视点. 该算法从一点透视和两点透视出发生成室内场景的潜在视点，并使用约束和审美约束筛选最合理的视点. 图 9 所示为和谐性较好的视点示意图.

根据算法给出的最佳视点 V，选取审美约束中的布局约束 C_{lay} 和三分构图约束 C_{trd} 作为美观性

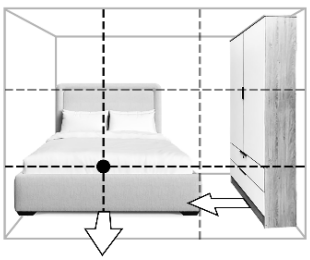


图 9 和谐性评估示意图

评估依据. 在布局约束中，床、沙发等物件属于主物体集合，记为 O_{sim}，主物体 o 的最佳观察方向为物件正前方，记为 $\boldsymbol{\gamma}_o$；$\boldsymbol{\beta}$ 表示最佳视点的摄像机方向. 在构图约束中，良好的布局应将主物件置于视野的三分构图点上. 据此，定义 $h(o,V)$，若主物件 o 位于三分点，则 $h(o,V)=0$；否则，$h(o,V)=1$. 最终，和谐性成本函数定义为

$$C_{\text{h}}=\lambda_{\text{h}}C_{\text{lay}}+(1-\lambda_{\text{h}})C_{\text{trd}};$$

其中，

$$C_{\text{lay}}=\sum_{o\in O_{\text{sim}}}\boldsymbol{\beta}\cdot\boldsymbol{\gamma}_o,$$

$$C_{\text{trd}}=\sum_{o\in O_{\text{sim}}}h(o,V).$$

5　人因准则

在室内场景评估中，场景是否易于使用、是否方便日常活动是评估场景的重要指标. 本文使用模拟人类活动的方法度量场景内可能的活动流线的合理性，以及潜在活动的舒适度. 其中，舒适度考虑通风和光照 2 种环境因素的影响.

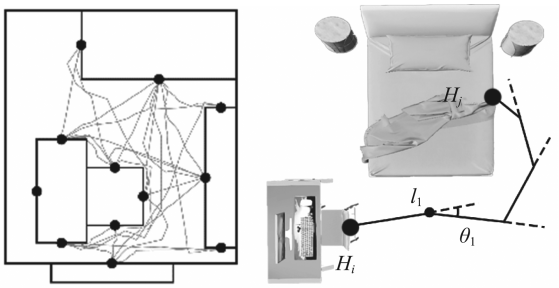
5.1　流线合理性

用户友好的室内场景应当保证室内流线的合理性，用户完成各种日常活动时，在不同家具之间转移的流线应当简单快捷. 为了模拟这一活动过程，首先选取房间内家具的潜在人类活动点 H，即用户使用该物件时最有可能出现的位置；然后在潜在活动点对 (H_i,H_j) 之间寻找可能的活动流线 $L_{i,j}$.

流线通过 RRT 算法生成，该算法在二维状态空间中不断采样，遍历已走过的点构成的路径树并找到距离采样点最近的节点，扩展设定步长，将采样点加入当前树中；不断重复此过程，直到随机树扩展至目标点. 图 10a 所示为某个场景的流线生成结果. 室内流线应当简单便捷，因此对于可能的活动流线 $L_{i,j}=\{\boldsymbol{l}_0,\boldsymbol{l}_1,\cdots,\boldsymbol{l}_m\mid\boldsymbol{l}_0=\boldsymbol{H}_i,\boldsymbol{l}_m=\boldsymbol{H}_j\}$，本文通过计算曲折度评估其质量，其中，$\theta_i$ 表示路径点 $\boldsymbol{l}_i$ 处路径方向的变动角度. 图 10b 所示为单条流线评估方法的示意图. 路径 $L_{i,j}$ 的评估公式为

$$C_{\text{angle}}(L_{i,j})=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m-1}\frac{1-\cos\theta_k}{2},$$

$$C_{\text{length}}(L_{i,j})=\frac{\sum_{k=0}^{m-1}\|\boldsymbol{l}_{k+1}-\boldsymbol{l}_k\|}{\|\boldsymbol{l}_0-\boldsymbol{l}_m\|}.$$



a. 室内流线示意图　　b. 单条流线评估示意图

图 10　流线合理性评估示意图

假设场景中存在 n 个潜在活动点，评估流线合理性的成本函数为

$$C_{\text{cir}}=\frac{2}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\lambda_{\text{cir}}C_{\text{angle}}(L_{i,j})+(1-\lambda_{\text{cir}})C_{\text{length}}(L_{i,j})\right).$$

5.2　活动舒适度

在舒适度计算中，本文考察了人类在场景中的潜在可能活动. 根据物体的使用情况，定义活动点 $(\boldsymbol{u}_i,\boldsymbol{v}_i)$；其中，$\boldsymbol{u}_i$ 表示活动位置，$\boldsymbol{v}_i$ 表示活动朝向；并计算活动位置受通风和采光影响的环境质量 Q，如图 11 所示. 通过评估房间内潜在活动点的环境质量，可以评估复杂场景布局的活动舒适度.

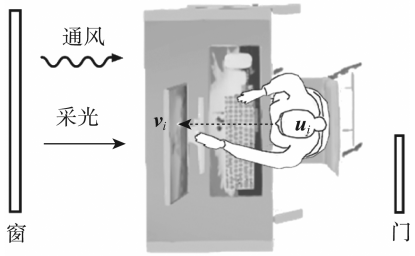


图 11　活动舒适度评估示意图

参考 Fu 等[28]的方法，将窗户作为光源，并假设空气总是从窗户向门口流动，建立室内的光场 $\boldsymbol{E}_{\text{l}}$ 和通风场 $\boldsymbol{E}_{\text{v}}$. 以光场为例，假设房间内有 s 扇窗户，将窗户作为光源，其位置设为 $\boldsymbol{s}_k$.对于室内朝向 $\boldsymbol{v}_i$ 的活动点 $\boldsymbol{u}_i$，通过叠加计算该点的场向量 $\boldsymbol{E}_{\text{l}}(\boldsymbol{u}_i)$，并得到场方向 $\hat{\boldsymbol{E}}_{\text{l}}(\boldsymbol{u}_i)$ 和场强 $\|\boldsymbol{E}_{\text{l}}(\boldsymbol{u}_i)\|$，综合二者，得到该点的采光质量为

$$Q_{\text{l}}(\boldsymbol{u}_i,\boldsymbol{v}_i)=\sigma_{\text{l}}\|\boldsymbol{E}_{\text{l}}(\boldsymbol{u}_i)\|+(1-\sigma_{\text{l}})\left(-\hat{\boldsymbol{E}}_{\text{l}}(\boldsymbol{u}_i)\cdot\boldsymbol{v}_i\right);$$

其中，$\boldsymbol{E}_{\text{l}}(\boldsymbol{u}_i)=\sum_{k=1}^{s}\frac{\boldsymbol{u}_i-\boldsymbol{s}_k}{\|\boldsymbol{u}_i-\boldsymbol{s}_k\|^2}$.

对于通风场，添加类别函数 $M_k=\pm1$（当场源为窗时 $M_k=1$，当场源为门时 $M_k=-1$），使通风场总体流向为窗户到门，通风场质量表达式为

$$Q_{\mathrm{v}}(\boldsymbol{u}_i,\boldsymbol{v}_i)=\sigma_{\mathrm{v}}\left\|\boldsymbol{E}_{\mathrm{v}}(\boldsymbol{u}_i)\right\|+(1-\sigma_{\mathrm{v}})\left(-\hat{\boldsymbol{E}}_{\mathrm{v}}(\boldsymbol{u}_i)\cdot\boldsymbol{v}_i\right);$$

其中，$\boldsymbol{E}_{\mathrm{v}}(\boldsymbol{u}_i)=\sum_{k=1}^{s}M_k\dfrac{\boldsymbol{u}_i-\boldsymbol{s}_k}{\left\|\boldsymbol{u}_i-\boldsymbol{s}_k\right\|^2}$.

综合光场和通风场的环境质量，得到舒适度成本函数为

$$C_{\mathrm{co}}=\sum_{i=1}^{n}\left(\lambda_{\mathrm{co}}Q_{\mathrm{l}}(\boldsymbol{u}_i,\boldsymbol{v}_i)+(1-\lambda_{\mathrm{co}})Q_{\mathrm{v}}(\boldsymbol{u}_i,\boldsymbol{v}_i)\right).$$

类似地，可以通过调整参数 σ 控制场方向和场强在评估结果中的贡献比例；调整参数 λ_{co} 控制光照和通风条件在舒适度评估中的优先级.

本文提出室内场景质量评估的 10 项指标，但由于各指标评估结果的取值分布不同，因此输入场景 O 还需要结合场景数据库的取值分布计算最终评分，如图 12 所示.

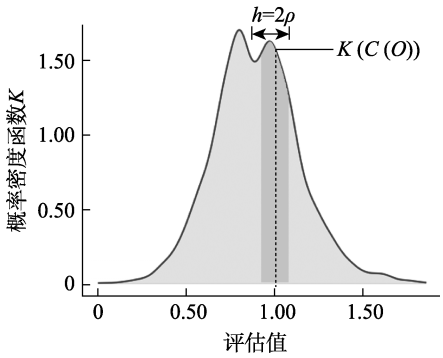


图 12 概率密度函数计算某评估项最终评分

对于场景数据库的某项评分分布 X，使用核密度估计计算其概率密度函数 K，高斯核为

$$g(x,h)=\frac{1}{\sqrt{2\pi h^2}}\mathrm{e}^{\frac{-x^2}{2h^2}}.$$

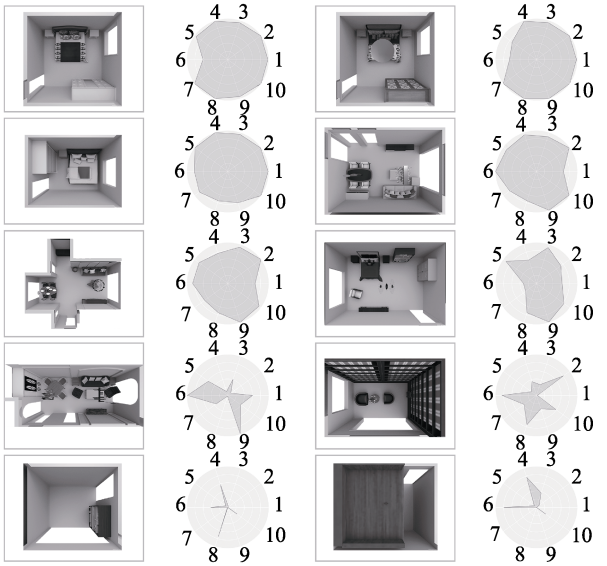
其中，带宽 $h=\sigma\left(p_{95}(X)-p_5(X)\right)$，$p_5(X)$ 表示样本 X 在 5%处的取值；$\sigma=0.05$，该取值参考了文献[28]中的计算. 对于场景在某项评估的得分 $C(O)$，本文取 $\rho_{\mathrm{s}}=0.01$，定义该项最终评估得分为

$$S(C(O))=\int_{C(O)-\rho_{\mathrm{s}}}^{C(O)+\rho_{\mathrm{s}}}K(C(O)).$$

6 实验及结果分析

6.1 数据集与实验结果

本文实验中，先验数据提取自 3D-Front 数据库，其中包含超过 7 万个场景，能够为评估过程的数据分布学习提供丰富的先验数据来源. 图 13 所示为本文方法对该数据库场景进行评估的部分结果，雷达图显示了场景 10 项评估指标的质量评分.



评分结果说明: 1. 可达性; 2. 可见性; 3. 开阔度; 4. 关联关系; 5. 功能比例; 6. 平衡性; 7. 齐整度; 8. 和谐性; 9. 流线合理性; 10. 活动舒适度

图 13 数据库场景评估结果

6.2 场景评估

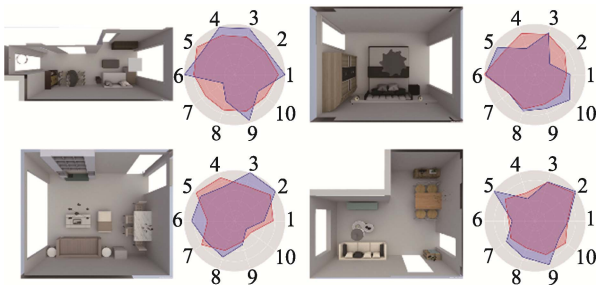
在三维场景度量方面，通过用户实验，与专业室内设计师对比，以评估本文方法的有效性. 从 3D-Front 数据库中随机选取了 50 个室内场景作为评估对象，该数据库的室内场景由手工搭建，整体质量较高，适于用作评估对象；选取过程尽量平衡了房间的家具数量分布.

评估过程中，本文从室内设计公司邀请 5 位专业室内设计师作为被试，并向设计师详细说明本文 10 项评估指标的评估目的，但并未解释各项评分的算法和实现细节，以提高评分的客观性. 要求设计师根据室内设计专业知识，分别从 10 个维度为 50 个场景打分，取其均值作为专业评分；然后使用本文方法评估相同场景，将其评分结果与人工评分结果进行对比分析.

由于设计师评分与本文方法的评分区间不同，因此本文对评估结果进行归一化处理，并取各项评分之差的绝对值的平均作为场景的平均评分差异，以此对场景排序. 表 1 所示为差异最小和差异最大的各 10 个场景的平均评分差异和平均方差. 图 14 所示为部分场景评分结果的可视化图表，其中，红色表示设计师评分，蓝色表示本文方法评分；评分经过归一化处理. 可以看出，本文方法在多数场景中能与设计师达成较好的一致，表明其能够以接近设计师专业水准的方式进行场景质量评估；由于设计师评分时可能受主观偏好影响，因

表 1　设计师评估与本文方法的部分结果对比

场景序号	平均评分差异	平均方差
1~10	0.133	0.030
41~50	0.220	0.089



评分结果说明: 1. 可达性; 2. 可见性; 3. 开阔度; 4. 关联关系; 5. 功能比例; 6. 平衡性; 7. 齐整度; 8. 和谐性; 9. 流线合理性; 10. 活动舒适度

图 14　对比实验结果

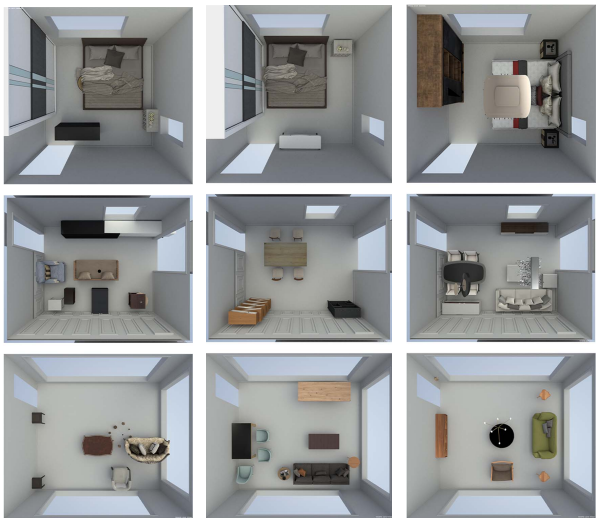
此最终评估结果与设计师存在一定差异.

6.3　场景生成

将本文方法与 2 种生成方法[9,19]进行比较, 它们都在生成过程中进行场景评估. 由于本文方法主要用于评估场景, 并且更多地在场景尺度进行评估, 而非在对象尺度评估, 因此在同一场景中, 10 项评估指标的反复计算会耗费较多时间. 本文方法基于典型的马尔可夫链蒙特卡罗框架[10], 在实现细节上遵循 Qi 等[34]的方法进行对象选择和变换, 但使用本文的评估指标进行度量.

2 种对比方法为 PlanIT[19]和 HAISOR[9]. PlanIT 是基于卷积神经网络的场景生成方法, 在迭代过程中利用神经网络将物体添加到场景, 并进行平移、旋转等变换. HAISOR 作为三维场景的最新方法之一, 能够基于图神经网络生成表现良好的室内场景. 2 种对比方法和本文方法都在相同的空房间集合下生成场景, 该空房间是从 3D-Front 数据库中随机选取的 30 个房间, 每个房间分别使用 3 种方法进行生成布局. 部分生成结果如图 15 所示.

本文邀请 20 位被试对生成结果进行评估. 每位被试收到一份包含 10 个不同房间的问卷, 每个房间都使用 3 种方法生成了不同场景. 被试需要对场景进行功能、美学和人因 3 方面的评价和总体评价, 分值范围为 1~5 分. 评估结果如表 2 所示. 可以看出, 本文方法在场景生成中具有良好的效果, 在功能、美学和人因评估中都优于对比方法. 但是, 由于本文方法迭代一轮计算 10 项指标, 需要耗费大量时间, 在场景生成任务中应用并不现实, 因此该实验仅能用于说明本文方法的合理性.



a. PlanIT[19]　b. HAISOR[9]　c. 本文

图 15　3 种方法的生成结果

表 2　室内场景的用户评估结果

方法	评分			
	功能	美学	人因	总体
PlanIT[19]	2.992	2.846	2.731	2.805
HAISOR[9]	3.050	2.996	3.015	3.029
本文	**3.592**	**3.658**	**3.488**	**3.695**

注. 粗体表示最优值.

7　结　语

针对室内三维场景的度量问题, 本文从功能、美学和人因 3 个方面提出 10 项评估指标, 完善室内场景评估的准则. 在此基础上, 设计师可以更加精确地评估和改进室内设计, 研究人员也能够更好地理解和优化场景生成算法.

场景评估实验结果表明, 本文指标能够以一定的专业设计水平评估室内场景. 场景生成实验中, 本文方法取得了良好的效果, 但需耗费较多时间. 由于室内场景评估的复杂性, 因此本文方法仍待改进. 例如, 功能准则依赖特定规则从现有数据集提取先验知识, 而这一过程需要耗费较多时间; 美学准则以几何评估为主, 并未考虑实际家具的颜色、纹理、风格等因素; 人因准则中, 仅考虑了光照和通风条件, 而更为完善的人因评估还应当包含活动环境的人体工学合理性、活动便捷性等因素. 在实际评估中, 考虑用户对功能、美学和人因偏好, 以及评估场景的多种评估需求, 应当通过用户预调研、数据拟合等方式设计多套可调整参数配置, 以满足不同评估情境的需求. 另外, 本文方法

的评估结果与设计师的评估结果仍有一定差异. 未来将继续改进本文方法, 提高评估模型在现实场景的应用性.

参考文献(References):

[1] Li W W, Talavera J, Samayoa A G, *et al*. Automatic synthesis of virtual wheelchair training scenarios[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2020: 539-547

[2] Wang F. Research on the application of immersive art in digital technology scene[J]. Advances in Education, Humanities and Social Science Research, 2023, 5(1): 88-93

[3] Walliss J, Rahmann H. Landscape architecture and digital technologies: re-conceptualising design and making[M]. Abingdon: Routledge, 2016: 1-44

[4] Alawadhi A, Yoon S Y. Shopping behavioral intentions contributed by store layout and perceived crowding: an exploratory study using computer walk–through simulation[J]. Journal of Interior Design, 2016, 41(4): 29-46

[5] Zhang S H, Zhang S K, Liang Y, *et al*. A survey of 3D indoor scene synthesis[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2019, 34(3): 594-608

[6] Weiss T, Litteneker A, Duncan N, *et al*. Fast and scalable position-based layout synthesis[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(12): 3231-3243

[7] Zhang S H, Zhang S K, Xie W Y, *et al*. Fast 3D indoor scene synthesis by learning spatial relation priors of objects[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2022, 28(9): 3082-3092

[8] Fu Q, Chen X W, Wang X T, *et al*. Adaptive synthesis of indoor scenes via activity-associated object relation graphs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(6): Article No.201

[9] Sun J M, Yang J, Mo K C, *et al*. HAISOR: human-aware indoor scene optimization via deep reinforcement learning[J]. ACM Transactions on Graphics, 2024, 43(2): Article No.15

[10] Yu L F, Yeung S K, Tang C K, *et al*. Make it home: automatic optimization of furniture arrangement[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): Article No.86

[11] Merrell P, Schkufza E, Li Z Y, *et al*. Interactive furniture layout using interior design guidelines[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): Article No.87

[12] Zhang S K, Liu J H, Li Y K, *et al*. Automatic generation of commercial scenes[C] //Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia. New York: ACM Press, 2023: 1137-1147

[13] Fisher M, Ritchie D, Savva M, *et al*. Example-based synthesis of 3D object arrangements[J]. ACM Transactions on Graphic, 2012, 31(6): Article No.135

[14] Ma R, Li H H, Zou C Q, *et al*. Action-driven 3D indoor scene evolution[J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(6): Article No.173

[15] Zhang S K, Li Y X, He Y, *et al*. MageAdd: real-time interaction simulation for scene synthesis[C] //Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia. New York: ACM Press, 2021: 965-973

[16] Yu L F, Yeung S K, Terzopoulos D. The clutterpalette: an interactive tool for detailing indoor scenes[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(2): 1138-1148

[17] Zhang S K, Tam H, Li Y K, *et al*. SceneDirector: interactive scene synthesis by simultaneously editing multiple objects in real-time[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024, 30(8): 4558-4569

[18] Wang K, Savva M, Chang A X, *et al*. Deep convolutional priors for indoor scene synthesis[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): Article No.70

[19] Wang K, Lin Y A, Weissmann B, *et al*. PlanIT: planning and instantiating indoor scenes with relation graph and spatial prior networks[J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(4): Article No.132

[20] Li M Y, Patil A G, Xu K, *et al*. GRAINS: generative recursive autoencoders for indoor scenes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(2): Article No.12

[21] Zhang Z W, Yang Z P, Ma C Y, *et al*. Deep generative modeling for scene synthesis via hybrid representations[J]. ACM Transactions on Graphics, 2020, 39(2): Article No.17

[22] Leimer K, Guerrero P, Weiss T, *et al*. LayoutEnhancer: generating good indoor layouts from imperfect data[C] //Proceedings of the SIGGRAPH Asia 2022 Conference Papers. New York: ACM Press, 2022: Article No.27

[23] Xie H L, Xu W Z, Wang B. Reshuffle-based interior scene synthesis[C] //Proceedings of the 12th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry. New York: ACM Press, 2013: 191-198

[24] Hu F, Ma Y B, Zhong W, *et al*. A dataset and benchmark for 3D scene plausibility assessment[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2024, 26: 6529-6541

[25] Wald J, Dhamo H, Navab N, *et al*. Learning 3D semantic scene graphs from 3D indoor reconstructions[C] //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2020: 3960-3969

[26] Ma R, Patil A G, Fisher M, *et al*. Language-driven synthesis of 3D scenes from scene databases[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(6): Article No.212

[27] Fisher M, Savva M, Li Y Y, *et al*. Activity-centric scene synthesis for functional 3D scene modeling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): Article No.179

[28] Fu Q, Fu H B, Yan H, *et al*. Human-centric metrics for indoor scene assessment and synthesis[J]. Graphical Models, 2020, 110: Article No.101073

[29] LaValle S M. Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning[D]. Iowa: Iowa State University, 1998: 1-4

[30] Fu H, Cai B W, Gao L, *et al*. 3D-FRONT: 3D furnished rooms with layouts and semaNTics[C] //Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2021: 10913-10922

[31] Shapiro S S, Wilk M B. An analysis of variance test for normality (complete samples)[J]. Biometrika, 1965, 52(3-4): 591-611

[32] Ester M, Kriegel H P, Sander J, *et al*. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with

noise[C] //Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Palo Alto: AAAI Press, 1996: 226-231

[33] Zhang S K, Tam H, Li Y X, *et al*. SceneViewer: automating residential photography in virtual environments[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2023, 29(12): 5523-5537

[34] Qi S Y, Zhu Y X, Huang S Y, *et al*. Human-centric indoor scene synthesis using stochastic grammar[C] //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 5899-5908

附录 A　各评估函数中可调整参数设置

表 A1　各评估函数可调整参数设置

评估准则	参数名	符号	本文取值	评估准则	参数名	符号	本文取值
可达性	不可达空间阈值	ρ	0.8	齐整度	位置贡献系数	λ_1	0.33
	不可达系数	δ	0.5		方向贡献系数	λ_2	0.33
	子可达空间权重	ω	依类别设定		噪声贡献系数	λ_3	0.33
可见性	可视空间系数	μ	依类别设定	和谐性	布局-构图贡献系数	λ_h	0.5
	遮挡比例	α	0.75	流线合理性	曲折度贡献系数	λ_{cir}	0.5
	不可见系数	η	0.5	活动舒适度	场强-场方向贡献系数	σ	0.33
开阔度	重叠范围影响度	ν	1		光照-通风贡献系数	λ_{co}	0.5
关联关系	距离-角度贡献系数	λ_p	0.75				