

虚拟现实(VR)购物场景的视觉复杂性分形评价模型

吴 江

浙江理工大学理学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年7月9日; 录用日期: 2025年7月23日; 发布日期: 2025年8月20日

摘 要

本文围绕VR购物环境中的视觉感知机制, 提出一种基于分形维度的评价方法, 用于量化场景的视觉复杂度以及和用户场景感知之间的关系, 为VR购物环境的设计提供了新的指导方向和操作建议。研究从场景空间布局、商品排列逻辑、背景纹理特征等几方面出发, 将虚拟购物场景的视觉感知与分形维度进行关联并建立评价模型。研究发现范围在1.3至1.5的分形维度能有效提升用户对VR购物场景的空间识别效率和情绪舒适度。过高或过低的分形维度会分别导致视觉负荷过载与不足, 进而影响决策效率与购买行为。并针对视觉对环境感知的优势和不足, 提出主客观评价模型、多因素加权评价模型以及多维度感知评价模型, 为提升VR购物体验质量开辟了新的方法路径。

关键词

虚拟现实, 电子购物, 分形维度, 视觉沉浸体验, 用户认知效率, 视觉复杂度, 识别效率

Fractal Evaluation Model of Visual Complexity in Virtual Reality (VR) Shopping Scenes

Jiang Wu

School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Jul. 9th, 2025; accepted: Jul. 23rd, 2025; published: Aug. 20th, 2025

Abstract

This study explores the visual perception mechanisms inherent in virtual reality (VR) shopping environments and presents a fractal dimension-based evaluation method designed to quantify the vis-

visual complexity of scenes and its correlation with user perception. This approach offers quantitative tools and operational recommendations for the design of VR shopping experiences. The research investigates various aspects, including the spatial layout of scenes, the logic of product arrangement, and the characteristics of background textures, establishing a relationship between the visual perception of virtual shopping environments and fractal dimensions to formulate an evaluation model. The findings reveal that a fractal dimension within the range of 1.3 to 1.5 significantly enhances users' spatial recognition efficiency and emotional comfort within VR shopping settings. In contrast, excessively high or low fractal dimensions can lead to visual fatigue and insufficient information, respectively, thereby adversely affecting decision-making efficiency and purchasing behavior. Additionally, in response to the strengths and weaknesses of visual perception in environmental cognition, the study proposes subjective-objective evaluation models, multi-factor weighted evaluation models, and multi-dimensional perception evaluation models, thereby opening up new methodological pathways for enhancing the quality of the VR shopping experience.

Keywords

Virtual Reality, E-Commerce, Fractal Dimension, Visual Perception Immersion, User Cognitive Efficiency, Visual Complexity, Recognition Efficiency

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

近年来随着虚拟现实(VR)技术的迅猛发展,传统电子商务平台正在经历由二维页面向三维沉浸式体验转型的重大变革,而基于VR的互动购物体验正成为技术投入的核心驱动。借助VR技术,用户进入高度仿真的购物环境中完成浏览、比较、选择与购买行为。

尽管VR购物带来了比传统网页和移动应用更具沉浸感的体验,但用户需要在一个高度自由的三维空间中完成信息获取与行为决策,这不仅对界面布局与交互反馈提出了新的要求,也对视觉感知机制提出了更高挑战。在真实购物场景中,用户通过复杂而稳定的视觉系统对场景中的背景纹理、商品陈列与空间关系进行快速解析;而VR场景中因为设计不当导致的背景纹理过密、商品摆放凌乱或视觉焦点模糊,往往会导致用户视觉负荷加重、认知过载,空间迷失,进而引发“虚拟疲劳”现象[1][2],这不仅降低了用户的沉浸感和购物体验,也更进一步影响平台的用户留存和转化率。

因此准确评估用户的VR购物场景的视觉感知至关重要。仅依赖设计者主观判断和用户问卷调查属于主观评价,不能客观量化用户的视觉感知。分形维度是描述视觉复杂度的理论工具[3]。将该理论引入虚拟购物场景中,不仅可以量化虚拟场景的视觉复杂度,还可预测不同分形维度对用户的空间识别效率与情绪状态的潜在影响。因此本文提出了一种基于分形维度的虚拟购物场景视觉复杂度评价机制,通过研究分析VR场景和分形维度的视觉感知机制,建立VR购物场景下视觉感知过程与分形维度的联系,最终形成一套通过分形维度推测场景视觉感知的评价模型,并探讨该机制与多模态感知模型中的融合可能性,为沉浸式电商平台的场景优化提供新的思考角度,推动VR购物环境向为用户提供更加人性化体验的未来发展。

2. 研究背景

2.1. VR购物的应用和研究现状

随着虚拟现实(VR)技术的迅速发展,沉浸式购物环境逐渐成为新兴电商的重要发展方向。Meta在

2023 年发布的数据显示,其“Meta Horizon Store”平台的用户停留时间较网页商城平均提升 38%。相比传统二维网页,VR 购物通过构建逼真的三维空间和交互环境,提升了消费者购物的情境参与感与购物决策信心[4]。Lee 等人也指出 VR 购物的优势在于可以模拟现实世界中的空间结构和视觉感知,有效增强购物者的临场感和信任度[5],但同时 VR 购物的认知负荷明显高于传统网页购物,如果设计不佳,将导致用户感到疲劳、眩晕[6]。

视觉是用户与 VR 场景交互的最主要感觉通道。Slater 和 Wilbur 提出“存在感”是衡量用户是否感觉“身临其境”的核心指标[7][8]。研究表明,视觉复杂度如果超出人眼识别上限,反而降低存在感与认知效率[1]。VR 购物场景下的视觉感知将直接影响商品识别速度与导航意愿[9],虚拟商城的空间布局、货架排布、灯光及动线设计等都需要考虑视知觉感知规律。

2.2. 虚拟现实购物环境构建要素

VR 购物场景的主要构成要素包括:1、空间结构的开放程度[10];2、商品陈列与引导[11];3、背景纹理与材质[12][13]。VR 空间结构的开放程度显著影响用户的“空间控制感”与路径认知效率。Alexander 等人发现,VR 环境下开放式布局(如弧形走廊)较封闭式长廊更有助于提高用户在空间中的感知控制感与决策信心[14]。而商品排列密度与层次组合将显著影响视觉搜索路径与效率,从而影响购买行为。商品陈列过于密集将造成“视觉疲劳”,而过于稀疏则降低信息获取效率[15]。缺乏物理参考点时导致 VR 用户容易在空间中迷失[16],影响导航与决策效率。因此合理设置地面纹理、地标与路径布局至关重要[17]。合适的背景材质(如墙面纹理、地板材质等)会提高用户方的定位能力和商品识别速度。当背景纹理与商品对比足够强时,用户更容易聚焦于目标物品,从而提高感知效率、满意度以及购买意愿[17][18]。此外,空间中引入现实生活元素(如绿植、背景人声、模拟阳光)可提高“真实度”与“熟悉性”,从而增强用户的空间识别能力与情感联结[19]。因此虚拟现实购物环境的构建远不止“场景复刻”,而是一个整合空间结构、商品逻辑、行为决策与感官线索的多模态感知系统。

2.3. 虚拟现实环境的视觉感知

视觉感知是 VR 环境中用户识别距离、方向、位置关系的能力[20]。视觉搜索是指用户在视觉场景中识别目标商品的过程,其过程受到商品排列密度、色彩对比度、纹理复杂度等因素影响[21][22]。实验发现 VR 购物环境下高密度、低层次差异的商品排布会显著降低搜索效率,用户在视觉混乱的环境中更容易产生疲劳并放弃购物[16]。用户通过视觉感知虚拟空间的能力直接影响沉浸感[23]。沉浸感是指 VR 系统技术层面提供的“包围式体验”[7],环境的沉浸感越强,用户对商品的可信度与购买力越高[24]-[26],而纹理、色彩与对比度等视觉属性对用户“沉浸感”影响显著[27]。Sanaei 等人还发现用户进行的任务决定其对 VR 场景的沉浸感和视觉复杂度的感知。

2.4. 分形与在 VR 场景中的应用

分形维度(以下用 D_f 表示)用于描述自然环境的复杂性[3],是视觉复杂度的客观量化[28]。Taylor 等人的研究表明人类更偏好分形维度处于 1.3 至 1.5 之间的自然纹理[29]-[32]。这种倒 U 型偏好广泛应用于建筑美学、装饰纹理乃至 UI 设计[33]。VR 场景中过高或过低的视觉复杂度均会影响认知效率。分形维度过高($D_f = 1.9$)代表视觉复杂度也过高,此时场景包含的大量细节和边缘会增加视觉搜索长度与认知负荷;而过低(如 $D_f = 1.1$)则同时代表视觉复杂度低,此时场景布局简单容易导致注意力缺失。因此分形维度可以作为评价 VR 环境视觉感知的工具,应用于空间布局、材质的选取、商品陈列等多个方面。

3. VR 购物场景视觉复杂性的分形评价模型

VR 购物环境的视觉复杂度是影响用户沉浸体验、认知效率与行为决策的重要因素，因此需要客观计算出视觉复杂度。采用问卷评估视觉感知是主观评价，而分形维度则是客观评价视觉复杂度的数学工具，盒子计数法是最常用的分形维度计算方法[34]。计算出的分形维度值越高，表明对象结构越“复杂”——形态填充空间的能力越强[35]。

3.1. VR 购物场景的视觉感知维度

在 VR 购物环境中，用户的视觉复杂度感知是一个从整体感知到目标识别的渐进过程[36]，遵循以下过程：1、整体感知[36]；2、注意聚焦[22]；3、区域区分[21]；4、商品识别[37]。基于该过程可推导出视觉感知的四个关键指标：1、场景视觉复杂度(D_scene)：该指标表明用户进入场景后会快速评估整体结构和细节，通过视觉系统捕捉整体信息密度与纹理层次，判断场景的可探索性与视觉负荷。2、视觉聚焦度(D_focus)：快速评估整体结构和细节后，用户的注意力会迅速转向目标区域(如明亮、清晰、有边界的部分)。该指标反映用户的视觉注意力是否被有效引导至目标区域，如果目标区域突出、聚焦明确，用户注意力更集中，信息提取更高效。3、区域对比度(D_contrast)：聚焦目标区域后，用户需要进一步识别各区域的内容属性(如商品、背景、路径)。这依赖于区域间在空间结构、背景纹理、或商品密度上的差异。区域对比度越强，内容属性越容易区分，因此，区域对比度成为评估空间导向能力的关键维度。4、商品识别清晰度(D_product)：该指标强调商品图像的辨识度与识别速度。用户必须能完成具体商品的识别判断。因此要求商品边缘清晰、与背景区隔明显，避免无关元素干扰判断。

3.2. VR 场景视觉复杂度的分形维度计算

采用盒子计数法计算场景的分形维度，步骤如下：1、图像采集：从场景中选取关键场景(如入口、商品区、导航点)截图作为计算对象，每处至少选取 3~5 张角度稍有不同图像计算平均值以提高准确性。2、图像预处理：通过图像处理软件 ImageJ 对图像进行灰度转换、Canny 边缘检测并完成图像二值化，排除颜色与材质干扰以便提取边缘线(如货架轮廓、地面纹理)。3、图像计算与数据分析：通过 MATLAB 软件下的 fraclab 插件计算图像的分形维度，其原理为对不同尺度下对边缘图进行网格覆盖，统计非空格子数量。最后采用 Python 编写 MATLAB 下运行的可视化数据分析程序，进行数据对比分析。

3.3. VR 购物场景视觉复杂度的分形评价模型

将分形维度与四个关键视觉感知指标相结合，构建场景的分形评价模型：

1) 场景视觉复杂度(D_scene)：反映场景整体的结构密度和信息负载水平。如果 $D_scene < 1.3$ ，说明场景趋于简洁，缺乏足够的视觉刺激和导航引导，建议适当增加商品数量，或在地面、货架等区域引入轻度纹理以丰富感知结构。如果 $D_scene > 1.5$ ，则表明场景趋于繁复，视觉负荷过高，用户可能出现视觉疲劳和认知干扰，应简化墙面装饰、减少无功能性的背景图案，以降低视觉负担、提升识别效率。

2) 视觉聚焦度(D_focus)：用户视觉注意力集中区域(如商品陈列区)的视觉复杂度水平。一般而言， $D_focus > 1.5$ 有助于吸引注意力，增强视觉冲击力；但若同时伴随 $D_product$ 显著升高，则可能意味着焦点区域过于繁复、边缘混杂，影响商品识别，应重视视觉层次与清晰度的平衡。

3) 区域对比度(D_contrast)：衡量视觉焦点与背景之间在结构复杂度上的差异。当 $D_contrast < 0.1$ 时表明焦点区域与周边缺乏明显区分，用户的注意力容易分散，需要提升焦点区域的复杂度，或降低背景干扰(如背景虚化)来强化视觉引导。 $D_contrast \geq 0.2$ 符合“弹出式目标”(pop-out)理论的显著性机制[38]，是比较理想的数值范围，有助于形成清晰的视觉层次结构，强化注意力引导、加快识别效率。

4) 商品识别清晰度(D_{product}): 评估用户在视觉焦点中识别商品的难易程度。最优识别状态通常出现在 1.3 至 1.5 的范围内, 此时商品轮廓清晰、纹理适中, 有助于快速理解商品特征。若 $D_{\text{product}} > 1.5$, 说明商品区边缘趋于过于密集或图样干扰过多, 建议通过简化背景、突出轮廓来提升可识别性。

通过分析四项指标的交互关系, 可以进一步得出:

1、如果 $D_{\text{scene}} > 1.5$ 且 $D_{\text{contrast}} < 0.1$, 表明整体负荷过重且缺乏视觉引导, 建议简化背景元素、增强焦点亮度与差异度。

2、如果 D_{focus} 较低、 D_{product} 较高, 说明商品区域未形成有效视觉聚焦, 可能因展示方式过杂, 应重新调整商品陈列方式或提升显著性特征。

3、如果 $1.3 < D_{\text{scene}} < 1.5$, $D_{\text{contrast}} \geq 0.25$, 则说明视觉层次结构适中、空间组织合理, 通常能带来良好的沉浸感与交互体验。

4. 评价模型与视觉识别效率

4.1. 背景纹理与视觉识别效率

VR 购物环境中背景纹理的分形维度直接影响用户的空间识别效率与沉浸体验。分形维度较高代表信息密度丰富, 有助于营造真实感; 但如果超过一定阈值, 则易造成信息冗余, 引发认知过载与注意力分散。Jerald 指出过度复杂的视觉刺激将降低用户对关键信息的提取效率, 影响导航、定位与决策行为, 甚至导致视觉疲劳与晕动症, 削弱用户满意度与平台留存率[1][2]。如果分形维度过低, 场景显得简洁但缺乏细节与引导, 用户难以形成清晰的空间感知, 容易产生“方向迷失”与识别困难, 影响操作流畅性与行为积极性。环境心理学研究表明结构过于单调的购物环境会引发情绪冷漠, 降低互动深度与购物动机[39][40]。用户在分形维度为 1.3 至 1.5 区间的场景中导航完成效率最高、错误率最低、空间记忆表现最佳[41][42]。一项基于实体商店路径的研究表明, 顾客购物路径的平均 D_f (与顾客在商店的平均停留时间相关) 约为 1.3 [43]。

研究表明背景纹理的分形维度还会影响用户的情绪状态和心理负荷[44], 适合的分形纹理能够有效缓解用户的心理压力, 提升用户情绪稳定性和心理舒适感[45], 进而空间识别效率[46]。 D_f 低于 1.3 时, 背景趋于简单, 容易导致认知疲劳和注意力下降; 而 D_f 高于 1.5 时, 视觉信息趋于密集, 增加了视觉负荷导致用户心理厌烦。当 D_f 在 1.3 至 1.5 之间时, 用户的视觉偏好和情绪适配性最强[29]-[32], 纹理在规律性与随机性之间取得平衡[28], 减轻了眼部肌肉负担, 激活与愉悦感相关的神经元, 使用户在心理放松同时产生积极情绪[47], 最终实现空间识别效率的提升[1][2]。

因此 VR 购物环境中的背景纹理的 D_f 一般情况下建议保持在 1.3 至 1.5 之间, 既保证视觉清晰与层次分明, 又避免视觉负荷过重, 以营造情绪稳定且感知友好的购物氛围, 提升沉浸感、识别效率与购物决策力。背景纹理应避免过于单调或复杂, 并与商品展示区域保持足够的视觉对比, 以提升识别效率。此外, 还可以结合用户操作节奏和实时生理反馈(如眼动、心率)动态调整纹理参数, 实现“情绪驱动”的背景适配机制, 从而优化用户的沉浸体验。

4.2. 商品呈现密度与识别效率

VR 购物环境中商品的视觉呈现密度对消费者的视觉识别效率和整体购物体验具有显著影响[37][48]。Kunalai 指出合理的商品密度与空间布局能显著提升用户的空间认知能力与购物意愿[49]。商品密度体现空间的填充度与层次多样性, 具有典型的分形结构特征。商品密度的分形维度与用户的视觉识别效率呈倒“U 型曲线”关系: 过高或过低都会降低识别效率, 影响购物决策[50]。采用分形结构优化的商品排列不仅增强了视觉层次感, 还能显著缩短用户的视觉搜索时间与决策过程[51]。

高分形维度布局($Df > 1.5$): 商品排列趋于密集, 视觉信息丰富但易产生遮挡与重叠, 增加视觉干扰, 用户需更长时间扫视和辨识。在 VR 环境中由于显示分辨率限制与用户视觉适应能力, 信息过载可能进一步引发生理不适, 如视觉疲劳或晕动症。

低分形维度布局($Df < 1.3$): 商品稀疏分布, 单品展示清晰, 但产品的空间距离过大, 用户需频繁转移视线, 眼动路径变长, 搜索效率下降。同时空旷环境缺乏视觉引导容易导致空间迷失, 削弱沉浸感和购买动机。

中等分形维度布局($1.3 < Df < 1.5$): 在此区间内, 商品密度达到视觉信息量与识别难度的最佳平衡点, 可实现最短搜索路径与最高识别效率。同时通过合理设计灯光、色彩对比与视觉引导, 可进一步强化商品层次感与焦点, 优化用户的视线路径与移动流线, 减少无效扫描, 提高整体购物效率。

5. 基于分形维度的拓展评价模型

5.1. 基于分形维度的主客观评价模型

分形评价机制为 VR 场景的视觉感知提供了量化标准, 可以在 VR 场景设计的前期进行预评估, 减少试错成本, 提升开发效率; 尽管诸如系统可用性量表等工具广泛应用于 VR 体验测评, 但这些工具侧重于用户的主观反馈, 缺少对视觉复杂度的客观量化, 而分形维度为客观指标则能够弥补这一不足。相关性研究表明视觉复杂度对系统可用性量表评分存在显著影响[52], 如果将分形维度评价与主观评价结合分析, 形成闭环优化评价模型, 有助于全面理解视觉复杂度对用户体验的影响机制, 进而为 VR 购物场景提供更加科学的设计依据。

5.2. 基于分形维度的多因素加权评价模型

尽管分形维度在描述 VR 购物环境的视觉感知方面具有显著优势, 但并不是视觉感知的唯一因素, 受到色彩[53]、光照[54]、语义叙事性[55][56]等多重因素的影响。研究表明色彩的饱和度、亮度、冷暖属性等会显著影响用户的情绪状态和注意力分布[53]。并且不同的色彩处理方式可能会放大或削弱分形维度在视觉中的呈现效果[53][56], 当中等分形维度图像采用高对比度、高饱和度配色时, 可能会因为刺激过强导致视觉疲劳; 而低亮度、低对比度的配色可能削弱结构边缘感, 使分形结构不易被识别。分形特征的感知强度高度依赖于光照条件。在虚拟环境中, 光照强度过高或明暗对比不足, 图像边界会变得模糊, 影响分形结构的辨识与复杂度感知。尽管动态光影能够提升沉浸感, 但也可能削弱静态分形图像的清晰度与稳定性。语义叙事性的影响更为复杂。虚拟场景中用户对图像的感知并非单纯依靠几何特征, 而是通过文化背景、情境认知和语义联想进行再构, 并与用户的文化语境和审美训练密切相关。Mitina 等人指出被试对同一组分形图像的视觉复杂度和吸引力评价, 受个体性格特征及先验视觉经验显著影响。而相同的分形结构在不同语境下可能引发截然不同的情感评价[56]。Della-Bosca 研究发现将分形图像用于游戏或虚拟空间中的自然场景背景, 用户往往感知为“舒适”“亲近”。但如果置于科技感或机械感极强的界面中, 分形结构可能被解读为“冷漠”或“压迫”, 尤其在高度结构化的界面设计中, 反而可能会降低用户的亲和度[55]。因此为了更好的量化 VR 场景的视觉感知, 本文进一步提出构建一个“多因素加权评价模型”, 整合多个因素——分形维度(Df)、色彩特征指数(C)、光照动态因子(L)、语义或叙事性评分(N)。数学形式表达为:

$$V = w_1 \cdot Df + w_2 \cdot C + w_3 \cdot L + w_4 \cdot N + \varepsilon$$

其中 V 为总体视觉体验评价值, $w_1 \sim w_4$ 为各因素的权重参数, ε 表示误差项或个体差异引入的随机因子。各因素权重参数值通过心理实验和机器学习方法对大样本数据进行回归拟合获取并不断优化, 使评价模型逐步接近人类视觉感知的真实机制[53][56][57]。

5.3. 基于分形维度的多维度评价模型

分形维度的多因素加权评价模型具备高度的可扩展性与适应性，可作为核心模块进一步拓展为多模态感知评价模型。在原有视觉感知维度的基础上，模型可以整合音频特征、用户动作响应以及神经生理信号(如脑电、心率、皮肤电等)，建立跨模态统一的用户感知表征模型。在多感官场景下，分形维度的应用不再局限于视觉感知。例如声音信号同样具备分形特性(频谱结构的自相似性)，因此可用于衡量听觉复杂度[57]。这种跨模态分形评价机制，有助于增强 VR 环境中感官间的感知一致性。多维度评价模型还可以通过引入用户的生理与行为数据(如眼动模式、心率波动、脑电节律等)，探讨个体差异在分形感知中的表现机制，并基于个体反应差异构建具备实时监测与反馈调节功能的动态系统，实现视觉复杂度智能自适应调节，从而推动交互体验向个性化、动态化方向发展。

6. 结论

本研究提出一种基于视觉分形理论的评价机制，帮助设计师科学有效地控制虚拟购物场景的空间布局、商品密度、背景纹理、行为导航等环节，实现视觉感知负荷与视觉复杂度的平衡，避免购物场景过度复杂或过度简化引发的感知不适，从而增强用户的沉浸感和购买意愿。研究表明分形维度在 1.3 至 1.5 区间内的 VR 购物场景，可以为用户提供最佳的视觉复杂度和空间识别效率，过高或过低会导致视觉负荷过载与不足，进而影响决策效率与购买行为。针对视觉对环境感知的优势和局限性，研究进一步提出主客观评价模型以及多因素加权评价模型，并结合多模态数据构建一个多维度感知评价模型，为 VR 购物场景的优化提供理论基础与实践路径，最终提高 VR 购物场景的设计效率和用户体验满意度。

参考文献

- [1] Jerald, J. (2015) The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2792790>
- [2] Huang, Y. (2019) Visual Perception and Fatigue in AR/VR Head-Mounted Displays. *Information Display*, **35**, 4-5. <https://doi.org/10.1002/msid.1015>
- [3] Pentland, A.P. (1984) Fractal-based Description of Natural Scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **6**, 661-674. <https://doi.org/10.1109/tpami.1984.4767591>
- [4] Kang, H.J., Shin, J. and Ponto, K. (2020) How 3D Virtual Reality Stores Can Shape Consumer Purchase Decisions: The Roles of Informativeness and Playfulness. *Journal of Interactive Marketing*, **49**, 70-85. <https://doi.org/10.1016/j.intmar.2019.07.002>
- [5] Lee, W.J. (2020) Use of Immersive Virtual Technology in Consumer Retailing and Its Effects to Consumer. *Journal of Distribution Science*, **18**, 5-15.
- [6] Makransky, G., Terkildsen, T.S. and Mayer, R.E. (2019) Adding Immersive Virtual Reality to a Science Lab Simulation Causes More Presence but Less Learning. *Learning and Instruction*, **60**, 225-236. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007>
- [7] Slater, M. and Wilbur, S. (1997) A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, **6**, 603-616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
- [8] Xi, N. and Hamari, J. (2019) VR Shopping: A Review of Literature. *Twenty-Fifth Americas Conference on Information Systems*, Cancun, 15-17 August 2019, 1-10.
- [9] Speicher, M., Cucerca, S. and Krüger, A. (2017) VRShop: A Mobile Interactive Virtual Reality Shopping Environment Combining the Benefits of on- and Offline Shopping. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, **1**, 1-31. <https://doi.org/10.1145/3130967>
- [10] Azarby, S. and Rice, A. (2022) Scale Estimation for Design Decisions in Virtual Environments: Understanding the Impact of User Characteristics on Spatial Perception in Immersive Virtual Reality Systems. *Buildings*, **12**, Article 1461. <https://doi.org/10.3390/buildings12091461>
- [11] Wang, W., Zhang, M., Wang, Z. and Fan, Q. (2025) The Impact of Spatial Dimensions, Location, Luminance, and

- Gender Differences on Visual Search Efficiency in Three-Dimensional Space. *Buildings*, **15**, Article 656. <https://doi.org/10.3390/buildings15050656>
- [12] Wang, C., Lu, W., Ohno, R. and Gu, Z. (2020) Effect of Wall Texture on Perceptual Spaciousness of Indoor Space. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article 4177. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114177>
 - [13] Lew, W.H. and Coates, D.R. (2024) The Effect of Target and Background Texture on Relative Depth Discrimination in a Virtual Environment. *Virtual Reality*, **28**, Article No. 103. <https://doi.org/10.1007/s10055-024-01000-4>
 - [14] Schnack, A., Wright, M.J. and Holdershaw, J.L. (2019) An Exploratory Investigation of Shopper Behaviour in an Immersive Virtual Reality Store. *Journal of Consumer Behaviour*, **19**, 182-195. <https://doi.org/10.1002/cb.1803>
 - [15] Halverson, T. and Hornof, A.J. (2004) Local Density Guides Visual Search: Sparse Groups Are First and Faster. *The Proceedings of the 48th Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, New Orleans, 20-24 September 2004, 1-5.
 - [16] Herumurti, D., Yuniarti, A., Kuswardayan, I., Khotimah, W.N. and Widyananda, W. (2017) Virtual Reality Navigation System in Virtual Mall Environment. *Proceedings of the 3rd International Conference on Communication and Information Processing*, Tokyo, 24-26 November 2017, 209-213. <https://doi.org/10.1145/3162957.3163052>
 - [17] Nguyen-Vo, T., Riecke, B.E. and Stuerzlinger, W. (2018) Simulated Reference Frame: A Cost-Effective Solution to Improve Spatial Orientation in VR. *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Tuebingen, 18-22 March 2018, 415-422. <https://doi.org/10.1109/vr.2018.8446383>
 - [18] Bedggood, P., Prea, S.M., Kong, Y.X.G. and Vingrys, A.J. (2021) Scaling the Size of Perimetric Stimuli Reduces Variability and Returns Constant Thresholds across the Visual Field. *Journal of Vision*, **21**, 1-12. <https://doi.org/10.1167/jov.21.11.2>
 - [19] Biocca, F. (2010) *Communication in the Age of Virtual Reality*. Routledge.
 - [20] Hmaiti, Y., Maslych, M., Ghasemaghahi, A., Ghamandi, R.K. and LaViola, J.J. (2024) Visual Perceptual Confidence: Exploring Discrepancies between Self-Reported and Actual Distance Perception in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **30**, 7245-7254. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2024.3456165>
 - [21] Perlman, G. and Swan, J.E. (1994) Relative Effects of Color-, Texture-, and Density-Coding on Visual Search Performance and Subjective Preference. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, **38**, 235-239. <https://doi.org/10.1177/154193129403800410>
 - [22] Bennett, C.R., Bex, P.J. and Merabet, L.B. (2021) Assessing Visual Search Performance Using a Novel Dynamic Naturalistic Scene. *Journal of Vision*, **21**, Article 5. <https://doi.org/10.1167/jov.21.1.5>
 - [23] Iachini, T., Maffei, L., Masullo, M., Senese, V.P., Rapuano, M., Pascale, A., et al. (2018) The Experience of Virtual Reality: Are Individual Differences in Mental Imagery Associated with Sense of Presence? *Cognitive Processing*, **20**, 291-298. <https://doi.org/10.1007/s10339-018-0897-y>
 - [24] Chhaniwal, N. (2025) Impact of Virtual Reality on Consumer Purchase Intentions: A Neuromarketing Perspective. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, **10**, 663-671. <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i9s.1292>
 - [25] Luna-Nevarez, C. and McGovern, E. (2021) The Rise of the Virtual Reality (VR) Marketplace: Exploring the Antecedents and Consequences of Consumer Attitudes toward V-Commerce. *Journal of Internet Commerce*, **20**, 167-194. <https://doi.org/10.1080/15332861.2021.1875766>
 - [26] Loureiro, S.M.C., Correia, C. and Guerreiro, J. (2020) Virtual Supermarket Setting: Exploring Antecedents of Emotions and Purchase Intentions. *Global Fashion Management Conference*, Milan, 11-14 July 2024, 468-472.
 - [27] Quan, W., Li, L., Liang, Z. and Zheng, M. (2023) Objective Evaluation of Presence in Virtual Reality Based on Visual Features. *2023 International Conference on Image Processing, Computer Vision and Machine Learning (ICICML)*, Chengdu, 3-5 November 2023, 462-466. <https://doi.org/10.1109/icicml60161.2023.10424817>
 - [28] Taylor, R.P., Spehar, B., Wise, J.A., et al. (2005) Perceptual and Physiological Responses to the Visual Complexity of Pollock's Dripped Fractal Patterns. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, **9**, 89-114.
 - [29] Spehar, B., Clifford, C.W.G., Newell, B.R. and Taylor, R.P. (2003) Universal Aesthetic of Fractals. *Computers & Graphics*, **27**, 813-820. [https://doi.org/10.1016/s0097-8493\(03\)00154-7](https://doi.org/10.1016/s0097-8493(03)00154-7)
 - [30] Spehar, B. and Taylor, R.P. (2013) Fractals in Art and Nature: Why Do We Like Them? *SPIE Proceedings*, **8651**, Article ID: 865118. <https://doi.org/10.1117/12.2012076>
 - [31] Taylor, R.P., Spehar, B., Van Donkelaar, P. and Hagerhall, C.M. (2011) Perceptual and Physiological Responses to Jackson Pollock's Fractals. *Frontiers in Human Neuroscience*, **5**, Article 60. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00060>
 - [32] Viengkham, C., Isherwood, Z. and Spehar, B. (2019) Fractal-scaling Properties as Aesthetic Primitives in Vision and Touch. *Axiomathes*, **32**, 869-888. <https://doi.org/10.1007/s10516-019-09444-z>

- [33] Friedenber, J. and Liby, B. (2016) Perceived Beauty of Random Texture Patterns: A Preference for Complexity. *Acta Psychologica*, **168**, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2016.04.007>
- [34] Jin, X.C., Ong, S.H. and Jayasooriah, (1995) A Practical Method for Estimating Fractal Dimension. *Pattern Recognition Letters*, **16**, 457-464. [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(94\)00119-n](https://doi.org/10.1016/0167-8655(94)00119-n)
- [35] Van den Berg, A.E., Joye, Y. and Koole, S.L. (2016) Why Viewing Nature Is More Fascinating and Restorative than Viewing Buildings: A Closer Look at Perceived Complexity. *Urban Forestry & Urban Greening*, **20**, 397-401. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.011>
- [36] Hadnett-Hunter, J., O'Neill, E. and Proulx, M.J. (2022) Contributed Session II: Visual Search in Virtual Reality (VSVR): A Visual Search Toolbox for Virtual Reality. *Journal of Vision*, **22**, Article 19. <https://doi.org/10.1167/jov.22.3.19>
- [37] Bigne, E., Simonetti, A., Guixeres, J. and Alcaniz, M. (2024) Visual Attention and Product Interaction: A Neuroscientific Study on Purchase across Two Product Categories in a Virtual Store. *International Journal of Retail & Distribution Management*, **52**, 389-406. <https://doi.org/10.1108/ijrdm-02-2023-0067>
- [38] Itti, L. and Koch, C. (2000) A Saliency-Based Search Mechanism for Overt and Covert Shifts of Visual Attention. *Vision Research*, **40**, 1489-1506. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00163-7](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00163-7)
- [39] Morais, H., Pires, A. and Duarte, R. (2019) The Shopping Centre—Architectural Characterization and Evolution. In: Ahram, T., Karwowski, W., Pickl, S. and Taiar, R., Eds., *Human Systems Engineering and Design II*, Springer, 1051-1057. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27928-8_156
- [40] Roy, A. and Tai, S.T.C. (2003) Store Environment and Shopping Behavior: The Role of Imagery Elaboration and Shopping Orientation. *Journal of International Consumer Marketing*, **15**, 71-99. https://doi.org/10.1300/j046v15n03_05
- [41] Roe, E.T., Bies, A.J., Montgomery, R.D., Watterson, W.J., Parris, B., Boydston, C.R., et al. (2020) Fractal Solar Panels: Optimizing Aesthetic and Electrical Performances. *PLOS ONE*, **15**, e0229945. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229945>
- [42] Taylor, R.P., Juliani, A.W., Bies, A.J., et al. (2018) The Implications of Fractal Fluency for Biophilic Architecture. *Journal of Biourbanism*, **1**, 23-40.
- [43] Kaneko, Y. (2015) Fractal Analysis of a Grocery Store Shopping Path. 2015 2nd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering (APWC on CSE), Nadi, 2-4 December 2015, 1-7. <https://doi.org/10.1109/apwccse.2015.7476224>
- [44] Hagerhall, C.M., Laike, T., Taylor, R.P., Küller, M., Küller, R. and Martin, T.P. (2008) Investigations of Human EEG Response to Viewing Fractal Patterns. *Perception*, **37**, 1488-1494. <https://doi.org/10.1068/p5918>
- [45] Mendes, D.C.G. and Cameirão, M.S. (2023) Comparing Perceived Restorativeness and Stress Reduction in Virtual Reality Environments Using Abstract Fractal Geometries versus Realistic Natural Landscapes. In: Abdelnour Nocera, J., Kristín Lárusdóttir, M., Petrie, H., Piccinno, A. and Winckler, M., Eds., *Human-Computer Interaction—INTERACT 2023*, Springer, 3-22. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42293-5_1
- [46] Nicolae, I.E. and Ivanovici, M. (2020) Preparatory Experiments Regarding Human Brain Perception and Reasoning of Image Complexity for Synthetic Color Fractal and Natural Texture Images via EEG. *Applied Sciences*, **11**, Article 164. <https://doi.org/10.3390/app11010164>
- [47] Briellmann, A.A., Buras, N.H., Salingaros, N.A. and Taylor, R.P. (2022) What Happens in Your Brain When You Walk down the Street? Implications of Architectural Proportions, Biophilia, and Fractal Geometry for Urban Science. *Urban Science*, **6**, Article 3. <https://doi.org/10.3390/urbansci6010003>
- [48] Chen, L., Qin, K., You, J., Zhang, T., Zhang, Y., Zhou, T., et al. (2024) Interactive 3D Product Information Design in Virtual Reality Shopping Application. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, **24**, Article ID: 054502. <https://doi.org/10.1115/1.4065060>
- [49] Ploydanai, K. (2019) Designing Attractive Stores: How the Spatial Layout of Physical Stores Affects Consumers' Responses. Ph.D. Thesis, Wageningen University.
- [50] Jang, J.Y., Baek, E. and Choo, H.J. (2018) Managing the Visual Environment of a Fashion Store: Effects of Visual Complexity and Order on Sensation-Seeking Consumers. *International Journal of Retail & Distribution Management*, **46**, 210-226. <https://doi.org/10.1108/ijrdm-03-2017-0050>
- [51] Kaneko, Y. and Yada, K. (2016) Fractal Dimension of Shopping Path: Influence on Purchase Behavior in a Supermarket. *Procedia Computer Science*, **96**, 1764-1771. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.08.225>
- [52] Moshagen, M., Musch, J. and Göritz, A.S. (2009) A Blessing, Not a Curse: Experimental Evidence for Beneficial Effects of Visual Aesthetics on Performance. *Ergonomics*, **52**, 1311-1320. <https://doi.org/10.1080/00140130903061717>
- [53] Sohn, S., Seegebarth, B. and Moritz, M. (2017) The Impact of Perceived Visual Complexity of Mobile Online Shops on User's Satisfaction. *Psychology & Marketing*, **34**, 195-214. <https://doi.org/10.1002/mar.20983>
- [54] Bojrab, M.L. (2010) Effects of Lighting Phenomena on Perceived Realism of Rendered Water-Rich Virtual Environ-

-
- ments. Ph.D. Thesis, Purdue University.
- [55] Della-Bosca, D., Patterson, D. and Costain, S. (2014) Fractal Complexity in Built and Game Environments. In: Pisan, Y., Sgouros, N.M. and Marsh, T., Eds., *Entertainment Computing—ICEC 2014*, Springer, 167-172. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45212-7_21
- [56] Mitina, O.V. and Abraham, F.D. (2003) The Use of Fractals for the Study of the Psychology of Perception: Psychophysics and Personality Factors, a Brief Report. *International Journal of Modern Physics C*, **14**, 1047-1060. <https://doi.org/10.1142/s0129183103005182>
- [57] Newport, R.A., Liu, S. and Di Ieva, A. (2024) Analyzing Eye Paths Using Fractals. In: Di Ieva, A., Ed., *The Fractal Geometry of the Brain*, Springer, 827-848. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47606-8_42