

DOI:10.11918/202401030

虚拟现实技术的建筑外部形态优化方法

张玲¹, 卓凯龙¹, 邵轲彬², 陈国伟³, 陶伊奇¹

(1. 深圳大学 建筑与城市规划学院, 广东 深圳 518060; 2. 河南省公共资源交易中心, 郑州 450000;
3. 梁黄顾建筑设计有限公司, 广东 深圳 518060)

摘要: 为探索存量背景下老旧建筑改造的建筑设计方法, 以深圳市罗湖区梧桐山社区老旧建筑改造项目为例, 结合心理物理学理论与虚拟现实(VR)技术, 探究VR作为设计媒介的可能性。利用数字化模型及头戴式VR交互系统设计VR感知实验, 收集场地内16个单体建筑改造方案的主观偏好评价, 同时提取方案在形体构成、界面构成与景观构成层面的10项设计影响要素。借助SPSS相关性分析设计要素与人群偏好的相关性, 了解人群对老旧建筑改造要素的关注偏好。实验结果表明, 景观配置、院落配置、界面明度、体块丰富度、 D/H 值、屋顶开闭度与人的空间认知偏好显著相关, 基于实验结果对设计方案提出优化策略。在建筑外部形态设计优化中使用VR技术, 有助于设计者理解使用人群的空间认知逻辑, 本文提出多方协同的互动设计优化流程为相关的设计实践提供参考。

关键词: 建筑设计优化; 虚拟现实; 空间认知; 既有建筑改造

中图分类号: TU18

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)06-0154-06

Optimization for external morphology of buildings based on virtual reality

ZHANG Ling¹, ZHUO Kailong¹, SHAO Kebin², CHEN Guowei³, TAO Yiqi¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

2. Henan Province Public Resources Trading Center, Zhengzhou 450000, China;

3. LWK + Partners, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: To explore architectural design methods for the renovation of old buildings within the context of existing stock, this study uses the renovation project of the old buildings in the Wutongshan Community of Luohu District, Shenzhen, as a case study. By integrating psychophysical theory with virtual reality (VR) technology, the research investigates the potential of VR as a design medium. A VR perception experiment was designed using digital models and a head-mounted VR interaction system. Subjective preference evaluations were collected for 16 renovation schemes of individual buildings within the site. Additionally, 10 design influencing factors were extracted across three dimensions: form composition, interface composition, and landscape composition. Using SPSS for correlation analysis, the study examines the relationship between design elements and public preferences to understand the factors that attract public attention in the renovation of old buildings. Results indicate that morphology elements such as landscape configuration, courtyard configuration, interface brightness, block richness, D/H value, and roof visual width in the scheme are significantly correlated with human spatial cognitive preferences. Based on the experimental results, the optimization strategy of the design scheme is proposed. Using VR technology in optimizing the external form design of buildings helps designers understand the spatial cognitive mechanisms of users. This paper proposes an interactive design optimization process through multi-party collaboration, which can be used as a reference for related design practices.

Keywords: architectural design optimization; virtual reality; spatial cognition; renovation of existing buildings

随着中国城市建设模式由增量发展向存量更新的转变, 老旧建筑改造成为城市建设愈发急切的需求。如何确保老旧建筑改造的科学性, 需要明晰城市空间形态的价值。然而, 传统研究的技术路径在感知量化方面的研究往往局限于感知者心理量化的

视角, 缺少将环境特征结合心理量进行研究的有效手段。虚拟现实(virtual reality, VR)技术凭借其仿真、沉浸、可操作性等特点在复杂环境的空间感知研究中逐渐显现出优势, 本文希望以VR作为设计媒介, 优化老旧建筑改造设计方法。

收稿日期: 2024-01-11; 录用日期: 2024-04-15; 网络首发日期: 2024-12-18

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241218.1400.002>

作者简介: 张玲(1982—), 女, 副教授, 硕士生导师

通信作者: 陶伊奇, taoyiqi@szu.edu.cn

国外学界较早注意到 VR 应用于空间研究的潜力。2006 年 Ruddle 等^[1]对 VR 图像信息辅助空间认知行为的有效性进行验证;Zacharias^[2]对比了人在 VR 与现实环境中初次空间认知的差异,且探讨了 VR 环境的仿真潜力。这一阶段的研究更多停留在 VR 技术及原理的讨论,未聚焦于具体的空间类型。

目前国内已经逐步开展针对具体建筑类型的相关研究,如利用 VR 技术对街道空间进行的疗愈效益研究^[3],对社区居住院落空间的可供性差异研究^[4],对船政建筑进行美学评价研究^[5],对传统村落的空间形态进行研究^[6],等。这些研究均将 VR 作为一种研究媒介应用于特定建筑类型的评价之中,但多数是基于理想研究场景下实现的,如简单几何模型下的街道空间,缺少对复杂、建成环境的相关讨论。

随着 VR 技术的迭代及普及,互动性成为 VR 空间研究的重要趋势。孙良等^[7]尝试结合 VR 技术与语义微分法对步行商业街道进行环境心理研究,整合了 VR 与传统的语义微分法;胡映东等^[8]研究了在 VR 仿真行为下主体生理信号的变化;雷婷婷等^[9]对商业建筑交互设计的方法进行研究,对商业建筑的标识物显著性进行了分析。可以看出,VR 与其他学科横向交叉的应用有效地解决了传统研究方法中感知量化、提纯研究的技术问题,但仍缺少对建筑实践应用的适应性探索。因此,本文应用 VR 技术对实际城市更新项目改造方案进行场景还原,基于心理物理学理论构建“环境心理”与“建筑外部形态”的“心物”关系,意在将虚拟现实空间评价反馈于设计过程,探索一种多方协同的设计优化方法;同时分析空间使用主体的主观偏好与建筑外部形态要素的相关性,探索其在感知偏好分析及设计优化方法的效益。

1 案例概况

本研究基于“深圳大望梧桐山片区横排岭老瓦房改造”项目。横排岭村地处梧桐山北部,属于深圳市罗湖区梧桐山社区,是罗湖区建设初期的典型社区,现有建筑大部分建成于 20 世纪 80 年代,如图 1 所示。该项目作为罗湖区政府与城建公司共同推进城市更新的改造试点工程,以片区内老旧瓦房更新为主,梳理优化空间与产业结构。

2 基于 VR 技术的空间评价实验

2.1 心理物理学与空间认知

心理物理学旨在探究人类如何感知和理解外部世界,研究人类感知的基本特征,通过实验获取人类

感知的阈值、变化和量化数据,揭示感知行为的本质和规律^[10]。建筑外部形态作为一种客观存在物具有多种构成特征,这些特征会经过人为信息处理后反映于人的心理状态,通过认知实验可以了解刺激材料的特征与人心理量的映射机制并测定二者的相关性。

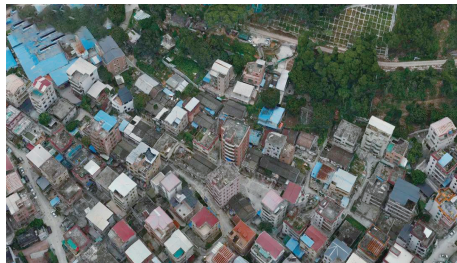


图 1 横排岭村

Fig. 1 Hengpailing Village

空间认知是指人感知环境的即时反应,发生于主体认知环境的最初过程,不仅是对外部环境信息的简单获取,也包含对信息进行组织、加工的复杂过程^[11]。空间信息的获取是一个动态、三维的过程,当人不断位移或活动时,周围环境刺激人的感官,使人能够接收到包括空间结构、位置、方向、距离等信息,通过人对环境的主观能动性,在大脑中建立完整的空间环境系统并做出相应的行为^[12]。传统媒介承载下的空间认知过程是抽象的,客体理解信息需要既有经验或思维惯性的参与。随着思维层级的增多,信息传递的效率越来越低,远不如站在真实环境中主动感受。VR 技术借助数字模型等新兴媒介的效率优势,能够实现即时性的场景搭建,使空间认知实验的操作成本大幅降低,并且 VR 环境满足空间认知行为的前提条件,能够仿真还原空间对于感官的刺激过程^[13]。

2.2 设计影响要素提取

芦原义信^[14]将街道侧界面解构为“第一次轮廓线”与“第二次轮廓线”,二者共同影响行人对街道的总体认知。人对环境具有的能动作用既包含物质和功能性的作用,也包含价值赋予和再解释的作用^[15],从认知心理的视角理解“轮廓线”与“对街道的总体认知”的关系,即综合不同层面的环境要素所带来的空间感受认知多维要素组成的环境,本研究将横排岭村的认知影响要素分为形体构成、景观构成、界面构成 3 个层面,见表 1。形体构成参考文献^[14]中“第一次轮廓线”的概念,即忽略建筑材料、细部装饰等要素下建筑体块关系或尺度关系的构成,选取 D/H 值、屋顶开敞度、体块丰富度、露台设计与屋顶类型 5 项要素。其中, D/H 值说明不同建筑尺度与视线角度对人认知心理的影响。当

1≤D/H≤3 时,观察者能够较为稳定地获取空间信息,其中当 D/H=2 时,处于感受空间的最佳视角;D/H>3 时,空间离散,界面感弱;D/H<1 时,空间会给人紧迫感。屋顶开阔度是指对于尺度范围较小的户外空间,建筑顶部轮廓线起伏越大则视觉捕捉的信息量越多,带给观察者的视觉感受也较为丰富^[16]。体块丰富度、露台设计及屋顶类型则是基于原有建筑形式的归纳,定性分析主体认知偏好与建筑体块关系、构造类型的映射机制。界面构成是指刨除建筑体块、尺度关系的影响,仅讨论建筑外表皮、墙面的材料和色彩构成。人对色彩的心理作用包括冷暖感、距离感、轻重感等。暖色产生靠近感,冷色产生隐退感,浅色具有扩张感,深色具有收缩感;自然材质引发亲切感,人造材质则具有理性和现代感^[17]。横排岭村多为住宅建筑,界面色彩通常跟

随建筑类型或地域文化的色彩特征,建筑色调的差异幅度较小,而建筑明度的差异较为显著。因此,在改造设计阶段,出于场地色彩肌理的考虑,界面构成选取色彩丰富度、界面明度及界面材质 3 项要素。按照 GB/T 18922—2008《建筑颜色的表示方法》^[18]编码对场地内的色彩进行色彩标定,利用 Adobe 拾色器提取建筑色彩样本并测量界面明度(数值范围区间为 0%~100%,数值越高即色调越深、明度越低)。色彩丰富度、界面材质则基于场地建筑的原有色彩或材质类型做定性归纳。VR 环境中的自然要素在空间感受上与现实环境具有相似效益^[19]。本次项目的景观改造主要是在建成环境中添加景观及针对小微尺度院落空间的改造,因此,梳理项目内院落、景观的分布,将景观配置、院落配置作为景观构成层面的选取要素^[19]。

表 1 建筑外部形态感知要素

Tab. 1 Perceived elements of external architectural morphology

构成层面	指标名称	指标类型	提取方式
	D/H 值	定量指标	计算:D/H。D 为某一方向空间截面水平宽度,m;H 为同一方向空间截面垂直高度,m
	屋顶开阔度	定量指标	计算: $p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n}}$ 。式中: h_i 为周围其中一栋建筑屋顶高度,m; n 为建筑栋数; $\bar{h}$ 为屋顶平均高度,m
形体构成	体块丰富度	定性指标	定义:单体块(1)/主次复合体块(2)/多体块(3)
	露台设计	定性指标	定义:有露台设计(1)/无露台设计(0)
	屋顶类型	定性指标	定义:平屋顶(1)/坡屋顶(2)
	色彩丰富度	定性指标	定义:单种(1)/两种(2)/多种(3)
界面构成	界面明度	定量指标	Adobe 拾色器测量(色彩构成模式:CMYK)
	界面材质	定性指标	定义:混凝土(1)/砖石(2)/混合木质(3)/混合砖石(4)
景观构成	景观配置	定性指标	定义:有绿植景观(1)/无绿植景观(0)
	院落配置	定性指标	定义:有院落空间(1)/无院落空间(0)

注:定性指标中括号内的数字代表指标定义的统计表达。

2.3 虚拟场景搭建

实验硬件设备选用 HTC VIVE 头戴式 VR 系统,软件平台采用 Enscape 渲染器(基于 Rhino 7.0)运行虚拟环境,其优势是能够自适应地渲染建筑模型的实时状态,这一特点与建筑师推进方案的工作惯性相吻合。通过设置空间定位仪,确立实验场地可漫游的现实范围,在工作站中构建并运行虚拟场景,采集漫游数据并进行后期分析,被试通过头戴显示器接收虚拟环境的影像信息。

基于方案模型进行 VR 场景搭建,为减少被试在体验过程中迷失方向的可能,以项目用地范围为基准对体验场景进行范围限制(图 2),场地共有两条纵向及 3 条横向主要道路,为了保证实验的流畅性,建模过程中对次要细节适当简化,主要体验的场景则最大程度还原空间实际形态。

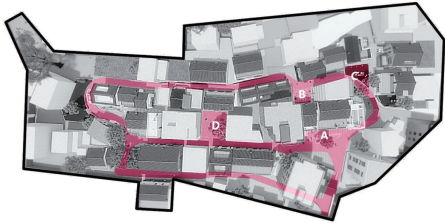


图 2 虚拟漫游场地示意

Fig. 2 Virtual roaming venue diagram

2.4 虚拟空间认知实验

横排岭村的生活人群为普通居民,对环境的敏感程度不一,认知能力差异较大。实验招募 40 位年龄在 22~45 岁之间、不限专业背景的被试进行 VR 环境的空间认知体验,其中男性 18 人,女性 22 人。实验正式开始时,将视角方位设于初始点并引导被试站在实验场地的中心点,随后被试以第一视角漫

游,时长为5~8 min,过程中告知被试留意虚拟环境中的建筑改造,并且需要在用地范围内漫游所有路段。在场景选取16个具有代表性的改造方案,如图3所示。图3(a)方案编号第1排从左到右依次为J-01、J-02、J-03、J-04,第2排从左到右依次为J-05、J-06、J-07、J-08;图3(b)方案编号第1排从左到右依次为J-09、J-10、J-11、J-12,第2排从左到右依次为

J-13、J-14、J-15、J-16。被试完成认知体验后对建筑改造进行偏好排序,并尽可能对每一组建筑给出描述性的主观评价,排序结果决定主观偏好评分分值(排序第1的方案计16分,第2的方案计15分,依次递减),各建筑改造具体得分与分布箱型图如图4、图5所示。除两位被试由于不适中断实验,其余被试均完整参与实验,最终获得有效数据样本38份。



图3 16个建筑改造方案
Fig.3 16 Building renovation schemes

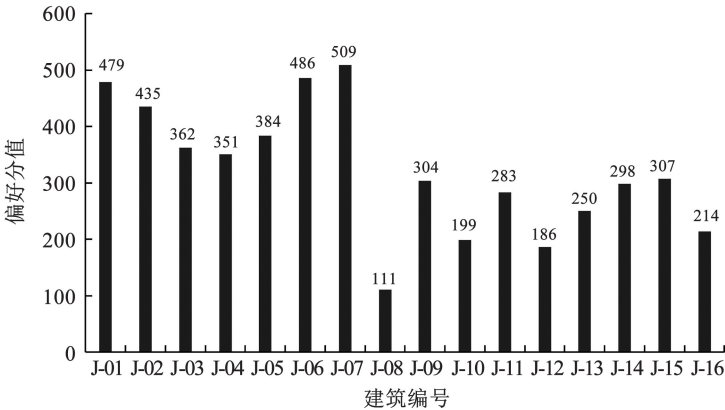


图4 建筑改造偏好得分
Fig.4 Scores of preference for building renovation

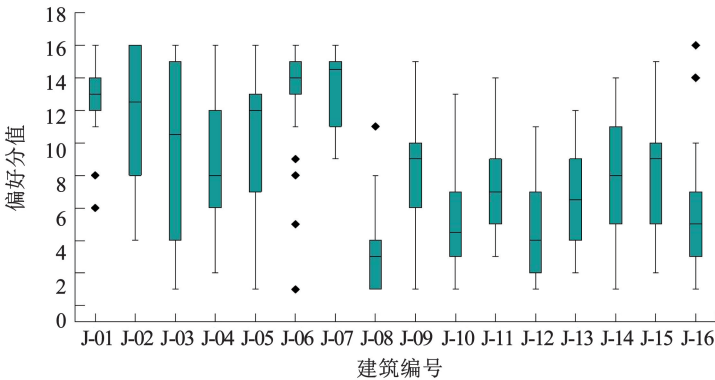


图5 偏好分值分布箱型图
Fig.5 Box plot of preference score distribution

3 空间认知偏好与影响因素相关性

为验证实验中主观评价的有效性,对建筑单体进行设计影响因素的定性归类与量化指标(屋顶开宽度、D/H值、界面明度)测算,并转化为统计学表

达。考虑到要素与感知的响应机制,对语义描述进行方向预设,并反映在结果的正负关系上。归纳10项设计要素的统计数据,结合主观偏好评分进行基于SPSS的Pearson相关性分析,结果见表2、表3。

表 2 偏好分值与形体构成要素相关性系数矩阵

Tab. 2 Correlation coefficient matrix between preference scores and shape composition elements

变量名称	偏好分值	D/H 值	屋顶开阔度	体块丰富度	屋顶类型	露台设计
偏好分值	1	0.805 **	0.499 *	0.522 *	-0.042	0.214
D/H 值	0.805 **	1	0.294	0.686 **	-0.067	0.184
屋顶开阔度	0.499 *	0.294	1	0.227	0.127	0.109
体块丰富度	0.522 *	0.686 **	0.227	1	-0.174	-0.127
屋顶类型	-0.042	-0.067	0.127	-0.174	1	0.174
露台设计	0.214	0.184	0.109	-0.127	0.174	1

注：*、** 表示显著相关，* 表示 $P\leq0.05$ ，** 表示 $P\leq0.01$ 。

表 3 偏好分值与界面构成、景观构成要素相关性系数矩阵

Tab. 3 Correlation coefficient matrix of preference scores with interface composition and landscape composition elements

变量名称	偏好分值	色彩丰富度	界面明度	界面材质	景观配置	院落配置
偏好分值	1	0.336	-0.591 *	0.047	0.648 **	0.517 *
色彩丰富度	0.336	1	-0.518 *	0.446	-0.017	-0.176
界面明度	-0.591 *	-0.518 *	1	0.185	-0.138	-0.332
界面材质	0.047	0.446	0.185	1	-0.141	-0.429
景观配置	0.648 **	-0.017	-0.138	-0.141	1	0.545 *
院落配置	0.517 *	-0.176	-0.332	-0.429	0.545 *	1

注：*、** 表示显著相关，* 表示 $P\leq0.05$ ，** 表示 $P\leq0.01$ 。

由表 2、表 3 可以看出：界面明度、院落配置、体块丰富度、屋顶开阔度与主观偏好呈现显著的相关性， $P\leq0.05$ ；景观配置、D/H 值与主观偏好显著相关， $P\leq0.01$ ；色彩丰富度、界面材质、屋顶类型和露台设计则与主观偏好没有显著相关性。在形体构成层面，D/H 值在系数上与主观偏好呈现最高的相关性，过高或过低的 D/H 值均对被试的感知结果产生负面影响；屋顶开阔度与主观偏好则为正相关关系，即起伏较大的建筑顶部轮廓线能给被试带来良好感受。在体块丰富度上，主次复合的体块类型相比于单一体块或多体块建筑更受被试的偏好。在界面构成层面，界面明度与被试的主观感受呈负相关关系，即相比于灰暗的界面色彩（明度数值在 55% 以上），明亮的界面色彩（明度范围在 20% ~ 30%）受到被试偏好。而景观构成层面，景观配置、院落配置均对空间感知具有积极作用。

4 优化策略

基于形体构成、界面构成及景观构成对改造设计方案提出优化策略：在形体构成方面，通过构造设计强化建筑通透性，削弱砖石建筑厚重感，优化建筑

高宽比对视觉带来的不良影响；注重建筑顶部轮廓线的尺度关系；由建筑的体块关系对建筑构造进行优化设计。在界面构成方面，优化仿古改造清一色的材质用料以提高界面明度，深化建筑的表皮设计。在景观构成方面，结合具体空间布局补充亲自然要素；深化院落空间的景观营造。

以本次实验结果偏好评分区位靠前的 J-01 与评分区位靠后的 J-12 为例进行设计优化（图 6）。J-01 在建筑形体构成上，结合考虑遮阳需求与建筑视觉标志性的需求，提取周围环境如山体的形态特征，对建筑顶部轮廓进行建筑语言的重塑；在景观构成方面，增加绿植景观设计，在乔木景观周边设计垂直向的交通空间，使得人群可以从不同的高度视角感知自然要素。针对仿古改造缺乏标志性、体块感厚重等问题，在 J-12 界面构成的后续改造中置入半透明的表皮以增加建筑界面在视觉效果上的通透感，增加明度较高的材料以提升建筑给人的积极感受；在景观构成部分增加绿植景观及可供休憩的构造，并通过视觉的引导设计及观景空间的设计强化建筑与公共节点空间视线关系。



图 6 方案深化效果

Fig. 6 Deepening effect of schemes

5 结 论

1)本文以深圳梧桐片区横排岭老瓦房改造项目为例构建了“建筑外部形态”与“环境心理”的心物关系,通过VR空间感知实验获取要素的配置类型、阈值区间与人群空间认知的相关性。实验发现,景观配置、院落配置、界面明度、体块丰富度、 D/H 值、屋顶开阔度与人的空间认知偏好显著相关,由评价差异提出具有适应性的设计要素优化策略并反馈设计。

2)由建筑设计的阶段性方案建立VR场景,利用VR技术的媒介优势,在设计过程中获得了人群的即时评价并进行相关分析,进而以分析结果提出设计方案的优化导向。基于设计评价、设计优化的正反馈路径提出多方协同参与的方法流程,该方法对于建筑改造的设计具有普适性。

参考文献

[1]RUDDLE R A, LESSELS S. For efficient navigational search, humans require full physical movement, but not a rich visual scene [J]. Psychological Science, 2006, 17(6): 463. DOI:10.1111/j.1467-9280.2006.01728.x

[2]ZACHARIAS J. Exploratory spatial behaviour in real and virtual environments[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 78(1-2): 10. DOI:10.1016/j.landurbplan.2005.05.002

[3]徐磊青, 孟若希, 黄舒晴, 等. 疗愈导向的街道设计: 基于VR实验的探索[J]. 国际城市规划, 2019, 34(1): 41

XU Leiqing, MENG Ruoxi, HUANG Shuqing, et al. Healing oriented street design: experimental explorations via virtual reality [J]. Urban Planning International, 2019, 34(1): 41. DOI:10.22217/upi.2018.496

[4]付而康, 王艺瀚, 冯进宇, 等. 基于VR实验的社区居住院落空间健康可供性差异研究[J]. 西部人居环境学刊, 2021, 36(5): 88

FU Erkang, WANG Yihao, FENG Jinyu, et al. Research on the difference of health affordance of community residential courtyard space based on VR experiment[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2021, 36(5): 88. DOI:10.13791/j.cnki.hsfwest.20210511

[5]李震, 王朝波, 蔡凯钱. VR体验情境下的邮轮建筑美学评价研究[J]. 工业工程设计, 2021, 3(2): 59

LI Zhen, WANG Chaobo, CAI Kaiqian. Research on the evaluation of cruise ship architectural aesthetics based on VR experience[J]. Industrial & Engineering Design, 2021, 3(2): 59. DOI:10.19798/j.cnki.2096-6946.2021.02.008

[6]苑思楠, 张寒, 何蓓洁, 等. 基于VR实验的传统村落空间视认行为研究——以闽北下梅和城村为例[J]. 新建筑, 2019(6): 38

YUAN Sinan, ZHANG Han, HE Beijie, et al. The research on visual perception and spatial behavior in traditional Chinese villages based on VR experiment: a case study in Xiamei and Chengcun[J]. New Architecture, 2019(6): 38. DOI:10.12069/j.na.201906036

[7]孙良, 宋静文, 滕思静, 等. 步行商业街界面形态类型与感知量化研究[J]. 规划师, 2020, 36(13): 91

SUN Liang, SONG Jingwen, TENG Sijing, et al. Quantitative study

on the morphology type and perception of the interface of pedestrian commercial street[J]. Planners, 2020, 36(13): 91

[8]胡映东, 沈百琦. VR虚拟技术在建筑设计研究中的应用初探——以交通枢纽过渡空间研究为例[J]. 建筑科学, 2017, 33(12): 170

HU Yingdong, SHEN Baiqi. Application of virtual reality technology in architectural research and design-case study of transitional space of traffic hubs[J]. Building Science, 2017, 33(12): 170. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.12.25

[9]雷婷婷, 邹广天. 虚拟现实技术的商业建筑互动设计方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(12): 176

LEI Tingting, ZOU Guangtian. Interactive design for commercial buildings based on virtual reality[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(12): 176. DOI:10.11918/201907050

[10]杨治良. 心理物理学[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1988

YANG Zhiliang. Psychophysics [M]. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1988

[11]韩默, 庄惟敏. 空间组构与空间认知[J]. 世界建筑, 2018(3): 105

HAN Mo, ZHUANG Weimin. Spatial configuration and spatial cognition [J]. World Architecture, 2018(3): 105. DOI:10.16414/j.wa.2018.03.017

[12]韩君伟. 步行街道景观视觉评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018

HAN Junwei. A visual evaluation study for walking streetscape[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018

[13]潘崑, 颜勤, 宋晓宇. 建筑空间认知迭代——VR空间认知、设计、表达[J]. 新建筑, 2020(3): 68

PAN Yin, YAN Qin, SONG Xiaoyu. Architectural space cognitive iteration: space cognition, design and expression in VR[J]. New Architecture, 2020(3): 68. DOI:10.12069/j.na.2020030650

[14]芦原义信. 街道的美学[M]. 天津: 百花文艺出版社, 2006: 208

KASHIHARA Y. Aesthetics of streets [M]. Tianjin: Baihua Literature and Art Publishing House, 2006: 208

[15]李斌. 环境行为学的环境行为理论及其拓展[J]. 建筑学报, 2008(2): 32

LI Bin. The environmental behavior theory and its expansion in environmental behavior studies[J]. Architectural Journal, 2008(2): 32

[16]周钰, 张玉坤, 苑思楠. 街道界面心理认知的量化研究[J]. 建筑学报, 2012(增刊2): 128

ZHOU Yu, ZHANG Yukun, YUAN Sinan. A quantitative research on psychological perception of street interface [J]. Architectural Journal, 2012(Sup.2): 128

[17]张颀, 徐虹, 黄琼. 人与建筑环境关系相关研究综述[J]. 建筑学报, 2016(2): 122

ZHANG Qi, XU Hong, HUANG Qiong. A review of the interactive relations between people and the built environment[J]. Architectural Journal, 2016(2): 122

[18]建筑颜色的表示方法: GB/T 18922—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008

Methods of color specification for architecture: GB/T 18922—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008

[19]岳淼, 张欣烁, 张军杰. 亲自然建筑设计及其健康效益的知识图谱分析[J]. 南方建筑, 2022(11): 18

YUE Miao, ZHANG Xinsuo, ZHANG Junjie. Knowledge mapping analysis of biophilic architecture design and its health benefits research[J]. South Architecture, 2022(11): 18. DOI:10.3969/j.issn.1000-0232.2022.11.002