

基于 BIM-VR 的沉浸式建筑设计评审研究

李博宇^{1,2} 关涛³ 陈维亚^{1,2}

- 华中科技大学 国家数字建造技术创新中心, 武汉 430074;
- 华中科技大学 土木与水利工程学院, 武汉 430074;
- 华中科技大学 软件学院, 武汉 430074)

【摘要】设计评审作为建筑方案设计阶段重要的一环,其目的是完善设计方案、提高设计质量及满足用户需求。然而由于二维纸质或传统人机界面的限制,基于图纸或 BIM 模型的设计方案展示往往不能直观地展现设计意图,尤其是对于非建筑技术专业的项目相关方。VR 技术基于其沉浸性、交互性等特点,成为解决这一问题的有力途径。本文通过对国内外研究现状的分析总结,提出并开发了一套沉浸式建筑设计评审系统,验证了沉浸式 BIM 在建筑设计评审中应用的可行性,并阐述了可能的演化思路。

【关键词】设计评审; BIM; 虚拟现实; 沉浸式

【中图分类号】 TU17

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-7461 (2024) 01-0039-07

【DOI】 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2024.01.07

引言

设计评审是设计管理工作的重要组成部分,而 BIM 使设计评审的载体有了更多的选择,管理流程也发生了根本的改变^[1]。BIM 能够将建筑的物理模型与功能特性数字化地表达,连接了项目全生命周期各阶段、各专业、各领域的信息、过程、行为和资源^[2]。因此在建筑领域,BIM 已经成为了数字化设计变革的基石。借助其强大的多维信息集成能力^[3],设计问题的发现、讨论、记录和追踪都可与 BIM 构件绑定,用户可以观察三维建筑模型,并查看相关属性及批注评论。然而,基于系统人机交互界面的局限性、空间感知受限等问题,限制了其进一步的推广以及产生更多价值。

虚拟现实的发展使得建筑设计领域中能应用这一新兴技术,以满足人们日益增长的对建筑环境设施等的需求。

1 沉浸式建筑设计评审

1.1 从界面到空间

目前,三维设计的一个缺陷是传统人机界面限制了评审人员与三维模型的高效互动,可视化的 BIM 三

维模型无法辅助用户挖掘出隐性设计缺陷^[4]。作为三维人机界面的最新形态,虚拟现实能够通过沉浸式的渲染和自然交互,使基于 BIM 的设计方案实现“从界面到空间”的转换^[2]。

在沉浸式虚拟环境中表达的 BIM^[5],极大地拓展了数字化设计评审的边界,“BIM+VR”的评审方式成为了解决上述问题的有力途径。它不仅可以在虚拟环境中以真实空间比例展示设计模型,还可以让用户“走进”建筑,在设计原型中模拟实际使用情景、验证预期功能,实现“参与式”评审。

评审者佩戴 VR 头戴显示器 (Head-Mounted Display, HMD),以虚拟三维空间为评审环境进行漫游,通过运动控制器(即手柄)完成与设计模型的交互和批注评论,如图 1 所示。



图 1 “BIM+VR”的设计评审方式

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(编号:72001086)

【第一作者】李博宇(2000-),男,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实在数字建造中的应用。

【通信作者】陈维亚(1988-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:数字建造、虚拟与增强现实、可视计算。

1.2 沉浸式评审研究现状

目前,国内已有部分研究通过VR提升设计评审的维度。例如陈婉蓉^[6]提出虚拟设计评审的交互设计原则,利用Unity3D和HTC VIVE搭建了一个用于展示和评价三维产品模型的虚拟评审平台。在建筑领域,刘基荣^[7]较早地提出了在虚拟环境中进行建筑设计方案的观察与评价,系统能够提供计算机桌面端的漫游和佩戴立体眼镜漫游两种形式。

国外已有一些将BIM与VR结合的尝试,实现在沉浸式环境下完成评审过程。例如Du等^[8]建立了一个名为BVRS的BIM-VR实时同步系统,通过云服务器解释和交换BIM元数据,并实时同步在源BIM模型。Nandavar等^[9]以OpenBIM为导向,提供了将BIM模型快速自动转换成IFC格式并导入VR中的方式,评审数据的转移、更改不再受限于特定商业设计工具软件或系统(例如Revit)。在改进系统中,实现了在虚拟环境中生成BCF标记,使审查信息更加结构化和标准化,以便在多用户的网络中进行共享和同步。

沉浸式建筑设计评审具有以下优势:

(1) 能够帮助评审者发现隐性设计缺陷。用户在和现实空间等比例等尺度^[10]的虚拟三维空间中,对构件尺寸的估计更加准确;

(2) 提升了多用户的交流效率^[11]。在虚拟环境下,各相关人员间的沟通互动更加直观和有形,当VR与其他可视化媒体技术如图纸、数字模型和效果图等结合,设计评审变得更高效率;

(3) 普适性高。与桌面界面相比,VR设计评审中大众和专家的评审表现结果并无太大差异,尤其是评审对象为复杂建筑模型时^[12]。

2 沉浸式设计评审系统设计与实现

通过对相关研究中评审系统的功能进行分析与总结,本研究得出如下结论:首先,用户需要在虚拟空间内高效漫游,快速到达指定的地点;其次,用户能够以BIM模型的视觉外观和属性数据作为评审的参考依据,在系统内完成并保存评审信息;最后,需要开发若干辅助功能提高评审效率及其便捷性。沉浸式评审系统的用例图如图2所示。

虚幻引擎(Unreal Engine, UE)作为一种功能强大且广泛应用的实时渲染和开发平台,具备出色的图形处理性能、物理模拟和交互能力。鉴于其在建筑设计领域的卓越表现及其对VR开发的高度支持,本研究选择UE 4.26作为评审系统实现的基础。

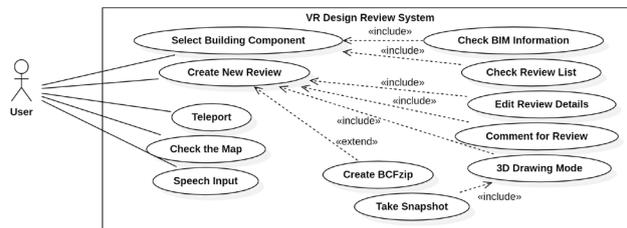


图2 沉浸式评审用例图

2.1 评审场景搭建

沉浸式评审系统首先需要满足用户随时点选构件并查看它们的BIM属性并对其进行判断从而形成评审意见。然而,BIM模型并不能直接导入开发引擎,而需要进行预处理,将其转换成FBX或OBJ格式^[8]。但这些类型的文件并没有保留BIM模型原有的属性信息元数据^[4],其根本原因在于Unity、UE等引擎与Revit等BIM设计软件在几何和语义等信息的表示方式上的不同。在基于UE的开发流程中,使用Datasmith插件将Revit中的BIM模型转换成兼容格式,作为静态网格体导入到引擎中,而BIM信息将储存在静态网格体的资产用户数据中,在虚拟评审环境下查看构件属性如图3所示。



图3 通过手持控制器点选构件并展示BIM属性

由于VR环境中瞬移的漫游方式不易引起晕动症且行动速度较快,故将其作为本系统用户移动的形式。在场景中,用户可以通过长按表盘并移动手柄的位置,自由选择要进行传送的目标位置及方向。此外,环境中设置了灯光与日照,且绘制了地形、草木等,提升评审者的临场感。

2.2 结构化评审信息储存

已有的沉浸式评审系统多侧重展示,因此需要研究面向BIM-VR的交互及评审数据输入管理框架,在虚拟环境中实现基于自然交互的批注添加、修改等操作,实现“边看边评”的沉浸式评审工作模式。评审信息储存的类设计图如图4所示。

XML 和 JSON 等文件储存格式传输、写入和读取速度较快，且结构直观清晰、易读性强，是常用的结构化数据储存格式。但其结构形式并不能体现出建筑设计评审的特征^[13]，且不具备表征项目相关方之间沟通交流的语义^[9]。而 BCF 格式则涵盖了对设计问题的记录框架，且较容易进行扩展，添加其他模态的批注，如图形标记等。

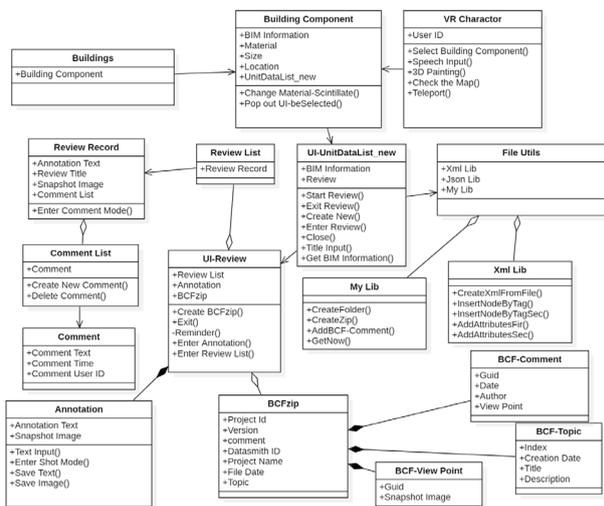
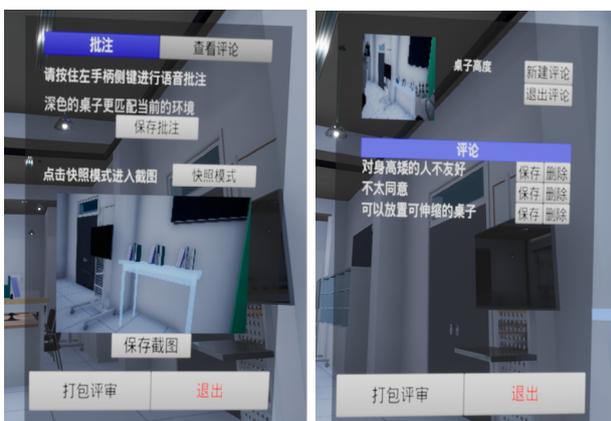


图 4 评审信息储存的类设计图

与 IFC 同处于 OpenBIM 框架下的 BCF 是一种满足跨平台、跨应用的开源数据标准（文件格式和数据通信协议），其提供了协作、精确定位、可视化和历史记录等功能，能够改善 BIM 相关活动的信息共享和协同决策过程。在 VR 评审环境下用户可将评审信息一键压缩并生成 bcfzip 文件，如图 5 (a) ~ (b) 所示。



(a) 新建评审批注 (b) 对评审的评论
图 5 评审信息的储存与表现

2.3 其他功能

为提升评审者在 VR 环境下的体验，系统开发了小地图功能，评审者可以轻松地观察整个建筑的结构和布局，如图 6 所示。



图 6 小地图

此外，通过三维批注功能，使用手持控制器添加注释和标记，评审者能够更准确地传达自己的观点，如图 7 所示。

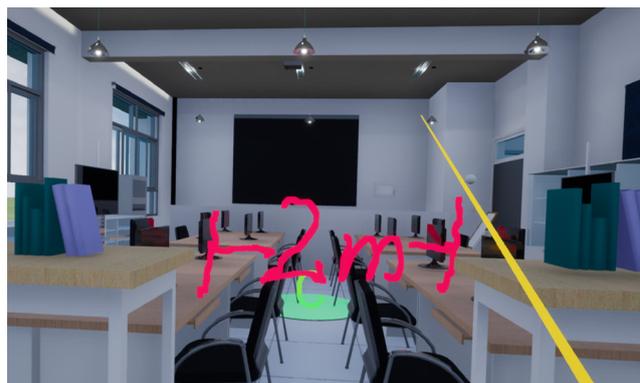


图 7 三维批注

3 用户实验

3.1 实验设计

为了验证本系统的可用性和先进性，以桌面界面基于 Revit 的方式分别作为对比实验的对照组，因变量为用户通过系统进行房间方案设计评审表现出的主客观量化指标。实验假设为沉浸式评审系统（以下简称 VR 系统）能够在某些方面优于基于 Revit 的 BIM 评审系统（以下简称 Revit 系统）。

实验以某实验室的 BIM 模型为评审载体，受试者在两种环境下对方案的布局、设施、装饰等建筑要素进行评价。而在 Revit 中则采用 BCFier 插件进行评审。为了排除系统使用的顺序对实验结果造成的干扰，受试者被划分为 I、II 两组，I 组先进行 VR 系统实验再进行 Revit 实验、II 组则相反。

3.2 实验指标

本实验以任务耗时作为客观评价指标，并通过问卷调查受试者对系统的主观评价。问卷除个人基本信息外，还包括两个部分：NASA 任务负荷指数（NASA-

TLX)、情景意识评估技术 (SART) [14]。

实验完成耗时可用于比较两个系统的效率和工作速度。如果一个系统在完成相同任务时耗时更少,则可认为其具有较高的效率和快速完成任务的能力,即拥有更好的任务绩效 (Task Performance, TP) 表现。

NASA-TLX 通过多个维度 (如心理需求、身体需求、时间需求等) 来评估任务的主观负荷水平。该指数可用于衡量任务执行过程中的认知和心理压力,并帮助评估任务的难度和负荷程度。

SART 可以反映出受试者对环境关键信息的感知、理解和预测能力,即情景意识 (Situation Awareness, SA)。系统中用户 SA 得分越高表明用户能够更加快速、全面地对当前情景中的信息进行分析、判断和决策,系统的可靠性、安全性越好。

3.3 实验过程

本次实验共招募了 20 位受试者,包括 13 名男生、7 名女生,年龄在 21~27 岁之间,涉及专业背景包括土木工程、工程管理、自动化、软件工程等。评审载体为实验室房间改造方案的 BIM 模型,受试者在各系统下都能够查阅每个构件的 BIM 属性并以 BCF 格式进行评审。

开始实验前,操作人员向受试者介绍各系统的基本功能及注意事项,请其签署测试知情同意书,之后受试者需要在 10 分钟之内熟悉使用两个系统。

受试者被要求通过 VR、Revit 两个系统分别进行评审,在规定的三个区域内各完成一项对附近建筑环境缺陷的评审,给出评审的标题、相应的描述以及能够反映问题所在位置的快照,如图 8 所示。



图 8 Revit 与 VR 系统评审实验过程

实验人员负责记录受试者所耗时间并向其发放对应系统的调查问卷。

3.4 实验数据分析

实验结束后将问卷结果及时间记录整理归纳并形成实验数据记录表,对其进行分析如下。

3.4.1 任务绩效 TP

经统计,使用 VR 系统完成全部任务耗时的均值为 4.01min,使用 Revit 系统完成全部任务耗时的均值为 5.07min,如图 9 所示。

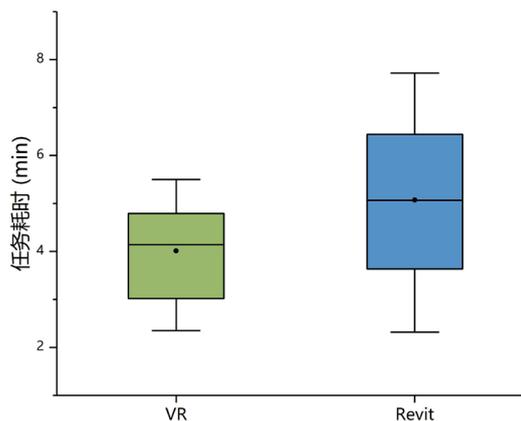


图 9 各系统评审任务耗时

为了进一步确定二者差异性是否显著,使用统计假设检验:

H0: 两组数据之间没有差异或差异不显著 ($p \geq 0.05$);

H1: 两组数据之间存在显著差异 ($p < 0.05$)。

当显著性检验参数 $p < 0.05$ 时有理由拒绝零假设 H0 而接受备择假设 H1,即二者之间具有明显的差异。

首先需要对两组配对样本进行 Shapiro-Wilk 正态性检验,当正态性检验值 $p \geq 0.05$ 时样本数据符合正态分布。若二者均符合正态分布则使用配对样本 t 检验,否则使用 Wilcoxon 符号秩检验。经检验,二者均具备正态性,且经过 t 检验可确定通过 VR 系统完成相同场景下的评审任务所消耗时间更短,如表 1 所示。

表 1 任务耗时的正态性检验与 t 检验

	VR	Revit
统计量 W	0.939	0.957
p	0.226	0.49
中位数	4.14	5.07
平均值 (标准差)	4.01(1.00)	5.07(1.63)
统计量 t 值	-3.63	
显著性 (p 值)	0.002*	

注: * 差异显著 ($p < 0.05$), ** 差异不显著 ($p \geq 0.05$)

3.4.2 认知负荷 CL

认知负荷能够反映出用户通过系统完成任务时的信息处理、记忆力等认知资源的使用情况,数据统计情况如图 10 所示。

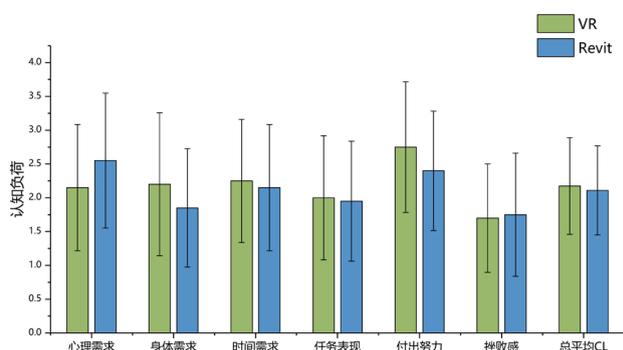


图 10 认知负荷均值及标准差

经过正态性检验后，除总平均 CL 外，其余分项样本均不符合正态分布，则对其分别使用 t 检验与 Wilcoxon 符号秩检验，均不存在显著差异，如表 2 所示。故可判断 VR 系统与 Revit 系统使用时的认知负荷相近。

表 2 认知负荷分项的差异显著性

认知负荷分项	统计量	显著性 (p 值)
心理需求	Z = 0.408	0.688**
身体需求	Z = -0.963	0.335**
时间需求	Z = -0.363	0.717**
任务表现	Z = -0.660	0.948**
付出努力	Z = -1.173	0.241**
挫败感	Z = -0.281	0.779**
总平均 CL	t = 0.292	0.773**

而两者认知负荷的微弱差异可能源自以下原因：

(1) VR 系统的心理需求负荷略低于 Revit，表明用户在 VR 环境下心理负担较低，意识中认为任务较为简单与轻松；

(2) 身体需求上 VR 略高于 Revit，意味着用户需要进行更多的身体运动和体力劳动。其可能的原因之一在于用户需要佩戴 VR 头戴显示器并手持控制器，从而增加了体力负荷；

(3) 在 VR 中需要比 Revit 付出更多精力完成任务，可能的原因在于 VR 环境下用户获得的建筑信息与环境语义更加丰富，且多数用户对虚拟现实技术的了解或使用较少，需要花费更多精力去适应环境。

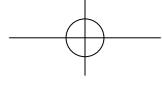
3.4.3 情景意识 SA

情景意识能够反映出系统是否能够提供完整全面的环境感知数据，用户能否把握场景重要信息，做出准确决策。通过 SART 问卷获得的数据如表 3 所示。经过正态性检验所有项均不符合正态分布，故对其进行 Wilcoxon 符号秩检验。

根据表 3 可知，在精神唤醒、注意力集中与分配、信息数量与质量方面，VR 系统的表现效果更加出色。精神唤醒能够反映出用户对环境的察觉及敏感度，注意力集中与分配则体现了用户个体专注于特定任务与

表 3 情景意识分项的正态性检验及差异显著性

序号	SART 分项	情景意识均值及标准差		Shapiro-Wilk 检验 (p)		差异显著性	
		VR	Revit	VR	Revit	统计量	显著性 (p 值)
1	情景不稳定性	2.15(1.04)	2.15(0.81)	0.005	0.009	Z = -0.091	0.927**
2	情景复杂度	3.05(0.94)	2.70(0.98)	0.001	0.017	Z = -1.336	0.172**
3	情景可变量	2.85(1.14)	2.30(1.17)	0.046	0.023	Z = -1.652	0.098**
4	精神唤醒	3.65(0.93)	2.90(1.29)	<0.001	0.009	Z = -2.040	0.041*
5	注意力集中	4.30(0.57)	3.55(0.94)	<0.001	<0.001	Z = -2.877	0.004*
6	注意力分配	4.00(0.73)	3.35(0.67)	0.001	<0.001	Z = -2.437	0.015*
7	精力剩余能力	3.40(0.94)	3.25(0.91)	0.018	<0.001	Z = -6.260	0.531**
8	信息数量	4.25(0.72)	3.45(1.10)	<0.001	0.049	Z = -2.115	0.034*
9	信息质量	3.95(0.94)	3.30(0.86)	0.004	0.010	Z = -2.041	0.041*
10	熟悉程度	3.60(1.19)	3.70(0.80)	0.032	0.001	Z = -0.353	0.724**
11	注意力需求 (D)	8.05(2.16)	7.15(1.76)	0.824	0.055	t = 1.473	0.157**
12	注意力供应 (S)	15.35(1.79)	13.05(2.84)	0.496	0.054	t = 2.955	0.008*
13	情景理解 (U)	11.80(2.12)	10.45(2.24)	0.172	0.230	t = 1.624	0.121**
14	SA=U-[D-S]	19.10(4.20)	16.35(4.60)	0.171	0.591	t = 1.751	0.096**



同时进行多项任务的能力。由此可以推断, VR 提供的沉浸式环境能够帮助用户更好地探查评审方案信息并及时进行处理和行动。而信息数量与质量的优势印证了 VR 相比传统 BIM 能够提供更丰富、完整的视觉信息,高自由度和真实感的评审环境有助于发现和解决潜在的设计问题,提升评审效果。

SART 中 1~3 项、4~7 项、8~10 项的代数分别代表注意力需求 (D)、注意力供应 (S) 及情景理解 (U), 而情景意识的值 $SA=U-[D-S]$, 据此对数据进行进一步处理得到图 11。可看出 VR 系统在各项 SA 中均保持优势。尤其是注意力供应, 代表了系统在为用户提供适当的注意力支持和资源分配方面的能力较为优秀。

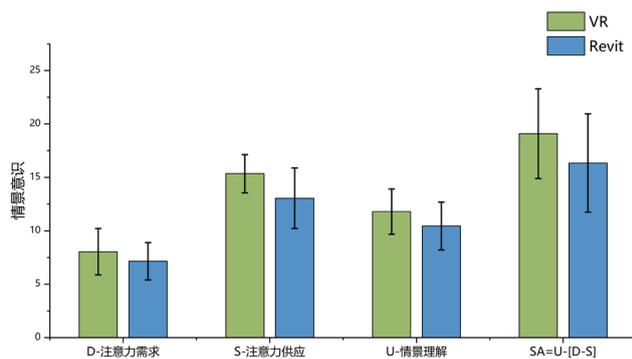


图 11 情景意识均值及标准差

4 总结与展望

本文对国内外关于沉浸式 BIM 设计评审研究进行了梳理, 研发基于 BCF 标准的 VR 设计评审系统并做出介绍。通过对比基于 Revit 和基于 VR 的 BCF 评审方式的实验证明了 VR 系统的优势: 在环境信息丰富度和评审操作效率上具有明显更好的表现。

根据问卷收集到的意见, 未来将着力于简化 UI 和用户操作逻辑, 提高使用舒适性, 并在系统中设置更明显的引导和提示, 进而提升整个系统的可用性。同时, 后续将对系统软硬件进行优化, 从而提升优势、补足劣势。

此外, 在设计评审过程中, 用户与 VR 环境、建筑模型交互中会产生大量信息。如果能对这些碎片化知识进行整合、储存、重用和表达, 从而形成案例并通过算法和知识推理实现案例匹配, 就可以为后续评审提供参考和借鉴。

参考文献

[1] 王葆华, 王晶晶. 数字化时代对建筑设计的影响 [J]. 中外

建筑, 2009(06):139-142.

- [2] 曾旭东, 魏世方. “BIM+VR” 同步与交互式技术在建筑方案设计中的运用 [C]// 数字技术·建筑全生命周期——2018 年全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会. 西安: 中国建筑工业出版社, 2018: 290-293.
- [3] Ding L, Zhou Y, Akinci B. Building Information Modeling (BIM) Application Framework: the process of expanding from 3d to computable nd[J]. Automation in Construction, 2014, 46(OCT): 82-93.
- [4] Keung C C W, Kim J I, Ong Q M. Developing a BIM-based MUVR treadmill system for architectural design review and collaboration[J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 6881.
- [5] Boton C. Supporting constructability analysis meetings with immersive virtual reality-based collaborative bim 4d simulation[J]. Automation in Construction, 2018, 96(DEC): 1-15.
- [6] 陈婉蓉. 基于虚拟现实的设计评审系统研究与实践 [D]. 湖南大学, 2019.
- [7] 刘基荣. 建筑师的新“利器” [D]. 东南大学, 2004.
- [8] Du J, Shi Y, Zou Z, et al. Covr: cloud-based multiuser virtual reality headset system for project communication of remote users[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2018, 144(2): 4017109.
- [9] Nandavar A, Petzold F, Nassif D, et al. Interactive Virtual Reality Tool for BIM Based on IFC[C]// In: Learning, Adapting and Prototyping, Proceedings of the 23rd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Beijing, China, 2018: 453-462.
- [10] 钟文敏. 基于沉浸式 VR 技术的建筑空间体验及评价 [D]. 深圳大学, 2018.
- [11] Shi Y, Du J, Lavy S, et al. A multiuser shared virtual environment for facility management[J]. Procedia Engineering, 2016, 145: 120-127.
- [12] Wu W, Hartless J, Tesei A, et al. Design assessment in virtual and mixed reality environments: comparison of novices and experts[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2019, 145(9).
- [13] Dris A S, Lehericey F, Gouranton V, et al. OpenBIM based IVE ontology: an ontological approach to improve interoperability for virtual reality applications[C]//Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering: Proceedings of the 35th CIB W78 2018

Conference: IT in Design, Construction, and Management.
Springer International Publishing, 2019: 129-136.
[14] Umair M, Sharafat A, Lee D, et al. Impact of Virtual Reality-

Based Design Review System on User' s Performance and
Cognitive Behavior for Building Design Review Tasks[J].
Applied Sciences. 2022, 12(14): 7249.

Research on Immersive Building Design Review Based on BIM and VR

Li Boyu^{1,2}, Guan Tao³, Chen Weiya^{1,2}

- (1. National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. School of Software Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Design review is an important part in building design phase, with the aim of improving design, enhancing design quality, and meeting users' needs. However, due to the limitations of 2D paper and traditional human-computer interfaces, the presentation of design proposals based on drawings or BIM models often fails to demonstrate design intent, especially for stakeholders who are not specialized in building technology. However, VR technology, with its immersive and interactive features, has become a powerful means to solve the above problem. Through analyzing and summarizing relevant research status at home and abroad, this paper proposes and develops an immersive building design review system, verifies the feasibility of immersive BIM application in building design review, and expounds possible evolutionary path.

Key Words: Design Review; BIM; Virtual Reality; immersive