

文章编号:1673-9469(2025)05-0104-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.05.013

基于视觉计算与眼动的建筑底层空间视觉品质分析

刘子轩,周祥*,龚航

(广东工业大学 建筑与城市规划学院,广东 广州 510009)

摘要: 为了揭示视觉显著性计算与主体空间视觉显著性体验以及视觉品质的内在关联,基于视觉计算深刻理解空间视觉感知过程,定量分析影响底层空间视觉品质的视觉显著性要素。采用视觉显著性计算与眼动追踪相结合的方法,采集相应数据分析建筑底层空间的视觉品质。首先阐述视觉显著性计算的基本原理,根据不同楼梯位置建立公共建筑底层开敞空间不同方案的虚拟现实模型,开展眼动追踪实验,并采用 ITTI 视觉显著性计算模型生成视觉计算显著图。最终与主观问卷调查结合,依据数据分析建筑底层空间的视觉显著性与视觉品质评价的关联。结果表明,建筑空间中实时视觉体验眼动热点图与视觉计算显著图具有较高相似性,视觉显著性数值与主观视觉品质评价呈正相关。布置于底层空间中部的楼梯与具备完整几何形的空间具有视觉显著性,成为影响建筑底层空间视觉品质的重要因素。最终验证计算机视觉显著性计算符合建筑空间视觉感知规律,可作为建筑空间视觉品质评价的有效工具,为基于人因的建筑设计提供了量化依据。

关键词: 底层空间;视觉显著性;眼动追踪;虚拟现实;视觉品质

中图分类号: TU2

文献标识码: A

Visual Quality Analysis of Architectural Ground-floor Space Based on Visual Computation and Eye-tracking

LIU Zixuan, ZHOU Xiang*, GONG Hang

(School of Architecture and Urban Planning, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510009, China)

Abstract: To reveal the intrinsic relationship between visual saliency calculation and the visual saliency experience and visual quality of the main space, based on a profound understanding of the visual perception process of space through visual computing, quantitative analysis was conducted on the visual saliency elements that affect the visual quality of the underlying space. The method of combining visual saliency calculation with eye-tracking was adopted to collect corresponding data for analyzing the visual quality of the building's underlying space. Firstly, the basic principle of visual saliency calculation was elaborated. Secondly, virtual reality models of different schemes for the open space of the underlying public building at different stair positions were established, eye-tracking experiments were carried out, and the ITTI visual saliency calculation model was used to generate visual calculation saliency maps. Finally, combined with subjective questionnaire surveys, the correlation between the visual saliency of the building's underlying space and the visual quality evaluation was analyzed based on the data. The results show that the real-time visual experience eye-tracking hotspots map and the visual saliency map generated by visual saliency calculation have a high similarity, and the visual saliency values are positively correlated with the subjective visual quality evaluation. The stairs located in the middle of the underlying space and the spaces with complete geometric shapes have visual saliency and become important

收稿日期:2025-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208014)

第一作者:刘子轩(1999—),男,湖南常德人,硕士研究生,从事人因城市与建筑方面的研究。

* 通信作者:周祥(1973—),男,辽宁海城人,博士,教授,从事人因城市与建筑方面的研究。

factors affecting the visual quality of the building's underlying space. Finally, it was verified that computer visual saliency calculation conforms to the visual perception laws of building spaces and can be used as an effective tool for evaluating the visual quality of building spaces, providing a quantitative basis for human-oriented architectural design.

Key words: ground-floor space; visual salience; eye-tracking; virtual reality; visual quality

在探索建筑设计内在科学规律的过程中,仅将建筑空间作为独立于主体之外的研究对象是远远不够的,需深入研究人在建筑空间中的感知与行为规律,及其对建筑空间塑造的影响。在此背景下,相关研究逐渐发展成为建筑学研究新趋势。毫无疑问,在建筑空间的五感中,视觉感知是最核心的部分,建筑空间视觉品质也构成了当前重视人因建筑学研究的重要内容。

随着计算机技术和数据分析方法的发展,越来越多的学者利用计算机模拟视觉体验,通过数据统计,定量分析建筑空间与实体的视觉感知与设计效果。蒋励等^[1]基于空间句法理论,采用图像识别技术研究了城市公园标识的视觉显著性;赵建波等^[2]基于建筑视觉场理论,分析了广场标志物对人们视觉心理的影响,总结了广场设计的视觉规律。在人工智能、学科交叉融合的大背景下,重视视觉显著性计算的计算机视觉模拟逐渐成为建筑空间视觉感知研究的重要手段。视觉显著性计算被广泛应用于图像识别、机器人视觉、虚拟现实场景设计等计算机视觉领域。建筑场所中空间要素的视觉显著性直接影响视觉感知的品质,对建筑与城市设计具有重要作用。Liu等^[3]利用视觉显著性算法提取区域建筑纹理特征,实现了城市建筑纹理特征的识别。Lien等^[4]结合视觉计算显著图与眼动追踪技术,评价了环境景观的视觉印象。徐然等^[5]基于 ITTI 视觉显著性模型定量评价了建筑立面的视觉特征,采用视觉差图方法分析不同建筑立面设计方案的显著性差异,将视觉显著性计算应用到建筑立面效果的比较与方案选择实践中。Xu等^[6]比较了在交通建筑中,旅客在寻路行为模式下,主体视觉注意是否达到设计预期目标。梁楠^[7]采用视觉显著性算法提取地域建筑肌理特征的视觉显著性,完成地域建筑肌理特征识别。孟月波等^[8]利用显著区域抑制与多尺度特征融合的方法识别建筑风格。林小莉^[9]利用视觉显著性计算量化分析建筑视觉场的影响。总体而言,建筑领域中基于视觉显著性计算的研究相对较少,有必要借鉴当前在视觉显著性模型选择、显著性特征对比等方面的研究成果,深入说

明建筑空间中的真实视觉感知与视觉显著性计算之间的关联,进一步探索依托视觉显著性评价建筑空间视觉品质的方法。

本研究融合视觉认知科学、计算机科学等多学科知识,采用视觉显著性计算与眼动追踪技术相结合的跨学科方法,创新性地定量分析公共建筑底层空间的视觉品质。旨在通过计算机视觉模拟深入理解建筑空间视觉感知规律,为基于人因的建筑空间设计提供计算依据,并为建筑空间视觉品质研究拓展新路径。

1 视觉显著性计算基本原理

视觉是人类获取外界信息的主要途径。人类的视觉神经系统由眼球视网膜、视神经和大脑相关区域共同构成,这一经由进化形成的生理结构,决定了其对外界的信息感知具有独特的规律。在视觉感知过程中,眼球运动呈现出一种非随意的特定模式^[10]。如果将落在视网膜上的光学信号事无巨细地传入大脑,脑神经将面临巨大的计算负荷。因此,视觉神经系统在实时作决定,选择可用信息进行深入地判断和分析,传入的信息只有小部分到达视觉感知脑区,其余部分或被忽略,或转化为下意识行为。被选中的可用信息会按重要性排序,优先处理最重要的部分,不太重要的随后处理,该过程被称为“选择性注意”。而注意力所落到的视觉对象的各个局部,依照显著性的不同形成视觉体验显著图。总之,显著性被定义为一种独特的视觉特征,具有视觉显著性的物体或要素易在场景中脱颖而出,引起人们的注意^[11]。

实际上,这些经过选择的视觉信息是分层次、分要素传递和呈现的。神经科学研究认为,人类视觉感知过程分为特征抽取与整合两部分。特征抽取是将完整对象的视觉信息分解为若干特征,分别送到不同的脑区进行加工,最终在大脑整合为整体视觉印象。抽取的特征包括颜色、方向和明度等视觉显著性特征^[12],构成了选择性注意的层次内容。

基于神经科学的认知,视觉计算是指利用数

学方法构建视觉显著性模型,通过计算机对人类视觉神经行为的模拟阐释。视觉显著性模型可简单地理解为在模拟视觉感知的特征抽取与整合中所应用的视觉计算模型。随着对视觉显著性认知的深入,基于场景图片的语义分割形状等显著性特征,研究者采用卷积神经网络深度学习的方法进行视觉显著性计算,进一步证实了视觉计算显著图与人类观察模式之间的相似性^[13]。

2 建筑空间视觉品质的显著性计算分析

2.1 视觉显著性模型的选择

在视觉计算领域,研究人员提出了多种视觉显著性计算模型,其中 ITTI 模型最具有代表性^[14],可以模拟人眼的视觉感知过程,在建筑相关分析中具有较好的适用性。该模型基于高斯金字塔方法生成 9 个不同尺度的图像,分别从亮度、颜色和方向 3 个方面提取不同尺度图像的显著性特征,经过归一化计算,按照加权比例融合成最终的视觉计算显著图,模型示意图见图 1。另外,考虑到建筑空间中视觉感知对形状特征比较敏感,本文将形状作为显著性特征展开进一步验证与分析。

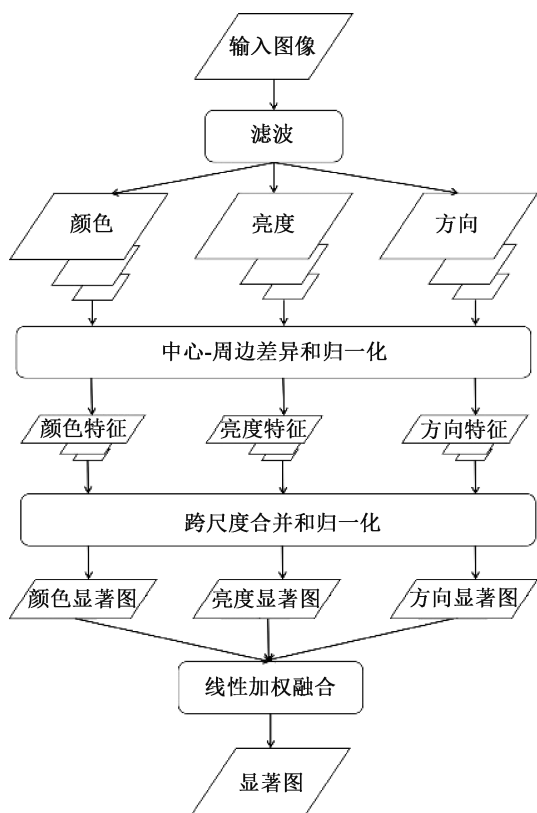


图 1 ITTI 视觉计算显著图模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ITTI visual computing significant graph model

2.2 视觉计算显著图的对比分析

利用数学模型生成视觉计算显著图后,还需要确定其与人类实际视觉体验之间的相似性,并定量比较不同设计方案中建筑空间的视觉显著性差异。

近年来,眼动仪越来越多地应用在建筑空间的视觉感知研究中^[15-16]。Bylinskii 等^[17]利用眼动仪,在高斯模糊条件下生成视觉注视显著图,将其作为基准数值图,与基于同一图像生成的视觉计算显著图进行相似性与差异性分析^[18]。Muhammad 等^[19]结合视觉显著性计算与眼动追踪数据分析,实现了对建筑质量检察人员视觉注意能力的详细评估。Sun 等^[20]结合算法模型与眼动追踪技术,研究了地下商业街空间中标识的显著性。当前,眼动仪分析软件可基于注视点位置和注视时长直接生成注视热点图,能够满足研究需求。本研究通过将眼动热点图与计算获得的视觉计算显著图进行定性比较,评估二者的相似性。

在数字化图像中,图像由无数个像素点组成。根据视觉计算原理,可对图像中每个位置像素点的显著性进行编码。每个像素的显著度可通过其颜色、亮度和方向等要素与周围相关信息的对比计算而得到^[21]。因此,原始图像的每个像素点均被赋予一个 0~255 之间的数值,表示其显著性。基于该数据矩阵,可以利用数理统计方法,对不同方案建筑空间的视觉显著性差异进行定量比较。

综上,本研究以公共建筑底层开敞空间为对象,将眼动仪生成的热点图与视觉计算显著图进行相似性比较,验证建筑空间视觉体验中视觉计算显著图的适用性。比较不同设计方案的视觉计算显著图差异,并结合空间视觉品质的主观问卷,分析空间的视觉品质与视觉显著性之间的关联,从而为空间场景的视觉评价提供新的方法和视角。

3 研究过程

公共建筑底层架空开敞空间(包括首层、二层),是重要的建筑内外联系空间,具有鲜明的视觉显著性需求。视觉显著性可以在功能方面保证公共建筑内外交通的易达性,也可以促进在空间体验方面形成良好的视觉品质。因此,本文拟选取公共建筑底层开敞空间为具体研究对象,开展相关研究工作。

3.1 技术路线

本研究的工作步骤包括虚拟现实(Virtual Re-

ality, VR)空间场景建模、视觉计算显著图生成、眼动数据采集、主观问卷调查、数据对比分析等阶段,研究框架如图 2 所示。

3.2 空间场景建模

本研究以某高校科创大楼底层空间的 2 个设计方案为研究对象,构建虚拟现实模型。

为了利于开展研究,模型需要限定空间变化,突出有差别的要素。通常在公共建筑设计中,首层楼梯的位置可以布置在门厅空间中间,也可以布置在其两侧。根据楼梯的位置形成不同的视觉体验,流线的方便程度也有所差异。楼梯位置的不同导致二层的空间效果有所不同,基于此,本研究构建了 2 个方案(方案 A、方案 B)的空间模型,其平面、层高等条件一致,最大差别在于楼梯的布局,方案 A 的楼梯位于门厅中间,方案 B 的楼梯位于门厅两侧。

为了减少变量影响,模型并没有做过多的修饰。在开敞空间中绿化是常见的景观要素,会影响人的视觉体验,因此,模型布置了简单的绿化景观,方案 A 和方案 B 的平面图见图 3、图 4。

在 SketchUp 软件设定层高层为 4.8 m,建立空间方案的三维模型,并在 Enscape 渲染器中渲染构建虚拟现实环境。在 2 个方案的流线上选择 2 个场景节点作为视觉品质的研究对象,建筑主入口作为场景一,上楼梯之后的二层空间作为场景二,2 个方案的场景节点图像见图 5。

为了保证视觉体验结果的真实性,图中的场景图片是在漫游过程中所做的截图,避免了静态图片视角差异带来的体验差异。

3.3 空间视觉计算显著图

本研究采用的模型包括在 GitHub 网站获取的

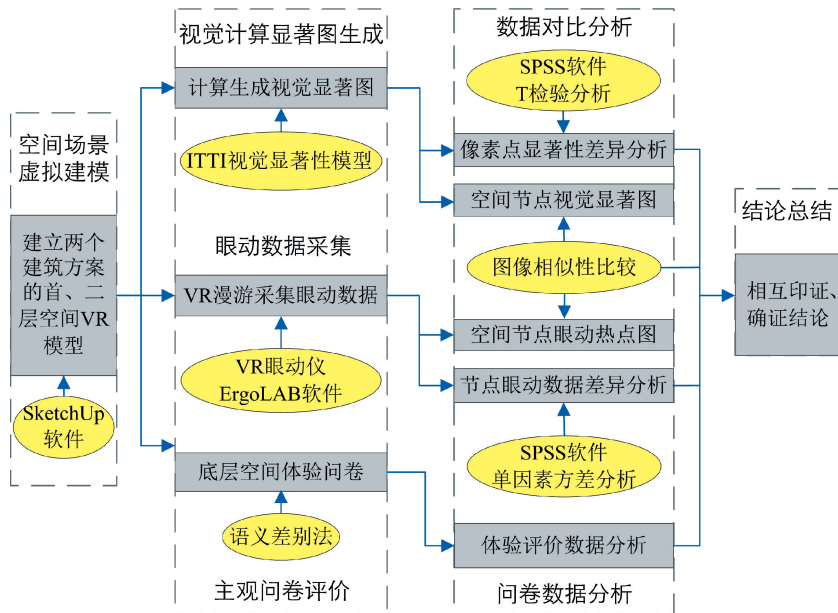


图 2 研究框架图

Fig. 2 Research framework

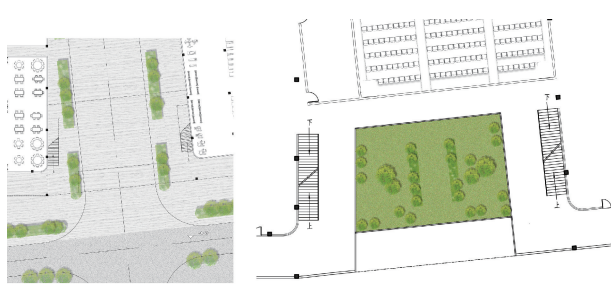


(a) 首层平面图

(b) 二层平面图

图 3 方案 A 平面图

Fig. 3 Plan of scheme A



(a) 首层平面图

(b) 二层平面图

图 4 方案 B 平面图

Fig. 4 Plan of scheme B

ITTI 视觉显著性计算模型,以及基于 SLIC 算法与紧凑度准则构建的形状显著性计算模型。需要说明的是,本研究在虚拟现实模型空间展开体验,模型材质简单,因此,在显著性融合计算中减少了颜色特征的权重,提高了亮度与方向特征的权重,将亮度、颜色与方向特征的融合比例拟设定为 4 : 2 : 4。最终,基于 2 个模型中漫游驻足的 2 个场景节点 VR 图像进行显著性计算并生成视觉计算显著图。

3.4 眼动追踪实验

3.4.1 实验目的

在实验室条件下,被试在 2 个方案的虚拟现实模型中漫游,利用眼动追踪设备获得各类型的眼动数据,并生成注视热点图。本研究一方面通过分析不同空间的注视数据差异,以确定视觉注意的差异性;另一方面,通过对比实际视觉体验与视觉显著性计算结果,验证二者之间的相似性。

3.4.2 实验设备与被试

(1) 实验设备

本实验采用基于 HTC vive Pro2 的 VR 头盔式眼动仪作为眼动追踪设备,其采样频率为 60 Hz,配套的数据分析平台是 ErgoLAB 3.0。

(2) 被试选择

随机招募 34 名大学生,年龄为 19~23 岁,男女性别比例各为 50%。矫正视力正常,情绪稳定,身体健康,学科专业随机分布。

3.4.3 实验过程

(1) 引导被试在实验室安静坐下,主试者向被试解释整个实验目的、过程和要求,被试佩戴 VR 头盔并进行设备校准。

(2) 被试在方案 A 和方案 B 的 VR 环境中进行漫游体验。首先进入场景适应 1 min,被试在 2 个方案中,沿着入口—首层(场景一)—楼梯—二层(场景二)的顺序漫游行走。在主试提示下,被试在 2 个场景节点中分别停留 30 s。眼动仪实时追踪记录实验过程中的眼动数据,整个实验过程约 5 min,实验过程见图 6。

(3) 实验结束后,被试立即填写主观评价问卷,按实验场景展示顺序对空间的视觉品质进行打分、评价。

3.4.4 空间视觉品质评价问卷

本研究通过问卷方式,采用李克特 5 级量表对空间视觉品质进行量化评价。具体问卷内容为“在当下环境场景中的空间视觉感受如何”,提供的选择包括非常差(2)、差(4)、一般(6)、好(8)、非常好(10)。通过问卷获得 2 个方案的空间视觉品质主观评价数据,验证视觉计算显著图与视觉品质之间的相关性。



图 6 眼动实验过程

Fig. 6 Procedure of eye-tracking experiment

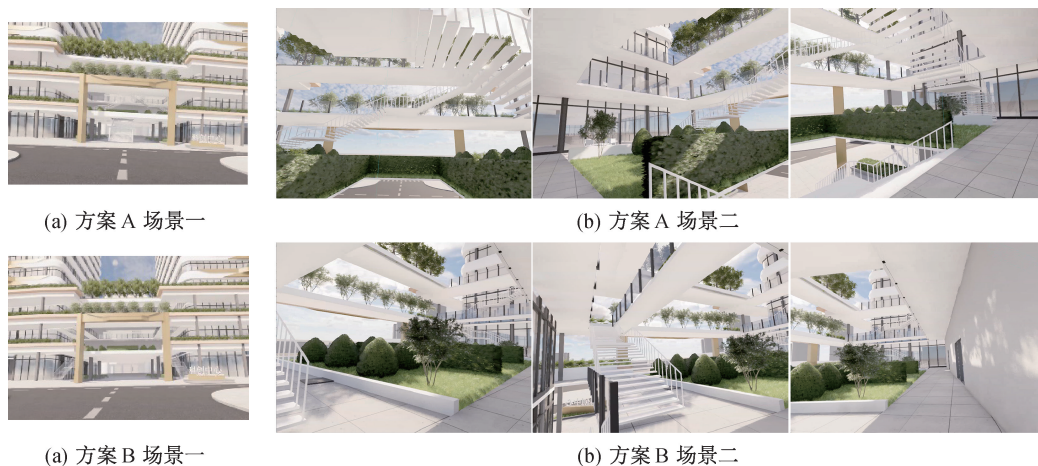


图 5 2 个方案的场景节点图像

Fig. 5 Scenario node image of two schemes

4 数据分析

4.1 主观问卷结果

本研究回收主观问卷后,共获得有效问卷34份,主观问卷评价分数统计结果如表1所示。在场景一中,方案A比方案B的得分更高,标准差更小;在场景二中,方案B的得分比方案A的得分略高;在综合体验中,方案A的得分更高。分析认为,在场景一中,方案A的楼梯布置在中间,良好的导向性形成更佳的视觉品质。进入场景二后,方案B的空间更完整,视觉通透性更好,视觉品质略胜一筹。

表1 主观问卷评价分数统计

Tab.1 Statistical analysis of subjective questionnaire evaluation scores

	方案	问卷数量/份	平均值/分	标准偏差/分
场景一	方案A	34	7.353	1.276
	方案B	34	6.882	1.321
场景二	方案A	34	7.706	1.643
	方案B	34	7.765	1.689
综合体验	方案A	34	7.765	1.281
	方案B	34	7.294	1.548

4.2 眼动数据分析

眼动追踪数据主要包括注视、眼跳和瞳孔3个指标类型。为了判断实际的视觉注意情况,说明注视热点图的意义,我们首先对8类注视指标进行分析,即总注视持续时间、首次注视持续时间、首次注视时间、平均注视时间、注视次数、注视次数占比、注视时间占比、平均绝对距离。在SPSS软件中对导出的眼动数据进行独立样本 t 检验、单因素方差分析,目的在于分析2个方案不同场景的视觉感知是否存在差异。首先对这些数值进行方差齐性检验与正态检验,8个注视指标的方差检验 p 值均大于0.05,故具备方差齐性。

场景一的眼动数据分析结果如表2所示。分析表明,2个方案在首次持续注视时间、注视次数

表2 场景一眼动数据分析

Tab.2 Eye-tracking data analysis of scene1

	总注视持续时间/s	首次注视持续时间/s	首次注视时间/s	平均注视时间/s	注视次数/次	注视次数占比/%	注视时间占比/%	平均绝对距离/px
方案A	1.819	0.202	3.818	0.173	10.156	23.907	27.323	226.155
方案B	1.343	0.114	6.661	0.152	8.281	17.068	17.500	289.117
显著性	0.223	0.001	0.056	0.803	0.337	0.047	0.090	0.280
双侧检验 p 值	0.163	0.006*	0.130	0.204	0.190	0.002*	0.001*	0.002*

注:* $p < 0.05$,具有显著性差异。

占比、注视时间占比、平均绝对距离4项指标中存在明显差异($p < 0.05$)。方案A在注视方面的数据均优于方案B,由此可以得出,首层楼梯布置在建筑中间,首次注视兴趣区的持续时间会更长,注视时间和注视次数的占比也更加高,被试的视觉注意力会更加集中。

场景二的眼动数据分析结果如表3所示。分析表明,2个方案在总注视持续时间、平均注视时间、注视次数、注视次数占比、注视时间占比等8项指标中存在明显差异。由注视数据看出,在场景二中,方案B的被试视觉注意力更加集中,平均绝对距离更短,平均眨眼次数更多,反映出了方案B的视觉注意力投入程度更深。

分析可知,眼动仪数据分析结果与主观问卷反应的视觉品质基本一致。

4.3 视觉计算显著图与眼动热点图的相似性

在视觉注视数据差异的基础上,为了验证视觉计算生成显著图与人眼注视热点图的关联,利用眼动仪生成场景的眼动热点图。

被试在场景漫游过程中,在主试提示下,分别在4个场景节点驻足停留。在ErgoLAB分析软件中,对所有被试在8张图片上的注视点位置和时间进行可视化处理,生成眼动热点图,使用不同颜色呈现被试对场景要素的注意程度。将在ITTI视觉计算模型中生成的视觉计算显著图与眼动热点图进行对比,如图7所示。从图中可以看出,眼动热点图的色彩区域与视觉计算显著图(呈现为灰度图)中表示具有显著性的白色区域基本重合,尤其在场景二中,眼动热点图的色彩区域和视觉计算显著图的白色区域基本一致。

为进一步分析视觉计算显著图的应用效果,本研究基于形状显著性特征生成了视觉计算显著图,如图8、图9所示,从图中可以看出,视觉计算显著图与眼动热点图具有一定的相似性。

表3 场景二眼动数据分析

Tab.3 Eye-tracking data analysis of scene2

	总注视持续时间/s	首次注视持续时间/s	首次注视时间/s	平均注视时间/s	注视次数/次	注视次数占比/%	注视时间占比/%	平均绝对距离/px
方案A	2.493	0.140	0.792	0.139	16.091	63.005	64.118	323.708
方案B	4.656	0.150	1.463	0.175	25.344	50.748	54.147	243.178
显著性	0.206	0.435	0.363	0.803	0.576	0.428	0.426	0.000
双侧检验p值	0.004*	0.720	0.315	0.007*	0.003*	0.004*	0.029*	0.000*

注: * $p < 0.05$, 具有显著性差异。

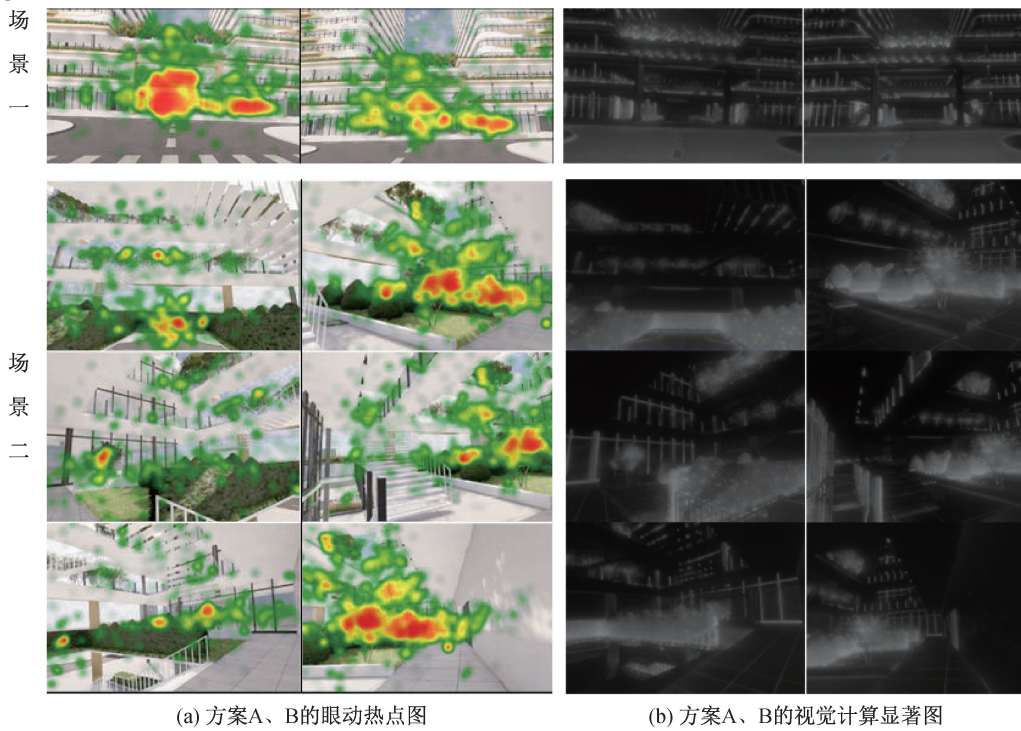


图7 眼动热点图与视觉计算显著图对比

Fig. 7 Comparison between eye-tracking heat map and visual calculation saliency map

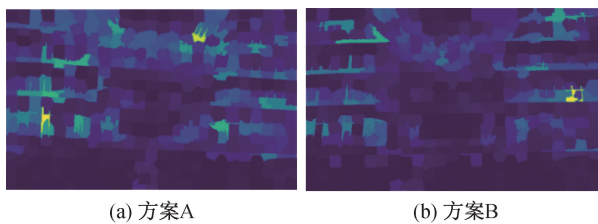


图8 基于形状特征的视觉计算显著图(场景一)
Fig. 8 Visual saliency map based on shape feature (scene1)

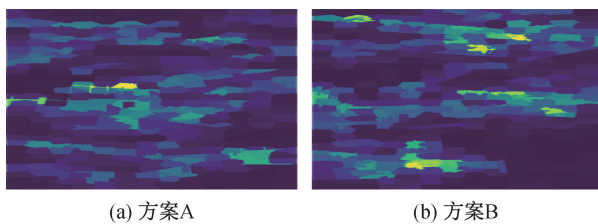


图9 基于形状特征的视觉计算显著图(场景二)
Fig. 9 Visual saliency map based on shape feature(scene2)

4.4 视觉显著性关联视觉品质

将显著图的像素点赋值,利用前文2.2 表述的分析方法,计算场景图片像素显著性均值,并对数据进行数理统计对比分析。结果表明,场景一的方案A 和方案B 的显著性均值分别为 85.925、73.927,二者存在明显差异($p < 0.05$),方案A 的均值大于方案B,表明其整体的视觉显著性更好;场景二的方案A 和方案B 的显著性均值分别为 60.289、65.612,二者存在明显差异($p < 0.05$),方案A 的均值小于方案B,说明方案B 整体的视觉显著性更好。2 个场景图像的像素点显著性数值比较结果与主观问卷的视觉品质调查结果一致,这说明视觉显著性计算与视觉品质有正向关联。

为了进一步说明像素分类显著性特征的均值情况,本研究针对场景二的亮度、颜色与方向特征分别进行了显著性数值统计与比较,结果表明,2 个方案的亮度特征显著性均值分别为 57.699、

65.743,颜色特征均值分别为184.048、194.573,方向特征均值分别为133.410、142.229。3个特征数据均具有统计学差异性($p < 0.05$)。同样地,针对2个场景的形状特征显著图的像素值差异性进行了比较,场景一的2个方案显著性均值分别为65.854、60.705,场景二的2个方案均值分别为66.885、69.686,数据分析结果同样显示具有明显的差异性($p < 0.05$)。总之,在亮度、颜色、方向和形状特征数据差异性基础上,场景二方案B的均值都大于方案A,也进一步说明方案B的要素特征显著性影响了视觉品质。

5 结论

基于视觉显著性分析和2个方案的视觉品质比较分析,得出如下结论:

1)在建筑空间的视觉体验中,视觉计算获得的显著图与眼动热点图具有一定的相似性,视觉计算显著图能够作为研究建筑空间视觉品质的有效方法。

2)视觉显著性计算数值与建筑空间的视觉品质成正向相关,在一定程度上能够成为建筑空间视觉品质分析的定量依据。

3)在公共建筑底层开敞空间的设计中,将楼梯布置在首层空间的中部可以获得更好的空间导向性和视觉品质。

4)建筑空间的几何完整性是视觉显著感知的重要内容,是影响建筑空间视觉品质的重要因素。

5)建筑空间的亮度与方向要素影响了视觉显著性,通过光线明暗的对比与导向性明确的设计,可以提高视觉显著性,进而提高空间的视觉品质。

参考文献:

- [1] 蒋励,高莹. 基于空间句法的城市公园标识视觉显著性研究——以大连劳动公园为例[J]. 住区, 2024(6):137-147.
JIANG L, GAO Y. Research on visual salience of urban park signs based on spatial syntax: case of Dalian Laodong Park[J]. Design Community, 2024(6):137-147.
- [2] 赵建波,易文博. 基于建筑视觉场的广场标志物高度控制域研究[J]. 南方建筑, 2020(1):1-6.
ZHAO J B, YI W B. Research on height control domain of square landmarks based on building visual field[J]. South Architecture, 2020(1):1-6.
- [3] LIU J, SONG Y X, GUO L X, et al. Research on texture feature recognition of regional architecture based on visual saliency model [J]. Electronics, 2023, 12(22):58-68.
- [4] LIEN D, KRISTIEN O, MARC A, et al. Comparing saliency maps and eye-tracking focus maps: the potential use in visual impact assessment based on landscape photographs [J]. Landscape and Urban Planning, 2016(148):17-26.
- [5] 徐然,夏海山. 建筑立面视觉特征识别的量化研究与评价——基于视觉显著性模型的分析方法[J]. 新建筑, 2019(6):26-31.
XU R, XIA H S. A Saliency-model based quantitative study and evaluation on the perception of visual attributes of building facades [J]. New Architecture, 2019(6):26-31.
- [6] XU, R, XIA H S, TIAN M. Wayfinding design in transportation architecture: are saliency models or designer visual attention a good predictor of passenger visual attention? [J]. Frontiers of Architectural Research, 2020(5):5-15.
- [7] 梁楠. 基于视觉显著性模型的地域建筑肌理特征识别[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2021, 31(4):27-33+46.
LIANG N. Research on regional architectural texture feature recognition based on visual salience model [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 31(4):27-33+46.
- [8] 孟月波,刘佳,赵敏华,等. 显著区域抑制与多尺度特征融合的建筑风格识别[J]. 光电子·激光, 2024, 35(9):916-924.
MENG Y B, LIU J, ZHAO M H, et al. Salient region suppression and multi-scale feature fusion for architectural style recognition [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2024, 35(9):916-924.
- [9] 林小莉. 视觉显著性计算对于建筑视觉场影响的量化研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
LIN X L. The quantitative research of saliency based visual attention for the impact of building visual perception [D]. TianJin: Tianjin University, 2016.
- [10] HUMPHREY K, UNDERWOOD G. Domain knowledge moderates the influence of visual saliency in scene recognition [J]. British Journal of Psychology, 2009, 100(2):377-398.
- [11] ITTI L. Visual salience [J]. Scholarpedia, 2007, 2(9):3327.
- [12] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11):1254-1259.
- [13] PETERS R J, IYER A, ITTI L, et al. Components of bottom-up gaze allocation in natural images [J]. Vision

- Research, 2005(45): 2397-2416.
- [14] 王凤娇,田媚,黄雅平,等. 基于眼动数据的分类视觉注意模型[J]. 计算机科学,2016(1):85-89.
WANG F J, TIAN M, HUANG Y P, et al. Classification model of visual attention based on eye movement data[J]. Computer Science,2016(1):85-89.
- [15] 任洪国,李振宇,刘颖,等. 基于脑电-眼动的乡村线状空间感知效能研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2025,42(3):97-105.
REN H G, LI Z Y, LIU Y, et al. Research on the perceived effectiveness of rural linear spaces based on electroencephalography and eye-tracking[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2025,42(3):97-105.
- [16] 冷红,罗紫元,袁青. 寒地城市大型商业建筑室外视觉景观满意度分析[J]. 建筑学报, 2020(S2):73-77.
LENG H, LUO Z Y, YUAN Q. Analysis on outdoor visual landscape satisfaction of large-scale commercial buildings in winter city[J]. Architectural Journal, 2020(S2):73-77.
- [17] BYLINSKII Z, JUDD T, OLIVA A, et al. What do different evaluation metrics tell us about saliency models? [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017(3):740-757.
- [18] HAASS M J, MATZEN L E, MCNAMARA L A, et al. Saliency estimation for advanced imaging scenes using pixel statistics. Abstracts of the 18th European Conference on Eye Movements, Vienna[J]. Journal of Eye Movement Research, 2015(4): 25.
- [19] MUHAMMAD R S, REBECCA N. Comparative analysis of saliency map algorithms in capturing visual priorities for building inspections [J]. Journal of Building Engineering, 2024,97(8): 110678-110686.
- [20] SUN L, XU Y, TENG S J, et al. Research into the visual saliency of guide signs in an underground commercial street based on an eye-movement experiment [J]. Sustainability, 2022,14(23):16062-16072.
- [21] ITTI L, REES G, TSOTSOS J. Neurobiology of Attention[M]. San Diego: Elsevier, 2005:576-582.
(责任编辑 王利君)

(上接第85页)

- [18] YANG X X, QIAO W G. Numerical investigation of the shear behavior of granite materials containing discontinuous joints by utilizing the flat-joint model [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 69-80.
- [19] KULATILAKE P H S W, SHREEDHARAN S, SHERIZADEH T, et al. Laboratory estimation of rock joints stiffness and fractional parameters [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34: 1725-1735.
- [20] 孟召平,张吉昌, JOACHIM T. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系 [J]. 地球物理学报, 2006,49(5): 1505-1510.
MENG Z P, ZHANG J C, JOACHIM T. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks [J]. Chinese Journal of Geophysics,2006, 49(5): 1505-1510.
(责任编辑 张爱丽)