

空间体验实证的人因分析技术路径

An Ergonomic Analysis Approach for Spatial Experience Proof

张利, 谢祺旭, 邓慧姝, 梅笑寒, 庞凌波, 叶扬
ZHANG Li, XIE Qixu, DENG Huishu, MEI Xiaohan, PANG Lingbo, YE Yang

张利
B.1970, 清华大学博士
清华大学建筑学院院长、教授
ZHANG Li
B.1970, PHD., Tsinghua University
Dean, Professor, School of Architecture,
Tsinghua University

谢祺旭
B.1994, 清华大学博士研究生
XIE Qixu
B.1994, PHD. Candidate, Tsinghua
University

邓慧姝
B.1995, 清华大学博士
洛桑联邦理工学院博士后
DENG Huishu
B.1995, PHD., Tsinghua University
Post-doctoral, EPFL

梅笑寒
B.1995, 清华大学博士研究生
MEI Xiaohan
B.1995, PHD. Candidate, Tsinghua
University

庞凌波
B.1993, 清华大学博士研究生
PANG Lingbo
B.1993, PHD. Candidate, Tsinghua
University

叶扬
B.1980, 清华大学博士
YE Yang
B.1980, PHD., Tsinghua University

国家自然科学基金
项目批准号: 52278023
国家重点研发计划
项目编号: 2018YFF0300200
唐仲英基金资助项目
项目编号: 202-000-063

本文图片除注明外均由清华城市人因
实验室提供

收稿日期: 2022-09-08

摘要: 空间体验实证是当前建筑学领域的重要问题。在设计阶段引入对用户体验的量化分析, 有助于更准确地预测建成空间体验, 而人因测度的发展为客观测量空间体验提供了可能性。本文尝试提出用于空间体验实证的人因分析技术路径, 通过对人因测度数据的分析, 预测建成空间体验, 以期为人们带来更高质量的城市生活。

Abstract: The search for the proof of spatial experience is one of the most important topics in architecture. Inviting quantitative analysis in the design intervention process is helpful for a more accurate prediction of spatial experience. The development of ergonomic measurements provides the opportunity to measure spatial experience. This paper aims to propose an approach of ergonomic analysis for spatial experience proof that will be able to predict the experience of the built environment based on ergonomic data, leading to a higher quality of urban life.

关键词: 空间体验, 预测与实证, 人因分析, 人因测度

Keywords: spatial experience, prediction and proof, ergonomic analysis, ergonomic measurement

DOI:10.16414/j.wa.2022.09.019

1 背景

空间体验实证是当前建筑学领域的重要问题。传统设计过程中, 依赖个人经验的判断往往与实际建成空间的用户体验存在落差。在设计阶段引入对用户体验的量化分析, 有助于我们更准确地预测建成空间体验, 为人们带来更高质量的城市生活。

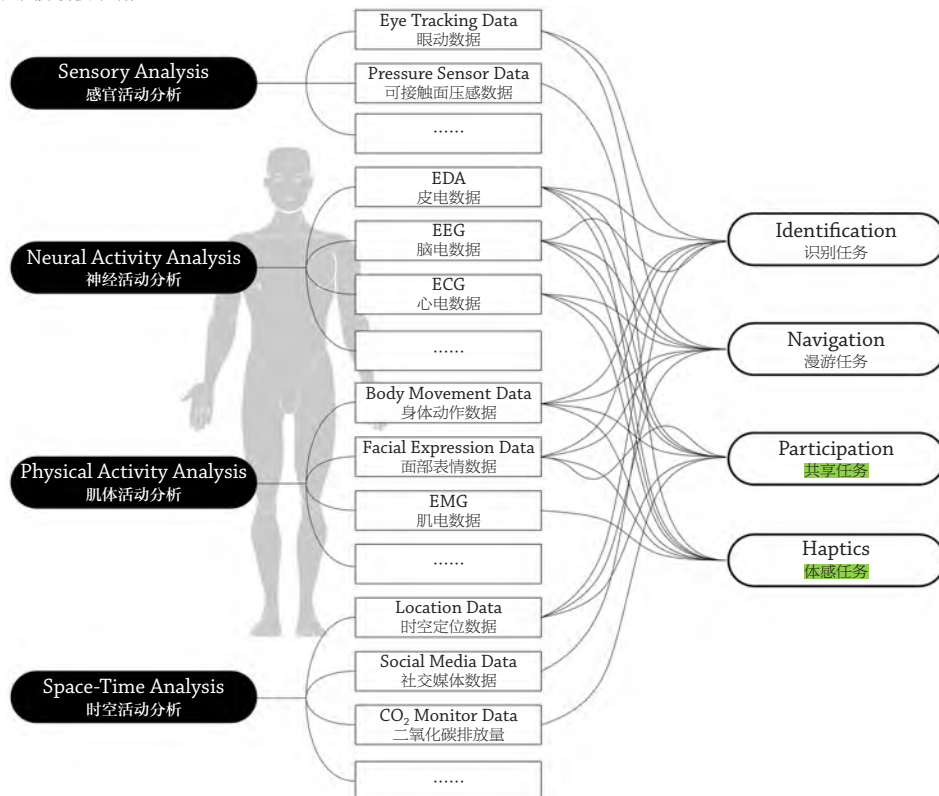
相较于传统的观察、访谈、问卷等间接测量方法, 人因测度的发展为客观测量空间体验提供了可能性, 提升了建筑师所能获取的数据类型和质量。基于此, 本文尝试提出用于空间体验实证的人因分析技术路径。

2 技术路径构建与空间体验任务

该人因分析技术路径如图 1 所示: 在传统设计任务的基础上, 增加了 4 项空间体验任务——识别任务、漫游任务、共享任务和体感任务, 通过选取适用的人因测度, 这一路径可以客观测量人的空间体验, 为上述 4 种空间体验任务提供量化证据, 实现更精准的建成空间体验预测与实证。

识别任务指人对特定的标识物 (landmark) 进行分辨、关注并与自身建立联系时的空间体验, 该任务关注人对标识物投入注意力的强度以及人与标识物的关联性。在建筑历史中, 标识物长期被认为是城市中最重要组成元素, 其凭借着颜色、形状或语义特征, 更容易被人识别或令人难忘, 以帮助人们在环境中定位或找到方向。如中国古代城市中的高塔、庙坛、楼阁; 欧洲古代城市中的教堂、钟楼等。20 世纪中期, 基于格式塔心理学理论在城市结构分析中的应用, 以凯文·林奇 (Kevin Lynch) 为代表的许多学者对标识物进行明确定义^[1-4], 并开始基于人对某一建筑或构筑物的印象深刻程度来衡量城市建筑的识别性。近年来, 随着影像分享社交媒体的兴起, 通过分析影像内容, 能够提取更被注意、被偏好的城市元素, 为量化分析识别任务提供大量可靠的研究数据和新的研究路径。

漫游任务指人在设计预期路径上进行游历的空间体验。漫游任务关注人体验的完整性和过程中空间



感知的丰富度。在中国古典园林中，通过空间节奏的控制和因地制宜的造景，塑造人在其中的漫游体验^[5]；现代主义时期，柯布西耶通过不同视点的透视序列绘画和文字描述记录自己在雅典卫城的行进过程^[6]，并在之后提出建筑漫步（architectural promenade）的概念，强调建筑内外可被通过、游历^[7]；到了20世纪末，空间句法领域的学者开始尝试对人群在空间中的漫游行为进行科学实证^[8]。

共享任务指不同群体或个人的多种活动发生在同一空间时的空间体验。共享任务关注活动发生的可能性和人在空间中的活动强度。如在四合院等传统居住院落中，院子容纳了共同居住群体丰富的日常活动。1960年代以来，随着人们对公共生活的关注和人本主义城市研究的兴起，共享任务成为城市空间研究的重要问题。扬·盖尔（Jan Gehl）、威廉·怀特（William Whyte）等学者对公共生活进行了长期地观察和记录^[9-11]，尝试归纳人群对公共空间的使用方式和活动特点。当下，公共空间可感知技术的发展扩充了共享任务的数据来源和样本数量。

体感任务指个人与身体周边空间界面进行接触式互动时的空间体验。该任务关注动作与动态的多样性及人与空间界面接触的强度。体感任务最直观地体现在家具、墙壁和地毯上，强调舒适与自在的身体感受，如刘贯道《梦蝶图》中庄子卧躺于榻上；也强调游戏性的体验^[12]，如时常出现在中国古典文学作品里的假山。自1950年代起，心理学领域开始强调皮肤、关节和肌肉上的“近端感觉”（proximal sense），并将其定义为视觉之外的另一种获取空间信息的重要方式^[13-15]。近年，在人机交互领域，动作分析（motion study）^[16-17]和触觉反馈分析^[18]已被广泛应用于解析和归纳人与空间界面互动的行为模式。

基于识别、漫游、共享、体感任务所关注的设计问题，人因分析研究能够更具针对性地筛选相关性更高的人因测度，对空间体验任务的相关方面进行量化，实现预测与实证。

3 人因测度

3.1 感官活动分析（Sensory Analysis）

感官活动分析的测量对象是人体接收外界刺激时的感官活动，可以作为反映人选择性注意力分布的有效指标，能够有效揭示空间界面对于人体体验影响的不均等性，**以及人对不同空间界面的潜在偏好。眼动、可接触面压感是空间体验研究中感官活动分析的典型测度。**

针对视觉，人因分析采用的测度为眼动数据。通过测量瞳孔位置、计算人眼的注视点分布，可以分析人识别空间时的视觉注意力分配（图2）。在感官层面，眼动可以揭示人眼对空间界面的注视偏好，帮助建筑师对设计的视觉吸引力进行测试^[19-20]；在行为层面，眼动可以部分揭示人在空间中行为的决策依据，帮助建筑师优化人的寻路和漫游体验^[21]。此外，**瞳孔直径、眼跳等眼动数据也可用于辅助对人情绪状态的判断**^[22]。

针对触觉，人因分析采用的测度为接触面压感数据。通过压感数据测量人与空间界面接触的位置、强度与接触频次，可以分析人在接触空间时的行为规律（图3）。在感官层面，**压感数据被用于分析身体各个部位的受压强度**，帮助建筑师测试人的体感体验^[23]；在行为层面，压感数据可以用于**对人群密度进行计数，对人群位置进行定位**，以帮助建筑师了解共享空间中的人群分布状况^[24]。

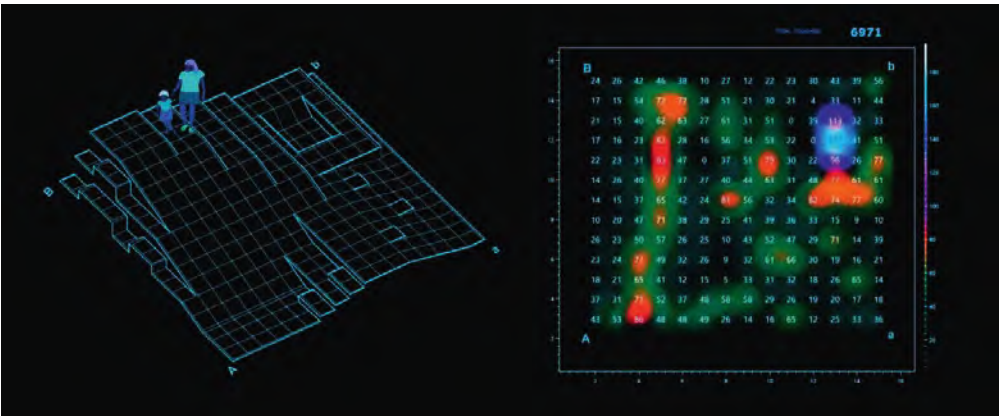
3.2 神经活动分析（Neural Activity Analysis）

神经活动分析的测量对象是人体接收外界刺激所形成的电生理信号反馈，在心理学和人机交互领域

2 眼动追踪示例：城市步行空间的注视点分布



3 压感数据示例：深双展装置互动数据分析



可作为衡量用户体验的有效指标^[25]。神经活动分析提供了深入了解使用者在游历空间过程中认知机制和情感体验的可能性^[26]。**皮电（EDA）、心电（ECG）、脑电（EEG）**是空间体验研究中神经活动分析的典型数据。

皮电活动指机体受到刺激时皮肤表面电导的变化。通过测量人的皮肤电导，可以分析使用者在空间中体验时的情绪唤醒程度（图4）。在感受层面，皮电可用于反映人对空间信息反馈的活跃程度和认知努力程度^[25]，**帮助检验设计方案中标志物的有效性^[27]和空间界面的友好程度^[28]**，优化漫游体验；在行为层面，皮电可用于反映人在空间中活动时的兴奋程度，**帮助建筑师判断用户参与活动及与空间界面互动的积极性^[29]**。值得注意的是，关于皮电的既有研究尚不足以支撑精准识别情绪效价^[30-31]，常与其他人因测度结合判断用户的空间体验^[32-33]。

心电指心脏每个心动周期伴随的生物电变化。通过测量人的心率（HR）、心率变异性（HRV）等指标，可以帮助分析人体验空间过程中心理压力变化和注意力水平等^[34-35]。在感受层面，心电可以反映**空间界面带给人的心理负荷**，帮助建筑师对空间设计，特别是地下、桥下等传统意义上的**消极空间的设计**进行评估^[36]；在行为层面，**心电可以反映人参与活动的激烈程度^[37]**，**优化人与空间界面交互的体感**。

脑电指大脑皮层神经细胞集群电活动而产生的电生理信号。通过测量头皮表面电位变化，可以分析空间中神经活动的变化^[25]。在感受层面，脑电可以反映人识别空间时唤醒程度的变化，评估认知负荷^[38]，帮助建筑师了解人在感知、识别空间时的注意力分布^[39-40]；在行为层面，**脑电可以帮助揭示人与空间界面互动时的情绪效价**，为建筑师提供预测人们空间中体验质量的契机^[41]。

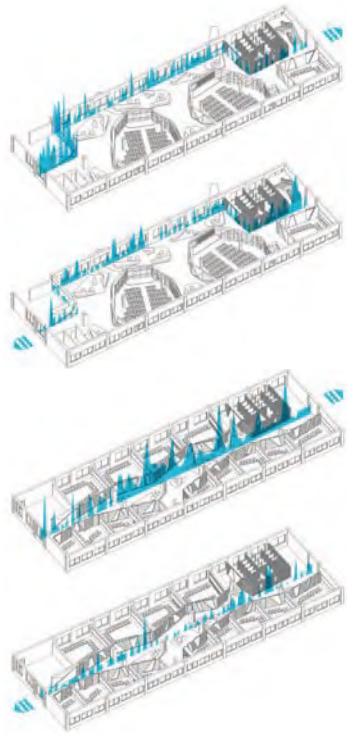
3.3 肌体活动分析（Physical Activity Analysis）

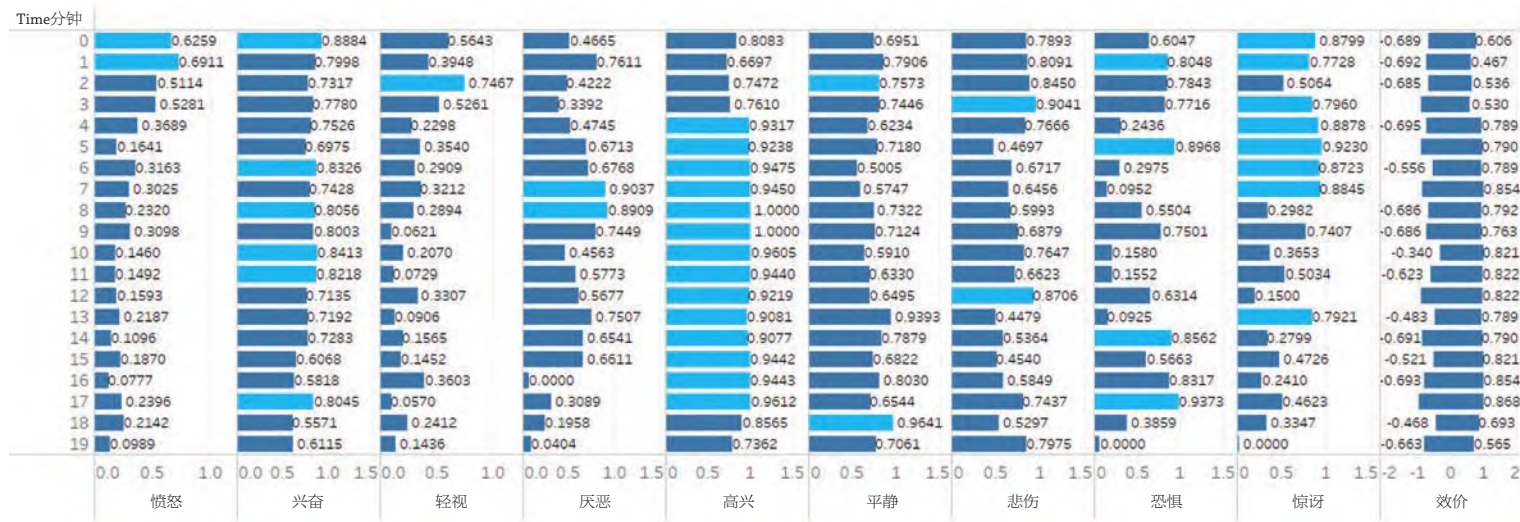
肌体活动分析的测量对象是人在接收外界刺激时肢体状态的变化过程，其人因测度有面部表情（FER）、身体动作、肌电（EMG）等。收集人们在空间体验时的肌体活动数据，能够帮助了解人们在空间中的情感状态^[42-43]，特别是疲劳^[44]、压力^[45]等状态。肌体活动分析可提供关于人的空间界面审美偏好的信息。

面部表情可以通过公共空间中采集的影像，识别、分析人在空间中面部表情的变化。目前通用的面部表情识别基于7种基本类型¹⁾^[46]：快乐、惊奇、恐惧、悲伤、厌恶、愤怒、中性，结合沉浸程度与心理效价指标，可计算出人们面部表情中不同感情成分的比例，帮助了解个体空间体验的情感偏好（图5）^[47]。

身体动作分析可以通过视频影像、生理传感器或物理传感器进行动作捕捉、识别与分析^[48]。**身体动作已被证实能够一定程度上揭示人的情感^[49]**，也能够反映一组人的社交活动模式与强度²⁾，可以帮助建筑师了解公共空间中人的活动与情感（图6）。

4 皮肤电导示例：三教漫游实验分析





6 身体动作分析示例, 来源:
domedb.perception.cs.cmu.edu



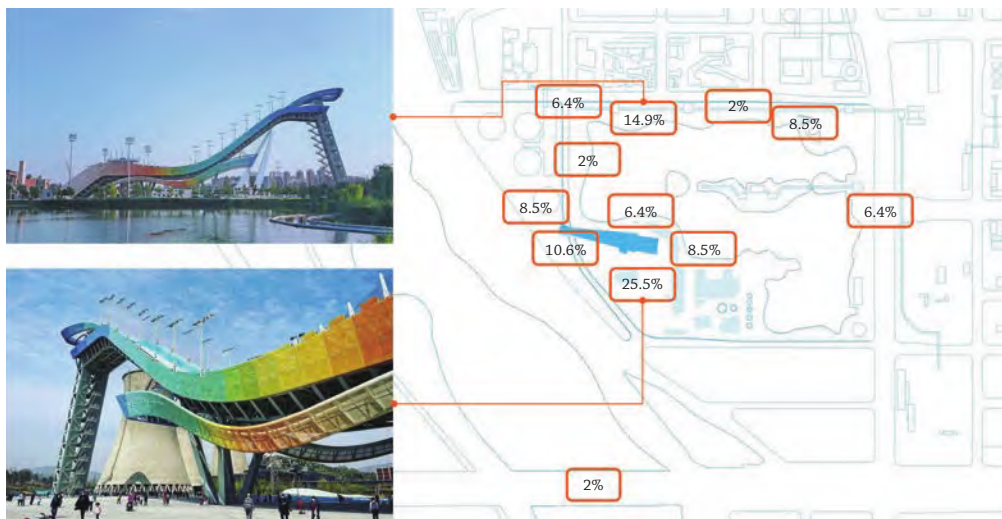
肌电信号可分为针电极肌电信号（**nEMG**）和表面电极肌电信号（**sEMG**）^[50]。表面肌电通过将中枢神经系统支配肌肉活动时伴随的生物电信号从运动肌表面引导记录下来^[51]，可以分析人与空间界面交互时肌肉的疲劳和兴奋程度。在行为层面，肌电可以用于识别人体动作^[52]，反映人在空间中活动的强度^[53]，可以帮助建筑师对用户体感进行测试。

3.4 时空活动分析 (Space-Time Analysis)

时空活动分析的测量对象是群体或个人在不同时间段进行的空间活动与分布, 主要数据来源包括时空定位数据、社交媒体数据, 以及基于对人体以 CO_2 为代表的可挥发性有机化合物成分数据^[54], 体现出人在时空活动中的不均匀性, 较为直接地反映人对空间界面的体验过程与偏好(图 7)。

时空定位数据指基于地理信息服务的普及，由卫星定位、移动基站定位、IP 地址定位，以及用户注

7 社交媒体与时空定位示例



册地址定位等方式产生的定位信息^[55]，同时，包括基于物联网（Internet of Things, IoTs）技术的传感器平台收集的个人的定位信息、移动终端访问应用平台所产生的基于时空坐标的个人的轨迹数据^[56]。分析此类数据所获得的时间、空间信息可得到个体或人群在空间中的动态分布与实时轨迹^[57]，帮助了解个体或人群的空间体验行动模式，推测其情感偏好^[58]，也可通过行为建模对个体或人群的活动进行预测^[59]。

除含有部分时空定位数据外，社交媒体数据也包括用户在社交媒体平台上发布的信息内容，文字、图片、视频与特定的空间体验直接相关^[60]。从个人的社交媒体数据提取出时空信息、描述性文本与图像，通过关键词文本处理^[61]、统计分析模型^[62]、语义网技术^[63]等主要方法解析语义，归纳出人的空间体验、情感偏好；叠加、聚合个体的社交媒体语义信息并与时空定位数据结合，可反映出群体在空间中的不均匀分布，以此得到群体的空间体验模式与偏好^[64]。

对人体可挥发性有机化合物的浓度进行测量、对比，基于化学成分检测获得的数据反映人在空间中的活动变化，可用于辅助了解相对封闭的空间内人的移动轨迹、停留时长与人群分布^[65]。

4 总结

综上所述，针对空间体验实证问题，本文尝试构建了一种基于人因分析技术的研究路径，在原有空间形态设计任务的基础上，增加了4项空间体验设计任务——识别任务、漫游任务、共享任务与体感任务。通过充分挖掘人因测度发展带来的可能性，各项空间体验任务可选取适用的人因测度进行定量研究，在建成前有效预测空间体验，为建筑师提供更客观的决策基础，从而给人们带来更高质量的城市生活空间。这一技术路径已在冬奥场馆设施规划设计中得到初步应用，有待在更日常、更普遍的城市公共空间中得到进一步的应用和论证。□

注释

- 1)

面部表情分类数在不同研究机构的数据库间有所增减，此前已有学者对此进行梳理总结，详情可见 Revina & Emmanuel. A Survey on Human Face Expression Recognition Techniques[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2021, 33(6): 619-628. 本文以最早提出的Ekman的6种
- 2)

卡耐基梅隆大学机器所的社交互动捕捉实验自2016年8月启动，至今已收集了超过150万3D骨架模型的交互动作数据。详情可见：<http://domedb.perception.cs.cmu.edu>。

参考文献

[1]

LYNCH K.The Image of the City[M].Cambridge:MIT Press,1960.

[2]

TLAUKA M,WILSON P N.The effects of landmarks on route-learning in a computer-simulated environment[J]. Journal of Environmental Psychology,1994(14):305313.

[3]

APPLEYARD D.Styles and and methods of structuring a city[J]. Environment and Behaviour,1970a,2:100-116.

[4]

MOUGHTIN C,OC T,TIESDEL S.Urban Design: Ornament and Decoration[M].Oxford: Butterworth Architecture,1999.

[5]

计成原著,陈植注释.园冶注释（第2版）[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[6]

GRESLERI G,FONDATION LE CORBUSIER.Voyage d'Orient:carnets[M].London:Phaidon Press,2002.

[7]

LE CORBUSIER.Le Corbusier talks with students from the schools of architecture[M].New York: Princeton Architectural Press,1999.

[8]

BATTY M.Predicting where we walk[J].Nature (London), 1997,388(6637):19-20.

[9]

GEHL J,SVARRE B.How to study public life[M]. Berlin:Springer,2013.

[10]

GEHL J.Life between buildings[M].New York:Van Nostrand Reinhold,1987.

[11]

WHYTE W H.The social life of small urban spaces[M]. Washington:Conservation Foundation,1980.

[12]

张利.主动式健康空间：身体、休闲与公共空间的游戏性[J].世界建筑,2016(11):14-19.

[13]

RÉVÉSZ G.Psychology and Art of the Blind[M].London: Longmans,Green,1950.

[14]

MILLAR S.Processing Spatial information from Touch and Movement[C] //Touch and Blindness.Ed.Morton Heller,and Ballesteros,Soledad.New Jersey:Lawrence Erlbaum Associates,2006:25-49.

[15]

PATERSON M.The Senses of Touch[M].Oxford/New York:Berg,2007.

[16]

PANERO J,MARTIN Z.Human dimension & interior space:a source book of design reference standards[M]. Watson-Guption,1979.

[17]

MOLINA-TANCO L,BANDERA J P,MARFIL R,& SANDOVAL F.Real-time human motion analysis for human-robot interaction[C]// 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.IEEE,2015:1402-1407.

[18]

GAO S,YAN S,ZHAO H,& NATHAN A.Touch-Based Human-Machine Interaction:Principles and Applications[M]. Berlin/Heidelberg,Germany:Springer,2021:1-240.

[19]

刘凌云,吴美阳,马艺萌,屈海燕.眼动追踪应用于景观领域的研究综述[J].西部人居环境学刊,2021,36(04):125-133.

[20]

NOLAND R B,WEINER M D,GAO D,et al.Eye-tracking technology,visual preference surveys,and urban design: Preliminary evidence of an effective methodology[J]. Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability,2017,10(1):98-110.

[21]

杨阳.商业建筑空间环境寻路认知机制及设计策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

[22]

LU Y,ZHENG W-L,LI B,et al.Combining eye movements and eeg to enhance emotion recognition [Z].Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence. Buenos Aires,Argentina:AAAI Press,2015:1170-6.

- [23] VOS G A, CONGLETON J J, MOORE J S, AMENDOLA A A, & RINGER L. Postural versus chair design impacts upon interface pressure[J]. *Applied ergonomics*, 2006, 37(5):619-628.
- [24] BRÄNZEL A, HOLZ C, HOFFMANN D, et al. Gravity Space: tracking users and their poses in a smart room using a pressure-sensing floor[C]//In Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems. New York: Association for Computing Machinery, 2014:725-734.
- [25] 葛燕, 陈亚楠, 刘艳芳, 李稳, 孙向红. 电生理测量在用户体验中的应用[J]. *心理科学进展*, 2014, 22(06):959-967.
- [26] DIRICAN A C, GOKTURK M. Psychophysiological Measures of Human Cognitive States Applied in Human Computer Interaction[J]. *Procedia Computer Science*, 2011, 3:1361-1367.
- [27] OJHA V K, GRIEGO D, KULIGA S, et al. Machine learning approaches to understand the influence of urban environments on human's physiological response[J]. *Information Sciences*, 2019, 474:154-169.
- [28] HOLPER L, JAGER N, SCHOLKMANN F, ET al. Error detection and error memory in spatial navigation as reflected by electrodermal activity[J]. *Cognitive Processing*, 2013, 14(4):377-389.
- [29] 付而康, 王艺嵩, 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):8.
- [30] 周钰婷. 皮肤电信号的情感特征提取及分类识别研究[D]. 重庆: 西南大学.
- [31] KEIL A, SMITH J C, WANGELIN B C, et al. Electrocardiac and electrodermal responses covary as a function of emotional arousal: A single-trial analysis[J]. *Psychophysiology*, 2008, 45(4):516-523.
- [32] WU N, JIANG H, YANG G. Emotion Recognition Based on Physiological Signals[J]. *Springer Berlin Heidelberg*, 2012:311-320.
- [33] 陈沙利, 张柳依, 江锋, 等. 基于多种生理信号的情绪识别研究[J]. *中国医疗器械杂志*, 2020, 44(4):5.
- [34] 严璘璘, 骆宏, 危静, 等. 心理压力的测量方法及新技术[J]. *应用心理学*, 2019, 25(1):16.
- [35] HERCEGFI K. Heart Rate Variability Monitoring during Human-Computer Interaction[J]. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2011, 8(5):205-224.
- [36] DPI A, RUTLLANT J, FORTEA J L. Differences in the perception of urban space via mental maps and Heart Rate Variation (HRV)[J]. *Applied Geography*, 2019, 112:102084.
- [37] LUO X. ECG signal analysis for fatigue and abnormal event detection during sport and exercise[J]. *Internet Technology Letters*, 2021, 4(3):e262.
- [38] 吴绍斌, 高利, 王刘安. 基于脑电信号的驾驶疲劳检测研究[J]. *北京理工大学学报*, 2009, 29(12):1072-1075.
- [39] MASAKI H, OHIRA M, UWANO H, et al. A quantitative evaluation on the software use experience with electroencephalogram[C]//International Conference of Design, User Experience, and Usability. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011:469-477.
- [40] KALANTARI S, TRIPATHI V, KAN J, et al. Evaluating the impacts of color, graphics, and architectural features on wayfinding in healthcare settings using EEG data and virtual response testing[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2022, 79:101744.
- [41] ROUNDS J D, CRUZ-GARZA J G, KALANTARI S. Using posterior eeg theta band to assess the effects of architectural designs on landmark recognition in an urban setting[J]. *Frontiers in human neuroscience*, 2020, 14:584385.
- [42] BRUYER R. The Neuropsychology of Face Perception and Facial Expression[M]. New York and London: Psychology Press, 2014.
- [43] GOYAL S J, UPADHYAY A K, JADON R S. A brief Review of Deep Learning Based Approaches for Facial Expression and Gesture Recognition Based on Visual Information[J]. *Materials Today: Proceedings*, Volume 29, Part 2, 2020, 462-469.
- [44] XU B, WU Q, XI C, HE R. Recognition of the fatigue status of pilots using BF-PSO optimized multi-class GP classification with sEMG signals[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 199, 106930. DOI:10.1016/j.ress.2020.106930.
- [45] WANG F, EDWIN ML YIU. Is Surface Electromyography (sEMG) a Useful Tool in Identifying Muscle Tension Dysphonia? An Integrative Review of the Current Evidence[J]. *Journal of Voice*, 2021. DOI:10.1016/j.jvoice.2021.10.006.
- [46] EKMAN P, FRIESEN W V. Manual for the Facial Action Coding System[M]. Palo Alto: Consulting Psychologists Press, 1977.
- [47] CHRISTO V, MORIDIS N, ANASTASIOS A. Measuring Instant Emotions During a Self-assessment Test: the Use of FaceReader[C]. *Proceedings of the 7th International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research*. 2010:24-27.
- [48] MAHBUB U, RAHMAN AHAD M A. Advances in human action, activity and gesture recognition[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2022, 155:186-190.
- [49] METCALFE D, MCKENZIE K, MCCARTY K, POLLET T V. Emotion recognition from body movement and gesture in children with Autism Spectrum Disorder is improved by situational cues[J]. *Research in Developmental Disabilities*, 2019, Volume 86:1-10.
- [50] MAVROS P, AUSTWICK M Z, SMITH A H. Geo-EEG: towards the use of EEG in the study of urban behaviour[J]. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 2016, 9(2):191-212.
- [51] 张旭. 基于表面肌电信号的人体动作识别与交互[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [52] 王笃明, 王健, 葛列众. 肌肉疲劳的sEMG时频分析技术及其在工效学中的应用[J]. *航天医学与医学工程*, 2003(05):387-390.
- [53] MCGOWAN C R, ROBERTSON R J, EPSTEIN L H. The effect of bicycle ergometer exercise at varying intensities on the heart rate, EMG and mood state responses to a mental arithmetic stressor[J]. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1985, 56(2):131-137.
- [54] 孙筱. 人体散发VOC的特性及人与环境的相互作用研究[D]. 北京: 清华大学, 2017:1-10.
- [55] 姜伟. 基于社交媒体顾及空间效应的商业区竞争选址研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [56] 张宁豫. 海量稀疏时空数据分析方法及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [57] AHAS R, AASA A, YUAN Y, et al. Everyday space-time geographies: using mobile phone-based sensor data to monitor urban activity in Harbin, Paris, and Tallinn[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(11-12):2017-2039.
- [58] FAN Y, KHATTAK A J. Urban Form, Individual Spatial Footprints, and Travel: Examination of Space-Use Behaviour[J/OL]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008, 2082(1):98-106. <https://doi.org/10.3141/2082-12>.
- [59] 吴昌旭, 周生琦, 叶亿宁. 人的行为建模在城市人因设计中的应用[J]. *世界建筑*, 2021(03):46-49+126.
- [60] QI G J, AGGARWAL C, TIAN Q, et al. Exploring Context and Content Links in Social Media: A Latent Space Method[J/OL]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(5):850-862.
- [61] XU G, YU Z, YAO H, et al. Chinese Text Sentiment Analysis Based on Extended Sentiment Dictionary[J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1):43749-43762.
- [62] CHEOLJUN E, TAISEI K, SANG H K, et al. Bitcoin and investor sentiment: Statistical characteristics and predictability[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, 514(2):511-521.
- [63] DRAGON M, PORIA S, Cambria E. OntoSentNet: a commonsense ontology for sentiment analysis[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2018, 33(3):77-85.
- [64] 蒋轶. 含地理位置信息的社交媒体挖掘及应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [65] 山本百合子, 伊藤博澄, 山下直人. CO₂ モニターを使った実店舗の換気評価 - 人の密度を客観化する試み2 - [J]. *人間工学*, 2021, 57:2D2-5.