

面向智能家居系统的主动交互设计研究

盖森¹⁾, 鲁艺^{1)*}, 张印帅²⁾, 周乐甲¹⁾, 王晓烨¹⁾

¹⁾ (北京工业大学艺术设计学院 北京 100124)

²⁾ (鼎道智联(北京)科技有限公司 北京 100193)

(luyi@bjut.edu.cn)

摘要: 随着物联网和人工智能在智能家居领域的应用, 智能家居具备了主动交互能力. 针对智能家居主动交互平衡信息传递和用户体验的问题, 提出面向智能家居系统主动交互设计策略. 首先, 通过文献研究总结了智能家居系统主动交互的发展现状, 将其总结为 3 个特征, 即交互策略逐步采用自适应场景模式、交互通道逐步转向多模态和交互程度逐步呈现低干扰度, 为策略设计提供了理论支撑; 其次, 梳理出智能家居场景要素和不同交互模态干扰度等级, 并提出了在不同场景的任务下智能家居对应的主动交互策略; 最后, 采用“绿野仙踪”方法在自行搭建的实验场景下进行实验, 并以 SUS 量表和 USE 问卷作为评价指标, 验证了所提策略的可用性和满意度. 此外, 构建了智能家居不同场景与主动交互干扰度的对应关系, 以为后续研究提供参考.

关键词: 智能家居; 主动交互; 设计策略; 用户体验

中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2023.20049

Research on Proactive Interaction Design for Smart Home System

Ge Sen¹⁾, Lu Yi^{1)*}, Zhang Yinshuai²⁾, Zhou Lejia¹⁾, and Wang Xiaoye¹⁾

¹⁾ (College of Art and Design, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

²⁾ (Ding (Beijing) Intelligent Technology Co. Ltd, Beijing 100193)

Abstract: With the application of internet of things and artificial intelligence in the field of smart home, smart home has the ability of active interaction. Aiming at the problem of balancing information transmission and user experience in active interaction of smart home, a design strategy for active interaction of smart home system is proposed. Firstly, through literature research and summary, this paper summarizes the development status of the active interaction of the smart home system, and summarizes it into three characteristics: the interaction strategy gradually adopts the adaptive scene mode, the interaction channel gradually shifts to multi-modality, and the degree of interaction gradually presents low disturbance, which provides theoretical support for the strategy design. Secondly, sort out the scene elements of smart home and the level of disturbance of different interaction modes, and propose the corresponding active interaction strategy of smart home under the tasks of different scenes. Finally, the “Wizard of Oz” method is used to conduct experiments in the experimental scene built by ourselves. Using the SUS scale and the USE questionnaire as evaluation indicators, the usability and satisfaction of the proposed strategy are verified. In this paper, the corresponding relationship between different scenarios of smart home and the degree of active interaction disturbance is constructed to provide reference for follow-up research.

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-12-03. 基金项目: 国家社科基金后期资助项目(19FYSB041)儿童交互产品设计. 盖森(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为人机交互设计; 鲁艺(1983—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 论文通信作者, 主要研究方向为交互设计、智慧教育、用户体验设计, CCF 会员, CCF 人机交互专业委员会执行委员, 主要研究方向为智能人机交互系统; 张印帅(1993—), 男, 硕士, CCF 会员, CCF 人机交互专业委员会执行委员, 主要研究方向为智能人机交互系统; 周乐甲(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为人机交互设计; 王晓烨(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为交互设计.

Key words: smart home; proactive interaction; design strategy; user experience

在人工智能(artificial intelligence, AI)和物联网(internet of things, IoT)技术赋能智能家居的背景下,智能家居从以往的单个产品逐渐形成可互联互通的智能家居系统网络,家庭中的智能设备可实现相互控制及信息传递。智能家居也逐渐呈现更智能和更人性化的特征。同时,随着自动化系统的不断应用,机器或系统将能够主动地承担部分人类的任务和工作^[1]。这种情况下,机器或系统可以拥有更多的主动权,以应对不同情况^[2]。主动性响应也被视为 AI 设备智能性体现的重要表征^[3]。百度智能机器人通过情境感知技术识别用户,当用户走近小度机器人时,会触发其主动迎宾接待功能。梅赛德斯-奔驰第3代 MBUX Hyperscreen 的人车交互系统,可以根据用户的使用习惯,与实际环境场景结合,主动向用户提供信息娱乐、舒适功能和车辆功能等个性化建议。智能产品正在由被动交互向主动交互过渡,主动交互通过大数据和深度学习等技术,在人与机器双向交互的过程中,可使机器或系统的智能程度提高^[4]。

1 相关工作

1.1 交互策略逐步采用自适应场景模式

Ha 等^[5]提出的智能家居中某一设备通过传感器感应和云端数据分析等,可凭借 IoT 来控制其他设备响应的过程是通过智能家居场景感知来实现的。场景感知是人工智能、云计算和 IoT 的融合技术,机器学习和 AI 的深度学习可以应用于场景分类和下一个场景预测^[6],以通过主动交互提供自适应用户行为和提供符合用户习惯的服务。鉴于人们的居家行为与活动存在复杂性和不确定性,目前智能家居主动交互是设备之间的开启/关闭,无法体现智能家居的智能化和人性化。浦贵阳等^[7]提出目前智能家居场景的组成元素只有设备,未能实现根据人与空间位置关系下发服务和消息,以及不同场景和设备的相互协同。

华为的分布式软总线技术提供了统一的分布式通信能力,智能设备通过 wifi、蓝牙和 Zigbee 等实现互联互通,可以为用户提供连续的场景交互体验。例如,用户运动后,运动器材可将用户的运动数据同步给冰箱,冰箱可推荐出体力恢复和营养补充的相关菜谱。Son 等^[8]提出主动响应式交互是将用户需求映射到系统构建的场景模型中,

根据场景的变化来提供自适应用户需求的服务。Li 等^[9]提出了基于对象和相关属性的家庭上下文建模方法,通过制定规则策略和模式控制的交互设计,将其来应用于智能家居的 IoT 场景。Non-Alisavath 等^[10]开发了一个上下文场景感知应用程序,通过传感器测算出用户与位置和时间的关系控制家庭中灯光开关,以实现智能家居与人的交互。通过对相关学者和案例的分析研究,智能家居的主动响应和交互策略应针对不同场景采取自适应模式。

1.2 交互通道逐步转向多模态

目前,智能家居中的设备控制连接一般以通过嵌入集中的平台实现统一控制。集控平台主要以智能语音助手、中控显示屏和移动终端等形式实现与人的交互。例如,米家、homekit 通过智能语音助手小爱同学、Siri 等与用户进行智能对话。然而,中控显示屏和智能语音助手均存在一定的局限性,由于中控显示屏固定在家庭的具体位置,虽允许远程语音交互,但在识别性和易用性存在一定缺陷。因此,针对智能化语音产品交互,刘志国等^[11]提出智能音箱的交互方式存在诸多问题,若仅依靠听觉通道的交互方式,则信息呈现性弱,用户对设备的可控制差且使用场景局限性大。

针对单通道交互信息承载量低的问题,牛红伟等^[12]提出交互通道应从单模态转为多模态。邵帮丽等^[13]提出了一种应用于智能家居的融合语音与手势的多模态交互方法,该方法能够形成模态信息之间的互补性。此外,刘志国等^[11]指出,随 AI 等技术发展,基于语音、视觉和手势等多感官通道的多模态交互是未来高端智能设备的发展必然。

1.3 交互程度逐步呈现低打扰度

不同状态的用户对智能设备主动交互的态度存在差异。主动交互虽可提供有用信息,但对于正在进行连续工作的用户而言,主动交互或成为存在中断风险的打扰行为^[14]。除中断风险外,信息过载、重复提醒等也被视为一种过分打扰用户的行为。上述问题将严重影响智能家居的用户体验。针对智能家居以何种程度的主动交互进行,以平衡信息并有效地传递和低打扰用户,以保证用户在交互过程中有良好的用户体验。赵颖等^[15]对智能音箱构建了5种不同执行程度的主动交互模型,通过实验数据得出用户满意度最高的是用户在进行高度紧急任务时,设备执行任务前请求用户同意模型;用户满意度最低的是低度紧急任务下,设备

直接执行任务模型。

相关研究表明,智能家居主动交互程度与家庭任务的属性存在一定联系,主动交互程度针对不同任务属性有所改变,但应在较低打扰度的基础上进行,以保证智能家居良好的用户体验。

上述内容对研究智能家居主动交互具有一定的指导意义。本文将探讨基于场景感知、多模交互和低打扰度与智能家居主动交互的关系,构建智能家居主动交互策略。

2 本文策略

智能家居场景感知与主动交互是 AI 和 IoT 等技术的外化表现,智能家居系统中设备之间的互联互通可通过 IoT 实现;在此基础上, AI 技术介入、设备之间通过算法等实现场景的识别判断,并将相关信息通过主动交互下发给用户。即当场景 1 的设备完成既定任务时,可通过场景 2 的设备向用户发起提醒。但在不同的场景中,智能家居主动交互带给用户的体验效果不同。例如,当用户在工作场景时,智能家居将工作相关设备或内容主动交互于用户,这将为用户带来节约时间成本、提高工作效率等便利。若用户在休闲场景时,智能家居主动交互或将成为是一种打断用户的打扰行为。因此,主动交互应根据场景属性的变化来进行策略性的改变。

本文将从分析智能化场景要素出发,定义智能家居场景,并结合多模主动交互,构建用户注意力影响打扰度等级,进而定义智能家居不同场景下的主动交互设计策略。

2.1 交互策略逐步采用自适应场景模式

2.1.1 智能家居场景要素提取

对于智能化语境下的场景定义和分析,李华君等^[16]提出场景感知包括对用户所处物理空间和用户个人属性信息的线下场景以及用户网络虚拟特征的线上场景的感知。Lohmann 等^[17]对场景模型进行了分类,包括角色、任务、位置、时间和设备,并就增强应用程序对最终用户的适应性进行了研究。Chen^[18]认为,在智能空间的背景下,场景感知为计算机系统提供了一种自动推理用户状况的方法,因此,其允许系统预测用户的需求,代表用户采取行动,并提出在智能空间系统中,用户定位、用户身份、用户意图是研究中常用的情境信息。

在智能家居背景下,场景要素包括 4 个基本点,即用户、空间、设备和任务,如图 1 所示。即

谁在什么空间位置中在用什么设备在进行什么动作。其中,用户包括客观用户与编码用户,空间包括物理映射空间与地理围栏空间,设备包括管理设备与应用设备,任务包括娱乐、起居和休息等任务。利用场景要素确定主动交互作用设备和交互方式等的关键信息,可为 AI 和 IoT 技术对智能家居设备之间的互联、互动建立前提基础,防止主动交互因打扰用户、执行错误等原因带来差的用户体验。

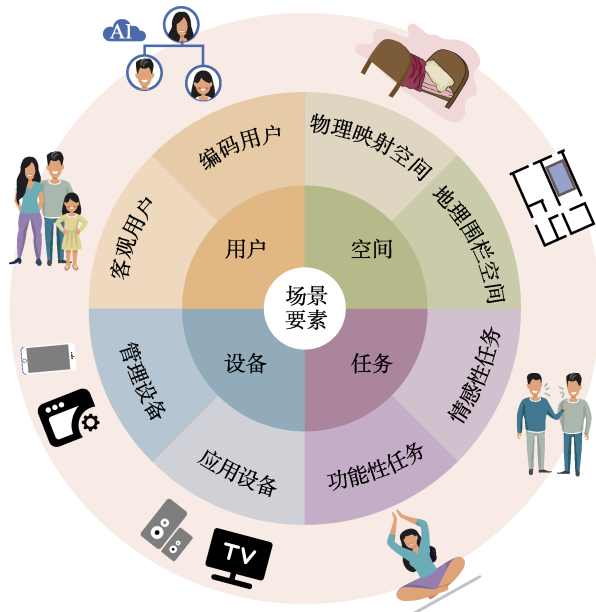


图 1 主动交互场景要素

2.1.2 场景任务分类及优先级划分

场景要素中的空间和设备是主动交互所作用设备的决定因素,用户和任务则是交互方式的决定因素。本文将用户正在进行的任务定义为主任务,非正在进行的任务定义为次任务。当次任务的关键节点(开始/结束)涉及相关设备开关时,需向主任务发起主动交互。次任务与主任务的优先级排序,决定了次任务以何种交互方式发起。

任务的优先级需要根据任务类型进行定性分析。有学者将人在家中的状态分为专注状态和放松状态。王尔卓等^[19]在居家场景中从专注和放松 2 种状态进行模拟日常起居任务。基于前文论述,其显性表征是用户通过智能家居设备进行各项工作、娱乐和起居等(非)专注任务,隐性反应是智能家居设备或通过网络(上)下载数据反馈给用户,各设备之间通过协议平台进行互联、互传数据,但在此过程存在一定的安全风险。王基策等^[20]提出智能家居在平台、设备和通信方面存在安全问题,包含智能家居设备联动、设备访问和网络流量等方面。安

全是智能家居的基础,一切服务与体验均是建立在安全之上。用户在进行各种任务时,网络和数据等相关排查、检测、阻止和抵抗等安全任务也在实时进行。

本文将居家任务分为安全任务、专注任务和非专注任务3类,同时给出3类任务优先级依次降低的定义。

2.2 多模主动交互干扰度分级

2.2.1 不同模态对注意力影响

交互模态的选择应根据场景进行变化,不同优先级场景任务主动交互时,需根据用户所进行任务的专注度选择不同干扰程度的交互模态。因此,需了解各个模态对人注意力资源的占有情况。

葛小立等^[21]指出,由于大脑的注意资源有限,视听2种模态在获取信息形成认知时存在资源争夺现象。因此针对视听双通道和视听单一通道2种情况,研究大脑对信息认知的影响。当视听双通道收到同一事物信息时,大脑会增加对该信息认知的准确性。在单一通道时,Wada等^[22]研究时间域下视听整合时,得出视觉判断时受声音变化影响大,声音判断时受视觉变化影响小的结论。此外,Bizley等^[23]通过实验研究指出,听觉皮层内的神经元可传递大量由视觉刺激引起的信息。因此,在大多数情况下,听觉模态较视觉模态对大脑获取和认知信息作用更强,在视和听单模态下,大脑的注意资源分配更侧重于听觉模态。

2.2.2 干扰度等级划分及分类

基于第2.2.1节不同模态对注意力占有的分析,本节构建不同干扰等级的主动交互模型,应用于不同场景任务之间的反馈形式。鉴于家居设备在应用触觉模态或会引起安全事故,暂不引入触觉模态。本文划分并定义的干扰度等级如表1所示。

表1 干扰度等级

干扰度等级	对应模态	交互形式
L_1	听觉+视觉	Voice User Interface+Graphical User Interface
L_2	听觉	VUI
L_3	视觉	GUI
L_4		静默

2.3 智能家居主动交互设计策略

针对智能家居的主动交互策略,将通过场景要素识别来分析设备开启情况和任务优先级情况,进而确定主动交互下发的模态。具体策略如图2所示。通过次任务与主任务的交叉关联得到5种信息传递模型:同级传递、次级传递(高-低)、次级传递(低-高)、两级传递(高-低)以及两级传递(低-高)。其中,同级传递,即主任务为同一优先级;次级传递,即主任务相差一个优先级,当次任务低于主任务优先级时映射到低-高,反之,映射高-低;两级传递,即主任务为优先级极值之间的传递,低-高与高-低逻辑服用次级传递。

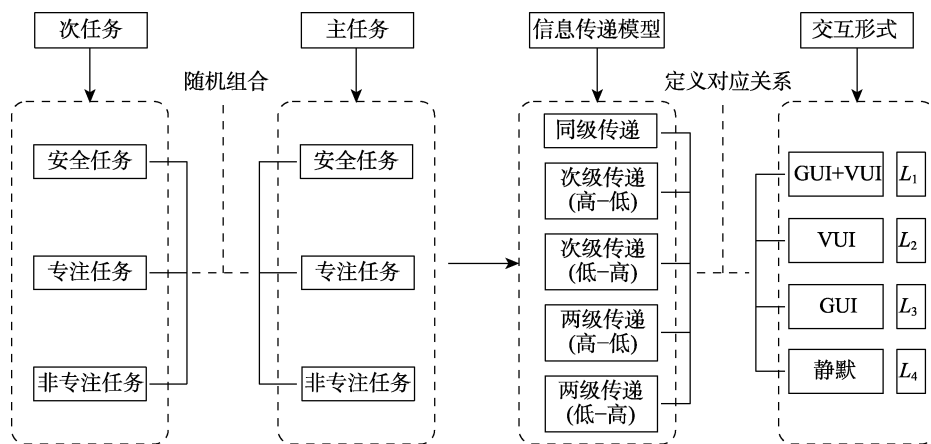


图2 主动交互策略

图2中,信息传递模型与交互形式的对应关系如下定义:同级传递采用 L_4 :静默;次级传递(高-低)采用 L_2 :VUI;次级传递(低-高)采用 L_3 :GUI;两级传递(高-低)采用 L_1 :GUI+VUI;两级传递(低-高)采用 L_4 :静默。

2.4 智能家居主动交互设计流程

与传统的家居产品相比,智能家居在拥有先进技术的加持下,表现出更智能、更主动和更前置的特点。因此,其将区别于以往的交互方式,本文对智能家居交互流程进行了如图3所示的梳理。

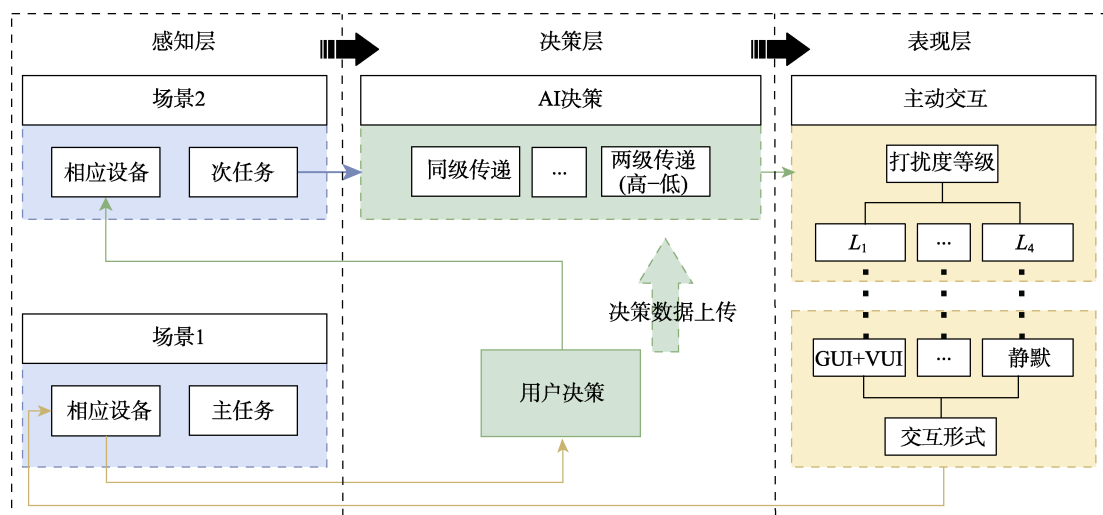


图 3 智能家居交互设计流程

感知层通过传感器和网关等对智能家居相关设备数据进行采集,包括次任务中涉及相关设备的工作情况及主任务中涉及相关设备的开关情况。决策层为交互流程中的关键要素,由 AI 和人共同作用,其通过深度学习和数据算法等对感知层的任务进行仲裁判断,进而确定信息传递模型。AI 提供的决策是智能家居主动交互的一个环节,最终任务执行的决定权归用户所有;同时,用户的决策将会被记录并上传至云端,通过用户的每次反馈形成数据池,以优化智能家居主动交互的频次和形式。表现层通过决策层的判断推送,选择定义的交互形式向主任务涉及设备下发相关内容。

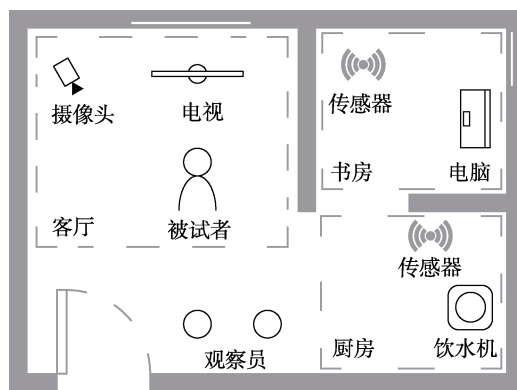


图 4 实验场地布局

本文设计了 3 个实验,对应 6 项任务,如表 2 所示。

3 实验

为了验证智能家居主动交互策略的可用性,本文采用“绿野仙踪”方法进行了实验,并采用系统可用性量表(system usability scale, SUS)和易用性量表(usefulness, satisfaction, and ease of use, USE)问卷作为评价指标。

3.1 实验场地及工具

为了更好地模拟用户居家场景,本次实验搭建了如图 4 所示客厅、书房和厨房 3 个居家区域;其中,包括电视、电脑、饮水机和其他家具产品。实验记录通过 1 个摄像设备以及 2 名实验观察员。

3.2 被试及实验任务

本次可用性测试共招募被试 20 名(10 名男性,10 名女性),年龄范围 18~42 岁(均值为 27.9,标准差为 6.39),被试者均来自北京市,职业包括教师、工程师、商务人员和学生等,被试者均有智能家居产品使用经验,教育背景为本科及以上。

表 2 实验任务

实验序号	任务	空间	设备	交互形式
1	打游戏	客厅	手机+电视	L_3
	烧水	厨房	饮水机	
2	打游戏	客厅	电视	L_2
	流量监控	客厅	电视	
3	休闲娱乐	客厅	电视	L_1
	文档访问	书房	电脑	

实验 1. 使用者在厨房区域烧水(非专注任务),然后使用者回到客厅区域使用手机投屏至电视进行游戏(专注任务)。当厨房区域烧水完毕时,系统向客厅区域电视发起主动交互。

实验 2. 使用者重复游戏此项专注任务,随后系统通过监控平台进行流量监测(安全任务),告知使用者流量不足以支持使用者进行第 2 场游戏,并在电视发起主动交互。

实验 3. 使用者在书房区域通过电脑在文档中

整理数据, 然后回到客厅区域使用电视随意浏览(非专注任务), 系统进行安全监测, 随后告知使用者有陌生用户申请文档访问权限, 并在电视发起主动交互。

以实验3为例, 图5和图6所示分别为实验关键性因素梳理和交互脚本设计。

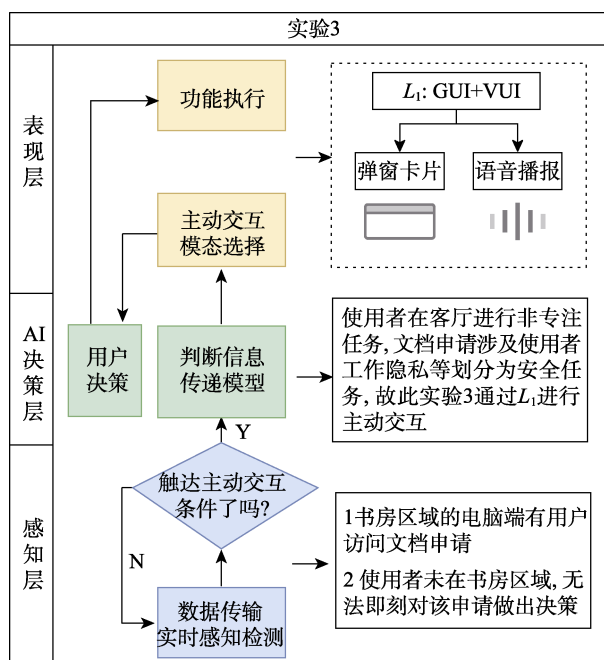


图5 信息梳理

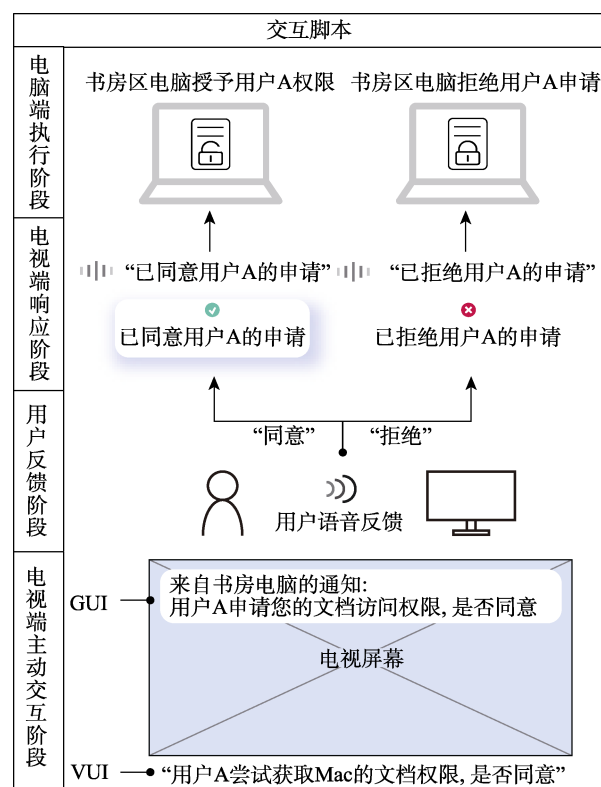


图6 交互脚本

3.3 实验结果与讨论

3.3.1 实验结果

被试者在使用原型完成实验任务后, 完成SUS量表和USE问卷的填写, 收回有效的实验数据SUS量表19份, USE问卷20份。

(1) 系统可用性检验

SUS量表共包含10题, 奇数题为正向项目, 偶数题为负向项目, 评分项从非常反对到非常同意, 分值依次从1~5分。奇数题得分记为 K_{2i-1} , 偶数题得分记为 K_{2i} ($i=1, 2, 3, 4, 5$), SUS总分记为

$$S_{\text{SUS}} = \left(\sum_{i=1}^5 (K_{2i-1} - 1) + \sum_{i=1}^5 (5 - K_{2i}) \right) \times 2.5 \quad (1)$$

通过式(1), 计算每名被试者关于智能家居系统主动交互方案的评分。本文通过数据统计分析, 得到本次实验方案的系统可用性平均值为79.23分。根据SUS等级划分, 智能家居系统主动交互处于高等级, 说明该系统具有较高的可用性。

(2) 主动交互策略满意度检验

USE问卷中第4项满意度内容作为本阶段的检测标准, 评分项从非常反对到非常同意, 分值依次为1~7分。问卷数据包括各个实验情境下主动交互策略的满意度。如图7所示, 实验1~实验3的满意度依次为5.58, 5.15和4.40, 各项满意度均值排序为实验3>实验2>实验1。

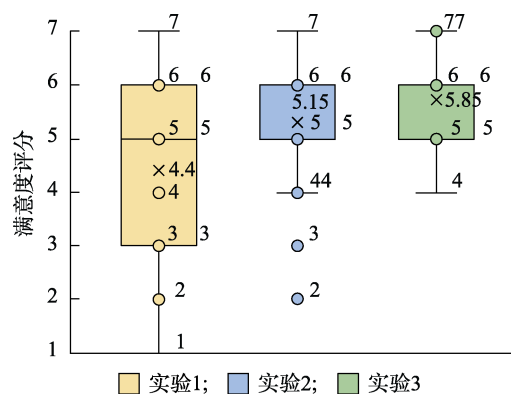


图7 满意度评分

3.3.2 讨论

由实验数据得出, 智能家居主动交互系统可用性和满意度较好, 但是度量3组实验主动交互策略满意度时可发现, 实验1策略的满意度低于实验2与实验3的满意度, 数据分布更加离散。在实验1~3分的被试者中, 6号(男, 24岁)、7号(男, 18岁)和13号(男, 22岁)均明确指出, 在进行游戏和需视觉关注的专注任务时, 不希望收到任何视觉性干扰, 但在6~7分的被试者中, 2号(女, 31岁)和20

号(女, 26 岁)表示, 主动交互有助于其记起刚做过的任务. 实验 1 出现该情况或与用户的性别与年龄段和用户所进行专注任务类型有关.

在与用户访谈过程中, 得出用户期望: (1) 居家任务优先级可进行自定义设置, 如被试者 3 号表示“任务优先级的逻辑判断, 需要根据我的个人习惯进行自定义设定”; (2) 主动交互时机和频次可以根据用户习惯进行更改, 如被试者 11 号表示“我希望这次做的决策, 系统记住我的操作, 下次直接进行”.

4 结 语

本文基于智能家居系统主动交互发展现状, 提取智能家居主动交互场景要素, 建立不同场景之间信息传递与交互模态选择的联系. 通过实验得出智能家居系统主动交互具有较高的可用性, 总体满意度良好, 并发现不同用户对交互策略的满意度有明显差异.

受限于时间与成本, 本文也具有一定的局限性, 例如, 在多模交互方面, 除视听模态外, 其他模态, 如何将触觉模态应用于智能家居主动交互中. 在实验方面, 如何还原真实的居家场景以及更全面地度量用户体验. 上述问题均被列入后续研究计划, 在下阶段进一步完善.

参考文献(References):

- [1] de Visser E J, Pak R, Shaw T H. From ‘automation’ to ‘autonomy’: the importance of trust repair in human-machine interaction[J]. *Ergonomics*, 2018, 61(10): 1409-1427
- [2] Shively J. Remotely piloted aircraft systems panel (RPASP) working paper: autonomy and automation[R]. Moffett Field: NASA Ames Research Center Moffett Field, 2017
- [3] Rafferty L, Iqbal F, Aleem S, *et al.* Intelligent multi-agent collaboration model for smart home IoT security[C] //Proceedings of the IEEE International Congress on Internet of Things. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 65-71
- [4] Qin Jingyan, Chen Zhibo, Zhang Wenhao, *et al.* Active interaction design of family intelligent products[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(20): 67-73(in Chinese)
(覃京燕, 陈智博, 张文昊, 等. 家庭智能产品的主动交互设计研究[J]. *包装工程*, 2019, 40(20): 67-73)
- [5] Ha N, Kim J S, Lee K Y. Technologies for personalized ambient intelligence based on 4 situational context awareness[C] //Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology Convergence. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2019: 489-493
- [6] Yachir A, Amirat Y, Chibani A, *et al.* Event-aware framework for dynamic services discovery and selection in the context of ambient intelligence and internet of things[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 10(1): 85-102
- [7] Pu Guiyang, Sun Hongchun, Wang Yalai, *et al.* Design of six-domain scene model system for smart home[J]. *Technology of IoT & AI*, 2020, 3(6): 31-34+50(in Chinese)
(浦贵阳, 孙红春, 王亚莱, 等. 智能家居的六域场景模型系统设计[J]. *智能物联技术*, 2020, 3(6): 31-34+50)
- [8] Son J Y, Park J H, Moon K D, *et al.* Resource-aware smart home management system by constructing resource relation graph[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(3): 1112-1119
- [9] Li M B, Wu Y. Intelligent control system of smart home for context awareness[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2022, 18(3): 15501329221
- [10] Non-Alisavath K, Kanthavong S, Luangxaysana K, *et al.* Context-awareness application to control multiple sensors for monitoring smart environment[C] //Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 920-923
- [11] Liu Zhiguo, Lu Xiaobo, Shi Minghong. Taking the interactive limitations of smart speakers as an example to illustrate the characteristics of “combined action interaction”[J]. *Art & Design*, 2020(2): 74-77(in Chinese)
(刘志国, 鲁晓波, 施明鸿. 以智能音箱的交互局限为例阐述“复合式交互”的特性[J]. *装饰*, 2020(2): 74-77)
- [12] Niu Hongwei, Hao Jia, Cao Beining, *et al.* Multimodal intelligent interaction framework and realization for product conceptual design[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(8): 2508-2521(in Chinese)
(牛红伟, 郝佳, 曹贝宁, 等. 面向产品概念设计的多模态智能交互框架及实现[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(8): 2508-2521)
- [13] Shao Bangli, Zhu Yin, Zhu Run, *et al.* Multi-modal man-machine intelligent interaction approach for smart home equipment control[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, 6(4): 190-196(in Chinese)
(邵帮丽, 朱寅, 朱润, 等. 一种面向智能家居设备控制的多模态人机智能交互方法[J]. *林业工程学报*, 2021, 6(4): 190-196)
- [14] Liao Q V, Davis M, Geyer W, *et al.* What can you do?: studying social-agent orientation and agent proactive interactions with an agent for employees[C] //Proceedings of ACM Conference on Designing Interactive Systems. New York: ACM Press, 2016: 264-275
- [15] Zhao Ying, Tan Hao, Zhu Min, *et al.* User satisfaction of proactive interaction behavior of intelligent speakers[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(14): 224-229(in Chinese)
(赵颖, 谭浩, 朱敏, 等. 智能音箱主动交互行为的用户满意度研究[J]. *包装工程*, 2021, 42(14): 224-229)
- [16] Li Huajun, Zhang Zhipeng. New user experience of digital publishing in artificial intelligence era: scene perception, scene production and entrance control[J]. *Publishing Research*, 2019(5): 17-21(in Chinese)

- (李华君, 张智鹏. 人工智能时代数字出版的用户新体验: 场景感知、场景生产与入口把控[J]. 出版发行研究, 2019(5): 17-21)
- [17] Lohmann S, Kaltz J W, Ziegler J. Model-driven dynamic generation of context-adaptive web user interfaces[C] //Proceedings of the International Conference on Models in software Engineering Languages and Systems. Heidelberg: Springer, 2006: 116-125
- [18] Chen H. An intelligent broker architecture for pervasive context-aware systems[D]. Maryland: University of Maryland, 2004
- [19] Wang Erzhuo, Yuan Xiang, Li Shiyan. Proactive interaction design of conversational agent for smart homes[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(4): 658-666(in Chinese)
(王尔卓, 袁翔, 李士岩. 智能家居场景中会话智能体主动交互设计研究[J]. 图学学报, 2020, 41(4): 658-666)
- [20] Wang Jice, Li Yilian, Jia Yan, *et al.* Survey of smart home security[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(10): 2111-2124(in Chinese)
(王基策, 李意莲, 贾岩, 等. 智能家居安全综述[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(10): 2111-2124)
- [21] Ge Xiaoli, Li Xuan, Hong Xiangfei, *et al.* Review of audio-visual cross-modal interaction[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2011, 30(4): 431-434+440(in Chinese)
(葛小立, 李璇, 洪祥飞, 等. 视听跨模态交互作用的研究现状[J]. 北京生物医学工程, 2011, 30(4): 431-434+440)
- [22] Wada Y J, Kitagawa N, Noguchi K. Audio-visual integration in temporal perception[J]. International Journal of Psychophysiology, 2003, 50(1/2): 117-124
- [23] Bizley J K, King A J. Visual-auditory spatial processing in auditory cortical neurons[J]. Brain Research, 2008, 1242: 24-36