基于实体交互的压感接通电路式教育产品设计与开发

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.05.009

别一飞　田宇飞　钱　俊

武汉大学
护理学院
湖北　武汉　430071

摘　要：实体交互的关键在于准确追踪和识别物理实体的位置和身份 ID，但现有的方法存在技术成本高或对环境因素要求苛刻等问题。为此，提出了一种压感接通电路式交互模式，并开发了一款名为 FaceON 的压感接通电路式教育产品，采用三层覆合矩阵式电路结构结合 PCB 控制模块，通过行列扫描法实现点位 ID 信号的识别与读取记录。该方案具有成本低、运行稳定的特点，支持拼接、点按和绘画等游戏功能，学习纸张可灵活更换，增强了产品的可持续性和教育应用潜力。对该产品进行教师可用性和儿童互动体验两项实验研究，证明了其在教育领域具有潜在的应用前景，能够有效地提升儿童的学习兴趣和认知能力。

关键词：实体交互；压感接通电路；儿童教育

中图分类号：TS951　　**文献标志码**：A

文章编号：1674-7100(2024)05-0063-09

引文格式：别一飞，田宇飞，钱　俊 . 基于实体交互的压感接通电路式教育产品设计与开发 [J]. 包装学报，2024，16(5)：63-71.

1　研究背景

信息技术的发展给社会生产和生活带来了巨大的变化，其中学前教育信息化的发展备受关注。实体交互通过操纵物理对象与数字信息进行互动 [1]，综合调用了学习者的多种技能，为学习者提供了一种直接和自然的互动形式。旨在提升儿童学习水平的实体交互产品逐渐成为重点的实践与研究对象 [2-3]。研究表明，实体交互可用于几何训练 [4]、颜色匹配 [5]、科学活动 [6]、计算机编程 [7] 等学习活动。通过操作具体的物理对象，不仅能够满足游戏性学习环境的需求，还能够提高儿童的思维和空间技能 [8-9]。

实体交互中的核心挑战是如何准确地追踪和识别物理实体的位置和身份 ID。针对这一问题，已经涌现出多种技术和策略，这些方法不仅涉及到硬件设计，还包括算法和软件的优化。一类是基于射频识别（radio frequency identification，RFID）技术的位置识别方法，通过为每个识别块配备 RFID 标签，并使用 RFID 阅读器读取标签信息来确定块的位置。例如，StoryTech[10] 是一种以计算机为媒介的玩具，它提供了一个混合现实环境，通过将实体毛绒玩具和背景卡与内部的 RFID 系统相结合，培养儿童的讲故事能力。K. Sorathia 等 [11] 开发了利用 RFID 来辅助学习流程图和算法的实体交互产品，实现对物理块的定位和身份判断，并给出指示灯光反馈。这些方案使用了有标签的物体和识别系统，并与移动端的应用程序集成，但技术成本较高，在一定程度上限制了其广泛应用和

收稿日期：2024-06-13

作者简介：别一飞（1999-），女，山东潍坊人，武汉大学硕士生，主要研究方向为柔性印刷电子，
E-mail：1362521882@qq.com

通信作者：钱　俊（1971-），男，湖北孝感人，武汉大学教授，博士，主要从事柔性印刷电子和新型包装印刷材料研究，
E-mail：whuqianjun@163.com

商业化的潜力。

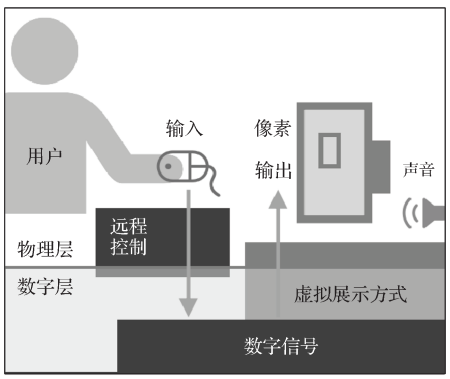
另一类是基于光学标记的位置识别方法，该方法是在每个识别块上设置独特的标记，然后通过摄像头捕捉这些标记的图像，再通过图像处理算法确定每个块的位置。例如，BlackBlocks 是为 4~8 岁儿童设计的语言和数学学习实体交互产品 [12]，通过与电脑软件和 reacTIVision 框架结合，实现对积木块的识别和交互反馈。D. Mcgookin 等 [13] 开发了一种名为 Tangible Graph Builder 的实体交互产品，允许视觉受损用户通过触觉和听觉方式访问和构建图表数据。该方法需要使用特定的设备并且依赖摄像头进行 3D 空间的渲染和对象的追踪，因此环境光线、摄像头的角度和位置等因素可能会影响系统的准确性和可靠性。

为解决上述问题，本研究基于实体交互理念制作了一款名为 FaceON 的压感接通电路式教育产品。印制包含 100 个导电油墨按键点位的 3 层覆合矩阵式电路结构 [14]，结合印制电路板（printed circuit board，PCB）控制模块，通过行列扫描法，实现对点位 ID 信号的识别与读取记录。通过嵌入式系统开发，实现了低成本且稳定运行的拼接、点按和绘画等游戏功能，并且学习纸张可灵活更换从而开展更多的游戏玩法，拓展了产品的可持续性和教育应用潜力。选取“拼一拼比大小”作为演示案例，从按物点数和按数取物两个游戏模式帮助儿童学习数与量的对应，以及比较运算符的运用。最后，分别对教师和儿童进行了实验测试，验证 FaceON 的可用性和易用性以及在实际应用中的教育效果。

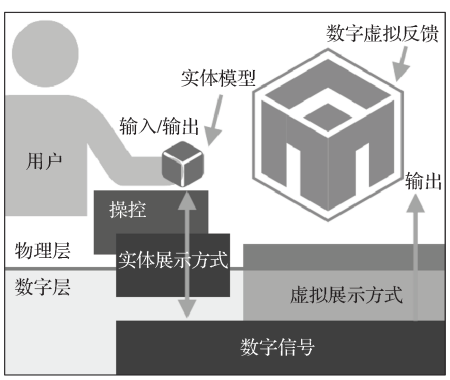
2 产品设计与开发

2.1 交互模式构建

实体交互是一种以物理实体为交互媒介的人机交互方式 [15]。实体交互为数字信息提供了物理形式的载体，用户可以通过物理组件与数字信息互动，从而提高协作、学习和设计能力 [16]。如图 1 所示，图形交互界面通过鼠标等设备进行信息输入，数字信息通过无具体形态的像素图像、声音等形式反馈。实体交互的实现形式通常将计算模块嵌入到实体物品中，使之具备一定的数据收集和处理能力，并将硬件形态和交互方式设计成与内容相适应的形式。实体交互的出现使得交互过程更加直观易懂，也更符合人类的自然行为习惯。



a）图形交互



b）实体交互

图 1 两种交互方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two interaction modes

儿童的认知发展与身体动作密切相关，其中手部动作在认知形成过程中发挥了关键作用。儿童通过拼接、点按和绘画等手部动作能够直观地感知物体的物理属性，从而建立对世界的基本认知。根据手部自然交互动作构建压感接通电路交互模式，通过物理压感操作实现对数字信息的控制。该模式利用物理压力改变电路状态（闭合或断开），从而触发数字世界的响应。在物理层面，导电油墨矩阵键盘作为核心组件，其点位受外力作用时发生接触变化；在数字层面，系统解析电路变化，记录身份与位置信息并执行相应操作。压感接通电路交互模式具体交互流程如图 2 所示。

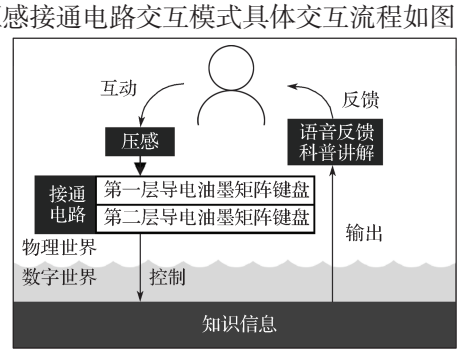


图 2 压感接通电路交互流程

Fig. 2 Interactive flow of pressure sensing circuit

2.2 产品整机装配

根据实体交互理念与压感接通电路交互模式，本研究设计并实现了一款名为 FaceON 的压感接通电路式教育产品，如图 3 所示。FaceON 由一个感应板、若干学习纸和图像卡组成。其设计理念是基于实体交互理念，强调学习者为主体的特性，旨在通过可触摸的物理组件和交互方式，让儿童能够亲身参与到学习过程中。根据知识构建需求，从实体交互的物理层、行为层、信息层以及反馈层这 4 个层面展开设计，如表 1 所示。

基于人机工程学原理，并参照《中国未成年人人体尺寸》中，3~6 岁儿童的人体尺寸参数，确定产品各部分尺寸，如图 4~6 所示。

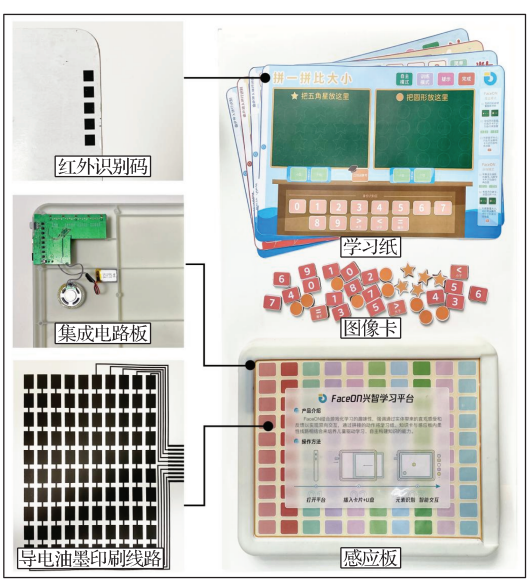


图 3 FaceON 整体设计

Fig. 3 FaceON overall design

表 1 FaceON 4 个层面的设计

Table 1 Design of the four FaceON layers

交互层面	知识构建需求	FaceON 设计
物理层	具体的物理实体、与认知能力相匹配、减少工具使用上的认知负担、提升使用意愿	感应板、学习纸、图像卡
行为层	调动知觉与运动技能、提高精细动作技能	拼接、点按、绘画
信息层	知识分析、归纳工具、降低用户思考负担、减少问题处理时间	交互矩阵键盘按键点位矩阵、儿童教育知识数据、红外编码信息、数据读取与处理
反馈层	多感官辅助表达、实时反馈	发声模块信息反馈

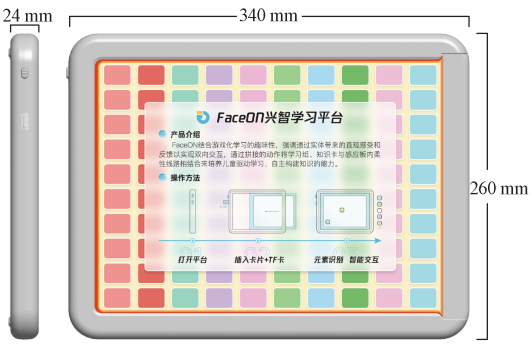
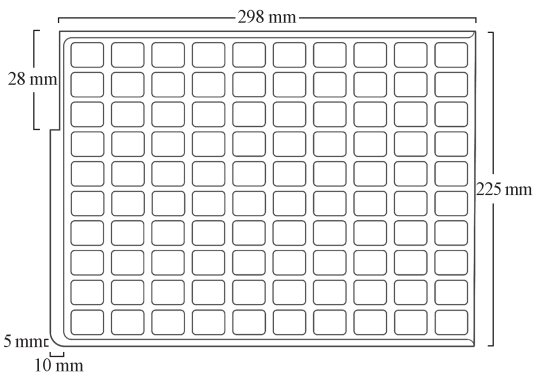


图 4 感应板尺寸规划

Fig. 4 Sensor plate size planning

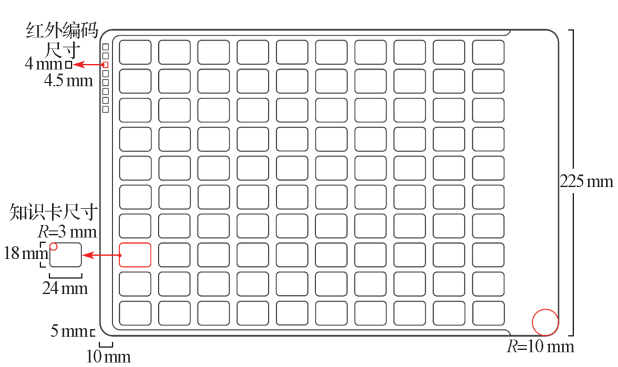


a）尺寸图

b）视觉图

图 5 感应板表面封装纸尺寸与视觉图

Fig. 5 Dimensions and visualization of the encapsulated paper on the surface of inductor plate



a）尺寸图

b）视觉图

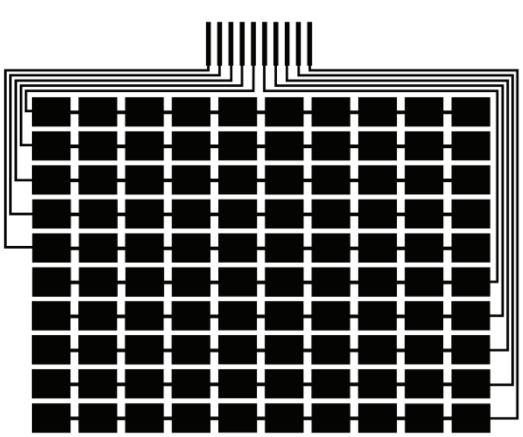
图 6　学习纸、图像卡尺寸与视觉图

Fig. 6　Study paper, image card sizes and visual diagrams

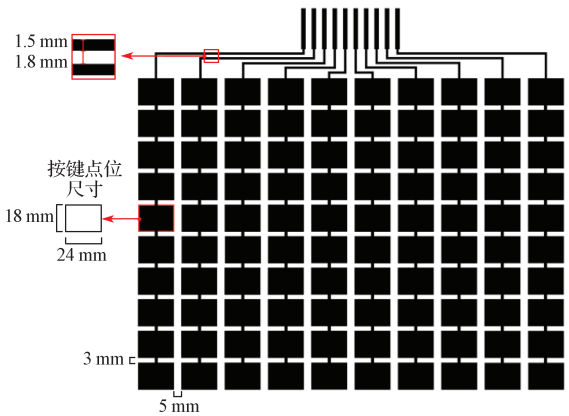
2.3　系统技术实现

2.3.1　印刷交互矩阵键盘按键点位矩阵规划

FaceON 感应板内交互矩阵键盘按键点位矩阵部分由导电油墨印刷，由 3 层构成，从上至下分层布置第一印刷线路、绝缘开孔层、第二印刷线路。拼接、点按、绘画等动作使上下两层电路接通，采用行列扫描法的 PCB 控制模能够识别和读取点位 ID 信号，从而使感应板内集成电路板处理电路信息，调动存储的知识信息对行为进行判断，通过语音芯片发出指令，实现多种玩法。在 FaceON 中，第一电路层和第二电路层均布局了 10 × 10 的二维按键点位阵列。绝缘层的开孔位置和尺寸需与第一电路层和即将施加的第二电路层精确对齐，确保在需要点对点信号传输的位置形成开口，而其余区域则维持封闭状态，以有效隔绝电流。如图 7 所示，制定按键点位尺寸并合理设置间距以避免短路，在绘制连接线路时考虑到丝网印刷技术的限制，确保设计符合印刷服务商的设备能力，最终选择最小线宽 1.5 mm，最小间距 1.8 mm。



a）布局图



b）尺寸图

图 7　交互矩阵键盘按键点位布局与尺寸图

Fig. 7　Layout and size diagram of key points on interactive matrix keyboard

2.3.2　印刷交互电路与控制模块连接设计

为确保硬件设计在成本和效能上均满足开发要求，采用 H05J51C 型号的主控制芯片电路关键部件，包括 LQFP48 封装的高密度引脚布局、行列检测与压感交互、红外识别电路的信号处理、TF 卡存储与音频解码、TP4054 芯片充电管理以及 LTK8002D 音频放大等功能模块。为实现教育游戏的多功能性，针对软件设计部分，采用符合 C51 语法的 C 语言编写程序，同时根据不同游戏的交互逻辑，在 keil 软件上进行程序编写，并将程序代码下载到主控芯片和 TF 卡中。采用红外识别以及交互电路 I/O 口传输信息来实现教育游戏的交互性，是程序的主体实现思路。将印有红外编码的学习纸插入 FaceON 感应板后，主控制芯片通过解析 8 位二进制红外信号来定位并执行特定的函数。系统通过行列扫描技术识别用户通过手部动作激活的 I/O 端口键值 ID，并依据预设逻辑调用相应的声音文件。所设计的以 H05J51C 为主控芯片控制板卡的电路原理图如图 8 所示，所对应的 PCB 主板电路图如图 9 所示。

2.4　游戏开发案例

学龄前儿童正处于认识世界和学习知识的关键时期，而数与运算是儿童认识世界和掌握知识的重要工具之一。与物体的直接交互可以促进儿童从具体概念向抽象概念认知的转变。选取“拼一拼比大小”作为开发案例，根据儿童计数能力发展的“口头数数－给物说数－按数取物－掌握数概念”顺序，游戏设计为自主模式和训练模式。游戏逻辑流程和视觉设计如图 10~11 所示。

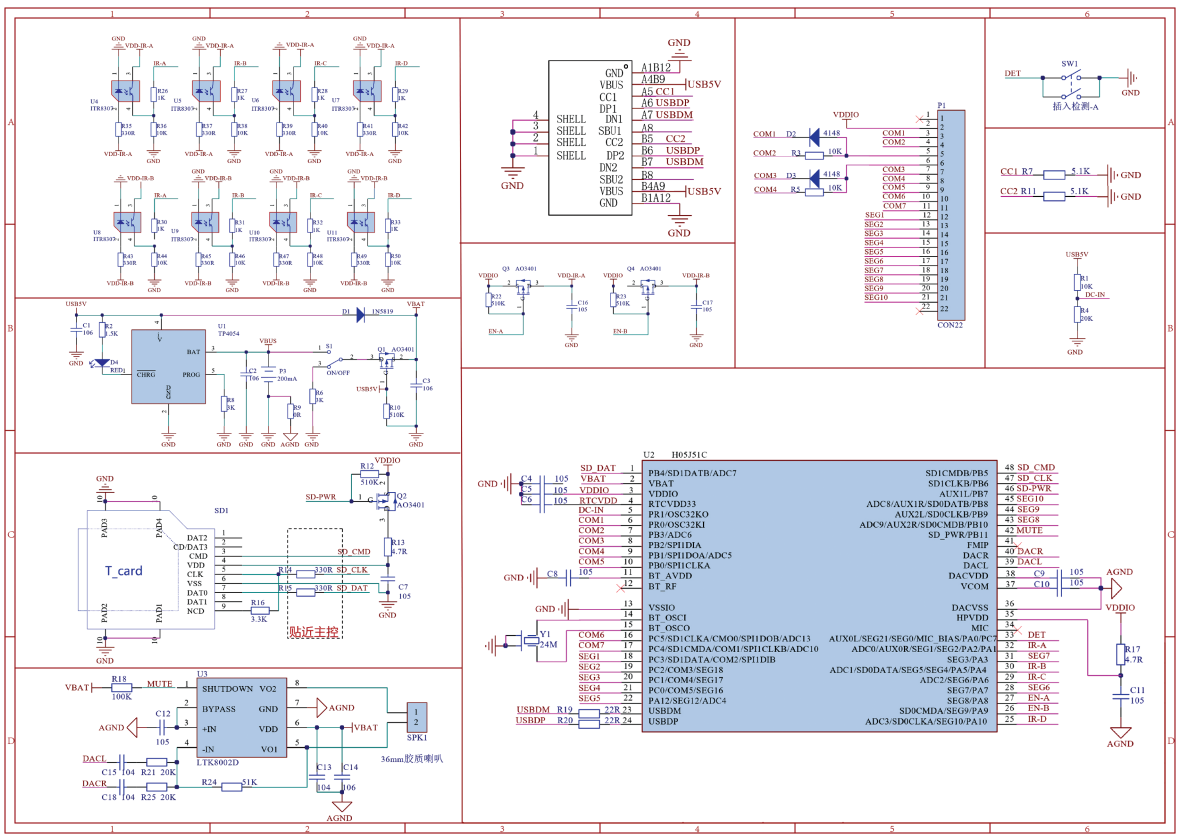
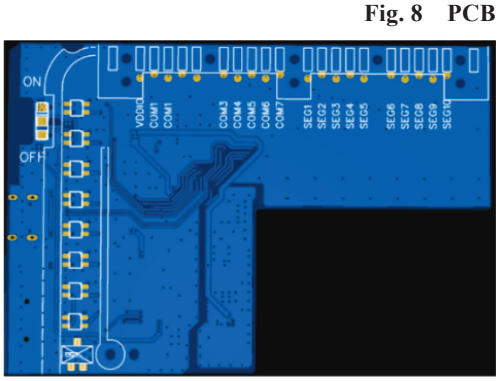
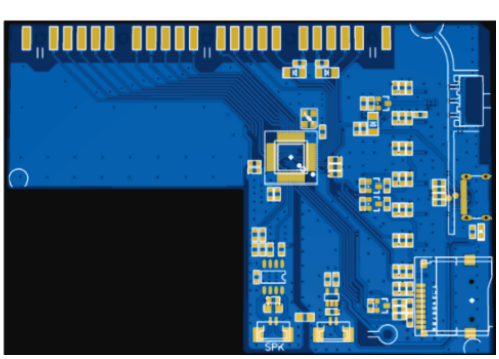


图 8　PCB 主板电路原理图

Fig. 8　PCB main board circuit schematic



a）正面



b）背面

图 9　PCB 主板电路图

Fig. 9　PCB main board circuit diagram

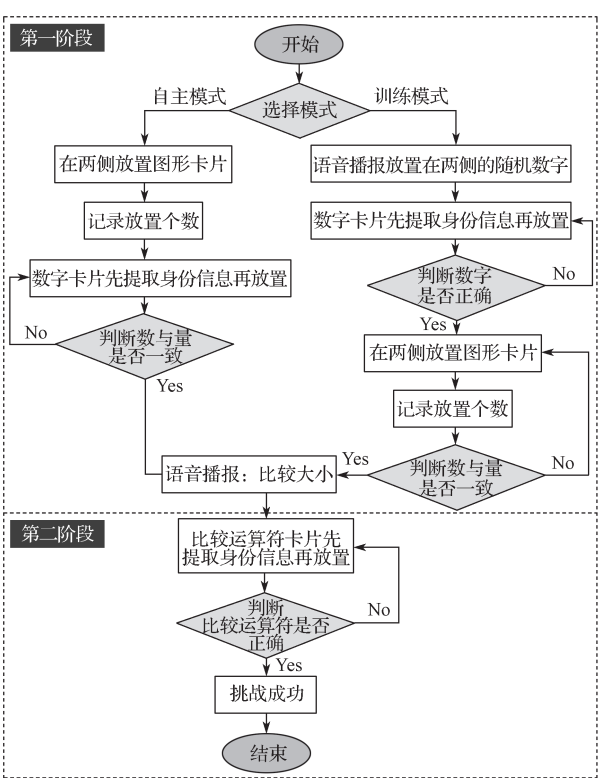


图 10　“拼一拼比大小”逻辑流程图

Fig. 10　Logic flowchart of “Compare the size of a puzzle”

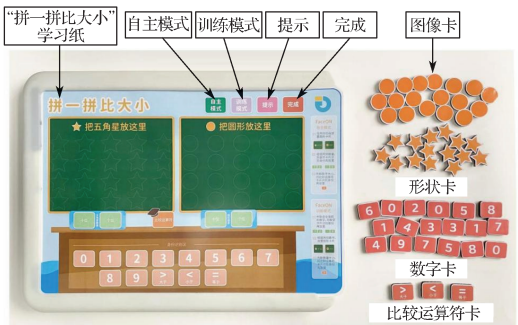
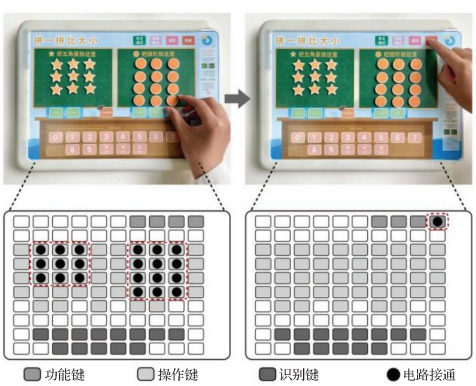


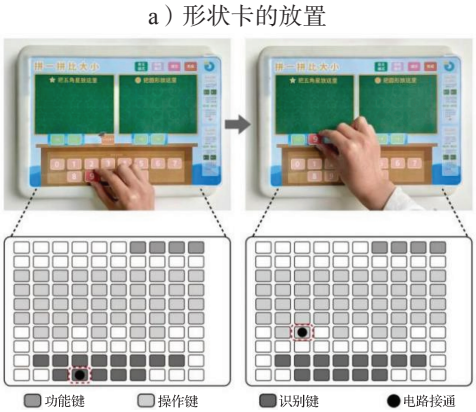
图 11 “拼一拼比大小”视觉设计图

Fig. 11 Visual design drawing of “Puzzle and Size”

对于图形卡片，系统只需要记录个数而不需要判断身份，所以每放置一个就记录一次信息，见图 12a。儿童在“操作键”区自由放置图形卡片，然后点击“功能键”区的“完成”。对于数字卡片和运算符卡片，需要赋予身份并判断是否正确，所以要将这类卡片先放在“识别键”区域进行身份赋予，再放置到“操作键”区域进行拼接学习，见图 12b。



a）形状卡的放置



b）数字卡和比较运算符卡的放置

图 12 判断识别接通电路

Fig. 12 Circuit on identification judgement diagram

3 用户体验与讨论

FaceON 主要基于建构主义的教育理念，探讨如何通过实体交互设计提升儿童的学习和认知能力。分别对教师和儿童进行实验，旨在探究以下两个问题：1）教师是否认为 FaceON 的设计对儿童有吸引力和可用性；2）儿童使用 FaceON 在不同难度等级下的学习表现，以及对这种交互方式的接受程度。

3.1 教师对产品可用性的评价与体验

本实验招募了幼儿教师 9 名，其中男性 2 名、女性 7 名。平均年龄 32 岁；平均工龄 7 年；专科学历 3 名，本科学历 6 名。所有教师均具有教授学龄前儿童的经验和传统教学工具的使用经历，但均未接触过实体交互产品。

实验开始前，先向教师们介绍了 FaceON 的设计理念及其使用方法，并提供相关的资料。随后，教师们进行了 FaceON 的首个活动“拼一拼比大小”，以体验其互动性。紧接着，研究者展示了 FaceON 的其他案例活动，让教师们全面把握该产品的各项功能与特性。

为了评估 FaceON 的可用性和用户体验，采用两种数据收集工具：系统可用性量表（system usability scale，SUS）[17] 和用户体验问卷（user experience questionnaire，UEQ）[18]。SUS 量表采用 5 点李克特量表，用以衡量教师对 FaceON 可用性的满意度。UEQ 问卷采用 7 点李克特量表，用以评估 FaceON 的总体体验。

SUS 量表的具体结果如图 13 所示，平均得分为 87.22 分（满分 100 分），高于 68 分的“可接受”标准。对量表的结果进行信度检验，Cronbach's alpha 值为 0.751，显示出良好的内部一致性信度，说明教师对产品的可用性和学习效果持积极肯定的态度。

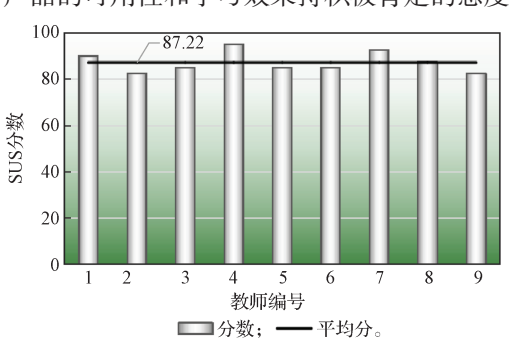


图 13 教师对 FaceON 的系统可用性（SUS）评分

Fig. 13 Teacher ratings of system usability (SUS) for FaceON designs

UEQ 问卷结果如图 14~15 所示。图 14 呈现各维度的均值及置信区间，其中吸引力维度的评分尤为突出（平均为 2.222，满分为 3），同时效率性、可靠性、

刺激性和新颖性维度也获得了较高的评分（均不低于2.000）。从图15中可以看出FaceON用户体验的基准，其中刺激性维度得分最高。总体而言，这些评估结果均显示FaceON在用户体验方面达到了良好及以上的水平。

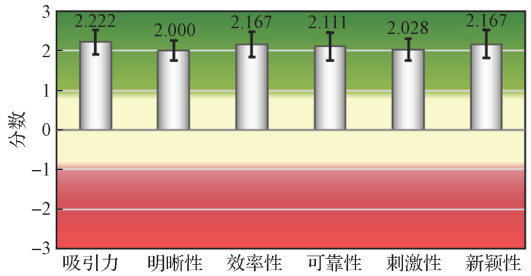


图14　用户体验评估

Fig. 14　User experience evaluation

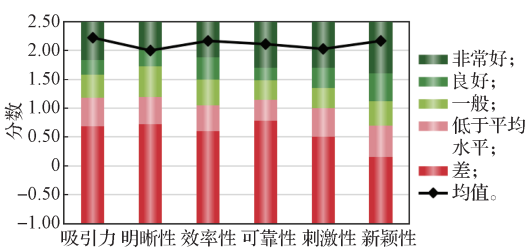


图15　UEQ基准和可用性研究参与者的平均分

Fig. 15　UEQ benchmark and usability study participant mean ratings

3.2　儿童对产品互动体验

本实验招募了5~6岁的儿童25名，其中男性11名、女性14名。所有参与儿童均未使用过基于实体交互模式的产品，这就排除了先前经验对实验结果的潜在影响，并且所有参与儿童均不存在任何学习障碍，以确保实验结果的客观性和准确性。

研究者通过介绍FaceON的基本功能并展示“拼一拼比大小”游戏，确保儿童理解后参与。实验过程中，每个儿童需依次完成自主模式和训练模式两个不同难度的任务。研究者观察儿童的交互行为和反应，并记录儿童完成每个任务所需的时间以及错误数量，随后对所得数据进行统计分析，计算出相应平均值。实验结束后，采用3级笑脸评价量表收集儿童对游戏体验的反馈，以便了解儿童对这种交互方式的接受程度。儿童与FaceON的整体交互体验呈现出积极态度，展现出高度的参与热情与浓厚兴趣，能够快速掌握产品的使用方法。此外，儿童还展现出了一定的创造力，尝试探索不同的卡片组合方式，如实现左右对称等，如图16所示。

自主模式和训练模式下实验数据如表2所示。为了检验两种模式下的差异是否显著，进行了统计学分析。通过t检验发现，对于完成时间和错误次数，两种模式下的平均值均存在显著差异。完成时间：t=3.287，p=0.002<0.05；错误次数：t = 2.708，p=0.009<0.05。表明训练模式对提升儿童学习效果具有积极作用，FaceON具有作为儿童学习工具的潜在价值。

图16　参与者使用情况

Fig. 16　Participant usage

儿童的3级笑脸评价量表调查结果如表3所示。由表可知，大部分儿童对使用FaceON学习“拼一拼比大小”游戏的体验持积极态度，认为学习过程充满趣味且产品易于使用。然而，部分儿童在评分中选择

了无表情的选项，这反映出部分儿童可能没有充分理解游戏规则或者需要更多的帮助。此外，儿童的兴趣和情感状态也可能对实验结果产生影响，将后续进一步研究。

表 2　两种模式下的实验结果

Table 2　Experimental results in two modes

模式类型	完成时间 /s	错误次数
自主模式	160.36 ± 18.42	1.60 ± 0.96
训练模式	141.08 ± 22.82	0.92 ± 0.81
t	3.287	2.708
p	0.002	0.009

表 3　儿童的 3 级笑脸评价量表调查结果

Table 3　Children's 3-level smiley face evaluation scale findings

问题	你学得开心吗？	你觉得产品好用吗？	你需要更多帮助吗？	你想再玩一次吗？
☺	23	24	20	21
😐	2	1	5	4
☹	0	0	0	0

4　结语

数字世界与物理世界的深度融合作为未来人机交互的重要发展方向。在儿童教育领域，知识的自主构建是儿童学习生活中不可或缺的一部分，实体交互提供了一种直观、交互式的学习环境，可以创造出更具体、更生动的学习体验，从而增强儿童对知识的理解和记忆。本研究利用印制包含 100 个导电油墨按键点位的三层覆合印刷交互电路矩阵结构，结合 PCB 控制模块，通过行列扫描法实现了对点位 ID 信号的识别和记录，制备了压感接通电路式教育产品 FaceON，并验证其在教育领域中的应用。通过设计合理的按键点位布局、电路连接和控制逻辑，实现了低成本且稳定运行的拼接、点按和绘画等游戏功能。并以具体的游戏任务为例介绍其设计和操作流程，展示了产品通过更换学习纸变更游戏玩法的多样性和可持续性。在系统测试部分，通过对教师和儿童的实验测试，验证了 FaceON 的可用性和教育效果。这种新颖的教学方法为幼儿教育和计算机科学在教育领域中的应用提供了一种新的思路。

参考文献：

[1] ULLMER B，ISHII H. Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces[J]. IBM Systems Journal，2000，39(3/4)：915-931.

[2] 周晔星 . 基于有形用户界面的儿童音乐智能玩具设计研究 [D]. 杭州：浙江大学，2017.
ZHOU Yexing. Research on the Design of Children's Musical Intelligent Toys Based on Tangible User Interface[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2017.

[3] 汪　默 . 基于实体交互的智能硬件产品设计方法 [D]. 长沙：湖南大学，2017.
WANG Mo. Smart Product Desing Approach Based on Tangible Interaction[D]. Changsha：Hunan University，2017.

[4] URRUTIA F J Z，LOYOLA C C，Marín M H. A Tangible User Interface to Facilitate Learning of Trigonometry[J]. International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)，2019，14(23)：152-164.

[5] KUBICKI S，WOLFF M，LEPREUX S，et al. RFID Interactive Tabletop Application with Tangible Objects: Exploratory Study to Observe Young Children'Behaviors[J]. Personal and Ubiquitous Computing，2015，19(8)：1259-1274.

[6] STRAWHACKER A，VERISH C，SHAER O，et al. Young Children's Learning of Bioengineering with CRISPEE: A Developmentally Appropriate Tangible User Interface[J]. Journal of Science Education and Technology，2020，29(3)：319-339.

[7] HORN M S，CROUSER R J，BERS M U. Tangible Interaction and Learning: The Case for a Hybrid Approach[J]. Personal and Ubiquitous Computing，2012，16(4)：379-389.

[8] 丁一清，贺　程 . 基于学龄前儿童的实体交互音乐玩具设计研究 [J]. 明日风尚，2021(10)：86-88.
DING Yiqing，HE Cheng. Research on the Design of Physical Interactive Musical Toys Based on Preschool Children[J]. Tomorrow's Style，2021(10)：86-88.

[9] 李　萌，徐迎庆 . 实体交互叙事视角下的信息设计研究 [J]. 装饰，2021(9)：24-28.
LI Meng，XU Yingqing. Research on Information Design from the Perspective of Tangible Interactive Narratives[J]. Decoration，2021(9)：24-28.

[10] KARA N，AYDIN C C，CAGILTAY K. Design and Development of a Smart Storytelling Toy[J]. Interactive Learning Environments，2014，22(3)：288-297.

[11] SORATHIA K，SERVIDIO R. Learning and Experience:

Teaching Tangible Interaction & Edutainment[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences，2012，64：265-274.

[12] ALMUKADI W，STEPHANE A L. BlackBlocks: Tangible Interactive System for Children to Learn 3-Letter Words and Basic Math[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces. Madeira：Association for Computing Machinery，2015：421-424.

[13] MCGOOKIN D，ROBERTSON E，BREWSTER S A. Clutching at Straws: Using Tangible Interaction to Provide Non-Visual Access to Graphs[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Atlanta：Association for Computing Machinery，2010：1715-1724.

[14] 钟云飞，付芦静，胡垚坚 . 印刷包装企业文化创意的途径及实现形式 [J]. 包装学报，2020，12(4)：84-88.
ZHONG Yunfei，FU Lujing，HU Yaojian. The Approach to Cultural Innovation and Realization Pattern for Printing and Packaging Enterprises[J]. Journal of Packaging，2020，12(4)：84-88.

[15] JACOB R J K，ISHII H，PANGARO G，et al. A Tangible Interface for Organizing Information Using a Grid[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Minneapolis：Association for Computing Machinery，2002：339-346.

[16] ISHII H. Tangible Bits: Beyond Pixels[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction. Bonn：Association for Computing Machinery，2008：15-25.

[17] Brooke J. SUS: A Retrospective[J]. Journal of Usability Studies，2013，8(2)：29-40.

[18] LAUGWITZ B，HELD T，SCHREPP M. Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire[C]//HCI and Usability for Education and Work: 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society. Graz：the Austrian Computer Society，2008：63-76.

（责任编辑：邓光辉）

Design and Development of Pressure-Sensitive Turn-on Circuit-Based Educational Products Based on Physical Interaction

BIE Yifei，TIAN Yufei，QIAN Jun

（School of Nursing，Wuhan University，Wuhan 430071，China）

Abstract：The key to entity interaction lies in accurate tracking and recognition of the location and identity ID of a physical entity, but existing methods suffer from problems such as high technical costs or demanding environmental factors. To this end, a pressure-sensitive turn-on circuit-based interaction mode is proposed and a pressure-sensitive turn-on circuit-based educational product called FaceON is developed, which adopts a three-layer laminated matrix circuit structure combined with a PCB control module to realize the recognition and reading record of point ID signals through the row and column scanning method. The solution is characterized by low cost and stable operation, supporting game functions such as splicing, point-and-click and drawing, and the learning paper can be flexibly replaced, which enhances the product's sustainability and potential for educational applications. Two experimental studies on teacher usability and children's interactive experience of the product have demonstrated its potential application prospects in the field of education and its ability to effectively enhance children's learning interest and cognitive ability.

Keywords：physical interaction；pressure-sensitive turn-on circuitry；children's education