

实体交互设计的发展历程及概念辨析

刘毅, 谢思远, 宋轩*
(广州美术学院, 广州 510000)

摘要: **目的** 针对实体交互设计及其相关概念混沌模糊的现象, 梳理和总结实体交互设计的发展历程, 讨论和界定实体交互设计的概念, 分析实体交互设计的概念发展关系。 **方法** 通过文献研究, 梳理和总结实体交互研究方向的起源和发展, 实体交互理论模型, 特定领域的实体交互设计研究和实现技术, 界定实体交互设计的概念及其基本关系。以 Hornecker 的实体交互框架为原型建立交互要素分析模型, 对实体交互设计概念进行交互要素相关性分析, 通过对比分析得出实体交互设计概念发展关系。 **结果** 界定实体交互设计的概念和其基本关系, 得出基于要素相关性的实体交互设计概念发展关系。 **结论** 实体交互设计的发展历程大致分三个阶段, 分别是物理性输入萌发、物理-数字耦合发展和体验导向的转变。可抓取交互界面、实体交互界面和 Radical Atoms 概念都隶属于实体交互设计。实体交互设计与交互要素的发展相互促进, 从以物理性要素为核心到通过技术加强表现性的实体交互界面, 再到以物理性和表现性为基础、具备空间性和具身性的实体交互系统, 体现了以体验为导向的实体交互设计发展历程。

关键词: 实体交互设计; 交互要素; 交互界面

中图分类号: TB472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)24-0217-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.24.024

Development History and Concept Analysis of Tangible Interaction Design

LIU Yi, XIE Si-yuan, SONG Xuan*
(Guangzhou Academy of Fine Arts, Guangdong Guangzhou 510000, China)

ABSTRACT: In view of the chaotic and fuzzy phenomenon of tangible interaction design and related concepts, the work aims to sort out and summarize the development history of tangible interaction design, discuss and define the concept of tangible interaction design, and analyze the development relationship of the tangible interaction design concept. Through literature research, the origin and development of tangible interaction research direction, tangible interaction conceptual model, domain-specific tangible interaction design research and implementation techniques were sorted out, and the concept and relationship of tangible interaction design were defined. With Hornecker's framework of tangible interaction as the prototype, this study established a model for interaction element analysis, conducted correlation analysis of interaction elements for the concept of tangible interaction design, and obtained the development relationship of the tangible interaction design concept by comparative analysis. The concept and basic relationship of tangible interaction design were defined, and the development relationship of the tangible interaction design concept based on element correlation was obtained. The development of tangible interaction design is roughly divided into three stages, namely the germination of physical input, the development of physical-digital coupling, and the transformation of experience orientation. Such concepts as graspable interface, tangible interface, and Radical atoms all fall into the category of tangible interaction design. The development of tangible interaction design and interaction elements enhances each other. The development history of experience-oriented tangible interaction design is reflected from physical elements as the core to the tangible interactive interface enhancing expressiveness through technology, to the physical and expressive-based tangible interaction system with space and embodiment.

KEY WORDS: tangible interaction design; interaction elements; interactive interface

随着“后 WIMP 风格 (post-WIMP)”人机交互范式的兴起,在 20 世纪 90 年代,实体交互界面作为后 WIMP 界面交互方式的一种类型出现,在之后二十余年受到国外人机交互和交互设计学科研究者的极大关注。近年来,国内研究者开始关注实体交互界面的研究,比如米海鹏等^[1]对实体交互界面的发展历程和研究趋势进行梳理并总结了实体交互界面的三种新型形态分类,李萌等^[2-3]将实体交互和叙事设计结合来进行信息设计研究,赵超等^[4]将实体交互界面应用于心理矫治领域的横向应用类研究等。

随着实体交互界面的发展,在 21 世纪初,实体交互设计概念被提出。然而,研究界对实体交互设计概念的阐述比较模糊,Hornecker 等^[5]用“包容性的框架”来概括实体交互设计概念。学者不仅从理论、方法等方面对实体交互和实体交互界面展开纵向研究,还从材料学、认知心理学、具身交互、智能技术、游戏设计等多学科视角进行交叉研究。本研究梳理和总结实体交互设计发展历程,讨论和界定实体交互设计的概念,分析实体交互设计的概念发展关系,希望对实体交互设计产生更加全面、清晰的认识。

1 实体交互设计的发展历程

1.1 实体交互的起源和发展

1.1.1 物理性输入萌发阶段

为了解决计算机中批处理和命令行^[6]的界面让普通用户难以使用的问题,工程师积极探索新的输入输出方式。1970 年,由美国 PARC (帕洛阿尔托研究中心)研发的图形用户界面 (GUI) 面世。对于任何应用领域,从生产工具到游戏,基于窗口 (window)、图标 (icon)、菜单 (menu) 和指针 (pointer) 的 WIMP 范式成为基本的人机交互范式。

WIMP 界面交互方式虽然已经成为主流,但是研究者发现 WIMP 界面存在一些交互上的不足^[7],比如输入设备很难实现多人参与的输入方式,输入方式基本忽视了人在物理空间中的动作丰富性,以及空间的位置性等。针对这些问题,融合人与真实世界交互技能的新型输入设备开始出现,并试图解决这些问题。在传感技术的推动下,计算机的输入设备突破鼠标键盘输入限制,出现具备物理性的输入设备原型。比如,1976 年,Perlman^[8]研发了一种使用物理卡片来表示编程的系统。另外,19 世纪 80 年代初,Aish 等^[9-10]为了让多人参与建筑设计讨论,使用物理模型作为输入设备,开发了 3D 建筑建模系统。该时期实体交互研究的应用主要在人与计算机的交互中,主要原因是该阶段的研究重心是探索计算机的物理性输入,涉及学科局限在人机交互中。但总而言之,这些新型输入设备可以归类为第一批实体交互界面原型和应用探索,这种新型输入方式也是后来兴起的“后 WIMP”

界面交互方式的一种类型。

在 20 世纪 90 年代末,随着处理器的小型化以及“普适计算”等概念的提出,交互设计研究者开始了关于增强现实的讨论,实体交互界面在增强现实的讨论中正式问世。Wellner 等^[11]说:“我们生活在一个复杂的世界,它充满了无数的物体、工具、玩具和人。我们的生活方式就是与环境进行互动。然而,我们却总要坐在一块连接鼠标键盘的发光屏幕前进行计算活动。”他主张将计算嵌入现有环境和人类实践中,以实现“数字”和“真实世界”之间的流畅过渡,这大大影响了增强现实和普适计算的发展^[6]。20 世纪的 70 到 90 年代是实体交互界面早期的萌发阶段,这一时代初步展现了以物理性输入为核心的基本特征。

1.1.2 物理数字耦合发展阶段

20 世纪末到 21 世纪初,实体交互界面被正式提出并且单独成为交互设计的一个科研方向,逐渐开始发展理论框架,并进入迅速发展的阶段。在 Fitzmaurice 等^[12-13]1995 年提出的可抓取交互界面概念的影响下,Ishii 教授等人在 MIT 实验室创立了有形媒体工作室 (Tangible Media Group)^[14]。随后,在 1997 年,Ishii 等^[15]提出可触比特 (Tangible Bits) 的愿景:通过数字信息 (比特) 实体化,来弥合网络空间和物理环境之间的差距。基于这个概念,实体交互界面已经成为一种新的界面和交互方式。

从技术发展角度看,随着传感器、微处理器、虚拟现实、增强现实、人工智能、操作系统等软硬件技术迅速发展,台式计算机中的鼠标和键盘这种较为单一、固定、精确的交互方式已经不能满足人们的使用需求,多通道的、自然的信息获取与互动方式成为用户的主流诉求,人机交互技术从图形用户界面阶段发展到多通道、多媒体的多模态交互阶段 (Multi-Modal Interaction)^[16]。基于人机交互技术进步的交互成为当前以及未来交互设计发展的基本方向^[17-18]。实体交互界面在萌发时期注重触觉、手动、手势、头动、肢体姿势等多通道的物理输入,后来,基于技术应用尽可能地实现物理界面和数字信息耦合的多媒体输出形式。实体交互界面的输出形式不仅注重使用实体的物理形变,更多时候会结合图形界面、触觉感受、声音信号、光影信号等多媒体进行统一的物理-数字耦合设计。

在物理数字耦合发展阶段,实体交互界面正式成为一种新型交互方式和交互研究方向。相关理论研究主要关注界面输入和输出的物理化,以及数字信息与物理实体的耦合设计研究。其核心在于如何增加技术应用可能性,从而实现物理-数字更好的耦合,具体体现在一些交互模型的构建、理论融合的研究和分类框架的构建上。

1.1.3 体验导向转变阶段

随着一些特定应用场景及领域中的实体交互界

面研究的开展，实体交互研究早期就有学者开始关注实体交互界面中的具身效应、空间性等因素。首先，针对一些群体合作场景的实体交互界面原型的实践^[19-20]，Arias 及 Stanton 等学者提出实体交互界面中的社会效应。比如，早在 1997 年 Arias 等^[21]和 Suzuki 等^[22]提出实体交互界面的社会可供性。2001 年，Stanton^[23]认为相较人与键盘的交互而言，人与实体交互界面交互的参与门槛更低、交互的过程更明显，从而实体交互界面满足社会性的多人使用场景。Dourish 在《Where the Action Is. The Foundations of Embodied Interaction》^[24]中强调环境的社会性。后来，Hornecker 等^[5,25]基于 Dourish 和上述几人的研究，指出环境中的物理性与社会性的关系，从而提出实体交互界面中的具身性。此外，随着一些空间互动的研究的出现，Hornecker 等^[5]提出实体交互界面中的空间性，比如 Bongers^[26]研究空间和场所的概念与交互性物理空间的潜在关联、Ciolfi^[27]在博士论文中研究位置性与交互空间中的用户体验的关系等。这些学者关注特定应用场景、具身性、空间性，使实体交互界面设计转向提高用户体验的实体交互系统设计，广义实体交互概念模型也因此形成（Hornecker 等^[5]于 2006 年提出）。

与此同时，2012 年，Ishii 等^[28]为了实现更好的

物理数字耦合的实体交互界面，提出 Radical Atoms 概念作为实体交互界面的新的未来愿景。从广义的实体交互发展历程来看，可将 Radical Atoms 概念视为实体交互中的数字信息物理化技术方面的支撑，这也是目前为止提出的实体交互界面发展的最终形态。

从 21 世纪初至今，实体交互设计的研究开始跳出人机交互学科的研究范畴，逐渐讨论具身交互、产品设计和交互艺术学科交叉下的广义实体交互系统设计，并且开始专注用户体验，从以技术为中心的实体交互界面设计转向以用户体验和社会效应为目标

的实体交互系统设计的研究。

本文提出实体交互研究方向的发展历程关键点及划分的三个阶段，见图 1。

综上所述得出如下结论。

1) 从实体交互设计研究内容来说，在早期，实体交互设计蕴含于对图形用户界面的新型自然输入方式，以及基于技术应用性的物理-数字耦合的多媒体输出形式的探究中。

2) 从实体交互设计学科发展看，实体交互起源于人机交互学科对界面载体范式的研究，逐渐发展到交互设计学科对交互形成因素及机制的研究。学者们以技术为中心的实体交互界面研究作为基础，综合实体不同视角的解读而提出实体交互概念。



图 1 实体交互设计发展历程中的关键节点及三个阶段

Fig.1 Key points and three stages of development history of tangible interaction design

3) 从实体交互设计目标转变看, 实体交互实现物理性的自然交互是其基本目标, 凭借独特的实体属性, 融合物理和空间性、具身效应等要素, 创造良好的社会效应和独特的用户体验已经成为其顶层目标。

1.2 实体交互理论模型发展

1.2.1 可抓取交互界面概念模型

随着实体交互发展初期对计算机物理性输入设备的探索, 1995 年 Fitzmaurice 等^[12]提出可抓取交互界面概念和其概念模型来系统表示物理性输入设备, 可抓取交互界面的概念模型见图 2。

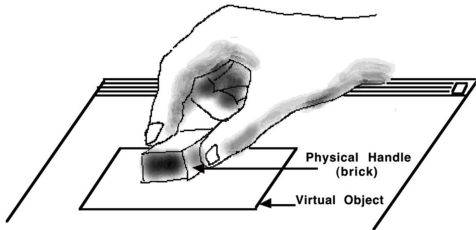


图 2 可抓取交互界面的概念模型
Fig.2 Conceptual model of graspable user interface

该概念模型从传统的图形交互界面的交互逻辑出发, 体现了图形交互界面向可抓取交互界面概念的转变: 不把物理输入设备看作是可抓取的设备, 而是看作可抓取的功能。在传统的图形交互界面中, 通常有三个交互阶段, 依次是获取物理设备、获取逻辑设备 (如滚动条或按钮等交互组件) 和操纵虚拟设备。可抓取交互界面将物理设备与逻辑设备保持耦合和持久连接, 因此逻辑设备具备了专用的可抓取功能, 从而将交互阶段从三个减少到两个: 获取物理设备和直接操纵逻辑设备。图形交互界面和可抓取交互界面的交互逻辑对比见图 3。

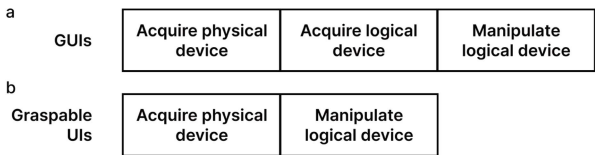


图 3 图形交互界面和可抓取交互界面的交互逻辑对比
Fig.3 Contrast of interactive logic between graphical user interface and graspable user interface

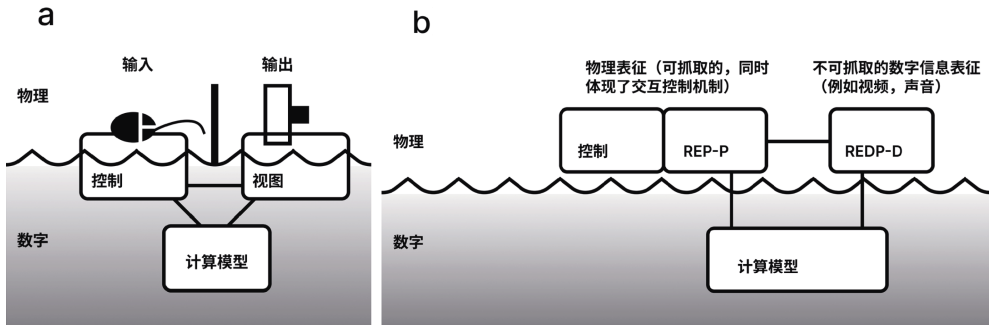


图 4 MCRpd 模型和 MVC 模型的对比
Fig.4 Contrast of MCRpd model and MVC model

1.2.2 实体交互界面概念模型

除了可抓取交互界面概念模型, 主要的实体交互概念模型还有 2000 年 Ullme 等^[29]提出的 MCRpd 模型。该模型主要从交互界面定义出发, 基于图形交互界面的交互模型 MVC (模型-视图-控制器), 定义实体交互界面的具体定义、基本交互模式、过程、要素以及特点。

该模型继承 MVC 模型的“控制”和“模型”要素, 将“视图”分为两个部分。其一是用物理表征来代替“视图”概念, 用于构成实体交互界面中的物理元素, 比如外壳材料和按钮等元素, 其二是用数字表征来代替实体交互界面中没有物理特征的数字信息表征, 比如视频和音频等元素^[29]。MCRpd 模型和 MVC 模型对比见图 4。MCRpd 模型中的三个要素分别是物理控件、物理-数字表征和概念模型, 设计重点是物理控件的外观和操作方式、交互系统的物理和数字层面信息的耦合以及底层数字概念模型。

2008 年, Ishii 补充了 MCRpd 模型的反馈循环部分。他指出, 用户在与物理工件的互动中总是由两个反馈循环组成, 但在某些情况下可能会出现第三个反馈循环^[30]。MCRpd 模型的反馈循环见图 5。

1.2.3 广义实体交互概念模型

研究者们对实体交互含义解读的扩展, 使强调物理数字耦合设计的实体交互界面设计开始转向塑造用户体验的实体交互系统设计, 广义上的实体交互概念模型也因此形成。2006 年, Hornecker 等^[5]提出了广义下的实体交互概念模型, 该概念模型见图 6。

该模型包含四个主题, 这些主题不是相互排斥的, 而是相互关联的, 提供了关于实体交互的不同视角的解读, 包括: 实体的操纵: 是指具有明显触觉品质感受的材料表征, 在实体交互中通常被用户通过接触来操纵; 空间互动: 指的是实体交互嵌入到真实的空间中, 因此互动行为是通过人在空间中的运动发生的; 具身性促进: 强调物理对象和空间配置影响和引导某种新兴的群体行为; 表达性表达: 关注的是实体交互系统所使用的物理和数字表征的表达性和可读性。该模型的每个主题中还包含一组概念, 来更具体

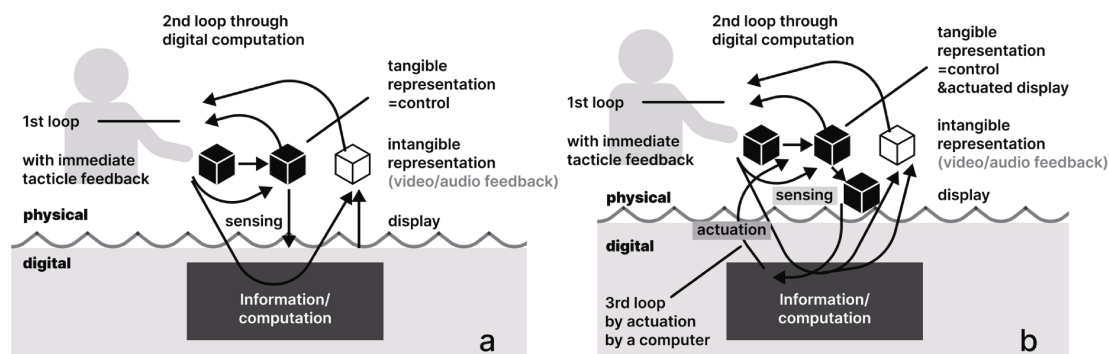


图 5 MCRpd 模型的反馈循环
Fig.5 Feedback loop of MCRpd model

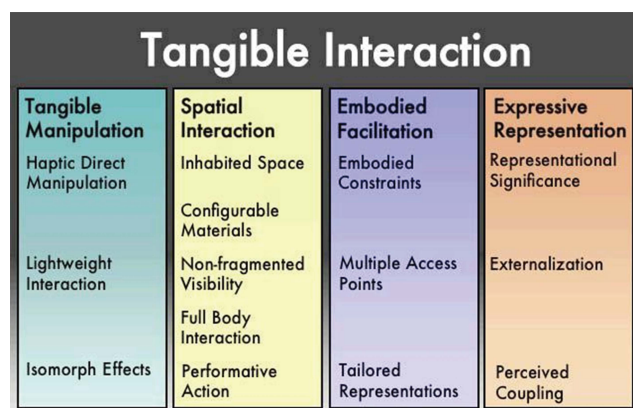


图 6 Hornecker 的实体交互框架
Fig.6 Hornecker's framework of tangible interaction

地阐述每个主题的含义。比如, 实体的操纵主题下的直接触觉操控 (Haptic Direct Manipulation) 强调物理工件同时是界面、交互对象和交互设备, 而不是像鼠标那样充当一个通用的和短暂的中介。人操纵交互对象时会有触觉接触, 会感受到触觉反馈和材料质量。同时, 实体物体可以通过吸引人们的触觉接触, 提供感官愉悦和互动游戏性, 从而邀请人们进行互动。

2007 年, Hornecker 等^[31]后续又修改、扩展和改写了该模型中某些概念, 但该模型的总体主题和结构没有改变。比如, 他们对具身性促进主题下的多访问点 (Multiple Access Point) 概念进行了扩展, 分为了进入点和访问点。

1.2.4 其他实体交互理论模型

从理论模型研究发展角度来看, 实体交互界面理论研究成果集中在概念模型、方法模型以及分类框架的构建上。除开上述谈及的实体交互概念模型, 在实体交互的方法模型方面, 主要有 1999 年 Holmquist 等^[32]提出的“嵌入-约束”系统, 后续 Ullmer 等^[33-34]对其进行了深入讨论, 从而确立了主要用于早期实体交互界面的描述和分析的方法模型。

除此以外, 学者们还结合心理学、行为学、材料学、空间建筑等领域的理论来提出一些方法模型, 这些体现在一些对实体交互案例的分类框架构建和理

论融合的研究上。比如, 2004 年 Fishkin^[35]从认知心理学视角, 以“隐喻”和“距离”为分类尺度提出分类框架。Sharlin 等^[36]提出将空间性纳入实体交互界面设计考虑中。Wensveen 等^[37]建立分类框架来分析人的行为和实体交互界面功能信息的耦合。Hoven 等^[38]关注实体交互界面中个人属性带来用户体验的影响因素问题, 从而提出相应分类框架。2003 年 Koleva 等^[39]提出基于物理和数字对象的耦合性程度的分类框架等。

1.3 实体交互特定领域研究与技术概述

研究者们在过去二十多年里, 一是从实体交互设计本身的特性出发, 二是从特定用户、特定场景以及系统的特定功用目标出发, 来对不同特定领域下的实体交互设计展开研究, 极大扩展了实体交互的应用领域。这些特定研究领域包括学习和教育领域、多人协作场景、特殊人群用户、空间认知评估领域, 信息物理化领域、计算机辅助建模领域、公共场所场景、日常办公和生活场景等。其中, 实体交互设计研究在某些特定领域已经产生一些理论模型, 比如多人协作和学习教育领域, 在许多领域仍处于理论融合探索或者设计原型探索期, 值得学者去尝试探索, 比如面向特殊人群的实体交互设计研究。

1.3.1 学习和教育领域

学习和教育领域的计算机辅助学习或娱乐的工具, 是实体交互主要应用领域。基于物理空间和实物道具的学习环境要求孩子调动所有感官去参与, 因此更有利于孩子的全面发展^[40-41], 一般会应用在一些玩具、教具和博物馆的科普互动装置等上面。从实体交互早期开始, 许多学者们就已经开始提出一些理论模型和设计准则来丰富学习和教育领域的实体交互理论方法。

比如, 2001 年 Stanton 等^[23]通过教室场景中协同绘画的实体交互原型设计过程, 提出教室场景下的实体交互界面设计的四个准则。2004 年 Price 等^[20]通过分析儿童学习数字增强互动空间, 从物理性和数字增

强两个方面来探究实体交互空间如何影响或支持儿童主动学习。2007年 Antle^[41]提出分析评估儿童认知发展的理论模型,包含行动空间、感知映射、行为映射等主题。Marshall等^[42]通过对认知科学、实体计算和教育领域的文献综述提出要素主题模型,来评判实体交互设计对学习的支持效用程度。2009年 Price等^[43]分析交互系统的“表征位置”对学习和交互的影响,提出学习情境中的实体交互设计参数模型。2010年他们通过儿童学习实体交互原型^[44],探讨物理上的参与、行为和交互对学习机会的影响。2016年 Suzuki等^[46]试图通过小组式编程学习工具原型,从工具和社会环境方面提出协作学习场景的设计原则,2017年他们设计了交互书籍原型^[46],探索基于纺织品材料技术的电子触觉和感受书籍方向,以及这个方向的开发技术问题。

1.3.2 多人协作场景

多人协作场景交互系统设计也是实体交互设计的主要应用领域之一。多人协作场景交互系统要求多人操作,因此需要特定的交互行为设计,群体聚集则会产生社会效应,而实体交互设计的实体式操作方式设计和物理工件操作引发具身效应的特点,可以达到上述设计要求。

学者们对多人协作场景下的实体交互设计的特点进行探究,比如,2002年 Hornecker等人^[47]设计了一种多人协同式城市规划的实体交互式互动桌面,探索如何设计和评估社区参与式设计的交互系统。2008年 Kim等^[48]对比协同设计场景下的图形交互界面和实体交互界面,来探讨实体交互界面的影响。2021年 Clarke等^[49]分析博物馆的实体交互展品,从多人场景下的交互控制权分配方面提出公共互动装置的交互控制权分配机制。2022年 Li等^[50]分析了协作学习空间实体交互产品设计的12个基本维度,并通过协作学习课堂实体交互原型实践提出设计原则。

1.3.3 特殊人群用户

特殊人群由于感官或认知能力的缺陷,可能会对于触觉层面的互动有更多的需求。比如,视障儿童虽然对于简单的二维形状很容易感知,但理解复杂形式三维物体需要长时间的触觉探索,并需要伴随着指导者以身体和语言提示的形式不断反馈。这个过程可能需要重复多次,才能形成并强化视障儿童对物体的充分心理表征^[51]。所以,近年一些学者试图用实体交互设计通过触觉层面与其进行沟通和建立认知。比如,2015年 Jafri等^[51]进行了视障儿童的触觉形状感知和空间意识自主学习的实体交互设计原型实践。

除视觉障碍人群外,另一些特殊人群也适合于实体交互应用方向。比如,2017年 Alexander等^[52]基于痴呆症患者音乐系统的实体交互界面的设计过程,讨论了界面设计的可用性和趣味性等问题。2019年

Mahmud等^[53]设计提高低资源地区自闭症儿童的社交和认知技能的实体交互原型。2020年赵超等^[4]针对精神障碍服刑人员心理矫治设计实体交互原型。2021年 Beccaluva等^[54]设计用于智障儿童记忆训练的实体交互原型,探索记忆康复背景下的实体交互设计原则。

1.3.4 实现技术概述

上述这些特定领域的实体交互设计研究中,研究者往往通过一些相应的实体交互设计原型进行实践探索,在这些设计原型的实现技术方面,大致可以分为感知技术、嵌入式信息处理以及驱动技术3大类^[1]。

感知技术可以感应位置、姿态和行为等因素的信号,比如射频识别(radio-frequency identification, RFID),机器视觉和超声波测量技术等。嵌入式信息处理通过嵌入微控制器在有源的系统,达到复杂信息处理、快速响应以及复杂驱动等需求特点^[55]。驱动技术主要用于有源的系统,以提供运动和形变等物理反馈,比如机电驱动,智能材料传感与驱动,气动驱动技术等。

实体交互设计大都运用较为成熟的技术,例如在感知技术与嵌入式信息处理技术方面,各种技术已经较为成熟,在技术实现上基本没有太大的技术难点。然而随着实体交互研究发展越来越强调数字信息与物理世界的互相反馈和影响,对驱动技术的要求越来越高,也越来越难以从已有成熟技术中寻找方案。如今更多的研究者尝试自己开发独特的驱动技术,以实现具有某些特定物理反馈能力的实体交互系统^[1]。

2 实体交互设计的概念关系

2.1 实体交互设计概念界定和讨论

在实体交互术语方面,“Tangible Interaction”在国内可译为“实体交互”“有形交互”等;“Tangible User Interface”可译为“实体用户界面”“实体交互界面”“有形用户界面”等;“Graspable User Interface”可译为“可抓取用户界面”“可抓取交互界面”“可触摸用户界面”等;“Tangible User Interface”可译为“可触比特”“实体比特”“有形比特”;“Radical Atoms”可译为“基本原子”“激进原子”等。

如上文所说,在20世纪末到21世纪初的实体交互诞生和发展阶段,不同学科的研究者从自身研究角度出发对实体交互概念进行解读,Hornecker等^[5]将其分为三大视角,分别是计算机学科下的数字信息视角、工业设计学科下的感知动作视角和建筑与艺术学科下的空间互动视角。

数字信息视角下,有可抓取交互界面的概念、实体交互界面、可触比特、Radical Atoms概念等。可抓取交互界面理论主张将一些原本在图形用户界面中的虚拟用户界面元素以物理形式呈现出来,强调可

抓取输入设备的“空间复用性”、用户心理模型中对“功能”的“直接抓取”和输入设备间具备空间感知性等^[12-13]。可触比特的特征基本延续了可抓取交互界面: 一是物理实体表面成为交互界面, 二是数字信息和物理实体耦合, 另外还需要考虑环境媒体的作用: 将日常建筑空间中物理物质也转化成通信的交互界面, 包括比如声、光、气流和水的运动等^[15]。实体交互界面是指通过数字媒体(例如图像、音频)和物理工件(例如空间上可操作的物理对象)的耦合, 使用物理工件作为计算媒体的表征和控制, 通过计算而产生的交互界面。简而言之, 实体交互界面为数字信息提供物理形式^[15]。Radical Atoms 是继可触比特之后的下一阶段实体交互愿景, 又可称为“材料用户界面(MUI)”, 强调界面材料与底层数字模型(比特)双向耦合, 物理形式的动态变化可以实时反映在数字状态中, 反之亦然^[28]。上述几个概念围绕对数字信息进行物理呈现的主题, 重视如何利用技术突破更强的耦合, 是实体交互概念发展的基础和主线。本文总结实体交互发展历程中的关键实体交互设计概念的基本关系, 见图7。

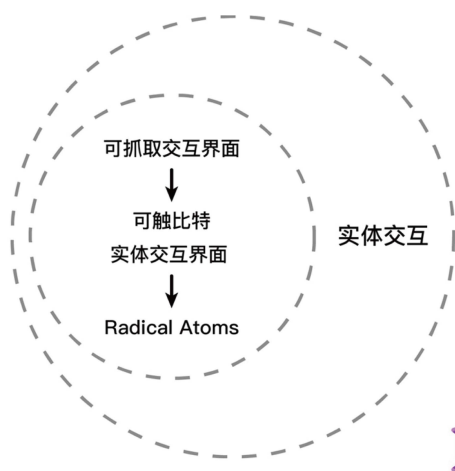


图7 实体交互的几个关键概念之间的基本关系
Fig.7 Basic relationship between several key concepts in tangible interaction

Djajadiningrat 等人提出从感知动作视角解读实体交互设计。他们在讨论工业产品形态外观设计的“可供性”时, 认为设计师在产品的形态设计之前应先对“交互可供性”进行设计, 也可以针对用户的一些特定技能进行引导, 从而进行富有表现力的产品交互设计(在论文中他用流水线工人的操作动作举例), 使人能在接触到产品之前就意识到应该采取什么操作动作。这些在某种程度上源于 Dourish 提出的交互思维转变, 即从产品本身提供“可供性”的观点转向在产品交互过程中创造意义^[56-58]。

空间互动视角下的解读主要基于计算机系统和物理空间组合的互动空间理论。互动空间设计的典型特征是将交互系统嵌入真实空间, 提供人与实体设备

交互的机会, 再触发数字内容或反应行为的显示, 最后发展到全身交互, 或者使用身体作为交互设备和显示^[26-27,59]。在这过程中, “实体”一词体现在人与整个实体空间或空间中的物体/标记的交互关系中, 同时空间互动带来独特的“全身互动”和“空间位置性”等属性, 这些都可以纳入实体交互系统的考虑范畴。

尽管实体交互在诞生过程中出现各种概念解读, 但可以发现, 所有的解读都没否认实体交互始终立足于物理世界的实体特性、需要借助耦合数字信息的物理工件或物理环境作为交互载体才能实现。依靠技术应用可能性, 实体交互的物理层面最终可以成为一种类似 Radical Atoms 的自然交互界面。此外, 物理实体本身可以带给人的丰富感官特性、行为可供性和空间位置性等自然的心理感受, 让实体交互可以在特定领域或场景中达到特定的用户体验, 比如在一些集体协作、社会性活动和空间场景等。所以它可以在实现自然交互界面愿景的基础上, 达到特定的用户体验或交互效应。Hornecker 等^[5]提出了实体交互框架, 但没有较准确地界定实体交互设计的定义。

综合概念基本关系总结, 基于现有文献对实体交互的描述与分析, 可将实体交互设计界定为: 实体交互设计是对实体交互系统的设计, 实体交互系统以数字信息物理化的自然交互形式为载体, 利用物理工件或物理环境的感知行为可供性、具身效应、身体互动、空间位置性等因素赋予交互意义, 实现特定交互体验或社会效应的目标。

2.2 实体交互要素对比分析

2.2.1 实体交互要素维度分析

从上可知, 实体交互作为一个交互设计研究方向, 虽然发展的历史很短, 也形成一些基本的概念框架和分类框架, 但相较以描述和搭建界面为目标的 MCRpd 模型^[29-30]、嵌入约束系统^[32-34]和只考虑双维度或多维度的分类框架而言, Hornecker 等^[5]提出的实体交互框架更能从一个广义且包容的视角来描述实体交互设计的特征和交互要素, 该框架见图6。

为了更加全面且具体地对比实体交互的相关概念之间的差异和共性, 笔者根据该框架中的四个主题, 即物理操控、空间交互、具身效应、表现性表达, 提炼出四个交互要素: 物理性、空间性、具身性、表现性。再根据四个交互要素建立四维度分析模型, 将各个概念辅以概念下的典型案例, 依据框架中的各维度下的细分要素, 进行要素占比的对比分析。下面对各个维度下的细分要素进行详细阐述。

物理性维度下的要素包括直接触觉操控、轻量交互、同构效应^[5]。物理性代表人与物理对象(设备)的身体交互^[5], 这种交互依靠人的触觉反馈(触觉操控)^[5], 要求交互反馈过程轻量且快速, 允许人进行多次试错(轻量交互)^[5], 数字信息的反馈与操作呈

现同时、同地、同形效应（同构效应）^[37]。

空间性维度下的要素包括真实空间、可配置材料、非碎片可视化、全身互动、表现性动作^[5]。空间性代表交互系统嵌入真实空间并且将真实空间与虚拟数字信息结合的特性^[60]。空间性不仅指交互系统嵌入真实空间、身体与空间产生位置关系等，更深层含义指该交互系统在运作时会周围产生一种“情景空间”（真实空间）^[59]，要求所有人都方便观察到交互的全过程（非碎片化可视）^[61]，尽量用到人的全部身体进行动作互动（全身互动）^[61]。交互动作要具有表达性且会对公众传达特定含义（表现性动作）^[61]。人移动物理工件或自己身体也是有含义的（可配置材料）^[5]。

具身性维度下的要素包括具身约束、多访问点、定制化表征^[5]。由于人在实体交互系统中不仅是在物理空间移动，也是在虚拟空间中进行隐喻移动，而在真实空间中被促进或限制的人类行为带来具身效应，这种效应会帮助塑造新的社会形态^[5]。交互系统的物理工件和物理空间的设计是设计师有意为之的，可以限制、阻碍或促进人的特定行为（具身约束）^[5,25]。同时，系统应允许多人同时参与交互，避免单人操控（多访问点）^[5]。设计师要根据目标用户的自身特定经验和技能来设计物理工件，从而使得目标用户对系统有直观的可读性，（定制化表征）^[61]。

表现性维度下的要素包括表征意义、外部工具化、感知耦合^[5]。表现性代表该系统的物理-数字耦合的程度、物理工件表征能力的高低^[5]。系统的物理表征和背后隐藏的数字信息恰当地耦合，并且能相互加强意义（表征意义）^[61]。人们可以将该系统自然地当作一种具备数字功能的日常工具进行使用（外部工具化）^[61]。最后，系统的反馈与人的操作是连贯且易懂的，物理工件设计能很好地吻合其背后代表的数字信息含义（感知耦合）^[61]。

从上文的实体交互概念的基本关系研究中，根据概念提出者所提出的概念定义和所实践的相应设计原型，选取每个实体交互概念下的代表性设计原型案例。依据分析模型的四个实体交互要素维度，邀请多名专家型被试用户对这些原型案例在每个要素维度的占比进行相关性评判打分。为尽可能准确对比概念在每个要素维度的占比，根据概念在各维度下的要素占比的比例，在每个维度对其进行 0~3 分的评分：0 分表示概念不存在该维度下的要素，即不具备该项特性；3 分表示概念具备该维度下的所有要素且要素的特征明显，即完全具备该项特性；1~2 分表示概念具备该维度下的部分要素。要素占比的分析的具体过程统计数据见表 1。最后分析结果用类似雷达图的形式展示，见图 8。

2.2.2 实体交互要素发展及影响

从图 8 可以看出，所有的概念在物理性维度的占

表 1 要素占比的对比分析统计数据
Tab.1 Statistical data of comparative analysis
of element proportions

概念	案例	交互要素				年份
		物理性	空间性	具身性	表现性	
可抓取交互界面	珠算算盘	3	1	0	1	1387
可抓取交互界面	Bricks	3	2	1	2	1995
可抓取交互界面	metaDesk	3	2	1	2	1997
可抓取交互界面	弹珠答录机	3	1	0	1	1999
可触比特	transboard	3	3	1	2	1997
可触比特	Ambient Room	3	3	1	2	1997
实体交互界面	MediaBlocks	3	2	1	1	1998
实体交互界面	Urp	3	2	2	3	1999
实体交互界面	Sandscape	3	2	3	3	2003
实体交互界面	PICO	3	2	1	2	2005
实体交互界面	Relief	3	2	1	2	2009
实体交互界面	ZeroN	3	2	1	2	2011
Radical Atoms	Perfect Red	3	1	1	3	2012
实体交互	EDC	3	2	3	3	2002
实体交互	CLAVIER	3	3	3	2	2005

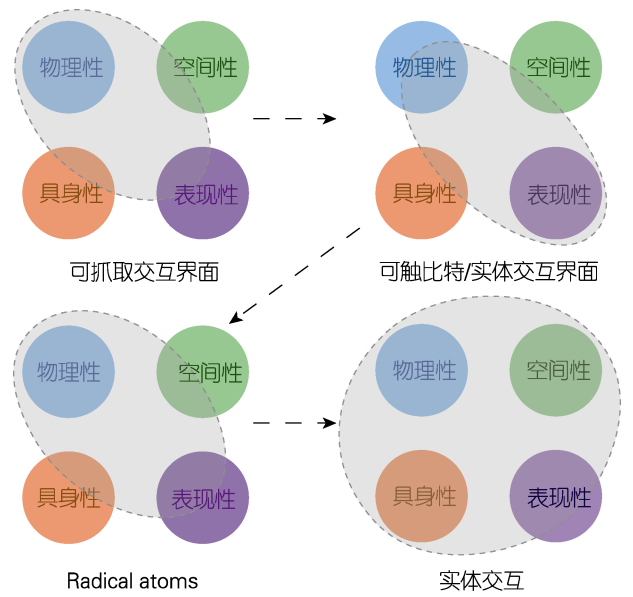


图 8 要素占比的对比分析结果展示
Fig.8 Results of comparative analysis of element proportions

比很高，可触比特/实体交互界面和实体交互在具身性和空间性维度的占比较高，只有实体交互和 Radical Atoms 在表现性维度的占比较高。

单独从每个交互要素的作用和发展角度来看，图 8 体现了物理性是实体交互概念的基础要素，说明实体交互的发展立足于人和物理对象（设备）的触觉上/身体上的交互。从单纯的桌面端操控计算机的可抓取交互界面到更大空间下的多人协作的交互场景，具身性和空间性已经成为实体交互的重要考虑因素。表现性本身代表着交互系统的物理-数字耦合程度，这一

要素的占比很多时候取决于物理工件的具体外观形态和数字信息层面的设计要素,并且在智能材料技术(Radical Atoms)和驱动技术等进步下,实体交互系统的表现性可能会越来越强。

从实体交互概念发展与交互要素的整体关系来看,实体交互设计与交互要素的发展相互促进:从以物理性要素为核心到通过技术加强表现性的实体交互界面,再到以物理性和表现性为基础、具备空间性和具身性的实体交互系统。同时,实体交互设计与交互要素的整体关系也体现了上文总结的实体交互设计发展历程。

以物理性要素为核心、通过技术加强表现性的实体交互界面强调探究如何更好地对数字信息进行物理操控,其以技术应用为核心创新点:从无源技术、自驱动,到智能材料技术^[1]。这些实体交互界面属于实体交互的基础层次,涉及该层次的概念有可抓取交互界面、实体交互界面(大部分)和Radical Atoms。

以物理性和表现性为基础、具备空间性和具身性的实体交互系统是集体多用户的空间性交互系统,其以创造社会互动和具身效应的空间氛围为目标,从着重物理性维度中的设计“物理表征”上升到设计“社会表征/社会可供性”^[5]。涉及该层次的概念有实体交互界面(一部分)、Radical Atoms(具备发展潜力,但目前尚未出现相符的设计原型)和实体交互。

3 结语

随着新技术的迅速发展,未来实体交互设计将依赖人机交互技术才能实现更为新颖、多样、便捷、高效的交互方式,实现更自然的界面形式是未来实体交互的基本研究方向,而社会性互动将是未来实体交互设计的重要研究方向。同时,实体交互设计研究从聚焦计算机界面交互设计的狭域交互设计,扩展为以物理工件和空间为载体的人与社会、环境复杂互动关系研究的广域交互设计。实体交互设计的社会性特征日趋凸显,构建良好的人与社会和环境的互动关系也将成为实体交互设计研究的重点。

参考文献:

- [1] 米海鹏,王濛,卢秋宇,等.实物用户界面:起源、发展与研究趋势[J].中国科学:信息科学,2018,48(4):390-405.
MI Hai-peng, WANG Meng, LU Qiu-yu, et al. Tangible User Interface: Origins, Development, and Future Trends[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48(4): 390-405.
- [2] 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 Ying-qing. Research on Information Design from the Perspective of Entity Interactive Narration[J]. Art & Design, 2021(9): 24-28.
- [3] 李萌,宫未.儿童实体交互叙事系统的游戏化设计策略研究[J].工业工程设计,2021,3(2):13-20.
LI Meng, GONG Wei. Research on Gamification Design Strategy of Children's Entity Interactive Narrative System[J]. Industrial & Engineering Design, 2021, 3(2): 13-20.
- [4] 赵超,苏华,关家印.面向精神障碍服刑人员心理矫治的实体交互设计研究[J].工业设计,2020(12):46-49.
ZHAO Chao, SU Hua, GUAN Jia-yin. Designing Psychological Correction of Tangible Interaction for Prisoners with Mental Illness[J]. Industrial Design, 2020(12): 46-49.
- [5] HORNECKER E, BUUR J. Getting a Grip on Tangible Interaction: A Framework on Physical Space and Social Interaction[C]// Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Montréal, Québec, Canada. New York: ACM, 2006: 437-446.
- [6] 龚杰民,王献青.人机交互技术的进展与发展趋向[J].西安电子科技大学学报,1998,25(6):782-786.
GONG Jie-min, WANG Xian-qing. The Progress and Trends of Human Computer Interaction[J]. Journal of Xidian University, 1998, 25(6): 782-786.
- [7] SHAER O, HORNECKER E. Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions[J]. Foundations and Trends in Human-Computer Interaction, 2010, 3(1-2): 1-137.
- [8] PERLMAN R. Using Computer Technology to Provide a Creative Learning Environment for Preschool Children. AI Memo 360[J]. Mit Ai Lab Memo Logo Memo, 1976: 24.
- [9] AISH R. 3D Input for CAAD Systems[J]. Computer-Aided Design, 1979, 11(2): 66-70.
- [10] AISH R, NOAKES P. Architecture without Numbers—CAAD Based on a 3D Modelling System[J]. Computer-Aided Design, 1984, 16(6): 321-328.
- [11] WELLNER P, MACKAY W, GOLD R. Back to the Real World[J]. Communications of the ACM, 1993, 36(7): 24-26.
- [12] FITZMAURICE G W, ISHII H, BUXTON W A S. Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces[C]// Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 1995: 442-449.
- [13] FITZMAURICE G W. Graspable User Interfaces[M]. Toronto: University of Toronto, 1996.
- [14] MIT 实验室.有形媒体工作室[EB/OL].(2020-05-19)[2022-04-20]. <https://tangible.media.mit.edu/person/hiroshi-ishii/>.
- [15] ISHII H, ULLMER B. Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms[C]// Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 1997:

- 234-241.
- [16] 董士海. 人机交互的进展及面临的挑战[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(1): 1-13.
DONG Shi-hai. Progress and Challenge of Human-Computer Interaction[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(1): 1-13.
- [17] 关琰. 普适计算与自然界面设计[J]. 装饰, 2009(5): 76-77.
GUAN Yan. Pervasive Computing and Natural Interface Design I Guan Yan[J]. Zhuangshi, 2009(5): 76-77.
- [18] 范俊君, 田丰, 杜一, 等. 智能时代人机交互的一些思考[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(4): 361-375.
FAN Jun-jun, TIAN Feng, DU Yi, et al. Thoughts on Human-Computer Interaction in the Age of Artificial Intelligence[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48(4): 361-375.
- [19] COHEN J, WITHGOTT M, PIERNOT P. Logjam: A Tangible Multi-Person Interface for Video Logging[C]// Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems. Pittsburgh, Pennsylvania, USA. New York: ACM, 1999: 128-135.
- [20] PRICE S, ROGERS Y. Let's Get Physical: The Learning Benefits of Interacting in Digitally Augmented Physical Spaces[J]. Computers & Education, 2004, 43(1-2): 137-151.
- [21] ARIAS E, EDEN H, FISHER G. Enhancing Communication, Facilitating Shared Understanding, and Creating Better Artifacts by Integrating Physical and Computational Media for Design[C]// Proceedings of the 2nd conference on Designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques. Amsterdam, The Netherlands. New York: ACM, 1997: 1-12.
- [22] SUZUKI H, KATO H. Interaction-level Support for Collaborative Learning: AlgoBlock - An Open Programming Language[C]. New Jersey: In Proceedings of the 2nd conference on designing interactive systems: processes, practices, methods, and technique, 1997: 1-12.
- [23] STANTON D, BAYON V, NEALE H, et al. Classroom Collaboration in the Design of Tangible Interfaces for Storytelling[C]// Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Seattle Washington USA. New York, NY, USA: ACM, 2001: 482-489.
- [24] DOURISH P. Where the action is: the foundations of embodied interaction[M]. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2001.
- [25] HORNECKER E. A Design Theme for Tangible Interaction: Embodied Facilitation[M]// ECSCW 2005. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006: 23-43.
- [26] BONGERS B. Interactivating Spaces[C]. Baden-Baden: The 4th Annual Symposium on Systems Research in the Arts: Music, Environmental Design and the Choreography of Space, 2002.
- [27] CIOLFI L. Situating "Place" in Interaction Design: Enhancing the User Experience in Interactive Environments[D]. Limerick: University of Limerick, 2004.
- [28] ISHII H, LAKATOS D, BONANNI L, et al. Radical Atoms[J]. Interactions, 2012, 19(1): 38-51.
- [29] ULLMER B, ISHII H. Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces[J]. IBM Systems Journal, 39(3.4): 915-931.
- [30] ISHII H. Tangible Bits: Beyond Pixels[C]// Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction. Bonn, Germany. New York: ACM, 2008: xv-xxv.
- [31] HORNECKER E, MARSHALL P, ROGERS Y. From Entry to Access: How Shareability Comes about[C]// Proceedings of the 2007 conference on Designing pleasurable products and interfaces. Helsinki, Finland. New York: ACM, 2007: 328-342.
- [32] HOLMQUIST L E, REDSTRÖM J, LJUNGSTRAND P. Token-Based Access to Digital Information[C]// Proceedings of the 1st international symposium on Handheld and Ubiquitous Computing. Karlsruhe, Germany. New York: ACM, 1999: 234-245.
- [33] ULLMER B A. Tangible Interfaces for Manipulating Aggregates of Digital Information[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [34] ULLMER B, ISHII H, JACOB R J K. Token+constraint Systems for Tangible Interaction with Digital Information[J]. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 2005, 12(1): 81-118.
- [35] FISHKIN K P. A Taxonomy for and Analysis of Tangible Interfaces[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2004, 8(5): 347-358.
- [36] SHARLIN E, WATSON B, KITAMURA Y, et al. On Tangible User Interfaces, Humans and Spatiality[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2004, 8(5): 338-346.
- [37] WENSVEEN S A G, DJAJADININGRAT J P, OVERBEEKE C J. Interaction Frogger: A Design Framework to Couple Action and Function through Feedback and Feedforward[C]// Proceedings of the 5th conference on Designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques. Cambridge, MA, USA. New York: ACM, 2004: 177-184.
- [38] HOVEN E V D, EGGEN B. Tangible Computing in Everyday Life: Extending Current Frameworks for Tangible User Interfaces with Personal Objects[C]// MARKOPOULOS P, EGGEN B, AARTS E, et al. European Symposium on Ambient Intelligence. Berlin: Springer, 2004: 230-242.
- [39] KOLEVA B, BENFORD S, NG K H, et al. A Framework for Tangible User Interfaces[C]. Copenhagen: Workshop-on Real World User Interfaces, 2003: 46-50.
- [40] JIAO J. Literature Review in Learning with Tangible Technologies[R]. Hannover: NESTA Futurelab Report, 2004.
- [41] ANTLE A N. The CTI Framework: Informing the Design of Tangible Systems for Children[C]// Proceedings

- of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction. Baton Rouge, Louisiana. New York: ACM, 2007: 195-202.
- [42] MARSHALL P, ROGERS Y, HORNECKER E. Are Tangible Interfaces Really any Better than other Kinds of Interfaces[J]. Workshop on Tangible User Interfaces in Context & Theory at Chi, 2007.
- [43] PRICE S, FALCÃO T P, SHERIDAN J G, et al. The Effect of Representation Location on Interaction in a Tangible Learning Environment[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction. Cambridge, United Kingdom. New York: ACM, 2009: 85-92.
- [44] PRICE S, SHERIDAN J G, FALCÃO T P. Action and Representation in Tangible Systems: Implications for Design of Learning Interactions[C]// Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction. Cambridge, Massachusetts, USA. New York: ACM, 2010: 145-152.
- [45] SUZUKI H, KATO H. AlgoBlock: a Tangible Programming Language, A Tool for Collaborative Learning[C]. London: Proceedings of 4th European Logo Conference, 1993.
- [46] MOORTHY P, HONAUER M, HORNECKER E, et al. Hello World: A Children's Touch and Feel Books Enhanced with DIY Electronics[C]// Proceedings of the 16th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia. Stuttgart, Germany. New York: ACM, 2017: 481-488.
- [47] EDEN H, SCHARFF E, HORNECKER E. Multilevel Design and Role Play: Experiences in Assessing Support for Neighborhood Participation in Design[C]// Proceedings of the 4th Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, And Techniques. New York: ACM, 2002: 387-392.
- [48] KIM M J, MAHER M L. The Impact of Tangible User Interfaces on Spatial Cognition during Collaborative Design[J]. Design Studies, 2008, 29(3): 222-253.
- [49] CLARKE L, HORNECKER E, RUTHVEN I. Fighting Fires and Powering Steam Locomotives: Distribution of Control and Its Role in Social Interaction at Tangible Interactive Museum Exhibits[C]// Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Yokohama, Japan. New York: ACM, 2021: 1-17.
- [50] LI Yan-hong, KOTHIYAL A, WEBER T, et al. Designing Tangible as an Orchestration Tool for Collaborative Activities[J]. Multimodal Technologies and Interaction, 2022, 6(5): 30.
- [51] JAFRI R, ALJUHANI A M, ALI S A. A Tangible Interface-Based Application for Teaching Tactual Shape Perception and Spatial Awareness Sub-Concepts to Visually Impaired Children[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 3: 5562-5569.
- [52] MÜLLER-RAKOW A, FLECHTNER R. Designing Interactive Music Systems with and for People with Dementia[J]. The Design Journal, 2017, 20(1): S2207-S2214.
- [53] MAHMUD A, SOYSA A I. POMA: A Tangible User Interface to Improve Social and Cognitive Skills of Sri Lankan Children with ASD[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2020(144): 102486.
- [54] BECCALUVA E, RICCARDI F, GIANOTTI M, et al. VIC—A Tangible User Interface to Train Memory Skills in Children with Intellectual Disability[J]. International Journal of Child-Computer Interaction, 2022, 32: 100376.
- [55] FOLLMER S, LEITHINGER D, OLWAL A, et al. INFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation[C]// Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology. St. Andrews, Scotland, United Kingdom. New York: ACM, 2013: 417-426.
- [56] JENSEN M V, BUUR J, DJAJADININGRAT T. Designing the User Actions in Tangible Interaction[C]// Proceedings of the 4th decennial conference on Critical computing: between sense and sensibility. Aarhus, Denmark. New York: ACM, 2005: 9-18.
- [57] DJAJADININGRAT T, OVERBEEKE K, WENSVEEN S. But How, Donald, Tell us How?: On the Creation of Meaning in Interaction Design through Feedforward and Inherent Feedback[C]// Proceedings of the 4th conference on Designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques. London, England. New York: ACM, 2002: 285-291.
- [58] BUUR J, JENSEN M V, DJAJADININGRAT T. Hands-only Scenarios and Video Action Walls: Novel Methods for Tangible User Interaction Design[C]// Proceedings of the 5th Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, And Techniques. New York, NY, USA: ACM, 2004: 185-192.
- [59] RUBIDGE S, MACDONALD A. Sensuous Geographies: A Multi-User Interactive/Responsive Installation[J]. Digital Creativity, 2004, 15(4): 245-252.
- [60] HORNECKER E. A Design Framework for Designing Tangible Interaction for Collaborative Use[J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2000(1): 10.
- [61] HORNECKER E. Creative Idea Exploration within the Structure of a Guiding Framework: The Card Brainstorming Game[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, And Embodied Interaction. New York: ACM, 2010: 101-108.