



# 实物用户界面: 起源、发展与研究趋势

米海鹏<sup>1\*</sup>, 王濛<sup>1</sup>, 卢秋宇<sup>1</sup>, 徐迎庆<sup>2,1\*</sup>

1. 清华大学美术学院信息艺术设计系, 北京 100084

2. 清华大学未来实验室, 北京 100084

\* 通信作者. E-mail: haipeng.mi@acm.org, yqxu@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017-11-06; 接受日期: 2018-02-07; 网络出版日期: 2018-04-09

国家重点研发计划 (批准号: 2016YFB1001402)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61232013) 和国家自然科学基金青年项目 (批准号: 61402250) 资助

**摘要** 实物用户界面是一种新型的人机交互界面范式. 通过实物对象与数字信息的耦合, 实物用户界面允许用户通过抓握、移动、组装等自然的操作方式对数字信息进行操作. 结合机电驱动等新兴技术, 实物用户界面也可以通过自主移动、形状改变等方式, 将数字内容的变化在真实世界中产生物理反馈. 在诸多领域中, 包括信息可视化、日常办公、教育与娱乐, 以及支持创意创作等方面, 实物用户界面都具有巨大的应用潜力. 本文对实物用户界面的研究发展做了较细致的梳理, 介绍了实物用户界面的起源及发展、理论框架、实现技术及应用领域等几方面, 并展望了这一研究领域未来的发展趋势.

**关键词** 实物用户界面, 自然用户界面, 界面范式

## 1 引言

近 30 年以来, 尽管计算机的计算能力获得了大幅的提升, 但人机交互界面似乎一直被限制在基于窗口 (window)、图标 (icon)、菜单 (menu) 和指针 (pointer) 的 WIMP 范式 (WIMP paradigm) 下. 随着研究者对“后 WIMP” (post-WIMP) 交互范式的不断探索, 涌现出了一批新的交互范式的概念, 实物用户界面就是这些新交互范式之一.

实物用户界面的主要研究范畴是人通过抓握、操作、组装等自然行为与实物对象发生交互. 相对于图形用户界面 (GUI) 主要信息均以虚拟方式呈现的形式, 实物用户界面 (tangible user interface, TUI) 更强调通过信息与物理实体耦合的方式, 实现物理化操作与物理形态的信息呈现.

自 20 世纪 90 年代 TUI 的概念出现时起, 经过 20 多年的发展, 实物用户界面取得了广泛的成果. 然而, 使用实物对象进行信息处理并不是近些年才出现的新方法. 事实上, 无论是古罗马的算板, 还是我国古代广泛应用的算盘 (图 1), 都可以看作为是实物用户界面最早的概念雏形, 尽管他们与今天的

**引用格式:** 米海鹏, 王濛, 卢秋宇, 等. 实物用户界面: 起源、发展与研究趋势. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 390–405, doi: 10.1360/N112017-00227  
Mi H P, Wang M, Lu Q Y, et al. Tangible user interface: origins, development, and future trends (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 390–405, doi: 10.1360/N112017-00227

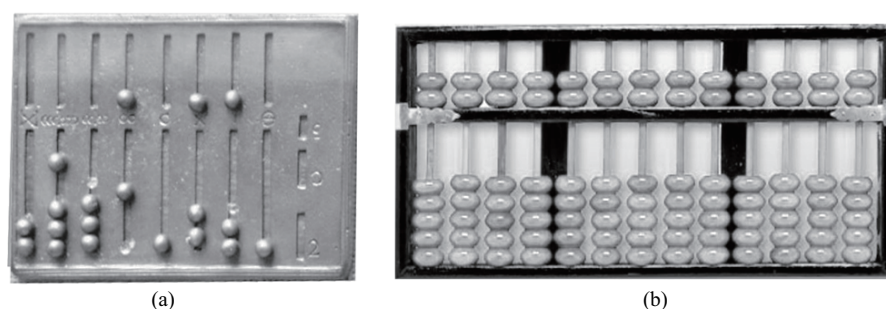


图 1 (a) 古罗马算板和 (b) 中国古代算盘

Figure 1 (a) A Roman abacus and (b) a Chinese abacus

实物用户界面看起来非常不同, 但是其基本原理 —— 使用实物对象 (算珠) 表示信息 —— 则已非常接近 TUI 的概念.

进入 21 世纪, 人类对于自然交互的需求越来越迫切. 而 TUI 则是面向下一代自然用户界面的重要范式之一. 其接近人类自然操作行为模式的交互方式也蕴含着巨大的应用潜力. 尤其在一些有国家重大需求的研究方向, TUI 也可以发挥重要的作用. 这些潜在的应用包括: 在智慧城市领域, 基于城市建筑物和主要设施实物模型的互动规划模拟和信息可视化方法; 在防灾减灾领域, 基于对象区域的物资, 救援配置的实物模型进行推演模拟和实时信息集成与呈现; 在国防领域, 基于战斗单位实物模型的战役推演电子沙盘系统; 在机械设计中, 通过实物组装把设计与调试融为一体; 以及在未来教育领域, 基于 TUI 的 STEAM 教育方法等.

可以认为, 实物用户界面是未来 10 年最重要的交互界面研究领域之一, 代表了未来人机交互竞争的热点和高地. 本文将通过对这一研究问题的发展起源、理论框架、研究领域和主要技术等方面的梳理, 试图构建出实物用户界面发展过程中的大致图景, 并展望未来的发展趋势.

## 2 起源与发展

实物用户界面的起源及发展可以分为几个阶段. 表 1 简要梳理了实物用户界面发展过程中的主要阶段, 以及代表性的研究工作.

### 2.1 实物用户界面的起源

实物用户界面的先驱工作可以追溯到 20 世纪 80 年代初期. Frazer 等<sup>[1]</sup> 尝试寻找用于计算机辅助设计 (CAD) 的替代方案, 他们提出了一种新的 3D 建模系统的概念. 在这个系统中, 用户可以通过操作实物组件进行建模, 而对应的虚拟模型则会呈现在显示器中 (图 2(a), 根据文献 [1] 图片重绘).

另外一些比较著名的早期研究工作还包括“卡片编程器” (slot machine)<sup>[2]</sup> —— 这一工作采用了物理卡片进行 Logo 语言编程; 以及“弹珠应答机” (marble answering machine)<sup>[3]</sup> —— 这项设计工作提出将未接来电用彩色弹珠来表示, 每有一个来电, 就会掉出一个弹珠, 用户通过拾取弹珠放到特定的位置, 即可回放相应的电话留言 (图 2(b), 根据文献 [3] 图片重绘). 这些早期先驱工作为 20 世纪 90 年代末期出现的实物交互界面的理论提供了灵感和基础.

而当前学术界通用的实物用户界面的概念一般认为起源于 1995 年由 Fitzmaurice 等<sup>[4]</sup> 提出的可抓取界面 (graspable interface) —— 通过一个可抓取的手柄去操控数字物体.

表 1 实物用户界面的起源与发展  
Table 1 Tangible user interface: origins and development

| 特征                   |           | 代表性工作                                   | 特点               | 发表年份 |
|----------------------|-----------|-----------------------------------------|------------------|------|
| 早期先驱工作<br>1970s–1997 | 早期萌芽      | Slot machine <sup>[2]</sup>             | 使用物理卡片进行编程       | 1976 |
|                      |           | Marble answering machine <sup>[3]</sup> | 使用物理实体指代信息       | 1995 |
|                      |           | Graspable interface <sup>[4]</sup>      | 可抓握界面            | 1995 |
| Tangible bits        | 无源        | metaDesk <sup>[6]</sup>                 | 桌面上的实物控件操作       | 1997 |
|                      |           | SandScape <sup>[7]</sup>                | 柔性任意塑形的信息耦合呈现    | 2002 |
|                      |           | SLAP widget                             | 桌面上较完备的实物操作组件    | 2009 |
|                      | 组装        | Topobo <sup>[12]</sup>                  | 拼插结构与动作记忆        | 2004 |
|                      |           | Lumino                                  | 光纤束结构实现无源多模块组装   | 2010 |
|                      |           | TwistBlock <sup>[14]</sup>              | 传感器网络结构实现复杂组装    | 2017 |
|                      | 自驱动       | Actuated workbench <sup>[9]</sup>       | 电磁阵列实现多物体动态反馈    | 2002 |
|                      |           | Tangbile bots <sup>[10]</sup>           | 小机器人实现复杂动态反馈     | 2011 |
|                      |           | zooids <sup>[11]</sup>                  | 实现动态反馈的微型机器人平台   | 2017 |
|                      |           | PneUI <sup>[17]</sup>                   | 气动控制形状改变         | 2013 |
| Radical atoms        | 物理属性<br>与 | inForm <sup>[18]</sup>                  | 垂直运动阵列实现复杂表面形态变化 | 2013 |
|                      |           | bioLogic <sup>[26]</sup>                | 生物材料实现形状改变       | 2015 |
|                      | 形状改变      | LIME <sup>[19]</sup>                    | 液态材料实现物理特征及形状改变  | 2016 |
|                      |           | Programmable droplets <sup>1)</sup>     | 水滴受控运动及变形        | 2018 |

1) <http://tangible.media.mit.edu/project/programmable-droplets/>.

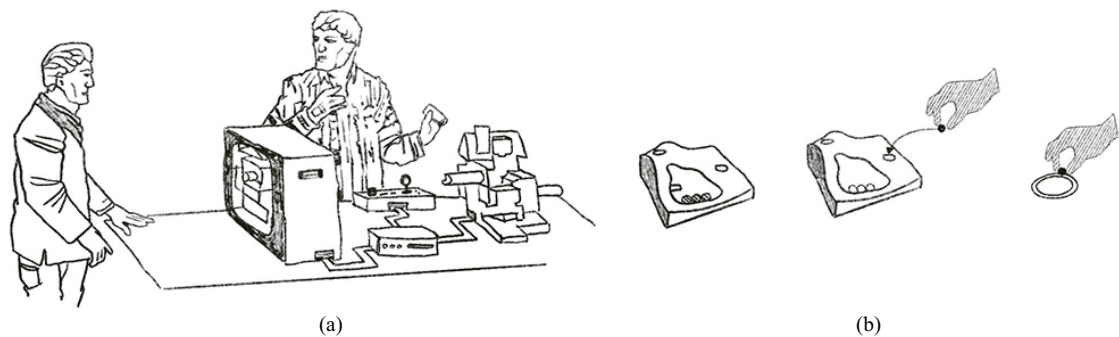


图 2 (a) Frazer 的“3D 建模系统”和 (b) Bishop 的“弹珠应答机”  
Figure 2 (a) Frazer’s 3D manipulating system and (b) Bishop’s marble answering machine

这些早期工作已经初步具备了使用物理实体指代信息或者操作信息的功能, 但是作为一种新的交互范式, 其理论框架尚没有形成.

2.2 实物用户界面的发展

1997 年, Massachusetts Institute of Technology 媒体实验室的 Ishii 与他的学生共同发表了一篇题为“可触 bits” (Tangible bits) 的文章<sup>[5]</sup>, 第 1 次采用了 Tangible 一词描述了这种界面形式. “bits” 一般意义下是无形的, 它也隐含了在图形用户界面的框架下. 数字空间与物理空间是泾渭分明的, 所有操作必须经由图形显示器才能完成. 而“可触”概念的提出则致力于打破这一藩篱, 基于这一概念的

实物用户界面则可以提供基于实物操作的输入与输出方式。

在“Tangible bits”这一概念提出之后,实物用户界面经过了20多年的发展,形成了较完整的体系。实物用户界面在初期面临的问题,是如何通过提供适当的物理实体(tokens),产生丰富的交互形态。例如metaDesk<sup>[6]</sup>使用抽象几何物体代表操作GUI界面中信息(图片等)的手柄(handler)。SandScape<sup>[7]</sup>等工作则突破了TUI必须是特定物理实体的限制,例如使用沙子等流质物质实现了任意物理塑性与信息空间的耦合。TUI作为操作控件(widgets)的功能也越来越完善,例如SLAP widgets<sup>[8]</sup>已经实现了对应GUI常用控件的各种TUI形态。但是这些TUI都是无源的,一般仅作为输入界面来使用。输出仍需要通过投影或屏幕来呈现。

为了能够让信息反馈不仅仅呈现在屏幕或投影表面,也能够以物理形式产生反馈,研究者提出了各种有源的方案来让TUI可以动起来。较早期的研究工作的代表是actuated workbench<sup>[9]</sup>,通过电磁铁驱动的方式让操作表面上的TUI可以自主运动,形成运动形式的反馈(kinetic feedback)。随着机器人技术的发展,越来越多的自驱动TUI采用了机器人技术<sup>[10,11]</sup>,并且呈现体积越来越小型化,同时配置的单元数量越来越多,反馈形态越来越丰富的特点。

物理组装是TUI发展的另一个重要分支。其核心目标是能够通过类似搭建积木的方式自由创建复杂的立体模型,并同数字空间的3D模型形成耦合,或是独自具备交互能力。Topobo<sup>[12]</sup>采用了动作记忆(kinetic memory)技术,使得积木拼插组成的模型具备了简单的交互功能。Lumino<sup>[13]</sup>采用了光纤束结构,通过将多层堆叠的模块视觉识别码层层传递至底层,实现了无源环境下对多层搭建模块结构的数字模型耦合。TwistBlock<sup>[14]</sup>则通过引入传感器网络技术,实现了对复杂组装模型的识别与实时耦合。

这些不同分支领域的发展逐步勾勒出TUI界面交互范式的大致图景。然而这些不断发展的技术与应用,也逐渐显示出了TUI界面的局限性。作为联结物理世界与数字世界的桥梁,TUI能够较好地实现从物理世界向数字世界的映射,却难以丰富地实现从数字世界向物理世界的反馈。换句话说,信息在数字世界中所展示出来的自由度,仍然远远高于TUI在物理世界中能够提供的自由度。针对这一局限性,一些新的理论和方法也陆续发展出来。

### 2.3 实物用户界面的新视野

21世纪以来,针对TUI日益显现的局限性,研究者陆续提出了一些新的理论观点。Holman等<sup>[15]</sup>于2008年提出的“有机用户界面”(organic user interface, OUI),提出使用柔性的可弯折形变的界面(类似纸张)概念;Minuto等<sup>[16]</sup>于2011年提出的“智能材料界面”(smart material interface, SMI),提出使用智能材料设计制作新型的可变性界面的概念。2012年,继提出“Tangible bits”之后,Ishii等提出了“Radical atoms”的概念(详见3.3小节)。这些新的理论观点均提出TUI若要在物理世界中提供更多的操作及呈现自由度,则需要通过引入新材料、新结构、新工艺等手段,实现界面本身的物理形态或物理属性的改变。

在这些理论的指导下,近些年出现了一些新的工作,为TUI的发展打开了新的视野。例如,PneUI通过设计新的结构和驱动方式来实现物理形态的改变<sup>[17]</sup>,bioLogic通过引入新的材料及新的工艺实现物理形态随环境状态的变化。inForm<sup>[18]</sup>利用了阵列结构来实现复杂的宏观物理形态改变,甚至是模拟力的作用。LIME<sup>[19]</sup>和programmable droplets则通过引入新的材料和新的物理学原理实现对液态界面的形变控制。

可以预见,随着新材料、新工艺等技术的发展,未来的实物用户界面将具有更丰富的物理反馈形态,建立数字世界与物理世界之间更强的耦合。

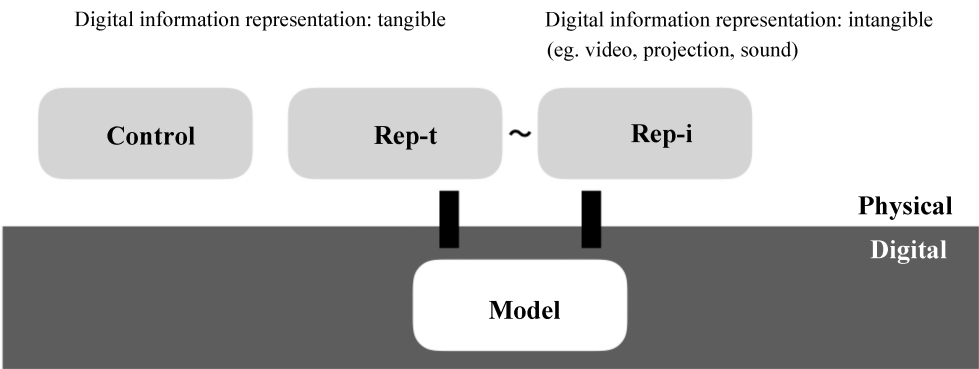


图 3 MCRit 模型  
Figure 3 MCRit model

3 理论框架

在实物用户界面发展过程中, 研究者提出了若干理论, 建立了相应的理论框架. 这些研究为实物用户界面发展提供了重要的理论基础.

3.1 MCRit 模型

2001 年, Ullmer 与 Ishii<sup>[20]</sup> 在图形用户界面的 MVC 模型 (model, view, control) 的基础上, 进一步提出了面向实物用户界面的 MCRit 模型 (model, control, representation: intangible and tangible). 相比于图形用户界面, MCRit 模型强调了将物理形态的信息呈现与控制相结合. 这将在一定程度上消除输入设备与输出设备的差别.

MCRit 模型 (图 3, 根据文献 [20] 图片重绘) 也可表述为实物用户界面的如下 4 种属性:

- (1) 实物对象与数字信息耦合;
- (2) 实物对象代表一种交互控制, 这种控制通过移动或操作这一实物来完成;
- (3) 实物对象与数字化呈现 (音频、图像等) 发生感知耦合 (perceptually coupling);
- (4) 实物对象的状态体现了整个系统状态的核心方面 (因此即使断电, 系统也部分可读).

这一模型较好地描述了无源 TUI 的性质与特征. 然而, 这一模型存在的局限性也非常明显. 对于无源 TUI 界面, 任一实物对象均需要用户的直接操作. 虽然在输入过程中得以实现实物对象与数字信息的耦合, 但是仅依靠数字化呈现, 却很难在输出过程中实现物理与数字的耦合.

3.2 ATUI 模型

为了在使用 TUI 界面的输出过程中, 也能实现更好的数字信息与实物对象的耦合, 研究者在无源 TUI 模型的基础上引入了驱动机制. Mi<sup>[21]</sup> 在 2011 年总结了自驱动实物用户界面 ATUI (actuated tangible user interface) 模型 (图 4, 根据文献 [21] 图片重绘).

ATUI 模型在描述 TUI 的 MCRit 模型基础上引入了驱动 (actuation), 使得一部分数字信息 (例如数字对象的位置、运动、形态等) 可以在与其耦合的物理实体上通过物理反馈 (运动反馈、形状改变等) 的形式呈现出来.

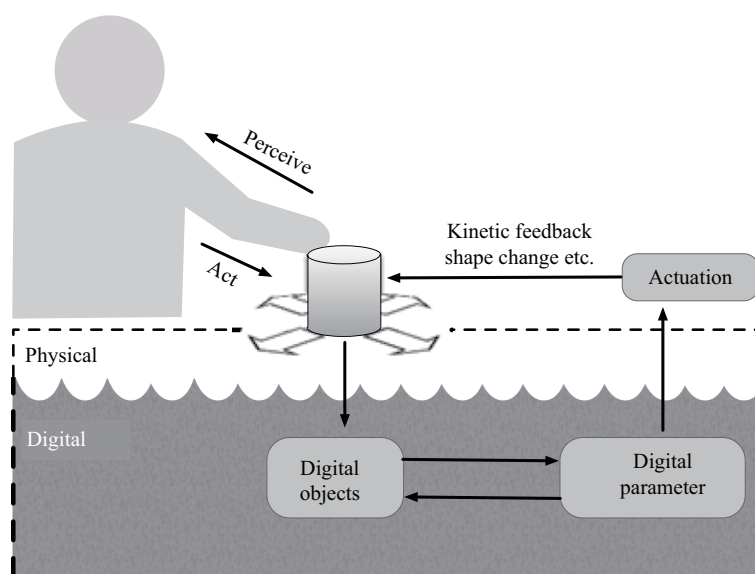


图 4 ATUI 模型

Figure 4 ATUI model

相比无源 TUI 仅提供静态的可操作物理实体, ATUI 模型可以在一定程度上实现 TUI 的动态反馈. 例如当与某一 TUI 相关联的数字对象在屏幕上的位置发生改变时, 这一 TUI 也随之改变位置, 进而实现物理实体与数字对象的强耦合.

然而, 基于驱动机制的物理反馈也仍具有局限性. 相比数字空间中的数字对象行为自由度, ATUI 的行为反馈程度终归有限. 例如, 在数字空间中的两个实体合二为一, 或者一个实体分裂为两个, 在物理世界就很难实现相应的行为反馈.

### 3.3 Radical atoms

Radical atoms 概念的出现是为了突破 “Tangible bits” 理论的局限. “‘Radical atoms’ 是能够改变其形状, 顺应其束缚, 并告知用户其功能的一种未来物质. ‘Radical atoms’ 也是未来人 - 物质交互的新理念. 基于此, 一切数字信息都将拥有一个物理表象, 可以直接与其交互. 我们将无需再考虑设计界面, 物质本身即是界面” [22].

图 5 (根据文献 [22] 图片重绘) 用冰山与水的关系隐喻展示了图形用户界面 (GUI)、实物用户界面 (TUI), 以及 Radical atoms 的不同视野. GUI 仅允许看到信息, 并通过非直接的方式操作它们. 就如同我们透过水面看到水下的物体却不能直接与其交互. TUI 就像一座冰山, 一小部分数字信息涌出了水面并拥有了物理实体. 因此可以直接与其交互. 而 Radical atoms 则描述了对未来交互的一种期望 —— 所有物理信息都将拥有数字表象, 物质即界面.

Radical atoms 概念激发了一系列对新型界面形态的探索. 一些新的研究工作也已初步展示出 “物质即界面” 的特点.



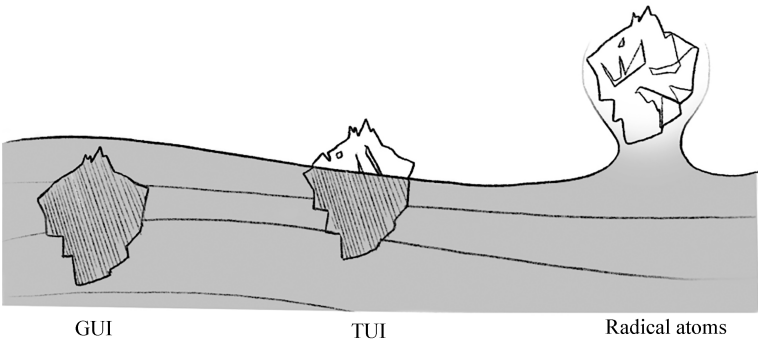


图 5 从 GUI 到 Radical atoms  
Figure 5 From GUI to Radical atoms

### 3.4 实物用户界面的分类与特征

#### 3.4.1 实物用户界面分类与基本形态

Ullmer 曾在 MCRit 模型的基础上, 提出了 TUI 的 3 个基本形态<sup>[23]</sup>. 如图 6 (根据文献 [23] 图片重绘) 所示.

(1) “交互表面” (interactive surface). 交互表面一般指可交互的桌面、地面、墙面等. 实物对象可以放置在交互表面上, 也可被直接操作. 实物对象的空间位置以及他们的相互关系可以用来表征系统状态.

(2) “构件组装” (assembly). 类似于拼插积木, 通过将一组构件模块进行连接组合, 形成具有语义的结构. 构件的空间位置以及组合构件的顺序均可以用来表征系统状态.

(3) “嵌入约束” (token + constraints). “约束”指一种特定的结构 (沟槽、格子等), 而嵌入其中的实物对象只能以约束结构规定的方式来放置或运动. 这一方式可以为用户提供物理形态的交互引导.

随着新的 TUI 理论与方法的不断发展, 上述几种形态分类已经不能用来完全描述新出现的 TUI 了. 考虑 ATUI, Radical atoms 等新理论模型, 可以大致通过如下新的形态分类对新的 TUI 界面进行描述. 如图 7 所示,

(1) “几何塑性” (geometry and relief). 通过在平面上引入一组高度可变的顶杆阵列, 可以模拟出类似于地形图的高程曲面, 实现 2.5D 的塑性.

(2) “运动反馈” (kinetic feedback). 是指将实物对象加入自主运动功能 (机器人技术), 使得实物对象除了可以被用户操作之外, 也可以被数字系统控制自主运动 (位置、角度、高度、体积变化等), 进而实现信息的物理形态反馈.

(3) “功能形变” (shape-changing). 是指采用功能材料 (记忆合金、生物材料、液态金属等) 设计的实物用户界面, 通过信号驱动或环境驱动的方式, 使实物用户界面的形状发生改变, 从而达到更多样化的信息提示和反馈的功能.

#### 3.4.2 距离尺度 – 隐喻维度模型

将物理世界中的实物对象与数字世界中的信息耦合是 TUI 的一个重要特征. 数字信息有很多种形态, 包括静态媒体 (图片、3D 模型等)、动态媒体 (视频等)、属性特征 (颜色、材质等)、复杂数据结构 (多种信息的组合) 等.

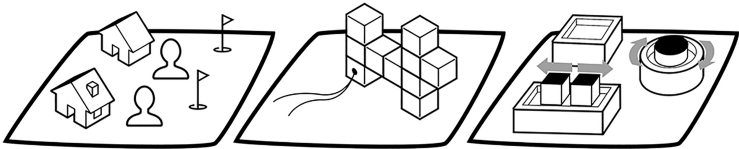


图 6 无源 TUI 的 3 种基本形态  
Figure 6 Classifications of passive TUIs

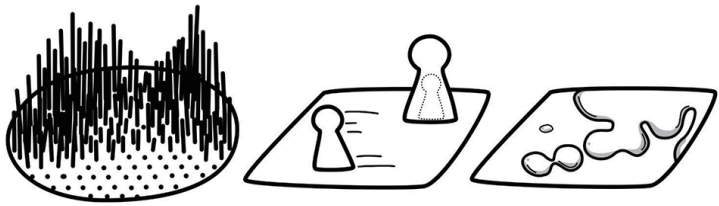


图 7 TUI 的 3 种新形态  
Figure 7 Classifications of new TUIs

实物对象与数字信息耦合方式可以通过两个维度来描述: 距离尺度 (embodiment) 和隐喻维度 (metaphor)<sup>[24]</sup>. 距离尺度具有 4 个层次, 分别是:

- (1) “完全重合” (fully embodied). 指输出设备即是输入设备;
- (2) “近距离” (nearby). 指输出呈现在输入对象不远处;
- (3) “环境内” (environment). 指输出呈现在用户周围;
- (4) “远程” (remote). 指输出呈现在相对较远的距离 (例如另一块屏幕甚至另一个房间).

而隐喻维度主要有两种类型:

- (1) “名词性隐喻” (metaphor of nouns). 指关联于实物对象的形状;
- (2) “动词性隐喻” (metaphor of verbs). 指关联于实物对象的运动或者对其的操作.

此外, 根据实物对象与数字信息耦合的动静态关系, 也可以归纳为一个描述 TUI 特性的重要维度<sup>[20]</sup>:

- (1) “静态绑定” (static binding). 指由系统设计者定义的耦合关系, 用户无法改变这一耦合;
- (2) “动态绑定” (dynamic binding). 指耦合关系可以由用户自行定义.

通过这一距离尺度 – 隐喻维度模型, 可以更加准确地描述和分析 TUI 的功能及应用特性.

### 3.4.3 示能性与约束

示能性 (affordance) 是人机交互学科中的一个重要概念, 一般可理解为一个对象提供了一种操作的功能. 例如一个按钮提供了点击的功能; 而一个滚动条则提供了拖动的功能. 对于实物用户界面, 其示能性是一个特别的属性. 一个实物对象可以提供远远超过虚拟对象的示能性信息. 其形状、大小、材质, 甚至重量和硬度等都会给用户提供使用提示.

约束 (constraint) 是另一个重要概念. 与示能性相反, 约束限制了操作的可能性. 如果示能性是告诉用户 “可以做什么”, 那么约束就是告诉用户 “不可以做什么” 或者 “只可以做什么”. 一般来说, 示能性与约束常常共同耦合到一个用户界面当中. 微波炉旋钮即是一个很好的例子.



除了传统的机械形态的示能性和约束, 一些新的研究尝试在 TUI 的设计中运用新材料, 产生新的约束形态. 例如改变按钮的软硬度来区分按钮是否可被按下<sup>[25]</sup>, 或者通过变化凸起的高度形成不同的按键布局<sup>[19]</sup>. 恰当运用示能性与约束的耦合, 将有可能设计出具有强大功能的 TUI.

## 4 实现技术

针对 TUI 的实现技术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.

### 4.1 感知技术

感知技术主要用于对 TUI 的 ID、位置、姿态、行为等各种要素进行检测并转化成可被处理的信号.

#### 4.1.1 RFID

射频识别 (radio-frequency identification, RFID) 是一种无线通信技术. 它通过射频信号自动辨识与追踪目标附有 RFID 标签的对象. 一般 RFID 多用于近距离识别, 需要将贴有标签的物体置于或者扫过 RFID 读取器 (RFID reader). 除了识别单一标签, 读取数据外, 一些应答器可以同时识别多个标签, 或向单个标签内写入数据.

在 TUI 的设计中, RFID 技术提供了一种简单稳定的耦合机制. 将特定的实物对象通过 RFID 标签与特定的数字信息绑定, 可以实现通过实物对象对数字信息的查询或切换. 但 RFID 技术的主要缺点是需要特殊的读取器, 以及不能很好支持对实物对象空间位置状态及相互关系的识别.

#### 4.1.2 机器视觉

在 TUI 中, 机器视觉常应用于平面空间交互场景. 利用机器视觉, 可以对处于平面的多个物体进行实时定位, 同时提供角度、颜色、大小、形状等信息. 计算机可通过特定编码图案来区分物体的身份, 并精确计算其在二维平面上的位置和旋转角度. 机器视觉的算法针对特定编码图案设计进行了专门优化, 因此可以比基于机器学习的系统更鲁棒, 也更准确, 硬件需求也更低. 应用于 TUI 的机器视觉系统通常至少包含 3 个组件: 一台高品质相机, 一个用于提供实时图形输出的投影仪, 以及定位监测软件.

基于机器视觉的识别技术提供了一种低成本且可靠的耦合机制, 可以将实物对象的空间位置状态和相互关系进行识别, 并用来驱动与之耦合的数字系统.

不过, 基于机器视觉的 TUI 性能和可靠性容易受到光线的变化和运动模糊影响. 使用颜色来识别对象相对更为可靠, 但仅能少量识别高对比度颜色. 提高鲁棒性和识别速度的一种方法是采用特殊编码的红外反射图像, 并为相机安装红外滤镜.

#### 4.1.3 其他感知技术

除了以上两种常见的感知技术, 还有一些其他的感知技术被运用到 TUI 设计与应用中. 例如: 超声波测量技术、传感器网络技术、光学编码技术, 以及基于机器学习的信号处理技术等.

## 4.2 嵌入式信息处理

嵌入式信息处理主要用于有源 TUI 设计. 在一些有源 TUI 中, 通过嵌入微控制器, 来连接传感器从物理世界接收信息, 并通过执行器反作用于物理世界. 微控制器可以独立工作, 也可以与计算机进行通信. 使用微控制器的 TUI 往往具有复杂信息处理、快速响应, 以及复杂驱动等需求特点<sup>[18]</sup>. 有一些 TUI 设计也需要运用物联网 (IoT) 技术. 对于多个 TUI 协同工作的应用场景, 有时需要 TUI 自行组网通信. 例如通过有线或无线连接 (ZigBee 或者蓝牙)、动态组网并进行通信<sup>[14]</sup>.

## 4.3 驱动技术

驱动技术主要用于有源 TUI 设计, 以提供运动、形变等物理反馈. 一些新材料驱动技术的运用, 也使得无源 TUI 具有一定的驱动能力成为可能.

### 4.3.1 机电驱动

作为最常见, 也最成熟的技术, 机电驱动在 TUI 设计中已有广泛的应用. 采用机电驱动技术的 TUI 大都利用精心设计的机械结构或者电磁铁等电器元件, 来驱动物理实体运动或变形. 例如 Actuated workbench<sup>[9]</sup>, Tangible bots<sup>[10]</sup>, 以及 zooids<sup>[11]</sup> 等.

### 4.3.2 智能材料传感与驱动

近年来, 一些专注于 TUI 研究的科研人员将目光投向了智能材料. 各类层出不穷的智能材料, 也为 TUI 的发展注入了新的活力. 这些智能材料, 能在外界电场、磁场、压力、温度、湿度等刺激下可控地改变自身一种或多种性质, 包括颜色、透明度、相态、刚度、形状、电传导性、自发光等. 科研人员借助智能材料的特性, 实现用户界面的物理与材料性质的可控改变, 来丰富 TUI 输入、输出形式与交互方式<sup>[19, 26]</sup>.

### 4.3.3 其他驱动技术

除了上述介绍的一些驱动技术之外, 在 TUI 设计研究中也出现了一些新颖的驱动技术. 例如气动驱动技术<sup>[17]</sup>、超声波声压驱动技术, 以及利用独特的物理原理进行驱动的应用等.

## 4.4 技术难点与挑战

在工程实现方面, TUI 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, 各种技术均已较为成熟, 基本没有太大的技术难点.

然而, 另一方面, 随着 TUI 的发展越来越强调数字信息对物理世界产生反馈和影响, 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. 越来越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 TUI.

因此, 对于未来 TUI 的设计, 如何发展出更好的驱动技术将很可能成为较长期的技术难题和研究挑战.

## 5 应用领域

### 5.1 日常办公与生活

办公场景是 TUI 的主要应用领域之一. 从 metaDesk<sup>[6]</sup> 到 SLAP widgets<sup>[8]</sup>, 诸多 TUI 研究工作都致力于提供更加直观、自然、易用的办公辅助界面. 办公应用中的 TUI 形态既包括操作滑块、旋钮、滑杆、键盘等多种输入界面, 也包括近年来新出现的一些具备物理输出能力的界面. 例如 “move-it sticky notes”<sup>[27]</sup> 使用记忆合金制作了能够进行变形的便笺纸, 方便对用户进行提醒等操作. “FluxPaper”<sup>[28]</sup> 在普通的便签纸张中间嵌入磁粉层, 通过磁场控制, 可以实现便签自动进行对齐和在白板上受控移动等功能.

一些 TUI 设计面向日常应用的情景. 代表性研究之一是 “touch & activate”<sup>[29]</sup>, 通过贴装压电陶瓷片并进行简单的采样训练, 就可以将日常生活中的几乎任何物体改造成可识别的触摸界面. 而将无源 RFID 标签技术与实物对象相结合, 则可以实现更多的操作方式. 例如 “IDSense”<sup>[30]</sup> 这项工作, 就可以将普通的日常物品赋予平移、旋转、轻扫、覆盖等 4 种不同交互操作.

此外, TUI 设计还可以被应用到家居领域. 例如 “jamSheets”<sup>[31]</sup> 就提出了一种可以调节刚度的充气材料, 能够制成形状可调节的桌椅、鞋帽等.

### 5.2 信息可视化

TUI 能够为信息可视化提供丰富的、多模态的交互方式. 例如 Tangible bots<sup>[10]</sup> 使用能够在桌面上运动的轮式小车作为实物控件, 在对信息进行操作的同时, 还能够得到力或者扭矩的反馈. 而 PneuUI<sup>[17]</sup> 则提供了气动式的实物控件, 可以通过物理变形的方式进行交互, 进一步增加了实物界面的输入、输出维度.

通过引入可升降的驱动器阵列, inForm 通过 “几何塑形” 的方式成为形状显示器 (shape display)<sup>[18]</sup>, 可以提供物理形状的输出、动态的约束与示能性, 以及丰富的数字内容与物理内容交互的方式. Jiao 等<sup>[32]</sup> 的工作通过灵活控制可以弹起和收回的触针阵列, 设计了可以供视障人士进行触摸交互的触觉显示器.

通过与新材料技术结合, 可以实现具有形变特性的新型 TUI, 从而为信息的物理可视化方式提供更多的可能性. 例如 Lu 等<sup>[19]</sup> 的工作提出了基于液态金属的实体控件, 通过控制液态金属的变形与运动实现信息的遮挡、状态标记、注意力引导等交互.

### 5.3 教育与娱乐

计算机辅助学习的工具也是 TUI 设计的主要领域之一. 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<sup>[33,34]</sup>. 也有一些 TUI 系统应用在娱乐教育领域 (edutainment), 比如一些玩教具, 以及博物馆的科普互动装置等.

基于 TUI 的智能积木可以让孩子从直观的角度去理解抽象概念. 例如 “Topobo” 积木组件<sup>[12]</sup>, 可以用来搭建的机器生物, 并通过直接操作积木来录制特定的动作, 从而让自己组装的机器生物运动起来. 这一类智能积木可以帮助孩子们学习并了解平衡、运动姿态、身体结构等概念.

在娱乐领域中, TUI 也有着广泛的应用. 桌面实物交互系统中的很多技术具有参与性强, 易于多人协作等特点, 因此常常可以直接应用于桌游等领域. Kaltenbrunner 等<sup>[35]</sup> 在 2007 年提出了 “reac-TIVision” 桌面实物交互平台, 并利用该平台制作了一套现场音乐 DJ 表演系统. Wang 等<sup>[36]</sup> 的工作

则通过引入可变形 TUI, 在传统桌面实物交互的基础上加入了新的交互元素, 使得游戏体验更富趣味性.

## 5.4 创意与创作

在很多使用情境下, TUI 可以充当图形界面的补充, 提高交互效率或者提供更自然的交互方式. 最近的一个商业化的例子是 Microsoft 公司于 2016 年推出的 Surface Studio, 其附带的实物控件 Dial 可以放置在屏幕上使用, 让用户可以通过更自然的操作方式进行工作.

类似的工作还有 Perelman 等<sup>[37]</sup>设计的球形鼠标, 能够同时感知二维平移和三维旋转, 极大地增加了三维操作的效率; 以及 Wang 等<sup>[14]</sup>设计的积木型动画生成设备, 可以将积木模型和动画模型绑定在一起, 并通过在积木中嵌入万向节和姿态传感器, 使得组装的实物模型可以自由改变姿势, 并作为物理骨骼驱动数字模型生成动画.

## 6 未来发展趋势

探究人与信息的关系, 是用户界面研究永恒的主题之一. 实物用户界面也不例外. 在 GUI 时代, 信息被限制在屏幕里. GUI 界面研究更多探讨的是人透过屏幕与信息交互的问题. 而随着 TUI 的发展, 信息已不局限在屏幕里, 人与信息的关系也发生了极大地变化. 如前所述, 当信息不再独立于物理世界, 那么, 信息在物理世界的投射 (驱动问题), 甚至信息与物理世界的融合 (新物质新材料) 都仍有太多的问题留待研究人员探索. 基于这些考量, 本节试图对实物用户界面的未来发展趋势做一粗浅的梳理及展望.

### 6.1 更加复杂且精巧的驱动

正如第 4 节所讨论的, 驱动技术将越来越决定未来 TUI 的发展. 而未来面向 TUI 的驱动技术也将呈现出更复杂和更精巧的特征.

早期的 TUI 驱动技术研究多集中于电机产生的移动、旋转、变形等驱动方式, 而近几年驱动技术的发展则为 TUI 创造了更多的可能性. 记忆合金已经成为常用的驱动材料, 液态金属<sup>[19]</sup>、生物细胞<sup>[26]</sup>、磁流体<sup>[25]</sup>等也纷纷加入了应用. 这些驱动方式通常比较灵活, 因此在某些特定领域能够有比较好的应用. 可以预见, 在未来将会出现更多样的驱动方式, 而更加复杂且精巧的驱动将会为 TUI 带来更丰富的信息反馈与呈现方式.

### 6.2 跨学科交叉

人机交互研究对象包括用户 (人)、数字信息载体 (机), 以及它们之间的关系 (交互). 这注定人机交互不仅仅是一门计算机科学, 同时也涉及到心理学、社会学、设计学等多个学科. 而伴随着 TUI 的提出与发展, 人机交互的研究交叉领域在进一步扩展. 例如 “Topobo”<sup>[12]</sup>, “Tangible bots”<sup>[10]</sup>, “inFORM”<sup>[18]</sup>, “lineFORM”<sup>[38]</sup> 等研究工作涉及到机械与机器人技术; “LIME”<sup>[19]</sup> 得到了材料科学学者的支持; “Biologic”<sup>[26]</sup> 是与生物学家合作研究的成果.

来自不同学科领域的技术成果, 不断为 TUI 的发展带来新的可能性.

### 6.3 非刚性、模块化与智能化

传统的 TUI 通常应用刚性的物体作为交互界面. 而近几年来, 已经有很多研究致力于使用一些有机的或是能够变形的材料<sup>[17, 18, 26, 31, 36, 38]</sup>. 通过柔性的输入与输出, TUI 能够提供更为自然、细腻的反馈. 类似的界面形式通常被称为有机用户界面 (organic user interfaces), 或者是非刚性用户界面 (non-rigid user interfaces), 用来指代能够主动或者被动进行形状变化的用户界面.

模块化的概念在实物交互中也常有应用. 模块化实物界面的形式和积木十分类似, 因此具有易于交互、灵活性强、能够激发创造性的特点<sup>[14, 38]</sup>. 而随着处理器与传感器的进一步微型化, 实物界面也能够感知并处理更多维度的信息<sup>[29, 30]</sup>, 从而变得更加智能.

### 6.4 全身交互、沉浸感与表演性

广义的实物用户界面也包含了全身交互 (whole-body interaction). 然而, 习惯上用户会倾向于使用上肢去操作可触及范围之内的物体. 一些新的系统允许用户在一个大尺度空间内与大型的实物对象进行交互. 大尺度的实物用户界面可以实现全身交互, 以及更具有沉浸感的交互体验.

表演性 (performativity) 是与全身交互相伴的另一个概念. 一些系统通过营造可互动的家具和房间, 使得多位用户需要通过全身运动完成交互过程. 这一大尺度的协作性全身交互便具有了一定的表演性<sup>[39]</sup>. 此外, 一些 TUI 设计还被运用到真实的音乐表演中. 表演者通过操作不同的实物对象, 可以产生特定的音调或节奏, 从而完成音乐演奏<sup>[35]</sup>.

具有沉浸感和协作性或表演性的大尺度交互系统, 也是 TUI 发展的一个重要方向.

### 6.5 设计与美感

设计在人机交互研究中一直发挥着不可或缺的作用. 自 20 世纪 90 年代以来, 艺术与交互逐渐成为 SIGCHI, SIGGRAPH 等国际学术会议的重要主题之一. 近些年来, 在 SIGGRAPH 的 E-Tech 单元、SIGCHI 的 Art Exhibition 单元, 以及位于奥地利 Linz 的 Ars Electronica 等国际重要学术活动中, 涌现了大量以新的 TUI 技术作为艺术语言的交互艺术作品. 例如 “BioLogic”<sup>[26]</sup> 团队将其研究成果与服装艺术相结合, 设计了可以根据人体温度与湿度改变通透程度的智能服装; “LIME”<sup>[19]</sup> 团队将研制的新型柔性界面的一些交互方式加以延伸, 运用到艺术作品的创作当中, 实现了独特的交互体验.

进一步将设计、艺术的理论及实践与 TUI 研究相结合, 也将有可能为未来的 TUI 研究工作提供更多新的可能性.

## 7 结语

在过去 20 余年中, 实物用户界面的研究取得了长足的发展. 研究人员致力于在人、数字信息、物理世界之间构建更自然的交互方式, 而与 TUI 有关的研究也对人机交互的研究带来了深刻的影响. 另一方面, TUI 的研究也仍存在着一些问题. 例如, 大部分 TUI 的设计都缺乏弹性, 往往针对一个特定的应用; 另外, 长时间使用 TUI 也更容易疲劳. 这些问题也导致了 TUI 的产业转化程度不够高. 我们也注意到国内学者在 TUI 这一领域的贡献总体水平还比较低, 仍然有巨大的发展空间.

放眼未来, TUI 的发展对我国诸多重要领域均有着巨大的应用潜力. 正如在本文开篇所述, 无论是在国防、防灾减灾等领域, 还是在未来教育、科普展示等方面, TUI 都大有用武之地. 而进一步开展

TUI 的研究, 需要综合利用计算机科学、机电与控制科学、材料科学、设计学等多学科的理论和方法, 运用交叉学科的研究方法来开展研究.

**致谢** 戴国忠研究员为促成本文成稿做了许多工作, 特此致谢. 姚远, 麦龙辉完成了本文诸多图片绘制工作. 路奇为本文排版做了大量工作. 在此一并致谢.

## 参考文献

- 1 Frazer J, Frazer P. Intelligent physical three-dimensional modelling systems. *Comput Graph*, 1980, 80: 359–370
- 2 Perlman R. Using computer technology to provide a creative learning environment for preschool children. MIT Logo Memo, 1976
- 3 Abrams R. Adventures in tangible computing: the work of interaction designer “Durrell bishop” in context. *South Asia Res*, 1999, 28: 23–48
- 4 Fitzmaurice G W, Ishii H, Buxton W A S. Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Denver, 1995. 442–449
- 5 Ishii H, Ullmer B. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Atlanta, 1997. 234–241
- 6 Ullmer B, Ishii H. The metaDESK: models and prototypes for tangible user interface. In: *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Banff, 1997. 223–232
- 7 Ishii H, Ratti C, Piper B, et al. Bringing clay and sand into digital design — continuous tangible user interfaces. *BT Technol J*, 2004, 22: 287–299
- 8 Weiss M, Jennings R, Khoshabeh R, et al. SLAP widgets: bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops. In: *Proceedings of CHI’09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, Boston, 2009. 481–490
- 9 Pangaro G, Maynes-Aminzade D, Ishii H. The actuated workbench: computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces. *ACM Trans Graph*, 2003, 22: 181–190
- 10 Pedersen E W, Hornbæk K. Tangible bots: interaction with active tangibles in tabletop interfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Vancouver, 2011. 2975–2984
- 11 Le Goc M, Kim L H, Parsaei A, et al. Zooids: building blocks for swarm user interfaces. In: *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Tokyo, 2016. 97–109
- 12 Raffle H S, Parkes A J, Ishii H. Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Vienna, 2004. 647–654
- 13 Baudisch P, Becker T, Rudeck F. Lumino: tangible building blocks based on glass fiber bundles. In: *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, Los Angeles, 2010
- 14 Wang M, Mi H, Xu Y Q. TwistBlocks: non-rigid interface for 3D-aware design and actuation. In: *Proceedings of China Human Computer Interaction Conference*, Shanghai, 2016
- 15 Holman D, Vertegaal R. Organic user interfaces: designing computers in any way, shape, or form. *Commun ACM Org User Interface*, 2008, 51: 48–55
- 16 Minuto A, Vyas D, Poelman W, et al. Smart material interfaces: a vision. In: *Proceedings of International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment*, Genoa, 2011. 57–62
- 17 Yao L N, Niiyama R, Ou J F, et al. PneuUI: pneumatically actuated soft composite materials for shape changing interfaces. In: *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, St. Andrews, 2013. 13–22
- 18 Follmer S, Leithinger D, Olwal A, et al. inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In: *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, St. Andrews, 2013. 417–426
- 19 Lu Q Y, Mao C P, Wang L Y, et al. LIME: liquid metal interfaces for non-rigid interaction. In: *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Tokyo, 2016. 449–452
- 20 Ullmer B, Ishii H. Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM Syst J*, 2000, 39: 915–931



- 21 Mi H. Actuated tangible user interface: an extensible method for tabletop interaction. Dissertation for Ph.D. Degree. Tokyo: University of Tokyo, 2011
- 22 Ishii H, Lakatos D, Bonanni L, et al. Radical atoms: beyond tangible bits, toward transformable materials. *Interactions*, 2012, 19: 38–51
- 23 Ullmer B, Ishii H, Jacob R. Token+constraint systems for tangible interaction with digital information. *ACM Trans Comput Hum Interact*, 2005, 12: 81–118
- 24 Fishkin K. A taxonomy for and analysis of tangible interfaces. *Pers Ubiquit Comput*, 2004, 8: 347–358
- 25 Jansen Y, Karrer T, Borchers J. MudPad: tactile feedback and haptic texture overlay for touch surfaces. In: *Proceedings of ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, Saarbrücken, 2010. 4351–4356
- 26 Yao L N, Ou J F, Cheng C Y, et al. BioLogic: natto cells as nanoactuators for shape changing interfaces. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Seoul, 2015. 1–10
- 27 Probst K, Seifried T, Haller M, et al. Move-it: interactive sticky notes actuated by shape memory alloys. In: *Proceedings of CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, Vancouver, 2011. 1393–1398
- 28 Ogata M, Fukumoto M. FluxPaper: reinventing paper with dynamic actuation powered by magnetic flux. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Seoul, 2015. 29–38
- 29 Ono M, Shizuki B, Tanaka J. Touch & activate: adding interactivity to existing objects using active acoustic sensing. In: *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, St. Andrews, 2013. 31–40
- 30 Li H, Ye C, Sample A P. IDSense: a human object interaction detection system based on passive UHF RFID. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Seoul, 2015. 2555–2564
- 31 Ou J F, Yao L N, Tauber D, et al. jamSheets: thin interfaces with tunable stiffness enabled by layer jamming. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, Munich, 2014. 65–72
- 32 Jiao Y, Gong J, Xu Y Q. Graille: design research of graphical tactile display for the visually impaired (in Chinese). *Art Des*, 2016, 01: 94–96
- 33 O'Malley C, Fraser D S. Literature review in learning with tangible technologies. NESTA Futurelab Report 12, 2004. <https://www.nfer.ac.uk/publications/FUTL69/FUTL69.pdf>
- 34 Antle A N. The CTI framework: informing the design of tangible systems for children. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, Baton Rouge, 2007. 195–202
- 35 Kaltenbrunner M, Bencina R. reacTIVision: a computer-vision framework for table-based tangible interaction. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, Baton Rouge, 2007. 69–74
- 36 Wang M, Mi H, Liu Y, et al. PolyHinge: shape changing TUI on tabletop. In: *Proceedings of the 8th Conference on Interfaces and Human Computer Interaction*, Lisbon, 2017
- 37 Perelman G, Serrano M, Raynal M, et al. The roly-poly mouse: designing a rolling input device unifying 2D and 3D interaction. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Seoul, 2015. 327–336
- 38 Nakagaki K, Follmer S, Ishii H. LineFORM: actuated curve interfaces for display, interaction, and constraint. In: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, Charlotte, 2015. 333–339
- 39 Shaer O, Horn M S, Jacob M S. Tangible user interface laboratory: teaching tangible interaction design in practice. *Artif Intel Eng Des Anal Manuf*, 2009, 23: 251–261

# Tangible user interface: origins, development, and future trends

Haipeng MI<sup>1\*</sup>, Meng WANG<sup>1</sup>, Qiuyu LU<sup>1</sup> & Yingqing XU<sup>2,1\*</sup>

1. *Department Information Art & Design, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *The Future Lab, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

\* Corresponding author. E-mail: haipeng.mi@acm.org, yqxu@tsinghua.edu.cn

**Abstract** Tangible user interface (TUI) is a new paradigm in the field of human-computer interaction. By coupling with physical objects and digital information, a TUI allows a user to perform natural actions such as grasping, moving, and assembling to manipulate digital information. With the latest approaches by integrating actuators, a TUI can also move actively or change shape by itself, thus enabling physical feedback. A TUI can be used in several application domains including information visualization, daily work, edutainment, and supporting creativity. This paper introduces the origins and development of tangible user interfaces, and discusses the theoretical frameworks, implementation technologies, application domains, and future research trends for TUIs.

**Keywords** tangible user interface, natural user interface, interface paradigm



**Haipeng MI** is an associate professor in the Department of Information Art & Design, Tsinghua University. He received his B.Sc. degree in physics and M.S. degree in electronics science and engineering from Tsinghua University in 2005 and 2008, respectively, and his Ph.D. from the University of Tokyo in 2011.



**Meng WANG** is a Ph.D. candidate at Tsinghua University. He received his B.E. degree from the Department of Precision Instrument, Tsinghua University in 2013 and his M.A. degree from the Academy of Arts & Design, Tsinghua University in 2016. His major research interest is tangible user interface.



**Qiuyu LU** is a Ph.D. student at Tsinghua University. He received his B.E. degree from the Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University in 2014 and his M.A. degree from the Academy of Arts & Design, Tsinghua University in 2017. His research interests include human-computer interaction, particularly in natural user interface, and tangible media.



**Yingqing XU** is a Cheung Kong scholar chair professor. He is currently the director of Future Lab and Lab for Lifelong Learning at Tsinghua University. He received his B.Sc. degree from the Department of Mathematics, Jilin University and his Ph.D. from the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences.