

盲人触觉交互的演进及未来趋势分析

关键词：视触觉交互 Graille

焦 阳 龚江涛 徐迎庆 等
清华大学

据世界卫生组织 2014 年的数据显示，全球视力受损人数为 2.85 亿，其中全盲患者为 3900 万。由于视觉受损，盲人依靠触觉和听觉进行视觉代偿，同时借助相关触觉辅助设备理解信息。虽然利用触觉和听觉获取信息的效率远不如视觉（各感官的信息容量参考等级：手指触觉 10^2bits/s ，听觉 10^4bits/s ，视觉 10^6bits/s ）^[1]，不过大量的实验和生活经验表明，视觉受损人群的触觉和听觉能力优于健全人^[2]。因为人脑感觉皮层具有可塑性，盲人的触觉皮层和听觉皮层代谢活动增加，使其触听觉更敏锐。这说明针对盲人群体，触觉和听觉拥有足够的认知交互空间的潜力。

本文在互联网信息快速发展的背景下，从用户交互体验的角度来探讨盲人辅助设备及其交互手段的进步和未来的发展趋势。

早期触觉辅助设备及其交互

20 世纪 60 年代，“人机界面”与“人机交互”开始兴起并发展，同时也有了面向盲人的触觉辅助交互设备的首次尝试。1969 年，詹姆斯·布利斯 (James C. Bliss) 等研究制作的 Optacon 视触觉转换器 (Optical to Tactile Converter)^[3] 与保罗·巴赫里塔 (Paul Bach-y-Rita) 等研究制作的触觉-视觉替代系统 (Tactile-Vision Substitution Systems, TVSS)^[4] 作为盲人辅助设备的先驱产品，充分利用

了盲人的触觉认知，是盲人辅助设备发展的一次重大跃进。

Optacon 视触觉转换器最初的设计构思致力于解决盲人无法阅读普通书籍的问题。使用者右手持该设备的摄像头，拍摄书中的文字信息，设备再将文字信息映射到用户左手所触摸的点阵上，以多个触点凸起的方式供用户触摸文字的轮廓，进行识别理解。（如图 1 所示）

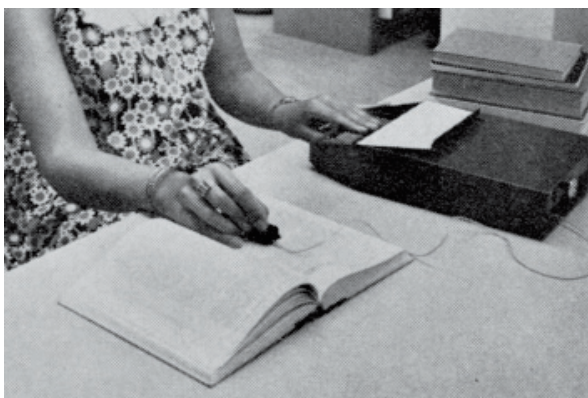


图1 Optacon使用场景^[3]

Optacon 设备在视觉的触觉转化以及触觉交互体验上具有重大意义。它首次运用点阵的高低、震动等触觉变化来模拟图形图像，创造了“触觉显示器”的概念：将视觉图像的像素点映射到触觉凸点的阵列上，用凸起、震动、热电刺激等触觉方式承载信息。盲人触摸触觉点阵，并控制摄像头的移动速度和位置，通过左右手的配合，以触觉方式阅读，

经过训练后的阅读速度可达 50 字 / 分钟。虽然文字阅读速度慢于标准盲文的 100 字 / 分钟，但它适用于任何书籍，不受盲文图书资源的限制，具有更广泛的适用性。由于 Optacon 产品概念和交互方式的优秀，虽然经过多次改进与迭代，现在依然有一定的使用价值。

TVSS 系统应用了类似的点阵驱动技术，把摄像头捕捉到的图像通过振动投射到盲人的背部来传达信息。在设备原型中，盲人佩戴摄像头和背部震动板，摄像头将捕捉到的

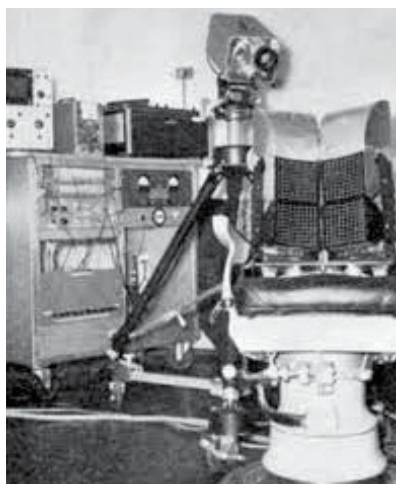


图2 触觉-视觉替代系统^[4]

物品提取轮廓，转化成对背部皮肤的震动刺激。图2为TVSS的原型设备，它的原理与Optacon类似，都是由摄像头读取视觉信息，再以触觉方式输出给用户，只不过TVSS尝试利用人的背部而不是手指进行触觉输出反馈。它的意义在于尝试用盲人身体的其他部位承载触觉信息，为触觉交互开创了新的方向。

这两个早期设备的实例都致力于弥补盲人的视觉缺陷，其设计的核心在于使用计算机视觉，将用户周围的视觉信息转化到触觉点阵或面板上。它们的触觉交互更多地表现在信息的输入上，用户通过手指或身体理解触觉信息后，需要从另一个维度实现信息的输出和控制，比如操作摄像头，需要一定的学习和适应成本。另外，人眼的分辨率为 300ppi (pixel per inch, 每英寸像素数)，而人手指的触觉分辨率约为 10ppi^[2]，低分辨率带来的问题是使触觉点阵尺寸增大，而 Optacon 的小尺寸点阵无法容纳足够的信息量。以上问题成为触觉辅助设备研究者接下来力图改进的方向。

互联网时代的触觉交互新模式

随着 PC 和互联网的发展和普及，人们可以借助网络，高效便捷地获取信息。网络蕴含了大量的文字、图形图像、声音和视频信息，而获取丰富的互联网信息也是盲人用户的诉求。信息需求的扩大促进了盲人辅助设备及其交互方式的进步。相比过去的辅助设备，互联网时代的触觉交互有了新的模式。

目前，盲人触觉辅助设备按功能可分为文字阅读设备和图像显示设备^[5]。前者如盲文点显器（见图3），后者如触觉图像显示器（见图4、图5），即



图3 清华启明星盲文点显器



图4 KGS图像显示器



图5 Display7200图像显示器

通过手指触觉实现文字和图形的视觉代偿。以上辅助设备或与电脑连接,或直接连接网络,可将互联网实时的文字或图像信息呈现给盲人用户。它解决了传统的纸质盲文或纸质触觉图像实时性缺失的问题,保证了信息的时效和广度。

信息源的扩展对信息呈现方式提出了更高要求。在触觉信息的呈现方面,得益于科技水平和机械工艺的进步,压电、电磁、形状记忆合金等驱动技术被大量尝试,研究者也更重视盲人触觉认知的体验。目前大部分的盲文点显器都采用压电驱动技术,用40个“点方”横向排列显示盲文,盲人用手指从左至右阅读,并按键操作换行,基本达到了纸质盲文书籍的触摸阅读体验。除了文字以外,越来越多的研究机构和厂商致力于图形图像的输出,比如日本KGS公司的DV图像显示器和德国Metec.AG公司的Display7200^[5]。图像显示器采用较大尺寸的触觉点阵,与早期的Optacon在原理上相似,即通过点阵中触点的高低、震动变化传达图像语义,而目前图像显示器的点阵尺寸和点阵密度都有了一定提升。比如Display7200采用竖置的压电驱动“点方”,可将 120×60 个触点以2.5mm间距紧密排列在一起,其分辨率已基本达到人手触觉认知的极限。通过以上辅助设备,盲人用户可以触摸学习互联网实时文字和图像信息。

除了信息呈现方式的进步,盲人用户还可以通过触觉方式进行操作控制,构成完整的触觉交互环路。比如盲文点显器的上下翻页功能,在阅读行的左右两侧,用户阅读完一行文字后,手指会自然地经过下翻页按键,实现了交互的连续性。又如Display7200图像显示器的触觉点阵配有按压识别传感器,设备可监测用户的触摸位置并做出实时反馈。综上所述,“丰富的信息源-信息的触觉转化-触觉呈现-触觉认知-触觉操控-再反馈”这样的触觉交互环路得以运转,因为给了盲人用户良好的交互体验,创造了触觉交互新模式。

在面向以语言文字为主的信息时,触觉交互并非目前的主要方式,读屏软件、智能手机等听觉辅助交互方式成为了主导。智能手机体积小,便携性好,适合移动端,更重要的是,智能终端的

VoiceOver^[6]、Talkback^[7]等语音辅助软件利用文本转语音技术(Text To Speech, TTS)进行语音输出,用户经过学习适应后的语音文字理解速度远高于盲文阅读速度,最快可达300字/秒。

未来的触觉交互发展方向

尽管触觉辅助设备已开发成功,但要实际应用还有许多问题。原因是这些设备过于昂贵。点显器的价格在2万元人民币左右,Display7200触觉图像显示器的价格为35万元人民币,普通用户无法负担。因此,如何采用低成本的材料和结构,让大部分盲人用户可以接受,是目前业界和研究者遇到的主要问题。

首先,许多机构都声称在研究低成本的触觉辅助设备,其主要思路有两种:选用小尺寸的点阵屏幕,或采用有限数量的驱动器,通过延长刷新时间来控制成本。但各种降低成本的方法都需要通过用户体验分析来评测。由于人手触觉分辨率的限制,小尺寸点阵承载的信息过少,使用场景非常有限。相比之下,用户理解触觉图像的方式是从局部到整体,进程较慢,所以图像刷新时间的延长对用户体验的影响有限,因而大尺寸图像显示器有望成为未来设计方向。

第二,盲人的触觉交互应与其他感官交互进行更深度的融合,比如和听觉交互的融合。触觉交互和听觉交互都有各自独特的优势。触觉交互更偏向

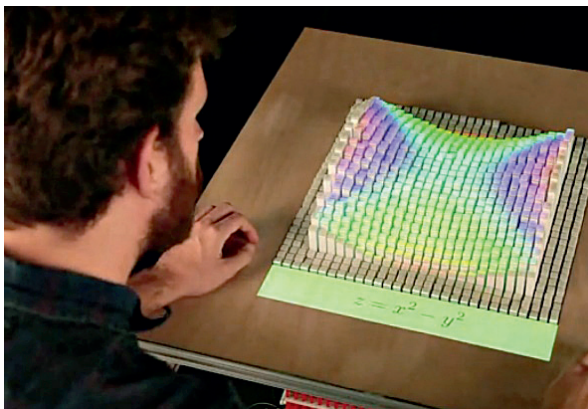


图6 麻省理工学院媒体实验室的inFORM原型

具象的体验,所触即所得,听觉交互则侧重语言上的抽象理解。而且,盲人用户的触听觉抽象信息处理和具象信息处理可以并行进行。从认知能力上看,不同通道的信息占用不同的脑力资源;从交互界面上看,触觉和听觉信息分别占用不同的传输空间,且相互没有干扰。盲人在使用触觉图像显示器时,配合对所触摸图像的语音解释,用户会将抽象的语言描述与具象的图像关联对应,从而更立体地理解信息。因此在实际交互过程中,具象的触觉界面与抽象的语音沟通共同作用,互为辅助,能承载更多信息,是更有效的交互方式。

第三,目前的触觉图像显示器等辅助设备仅提供二维平面的触觉信息,对触觉感官通道的利用有限。如果触觉点阵可以产生多值高度,则会在二维的基础上又增加了高度维度,实现 2.5D 甚至 3D 的信息承载,如麻省理工学院媒体实验室的 inFORM^[8] 原型设备(如图 6 所示)。inFORM 的每一个方块都可以实现高度调节,一组特定高度的方块矩阵即可承载类 3D 的信息。人的触觉认知非常适合三维触觉信息,因为整个手掌拥有较高的触觉灵敏度,而且通过前臂的运动,手掌可以在三维空间的任意角度上进行认知活动。因此,人脑会形成“手掌-前臂”的共同触觉认知,对三维信息的理解力也会更强。

此外,inFORM 是从设备底端向上实现高度的变化,如果触觉辅助设备能实现自驱动,通过内在力变形,就可以实现完全 3D 的触觉信息承载。比如模块化机器人(如图 7 所示),它通过多个基本单元的相互拼接和运动,可以呈现不同的形态。它已经脱离了“显示器”的范畴,以“实体”的形式呈现,蕴含了丰富的触觉示能性(tangible affordance)。盲人用户可以在他(她)所熟知的三维空间中认知该实体,并通过按压、旋转等触觉操作进行交互,拉



图7 模块化机器人

近用户与设备距离的同时增加了触觉信息量。诚然,inFORM 和模块化机器人的体积过大,且受到机械和硬件条件的诸多限制,目前还不适合面向盲人用户。不过我们认为,这种 3D 化的交互方式很有可能成为未来盲人触觉交互的发展方向。

盲人触觉图形显示器设计实例

基于上文对触觉交互和触觉辅助设备的分析,我们构建了桌面端触觉图形显示器的设计原型:Graille。目前同类产品听觉通道利用不足,难以形成多通道互为辅助的交互形式,且压电驱动模块成本过高,造价昂贵。鉴于此,我们在设计过程中,在点阵控制和触听觉交互两方面提出了创新改进,增加了触觉引导、语音描述、触控输出等功能。

我们的触觉图形显示器分辨率为 120×60 ,并创造性地使用了推拉式电磁铁和自锁点阵。将推拉式电磁铁置于自锁点阵下方,电磁铁通电产生向上推力,推动触点的“Push-Push”结构,从而改变触点的高低状态。电磁铁通过滑台平移,遍历刷新每个触点,点阵屏幕即可产生触觉图像。图 8~10 为 Graille 的点阵、驱动器及整体原理图。

听觉通道需要与触觉配合进行认知。为了打通多感官之间的信息流,我们引入了内置的语音说明和触觉引导系统。同时,设备根据用户手指的

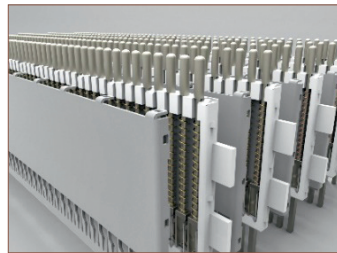


图8 点阵装配

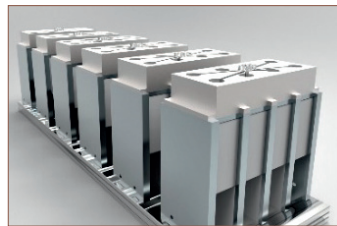


图9 电磁铁驱动器组合

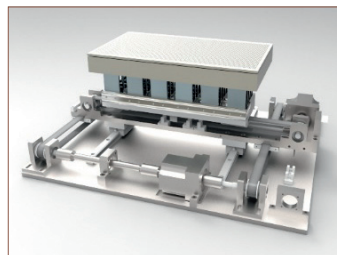


图10 平面滑台-电磁铁-点阵

触摸位置播放相关语音描述,辅助用户理解图形,实现“所触即所得”的良好体验。

Graille 触觉图形显示器操作系统集中管控各模块:控制电磁铁及滑台,刷新触觉图像;引导滑块移动,辅助盲人触摸;管理语音交互模块,辅以语音描述;还有语音识别、按压感应、无线通信、盲文键盘模块,以传统桌面台式电脑的形式,为用户提供优秀的触听觉操作体验。图 11 是设备整体外观图。

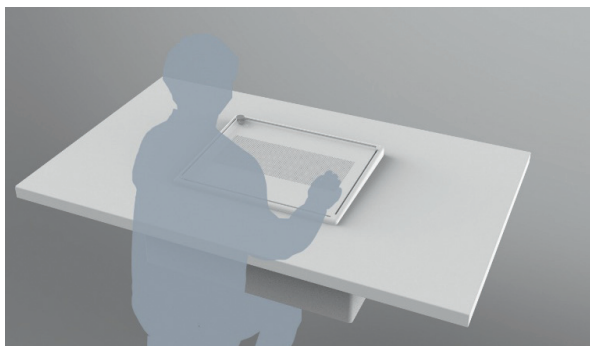


图 11 Graille使用外观图

Graille 拥有大尺寸点阵屏幕和语音系统,可以实现盲文输出、触觉图像输出、声音输出、文字及语音识别输入功能,致力于成为盲人访问互联网的接口。盲人用户可以使用 Graille 上课学习,学生通过 Graille 学习并理解老师上课的文稿和其他材料,比如地理地图、数学图形、物理图等图像信息,还可以使用盲人键盘记笔记,并通过触觉屏幕阅读并校对文字。Graille 还可以在家使用,用于盲人上网、社交、图像分享、网上购物等场景,成为专为盲人设计的桌面电脑。我们希望互联网的发展和交互技术的进步能帮助盲人群体更轻松、更便捷地生活,并享受丰富的网络资源。■

致谢:

本文工作得到国家自然科学基金重点项目(61232013)的支持,感谢百度公司在针对盲人用户的搜索平台建设以及硬件研制方面的资助和支持;感谢英特尔公司在 Graille 触觉图形显示器硬件控制系统方面的资助和支持;感谢微软亚洲研究院在触觉认知理解研究方面的资助和支持。



焦 阳

CCF学生会会员。清华大学博士生。主要研究方向为触觉认知与交互。
jymars@live.cn



龚江涛

CCF学生会会员。清华大学博士生。主要研究方向为人机交互设计,触觉认知交互。
gongjiangtao2@gmail.com



徐迎庆

CCF杰出会员。清华大学教授,教育部“长江学者”特聘教授。主要研究方向为触觉认知与交互、沉浸认知与交互、文化遗产数字化、创新学习的理论与方法等。
yingqingxu2004@hotmail.com

其他作者:鲁晓波 史元春

参考文献

- [1] KJ Kokjer, The information capacity of the human fingertip [C]. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, vol. SMC-17, 1987, pp.100~102.
- [2] Bruce Goldstein, *Sensation and Perception* [M]. Belmont: Wadsworth Publishing, 2002, pp5~11.
- [3] Deborah Kent Stein, The Optacon: Past, Present, and Future, [OL] <https://nfb.org/images/nfb/publications/bm/bm98/bm980506.htm>.
- [4] Paul Bach-y Rita, Carter Collins, Frank Saunders, Benjamin White, Lawrence Scadden, Vision substitution by tactile image projection, *Nature*, 1969,08: 963~964.
- [5] Display 7200, a tactile graphical display by Metec-AG [OL]. <http://web.metecag.de/graphik%20display.html>.
- [6] 适用于OSX的VoiceOver,好用的功能,说起来好,听起来更好. <http://www.apple.com/cn/accessibility/osx/voiceover/>.
- [7] Google Talkback - Android Apps on Google Play [OL]. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.marvin.talkback>.
- [8] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, et al., inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation [C]. *UIST '13: Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*.