

悬浮空间中的触觉反馈在多对象选择任务中的作用*

杨毅¹, 张玉茹¹, 戴晓伟¹, 徐泉², 侯柱¹

¹(虚拟现实技术与系统国家重点实验室(北京航空航天大学), 北京 100191)

²(流程工业综合自动化国家重点实验室(东北大学), 辽宁 沈阳 110819)

通讯作者: 杨毅, E-mail: eyang@me.buaa.edu.cn, http://haptic.buaa.edu.cn

摘要: 在触控交互中, 缺少触觉反馈会造成用户操作水平的降低和用户体验的下降. 前人研究对在触控交互中增加触觉反馈这一方法进行了探索. 然而, 由于现有触摸屏技术仅能在用户点击屏幕后检测用户手指的位置, 触觉反馈也只能在用户点击屏幕之后发挥作用. 新的传感技术可以在触摸屏上方的悬浮空间(hover space)内提前检测到手指的位置. 利用多对象选择任务(multi-target pointing task)比较了在悬浮空间中增加4种反馈方式对用户操作水平和用户体验的影响. 实验结果显示, 增加的点击振动反馈受到了用户的普遍青睐. 然而, 增加的触觉反馈对于用户的操作效率和正确率却没有影响. 根据这些结果和前人的研究, 提出了在悬浮空间中增加触觉反馈的设计建议.

关键词: 触控交互; 触觉反馈; 悬浮空间

中文引用格式: 杨毅, 张玉茹, 戴晓伟, 徐泉, 侯柱. 悬浮空间中的触觉反馈在多对象选择任务中的作用. 软件学报, 2014, 25(Suppl.(2)): 28-35. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14020.htm>

英文引用格式: Yang Y, Zhang YR, Dai XW, Xu Q, Hou Z. Evaluation of haptic feedback in hover space in a multi-target pointing task. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2014, 25(Suppl.(2)): 28-35 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14020.htm>

Evaluation of Haptic Feedback in Hover Space in a Multi-Target Pointing Task

YANG Yi¹, ZHANG Yu-Ru¹, DAI Xiao-Wei¹, XU Quan², HOU Zhu¹

¹(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems (BeiHang University), Beijing 100191, China)

²(State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries (Northeastern University), Shenyang 110819, China)

Corresponding author: YANG Yi, E-mail: eyang@me.buaa.edu.cn, <http://haptic.buaa.edu.cn>

Abstract: Adding haptic feedback to touch screens is promising in improving users' productivity. However, most touch screens only track user's finger position when the user touches the screen. As a result, haptic feedback is not provided until touch is detected. This paper investigates adding haptic feedback in addition to visual feedback in hover space—the space above the touch screen. Four feedback conditions are compared in a multi-target pointing task. Experimental results show that there is no significant difference between the four feedback conditions as far as task completion speed and accuracy are concerned. The additional haptic feedback neither improves nor deteriorates performance as compared with the visual-only condition no matter it was added in hover space or as a button-click feedback. However, the button-click feedback is most favorable to users. Based on these results and previous literature, this study creates guidelines on how to add haptic feedback in hover space.

Key words: touch interaction; haptic feedback; hover space

使用触摸屏的触控交互设备已经广泛应用于我们的生活之中. 虽然触控交互自然而直接, 但是需要用户几乎完全依靠视觉完成所有操作. 在操作过程中, 由于缺乏用户使用物理控件(键盘, 滑块, 旋钮等)时的触觉反馈, 容易导致用户产生视觉疲劳并造成操作失误^[1].

* 基金项目: 国家自然科学基金(61190120, 61190125)

收稿时间: 2013-06-15; 定稿时间: 2013-08-21

在触控交互过程中增加触觉反馈是解决这一问题最直接的方法.前人研究发现,在触控交互中增加触觉反馈可以提高用户的操作效率^[2],降低操作失误率和工作量^[3],因而获得了用户的青睐^[4].在这些研究中,很大一部分使用振动电机^[5]使设备整体振动或利用压电驱动器^[6]使触摸屏表面振动从而模拟手指点击按键时的触感.还有一部分研究通过改变触控表面的物理参数产生触觉反馈.比如,通过在表面产生挤压气膜效应降低表面摩擦系数^[4],利用静电振动增加表面摩擦^[7]等.然而,尽管人机交互接口需要 3 个状态来完成交互(out of range, tracking, dragging)^[8],但大多数触摸屏也只能在手指点击屏幕时检测手指的位置实现两个状态的交互(tracking, dragging).因此,触觉反馈也只能在用户接触屏幕后发挥作用.

随着科技的发展,一些新的触摸屏技术已经可以实现用户在用户接触屏幕前检测到手指的位置,包括利用红外传感器^[9]、电容传感技术^[10]以及计算机视觉^[11]等.由于智能手机的快速发展,手机厂商也开始将能够检验手指悬浮(hover)状态的新兴技术应用到新产品中.比如,索尼公司的 Xperia™ sola 手机就采用了“Floating Touch™”技术来增强触控交互^[12].当用户使用这种技术浏览网页时,用户可以将手指悬浮于网站链接上方,系统会将手指所对应的链接突出显示使用户明确下一步点击的对象,从而降低误点击错误的发生.

这些新技术的出现为在触控交互中增加触觉反馈开辟了新的途径.那么,在悬浮空间内增加触觉反馈会对用户操作水平和用户体验带来怎样的影响?对这个问题仍然缺少足够的研究^[13].在以前的实验中^[14],我们发现用户在用户手指到达选取目标的上方时增加一个阻力反馈可以帮助用户快速地选取目标.这种反馈比起在用户点击目标后增加点击反馈更能提高用户的操作效率和精度.然而,这个结果是在单一对象费茨(Fitt's)往复点击实验环境下得到的.实验中,两个目标之间没有其他对象.但是,在多对象(multi-target)任务中,用户手指在选取目标之前会划过多个对象.由于这些对象都被赋予了阻力反馈,可能会造成对用户手指运动的干扰和阻碍^[15].在间接交互(如使用鼠标)中,这种触觉反馈反而降低了用户的操作水平^[16].

为了研究在悬浮空间中增加触觉反馈的作用,我们通过更接近真实使用场景的多对象选择任务来比较 3 种增加触觉反馈的方法对用户操作水平所产生的影响.在现有的触摸屏手机上往往装有振动电机以实现按键点击振动反馈.我们也想通过这个实验来比较在悬浮空间中增加触觉反馈和这种按键点击振动反馈的优劣.同时,在悬浮空间中增加哪种类型的触觉反馈(振动反馈或力反馈)可以更好地提高用户的操作水平,也需要通过实验得到验证.

1 多对象点击选择实验

除了打电话和发短信,浏览网页是用户在智能手机上使用频率最高的应用^[17].在手机浏览器页面中,新闻标题、社交用户群等链接通常以列表的形式排列(如图 1 所示).每一个链接都是用户可能点击的对象.由于这些对象紧密排列,用户在选择某个对象之前往往要先划过其他一些对象.这个选择过程是一个典型的多对象选择任务^[18].我们利用这个典型的用户使用场景来研究在悬浮空间中增加触觉反馈的作用.

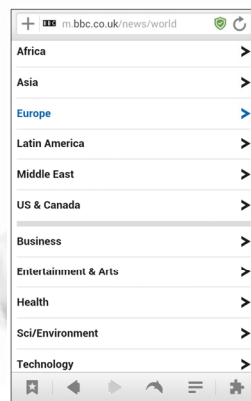


Fig.1 Hyperlinks in a mobile Web browser

图1 手机浏览器中的链接列表

1.1 实验设备

实验设备包括使用电容触摸屏的 HTC 智能手机(HTC Rezound ADR6425)和一台柔索驱动并联力反馈设备,如图 2所示.HTC 手机用于显示实验环境并通过其内置的振动电机产生振动触觉反馈.实验环境在安卓 2.3.4 操作系统下利用 Java(JDK 1.7)语言开发.振动电机产生的频率为 90 Hz 的振动通过握持手机的手掌感知.力反馈设备用于检测用户手指位置并提供力反馈.力反馈设备包括均布在支撑板四周的 4 个相同的驱动模块.每个驱动模块包括一个线轮、一个直流电机和一个编码器.每根柔绳的一端缠绕在线轮上,另一端与一个指环相连接.指环佩戴在实验对象常用手的食指第一指节处.线轮的转动会使编码器计数从而换算出柔绳长度的变化.指环的位置(也就是食指的位置)通过力反馈设备机构的正向运动学计算得到.设备的位置精度为 0.1mm,最大输出力为 4.5N.关于力反馈设备的工作原理可参考文献[19].在 PVC 支撑板的中心,我们设计了一个比 HTC 手机长和宽都大 4mm 的矩形孔用于放置手机.同时,在孔的四周粘贴了柔软海绵以保证手机刚刚可以放入而又不会影响振动电机产生振动.实验中,实验对象用他们的非常用手托住手机以感受振动触觉反馈;使用他们常用手的食指操作力反馈设备并在手机触摸屏上进行点击操作.支撑板相对于桌面向上倾斜了 30°以保证用户以接近实际使用手机的姿势进行实验操作.

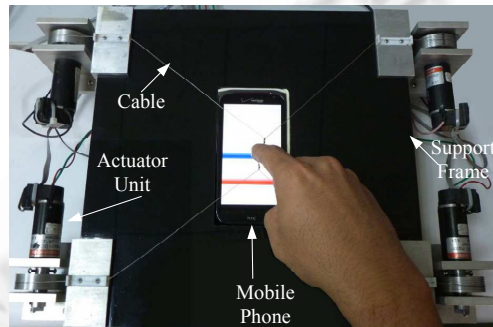


Fig.2 Top view of the experiment setup. The user's index finger of his dominant hand is touching the touch screen while his non-dominant hand is propping the mobile phone beneath the support frame

图2 实验设备的组成.实验中,实验对象常用手的食指在手机屏幕上点击目标,另外一只手则在支撑板下方托住手机

为了连续获取手指的位置,触摸屏仅用于探测手指的接触情况(点击,拖动或抬起).无论手指与触摸屏是否接触,手指的位置完全由力反馈设备获得.为了保证手指位置检测的一致性,我们在开始实验前对手指位置进行了标定,使力反馈设备检测到的手指位置与触摸屏一致.HTC 手机的显示屏尺寸为 $54 \times 96 \text{mm}^2$,分辨率设置为 720×1280 (13.33pixel/mm).

1.2 实验任务与激励

我们采用多对象列表选择任务来评价在悬浮空间中增加触觉反馈的作用.在苹果手机操作系统中(iPhone iOS),列表中每个条目的推荐高度为 6.7mm(屏幕尺寸为 $49 \text{mm} \times 74 \text{mm}$)^[20].在 HTC 手机使用的 Dolphin 浏览器上,每个条目的高度为 6mm(80px).因此,我们使用高度为 80px(6mm)的矩形来代替列表中的链接.每个列表包括 16 个条目:每个条目宽 720px,高 80px.列表的尺寸刚刚满足 HTC 手机 4.3 吋屏幕的显示范围.

实验任务要求实验对象通过点击的方式选择列表中的指定条目.在每次选择开始前,在列表的顶端或底部会显示一个黄色的开始按键以指示向下或向上选取目标.实验对象点击黄色按键开始实验,随即黄色开始按键消失.同时,在列表上出现一个红色条目作为选择目标.选择目标随机出现在 4 个预定位置中的一个且不会与上一次出现的位置相同.目标被点击后即消失,黄色开始按键再次出现表示下一轮选择任务开始.在实验中,实验对象被要求又快又准地点击目标.点击到目标外面被记录为 1 次错误.为了防止实验对象盲目追求速度而不顾精度,只有当他们正确点击到目标时才会使下一次选择任务开始(即使这样设定可能需要多次点击).实验中记

录的数据包括移动时间(movement time)、手指抬起时间(take-off time)^[21]、错误率(error rate)和偏离量(overshoot).移动时间为实验对象从点击开始按键到点击目标的时间.手指抬起时间为手指点击目标到手指从目标上抬起的时间.偏离量为手指超越目标后的最大运动距离.这些参数用来深入分析触觉反馈对实验对象操作水平的影响.

实验包括 4 种反馈条件.其中,视觉反馈(visual-only)通过将手指在悬浮空间内划过的条目突出显示(用蓝色显示,图 3 中靠下条目)实现,如图 3 所示.这种方法与索尼手机在浏览器中使用的悬浮触控技术的视觉反馈相似^[12].视觉反馈作为实验的基本反馈条件.在另外 3 种触觉反馈方式中,同样存在相同的视觉反馈.通过这种方式,我们可以分析在有视觉反馈的情况下,在悬浮空间中增加触觉反馈的作用.

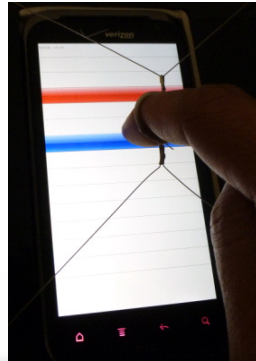


Fig.3 Visual feedback in the experiment. The red item represents the target (upper one).

When user's finger hovered over any item, the item was highlighted with blue (lower one)

图3 实验中的视觉反馈.红色条目代表目标(图中靠上条目).当手指在悬浮空间内划过其余条目上方时,所对应的条目由蓝色显示(图中靠下条目)

在悬浮空间中,我们设计了两种触觉反馈条件:振动触觉反馈(HoveVib)和力反馈(HoverFos).振动触觉反馈通过 HTC 手机中内置的振动电机实现.当手指在悬浮空间中划过每个条目的边界时,手机会振动 40ms 以模拟条目的边界.由于用户更青睐尖锐的边界模拟效果,所以振动产生的时间越短越好^[22].然而,惯性振动电机的频率与振幅耦合,需要使转速达到一定数值后才能产生明显的振动效果.因此,我们通过预实验进行了振动参数的选择,发现 40ms 的振动时间是使用户可以感觉到振动的最短时间.力反馈是一个作用在条目中心 2mm 范围内,大小为 0.65N 的恒定阻力.力反馈由实验设备中的力反馈设备产生.这种反馈方式在单一对象 Fitt's 实验中可以有效地帮助用户选择目标^[14].最后一种反馈方式模拟手机中常用的按键点击振动反馈.这种反馈由 HTC 手机内置的振动电机产生.当实验对象点击目标条目时,振动电机产生 100ms 的振动.这种反馈方式有一个独立的对比条件:只在 Button-Click 条件中出现,在其他 3 种反馈条件中没有这种反馈.

在实验前,我们向实验对象介绍实验过程.作为培训,他们在每个反馈条件下完成 20 次选择任务.在实验中,实验对象需要带上隔音耳机以隔绝外界噪声对实验所产生的影响.在实验完成后,实验对象需要对 4 种反馈条件进行排名并发表他们对各种反馈的看法.每个实验对象需要大约 30 分钟时间完成整个实验.

1.3 实验对象

12 名年龄在 23 岁~27 岁(均值=25.3 岁,标准差=1.5 岁)的志愿者参加了本实验.所有实验对象都有使用触摸屏设备的经历,并以右手为常用手.

1.4 实验设计

实验采用重复测量被试内设计(repeated-measures within-subject design).实验因素包括反馈条件(HoverVib, HoverFos, Button-Click 和 Visual-Only)、目标方向(向下或向上寻找)以及目标距离(与开始按键相距 3,6,9,12 个条目).反馈条件的实验顺序通过平衡拉丁方方法实现在实验对象间的平衡,目标距离在实验中随机改变,每个目标出现在开始按键上方或下方的次数相同,向上或向下寻找目标的任务交替出现.

概括来说,实验设计包括:12名实验对象×4个反馈条件(HoverVib,HoverFos,Button-Click和Visual-Only)×2个目标方向(向上或向下)×4个目标距离(3,6,9和12个条目)×10次重复=3840次点击任务。

1.5 实验结果

1.5.1 错误率

整个实验的平均错误率为4.8%。我们利用4×4×2(反馈条件×目标距离×目标方向)重复测量ANOVA方差分析方法对错误率进行了分析。在各种反馈条件下的平均错误率分别为Visual-Only,3.8%;Button-Click,4.2%;HoverVib,4.5%;HoverFos,6.7%。然而,反馈条件对错误率没有显著影响($F_{3,33}=1.97, p=0.14$)。图4展示了4种反馈条件下的错误率。

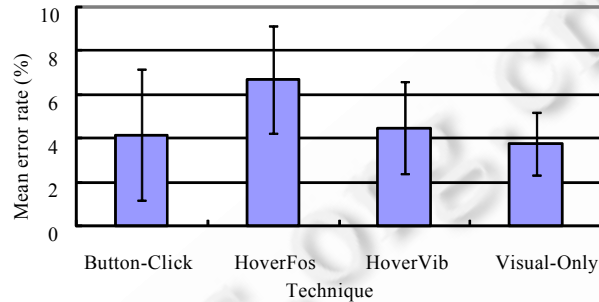


Fig.4 Mean error rate for feedback conditions. Error bars represent 95% confidence interval

图4 4种反馈条件下的错误率。误差线表示95%的置信区间

1.5.2 移动时间

我们分析用户一次性点击成功的移动时间。ANOVA方差分析显示,目标距离($F_{3,33}=13.25, p<0.001$)和目标选择方向($F_{1,11}=66.77, p<0.001$)对移动时间有显著影响。然而,反馈条件对移动时间没有显著影响($F_{3,33}=1.66, p=0.20$)。图5展示了不同反馈条件和目标距离下的平均移动时间。4种反馈条件下的平均移动时间分别为Button-Click,720.9ms;HoverVib,721.6ms;Visual-Only,725.5ms;HoverFos,765.5ms。虽然在HoverFos条件下的移动时间比其他条件略长,但差异并不显著($p>0.10$)。

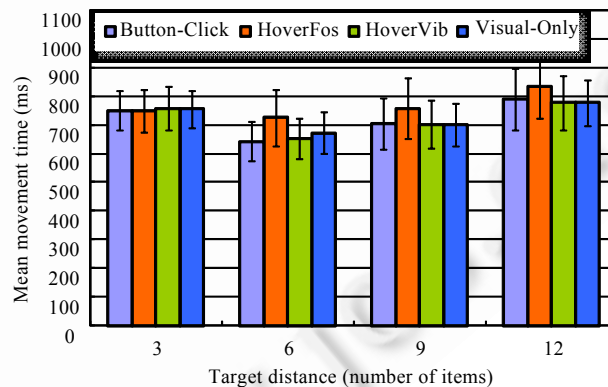


Fig.5 Mean movement time for target distance and feedback conditions.

Error bars represent 95% confidence interval

图5 不同反馈条件和目标距离下的平均移动时间。误差线表示95%的置信区间

1.5.3 手指抬起时间

手指抬起时间为正确点击目标后的抬起时间。ANOVA方差分析并没有发现任何因素对此参数产生显著影响。在Button-Click条件下的手指抬起时间比其他条件略短,但是差异并不显著($p>0.12$)。图6展示了4种反馈条件下的手指抬起时间情况。

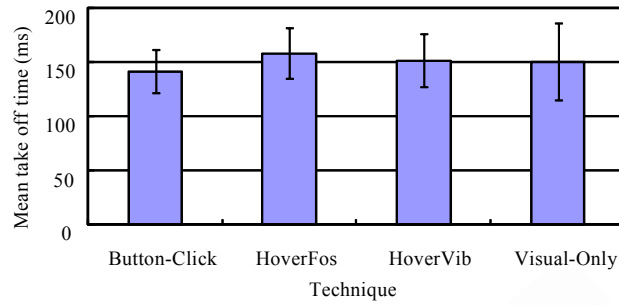


Fig.6 Mean take-off time for feedback conditions. Error bars represent 95% confidence interval

图6 4种反馈条件下的手指抬起时间.误差线表示95%的置信区间

1.5.4 偏离量

偏离量表示手指划动超越目标后的最远运动距离.通过 ANOVA 方差分析,我们发现反馈条件($F_{3,33}=4.5, p<0.05$)和目标距离($F_{3,33}=66.26, p<0.001$)对偏离量有显著影响,且这两个因素具有交互作用($F_{9,99}=4.08, p<0.05$).对数据均值进行比较发现,HoverFos 条件下的偏离量最小,且差异显著($p<0.05$).而且,这种作用在目标距离较小时更为显著.图 7展示了各种反馈条件和移动距离下的偏离量.可以看出,用户选择短距离目标时的偏离量最大.在选择这类目标时,用户手指刚刚启动,正处于加速运动中.然而,用户马上要求手指停止运动去选择目标.由于肌肉反应时间较长,在惯性作用下,用户在选择这类目标时产生了较大的偏离.此时,阻力反馈 HoverFos 可以有效帮助用户减速,因而降低了偏离量.相比之下,在目标距离较远时,用户已经适应了阻力反馈的作用,并且用户可以主动使手指减速,从而降低偏离目标的情况.因此,在这类目标的选择上,力反馈的作用就比较微弱.

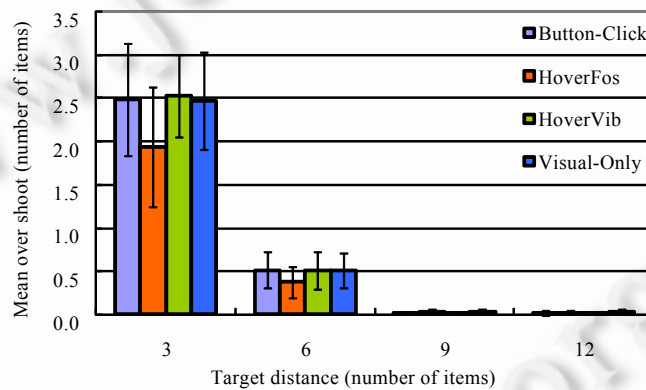


Fig.7 Mean overshoot distance for target distance and feedback conditions.

Error bars represent 95% confidence interval

图7 各种反馈条件和移动距离下的偏离量.误差线表示95%的置信区间

1.5.5 主观评价

在实验结束后,我们请实验对象对 4 种反馈条件进行排名.其排名结果为 Button-Click,1.6;Visual-Only,2.1;HoverVib,3.1;HoverFos,3.3.并且,排名先后的差异较为显著($\chi^2=13.80, p<0.01$).

2 结论与讨论

在悬浮空间中,我们比较了两种形式的触觉反馈:振动触觉反馈和力反馈.对于力反馈,在以前的单一对象 Fitt's 实验中^[14],我们发现在用户手指到达选取目标的上方时增加一个阻力反馈可以帮助用户快速地选取目标.这种反馈比起在用户点击目标后增加点击反馈更能提高用户的操作效率和精度.然而,在多对象任务中,力反馈

虽然可以防止用户滑过目标,降低偏离量,但在非目标对象上的力反馈却阻碍了手指的运动,结果并没有提高用户的操作水平.此外,实验对象并不青睐这种阻力作用.大部分实验对象认为这种反馈干扰了他们的操作并容易使他们产生疲劳.这个结果与 Dennerlein 和 Yang 的研究结果相吻合.他们也发现阻力场会导致实验对象出现肌肉疲劳^[16].

对于触觉反馈,Casiez 等人通过阶跃信号增大目标的摩擦系数,从而提高了用户的操作水平.而且,他们认为使用户操作水平提高的原因是摩擦系数改变产生的感知信号而非摩擦产生的阻碍作用^[23].在我们的实验中,振动触觉反馈通过 HTC 手机的内置振动电机产生.在 HoverVib 条件下,当用户划过一个条目的边界时振动电机产生 40ms 的振动.再短的振动则很难被用户感知.然而,这种偏心振动电机的置位时间(setting time)较长,在停止信号发出后需要几十毫秒的时间才能停转^[24].在 HoverVib 条件下,实验对象选择最远目标(12 个条目)所需平均时间为 721ms.那么,平均划过每个条目的时间为 60ms.也就是说,由于手指运动速度很快而振动电机反应过慢,在第 1 次振动还未完全结束后,第 2 次振动又已经开始.在这种条件下,用户无法区分出两次振动之间的间隔.所以,这种振动触觉反馈完全被用户忽略掉了.此外,振动触觉没有提高用户操作水平的另一个深层原因可能是,在直接交互(direct interaction)中,视觉反馈占据了任务的主导地位,因而使触觉反馈的作用被忽视.类似的结果也曾文献^[13]中出现.然而,这个原因需要进一步研究才能确定.

在前人的研究中发现,振动触觉反馈和力反馈在单一对象选择任务中可以提高用户的操作水平^[25],但在多对象任务中这种作用却很难显现^[16].因此,结合本文的实验结果,我们建议,对于单一对象选择任务,可以在悬浮空间中增加触觉反馈以帮助用户更便捷地选取目标.对于多对象任务,会产生干扰作用的力反馈和效果模糊的振动触觉反馈很难提高用户的操作水平.然而,通过对悬浮空间内触觉反馈的改进,比如根据移动速度动态调节的力反馈^[15]或者采用响应速度快的振动反馈^[5],可能会对用户的操作有所帮助.但是,交互设计师在选用这些反馈时要防止这些反馈对用户正常的操作造成干扰.

相对于在悬浮空间内增加的触觉反馈,在点击目标后增加的按键振动反馈并不影响实验对象选取目标的操作.这种反馈反而使用户感觉更舒服.虽然这种反馈可以少量提高用户从目标上抬起手指的速度,但是按键点击反馈的作用更多地体现在用户体验上.实验对象普遍认为这种反馈使他们感觉在目标上的点击得到了确认.一名实验对象甚至感觉这种反馈像是任务完成后得到的奖励.因此,这种按键点击反馈是在悬浮空间中进行触控操作时对视觉反馈的一种有益补充.

References:

- [1] Banter B. Touch screens and touch surfaces are enriched by haptic force-feedback. *Information Display*, 2010,26(3):26-30.
- [2] Leung R, Maclean K, Bertelsen M B, *et al.* Evaluation of haptically augmented touchscreen gui elements under cognitive load. In: *Proc. of the ICMI 2007*. Nagoya: ACM, 2007. 374-381.
- [3] Hoggan E, Brewster S A, Johnston J. Investigating the effectiveness of tactile feedback for mobile touchscreens. In: *Proc. of the SIGCHI 2008*. Florence: ACM, 2008. 1573-1582.
- [4] Levesque V, Oram L, Maclean K, *et al.* Enhancing physicality in touch interaction with programmable friction. In: *Proc. of the SIGCHI 2011*. Vancouver: ACM, 2011. 2481-2490.
- [5] Brewster S, Chohan F, Brown L. Tactile feedback for mobile interactions. In: *Proc. of the SIGCHI 2007*. San Jose, 2007. 159-162.
- [6] Poupyrev I, Maruyama S, Rekimoto J. Ambient touch: Designing tactile interfaces for handheld devices. In: *Proc. of the UIST 2002*. Paris: ACM, 2002. 51-60.
- [7] Bau O, Poupyrev I, Israr A, *et al.* TeslaTouch: Electro-vibration for touch surfaces. In: *Proc. of the UIST 2010*. New York: ACM, 2010. 283-292.
- [8] Buxton W, Hill R, Rowley P. Issues and techniques in touch-sensitive tablet input. In: *Proc. of the CGIT'85*. ACM, 1985. 215-224.
- [9] Takeoka Y, Miyaki T, Rekimoto J. Z-Touch: An infrastructure for 3D gesture interaction in the proximity of tabletop surfaces. In: *Proc. of the ITS 2008*. ACM, 2010. 91-94.
- [10] Rekimoto J. SmartSkin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In: *Proc. of the SIGCHI 2002*. Minneapolis: ACM, 2002. 113-120.

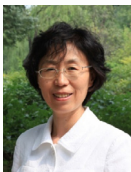
- [11] Hilliges O, Izadi S, Wilson A D, *et al.* Interactions in the air: Adding further depth to interactive tabletops. In: Proc. of the UIST 2009. Victoria: ACM, 2009. 139–148.
- [12] Sony xperia sola. <http://developer.sonymobile.com>
- [13] Sun MH, Ren XS. An evaluation of multimodal feedback in tracking state for pen-based interfaces. In: Proc. of the ICMA 2008. 2009. 72–77.
- [14] Yang Y, Zhang Y, Hou Z, *et al.* Adding haptic feedback to touch screens at the right time. In: Proc. of the ICMI 2011. Alicante: ACM, 2011. 73–80.
- [15] Oakley I, Brewster S, Gray P. Solving multi-target haptic problems in menu interaction. In: Proc. of the SIGCHI 2001. Seattle: ACM, 2001. 357–358.
- [16] Dennerlein JT, Yang MC. Haptic force-feedback devices for the office computer: Performance and musculoskeletal loading issues. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2001,43(2):278–286.
- [17] Do TMT, Blom J, Gatica-Perez D. Smartphone usage in the wild: A large-scale analysis of applications and context. In: Proc. of the ICMI 2011. Alicante: ACM, 2011. 353–360.
- [18] Blanch R, Ortega M. Benchmarking pointing techniques with distractors: Adding a density factor to Fitts' pointing paradigm. In: Proc. of the SIGCHI 2011. Vancouver: ACM, 2011. 1629–1638.
- [19] Gosselin C, Poulin R, Laurendeau D. A planar parallel 3-d of cable-driven haptic interface. In: Proc. of the WM-SCI 2008. Orlando: 2008. 266–271.
- [20] iOS Human User Interface Guideline. <http://developer.apple.com>
- [21] Potter RL, Weldon LJ, Shneiderman B. Improving the accuracy of touch screens: An experimental evaluation of three strategies. In: Proc. of the SIGCHI'88. Washington: ACM, 1988. 27–32.
- [22] Pakkanen T, Raisamo R, Raisamo J, *et al.* Comparison of three designs for haptic button edges on touchscreens. In: Proc. of the Haptics Symposium 2010. IEEE, 2010. 219–225.
- [23] Casiez RG, Roussel N, *et al.* Surfpad: Riding towards targets on a squeeze film effect. In: Proc. of the SIGCHI 2011. Vancouver: ACM, 2011. 2491–2500.
- [24] Kyung KU, Lee JY, Srinivasan MA. Precise manipulation of GUI on a touch screen with haptic cues. In: Proc. of the World Haptics 2009. 2009. 202–207.
- [25] Akamatsu M, Mackenzie IS. Movement characteristics using a mouse with tactile and force feedback. *Int'l Journal of Human-Computer Studies*, 1996,45(4):483–493.



杨毅(1985—),男,北京人,博士生,主要研究领域为触觉人机交互。
E-mail: eyang@me.buaa.edu.cn



徐泉(1982—),男,讲师,主要研究领域为人机交互,执行制造系统,信息可视化。
E-mail: quanxu@mail.neu.edu.cn



张玉茹(1959—),女,教授,博士生导师,主要研究领域为机器触觉,虚拟现实技术,智能机器人技术。
E-mail: yuru@buaa.edu.cn



侯柱(1987—),男,硕士生,主要研究领域为触觉人机交互。
E-mail: houzhu0130@163.com



戴晓伟(1985—),男,博士生,主要研究领域为触觉人机交互。
E-mail: daixw@me.buaa.edu.cn