

于交互表面上方的空间,即 $P_t \notin S$. P_t 通过合并操作,并入前一个时刻的空中轨迹原语 Ta_{t-1} ,形成新的原语 Ta_t ,记为 $Ta_t=f(Ta_{t-1},P_t)$. S_2 为表面轨迹输入状态,其当前轨迹输入点 P_t 位于交互表面内,即 $P_t \in S$. 通过合并操作 $Ts_t=f(Ts_{t-1},P_t)$,将 P_t 并入前一时刻的表面轨迹原语 Ts_{t-1} ,从而得到当前时刻的轨迹原语 Ts_t .

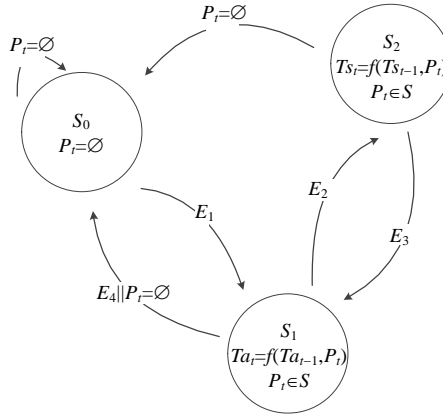


Fig.6 Hybrid automaton for trajectory segmentation

图 6 轨迹切分的混合自动机

各个状态之间的转换通过一些事件或条件进行控制,如图 7 所示.在初始状态无轨迹输入,因此 $P_t = \emptyset$,状态机位于 S_0 状态.当开始进行手势交互,手指进入交互空间中时,事件 E_1 发生,此时,传感器检测到相关的位置信息 $P_t(Attr, Pos3(x,y,z), Time, Press, Size)$,并计算出输入轨迹点到交互表面的投影距离 H .此时,状态机转入 S_1 状态, $P_t \in S$.当手指向下运动,接触交互表面时,事件 E_2 发生,此时,轨迹点属性 $Attr$ 发生改变,投影高度 H 跃变为 0(有可能无法精确追踪到手指与表面的初始接触点),而交互表面压力值 $Press$ 、接触面积 $Size$ 发生跃变.此时, $P_t \in S$,进入 S_2 状态.当手指离开交互表面时,事件 E_3 发生,压力值 $Press$ 、接触面积 $Size$ 跃变为 0,而投影高度 H 也发生跃变,此时进入 S_1 状态, $P_t \in S$.当手指继续抬升,达到交互空间边缘时,事件 E_4 发生,由于无法检测到手势输入,此时 $P_t = \emptyset$,进入 S_0 状态.为了保证状态机的可靠性,规定:在 S_1, S_2 状态时,若出现 $P_t = \emptyset$,则返回初始状态 S_0 .

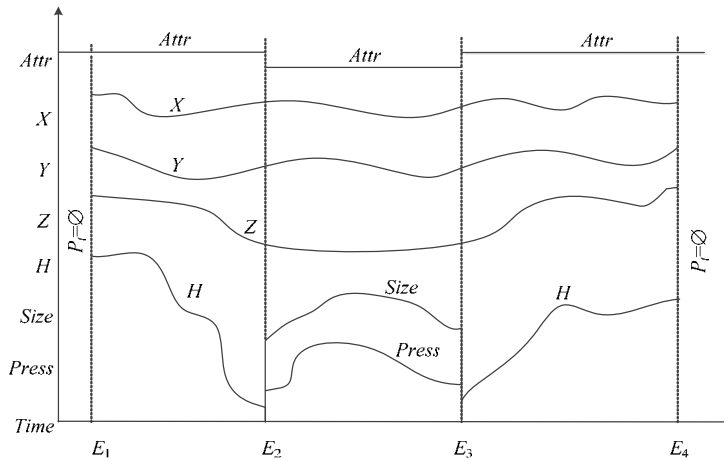


Fig.7 Interactive temporal model

图 7 交互动作时序模型

5.3 轨迹切分策略

混合自动机处理过程,实质上是将轨迹初步切分为空中轨迹及表面轨迹两类,在 S_1, S_2 状态中,需要对轨迹进

行二次切分,以形成轨迹原语 Ta, Ts . 针对平面轨迹,参考文献[31],使用二维平面的轨迹点位置、运动方向、速度值及速度矢量这 4 个属性进行轨迹切分^[31]. 对于前 3 种属性,采用了限定轨迹分段最大长度(半径小于一定阈值)、限定运动方向角范围(角度小于一定阈值,如 $\pi/2$)、速度值单调变化(单调递增、单调递减)的切分策略. 对于速度矢量属性,则采用了前 3 个切分策略相结合的方式. 本文采用相似策略,基于时间连续性(采样点时间间隔)、基于空间连续性(位置)以及基于速度单调性(方向及速度值),将切分对象由二维平面轨迹扩展到三维空间轨迹. 其主要的切分策略如下.

(1) 基于时间连续性,将出现时间间隔发生跃变的轨迹点作为切分点. 两个轨迹点的采样时间间隔 $time_{t+1} - time_t$, 应处于区间 $[1/f_{\max}, 1/f_{\min}]$ 内,即采样时间间隔减去区间中点 $(0.5 \times (1/f_{\max} + 1/f_{\min}))$ 的差值,应不大于区间长度的 $1/2(0.5 \times (1/f_{\min} - 1/f_{\max}))$. 由此可以得到评价函数,如公式(1):

$$f_{tim}(P_t, P_{t+1}) = \left| time_{t+1} - time_t - \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2f_{\max}f_{\min}} \right| - \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2f_{\max}f_{\min}} \quad (1)$$

其中 f_{\max} 及 f_{\min} 是所允许的传感器最大、最小采样频率. $time_t$ 及 $time_{t+1}$ 为相邻的两个空间信息点 P_t 及 P_{t+1} 的时间戳. 当函数值大于 0 时,相邻轨迹点的时间间隔过大,该点为切分点.

(2) 基于空间连续性,将出现空间坐标跃变的轨迹点作为切分点. 其评价函数如公式(2)所示.

$$f_{dis}(P_t, P_{t+1}) = \sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2 + (z_{t+1} - z_t)^2} - (time_{t+1} - time_t)v_{\max} \quad (2)$$

其中 P_t 及 P_{t+1} 是两个相邻轨迹点的位置信息五元组,其三维空间信息为 (x_t, y_t, z_t) 及 $(x_{t+1}, y_{t+1}, z_{t+1})$; $time_t$ 及 $time_{t+1}$ 为时间戳; v_{\max} 是一般情况下手势轨迹所能达到的最大瞬时速度. 当相邻轨迹点之间的位移速度过大,导致位移值大于阈值(取决于 v_{\max})时,评价函数的值大于 0,则该点作为切分点.

(3) 基于速度单调性,相邻轨迹点的瞬时速度和方向变化较为单调平缓变化,不能有突然的跃变. 因此,将瞬时速度大小或方向有较大变化,或速度变化的单调性发生改变的轨迹点作为切分点.

- 对于轨迹点,其瞬时速度的计算公式为

$$V(P_{t+1}) = \frac{\sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2 + (z_{t+1} - z_t)^2}}{time_{t+1} - time_t} \quad (3)$$

- 基于速度变化的单调性评价公式为

$$f_{mon}(P_{t+1}) = \frac{V(P_{t+1}) - V(P_t)}{V(P_t) - V(P_{t-1})} \quad (4)$$

当值大于 0 时,该点出现了速度变化的拐点,因此作为切分点.

- 基于速度值变化率的评价公式为

$$f_{val}(P_{t+1}) = \frac{V(P_{t+1}) - V(P_t)}{time_{t+1} - time_t} - a_{\max} \quad (5)$$

当值大于 0 时,速度变化率大于阈值 a_{\max} ,则该轨迹点作为切分点.

- 基于速度方向变化的评价公式为

$$f_{dir}(P_{t+1}) = \left| \frac{x_{t+1}x_t + y_{t+1}y_t + z_{t+1}z_t}{\sqrt{x_{t+1}^2 + y_{t+1}^2 + z_{t+1}^2} \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + z_t^2}} \right| - c_{\max} \quad (6)$$

当值大于 0 时,相邻轨迹点的瞬时速度方向夹角余弦值大于阈值 c_{\max} ,则该点作为切分点.

5.4 手势分类

为了描述交互系统可以识别的交互手势,需要对手势集进行分类定义. 其分类类型如图 8 所示. 图 8(a)为空中手势,图 8(b)为表面手势,图 8(c)~图 8(f)为混合手势. 由于交互空间包含了空中层、表面层、混合层,故对手势集合定义如下: $G = \{g | g \in Ga \cup Gs \cup Gm\}$. 其中, Ga, Gs, Gm 分别表示空中手势集合、表面手势集合、混合手势集合. 其中,空中手势集合 $Ga = \{g | g \in Tac\}$,表面手势集合 $Gs = \{g | g \in Tsc\}$. 混合手势由于同时包含了空中轨迹和表面轨迹,且两种轨迹有可能多次交织. 因此只定义了其基本手势类型集 Gm , 包含 4 种基本类型的混合手势(图 8(c)~图

8(f)),由这 4 种基本类型的手势可以组合成更为复杂的混合手势:

$$Gm=\{(g_a,g_s),(g_s,g_a),(g_a,g_s,g_a),(g_s,g_a,g_s)|g_a \in Tac, g_s \in Tsc\}.$$

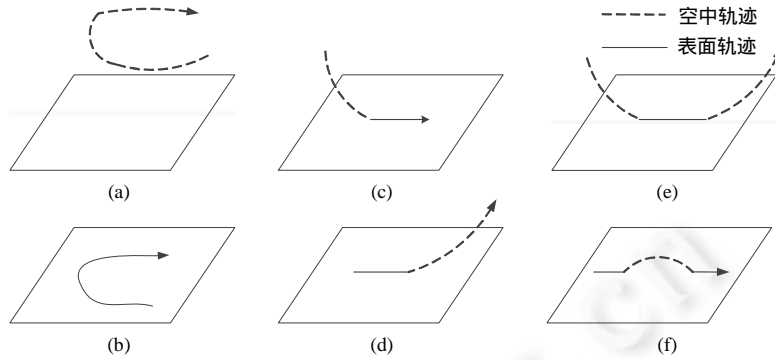


Fig.8 Interactive gesture types
图 8 交互手势类型

5.5 手势预分类器

当轨迹原语 T_s, T_a 传递到交互识别层后,首先通过动作预分类器进行初步分类和拼接,其状态转换图如图 9 所示.其中, S 为初始状态,其识别缓冲区为空,无轨迹原语.状态 $a \sim$ 状态 f 分别对应图 8 中的 6 种手势类型.下面以轨迹原语序列 T_c 的识别过程为例,若输入的连续轨迹原集合为 $T_c=\{Ta_1, Ta_2, Ts_3, Ts_4, Ta_5\}$,在初始状态 S 下,首先进入识别缓冲区的为空中轨迹原语 Ta_1 ,则进入 a 状态,识别为空中手势;后续输入为 Ta_2 ,则保持在 a 状态,识别为空中手势.输入表面轨迹原语 Ts_3 时,则进入 c 状态,识别为 c 类型的混合手势. c 状态下,输入为 Ts_4 ,状态保持不变.最后输入为 Ta_5 ,进入 e 状态,将整个轨迹原语序列 T_c 识别为 e 类型的混合手势.

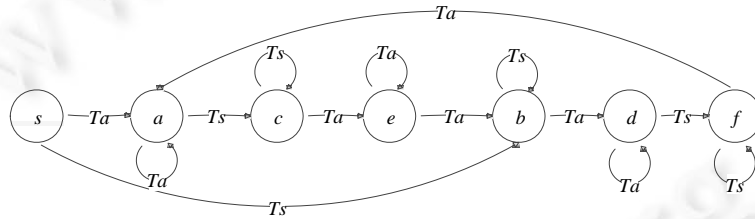


Fig.9 State transition diagram of the type identification for the sequence of the trajectory primitives
图 9 对轨迹原语序列进行类型识别的状态转换图

5.6 轨迹原语变换

通过手势预分类器的处理,输入的轨迹原语序列被识别为 6 种类型,在进行手势识别前,需要根据应用场景与需求对其进行轨迹变换.例如,对于平面的触控屏幕、平面式的 WIMP 范式界面,一般需要将分类后的轨迹原语投影到屏幕平面上,使用平面投影轨迹作为最终输入命令.为了适应多种应用场景需求,将轨迹原语变换处理分为 3 种:直接输出、投影为表面轨迹、构造空间轨迹(如图 10 所示).直接输出是指对轨迹序列不进行变换处理(如图 10(a)所示),直接输出给后继的手势识别模块进行处理;对于只使用交互表面轨迹的场景,则将轨迹序列中的空中轨迹原语 T_a 投影到交互表面,得到其表面投影轨迹 T_s' (如图 10(b)所示).经过投影后,轨迹序列只包含表面轨迹原语;对于一些三维交互场景,需要使用交互手势的三维空间信息,则利用序列中的空中轨迹 T_a 作为约束条件,将 T_s 作为交互表面的投影,构造出其对应的空中轨迹原语 T_a' (如图 10(c)所示).

轨迹原语变换方式的选择主要取决于 3 个因素:当前输入的轨迹原语、当前应用场景状态、之前识别的交互动作.因此可以构造动态贝叶斯网络^[21],以轨迹原语变换方式的选择作为响应动作,以前一个交互动作、当前输入的轨迹原语、当前的场景视图状态作为条件,计算响应动作的条件概率,从而依据动态更新的响应动作条

件概率值来选择合适的变换方式.

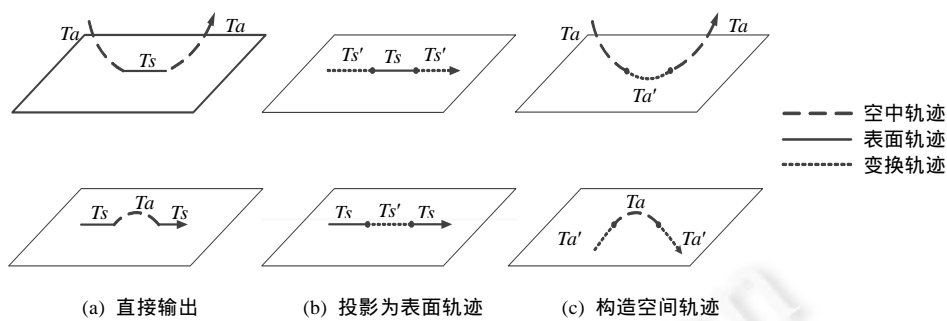


Fig.10 Transformation of the sequence of the trace primitives
图 10 轨迹原语序列的变换方式

6 实验验证

我们设计了一个手势识别的应用实例,来验证空间分层模型的合理性以及手势识别框架模型的可行性.在实验中,我们对连续交互空间层次交互模型进行了简化,主要基于连续的交互空间,使用平面界面应用场景,针对手势识别框架进行实验.

使用三星公司的 GALAXY S4 手机作为主要的实验设备,其触控屏幕使用了自电容感应技术,可以对屏幕上方约 15mm 距离内的单指运动进行平面位置追踪.在识别算法方面,采用 \$1 作为二维平面手势的识别算法. \$1 识别算法是华盛顿大学的 Wobbrock 等人^[32]在 2007 年提出的二维手势识别方法.该算法通过模板匹配的方式进行单笔划二维手势识别.该算法不需要大样本量的手势模板库,仅需要 1 个手势模板样本即可进行手势匹配识别,简单易用,执行速度快,且具有较高的识别率^[14].

在 \$1 的标准手势集中,我们依据从简单到复杂的原则,选择了 caret,check,circle,star 这 4 种具有代表性的手势(如图 11 所示),分别以表面手势、空中手势、混合手势这 3 种方式进行相应的手势输入,并记录完成时间及准确率.

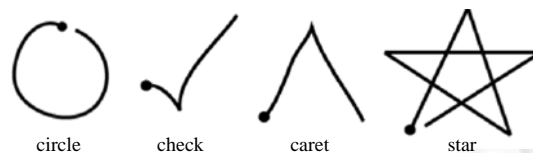


Fig.11 Gestures for experiments
图 11 实验手势集

本次实验共有 13 名被试者,其中 9 名男性,4 名女性.实验开始前,向被试者介绍实验所使用的 3 种手势输入方式:正常的触控输入方式、非接触的空中输入方式以及允许手指短暂离开交互表面的混合输入方式.用户熟悉操作流程和操作方法后,开始进行实验.对于每种输入方式,进行一组实验,总共 3 组.在每一组实验中,被试者需要使用单指输入 4 种手势,每种手势需要输入 15 次.在实验过程中,要求输入尽可能地快速、流畅.实验完成后,通过问卷调查,让被试者对 3 种输入方式的舒适性、空间自由度程进行打分,分值范围为 1 分~10 分,分值越高,则表明舒适性或自由程度越高.

如图 12、图 13 所示为手势输入所花费的平均时间.由图 12 中可以看出,空中手势输入的时间花费最多,表面触控输入花费时间最少,而混合手势的总时间开销(空中+表面)介于二者之间.混合手势的表面轨迹的时间花费比表面触控手势更小(如图 13 所示).如图 14 所示为输入手势的识别成功率.在 3 种输入方式中,表面触控成功率最高,混合手势次之,空中手势识别率最低.因此,对于 3 种手势输入方式来说,空中输入时间花销最大,准确率

最低;表面触控输入时间花费最小,准确率最高;混合手势输入则介于二者之间。

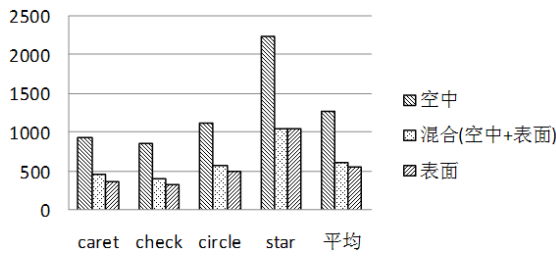


Fig.12 Gesture input time (1)

图 12 手势输入时间(1)

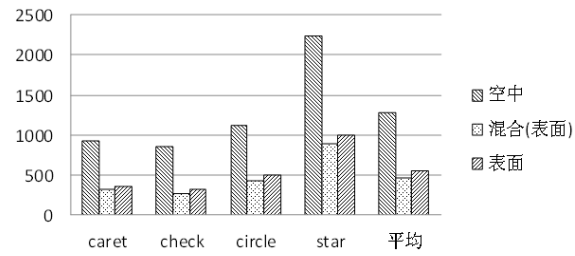


Fig.13 Gesture input time (2)

图 13 手势输入时间(2)

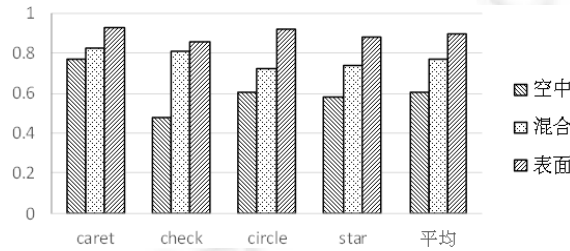


Fig.14 Gesture recognition success rate

图 14 手势识别成功率

对空中手势而言,要达到理想的交互效果,需要大范围的交互空间,而手在空中运动阻力较小(相对于触控而言),运动速度较快.这意味着对空中手势传感器有较高的要求.GALAXY S4 仅能识别屏幕上方向约 15mm 距离内的单指运动二维坐标,且有较为明显的时间延迟(约 0.3s).因此,其识别区间、识别速度都无法达到空中手势的理想要求.在实验中,空中手势输入经常会出现手指移出感应区域而导致识别失败的现象.而明显的延时,使得绘制的轨迹总是滞后于手指的移动,实际上起到了“限速”的作用.同时,基于二维平面坐标,也难以准确识别输入动作的起止点.这些因素的共同作用导致了空中手势输入无论在时间消耗上还是识别成功率上都表现最差.

混合手势输入方式对交互空间的要求相对较低.其输入动作轨迹包含了表面轨迹及空中轨迹(已投影到触控表面),不会由于手指短暂离开交互表面而导致识别失败.同时,可以利用表面轨迹作为约束条件,对其空中轨迹进行平滑、分割及识别.因此,其识别成功率比空中手势高.但是,由于基 GALAXY S4 的自电容传感器仅能识别手指的屏幕投影坐标,而没有空间高度信息,因此,对于起始及退出的空间动作难以进行有效的切分及识别,这对识别成功率有着较为显著的影响.另外,接触表面前及离开表面后的近表面空中轨迹也作为手势输入的有效组成部分,因此与表面触控输入相比,混合手势输入方式的时间开销会更大一些.

实验结束后,针对舒适度及空间自由度对被试者进行了问卷调查.图 15 中显示:表面触控输入的舒适度最高,空中手势输入的舒适度最低.这与手势识别成功率(如图 14 所示)一致,表明手势输入的客观成功率对主观舒适度评价有着重要的影响.图 16 为空间自由度的主观评价,从图中可以看出,混合交互方式空间自由度最高,表面触控方式次之,空中手势输入方式最低.这表明表面触控方式在带来高精度的同时,也损失了部分空间自由度.空中交互方式由于硬件的限制,其交互空间仍较为狭窄(屏幕上方向约 15mm 内的空间);同时,无触觉反馈、难以判断手势输入动作的起止点以及识别滞后等因素,对时间开销及识别率产生了较大的影响,最终也导致了在主观评价中舒适度、空间自由度均为最低.对于混合输入方式,将交互空间由表面扩展到了近表面空间,由于目前硬件实验条件及软件识别算法的限制,识别成功率低于表面触控方式,影响了舒适度评价,但由于交互空间突破了交互表面的限制,得到了三者中最高的空间自由度评分.

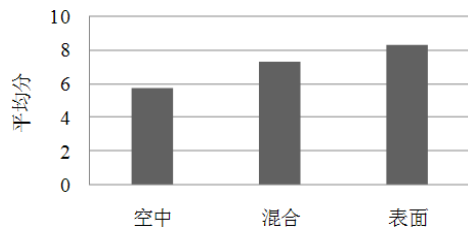


Fig.15 Average comfort degree

图 15 平均舒适度

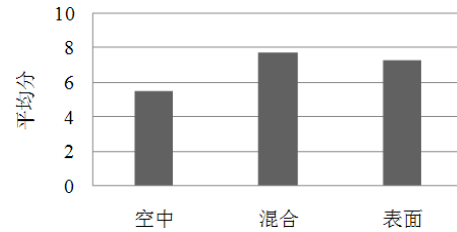


Fig.16 Average space degree of freedom

图 16 平均空间自由度

7 总 结

本文结合目前交互技术发展趋势,分析了目前触控交互技术在移动机可穿戴设备应用的现状及存在的问题.基于交互动作的时间连续性及空间连续性,提出了将触控交互动作的接触面轨迹与空间轨迹相结合,同时具有空中手势及触控手势的特性及优点的混合手势输入方法.基于连续交互空间的概念,将空中手势、表面触控手势进行统一,建立了包括空中层、表面层、混合层的连续交互空间分层处理模型.详细阐述了连续交互空间的输入整合方法,对各个层次所涉及到的主要数据形式进行了规约和定义,并对数据流的转换过程进行了说明.然后,以分层处理模型中的交互表示层及交互理解层两个层次为核心,构建了通用性的手势识别框架.最后,通过手势识别的应用实验来验证空间分层模型的合理性以及手势识别框架模型的可行性.实验结果表明,混合手势输入方式同时兼具了表面触控输入及空中手势输入的优点,在兼顾识别效率的同时,具有较好的空间自由度.

今后,我们将会围绕连续交互空间,针对混合手势的识别和应用展开进一步研究和实验,研究混合交互手势在其他类型的交互表面,如曲面屏幕、柔性触控表面等的适用性及应用方法.同时,进一步完善手势识别框架,对轨迹切分方法、轨迹切分策略以及算法调度做进一步的研究,以提高对不同类型手势输入、不同类型的交互表面的适应性及识别效率.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的中国科学院软件研究所人机交互技术与智能信息处理实验室的苏晓君老师、路璐、陈毅能、贺悦、施大鹏及参加实验的同学表示感谢.

References:

- [1] Wang F, Cao X, Ren X, Irani P. Detecting and leveraging finger orientation for interaction with direct-touch surfaces. In: Wilson A, ed. Proc. of the 22nd Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2009. 23–32. [doi: 10.1145/1622176.1622182]
- [2] Hourcade JP, Berkel TR. Tap or touch? Pen-based selection accuracy for the young and old. In: Olson G, ed. Proc. of the ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI), 2006 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2006. 881–886. [doi: 10.1145/1125451.1125623]
- [3] Heo S, Gu J, Lee G. Expanding touch input vocabulary by using consecutive distant taps. In: Jones M, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction (SIGCHI) Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2014. 2597–2606. [doi: 10.1145/2556288.2557234]
- [4] Walter R, Bailly G, Müller J. StrikeAPose: Revealing mid-air gestures on public displays. In: Mackay WE, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction (SIGCHI) Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2013. 841–850. [doi: 10.1145/2470654.2470774]
- [5] Chen XA, Schwarz J, Harrison C, Mankoff J, Hudson SE. Air+Touch: Interweaving touch & in-air gestures. In: Benko R, ed. Proc. of the 27th Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2014. 519–525. [doi: 10.1145/2642918.2647392]
- [6] Bi XJ, Zhai SM. Bayesian touch: A statistical criterion of target selection with finger touch. In: Izadi S, ed. Proc. of the 26th Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2013. 51–60. [doi: 10.1145/2501988.2502058]

- [7] Fukushima S, Kajimoto H. Palm touch panel: providing touch sensation through the device. In: Rekimoto J, ed. Proc. of the ACM Int'l Conf. on Interactive Tabletops and Surfaces. New York: ACM Press, 2011. 79–82. [doi: 10.1145/2076354.2076370]
- [8] Lu L, Tian F, Dai GZ, Wang HA. A study of the multimodal cognition and interaction based on touch, audition and vision. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014,26(4):654–661 (in Chinese with English abstract).
- [9] Reisman JL, Davidson PL, Han JY. A screen-space formulation for 2D and 3D direct manipulation. In: Wilson A, ed. Proc. of the 22nd Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2009. 69–78. [doi: 10.1145/1622176.1622190]
- [10] Kane SK, Bigham JP, Wobbrock JO. Slide rule: Making mobile touch screens accessible to blind people using multi-touch interaction techniques. In: Harper S, ed. Proc. of the 10th Int'l ACM SIGACCESS Conf. on Computers and Accessibility. New York: ACM Press, 2008. 73–80. [doi: 10.1145/1414471.1414487]
- [11] Butler A, Izadi S, Hodges S. SideSight: Multi-“touch” interaction around small devices. In: Cousins S, ed. Proc. of the 21st Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2008. 201–204. [doi: 10.1145/1449715.1449746]
- [12] Wigdor D, Williams S, Cronin M, Levy R, White K, Mazeev M, Benko H. Ripples: Utilizing per-contact visualizations to improve user interaction with touch displays. In: Wilson A, ed. Proc. of the 22nd Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2009. 3–12. [doi: 10.1145/1622176.1622180]
- [13] Sohn M, Nam T, Lee W. Designing with unconscious human behaviors for eco-friendly interaction. In: Jr. Olsen DR, ed. Proc. of the ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI), 2009 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2009. 2651–2654. [doi: 10.1145/1520340.1520375]
- [14] Laviola JJ. An introduction to 3D gestural interfaces. In: Shreiner D, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conf. (SIGGRAPH). New York: ACM Press, 2014. 1–42. [doi: 10.1145/2614028.2615424]
- [15] Konrad T, Demirdjian D, Darrell T. Gesture + play: Full-body interaction for virtual environments. In: Cockton G, ed. Proc. of the ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI), 2003 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2003. 620–621. [doi: 10.1145/765891.765894]
- [16] Hinckley K, Song H. Sensor synaesthesia: Touch in motion, and motion in touch. In: Tan D, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction (SIGCHI) Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2011. 801–810. [doi: 10.1145/1978942.1979059]
- [17] Lai JW, Zhang DS. ExtendedThumb: A motion-based virtual thumb for improving one-handed target acquisition on touch-screen mobile devices. In: Jones M, ed. Proc. of the ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI), 2014 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2014. 1825–1830. [doi: 10.1145/2559206.2581158]
- [18] Oakley I, Lee D. Interaction on the edge: Offset sensing for small devices. In: Jones M, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction (SIGCHI) Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2014. 169–178. [doi: 10.1145/2556288.2557138]
- [19] Baudisch P, Chu G. Back-of-Device interaction allows creating very small touch devices. In: Jr. Olsen DR, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction (SIGCHI) Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2009. 1923–1932. [doi: 10.1145/1518701.1518995]
- [20] Wigdor D, Leigh D, Forlines C, Shipman S, Barnwell J, Balakrishnan R, Shen C. Under the table interaction. In: Wellner P, ed. Proc. of the 19th Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2006. 259–268. [doi: 10.1145/1166253.1166294]
- [21] Li Y, Lu H, Zhang H. Optimistic programming of touch interaction. ACM Trans. on Computer-Human Interaction, 2014,21(4): 1–24. [doi: 10.1145/2631914]
- [22] Niikura T, Hirobe Y, Cassinelli A, Watanabe Y, Komuro T, Ishikawa M. In-Air typing interface for mobile devices with vibration feedback. In: Deroose T, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conf. (SIGGRAPH). New York: ACM Press, 2010. [doi: 10.1145/1836821.1836836]
- [23] Ketabdar H, Yüksel K, Roshandel M. MagiTact: Interaction with mobile devices based on compass (magnetic) sensor. In: Rich C, ed. Proc. of the 15th Int'l Conf. on Intelligent User Interfaces. New York: ACM Press, 2010. 413–414. [doi: 10.1145/1719970.1720048]

- [24] Kratz S, Rohs M. HoverFlow: Expanding the design space of around-device interaction. In: Oppermann R, ed. Proc. of the 11th Int'l Conf. on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services. New York: ACM Press, 2009. 1–8. [doi: 10.1145/1613858.1613864]
- [25] Hilliges O, Izadi S, Wilson AD, Hodges S, Garcia-Mendoza A, Butz A. Interactions in the air: Adding further depth to interactive tabletops. In: Wilson A, ed. Proc. of the 22nd Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2009. 139–148. [doi: 10.1145/1622176.1622203]
- [26] Marquardt N, Jota R, Greenberg S, Jorge JA. The continuous interaction space: Interaction techniques unifying touch and gesture on and above a digital surface. In: Proc. of the 13th IFIP TC 13 Int'l Conf. on Human-Computer Interaction (INTERACT 2011). Berlin: Springer-Verlag Press, 2011. 461–476. [doi: 10.1007/978-3-642-23765-2_32]
- [27] Gu J, Heo S, Han J, Kim S, Lee G. LongPad: A touchpad using the entire area below the keyboard of a laptop computer. In: Bauersfeld P, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction (SIGCHI) Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2013. 1421–1430. [doi: 10.1145/2470654.2466188]
- [28] Moghaddam AB, Svendsen J, Tory M, Albu AB. Integrating touch and near touch interactions for information visualizations. In: Tan D, ed. Proc. of the ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI), 2011 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2011. 2347–2352. [doi: 10.1145/1979742.1979934]
- [29] Zhang JC, Fu N, Qiao LY, Peng XY. Investigation of information bandwidth oriented spectrum sensing method. Acta Physica Sinica, 2014,63(3):77–87 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7498/aps.63.030701]
- [30] Pohl H, Murray-Smith R. Focused and casual interactions: Allowing users to vary their level of engagement. In: Mackay WE, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction (SIGCHI) Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2013. 2223–2232. [doi: 10.1145/2470654.2481307]
- [31] Buchin M, Driemel A, van Kreveld M, Sacristán V. An algorithmic framework for segmenting trajectories based on spatio-temporal criteria. In: Agrawal D, ed. Proc. of the 18th SIGSPATIAL Int'l Conf. on Advances in Geographic Information Systems. New York: ACM Press, 2010. 202–211. [doi: 10.1145/1869790.1869821]
- [32] Wobbrock JO, Wilson AD, Li Y. Gestures without libraries, toolkits or training: A \$1 recognizer for user interface prototypes. In: Shen C, ed. Proc. of the 20th Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 2007. 159–168. [doi: 10.1145/1294211.1294238]

附中文参考文献:

- [8] 路璐,田丰,戴国忠,王宏安.融合触、听、视觉的多通道认知和交互模型.计算机辅助设计与图形学学报,2014,26(4):654–661.
- [29] 张京超,付宁,乔立岩,彭喜元.一种面向信息带宽的频谱感知方法研究.物理学报,2014,63(3):77–87. [doi: 10.7498/aps.63.030701]



刘杰(1981 -),男,广西崇左人,博士,讲师,CCF 专业会员,主要研究领域为人机交互技术,图形图像处理.



胡伟平(1991 -),男,硕士,主要研究领域为嵌入式,生理计算.



黄进(1985 -),男,博士生,CCF 学生会会员,主要研究领域为人机交互技术,图形图像处理.



戴国忠(1944 -),男,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为人机交互,计算机图形学.



田丰(1976 -),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为人机交互技术,虚拟现实.



王宏安(1963 -),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为实时智能,用户界面.