

文章编号: 1001 - 9081 (2005) 10 - 2219 - 05

手持移动计算中的人机交互技术研究

陈文广,董士海,岳玮宁,谭继志,王 衡
(北京大学 计算机科学技术系,北京 100871)

(chenwg@pku.edu.cn)

摘 要:叙述了在手持移动计算设备上的基于上下文感知的多通道交互模型、多通道汉字输入、移动计算中的小屏幕网络浏览策略等方面的研究成果。实现了一个智能导游系统 TGH,对这些模型和方法进行了应用和测试。最后总结了手持移动计算中的人机交互技术研究的一些结论。

关键词:手持移动计算;多通道交互;智能交互;普适计算

中图分类号: TP11 **文献标识码:** A

Research on man-machine interaction of handheld mobile computing

CHEN Wen-guang, DONG Shi-hai, YUE Wei-ning, TAN Ji-zhi, WANG Heng
(Department of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on our research projects supported by the National Natural Science Foundation of China, some research results were described, including the model of multimodal interaction based on context awareness, Chinese characters multimodal inputted for the handheld mobile devices, and the principles of improving web interaction on the small screen terminals. An intelligent guide system TGH to test our above frameworks and methods was implemented. At the end of this paper, some conclusions about the research on man-machine interaction of handheld mobile computing were given.

Key words: handheld mobile computing; multimodal interaction; intelligent interaction; pervasive/ubiquitous computing

0 引言

自 20 世纪 90 年代初以来,以手机、PDA 和掌上电脑为代表的移动设备得到了日益广泛的应用。手持移动计算的迅速发展,使得“任何人、在任何地点、任何时间、可以使用任何设备访问任何资源”的愿望可能得以实现。目前移动计算已经逐渐成为重要的计算模式之一。在移动计算的发展过程中,由于设备本身特点(如计算能力、网络环境条件的变化、安全性、屏幕尺寸、电源等方面的限制),移动设备上人机交互成为一个关键的问题。随着移动设备自身软硬件性能的提高和网络覆盖率、带宽等外部计算条件的不断提高和改善,人机交互的效率和自然性不高的问题越来越严重,也受到了越来越多的关注。

手持移动计算要求应用是脱离桌面的。在手持移动计算设备上的人机交互不同于基于键盘、鼠标和显示器的人机交互方式,它应该是一种隐含的、类似于现实世界中人和人的自然的交互方式。用利于手写、语音、手势等自然的人的表达方式取代 GUI 的交互范式。这种交互方式具有智能性、可学习性、易用性和高效性,适用于用户在移动环境下完成信息访问和处理的业务。在此过程中,人机交互的效率和自然性成为移动计算普及和应用中最为核心的问题之一。

1 相关研究工作

在移动计算技术迅速发展过程中,多通道交互在移动计

算模式中的应用受到了关注。Smart Sight^[1]是一个可携带的移动导游助理系统,它不仅实现了基于 GPS 的用户位置实时感知,而且支持手持、眼动、语音、手写等方式的多通道交互。MUST^[2]是另一个支持语音和手写交互的手持移动计算系统,并且能够提供多语种的服务。

早期研究的不足之处在于,它们的“多通道”实际上是各个交互通道的交替控制,各种通道之间缺乏并发性和协同性。同时,它们往往将所有的重要操作都交由专门的服务器处理,而随着移动设备计算能力的不断提高,手持设备本身已经可以处理更多的信息,分布式的系统结构已成为可能。

普适计算人机交互问题近年来受到了国内外的普遍关注。国际上,很多研究重点放在提高移动设备的交互能力上,从而使用户可以在任何时间、任何地点享受普适计算服务。美国斯坦福大学、CMU 和 Xerox 等研究机构,始终关注 Web 信息在小屏幕设备上的呈现^[3,4];斯坦福大学和华盛顿大学则在提高普适计算环境的信息输入效率上进行了不同的探索^[5,6]。另一方面,将计算空间与物理空间紧密结合的嵌入式集成空间也得到了广泛的重视。MIT 的 Oxygen 项目中的智能房间、CMU 的 Aura^[7]、斯坦福大学的 Interactive Workspaces^[8]、欧盟的 Disappearing Computer^[9]等研究计划是其中的主要代表。在国内,清华大学人机交互与媒体集成研究所构建的智能化教室 Smart Classroom^[10]从人机交互和系统支撑软件的角度对普适计算的理论和实践进行了深入讨论,取得了良好的效果。中国科学院软件研究所在办公环境

收稿日期: 2005 - 08 - 31 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60033020; 60473100)

作者简介:陈文广(1964 -),男,北京人,博士研究生,主要研究方向:人机交互、信息系统;董士海(1939 -),男,浙江镇海人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机软件、图形学、人机交互等;岳玮宁(1980 -),男,北京人,博士研究生,主要研究方向:人机交互、CAD;谭继志(1976 -),男,北京人,博士研究生,主要研究方向:人机交互、图像处理;王衡(1960 -),女,江苏无锡人,副教授,博士,主要研究方向:人机交互、图像处理等。

中基于笔的自然交互方面进行了有益研究^[11],并已实现了产品化。北京大学则在改善手持移动设备交互方面进行了探索性的工作^[12,19~25]。

国际标准化组织 W3C 在 2002 年成立了多通道交互标准的制定小组^[13],其目的是将多个交互通道协同并发控制的机制引入到手持移动计算当中,为移动设备上的多通道交互提供国际标准。其中核心工作是制定多通道移动交互的框架结构^[14],它对移动多通道交互中最本质的组件和数据流进行了描述。W3C 的标准同时指出,这个描述只是在系统体系结构层面上的一种抽象,具体的实现需要在实际应用中灵活确定。在这样的背景下,我们设计和开发了一个基于手持移动设备的智能导游系统 TGH,并以它为实例,对多通道信息整合、上下文感知、显式交互和隐式交互相结合等问题展开研究。

2 手持移动计算中的多通道人机交互技术

2.1 多通道信息整合模型和交互框架^[19,20]

我们提出的手持移动计算环境中的多通道交互模型如图 1 所示。该交互模型对用户的语音、笔等输入处理过程如下:

系统首先对用户的多通道输入的信息进行识别,进而对每个通道的信息进行词法和语法分析,将来自不同设备的识别信息做统一化处理,通过把意义相同而形式不同的输入统一为相同的信息表示,从而向语法层提供与设备无关的信息。经过识别和词法分析后信息用原语的形式表达,它是信息流中的基本单位,具有不可再分性。模型中的语法分析构件任务是:按照交互中的语法规则,将这些原语分解为符合任务槽各个表项的形式,即任务动作、承受动作的对象以及对象的相应属性,从而为后续的语义整合做准备。在多通道信息整合构件中,经过了语法分析的输入信息,根据相应通道和设备的特点,按照某种特定的整合算法进行整合,其输出是带有明确、完整语义信息的系统命令。这些命令就是高层应用程序调用功能的依据。需要强调的是,经过整合的系统命令既可以反映单一通道的语义信息,也可以反映多个通道相互整合后形成的语义信息。即系统既允许用户通过多个通道的串行交替使用进行交互,也支持多个通道并发的协同控制。

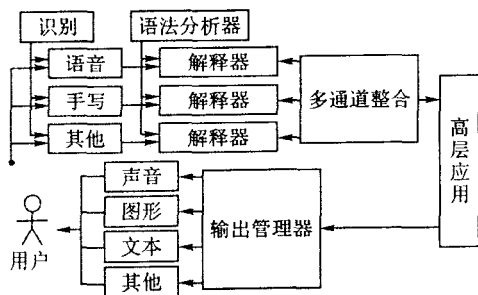


图 1 手持移动计算模式中的多通道交互模型

与桌面计算中的多通道交互相比,移动设备交互中多通道整合的一个重要特点是:各通道原语的形成和最终的整合可能是分布式进行的。以语音和手写的通道整合为例,由于语音的识别对存储和计算能力的要求较高,因此可以通过特定的服务器完成语音识别以减轻手持设备的计算负担,二者之间可通过无线媒介(如 GPRS, WLAN)通信。与此同时,手写输入可以在手持设备上同步地识别和分析,并与在服务器形成的语音原语进行整合。当两个或多个通道信息进行整合

时,可以根据识别、解释所需消耗的计算资源和时间等因素,确定选择在移动设备上、还是服务器上运行解释器与整合器,其基本原则是在手持设备的计算负担和网络通信开销之间进行权衡,以求得最佳的性能开销比。与用户的多通道输入相对应的是系统的多媒体输出反馈模式。高层应用程序执行相应操作后产生的输出数据被发送到输出管理器,输出管理器按照系统当前的工作模式,为各数据选择适当的承载媒体,如文本、图形、语音等。这些信息形成了最终用户所得到的视频、音频、语音或是文字等等。输出数据组织的主要依据有三个:第一是当前物理设备的属性,如屏幕大小、网络状况、电池电量等;第二是当前所处环境的因素,例如室内或室外、噪音情况、光线情况等;最后是通过机器学习所获得的用户主观偏好和习惯。例如,当在手机或掌上电脑上输出一段文字信息时,可能需要对字体、颜色、字数等进行不同的设置,这些功能都由输出管理器完成,它增强了系统的可移植性。

当考虑上下文参与下的多通道交互时,上述的多通道交互模型可扩充为图 2 所示。该框架的特点可概括为 Multimodal + Context sensitive。

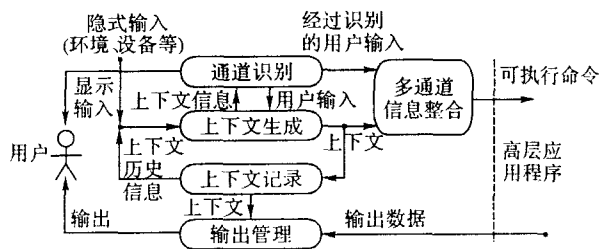


图 2 考虑上下文的交互框架: Multimodal + Context sensitive

上下文感知是提高计算智能性的重要途径,是普适计算的核心技术之一。所谓上下文是指计算系统运行环境中的一组状态或变量(其中包括环境因素和设备特征,如地理位置、温度、时间、光亮;还有用户的喜好、习惯、交互历史等)。上下文感知计算是指系统自动地对上下文、上下文变化以及上下文历史进行感知和应用,根据它调整自身的行为。在这个框架中,增加了上下文生成模块负责感知和生成上下文信息。上下文的来源主要包括 3 个方面:1) 用户主观以外的诸因素,包括自然环境因素和设备特征等;2) 经过识别的用户输入,它是用户意图和个性化因素最集中的体现,是用户上下文学习的主要依据;3) 上下文的历史记录,所有上下文形成后都被保存,从这些记录中往往可以提取规律性信息,挖掘出有意义的上下文。从交互模式的角度考虑,多通道属于显式交互的范畴,其目的是使用户“易交互”;上下文则属于隐式交互,其目的是让用户“少交互”。我们在信息整合阶段对两者进行无缝的融合。从广义的角度看,上下文也是一类特殊的交互通道,它是对用户主动输入信息的解释和补充。因此上述交互框架将上下文信息作为输入的一部分参与多元信息的整合,从而形成的系统命令既能体现用户的主观交互意图,又能充分考虑当时的客观因素。在整合过程中需要注意,用户主动输入的优先级应当高于上下文信息,即如果二者之间存在冲突,应主要按照用户输入的语义形成命令。该框架并不是一个具体的体系结构,而是对交互特征、关键构件和控制流程的一种抽象描述,如何实现可以根据具体需求而定。例如信息处理可以是分布式的,将某些耗费计算资源的操作(如

语音通道信息的识别)放在服务器上进行。

2.2 基于上下文感知的智能交互模型^[22]

上下文信息的产生和调度机制,可以由图 3 所示的模型表示。这是一个具有一定通用性的上下文感知方法。依照这个结构模型构建系统时,需要首先对系统进行自顶向下的分析,筛选归纳出对系统行为 and 用户使用产生影响的所有因素,将其作为系统中需要考虑的上下文信息。而后将每个上下文分解为若干语义成分,建立上下文知识库,并确定需要哪些传感器作为这些语义成分的载体。在这个过程中要注意避免传感器的功能重复。对于处理传感器数据的智能体,其具体功能根据传感器类型的不同各不相同。可以采用如下的策略:对于物理传感器,由于设备本身的驱动程序已经对数据进行了有效的一次有效的抽象,因此其对应的智能体只需负责将这些抽象后的数据分解,从中提取出上下文元素。而对于逻辑传感器而言,可以将原始数据的感知和上下文元素的提取,集成在一个智能体中完成。



图 3 上下文智能交互模型

经过了对原始数据的获取和处理后,系统中的上下文以上下文元素的形式存在。这些元素由一个专门负责上下文元素融合模块按照知识库中的信息进行融合,并形成上下文槽,调度模块用来控制其与高层通讯。系统设有专门的存储空间对上下文信息进行保存,这些上下文的历史记录结合用户同高层应用程序交互的反馈信息,构成了知识库进行学习和调整的依据。

此结构模型中需要强调:1)图中的每个上下文传感器都对应多个上下文元素,而实际上原始数据本身可能就是一个上下文元素,二者之间可能是一对一的关系。2)上下文存储器可以隶属于系统的运行空间,也可以由专门的服务器负责。对于移动计算环境而言,我们的建议是:手持设备保存一定时间段内的上下文历史,并将这些历史记录定期发送到服务器。这样可以充分发挥服务器的计算能力,从用户交互历史中挖掘出有意义的信息。3)图中的体系结构呈现严格的层次关系,但这种层次只是逻辑上严格的,实际上很多底层的传感器都是用于检测高层上下文的。例如,用于感知用户交互习惯的传感器,其监测对象就是高层应用本身,它通过用户与高层的交互过程所反馈的信息感知其使用习惯。

2.3 多通道汉字字符输入方法研究^[13]

字符输入是人机交互中最为常见和重要的环节之一。由于移动设备的物理尺寸等限制,传统的鼠标、键盘等交互设备无法在其上使用,笔成为了目前移动设备上最常用的交互工具。同时,语音在移动计算中的应用也受到了普遍的关注和重视,人们希望将这种最为自然的交互通道引入交互过程之中,建立基于语音的移动用户界面。我们所提出的多通道整合汉字输入方法也正是以笔和语音作为两个基本的信息输入

通道。

笔输入方式存在的最大问题是长期输入会造成用户疲劳。移动中的使用更给书写带来很大的困难。同时,汉字本身相对复杂的结构使得上述问题在中文输入过程中更为明显。

语音通道的问题首先在于识别率,同音字问题仍然是汉字语音输入中的一个难题。在众多的同音字中进行筛选。这种筛选降低了输入的速度,增加了用户负担,在移动计算的环境中该问题尤为突出。

为了结合笔和语音各自的交互优势,克服缺点,我们根据多通道交互的理论提出了一种同时利用语音和笔通道的输入方法:在按照笔顺输入的前提下,用户可以一边用笔输入汉字的笔画,一边将这个字的读音输入。系统将两个通道的输入信息进行同步识别和整合,从而在较短的时间内将欲输入汉字的候选集合缩小到一个较小的范围内,以此提高非连续汉字输入的速度。例如,当用户发音为“Zhang”,同音字众多,如果同时通过笔输入笔画“横”,则会将同时符合两个通道信息的字符“丈,杖”选出,若用户再输入笔画“竖”,则“杖”唯一确定。

我们将用户输入的笔画分为 5 类:横、竖、撇、点和其他,并将该方法的可行性问题等价描述为如下数学问题:

设 A 是任意一个同音汉字集合, $E = \{ \text{横, 竖, 撇, 点, 其他} \}$ 。对于一个给定的 $n(n \geq 1)$, 任意笔画序列 $M = m_1, m_2, \dots, m_n (m_i \in E, i = 1, 2, \dots, n)$, 令 $A(M, n) = \{ c \in A \mid c \text{ 的前 } n \text{ 笔顺序与 } M \text{ 中的顺序一致} \}$ 。是否可以在 n 较小的情况下使得 $|A(M, n)|$ 小于某个较小阈值。

通过对新华字典中 100 个最为常用的发音的 1 860 汉字的统计分析,得到所有 $|A(M, n)|$ 的平均值 $A(n)$ 的结果为: $A(1) = 5.52, A(2) = 4.21, A(3) = 2.48$, 说明一个同音字集合中前三笔相同的字符数平均约在 2 个左右,这样就能够很好的满足该方法中所提出的两方面要求,从而证明了该方法的可行性。

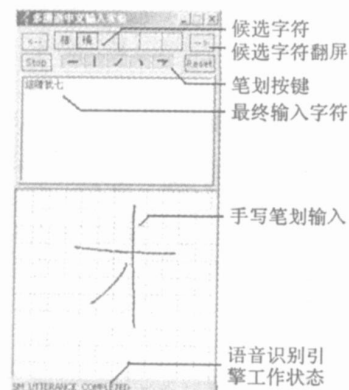


图 4 多通道汉字输入

我们开发、实现了本方法(见图 4),并且进行了用户的对比实验。实验中,对比了本文方法与三种单纯的笔或语音输入方法(在台式机上广泛使用的基于结构模式识别的手写输入;在手持移动设备上广泛使用的基于笔顺的手写输入和单字语音输入)的输入效率。从试验结果来看,本文方法在整体性能上优于其他三种输入方法,特别是与广泛使用在移动电话等移动设备上的基于笔顺的输入方法相比,对性能的提

高更为显著。

2.4 小屏幕信息呈现研究^[24,25]

小屏幕信息呈现的有限性和可读性差是移动计算交互的又一个重要问题。这个问题涉及 HTML、信息裁减、图形图像等多方面的技术,多通道交互技术在其中也发挥着重要的作用。

提高小屏幕浏览效率的方法大致可以分为两种:1)针对移动设备的屏幕尺寸对页面进行重新设计,以使两者相互适应;2)通过增加专门的代理服务器,对用户请求的网页进行动态重构,例如缩小图像、编写摘要等,使其信息量和组织形式符合小屏幕的特点和要求。页面重构方法对于结构清晰的简单页面非常有效,但面对各种不同类型的页面,很难单纯的通过 HTML 标记找到一个通用的重构算法。经过重构的网页不可避免地破坏了原本的布局、结构、色彩和组织形式等,而这些因素往往直接影响着用户对页面的整体感觉和把握。

为了克服页面重构方法的不足,美国 CMU 提出了使用缩略图进行小屏幕网络浏览的方法^[15],其问题在于:将整个页面转换为缩略图显示使页面上的内容变得过小,用户虽然获得了整体上的把握,却很难清晰地浏览其上的具体内容,因此必须不断交替地进行移动和缩放。特别是对于那些只有较少文字段落的简单网页而言,将它们转换为图像格式浏览反而可能降低阅读速度。我们采取的方法是:针对 Web 页面的不同类型将两者有机结合,取长补短以达到最佳的浏览效果。

我们首先将页面大致分为导航页面和内容页面两类。导航页面的特点是其本身往往没有实质性的内容,它们的作用是通过链接(Link)引导用户继续浏览;内容页面则恰恰相反,它们主要是针对某具体内容进行详细报道和介绍,页面元素往往是文字段落或图片。对于导航页面而言,如何帮助用户快速定位和查找其所需信息对提高浏览效率至关重要;而支持低负担的快速阅读则是提高内容页面浏览速度的关键。因此,可以通过缩略图保持导航页面的布局 and 结构,而利用页面重构突出显示内容页面上的文字信息。我们还注意到,内容页面的结构往往比导航页面简单的多,这进一步保证了该方案的可行性。

当用户通过移动设备发出了一个页面浏览请求后,系统服务器根据 URL 获取原始 Web 页面及其类型。页面的类型可以由用户在发出浏览请求时显式指明,也可以由服务器自动进行判断。而后,系统服务器将导航页面转换为缩略图,而对内容页面进行重构,并将处理的结果发回客户端显示。用户可以通过放大和缩小局部的方式浏览页面内容,也可以通过动态交互重构图像上的任意内容。在文本内容的浏览中,快速串行可视化表示(RSVP)^[16]和语音浏览是重要的辅助手段。RSVP通过若干行的文本滚动显示节省了交互空间,符合小屏幕交互的特点。用户可以通过笔画手势的方式完成对滚动方向、速度、行数以及字体等属性的控制。语音浏览则可以在用户“眼忙”的情况下提供更好的支持。

3 实例

为了验证上述交互模型的可用性,我们开发了智能导游系统 TGH (Tour Guide in Hand),见图 4。该系统采用

Microsoft Visual Embedded Tool 实现,运行于 Windows CE 兼容的移动设备上,具有无线网络通讯功能以及基于 GPS 的地理信息查询功能。



图 5 TGH 终端

3.1 多通道交互

TGH 允许用户通过语音、笔和软键盘三种交互工具与系统进行交互。其中笔既可以作为指点工具,也可以作为手写的介质和基于手势的交互。在 TGH 中,系统允许用户通过上述三种工具单独的、或是交替的控制所有系统行为,同时也允许用户通过它们之间的并发协作控制系统。为了说明 TGH 中的多通道交互模式,将本系统中的主要任务划分成了三个类型:1)简单操作:包括对界面元素的基本调整,如改变文字的字体、颜色、字型等,以及对地图界面的基本操作,例如平移、缩放、旋转等。2)定位:它又可以细分为三种类型。第一类是对特定对象和位置的查找(如用户想在地图上查找显示北京大学的位置);第二类是同类对象定位(如查找当前地图上所有的 ATM 取款机的位置);最后一类是有条件的同类对象定位(查找一个指定区域内的所有 ATM 取款机)。3)任意两点间路径搜索:任意两点间的最优路径、最短路径等。以查找到一个区域内的所有餐厅为例,用户可以通过笔在屏幕上指定一个区域,同时通过语音输入“餐厅”。在 TGH 中,我们采用基于任务制导的分层整合算法^[15]对这些信息进行整合并形成系统命令。举例,当用户意图查找当前位置到一个指定位置 A 的路线时,他可以通过语音输入“到这里”,同时通过笔指点目的地的位置。这时语音命令指明了任务的目的是查找路径,起点和终点是其两个参数;第一个参数是用户的当前位置,由 GPS 接受并经过解析的数据得到;第二个参数是目的地,由笔通道的指点操作得到。

为了测试多通道交互的结果,我们邀请 36 位北京大学本科生使用 TGH 在北京大学校园内游览,对交互效果进行评估测试。他们被分成若干组,分别按照传统的交互模式和多通道交互模式完成相同的若干任务。测试结果表明,多通道交互模式较之单纯的笔和语音具有更高的交互效率。试验中我们发现,用户往往习惯使用笔完成某些较为简单的交互任务;而使用语音或两者的结合完成复杂任务,从而再次证明了两者的互补作用。

3.2 上下文交互

采用我们前面提出的分层抽象模型,TGH 中实现了基于

位置、方向、网络状况、游览路线、用户阅读浏览习惯等上下文信息的交互。这些上下文信息与用户输入共同作用,对系统的行为和界面进行自适应性的调整。例如, TGH会记录用户查看文字信息的习惯,包括文字的大小、颜色、字体等,并在后续的交互中按照这种习惯调整界面。又如,传统的 GIS服务程序总是将正北作为地图的正方向,即无论用户向哪个方向运动,北方始终处于界面的上方。当用户向其它方向运动时,由于界面的方向表征与用户心理的方向表征之间出现了偏差,用户定位的速度和方向感会明显下降。在 TGH中,地图被划分为 4个自由度,地图方向随着用户的运动方向而改变,从而有效解决了这一问题。特别是在用户进行路线、位置查询时,该上下文和用户输入的结合能够有效的提高定位的速度和准确性。

4 结语^[17, 18, 21]

我们以普适计算中的人机交互作为研究对象,将软件技术与认知心理学理论结合起来,对多通道用户界面在移动计算模式中的应用进行了较为深入的研究,通过对移动计算中的关键应用、通用交互模型的理论研究、基于上下文感知的智能交互模型,以及若干主流应用下原型系统的开发和用户评估,我们可以得出如下结论:多通道用户界面和多通道交互模式对于提高移动计算应用中的人机交互效率具有重要的作用,它能够提高人机交互的自然性,是普适计算人机交互模式中的重要组成部分;上下文感知是实现普适计算环境下智能化人机交互的关键技术。以计算不可见为特征的普适计算是未来计算机技术的重要发展方向。它将以自然交互界面、上下文感知应用、自动捕捉、记录及分析用户生活经历等为其重要内容,在此过程中,多通道用户界面将发挥不可替代的重要作用。

参考文献:

- [1] YANG J, YANG WY, DENECKE M, *et al*. SMART SIGHT: A tourist assistant system [A]. In: Proc of the 3rd Int'l Symp. on Wearable Computers (ISWC'99) [C]. San Francisco, 1999. 73 - 78.
- [2] ALMEDA L, AMDAL I, BEIRES N, *et al*. The MUST guide to Paris[EB/OL]. In: ISCA Tutorial and Research Workshop, Multimodal Dialogue in Mobile Environments Kloster Irsee, 2002. http://www.isca-speech.org/archive/ids_02/ids2_004.html, 2002.
- [3] BUYUKKOKTEN O, GARCIA2MOLNA H. Power browser: Efficient web browsing for PDAs[A]. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'00) [C]. Hague, Netherlands, 2000. 430 - 437.
- [4] PARTIDGE K, CHATTERJEE S, SAZAWAL V, *et al*. Tilttype: Accelerometer supported text entry for very small devices[A]. In: Proceedings of the 15th ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'02) [C]. Paris, France, 2002. 201 - 204.
- [5] WOBROCK JO, FORLIZZI J, HUDSON SE, *et al*. WebThumb: Interaction techniques for small screen browsers[A]. In: Proceedings of the 15th ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'02) [C]. Paris, France, 2002. 205 - 208.
- [6] GUMBRETIÈRE F, WNOGRAD T. Flowmenu: Combining command, text, and data entry[A]. In: Proceedings of the 13th ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'00) [C]. San Diego, USA, 2000. 213 - 216.
- [7] GARLAND, SIEW DREK DP, SMA LAGICA, *et al*. Project Aura: Toward distraction free pervasive computing[J]. IEEE Pervasive Computing, 2002, 1(2): 22 - 31.
- [8] JOHANSON B, FOX A, WNOGRAD T, *et al*. The interactive workspaces project: Experiences with ubiquitous computing rooms [J]. IEEE Pervasive Computing, 2002, 1(2): 67 - 75.
- [9] SALZ P. The disappearing computer[J]. Time Europe, 2000, 155(8): 1 - 8.
- [10] SHI YC, XIE WK, XU GY, *et al*. The smart classroom: Merging technologies for seamless tele education[J]. IEEE Pervasive Computing, 2003, 2(2): 47 - 55.
- [11] LI Y, GUAN ZW, DAIGZ, *et al*. A context aware infrastructure for supporting applications with pen based interaction [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2003, 18(3): 343 - 353.
- [12] YUE WN, DONG AQ. Multimodal Chinese characters input for handhelds[A]. In: Proceedings of the 5th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction (APCHI2002) [C]. Beijing, 2002. 652 - 658.
- [13] W3C Multimodal Interaction Activity [EB/OL]. <http://www.w3.org/2002/mmi>, 2002.
- [14] W3C Multimodal Interaction Framework [EB/OL]. <http://www.w3.org/TR/mmi-framework>, 2002.
- [15] 曹建涛,董士海.任务制导的多通道分层整合模型及其算法.计算机研究与发展 [J], 2001, 38(8): 966 - 971.
- [16] POTTER MC. Rapid serial visual presentation (RSVP): A method for studying language processing [A]. New Methods in Reading Comprehension Research [C]. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1984. 91 - 118.
- [17] 董士海,王坚,戴国忠.人机交互和多通道用户界面 [M].北京:科学出版社,1999.
- [18] 王衡,董士海.人机交互 [M].北京:北京大学出版社出版,2004.
- [19] 王悦,岳玮宁,王衡,等.手持移动计算中的多通道交互 [J].软件学报,2005, 16(1): 29 - 36.
- [20] 岳玮宁,董士海,王悦,等.普适计算的人机交互框架模型 [J].计算机学报,2004, 27(12): 1657 - 1664.
- [21] 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.
- [22] 岳玮宁,王悦,汪国平,等.基于上下文感知的智能交互系统模型 [J].计算机辅助设计与图形学学报,2005, 17(1): 74 - 79.
- [23] WANG Y, PU JT, DONG SH. Research of context awareness in handheld & mobile computing[A]. The Proceeding of 5th Asia-Pacific Conference on Computer-Human Interaction (APCHI'02) [C]. Beijing China, 2002. 401 - 406.
- [24] 岳玮宁,王悦,谭继志,等.移动计算中的小屏幕网络浏览策略及其实现 [A].第十二届全国多媒体学术会议论文集 [C]. 贵州, 2003. 460 - 468.
- [25] YUE WN, CHEN WG, WANG H, *et al*. Principles and Practice of Improving Web Interaction on Small Screen Terminals[A]. The 11th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI'05) [C]. Las Vegas, US, 2005.