

# 手持移动计算中的多通道交互\*

王悦<sup>†</sup>, 岳玮宁, 王衡, 董士海

(北京大学 计算机科学技术系, 北京 100871)

## Multi-Modal Interaction in Handheld Mobile Computing

WANG Yue<sup>†</sup>, YUE Wei-Ning, WANG Heng, DONG Shi-Hai

(Department of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62751781, E-mail: wangyue@graphics.pku.edu.cn, <http://graphics.pku.edu.cn>

Received 2003-07-07; Accepted 2004-07-27

Wang Y, Yue WN, Wang H, Dong SH. Multi-Modal interaction in handheld mobile computing. *Journal of Software*, 2005,16(1):29-36. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/29.htm>

**Abstract:** Handheld mobile computing has increasingly become a mainstream computing paradigm, in which human-computer interaction is an essential issue. Multi-Modal user interface and multi-modal interaction can effectively improve the interaction efficiency in mobile computing. This paper presents a multi-modal interaction model and discusses the application of multi-modal interaction in handheld devices. Then the tour guide system is described. An experimental evaluation shows that the multi-modal interaction, based on pen and speech, can greatly improve its interaction.

**Key words:** mobile computing; multi-modal user interface; multi-modal interaction; speech; tour guide

**摘要:** 手持移动计算已逐渐成为当今主流的计算模式之一,人机交互是其中的关键问题.多通道用户界面和多通道交互方式能够有效地提高移动环境中人机交互的效率.讨论了移动环境中的多通道交互模型,并结合设计开发的移动导游系统 TGH(tour guide on hand),分析了多通道交互在手持移动计算中的应用.性能测试表明,笔和语音结合的多通道交互方式在移动环境中能够较好地提高人机交互效率.

**关键词:** 手持移动计算;多通道用户界面;多通道交互;语音;导游系统

中图法分类号: TP302 文献标识码: A

从 20 世纪 90 年代初至今,以手机、PDA 和掌上电脑为代表的手持移动设备得到了日益广泛的应用,手持移动计算已经逐渐成为当今的主流计算模式之一.随着移动设备自身软硬件性能的提高和网络覆盖率、带宽等外部条件的改善,人机交互的效率和自然性不高的问题暴露得越来越明显,也受到了越来越多学者和普通用户的关注.我们认为,人机交互的效率和自然性已经成为移动计算普及和应用中最为核心的问题之一.

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60033020 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA114170 (国家高技术研究发展计划(863))

**作者简介:** 王悦(1979 - ),女,黑龙江大庆人,硕士,主要研究领域为人机交互,计算机图形学;岳玮宁(1980 - ),男,博士生,主要研究领域为人机交互,模式识别;王衡(1960 - ),女,博士,副教授,主要研究领域为人机交互,图像处理;董士海(1939 - ),男,教授,博士生导师,主要研究领域计算机软件,人机交互,计算机图形学.

手持设备自身的物理特征决定了纯粹基于 WIMP 界面(即以窗口、图标、菜单和指点工具为基础的界面)的交互方式很难在移动计算环境中取得良好的效果.传统 GUI 界面的主要限制在于要求用户在交互过程中给出显式的精确命令,而且交互过程中的信息交换绝大多数都是通过用户的手和眼睛两个通道完成的.在桌面计算(desktop computing)中,这种交互模式的弊端已经限制了交互的自然性和效率,而在手持移动计算环境中,其影响将更加明显.首先是交互效率的下降.由于手持移动设备自身物理尺寸的限制,鼠标、键盘等最常用的交互工具无法使用,信息输入效率受到明显限制.与此同时,过小的屏幕给信息的反馈呈现和浏览造成了困难.与交互效率降低并存的是自然性的限制,用户采用指点方式在过小的屏幕上进行点击、选择等精确操作的过程严重增加了其认知负担,从而容易导致用户的急躁、厌烦心理.因此,提高移动系统人机交互的效率和自然性,是手持移动计算模式发展的瓶颈之一.

多通道(multi-modal,也称多模式)交互模式已被诸多研究证明是提高交互效率和自然性的有效途径<sup>[1]</sup>,比传统 GUI 界面适用于更多领域的应用程序以及更广泛的用户群<sup>[2]</sup>.它允许用户通过各种自然的交互手段,如语音、手写等,与计算机系统交互,从而克服了传统交互工具缺失引起的问题.同时,多通道交互能够有效地扩大信息交换的带宽,从而达到提高交互效率的目的;并可发挥人机之间彼此不同的认知潜力,降低用户的认知负荷.用户可以通过各种不同的交互通道以及它们之间的相互组合、协作来完成交互任务,这正好弥补了单一交互模式给用户带来的限制和负担.同时,移动设备所访问和处理的信息由各种不同的媒体承载,在这样一个混合媒体的环境中,系统需要多个通道来对应各种不同的信息类型<sup>[3]</sup>.如何将多通道的体系结构、模型算法与手持移动计算有机地结合起来,是本文研究的重点内容.

本文以我们设计开发的手持移动导游系统 TGH(tour guide on hand)为出发点和实例,分析并讨论了多通道用户界面和多通道交互模式在手持移动计算环境中的应用.

本文第 1 节提出一个手持移动环境中的多通道交互模型.第 2 节详细介绍按照这个模型实现的 TGH 系统中的多通道交互方式,而后着重分析了语音和笔在移动多通道交互中的作用,并给出了定量测试和定性评估的结果.最后,我们在总结已有工作的同时,对下一步的研究进行了展望.

## 1 相关研究

多通道交互作为未来人机交互中的一项核心技术在国内外受到了普遍的关注.自 20 世纪 90 年代以来,国内外的诸多研究已经将多通道模式初步引入了桌面计算的 GUI 交互模式中,并且成为对 WIMP 交互方式的重要补充和提高.对于多通道交互的研究是从各个侧面展开的,其中多通道界面的心理学基础问题<sup>[1]</sup>、软件体系结构<sup>[4,5]</sup>、多通道信息整合模型和算法<sup>[6,7]</sup>、网络多通道用户界面<sup>[8]</sup>以及多通道软件的实际应用<sup>[9]</sup>是其中的重点.这些研究为多通道用户界面和交互模式的进一步发展打下了良好的基础.

近年来,随着移动计算机技术的迅猛发展,多通道交互模式在这种新型计算模式中的应用受到了关注.Smart Sight<sup>[10]</sup>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<sup>[11]</sup>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.这些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,各种通道直接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,分布式的系统结构成为可能.为此,国际标准化组织 W3C 特别在 2002 年成立了多通道交互标准的制定小组<sup>[12]</sup>,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<sup>[13]</sup>,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,这个描述只是在高于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导航系统 TGH,并以它为实例,在 W3C 交互框架的基础上对多通道移动软件体系结构、分布式信息整合、并发控制等问题展开研究.

## 2 移动多通道交互模型

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.在这个交互系统模型的输入处理中,系统首先对用户通过语音、笔等通道输入的信息进行识别,并且对每个通道的信息进行词法和语法分析.它对来自不同设备的识别信息进行统一化处理,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的信息用原语(IP)的形式表达,它是信息流中的基本单位,具有不可再分性.而后,模型中的语法分析构件将这些原语按照交互中的语法规则分解为符合任务槽各个表项的形式,即任务动作 Q 承受动作的对象以及对象的相应属性,从而为后续的语义融合做准备.在多通道信息融合构件中,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.需要特别强调的是,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的信息相互融合后形成的语义信息.即,系统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.

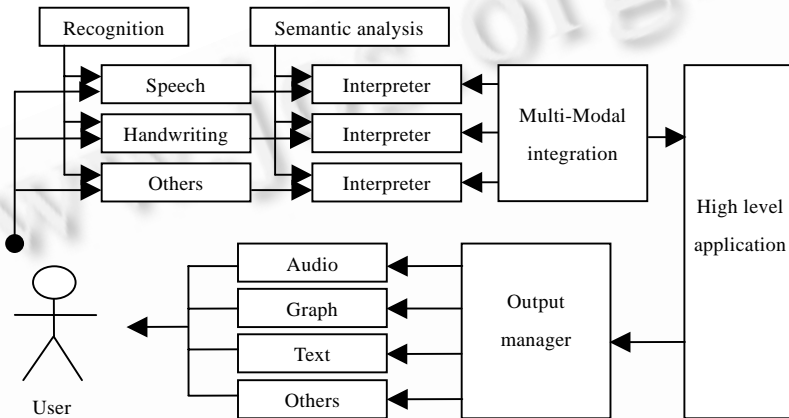


Fig.1 Multi-Modal interaction model in handheld mobile computing paradigm

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,二者之间通过无线媒介通信(如 GPRS, WLAN).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.推而广之,当两个或多个通道信息进行整合时,可以根据各个通道识别、解释所需消耗的计算资源和时间等因素确定解释器和整合器究竟隶属于移动设备还是服务器,其宗旨就是在手持设备的计算负担和网络通信开销之间进行权衡,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数据管理器.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 3 个:第 1 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 2 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获得的用户主观偏好和习惯.例如,对于一段待输出的文字信息,当显示在手机和掌上电脑上时,对于字体、颜色、字数可能需要不同的设置,这些功能都由输出管理器完成,它增强了系统的可移植性.

## 3 实例研究:TGH 中的多通道交互

根据以上提出的移动计算环境中的多通道交互模型,我们设计并实现了一个多通道导游系统 TGH,充分地

支持了基于语音和笔的多通道用户界面和交互方式.TGH 系统是使用 Microsoft Embedded Visual Tools 3.0 在康柏 iPAQ H3870 掌上电脑上开发实现的,可运行于所有与 Windows CE 3.0 操作系统兼容的掌上电脑之上(如图 2 所示).每个 TGH 终端都配有 GPS 卫星定位接收器,用户可以实时定位当前位置.同时装备有 802.11 无线网络卡,可以通过 WLAN 作为与服务器无线通信的媒介.



Fig.2 TGH end-system

图 2 TGH 终端系统

### 3.1 多通道交互模式

TGH 允许用户通过语音、笔和软键盘 3 种交互工具与系统进行交互.其中笔既可以作为指点工具,也可以作为手写输入的介质,还可以供用户进行基于手势的交互.在 TGH 中,系统允许用户通过上述 3 种工具单独地、或是交替地控制所有系统行为,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,我们将本系统中的主要任务划分成 3 种类型:(a) 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 GIS 操作,例如平移、缩放、旋转等.(b) 定位:它又可以细分为 3 种类型.第 1 类是对特定对象和位置的查找,例如用户想在地图上查找显示北京大学的位置;第 2 类是同类对象定位,例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,例如查找一个指定区域内的所有 ATM 取款机.(c) 任意两点间路径搜索:任意两点间的最优路径、最短路径等.表 1 是我们从每类中挑选若干有代表性的任务,并对用户执行这些任务时可选的交互方式进行介绍和分析.

Table 1 Representative cases of multi-modal interaction in the TGH

表 1 TGH 中多通道交互的典型实例

Types	Tasks	Manipulation modes
A	Zooming the map	1. Pointing button with pen 2. Speaking "Zoom in (or out) the map"
	Rotating the map left	1. Pointing button with pen 2. Speaking "Rotate 45 degree to left" 3. Sketching a arc on the map with pen
B	Looking for the location of A	1. Inputting the name of A by handwriting or typing 2. Selecting the name of A in list with pen 3. Speaking the name of A
	Looking for all the ATMs on map	1. Selecting "ATM" form a list 2. Speaking "ATM"
	Looking for all the ATMs in specific region	1. Speaking "ATM" and sketching a closed region on the map with pen
C	Looking for the way from current location to A	1. Selecting the name of A from a list and pointing a button 2. Speaking "The way to A" 3. Speaking "The way here" and pointing the location of A with pen
	Looking for the way from A to B	1. Selecting the name of A and B in list and pointing a button 2. Speaking "The way from A to B" 3. Speaking "The way from A here" and pointing the location of B with pen
		4. Speaking "The way between these two" 5. Sketching from A to B

### 3.2 基于语音和笔的多通道交互

从上面的任务交互分析中可以看出,语音是 TGH 多通道交互的一个基本通道,几乎所有的交互任务都可以通过语音完成.TGH 的交互可以概括为笔和语音结合、以语义为主的模式.这是因为,我们认为语音通道在移动导游导航中具有其他通道所不能替代的优势.

- 减少了对用户注意力的限制和交互负担.移动计算环境中用户的注意力更多地集中在所处环境的事物上,正如 David Garlan<sup>[14]</sup>所说的:计算机系统中最珍贵的资源已不是处理器、内存、硬盘或网络,而是用户注意力.语音交互方式是一种最为直接、自然的方式,符合人们日常生活习惯,能够有效地减少用户在交互过程中注意力的分散.

- 语音适合各类用户群(除聋哑人以外),尤其是儿童、老人、行动不方便的人或盲人使用.
- 辅助完成一些单独用笔很难完成的任务.例如,查找指定区域内的同类对象.
- 语音输入无须占用用户的手、眼等交互通道,适合在移动计算环境中的使用.同时,它不需要任何附加的硬件装置,也符合手持移动设备的特点.

当然,语音通道也具有其自身的弱点,例如目前语音识别技术还不是十分成熟,交流速度较慢,不易记录和修改编辑以及个人隐私等等.我们期望通过与笔的结合来解决这些问题,笔也是一个具有极高自然性的交互通道,它既可以作为手写输入的载体,也可以在 WIMP 界面中充当重要的指点设备.正是由于手写输入的自然高效,以及 WIMP 界面存在的长期性,决定了笔在相当长的时间内还将是移动计算中的主要交互工具.更重要的是,研究表明,笔和语音具有极强的多维互补性<sup>[15]</sup>,它们的结合使用能够极大地提高交互界面的易学性和灵活性,从而使用户可以根据环境和设备的特点灵活地选择最合适的交互方式.基于语音和笔的多通道界面能够有效改善交互质量,是手持移动计算用户界面发展方向.

### 3.3 多通道交互评测

我们邀请 12 名北京大学在校学生对 TGH 的多通道交互进行了定量性能测试与主观评估.他们都有较长时间使用计算机的经历,但都没有使用过基于手持移动设备的导游导航系统.

#### 3.3.1 定量性能测试

参加定量性能实验的每个被试要求完成表 2 所示的 10 个任务.

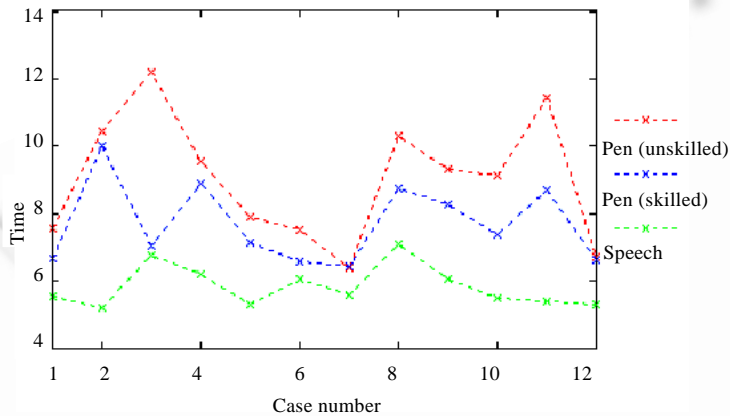
**Table 2** Experimental tasks in performance study  
表 2 性能测试中的实验任务

Number	Tasks
01	Zoom in, zoom out and move the map
02	Display all the dinning halls on the map
03	Look for the location of Stone Fish and display it on the map
04	Look for the location of BoYa Tower and display it on the map
05	Look for the nearest ATM to the user
06	Look for the nearest classroom building to the Library
07	Look for the optimized route from West Gate to Library
08	Look for the optimized route from South Gate to BoYa Tower
09	Look for the optimized route from current location to the Main Building
10	Look for the optimized route from current location to the post office

实验过程中我们发现,对于 B 类和 C 类任务(合成为复杂任务),一旦用户熟悉菜单操作,其交互时间会大大降低.但这种熟悉是建立在用户记住所查找景点在菜单项中的位置的基础上的.而在真实旅游中,一个用户不会多次询问同一个景点的信息,也就是说以上提到的用户熟悉带来的交互时间的降低是很少的.而语音命令的交互效率取决于用户说话的速度以及网络速度.对于复杂命令,在网络速度恒定(网络带宽 10Mbps)的情况下(如果用户所处环境中没有无线网环境,则只能采用笔交互),测得语音操作平均交互时间为 5.82s.而用笔交互的速度很大程度上取决于用户的熟练程度.同样,对于复杂命令,实验中测得笔交互的平均时间是 8.37s,最短的用户交互时间是 6.39s,仍然大于语音的平均时间.表 3 和图 3 给出了参加实验同学分别采用笔和语音两种方式完成复杂命令的时间.

**Table 3** Execution time of complex tasks with different interaction modes**表 3** 不同交互方式下完成复杂任务时间

	Speech (s)	Pen (unskilled) (s)	Pen (skilled) (s)
User 1	5.51	7.57	6.65
User 2	5.20	10.44	10.02
User 3	6.74	12.17	8.04
User 4	6.19	9.56	8.90
User 5	5.29	7.91	7.13
User 6	6.03	7.50	6.57
User 7	5.58	6.39	6.45
User 8	7.10	10.30	9.76
User 9	6.04	9.33	8.26
User 10	5.47	9.12	7.35
User 11	5.41	11.42	8.70
User 12	5.31	6.69	6.61
Average	5.82		8.37

**Fig.3** Comparison of complex tasks' execution time**图 3** 复杂任务执行时间对比

实验中所设置的起始点和目的地个数分别是 2 和 3 个。我们发现在笔式交互中,随着景点数目的增加,从景点列表(也就是菜单项)中查到想要的景点的时间也随之增加,这样会增加用户从选项中查找特定景点的时间,并可能使用户产生厌烦感。并且随着列表中景点数目的增加,即使用户熟练掌握了笔交互方式,其交互时间的缩短程度也不如上表中明显。参加实验的均是在校大学生,比较熟悉计算机中的菜单操作。对于一些没有接触过计算机的用户,笔交互的效率会更低。

对于 A 类任务:由于简单任务大多数情况下不需要输入参数,且系统界面上提供了按钮,用户只要按下按钮即可完成。此时,用笔操作的平均执行时间小于 1s,明显比语音操作效率高。

由以上的比较我们发现:对于简单任务,采用单一笔通道来完成效率很高;而对于复杂任务采用语音通道完成会得到较高的交互效率。笔和语音在任务完成效率方面基本是互补的,所以,提供多种交互方式的系统交互效率明显高于只提供单一通道的系统的交互效率。具体数据见表 4,这里我们假设用户执行简单任务和复杂任务的次数相同;同时假设在多通道环境下用户采用笔完成简单任务,采用语音完成复杂任务。

**Table 4** Execution time of single modality and multi-modal interaction**表 4** 单通道与多通道完成任务时间比较

	Pen modality	Speech modality	Multi-Modality
Average completion time of simple tasks (s)	0.3	5.50	0.3
Average completion time of complex tasks (s)	8.37	5.82	5.82
Average completion time (s)	4.36	5.66	3.06

### 3.3.2 用户主观评估

正如以上指出的,简单命令可以通过直接单击界面上的按钮完成,对于其中 88%的命令,用户选择笔输入;另外 12%的命令,用户出于新鲜而选择语音输入.对于复杂命令,其中 60%的命令用户选择语音通道或笔和语音结合的多通道输入,如图 4 所示.在对用户的问卷调查中发现,多数用户倾向于多通道的输入方式,他们认为多通道用户界面具有较好的自然性、易学性以及新鲜感;少数用户仍选择笔作为导游系统唯一的输入方式.根据以上数据,我们不难得出导游系统中多通道用户界面是十分必要的.

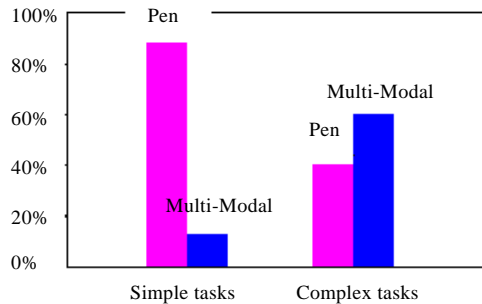


Fig.4 User's trend on interaction mode

图 4 用户对交互方式的倾向

## 4 结 语

本文重点讨论了移动计算环境中的多通道交互模型,并结合 TGH 分析了多通道交互在手持移动计算中的应用.对系统进行的性能测试表明,笔和语音结合的多通道交互方式在移动环境中,特别是移动导游系统中,较好地提高了系统的交互效率.同时,多通道交互的使用增进了系统的适用性和易用性.下一步,我们会在本文提出的多通道交互模型中整合除语音和笔以外的更多通道,如计算机视觉.我们相信在不久的将来,多通道用户界面必将成为移动计算环境中的主流交互方式.

致谢 在此,我们对北京大学计算机科学技术系的陈文广博士在 TGH 设计开发过程中给予的支持表示衷心感谢.感谢中国科学院软件研究所戴国忠研究员对本研究提出的意见.

### References:

- [1] Dong SH, Wang J, Dai GZ. Human-Computer Interaction and Multimodal User Interface. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese).
- [2] Oviatt, S, Cohen P, Wu LZ, Vergo J, Duncan L, Suhm B, Bers J, Holzman T, Winograd T, Landay J, Larson J, Ferro D. Designing the user interface for multi-modal speech and gesture applications: State-of-the-Art systems and research directions for 2000 and beyond. In: Carroll J, ed. Human-Computer Interaction in the New Millennium. Boston: Addison-Wesley, 2000. 263-332.
- [3] Sawhney N, Schmandt C. Nomadic radio: Speech and audio interaction for contextual messaging in nomadic environments. ACM Trans. on Computer-Human Interaction, 2000,7(3):353-383.
- [4] Li MZ, Dai GZ, Dong SH. Software model and interaction algorithm of multimodal interface. Chinese Journal of Computers, 1998,21(2):111-118 (in Chinese with English abstract).
- [5] Li Y, Guan ZW, Dai GZ, Ren XS, Han Y. A context-aware infrastructure for supporting applications with pen-based interaction. Journal of Computer Science and Technology, 2003,18(3):343-353 (in Chinese with English abstract).
- [6] Lin YM, Dong SH. The realization of algorithm and software platform of multimodal fusion. Chinese Journal of Computers, 2000,23(1):90-94 (in Chinese with English abstract).

- [7] Pu JT, Dong SH. A task-oriented and hierarchical multimodal integration model and its corresponding algorithm. *Journal of Computer Research and Development*, 2001,38(8):966-971 (in Chinese with English abstract).
- [8] Dong SH, Xiao B, Wang GP. Multi-Modal user interface for Internet. *Chinese Journal of Computers*, 2000,23(12):1270-1275 (in Chinese with English abstract).
- [9] Li J, Tian F, Wang WX, Dai GZ. A multi-modal interaction system for children. *Journal of Software*, 2002,13(9):1846-1851 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1846.pdf>
- [10] Yang J, Yang WY, Denecke M, Waibel A. SMART SIGHT: A tourist assistant system. In: *Proc. of the 3rd Int'l Symp. on Wearable Computers (ISWC'99)*. San Francisco, 1999. 73-78.
- [11] Almeida L, Amdal I, Beires N, Boualem M, Boves L, den Os E, Filoche P, Gomes R, Knudsen JE, Kvale K, Rugelbak J, Tallec C, Warakagoda N. The MUST guide to Paris. In: *ISCA Tutorial and Research Workshop, Multi-Modal Dialogue in Mobile Environments*. Kloster Irsee, 2002. [http://www.isca-speech.org/archive/ids\\_02/ids2\\_004.html](http://www.isca-speech.org/archive/ids_02/ids2_004.html)
- [12] W3C Multimodal Interaction Activity. 2002. <http://www.w3.org/2002/mmi>
- [13] W3C Multimodal Interaction Framework. 2002. <http://www.w3.org/TR/mmi-framework>
- [14] Garlan D, Siewiorek D, Smailagic A, Steenkiste P. Project Aura: Towards distraction-free pervasive computing. *IEEE Pervasive Computing*, 2002,1(2):22-31.
- [15] Oviatt SL. Multi-Modal interface research: A science without borders. In: *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Spoken Language Processing*. Beijing: Science Press, 2000. 1-6.

#### 附中文参考文献:

- [1] 董士海,王坚,戴国忠.人机交互和多通道用户界面.北京:科学出版社,1999.
- [4] 李茂贞,戴国忠,董士海.多通道界面软件结构模型及整合算法.计算机学报,1998,21(2):111-118.
- [6] 林应明,董士海.多通道融合算法和软件平台的实现.计算机学报,2000,23(1):90-94.
- [7] 普建涛,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,2001,38(8):966-971.
- [8] 董士海,肖斌,汪国平.基于 Internet 的多通道用户界面.计算机学报,2000,23(12):1270-1275.
- [9] 李杰,田丰,王维信,戴国忠.面向儿童的多通道交互系统.软件学报,2002,13(9):1846-1851. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1846.pdf>