

# 普适计算

徐光祐 史元春 谢伟凯

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

(清华大学智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)

**摘 要** 计算技术的发展需要与之适应的计算模式. 计算技术在桌面计算模式下经历的 20 年的飞速发展正蕴育着一种革新性的计算模式——普适计算. 普适计算是信息空间与物理空间的融合, 在这个融合的空间中人们可以随时随地和透明地获得数字化的服务; 计算机本身将从人们的视线中消失, 人们注意力的中心可以回归到要完成的任务本身. 普适计算将从根本上改变人们对什么是计算的思考, 也改变我们整个生活和工作的方式. 该文综述了普适计算研究的现状和发展趋势, 并讨论了普适计算的两个关键研究内容——觉察上下文的计算和普适计算系统软件, 最后简要介绍作者在智能空间领域的研究成果.

**关键词** 计算模式; 普适计算; 觉察上下文计算; 智能空间

**中图法分类号** TP391

## Pervasive/Ubiquitous Computing

XU Guang-You SHI Yuan-Chun XIE Wei-Kai

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

(State Key Laboratory of Intelligence Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** To promote the development of computer technology it is essential to adopt a homologous computing paradigm. Now it is an urgent need to explore the new computing paradigm homologous with the current development trend of computer technology which is characterized by the more and more close integration with communication and digital media technology and embedded to the living space. That is the ubiquitous or pervasive computing. The main idea of pervasive computing is to embed computer into the living environment or tool of human, so as to make the computer invisible from users' sight and the users can focus on their task itself, instead of the computer. Pervasive computing embodying the integration of computer, communication and digital media technology makes it possible to integrate the physical world we are living in and the virtual world in the information space together as the whole. That, as the result, will makes a profound influence on our thinking on information and our working and lives style as well. This paper surveys the development of pervasive computing including the current stage, research content and development trend. Authors' preliminarily research results are also introduced.

**Keywords** computing paradigm; pervasive/ubiquitous computing; contex-aware computing; smart space

## 1 引 言

### 1.1 新世纪需要的新计算模式

计算技术的健康发展需要有与之相适应的计算

模式 (computing paradigm). 计算模式在 20 世纪的 80 年代经历了从主机计算 (mainframe computing) 到桌面计算 (desktop computing) 的革新, 这使计算机从实验室的“象牙塔”进入了普通的办公室和家庭, 极大地推动了计算机技术和产业的发展. 那么近

20 年来计算技术的飞速发展,是否蕴育了新的计算模式呢?

为此,我们首先需要分析当前计算机技术发展的特点:

(1) 计算、通信和数字媒体技术的互相渗透和结合,其集中的体现就是互联网的发展.互联网已成为人们在工作、生活、娱乐和学习中获取信息、进行交互的主要途径.

(2) 计算机在计算能力和存储容量提高的同时体积也越来越小,其发展趋势是把计算能力嵌入到各种设备中去,而且这些设备可联网使用.

与这样的发展形成鲜明对照的是传统的计算模式以及与此相应的计算机使用方式:

(1) 以计算机为中心的计算:(a)计算机的使用方法不符合人类的习惯;(b)为了完成一项任务,需要与计算机进行的对话过于烦琐(如需要手工配置计算机的软、硬件环境和把计算任务映射到应用程序中去).这使得计算机本身吸引了太多注意力,而不是需要解决的问题本身.

(2) 基于桌面的使用模式:(a)用户要使用计算机,就需要端坐在计算机面前;而人是生活在一个相对自由的三维空间中的.因此计算机并没有与人们的生活环境融合在一起<sup>[1]</sup>;(b)桌面计算从本质上说是一种私有的模式,难以适应一个用户可能在不同地点和环境,甚至在移动过程中使用多台计算设备进行工作的情况.

限于上述这样的计算模式,计算机还只是一种不太好用的工具,无法真正融入人们的工作和生活,更谈不上成为如空气、水、电这样的生活必需品.这是当前计算机产业和应用领域进一步发展的主要障碍.因此,计算机技术进一步发展迫切地需要全新的计算模式,这就是普适计算(pervasive(或 ubiquitous)computing).

## 1.2 普适计算的定义

普适计算的思想最早是 1991 年 Mark Weiser 在《Scientific American》的“The Computer for the 21st Century”<sup>[2]</sup>中提出的,强调把计算机嵌入到环境或日常工具中去,让计算机本身从人们的视线中消失,让人们注意的中心回归到要完成的任务本身.他的思想在 90 年代后期开始在国际上得到广泛关注和接受,许多相关的研究计划纷纷启动,目前已经成为一个极具活力和影响力的研究领域.其重要标志是分别从 1999 年和 2000 年开始的 Ubicomp 国际会议和 Pervasive Computing 国际会议、2002 年 IEEE Pervasive Computing 期刊的创刊.关于普适

计算准确的定义,不同的研究者有不同的理解,其目标都是“要建立一个充满计算和通信能力的环境,同时使这个环境与人们逐渐地融合在一起”<sup>[2]</sup>.我们给出的定义是:“普适计算是信息空间与物理空间的融合,在这个融合的空间中人们可以随时随地、透明地获得数字化的服务.”

其中“随时随地”是指人们可以在工作、生活的现场就可以获得服务,而不需离开这个现场而去端坐在一个专门的计算机面前;这也是普适计算的英文中 Ubiquitous 或 Pervasive 的含义,即像空气一样无所不在.MIT 的普适计算研究计划命名为 Oxygen 的原因也在此<sup>[3]</sup>.而“透明”是指获得这种服务时不需要花费很多注意力,即这种服务的访问方式是十分自然的甚至是用户本身注意不到的,即所谓蕴涵式的交互(implicit interaction).相对“随时随地”的特性,“透明”是普适计算更本质的要求,是其与桌面计算模式最本质的区别.否则,如果仅仅要求“随时随地”性,一人一台无线联网的笔记本或许就可以了,但这显然不是普适计算.Weiser 在文献[2]中这样描述“透明”的本质性:“最具有深远意义的是那些从人们注意力中消失的技术.这些技术已经渗透到人们的日常生活中以致与生活难以区分”.人们在写字时,笔和纸本身不会分散我们的注意力,因此对于我们的注意力是透明的;又如雕刻家创作时,手中的雕刀于其注意力是透明的.Weiser 以此来比拟普适计算所希望的服务访问过程或手段的透明性.与此相似的有 Don Norman 的“Invisible Computer”<sup>[4]</sup>、CMU 的 Aura 计划<sup>[5]</sup>和欧盟的“Disappearing Computer”研究计划<sup>[6]</sup>,它们都表达了同样的思想.MIT 命名 Oxygen 计划的另一层含义也是想让计算成为像氧气一样看不见又必不可少的东西.

在文章的第 2 节我们将从如何实现信息空间与物理空间融合的角度,分析普适计算研究所面临的技术挑战.其后的几节将进一步阐述普适计算的若干关键技术,然后给出我们目前的研究进展,最后是一个小结.

## 2 如何实现普适计算

### 2.1 信息空间和物理空间的融合

普适计算的定义表明了实现普适计算“随时随地”性和“透明”性的方法是使信息空间和物理空间融合为一体.我们把信息空间(cyberspace)定义为存在于计算机和网络中的数字化的信息、服务、计算和通信构成的总体.我们认为信息空间和物理空间

的融合有两层含义:绑定(binding)和自发的交互(spontaneous interaction).

### 2.1.1 绑 定

绑定是指信息空间中的对象与物理空间中的物体建立相互的对应,使这个物体成为访问信息空间中服务的直接入口.这种绑定可以通过两种途径实现:

(1) 直接在物体上(内)嵌入一定的感知、计算、通信能力,使其同时具有物理空间和信息空间中的用途.例如, MERL 实验室研究的 Interactive Table 中一张桌子可以显示影集和具有交互能力<sup>[7]</sup>;在我们研究的 Smart Classroom 中,一个物理的教室同时又是一个基于网络的虚拟远程教室的访问入口<sup>[8]</sup>; MIT Media Lab 的 Things That Think 项目也是基于同样的考虑<sup>[9]</sup>.

(2) 为每个物体添加可以被计算机自动识别的标签,标签可以是基于条码、红外和 RFID 的.例如, HP 的 Cool Town 计划就是通过在所有物理世界中的物体(如地理位置和货架上的商品)上附着一个编码有 URL 信息的条形码来建立物体与其 Web 上的表示之间的对应,从而建立一个数字化的城市<sup>[10]</sup>.

### 2.1.2 自发的交互

自发的交互是指物理空间和信息空间之间无需人的干预的交互,即其中任一个空间状态的改变可以引起另一个空间的状态的相应改变.从两个相对的方向来看:

(1) 信息空间的状态改变映射到物理空间中,其最主要的形式是数字化的信息可以无缝地叠加在物理空间中/上.一个很好的例子就是已经广泛采用的各种电器上的显示屏,它可以直观地反映出信息空间中的状态. E-Ink 公司正在研究的电子纸<sup>[11]</sup>和 IBM 研究院的 Everywhere Display<sup>[12]</sup>就是要开发出可以到处使用的轻便显示设备.在这层意义增强现实(augmented reality)的研究与此目的是一致的,但倾向于通过把信息显示在半透的眼镜显示器上来实现.同时 MEMS 技术的发展已经可以把操作器(actuator)直接集成到芯片上,从而为信息空间到物理空间的状态映射形式提供了一种新的可能,即直接改变物理世界中的某些物理参数.

(2) 信息空间也可以自动地觉察物理空间中状态的改变,从而改变相应对象的状态或触发某些事件.这种特性称为觉察上下文的计算(context-aware computing),是普适计算的重要特征.位置、身份、时间是目前研究的最多的几种上下文信息,利用物理空间中的这些上下文信息可以设计出许多十分有用和方便的应用.比如,你的手持设备可以在你抵达一

个场所时,自动获得有关这个物理环境中可以利用的各种服务和设备的信息.再比如, Weiser 认为未来的计算设备将像纸张一样公用化.当一个用户拿起一个公用设备时,它可以自动识别用户身份并进行相应的个性化设置,这一设想已经在 MIT 的 Oxygen 计划中得到部分实现.人也是物理空间中的一份子,所以物理空间到信息空间的自动映射也包括信息空间对人的行为甚至表情的自动理解,在这种理解的基础上进一步提供主动的伺候式的服务则称为主动的计算(proactive computing)<sup>[13]</sup>或者蕴涵式的人机交互<sup>[14]</sup>.与此相对,目前的人机交互多为显式的(explicit).觉察上下文计算和蕴涵式人机交互的研究根据实现途径的不同可以分为两类:通过传感器和通过多模态感知接口.前者如欧盟的 TEA (Technology for Embedded Awareness) 计划就是通过在日常器具如咖啡杯、家具、手机等中嵌入传感器来实现对物理空间的上下文的感知<sup>[15]</sup>;而后者如我们的 Smart Classroom 中则用视觉跟踪、姿态识别等方法来判断目前教室中的上下文.

在桌面计算模式下,信息空间和物理空间是隔离的.表现为:(a) 绑定是稀疏的,唯一的绑定点就是计算机本身;(b) 它们之间的交互是由人驱动的,即人先察觉物理空间的改变然后用一定的方式输入到信息空间.可以说这种隔离正是桌面计算模式各种不足的根源.而普适计算模式下这种绑定和自发交互将变得无所不在,从空间中的物体、用品、家具、房间以至整个空间本身,信息世界和物理世界的界限将变得模糊,正是这种界限的消失提供了人们可以随时随地透明地访问到数字化服务的可能. Ishii 形象地将这种融合称为 Tangible Bits<sup>[16]</sup>——即信息空间中的基本单位比特将像物理世界中的基本单位原子一样是看的见摸的着的.

## 2.2 全面的技术挑战

追求普适计算理想的一个最为典型的研究计划就是文中多次提到的 MIT 的 Oxygen 计划,目标是“使丰富的计算和通信能力像空气一样无所不在和自由地融入人们的生活之中”,因此,普适计算应具有以下特性:

(1) 无所不在的(pervasive):用户可以随地以各种接入手段进入同一信息世界;

(2) 嵌入的(embedded):计算和通信能力存在于我们生活的世界中,用户能够感觉到它和作用于它;

(3) 游牧的(nomadic):用户和计算均可按需自由移动;

(4) 自适应的(adaptable):计算和通信服务可按

用户需要和运行条件提供充分的灵活性和自主性;

(5) 永恒的(eternal): 系统在开启以后再也不会死机或需要重起; 部件可以因需要、出错或升级来去, 但整个系统则永远可用。

由此我们可以看出, 普适计算的本质就是力图真正全面实现计算技术的“以人为本”, 它对计算机科学的各个层次的研究都提出了新的要求和技术挑战:

(1) 在硬件或接入层次上, 需要研究和开发出新的嵌入环境的和便于携带的计算设备、传感设备和显示设备;

(2) 在网络层次上, 当具有计算、感知能力的物体变得无所不在时, 这些物体间的互联通过有线网络进行显然是不可取的, 所以无线网络将成为普适计算的重要基础设施, 而网格(grid)则可能构成普适计算的网络和计算资源的平台;

(3) 在系统软件(infrastructure)层次上, 各种异质的具有计算、传感能力的物体间的交互的需求对系统软件提出了前所未有的挑战, 需要解决如何使它们实现数据的交互、任务的协作; 在传感设备无所不在时如何保护用户的隐私等等一系列问题;

(4) 在人机交互层次上, 普适计算要求交互方式从困难烦琐的显式交互转变为透明的蕴涵式交互, 这就需要研究新的交互模式(metaphor)和感知接口。

由于各研究团队背景和研究侧重点的不同, 围绕上述普适计算在一个或者多个层次上的需求和特点, 目前已经在普适计算的大帽子下形成了许多相对自完备的研究领域, 比如智能空间(smart space)、可穿戴计算(wearable computing)、觉察上下文计算(context-aware computing)、游牧计算(nomadic computing)等等。本文将对其中相对成熟和完整的三个研究领域: 觉察上下文计算、普适计算系统软件和智能空间分别进行综述。这三个领域并不是严格按照一个统一角度对普适计算的研究内容进行划分的。觉察上下文计算可以认为是从支持主动觉察和应用上下文的目标出发, 从一种纵向的角度来研究普适计算, 牵涉到从硬件到交互和应用的各个层次; 普适计算的系统软件则是从横向的角度来研究普适计算的软件基础设施, 集中于系统软件层次; 智能空间则可以认为是一种普适计算的一种体现或者是一种应用方式, 可以认为是从一种纵向剖面的角度来研究普适计算, 将包含各个层次的问题, 因此这三者的研究是互相交叉和互相支持的, 比如觉察上下文计算的研究牵涉到如何在普适系统软件中提供相应的支持; 觉察上下文计算和系统软件的典型问题将在智能空间中得到充分体现, 同时它们也是智能空

间系统的一个组成部分。

### 3 觉察上下文的计算 (Context-Aware Computing)

普适计算把计算和信息融入到物理世界, 这不仅是使计算机无所不在, 由于人与信息以及计算能力将保持不间断的接触, 它还提供了一种新的交互方式的可能, 这就是前面提到的蕴涵的交互方式, 这时需要系统能觉察在当时的情景中与交互的任务有关的上下文, 并据此做出决策和自动地提供相应的服务。虽然在桌面计算中已开始利用上下文信息, 但与桌面计算模式下上下文是固定或人为设定的情况不同, 在普适计算模式下上下文将随任务而变化, 而且由于工作环境是现场, 其中的背景情况不但复杂而且是动态变化的, 使上下文的动态性问题更加突出。上下文在交互中的重要性表现为

(1) 同样的输入, 不同的上下文可能具有不同的语义。

(2) 鉴于在人与人的交谈中应用蕴含的状态信息(即上下文)可提高交互的效率, 充分觉察环境中的上下文是实现普适计算系统尽量少分散用户注意力这一目标的重要途径<sup>[17]</sup>。例如, 文献[18]中描述的在野外跟踪长颈鹿时, 可以自动记录, 发现长颈鹿位置的一种应用, 科学家可以集中精力去观察和记录, 而不是去查看 GPS 的读数。

(3) 在普适计算的情况下, 物理上的接口不是个人专有的, 而是由多人共享, 因此在交互过程中, 为实现接口和服务的个性化也需要上下文信息。

由此可见觉察上下文计算在人机交互中的重要性。有人认为觉察上下文计算概念的引入将需要对现有的人机交互理论做全面的重新考虑<sup>[19]</sup>。

觉察上下文计算具有广泛的应用领域, 其中包括: 对用户主动启动(proactive triggering)的服务, 即利用用户当前的上下文来启动有关的操作和显示有关的信息; 流水线式交互(streaming interaction)。人们可利用交谈时蕴含的状态信息, 也即利用上下文信息来提高交谈的效率<sup>[20]</sup>; 以往事件的记忆; 优化行为的模式; 共享经验等。

#### 3.1 觉察上下文计算的基本概念

从普适计算的角度来看, 上下文是指任何可用于表征实体状态的信息。这里的实体可以是个人、位置、物理的或信息空间中的对象。觉察上下文计算是指每当用户需要时利用上下文向用户提供适合于当时任务、地点、时间和人物的信息或服务。觉察上下

文应用是指其行为(在某种程度上)是由用户的上下文所决定的应用.例如,如果系统知道用户所携带的移动电话的位置和音乐会的时刻表,那么在音乐会的过程中系统就把移动电话设置在振动方式.再如 GPS 提供的位置信息在农业、建筑、军事和“p-commerce”(基于用户位置的商务)方面的应用.

觉察上下文计算的重要性已为越来越多的研究者所认识. HP 公司的年度报告中认为觉察上下文应用是公司未来的关键技术,因为应用上下文是解决信息超载最有希望的途径.觉察上下文本质上是一种协助其他应用提高性能的支持工具.

在实际的应用中为了方便,可把上下文的种类归纳为

(1) 计算上下文.如网络的连接情况、通信成本、通信的带宽和附近的资源(如打印机、显示器和工作站等);

(2) 用户的上下文.用户的特性、位置、时间,附近的人员、当前的人际关系;

(3) 物理的上下文.如光照、噪声程度、交通条件和温度等;

(4) 上下文的历史.

觉察上下文计算中的关键技术包括上下文的获取技术、上下文的模型、支持觉察上下文计算的软件结构等.

### 3.2 当前上下文的获取

当前的上下文信息可从以下几种方式或来源获取:从各种传感器;从已有的信息,其中包括日期、日程表、天气预报等;从用户和任务模块获取;通过计算设备间的交互;由用户直接设定等.

上下文有不同的层次:低层的和高层的.从传感器直接得到的上下文通常是低层的.例如,“门是否是开的”、“椅子上是否有人”,这些信息可由相应的传感器获得.一般来说,人们对高层的上下文更为感兴趣.例如,“人们是否是忙碌”、“会议是否已开始”.低层和高层的上下文通常是相互关联的.因此,有可能从低层的事件来假设高层的事件.系统如能从假设中检测上下文,那么需要由用户输入系统的信息就可减少.例如,推测用户是否是在度假.进行推测需要概率模型的支持.文献[21]采用 Bayesian 网络作为概率框架,根据来自传感器的数据推理查询的上下文变量.在 TEA 计划中采用 Kohonen Self-Organizing Map 人工神经网络的方法把输入的传感器数据进行标记和分类,然后再用概率的有限自动机对结果进行校验<sup>[22]</sup>.对于某些高层的上下文,例如用户的当前活动,一种可用的方法是利用计算机视

觉进行跟踪和识别.

由于上下文可能在人机交互中重复地出现,所以对上下文的记忆在觉察上下文计算中占重要地位.在上下文记忆的最低层中,最重要的信息是上下文值的变化,而不是值本身.例如,在检测物体的移动时就需要记忆位置的变化.在上下文记忆的较高层次上就需要分析过去的上下文,特别是分析什么改变了和什么没有改变,以便得出合理的推论.例如,从用户在过去的十多分钟里一直在看有关古建筑的网页可推论可能对古建筑感兴趣.

### 3.3 觉察上下文计算的软件支持环境

开发觉察上下文计算的应用系统是个困难的问题,这是由于开发中必须解决由上下文种类的多样性、数据格式和精度各不相同、提供的时间互不同步所造成的困难.例如,在对用户从室外到室内的位置信息进行跟踪和记录来说,用 GPS 可能准确到 10m,但建筑物的定位系统的精度可能要比这个精度高,同时 GPS 提供的是经度/纬度数据,而室内的主动式胸卡(active badge)是通过红外识别器来提供位置数据,再由红外识别器映射到建筑物中的相对位置.在建立觉察上下文计算的软件支持环境过程中需要解决的关键问题是

(1) 上下文信息的建模.对于各种上下文,由于它们的特性不同所以就有各种的表达和模型.当前几乎所有的系统都采用自己的方法来建立上下文信息的模型.这样就不可能相互交换上下文的信息或根据一个系统感知到的上下文变化来通知另外系统中的应用程序.现在需要的是能表示各种上下文信息的通用数据结构.

(2) 系统结构.与各种上下文传感器系统进行交互,把有关的上下文解释为所希望的格式并以合适的方式加以利用都涉及大量的工作.所以有必要把应用开发与上下文的感知相分开,这对建立可适用于各种应用的通用系统来说也是至关重要的.为了把低层的传感数据处理与高层的应用分开,需要引入中间层.它的作用是收集原始的传感器数据,把这些数据转换成应用程序能理解的格式并把它们发送到对它有兴趣的应用程序.这时可有两种结构形式:集中式结构和分布式结构.集中式结构:最简单的方式是可向应用程序提供上下文信息的中央上下文服务器.例如,文献[23]中有动态环境服务器,用于管理一组变量的名称和值(表示一个环境),并向预先通过注册表示需要此上下文的客户发送最新的上下文信息.集中式的方式通常会有尺度的问题(scalability).分布式结构:分布式结构把上下文分

布保存在若干个地方,以避免可能的瓶颈问题.但分布式结构会增加系统的计算和通信负载.

如果要从应用程序的工作环境中访问上下文信息就需要利用被称为“上下文工具”(context widget)的软件模块.每个“上下文工具”有一个状态(即一组属性)和一个行为(即一组由上下文变化触发的回调函数).“上下文工具”从传感器获得上下文信息并把它们传送到解释器或服务器用于集成.解释器和服务器向要求访问的应用程序提供简单的 API.

这方面的研究比较典型的项目有 Stick-E Notes<sup>[24]</sup>, Context Toolkit<sup>[25]</sup>, Context Fabric<sup>[26]</sup>.

## 4 普适计算的系统软件 (Software Infrastructure)

### 4.1 普适计算系统软件的需求

普适计算的系统软件构成普适计算的基础设施的软件部分,它对普适计算中大量的联网的设备、物体、计算实体进行管理,为它们之间的数据交换、消息交互、服务发现、任务协调、任务迁移等等提供系统级的支持.普适计算的系统软件必须能在我们日常生活的空间中而不是一个特定的环境中提供上述各种功能和服务,这是一个组成、结构都经常变化的工作环境,并且与此相关的硬件经常是异构的、容易出错和只具有有限的资源.这就对普适计算的系统软件技术提出了极大的挑战<sup>[27]</sup>.虽然移动计算和分布式计算研究已经解决了其中一部分问题,但距普适计算情况下的需要来说还有很大差距.普适计算系统软件区别于其它分布式系统的两个主要的需求是:

(1) 物理的集成(physical integration).在普适计算系统中涉及计算节点与物理世界的某种集成.例如,考虑一个智能会议室(smart meeting room),其中的椅子嵌入了压力传感器、白板嵌入了可以自动数字化其上的笔迹的传感器、投影机嵌入了网络传输能力<sup>[28]</sup>,这样房间可以感知会议中用户的存在和位置,当他们坐在桌子旁或在白板旁边发言时能主动提供合适的服务,房间中任一个 PDA 都可以把自己的显示重定向到投影机.

(2) 自发的互操作(spontaneous interoperation).一个普适计算系统可以划分为两部分,一部分是基础设施(infrastructure),一部分是移动设备.移动设备随着人的移动在不同的环境的基础设施中进出,这样就造成了系统环境的不断变化;同样基础设施的部件的维护、升级也是造成系统环境变化的另一个原因.普适计算系统中的软件部件应能在这

种变化的环境中进行自发的互操作,即不需人为地重新设置和添加软件模块,模块之间就可以自发地建立关联和进行功能上的协作.

移动计算领域中对信息内容及访问设备的异构性的自适应研究已经解决得较好,但仍不足以满足普适计算的自发的、互操作的要求,因为在普适计算系统中还存在着大量的功能异构性.举例来说,一个来自外单位的访问者带着他的 PDA 进入如前所述的智能会议室时,他的 PDA 事先可能根本没有预料到房间中的投影机可以被利用,这时我们希望访问者不需要任何手工的配置,就可用 PDA 把他的讲稿发送到房间的投影机上.

### 4.2 普适计算系统软件的关键问题

(1) 发现(discover).当用户把一个新设备带入一个空间或在已有的设备上采用新的模块时,在此设备/模块和其它可用的服务和设备之间是如何相互地发现以及在它们之间需要进行哪些交互.同时普适计算系统是一个逐渐扩展的系统,这个过程应该不要求重新启动系统,或重写已有代码,这也是以发现机制作为基础的.目前已经有一些这方面的技术基础,如 JINI, UpnP 等.

(2) 自适应(adaptation).普适计算系统中各种设备拥有的资源是不同的和变化的.从最小的 MEMS 系统到嵌入计算能力的物体,到可携带计算设备,再到基础设施中的部件,它们在计算能力、存储容量、电池容量、交互手段等因素上都有着很大的差异;设备在不同的环境中移动时,可用的无线网络的带宽也是不同的.这就需要解决自适应的问题.它包括内容的转化和交互界面的转化两部分.前者解决数据传输过程中因为资源的限制而对数据做的处理;后者是因为设备的交互机制的不同,需要把同一个交互接口映射到不同的交互机制下完成,比如可以想象以后的便携设备小到无法使用显示屏,就必须把输出重定向到周围环境中合适的输出设备或转为语音输出. Stanford 的 I-crafter 框架<sup>[29]</sup>就是研究界面元素如何在不同的设备上互相转换的机制.

(3) 对物理实体的管理.因为在普适计算系统中,物理世界中的物体都同时具有信息空间中的意义,普适计算的系统软件就必须对这些物理实体具有一定的管理能力. UIUC 的 GaiaOS<sup>[30]</sup>研究就认为普适计算的系统软件就是一种物理空间的操作系统,它与目前的操作系统的不同之处就是它需要把物理实体也管理起来.我们认为这里的管理有两层含义:(a)把物理实体看作一种资源,需要建立对这些资源的位置、结构、功能的表示,而且需要反应动态的实际情况.这需要觉察上下文计算的支持.(b)

当物理实体嵌入有传感、计算、效应能力时,必须提供对它们的高层接口,即相当于传统的驱动程序。

(4) 模块间协调机制(inter-module coordination). 普适计算系统是一个分布的系统,如何把各种分布的模块之间纷繁复杂的互联、通信、协作以一种统一和有机的方式组织、管理起来,而使系统展示出一个协调的行为和功能,这就是协调机制的作用。目前已有的各种分布式组件结构如 DCOM、CORBA 和 EJB 等都可以认为是一种协调机制,但它们直接用来支持普适计算系统是不合适的,因为用对象来抽象普适计算中的模块是不合适的<sup>[31]</sup>。Multi-Agent 系统目前被公认为是一种较合适的选择方案。在此基础上开发的有 MIT 的 Metaglu<sup>[32]</sup>、SRI 的 OAA<sup>[33]</sup> 和我们的 Smart Platform<sup>[31]</sup> 等。

(5) 鲁棒性. 普适计算系统,特别是在使用了无线通信和人携带设备在不同空间中移动的情况下,将会面临与使用有线分布式系统时相比出错频率大幅度增加的情况。在自发互操作中,模块间的联系会经常不可预见地丢失和恢复。在普适计算系统中,各种暂时的故障不应该被作为错误情况而导致系统退出或崩溃,而需要设计能把这种暂时的故障看做一种正常的动态的工作上下文的功能和技术。虽然在分布式系统的研究中也包括了容错计算,但它们主要是基于资源冗余的方法,并不适用于资源缺少的情況。

(6) 安全性(security). 普适计算系统的移动设备和基础设施之间自发的互操作带来了新的安全问题,如何保护它们不受到潜在的、恶意的交互对方的损害? 例如,在智能房间中的某些服务可能受到恶意来访者设备的攻击。与此相似,用户带入环境的 PDA 上可能有一些机密材料需要受到保护。而普适计算下物理空间和信息空间的高度融合更对个人的隐私造成了潜在的威胁。当办公室里布置了人员定位设施后,如何保证人们的位置信息不被恶意地利用。当人们不希望自己的位置被别人知道时,能否确保做到这一点。解决这些问题,不仅需要技术手段的支持,而且需要新的商业模式、市场力量、法律等方面的支持<sup>[34]</sup>。

## 5 智能空间(Smart Space)

### 5.1 智能空间的定义

如前所述,普适计算中信息空间和物理空间的融合可以在不同尺度上得到体现,其在房间、建筑物这个尺度上的体现就是智能空间,并且它可以不断连接扩大至全球。美国国家标准和技术学会(NIST)

给出的智能空间的定义是“一个嵌入了计算、信息设备和多模态的传感器的工作空间,其目的是使用户能非常方便地在其中访问信息和获得计算机的服务来高效地进行单独工作和与他人的协同工作”<sup>[35]</sup>。

目前国际上对智能空间的研究开展得相当广泛,如 MIT AI Lab 的 Intelligent Room<sup>[1]</sup>, Stanford 的 Interactive Workspace<sup>[36]</sup>, GIT 的 Aware Home<sup>[37]</sup>, Microsoft Research 的 Easy living<sup>[38]</sup>, GMD 的 iLand<sup>[39]</sup> 等等。

智能空间应具备的功能和为用户提供的服务包括:

- (1) 能识别和感知用户以及他们的动作和目的,理解和预测用户在完成任务过程中的需要;
- (2) 用户能方便地与各种信息源进行交互;
- (3) 用户携带的移动设备可以无缝地与智能空间的基础设施交互;
- (4) 提供丰富的信息显示;
- (5) 提供对发生在智能空间中的经历(experience)的记录,以便在以后检索回放;
- (6) 支持空间中多人的协同工作以及与远程用户的沉浸式的协同工作。

智能空间的应用价值可以直接体现在其具体用途上。如智能会议室、作战指挥室、能照料老人的智能家居等<sup>[40]</sup>。Kindberg 在文献[41]中指出将来不太可能存在一个全球统一的普适计算系统,而是存在许多因为管理区划、地域区划和文化区划而分离的有明确边界的智能空间系统,这些智能空间系统间可以有一定的交互,人和各种可携带设备可以透明地在它们之间移动。这说明了从实施智能空间入手是通向全面实现普适计算的最可能的途径。下面我们将给出我们的应用实例。

### 5.2 智能远程教室——智能空间的一个应用实例

普适计算研究中的一个重要问题是如何把这项基础研究与当前的应用相结合。我们认为远程教育是一个很好的结合点。因此,建立了基于智能空间的远程智能教室实验系统<sup>[8]</sup>,作为对智能空间和理论和应用研究的试验床。此空间具有以下特点:

(1) 基于多模态信息的自然人机交互。教师的身份通过对人脸图像和讲话声音的识别来实现。教师就像在普通教室中那样通过语音和手势就可进行教学,而无需坐在计算机面前。教师的操作包括调用课件、在电子黑板上作注释、与远方的学生交流等。此外,在此智能空间中还引入基于了虚拟人像(avatar)技术的一个虚拟助理角色,由它代表智能空间来协助用户与智能空间的交互。

(2) 分布侍候式服务(attentive service)。智能空间能检测教室中发生的事件,并根据对此事件的

理解主动地提供相应的服务. 教师在教学中可能有以下场景: 手持教具讲解、面向电子黑板解释其上内容等. 系统将根据对教师动作的理解, 在不同的场景下向远方的学生转发相应的视频镜头或电子黑板内容.

(3) 经历(experience)的自动记录: 系统自动记录在远程智能教室中发生的所有事件, 其中包括学生的提问、教师的演讲和在黑板上的注释等, 并以结构化的多媒体流的形式保存. 这是一个以时间或事件为索引的结构化的文件, 既可作为课件也可作为上下文历史供以后使用.

(4) 计算和通信服务是分布和不可见的, 整个系统是建立在一个自主开发的多代理(multi-agent)分布式系统——Smart Platform 上的. 在此系统中计算资源是共享的, 而不是私有的. 通过传感器输入的信息和提出的相应计算任务不是固定在某台计算机上, 而是由系统根据当时的情况来调度. 这样可以很好地解决多项计算任务, 例如语音与手势数据的实时处理同时进行的问题.

(5) 此系统结合了桌面会议系统、异地协同编著系统的功能, 因此, 可支持远程的协同工作, 如协同教学、协同设计等应用.

传统的远程教育系统中的教师是面向计算机的屏幕, 而不是学生, 这阻碍了教师与学生之间的面对面的交流. 在基于智能空间的远程教育系统中教师可面向学生进行教学, 同时又可充分地享受信息访问和交互的服务. 把远程教育技术提高到一个新的水平.

## 6 结 论

普适计算把计算和信息融入人们的生活空间, 使我们生活的物理世界与在信息空间中的虚拟世界融合成为一个整体. 人们生活其中可随时、随地得到信息访问和计算服务, 从根本上改变了人们对信息技术的思考, 也改变了我们整个生活和工作的方式. 普适计算是对计算模式的革新, 对它的研究虽然还刚刚开始, 但是它已显示了巨大的生命力和深远的影响. 普适计算的新思维极大地活跃了学术思想, 推动了对新型计算模式的研究. 在此方向上已出现了许多诸如 calm computing(平静计算)<sup>[42]</sup>、everyday computing(日常计算)<sup>[43]</sup>、proactive computing(主动计算)<sup>[13]</sup>等新的研究方向. 这说明普适计算是一个不断发展和充满朝气的研究领域. 我们需要抓住时机开展普适计算的基础理论和方法的研究, 这样才能在战略性领域中做出我们的创造性贡献. 从另一方面看, 从根本上讲, 普适计算是为了使人们更方

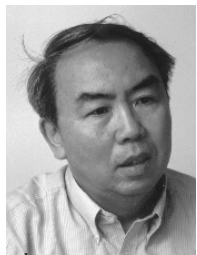
便地得到信息访问和计算服务. 它使计算的应用又可能扩展到前所未有的宽度和深度. 因此, 普适计算的研究又必须紧密地结合应用, 不断地开拓应用领域将使普适计算研究获得强大的推动力.

## 参 考 文 献

- 1 Coen M. The future of human-computer interaction or how I learned to stop worrying and love my intelligent room. *IEEE Intelligent Systems*, 1999, 4(3~4): 8~19
- 2 Weiser M. The computer for the twenty-first century. *Scientific American*, 1991, 265(3): 94~104
- 3 Dertouzos M. The future of computing. *Scientific American*, 1999, 282(3): 52~63
- 4 Norman D. *The Invisible Computer*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1999
- 5 Garlan D, Siewiorek D P, Smailagic A, Steenkiste P. Project aura: Toward distraction-free pervasive computing. *IEEE Pervasive Computing*, 2002, 1(4~6): 22~31
- 6 Salz P. The disappearing computer. *Time Europe*, 2000, 155(8): 1~8
- 7 Vernier F, Leash N, Shen C. Visualization techniques for circular tabletop interfaces. MERL Cambridge Research, MA, USA; Technical Report; TR2002-01, 2002
- 8 Xie Wei-Kai, Shi Yuan-Chun, Xu Guan-You. Smart classroom——An intelligent environment for tele-education. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia*, Beijing, China, 2001. 662~668
- 9 Wilson J. Toward things that think for next millennium. *IEEE Computer*, 2000, 33(1): 72~76
- 10 Kindberg T, Barton J, Morgan J *et al*. People, places, things; Web presence for the real world. In: *Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA'00)*, Monterey CA, USA, 2000. 19~30
- 11 Chen Y *et al*. Flexible active-matrix electronic ink display. *Nature*, 2003, 423(5): 136
- 12 Pinhanes C S. The everywhere displays projector: a device to create ubiquitous graphical interfaces. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing*, Atlanta, USA, 2001. 315~331
- 13 Tennenhouse D. Proactive computing. *Communications of The ACM*, 2000, 43(5): 43~50
- 15 Beigl M, Gellersen H W, Schmidt A. MediaCups: Experience with design and use of computer-augmented everyday objects. *Computer Networks*, 2001, 35(4): 401~409
- 14 Schmidt A. Implicit human computer interaction through context. *Personal Technologies*, 200, 4(6): 191~199
- 16 Ishii H, Ullmer B. Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In: *Proceedings of CHI'97*, Atlanta, USA, 1997. 234~241
- 17 Satyanarayanan M. Pervasive computing: vision and challenge. *IEEE Personal Communications*, 2001, 8(8): 10~17
- 18 Pascoe J, Morse D, Ryan N. Developing personal technology for the field. *Personal Technologies*, 1998, 2(3): 28~36
- 19 Abowd G D, Schilit B N. Ubiquitous computing: The impact on future interaction paradigms and hci research. In: *Proceed-*



- ings of CHI'97 Workshop2, Atlanta, USA, 1997. Available at <http://www.acm.org/sigs/sigchi/chi97/proceedings/workshop/gda.htm>
- 20 Abowd G D, Dey A K, Brown P J, Davies N, Smith M, Steggles P. Towards a better understanding of context and context-awareness. In: Gellersen H W ed. *Handheld and Ubiquitous Computing*. Berlin: Springer, 1999. 304~307
  - 21 Castro P, Muntz R. Managing context data for smart spaces. *IEEE Personal Communications*, 2000, 7(5): 44~46
  - 22 Schmidt A *et al.* Advanced interaction in context. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, Karlsruhe, Germany, 1999. 89~101
  - 23 Schilit W N. A system architecture for context-aware mobile computing[Ph D dissertation]. Department of Computer Science, Columbia University, USA, 1995
  - 24 Pascoe J. The stick-e note architecture: extending the interface beyond the user. In: *Proceedings of International Conference on Intelligent User Interfaces*, Orlando, USA, 1997. 261~264
  - 25 Dey A K, Salber D, Abowd G D. A conceptual framework and a toolkit for supporting the rapid prototyping of context-aware applications. *Human-Computer Interaction*, 2001, 16(2~4): 97~166
  - 26 Hong J I, Landay J A. An infrastructure approach to context-aware computing. *Human-Computer Interaction*, 2001, 16(2~4). Available at <http://guir.berkeley.edu/projects/cfabric/pubs/context-essay-final.pdf>
  - 27 Abowd G D. Software engineering issues for ubiquitous computing. In: *Proceedings of International Conference on Software Engineering (ICSE-99)*, Los Angeles, USA, 1999. 75~84
  - 28 Thayer S M, Steenkiste P. An architecture for the integration of physical and informational spaces. In: *Proceedings of International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS02)*, Karlsruhe, German, 2002. 7~20
  - 29 Ponnokanti S, Lee B, Fox A *et al.* ICrafter: A service framework for ubiquitous computing environments. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing*, Atlanta, USA, 2001. 56~75
  - 30 Manuel Román, Christopher K Hess *et al.* A middleware infrastructure to enable active spaces. *IEEE Pervasive Computing*, 2002, 1(4): 74~83
  - 31 Xie Wei-Kai, Shi Yuan-Chun, Xu Guan-You, Mao Yan-Hua. Smart platform: A software infrastructure for smart space (siss). In: *Proceedings of the 4th International Conference on Multimodal Interfaces*, Pittsburgh, USA, 2002. 429~434
  - 32 Philips B A. Metaglug: A programming language for multi-agent systems[MS dissertation]. AI Laboratory, MIT, USA, 2000
  - 33 Martin D, Cheyer A, Moran D. The open agent architecture: A framework for building distributed software systems. *Applied Artificial Intelligence: An International Journal*, 1999, 13(1~2): 91~128
  - 34 Lessig L. The architecture of privacy. In: *Proceedings of Taiwan NET'98*, Taipei, China, 1998. Available at <http://cyberlaw.stanford.edu/lessig/content/articles/works/architecture-priv.pdf>
  - 35 Rosenthal L, Stanford V. NIST information technology laboratory pervasive computing initiative. In: *Proceedings of IEEE 9th International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*, NIST, USA, 2000. 30~36
  - 36 Johanson B, Fox A, Winograd T. The interactive workspaces project: experiences with ubiquitous computing rooms. *IEEE Pervasive Computing*, 2002, 1(2): 67~74
  - 37 Kidd C D, Orr R, Abowd G D *et al.* The aware home: A living laboratory for ubiquitous computing research. In: *Proceedings of the International Workshop on Cooperative Buildings*, Pittsburgh, Pennsylvania, 1999. 191~198
  - 38 Brumitt B, Meyers B, Krumm J, Kern A, Shafer S. EasyLiving: Technologies for intelligent environments. *Handheld and Ubiquitous Computing*, Bristol, UK, 2000. 30~36
  - 39 Streitz N A, Tandler P, Müller-Tomfelde C, Konomi S. Romware: Towards the next generation of human-computer interaction based on an integrated design of real and virtual worlds. In: Carroll J ed. *Human-Computer Interaction in the New Millenium*. Addison-Wesley, 2001. 553~578
  - 40 Stanford V. Using pervasive computing to deliver elder care. *IEEE Pervasive Computing*, 2002, 1(1~3): 10~13
  - 41 Kindberg T, Fox A. System software for ubiquitous computing. *IEEE Pervasive Computing*, 2002, 1(1~3): 70~81
  - 42 Rekimoto J *et al.* Adding another communication channel to reality: Experience with a chat-augmented conference. In: *Proceedings of ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Los Angeles, USA, 1998. 384~391
  - 43 Volda S, Mynatt E D, MacIntyre B, Corso G M. Integrating virtual and physical context to support knowledge workers. *IEEE Pervasive Computing*, 2002, 1(3): 73~79



**XU Guang-You**, born in 1940, the chair professor of the Department of Computer Science, Tsinghua University, supervisor. His research interests cover computer vision, human computer interaction and multimedia computing. Contact him at [xgy-dcs@tsinghua.edu.cn](mailto:xgy-dcs@tsinghua.edu.cn).

research interests include pervasive computing, human computer communication technology and distributed multimedia processing. Contact her at [shiyc@tsinghua.edu.cn](mailto:shiyc@tsinghua.edu.cn).

**XIE Wei-Kai**, born in 1976, Ph. D., joined IBM China Research Lab at Beijing as a research scientist. His research interests include software infrastructure for Smart Space, formal context data representation and context reasoning model in context-aware computing. Contact him at [xwk@media.cs.tsinghua.edu.cn](mailto:xwk@media.cs.tsinghua.edu.cn).

**SHI Yuan-Chun**, born in 1967, Ph. D., professor. Her

