

《普适计算 2018：发展趋势》

CCF 普适计算专业委员会

摘要：近年来，普适计算相关技术领域已发展到全新阶段：一方面，物联网技术、社交网络、移动互联网、智能终端、感知及交互技术的迅速发展，推动了信息空间、物理空间和社会空间的融合；另一方面，基础设施的广泛布设和智能终端的泛在嵌入，计算能力以前所未有的程度深入到人们的生活，由此衍生出大量“围绕人的服务”。在此基础上，“人-机-物”三元世界逐步深度融合，正催生未来普适计算的一种愿景——iCPS(I and Cyber-Physical-Social Systems)。其中，人是核心，智能是目标，“人-机-物”三元融合是途径。围绕 iCPS，本文介绍了国内外研究机构在用户建模、基础设施和服务平台以及智能终端感知交互技术等方面开展的一系列工作及成果。然后，结合学术界和工业界提出的不同概念原型，探讨了“人-机-物”模型、普适智能服务、智慧终端以及人机交互等方面的未来发展趋势。最后分析了普适计算领域存在的挑战。

关键词：普适计算、普适服务、用户模型、智能终端、人机交互

Abstract: Ubiquitous computing technologies have developed to a brand-new stage. On one hand, the rapid development of the technologies about things of internet, social network, mobile internet, smart terminals, sensing and interacting promotes the tight integration of the cyber space, physical space and social space; on the other hand, with the ubiquitousness of hardware facilities and smart terminals, computing is deeply embedded into people's living environment, many human-centric services being derived as a result. On the basis of the rapid development of the technologies, the condition of nowadays, that humans and smart things being tightly integrated, are making the future vision of ubiquitous computing, iCPS (I and Cyber-Physical-Social Systems). iCPS is a human-centric system, with the

goal of providing intelligent services by integrating humans and smart things. For the vision of iCPS, many research effort have been concentrated on user models, infrastructure, smart terninals, and HCI. On the basis of the achievements, many demos have been proposed. By analysing the key concepts of demos, the paper discussed the future trend and the potential challenges of ubiquitous computing.

Keywords: ubiquitous computing, ubiquitous service, user model, smart terminal, human-machine interaction

一、引言

1.1 背景：新技术革命推动普适计算发展

3D 打印、能源互联网、新型纳米材料……一波新的技术浪潮正在改变世界，其特征是新能源、新材料与信息技术的高度融合与发展。2012 年 4 月著名期刊《经济学人》对当前这次新技术浪潮作了专题论述^[1]，认为它可与前两次技术革命——17 世纪的“蒸汽技术革命”和上世纪初（1912 年前后）的“电力技术革命”相媲美，可称作“第三次工业革命”。

不论这次技术浪潮是否达到了“工业革命”的程度，但它的确已对世界产生了重大影响。2010 年 8 月起，伊朗核设施遭受“震网”计算机病毒攻击，部分离心机被迫关闭，其核计划可能被延迟两年；自 2010 年底起，突尼斯、埃及、阿尔及利亚、叙利亚等国相继发生所谓“茉莉花革命”，Twitter、YouTube、Facebook 等新在线社交媒体成了这次政治剧变的时代标志；2010 年美军成立了“赛博司令部”，2011 年白宫公布了美国“赛博空间国际战略”，从国家战略的高度研究、规划、建设自身在信息空间中的作战能力^[2]，对世界各国产生很大影响。

基于对上述一系列事件的判断分析可知，目前电子信息技术和产业作为基础性、战略性、支柱性、先导性产业的特征日趋显著，向其他产业的渗透性更加突出；信息技术与生物、新材料、新能源等技术的交叉创新，可能引发新一轮产业革命；与此同时，人类社会、信息空间和物理世界的不断融合，将改变传统的计算模式，要求建立与之适应的新型信息基础设施，并将对诸多关键技术领域提出新的要求和挑战。

自 Mark Weiser 于 1991 年提出“Ubiquitous Computing（普适计算）”理念以来^[3]，普适计算已走过 20 多年的发展历程。普适计算最初的设想就是将信息技术融入到日常生活用品中，使它们从人们的视线中消失，以最自然的方式提供服务，彻底突破桌面计算模式。

可以看出，信息空间与物理空间融合的思路从一开始就渗透在普适计算的理

念中。但相比 Weiser 的时代，目前的相关技术领域已发展到一个全新阶段。

首先，信息技术整体发展已进入到所谓的“四后”时代，即“后 PC”、“后 Moore”、“后 IP”和“后图灵”（涌现新型计算模式），信息技术不断向其他产业渗透；

其次，各类新型支撑技术为普适计算提供新的发展平台。云计算技术的迅猛发展，近乎无限地扩展了普适终端的计算、存储能力；物联网技术重塑了物物关系，特别是加快了物体间的信息活化、通信以及共享；社交网络不仅彻底改变了用户间获取和传播信息的方式，而且给出了全新的人与人、人与信息、人与物的关系。

再次，智能终端及移动互联网的爆炸式增长，使用户和终端紧密耦合，围绕用户需求的、上下文敏感的各类服务（例如 LBS 服务）迅猛发展；同时，感知和计算能力也随着终端的普及，泛在地嵌入到物理环境中，智能手机、智能电视、智能汽车和各种传感设备都是最典型的终端实例。

综合上述情况，我们认为：信息产业正向其他产业快速扩张，在带动起一系列新兴增长极的同时，也将信息能力融入其他产品形态，客观上推动了信息空间、物理空间和社会空间的融合；同时，得益于基础设施的广泛布设和智能终端的泛在嵌入，计算能力以前所未有的程度深入到人们的生活，“计算能力的普适化”正在出现；移动终端与用户紧密绑定，由此衍生出大量“围绕人的服务”，相应的新型产业生态系统正被构建起来。

1.2 未来普适计算愿景 iCPS

互联网的出现为人类信息的及时共享提供了基础，移动互联网使得人们与信息空间 (Cyberspace) 连接的可持续性得到了保证，物联网将人们活动所依赖的物理环境中的各种组成单元接入到信息空间，社交网络和脑机接口正成为人接入信息空间的两种典型方式（前者为松耦合方式、后者为紧耦合方式）。随着这种“人-机-物”三元世界的逐步深度融合，正催生未来普适计算的一种可能的愿景——iCPS (I and Cyber-Physical-Social Systems)。在此系统中，人是核心，智能是目标，“人-机-物”三元融合是途径。下面将

通过一组生活场景来说明 iCPS 将给人类生活带来的影响。

(1) 场景 1：从智能家庭到智慧城市

根据 IBM 的预测，到 2050 年 70% 的人口将会生活在城市。环境的智能化程度和范围正不断扩大，从一个个智能家庭发展为智能城市，我们将迎来更加智能、便捷、绿色环保的城市生活。

未来的人居环境将由一个个具有智能的家庭单位连接成网络，从而实现资源的共享和优化配置。一方面，通过各种感知设备的大量应用，智能家庭单位中的功能单元将能理解用户的行为习惯和生活规律，并通过与用户社交网络的融合，主动与其他进行人性化互动。例如，空调系统可以在用户下班之前提前开启，将房间调节到舒适的温度；吸尘器等清洁装置可以自动调整打扫房间的时间和频率；电视、平板等设备可以自动为用户下载感兴趣的内容。在交互方面，用户将能直接通过语音、表情、手势和姿态动作等与家居设备进行交互。例如，通过语音打开或关闭灯光，或通过手势或肢体动作进行游戏操控等；另一方面，由各种智能家庭单元连接成的网络将能更好地协调和配置资源。例如，电网将能够根据各个家庭的用电情况进行负载均衡；网络系统能够根据各个家庭的使用情况和带宽变化自动缓存内容和分配带宽；以家庭为单位的社交网络可以促进居民在节能减排、环境保护方面的行动，从而为绿色人居环境的建立提供基础。

由各个智能家庭单元组成的未来城市将成为低能耗、低污染、资源优化配置和高度可回收的典范。在节能方面，智能的电气设备能够根据用户的习惯自动调整工作状态，并通过时序优化降低电网峰值，从而达到节能的目标；在减排方面，自动化的交通系统将对车辆进行统一调度和控制，从而避免交通拥堵，降低污染；在资源利用方面，通过 RFID 等追踪技术，可以对设备的使用进行管理，从而提高资源的利用率。

(2) 场景 2：从车联网到智能出行

车联网是物联网的一部分，车联网时代的智能汽车与城市交通信息网络、智能电网以及社区信息网络完全地连接起来，为人类提供诸多信息服务。未来的交

通出行将建立在智慧路网和智能车联网的基础上，提供快速、安全、环保的出行体验。一方面，未来的汽车将具备高度智能的车载信息系统，可以与城市交通信息网络、智能电网以及社区信息网络连接，随时随地获得即时资讯，并且作出与交通出行有关的明智决定；另一方面，未来的路网将设计成立体式交通网络，以允许不同速度和模式的车辆快速通行。汽车自动驾驶技术将成为现实，并且在“车联网”的保护下实现零交通事故率。智能的“车联网”甚至可以帮助司机订票、寻找停车场，以及自己找到充电站完成充电。

在车联网和自动驾驶的时代，老人、孩子甚至残疾人都可拥有自己的汽车，人们的出行将变得更加轻松。一个典型场景如下^[4]：Anna 自小双目失明，行走都需要导盲犬的帮助。一天 Anna 的父亲举办个人音乐会，他需要提早去场地彩排，Anna 只能一个人前往音乐会。她一个人坐上车，按动导航系统的开关，不用为看不见路担忧。导航系统显示出父亲事先给她设定好的行车路线，汽车在自动驾驶的状态下高速前进。途中汽车提示电量不足，Anna 只需告诉汽车去充电，汽车便会临时改变路线，带她到最近的充电场地，充电完毕后，汽车继续按照原来路线高速前进，Anna 准时到达父亲的演出现场。

(3) 场景 3：移动+社交+网络

未来的移动社交网络不再是完全虚拟的社会网络，而将逐步把在线交互与位置、行为活动等线下感知信息相结合。物理世界中原本不相识的个体越来越有可能通过移动社交网络平台成为朋友，并可以通过实时分享彼此的物理状态（如位置、活动等）增强线上线下之间的交流。下面以智慧校园（如图 1 所示）为例做说明。

学生 A 和 B 是某大学一年级的新生，他们两人虽然不认识，但由于两人在移动社交网络的签到都包括图书馆、A 教学楼、羽毛球馆等场所，而且两人专业相近，故移动社交平台通过匹配两人的历史活动记录和个人信息发现二者的相似性，故对两人进行朋友推荐。在得到双方确认后成为移动社交网络上的好友，并且能够相互查看对方的状态。这样，A 在自习时遇到不会的问题，看到 B 也在同

一教学楼就可以寻求找 B 帮助；而当 B 想去打球时也可以查看 A 的活动状态而决定是否 A 有时间陪他去打球。移动社交平台还可以根据二人的相似性把 A 常去的兴趣地点推荐给 B。



图 1 移动社交网络在智慧校园中的应用

(4) 场景 4： 社会感知

社会感知是普适计算的高级阶段，群智感知是实现社会感知的有效途径。在未来群智感知中，每个人都会充当多个角色。例如作为记者，去发现和报道所经历的活动和事件；又如如环境保护者，进行周边环境情况共享等。下面以突发性社会事件的感知为例进行说明。

某城市正在举行大型比赛，很多群众围观比赛并拿出手机进行拍照或者拍摄视频。这时，突然在赛场某个角落发生了爆炸。在这种危急情况下，所有人会迅速散开并逃跑。在警局收到报警并赶到现场后就很难查出行凶者的线索。这时，当时围观比赛的群众会在到达安全地点后将手机拍摄的照片和视频上传到警局的网络上。大量群众拍摄的突发事件发生前事发现场的照片和视频将使警局的工作人员在没有目睹这场突发事件的情况下就能够基本还原突发事件发生前现场的情况和围观群众的状态，从而帮助警局人员能够快速锁定可疑人员并进行侦察，加速案件的侦破过程。采用这种公众提供集体智慧的方式使得警局工作人员不必再大费周折地寻找目击证人并进行采访，大大减少了他们的工作量，并且群众的

智慧更能反映出突发事件发生时的真实情况。波士顿爆炸案发生后 FBI 采用现场用户贡献的数据进行嫌犯确认就是一个很好的实例。

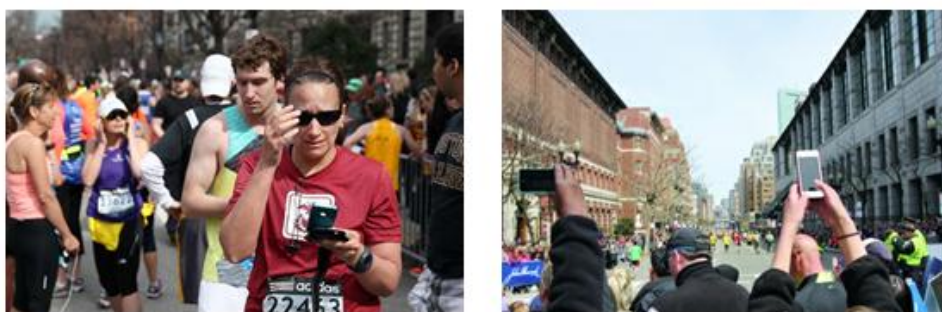


图 2 社会感知与波士顿爆炸案

二、 国际研究现状

从上述计算机相关领域的研究现状与进展来看，未来普适计算发展的总体趋势正在朝着类似 iCPS 的愿景发展，体现在：“人-机-物”进一步充分互联，各类异构终端普遍分布，信息能力泛在融合到日常物体中；各类异构交互设备进一步隐藏于周边环境，交互方式更加丰富和自然；海量知识的积累使得计算环境对用户需求和个性化的理解更为准确；“围绕人的计算”仍将是未来普适计算最鲜明的特征。

在现阶段研究成果的基础上，学术界和工业界打造了层出不穷的概念原型，从不同角度阐述了对未来信息产品和计算模式的理解。窥一斑而知全豹，我们选取了若干较具代表性的原型，尝试对其进行分析并探讨目前国际相关领域的现状及趋势。

2.1 “人—机—物”模型

(1) Social Web of Things: 人和物充分互联

随着物联网应用的发展，物联网技术正在与社交网络结合，形成一种以私有物体信息上网为媒介，以社交娱乐为目的的新网络——社交物联网。社交物联网

利用物联网的感知检测技术，原本在我们生活中的普通物体可以实现实时的信息化，通过网络技术、云计算技术、云存储技术等，物体就可以“活生生”的“生长”在社交网络上。比如，用户将自己的微信账号和家电的微信账号绑定后，每天出门的时候，或许只需对着微信说一句“我要去上班了”，家里的电视、空调、电灯就会自动关闭了。2011 年 2 月，爱立信推出了称为“社交互联网”(social web of things)的概念视频[5]，设想人和各种联网设备以平等的方式在社交网络上互动，如图 3 所示。该概念突破了传统的“人控制设备”的模式，让人与设备以更平等、更智能的方式沟通和协作。2011 年底，浙江大学亦尝试将物理设备（饮水机）连接到人的社交网络（新浪微博）上[6]。当水烧开时或者没有热水时，饮水机会自动发布微博通知用户。

可以预见，那些原本仅属于我们生活空间中的“私有物品”一旦接入社交网络，就可以通过这些既有的平台，以全新方式与全球用户互动。

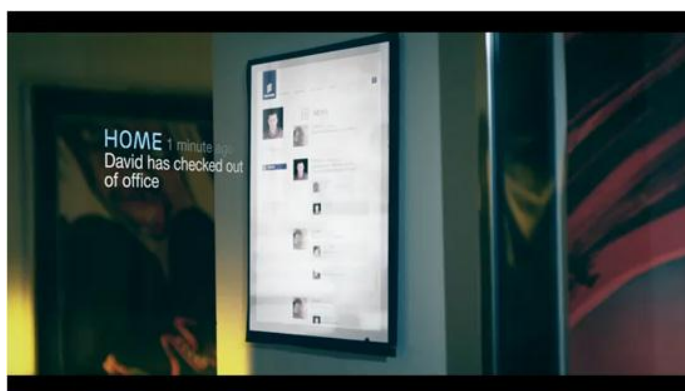


图 3 Social web of things

(2) A day made of glass: 信息和物体的深度融合

美国康宁 Corning 玻璃公司制作了一段关于想象未来生活的视频[7]。在影片当中，女主角走进洗手间，一边刷牙洗脸一边利用镜子的触控功能，安排今日的工作行程，甚至是回复朋友信息，如图 4 所示；男主角在床边，利用墙壁上的触控式荧幕，就可得知今日的天气以及交通状况。智能的玻璃具备感知周围物体的能力，与移动终端、家居用品、交通工具等友好的融合在一个智能环境中。智能的玻璃尝试将信息以最便捷的方式直接叠加到日常环境中，体现的是一种将虚

拟空间和真实空间深度整合的思路，预言了未来日常生活中物体和信息深度融合的趋势。



图 4 A day made of glass

从上述两个概念原型可以看出，一方面，未来的社交网络不仅是人与人的网络，也将是人与物、物与物的网络，信息化设备通过“社交物联网”与人进行平等的互动，这种互动方式充分利用了现有社会网络平台、接口和协议，社交网和物联网将以类似的方式走向融合。另一方面，信息技术不断整合到日常生活物体中去，这种深度整合的思路不仅将催生出多种新产品，还使得信息基础设施真正无处不在，可能孕育出全新的计算模式，从而极大地改变人们的生活和工作。

2.2 智慧终端

(1) 智能手机：随身交互与计算中心

目前智能手机的计算和存储能力已经超过早期的 PC，并具备 PC 没有的传感、通讯等功能，同时其能力正被云计算无限扩展。截止 2012 年底，全球智能手机用户数已突破 10 亿[8]。为满足用户需求，越来越多的传感器件和传感技术被运用到智能手机上，催生了一系列基于智能手机感知的应用，并掀起了移动感知的研究热潮[9]。可以很清晰地看到，未来的智能手机将成为重要的感知和计算设备，越来越多的新型应用将围绕手机展开，并最终成为“人-物-机”三元世界相互沟通和融合的门户。

(2) 可穿戴设备：计算机的未来形态？

随着传感技术的进步，越来越多的微型可穿戴传感装置不断涌现。

一方面，一些可穿戴设备可通过与智能手机相连接，提供友好的人机交互界面、数据存储和云服务访问。例如，MYO 臂带通过检测手势变化时的肌肉放电特征来识别用户手势。借助这种新型的生物电感应技术，MYO 臂带可以检测手部运动时肌肉的电信号传输，甚至在手指细微动作执行前的瞬间就能感知到运动信号。利用蓝牙与智能手机连接后，用户可以通过手势控制设备开关、音乐播放，甚至小型四翼飞行器；另一些可穿戴设备则隐藏于衣服、鞋子等日常用品中，对人的活动进行无时不刻的感知。例如，Nike Lunar 篮球鞋通过内置的芯片可以记录运动时每一次跳起的高度，跑步的步速等数据，并将数据转化为衡量运动量的 NikeFuel 数值。通过智能手机应用和云端账号便可即时查看数据，还可提供每周排名、个性定制训练课程、查看比赛中细节数据等功能。



图 5 MYO 臂带和 Nike+ 篮球鞋



图 6 Google 眼镜

另一方面，一些功能更强大的可穿戴设备也在日益兴起，并有望成为类似智

能手机的随身服务设备。例如，2012 年 4 月，谷歌推出了 Google Glass，其形态是一副眼镜，但功能类似一台整合了谷歌云服务的智能手机，其独特形态便于用户随时获取各类信息，并通过投影显示器以增强现实的方式提供给用户(图 6)。

可以预见，在云计算、增强现实、三维显示等技术的支持下，可穿戴计算设备的计算、存储、显示等能力得以大幅扩展，形态日新月异，异构化、小型化、随身化的各类设备将持续涌现。计算能力正在摆脱传统的“计算机”形态，通过各种穿戴设备，以“呼之即来挥之即去”的方式将信息提供给用户。

(3) 智能汽车：一种新的信息服务终端

智能汽车关注汽车本身的智能化，能够辅助司机完成更加安全和可靠的驾驶任务。车联网和自动驾驶是目前智能汽车领域的两个热点方向，为未来更加安全、高效的智能交通系统描绘了雏形。

在车联网方面，通用汽车于 2010 年 3 月在上海发布了基于车联网的概念车 EN-V[10]。EN-V 是面向未来城市个人交通的解决方案，致力于城市交通的零油耗、零排放、零堵塞和零事故。EN-V 通过城市智能交通网络和车辆自身驾驶系统实现智能导航和行驶，并可通过智能手机定位车的位置。多辆 EN-V 智能车之间能够组成网络，共享道路信息，并能前后排列成队列在道路上行驶；EN-V 具有障碍检测功能，可以自动避开行驶过程中的障碍物；作为两轮电动车，采用智能平衡技术保证车身平衡。



图 7 通用 EN-V 智能概念车

与此同时，汽车自动驾驶技术已经日趋成熟。截至 2012 年，谷歌公司的无

人驾驶车累计驾驶里程已达 30 万英里（48 万公里），仅发生 1 起事故（等红灯时被追尾）。随后，谷歌无人驾驶车在加州和内华达州拿到上路许可证。国家自然科学基金委亦于 2008 年设立了由郑南宁院士领衔的“视听觉信息的认知计算”重大研究计划，其任务之一就是集成人的听视觉认知机理等成果，研制无人驾驶车辆验证平台。2012 年 11 月，军事交通学院自主研发的无人驾驶汽车成功进行了从北京至天津的行驶测试，预计于 2015 年将测试从北京行驶至深圳。



谷歌无人车

国产无人车

图 8 国内外无人驾驶汽车

综上所述，车联网和自动驾驶技术将改变汽车产业的形态。用户将从驾驶行为中解放出来，汽车则从人操控的交通工具逐步向自主机器人演变，这将对人车交互方式产生深远影响。汽车将不仅是交通工具，还是集聚信息服务的重要平台。“围绕人的计算”正取代“围绕机械的计算”成为汽车价值的核心。

2.3 人机交互

普适人机交互充分融合了传感器技术、智能计算技术以及嵌入式系统等领域的最新技术。交互设备将逐渐隐藏于环境之中，交互的深度和广度不断扩展，朝着以人为本、增强体感、方便用户的方向不断向前发展。

(1) 交互设备逐渐隐藏到幕后

随着环境设备的不断增强，用于满足普适交互的基础设施逐渐完善。一方面体现在环境中多尺度显示屏的普及。以智能手机为代表的小型交互屏幕解决了交互屏的可携带性问题，提供了无处不在的交互界面；以智能电视为代表的大型屏则具有较好的视觉效果和沉浸感，为基于肢体动作的交互提供了可能；而大型投

影屏则提供了大范围多用户信息共享和协作的可能，并可借助智能手机等终端设备进行远程交互；另一方面，可穿戴设备的普及带来了交互体验的提升。通过隐藏在眼镜、手表、鞋子，甚至植入于体内的芯片，这些设备将提供无缝的感知和交互体验，用户无需借助专用设备即可通过自然的方式使得设备理解其行为意图。

一个典型的例子是 MIT 的第六感项目[11]。该项目使用的交互技术在一定程度上将现实空间与虚拟空间融为一体。整个系统由四个套在手指上的彩色标记环、一个小型摄像头、一个便携式投影仪等设备组成（图 9）。通过摄像头追踪标记环的运动，可以识别用户手势信息，进而结合当前的用户情境，推断出用户动作的意图，例如拍照、文本输入等。执行结果和操作界面可以通过投影仪投影到任何合适的显示位置，达到增强现实的效果。

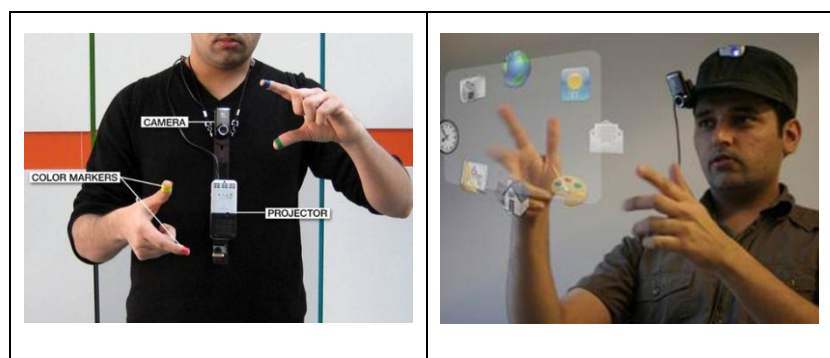


图 9 第六感装置示意图

(2) 交互的广度和深度不断扩展

依托各类新设备和交互模态，人机交互的广度和深度亦将不断得到扩展。

一方面，感知技术的进步使得多种交互手段融合成为可能，交互方式不断推陈出新。表 1 列举了一些典型异构终端及代表性应用。

在这些异构设备中，肢体和手势识别技术进展迅速。包括以 Kinect 为代表的深度摄像头感知、LeapMotion 为代表的红外感知、MYO 臂带为代表的生物电信号感知等。微软的 Kinect 体感控制器[12]结合了摄像头和红外传感器，可以识别约 30 米范围内的深度信息。利用 Kinect，可以对用户的姿态和手势进行实时识别，并用于 3D 建模和控制虚拟场景中的物体摆放等操作；LeapMotion 则通过红外传

感器实现了高精度的深度信息感知，可以感知其上方 8 立方英尺内的手指动作，识别精度可达 0.01 毫米，还可以同时识别不同手指间以及铅笔的差别，应用前景十分广阔。

表 1 可连接到智能手机的异构终端

传感类型	原理	代表性产品
脑电感知装置	通过头皮表面放置的电极，记录脑部生物电活动的波形图（EEG），从而检测人脑兴奋程度。	NeuroSkyMindWav 头箍 NeurowaveMico 耳机
手势感知装置	通过红外感应器跟踪和识别手指运动；通过检测手势变化时的肌肉放电特征来识别手势和动作。	LeapMotion 手势控制器 MYO 臂带
姿态感知装置	结合彩色摄像头和红外摄像头建立人体三维模型，从而捕捉肢体动作；使用加速度传感器感知肢体运动。	Kinect 体感控制器 Amiigo 腕带
行为感知装置	监测运动行为，估计运动量，从而给出健康建议。	FitBit 腕带 Nike FuelBand 腕带
生理感知装置	通过生理传感器感知用户的心率、血压、体温等数据，进而监测睡眠质量等健康信号	Basis Band 手表 Larklife 腕带



图 10 Kinect 和 LeapMotion 手势控制器

另一方面，复杂信号感知技术（特别是脑机接口等技术）使人机交互的层面不断深入。如何理解人的意图是神经科学、计算机、心理等学科的重要交叉研究课题，该领域近年的进展带来了一系列新型交互模式，脑机交互是这类更“深入地”人机交互模式的代表。

一个典型的例子是 Campbell 等人提出的 NeuroPhone[13]。NeuroPhone 可以让用户通过意念控制手机进行拨号（图 11）。当用户注视的联系人头像闪烁时，系统能检测到特殊的脑电信号，从而触发拨号操作。NeuroPhone 展示了脑机交

互的初步应用，未来可以运用于用户意图识别等方面。



图 11 NeuroPhone 和 FlyingBuddy2: 利用脑电信号进行交互

三、国内研究进展

围绕 iCPS 等可能的普适计算愿景，研究者建立了大量“围绕人”的普适计算模型，试图基于普适感知等手段，将人在生活与工作过程中的各种外在表现和内在变化在信息空间中完整地刻画和记录；同时，在普适计算基础设施和服务平台方面，研究者们也做了若干探索性工作，尝试为理论模型提供支撑平台，促进信息空间和物理空间的融合；而随着材料科学、电子科学、云计算以及相关硬件和制造业的发展，智能手机和大量异构可穿戴设备等智能终端也不断涌现出来。这些终端设备融合了感知技术和交互技术领域的最新进展，直接与人交互，形成围绕人的普适感知源和服务源。下面将从用户模型、基础设施、新型服务、终端及人机交互等方面介绍相关国内研究进展。

3.1 用户模型

普适计算区别于传统计算技术的本质特性在于强调计算模式的“以人为本”。从这种意义上说，人类活动是在普适计算空间中实现信息空间与物理空间融合的纽带。用户实体与计算实体之间、计算实体与计算实体之间的相互交互需随用户移动或环境变化而在不同时空动态演变[14]。因此，需要以人及其周围环境为核心建立模型，记录、存储、描述“*I*”在 Cyber Space, Physical Space 以及 Social Space 的活动轨迹，这也是我们提出 iCPS 愿景的原因之一。

在普适计算中，用户建模的过程是获取、表达和维护用户兴趣、社会关系和行为规律等相关知识的过程。用户模型是推荐系统、行为预测等相关技术的基础。根据应用领域不同，用户建模的主要研究方向包括用户兴趣建模、朋友关系建模和移动性建模等：

- 用户兴趣模型不是对用户个体的一般性描述，而是具有一种面向算法的、具有特定数据结构的、形式化的用户描述。它由表示用户兴趣的对象组成，每个对象都有一个权值信息，权值越高，表明用户对这个方面的信息兴趣越浓厚。
- 朋友关系建模随着社交网络的兴起受到了前所未有的重视，通过用户在社交网络上留下的数字足迹，融合用户在线上和线下交互的特征，可以对朋友关系进行评估和建模。
- 用户的移动性模型是从研究用户个体的运动机制出发，详细描述用户的具体运动参数(如：位置、轨迹、方向、速度等)并分析用户的移动规律，主要可以应用于用户的位置跟踪、预测、兴趣点发现等。受益于带 GPS 的智能手机的普及，大规模采集用户的移动轨迹成为可能，为用户移动性建模提供了数据支持。

此外，还有一些用户模型更宏观地刻画了用户模型在物理空间和信息空间中的不同特性，以及用户和环境、服务之间的关系。典型的有浙江大学的“影子模型”[15]等，较准确地体现了普适计算服务“无处不在”的时空特性、普适计算用户界面的“透明”交互模式及普适计算“以人为本”的基本理念。

浙江大学从物理空间和信息空间融合的背景出发，根据以人为中心的不同实体之间相互作用的基本原理，提出了基于物理场理论的智能影子模型(图 12)。用户在 CyberSpace 中存在一个自己的数据影子，随时随地与 Physical Space 中真实的“我”相互感知与交互，记录人生信号；计算基础设施中存在一个服务影子，形成个性化、移动式的虚拟化智能空间，随时随地为用户提供智能化普适服务。智能影子的计算范式是从对物理世界的“感知”到反作用至物理世界的“交互”

这两个操作交替螺旋式反馈上升的过程，从而达到从人生记录到人生服务。

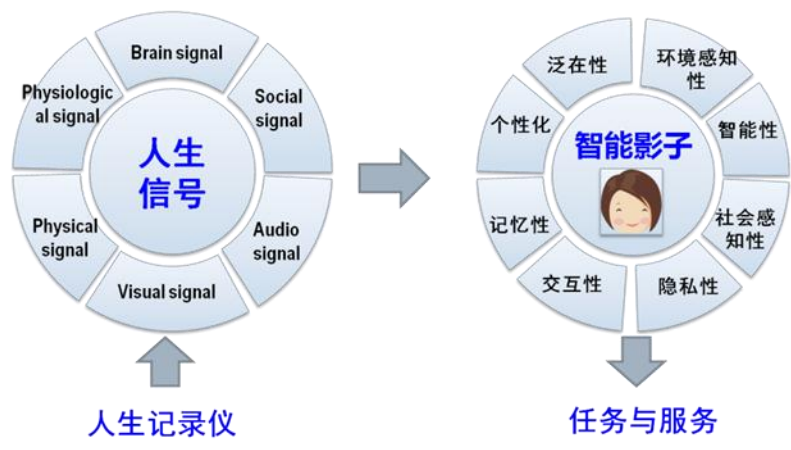


图 12 智能影子的用户模型：从人生记录到人生服务

3.2 基础设施和服务平台

普适计算环境中的基础设施和服务平台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、任务迁移等提供系统级的支持[16]。正是这些基础设施和服务平台为上述用户模型提供了支撑平台，使得设备和服务能无缝地嵌入生活和工作空间，促进了信息空间和物理空间的融合，在改变提供信息和服务方式的同时，也改变了人们未来的生活和工作。

(1) 移动社交网络系统支撑平台

人类同时生存于物理和虚拟两个社会空间中，但在过去很长一段时间里，这两个社会空间是分离的。移动社交网络的发展为物理和虚拟两个社会空间的连接提供了条件，融合人们线上、线下体验，形成了混合社交空间。在移动社交网络中，感知随时随地发生，交流无处不在，服务触手可及，为实现面向社会发展的感知计算（社会感知计算[17]）提供了一条切实可行的技术途径。因此，感知计算在移动社交网络中显得尤为重要[18]。然而，感知数据的实时连续性、服务的及时性等特点对移动社交网络系统支撑平台提出了新的要求。连续实时的用户状态感知功能使移动终端，尤其是智能手机成为一个理想的数据感知平台，借助于

智能移动终端不断增强的感知能力，捕获用户周围的状态信息。同时，服务的及时性以及移动终端的弱计算能力需要以中心服务器为依托，通过分析异构多源感知数据，及时地为目标用户提供个性化的服务。因此，移动社交网络系统支撑平台由手机端的智能感知和服务器端的分布式服务中间件两个部分构成。

移动感知中间件通过智能移动终端中的各种感知设备，包括 GPS 定位、加速计、蓝牙等，实时地采集用户的状态信息，实现用户数字轨迹的实时检测和记录。西北工业大学提出了一个参考智能感知中间件架构，可以划分为感知设备层、汇聚分析层和应用传输层三个层次，如图 13（左）所示。

分布式服务中间件是构建移动社交网络系统平台的灵魂，是整个应用系统的中枢。其结构如图 13（右）所示，包括网络通信层、基础服务层和应用层。网络通信层主要完成跨协议的通信对接，实现移动终端到服务器、终端到终端之间的交互通信，从而达到屏蔽底层硬件设备差异的目的。基础服务层实现公用服务的封装，为上层应用提供统一的服务机制和调度接口。基础服务层以开放服务网关（Open Service Gateway initiative，OSGi）框架为基础，实现对于公用服务的封装。应用层则面向具体的需求，以公共服务为基础开发各种服务应用，从而实现为移动社交网络用户提供适时的个性化服务。

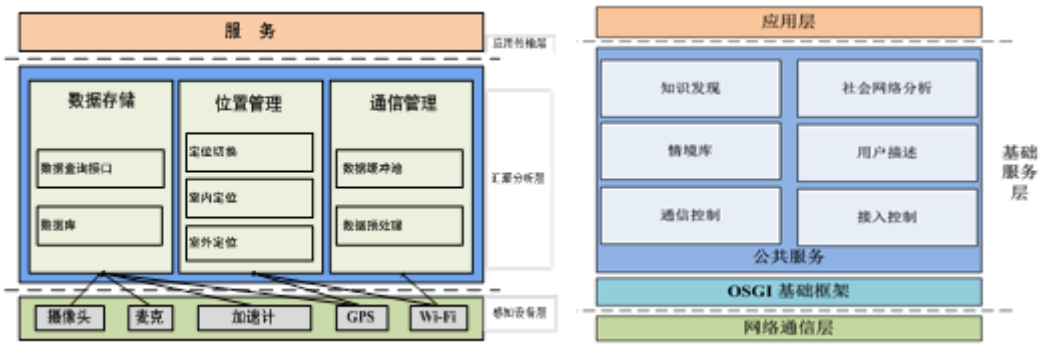


图 13 移动社交网络系统支撑平台：移动感知中间件（左）和分布式服务中间件（右）

在移动社交网络平台服务方面，国内还有很多其他研究工作。如微软亚洲研究院提出了结合手机端移动轨迹感知数据和后台数据集成分析的移动社交网络位置服务平台，能根据用户间行为相似度进行旅行推荐[19]。诺基亚中国研究院刘震等认为移动社交网络的关键是实现线上线下的真正融合，提出了瞬时社交网

络 (Ephemeral Social Network) 概念来为用户提供更好的移动社交服务体验[20]。清华大学唐杰则对移动社交网络平台中的用户行为预测方法进行了研究[21]。

(2) 群智感知计算



图 14 群智感知计算体系架构

社会及城市感知任务具有范围广、规模大、任务重等特点；传统感知技术依赖于专业人员和设备，覆盖范围受限，维护成本高。在此背景下，群智感知计算作为一种新的感知模式被提出来。它利用大量普通用户使用的移动设备作为基本感知单元，通过物联网/移动互联网协作，实现感知任务分发与数据收集利用，最终完成大规模、复杂的社会与城市感知任务。

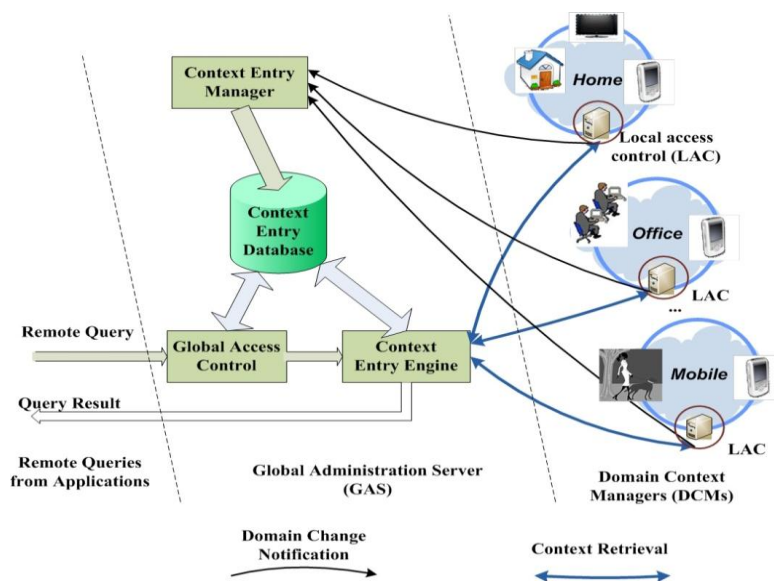
清华大学刘云浩团队对群智感知计算的起源、概念与特质进行了归纳和总结，提出群智感知计算的主要挑战包括弱联网环境下数据采集、数据质量与数据选择、大数据处理等[22]。其团队的研究人员还成功把群智感知的概念应用到智能交通、室内定位等领域[23]。微软亚洲研究院研究人员利用群体贡献的手机数据进行用户相似度匹配和好友推荐[24]。浙江大学利用从杭州及上海收集的大规模出租车移动轨迹数据来分析人们的移动规律、城市动态及地点语义[25]。北京邮电大学利用用户贡献的数据来改进机会网络中的数据路由性能[26]。

西北工业大学提出了群体智能的基本计算架构[27]，共分为五层 (图 14)。从大量的数字脚印中挖掘和理解个人和群体活动模式、大规模人类活动和城市动态规律，把这些信息用于各种创造性服务，例如社会关系管理、城市感知、环境监测等。

(3) 异构空间情境管理

近年来，普适计算研究者提出不同的情境管理方法来满足不同智能空间的需求，如智能家庭、智能办公室、智能医院等。这些情境管理被设计来存储本地空间产生的情境信息并为本地应用提供调用接口。随着普适计算技术的发展和普及，我们可以预测在不久的将来，现实生活中将布满各种智能空间，人们在这些不同的智能空间之间移动，在不同的智能空间留下不同的情境，这些情境综合起来才能构建出用户真实而完整的上下文信息。这样就产生了一个新的挑战，当智能空间由单个转为多个时如何管理在这些异构空间中产生的情境。由于用户的移动性，用户情境可能分布于不同智能空间，当一个空间查询某个用户或某移动实体的情境时究竟应该从哪个空间获取。

单一空间的情境管理已有相关研究，如 Jose[28]依靠电信运营商建立了“Vader system”，根据用户当前位置确定用户所在空间并获取情境信息。近年来，异构空间的情境管理引起了研究者的兴趣，如西北工业大学提出的“iCROSS”[29]解决方案。图 15 为“iCROSS”系统架构。该方法中移动用户通过向所处空间的情境服务器申请访问，情境服务器进行授权并在一个统一的注册中心更新用户进入点，从而解决移动用户注册问题。同时提供了一个跨空间情境查询算法来解决移动状态下用户情境查询问题。



在虚拟空间和真实空间融合的背景下,情境在“虚实”之间的融合也相当重要。针对移动终端上的微博浏览问题,微软亚洲研究院谢幸等人综合利用时间、地点、浏览历史、社会关系和活动构成用户浏览时的“情境”。首先学习微博内容和用户情境之间的关系,然后通过检测当地的微博话题,根据用户的利益偏好推荐用户相关话题,直至找到用户首选的内容[30]。

3.3 新型普适智能服务

(1) 基于移动感知的精准广告推送

精准广告是随着互联网发展而出现的新事物，属于个性化推荐的范畴。例如百度和谷歌等利用用户关键词、所在地域和查询时间等对用户兴趣进行分析，进而提供相关联的广告推送。基于移动感知的精准广告则从传统 PC 迁移到更为广阔的物理空间。主要依托移动终端，如智能手机、平板以及智能可穿戴设备等，通过传感器采集用户的历史数据在服务器端建立用户的偏好模型和用户行为模型，在进行广告推送时根据用户的偏好、用户当前或未来一段时刻所处的实时情境给特定用户推送广告，以达到精准推送的目的。图 16 给出了华为与西北工业大学合作的精准广告平台的一组场景。如果从用户的行为模型可以知道用户经常

在早上 8 点左右乘坐地铁，从用户的偏好模型发现用户平时喜欢浏览时事新闻。通过用户移动终端上的传感器发现用户在乘坐地铁，且当前处于空闲状态，于是推送引擎向用户推送新闻套餐服务。如果用户为学生，根据用户行为模型发现该用户在节假日有外出游玩的爱好，在离用户家不远的的一个游乐场准备在即将来临的节假日搞优惠活动，则推送引擎将该优惠活动推送给该用户。

随着带丰富感知功能的智能手机和平板的普及，移动精准广告推送将获得前所未有的关注。通过感知数据分析获得用户兴趣偏好和实时状态（位置、忙闲状态等），它一方面可以让商家能快速的定位目标客户，另一方面让用户及时有效的获得自己需要的信息。移动精准广告的火爆，充分展示了在大数据的支持下，目前的计算系统正以前所未有的广度和深度认知用户的行为，这为普适信息服务提供了机遇和支持，同时将不断推动研发人员和用户在隐私保护、安全等相关问题上的思考与实践。

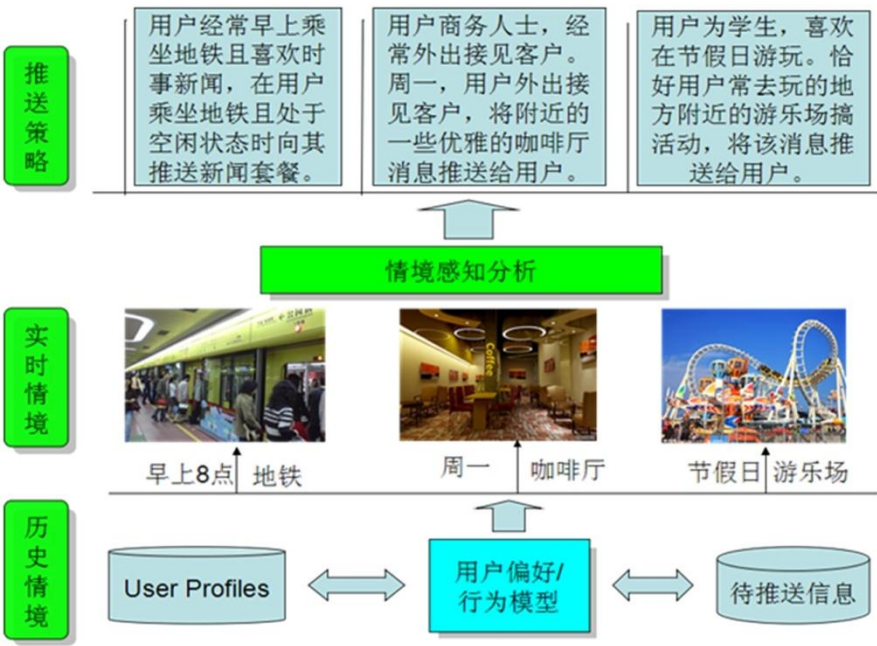


图 16 移动精准广告推送

(2) 社会感知服务

社会感知计算（Socially-Aware Computing）是通过人类生活空间日益部署的大规模多种类传感设备，实时感知识别社会个体的行为，分析挖掘群体社会交互

特征和规律，辅助个体社会行为，支持社群的互动、沟通和协作[17]。社会感知计算的核心在于“感知”二字，有两层涵义，首先感知现实世界（Sensing），然后觉察并做出响应（Aware）。具有社会感知能力的计算机系统可以帮助人们了解当前状况，提升社交技巧，促进良性交互，满足个人的社会性需求。前面曾提出智慧校园的例子对社会感知进行说明。为了促进校园中的社会交互，提高公共资源的使用率，西北工业大学实现了一个信息资源共享的智能校园系统，其中以自习室查询应用 Where2Study、群智感知应用 I-Sensing、社会活动推荐服务 GroupMe 等为典型代表。

- Where2Study[18]是一个自习室状态共享的应用查询系统。通过检测 Wi-Fi 信号的 RSSI 信号强度，实现用户的室内定位功能。用户通过移动终端可以查询每个教室的使用情况，同时能够清楚地了解每个教室座位的剩余数量。
- I-Sensing[18]是一个基于群智感知的应答系统。系统中的每一个用户充当一个可移动的感知节点，为系统提供相应的输入信息。使用者可以就校园内公共设施的使用情况，例如运动场地是否空闲等问题向系统发起一个任务请求。系统引入了社会竞争机制以达到激励群体用户参与和接收任务的目的。
- GroupMe[31]是一个社会活动采集、挖掘及智能化推荐系统。系统能自动记录用户在校园社区内与其好友活动交流的历史（如一起自习、聚餐、开项目会议等），根据社会图（Social Graph）分析及群组计算（Group Computing）等方法进行活动群组发现。在当用户需组织活动时，可根据移动感知得到的用户情境（所在位置、时间、和谁在一起等）及群组亲密度信息等进行智能化群组推荐。



图 17 智慧校园感知服务：Where2Study (a, b)、ISensing (c)，GroupMe (d,e)

此外，南京大学和香港中文大学的研究人员对移动社交网络中基于用户协作的高效内容分发服务进行了研究[32]。微软亚洲研究院利用群体贡献的手机感知数据（如声音、照片等）进行分析，对用户所处的位置语义进行识别[33]。

(3) 协作式智能健康辅助

普适计算领域顶级期刊《IEEE Pervasive Computing》的编委文斯·斯坦福（Vince Stanford）指出，基于普适计算的老年人生活辅助技术将成为未来解决老年人日常生活问题最有效、最具活力的技术之一[34]。近年来，随着社交网络的出现，基于社会交互与普适健康感知融合的协作式健康辅助成为新的研究热点。

为了督促老年人按时服药,西北工业大学设计了基于移动社交网络的协作式老年人服药系统[18]。该系统在智能家庭的基础上引入了移动社交网络的思想,通过社会化的提醒,一方面使老年人能够按时服药,另一方面增强老年人之间的社会交互。首先,借助智能家居中的感知能力,系统自动检测老人是否按时服用药物,当检测到用户没有按时服用药物时,系统自动形成一个服药提醒任务,并通过交互式终端向目标主体发起服药提醒,目标主体在接收并完成服药任务后,通过社会竞争机制给提醒服务的发起者以反馈。图 18 给出了协作式服药系统的网络结构图。另外,北京大学在情境感知服务系统 CBS³(Context-aware Based Smart Service System)的基础上提出了 iCARE 服务[35],避免患有老年痴呆或由于其他疾病造成自主意识丧失的老人丢失。iCARE 的主要业务是通过在老人居住社区内布置的蓝牙节点采集数据,判断老人是否走出安全区域。当老人走出正常区域时会被非正常区域的节点检测到, iCARE 会向老人的子女或社区保安报警,以避免老人丢失。中科院计算所提出了基于智能手机的 PPCare 系统,能够监控老人的日常行为并提供健康服务支持。该系统包括四个功能:运动规划、卡路里消耗预测、跌倒报警、生理监视。该系统已经在两个老年人社区进行了用户体验并取得了较好的反馈[36]。

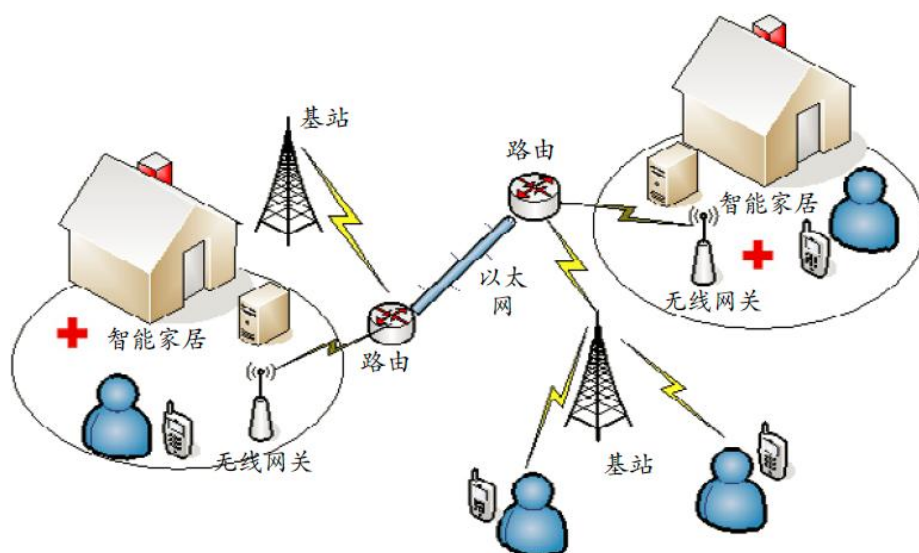


图 18 基于移动社交网络的协作式服药系统架构

3.4 智能终端感知和交互技术

随着硬件技术的发展，各种智能终端方兴未艾。智能手机正在迅速成为个人计算和通讯的核心设备，以可穿戴设备为代表的新型异构终端不断涌现。这些终端设备融合了感知技术和交互技术领域的最新进展，将形成以人为中心的普适感知源和服务源。以下从智能手机和异构终端这两个方面介绍智能终端方面和交互技术方面的进展。

(1) 智能手机

智能手机具有丰富的感知能力。通过各种内置的传感器，可以实现对手机自身状态和周围环境的感知。例如，通过内置的加速度传感器和陀螺仪可以感知手机的运动状态，进而识别用户手势[37, 38]；通过手机摄像头和麦克风可以识别人脸、声纹等关键生物信息，从而确定用户身份；通过近场通讯（NFC）技术，可以从周围的 NFC 标签或 NFC 手机读取信息，从而进行媒体共享或信息传输。基于这些感知能力，已有研究者提出多种新型应用。例如，浙江大学的 MagicPhone[37]通过感知智能手机的空间朝向，提出了指向操控的概念，使得智能手机成为环境设备的统一控制器，体现了自然交互的思想；浙江大学的 TouchPhone[39]则通过近场通讯技术（NFC）感知周围设备的信息，从而实现了智能手机与环境设备之间的任务迁移与协作。例如，当用户播放音乐时将手机与音箱接触，则音乐会自动迁移到音箱中播放。



图 19 MagicPhone 和 TouchPhone 工作场景示意图

不仅如此，在手机基础信号的基础上，可以提炼出以人为中心的若干智能手机可感知的内容，包括位置感知、姿态感知、行为感知、身份感知、情绪感知和社会关系感知等。位置感知通过获得智能手机所处的空间坐标及其所对应的语义信息，使得智能手机和移动互联网应用能够提供基于位置的服务；姿态感知则通过捕捉人的身体动作、手势和表情变化等来识别动作意图。与传统的人机交互方式相比，姿态控制和交互更为直接、自然；行为感知则通过对用户长时间的活动信号进行感知，抽取出用户的活动规律，从而在适当的时间地点为用户提供个性化的交互方式；而情感感知则试图通过人的语音、表情甚至大脑活动信号来推测人的情感状态和特征，从而更好地理解用户的喜好。

社会感知相对更复杂一些，主要是试图借助前述各种感知手段，从社会活动中发现用户之间的社会交互特征和规律，进而理解用户的社会关系。社会关系感知能帮助用户协调社会行为，促进社群的互动、沟通和协作。中国科学院陈益强等人对终端收集到的蓝牙信息进行分析，可有效地捕获用户周围的环境特征，例如正式会议、与朋友聊天、和朋友逛街，或者独自一人等，特定的情境识别率以

及情节推测的准确率达 87%[40]。

综上所述，基于智能手机的感知交互手段正在经历从单一到多维、从数据到语义、从个体到群体的发展趋势，并将朝着以人为本、无处不在、智能感知与交互的方向不断向前发展。

(2) 异构终端

便携式的头戴式脑电信号采集设备是一类有潜力的终端设备，它可以采集头部特定位置的脑电信号，并经蓝牙传送到智能手机，从而根据信号特征检测大脑的放松程度（attention）和专注程度（meditation）等活动状态[41]。通过使用多个电极同时采集大脑不同位置的脑电信号，可以获得更丰富的电位特征。其中，事件相关电位中的 P300 信号已获得广泛研究[13, 42, 43]，浙江大学的 FlyingBuddy2[44]就是通过检测 P300 电位来识别用户意图。FlyingBuddy2[44]实现了通过脑电信号控制四翼螺旋飞机的原型。当用户思考特定动作时，系统能检测出脑电信号变化，从而转换成控制四翼螺旋飞机的指令。

此外，还出现了一些基于常规交互设备的新颖交互手段。清华大学通过获取用户移动鼠标形成的光标轨迹，从而呈现出用户控制鼠标时个性化模式。通过研究某个用户使用鼠标时的轨迹，就能识别出该用户是谁，识别率高达 87.5%[45]。中国科学院的樊银亭等人基于认知心理学相关理论，提出了基于经验感知的自适应用户界面模型[46]，从界面静态组成元素、动态交互行为和自适应策略三个方面建立了该模型的统一描述。该模型能够根据用户交互历史和上下文环境，准确预测用户意图，实时调整界面布局和交互行为以及主动地适应用户。这些新型的交互方式体现了对用户复杂意图的感知能力，将为未来人机交互提供更广阔的空间。

四、 国内外研究进展比较

我国的移动互联网市场规模已成为全球第一，智能终端广泛普及，通信网络大量铺设，在终端研发、网络运营、服务提供等方面形成了一批领军企业，积累

了大量关键技术和产品，正在逐步形成非常有利于普适计算发展和应用的生态环境。在这种情况下，通过与国外研究现况的对比，我们欣喜的发现，国内普适计算领域已不断涌现达到国际先进水平的成果。与此同时，我们也发现一些可改进的地方。总的来看，国内外普适计算研究体现出如下几方面特点：

1. 国外大量研究工作由工业界团队参与甚至主导，产业导向鲜明，学科交叉充分，从概念到产品的研发能力更完备。

国外研究群体除高校、研究所等学术机构之外，一些国际工业巨头的实验室和小型科技公司也积极参与普适计算领域的研究工作。这些工业界研究者的参与，使得研究工作的目标和导向更为清晰，研发工作打破专业限制，进行按需整合。其研究内容不仅包含计算机科学，还包含了材料科学、人机工程、通信等领域，甚至医学、认知科学、心理学等领域成果也被充分吸纳。同时，优秀成果也能及时进行市场转化，出现了如 Kinect 等优秀产品。与此相比，国内研究团队主要来自专业学术机构，学科交叉不够充分，成果转化路径不成体系，成果产业化程度不高。

2. 与国外相比，国内在装备类、器件类方面的研究偏弱，软件、算法和服务方面研究整体水平相对较高。

从具体研究领域来看，国内在普适计算用户模型、基础设施、新型服务和交互理论等方面研究均颇有亮点，部分成果受到国内外研究者的好评和引用。从创新能力角度来看，一些重要、关键的创新概念仍由国外研发机构主导和推动，国内原始创新能力仍有待加强；同时，在可穿戴设备、感知设备方面，基础硬件（如臂带、手环、各种传感器、脑机接口设备等）主要源自国外，部分体现了我国在“研发->制造”产业链条上的弱点，也进一步体现学术机构和生产企业对接的必要性。

五、发展趋势与展望

目前工业界和学术界大量概念 Demo 和相关技术的进展，较为清晰地刻画出

了未来普适计算的一系列趋势。同时，新技术浪潮对普适计算提出了新的挑战和思考，包括：

1. 物联网、云计算、CPS、社交网络等技术改变了人与设备、人与环境的关系，设备智能化程度不断提高，人与设备互动性加强。在这种计算环境下，传统普适计算模型需如何演变？
2. 依托脑机接口、大数据分析、社交网络等技术，有可能从信号、数据、社会关系等多个层面认知用户行为，据此可构建怎样的新用户模型？
3. 设备互联技术和云端服务近乎无限地放大了终端的能力，终端成为用户接入计算环境的入口。在这一背景下，未来终端形态会如何变化？
4. 信息空间、物理空间和社会空间进一步交融，信息被深度嵌入到物理环境中，信息服务将具有怎样的新形态？应建设怎样的信息基础设施为构建普适计算环境服务？
5. 新材料、新能源、生物技术和信息技术不断融合，各种新型人机界面和交互范式层出不穷[20]。在这些新技术和交互模式基础上，如何进一步实现“以用户为中心”的交互体验？
6. 随着大量异构传感设备的使用，大规模、异构、多模态数据的挖掘和处理成为一类挑战性问题，其中包括低质量数据的过滤，大数据的理解和处理技术等。
7. 在大量异构终端和基础设施构成的物理环境中，不断深化的“感知人”计算将最终推动“围绕人”的计算。具体体现在：随着云计算、社交网络和物联网及其他基础设施的发展，智能手机将逐渐成为打通“人-机-物”三元世界的门户，为人机交互、健康护理、社群智能等领域带来革命性的变化；各种异构终端的兴起，将形成以人为中心的普适感知源和服务源。以可穿戴设备为典型代表的一批微型终端，通过与智能手机相连接，可以极大地扩展现有设备的感知和交互能力，并能记录关于人的各个维度的信息，从而提供个性化的服务。

8. 普适人机交互领域正处于茁壮成长时期，充分融合了智能计算技术、传感器技术以及嵌入式系统等领域的最新技术，在深度和广度上均达到前所未有的高度。每一种新的生理信号均可能延伸为一种新型人机交互通道，利用这些新型生理信号的基于手势、脑电等新型感知方式的人机交互模式日渐兴起，将提供更为直观自然的交互体验。
9. 普适计算与社交网络深度融合带来线上线下行为的相互映照，通过线上数据可以对物理事件进行预测，而通过物理世界交互记录可以对线上交流进一步增强。未来的挑战包括如何基于线上线下特征对用户进行建模，如何通过线上线下特征的融合进行行为预测等。

六、结束语

正在涌动的新技术浪潮正不断影响和推动普适计算的发展。现有的基础设施、软硬件环境、各种支撑技术、计算能力、新材料打造了优越的“硬”条件；以4V为特征的大数据、丰富的云-端服务、弹性互动的社交网络构成的“软环境”则将用户、物理环境、与计算系统紧密联系在一起。以人机物三元深度融合为途径进一步打造“围绕人的计算”正当其时，相关研究领域、工业应用和商业模式正在迎来全新的发展契机。

参考文献

- [1] Chun-Han Lin, King Chung-Ta, and Hsiao Hung-Chang. *Region abstraction for event tracking in wireless sensor networks*. 2005.
- [2] House White, *International Strategy for Cyberspace: Prosperity, Security, and Openness in a Networked World*, May 2011.
- [3] Weiser Mark, *The computer for the 21st century*. Scientific american, 1991. 265(3): p. 94-104.
- [4] 高弋坤, 车联网开启城市交通新时代. 通信世界, 2010. 25(24): p. 22.
- [5] Alendal Mats. *The social web of things-a social network for your devices*, Ericsson, http://www.ericsson.com/thinkingahead/idea/110217_social_network_for_you_1968920151_c.

- [6] Chen Longbiao, Yaochun Li, Zeming Zheng, Li Zhang, Dan He, Xiaolong Li, Sha Zhao, Shijian Li, and Gang Pan. *WaterLady: A Case Study for Connecting Physical Devices into Social Networks*. in *Ubiquitous Intelligence & Computing and 9th International Conference on Autonomic & Trusted Computing (UIC/ATC)*, 2012 9th International Conference on. 2012: IEEE.
- [7] Doherty L., Pister K.S.J., and El Ghaoui L. *Convex position estimation in wireless sensor networks*. in *INFOCOM 2001*. 2001.
- [8] Analytics Strategy, *Global business smartphone sales 2010–2016*. 2011, Research report, Strategy Analytics.
- [9] Lane Nicholas D, Emiliano Miluzzo, Hong Lu, Daniel Peebles, Tanzeem Choudhury, and Andrew T Campbell, *A survey of mobile phone sensing*. *Communications Magazine*, IEEE, 2010. **48**(9): p. 140-150.
- [10] 高美嘉, 通用 EN-V 电动联网概念车. 轻型汽车技术, 2010(9): p. 36-36.
- [11] Mistry Pranav and Pattie Maes. *SixthSense: a wearable gestural interface*. in *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Sketches*. 2009: ACM.
- [12] Norrie Lauren and Roderick Murray-Smith. *Virtual sensors: rapid prototyping of ubiquitous interaction with a mobile phone and a Kinect*. in *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*. 2011: ACM.
- [13] Campbell Andrew, Tanzeem Choudhury, Shaohan Hu, Hong Lu, Matthew K Mukerjee, Mashfiqui Rabbi, and Rajeev DS Raizada. *NeuroPhone: brain-mobile phone interface using a wireless EEG headset*. in *Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Networking, systems, and applications on mobile handhelds*. 2010: ACM.
- [14] 吴朝晖 and 潘纲, *普适计算*. 2006, 中国计算机学会文集, 清华大学出版社. 北京.
- [15] Zhang Li, Gang Pan, Zhaohui Wu, Shijian Li, and Cho-li Wang. *SmartShadow: Modeling a user-centric mobile virtual space*. in *Pervasive Computing and Communications, 2009. PerCom 2009. IEEE International Conference on*. 2009: IEEE.
- [16] 徐光佑, 史元春, 谢伟凯, *普适计算*. 计算机学报, 2003. **Vol. 26 No.9**: p. pp.1042-1050.
- [17] 於志文, 於志勇, and 周兴社, *社会感知计算: 概念, 问题及其研究进展*. 计算机学报, 2012. **35**(1): p. 16-26.
- [18] 於志文 周兴社, 郭斌., *移动社交网络中的感知计算模型、平台与实践*. 中国计算机学会通讯, 2012. **Vol.8, No.5**: p. pp. 15-21.
- [19] Lu-An Tang Yu Zheng, Jing Yuan, Jiawei Han, Alice Leung, Chih-Chieh Hung, and Wen-Chih Peng. *On Discovery of Traveling Companions from Streaming Trajectories*. in *IEEE International conference on Data Engineering (ICDE)*. 2012. Washington, DC: IEEE.
- [20] 刘震, 秦永健, 王霞, 徐彬, *瞬时社交网络——从在线社交网络到移动社交网络*. 中国计算机学会通讯, 2012(5).
- [21] 唐杰, 杨洋, *移动社交网络中的用户行为预测模型*. 中国计算机学会通讯,

2012. 5.

- [22] 刘云浩, 群智感知计算. 中国计算机学会通讯, 2012. **Vol. 8 No. 10**.
- [23] Yang Zheng, Chenshu Wu, and Yunhao Liu. *Locating in fingerprint space: wireless indoor localization with little human intervention*. in *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*. 2012: ACM.
- [24] Dragos Niculescu and Badri Nath. *Ad hoc positioning system (APS)*. in *Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '01. IEEE*. 2001. San Antonio: IEEE Press.
- [25] Gang Pan Guande Qi, Wangsheng Zhang, Laurence Yang, Shijian Li, Zhaohui Wu, *Trace Analysis and Mining for Smart Cities: Issues, Methods, and Applications*. IEEE Communications Magazine, 2013. **51**(6): p. 120-126.
- [26] Peiyan Yuan Huadong Ma, *Hug: Human Gathering Point Based Routing for Opportunistic Networks*, in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. 2012, IEEE: Shanghai. p. 3024-3029.
- [27] 郭斌 张大庆, 於志文, 周兴社., 数字脚印与“社群智能”. 中国计算机学会通讯, 2011. **Vol. 7 No. 3**: p. pp.53-60.
- [28] José Rui, Filipe Meneses, and Adriano Moreira, *Integrated context management for multi-domain pervasive environments*. 2005.
- [29] Guo Bin, Daqing Zhang, Lin Sun, Zhiwen Yu, and Xingshe Zhou, *iCROSS: toward a scalable infrastructure for cross-domain context management*. Personal and Ubiquitous Computing, 2013. **17**(3): p. 591-602.
- [30] Han Jonghyun, Xing Xie, and Woontack Woo, *Context-based microblog browsing for mobile users*. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 2013. **5**(1): p. 89-104.
- [31] Guo Bin, Huilei He, Zhiwen Yu, Daqing Zhang, and Xingshe Zhou. *GroupMe: Supporting group formation with mobile sensing and social graph mining*. in *Proceedings of the 9th international conference on mobile and ubiquitous systems: computing, networking and services (MobiQuitous' 12)*. 2012.
- [32] 胡海洋、李忠金, 胡华, 赵格华, 面向移动社交网络的协作式内容分发机制. 计算机学报, 2013. **36**(3): p. 613-625.
- [33] Yohan Chon Nicholas D. Lane, Fan Li, Hojung Cha, Feng Zhao, *Automatically characterizing places with opportunistic crowdsensing using smartphones*, in *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*. 2012, ACM: New York. p. 481-490.
- [34] Stanford Vince, *Using pervasive computing to deliver elder care*. Pervasive Computing, IEEE, 2002. **1**(1): p. 10-13.
- [35] 莫同, 李伟平, 吴中海, and 褚伟杰, 一种情境感知服务系统框架. 计算机学报, 2010. **33**(11): p. 2084-2092.
- [36] Yan Tang Shuangquan Wang, Yiqiang Chen, Zhenyu Chen, *PPCare: A Personal and Pervasive Health Care System for the Elderly*, in *Ubiquitous Intelligence & Computing and 9th International Conference on Autonomic & Trusted Computing (UIC/ATC)*. 2012: Fukuoka. p. 935-939.

- [37] Wu Jiahui, Gang Pan, Daqing Zhang, Shijian Li, and Zhaohui Wu. *MagicPhone: pointing & interacting*. in *Proceedings of the 12th ACM international conference adjunct papers on Ubiquitous computing-Adjunct*. 2010: ACM.
- [38] Du Yuan, Haoyi Ren, Gang Pan, and Shjian Li. *Tilt & touch: mobile phone for 3D interaction*. in *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing*. 2011: ACM.
- [39] Chen Longbiao, Gang Pan, and Shijian Li. *Touch-driven Interaction via an NFC-enabled Smartphone*. in *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2012 IEEE International Conference on*. 2012: IEEE.
- [40] Chen Yiqiang, Zhenyu Chen, Junfa Liu, Derek Hao Hu, and Qiang Yang. *Surrounding context and episode awareness using dynamic Bluetooth data*. in *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*. 2012: ACM.
- [41] Crowley Katie, Aidan Sliney, Ian Pitt, and Dave Murphy. *Evaluating a brain-computer interface to categorise human emotional response*. in *Advanced Learning Technologies (ICALT), 2010 IEEE 10th International Conference on*. 2010: Ieee.
- [42] Linden David EJ, *The P300: where in the brain is it produced and what does it tell us?* The Neuroscientist, 2005. **11**(6): p. 563-576.
- [43] 吴边, 苏煜, 张剑慧, 李昕, 张吉财, 陈卫东, and 郑筱祥, *基于 P300 电位的新型 BCI 中文输入虚拟键盘系统*. 电子学报, 2009. **37**(8): p. 1434-1438.
- [44] Yu Yipeng, Dan He, Weidong Hua, Shijian Li, Yu Qi, Yueming Wang, and Gang Pan. *FlyingBuddy2: a brain-controlled assistant for the handicapped*. in *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*. 2012: ACM.
- [45] Yu Chun, Yue Shi, Xinliang Wang, and Yuanchun Shi. *Watching you moving the mouse, i know who you are*. in *Proceedings of the 2012 ACM annual conference extended abstracts on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts*. 2012: ACM.
- [46] 樊银亭, 滕东兴, 杨海燕, 马翠霞, 戴国忠, and 王宏安, *基于经验感知的自适应用户界面模型*. 计算机学报, 2011. **34**(11): p. 2211-2223.

执笔人：李石坚¹，郭斌²，於志文²，赵莎¹，吴朝晖¹

(1. 浙江大学计算机学院，310027，杭州)

(2. 西北工业大学计算机学院，710129，西安)



李石坚，浙江大学计算机学院副教授，CCF 普适计算专委会委员。主要研究方向为普适计算、移动互联网、社会计算等。
shijianli@zju.edu.cn



郭斌，博士，西北工业大学计算机学院副教授。主要从事普适计算、群智感知、移动社交网络等领域研究工作。
guobin.keio@gmail.com



於志文，教授，博士生导师，洪堡学者，西北工业大学计算机学院副院长，普适与智能计算研究所所长。主要从事普适计算、移动互联网、人机交互、个性化服务等领域研究工作。
zhiwenyu@nwpu.edu.cn



赵莎，博士生，浙江大学计算机学院，主要从事普适计算方面研究工作。
szhao@zju.edu.cn



吴朝晖，浙江大学计算机学院教授，系统所所长。CCF 会士、常务理事、普适计算专委会主任。主要研究方向为人工智能、普适计算与服务计算等。
wzh@zju.edu.cn