

# 参与式感知:以人为中心的智能感知与计算

于瑞云 王鹏飞 白志宏 王兴伟  
(东北大学软件学院 沈阳 110169)  
(yury@mail.neu.edu.cn)

## Participatory Sensing: People-Centric Smart Sensing and Computing

Yu Ruiyun, Wang Pengfei, Bai Zhihong, and Wang Xingwei  
(Software College, Northeastern University, Shenyang 110169)

**Abstract** More and more mobile devices are equipped with various kinds of sensors, and wireless mobile networks, such as 4G, Wi-Fi, have been largely developed and popularized in recent years. All of these factors promote the development of participatory sensing which is also called urban sensing, user-centric sensing, mobile crowd sensing. Participatory sensing can overcome the weakness of wireless sensor networks which are expensive and hard to deploy on a large scale. The participatory sensing system utilizes embedded sensors, social networks, user mobile usage behaviors and other sources where sensing data is generated and recorded in smart mobile devices to sense the physical environment, society and personality information etc. The sensing data is collected, transported and analyzed by the participatory sensing server, and processed useful sensing information is sent to data consumers. Participatory sensing is of great significance in achieving the concept of smart city, ubiquitous computing and Internet of things. The related concepts of participatory sensing and prototypes are introduced first in the paper. Then, the current hot research fields of participatory sensing, such as the participatory sensing prototype design, sensing data related problems, incentive mechanisms, privacy preserving, malicious behaviors, and frameworks in different wireless networks are elaborated in this paper. Finally, a general research method of studying participatory sensing is given.

**Key words** participatory sensing; user-centric sensing; urban sensing; mobile crowd sensing; ubiquitous computing

**摘 要** 越来越多的无线智能移动设备集成了大量不同种类的传感器模块,与此同时无线网络也迅速普及.这些因素推动了参与式感知概念的提出与发展.参与式感知又被称为城市感知、以用户为中心的感知、群智感知.参与式感知可以解决传统无线传感网络难以大规模部署以及部署成本高昂的问题.参与式感知系统通过利用移动智能设备中的传感器、社交网络以及个人设备使用行为对参与者周围的物理环境、社会环境或者个人状态进行自主式采集、传输和分析,并做出智能化决策.这对未来实现智慧

收稿日期:2015-12-03;修回日期:2016-06-22  
基金项目:国家自然科学基金项目(61672148,61502092,61572123);国家杰出青年科学基金项目(61225012,71325002);教育部-中国移动科研基金项目(MCM20160201);辽宁省百千万人才工程项目(201514)  
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61672148, 61502092, 61572123), the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars (61225012, 71325002), the Chinese Ministry of Education-China Mobile Communications Corporation Research Funds (MCM20160201), and the Hundred, Thousand and Ten Thousand Talents Project of Liaoning Province (201514).  
通信作者:王兴伟 (wangxw@mail.neu.edu.cn)

城市、普适计算以及物联网等重大概念具有重要的意义. 首先介绍了参与式感知相关概念、理论以及相应的应用原型系统; 然后介绍了参与式感知相关研究前沿热点, 包括参与式感知的原型设计、感知数据处理、激励机制、隐私保护、恶意攻击以及不同移动网络的问题等; 最后给出研究参与式感知的一般方法.

**关键词** 参与式感知; 以用户为中心的感知; 城市感知; 群智感知; 普适计算

**中图法分类号** TP391; TP393

参与式感知<sup>[1]</sup>指通过移动设备形成一个交互式的、参与式的传感网络, 能够让普通用户和专家用户采集、分析和分享本地感知信息. 参与式感知是无线传感网络(wireless sensor networks)的延伸和拓展, 传统的无线传感网络由于设备昂贵、部署困难等原因很难大规模应用, 而参与式感知提供了一种全新的、廉价的且易于部署的模式和方法来解决这些问题. 参与式感知使感知的中心由传统传感器节点转移到人和智能移动设备上, 人和智能移动设备有机组合成为了类似无线传感网络中具备传感器模块的设备节点. 参与式感知应用一般不需要预先部署特殊的基础设施, 这大大节省了开支并适合应用的大规模部署, 同时也是与传统无线传感器网络最大的区别.

参与式感知概念的提出和发展主要得益于移动

智能手机的普及, 嵌入了丰富传感器模块(例如 GPS、加速度传感器、方向传感器、压力传感器、光线传感器等)的移动智能手机为参与式感知提供了设备支持. 除智能手机以外, 各种具备通信和传感功能的平板、PDA、智能手环、手表以及眼镜等设备均可以作为感知节点以不同组网方式加入到参与式感知应用中, 并提供相关感知数据.

目前, 参与式感知得到了一定的应用, 如噪音污染监测<sup>[2]</sup>、行车路线规划<sup>[3]</sup>以及环境污染监测<sup>[4]</sup>等. 参与式感知应用与传统无线传感器网络相比更加强调了人在感知过程的参与以及人对感知的决定性作用. 基本的参与式感知过程如图 1 所示, 参与者通过智能设备组成的传感网收集感知信息, 这些感知信息上传给感知服务器后经过分析处理获得有意义的整合感知结果并将其分享给相应的数据消费者.

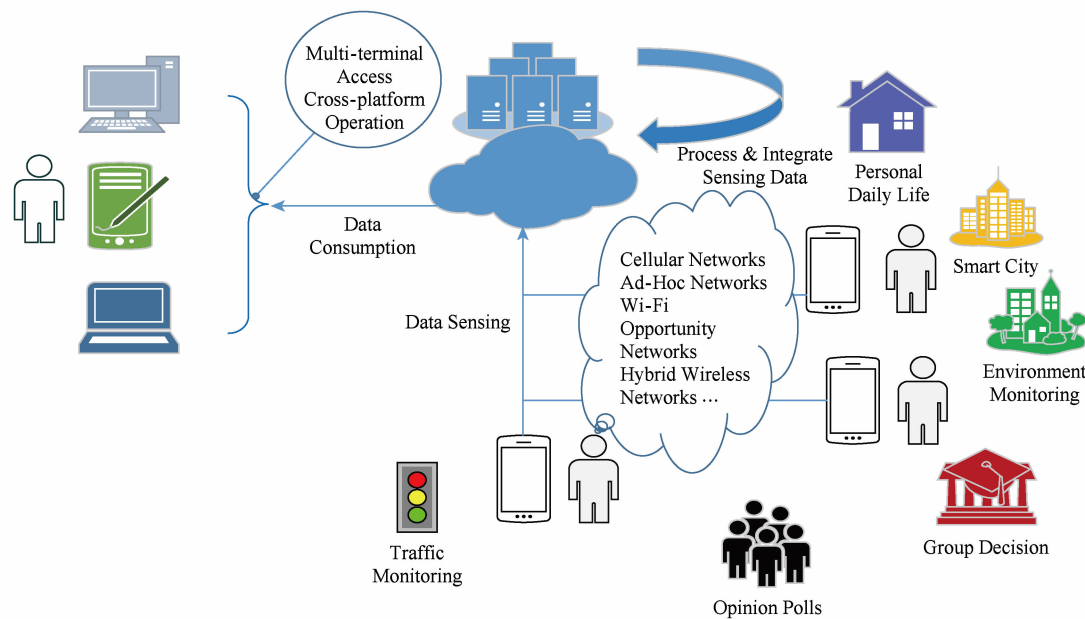


Fig. 1 Basic framework of the participatory sensing application  
图 1 参与式感知基本框架

参与式感知以人为中心, 用户出于个人爱好、经济、兴趣等原因有意识地主动响应感知需求, 这是参与式感知与机会感知(opportunistic sensing)最大的区别<sup>[5]</sup>. 机会感知中数据的采集是通过用户无意

识的感知上传获得的. 另外, 在参与式感知中用户既可以作为感知数据的提供者也可以作为数据的消费者, 这一点是参与式感知和众包(crowdsourcing)最大的区别<sup>[6]</sup>. 在众包

模式中,系统中所完成的任务一般不能被参与者所消费.参与式感知对未来实现普适计算和智慧城市等概念重大意义,因而近几年来引起了科研人员的密切关注.美国加州大学洛杉矶分校的嵌入式网络感知中心(Center for Embedded Networked Sensing, CENS)研究中心于2006年提出了这一设想,并将之称为“参与式感知”<sup>[1]</sup>.从2009年以来,该中心已经将主要精力投入到参与式感知技术研究中.在CENS研究中心2011年年度进展报告<sup>[7]</sup>的Research部分,参与式感知方面的内容占了将近一半的篇幅;在中国计算机学会CCF YOCSEF确定的2011—2012年度活动计划中,参与式感知(participatory sensing)被列为2011—2012年度10个学术报告会主题之一.2014年“ACM中国会议委员会成立与群智感知网络研讨会”在清华大学举行,会议围绕“群智感知网络”主题进行讨论,分析了主动出发到无意识配合等感知特点;同年,CCF YOCSEF举办了“群智计算研究进展”相关学术报告会,总结了参与式感知和众包等概念,分析了社会感知这一高级感知阶段,并从产业角度研究如何将其应用到实际系统中.2016年中国计算机大会举办了“群智感知计算前沿”专题论坛,对群智感知系统部署与应用、隐私保护机制、激励等问题进行了热烈讨论,总结了群智感知未来发展方向.IEEE和ACM相关领域顶级学术会议陆续发表了一些与参与式感知、群智感知相关的学术论文并组织举办了相关研讨会,例如International Workshop on Mobile Sensing, Computing and Communication(MSCC),International Workshop on Crowd Assisted Sensing(CASPer),Workshop on Crowdsensing Methods, Techniques, and Applications(CROWDSENSING)等.鉴于参与式感知在国外已经取得了一定的成果,国内尚处于发展阶段,为了深入理解参与式感知的概念和发展趋势,并促进国内在该方向上的研究,综述参与式感知研究进展工作具有重要意义.

1 参与式感知应用现状

参与式感知应用是参与式感知理论研究的基础也是研究重点.参与式感知应用根据感知目的和感知范围的不同划分为公共感知应用、社交感知应用以及个人感知应用3类.

1.1 公共感知应用

公共感知应用指通过智能移动设备对公共环境

进行感知的应用,公共环境包括但不限于噪音、道路情况、温度、空气湿度、天气状况、二氧化碳、PM2.5等.目前大部分参与式感知应用都是围绕公共感知进行的.

文献[2]提出了第1款基于移动智能设备开放且廉价的城市噪音监测应用EarPhone,其主要用于城市道路噪音污染的监测.参与者通过手机感知周边噪音信息,这些噪音数据通过智能设备进行评级并转化为噪音等级数据,感知服务器对参与者上传的噪音等级数据处理后根据相关地理位置信息将感知服务器处理后的噪音监测信息显示在电子地图上并分享给数据消费者.EarPhone也研究了在噪音监测背景下的众包模型、不完整数据以及随机样本数据所产生的其他问题等.EarPhone可以提高人们对噪音污染的关注并协助寻找解决方案.

交通拥堵是大部分城市难以解决的问题,测量定位拥堵的位置,并通知其他用户绕过这些拥堵是缓解拥堵的一种解决方式.文献[3]提出并实现了一款名为V-Track的出行时间估计应用,并强调了手机中能量消耗的敏感性和感知数据的不稳定性.然而GPS模块的长时间使用会导致手机电池很快耗尽,为了解决该问题作者提出了利用低能耗但高噪音的信号(例如WiFi信号等)去估计用户出行轨迹和时间.V-Track使用一种基于隐Markov的地图匹配机制和时间估计方法通过插入稀疏数据并基于用户偏好和出行时间去识别最适合的行进道路.同时,作者也通过多种方式验证了其方法的有效性,并对WiFi和GPS模块基于能源消耗的最佳采样策略进行了详细的研究和探讨.

文献[8]设计实现了一款名为Gas-Mobile的空气污染监测应用,原型如图2所示.其通过外置空气检测感知模块对空气环境进行监测,并考虑了参与

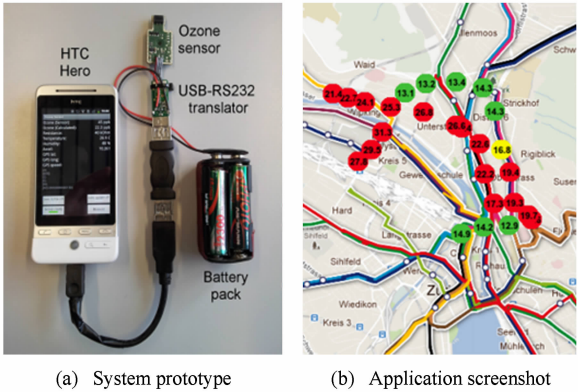


Fig. 2 Prototype of gas-mobile

图2 Gas-Mobile 空气监测应用

式感知中能耗和花费等问题. 为了保证监测数据的准确性, 部署空气污染监测器在政府监测基站附近, 进行传感数据校正. 同时, 作者也分析了设备的移动对于传感器感知准确性的影响.

另外还有很多与公共感知相关的应用, 例如, 文献[9]利用手机摄像头设计实现了一种寻找商场特价商品应用 LiveCampare, 其通过商品条形码来确定商品, 利用位置信息来确定商场并设计了相应的激励机制; 文献[10]利用手机设计了一个价格信息共享应用 Mobishop, 并在手机端实现了光学字符识别(optical character recognition, OCR)模块处理照片信息; 文献[11]利用手机内置麦克风开发了一款噪音地图应用 Laermometer, 除了噪音数据还添加了参与者关于噪音等级的主观评论信息; 文献[12]开发了一款名为 MobGeoSen 的应用来监控地区环境和个人状态; 文献[13]设计了基于参与式感知的公交时间预测应用, 并做了长时间的模拟跟踪实验.

1.2 社交感知应用

社交感知指参与者的感知信息在一个社交群组中分享, 社交感知应用收集和分享感知信息给他的朋友、社交群组或者圈子.

文献[14]设计并实现了一款名为 CenceMe 的社交感知应用, 社交群组中的成员通过一种安全的方式来分享他们的日常感知信息. 这种感知信息可能是用户的活动(走路、遇到朋友等)、情绪(开心、快乐、悲伤等)或者所在环境(吵闹、热、高海拔等)等. CenceMe 将移动感知边界拓展到社交网络的同时提高了社交网络的连通力和感知能力. 应用包括嵌入在用户手机中的物理传感器、虚拟软件传感器和数据分析引擎 3 部分. 物理传感器可以感知加速度、重力、声音和视觉等, 虚拟软件传感器捕捉用户的在线社交数据等. CenceMe 通过上述感知模块和分析引擎可以对不同的好友展示自己不同的感知信息, 这些服务包括: 生活方式、社交互动、位置信息等.

文献[15]设计实现了一款利用手机摄像头寻找潜在“有趣”事件的应用 MoVi, 并通过 Nokia 手机和 iPod Nano 实现. MoVi 主要包括 4 个模块: 群组管理模块(group management module)、事件监测模块(event detection module)、角度选择模块(view selection module)和事件分片模块(event segmentation module). 群组管理模块基于社交上下文的相关性分离出一个移动设备集合; 事件监测模块去识别社交上“有趣”的事情; 角度选择模块从群组中选择最好的角度去探测该“有趣”的事情; 事件分离模

块获得事件触发的时间戳, 扫描传感器测量的数据去辨别事件的开始和结束.

文献[16]设计了一款名为 Apollo 的事件发生探测应用. 作者通过利用 Twitter 用户的微博数据作为感知数据来源, 利用社交关系图谱基于期望最大化算法进行了事件发生的识别. 其提出了人联网(Internet of people, Iop)可能是未来最大的感知网络, 而且人也可以作为一种高级传感器来收集数据和感知环境. 作者将社交网络作为传感网络、将人作为传感器并解决了感知数据可靠性问题. 最后, 文章考虑了微博数据的单向关注的特征, 利用期望最大化算法进行事件可能发生的概率估计.

除此之外, 还有其他一些基于参与式社交感知的应用. 例如文献[17]提出了一种个人环境影响报告应用 PEIR, 可以将感知信息分享到 Facebook; 文献[18]开发了一种在社交网络中探索灾难推断的系统原型, 通过社交网络数据预测灾难发生, 并进行了实验模拟来验证应用的有效性.

1.3 个人感知应用

个人感知应用关注用户个人信息的收集、监测和决策处理. 个人感知应用收集用户的信息包括生活信息、物理活动信息、生理信息、地理位置信息等. 这些信息通过感知服务器或者移动设备进一步处理后为个人服务.

文献[19]设计实现了基于手机麦克风的个人感知应用 SoundSense, 其是一个定量感知声音事件的框架, 并在 iPhone 手机上予以实现. 该架构和算法通过使用监督和无监督学习技术来进行声音分类(例如音乐、声音等)并发现新奇的声音事件推送给个人用户. 通过实践评估证明 SoundSense 可以有效识别日常生活中有意义的新奇声音事件.

文献[20]提出了一款名为 NeuroPhone 的神经信号感知应用, 该应用可以通过神经信号控制手机操作, 图 3 是 NeuroPhone 系统的示意图. 传统检测



Fig. 3 Prototype of NeuroPhone  
图 3 NeuroPhone 原型系统



神经信号的设备一般非常昂贵、体积大且容易损坏,而 NeuroPhone 通过一种便宜且现有的无线脑电图(electroencephalography, EGG)手持设备替代神经检测设备控制手机. 开发了用大脑控制的、类似 P300 拼写脑机界面(brain-computer interfaces)的电话本应用. 该电话本应用打开后闪现一系列联系人的信息,一个 P300 脑电位会在闪现的人与用户想联系的人一致时发出. 从手持设备发出的 EGG 信号通过无线方式传输给手机,并可以从噪音中分离出来,手机接到信号后该联系人的电话号码就自动拨出. NeuroPhone 开辟了脑机交互的新领域,作者还讨论了该应用未来的研究方向.

文献[21]提出了一款名为 EyePhone 的眼镜定位追踪应用,其也是一种不需要手操作就可以进行交互的移动手机应用. EyePhone 通过手机摄像头追踪用户眼睛的移动来进行手机的操作. 程序通过摄像头跟踪眼睛并推断它的位置,通过眨眼睛来触发鼠标点击事件. EyePhone 应用中的追踪算法包括 4 个阶段:

1) 阶段 1 是眼睛识别,通过边缘检测识别眼球所在位置;

2) 阶段 2 是眼部模板创建,产生一个用户开放眼球的模板,当用户第 1 次使用眼部检测算法的时候产生 1 个用户开放眼球模板,该模板会被永远存储;

3) 阶段 3 是基于模版匹配的眼部追踪的过程,模版匹配函数计算开放眼部模板和搜索窗的相关度;

4) 阶段 4 是眨眼检测,基于阈值技术通过模版匹配函数返回归一化相关系数,与此同时为了解决摄像头离人的远近问题,作者用了 4 种阈值进行计算.

还有其他个人感知应用,例如文献[22]实现了一款名为 AndWelness 的个人日常生活感知应用,其收集定义的数据、文字信息、媒体信息和其他感知信息(如地理位置、活动推测信息等)等;文献[23]提出了一款名为 UbiFit Garden 的健康应用,开发了单独的感知模块来监测用户的日常习惯,并激励用户进行有效频率的健身运动;文献[24]提出了一款长期健康管理应用 Balance,用户可以输入饮食情况,并开发了感知模块测量氧气消耗进而感知个人卡路里的消耗;文献[25]提出了一款名为 SPA 的手机辅助慢性疾病自我管理应用,用户可以自我监测自身的生理体征参数进而达到治疗慢性病的作用;

文献[26]提出了一款名为 HyperFit 的个人营养健康和锻炼管理应用,其基于互联网并提供一个虚拟教练来进行实际指导;文献[27]开发了名为 HealthAware 的健康管理应用,通过使用者对食物拍照可以给出与该食物相关的信息;文献[28]提出了一款基于姿势交互的文档应用 Pacer;文献[29]提出了一种基于蓝牙的个人追踪系统;文献[30]提出了一款名为 UbiqLog 的日常生活记录原型应用;文献[31]提出了基于手机的高血压自我管理报告应用系统;文献[32]提出了基于手机的增强现实问答导航系统;文献[33]提出了基于上下文感知的无线传感器网络访问应用 CONSORTSS;文献[34]提出了名为 Cam 的手机摄像头文档处理应用.

大部分参与式感知应用都可以归纳为本节中 3 种类型,随着参与式感知的发展,相信会有更多新颖实用的参与式感知应用被提出和实现.

## 2 参与式感知研究的热点问题

参与式感知研究的热点问题主要集中在参与式感知原型应用研究、感知数据相关研究、激励机制研究、隐私保护研究 4 个方面.

### 2.1 参与式感知原型

参与式感知原型是参与式感知研究的基础,因此开发和研究新的参与式感知原型对参与式感知研究意义重大. 由于传感器决定了感知能力,所以其成为了研究参与式感知原型的基础. 为了说明参与式感知应用原型研究方向,本节基于传感器特征将参与式感知原型研究分为设备自身传感器感知原型研究、外置传感器感知原型研究以及人智传感知原型研究 3 类(参与式感知原型研究归纳总结如附录 A 所示).

#### 1) 设备自身传感器感知原型的研究

从附录 A 中表 A1 可以概括所有的参与式感知应用都无一例外用到了智能手机的内置传感器设备. 设备自身配备的传感器可以满足很多感知需求,表 1 列举了近 3 年主流手机所配备的传感器设备情况.

通过表 1 可以看出随手机的更新换代越来越多的传感器被集成在移动设备中,这可以更加广泛地进行感知. 目前,已经有很多利用移动设备自身传感器构建的参与式感知原型,基于手机自身传感器应用的研究主要集中在 2 方面.

多传感器综合原型研究:使用 2 个以及 2 个以上的传感器模块来完成某一特定感知的应用研究.很多参与式感知应用都使用了多个传感器,例如基于地理位置的感知都需要使用定位模块和其他 1 个或多个传感器模块.

内置其他模块拓展原型研究:将手机中原本非传感器模块当作传感器模块进而拓展感知范围的参与式感知原型研究,目前这方面的研究相对较少.例如,WiFi 模块和蓝牙模块原本是通信模块,主要用

于无线通信.然而,可以通过 WiFi 模块或者蓝牙模块来探测周围的 WiFi 或者蓝牙信号强度、感知周围的设备等.利用这些非传感器模块进行感知可以拓展参与式感知应用原型,例如利用 WiFi 信号强度进行室内定位<sup>[35]</sup>;苹果最新推出的手机 iPhone 6S 拥有压力感应屏幕,其可以感应屏幕所受压力,这也为参与式感知应用提供了研究的新的感知手段.手机中其他模块拓展的新特征可以赋予手机更多的潜在感知能力,进而拓展参与式感知原型研究.

Table 1 Sensors in Mainstream Mobile Phones  
表 1 主流手机传感器配备情况

Phone Model	Release Year	Specific Sensors	Sensors All Phones Have
iPhone 5	2012	None	
iPhone 5S	2013	Fingerprint sensor	
iPhone 6	2014	Fingerprint sensor, barometer	
Samsung S5	2014	Fingerprint sensor, heart rate sensor	Camera, microphone, Wi-Fi module, Bluetooth, accelerometer, gravity sensor, light sensor, distance sensor, localization module (GPS etc), compass, gyroscope
Mi 4	2014	Hall sensor, Barometer, infrared sensor	
iPhone 6S	2015	Fingerprint sensor, Barometer, 3D touch	
Samsung S6	2015	Fingerprint sensor, heart rate sensor	
Huawei Honor 7	2015	Fingerprint sensor, Hall sensor	

2) 外置传感器感知原型的研究

由于一些传感器的客观状况(体积过大、过于昂贵或者精度不足等)导致其很难集成到手机中,影响了参与式感知系统原型的研究.例如,如果要检测空气中 PM2.5 的数值,必须结合 PM2.5 传感器,然而 PM2.5 传感器并不是手机需要的传感器,并且 PM2.5 传感器体积大且昂贵.但是,未来随着科技的进步可以使这些传感器集成到手机中或者变得小巧易于携带.因此,外置传感器感知原型的研究对未来参与式感知意义重大.一般而言,这些外置模块与手机通过无线或者有线的方式进行连接通信.

外置传感器传感应用的研究将会是未来参与式感知原型研究的主要方向之一,第 1 节中很多感知原型都使用了外置传感器.随着传感器的种类逐渐丰富、体积逐渐变小、成本逐渐降低,越来越多的外置传感器集成到手机中.例如气压传感器已经集成到相当多的手机中.基于外置传感应用原型必定会在研究的同时遇到一些难以解决的问题,从而涌现新的研究领域和研究方向.

3) 人智传感原型的研究

人智传感(human intelligence sensing)指在参与式感知环境下,人充当传感器无法充当的传感器

感知环境等信息并将感知信息通过移动智能设备上 传共享并进行智能化决策的过程.

在 2014 年的第 13 届传感网络数据处理国际大会(International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN)中一个重要的议题为“All Things Sensors”,会议提出了万物皆可以作为传感器的概念,这拓展了传感器的边界.其中文献[16]提出了“Using Human as Sensors”的概念,并通过 Twitter 微博社交数据设计并验证了基于期望最大化和社交关系的事件监测算法,建立了感知应用原型并进行了实验验证.在此之前,也有很多关于利用微博数据进行事件监测的算法提出和建立,其中包括对自然灾害的监测预警等<sup>[36-40]</sup>.这些人智传感应用和算法的提出为人智传感原型的研究和开发提供了基础.

目前,人智传感应用原型的研究处于上升阶段.由于人的更加高度参与(趋利性、自私性、恶意等)导致其与其他参与式感知应用原型相比更加困难,这给人智传感原型的研究提出了更大的挑战.本文归纳了人智传感应用原型研究与其他参与式感知应用原型研究不同之处.

① 感知数据语义获取.人产生的感知数据可能

是文字、影像和图像等形式,然而这些数据很难被识别和使用。为了使数据满足参与式感知应用的需求,往往要将这些数据“翻译”成为人智传感应用所需要的语义,例如二元数据、模糊数据等。感知数据语义的获取与自然语言处理、图像识别、视频处理等方面息息相关。

② 感知数据相对性。由于人的参与给数据的真实性提出了巨大的挑战。普通传感器通过物理感知进而获得相应数据,然而人所感知的数据经过大脑神经处理,无论是由于人的主观感受不同、自私、恶意、趋利亦或其他原因,这都将影响所获得感知数据的真实性。以主观感受为例,每个人对相同环境的感知是有主观性的。例如同样对于 20℃ 的环境温度,住在北极附近的人可能感觉很温暖然而住在赤道附近的人却觉得比较凉爽。感知数据的相对性需要科研学者进一步通过实际的案例和感知模型进行分析,设计出合适的算法或者机制解决该问题。

与此同时,还有很多参与式感知应用既使用手机内部传感器也使用外置的其他传感器,或强调了人的参与。例如人和 GPS 模块可以组成基于地理位置的人智传感应用;内部和外部传感器协同可以组成类似 BikeNet<sup>[4]</sup> 的参与式感知应用等。相信未来多种传感器混合运用、交叉传感也会是未来研究热点。

## 2.2 感知数据处理

感知数据是参与式感知的主要处理对象,感知数据经过采集、分析、上传、再发送给数据消耗者。在整个数据处理过程中,感知数据经历了数据采集、数据分析、数据上传和数据分发 4 个阶段,这 4 个阶段也是参与式感知中感知数据研究的重点。本节将结合参与式感知的特点详细阐述这 4 个方面的相关热门研究问题和成果。

### 2.2.1 参与式感知数据采集

由于感知数据是参与式感知的感知源头,如何进行有效数据采集是一个重要的研究方向。研究数据采集可以提高参与式感知应用的用户参与度、提升数据采集效率、提高数据质量、减少资源消耗等。很多数据采集问题在传统传感器网络中已经有比较多的研究,本节主要阐述参与式感知中数据采集与传统传感器网络不同的部分——参与者招募。

与传统传感器网络不同,参与式感知环境下感知节点并不能按照系统需要的情况进行固定部署。人与手机有机组成感知节点按照人的自身运动规律进行活动,这导致解决如何通过参与者获得参与式

感知应用需要的数据成为了富有挑战的问题。数据采集问题在参与式感知环境下转换为特定参与式感知用户的招募问题,通过什么方式来招募什么样的用户、如何高效地招募用户、如何尽可能节约资源等都成为参与式感知数据采集相对于传统传感器网络不同的研究方向。

文献[41]提出了一种基于移动环境上下文的参与者招募机制,该机制通过考虑用户对该任务的合适程度、地理空间位置和用户习惯进行用户招募;文献[42]提出了一种在参与式感知下的数据收集招募框架,该框架可以让参与式感知组织者基于地理位置、时间特点和用户喜好去识别感知合适的参与者进而进行招募,并考虑了系统的效用问题;文献[43]提出的用户选择方法,在一定范围内选择低价但是高质量的数据提供者,该方法主要将参与者选择问题形式化为一个多目标背包问题并给予解决;文献[44]提出了一种基于社交的应用无关的参与式感知信任框架,其使用模糊逻辑来对参与式感知用户进行评分;文献[45]提出了一种高效节能移动感知系统(energy efficient mobile sensing system, EEMSS),其利用多层传感器管理策略识别用户状态和监测状态的变化。

一般来说,招募用户可以从是否愿意提供帮助、数据质量、响应速度、服务质量、用户典型程度、系统开销、用户花费等方面来进行考虑。为了让用户更加主动地提供感知数据,越来越多的学者关注于参与式感知系统中激励机制和算法的研究和设计,激励机制将在 2.3 节做详细介绍。

### 2.2.2 参与式感知数据分析

参与式感知数据分析指参与式感知应用获得感知数据之后,根据参与式感知应用的目的对数据进行分析和处理的过程。

由于人的参与引起感知数据不准确(例如传感器放置不准确、用户个人爱好等)会影响数据的分析,如何鉴别数据的真实性和整合冲突数据是一个亟需解决的问题;由于感知用户的稀疏或者用户参与度不高会导致感知数据不完整,有时需要通过相关理论或算法补足数据;参与式感知所获取的数据形式有时与传统传感器感知的数据不同,参与者上传的感知数据可能是文字、图片、视频或者是对某种事物的评分、评级等主观信息等。以上所有原因导致需要合适的分析算法来对这些数据进行处理。

目前数据真实性鉴别和数据整合已经有了相关研究,文献[46]提出了一种基于数据来源独立性的

方法来整合冲突数据,其主要运用贝叶斯分析来研究数据源的独立性,设计了迭代算法检测独立性并从冲突数据中寻找真实数据;文献[47]通过研究3种潜在的概率模型解决数据冲突并提高数据准确性;文献[48]提出了一种在分布式感知系统中的广义决定聚合(generalized decision aggregation, GDA)算法,考虑了数据融合和感知节点的可靠性;文献[49]提出基于Gompertz函数的声望框架来计算数据的真实性,作者通过一个参与式感知的噪音检测应用实现了该算法并与Beta声望模式进行对比,结果显示基于Gompertz函数的声望系统的计算效果优于Beta声望模式3倍;文献[50]提出了一种基于社交群组的贝叶斯聚合模型,其利用用户的社交群组属性并结合贝叶斯理论进行数据整合,实验证明相对于同样数量标签的其他聚合算法该模型的数据准确率提高8%。

对于数据稀疏问题目前也有一些解决方案,文献[51]提出了一种基于Kriging技术对数据进行实时补全的算法,通过该算法可以对空气污染的数据进行补全;文献[52]提出了一种基于高斯-马尔科夫随机场与Kriging技术结合的数据处理方法,提高了算法的计算速度并减少了应用存储需求,但是没有考虑多变量的时间相关性;文献[53]提出了一种参与式感知应用下的数据差值模型,并通过空气质量检测系统进行实际实验。目前解决数据稀疏问题主要是通过利用Markov随机场、高斯分布、Kriging技术、主成分分析(principal component analysis, PCA)、独立成分分析(independent component analysis, ICA)方法进行补全解决。联合利用2种及2种以上方法或理论进行数据补全不失为一种好的解决方案。

在参与式感知系统中对于感知数据的主观数据分析很重要,这与神经信息处理类似。神经信息处理后的感知数据成为应用所需要的源数据,例如二元数据、模糊数据、概率数值以及其他可以用来进行后续处理的数据。文献[16,54]通过定义的二元数据来处理人感知的数据,并通过感知数据提出了相应的事件发生算法;文献[55]设计了一套基于模糊逻辑的医疗保健物理性能指标,用于检测老年人的健康情况;文献[56]基于DietSense原型研究了参与式感知中图像处理和分类的方法,其阐述了主色分析、边缘检测、颜色直方图等方法在参与式感知应用中的应用。本文认为未来这方面的研究主要集中在相应参与式感知应用中感知数据的有效表达,以及进一步的数据分析。

随着感知数据的不断增加,参与式感知应用中的感知大数据分析越来越受到重视,如何在感知大数据中获得有效信息成为重要的研究方向。文献[57]提出了一种基于半监督学习方法的实时空气质量推测算法,结合PM<sub>2.5</sub>基站观测信息、交通信息、人的移动信息、道路网络信息以及兴趣点(point of interests, POIs)信息等进行计算;文献[58]利用城市感知大数据提出了一种计算任意地点实时空气质量的算法和一种基于最小熵模型进行空气质量观测基站最优选址的算法。目前大部分应用集中在对自然环境的监测,未来随着其他领域的发展会有更多不同种类的大数据分析,例如感知医疗大数据、车联网大数据等。

### 2.2.3 参与式感知数据的上传与分发

大部分的参与式感知应用均部署在移动蜂窝网络中。由于下一代无线互联网可能会与目前使用的无线网络不同,或在某些特定情况下蜂窝网络无法工作,网络环境的不同对参与式感知数据的上传与分发提出了挑战。

从网络模型来看,参与式感知属于应用层内容。由于参与式感知所属网络层级较高,这导致参与式感知添加的新特性可以为其下面层级所使用,下面层级的特征也会影响参与式感知的效果。

目前,相关学者已经基于具体网络对参与式感知数据上传和分发进行了研究。例如文献[59]在提出激励算法的同时,考虑了多种网络形式,除了一般通信方式以外,其还考虑了广泛的近距离无线通信方式(例如蓝牙、Zigbee, WiFi等);文献[60]提出了一种在参与式感知框架下的基于时延容忍网络(delay tolerant network, DTN)的数据收集路由算法,其主要应用于灾难应急等情境,该算法可以有效减少感知数据上传过程的时延;文献[61]提出一种支持参与式感知的灾难应对系统的数据分发框架,该框架可以通过几个广泛使用的度量作为输入并通过动态组合这些度量做出智能决策。

### 2.3 激励机制

人的理性(趋利性)导致其总希望获得最大的效用,然而在人获得最大效用的同时系统往往无法达到令人满意的效果。即使参与式感知应用选择了合适的用户招募对象,如果该用户由于其理性选择拒绝参加任务,那么依然会导致任务难以完成。为了保证参与式感知应用的正常运行,设计合理的激励机制或算法提高用户的参与度十分必要。

由于用户的参与程度直接决定了参与式感知应



用的感知效果,近年来相关学者对参与式感知应用的研究越来越集中在该领域. 本文将参与式感知下的激励机制主要划分为基于拍卖的激励机制、基于博弈的激励机制以及其他类型的激励机制.

2.3.1 基于拍卖的激励机制

拍卖原理广泛应用于参与式感知激励机制的研究与设计中,拍卖原理有效描述了参与式感知应用

和用户之间的交互行为并为激励参与者提供数据提供了强有力的理论依据. 拍卖主要分为 2 种模式,即常规拍卖和反向拍卖. 简而言之,常规拍卖是买家出价,价高者得;而反向拍卖是卖家出价,价低者得. 在参与式感知中主要应用反向拍卖,参与式感知服务器作为数据购买者,参与者作为数据提供者,反向拍卖的流程主要如图 4 所示:



Fig. 4 Flow chart of reverse auction  
图 4 反向拍卖流程

最早将拍卖机制运用到参与式感知的是文献[62],其设计了参与式感知环境下基于反向拍卖的动态价格激励机制,用户可以提供一个合理的投标价格将他们的感知数据卖给感知服务提供者,服务器根据投标价格决定是否购买该感知数据,该激励机制可以减少服务器的激励消耗、提高系统的稳定性;文献[63]更加具体化了文献[62]中的激励算法,其通过考虑地理位置进行改进,基于预算限制和地理位置因素提出了一种周期性的反向拍卖的激励机制,通过贪婪算法选择一个有代表性用户子集;文献[64]提出了基于反向拍卖提出了一系列手机感知的激励方法 TBA,TOIM 和 TOIMAD,这 3 种算法都具有计算高效、理性、高收益且极具竞争力的特征,其中 TBA 机制追求平台效用最大化,而 TOIM 和 TOIMAD 机制则实现了用户真实报价的目的;文献[65]提出了一种基于反向拍卖的最优激励驱动的参与式感知应用设计,即最小化满足参与者要求也满足数据消费者既定质量的感知数据要求;文献[66]提出了一种基于 Laypunov 的 VCG 拍卖规则的激励机制,其研究了参与者的选择问题,最大化社会利益并保证了社交用户的长期参与.

2.3.2 基于博弈的激励机制

博弈论是一种研究竞争或者斗争现象的数学理论和方法. 利用博弈论考虑纳什均衡或者帕累托最优,可以研究用户的自私行为. 通过博弈论建立参与式感知环境下的博弈模型,设计博弈规则,寻找可以激励用户行为的方法,进而可以激励参与者并提高参与式感知应用的性能.

文献[59]提出了一种以廉价为基础的博弈激励机制,该机制可以激励自私节点的参与并最大化他

们的奖励,与此同时根据描述的问题寻找纳什均衡和帕列托最优;文献[67-68]提出了一种基于斯塔克伯格博弈的激励机制,其设定只有当有足够用户参与上传数据时参与式感知服务器才能够获得一定的收益,并通过子博弈精炼纳什均衡证明该机制的稳定性和有效性;文献[69]将参与式感知应用分类为以服务为中心和以用户为中心 2 类,并针对以用户为中心的参与式感知应用提出了一种基于斯塔克伯格博弈的激励机制.

2.3.3 考虑其他限制的激励机制

除了基于拍卖和博弈的激励方式之外,还有一些基于其他原理的激励机制. 这些激励机制一般考虑了参与式感知中的特殊情况,如强调资源有限、用户隐私保护等.

文献[70]研究了参与式感知应用中图像或者视频的处理过程,强调了使用蜂窝网络上传数据是不可忽略的消耗,并提出了资源敏感情境下的激励机制;文献[71]提出了 2 种隐私敏感的激励机制促进用户的参与,利用请求令牌 (request token) 2 种机制均保证用户提供数据获得信用且不泄露自身的隐私信息,同时也防止用户滥用系统获得信用,文献[72]改进了该激励机制.

目前,由于一般的激励机制已经被相关科研学者广泛研究,参与式感知激励机制的设计已经逐渐从考虑利益最大化转换为基于某一种或者多种特殊因素的考虑进行激励机制设计.

2.4 隐私保护

各种传感器的监测为参与式感知中用户的隐私保护提出了要求. 传感器可以感知的信息包括时间、位置、文字、图像、视频、音频、加速度、环境数据、

个人体征信息等. 目前隐私保护的方法主要包括用户个人偏好设定、假名、空间伪装、数据扰动、数据聚合等.

用户个人偏好设定是指用户通过在参与式感知应用设定自己隐私水平, 进而达到隐私保护的目的. 文献[73]在应用 Cenceme 中使用了该策略, 然而这种策略并不有效. 因为一旦设置为较高的隐私保护级别会导致参与者无法上传有效感知数据进而影响感知系统的决策.

假名是利用非真实信息来隐藏用户的相关信息, 假名的使用可以保证参与式感知应用中用户的相关隐私信息. 其中, 文献[74]提出了一种名为 IncogniSense 的声望匿名框架, 其可以保护参与式感知系统中用户的声望信息不被他人获取; 文献[75]和文献[76]也利用假名提出了相应的声望保护算法; 文献[77]提出了一种保护地理位置隐私的方法, 其利用基于属性的加密方法并假设服务提供者不是可信的; 文献[78]提出了一种基于假名且非中心化的隐私保护机制并通过真实 GPS 数据进行了验证, 证明该方法可以在给定的距离参数下 100% 隐藏位置信息.

空间伪装主要通过  $K$  匿名来实现.  $K$  匿名的核心思想是建立  $K$  个参与人参加的群组, 报告他们分享的一般属性, 让彼此之间不能够被分辨. 不同的方法可以用来寻找合适的  $K$  个人的群组, 这些方法主要包括泛化和扰动. 泛化是指在精度可以容忍的情况下将数据模糊处理, 提供更少细节的数据; 扰动是指将数据通过某种算法扰乱更改为某种新的数据. 镶嵌(tessellation)是泛化的一种常见形式, 其将地理位置划分为多个区域(tiles). 例如文献[79]基于微聚合(microaggregation)提出了参与式感知环境下的  $K$  匿名位置隐私保护模型, 并将每个区域中心坐标作为所在该区域节点的坐标; 文献[80]提出一种基于位置敏感的 Hash 算法将用户的位置信息加入一个群组, 该群组包含最少  $K$  个用户. 然而泛化无法解决同质化攻击问题<sup>[81]</sup>, 即当  $K$  个用户的待隐藏属性是单调同质时, 会导致  $K$  匿名失效.  $I$  多样性被提出解决该问题, 在每个用户群组中即至少需要  $I$  个不同的数据值隐藏敏感数据. 其中, 文献[79]基于  $I$  多样性提出了 LD-VMDAV 隐私保护机制.

数据扰动通过在手机端添加人工噪音故意影响传感器采样, 其目的是整体数据趋势不受影响的情况下不透露个人信息数据. 噪音的特点必须

严格筛选, 因为该噪音需要有效扰乱个人感知数据并保证感知数据的整体统计趋势没有被影响. 文献[82]提出了基于客户端数据扰动的隐私保护机制 PoolView, 其通过使用重建技术计算聚合信息的倾向; 文献[83]提出一种隐私加强的独立状态扰动(privacy enhanced state-dependent perturbation, PESp)机制, 其不仅可以重建整体统计数据而且还可以为个人提供良好的隐私保护, 其防止所有用户使用同一个噪音分布扰动, 使恢复个人数据变得更加不可能.

数据聚合指将多个感知数据进行聚合使单个数据无法获得进而达到隐私保护的目的. 文献[84]提出了参与式感知应用下基于数据聚合的隐私机制 PriSense, 其不依靠中心的服务器来进行数据保护而是通过多个参与者的共同合作来进行保护. PriSense 包括 2 个部分:

1) 加聚合函数. 通过加聚合函数参与者将自己的数据分为确定的份数, 参与者然后随机选择  $n$  个其他节点将 1 个独一无二的的数据分片发送过去, 最后每个节点将自己剩下的数据分片和从他人那里获得的数据分片发送给聚合服务器;

2) 分片组合和混合技术, 通过该技术可以数据还原并可以支持非附加聚合函数的计算, 例如求最大值、最小值、中位数、直方图或者百分比等.

## 2.5 恶意行为检测

除了防止用户隐私泄漏被恶意利用以外, 参与式感知环境下还要防止其他各种类型的恶意攻击行为.

这些恶意行为主要是由于 2 种原因引入: 1) 网络环境(例如蜂窝网络、Ad-Hoc 网络、机会网络、混合网络等)的不同所带来的问题; 2) 人的参与(例如趋利性、恶意攻击等)所带来的问题. 参与式感知可能遭受错误数据攻击、返回攻击、共谋攻击、女巫(sybil)攻击等. 一些使用了声望机制的参与式感知应用也可能需要承受不公平评价攻击等.

文献[85]依靠移动安全代理为系统提供最精确的信息从而防止共谋攻击、错误数据攻击等; 文献[86]提出了一种参与式感知系统下利用基于云的信任管理机制检测女巫攻击的方法; 文献[76]提出了一种名为 ARTSense 的框架解决在匿名情况下的信任问题, 其包括隐私保护起源模型、数据真实评价机制和匿名声望管理协议等. 相信随着参与式感知研究的深入, 将有更多相关研究.

3 参与式感知研究方法

参与式感知涉及到网络中的各个层面,其中参与式感知原型的构建是进行参与式感知研究的基础.参与式感知以感知目的为核心,基于感知目的进一步确定参与式感知原型的感知模式、感知数据类型、传感器种类以及网络环境等,从而进一步基于软件工程理论进行参与式感知应用原型的开发,具体考虑内容如图 5 所示.其中,参与式感知模式可以通过感知范围和感知过程 2 个维度进行分类,根据参与式感知范围可以划分为上文提到的公共感知、社交感知和个人感知;根据感知流程将感知应用分为面向服务的感知模式和面向用户的感知模式 2 种<sup>[66]</sup>.面向服务的感知模式指服务器自身确定需要感知数据特征并自主控制通过何种方式采集何种感知数据,将通过参与者采集的数据进行处理并最终分享给数据消费者.例如建立一个基于地理位置服务的城市实时空气污染监测原型应用,用户可以通过该应用原型实时查看空气质量情况,并不需要关心通过哪些参与者采集何种数据.在面向用户的参与式感知模式中,参与者通过服务器获得该任务并自主完成,感知服务器在其中起到平台作用.视频捕捉便是面向用户感知模式的应用,用户首先上传相关需求的视频捕捉请求,服务器请求符合要求的参与者进行协助,在任务完成后服务器将参与者上传

的视频反馈给数据请求者.值得注意的是数据的消费者有时也可能是该数据的提供者,例如个人感知应用.

感知数据类型是指通过移动设备上传给参与式感知服务器的数据类型,感知数据类型的不同对于数据的处理提出了不同的要求和挑战.不同的传感器产生的数据类型是不同的,例如摄像头产生视频数据、麦克风产生音频数据、温度传感器产生温度信息.需要根据不同的感知数据类型对数据处理变成有用的信息.处理传感器数据的相关研究已经很多且相对成熟,图像视频方面已经有基于内容的视频和图像检索的相关数据<sup>[87]</sup>进行参考,国内也很早就有相关综述文献,文献[88]早已总结了基于内容检索的视频处理技术,这些内容检索技术为参与式感知提供了视频信息获取处理的基本方法和理论支撑;音频方面也早有相关研究,例如文献[89]研究了语音识别特征参数选择算法,该算法可以为基于移动设备麦克风的参与式感知应用提供语音识别技术的支持.

考虑传感器种类进一步确定移动设备内置的传感器是否可以满足该参与式感知应用的需求,若满足不了则需要配置额外的传感器模块并与手机相连,目前的连接方式包括有线连接、WiFi 连接、蓝牙连接等方式.与此同时,网络环境需要重点考虑研究,不同的网络环境对参与式感知应用原型也提出了不同的挑战.Ad-Hoc 网络、机会网络以及无线混合网络等给参与式感知应用提出了新的挑战,近年来相关学者已经在该方面进行了相应的研究.其中,文献[59-61]也是基于不同网络环境进行相关研究.另外,文献[90]提出了一种在移动机会网络下建立感知地图的整体合作框架,提出了在参与式感知环境下基于移动机会网络的合作转发协议框架,提高了传输成功率并降低了传输负载;文献[91]提出了一种基于社会关系的移动用户位置预测算法,移动用户位置预测是参与式感知系统进行有效数据采集和消息转发的关键,为分布式参与式感知应用提供了有力支持.

参与式感知的研究应在感知原型建立的基础上进行,根据第 2 节介绍的相关热点问题(数据类型、激励机制、隐私保护、恶意行为分析检测、具体网络环境等)在不同的层面进行研究,分层情况如图 6 所示.本文将参与式感知自上而下分为 4 个层面:服务

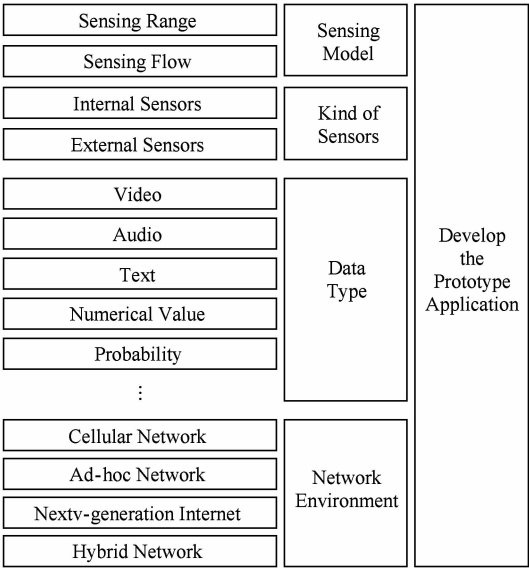


Fig. 5 Prototype development of participatory sensing

图 5 参与式感知原型开发

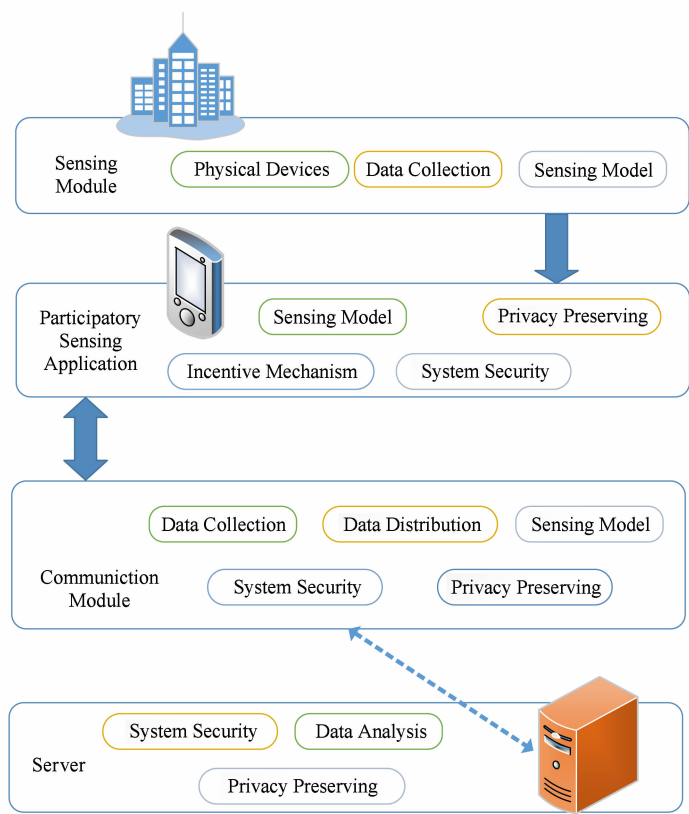


Fig. 6 Problems in different layers of participatory sensing  
图 6 参与式感知不同层中的问题分布情况

器层、网络层、应用程序层和感知模块层,其中有一些研究问题需要从多个层面进行考虑,并按照问题发现、算法提出、应用实践、分析改进的过程对参与式感知应用进行优化,参与式感知中相关问题的研究热点和展望在上文已有相关阐述。

4 结束语

参与式感知涉及的研究主要包括参与式感知系统原型设计、参与式感知数据分发机制、参与式感知数据收集机制、参与式感知数据处理方法、参与式感知激励机制、参与式感知隐私保护机制以及参与式感知恶意攻击防范。目前参与式感知的发展处于初级阶段,现有的相关机制和方法无法完全满足参与式感知的发展需求,面临各种挑战。作为一种全新的感知模式,参与式感知对于智慧城市、普适计算等重大概念的实现具有重要理论和现实意义。参与式感知的研究与人工智能、模式识别、机器学习、自然语言处理、博弈论、经济学、软件工程等有着广泛交叉,这也对相关研究提出了挑战。希望本文能够推动相关领域学者对这一新兴技术的持续关注与研究。

参 考 文 献

[1] Burke J, Estrin D, Hansen M, et al. Participatory sensing [C] //Proc of the 1st Workshop on World-Sensor-Web; Mobile Device Centric Sensor Networks and Applications. New York: ACM, 2006

[2] Rana R K, Chou C T, Kanhere S S, et al. Ear-phone: An end-to-end participatory urban noise mapping system [C] // Proc of the 9th ACM/IEEE Int Conf on Information Processing in Sensor Networks. New York: ACM, 2010: 105-116

[3] Thiagarajan A, Ravindranath L, Lacurts K, et al. VTrack: Accurate, energy-aware road traffic delay estimation using mobile phones [C] //Proc of the 7th Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2009: 85-98

[4] Eisenman S B, Miluzzo E, Lane N D, et al. BikeNet: A mobile sensing system for cyclist experience mapping [J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2009, 6(1): Article No.6

[5] Lane N D, Eisenman S B, Musolesi M, et al. Urban sensing systems: opportunistic or participatory? [C] //Proc of the 9th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. New York: ACM, 2008: 11-16

[6] Howe J. The rise of crowdsourcing [EB/OL]. [2016-02-10]. <http://www.wired.com/2006/06/crowds>

- [7] Estrin D, Sukhatme G, Allen M, et al. 2011 annual progress report [R/OL]. Los Angeles: Center for Embedded Networked Sensing at UCLA, 2011 [2015-05-01]. <http://www.cens.ucla.edu/>
- [8] Hasenfratz D, Saukh O, Sturzenegger S, et al. Participatory air pollution monitoring using smartphones [C] //Proc of the 2nd Int Workshop on Mobile Sensing. New York: ACM, 2012
- [9] Deng Linda, Cox L P. Livecompare: Grocery bargain hunting through participatory sensing [C] //Proc of the 10th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. New York: ACM, 2009; Article No. 4
- [10] Sehgal S, Kanhere S S, Chou C T. Mobishop: using mobile phones for sharing consumer pricing information [C] //Proc of the 4th Int Conf on Distributed Computing in Sensor Systems. New York: ACM, 2008
- [11] Bilandzic M, Banholzer M, Peev D, et al. Laermometer: A mobile noise mapping application [C] //Proc of the 5th Nordic Conf on Human-computer Interaction: Building Bridges. New York: ACM, 2008; 415-418
- [12] Kanjo E, Benford S, Paxton M, et al. MobGeoSen: Facilitating personal geosensor data collection and visualization using mobile phones [J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2008, 12(8): 599-607
- [13] Zhou Pengfei, Zheng Yuanqing, Li Mo. How long to wait?: Predicting bus arrival time with mobile phone based participatory sensing [C] //Proc of the 10th Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2012; 379-392
- [14] Miluzzo E, Lane N D, Eisenman S B, et al. CenceMe-injecting sensing presence into social networking applications [G] //Smart Sensing and Context. Berlin: Springer, 2007; 1-28
- [15] Bao Xuan, Choudhury R R. Movi: mobile phone based video highlights via collaborative sensing [C] //Proc of the 8th Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2010; 357-370
- [16] Wang Dong, Amin M T, Li Sheng, et al. Using humans as sensors: an estimation-theoretic perspective [C] //Proc of the 13th Int Symp on Information Processing in Sensor Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2014; 35-46
- [17] Mun M, Reddy S, Shilton K, et al. PEIR, the personal environmental impact report, as a platform for participatory sensing systems research [C] //Proc of the 7th Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2009; 55-68
- [18] Gu Siyu, Pan Chenji, Liu Hengchang, et al. Data extrapolation in social sensing for disaster response [C] //Proc of the 10th Int Conf on Distributed Computing in Sensor Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2014; 119-126
- [19] Lu Hong, Pan Wei, Lane N D, et al. SoundSense: Scalable sound sensing for people-centric applications on mobile phones [C] //Proc of the 7th Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2009; 165-178
- [20] Campbell A, Choudhury T, Hu S, et al. NeuroPhone: Brain-mobile phone interface using a wireless EEG headset [C] //Proc of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Networking, Systems, and Applications on mobile handhelds. New York: ACM, 2010; 3-8
- [21] Miluzzo E, Wang Tianyu, Campbell A T. EyePhone: Activating mobile phones with your eyes [C] //Proc of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Networking, Systems, and Applications on Mobile Handhelds. New York: ACM, 2010; 15-20
- [22] Hicks J, Ramanathan N, Kim D, et al. AndWellness: An open mobile system for activity and experience sampling [C] //Proc of Wireless Health 2010. New York: ACM, 2010; 34-43
- [23] Consolvo S, McDonald D W, Toscos T, et al. Activity sensing in the wild: A field trial of ubifit garden [C] //Proc of the 26th SIGCHI Conf on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2008; 1797-1806
- [24] Denning T, Andrew A, Chaudhri R, et al. BALANCE: Towards a usable pervasive wellness application with accurate activity inference [C] //Proc of the 10th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. New York: ACM, 2009; Article No. 5
- [25] Sha Kewei, Zhan Guoxing, Shi Weisong, et al. SPA: A smart phone assisted chronic illness self-management system with participatory sensing [C] //Proc of the 2nd Int Workshop on Systems and Networking Support for Health Care and Assisted Living Environments. New York: ACM, 2008; Article No. 5
- [26] Jarvinen P, Jarvinen T H, Lahteenmaki L, et al. HyperFit: Hybrid media in personal nutrition and exercise management [C] //Proc of the 2nd Int Conf on Pervasive Computing Technologies for Healthcare. Piscataway, NJ: IEEE, 2008; 222-226
- [27] Gao Chunming, Kong Fanyu, Tan Jindong. Healthaware: Tackling obesity with health aware smart phone systems [C] //Proc of Int Conf on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2009; 1549-1554
- [28] Liao Chunyuan, Liu Qiong, Liew B, et al. Pacer: Fine-grained interactive paper via camera-touch hybrid gestures on a cell phone [C] //Proc of the 28th SIGCHI Conf on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2010; 2441-2450
- [29] Ahmad S, Lu R, Hussain M J. Never lose! Smart phone based personal tracking via Bluetooth [J]. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 2014, 4(3): 528-545
- [30] Rawassizadeh R, Tomitsch M, Wac K, et al. UbiqLog: A generic mobile phone-based life-log framework [J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2013, 17(4): 621-637



- [31] Bengtsson U, Kasperowski D, Ring L, et al. Developing an interactive mobile phone self-report system for self-management of hypertension. Part 1: Patient and professional perspectives [J]. *Blood Pressure*, 2014, 23(5): 288-295
- [32] Lin Huifei, Chen Chihua. Design and application of augmented reality query-answering system in mobile phone information navigation [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(2): 810-820
- [33] Sashima A, Inoue Y, Ikeda T, et al. CONSORTS-S: A mobile sensing platform for context-aware services [C] //Proc of the 10th Int Conf on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 417-422
- [34] Parikh T, Javid P. Cam: A mobile interaction framework for digitizing paper processes in the developing world [C] //Proc of the 18th Symp on User Interface Software and Technology. New York: ACM, 2005
- [35] Yu Ruiyun, Wang Pengfei, Zhao Zhijie. The location fingerprinting and dead reckoning based hybrid indoor positioning algorithm [J] //Advances in Wireless Sensor Networks. Berlin: Springer, 2014: 605-614
- [36] Zhang Wei, Zhang Qiupu, Shan Wei, et al. Role of social media in knowledge management during natural disaster management [J]. *Advances in Information Sciences & Service Sciences*, 2012, 4(4): 284-292
- [37] Goggins S, Mascaro C, Mascaro S. Relief work after the 2010 Haiti earthquake: Leadership in an online resource coordination network [C] //Proc of the 15th ACM Conf on Computer Supported Cooperative Work. New York: ACM, 2012: 57-66
- [38] Ichiguchi T. Robust and usable media for communication in a disaster [J]. *Quarterly Review*, 2011, 2011(41): 44-55
- [39] Palen L. Online social media in crisis events [J]. *Educause Quarterly*, 2008, 31(3): 76-78
- [40] Lu Yong, Yang Dan. Information exchange in virtual communities under extreme disaster conditions [J]. *Decision Support Systems*, 2011, 50(2): 529-538
- [41] Reddy S, Estrin D, Srivastava M. Recruitment framework for participatory sensing data collections [G] //Pervasive Computing. Berlin: Springer, 2010: 138-155
- [42] Reddy S, Shilton K, Burke J, et al. Using context annotated mobility profiles to recruit data collectors in participatory sensing [G] //Location and Context Awareness. Berlin: Springer, 2009: 52-69
- [43] Pham H N, Sim B S, Youn H Y. A novel approach for selecting the participants to collect data in participatory sensing [C] //Proc of the 11th IEEE/IPSJ Int Symp on Applications and the Internet. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 50-55
- [44] Amintoosi H, Kanhere S S. A trust framework for social participatory sensing systems [G] //Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services. Berlin: Springer, 2013: 237-249
- [45] Wang Yi, Lin Jialiu, Annaram M, et al. A framework of energy efficient mobile sensing for automatic user state recognition [C] //Proc of the 7th Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2009: 179-192
- [46] Dong Xin, Berti-Equille L, Srivastava D. Integrating conflicting data: The role of source dependence [J]. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 2009, 2(1): 550-561
- [47] Galland A, Abiteboul S, Marian A, et al. Corroborating information from disagreeing views [C] //Proc of the 3rd ACM Int Conf on Web Search and Data Mining. New York: ACM, 2010: 131-140
- [48] Su Lu, Li Qi, Hu Shaohan, et al. Generalized decision aggregation in distributed sensing systems [C] //Proc of the 35th Real-Time Systems Symp. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1-10
- [49] Huang Kuanlu, Kanhere S S, Hu Wen. Are you contributing trustworthy data?: The case for a reputation system in participatory sensing [C] //Proc of the 13th ACM Int Conf on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems. New York: ACM, 2010: 14-22
- [50] Venanzi M, Guiver J, Kazai G, et al. Community-based bayesian aggregation models for crowdsourcing [C] //Proc of the 23rd Int Conf on World Wide Web. New York: ACM, 2014: 155-164
- [51] Srinivasan B V, Duraiswami R, Murtugudde R. Efficient kriging for real-time spatio-temporal interpolation [C] //Proc of the 20th Conf on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences. Atlanta, GA: American Meteorological Society, 2010: 228-235
- [52] Hartman L, Hössjer O. Fast kriging of large data sets with Gaussian Markov random fields [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2008, 52(5): 2331-2349
- [53] Mendez D, Labrador M, Ramachandran K. Data interpolation for participatory sensing systems [J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2013, 9(1): 132-148
- [54] Wang Dong, Kaplan L, Le H, et al. On truth discovery in social sensing: A maximum likelihood estimation approach [C] //Proc of the 11th Int Conf on Information Processing in Sensor Networks. New York: ACM, 2012: 233-244
- [55] Wang Shuang, Keller J M, Burks K, et al. Assessing physical performance of elders using fuzzy logic [C] //Proc of the IEEE Int Conf on Fuzzy Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 1482-1487
- [56] Reddy S, Parker A, Hyman J, et al. Image browsing, processing, and clustering for participatory sensing: lessons from a DietSense prototype [C] //Proc of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors. New York: ACM, 2007: 13-17

- [57] Zheng Yu, Liu Furui, Hsieh H P. U-Air: When urban air quality inference meets big data [C] //Proc of the 19th ACM SIGKDD Int Conf on Knowledge Discovery and Data Mining. New York; ACM, 2013; 1436-1444
- [58] Hsieh H P, Lin S D, Zheng Yu. Inferring air quality for station location recommendation based on urban big data [C] //Proc of the 21st ACM SIGKDD Int Conf on Knowledge Discovery and Data Mining. New York; ACM, 2015; 437-446
- [59] Xie Xiaojuan, Chen Haining, Wu Hongyi. Bargain-based stimulation mechanism for selfish mobile nodes in participatory sensing network [C] //Proc of the 6th Annual IEEE Communications Society Conf on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. New York; IEEE Communications Society, 2009; 22-26
- [60] Fajardo J T B, Yasumoto K, Shibata N, et al. DTN-based data aggregation for timely information collection in disaster areas [C] //Proc of the 8th Int Conf on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. Piscataway, NJ; IEEE, 2012; 333-340
- [61] Ahmadi H, Abdelzaher T, Kravets R. Adaptive multi-metric routing in distressed mobile sensing networks [C] //Proc of the IEEE Int Conf on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. Piscataway, NJ; IEEE, 2010; 213-220
- [62] Lee J S, Hoh B. Dynamic pricing incentive for participatory sensing [J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2010, 6(6): 693-708
- [63] Jaimes L G, Vergara-Laurens I, Labrador M. A location-based incentive mechanism for participatory sensing systems with budget constraints [C] //Proc of the 10th Int Conf on Pervasive Computing and Communications. Piscataway, NJ; IEEE, 2012; 103-108
- [64] Zhang Xinglin, Yang Zheng, Zhou Zimu, et al. Free market of crowdsourcing: Incentive mechanism design for mobile sensing [J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(12): 3190-3200
- [65] Koutsopoulos I. Optimal incentive-driven design of participatory sensing systems [C] //Proc of the 32nd IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ; IEEE, 2013; 1402-1410
- [66] Gao Lin, Hou Fen, Huang Jianwei. Providing long-term participation incentive in participatory sensing [C] //Proc of the 34th IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ; IEEE, 2015; 2803-2811
- [67] Duan Lingjie, Kubo T, Sugiyama K, et al. Incentive mechanisms for smartphone collaboration in data acquisition and distributed computing [C] //Proc of the 31st IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ; IEEE, 2012; 1701-1709
- [68] Duan Lingjie, Kubo T, Sugiyama K, et al. Motivating smartphone collaboration in data acquisition and distributed computing [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2014, 13(10): 2320-2333
- [69] Luo Tie, Tan H P, Xia Lirong. Profit-maximizing incentive for participatory sensing [C] //Proc of the 33rd IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ; IEEE, 2014; 127-135
- [70] Cheung M H, Hou Fen, Huang Jianwei. Participation and reporting in participatory sensing [C] //Proc of the 12th Int Symp on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Piscataway, NJ; IEEE, 2014; 357-364
- [71] Li Qinghua, Cao Guohong. Providing privacy-aware incentives for mobile sensing [C] //Proc of the 11th IEEE Int Conf on Pervasive Computing and Communications. Piscataway, NJ; IEEE, 2013; 76-84
- [72] Li Qinghua, Cao Guohong. Providing efficient privacy-aware incentives for mobile sensing [C] //Proc of the 34th IEEE Int Conf on Distributed Computing Systems. Piscataway, NJ; IEEE, 2014; 208-217
- [73] Miluzzo E, Lane N D, Fodor K, et al. Sensing meets mobile social networks: the design, implementation and evaluation of the cenceme application [C] //Proc of the 6th ACM Conf on Embedded Network Sensor Systems. New York; ACM, 2008; 337-350
- [74] Christin D, Roßkopf C, Hollick M, et al. Incognisense: An anonymity-preserving reputation framework for participatory sensing applications [J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2013, 9(3): 353-371
- [75] Huang Kuanlu, Kanhere S S, Hu Wen. A privacy-preserving reputation system for participatory sensing [C] //Proc of the 27th Conf on Local Computer Networks. Piscataway, NJ; IEEE, 2012; 10-18
- [76] Wang Xinlei, Cheng Wei, Mohapatra P, et al. Artsense: Anonymous reputation and trust in participatory sensing [C] //Proc of the 32nd IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ; IEEE, 2013; 2517-2525
- [77] Dong Kai, Gu Tao, Tao Xianping, et al. Privacy protection in participatory sensing applications requiring fine-grained locations [C] //Proc of the 16th Int Conf on Parallel and Distributed Systems. Piscataway, NJ; IEEE, 2010; 9-16
- [78] Christin D, Guillemet J, Reinhardt A, et al. Privacy-preserving collaborative path hiding for participatory sensing applications [C] //Proc of the 8th Int Conf on Mobile Adhoc and Sensor Systems. Piscataway, NJ; IEEE, 2011; 341-350
- [79] Huang Kuanlu, Kanhere S S, Hu Wen. Preserving privacy in participatory sensing systems [J]. *Computer Communications*, 2010, 33(11): 1266-1280
- [80] Vu K, Zheng Rong, Gao Jie. Efficient algorithms for  $k$ -anonymous location privacy in participatory sensing [C] //Proc of the IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ; IEEE, 2012; 2399-2407

[81] Machanavajjhala A, Kifer D, Gehrke J, et al. *l*-diversity: Privacy beyond *k*-anonymity [J]. ACM Trans on Knowledge Discovery from Data, 2007, 1(1): Article No. 3

[82] Ganti R K, Pham N, Tsai Y E, et al. PoolView: stream privacy for grassroots participatory sensing [C] //Proc of the 6th ACM Conf on Embedded Network Sensor Systems. New York: ACM, 2008: 281-294

[83] Zhang Fan, He Li, He Wenbo, et al. Data perturbation with state-dependent noise for participatory sensing [C] //Proc of the 31st IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 2246-2254

[84] Shi Jing, Zhang Rui, Liu Yunzhong, et al. Prisense: privacy-preserving data aggregation in people-centric urban sensing systems [C] //Proc of the 29th IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1-9

[85] Restuccia F, Das S K. FIDES: A trust-based framework for secure user incentivization in participatory sensing [C] //Proc of the 15th Int Symp on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1-10

[86] Chang S H, Chen Y S, Cheng S M. Detection of Sybil attacks in participatory sensing using cloud based trust management system [C] //Proc of the 8th Int Symp on Wireless and Pervasive Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2013

[87] Veltkamp R, Burkhardt H, Kriegel H. State-of-the-art in Content-based Image and Video Retrieval [M]. Berlin: Springer, 2013

[88] Jin Hong, Zhou Yuanhua. Review of video parsing techniques for content-based video retrieval [J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(4): 276-283 (in Chinese)  
(金红, 周源华. 基于内容检索的视频处理技术[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(4): 276-283)

[89] Yang Dali, Xu Mingxing, Wu Wenhui. Study of feature selection for speech recognition [J]. Journal of Computer Research and Development, 2003, 40(7): 963-969 (in Chinese)  
(杨大利, 徐明星, 吴文虎. 语音识别特征参数选择方法研究[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(7): 963-969)

[90] Zhao Dong, Ma Huadong, Tang Shaojie, et al. COUPON: A cooperative framework for building sensing maps in mobile opportunistic networks [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(2): 392-402

[91] Yu Ruiyun, Xia Xingyou, Li Jie, et al. Social-aware mobile user location prediction algorithm in participatory sensing systems [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(2): 374-385 (in Chinese)  
(于瑞云, 夏兴有, 李婕, 等. 参与式感知系统中基于社会关系的移动用户位置预测算法[J]. 计算机学报, 2015, 38(2): 374-385)



**Yu Ruiyun**, born in 1974. Professor and PhD supervisor. His main research interests include participatory sensing systems, wireless sensor networks, mobile and pervasive computing, and big data analytics, etc.



**Wang Pengfei**, born in 1990. PhD candidate. His main research interests include ubiquitous computing, Internet measurements and wireless sensor networks, etc.



**Bai Zhihong**, born in 1992. MSc candidate. His main research interests include location privacy protection and participatory sensing technology, etc.



**Wang Xingwei**, born in 1968. Professor and PhD supervisor. His main research interests include future Internet and cloud computing, etc.

附录 A

Table A1    Contrasts Among Participatory Sensing Applications

表   A1 参与式感知应用对比

Application Name	Sensing Scope			Sensing Module			Sensing Feature			Operation System		
	Public	Social	Personal	Internal	External	People	User Oriented	Service Oriented	Android OS	IOS	Symbian OS	Others
EarPhone <sup>[2]</sup>	√			√				√			√	Windows Mobile
VTrack <sup>[3]</sup>	√			√	√		√			√		Website
BikeNet <sup>[4]</sup>	√		√	√	√			√			√	Website
Gas-Mobile <sup>[8]</sup>	√			√	√			√	√			
LiveCampare <sup>[9]</sup>	√			√				√			√	
Mobishop <sup>[10]</sup>	√			√				√			√	
Laermometer <sup>[11]</sup>	√			√				√	√			Website
MobGeoSen <sup>[12]</sup>	√			√	√			√			√	Google Earth
Paper <sup>[13]</sup>	√			√			√		√			
CenceMe <sup>[14]</sup>		√		√	√			√			√	Website
MoVi <sup>[15]</sup>		√		√	√		√				√	
Apollo <sup>[16]</sup>		√		√		√	√					Not mentioned
PEIR <sup>[17]</sup>		√		√	√			√			√	Website
Ref <sup>[18]</sup>		√		√		√		√				Not mentioned
SoundSense <sup>[19]</sup>			√	√				√		√	√	
NeuroPhone <sup>[20]</sup>			√	√	√			√		√		
EyePhone <sup>[21]</sup>			√	√				√			√	
AndWelness <sup>[22]</sup>			√	√				√	√			
UbiFit Garden <sup>[23]</sup>			√	√	√			√			√	
Balance <sup>[24]</sup>			√	√	√			√			√	
SPA <sup>[25]</sup>			√	√	√			√			√	
HyperFit <sup>[26]</sup>			√	√				√			√	Website
HealthAware <sup>[27]</sup>			√	√				√				Windows Mobile
Pacer <sup>[28]</sup>			√	√				√				Windows Mobile
Paper <sup>[29]</sup>			√	√				√		√		
UbiqLog <sup>[30]</sup>			√	√				√	√			
Paper <sup>[31]</sup>			√	√				√	√			
CONSORTSS <sup>[32]</sup>			√	√	√			√				J2ME CLDC

√ : The feature is adopted by this application.