

以人为中心的感知

孙国栋, 许斌

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

E-mail: sgdes@tsinghua.edu.cn

摘要: 随着嵌入式技术、移动计算技术和无线传感器网络技术的发展,越来越多的可移动的通信和存储设备上嵌入了传感器,比如,手机上的方位传感器、震动传感器(实际上,手机的话筒和摄像头也是传感器)以及嵌入到MP3播放器中的脉搏传感器,等等。这些移动设备上的传感器可以采集与人们的行动、社会交往等息息相关的个人信息。此外,随着成本的下降,这些具有感知功能的移动通信设备的持有量不断提高,再加上Internet中社会网络软件的广泛使用,一类新的感知应用应运而生——以人为中心的感知(People-Centric Sensing, PCS)。PCS不仅是一个新的研究领域,而且具有巨大的潜在应用价值,近几年来引起了学术界和工业界的高度关注。该文介绍了PCS的概念、特征以及重要的研究问题和挑战,并概述了PCS的研究现状。

关键词: 以人为中心的感知; 机会型接触; 数据转发; 社会网络; 信息处理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2012)07-1393-11

People-centric Sensing

SUN Guo-dong, XU Bin

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

Abstract: With the technological development of embedded computing, mobile computing and wireless sensor networking, more and more mobile devices and storage devices have been equipped with some sensors, such as the magnetic and vibration sensors in mobile phones as well as microphone and camera, the heart pulse sensor in MP3 players, etc.. Such on-device sensors can collect information closely related to human activity and interactions in societies. Additionally, as the cost of mobile devices decreases recently, they could be afforded by most people. By grouping the personal sensor data and extensive social networking software, therefore, a new application in sensing, called People-Centric Sensing (PCS), is emerged, which, in fact, is not only a potentially new research area but also will create huge commercial benefit. So, in the past few years, PCS obtains great attention in academia and industry. This paper introduces the concept and characteristics of PCS, followed by the important research issues, challenges and the major technologies in use.

Key words: people-centric sensing; opportunistic contact; data forwarding; social network; information processing

1 引言

随着传感技术以及嵌入式计算技术的进步,大量的手机、车载设备等移动设备上安装了价格低廉的嵌入式传感器,使得这些设备不仅具有无线通信、拍照、录音、GPS定位等通用的感知功能以外,还可以感知方向、温度、人的血压、甚至空气质量等数据。因此,除了静态布置的传感器网(wireless sensor network, WSN)^[1-4]以外,一类新的移动感知系统应运而生——以人为中心的感知(people-centric sensing, PCS)系统。不同于传统的WSN,在PCS中没有固定的网络拓扑结构,每个可以提供感知数据的节点可以是固定放置的传感器,也可以是随着人(交通工具^[5])移动的手持设备;PCS的应用范围也从WSN的领域用户扩展到普通的个人、一个群体甚至是一个城市内的所有可以访问网络的居民。由于PCS节点往往具有移动性,当两个节点“偶然”相遇(进入对方的通信范围)时,它们可以进行通信、交换数据、共享资源。利用大量的

便携设备的感知和无线通信功能,再加上机会型接触建立的通信链路,PCS这样一种融合了人类社会关系和科学技术的新型应用正在演变成一种能为普通大众提供服务的大规模、功能灵活、全局的感知网络^[6-7]。

相对于传统WSN、移动Ad Hoc网络,PCS的应用目标、网络结构、复杂程度等都具有明显的特殊性,并带来了新的挑战和机遇,进而也引起了科研人员的密切关注,在SIGCOMM, SenSys, Mobicom, MobiSys和INFOCOM等通信、嵌入式系统、移动计算领域的一流国际会议上,与PCS相关的研究成果不断增多。国外在PCS领域的研究已经取得了一定的进展,然而我国在这一研究方向上的研究成果目前还很少。本文对PCS的相关研究进行了较为详尽的论述,希望对深入理解PCS的概念、关键问题和技术、发展趋势有一定的借鉴意义。

2 PCS概述

本节首先分析了PCS的产生的技术和应用背景,然后给

收稿日期: 2011-07-07 收修改稿日期: 2011-08-29 基金项目: 国家自然科学基金项目(60803124; 61170212) 资助; 国家“九七三”重点基础研究发展计划项目(2006CB303000) 资助; 中国博士后特别基金(201104101) 资助。 作者简介: 孙国栋,男,1981年生,博士,助理研究员,研究方向为移动计算和传感网; 许斌,男,1973年生,博士,教授,研究方向为移动计算、传感网、Web服务。

出了一个 PCS 的描述性定义,最后讨论了 PCS 的特点和面临的主要研究挑战。

2.1 PCS 产生的背景

近 10 年来,WSN 技术和应用都有了长足的发展,在环境监测、工业控制、煤矿安全等领域都有着广泛的应用,WSN 中的一些研究问题依然重要,但相对于以人为中心的应用形式,如城域规模的环境感知和交通监测,WSN 表现出了一定的局限性。

首先,WSN 能达到的应用规模还很小,节点数据量一般为几十或几百个,监测区域也十分有限;目前,GreenOrbs^[9]是一个典型的大规模 WSN 项目,包含 300 多个 TelosB 传感器节点,它计划使用 1200 个传感器节点来监测面积约为几平方公里的林区的生态环境。其次,大规模 WSN 的成本(包括后期维护)相对较高,尤其是作为基础设施的 WSN 应用(城市交通状况监测、森林生态监测等),例如,对于美国洛杉矶市的一个停车位 WSN 监测管理系统^[10],在一条常规街道上的安装和维护成本达近百万美元。所以,覆盖范围、节点规模和成本依然是 WSN 目前难以克服的壁垒。再次,在 WSN 中,节点的计算资源十分有限,其能耗更是设计中最为核心的问题,而能耗问题对于手机等便携设备来说却不是一个决定性的限制,因为用户可以对设备的电源、电池进行一定的手工管理。最后,目前的 WSN 应用还体现了明显的领域特征,例如,农场的耕种环境监测,海洋河流污染监测,森林气候和环境监测,等等。这些感知数据的最直接的关注者或消费者是农场主、政府等个人或机构,而普通大众很难从中获得与个人生活息息相关的、感兴趣的信息。针对传统 WSN 的不足,为了构建大规模的、灵活部署的、以人为中心的感知应用,有必要探索新的理论和技术。



图 1 嵌入了传感器的移动设备及传感器示例

Fig.1 Sensor-embedded mobile devices and sensors

除了应用需求以外,技术的进步也是 PCS 产生的一个重要推动因素。近几年来,随着传感器技术、移动计算技术和无线通信技术的进步,大量的移动便携设备嵌入了各种各样的微型传感设备,如图 1 所示,DELL D630 笔记本电脑的环境光线传感器,iPhone 和 Nokia 手机上嵌入了方向、加速度(惯性)、震动传感器和接近度(proximity)传感器,YAMAHA 运动型 MP3 播放器和 BodiBeat Mp3 播放器配备了脉搏传感器,等等;一些较为廉价的传感器,比如惯性传感器,已经逐渐成为手机的标准配置,比如苹果 iPhone,Blackberry,三星

Omina, HTC Diamond 和 Nokia N95 都采用了基于 MEMS 技术的惯性传感器;在不久的将来,手机上还会嵌入可以监测空气中污染的化学传感器^[8](见图 1 中下方中间的图);当然,笔记本电脑和手机上的麦克风和摄像头可以作为声音传感器和图像传感器,GPS 装置可以看作是位置传感器。这些尺寸微小的传感器本身可能没有集成通信能力,但它们的嵌入环境具有无线通信能力,例如 WiFi 模块、蓝牙模块、GPRS 模块等。这些由人或者交通工具携带的、具有无线通信功能的传感设备(模块)正在演变成一种大规模的移动感知系统,这使得一个新的应用方向应运而生——以人为中心的感知。对于一个城市,如图 2 所示的例子,随着几十万、上百万的便携无线移动设备具备了感知功能,而且这些设备可以覆盖在十几、几十平方公里的范围并可以移动,如果把这些移动感知设备组织起来,再加上已有的、静态布置的 WSN,构建一个覆盖整个城市的、面向大众的感知系统就成为可能。

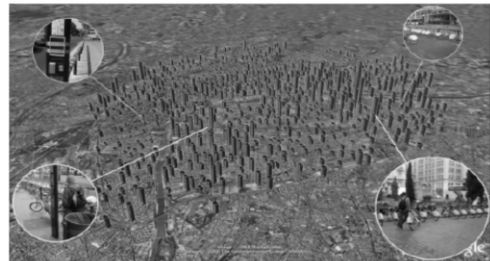


图 2 城域规模的 PCS 覆盖示例^[11]。其中,节点是安装了通信和感知模块的自行车或人,利用这个 PCS 系统,可以获得整个城市的空气质量、交通的动态情况,用户可以访问这些数据,或者根据这些数据定制服务

Fig.2 The city-wide coverage of a PCS scenario where the bikes with radios and sensors, or the biker with sensors, serves as PCS nodes. Through it, we can know the dynamics of air pollution level and traffic status about the whole city. And the data can be accessed according to user's interests

PCS 应用的一个关键基础来源于机会网络中的机会接触(opportunistic contact)的概念^[12,13]。接触的根本意思是碰上、挨上,对于两个移动无线设备来说,接触意味着它们处于对方的通信范围内;当两个移动无线设备接触时,尽管可能是机会型的(偶然的),但却带来了一次通信的机会,进而可以利用建立起来的通信链路进行信息和资源的交换、共享,PCS 的通信过程具有存储-携带-转发(store-carry-forward)的特性。具有感知功能的移动计算设备的广泛使用,创造了大量的接触机会。尤其是,随着便携移动设备用户的飞速增长,移动设备间发生接触的频率也大为增加。依靠机会型接触建立的网络连接传输数据已逐渐成为现实。截止 2010 年,全球共有 33 亿手机用户,如果在某一时刻有 20 亿部手机处于开机状态,那么会同时存在约 10 亿个用户间的接触机会。假设每部手机都只具有 200kbps 的通信能力,上述的机会接触可以在 1 秒内传输近 1Peta 字节的数据^[12]。总的来说,PCS 是应用需求和技术发展的双重推动下的结果。

2.2 PCS 的定义

目前,对“以人为中心的感知”还没有一个统一的定义。本文在分析已有文献的基础上,从系统应用的角度给出一个描述性定义:一个 PCS 系统是由用户(人或交通工具)所携带的具有感知功能的移动无线设备以及基础感知、通信设施构成的一个感知网络,它利用节点的移动性来提高网络感知范围,并利用移动所带来的接触机会建立通信链路,用户提供的感知数据与其生活密切相关,他(她)们既是感知数据的提供者又是消费者。从上述定义可以看出,PCS 是对 WSN 的扩展,采集、传输和处理感知数据,为用户提供满足其需要的信息是 PCS 的基本功能;利用机会型接触,移动的感知设备与静态布置的 WSN 协作的完成感知任务是 PCS 的典型特点;在 PCS 中,用户是感知数据的提供者,同时又是数据的消费者,感知数据体现了用户自身及其周边环境的状态,这是 PCS 的最关键的特征。PCS 应用的目标、提供的服务也大都与人们的日常生活息息相关,比如,城市环境监测^[15, 16, 38, 42]和识别^[17, 18],数据分享^[19-21],交互式游戏^[22],道路状况监测^[23, 24],疾病传播跟踪^[25],手持设备用户的定位^[26-28]等都属于 PCS 应用。

PCS 是以人为中心的,作为系统核心的是人而不是树木、河流,或者机床。节点的接触模式关键取决于其携带者——人或由人驾驶的交通工具的接触方式;感知数据的受益者不再仅仅是科学家、工程师、农场主等领域用户,更多的为数据提供者本身或者他(她)们的朋友。PCS 的以人为中心主要包含两个方面的含义:

1) 在 PCS 中,普通大众是感知数据的主要提供者和消费者,这些感知数据与提供者自身、其周围环境等因素密切相关,同时,用户从 PCS 中获得的服务也反映了他(她)们在日常生活中的需求;

2) 从感知全局来看,人的生活习惯、社会关系等因素深刻的影响着 PCS 中的软硬件体系结构、数据传输、数据处理等技术的设计和实现,并且对系统效率有着重要的影响。

PCS 与传统的移动传感网(mobile WSN)应用的前提条件是不同的^[29-33]。移动传感网中节点往往是按照统一的模型随机移动,或者是可以做到有目的的移动,比如,把更多的节点移动到没有覆盖的区域或者网络容易分化的地点。但在 PCS 中,用户或者交通工具的移动是不受感知任务控制的,而且具有更为复杂的移动模式(4.2 小节将给予详细介绍)。目前看来,PCS 与容迟网络(DTN)^[32, 35]或机会网络最大的区别在于应用目的不同。机会网络和 DTN 的主要目的是在移动节点和固定基础通信设施上建立通信网络,并对数据交换提供有效的支持。而对于 PCS,获取并分享与用户生活紧密相关的感知数据是应用的核心目的,进而,PCS 与机会网络和 DTN 的体系结构也是不同的,PCS 需要一整套、自底向上的软硬件体系结构来保证数据的采集、传输和处理,并为用户提供有用的服务,其中有许多新的问题亟待解决,比如,感知数据内容的可靠性,用户环境的识别,感知任务的优化,等等,而这些问题与机会网络和 DTN 的应用关联不大。

2.3 PCS 的主要研究挑战

在 PCS 系统中,节点的感知、计算、通信能力具有很强的异构性;网络拓扑呈现时断时续的特征,难以维护稳定而可靠的通信链路;感知数据与用户的生活方式等因素密切相关;PCS 还具有其他很多不同于传统 WSN 和移动 Ad Hoc 网络的特点,这都在系统的各个层面上向研究人员提出了一系列新的挑战。

1) 节点类型多、规模巨大。在 PCS 中,节点种类很多,例如,手机, Mp3 播放器,笔记本电脑、车载 GPS、TinyOS 传感器^[36], RFID^[37] 读取设备,等等,当这些节点的计算能力、通信能力、软件配置各不相同,而且节点间的机会接触的地点、维持的时间长度等因素的随机性很强,所以,如何在异构节点的机会型接触过程中完成交互操作是一个挑战。从系统全局的角度来看,如何把这些规模巨大、节点异构的节点组织起来、在没有稳定的通信链路的基础上协作完成一个感知、通信任务是一个更大的挑战。

2) 节点上下文信息的不准确性。感知数据的上下文信息(sensing context)对 PCS 应用非常重要,这些信息描述了感知数据采样的当前环境,在一定程度上决定了感知数据的可用性(fidelity)。例如,对于一个采集室外温度的 PCS 应用,如一个节点放在了用户衣服兜里,那么返回的温度值就不能很好的反映室外温度。如何保证感知数据的准确性或者判断节点的状态是 PCS 的一个区别于机会网络和 DTN 的关键挑战。

3) 节点的移动和分布具有不确定性。PCS 节点大都是由人或者由人驾驶的交通工具所携带的,所以具有明显的移动特征。由于人的移动受其社会属性和时空属性的限制,比如,他们的居住地点、工作地点、生活习惯,等等。除了移动方式以外,节点的分布特点也受到了空间和时间的影响,比如,在商业区中人和交通工具的密度就相对高一些,全面感知覆盖和机会型接触发生的概率也相对较高,而在夜间,人和交通工具保持静止的可能性较高。如何准确理解不同时间空间尺度下的节点移动规律并建立有效的模型是 PCS 的设计、性能优化和评价的一个重要挑战。

4) 网络拓扑具有高度的动态性。由于节点的移动和用户参与方式的不确定性以及无线通信链路的不可靠性,PCS 中网络连通状态是时断时续的,由此带来的较高的、不确定的传输延迟可能会损害某些网络应用性能。尤其是,很难在网络全局甚至局部事先确定节点接触的地点、时间、使用的通信带宽等信息。所以,如何利用节点的移动规律、用户的习惯和应用需求来实现可扩展的、资源自适应的机会型数据转发策略是 PCS 组网的一个重要挑战。在此基础上,如何设计中间件来屏蔽机会路径建立的复杂过程及其带来的网络延迟也是一个重要挑战。

5) 感知数据处理难度大。首先,对于以人为中心的应用,PCS 中的感知数据动态性强、之间的关联十分复杂,再加上用户上下文环境的动态变化,如何把用户感知数据实时的映射到实际情况是 PCS 设计的一个关键挑战,其难度是传统 WSN 应用未曾遇到的。另外,在感知数据被传输到应用程序之后,PCS 就要存储、分析这些感知数据,从中提取能满

足用户需求的信息并且以容易理解的形式表示出来是一个挑战. 还有, 在网络资源高度动态、节点位置不可控的情况下, 感知任务的制定和优化是 PCS 设计的一个难点.

6) 安全隐私问题. 与大部分 WSN 应用不同, 用户的安全和隐私是 PCS 系统能否成功应用的一个决定性因素. 在 PCS 中, 主要存在两个方面的安全挑战: 对用户自身隐私 (通话信息、所在位置、个人照片、名片等) 的泄露, 对用户周围的人或物的隐私的泄露. 例如, 一部用麦克风参与街道噪音监测的手机可能同时也记录了从周围经过的人的谈话, 进而有泄露别人隐私的可能性. 如何保证用户的隐私是 PCS 设计和应用是一个关键挑战.

3 PCS 的原型系统及体系结构

在讨论 PCS 的研究问题之前, 有必要首先介绍一下 PCS 的应用场景、原型系统, 以及相关的功能结构. 由于 PCS 不是单纯的通信网络, 也不是针对某种特定应用的传感器网络, 尤其是 PCS 中包含了多种多样的移动节点设备、存在多种接入基础通信设施的方式、应用规模也不尽相同, 所以目前 PCS 系统的软硬件体系结构没有一个统一的标准. 本节介绍了目前几个典型的 PCS 应用及其原型系统, 并介绍了它们采用的体系结构.

3.1 CarTel^[38]

CarTel 是一个融合了 Ad hoc、DTN 和传感技术的 PCS 原型系统, 它包含了数据收集、处理、传输、可视化等多个功能模

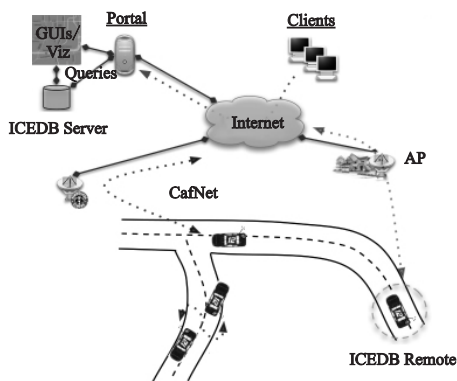


图3 CarTel 的体系结构

Fig.3 Architecture of CarTel

块, 可以在环境监测、民用基础设施监测、自动诊断、地理信息显示、数据转移等领域. CarTel 使用了一个可重用的软件平台, 其上可以构建多种移动感知应用, 并且提供了一个简单的编程接口, 开发人员只需进行 web 开发, 而不用考虑节点的分布及其移动行为; CarTel 可以同时处理大量异构的传感数据; CarTel 包含了数据摆渡 (data mules) 策略和持续查询处理技术. 图3描述了 CarTel 的体系结构, 具体来说主要包含3个组件:

1) 持续查询处理器 (ICEDB). ICEDB 运行在 Portal (后面会介绍) 上或者移动节点上. 运行在 Portal 上的 ICEDB 进程维护一个用户的查询列表, 并通过网络协议栈依次发布查

询. 运行在移动节点上的 ICEDB 实例负责处理采集到的传感器数据, 并通过网络协议栈返回查询结果. 为了支持异构传感数据应用, ICEDB 使用了一个元数据包 (一个脚本) 来自动管理当前系统中的传感数据类型的添加或删除. ICEDB 对 SQL 语法进行了扩展, 可以支持持续查询.

2) 容迟通信协议栈 (CafNet). CarTel 针对网络拓扑的间歇性连通这一特点设计了一个通信协议栈 CafNet. 它包含3个层次: 传输层 (CT)、网络层 (CN)、数据摆渡适应层 (MA). CT 层对应用程序负责, 为其记录、发送数据, 并通知应用程序数据是否成功发送, CT 层提供了一些可选配置, 如当传送失败时是否进行重传等. CN 层负责缓存、调度数据, 计算路由. MA 层完成邻居发现功能. 针对网络节点间的连通属于机会型接触、可用链路存活时间短这一现象, CafNet 在 CN 层引入一个小尺寸的缓存空间来缓存数据.

3) 访问端 (Portal). 可以运行在后台服务器上、无线 AP 上或者手持终端上的软件. Portal 负责维护一个用来检索传感数据 ICEDB 实例和一个用于数据可视化的函数库. Portal 中的应用程序发布持续查询并存储返回的查询结果. 另外, Portal 还要为 CarTel 的用户提供隐私保护.

3.2 CenceMe^[39]

在 CenceMe 系统中, 作者首先提出了可感知的存在 (sensing presence) 这一概念. 可感知的存在实际上是一个能描述人的各种状态的感知数据的集合, 而这些数据来自人所直接携带的或者嵌入到手持设备上的各种各样的传感器, 下列数据都可以用来描述人的可感知的存在: 描述姿态的数据, 比如, 坐、立、行走等; 描述生活习惯的数据, 比如, 下午去某咖啡厅、晚上步行回家、周六在某健身房等; 描述生理指标的数据, 比如, 体温、心率、血压、血氧含量等; 描述情绪的数据, 比如, 高兴、悲伤、平静等 (需要在脉搏、血压等生理传感器数据, 并结合医学和心理学上的领域知识做出判断). 描述周围环境的数据, 比如, 温度、噪音、光强、湿度、空气污染、辐射等.

CenceMe 的目的就是把这些来自人的感知数据融入到社交应用程序当中, 用户上传和分享自己的感知数据, 从而能以更丰富的视角展现自己当前的状况. CenceMe 体系结构的核心从概念上看是由一组服务器构成, 这些服务器管理用户上传的感知数据, 并且为用户访问提供入口, 并运行一系列算法为用户提供定制服务, 具体来说, CenceMe 的体系结构包含如下组件:

1) 瘦客户端. 安装在用户所携带的移动设备和传感器上的软件, 负责传感数据的采集, 也用来协调不同节点间的数据通信.

2) 传感数据分析引擎. 根据采集的感知数据进行分析 and 推断用户当前的状态.

3) 传感数据存储. 存储用户传来的感知数据, 为他们提供一个相应的访问入口.

4) 服务层. 为了方便在用户的社交圈子中分享他们的感知数据, 并同时满足他们的隐私要求, CenceMe 能为用户提供如下服务: 获取个人生活方式或健康状态信息, 查询用

户当前状态, 朋友间的访问 等等。

5) 用户层. 以插件形式运行在社交应用程序上, 为用户提供定制的服务。

3.3 BikeNet^[40]

S. Eisenman 等人以日常的自行车运动为应用背景设计了 BikeNet 系统, 其中, 多种传感器节点被安装到自行车以及骑车人的身上, 这些传感器可以检测自行车当前的速度、平均速度、骑行里程、骑车人消耗的热量、心率、空气中 CO₂ 含量、周边汽车的密度、以及骑车人的皮电反应 (Galvanic skin response, 能衡量人情绪的一个生理指标)。这些传感数据详细的记录了骑车人的经历, 为他(她)们提供关于锻炼情况的反馈和对比, 同时也为其他用户提供了骑车人所经过区域的环境信息。如图 4, BikeNet 的体系结构中包含 3 个部分:

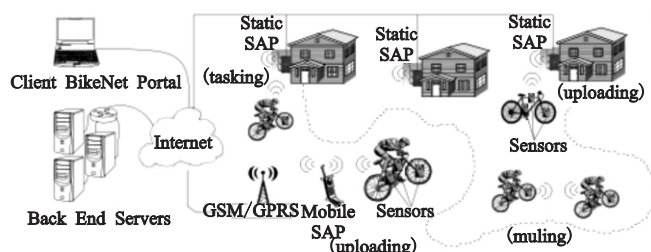


图 4 BikeNet 体系结构

Fig. 4 Architecture of BikeNet

1) 移动节点局域网. 在 BikeNet 中, 骑车人身上和自行车上安装了多种传感器, 这些传感器与骑车人的手机之间可以通过 Bluetooth 或者 ZigBee 构成一个小型局域网 (bicycle area network) 这样, 骑车人的手机就可作为网关, 向外界发送所有的感知数据或者从外界接收消息。

2) 访问点. 预先布置了一定量的 SAP (sensor access point) 设备。当骑车人进入某个 SAP 的通信范围时, 他的传感数据就可通过该 SAP 上传到 BikeNet 的后台服务器中。当然, 如果两个骑车人相遇时, 也可在他们之间交换数据, 类似于 CarTel 中的数据摆渡。

3) 后台服务器. BikeNet 的后台服务器使用一个数据访问端 BikeView, 它把骑车人的数据以图形化方式显示出来, 同时也提供了数据查询和数据挖掘等功能。

3.4 SenseWeb^[41]

SenseWeb 是微软研究人员设计的一个传感数据分享系统。它的基本思想是: 如果用户上传、分享自己的传感数据, 就可以用这些数据构建更多的、所有用户都能受益的软件服务系统。SenseWeb 的设计目标是让多个并发的应用程序可以共享感知数据, 包含了如下主要组件:

1) 协调器 (coordinator). 协调器是所有 SenseWeb 应用软件与用户之间的纽带。它包含两个部分: 传感器数据库 (SenseDB) 和任务调度模块 (Tasking)。

2) 传感器网关、移动代理. 传感器网关与移动代理分别是静态传感器与嵌入式移动设备访问 SenseWeb 的接口。

3) 数据转换器 (data transformer). 数据转换器从原始传感

数据中提取语义。例如, 计算一张照片中出现的个数, 等等。

4) 应用层. 用户访问 SenseWeb 获得服务的接口。

在协调器中, SenseDB 利用不同用户查询中存在共同部分这一特点, 使用了查询合并和数据缓存等技术对传感器节点与其网关的工作方式进行了优化。Tasking 模块根据当前可用传感器的能力、分享意愿等指标尽可能的为用户提供服务。应用程序开发人员可以利用协调器提供的 API 开发特定数据转换器, 领域专家可以针对特定的传感数据使用不同的数据转换器。协调器通过索引的方式管理所有数据转换器。SenseWeb 的应用层包含了一系列交互式的应用程序, 目前通过 SenseWeb 应用层实现的传感系统有: Vanderbilt 大学的研究人员用车载传感器监测城市的空气质量, Ohio 州立大学开发了用户定位、家庭花卉土壤湿度监测的应用, Virginia 大学的研究人员用 SenseWeb 来分享城市商业区的传感数据, 等等。

SenseWeb 不仅使感知数据的分享成为可能, 还为不同的传感网应用提供了一种资源重用的方式。它简化了数据收集的过程, 并且通过使用网关和移动代理屏蔽了不可靠的或者移动的传感器对系统的影响, 这使得 SenseWeb 具有良好的应用可扩展性。作为一个数据可分享的系统, SenseWeb 同时也初步考虑了数据的隐私、安全、可信度等问题。

3.5 其他 PCS 应用及其体系结构

监测城市的噪音污染状况是 PCS 的一个典型应用。使用传统的 WSN 会带来高昂的设备和维护成本, 而且有些地方还很难被覆盖, 针对这些问题, Rana 等人^[42]设计并实现了一个用于城市噪音监测的 PCS 系统 Ear-Phone, 它的体系结构主要包括两个部分: 手机和后台服务器。在街边行走的手机用户将采集到的噪音数据汇报给服务器, 应用程序负责分析这些数据并建模, 然后终端用户可以访问噪音的相关信息, 比如, 噪音强度、位置等等。在手机上, Ear-Phone 对噪音、地理位置、时间等数据进行处理, 当手机可以访问到某处 WiFi 接入点时, 就通过无线链接把采集的噪音数据发送至服务器。服务器端对用户的查询进行处理。ParkNet^[23] 是 Mathur 等人设计和实现的一个查询城市街边停车位的 PCS 系统。在 ParkNet 中, 汽车右侧安装了超声波传感器用于计算路边车位的使用情况, 并根据 GPS 定位信息来计算沿途的可用停车位的数量和位置。行驶的汽车把这些感知数据通过车载无线设备发送到服务器, 服务器根据收集到的车位信息就可以计算出某条街道、街区、甚至整个城市当前一段时间内有多少个停车位可以使用以及它们都处于什么位置, 这样, 希望得到停车位的用户在查询后就会获得若干就近的停车位信息。ParkNet 的硬件体系结构也包含两个部分: 车载感知和后台服务器。

3.6 小结

PCS 是结合了普适计算技术、WSN、无线自组网技术以及移动计算技术的新型感知网络。如图 5 所示, 目前 PCS 体系结构可以概括为一个 4 层结构: 设备层、网络层、数据管理层和应用层。

设备层由各种通信和感知设备组成, 包括手机、MP3 等用户携带的具有感知功能的移动设备, 还包括静态布置的

WSN, 以及可以作为基础通信设施的 IP 网络和蜂窝网络。除了节点类型是异构的, 通信链路也可能是异构的, 比如, 这些设备可能使用 WiFi、蓝牙、ZigBee 等协议进行通信。所以, 在网络层, PCS 的首要任务是对可能涉及的异构节点进行组网, 实现节点与节点、节点与基础通信网络之间的通信,

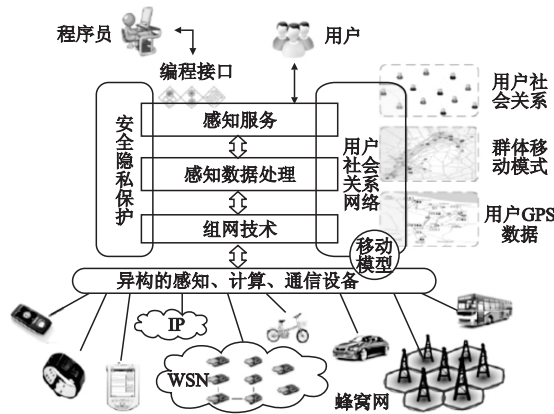


图5 一个典型的 PCS 体系结构

Fig. 5 A typical architecture of PCS

支持静态的、移动的多节点间协作完成大型的感知任务。网络层完成了物理世界到电子感知设备(数据)网络的抽象。数据管理层以感知数据为中心, 完成感知任务的定制和优化, 以及感知数据的存储、查询、挖掘、可视化等数据处理任务, 数据管理层完成了对感知数据的分析和理解, 根据应用层的需求, 提取能满足用户需要的信息。应用层面对开发人员和用户, 为开发人员提供灵活、容易使用的编程接口以及各种应用软件的开发环境, 同时也为用户提供访问系统的接口和相关的服务。应用层完成了从电子数据网络到人类社会及其需求的抽象。

在 PCS 中, 普通大众是感知数据的主要提供者, 这些感知数据与用户自身、周围环境等因素密切相关, 另外, 用户在生活中和人际交往上的习惯、方式等因素也深刻的影响着体系结构中软硬件的配置、设计以及系统的效率。所以, 在 PCS 各个层次的设计当中, 都有必要考虑如何利用人的社会关系信息来改善系统的性能。另外, 感知数据从被采集, 在网络中传输, 一直到进入服务端被存储和处理, 都可能涉及用户的个人信息, 因此, 安全和隐私问题是 PCS 各层设计和实现中都必须关注的。

4 PCS 的热点研究问题

目前对 PCS 的研究在理论技术和实践上都尚处于探索阶段, 本节以图 5 所示的体系结构为主线, 介绍并讨论 PCS 的热点研究问题。

4.1 网络通信机制的研究

作为一个通信系统, PCS 与机会网络和 DTN 有相似之处, 数据的传输是建立在时断时续的网络拓扑之上的。PCS 中, 网络通信是最重要的基本功能, 是感知数据上传、感知任务发布、信息分享的前提条件, 因此受到的关注也最多。

4.1.1 基于泛洪的网络通信机制

Epidemic^[43] 是一个基于传染算法的数据路由协议。其中, 节点缓存数据, 当遇到另一个节点时, 二者首先交换各自维护的数据索引来判断对方是否缓存了自己所没有的数据, 如果是, 就通过交换来缓存对方的数据; 通过这种方式, 数据就像病毒一样扩散到网络中直至目标节点。Epidemic 中每个数据都要对应一个全局唯一的 32 位 ID 和一个预先设置的最大可传输跳数(类似于 IP 网络中的 TTL)。虽然 Epidemic 适应具有间歇连通的网络, 可以保证找到到达目标节点的最短路径, 但它的传输方式导致了大量数据拷贝在网络中的扩散, 无线信道竞争严重, 数据丢弃/丢失现象明显, 引发的重传操作极大的浪费了网络资源。PROPHET^[44] 对 Epidemic 进行了改进-结合了对节点间相遇概率的预测, 而不是盲目的在相遇节点间转发数据。PROPHET 为每个节点对 (a, b) 计算一个数据转发概率值 $P(a, b)$, 表示从 a 到 b 成功发送数据的概率。每当 a 和 b 相遇, $P(a, b)$ 就提高, 反之, 就随着时间而递减。假设 d 是 a 的目标节点, a 和 b 相遇时, 如果 $P(b, d) > P(a, d)$, a 就把数据转发给 b , 降低了广播风暴出现的可能。

SW 和 SF 是 Spyropoulos^[45, 46] 等人相继提出的两个类似的路由算法。SW 包含两个阶段, 首先源节点把一定量的数据拷贝"喷洒"到网络中, 然后进入等待阶段: 等待接收到数据拷贝的节点与目的节点相遇。SF 对 SW 的等待阶段进行了改进。在 SF 中, 数据不断的从效用低的节点转发到效用高的节点, 直到遇到目标节点。Masoccolo 等人提出了一个用于 PCS 的转发机制 SCAR^[48]。SCAR 借鉴了 SW 中限制源节点数据拷贝个数的思想, 定义了节点效用并且使用时间序列方法进行分析。SCAR 中数据拷贝总是沿着效用逐渐增加的方向转发数据。

RAPID^[49] 把 DTN 路由问题形式化资源分配问题, 并把对路由性能评价转换成对单个数据效用的评价。协议通过令相遇的节点双方记录所有相关的数据并形成一个完整的相遇历史信息, 来保证对节点相遇的精确预测。这种方式明显占用了大量的节点的存储空间, 不适用于存储资源受限的传感器环境, 也不适用大规模节点的应用场景。Erramilli 等人^[50] 提出了一个委托转发机制 DF。DF 借鉴了概率中的雇员机制, 即如果需要从 n 个节点中选取一个最佳的中继节点 a , 可以采取对前 m 个节点进行考察, 从 m 中选择最佳节点 b , 理论上 b 将会非常接近 a 。DF 取得了同其他路由协议近似的性能, 同时降低了开销。CAR^[51] 是一个 DTN 路由协议, 它使用了一个 Kalman 滤波器来提高预测节点相遇的准确性, 与 SW 相比, CAR 明显的降低了数据拷贝的数量。

4.1.2 基于社会关系的网络通信机制

研究人员发现机会接触模型与社会网络中人的移动特征有关。PCS 节点的携带者一人(包括他们使用的交通工具)的移动往往受其生活习惯、社会关系、时间空间等因素的影响, 所以 PCS 和社会网络一样也具有典型的复杂网络特征^[47]。因此传统的移动 Ad Hoc 网络考虑和使用的节点移动方式不能直接用于 PCS 中(第 4.2 小节会给予详细论述)。Musolesi

等人^[52]提出了一个基于社会网络理论的移动模型. 该模型根据节点间的社会联系, 将节点划分到分布在不同区域的社区 (community) 并计算不同社区对每个节点的吸引力. 该模型较好的表征了分别由三个不同的研究机构在不同地点采集的实际数据集. 在文献 [53] 中, Costa 等人提出了以 DTN 中订阅-发布模式为应用背景的路由机制 SocialCast, 主要是根据社会网络和手持设备的移动网络模型的对比来预测节点间的接触, 找到最优的转发节点. SocialCast 基于这样的观察结果: 属于同一个社区的成员即使会相互远离而不能建立通信链路, 但是经过一段时间后他们再次相遇的概率却很高. SocialCast 的运行包括三个阶段: 兴趣发布、转发节点选择、数据发布. 这个三个阶段周期性的执行, 而且节点间不需要时间同步. 在兴趣发布阶段, 节点再广播兴趣消息到一跳邻节点. 在转发节点选择阶段, 通过卡尔曼滤波的方法计算节点对特定兴趣的效用值, 并选择效用最大的节点作为转发节点. 在数据发布阶段, 根据订阅情况以及效用函数再次计算消息内容并将其转发到最佳转发节点. 文献 [54] 研究了城域规模 PCS 中数据发布问题. 研究发现通过移动节点来转发固定布置的传感器的数据可以有效的提高网络吞吐量.

LABEL^[55] 利用了社会网络模型中的社区概念, 为同属于一个社区的节点赋予相同的标签, 节点相遇时就可以根据双方的标签判断是否属于同一个社区, 进而可以优先选择与目的节点处于同一个社区的节点作为转发节点. BUBBLE Rap^[56] 也是一个基于社会网络模型的路由算法 (图 6). 该算法基于这样的认识:

- 1) 人们之间的社会关系比由其设备构成的网络拓扑更加稳定;
- 2) 人在社会网络中往往具有不同的角色和受欢迎的程度, 受欢迎的人一般会有更多的朋友, 因此就会拥有与更多人相遇的机会;
- 3) 在目标节点所在的社区中, 最受欢迎的节点先遇到目标节点的可能性最大.

因此, BUBBLE Rap 的设计目标是能以在线的 (online)、分布式的方式确定人的社会性移动模式, 进而根据人在社会关系中的级别进行路由选择. BUBBLE Rap 的实现基于两个重要假设: 每个节点至少隶属于一个社区, 以及每个节点都有一个全局等级和一个社区内的等级, 这两个等级分别代表节点在整个网络系统和它所属社区内的中心性 (centrality). 这样, 在 BUBBLE Rap 中节点根据全局等级不断的把数据转发到更高等级的节点, 直到目标节点所在的社区; 然后再根据社区等级将数据转发到目标节点. 为了避免过多的数据拷贝在网络中转发, BUBBLE Rap 规定转发节点在转发数据以后便不再发送该数据, 所以说, BUBBLE Rap 是一个单拷贝转发的算法.

国内的相关工作目前有牛建伟、孙利民等人提出的 CMTS^[57]. CMTS 也是一种基于社区的数据转发算法, 首先根据节点间通信的频繁程度自动把节点区域划分到不同的社区, 然后对网络内转发的数据拷贝数量进行控制, 并且区别对待社区内和社区间的数据转发模式, 在保证转发成功率的同时

降低了数据被转发的次数. 文献 [58] 中提出了一种结合节点移动向量和接收信号强度 (RSSI) 的机会型路由 OR-RSSI, 它利用基站所发送信标的 RSSI 值来建立并更新机会概率值, 使用具有最大机会概率值的节点作为转发节点.

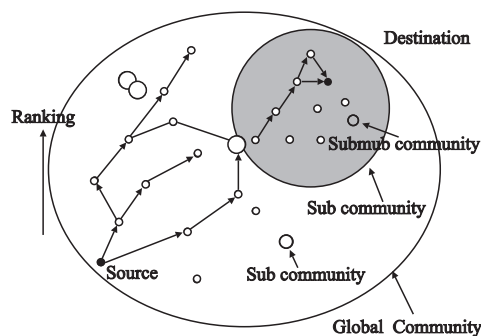


图 6 BUBBLE Rap 算法示意图

Fig.6 Illustration of BUBBLE Rap

除了设计转发算法之外, 分析网络特征对转发算法性能的影响也是一个较为重要的课题. Chaintreau 等人^[59] 研究移动模型对机会转发算法性能的影响. Palla 等人^[60] 使用一个基于团渗流理论 (clique percolation) 的算法研究了不同规模重叠社区关系的时间依赖特性和社区关系演化的基本特征. 该文作者发现在一个小规模的团内部存在着紧密的关系, 而且只要这些关系是稳定的, 那么包含这个团的社区就是稳定的; 相反的是, 对于大规模的团, 上述特性并不存在. 文献 [61] 研究了机会网络中利他行为的程度及分布对网络吞吐量和数据传输延迟的影响. Chau 等人^[62] 把机会型转发建模为有限图上的 "随机行走" 问题, 并分析了节点接触时间的特征以及网络的延迟. Basu 等人^[63] 发现, 即使对网络拓扑信息的预先了解很有限, 也可以明显的提高机会转发算法的实时性能.

小结. 在以数据收集、处理、分享为目的 PCS 应用中, 如何利用机会接触进行高效的数据通信是一个重要的课题. 通过分析可以发现, 前述针对机会网络和 DTN 提出的数据转发策略不能或不能直接用于 PCS 中, 问题集中体现在以下几个方面:

- 1) 在机会网络和 DTN 中, 网络通信更多的是面对端端的数据传输, 而在 PCS 中, 网络通信主要面对数据收集和感知任务发布;
- 2) PCS 节点类型和能力各不相同, 在设计 PCS 网络机制时, 资源的合理利用是关键, 而已有机会网络和 DTN 数据转发策略对节点差别考虑较少;
- 3) PCS 中的感知数据本身也具有异构性, 比如, 温度、方位、噪音等数据属性, 每类传感数据的类型、存储格式、信息量 (相对于应用需求)、标识的地理范围、精度等可能都不一样, 有必要在 PCS 的数据转发过程中就对所有感知数据进行处理, 进而缓解对网络资源的需求.

值得一提的是, 机会网络和 DTN 的数据转发策略一般要求节点维护若干全局信息或者与其他节点相遇的历史信息,

而且为了降低传输延迟还要求在网络中缓存一定数量的数据拷贝. 这对存储空间受限的传感器节点来说是一个非常现实的挑战. 综上, PCS 数据转发的研究还尚待深入, 可扩展性、自适应性、资源有效性、健壮性是 PCS 数据转发机制设计的基本指标, 并在此基础上还需要考虑其他 QoS (quality of service) 保障问题.

4.2 节点的移动模型

在传统的 Ad Hoc 网络中, 节点的移动为保持网络的连通提出了挑战. 所以, 传统 Ad Hoc 网络中的协议设计都把节点移动看作是不利因素. 除此之外, 在大规模网络的仿真实验中, 一个符合实际情况的节点移动模型也又助于系统性能的准确评价. 在机会型通信系统中, 通信链路就是在机会型接触的节点之间建立的, 而这样的接触机会是由节点的移动所带来的. 相对于机会网络和容迟网络, PCS 中移动的节点还带来了另外一个好处: 扩大感知范围, PCS 城域应用的可行性就是建立在节点可在较大范围内分布、移动这个基础之上的. 所以在 PCS 中, 准确理解节点的移动规律更为重要.

在移动 Ad Hoc 网络中的节点模型主要有 Random Way Point 模型^[64]、Random Walk 模型和 Random Direction^[65] 模型. 这些模型假设节点的移动具有独立同分布特性, 并且在任何时刻按照同一个概率模型来运动. 在 PCS 中, 节点往往佩戴在人的身上或者安装在交通工具上, 人和交通工具这两个载体的移动规律显然并不符合独立同分布的移动模型, 例如同一个人在街道上、在办公室里、在商场里的移动方式和规律都是不同的; 还有, 公交车与出租车都行驶在街道上, 但他们的速度、停车频率等移动方式也显然不同. Eagle 等人^[66] 较早的考察了人实际的移动和接触情况, 作者记录了校园环境、隶属于一个实验室和一个学院的学生和教师共 100 人在 6 个月内的移动和接触数据. 实验中, 每个人都携带具有蓝牙模块的手机, 并利用蓝牙的设备发现功能来判断两个人是否相遇, 即是否处于可以互相通信的距离之内. 作者公开了用户的位置和用户间接触的数据集, 这些数据可以被其他研究人员用来评价相关设计. 类似的, McNett 等人^[67] 使用了一个 300 个用户携带的 PDA 组成的实验平台, 记录了 11 周内这些 PDA 的移动情况以及它们与校园内固定分布的 Wi-Fi 接入点的接触数据, 根据这些数据, 作者提出了两个描述节点移动和相遇的网络拓扑模型. 文献[59]在 8 个不同的数据集上研究了移动节点的接触情况, 研究发现两个节点两次接触的时间间隔在 10 分钟到 1 天的时间范围内服从近似的、具有长尾特征的幂律分布. 上述实验平台多使用蓝牙模块的邻居发现功能来记录节点的接触数据, 包括接触的判断、维持的时间等等. 文献[68]研究了蓝牙模块硬件和软件上的局限性, 提出了一个提高蓝牙模块测量精度的方法.

除了上述实验研究和数据分析之外, 一些研究人员开始从理论上建立了一些人的移动模型. 文献[52]研究发现人的移动方式受其社会活动关系和习惯的影响, 常常表现为在某些群组间移动或者某个时间段内处于某个固定的群组. 作者使用了社会网络理论的技术设计了一个基于社区的移动模型 CMM, 并在已有数据集上验证了模型的有效性. Boldrini^[70] 在

CMM 的基础上提出了 HCMM 移动模型, 节点的移动往往会带动同属于一个群组的其他节点一起移动到新的群组, HCMM 考虑了这种情况. 文献[71]对 10 万个手机用户 6 个月内的位置数据进行了深入研究. 研究发现, 人的移动轨迹显示出很高的统计学意义上的规则性, 每个人的移动轨迹以一种不依时间变化的、显著的概率往返于几个固定地点, 进而可以把每个人的移动轨迹建模为一个空间概率分布. 文献[72]对 6 个月内 50 辆出租车的 7.2 万名乘客的移动轨迹进行了研究, 提出了在城市街道网络上的人的移动模型, 并分析了目的地的分布对人移动方式的影响.

小结. 可以看出, 对于由嵌入到人或者交通工具上的无线通信设备构成的机会网络或者 PCS, 设计和考察数据转发算法时必须考虑真实情况下的节点移动方式, 并利用已获得的先验知识来预测节点的接触机会, 进而设计有效的机会型数据转发算法. 目前对节点移动模型的研究还是开放性的问题. 从数据集中概括出来的模型可能不适用于节点大规模的情况; 另外, 单一的移动模型也无法总能保证获得对不同空间、时间尺度下的节点移动方式的准确描述.

4.3 隐私及安全保障技术

相对于针对领域应用的传统 WSN, 设计安全的 PCS 面临着新的挑战. 首先, PCS 的感知数据不仅描述了节点的环境信息还描述了节点本身-用户的信息, 这些信息可能非常敏感或者属于个人隐私. 其次, 网络节点的异构性、移动性以及网络拓扑的高度动态性使得应用中可能需要多层次的、动态自适应的安全机制^[73]. 最后, 由于提供数据的手持设备或者车载设备大多是由人操控的, 因此 PCS 的攻击模型、数据完整性、数据可信性也体现了新的特征和要求. Johnson 等人^[74, 75] 从数据隐私 (privacy)、数据一致性 (integrity)、数据有效性 (availability) 三个方面考虑 PCS 的安全问题, 并提出了 9 个技术挑战: (1) 数据上下文隐私; (2) 匿名的任务发布; (3) 匿名的数据汇报; (4) 数据内容的可靠性; (5) 数据来源的真实性; (6) 系统的一致性; (7) 数据抑制的防止; (8) 用户的参与程度; (9) 用户效用的公平性.

隐私和安全问题是 PCS 系统能否普遍应用的一个关键因素, 目前对 PCS 的隐私和安全问题的研究主要集中在如何保护提供感知数据的用户的隐私上. 针对 PCS 中的数据隐私、安全、伦理等问题, 文献[76]中把数据隐私和安全等管理看做是一个用户的参与过程, 并提出了参与性隐私调控 (participatory privacy regulation) 的概念, 调控的过程就是用户间对数据的获取、表述、公开等操作的协商过程. AnonySense^[77] 是一个用来保护用户数据隐私并保证数据可信的协议框架. 其中, 应用程序发布的感知任务被提交给匿名的参与者, 然后这些参与者返回可信的但依然是匿名的感知数据. PriSense^[78] 是在 PCS 的数据聚集过程中保护用户隐私的一个策略. PriSense 支持诸如 SUM、AVG、COUNT、MAX/MIN 等常用的数据聚集操作, 并在数据处理过程中使用数据切片 (slicing) 和混合 (mixing) 技术来保护响应查询的用户的隐私.

小结. 在 PCS 应用中提供隐私和安全的保障是一个复

杂的问题,因为它不仅仅涉及技术问题还在不同层面和不同程度上涉及法律、地域习惯等非技术问题。目前对 PCS 隐私和安全问题的研究还相对较少,用户的身份、位置和生活习惯等信息是 PCS 隐私和安全保障要考虑的首要因素。

4.4 网络协作

在 WSN 中,应用程序有权利对每一个节点进行查询、重编程等操作,即,节点都是天生的数据提供者和受支配者,另外,由于传感器节点传输距离十分有限,大多数情况下,一个节点还要为其它节点转发数据。但对于 PCS,用户有权选择在何时何地参与或者退出一个应用。这就使得 PCS 的设计必须考虑到节点的参与程度和参与方式对系统设计和性能的影响。Panagakakis 等人^[79]研究了 DTN 中几个典型的数据转发算法在不同合作程度下的网络延迟和通信代价,得到的研究结论为:在事先知道网络全局节点的合作意愿的情况下,网络传输性能才能得到保障。文献[80]以个域网(WPAN)为应用背景,针对孤立节点无法联入网络的情况,通过对能与网络保持链接的节点施与一定的激励,来获得被激励节点的通信资源,进而使孤立节点得以建立到目标节点的通信路径。文献[61-81]在社会网络拓扑模型和人的移动轨迹的基础上,研究了机会型通信中节点的“利他”行为(主动为其他节点提供服务或资源)对网络延迟和吞吐量的影响。研究发现,在机会型通信系统中,参与节点的不同概率分布的利他行为都有助于提高网络的性能和健壮性,尤其是当节点具有基于社区偏好的利他行为时。文献[82]设计了一种“微利”(micro-payment)激励机制来提高用户手机参与 PCS 应用的积极性。

小结:上述研究成果和结论主要是用来优化通信性能的。对于 PCS 来说,网络节点协作的目的、方式、性能评价都还有待进一步研究。

4.5 数据管理

在 PCS 系统中,用户既是感知数据的生产者,又是消费者。数据管理是 PCS 的重要组件之一,涉及的研究内容也最为广泛。UbiStore^[83]是一种分布式的、点到点的数据备份方法。UbiStore 认为日常生活中的节点的移动具有重复特性-节点间可以多次相遇,因此可以把数据备份到重复相遇的其他节点上。一旦用户的数据丢失或者节点失效,就可通过其他节点上的备份进行恢复。在 UbiStore 中,只允许数据在一跳相遇节点处进行备份。UbiStore 考虑三方面的因素:数据恢复速度、空间效率、通信代价。

由于 PCS 节点类型与资源的异构特性,PCS 应用端收到的感知数据常常是未经标示的(non-labeled)并缺少与应用相关的、统一的属性描述,所以,PCS 应用程序的推断模型往往缺少理想的训练数据。文献[84]设计了一个机会型特征向量融合机制和一个基于社会网络的训练数据共享机制,两个机制合起来构成一个 PCS 应用端的分类器,它能有效降低用户对感知数据预处理的参与程度并提高了感知数据分类的准确性和可靠性。

McNamara 等人^[85]设计了一个公共交通 PCS 的数据共享策略。该文的背景为:人们在上下班乘坐公共交通的途中,

可以利用各自的手机、Mp3 播放器等移动通信设备来分享共同感兴趣的多媒体数据。提出的机制通过预测同一辆交通工具上乘客之间共处(co-location)的时间长度信息来选择合适的数据进行交换。

对感知数据及其相关信息的查询处理是 PCS 数据管理的一个重要功能,在第 3 节中对原型系统的分析中包含了查询处理技术的介绍,这里不再列出。

小结:目前对 PCS 中数据管理的研究还相对松散。PCS 数据管理应该考虑如下方面的问题:存储那些数据、在那里存储、如何查询和处理数据、如何理解并显示数据。与 Internet 不同,PCS 的数据管理应该与网络传输、社会网络应用程序等结合起来。另外,如何设计一个通用的 PCS 数据管理框架,使其不仅能提供基本的感知数据存储、访问机制,还能为不同的背景的应用提供灵活、丰富的编程接口也是一个重要的研究方向。

5 总结与展望

以人为中心的感知系统利用便携移动通信设备的感知能力,把传统 WSN 扩展到了更大的覆盖范围,并用更低的成本和灵活的组网方式支持了更广泛的应用领域。作为一种融合了移动计算技术、WSN 技术和普适计算技术的全局感知方式,PCS 中的节点既是数据的提供者又是消费者,它以普通大众为服务对象;PCS 对于实现未来的“无所不在的感知”具有重大的影响和促进作用。目前针对 PCS 的研究主要是从不同应用背景 and 不同问题来探讨它的设计和实现,还缺乏系统、深入的认识,大量的问题还没有解决甚至还没有被发现。PCS 的研究方兴未艾,未来的研究方向将主要集中于:

- 1) PCS 系统体结构及中间件服务的可扩展性、易配置性和可重用性;
- 2) 有效描述不同时空环境下节点移动和分布的模型,并探索节点移动模型与其社会属性的联系;
- 3) 高度动态网络拓扑下的资源自适应的、健壮的数据转发机制;
- 4) 行之有效的用户安全和隐私的保障策略。

值得注意的是,对集成了传感器的手机等移动通信设备上的嵌入式软件的研究受到的关注还很少,设计和开发通用的、针对 PCS 应用需求的嵌入式操作系统或相关的终端应用软件势在必行。PCS 就是一个把具有感知和通信功能的电子设备组织成、抽象成一个能为用户提供安全的、可靠的、准确的、方便访问的全局感知系统;研究 PCS 的关键角度和手段则是对用户社会关系属性、特征等信息的有效利用。本文综述了 PCS 这一领域目前的主要研究方向和研究成果,希望能为读者提供一个对该领域的初步认识。

References:

- [1] Li Jian-zhong, Li Jin-bao, Shi Sheng-fei. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [2] Cui Li, Ju Hai-ling, Miao Yong et al. Overview of wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(1): 163-174.

- [3] Yao K. Sensor networking: concepts, applications and challenges [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32(6): 839-846.
- [4] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(4): 2292-2330.
- [5] Chen Chen, Han Wei-li, Wang Xin. Survey on security in vehicular ad hoc networks [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2011, 32(5): 896-904.
- [6] Kleinberg J. The convergence of social and technological networks [J]. *Communications of ACM*, 2008, 51(11): 66-72.
- [7] Abdelzaher T, Anokwa Y, Boda P, et al. Mobiscopes for human spaces [J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2007, 6(2): 20-28.
- [8] Chemical sensor [EB/OL]. <http://www.physorg.com>, 2011.
- [9] Mo L, He Y, Liu Y, et al. Canopy closure estimates with GreenOrbs: sustainable sensing in the forest [C]. In: *SenSys*. Berkeley, USA: ACM, 2009.
- [10] Parking [EB/OL]. <http://sfpark.org/>, 2011.
- [11] City sensing [EB/OL]. <http://girardin.org/fabien>, 2011.
- [12] Conti M, Kumar M. Opportunities in opportunistic computing [J]. *IEEE Computer*, 2010, 43(1): 42-50.
- [13] Xiong Yong-ping, Sun Li-min, Niu Jian-wei, et al. Opportunistic networks [J]. *Journal of Software*, 2009, 20(1): 124-137.
- [14] Campbell A T, Lane N, Miluzzo E, et al. The rise of people-centric sensing [J]. *IEEE Internet Computing*, 2008, 12(4): 12-21.
- [15] Pal B. SensorPlanet: an open global research framework for mobile device centric wireless sensor networks [C]. In: *NSF Workshop on Data Management for Mobile Sensor Networks*, Pittsburgh, USA, 2007: 1-3.
- [16] Lai T, Chen Y H, Huang P, et al. PipeProbe: a mobile sensor droplet for mapping hidden pipeline [C]. In: *SenSys*, Zurich, Switzerland: ACM, 2010.
- [17] Azizyan M, Constandache I, Choudhury R. SurroundSense: mobile phone localization via ambience fingerprinting [C]. In: *MobiCom*, Beijing, China: ACM, 2009: 261-272.
- [18] Lu H, Pan W, Lane N, et al. SoundSense: scalable sound sensing for people-centric applications on mobile phones [C]. In: *MobiSys*, Krakow, Poland: ACM, 2009: 165-178.
- [19] Lenders V, Karlsson G, Clemens M. Wireless ad hoc podcasting [C]. In: *IEEE SECON*, San Diego, USA, 2007: 273-283.
- [20] Clemens M, Lenders V, Karlsson G. Wireless opportunistic podcasting: implementation and design tradeoffs [C]. In: *CHANST*. Montreal, Canada, 2007: 75-82.
- [21] Vallina-Rodriguez N, Hui P, Crowcroft J. Has anyone seen my Goose? social network services in developing regions [C]. *Proceedings of 2009 Conference on Computational Science and Engineering*, 2009: 1048-1053.
- [22] Tuulos V, Scheible J, Nyholm H. Combining Web, mobile phones and public displays in large-scale: manhattan story marsh-up [A]. In: *Proceedings of the 5th Conference on Pervasive Computing* [C], Berlin, Germany: Springer, 2007: 37-54.
- [23] Mathur S, Jin T, Kasturirangan N, et al. ParkNet: drive-by sensing of road-side parking statistics [C]. In: *MobiSys*, San Francisco, USA: ACM, 2010.
- [24] Thiagarajan A, Ravindranath L, LaGurtis K, et al. VTrack: accurate, energy-aware road traffic delay estimation using mobile phones [C]. In: *SenSys*, Berkeley, USA: ACM, 2009: 85-98.
- [25] Madan A, Cebrian M, Lazer D, et al. Social sensing for epidemiological behavior change [C]. In: *Ubicomp*, Copenhagen, Denmark: ACM, 2010.
- [26] Teixeira T, Jung D, Savvides A. Tasking networked CCTV cameras and mobile phones to identify and localize multiple people [C]. In: *Ubicomp*, Copenhagen, Denmark: ACM, 2010: 213-222.
- [27] Lin J, Xiang G, Hong J, et al. Modeling people's place naming preferences in location sharing [C]. In: *Ubicomp*, Copenhagen, Denmark: ACM, 2010: 75-84.
- [28] Kim D, Kim Y, Estrin D, et al. SensLoc: sensing everyday places and paths using less energy [C]. In: *SenSys*, Zurich, Switzerland: ACM, 2010.
- [29] Wang G, Cao G, Porta T, et al. Sensor relocation in mobile sensor networks [C]. In: *Infocom*, 2005: 2302-2312.
- [30] Heo N, Warshney P. Energy-efficient deployment of intelligent mobile sensor networks [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 2005, 35(1): 78-92.
- [31] Zou Y, Chakrabarty K. Distributed mobility management for target tracking in mobile sensor networks [J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2007, 6(8): 872-887.
- [32] Tan G, Jarvis S, Kermarrec A M. Connectivity guaranteed and obstacle-adaptive deployment schemes for mobile sensor network [J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2009, 8(6): 836-848.
- [33] Mottola L, Cugola G, Picco G. A self-repairing tree topology enabling content-based routing in mobile ad hoc networks [J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2008, 7(8): 946-960.
- [34] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a delay tolerant network [C]. In: *Sigcomm*, Portland, USA: ACM, 2004.
- [35] Su Jin-shu, Hu Qiao-lin, Zhao Bao-kang, et al. Routing techniques on delay/disruption tolerant networks [J]. *Journal of Software*, 2010, 21(1): 119-131.
- [36] TinyOS [EB/OL]. <http://www.tinyos.net/>, 2011.
- [37] Want R. Enabling ubiquitous sensing with RFID [J]. *IEEE Computer*, April 2004, 37(4): 84-88.
- [38] Hull B, Bychkovsky, Zhang Y, et al. CarTel: a distributed mobile sensor computing system [C]. In: *SenSys*, Boulder, USA: ACM, 2006.
- [39] Miluzzo E, Lane N, Eisenman S, et al. CenceMe: injecting sensing presence into social networking applications [C]. In: *EuroSSC, LNCS*, 2007: 1-28.
- [40] Eisenman S, Miluzzo E, Lane N, et al. The BikeNet mobile sensing system for cyclist experience mapping [C]. In: *SenSys*, Sydney, Australia: ACM, 2007: 87-102.
- [41] Kansal A, Nath S, Liu J, et al. SenseWeb: an infrastructure for shared sensing [J]. *IEEE Multimedia*, 2007, 14(4): 8-13.
- [42] Rana R, Chou C T, Kankere S, et al. Ear-Phone: an end-to-end participatory urban noise mapping system [C]. In: *IPSN*. Stockholm, Sweden: ACM, 2010.
- [43] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks [R]. Technical Report CS200006, Duke University, 2000.
- [44] Lindgren A, Doria A, Schelen O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. *Sigmobile Mobile Computing and Communications Review*, 2003, 7(3): 19-26.
- [45] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks [C]. In: *Sigcomm*, Philadelphia, USA: ACM, 2005: 252-260.
- [46] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C. Spray and focus: efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility [C]. In: *PerCom*, NY, USA: IEEE, 2007: 792-785.
- [47] Zhan Wei-hua, Guan Ji-hong, Zhang Zhong-zhi. Advance in the research of complex network: model and application [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2011, 32(2): 193-202.
- [48] Pasztor B, Musolesi M, Mascolo C. Opportunistic mobile sensor data collection with SCAR [C]. In: *MASS*, Pisa, Italy: IEEE,

- 2007.
- [49] Balasubramanian A, Levine B, Venkataramani. DTN routing as a resource allocation problem [C]. In: SIGCOMM, Kyoto, Japan: ACM, 2007.
- [50] Erramilli V, Crovella M, Chaintreau A, et al. Delegation forwarding [C]. In: MobiHoc, HongKong: ACM, 2008: 251-259.
- [51] Musolesi M, Mascolo C. CAR: context-aware adaptive routing for delay-tolerant mobile networks [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2009, 8(2): 246-260.
- [52] Musolesi M, Mascolo C. A community based mobility model for ad hoc network research [C]. In: Realman. Florence, Italy: ACM, 2006: 31-37.
- [53] Costa P, Mascolo C, Musolesi M, et al. Socially-aware routing for publish-subscribe in delay-tolerant mobile ad hoc networks [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 2008, 26(5): 1-13.
- [54] Leguay J, Lindgren A, Scott J, et al. Opportunistic content distribution in an urban setting [C]. In: Sigcomm Chants, 2006: 205-212.
- [55] Hui P, Crowcroft J. How small labels create big improvements [C]. In: PerCom, NY, USA: ACM, 2007: 65-70.
- [56] Hui P, Crowcroft J, Yoneki E. BUBBLE RAP: social-based forwarding in delay tolerant networks [C]. In: MobiHoc, Hongkong: ACM, 2008: 1-10.
- [57] Niu Jian-wei, Zhou Xing, Liu Yan, et al. A message transmission scheme for community-based opportunistic network [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(12): 2068-2075.
- [58] Huo Guang-cheng, Wang Xiao-dong. An opportunistic routing for mobile wireless sensor networks based on RSSI [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 608-615.
- [59] Chaintreau A, Hui P, Crowcroft J, et al. The impact of human mobility on the design of opportunistic forwarding algorithms [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2007, 6(6): 606-622.
- [60] Palla G, Barabasi A L, Vicsek T. Quantifying social group evolution [J]. Nature, 2007, 446: 664-668.
- [61] Xu K, Hui P, Li V, et al. Impact of altruism on opportunistic communications [C]. In: the 1st International Conference on Ubiquitous and Future Networks, Hongkong, China: IEEE, 2009.
- [62] Chau C K, Basu P. Exact analysis of latency of stateless opportunistic forwarding [C]. In: Infocom, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2009.
- [63] Basu P, Gha S. Effect of topology knowledge on opportunistic forwarding [C]. In: Infocom, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2009.
- [64] Broch J, Maltz D, Johnson D, et al. A performance comparison of multihop wireless ad hoc network routing protocols [C]. In: Mobicom, 1998: 85-97.
- [65] Bettstetter C. Mobility modeling in wireless sensor networks: categorization, smooth movement, and border effects [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(3): 55-66.
- [66] Eagle N, Pentland A. Reality mining: sensing complex social systems [J]. Journal of Personal and Ubiquitous Computing, 2006, 10(4): 255-268.
- [67] McNett M, Voelker G. Access and mobility of wireless PDA users [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2005, 9(2): 40-55.
- [68] Nordstrom E, Diot C, Gass R, et al. Experiences from measuring human mobility using bluetooth inquiring devices [C]. In: MobiEval, 2007: 15-20.
- [69] Gonzalez M, Hidalgo C, Barabasi A L. Understanding individual human mobility patterns [J]. Nature, 2008, 453: 779-782.
- [70] Boldrini C, Conti M, Passarella A. Impact of social mobility on routing protocols for opportunistic networks [C]. In: WoWMoM, IEEE, 2007: 1-6.
- [71] Gonzalez M, Hidalgo C, Barabasi A. Understanding individual human mobility patterns [J]. Nature, 2008, 453(7196): 779-782.
- [72] Jiang B, Yin J, Zhao S. Characterizing the human mobility pattern in a large street network [J]. Physical Review E, 2009, 80(2): 1136: 1-11.
- [73] Lan Li-hui, Ju Shi-guang, Jin Hua. Research progress on privacy preserving publishing of social network data [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(12): 2318-2323.
- [74] Johnson P, Kapadia A, Kotz D. People-centric urban sensing: security challenges for the new paradigm [R]. Dartmouth College, Computer Science Technical Report, TR2007-586, 2007.
- [75] Kapadia A, Kotz D, Triandopoulos N. Opportunistic sensing: security challenges for the new paradigm [C]. In: COMSNET, Bangalore, India: IEEE, 2009: 1-10.
- [76] Shilton K, Burke J, Estrin D, et al. Participatory privacy in urban sensing [EB/OL]. <http://escholarship.org/uc/item/90j149pp>, 2010.
- [77] Cornelius C, Kapadia A, Triandopoulos N. AnonySense: privacy-aware people-centric sensing [C]. In: MobiSys 2008: 211-224.
- [78] Shi J, Zhang R, Liu Y, et al. PriSense: privacy-preserving data aggregation in people-centric urban sensing systems [C]. In: Infocom, San Diego, USA: IEEE, 2010.
- [79] Panagakos A, Vaiaos A, Stavrakakis I. On the effects of cooperation in DTNs [C]. In: Comsware, 2007.
- [80] Defrawy K, Zarki M, Tsudik G. Incentive-based cooperative and secure inter-personal networking [C]. In: MobiSys, 2007: 57-62.
- [81] Hui P, Xu K, Li V, et al. Selfishness, altruism and message spreading in mobile social networks [C]. In: NetSciCom, 2009.
- [82] Reddy S, Estrin D, Hansen M, et al. Examining micro-payments for participatory sensing data collections [C]. In: Ubicomp, Copenhagen, Denmark: ACM, 2010: 33-37.
- [83] Tan F, Ardon S, Ott M. Ubistore: ubiquitous and opportunistic backup architecture [C]. In: PerCom, 2007.
- [84] Lane N, Lu H, Eisenman S, et al. Cooperative techniques supporting sensor-based people-centric inferencing [J]. LNCS Pervasive Computing, 2008, 5013(10): 75-92.
- [85] McNamara L, Mascolo C, Capra L. Media sharing based on colocation prediction in urban transport [C]. In: Mobicom, 2008: 58-70.

附中文参考文献:

- [1] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展 [J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [2] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
- [5] 陈辰, 韩伟力, 王新. VANET 安全技术综述 [J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(5): 896-904.
- [13] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络 [J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137.
- [35] 苏金树, 胡乔林, 赵宝康, 等. 容延容断网络路由技术 [J]. 软件学报, 2010, 21(1): 119-131.
- [47] 詹卫华, 关佑红, 章忠志. 复杂网络研究进展: 模型与应用 [J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(2): 193-202.
- [57] 牛建伟, 周兴, 刘燕, 等. 一种基于社区机会网络的消息传输算法 [J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(12): 2068-2075.
- [58] 霍广城, 王晓东. 移动传感网中一种基于 RSSI 的机会主义路由设计 [J]. 电子学报, 2009, 37(3): 608-615.
- [73] 兰丽辉, 鞠时光, 金华. 社会网络数据发布中的隐私保护研究进展 [J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(12): 2318-2323.