软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2016,27(8):2025−2047 [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005049]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel: +86-10-62562563

群智感知激励机制研究综述*

吴 垚[1,2], 曾菊儒[1,2], 彭 辉[1,2], 陈 红[1,2], 李翠平[1,2]

[1](数据工程与知识工程教育部重点实验室(中国人民大学),北京 100872)

[2](中国人民大学 信息学院,北京 100872)

通讯作者: 陈红, E-mail: chong@ruc.edu.cn

摘 要: 近年来,作为一种新的感知环境、收集数据和提供信息服务的模式,群智感知逐渐成为当前的研究热点之一.激励机制是群智感知研究中的一个重要问题,即通过设计合理的激励方式来激励足够多的参与者参与感知任务,并提供高质可靠的感知数据.对近年来在群智感知激励机制方面的研究工作进行综述,首先概述群智感知和群智感知激励机制;然后从关键技术入手,介绍4类主要激励方式和6类核心研究问题;最后,对现有工作进行对比分析,总结研究挑战,并指出未来发展方向,为相关研究人员提供有价值的参考.

关键词: 激励机制;群智感知;拍卖模型;数据质量;隐私安全

中图法分类号: TP311

中文引用格式: 吴垚,曾菊儒,彭辉,陈红,李翠平.群智感知激励机制研究综述.软件学报,2016,27(8):2025−2047. http://www.jos.org.cn/1000-9825/5049.htm

英文引用格式: Wu Y, Zeng JR, Peng H, Chen H, Li CP. Survey on incentive mechanisms for crowd sensing. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(8):2025−2047 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/5049.htm

Survey on Incentive Mechanisms for Crowd Sensing

WU Yao[1,2], ZENG Ju-Ru[1,2], PENG Hui[1,2], CHEN Hong[1,2], LI Cui-Ping[1,2]

[1](Key Laboratory of Data Engineering and Knowledge of Ministry of Education (Renmin University of China), Beijing 100872, China)

[2](School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: In recent years, as a new method of environment sensing, data collecting and information providing, crowd sensing has gradually become one of the research highlights. Incentive mechanism is one of the most important research problems in crowd sensing. The method refers to certain mechanism design that encourages participants to join in sensing tasks and provide high-quality and reliable sensing data. This paper reviews the researches on incentive design of crowd sensing in recent years. First of all, crowd sensing and crowd sensing incentive design are introduced. Then, starting with key techniques, the main incentive methods and the core problems in incentive design are described. Finally, existing work, research challenges, and future directions are discussed. This work is to provide valuable reference for the related researchers.

Key words: incentive mechanism; crowd sensing; auction model; data quality; privacy and security

群智感知是结合众包思想和移动设备感知能力的一种新的数据获取模式,是物联网的一种表现形式.群智感知是指通过人们已有的移动设备形成交互式的、参与式的感知网络,并将感知任务发布给网络中的个体或群

* 基金项目: 国家自然科学基金(61532021, 61272137, 61202114); 国家高技术研究发展计划(863)(2014AA015204); 国家重点基础研究发展计划(973)(2012CB316205, 2014CB 340402)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61532021, 61272137, 61202114); National High-Tech R&D Program of China (863) (2014AA015204); National Program on Key Basic Research Project of China (973) (2012CB316205, 2014CB340402)

收稿时间: 2015-08-16; 修改时间: 2016-01-05; 采用时间: 2016-03-03; jos 在线出版时间: 2016-03-16

CNKI 网络优先出版: 2016-03-17 09:57:14, http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20160317.0957.002.html

体来完成,从而帮助专业人员或公众收集数据、分析信息和共享知识.参与式感知[1,2]、移动感知[3,4]、志愿感知[5,6]、城市感知[7−9]和社会感知[10,11]等与群智感知[12,13]虽然在概念上侧重点有所不同,但都是指人辅助移动设备进行数据收集、信息整理和知识发现的方式.目前,针对群智感知并没有明确的统一定义.不同的研究侧重点不同,在定义上也存在差异.在国外,最早提出相应概念的是 Estrin 等人提出的参与式感知[1],即通过组织移动设备,如手机,形成交互式的参与式的感知网络,从而帮助专业用户收集、分析和分享本地知识.国内最早研究这方面工作的刘云浩老师指出:群智感知的理念就是要无意识协作,让用户在不知情的情况下完成感知任务,突破专业人员参与的壁垒[12].本文所说的群智感知是指人辅助移动设备形成一定的网络规模进行数据收集、信息整理和知识发现的方式.虽然群智感知没有统一的严格定义,但是这并不影响这一领域的发展.因为群智感知能够实现大范围的数据感知,在应用领域和研究领域都得到广泛关注.加州伯克利大学(UCB)开发的空气质量检测应用 Common Sense[14]、IBM 进行的研究水域污染状况的项目 Creek Watch[15]、加州大学洛杉矶分校(UCLA)进行的一项利用位置信息来研究用户与环境相互影响的项目 PEIR[16]等都是群智感知领域的研究项目.此外,噪音级别监测项目 Ear-Phone[17]、健康服务类项目 BikeNet[18]、社会感知与社交网络结合项目 CenceMe[19]以及著名的商业化地图服务公司位智(Waze)[20]等是群智感知在社会生活中的广泛应用.群智感知研究在 Infocom, Ubicomp,Percom,Mobicom 等国际知名学术会议以及 UCLA CENS,UCB CSD 等著名研究单位都是新颖的热点问题.在国内,清华大学、北京邮电大学、南京邮电大学、西北工业大学和国防科技大学等著名院校在群智感知研究方面也取得了一系列研究成果[12,21−24].

受限于感知任务参与者数量不足[25]和提供数据质量不高[26,27],群智感知的发展受到了严重的影响.针对这一问题,群智感知激励机制通过采用适当的激励方式(模型),鼓励和刺激参与者参与到感知任务当中,并提供高质、可靠的感知数据.不同的激励方式在不同的场景下,对不同的参与者群体具有不同的激励效用,这使得激励方式的选择和设计变得复杂而困难.

群智感知激励机制的研究不仅要采用适当的激励方式,更重要的是通过不同激励方式解决服务器平台和参与者双方在最大化各自效用时面临的核心问题,以达到激励的作用.作为感知任务发布方的服务器,其主要目标是在支付代价最小或者支付代价可控的情况下激励更多的参与者,既需要提高参与者参与水平,又要保证参与者的感知数据是高质可靠的.作为完成任务的参与者,阻碍其积极参与感知任务的主要原因是参与感知任务引起的资源消耗和隐私安全问题.此外,如何实现激励方式的线上实时反馈并应用到实际当中,也是激励机制需要研究的问题.

针对群智感知激励机制中的激励方式和面临的其他研究问题,近几年逐渐涌现出许多有价值的研究工作.本文将对这些国内外的研究现状进行综述,为相关研究人员提供可参考的资料.目前,国外知名期刊上已有一些群智感知激励机制的综述论文,其中包括在本文撰写和投稿过程中刚刚发表的工作[28,29]以及还未正式发表的工作[30,31].由此可见,近些年在群智感知激励机制方面的工作受到广泛关注.因此,本文从不同角度,更加深入地阐述群智感知激励机制的研究现状,为相关研究人员提供有价值的参考.

本文第 1 节简介群智感知相关知识.第 2 节概述群智感知中激励机制的研究内容.第 3 节、第 4 节从 4 种主要激励方式和 6 类核心研究问题详细综述群智感知激励机制研究现状.第 5 节对现有工作做出对比分析.第 6 节进行总结,指出未来的研究方向.第 7 节是结束语.

1 群智感知

随着各种各样的移动便携设备的普及和广泛使用,如智能手机、平板电脑、可穿戴设备等,群智感知提供了一种新的感知环境、收集数据和提供信息服务的模式.群智感知是指通过人们已有的移动设备形成感知网络,并将感知任务发布给网络中的个体或群体来完成,从而帮助专业人员或公众收集数据、分析信息和共享知识.传统的感知数据方式,如无线传感器网络和分布式传感器网络,通常采用静态的感知方式,容易受到诸如节点覆盖不足、高代价的安装和管理成本以及缺乏可扩展性等限制,在实际部署应用时遇到很多困难.然而在群智感知中,结合人的感知判断能力和移动设备本身具有的感知能力,如地理位置、气候环境、交通情况等,可以

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

为公共安全、环境监测、医疗护理和社会生活等提供更多的数据信息.群智感知具有部署灵活经济、感知数据多源异构、覆盖范围广泛均匀和高扩展多功能等诸多优点.正因为这些优势,群智感知越来越多地得到学术界和工业界的广泛关注.

群智感知的典型系统架构如图 1 所示,该系统架构包括服务器平台、数据使用者和任务参与者(数据提供者)这 3 部分.在云端的服务器接受来自数据使用者的服务请求,将感知任务分配给参与者,处理收集的感知数据,并进行其他的管理功能.参与者接收到感知任务后,进行所需数据的感知,然后将数据返回给服务器,服务器将数据处理后返回给数据使用者.通过整个流程实现数据感知、数据收集和信息服务提供等功能,群智感知是一种分布式的、移动的、基层的、自主的服务模式.

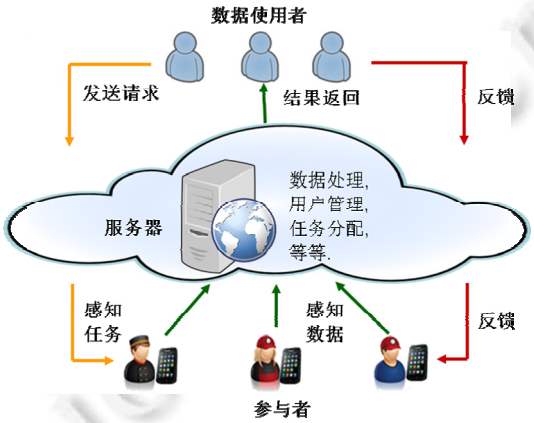

Fig.1 A typical architecture of a crowd sensing system

图 1 群智感知典型体系结构

群智感知能够从各地收集海量多维异构数据,解决各种大规模数据需求问题,提供高质量、可靠的数据服务.然而,随着群智感知的流行,新的问题和挑战也逐渐显现出来.其中,限制群智感知发展的最主要原因是参与者积极性不高,服务器平台不能招募到足够多的参与者来获得高质可靠的感知数据.因此,如何激励更多的参与者加入群智感知,提供具有高可靠性和高有效性的感知数据,是促进其发展的关键问题.

2 群智感知激励机制

激励机制在 P2P 网络[32]、机会网络[33]、延迟容忍网络[34,35]和无线频谱分配[36]等方向中也存在大量研究工作.与此不同的是,群智感知新的体系结构和网络关系,使得激励机制方式更加多元化.在群智感知中,移动用户的普遍参与使得激励的客体具有移动属性,如地理位置和任务覆盖率的影响,这使激励问题变得更加复杂.而且,新的技术和理论也使得群智感知激励机制与传统网络中的激励机制不同,如社交网络关系的影响等.因此,针对群智感知激励机制这一研究方向,我们从主要激励方式和核心研究问题两个角度进行详细的分析和对比.

群智感知激励机制研究的主要目标是在服务器平台的管理下激励具有感知设备的持有者(参与者)加入感知项目,并积极参与感知任务,提交高质可靠的感知数据.根据群智感知的体系结构,如图 1 所示,在群智感知激励机制中涉及的主体有参与者(participants)和服务器平台(server).激励机制可以用如下模型表示:

$$I{:}M\rightarrow\max(U(S),U(P)) \tag{1}$$

该模型表示群智感知激励机制(incentive,简称 I),即通过某种激励方式(mechanism,简称 M)达到服务器平台(server,简称 S)和参与者(participants,简称 P)的效用(utility,简称 U)最大.

群智感知受限于参与者数量不足的原因主要来自两个方面:

- 一方面是参与者希望从提供数据中得到实际的回报,而不是志愿无偿提供数据.因为数据的感知需要消耗参与者移动设备的电池电量、计算资源和数据流量等资源,在此过程中,参与者也需要付出时间和

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

劳动.没有适当的回报,参与者没有兴趣在群智感知中长期保持积极状态.

- 另一方面,参与者提供的一些敏感数据会泄露其隐私信息.参与者感知的数据包括文本、图像、音频、视频等多种类型的数据,这些数据大多是时间和位置敏感的,需要用户提供数据的同时提供对应的时间和位置.对因此而泄露的的时空隐私信息,是阻止参与者加入的另一个主要原因.

在群智感知中,参与者是被激励的对象,可能具有以下特点:

1) 自私性:不愿无偿使用感知设备资源.
2) 个体理性:希望得到的回报的效用高于付出的时间、资源、行动等代价.
3) 不诚实性:为了以最小代价获得更多报酬,参与者会故意提交低质量或虚假的感知信息.
4) 不确定性:参与者的感知能力取决于感知设备的能力和主观的个人感受等.

对于服务器来说,考虑到参与者的这些特性,服务器希望在付出最少代价或者代价可控的情况下,招募更多的参与者,而且是高质量可信性数据的提供者.例如,对于位置敏感的数据,感知数据的来源越广泛、越均匀,数据质量越高.对于这种情况,偏僻地区的数据就会更加有价值.服务器平台的激励机制要能激励参与者提供高质量的数据,而不仅仅考虑支付代价.此外,参与者会为获取更多的支付回报而谎报数据信息或者个人信息,因此,激励机制还需要对参与者的可信性进行控制.由此可见,对服务器平台来说,一套合理的激励机制能够保证参与水平,同时保证完成质量.另外,如何实现激励方式的线上实时反馈,并通过实际的应用系统来验证评估激励方式的有效性,都是激励机制值得研究的问题.

针对不同的情况,不同的激励方式具有不同的激励作用,对不同的激励方式的优劣并没有形成统一的认识.目前的研究主要可以分为报酬支付激励(monetary reward incentive)、娱乐游戏激励(entertainment & gamification incentive)、社交关系激励(social relation incentive)、虚拟积分激励(virtual credit incentive)和混合激励.虽然激励方式不同,但是这些方式都能通过满足参与者的某种需求来提供激励作用,从而达到激励效果.

采用适当的激励方式能够达到一定的激励效果,但是激励机制的研究不仅仅是激励方式的研究,更主要的是通过采用合理的激励方式,结合有效的关键技术,解决服务器平台和参与者双方在最大化各自效用时面临的核心问题,以达到激励的作用.这些核心研究问题主要包括参与水平问题、完成质量问题、支付控制问题、效率能耗问题、隐私安全问题、线上实时问题和实际应用问题.

现有的群智感知中的激励机制研究可以从主要激励方式入手,进而介绍解决核心研究问题的关键技术来进行综述.群智感知激励机制作为一个新的研究方向,主要的文献工作在于研究不同的激励方式对激励机制的影响以及如何通过激励机制解决不同的研究问题.因此,本文首先介绍主要的激励方式,然后介绍针对不同的核心研究问题采用的技术方法来进行综述工作.具体来说,本文首先将从报酬支付激励、娱乐游戏激励、社交关系激励、虚拟积分激励这 4 种不同的激励方式介绍主要激励模型,然后,根据激励机制的核心研究问题,本文将从参与水平问题、完成质量问题、支付控制问题、效率能耗问题、隐私安全问题、线上实时问题这 6 个方面介绍主要技术方法.

3 主要激励方式

在群智感知中,有不同的激励方式,简单来说,从回报方式上可以分为金钱式的激励和非金钱式的激励.金钱式的激励主要是通过报酬支付来激励参与者参与,其中最主要的金钱式激励方式是拍卖机制,即通过对参与者对感知数据的报价,选择支付代价较低的参与者子集来完成感知任务.报酬支付激励通过金钱货币的方式回报参与者的感知数据,这是最直接,也是目前主要的激励方式.文献[37]指出,含有金钱激励方式的机制往往效果更好.非金钱式的激励主要包括娱乐游戏激励、社交关系激励和虚拟积分激励.娱乐游戏激励指通过将游戏策略引入到群智感知系统中,利用游戏的娱乐性和吸引性来激励用户完成感知任务.社交关系激励是指在参与者所处的现有的或者服务器平台构建的某种社会网络关系中,参与者为保持在社交关系中的归属感而受到激励.虚拟积分激励是指参与者会从感知任务中得到虚拟积分作为回报,由虚拟积分转换成的真实货币、某种实物或者由其带来的虚拟回报感会激励用户参与感知任务.因此,群智感知中的主要激励方式可以按照图 2 所示的方

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

式进行分类.

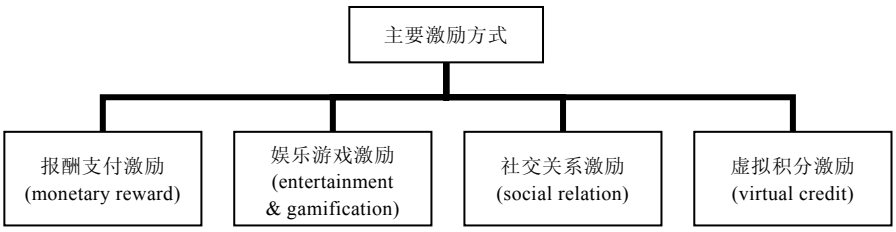

Fig.2 Taxonomy of incentive methods in crowd sensing

图 2 群智感知激励方式分类

3.1 报酬支付激励

报酬支付激励根据侧重点的不同,可以分为以服务器为中心的(server-centric)方式和以参与者(user-centric)为中心的方式两种,这两种方式都是以微支付(micro-payment)的方式回报参与者的感知数据.以服务器为中心的方式首先需要提前得知所有参与者的信息,如报价、数据质量等,然后从所有参与者中选择支付代价最小、效用最大的一个子集作为支付对象.这种以服务器为中心的支付回报方式主要采用博弈论方法(game theory),其中最主要的是拍卖模型(auction model).在拍卖模型中,每个参与者有一个报价 b_i,一个真实估价 v_i,且 $b_i \geqslant v_i$,以保证参与者获得非负收益.服务器提前得知报价信息 b_i,选择报价最低的一部分而不是所有报价的参与者进行任务感知,这样可以减小支付代价.在竞价中,获得感知任务的称为赢标者(winner),反之则为失标者(loser).在报酬支付激励这一节,本文会多次引用此基础拍卖模型.以参与者为中心的报酬支付是指服务器平台不是根据所有已知参与者信息选择部分参与者,而是直接根据每个参与者个人报价或者完成质量进行支付.在这种情况下,不需要其他参与者信息作为参考,参与者本身具有更多主动性和优势.John 等人[38]做了为期两天、人数 96 人的调查研究,发现相对于加权彩票(weighted lottery)的方式,微支付能够激励更多的参与者完成感知任务.文献[37]采用感知数据总量、感知数据质量和时空覆盖率这 3 个属性作为评估标准,对微支付的激励方式进行研究发现,不同的支付方式和支付额度对不同的群智感知应用具有一定的影响.

报酬支付激励方式主要是基于博弈论的方法,其中最主要的是拍卖机制,包括逆向拍卖、组合拍卖、多属性拍卖、全付拍卖、双向拍卖以及 VCG(vickrey-clarke-groves)拍卖.此外,还有基于斯塔克尔伯格(Stackelberg)博弈的激励方式等.一般情况下,基于拍卖模型的激励机制需要考虑以下 4 点:

- 个体理性(individual rationality):每个参与者希望得到非负的收益.
- 真诚可信(truthfulness):对于参与者而言,以真实估计 v_i 竞标是占优策略,即参与者不能从虚假的报价中获得更多的效用.
- 社会福利(social welfare):所有赢标者的收益要最大化,以提高整体社会福利.
- 计算效率(computation efficiency):竞价的结果,即赢标者的选择过程,要在多项式时间内计算出来.

3.1.1 逆向拍卖(reverse auction,简称 RA)

逆向拍卖也称为反向拍卖、荷兰式拍卖、减价拍卖或招标系统等,是不同于传统的正向拍卖的一卖方多买方形式.逆向拍卖是指存在一位买方和许多潜在卖方的拍卖形式,如图 3 所示.在逆向拍卖中,买方会提出自己想要得到的商品,然后等待持有自己想要的商品的卖方的联系,潜在卖方持续喊出更低的价格,直到不再有卖方喊出更低价为止.在群智感知系统中,服务器平台是买方,参与者是卖方,服务器平台发布感知任务,参与者以自己完成感知任务希望获得的报酬进行报价,最终,服务器平台选出报价最低的一组参与者作为赢家并支付报酬.即 $B=\{b_1,b_2,...,b_n\}$ 是参与者报价集合,那么 $B_w=\{b_{w1},b_{w2},..,b_{wm}\}\subseteq B$ 并且 $\max(B_w)\leqslant\min(B-B_w)$ 是赢标者的报价集合.逆向拍卖激励方式是一个子集选择问题,即服务器平台在最大化效用的前提下,选择支付代价最小的参与者子集.

文献[39]首次将经济领域中的逆向拍卖应用在群智感知激励机制研究中,在最小化支付代价的同时,保证

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

较高的参与率.文献[39]提出逆向拍卖动态价格-虚拟参与积分机制(reverse auction based dynamic price-virtual participant credit,简称 RADP-VPC),采用逆向拍卖机制,选取参与者中出价最低的作为赢家并支付,同时引入虚拟参与积分的概念,避免在竞价中屡次失败的参与者退出参与.文献[39]的贡献在于将经济模型引入激励机制,同时,相对于固定价格随机支付的方式(random selection based fixed price,简称 RSFP),提出动态价格和虚拟参与积分的方法保证了参与率,并最小化支付代价.

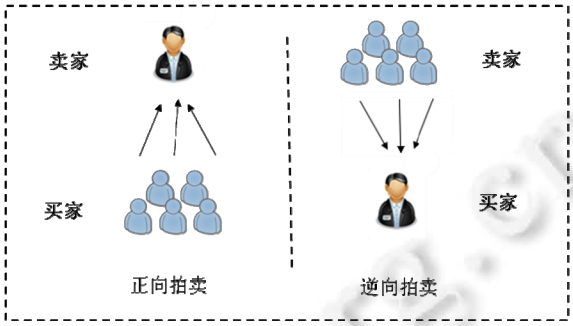

Fig.3 Regular auction and reverse auction

图 3 正向拍卖和逆向拍卖

逆向拍卖作为常用的报酬支付方式,在不同的研究工作中用作基本模型来解决群智感知激励机制中不同的问题.比如,文献[40–42]采用逆向拍卖解决线上实时激励机制;文献[26,43]考虑位置敏感的群智感知任务,采用逆向拍卖模型来实现高质量数据反馈的激励机制等.逆向拍卖适用于易失性物品的拍卖,时效性商品采用逆向拍卖的方式可以获得比固定价格更多的期望利润.因此,在群智感知激励机制中,逆向拍卖所采用的买方动态竞标任务的方式可以非常容易地解决感知任务价格确定的问题.

3.1.2 组合拍卖(combinatorial auction,简称 CA)

在群智感知中,服务器平台可以发布多个任务,每个参与者也可以选择多个任务进行投标,这样,每个参与者可以赢得多个任务的支付.组合拍卖是指竞价人可以对多种商品的组合进行竞价的拍卖方式.与传统的拍卖方式相比,组合拍卖在分配多种商品时效率更高.组合拍卖是一种一对多的逆向拍卖模型,即,一个竞标者可以竞标完成多个感知任务.

Feng 等人在文献[44]中采用逆向拍卖中的组合拍卖模式来激励参与者,参与者可以根据自己所在位置和感知范围竞价多个感知任务,服务器平台根据汇总的参与者竞价情况来选择赢标者.

3.1.3 多属性拍卖(multi-attributive auction,简称 MAA)

在群智感知中,参与者的任务分配往往不仅仅取决于报价这一单一属性,还受数据质量、参与时间等其他因素的影响.多属性拍卖是指卖方与买方在价格及其他属性上进行多重谈判的一种拍卖方式,多属性拍卖也是逆向拍卖的一种.

Krontiris 等人[45]采用逆向拍卖中的多属性拍卖机制,不仅考虑参与率问题,还考虑到感知数据的质量问题.服务器平台能够通过拍卖过程影响数据质量,同时,参与者能够通过拍卖结果的反馈提高自身感知数据的质量,从而提高竞标价格.多属性拍卖的效用函数可以由公式(2)[45]表示.

$$S(x)=\sum_{i=1}^{n}w_iS(x_i) \text{ and } \sum_{i=1}^{n}w_i=1 \tag{2}$$

其中,w_i 是各属性权值,$S(x_i)$是各属性的效用函数.竞标成功者即多属性效应最大的参与者,即公式(3)[45].

$$\max\{S(x_j)\},\ \text{where } 1\leqslant j\leqslant m \tag{3}$$

文献[45]中通过蒙特卡洛仿真(Monte Carlo simulation)模型进行实验,指出,MAA 机制相对于单一属性的逆向拍卖机制,能够获得更高的实际效用.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

3.1.4 全付拍卖(all-pay auction,简称 AA)

在全付拍卖中,所有的投标人都要付出他们投标的费用或者代价,无论最后谁赢.当然,最后投标最高的人赢得拍卖.在群智感知中,服务器平台并不是支付每个参与者,而是只有一个支付报酬,这个报酬是支付给参与者中做出最大贡献的,但是其他参与者虽然没有得到报酬也要完成他们的感知任务.即

$$B_w=\max(C(p_i)).$$

其中,$C(p_i)$是参与者p_i的贡献.在全付拍卖中,每个投标人的期望收益等于最高支付报酬,而这个支付报酬往往比较高,这就在一定程度上更能激励参与者参与到感知任务中.

Luo 等人[46]提出用全付拍卖的方法来激励参与者参与.全付拍卖是指服务器只支付参与者中贡献最大的竞标者,而不是所有参与者.全付拍卖支付给参与者的唯一报酬不是一个固定的值,而是关于所有参与者最大贡献的函数.在此基础上提出利润最大化的激励机制.文献[47]同样采用全付拍卖机制,基于参与者行为,提出针对线上实时激励机制的序列全付拍卖(sequential all-pay auction)方法.全付拍卖的方式适用于不完全信息、风险规避和随机群体的情况.

3.1.5 双向拍卖(double auction,简称 DA)

在群智感知中,除了上文已提到的买卖双方一对一、一对多的支付方式以外,还可能是多对多的方式.双向拍卖是指买卖双方的交易人数都多于一人,只要一方中有人接受另一方的叫价,两者便可以达成交易,每一次交易一个商品,可以有多个交易期.双向拍卖是一种多对多的拍卖,即多个买者和多个卖者.由于双向拍卖是一种多对多的拍卖形式,在群智感知激励机制中适用于多个参与者与多个参与者之间的交易.

Yang 等人[18]采用双向拍卖机制来激励参与者加入位置信息敏感者的 K 匿名保护中.在群智感知中,不同的参与者对于位置隐私的敏感程度是不一样的,因此提出,采用双向拍卖的方式激励位置隐私不敏感者加入位置隐私敏感者的激励行动中,以实现经典的 K 匿名位置隐私保护.在文献[48]中,位置敏感者是买方,位置不敏感者是卖方,通过双向拍卖的方式,可以激励买方实现 K 匿名的位置隐私保护需求,如公式(4)[48]所示.

$$U^b=\{U_1^b,U_2^b,\ldots,U_n^b\},\ U^s=\{U_1^s,U_2^s,\ldots,U_n^s\},\ |W^b|+|W^s|\geqslant k_i \text{ for each } U_i^b\in W^b \tag{4}$$

3.1.6 VCG(vickrey-clarke-groves)拍卖

VCG 拍卖模型是指对每个竞标者的报酬,是按照该竞标者的加入而造成的对其他所有竞标者造成的损害值进行支付.典型的 VCG 拍卖包括分配规则(allocation rule,即赢标者选择规则)和支付规则(payment rule)两部分.文献[49]采用 VCG 拍卖机制,针对线上群智感知激励机制,另外引入更新规则(updating rule).分配规则在每个时间段内最大化社会福利(social welfare)效益来选择赢标者,支付规则对每个赢标者按照对其他参与者造成的损害值来进行支付回报,更新规则根据用户的可信度来调整更新分配规则.

3.1.7 Stackelberg 博弈(Stackelberg game)

Stackelberg 博弈模型(SG)中包括带头人(leader)和跟随者(follower),带头人首先采取行动,然后跟随者根据带头人行动调整自己的策略来最大化自己的效用.文献[50]中,针对服务器为中心的激励模型采用 SG 来最大化服务器效用.首先,服务器作为带头人公布支付报酬;然后,参与者作为跟随者调整自己的感知时间来最大化个人收益.文献[51]同样基于 SG 模型,建立参与者之间的社交关系来实现激励机制.

3.1.8 其他(others)

此外,一些非基于博弈论的报酬支付的方式也在文献[52–56]采用.如,文献[52]根据当前参与情况支付每个参与者的感知数据;文献[55]根据参与者的历史数据和时空位置来决定参与者支付;文献[56]在预算一定的情况下,分配给每个空间位置上的子区不同支付,参与者的报酬由子区的预算决定.在最近的工作中,我们提出了基于纳什讨价还价模型(Nash bargain theory)的、将参与者划分为群(crowd)的激励机制.该方法能够提高参与率,保证参与者位置隐私,同时保证数据质量和参与者的可信性.此外,在近期的研究工作中,我们还提出位置相关的群智感知中参与敏感、贡献依赖的激励机制.不同于现有的研究工作,即服务器在报酬支付上具有优势地位,该机制提出自由市场式的支付方式,保证参与者和服务器的同等交易地位.我们提出了基于沃罗诺伊图(Voronoi)划分和信息熵的参与水平衡量方法,构建基于狄罗尼图(Delaunay diagram)的方式来计算参与者的个

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

体参与贡献.同时提出线上和线下两种激励机制,并且都实现了预算内的报酬分配问题.

在报酬支付激励方式中,基于博弈论的机制能够提供很好的数学模型来解决理性服务器和参与者之间的冲突和合作的关系以及决定选择问题,同时可以提供充分的理论工具来分析参与者的行为.因此,不同的博弈模型在不同的场景下被用来模拟解决不同的问题,这些方法以服务器为中心的为主.这些基于博弈论模型,尤其是拍卖理论的报酬支付的激励方式(RA,CA,MAA,AA,DA,VCG,SG,others),将服务器平台和参与者作为博弈的双方,同时,参与者之间为获得感知任务形成竞争关系.根据拍卖双方的人数、信息是否完全、优化目标等的不同,不同的拍卖方式适用于不同的群智感知环境.报酬支付的方式能够有效地激励参与者的积极性并且有良好的理论基础,但是在实际群智感知应用中,考虑到报酬支付存在的问题,如服务器平台需要付出金钱、支付安全、支付的合理公平等,这种方式并不常见.而作为非金钱式的回报,由于其不需要支付参与者实际金钱,在研究中也越来越受到关注.

3.2 娱乐游戏激励

娱乐游戏激励是指通过参与者进行游戏,由游戏带来的等级排名、任务积分以及其内在的趣味性等激励参与者完成任务.与金钱激励相似,游戏激励同样会给参与者带来满足感,因而起到激励的作用[25,,57,58].

Kawajiri 等人[27]采用游戏激励的方式来鼓励用户完成面向数据质量的位置相关的感知任务,该机制首先将数据收集的回报转换成游戏积分(game point,coupon point);然后,参与者决定是否参与到任务执行中.在他们的实际系统中,游戏积分是根据质量指标(quality indicator)确定的.在不同的位置,根据当前数据采集质量制定出不同的游戏积分,以此来激励参与者进行数据收集,并通过不同的游戏积分激励参与者到不同的地点收集数据.

BudBurst[59]是 UCLA 进行群智感知的一个项目,用来考察游戏机制在激励用户收集数据中的激励作用.BudBurst 是一项根据用户观测周围植物并记录观测结果,上传到服务器网站来研究气候变化对植物的影响的项目.文献[59]引入户外游戏活动作为激励机制来鼓励人们参与到项目中.这些游戏活动包括积累积分、等级升级和户外观测记录.通过招募 50 名志愿者,经过为期两周的实验.该文指出,这种游戏激励机制能够促进用户的参与.

在文献[60]中,Ueyama 等人提出,为避免越来越多的报酬支付,采用游戏的机制来减少支付费用.文中提出了状态级别机制(level scheme),即类似航空公司的里程积分.文中还采用排名机制(ranking scheme)和徽章机制(badge scheme)来激励参与者.这种支付回报结合游戏的机制不仅可以满足参与者的金钱需求,还可以在游戏中获得成就感(sense of accomplishment).实验结果表明,游戏激励机制将参与概率从 53%提高到了 73%.

娱乐游戏激励方式将一系列的游戏方式设计和任务奖赏回报策略,融合参与者的习惯和心理作用,有机地结合到群智感知激励机制中,能够对参与者起到积极的激励作用.娱乐游戏激励的局限性在于,将感知任务与游戏设计结合在一起,十分依赖于感知任务和游戏各自的特点,并不是所有的感知任务都可以简单地游戏化.目前来说,位置相关的感知任务更容易与娱乐游戏相结合.

3.3 社交关系激励

社交关系激励是指利用参与者形成的社交关系网络来激励其参与感知任务.社交关系激励更侧重于通过参与者为了维护自己在社会网络中的地位、荣誉等而带来的积极性和主动性来提高感知任务的质量.

文献[61]通过引入现有的社交网络信息来检测不诚实的自私参与者,并对其惩罚来激励参与者(IRONMAN).针对群智感知中一类特殊的感知网络——机会感知网络,该文献通过现有社交网络来建立参与者之间的信任体系,以改善现有的激励机制.由于没有固定的感知网络基础结构,感知数据有时需要通过感知节点之间传递到服务器.考虑到感知节点的自私性,为了减少不必要的能量和存储消耗,自私的感知节点不会为其他节点传递数据.文中针对这种情况,利用已经存在的社交网络信息建立感知节点(用户)之间的信任关系模型.该方法能够及时检测出自私节点,提高网络信息传递率.

Luo 等人[51]提出了 Simple Endorsement Web(SEW)的方式——一种基于裙带关系(nepotism)的激励机制.通

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

过建立参与者之间的背书关系(endorsement)来保证参与者数据质量的可信性.裙带关系是指当其中的某个个体上传不可信的数据时,这种不可信的行为会导致裙带关系内的其他个体受到牵连甚至惩罚.裙带关系是一个有向图:

$$W=(N,E),\ \text{a set } N \text{ of participants and a set } E \text{ of endorsement links.}$$

裙带关系通过公式(5)[51]传递,通过裙带关系内的成员之间的监督和回报分配来达到可信的参与.

$$BP_k = \sum_{i \in N_k^{in}} \frac{EP_i}{|N_k^{out}|} \tag{5}$$

针对社区感知这一类特殊的群智感知,Faltings 等人[62]提出了同行互清(peer truth serum)的方式来解决激励机制问题.他们指出,尽管基于游戏的方式可以应用到此场景中,但也存在不足.他们提出了一种能够激励参与者提供精确可靠的感知数据的激励方式.在 t 时刻,服务器端有此时刻的各地 l 的空气污染概率,通过参与者上传的观测数据 o,会得出下一时刻 t+1 各地的空气质量概率分布图.只有当参与者的感知数据 o 是真实可靠的数据时,才能保证下一时刻的预测是准确的.因此,他们提出了激励参与者上传可信数据的机制:

$$\begin{cases} function\ a + b \cdot \tau(s,q,R): \\ \bullet\ \ \tau(s,q,R) = \dfrac{1}{R(q)},\ \text{if } s = q; \\ \bullet\ \ \tau(s,q,R) = 0, \qquad \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

在公式(6)[62]中,R 是先验概率分布,s 是参与者上传数据,q 是同行之间生成的参考估计值.参与者的收益是和同行(peer)的数据有关的,通过在同行之间形成可信关系网络来激励参与者上传真实数据.

社交关系激励利用参与者在社交网络中的相互影响来激励参与者,尤其是激励参与者提交高质可靠的感知数据.在线社交关系是线下真实社会关系的延伸,参与者会在意自己在社会关系中的地位、成就、认可等,因此会在社会关系中形成激励作用,激励参与者更加积极地、高质量地完成感知任务.社交关系的激励效果会受网络关系本身的影响,在真实、可信的社交网络中,参与者的积极性往往更强.

3.4 虚拟积分激励

虚拟积分激励与直接的报酬支付不同,但同样能够起到激励的作用,如航空公司提供的飞行积分等.参与者能够通过不断的积累积分来获取其他的奖励.

文献[63,64]采用虚拟积分来解决车辆通信的移动监控问题,通过移动车辆自带的摄像头采集交通事故的现场,从而帮助警方定位肇事者或者犯罪嫌疑人.该激励机制通过虚拟积分鼓励参与者使用自己的数据流量上传数据,或者分享自己的宽带资源帮助其他参与者上传数据.文中根据不同的数据产生的效用赋予不同的虚拟积分,如不同的视频分辨率,高分辨率的视频可以获得高的虚拟积分.

图 4 中,Source Node 通过上传数据获得虚拟积分,Relay1,Relay2 通过分享自己的宽带资源辅助 Source Node 获得虚拟积分.

Yu 等人在文献[65]中提出了一个基于虚拟积分的数据流量分享系统 INDAPSON.该方法旨在激励那些数据流量过剩的用户分享自己的数据帮助流量不足的用户.文中指出,现有的通信行业的流量套餐业务是固定的,但是每个用户的消费每个月是不一样的,这就造成了数据流量的浪费.文章旨在通过虚拟积分制度,基于信誉的自适应价格机制(reputation adaptive pricing scheme,简称 RAP)来激励流量数据过剩的用户分享自己的流量数据给数据不足的用户.

虚拟积分激励不同于报酬支付方式,参与者不能直接获得支付报酬,但是虚拟积分能够满足参与者自我价值实现、虚荣方面的心理需求,对参与者起到导向性作用,增加用户粘性.虚拟积分方式可以用来结合报酬支付和娱乐游戏的方式,更好地激励参与者.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

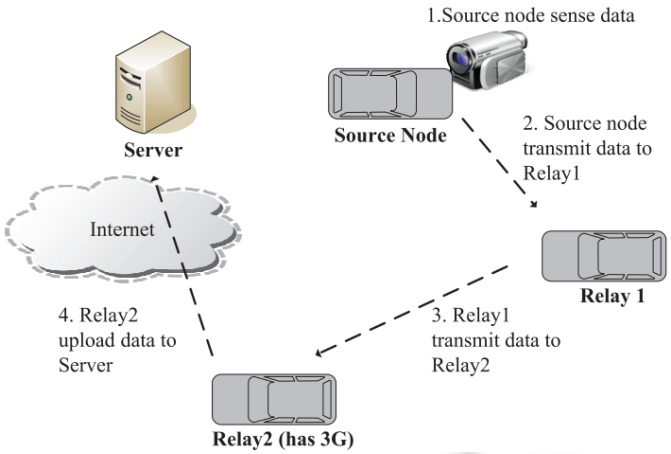

Fig.4 Crowd-Based surveillance model in Ref.[37,38][63,64]

图 4 文献[37,38]中群智监控模型[63,64]

3.5 混合方式

在群智感知激励机制中,为了更好地激励参与者,往往会集成两种或以上的激励方式(hybrid incentive).文献[25,66]采用 RA 选择赢标者来支付感知数据,同时,通过虚拟积分方式激励失标者保持在系统中的积极性.文献[51]采用 SG 模型,并建立参与者之间的背书关系来激励参与.文献[67]运用了 3 种激励方式:基于博弈的 RA 报酬支付方式、基于用户信誉等级的社交关系激励和娱乐游戏激励.

综上所述,不同的激励机制可以通过满足参与者某些方面的需求来实现激励的作用.从现有的研究来看,以拍卖机制为基础的报酬支付激励是研究最广泛的.同时,其他激励方式也在不同的情况下有不同的积极效果.娱乐游戏激励是通过内在的娱乐属性和吸引力来激励参与者加入感知任务,社交关系激励是通过已有的或者构建的社交关系来激励参与者参与并提供高质、可靠的感知数据,虚拟积分激励是通过提供虚拟的支付方式来激励参与者.此外,混合式的激励方式针对不同情况也有很好的激励作用.总之,激励方式的研究主要是对参与者进行报酬激励、娱乐激励、精神激励、荣誉激励等,以满足参与者的心理需求,促进参与者加入到感知任务中.

4 核心研究问题

在群智感知中,激励方式为激励机制研究提供了基本模型.在此基础上,针对激励机制涉及的不同研究问题,诸多研究工作提出了关键技术和算法来解决这些问题.在群智感知激励机制中,以下 6 点是核心研究问题:

- 参与水平:激励机制最主要的目标是激励参与者参与感知任务,即,提高参与率.同时,从时间维度考虑,保持参与者参与的长期性也是需要考虑的问题.服务器平台不仅希望参与者参与到感知任务中,还希望参与者会长期保持在群智感知系统中,为感知任务提供长期的数据感知.此外,参与水平对激励机制的反馈影响也是值得研究的问题.
- 完成质量:文献[27,68]指出,仅依靠提高参与率难以保证完成群智任务的高质完成,还需要考虑用户位置、用户行为和数据质量等对任务完成质量产生的影响.群智感知任务大多数是位置敏感的,用户的位置将影响整体的数据感知质量,参与者因为其内在的自私性有可能故意上报虚假数据而影响感知数据质量.此外,感知设备本身的灵敏度和参与者自身的局限性也会影响任务完成质量.
- 支付控制:作为服务器平台,往往要对参与者的感知数据支付一定的报酬,服务器要保证支付代价最小,或者将支付代价控制在固定的预算内.
- 效率能耗:效率能耗不仅指服务器需要高效的算法处理激励机制,也指参与者希望激励机制能够减少感知设备的资源消耗.感知设备的资源消耗是阻碍参与者参与感知任务的重要原因,激励机制需要尽

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

量减少这些资源消耗,高效的算法是激励机制中提高效率、减少运行时间不可或缺的部分.

- 隐私安全:隐私安全包括参与者的参与隐私性和服务器的安全性.参与者希望在感知任务上传数据的时候不泄露个人隐私数据,尤其是位置敏感的群智感知.由于参与者可能是不诚实的,因此上传的虚假数据对服务器造成数据安全问题.此外,恶意用户或其他实体的恶意攻击也是需要考虑的.
- 线上实时:根据处理时间的不同,激励机制的处理可以分为线上处理和线下处理.线下处理指服务器平台需要根据所有参与者的信息才能做出感知任务分配的决定,是一种需要全局信息的方式.而参与者的动态随机加入和对实时反馈的要求,需要提出线上机制来实时激励参与者.

现有的研究工针对这些问题,在主要激励方式和模型的基础上提出了关键的技术和高效的算法来达到激励作用.本节将从图 5 中的 6 类问题来综述激励机制的关键技术.

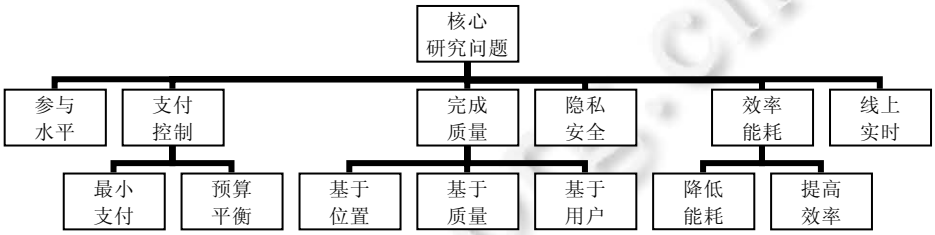

Fig.5 Taxonomy of incentive problems in crowd sensing

图 5 群智感知激励机制研究问题分类

4.1 参与水平问题

群智感知激励机制的一个重要目标是,激励参与者加入到感知任务中.文献[25]是最早研究群智感知激励机制问题的工作之一,文中提出了 RADP-VPC 模型,采用逆向拍卖机制选取出价最低的参与者作为赢家并支付,同时引入虚拟参与积分的概念,避免在竞价中屡次失败的参与者退出参与.文献[25]的贡献在于将经济模型引入激励机制中,同时,相对于固定价格随机支付的方式,提出的动态价格和虚拟参与积分的方法保证了参与率,并最小化支付代价.

在群智感知中,大部分激励机制是直接支付参与者感知数据的短期(short-term)激励,对于很少被选为参与者的用户,会失去兴趣而退出群智感知系统.长期性激励机制在于激励参与者为感知项目提供长期的持续性的激励.Gao 等人[49]因此提出了参与率的长期性(long-term)问题,并基于李雅普诺夫 VCG 拍卖(Lyapunov-based VCG auction)模型来解决此问题.文中考虑了一个更加普遍的架构,即基于时空的感知体系.不同地点和不同时间的数据具有不同的价值,因此,如何选择参与者来保证最大的效益和长期性的参与,是激励机制的一个挑战.他们基于李雅普诺夫 VCG 拍卖模型,在不需要未来信息的情况下,实现最佳的线上任务分配机制.他们将参与者的报酬根据时间段(slot)分多次进行支付,实现了激励的长期性.

同样针对长期性参与问题,Sun 等人在文献[53]引入 restless Multi-Armed Bandit(MAB)过程模型和多信念值(heterogeneous belief values)模型.他们将这种持续的群智感知激励模型化为 MAB 过程,基于社会状态和实时贡献的多信念值模型来解决实时线上长期激励问题.

除了参与的长期性研究以外,Thepvilojanapong 等人[52]还提出了参与敏感(participation-aware)的激励机制 SenseUtil.他们根据需求关系决定感知数据的支付报酬,如果参与水平低,就自动提高价格来吸引参与者加入.他们通过平均参与数(N_{avg})来定义参与级别(participation level),如公式(7)[52]所示.

$$N_{avg}=\frac{\sum_{i=1}^{N_{poi}} S_i}{N_{poi}} \tag{7}$$

即在一个周期内所有兴趣区域的平均参与数量.该机制的特点是,支付回报随着时间和参与水平的变化而变化.这种动态的激励机制能够在保证合理的支付(moderate payment)情况下,最大限度地激励参与者参与.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

从现有工作来看,群智感知激励机制不仅要提高参与率,还要考虑参与的长期性和敏感性,保证参与者的持续参与和对报酬的动态适应需求.因为在群智感知中,仅仅靠提高参与者数量有时并不能维持感知项目的长期性,同时还需要提高参与者的感知任务的活跃度,从而保证参与者进行持续有效的任务感知.

4.2 完成质量问题

在群智感知激励机制中,仅通过招募大量参与者不能保证感知任务被高质量地完成.在提高参与率的同时,还要保证一定的任务完成质量.参与者的位置分布情况会影响任务完成质量,参与者上传数据也有真假和好坏之分,建立基于数据质量和用户表现的激励机制体系,能够激励参与者上传高质量数据.面向完成质量的激励机制主要包括基于位置、基于用户(行为、贡献、名誉)和基于数据质量的激励机制.

4.2.1 基于位置

在位置相关的群智感知中,用户的位置信息会影响数据质量.服务器平台不仅要以最小的支付代价招募更多的参与者,还要考虑用户的位置分布,招募的参与者覆盖范围越广泛、感知范围越大,数据质量也就越高.因此,Jaimes 等人[43]在文献[39]的工作基础上,结合 GBMC(greedy budgeted maximum coverage)算法,提出了 GIA 算法,在给定预算的情况下,提高兴趣区域(area of interest)覆盖范围.

在群智感知中,在热点区域容易招募覆盖范围广泛的参与者,但是在非热点区域,往往很少有参与者参与感知任务.在基于群智感知的无线室内定位过程中,数据收集的质量是与数据采集的位置相关的,针对这种情况,Kawajiri 等人[27]提出了可控的激励机制(steered incentive).通过娱乐游戏的激励方式,在不同区域制定不同的游戏任务奖励,激励参与者去非热点区域进行数据感知,从而提高整体的参与者空间分布状态,到达高质量的任务感知(如图 6 所示).

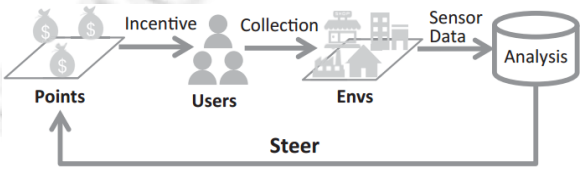

Fig.6 Workflow of game-based steered crowd sensing[27]

图 6 基于游戏激励的可控群智感知流程[27]

文献[44,55]在设计激励机制时同样考虑了位置信息对数据质量的影响,将位置信息作为激励机制的一部分,进而在保证参与率的同时提高任务完成质量.文献[66]继续文献[39]的工作,考虑了地理位置对覆盖的影响.文献[26,43,49]等在设计激励机制时都将位置信息作为影响完成质量的因素,提出了位置敏感的激励机制.

4.2.2 基于用户(行为、贡献、信誉)

基于用户特征的激励机制包括基于用户行为、用户贡献和用户信誉的激励机制.文献[47]提出了基于行为的激励机制(behavior-based),文中定义参与者的行为能力如公式(8)所示[47].

$$\theta \in [\underline{\theta}, \overline{\theta}] \tag{8}$$

具有高行为能力的参与者会提供更高的数据质量,因而在激励机制中,具有优先权被选为感知者并获得支付.如公式(8)所示,θ表示参与者行为能力的强弱.该工作是在文献[27]的基础上,引入用户行为能力这一标准来激励用户提高感知技能.

Luo 等人[46]将用户的贡献作为衡量完成质量的准则,根据参与者的贡献大小决定支付的多少.文中指出,用户的贡献可以用单一的感知时间的长短来衡量,也可以是感知时间和数据质量的混合模式.

文献[48,61]提出了基于用户信誉(reputation)的激励机制.文献[57]中将用户感知数据的质量作为用户的信誉值,由服务器管理参与者的信誉值,参与者的回报和其信誉值排名相关,这样激励用户提供高质量数据,以保持信誉值,得到更高的支付回报.文献[61]是引入现有社交网络到群智感知中,通过参与者在社交网络中的信誉来激励参与者提交可信数据,建立可信机制.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4.2.3 基于数据质量

Krontiris 等人[45]不仅考虑参与率问题,还考虑到感知数据的质量问题.他们采用 MAA 模型,考虑影响数据质量的多个属性,通过不同的回报支付来激励用户上传高质量数据.Wen 等人[26]提出了数据质量驱动的激励机制,该方法在基于指纹的室内定位系统上实现.他们指出,支付参与者的报酬应该基于数据质量而不是完成任务所需的时间.他们采用单调递增函数(monotonically increasing)模型来表示数据质量与服务器获得的收益值的映射关系.文献[67]基于信誉机制和质量评级机制来保证激励机制的数据质量,实验阶段,通过游戏的方式验证该方法的可靠性.文献[56]将总体感知数据质量作为激励机制的目标,如公式(9)[67]所示.

$$\left.\begin{array}{l}\max(\alpha(O),\beta(O))\\ \text{s.t.}\ \sum\limits_{\forall r\in R} o_r \leqslant B\end{array}\right\} \tag{9}$$

其中,α是数据精确度,β是数据的空间分布.该文将激励机制作为一个多目标优化问题.

在提高群智感知参与水平的同时,研究人员开始关注激励机制中的任务完成质量问题,通过激励机制来引导用户提供高质量的感知数据.然而,对于任务完成质量的标准,学者们并没有形成统一的认识.目前,位置信息、数据质量、用户的行为、贡献和信誉等,是被研究最多的面向任务完成质量的激励机制.

4.3 支付控制问题

在激励机制中,主要激励方式是报酬支付.对于服务器平台来说,在支付最小或预算可控的情况下实现最高的参与率是主要目标.当前,在支付控制问题上的研究主要是将问题规划成代价模型,在此基础上寻找最优解.

4.3.1 最小支付

文献[69]提出了在最小化支付代价的同时保证激励机制,其中目标函数如公式(10)[69]所示.

$$\min_{M(c)\in M(c)} E_c\left\{\sum_{i\in N} p_i(c)\right\} \tag{10}$$

其中,p_i(c)是支付给每个参与者的报酬,E_c 是期望效用函数.通过找到最小化期望函数的参与者子集来实现支付报酬最少.

文献[42]在支付代价最小的情况下实现线上实时激励机制,保证至少L个参与者被选中参与感知任务.文献[60]采用游戏积分的方式激励参与者,同样保证每个兴趣区(PoI)感知率在α的前提下,最小化支付积分.

以上这些工作都是在满足某些限制条件下,最小化支付代价来选择获得支付报酬的参与者子集.支付可以是实际的货币报酬,也可以是虚拟的积分.

4.3.2 预算平衡

文献[56]提出了在预算可控的情况下,最大化数据质量.该方法首先在子区域内和参与者协商支付,然后再进行支付分配.文献[70]也是将支付代价控制在预算内,根据任务难度水平和参与者完成质量来进行报酬支付,激励参与者进行标注工作.文献[40,47,71]的工作都是在预算范围内,最大化参与者提交的感知数据质量为目标,如公式(11)[71,40,47]所示,通过报酬支付的方式激励参与者:

$$\max V(S)\ \ \text{s.t.}\ \sum_{i\in S} p_i \leqslant B \tag{11}$$

此外,文献[43,48]也是将激励机制模型化为代价模型,将代价控制在预算内来实现激励机制.不同于最小支付模型,预算平衡模型首要考虑的是诸如数据质量、完成质量和参与者人数等效用因素,其次是保证支付代价在预算内.

对于服务器平台来说,支付代价是关键的问题,因此需要最小化支付代价或者保证支付代价在可控预算内.从现有工作来看,面向支付控制有两种模型:一种是在某些限制条件下最小化支付代价,一种是在支付代价可控内最大化效用函数.在解决此类问题时,研究者通常将问题转化为一个具有约束条件的优化问题,进而解决该问题以得到最优解或者近似解.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4.4 效率能耗问题

群智感知需要考虑的另一个方面就是效率能耗.对于参与者来说,数据感知和上传需要消耗移动设备的计算、存储和通信资源等,需要尽量减少完成感知任务时的能量消耗.对于服务器平台,提高激励机制的计算效率能够降低服务器负荷,减少任务分配的时间.

4.4.1 提高效率

文献[44]提出了TRUC——位置敏感的高计算效率的激励机制.文中首先引入位置信息,证明位置信息的引入使得问题变为NP问题,进而提出接近最佳的近似算法(near-optimal approximate algorithm),在多项式计算复杂度内解决赢标者问题.算法复杂度是 $O(1+\ln(n))$,n 是一个感知设备最大的任务承受量.文献[48]提出了解决 K 匿名位置隐私的算法KASD,KADD和KADD+,其算法复杂度都是 $O(n\log n+m\log m)$,n,m 分别是位置隐私敏感者和位置隐私不敏感者的数量.文献[71]提出了线上激励机制算法 OMZ 和 OMG,基于贪婪策略,其算法复杂度都是 $O(mn\min\{m,n\})$,m 是兴趣区域数量,n 是参与者数量.文献[50]提出了纳什均衡(NE)的计算算法——以服务器效用为中心的 LSB Auction 算法、MSensing Auction 算法,基于局部最优搜索策略,其算法复杂度分别是 $O(n\log n)$,$O(1/\varepsilon\ n^3 m\log m)$和 $O(nm^3)$,其中,n 是参与者人数,m 是任务数量.文献[72]提出了启发式激励机制GREEDY 和高效可信机制 TruTeam,算法复杂度分别是 $O(n^2)$和 $O(n^2 l)$,n 是所有竞标者人数,l 是赢标者人数.文献[47,53,55]是在激励机制的基础上设计出计算效率更高的算法,减少计算代价.这些工作都是针对时间复杂度比较高的最大最小化问题,通过贪婪式或者启发式的策略,提出时间复杂度低的算法,保证算法在多项式时间内完成,提高计算效率,减少执行时间.

4.4.2 降低能耗

Yu 等人[65]针对自组织的数据分享情况,为了监听周围设备提出的建立局部网络的请求,提出了节能监听方式,即在空闲时刻监听时,采用蓝牙通信作为监听方式,相对于无线监听,可以节省通信消耗.实验指出,无线监听在500分钟内比蓝牙监听多耗费588mAh的能量.接着,文中采用间歇性休眠(intermittent sleeping)的方式进一步减少监听能耗.文献[55]指出,减少感知设备的能量消耗,是激励参与者参与的一个关键因素.除了适应性调节感知频率和聚集压缩感知数据外,背负式群智感知(piggyback crowdsensing)能够通过平衡设备应用情况进行任务感知和数据上传,以达到减少能量消耗的目的.文中指出,在设备进行 3G 通话的同时进行数据传输,要比直接通过 3G 数据传输数据减少 75%的能量消耗.因此,根据参与者的移动轨迹和通话记录,预测出用户在一特定感知周期内某一信号塔附近会通话的概率,这样就可以采用背负式的方式将参与者的感知数据随着通话传给近邻区域内的信号塔,从而减少能量消耗.文献[54]针对目前的激励机制主要集中在最大化服务器效用而忽略了参与者的资源消耗的不足,提出了以用户为中心的激励机制.文中将感知设备电量作为能量消耗指标,同时考虑设备存储能力,激励参与者参与的同时保证设备运行时的灵活性,最大化参与者效益.

高效的算法一直是激励机制研究的重点,是提高服务器平台系统效率的关键.降低感知设备的能量消耗是参与者关心的问题,大部分参与者之所以不愿无偿加入感知任务,其中重要原因就是数据的感知会造成设备的资源消耗,如电池电量、存储能力和宽带资源等.解决能耗问题,可以有效激励参与者加入感知任务中.

4.5 隐私安全问题

在群智感知中,参与者在完成感知任务时会面临隐私泄露的风险,主要包括数据隐私和位置隐私.数据隐私是指参与者上传的感知数据中含有用户的隐私信息,如用户的感知设备信息.位置隐私主要是针对位置相关的群智感知,用户的位置信息是随数据信息一起上传给服务器平台的.在激励机制中,要考虑参与者因隐私安全问题而不愿加入感知任务这一情况.

在位置相关的群智感知中,不同参与者对位置隐私的敏感程度不同,其中有些参与者是不关注位置隐私的,而关注位置隐私的用户也有不同的隐私需求.Yang 等人[48]针对参与者的位置隐私问题,采用 DA 方式激励隐私不敏感的参与者加入隐私敏感的参与者,以实现基于 K 匿名的位置隐私保护.K 匿名位置隐私是指在同一空间区域内至少有 K 个不同的用户同时隐匿真实 ID.该文首先针对所有参与者具有相同的隐私需求,即每个参与者

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

的 K 是一样的,然后提出更加现实的情况,即每个参与者对 K 有不同的需求.针对这两种情况,他们提出了 KASD 和 KADD 两种算法来激励参与者实现 K 匿名位置隐私.实验表明,该方法具有高效的计算效率.

群智感知的激励机制能够鼓励参与者参与,但有时参与者为获得报酬,恶意的参与者会上报虚假的数据来获得非法报酬.同时,用户能够通过诸如 FakeLocation 等工具伪造位置信息.这些恶意的用户违背了激励机制的目的.针对这一问题,Restuccia 等人在文献[73]中提出了群智感知中的可扩展的可信框架.他们首先定义了 3 种新的攻击模型,然后提出了基于移动安全代理(mobile security agent,简称 MSA)和 Jøsang 信任模型(Jøsang's trust model)的可扩展的可信模型来保证激励机制的数据可信性.他们提出了 3 种攻击模式,包括:

(1) 无知识攻击(no-knowledge (NK) attack):用户对需要感知的数据没有任何了解,上传随机虚假数据到服务器平台.

(2) 部分知识攻击(partial-knowledge (PK) attack):用户根据对所在感知区域内的感知数据的了解,以概率 p 上传虚假数据.

(3) 交互知识攻击(seesaw (S) attack):用户周期性 T 上传真实感知数据和虚假数据.

针对这些攻击,文章提出了 FIDES 框架,激励诚实用户阻止恶意用户.FIDES 如图 7 所示,基于 MSA 和 Jøsang's trust model 来检测恶意用户,建立信用机制.该文章针对恶意用户对服务器的虚假数据攻击,提出了可扩展的安全激励模型,并在真实数据上评估了模型的安全性和可扩展性.

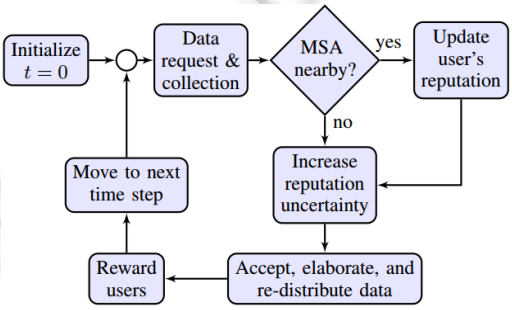

Fig.7 Flow diagram of the FIDES framework[73]

图 7 FIDES 工作流程图[73]

Li 等人[74]提出了两种面向隐私的激励方案,通过积分激励用户上传数据,同时不泄露上传的数据.针对不诚实的用户恶意获得积分的情况,一个方案通过第三方可信平台(trusted third party,简称 TTP)实现,另一个通过盲签名(blind signature)和委托技术(commitment techniques)实现.第三方可信平台方案通过哈希验证方程(Hash and HMAC functions)实现,具有较低的计算复杂度和存储消耗.通过盲签名和委托技术的方案无需 TTP,但是计算量大.两个方案都支持用户动态加入和退出.

隐私安全问题是限制参与者参与感知任务的关键问题,也是服务器平台关注的问题.解决了隐私安全问题,才能达到更好的激励效果.

4.6 线上实时问题

现有的激励机制主要是线下(offline)情况,在线上(online)情况下,就要考虑用户的实时动态加入,因此使问题变得复杂.但是线上激励机制是更加实际的情况.

Zhao 等人[71]针对现有激励机制主要是 offline 的情况,提出了线上激励机制.他们指出,参与者竞价时是线上实时加入和退出的.他们提出了 OMZ 和 OMG 两个基于逆向拍卖模型的线上激励机制.线下激励是指所有参与者提交自己的竞价和所要完成的任务之后,再由服务器选择符合要求的参与者.而实际上,参与者往往是线上随机加入竞价,也可能随机退出竞价.因此,必须在加入竞价时,就要确定其是否被选派完成任务.他们针对这种情况,在预算一定的条件下,提出线上激励机制,最大化完成质量.他们引入边际密度(marginal density)的概念,基

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

于多阶段采样接收过程(multiple-stage sampling accepting process)动态更新样本集大小和密度阈值,当新加入参与者的边际密度不小于当前密度阈值,就接收.针对参与者进入和离开的时间不同,他们提出了 OMZ 和 OMG 两种机制.OMZ 是指用户的到达时间和离开时间是一致的;OMG 是更通用的情况,用户的到达和离开时间不一致,这样,在同一时刻就会有多个参与者在线(如图 8 所示).

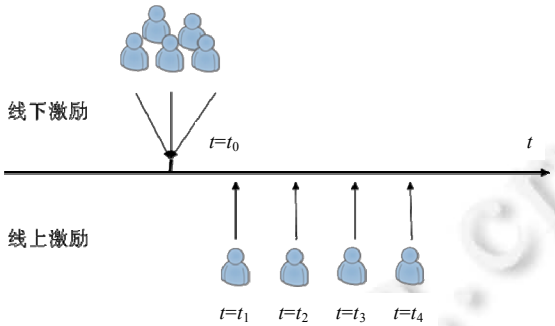

Fig.8 Offline VS online incentive

图 8 线上激励机制和线下激励机制

文献[40–42,47,53]是在线上实时激励机制的其他相关工作.文献[40]是文献[71]的期刊论文,讨论了在文献[71]预算可控情况之外的另外两种情况,最小化支付代价和最大化服务器效益.文献[42]是最小化支付代价的具体实现,文献[41]是最大化服务器收益的情况.文献[47]引入了用户行为这一属性,而文献[53]是 Sun 等人在文献[71]之前基于多信念值(heterogeneous belief value)模型的线上激励机制.文献[49]提出了时间敏感的线上参与者选择机制,提供长期的激励机制.

线上实时的激励机制是更加实际的激励方式,参与者能够实时得到感知反馈,提高了任务分配的时间效率.线上实时激励机制的另一个挑战是参与者数量的增加.随着移动用户的不断增加,群智感知项目往往需要海量的用户参与,目前,很少有学者研究这种实时的海量参与者的激励机制问题.

4.7 实际应用

激励机制目前的主要工作集中在理论研究方面,但是也有不少针对特殊场景和应用的工作.文献[59]是 UCLA 的项目 BudBurst,设计基于游戏机制的激励机制来鼓励用户收集数据.文献[27]是通过游戏积分的方式激励用户完成室内定位的工作,并完成系统的部署,在真实情况下验证了文中提出的方法.此外,基于游戏和社交互动的激励方式已应用到 Waze[58],CrowdPark[75]等实际应用中.在面向应用的激励机制中,基于游戏、虚拟积分等非金钱支付的方式比较普遍.

5 对比分析

在群智感知中,激励机制研究是促进其发展的重要因素,只有保证参与者的数量和数据质量,才能推进群智感知的进一步发展.现有的工作主要是在激励方式研究的基础上,并且针对核心研究问题,提出关键技术和高效算法.

基于博弈模型的激励机制具有很好的数学工具来证明激励机制的性质,并且通过报酬支付的方式来激励参与者.微支付的方式是群智感知激励机制中常用的也是效果比较好的一种方式.基于娱乐游戏的模型在实际中应用广泛,因为这种机制不需要服务器平台支付参与者费用,而是通过游戏本身的吸引性来激励用户参与.其难点在于如何合理地设计娱乐游戏方式来结合感知任务,从而达到激励效果.基于社交关系的激励机制能在激励用户提供可靠高质感知数据方面具有优势,参与者内在的社交动力激励其在社交关系网络中维持自己的信誉等.基于虚拟积分的机制可以很好地与其他方式进行结合,补充其他方式的不足.

在主要激励方式的基础上,针对核心研究问题的关键技术不尽相同,但主要是解决服务器平台和参与者各

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

自的效用最大化、代价最小化问题.

参与水平、完成质量和支付控制是服务器平台关心的问题,服务器平台在支付控制的条件下提高参与水平,同时保证任务完成质量.在服务器端,感知项目管理者通过某种激励方式来满足参与者的需求,如报酬需求、娱乐需求、社会地位需求和虚拟积分需求等,从而激励参与者参与感知任务.服务器作为任务发布者,具有更多的主动权,可以通过对参与者的选择,来达到更高质量的数据服务和更低的支付报酬.大部分激励机制可以看做是参与者选择问题,即通过选择合适的参与者来实现高效的激励机制.

隐私安全、资源消耗和线上实时是参与者关心的问题,参与者希望从资源消耗的感知任务中得到报酬,隐私安全是阻碍参与者积极参与的原因.此外,线上实时是更加实际的激励模型.参与者作为感知任务执行者,为了获得更多的回报,无论是物质的还是虚拟的,出于本身的自私性,会不参与或者不能高效地参与感知任务.激励机制的设计要考虑参与者的自私特点,包括报酬需求、隐私需求等等.

群智感知激励机制研究本质上是在研究参与者与服务器平台之间最大化各自效用、最小化代价的决策博弈问题.因此,激励机制更准确的模型可以表示成:

$$I{:}M\rightarrow\max(U(S),U(P)),\ \min(C(S),C(P)) \tag{12}$$

其中,C 是服务器和参与者的代价:对于服务器是主要支付代价;对于参与者是感知任务需要的设备资源、时间以及隐私等代价.

从现有工作来看,激励机制不仅要考虑激励方式的研究,还要考虑激励机制涉及的研究问题,参与水平、支付控制、完成质量、隐私安全、效率能耗和线上实时等都是值得研究的问题.本文根据激励方式和研究的问题,将现有工作总结见表 1(*表示该文献在本表格中被引用多于一次,√表示对应问题在主要文献中涉及,支付回报对应的主要文献()内表示激励方式的简称).

Table 1 Comparison on different incentives

表 1 激励机制对比

激励方式	参与水平	隐私安全	线上实时	完成质量			支付控制		效率能耗		主要文献
				位置	行为	质量	最小支付	预算平衡	提高效率	降低能耗	
支付回报											[46](AA)
			√		√	√		√	√		[47](AA)
				√			√		√		[44](CA)
		√						√	√		[48](DA)
						√					[45](MAA)
	√		√	√							[49](VGC)
									√		[50]*(Stack)
											[51]*(Stack)
	√			√			√				[66]*(RA)
					√	√					[67]*(RA)
	√			√				√			[43](RA)
			√					√	√		[71](RA)
							√				[69](RA)
				√		√					[26](RA)
			√					√	√	√	[40](RA)
			√						√		[41](RA)
			√				√		√		[42](RA)
	√						√				[39]*(RA)
									√		[50](RA)
	√			√							[52](NO)
	√		√						√		[53](NO)
										√	[54](NO)
				√			√		√		[55](NO)
				√		√		√			[56](NO)
游戏激励											[27]
											[59]
											[67]
							√				[60]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Table 1 Comparison on different incentives (Continued)

表 1 激励机制对比(续)

激励方式	参与水平	隐私安全	线上实时	完成质量			支付控制		效率能耗		主要文献
				位置	行为	质量	最小支付	预算平衡	提高效率	降低能耗	
社交关系				√	√	√					[62] [61] [51]
虚拟积分	√ √	√		√ √			√ √			√	[63,64] [65] [74] [38] [66]
其他		√									[73]

从表中可以看出,不同的激励方式对于解决不同的问题各有优劣,也没有任何一种方式可以解决激励机制中的所有问题.目前,由于不同方法的应用背景和解决的问题不大相同,针对各种方法,我们很难给出统一的定量的分析,暂时只能给出定性的对比.从心理学的角度看,内部激励和外部激励都可以到达激励效果[76].现有的工作主要是通过外部激励来提高参与者的积极性,在内部激励方面,还有很多工作可以开展.此外,针对目前集中在个体的积极的激励方式的不足,采用集体的消极的激励方式也是有益的尝试[77,78].随着新问题的不断出现,如何在服务器和参与者的效用和代价之间做好平衡,会给群智感知激励机制研究带来新的挑战.

群智感知激励机制可以激励参与者积极参与感知任务,并且高质、高效完成感知任务.为此,任务发布者往往会提供某种激励回报,如金钱、游戏徽章、虚拟积分等.在群智感知中,参与者不一定是诚实可信的[42,44,72],为获得更多的回报,参与者会做出欺骗行为,如谎报竞标价格、上传虚假数据等.这将严重影响激励机制的效果和感知任务的完成质量.目前,研究工作主要是通过激励机制设计,鼓励参与者进行诚实可信的感知活动来获得更多回报,如通过拍卖机制,报价过高的参与者往往不能分配到任务.在面向数据质量的感知任务中,给予诚实可信的参与者更多回报.然而,如何识别恶意参与者的不诚实行为,进而限制其参与感知任务来保证激励机制效果,这是群智感知激励机制需要解决的问题,也是当前研究工作需要深入研究的一个方面.

6 未来的研究方向

目前,群智感知激励机制取得了一定的进展,作为一个热门的研究领域,其中可以深入研究的方向有很多,主要包括:

(1) 隐私安全.隐私安全在各个领域越来越得到研究者的关注,尤其是对位置敏感的群智感知来说,降低由于位置信息泄露造成的隐私风险,可以激励用户积极地参与感知任务.此外,用户提交的数据本身可能会含有敏感信息,如感知设备的状态、用户采集的音视频等.数据安全指参与者的不诚实或者恶意会给服务器的数据质量造成影响,进而降低群智感知提供的数据服务.因此,提高数据的安全可靠性,也是激励机制需要考虑的问题.随着大数据、云计算和物联网的发展,隐私安全问题越来越收到研究者的重视,群智感知激励机制也需要在此方面更多的研究工作.

(2) 数据集成.现有的激励机制主要考虑参与者直接将数据提交到服务器平台.而在客户端进行数据集成,可以减少数据上传的代价,进而可以减少用户购买数据流量的费用,激励用户参与到感知任务中.面向数据集成的激励机制尤其对针对多媒体数据采集的群智感知有重要影响.随着移动设备的计算存储能力的不断增强,对于图片、音频和视频感知也越来越普遍,多媒体数据的集成会成为影响群智感知效率的关键因素.与此同时,数据集成可以减少冗余数据的上传,提高数据精度和完成质量,减少服务器端数据处理和运算.

(3) 参与者移动性.目前的激励机制考虑了用户的位置信息,但是对用户位置的移动性研究不足.由于用户的移动性,用户参与感知的范围和能力也会不同.更重要的是,用户的移动不是简单的按照面积范围的活动,而是具有移动的轨迹规律、方向速度和时间周期性的.考虑参与者移动性的不确定信息对

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

群智感知激励机制来说更加现实,同时也更加复杂,研究参与者移动受限的激励机制具有更加现实的意义和挑战.此外,参与者的移动性带来的数据感知和上传的位置不一致性,以及由此引起的数据可靠性和可用性,也是值得研究的课题.

(4) 分布式处理模式.集中式的群智感知是当前研究的主流,这里的集中式指的是参与者的信息和提交的数据都是经过统一的服务器平台进行处理.考虑到服务器的不可信性和某些情况下无法部署具有服务器的特点,分布式的激励机制对于参与者来说也是一种有益的尝试.分布式处理的方式更加适合群智感知的网络环境,同时也能通过去中心化来提高参与者的隐私保护的强度.但是如何解决群智感知网络中分布式平台的均衡负载等问题,也是值得研究的.

(5) 以参与者为中心.目前,大部分激励机制是在服务器端进行的,因此考虑更多的是服务器的效益最大化,这也是参与者积极性不高的原因.服务器会利用参与者之间的竞争关系来选择报价最低、支付代价最小的参与者子集作为赢标者.这样,以服务器为中心的激励机制没有优先考虑参与者的利益,因此不能更加高效地激励参与者加入感知任务.设计以参与者为中心的激励机制,以最大化参与者效用为目标,会起到更好的激励作用.以参与者为中心的激励机制是从另一个角度设计激励模型,即优先考虑参与者利益,在这方面的研究还有很大的提升空间.

(6) 潜在激励因素.激励机制是指通过某种理性化的策略来激励用户进行特定的行为活动.激励机制从不同的角度可以分为外在的和内在的、消极的和积极的、集体的和个体的等.目前的研究主要是集中在个体的、外在的、积极的激励机制,内在的、集体的、消极的策略也是值得研究的.此外,多种激励方式的混合能够弥补不同机制的不足,起到更好的激励作用.

(7) 实际应用.现有的群智感知激励机制大部分集中在理论研究阶段,尤其是在报酬支付的方式上.针对不同应用的实际情况,需要将已有的理论工作结合应用,在实践中检验激励机制的可行性.当参与者数量不断增加时,受限于平台的存储和计算能力,现有的激励机制可能难以应对参与者骤增的情况.如何利用大数据、云计算等处理实时的海量参与者,也是实际部署中值得研究的问题.

7 结束语

本文主要阐述了群智感知激励机制的研究进展,从激励机制的 4 种主要激励方式(报酬支付激励、娱乐游戏激励、社交关系激励、虚拟积分激励)和面向的 6 个核心研究问题(参与水平、支付控制、完成质量、隐私安全、效率能耗、线上实时)两个角度进行了深入而广泛的综述.并针对目前的研究状况,给出了未来值得探讨的研究方向.群智感知激励机制主要是在激励模型的基础上,针对核心研究问题提出关键技术,重点是解决服务器平台和参与者各自的效用最大化、代价最小化问题.未来在隐私安全、数据集成、参与者移动性、分布式处理模式、以参与者为中心的机制等方向,都是值得进一步研究的.随着移动设备的不断普及,群智感知的优势变得更加明显,各种应用层数不穷,但是面临的挑战依旧需要解决.群智感知作为新的研究热点,结合了众包的思想和移动设备的感知能力,逐渐受到学术界和工业界的广泛关注.激励机制作为群智感知研究的重要问题.在近几年涌现出许多有意义的研究工作.希望本文所做的工作可以为群智感知激励机制的相关研究人员提供参考.

致谢 本文部分工作是作者在访问中国人民大学的萨师煊大数据管理和分析中心时完成的,该中心获国家高等学校学科创新引智计划(111 计划)等资助.

References:

[1] Burke J, Estrin D, Hansen M, Parker A, Ramanathan N, Reddy S, Srivastava M. Participatory Sensing. Center for Embedded Network Sensing, UCLA, 2006.

[2] Estrin D. Participatory sensing: Applications and architecture. IEEE Internet Computing, 2010,14(1):12−42. [doi: 10.1109/MIC.2010.12]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[3] Ganti RK, Ye F, Lei H. Mobile crowdsensing: Current state and future challenges. IEEE Communications Magazine, 2011,49(11): 32−39. [doi: 10.1109/MCOM.2011.6069707]

[4] Ma H, Zhao D, Yuan P. Opportunities in mobile crowd sensing. IEEE Communications Magazine, 2014,52(8):29−35. [doi: 10.1109/MCOM.2014.6871666]

[5] Campbell AT, Eisenman SB, Lane ND, Miluzzo E, Peterson, RA, Lu H, Zheng X, Musolesi M, Fodor K, Ahn G. The rise of people-centric sensing. IEEE Internet Computing, 2008,12(4):12−21. [doi: 10.1109/MIC.2008.90]

[6] Srivastava M, Abdelzaher T, Szymanski B. Human-Centric sensing. Philosophical Trans. of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012,370(1958):176−197. [doi: 10.1098/rsta.2011.0244]

[7] Zhao D, Ma H, Liu L. Energy-Efficient opportunistic coverage for people-centric urban sensing. Wireless Networks, 2014,20(6): 1461−1476. [doi: 10.1007/s11276-014-0687-0]

[8] Liu L, Wei W, Zhao D, Ma H. Urban resolution: New metric for measuring the quality of urban sensing. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2015,14(12):2560-2575. [doi: 10.1109/TMC.2015.2404786]

[9] Zhao D, Ma H, Liu L, Li X. Opportunistic coverage for urban vehicular sensing. Computer Communications, 2015,60:71−85. [doi: 10.1016/j.comcom.2015.01.018]

[10] Madan A, Cebrian M, Lazer D, Pentland A. Social sensing for epidemiological behavior change. In: Proc. of the 12th ACM Int'l Conf. on Ubiquitous Computing. ACM Press, 2010. 291−300. [doi: 10.1145/1864349.1864394]

[11] Aggarwal CC, Abdelzaher T. Social Sensing. Managing and Mining Sensor Data. Springer-Verlag, 2013. 237−297. [doi: 10.1007/978-1-4614-6309-2_9]

[12] Liu YH. Crowd sensing computing. Communications of the CCF, 2012,8(10):38−41 (in Chinese with English abstract).

[13] Guo B, Yu Z, Zhou X, Zhang D. From participatory sensing to mobile crowd sensing. In: Proc. of the 2014 IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops). IEEE, 2014. 593−598. [doi: 10.1109/PerComW.2014.6815273]

[14] Dutta P, Aoki PM, Kumar N, Mainwaring A, Myers C, Willett W, Woodruff A. Common sense: Participatory urban sensing using a network of handheld air quality monitors. In: Proc. of the 7th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. ACM Press, 2009. 349−350. [doi: 10.1145/1644038.1644095]

[15] Kim S, Robson C, Zimmerman T, Pierce J, Haber EM. Creek watch: Pairing usefulness and usability for successful citizen science. In: Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. ACM Press, 2011. 2125−2134. [doi: 10.1145/1978942.1979251]

[16] Mun M, Reddy S, Shilton K, Yau N, Burke J, Estrin D, Hansen M, Howard E, West R, Boda P. PEIR, the personal environmental impact report, as a platform for participatory sensing systems research. In: Proc. of the 7th Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services. ACM Press, 2009. 55−68. [doi: 10.1145/1555816.1555823]

[17] Rana RK, Chou CT, Kanhere SS, Bulusu N, Hu W. Ear-Phone: An end-to-end participatory urban noise mapping system. In: Proc. of the 9th ACM/IEEE Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks. ACM Press, 2010. 105−116. [doi: 10.1145/1791212.1791226]

[18] Eisenman SB, Miluzzo E, Lane ND, Peterson RA, Ahn GS, Campbell AT. BikeNet: A mobile sensing system for cyclist experience mapping. ACM Trans. on Sensor Networks, 2009,6(1):Article No.6. [doi: 10.1145/1653760.1653766]

[19] Miluzzo E, Lane ND, Fodor K, Peterson R, Lu H, Musolesi M, Eisenman SB, Zheng X, Campbell AT. Sensing meets mobile social networks: The design, implementation and evaluation of the cenceme application. In: Proc. of the 6th ACM Conf. on Embedded Network Sensor Systems. ACM Press, 2008. 337−350. [doi: 10.1145/1460412.1460445]

[20] Waze. Way to go! 2010. http://waze.com

[21] Zhao D, Ma HD. Development and challenges in crowds sensing networks. Information and Communications Technologies, 2014, (5):66−70 (in Chinese with English abstract).

[22] Chen HH, Guo B, Yu Z. Mobile crowd-sensing application. ZTE Technology Journal, 2014,20(1):35−37 (in Chinese with English abstract).

[23] Xiong Y, Shi DX, Ding B, Deng L. Survey of mobile sensing. Computer Science, 2014,41(4):1−8 (in Chinese with English abstract).

[24] Huang HX, Ding Q, Li L, Lou MQ, Sun ZX. Research on mobile terminal crowdsourcing. Computer Technology and Development, 2014,24(6):6−9 (in Chinese with English abstract).

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[25] Deterding S, Dixon D, Khaled R, Nacke L. From game design elements to gamefulness: defining gamification. In: Proc. of the 15th Int'l Academic MindTrek Conf.: Envisioning Future Media Environments. ACM Press, 2011. 9−15. [doi: 10.1145/2181037.2181040]

[26] Wen Y, Shi J, Zhang Q, Tian X, Huang Z, Yu H, Cheng Y, Shen X. Quality-Driven auction based incentive mechanism for mobile crowd sensing. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2015,64(9):4203−4214. [doi: 10.1109/TVT.2014.2363842]

[27] Kawajiri R, Shimosaka M, Kahima H. Steered crowdsensing: Incentive design towards quality-oriented place-centric crowdsensing. In: Proc. of the 2014 ACM Int'l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing. ACM Press, 2014. 691−701. [doi: 10.1145/2632048.2636064]

[28] Gao H, Liu C, Wang W, Zhao J, Song Z, Su X, Crowcroft J, Leung KK. A survey of incentive mechanisms for participatory sensing. Communications Surveys Tutorials, 2015,17(2):918−943. [doi: 10.1109/COMST.2014.2387836]

[29] Zhang X, Yang Z, Sun W, Liu Y, Tang S, Xing K, Mao X. Incentives for mobile crowd sensing: A survey. Communications Surveys Tutorials, 2015,18(1):54−67. [doi: 10.1109/COMST.2015.2415528]

[30] Restuccia F, Das SK, Payton J. Incentive mechanisms for participatory sensing: Survey and research challenges. arXiv preprint arXiv:1502.07687, 2015.

[31] Sun J. Incentive mechanisms for mobile crowd sensing: Current states and challenges of work. arXiv preprint arXiv:1310.8364, 2013.

[32] Feldman M, Lai K, Stoica I, Chuang J. Robust incentive techniques for peer-to-peer networks. In: Proc. of the 5th ACM Conf. on Electronic Commerce. ACM Press, 2004. 102−111. [doi: 10.1145/988772.988788]

[33] Wu H, Ma H, Zhao D. Videocent: A quality-oriented incentive mechanism for video delivery in opportunistic networks. Wireless Networks, 2015,21(3):769−781. [doi: 10.1007/s11276-014-0813-z]

[34] Lu R, Lin X, Zhu H, Shen X, Preiss B. Pi: A practical incentive protocol for delay tolerant networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2010,9(4):1483−1493. [doi: 10.1109/TWC.2010.04.090557]

[35] Chen B, Chan MC. Mobicent: A credit-based incentive system for disruption tolerant network. In: Proc. of the 2010 IEEE INFOCOM. IEEE, 2010. 1−9. [doi: 10.1109/INFCOM.2010.5462136]

[36] Etkin R, Parekh A, Tse D. Spectrum sharing for unlicensed bands. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007,25(3):517−528. [doi: 10.1109/JSAC.2007.070402]

[37] Reddy S, Estrin D, Hansen M, Srivastava M. Examining micro-payments for participatory sensing data collections. In: Proc. of the 12th ACM Int'l Conf. on Ubiquitous Computing (Ubicomp 2010). ACM Press, 2010. 33−36. [doi: 10.1145/1864349.1864355]

[38] No "one-size fits all": Towards a principled approach for incentives in mobile crowdsourcing, In: Proc. of the 15th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications Article (HotMobile 2014), Vol.3. 2014. [doi: 10.1145/2565585.2565603]

[39] Lee JS, Hoh B. Sell your experiences: A market mechanism based incentive for participatory sensing. In: Proc. of the 2010 IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom). IEEE, 2010. 60−68. [doi: 10.1109/PERCOM.2010.5466993]

[40] Zhao D, Li XY, Ma H. Budget-Feasible online incentive mechanisms for crowdsourcing tasks truthfully. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2016,24(2):647−661. [doi: 10.1109/TNET.2014.2379281]

[41] Zhang X, Yang Z, Zhou Z, Cai H, Chen L, Li X. Free market of crowdsourcing: Incentive mechanism design for mobile sensing. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2014,25(12):3190−3200. [doi: 10.1109/TPDS.2013.2297112]

[42] Zhao D, Ma H, Liu L. Frugal online incentive mechanisms for crowdsourcing tasks truthfully. arXiv preprint arXiv:1404.2399, 2014.

[43] Jaimes LG, Vergara-Laurens I, Labrador MA. A location-based incentive mechanism for participatory sensing systems with budget constraints. In: Proc. of the 2012 IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom). IEEE, 2012. 103−108. [doi: 10.1109/PerCom.2012.6199855]

[44] Feng Z, Zhu Y, Zhang Q, Ni LM, Vasilakos AV. TRAC: Truthful auction for location-aware collaborative sensing in mobile crowdsourcing. In: Proc. of the 2014 IEEE INFOCOM. IEEE, 2014. 1231−1239. [doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6848055]

[45] Krontiris I, Albers A. Monetary incentives in participatory sensing using multi-attributive auctions. Int'l Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, 2012,27(4):317−336. [doi: 10.1080/17445760.2012.686170]

[46] Luo T, Tan HP, Xia L. Profit-Maximizing incentive for participatory sensing. In: Proc. of the 2014 IEEE INFOCOM. IEEE, 2014. 127−135. [doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6847932]

[47] Sun J. Behavior-Based online incentive mechanism for crowd sensing with budget constraints. arXiv preprint arXiv:1310.5485, 2013.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[48] Yang D, Fang X, Xue G. Truthful incentive mechanisms for *k*-anonymity location privacy. In: Proc. of the 2013 IEEE INFOCOM. IEEE, 2013. 2994−3002. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6567111]

[49] Gao L, Hou F, Huang J. Providing long-term participation incentive in participatory sensing. arXiv preprint arXiv:1501.02480, 2015. [doi: 10.1109/INFOCOM.2015.7218673]

[50] Yang D, Xue G, Fang X, Tang J. Crowdsourcing to smartphones: Incentive mechanism design for mobile phone sensing. In: Proc. of the 18th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. ACM Press, 2012. 173−184. [doi: 10.1145/2348543.2348567]

[51] Luo T, Kanhere SS, Tan HP. SEW-Ing a simple endorsement Web to incentivize trustworthy participatory sensing. In: Proc. of 2014 the 11th Annual IEEE Int'l Conf. on Sensing, Communication, and Networking (SECON). IEEE, 2014. 636−644. [doi: 10.1109/ SAHCN.2014.6990404]

[52] Thepvilojanapong N, Zhang K, Tsujimori T, Ohta Y, Zhao Y, Tobe Y. Participation-Aware incentive for active crowd sensing. In: Proc. of 2013 IEEE the 10th Int'l Conf. on High Performance Computing and Communications & 2013 IEEE Int'l Conf. on Embedded and Ubiquitous Computing (HPCC_EUC). IEEE, 2013. 2127−2134. [doi: 10.1109/HPCC.and.EUC.2013.305]

[53] Sun J. An incentive scheme based on heterogeneous belief values for crowd sensing in mobile social networks. In: Proc. of the 2013 IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM). IEEE, 2013. 1717−1722. [doi: 10.1109/GLOCOM.2013.6831321]

[54] Reddy S, Estrin D, Srivastava M. Recruitment framework for participatory sensing data collections. In: Proc. of the Pervasive Computing. Springer-Verlag, 2010. 138−155. [doi: 10.1007/978-3-642-12654-3_9]

[55] Zhang D, Xiong H, Wang L, Chen J. CrowdRecruiter: Selecting participants for piggyback crowdsensing under probabilistic coverage constraint. In: Proc. of the 2014 ACM Int'l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing. ACM Press, 2014. 703−714. [doi: 10.1145/2632048.2632059]

[56] Song Z, Ngai E, Ma J, Wang W. A novel incentive negotiation mechanism for participatory sensing under budget constraints. In: Proc. of the 22nd Int'l Symp. of Quality of Service. IEEE, 2014. 326−331. [doi: 10.1109/IWQoS.2014.6914336]

[57] Hamari J, Koivisto J, Sarsa H. Does gamification work?—A literature review of empirical studies on gamification. In: Proc. of 2014 the 47th Hawaii Int'l Conf. on System Sciences (HICSS). IEEE, 2014. 3025−3034. [doi: 10.1109/HICSS.2014.377]

[58] McCall R, Koenig V. Gaming concepts and incentives to change driver behaviour. In: Proc. of 2012 the 11th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net). IEEE, 2012. 146−151. [doi: 10.1109/MedHocNet.2012.6257115]

[59] Han K, Graham EA, Vassallo D, Estrin D. Enhancing motivation in a mobile participatory sensing project through gaming. In: Proc. of 2011 IEEE the 3rd Int'l Conf. on Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT) and 2011 IEEE the 3rd Int'l Conf. on Social Computing (SocialCom). IEEE, 2011. 1443−1448. [doi: 10.1109/PASSAT/SocialCom.2011.113]

[60] Ueyama Y, Tamai M, Arakawa Y, Yasumoto K. Gamification-Based incentive mechanism for participatory sensing. In: Proc. of the 2014 IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops). IEEE, 2014. 98−103. [doi: 10.1109/PerComW.2014.6815172]

[61] Bigwood G, Henderson T. Ironman: Using social networks to add incentives and reputation to opportunistic networks. In: Proc. of 2011 IEEE the 3rd Int'l Conf. on Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT) and 2011 IEEE the 3rd Int'l Conf. on Social Computing (SocialCom). IEEE, 2011. 65−72. [doi: 10.1109/PASSAT/SocialCom.2011.60]

[62] Faltings B, Li JJ, Jurca R. Incentive mechanisms for community sensing. IEEE Trans. on Computers, 2014,63(1):115−128. [doi: 10.1109/TC.2013.150]

[63] Chou CM, Lan K, Yang CF. Using virtual credits to provide incentives for vehicle communication. In: Proc. of 2012 the 12th Int'l Conf. on ITS Telecommunications (ITST). IEEE, 2012. 579−583. [doi: 10.1109/ITST.2012.6425246]

[64] Lan K, Chou CM, Wang HY. An incentive-based framework for vehicle-based mobile sensing. Procedia Computer Science, 2012, 10:1152−1157. [doi: 10.1016/j.procs.2012.06.165]

[65] Yu T, Zhou Z, Zhang D, Wang X, Liu Y, Lu S. INDAPSON: An incentive data plan sharing system based on self-organizing network. In: Proc. of the 2014 IEEE INFOCOM. IEEE, 2014. 1545−1553. [doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6848090]

[66] Lee JS, Hoh B. Dynamic pricing incentive for participatory sensing. Pervasive and Mobile Computing, 2010,6(6):693−708. [doi: 10.1016/j.pmcj.2010.08.006]

[67] Wang Y, Jia X, Jin Q, Ma J. QuaCentive: A quality-aware incentive mechanism in mobile crowdsourced sensing (MCS). The Journal of Supercomputing, 2015. [doi: 10.1007/s11227-015-1395-y]

[68] Chon Y, Lane ND, Kim Y, Zhao F, Cha H. Understanding the coverage and scalability of place-centric crowdsensing. In: Proc. of the 2013 ACM Int'l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing. ACM Press, 2013. 3−12. [doi: 10.1145/2493432.2493498]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[69] Koutsopoulos I. Optimal incentive-driven design of participatory sensing systems. In: Proc. of the 2013 IEEE INFOCOM. IEEE, 2013. 1402−1410. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6566934]

[70] Zhang Q, Wen Y, Tian X, Gan X, Wang X. Incentivize crowd labeling under budget constraint. In: Proc. of the 2015 IEEE INFOCOM. IEEE, 2015. 2812−2820. [doi: 10.1109/INFOCOM.2015.7218674]

[71] Zhao D, Li XY, Ma H. How to crowdsource tasks truthfully without sacrificing utility: Online incentive mechanisms with budget constraint. In: Proc. of the 2014 IEEE INFOCOM. IEEE, 2014. 1213−1221. [doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6848053]

[72] Qing L, Tie L, Ruiming T, Stéphane B. An efficient and truthful pricing mechanism for team formation in crowdsourcing markets. In: Proc. of the 2015 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). IEEE, 2015. 567−572. [doi: 10.1109/ICC.2015.7248382]

[73] Restuccia F, Das SK. FIDES: A trust-based framework for secure user incentivization in participatory sensing. In: Proc. of 2014 IEEE the 15th Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE, 2014. 1−10. [doi: 10.1109/WoWMoM.2014.6918972]

[74] Li Q, Cao G. Providing privacy-aware incentives for mobile sensing. In: Proc. of the 2013 IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom). IEEE, 2013. 76−84. [doi: 10.1109/PerCom.2013.6526717]

[75] Yan T, Hoh B, Ganesan D, Tracton K, Iwuchukwu T, Lee JS. CrowdPark: A crowdsourcing-based parking reservation system for mobile phones. Technical Report, University of Massachusetts at Amherst, 2011.

[76] Ryan RM, Deci EL. Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. Contemporary Educational Psychology, 2000,25(1):54−67. [doi: 10.1006/ceps.1999.1020]

[77] Bindra D, Palfai T. Nature of positive and negative incentive-motivational effects on general activity. Journal of Comparative and Physiological Psychology, 1967,63(2):288−297. [doi: 10.1037/h0024371]

[78] Li Z, Shen H. Game-Theoretic analysis of cooperation incentive strategies in mobile ad hoc networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2012,11(8):1287−1303. [doi: 10.1109/TMC.2011.151]

附中文参考文献:

[12] 刘云浩.群智感知计算.中国计算机学会通讯,2012,8(10):38−41.

[21] 赵东,马华东.群智感知网络的发展及挑战.信息通信技术,2014,(5):66−70.

[22] 陈荟慧,郭斌,於志.移动群智感知应用.中兴通讯技术,2014,20(1):35−37.

[23] 熊英,史殿习,丁博,邓璐.移动群体感知技术研究.计算机科学,2014,41(4):1−8.

[24] 黄涵霞,丁强,李莉,娄梦茜,孙知信.移动终端群智感知研究.计算机技术与发展,2014,24(6):6−9.

吴垚(1990－),男,河北高碑店人,博士生,主要研究领域为移动群智感知,隐私保护,数据管理系统.

陈红(1965－),女,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为物联网数据管理,基于新硬件的数据管理与数据分析.

曾菊儒(1987－),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络,隐私保护,参与式感知.

李翠平(1971－),女,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为数据仓库,数据挖掘,信息网络分析,流数据管理.

彭辉(1986－),男,博士,主要研究领域为物联网数据管理,隐私保护.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn