



群体智能 2.0 研究综述

赵 健, 张鑫祺, 李佳明, 贺 晨

(西北大学 信息科学与技术学院, 西安 710127)

摘 要: 在物联网、移动互联网的快速发展和大数据的深层驱动下, 群体智能进入 2.0 时代。通过介绍群体智能 2.0 的定义, 分析国内科研团队在群智感知计算、联邦学习及众包等方面的研究成果, 明确群体智能 2.0 的发展趋势, 并指出群智感知计算与众包技术将成为群体智能 2.0 的主要研究方向, 数据获取、数据处理及用户隐私保护为需要解决的关键技术难点。

关键词: 群体智能; 众包; 移动众包; 群智感知计算; 联邦学习

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 赵健, 张鑫祺, 李佳明, 等. 群体智能 2.0 研究综述[J]. 计算机工程, 2019, 45(12): 1-7.

英文引用格式: ZHAO Jian, ZHANG Xinti, LI Jiaming, et al. Research review of crowd intelligence 2.0[J]. Computer Engineering, 2019, 45(12): 1-7.

Research Review of Crowd Intelligence 2.0

ZHAO Jian, ZHANG Xinti, LI Jiaming, HE Chen

(School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

[Abstract] With the rapid development of Internet of Things (IoT) as well as mobile Internet and the deep drive of big data, crowd intelligence has entered the 2.0 era. This paper introduces the definition of crowd intelligence 2.0, and analyzes the research results of Chinese research teams on crowd intelligence sensing and computing, federated learning and crowdsourcing. On this basis, this paper clearly indicates the development trend of crowd intelligence 2.0, where crowdsourcing technologies and crowd intelligence sensing and computing will become the focus of research, while data acquisition, data processing and user privacy protection will become the key technological challenges to be solved.

[Key words] crowd intelligence; crowdsourcing; mobile crowdsourcing; crowd intelligence sensing and computing; federated learning

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0056410

0 概述

群体智能是基于人们对于自然界群居生物的观察所提出的一种智能形态, 其具有群体涌现出的智慧超越其组成个体智慧的特点。早期学者专注于群体行为特征规律上的研究, 并针对这些行为特征提出一系列具备群体智能特征的算法, 如蚁群优化算法^[1]、蚂蚁聚类算法^[2]及粒子群优化算法^[3]等。近年来, 在物联网、移动互联网快速发展和大数据深度驱动下, 群体智能的发展方向逐渐转移到将人类智能与智能机器互相融合的思路。中国科学院院士李未提出了群体智能的新概念, 即群体智能是在某种基于互联网的组织结构下被激励进行计算任务的大量独立个

体共同作用所产生的超越个体智能局限性的智能形态, 这标志着群体智能迈入了 2.0 时代^[4]。

人机物三元融合, 共融共生的思想为群体智能发展注入了新的动力。人机物共融^[5]智能即通过物联网、移动互联网, 结合大数据计算、通信、人工智能等技术使物与物之间、物与人之间实现互联, 将智能融入万物实现无缝对接、协同计算。人机物共融打造新一代工业生产模式, 推动社会发展, 期间人们所熟知的数字经济、智慧城市都是人机物推动社会发展所出现的阶段性表现, 如今结合群体智能更是要将打造“群智空间”列入其中。人机共融智能深入人们生活, 如医疗保健、银行智能服务、智能家居、可移动智能穿戴设备等。基于互联网组织结构和大数据

基金项目: 国家自然科学基金(61701401); 陕西省自然科学基金(2019KJXX-061)。

作者简介: 赵 健(1973—), 男, 教授、博士后、科技创新 2030“新一代人工智能”重大项目群体智能方向会评专家, 主研方向为人工智能及其应用; 张鑫祺、李佳明, 硕士研究生; 贺 晨, 教授、博士。

收稿日期: 2019-09-05 **修回日期:** 2019-10-05 **E-mail:** zjtec@nwu.edu.cn

数据驱动下人机物共融的发展越来越深入,尤其是在群智感知计算和众包方面利用人与机器之间的互补性使人机物共融共生的思想得到延伸。

移动设备的广泛普及为群体数据带来了新的产生方式和类型,借助万物互联的物联网和互联网的实时网络共享功能,各类众包系统层出不穷。人群与智能设备紧密相连的关系使得群体智能为人群服务的方式不断更新换代,如科技服务人类,人类推动科技发展一样,在群智感知计算方面也秉承着数据来源于人群服务于人群的思想。群体智能感知计算也被广泛用于智能交通、医疗保健及社会管理等方面。本文对群体智能的国内发展现状与研究成果进行介绍,分析群体智能 2.0 时代的主要研究方向,并明确群体智能 2.0 时代的发展趋势。

1 国内发展现状

随着物联网、移动互联网发展带来的万物互联、共建共享和大数据的深层驱动,群体智能迎来了新的黄金发展时期,步入群体智能 2.0 时代。

与国外发展现状相比,国内在群体智能的理论发展及所取得技术成果方面都有一定的差距。2017 年,人工智能正式迈入 2.0 时代,并居于国家战略的高度。属于人工智能重要发展方向之一的群体智能也受到了高度关注,在《新一代人工智能发展规划》^[6]中明确提出,关于群体智能的研究需分别从理论基础和关键共性技术两方面入手建立完善的群体智能理论与技术体系,为我国针对群体智能研究做出技术性突破打下坚实基础。

理论研究方向主要分为群体智能的结构理论与组织方法、群体智能激励机制与涌现机理、群体智能学习理论与方法、群体智能通用计算范式与模型 4 个方面。关键共性技术方面主要分为群体智能的主动感知与发现、知识获取与生成、协同与共享、评估与演化、人机整合与增强、自我维持与安全交互、构建群智空间的服务体系结构、移动群体智能的协同决策与控制技术 8 个方向。

1.1 群体智能 1.0 与群体智能 2.0 对比

针对群体智能,分别给出群体智能 1.0 时代和群体智能 2.0 时代的定义:群体智能 1.0 时代(基于生物群体行为),大量的简单个体按照一定规则进行的活动表达出了超越个体智能限制的集体智慧;群体智能 2.0 时代(基于移动互联网),基于互联网的组织结构下被激励进行计算任务的大量独立个体共同作用下所产生的超越个体智能局限性的智能形态。

基于不同定义,本文对比两个时代群体智能发展的不同方向,如表 1 所示。群体智能 1.0 时代侧重于对群体生物行为模型的研究,对群体生物的觅食、筑巢等行为进行建模并提出算法,从而得出针对实际问题的解决思路,取得的成果有蚁群优化算法、蚂蚁聚类算法、粒子群优化算法等。

表 1 群体智能算法的群体行为与应用领域

算法	群体行为	应用领域
蚂蚁优化算法	蚁群觅食	TSP 问题、皇后问题等
蚂蚁聚类算法	蚂蚁墓的形成	聚类划分、数据分析等
粒子群优化算法	鸟群觅食	函数优化、电力系统等
狼群算法	狼群捕食	医学、三维传感器优化、人工神经网络等
鸽群优化算法	鸽群自主归巢	无人机组队、控制参数优化、图像处理等

此外,群体智能 1.0 时代在群体机器人、群智系统构建机制等方面也有相关研究^[7],其中群体机器人的研究基于群体生物行为。

群体智能 2.0 时代侧重于与物联网、互联网、大数据、协同计算以及人机物共融等技术和思想交叉发展的领域,将针对群体生物行为模型的研究转为针对人群智能的探索。

从群体智能 1.0 和群体智能 2.0 所处的背景出发,笔者认为群体智能 2.0 时代较群体智能 1.0 时代具有网络速率高、用户范围广、数据多样化、数据安全性高的特点。在 5G 万物互联的助力下,更多的移动设备被接入网络,群体智能 2.0 具有多终端、用户参与度高的优势。

1.2 现有成果

国内对于群体智能的研究主要以李未院士及其团队为主。2012 年,李未院士将研究方向转为基于人机物结合的群体智能系统研究,参与了人工智能国家重大专项的论证并提出推进群体智能相关研究,被列入 2016 年中国工程院发布的《中国人工智能 2.0 计划》,成为国家“科技创新 2030”重大计划的重要内容。目前该实验室取得的重大成果有首创众包动态任务分配理论、结合并开创群体软件工程新方向等。

国内在群体智能结合人群智能方面也取得了显著成果。在群体智能结合协同计算方面,李未院士及其团队针对微博这一平台,对社交网络情绪传播进行分析,取得成果引起国际高度关注并纳入多科教材;在软件开发方面,李未院士提出了群体软件工程的研究,并且针对这一研究课题,国家自然科学基金委员会、科技部等先后立项了多个群智化软件开发方法的重大/重点项目;在群体智能结合大数据、协同计算方面,清华大学的刘云浩教授提出群智感知计算;在众包数据管理方面,清华大学的李国良副教授及其团队构建了众包任务处理平台 ChinaCrowd,北京航空航天大学的童咏昕副教授及其团队针对众包系统时空数据管理方面取得了一系列研究成果。

2 群体智能 2.0

2.1 群智感知计算

2.1.1 群智感知计算概念

由于获取到的数据质量高低对数据处理结果具有重要影响,因此如何更快速有效地获取大规模数

据信息成为数据信息收集的发展目标。2012年,清华大学刘云浩教授提出群智感知计算这一概念。群智感知计算是利用物联网、移动互联网、移动设备和群体智能等技术实现的一种新型获取数据信息的方式,其具体是在基于移动互联网的组织结构和大量用户群体的驱动下,以每个用户的移动设备为感知单元实现对感知任务的分发和数据的收集^[8]。由于人群具有活动范围广、分布随机等特性使得这种新型的数据感知获取方式与以往基于传感网和物联网的感知方式相比更适宜应对数据需求灵活度高、规模大的情况。

2.1.2 群智感知计算系统典型架构

群智感知计算系统的典型构架^[9](见图1)包括感知参与者、网络层和终端用户三部分,这三部分分别用于提供数据、数据采集与传输、数据处理与计算、获取发布的任务及收到任务处理的结果。数据的来源除了智能机器,还有参与感知的群体用户,称为感知参与者。整个系统的工作流程为:终端用户通过网络下发任务给感知参与者,参与者从中选择任务并通过网络传输反馈感知数据,网络层对数据进行存储、传输、计算及处理,将最终处理结果发送给终端用户。

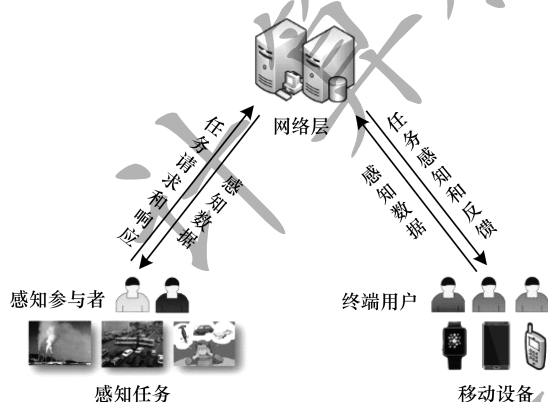


图1 群智感知计算系统典型构架

在群智感知计算中,将感知参与者提供数据的方式分为线上和线下两种,线下通过人在回路(human in the loop)的感知模式提供数据,即通过用户参与任务提供数据;线上通过收集用户使用社交媒体过程中产生的数据,各类移动社交媒体将现实与虚拟空间相连进行用户实时数据传输^[10],也将这两种参与方式称为参与式(主动感知)和机会式(被动感知)。

2.1.3 群智感知计算的相关应用

随着移动设备的普及,智能手机配备了各项功能强大的传感器,如GPS、罗盘、陀螺仪、加速度计、麦克风、镜头传感等(除智能手机外,移动设备还包括智能车辆、医疗设备、可穿戴设备等)。在移动设备与传统传感器的协调工作下,感知网络的规模扩大到一个新的高度,不仅可在人群参与感知中获得数据信息,还可通过社交网络等应用程序获知用户

的上下文感知数据,如位置信息、健康数据、天气状况等。移动感知和人群计算提供了一种大规模、分布式的感知计算方法,并将其应用于实际问题中,如医疗保健、环境、智慧城市建设、智能交通、人群管理、社交网络、公共安全和军事应用等方面^[11]。

在公共安全和军事方面,文献[12]提出利用移动感知实现高效目标追踪定位的方法,相较于通过摄像头等传感器捕捉目标信息,该方法从人群获取信息的角度,建立相应的众包平台,并利用群体感知的方法来追踪目标。结合用户上传目标照片和时间位置信息,并以时间为轴建立信息网来实现目标追踪。

在人群管理方面,对人群行为和情感进行监测研究。文献[13]将行为分析应用于商业客户分析。针对不同客户的需求,将客户划分为不同类型,根据不同类型客户对应的市场制定相应的方案。划分客户类型是进行客户分析的前提,由于基于群体智能的聚类算法(如蚂蚁聚类算法)的聚类中心个数是自动产生的,相比于传统聚类算法,群智聚类算法具有更能发现是否存在其他划分可能性的优势,而划分结果也会影响客户群体分析的有效性。李未院士及其团队以新浪微博平台为例,研究选取了微博7000万条数据,以转发关系为交互信息,对群体行为受到群体情绪的影响情况进行研究。将用户情绪分为高兴、愤怒、低落、厌恶4种,利用构建的交互网络进行分析,发现在网络中最容易传播的情绪是愤怒,这一结论的得出受到各界广泛关注。

2.1.4 群智感知计算发展的影响因素

群智感知计算的优点是数据来源及其分布具有覆盖面广、随机性强的特点,可应对大规模数据需求问题,但同时数据质量不齐和数据结构复杂多样给计算带来困难,用户的安全隐私问题也备受关注。为解决以上问题,需要在提高用户参与积极性、加强优化数据处理方式、不侵犯用户隐私和保障用户安全的前提下实现群智感知计算。

1) 提高用户的参与积极性

为提高用户参与积极性并能得到相应高质量的数据,需从两方面入手,即在采用一定激励机制的前提下对用户群体进行约束。在感知过程中保持人群心情愉快可以适当提高用户的参与感,同时对用户进行筛选可以有效控制数据质量和减少数据冗余。

2) 确保用户安全与隐私

用户数据泄露事件频发导致的数据隐私安全问题引起了广泛关注,在保证用户隐私安全的基础上实现数据共享成为群智感知计算发展的一大难题。对于数据安全隐私问题,谷歌提出联邦学习,即针对用户数据的安全隐私监督,在保护数据隐私性的前提下实现数据共享,其特点是只进行中间参数交换而将用户数据保留在本地,避免了隐私泄露。

2.2 联邦学习

用户数据泄露事件的频发引起了公众的恐慌,随即数据隐私安全受到国内外高度重视。欧盟实施了《通用数据保护条例》,国内在《网络安全法》及《民法通则》上也做出了相关规定。并且,由于商业机密性、竞争性导致无法进行数据共享,因此出现数据孤岛的问题。这两大问题对由大数据驱动的群体智能带来了极大挑战。为解决以上问题,2016 年谷歌提出联邦学习概念,即对分布于多方设备的数据集,在确保数据隐私和安全的情况下进行联合建模。简单来说,假设有 n 个数据集 $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ 进行联合训练模型,每个数据集之间互不公开,也就是完全独立。相较于一般训练模型的方法,将 n 个数据集放在一起进行训练,能够有效避免数据隐私泄露。

基于谷歌提出的联邦学习框架,杨强教授团队定义了一个更全面的联邦学习框架^[14]。联邦学习的提出为打破数据壁垒做出极大贡献,群智感知计算可以利用联邦学习的模式来保证用户数据的安全和隐私性,提高用户参与积极性。根据数据分布特征不同,将联邦学习划分为 3 类,并对不同类型的联邦学习隐私技术及应用进行论述。根据数据分布特征的不同,文献[14]将联邦学习分为横向联邦学习、纵向联邦学习、迁移联邦学习。联邦学习分类结果如图 2 所示,联邦学习分类特征如表 2 所示。

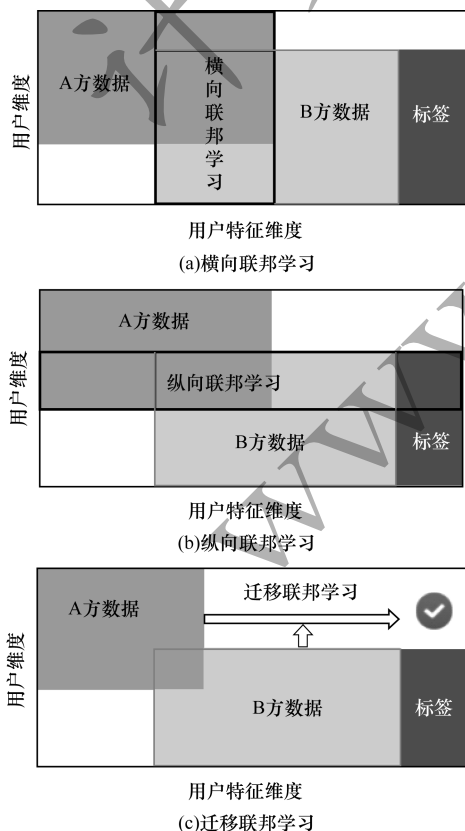


图 2 联邦学习分类结果

表 2 联邦学习分类特征

类别	用户特征	用户交集
横向联邦学习	一致	不一致
纵向联邦学习	不一致	一致
迁移联邦学习	不一致	不一致

2.2.1 联邦学习结构

横向、纵向和迁移联邦学习结构具体如下：

1) 横向联邦学习结构

文献[14]中的横向联邦学习结构如图 3 所示,其中数据库 $B_n (n=1, 2, \dots, k)$ 由 k 个参与者提供,它们具有相同的数据结构,参与者通过参数或云服务器来协作训练器学习模型,并且此过程中要求参与者不得向服务器泄漏信息。

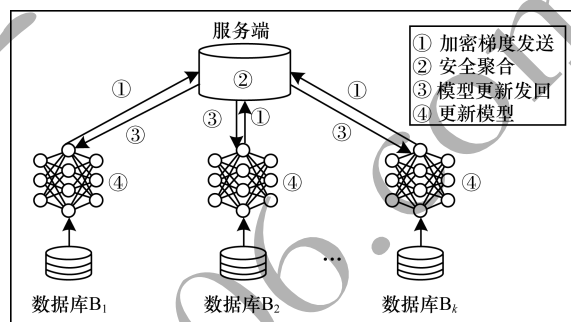


图 3 横向联邦学习结构

模型训练步骤具体如下：

- (1) 参与者在本地计算训练梯度,使用加密、差异隐私或 Secret Sharing 技术对所选梯度进行掩码,并将掩码后的结果发送到服务器。
- (2) 服务器执行安全聚合,并且无法获知任何参与者的信息。

(3) 服务器将聚合后的结果发送给参与者。

(4) 参与者用解密的梯度更新各自的模型。

通过上述步骤进行迭代,直到损失函数收敛,从而完成整个训练过程。

2) 纵向联邦学习结构

文献[14]中的在纵向联邦学习结构如图 4 所示,其中 A、B 双方想联合训练一个机器学习模型,但由于数据隐私和安全原因,双方不能直接交换数据。为确保训练过程中数据的保密性,引入了第三方合作者 C,并假设 C 是诚实可信的。系统结构由加密实体对齐和加密模型训练两部分组成。系统通过基于加密的用户 ID 对齐技术来确认双方的共同用户,从而使得 A 和 B 不会暴露各自的数据。在确定了公共实体后,使用这些公共实体的数据来训练机器学习模型。

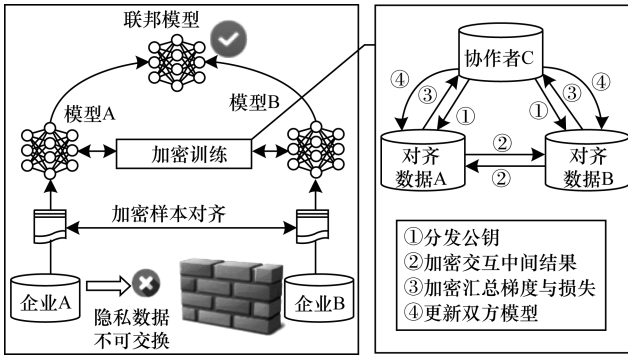


图 4 纵向联邦学习结构

模型训练步骤具体如下:

(1) 第三方合作者 C 创建加密对,将公钥发送给 A 和 B。

(2) A、B 对计算梯度和损失所需要的中间结果进行加密与交换。

(3) A、B 分别计算加密梯度并添加额外的掩码,拥有标签数据的 B 还需要计算加密损失。在计算完毕后,A 和 B 向 C 发送加密值。

(4) 第三方合作者 C 进行解密并将解密后的梯度和损失发送回 A、B。A 和 B 去除梯度上的掩码,相应地更新模型参数。

3) 迁移联邦学习结构

为使得纵向联邦学习中的训练数据集不再局限于重叠部分,而是扩展到整个样本空间,引入迁移学习,其整体结构与纵向联邦学习类似,但在 A、B 双方交换中间结构的细节方面有些不同。

2.2.2 联邦学习应用

联邦学习为打破数据壁垒、解决数据孤岛问题提供了新方法,为数据安全隐私提供了保障,在大数据驱动的时代具有重大的意义。目前,联邦学习在医疗、金融、通信、人工智能、机器学习、边缘计算等方面都有相关应用,对于群体智能的发展也有重要的影响。

2.3 众包

人机物的结合为解决计算机难以独立完成的任务提供了新思路,其中最具代表性的成果是众包系统。众包的思想是利用互联网来汇聚群体智慧解决实际问题,具体来说,任务的发出者将任务发布在互联网上供参与者选择,两者再通过众包平台进行信息交互。众包技术具备可行性的最关键因素为群体能够提供超越个体的创新能力,并且利用群体提供的数据可得到有效可靠的预测能力,被广泛应用于数据挖掘、自然语言处理、信息检索、软件设计开发、软件测试、图像识别、平面设计、创意征集、社交网络分析等方面。

众包拓展了人群智能的应用范围,促进了人类智能与机器智能的融合。近年来,随着移动设备的发展,文献[15]提出了移动众包的概念,即通过移动设备的移动性和上下文感知优势来获取数据,并将群体智能融入到移动计算中。基于众包的软件开发模式在诸多领域得到广泛应用。

2.3.1 移动众包

移动众包是指用户借助移动设备自愿收集和共享数据的模式^[15],并利用移动设备传感器或智能移动设备上的众包应用程序来获取数据信息。移动众包被广泛用于环境监测、灾害管理、基础设施监测、社区医疗、交通等方面及近年来出现的 O2O 中^[16]。

移动众包模式工作流程(见图 5)具体为:1)任务发布者提出问题;2)将问题在互联网上发布并传播,请求互联网上的任务参与者给出问题的解决方案;3)收集任务参与者给出的解决方案并予以审查;4)选出最优的解决方案。

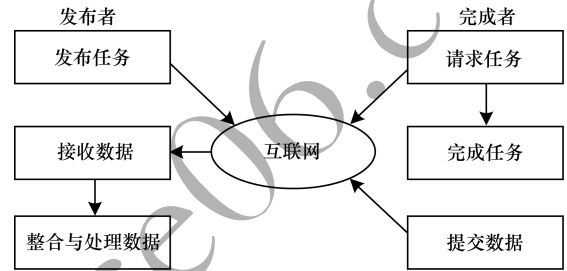


图 5 移动众包的工作流程

文献[15]基于众包的基本思想,提出移动众包通用结构,如图 6 所示,该结构又称为客户端-服务器结构,其中的数据获取和数据处理为关键步骤。

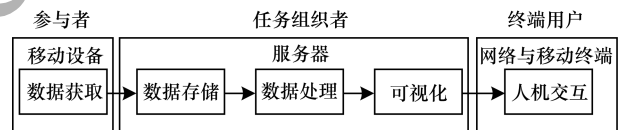


图 6 移动众包的通用结构

针对移动众包应用,研究人员提出一系列框架,如 Medusa^[17]、Vita^[18]、MoCoMapps^[19]、PRISM^[20]和 AnonySense^[21],分别在任务管理、数据获取与处理及隐私保护等方面具有不同的侧重。对于数据处理方式的不同,文献[16]从程序员和从业者的角度提出广义集中式和分散式移动众包架构。广义集中式移动众包架构分为移动感知采集层、网络连接层、数据处理层及终端用户层,整个数据处理过程是统一集中化在云服务器上执行。相反地,分散式移动众包架构的所有计算与通信都由对等体的相应节点在本地执行,使得位置信息与计算过程相关,分布式的特点使

其具有低时延、高宽带的特性,在应对突发灾害造成的人员失踪等紧急情况时具有明显优势^[22]。5G 时代互联网的大范围、高吞吐量与计算能力使移动众包更具优势,成为目前乃至未来众包模式发展的方向。

2.3.2 软件众包

利用众包技术开发软件被广泛用于学术界和商业界,针对不同目标的软件开发的侧重不同。软件众包的开发人员水平参差不齐,并且与传统软件开发方式相比,通过网络协作方式存在较大的不可控性,如何保证开发人员之间工作的协调性也是众包软件开发亟待解决的难题之一。在文献[23]中,TopCoder^[24]和 GetACoder^[25]这两种软件开发平台分别代表了竞赛和竞价两种不同的开发模式。竞赛模式在保证任务完成质量的基础上存在开发周期长的问题,而竞价模式适用于各种规模的开发任务,但存在人工成本相对高昂的问题。软件众包的不同模式为不同的软件开发目的和需求提供了多种选择。

2.3.3 众包发展的影响因素

众包发展的影响因素主要包括:

1) 数据管理及分类

移动设备携带的用户上下文数据使得数据来源不仅局限于用户主动参与,还可将时间、地理、社交等信息汇聚成一张时空交错的信息网。因此,移动众包又被称为时空众包或空间众包。时空众包的数据结构复杂多变,数据管理成为其重点研究问题,如文献[26]并先后提出将传统数据库管理系统、经典查询处理技术等与众包数据管理相结合的方法。由于获取的数据先进行分类能提高数据处理效率,因此文献[27]提出平均交换误差最低的概率基础事实(PGT)方法,并使用其在众包数据问题中进行模型选择。

2) 众包平台

众包系统能够有效工作得益于众包平台的构建。众包平台是一个提供多方在线进行任务交互的网络平台,其中较成熟的众包平台有维基百科、Amazon Mechanical Turk (Mturk)、CloudCrowd、Facebook 等。文献[28]对众包平台如何影响众包参与过程进行研究,得出参与过程由于参与驱动的激励会产生更高水平的积极情绪唤醒,从而促进情感承诺的发展和直接或间接的价值贡献,说明了激励机制的不可或缺性。激励机制的调控因素可分为酬劳、声誉、兴趣和利他性^[4],通过刺激用户不同需求来调动用户的参与积极性。

3) 任务分配

任务分配在众包模式中起到重要作用。众包中的任务分配主要分为动态分配和静态分配两种方式,任务分配效率将直接影响任务执行效率。近年来,研究者不断提出对任务分配的优化方法,如文献[23]对匈牙利算法^[29]进行改进,先构建二分图结构,再用匈牙利算法求解二分图最优匹配,并且通过协作候选组替换策略动态地改变二分图结构,从而获得与协同约束的最优匹配。

3 结束语

本文通过对群智感知计算、联邦学习、众包等研究成果的介绍和分析,明确群体智能 2.0 时代的发展趋势,指出群智感知计算和众包将成为群体智能 2.0 时代的重点研究方向。由于 5G 时代带来更高网络速率的同时万物互联也加快了移动设备的发展,移动设备的多样化和普及化使得感知网络的覆盖范围更广,数据类型更丰富,因此处理复杂数据和保障用户隐私安全将成为群智感知计算的主要研究方向,而构建更强大的数据管理与分类系统和提出更有效的激励措施,加强用户隐私保护并建立完善的安全协议也将成为众包及数据安全领域的下一步研究重点。

参考文献

- [1] COLORMI A, DORIGO M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies [C]//Proceedings of European Conference on Artificial Life. Paris, France: Elsevier Publishing, 1991: 134-142.
- [2] CHU Shuchuan, RODDICK J F, SU C J. Constrained ant colony optimization for data clustering [C]//Proceedings of the 10th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence. Berlin, Germany: Springer, 2004: 534-543.
- [3] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [4] LI Wei, WU Wenjun, WANG Huaimin, et al. Crowd intelligence in AI 2.0 era [J]. Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, 2017, 18 (2): 15-43.
- [5] LICKLIDER J C R. Man-computer symbiosis [J]. IRE Transactions on Human Factors in Electronics, 1960, 1 (2): 4-11.
- [6] Development planning for a new generation of artificial intelligence [EB/OL]. [2019-09-24]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm. (in Chinese)

- 新一代人工智能发展规划[EB/OL]. [2019-09-24]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.
- [7] WANG Mei, ZHU Yunlong, HE Xiaoxian. A survey of swarm intelligence [J]. Computer Engineering, 2005, 31(22):204-206. (in Chinese)
王玫,朱云龙,何小贤. 群体智能研究综述[J]. 计算机工程, 2005, 31(22):204-206.
- [8] LIU Yunhao. Crowd sensing and computing [J]. Communications of the CCF, 2012, 8(10):38-41. (in Chinese)
刘云浩. 群智感知计算[J]. 中国计算机学会通讯, 2012, 8(10):38-41.
- [9] GUO Wenzhong, ZHU Weiping, YU Zhiyong, et al. A survey of task allocation: contrastive perspectives from wireless sensor networks and mobile crowdsensing [J]. IEEE Access, 2019, 7:78406-78420.
- [10] GUO Bin, ZHAI Shuying, YU Zhiwen, et al. Crowdsensing big data: sensing, data selection, and understanding [J]. Big Data Research, 2017, 3(5):57-69. (in Chinese)
郭斌,翟书颖,於志文,等. 群智大数据:感知、优选与理解[J]. 大数据, 2017, 3(5):57-69.
- [11] ABUALSAUD K. A survey on mobile crowd-sensing and its applications in the IoT era [J]. IEEE Access, 2019, 7:3855-3881.
- [12] LUAN Dongming, YANG Yongjia, WANG En, et al. An efficient target tracking approach through mobile crowdsensing [J]. IEEE Access, 2019, 7:110749-110760.
- [13] WU Bin, ZHENG Yi, FU Weipeng, et al. A customer behavior analysis algorithm based on swarm intelligence [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(8):913-918. (in Chinese)
吴斌,郑毅,傅伟鹏,等. 一种基于群体智能的客户行为分析算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(8):913-918.
- [14] YANG Qiang, LIU Yang, CHEN Tianjian, et al. Federated machine learning: concept and applications [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2019, 10(2):1-19.
- [15] FUCHS-KITTOWSKI F, FAUST D, BALOIAN N, et al. Architecture of mobile crowdsourcing systems [C]//Proceedings of CYTED-RITOS International Workshop on Groupware. Berlin, Germany: Springer, 2014:121-136.
- [16] PHUTTHARAK J, LOKE S W. A review of mobile crowdsourcing architectures and challenges: toward crowd-empowered internet-of-things [J]. IEEE Access, 2019, 7:304-324.
- [17] RA M R, LIU Bin, GOVINDAN R, et al. Medusa: a programming framework for crowd-sensing applications [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Mobile System Application Services. New York, USA: ACM Press, 2012:337-350.
- [18] HU XIPING, CHU T H S, CHAN H C B, et al. Vita: a crowdsensing-oriented mobile cyber-physical system [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics Computing, 2013, 1(1):148-165.
- [19] HUPFER S, MULLER M. MoCoMapps: mobile collaborative map-based applications [C]//Proceedings of CSCW'12. New York, USA: ACM Press, 2012:43-44.
- [20] DAS T, MOHAN P, PADMANABHAN V N, et al. PRISM: platform for remote sensing using smartphones [C]//Proceedings of International Conference on Mobile Systems, Applications and Services. New York, USA: ACM Press, 2010:63-76.
- [21] CORNELIUS C, KAPADIA A, KOTZ D, et al. AnonySense: privacy-aware people-centric sensing [EB/OL]. [2019-09-24]. <http://www.doc88.com/p-9943363761284.html>.
- [22] RODRIGUES J, MARQUES E R B, LOPES L M B, et al. Towards a middleware for mobile edge-cloud applications [C]//Proceedings of the 2nd Workshop on Middleware for Edge Clouds and Cloudlets. New York, USA: ACM Press, 2017:1-10.
- [23] YU Dunhui, ZHOU Zhuang, WANG Yi. Crowdsourcing software task assignment method for collaborative development [J]. IEEE Access, 2019, 7:35743-35754.
- [24] LAKHANI L R, GARVIN D A, LONSTEIN E. Topcoder(a): developing software through crowdsourcing [EB/OL]. [2019-09-24]. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2002884.
- [25] ZANATTA A L, MACHADO L S, PEREIRA G B, et al. Software crowdsourcing platforms [J]. IEEE Software, 2016, 33(6):112-116.
- [26] TONG Yongxin, YUAN Ye, CHENG Yurong, et al. Survey on spatiotemporal crowdsourced data management techniques [J]. Journal of Software, 2017, 28(1):35-58. (in Chinese)
童咏昕,袁野,成雨蓉,等. 时空众包数据管理技术研究综述[J]. 软件学报, 2017, 28(1):35-58.
- [27] URKULLU A, PÉREZ A, CALVO B. On the evaluation and selection of classifier learning algorithms with crowdsourced data [J]. Applied Soft Computing, 2019, 80:832-844.
- [28] TROLL J, BLOHM I, LEIMEISTER J M. Why incorporating a platform-intermediary can increase crowdsources' engagement [J]. Business and Information Systems Engineering, 2019, 61:433-450.
- [29] MUNKRES J. Algorithms for the assignment and transportation problems [J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1957, 5(1):32-38.