

基于边缘计算的传感云研究进展*

曹芷晗¹, 卢煜成¹, 赖思思¹, 於志勇^{2,3}, 马樱⁴, 王田^{1,4}



¹(华侨大学 计算机科学与技术学院,福建 厦门 361021)

²(福州大学 数学与计算机科学学院,福建 福州 350108)

³(福建省网络计算与智能信息处理重点实验室(福州大学),福建 福州 350108)

⁴(数据挖掘与智能推荐福建省高校重点实验室(厦门理工学院),福建 厦门 361024)

通讯作者: 王田, E-mail: wangtian@hqu.edu.cn

摘要: 传感云是无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSNs)和云计算的结合.通过利用云计算在资源利用方面的优势,传感云(sensor-cloud)极大地提高了传统无线传感器网络的计算能力和存储容量.然而,传感云仍有许多问题需要解决,例如无线传感器网络在通信和能源方面的局限性,以及将云平台作为数据处理和控制中心所带来的高延迟和安全隐私问题.边缘计算具有解决传感云缺点的巨大潜力,其核心是将云计算中心的部分或全部计算任务迁移到数据源附近进行处理.经过大量调研,分析了传感云的最新研究现状,总结了现有传感云的特点,揭示了已有传感云方案中的问题,提出了基于边缘计算的传感云实现方案.最后,探讨了该研究面临的挑战和未来研究方向.

关键词: 传感云;无线传感器网络;云计算;边缘计算;隐私安全

中文引用格式: 曹芷晗, 卢煜成, 赖思思, 於志勇, 马樱, 王田. 基于边缘计算的传感云研究进展. 软件学报, 2019, 30(Suppl.(11)):40-50. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19005.htm>

英文引用格式: Cao ZH, Lu YC, Lai SS, Yu ZY, Ma Y, Wang T. Survey on sensor-cloud based on edge computing. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2019, 30(Suppl.(11)):40-50 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19005.htm>

Survey on Sensor-Cloud Based on Edge Computing

CAO Zhi-Han¹, LU Yu-Cheng¹, LAI Si-Si¹, YU Zhi-Yong^{2,3}, MA Ying⁴, WANG Tian^{1,4}

¹(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

²(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

³(Fujian Provincial Key Laboratory of Networking Computing and Intelligent Information Processing (Fuzhou University), Fuzhou 350108, China)

⁴(Key Laboratory of Data Mining and Intelligent Recommendation (Xiamen University of Technology), Xiamen 361024, China)

Abstract. Sensor-cloud is a combination of wireless sensor networks (WSNs) and cloud computing. The emergence of sensor-cloud greatly enhances the computing power and storage capacity of traditional WSNs via exploiting the advantages of cloud computing in resource utilization. However, there are still many problems that need to be solved in sensor-cloud, such as the limitations of WSNs in

* 基金项目: 国家自然科学基金(61502404); 数据挖掘与智能推荐福建省高校重点实验室开放基金(DM201902);福建省网络计算与智能信息处理重点实验室开放课题;福建省社会科学规划基金(FJ2018B038);福建省自然科学基金(2018J01092, 2019J01851);华侨大学研究生科研创新基金(17014083012)

Foundation item: National Nature Science Foundation of China (61502404); Open Fund of Key Laboratory of Data Mining and Intelligent Recommendation, Fujian Province University (DM201902); Open Project of Key Laboratory of Networking Computing and Intelligent Information Processing, Fujian Province; General Projects of Social Sciences in Fujian Province (FJ2018B038); Natural Science Foundation of Fujian Province of China (2018J01092, 2019J01851); Subsidized Project for Postgraduates Innovative Fund in Scientific Research of Huaqiao University (17014083012)

收稿时间: 2019-09-15; 采用时间: 2019-10-24

terms of communication and energy, the high latency and privacy security issues due to applying cloud platform as the data processing and control center. The core of edge computing is to migrate some or all of the computing tasks of the original cloud computing center to the vicinity of the data source, which gives edge computing great potential in solving the shortcomings of sensor-cloud. After a lot of research, the latest research status of sensor-cloud was analyzed, the characteristics of existing sensor-cloud were summarized, the problems of existing sensor-cloud solution were revealed and the implementation scheme of sensor-cloud based on edge computing was proposed. Finally, the challenges and future research directions of the research in sensor-cloud were discussed.

Key words. sensor-cloud; WSNs; cloud computing; edge computing; privacy security

近年来,随着医疗保健、智能交通、制造业和农业等领域智能应用的发展,传感云正受到学术界和工业界的广泛关注.传感云改变了传统应用程序需要单独使用传感器的要求,提高了传感器节点的利用率并为用户提供定制服务,从而使用户将重心转移到如何更好地利用服务提供商部署的智能传感器基础设施上,而并非考虑应该如何自行部署相应的传感器设施^[1].但是,传感云也带来了一些新的问题,如无线传感器网络与云端之间的通信问题、第3方可信问题、耦合安全问题以及由于云服务器距离底层传感网络太远而导致的高延迟问题等等.因此,有必要探索新的方法和模型来解决这些问题.笔者注意到边缘计算具有诸多优势,包括更高的性能、更好的效率和更高的安全性.边缘计算作为云计算的延伸,是一种新兴的热点技术,其特点是比云计算更接近底层网络、支持移动性和具有分布式的计算资源^[2].边缘层是云端与无线传感器网络之间的中继,边缘计算可以看做是一种微云,工作于传感云架构的中间层,以实现安全可靠的数据处理和数据存储.

本文首先对传感云进行了概述,介绍了传感云的特点和传统传感云的架构.其次,根据现有传感云的不足,总结了边缘计算应用于传感云系统的优势.接着,详细讨论了如何利用边缘计算来解决传感云中的挑战,并分析了一些基于边缘计算的传感云的具体应用.然后,讨论了一些开放式问题并提供了预期的解决方案,确定了未来研究方向.最后,对本文的工作进行了归纳总结.

1 传感云系统概述

1.1 传感云设计和特点

传感云是无线传感器网络和云计算的结合,通过云端控制传感器网络,完成信息收集、处理和存储等功能.因此,传感云结合了云计算的优势,并扩展了无线传感器网络的计算能力、存储容量和通信带宽^[3].底层传感器网络负责收集信息并上传给云端,由云端处理这些产生的数据,并为上层用户提供远程服务,使用户能随时随地按需收集、处理、分析、存储和分享传感器数据,这也减轻了传感器网络的负担,加快了数据处理速度^[4].在支持传感云的应用程序中,用户只需向传感云发送应用请求,传感云将自动分发和调度相应的传感器网络以提供实时服务.

我们对近6年来的无线传感器网络、云计算及传感云进行了大量的调研,图1(a)显示了三者相关论文数量的趋势.显然,人们对云计算的关注正在减少,对无线传感器网络的研究则保持着相对平稳的态势.然而,传感云的研究趋势最初呈上升趋势,而在近两年开始有所下降.根据历史经验,当一项技术达到顶峰并开始衰退时,它将很快进入成熟应用阶段,比如物联网技术^[5].因此,对于传感云来说,这种下降趋势表明它正在逐渐成熟,这是研究其应用和开放性问题的最佳时机.图1(b)显示了过去6年中针对传感云不同研究方向的论文数量占比,研究方向主要包括服务、安全、架构、信任和存储.从图中可以看出,人们非常重视对传感云安全问题的研究,其中数据安全更是关注的重点^[6].

图2显示了一种传感云的体系结构,自下而上依次包括物理节点层、虚拟节点层和用户应用层^[7].在物理节点层,每个传感器节点都有自己的控制和数据收集机制,该层主要负责收集感知数据,不同的应用场景中其功能也有所不同.虚拟节点层由虚拟传感器节点和云服务器组成,主要负责数据的处理和对物理节点层的调度管理.该层对用户来说是透明的,当用户使用基于传感器的云服务时,终端用户不需要担心传感器节点的特定位置和状态.最上层是用户应用层,该层为用户提供大量的应用服务,用户只需根据自己的需求访问底层网络收集到的数据,并通过基于云计算的应用服务进行数据处理和分析^[8].

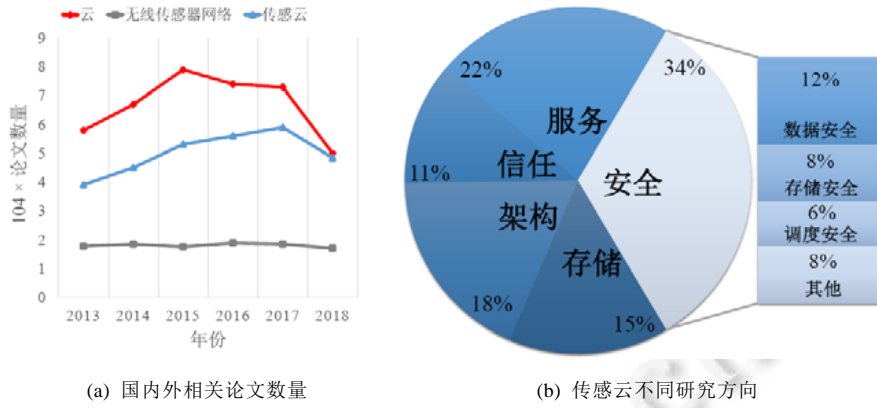


Fig.1 Trends of sensor-cloud research

图 1 传感云研究趋势

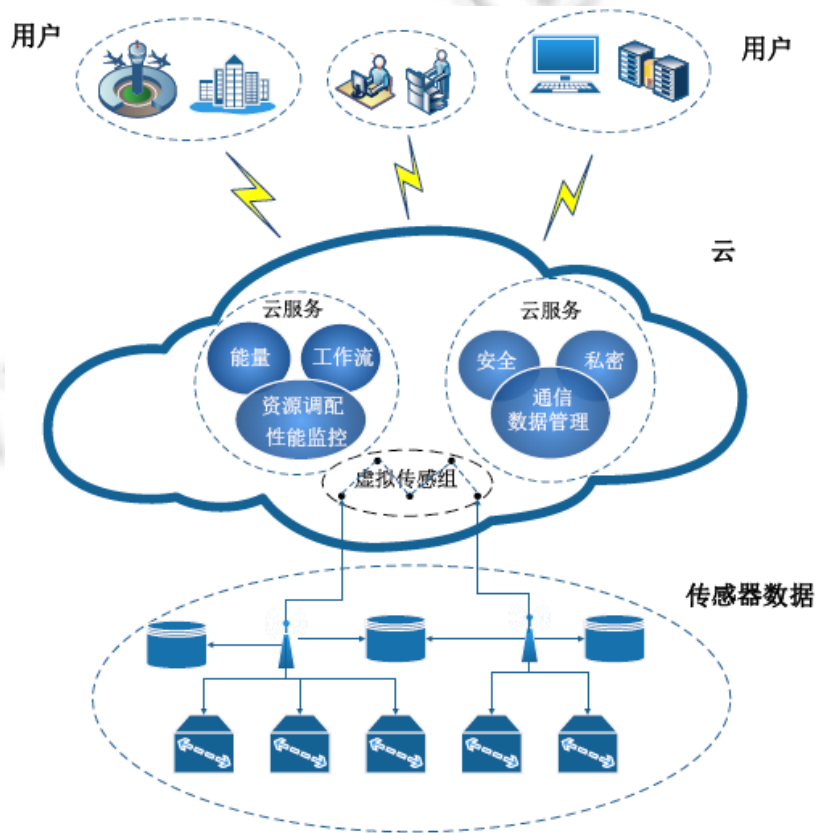


Fig.2 Sensor-cloud architecture

图 2 传感云体系结构

1.2 现有传感云研究

传感云平台具有快速接入、数据云存储、随时随地访问、按需服务等优点,在各行各业有着广泛的应用.目前已有的传感云研究已经囊括了服务、信任、安全等在内的方方面面,相较于传统的无线传感器网络,基于传感云的新型应用均提供数据的云存储处理、移动访问和传感器网络的远程控制等服务^[9],下面逐条说明.

(1) 服务:良好的用户体验是用户选择传感云平台的必要条件.当存在大量并发用户服务请求时,满足不同用户针对不用应用的服务质量(QoS)要求是主要问题.文献[10]中的研究为传感云用户提出了一种多方法数据传输(MMDD)方案,具有4种数据传输方式,包括云端和传感云用户之间的交互,无线传感器网络和传感云用户之间的交互,传感云用户之间的交互以及边缘服务器和传感云用户之间的交互.该方案综合考虑传感云用户的位置、所需数据和服务水平,以创建一种全面的数据传输解决方案.

(2) 安全:保护网络安全和用户隐私在传感云系统中是非常必要和关键的.加强不同场景下的认证和加密机制有助于提高安全级别.文献[11]提出了基于入侵检测中密钥被截获的概率和设备运行授权的泄漏概率,建立了一个动态多密钥博弈的认证框架,用来实现工业无线传感云(IWSC)的无人看守操作,并在严峻的工业网络环境中保护被攻击者.

(3) 信任:自传感器提出以来,信任机制的研究就备受关注^[12].在基于传感云的车载自组织网络(VANET)中,车辆间的信任建立对于确保应用的完整性和可靠性非常重要.文献[13]提出了一种基于经验和合理性的模糊信任模型来保护车载网络,该信任模型通过执行一系列的安全检查来确保从授权车辆处收到的信息的正确性.

2 基于边缘计算的传感云系统

一种新型的云计算数据管理机制随着传感云技术的发展而出现,这不仅拓展了云计算的市场空间,同时也极大地丰富了无线传感器网络的应用前景,但传感云在提供服务的同时也带来了一些新的挑战,主要体现在通信瓶颈和直接管理等方面.

在通信带宽方面,传感器网络和云端之间存在通信瓶颈,传感器网络的无线通信带宽有限,而基于传感云的新应用通常会大量数据并导致网络通信的高延迟.在基于边缘计算的传感云系统中,每个边缘节点可以充当移动基站,可以通过多个边缘节点的协作来形成移动多输入多输出(MIMO)网络结构^[14].当移动基站由于大量数据而被阻塞时,可以将数据转发到其他轻负载的基站,从而最大化整个网络的数据传输量并减少数据传输延迟.此外,传感器节点管理也是传感云的主要挑战之一,由于作为底层无线传感器网络管理平台的云服务器远离传感器网络,导致缺乏对传感器节点的直接管理.传统的基于云平台的远程管理无法满足用户对数据进行直接控制的需求,而在基于边缘计算的传感云系统中,由于边缘节点靠近传感器网络层并具有一定的计算、存储和移动能力,可以用来协助云端更加高效地管理和控制传感器节点.通过利用边缘节点提供的计算和存储资源来避免数据与云端交互引起的高时延问题,当计算需要更多资源时边缘端也可以将大多数计算任务卸载到云端^[15].

边缘计算作为新一代分布式计算,符合互联网分散化的特点,与云计算相比,边缘计算实际上是云计算的扩展,因为边缘计算将云计算范式扩展到网络边缘.然而,边缘计算并不会取代云计算,而是作为云计算的补充,以提高数据存储的安全性和降低云服务交付的延迟^[16].在边缘计算环境中,通常由提供计算、存储和通信功能的网络组件充当边缘节点,这些组件包括交换机、路由器、嵌入式服务器、复杂网关、可编程逻辑控制器、基站和智能物联网(IoT)节点等.边缘计算具有许多优点和特性,例如无线接入的主导性、良好的移动性和可扩展性、较低的服务延迟、更广泛的地理分布和更高的安全性等.边缘计算借助自身优势促进了数据中心和终端设备之间网络服务的管理和编程.随着边缘计算的快速发展,基于边缘计算的传感云系统能够通过其集成的数据采集、计算和存储服务为个人用户和企业带来更多的便利^[17].

3 基于边缘计算的传感云系统的现有实现

综合前两节的分析,现有传感云系统在信任、安全和服务方面还存在着一些明显的问题,这些成为了传感云发展的瓶颈.边缘计算的引入为这些挑战提出了多方位的解决方案,边缘节点更贴近底层网络、易于管理、可信度高的特点使其成为了WSNs和云端之间的桥梁和纽带.

3.1 传感云信任评估问题

对于传感云的信任问题,内部攻击和隐藏数据攻击占很大比例,信任评估机制是解决这些攻击的有效手段.信任评估不仅限于对底层无线传感器网络的传感器节点进行信任评估,还需要评估无线传感器网络和云端之间的信任关系、云端和用户之间的信任度等^[18].

(1) 层次信任评估:传统信任评估方法过度依赖可信云中心,难以对底层网络状况进行全面掌握,只能进行粗粒度的评估.文献[15]考虑了传感云中信任评估方面的一些潜在问题,如无线传感器节点的能量消耗问题,发现隐藏数据攻击问题等,设计了一种基于边缘计算的新型层次信任评估机制来解决这些问题.如图3所示,一部分是分层评估机制,另一部分是基于边缘计算的管理和维护实体信任关系.通过对底层无线传感器网络进行行为监控,由边缘层获取无线传感器网络的行为状态数据并做数据处理,从而将复杂的数据分析迁移到边缘层以实现细粒度的评估.边缘层通过分析数据发现隐藏的数据攻击,保证边缘节点可信和恢复误判节点,并利用收集的服务记录帮助云服务提供商和传感服务提供商建立信任关系^[19].这种基于边缘的分层信任机制不仅能够快速检测恶意节点、减小能耗,而且具有较好的鲁棒性.

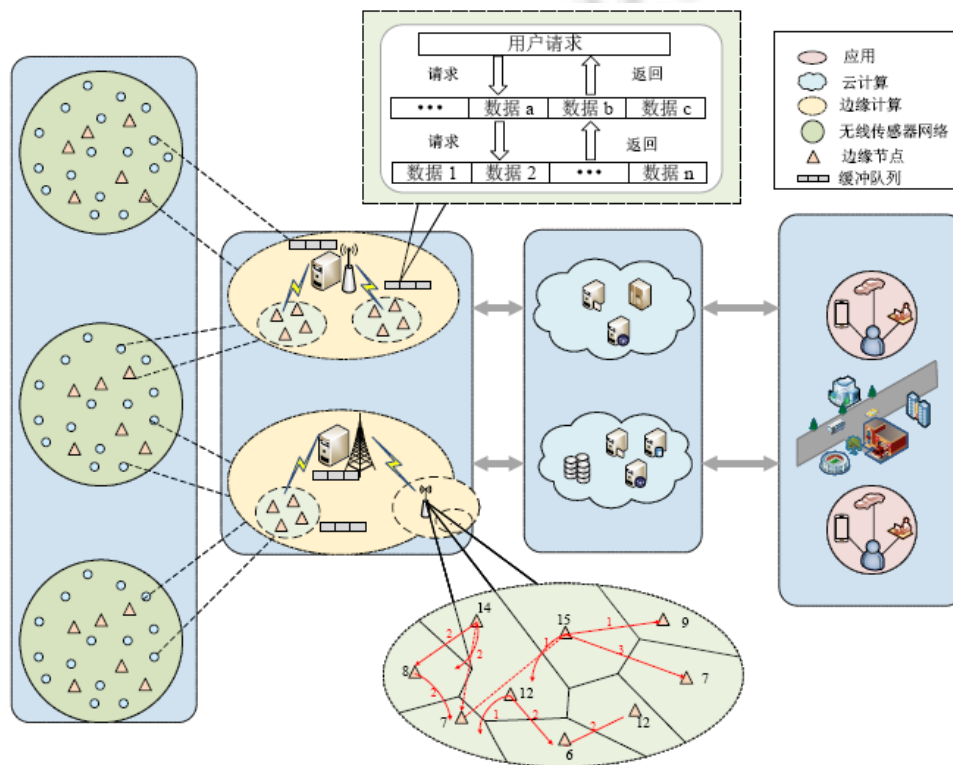


Fig.3 Edge computing enables sensor-cloud

图3 基于边缘计算的传感云

(2) 信任路径规划:在基于边缘计算的传感云系统中,底层无线传感器网络收集的数据是上层决策的基础,是所有应用的基础,这就需要高效的能源协议^[20].如果收集到的数据是错误的和不可信的,数据保护和应用将成为一个不切实际的目标,并进一步导致不必要的能源成本.然而,传统的方法不能有效、可靠地解决这一问题.为了实现这一目标,文献[21]设计了一种基于移动边缘计算的新型节能可信协议.通过在边缘层上建立信任模型,对传感器节点进行评估,生成效用值最大的移动数据采集路径,避免访问不必要的传感器节点以尽可能采集可信数据,从而提高系统效率.

(3) 信任激励机制:由于远程云端与底层传感器节点之间的距离相对较远,云计算无法为传感器节点提供有效的、即时的管理,导致信任漏洞.文献[22]设计了一种基于众包和智能边缘计算的信任评估机制,利用计算、存储能力相对较强的边缘用户,为传感器节点提供直接管理.边缘用户可以通过对传感器节点的近距离访问,获取节点的各种信息并判断该节点是否可信.该信任评估机制包含两种激励机制,即可信激励机制和质量感知可信激励机制,第 1 个目标是激励边缘用户上传关于其能力和成本的真实信息,第 2 个目标是激励可信边缘用户执行任务并报告结果,以激励边缘用户进行信任评价.

3.2 传感云安全问题

自从传感云被提出以来,安全问题已经成为一个被不断关注的问题.本节将分析传感云安全问题中的 3 个关键性问题:数据收集问题、存储安全问题、耦合安全问题.下面逐条介绍.

(1) 数据收集:传感云的数据收集能力受到无线传感器网络通信能力的限制,难以满足无线传感器网络与云端之间的实时数据传输需求^[23].文献[24]提出了一种基于边缘计算的新框架,将移动汇聚节点作为边缘节点,在无线传感器网络和云端之间架起桥梁,如图 3 所示,三者相互协作建立起一个多输入多输出网络,能够最大限度地提高吞吐量和最小化传输延迟.作者使用图论中的 Voronoi 原理将数据收集区域作为一个平面,并为所有的汇聚节点划分收集区域,然后将传感器分配给相应的汇聚节点,由此设计了一种考虑跳数和能量消耗的传感器路由算法,该算法节约了无线传感器网络的能耗,降低了传输时延.

(2) 存储安全:随着各种数据的快速增长,云存储的快速发展使得基础架构体系和存储安全性得到广泛关注.在公共云应用程序中,云服务提供商拥有并管理基础架构,这表明用户无法控制自己的数据,这些数据很可能会被传递给不被信任的机构和组织,因此数据的安全性存在很大的风险.为了保护用户隐私,文献[25]提出了一种基于边缘的 3 层存储方案(TLS),该方案可以确保用户具有数据管理能力并在一定程度上保护数据安全.如图 4 所示,该框架主要利用边缘服务器的数据存储和处理能力,在 3 层架构中,使用 Hash-Solomon 算法决定在本地存储最小规模的数据量(例如 1%),剩余的数据被适当地分割并上传至边缘服务器(例如 4%)和云服务器(例如 95%).数据盗窃者缺少任何一部分的数据都无法正确恢复用户原始数据,这确保了用户数据的隐私和安全.

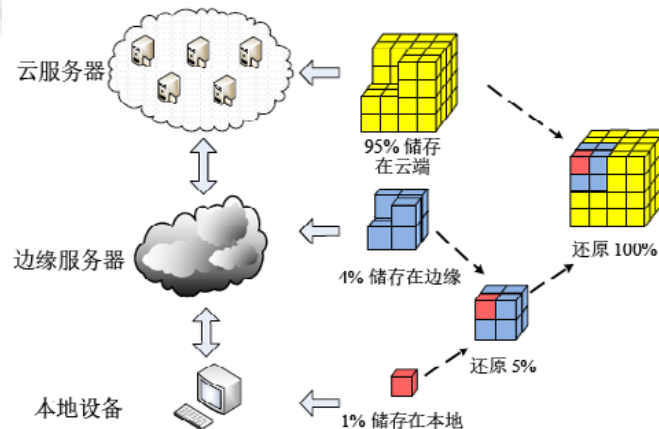


Fig.4 Three-layer storage scheme

图 4 3 层存储方案

(3) 耦合安全:当物理传感器节点同时接收多个服务请求时,会出现服务冲突,即耦合资源管理问题^[26].这种耦合安全问题可能导致服务故障和系统安全威胁.如图 3 所示,为了解决基于边缘计算的传感云系统中的耦合问题,文献[27]在边缘层设计了一个缓存队列,它将计算结果直接返回给云层,当系统中存在恶意节点和用户请求时,边缘层可以缓存冲突节点的数据,避免系统冲突,实现高度可持续性.

3.3 传感云服务质量问题

传感云中的许多应用都是数据密集型、延迟敏感型和实时性的,所以必须确保延迟敏感应用的服务质量,如延迟、反馈、成本、价格等^[28].例如,在森林火灾监测中,如果延迟太长或反馈太慢,则不能起到防止火灾和避免损失的作用,通过实施远程监控,我们可以及时发现问题、预防事故并挽救生命.利用边缘计算,以下问题可以得到较好解决.

(1) 动态边缘服务:边缘计算的引入可以极大程度地满足严格的服务质量要求,因为它使计算、存储和网络资源更接近用户.文献[29]提出了一个3层框架 FOGPLAN,用于支持服务质量的动态边缘服务供应(QDFSP),主要关注应用程序服务在边缘节点上的动态部署,或者发布以前部署在边缘节点上的应用程序服务,以满足应用程序的低延迟和服务质量要求,同时使成本最小化.

(2) 成本最小化和利润最大化:边缘辅助物联网解决了物联网设备在计算和能源方面的资源限制,并使计算密集型和延迟敏感型任务能够卸载到连接在物联网网关的边缘节点.但是由于移动终端设备的高成本,云服务提供商和边缘服务提供商只能用很高的财政预算来保证服务质量.因此,目前专注于服务质量的研究旨在最小化云服务提供商和边缘服务提供商的成本,并使其利润最大化.文献[30]通过将服务质量定义为所收集数据的空间和时间覆盖范围,将任务分派问题表示为整数线性规划(ILP)问题,提出了一种在线调度算法,并证明了该算法能获得接近最优的时间平均总成本.在任务调度算法的基础上,将传感云平台与用户之间的交互建模为两极竞争的逆向拍卖,提出了一种定价策略,在保证服务质量的同时最小化设备的总体成本.文献[31]在确保服务质量要求的前提下,将边缘资源供应和能源控制的联合优化问题转化为一个混合整数非线性规划问题,以最小化系统成本,使供应商利润最大化.

对于基于边缘计算的传感云研究方向,在表1中做了详细的分类和全面的总结.经上述分析可以发现,在基于边缘计算的传感云系统中,关于信任问题的研究旨在提高数据可靠性,而安全方面的问题涉及更为广泛,从数据的角度分析可以有数据收集安全、数据传输安全、数据处理安全和数据存储安全,从系统的角度分析则有认证安全、耦合安全等.

Table 1 Edge-based sensor-cloud
表 1 基于边缘计算的传感云研究方向

研究方向	研究内容	策略方法	主要贡献	文献引用
架构	分层架构	LRMC; 基于事件树的调度系统	减少时间依赖关系	[25,32] [33,34]
	信任	信任路径规划 信任激励机制	信任评估模型的优化 减少无效数据,提高系统生命周期	[15,34] [21]
安全	数据安全	基于 MST 的路由方法;TASA;MMSA	降低评估成本,可扩展性好	[22]
	认证安全	基于矩阵的密钥协议;数据加密	降低延迟和能源消耗	[24,35]
	传输安全	CORA;BCRA	减少冗余认证,提高系统效率	[36,37]
服务	存储安全	Hash-Solomon 算法;Reed-Solomon 算法	优化计算资源分配	[38,39]
	耦合安全	匈牙利算法	用户隐私保护,通信成本最小化	[25,38]
服务	服务质量	FOGPLAN;MINLP	减少耦合计算,增加资源利用率	[25,40]
			最小化系统成本	[29,31]

4 未来研究方向

在前面的部分中,我们总结了基于边缘计算的传感云应用的最新研究,并分析了边缘计算模型在传感云系统中的应用优势.然而,目前基于边缘计算的传感云系统还不够完善,仍有许多问题亟待解决,如基于移动边缘计算的节点信任评估、可信数据收集和筛选等.在本节中,我们将尚未被广泛讨论和研究的潜在问题或解决方案作为未来研究方向,具体内容如下.

4.1 基于移动边缘计算的节点信任评估

数据来源于传感器节点,因此有必要对底层物理节点进行全面有效的信任评估,以识别故障节点和恶意节

点,但传统方法过于依赖可信云中心,而云端远离传感器网络,导致难以及时地掌控传感器网络上的信息.边缘节点层能够全面而及时地获取传感器网络在数据采集过程中的各种状态信息,从而客观地评估传感器网络中的节点,传感器网络中的信任评估可以分为两类:直接信任评估和间接信任评估.

图 5(a)给出了一个直接信任评估的例子.移动边缘节点在节点 A 附近,节点 B 和 C 是节点 A 的直接邻居节点,然后移动边缘节点可以获得节点 A 、 B 和 C 的直接信任评估.而对于节点 D ,由于此时移动边缘节点和节点 D 不能直接交互,在传统方法下无法获得直接信任评估,只能通过其他中间节点的信任传递间接获得.但是,通过边缘节点的移动,我们假设它从图中的节点 A 移动到节点 D 附近,其中边缘节点与多个传感器节点建立了直接通信关系,从而进行直接信任评估,此时只有节点 E 、 F 、 G 和 H 无法进行直接信任评估.在基于移动边缘节点信任评估模型中,可以通过尽量缩短信任传递链来保障安全性和提高效率.如图 5(b)所示,如果边缘节点固定在节点 A 处,则节点 I 的信任评估链为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow I$ 或 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow I$.在移动的情况下,假设边缘节点沿着图中蓝色箭头移动到了节点 E ,而节点 E 恰好是一个不可信的中间节点,则可以避免选择不可信节点并回溯一个节点,以节点 D 为起始点建立信任传递链,最终节点 I 的信任评估链是 $D \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow I$.

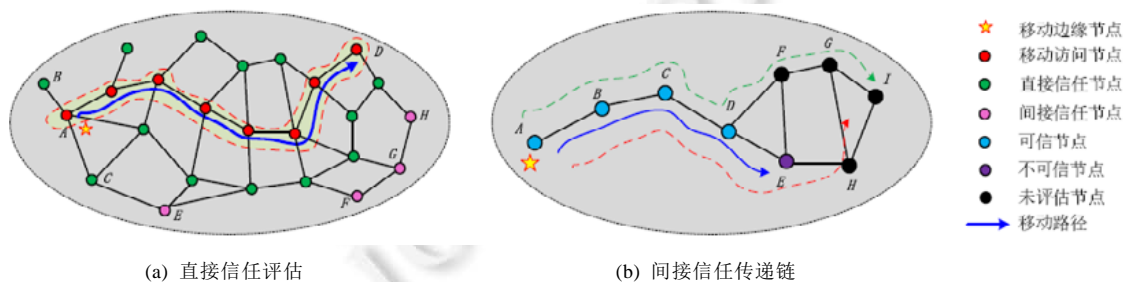


Fig.5 Trust evaluation based on mobile edge nodes

图 5 基于移动边缘节点信任评估

4.2 基于移动边缘计算的可信数据收集

对于基于边缘计算的传感云系统而言,准确高效的可信数据收集是系统管理决策的基础.因此,云端需要对底层传感网络的数据进行信任管理.结合上述传感器节点信任评估,在移动边缘节点规划移动路径的过程中加入节点可信因子的考虑.移动边缘节点能够避免不可信的传感器节点,这在收集时延敏感型数据时尤为重要,因为可以避免不必要的移动延迟.在不影响网络部署和应用平台的前提下,应考虑边缘节点如何在有限的移动距离内尽可能移动到高可信区域,以达到一次收集更多可信数据的目的.

4.3 基于移动边缘计算的数据筛选

在基于边缘计算的传感云系统中,虽然可以通过移动边缘节点访问可信数据源进行数据收集,但也难以保证数据是完全可信的.这是因为数据传递过程中存在一些不稳定因素,如恶意节点的蓄意干扰和破坏等,因此系统需要在考虑数据生命周期的基础上对数据进行筛选.在数据收集过程中,通过移动边缘节点实时动态检测异常数据,在保留可信数据的同时直接丢弃不可信数据,避免不可信数据上传到云端,这样不仅消除了异常数据,又节省了能量和带宽.数据筛选的过程大体可以分为以下两个步骤:

(1) 对数据进行分析,直接丢弃不可信的数据.由于传感器节点收集的数据一般具有空间相似性和时间相似性这两个特征,可以构建一个时空数据集,通过采用离群点检测算法进行分析,对异常和不可信数据进行检测和识别.

(2) 边缘节点可以利用自身的计算能力,根据收集到的数据进行局部预决策.如果边缘节点能够对事件进行预决策,则只需将决策结果提交给云端,否则需要将相关数据上传到云端进行综合分析判断.

5 结 论

传感云的兴起和发展既拓展了云计算的市场空间,也使得无线传感器网络具有更良好的应用前景,但与此同时,传感云也带来了新的挑战.由于网络带宽和地理位置的原因,传感云存在着效率低、数据安全难以保证等问题.边缘计算使计算资源更接近底层的无线传感器网络,从而可以将高要求的计算任务卸载到边缘,以降低无线传感器网络能耗和云端负载.然而,目前对边缘计算在传感云领域的潜在应用研究甚少,基于此本文主要讨论了边缘计算在传感云中的适用性,分析了边缘计算在解决传感云环境中数据收集、信任评估和数据存储等方面挑战的优势.最后,本文对节点信任评估、可信数据收集和筛选等开放性问题进行了展望,作为基于边缘计算的传感云系统的未来研究重点.

References:

- [1] Ojha T, Misra S, Raghuvanshi NS, Poddar H. DVSP: Dynamic virtual sensor provisioning in sensor-cloud based Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019,6(3):5265–5272.
- [2] Sthapit S, Thompson J, Robertson NM, Hopgood JR. Computational load balancing on the edge in absence of cloud and fog. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2018,18(7):1499–1512.
- [3] Wang WH, Wang T, Wu Q, Wang GJ, Jia WJ. Survey of delay-constrained data collection with mobile elements in WSNs. *Journal of Computer Research and Development*, 2017,54(3):474–492. (in Chinese with English abstract).
- [4] Meng Q, Ma JF, Chen KF, Miao YB, Yang TF. Data comparable encryption scheme based on cloud computing in Internet of Things. *Journal on Communications*, 2018,39(4):167–175 (in Chinese with English abstract).
- [5] Zeng X, Xu G, Zheng X, Xiang Y, Zhou W. E-AUA: An efficient anonymous user authentication protocol for mobile IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019,6(2):1506–1519.
- [6] Zhang Q, Hu YP, Ji C, Zhan P, Li XQ. Edge computing application: real-time anomaly detection algorithm for sensing data. *Journal of Computer Research and Development*, 2018,55(3):524–536 (in Chinese with English abstract).
- [7] Wang T, Shen XW, Luo H, Chen BS, Wang GJ, Jia WJ. Research progress of trusted sensor-cloud based on fog computing. *Journal on Communications*, 2019,40(3):170–181 (in Chinese with English abstract).
- [8] Zeng JD, Wang T, Jia WJ, Peng SL, Wang GJ. A survey on sensor-cloud. *Journal of Computer Research and Development*, 2017,54(5):925–939 (in Chinese with English abstract).
- [9] Chen YR, Lu SY, Ren TJ, Yang HB. Study on the movement path optimization algorithm of sink node for wireless sensor networks. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017,30(12):1933–1940 (in Chinese with English abstract).
- [10] Zhu CS, Leung VCM, Wang K, Yang LT, Zhang Y. Multi-method data delivery for green sensor-cloud. *IEEE Communications Magazine*, 2017,55(5):176–182.
- [11] Li DZ, Li ML, Liu JH. A dynamic multiple-keys game-based industrial wireless sensor-cloud authentication scheme. *The Journal of Supercomputing*, 2018,74(12):6794–6814.
- [12] Chen ZK, Zi BJ, Jiang GH, Liu Y. Trust evaluation for wireless sensor networks based on trust-cloud. *Journal of Computer Applications*, 2010,30(12):3346–3348 (in Chinese with English abstract).
- [13] Soleymani SA, Abdullah AH, Zareei M, Anisi MH, Vargas-Rosales CV, Khan MK, Goudarzi S. A secure trust model based on fuzzy logic in vehicular ad hoc networks with fog computing. *IEEE Access*, 2017,5:15619–15629.
- [14] Li XF, Tan LS, Li FF. Optimal cloud resource allocation with cost performance trade-off based on Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019,6(4):6876–6886.
- [15] Wang T, Zhang GX, Bhuiyan MDZA, Liu AF, Jia WJ, Xie MD. A novel trust mechanism based on fog computing in sensor-cloud system. *Future Generation Computer Systems*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.049>.
- [16] Liu ZZ, Li SN, Li B, Wang H, Zhang QY, Zheng R. New elastic collision optimization algorithm and its application in sensor cloud resource scheduling. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018,52(8):6–18 (in Chinese with English abstract).
- [17] Wang T, Li Y, Jia WJ, Wang GJ, Peng SL. Research progress of sensor-cloud security. *Journal on Communications*, 2018,39(3):35–52 (in Chinese with English abstract).

- [18] Wang T, Zhang GX, Cai SB, Jia WJ, Wang GJ. Survey on trust evaluation mechanism in sensor-cloud. *Journal on Communications*, 2018,39(6):41–55 (in Chinese with English abstract).
- [19] Wang T, Luo H, Jia WJ, Liu AF, Xie MD. MTES: An intelligent trust evaluation scheme in sensor-cloud enabled industrial Internet of Things. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2019.
- [20] Li JR, Li XY, Gao YL, Gao YQ, Fang BX. Review on data forwarding model in Internet of Things. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2018,29(1):196–224 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5373.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005373]
- [21] Wang T, Qiu L, Xu GQ, Sangaiah AK, Liu AF. Energy-efficient and trustworthy data collection protocol based on mobile fog computing in Internet of Things. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2019.
- [22] Wang T, Luo H, Zheng JX, Xie MD. Crowdsourcing mechanism for trust evaluation in CPCS based on intelligent mobile edge computing. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 2019,10(6):62.
- [23] Ali I, Gani A, Ahmady I, Yaqoob I, Khan S, Anisi MH. Data collection in smart communities using sensor cloud: Recent advances, taxonomy, and future research directions. *IEEE Communications Magazine*, 2018,56(7):192–197.
- [24] Wang T, Zeng JD, Lai YX, Cai YQ, Tian H, Chen YH, Wang BW. Data collection from WSNs to the cloud based on mobile fog elements. *Future Generation Computer Systems*, 2017.
- [25] Wang T, Zhou JY, Chen XL, Wang GJ, Liu AF, Liu Y. A three-layer privacy preserving cloud storage scheme based on computational intelligence in fog computing. *IEEE Trans. on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2018,2(1):3–12.
- [26] Liazid H, Lehsaini M, Liazid A. An improved adaptive dual prediction scheme for reducing data transmission in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2019,25(6):3545–3555.
- [27] Wang T, Liang YZ, Jia WJ, Arif M, Liu AF, Xie MD. Coupling resource management based on fog computing in smart city systems. *Journal of Network and Computer Applications*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.02.021>.
- [28] Wieland M, Li Y, Martinis S. Multi-sensor cloud and cloud shadow segmentation with a convolutional neural network. *Remote Sensing of Environment*, 2019,230:111203.
- [29] Yousefpour A, Patil A, Ishigaki G, Kim I, Wang X, Cankaya HC, Zhang Q, Xie WS, Jue JP. FogPlan: A lightweight QoS-aware dynamic fog service provisioning framework. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019,6(3):5080–5096.
- [30] Liu T, Zhu YM, Yang YY, Ye F, Yu JD. Online task dispatching and pricing for quality-of-service-aware sensing data collection for mobile edge clouds. *CCF Trans. on Networking*, 2018,2(1):28–42.
- [31] Yao J, Ansari N. QoS-aware fog resource provisioning and mobile device power control in IoT networks. *IEEE Trans. on Network and Service Management*, 2019,16(1):167–175.
- [32] Yang K, Shi Y, Ding Z. Low-rank matrix completion for mobile edge caching in fog-ran via Riemannian optimization. In: *Proc. of the 2016 IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM)*. 2016. 1–6.
- [33] Madumal MBAP, Atukorale DAS, Usoof T. Adaptive event tree-based hybrid cep computational model for fog computing architecture. In: *Proc. of the 2016 16th Int'l Conf. on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer)*. 2016. 5–12.
- [34] Wang T, Zhang GX, Liu AF, Bhuiyan MZA, Jin Q. A secure IoT service architecture with an efficient balance dynamics based on cloud and edge computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018,6(3):4831–4843.
- [35] Wang T, Li Y, Fang WW, Xu WZ, Liang JB, Chen YW, Liu XX. A comprehensive trustworthy data collection approach in sensor-cloud system. *IEEE Trans. on Big Data*, 2018.
- [36] Cui J, Wei L, Zhang J, Xu Y, Zhong H. An efficient message-authentication scheme based on edge computing for vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2018,20(5):1621–1632.
- [37] Hu P, Ning HS, Qiu T, Song HB, Wang YN, Yao XX. Security and privacy preservation scheme of face identification and resolution framework using fog computing in Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017,4(5):1143–1155.
- [38] Wang T, Zhou JY, Liu AF, Bhuiyan MZA, Wang GJ, Jia WJ. Fog-based computing and storage offloading for data synchronization in IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018,6(3):4272–4282.
- [39] Du J, Zhao L, Feng J, Chu X. Computation offloading and resource allocation in mixed fog/cloud computing systems with min-max fairness guarantee. *IEEE Trans. on Communications*, 2018,66(4):1594–1608.

- [40] Liang Y, Wang T, Bhuiyan MZA, Liu AF. Research on coupling reliability problem in sensor-cloud system. In: Proc. of the Int'l Conf. on Security, Privacy and Anonymity in Computation, Communication and Storage. 2017. 468–478.

附中文参考文献:

- [3] 王文华,王田,吴群,王国军,贾维嘉.传感网中时延受限的移动式数据收集方法综述.计算机研究与发展,2017,54(3):474–492.
 [4] 孟倩,马建峰,陈克非,苗银宾,杨腾飞.基于云计算平台的物联网加密数据比较方案.通信学报,2018,39(4):167–175.
 [6] 张琪,胡宇鹏,嵇存,展鹏,李学庆.边缘计算应用:传感数据异常实时检测算法.计算机研究与发展,2018,55(3):524–536.
 [7] 王田,沈雪微,罗皓,陈柏生,王国军,贾维嘉.基于雾计算的可信传感云研究进展.通信学报,2019,40(3):170–181.
 [8] 曾建电,王田,贾维嘉,彭绍亮,王国军.传感云研究综述.计算机研究与发展,2017,54(5):925–939.
 [9] 陈友荣,陆思一,任条娟,杨海波.一种无线传感网的 Sink 节点移动路径规划算法研究.传感技术学报,2017,30(12):1933–1940.
 [12] 陈志奎,瞿冰洁,姜国海,刘旸.基于信任云的无线传感器网络信任评估.计算机应用,2010,30(12):3346–3348.
 [16] 刘洲洲,李士宁,李彬,王皓,张倩昀,郑然.基于弹性碰撞优化算法的传感云资源调度.浙江大学学报(工学版),2018,52(8):6–18.
 [17] 王田,李洋,贾维嘉,王国军,彭绍亮.传感云安全研究进展.通信学报,2018,39(3):35–52.
 [18] 王田,张广学,蔡绍滨,贾维嘉,王国军.传感云中的信任评价机制研究进展.通信学报,2018,39(6):41–55.
 [20] 李继蕊,李小明,高雅丽,高云全,方滨兴.物联网环境下数据转发模型研究.软件学报,2018,29(1):196–224. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5373.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005373]



曹芷晗(1996—),女,湖北大冶人,硕士生,主要研究领域为传感云,车联网,深度学习.



於志勇(1982—),男,博士,副教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为普适计算,移动社交网络,群智感知.



卢煜成(1996—),男,硕士生,主要研究领域为传感云,边缘计算,物联网.



马樱(1982—),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为数据挖掘,物联网,人工智能.



赖思思(1998—),女,主要研究领域为传感云,深度学习.



王田(1982—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为物联网,云计算,雾计算/边缘计算,网络信息安全,软件安全,社交网络.