

边缘计算技术及应用综述

赵明

武汉数字工程研究所 武汉 430000

摘要 边缘计算作为继云计算之后新的计算范式,将计算下沉到靠近用户和数据源的网络边缘,提供数据缓存和处理功能,具有低延迟、安全性高、位置感知等特点。文中从边缘缓存的内容分发网络开始,综述了边缘计算的发展历史,从内容分发网络到云计算、雾计算和边缘计算的演变过程,从学术界和工业界的角度梳理了相关成果。接着对目前流行的3种边缘计算架构进行了介绍,总结了边缘计算的典型应用场景:车联网、工业生产、智慧城市。最后,基于海战场的军事应用背景,提出了基于边缘计算的指挥信息系统架构设想,探讨了边缘计算未来的发展趋势和应用方向。

关键词 边缘计算;发展历史;架构;军事应用

中图法分类号 TP393

Survey on Technology and Application of Edge Computing

ZHAO Ming

Wuhan Digital Engineering Research Institute, Wuhan 430000, China

Abstract Edge computing, as a new computing paradigm after cloud computing, migrates computation to the edge close to users and data sources, and provides data caching and processing functions with low latency, high security and location awareness. Starting from the Content Delivery Network of edge cache, this paper summarized the development of edge computing, the evolution process from the Content Delivery Network to cloud computing, fog computing and edge computing, and sorted out the relevant achievements from the perspective of academia and industry. Then, the three popular edge computing architectures were introduced, and the typical application scenarios of edge computing were summarized: Vehicle networking, Industrial production and Smart city. Finally, based on the military application background of naval battlefield, the architecture of command information system based on edge computing was proposed, and the future development trend and application direction were discussed.

Keywords Edge computing, Development history, Architecture, Military application

1 引言

随着互联网和计算机技术的发展,信息和数据呈现爆炸式增长的趋势,如何有效地处理和利用海量的信息并提高服务质量,已成为亟待解决的问题。在这种背景下,出现了云计算的概念。云计算作为并行计算、网格计算延伸的计算模式,受到了学术界和工业界的广泛关注。云计算将数据存储在云端,应用与服务存储在云端,通过发挥云服务器强大的数据处理和存储能力,来为用户提供便捷、可靠的服务。由于云服务器和终端设备物理位置之间的距离限制,集中处理和存储数据的云计算模式面临着延迟、带宽和能耗等方面的问题,我们需要新的解决方案来弥补云计算的不足。

边缘计算是指在靠近用户终端设备的网络边缘处理和存储数据,就近为用户提供可靠稳定的服务的一种计算模式。由于边缘服务器和终端设备距离较近,边缘服务器直接提供服务从而保证较低的延迟,避免服务器在本地处理数据时将数据全部上传至云端,从而减少了带宽压力,同时广泛分布的边缘服务器一定程度降低了服务器的能耗。由于边缘计算架构的独特优势,相关的研究也越来越多。自2015年开始,边缘计算相关的研究呈现猛增趋势,理论方面和应用方面均发展迅速。本文第2节介绍了边缘计算的发展历程,包括发

展历史,学术界、工业界和政府界的发展现状;第3节详细介绍了3种流行的边缘计算框架以及设计特点;第4节总结了边缘计算的主要应用方向以及部分研究成果;最后对边缘计算的军事应用进行了研究分析,提出了一种基于海战场的边缘计算指挥信息系统架构,对未来发展做出了展望。

2 边缘计算的发展

2.1 内容分发网络

边缘计算的概念最早追溯到20世纪90年代,Akamai公司为解决网络带宽小、用户访问量巨大且不均匀等问题,提出了内容分发网络CDN(Content Delivery Network)技术。CDN通过增加缓存服务器来实现内容服务,将边缘服务器设置在靠近用户的网络边缘。用户的请求会被定向到离用户最近且负载低的节点上,提高了用户访问的响应速度,尤其在视频音频等流媒体服务上有效保证了服务质量。CDN边缘服务器面向的是内容转发,而边缘计算节点面向的是数据处理。

2.2 云计算

2007年,IBM和Google宣布在云计算领域开展合作后,云计算逐渐成为学术界和工业界的研究热点。伯克利云计算白皮书对云计算的定义^[1]是:云计算包括互联网上的各种服务形式的应用及数据中心中提供这些服务的软硬件设施,云

分为公有云和私有云。云计算系统具有支持虚拟化、保证服务质量、高可靠性和扩展性等特点。对于终端设备计算资源有限的问题,云计算提供的解决方案是通过在远程高性能的计算服务器上执行应用程序,并通过网络与云服务器进行交互。但是,这种架构也存在局限性,如网络时延波动大、网络带宽有限、传输成本高、数据安全和隐私问题等。

2.3 Cloudlet

2009年,Satyanarayanan等提出了基于Cloudlet^[2]的体系架构,Cloudnet是一种受信任、资源丰富的计算机集群,分散并广泛分布,其计算和存储资源可以被附近的移动计算机所使用。把云服务器的计算迁移到靠近用户的Cloudlet上,通过移动终端与Cloudnet的近距离交互降低网络时延并提高服务质量。

2.4 雾计算

2011年思科首次提出了雾计算^[3]的概念,它通过在移动设备和云之间引入一个中间雾层来扩展云计算。中间雾层由部署在移动设备附近的雾服务器构成,雾服务器是一种具有数据存储、计算和通信功能的虚拟设备。雾计算将少量的计算、存储和通信资源放在移动设备的附近,通过本地的短距离无线连接,为移动用户提供快速服务。通过基于位置分布的雾服务器,雾计算解决了云计算无法感知位置和高延迟等问题。

2.5 边缘计算

在学术界,2016年5月,施巍松教授第一次给出了边缘计算的正式定义:边缘计算是指在网络边缘进行计算的技术,边缘定义为数据源和云数据中心之间的任一计算和网络资源节点。理论上,边缘计算应该在数据源附近进行计算分析和处理^[4]。文中研究了边缘计算的应用场景,在云卸载、视频分析、智能家居、智慧城市和边缘协作等领域均有较好的应用前景。同时作者提出了边缘计算面临的挑战和机遇,对编程可行性、命名、数据抽象、服务管理、隐私安全和优化方面进行了详细的阐述。

2016年10月,ACM和IEEE联合举办边缘计算顶级会议(IEEE/ACM Symposium on Edge Computing),截至2019年3月已经举办过三届。SEC2016收录了11篇论文,主要研究了架构实施、身份验证、边缘传感器和编程可行性等领域。Liu等提出了一种特定的提供计算和存储资源的边缘计算平台——ParaDrop^[5],将WiFi接入点(AP)和无线网关作为网络边缘,实现敏感数据本地化处理从而保护了用户隐私、WiFi接入网络延迟低、互联网上传数据量低等优点。Nastic等提出了一个支持IoT云端多级配置的中间件,为物联网云系统的多级配置提供了全面的支持^[6]。Echeverria等提出了一种基于安全密钥生成和交换的边缘节点身份验证方法^[7],用于在断开连接的环境中如战术环境下建立可信身份。

2017年10月,第二届会议SEC2017收录了20篇论文,主要研究了边缘计算在车辆上的应用、边缘计算的管理和应用、迁移、表现和评估、视频分析、框架等议题。在车辆领域中,会议重点关注如何借助边缘计算来解决人员流动分析、驾驶员区分和交通流量问题。Qi等提出了Trellis——一种基于WiFi的低成本的汽车监控和跟踪系统^[8],基于运行在车辆上的边缘的计算平台,该系统提供有关车内外人员的各种分析和运输系统中乘客的活动趋势。在迁移领域中,会议主要

研究了如何高效透明地进行边缘服务器或虚拟机的迁移。Ma等提出了一种基于Docker容器的边缘服务器迁移方法^[9],通过容器迁移来实现服务迁移,利用分层存储系统来减小文件系统的同步开销。

2018年10月,第三届会议SEC2018收录了23篇论文,呈现逐年递增的趋势。本次会议包含六大议题:支持边缘应用、隐私安全、边缘视频、边缘计算和物联网、基础设施和云边交互。这六大议题表达了边缘计算的发展现状和未来趋势,如第一个议题研究了边缘计算在时下流行的VR^[10]和车辆驾驶中的应用^[11],在VR应用中可以明显降低边缘云的计算负担,在车辆驾驶应用中可以在车辆行驶过程中近乎实时检测出危险事件;第二个议题关注了边缘计算带来的潜在的隐私和安全问题,通过引入适用于家庭环境的隐私感知智能中心HomePad进行管控^[12]、引入vigilia实现Java语法赋予权限管控^[13]、引入差分隐私机制对神经网络训练进行管控^[14]等措施来提升边缘计算的安全性。ICDCS、INFOCOM、ICFEC等其他国际会议同样开始聚焦边缘计算,增加边缘计算的分会或专题研讨会。其中通信领域顶级会议INFOCOM(International Conference on Computer Communications)收录边缘计算方向的论文逐年增加,从2016年的8篇到2018年的29篇。

在工业界,随着物联网、大数据、人工智能、5G通信等技术的快速发展,边缘计算也逐渐兴起。在国外,2015年9月,欧洲电信标准化协会ETSI发表了关于移动边缘计算的白皮书;同年11月思科、ARM、戴尔、英特尔、微软和普林斯顿大学联合成立Openfog联盟;2017年3月ETSI将移动边缘计算行业规范工作组正式更名为多接入边缘计算。国际标准组织物联网标准分技术委员会ISO/IEC JTC1 SC41成立了边缘计算研究小组。2018年1月,首本边缘计算专业书籍《边缘计算》正式出版,其从边缘计算的需求与意义、边缘计算基础、边缘计算典型应用、边缘计算系统平台、边缘计算的挑战、边缘计算系统实例以及边缘计算安全与隐私保护等多个方面对边缘计算进行了阐述。2018年2月,OpenStack基金会正式发布了《边缘计算-跨越传统数据中心》白皮书,阐述了边缘计算所面临的机遇和挑战。在国内,边缘计算同样发展迅速。2016年11月,华为技术有限公司、中国科学院沈阳自动化研究所、中国信息通信研究院、英特尔、ARM等在北京成立了边缘计算产业联盟(Edge Computing Consortium,ECC),旨在搭建边缘计算产业合作平台,推动运营技术和信息与通讯技术开放协作;2018年9月,在上海召开的世界人工智能大会上,举办了以“边缘计算,智能未来”为主题的边缘智能主题论坛。2019年2月,世界移动通信大会MWC2019上边缘计算成为了热门话题,中国移动联合中国电信、中国联通及产业链合作伙伴发布了OTII边缘定制服务器,推动建设移动边缘计算MEC。

3 边缘计算的架构

3.1 EdgeX Foundry

2017年4月,Linux基金组织启动了开源项目EdgeX Foundry^[15],旨在创建物联网边缘计算标准化的通用框架。EdgeX Foundry的设计有如下原则:架构设计与平台无关,可以运行在不同的硬件操作系统上;架构设计非常灵活,支持替换、升级或扩充平台的任何组件;架构设计提供存储和转发功

能,以解决延迟执行和远程执行的延迟和存储问题;边缘设备部署安全且易于管理。

Edgex Foundry 是一组微服务集合,具体可划分为 4 个服务层和 2 个基础系统服务,EdgeX Foundry 的架构设计如图 1 所示。其中服务层包括核心服务层、支持服务层、导出服务层和设备服务层,基础系统服务包括安全和系统管理。在

官方文档中架构图被划分为南侧和北侧。南侧指物理领域内的所有物联网对象,以及与这些设备、传感器等直接通信的网络边缘;北侧指对数据收集、存储、聚合、分析和通信的云层。EdgeX Foundry 是一个中立于供应商的开源项目,由一系列的耦合、开源的微服务模块组成,用于构建即插即用、模块化的物联网边缘计算生态系统,推进市场统一和物联网部署。

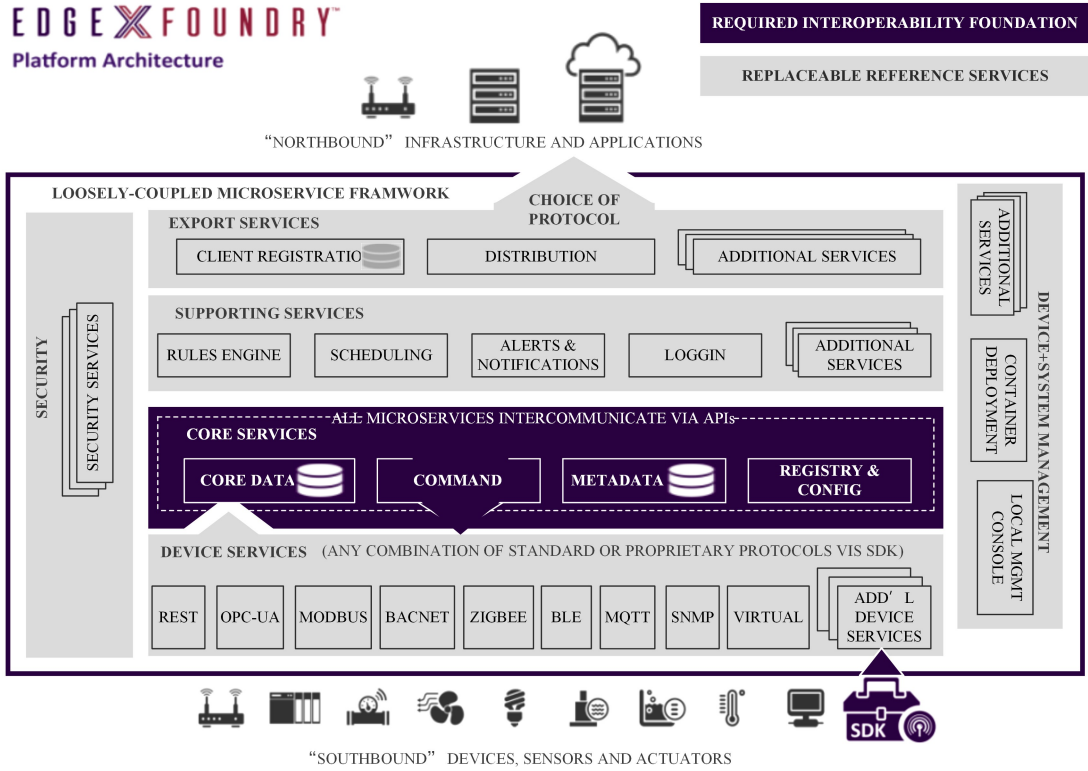


图 1 EdgeX Foundry 架构

Fig. 1 Architecture of EdgeX Foundry

3.2 边缘计算参考架构 3.0

2018 年 11 月,边缘计算产业联盟 ECC 与工业互联网产业联盟 AII 联合发布了《边缘计算参考架构 3.0》^[16]。文中指出了制造、电力、交通、医疗等行业的智能化时代已经到来,当前行业智能发展遇到的挑战主要有:操作技术和信息交流技术的协同问题;数据的集成问题;知识模型化问题;数据端到端的流动问题。面对行业智能化的挑战,边缘计算产业联盟认为边缘计算需攻克四大关键技术:通过数字孪生,在数字世界建立物理资产的实时映像,建立物理世界和数字世界的联接与互动;通过集成人、物、本地系统、云等协作,构建以模型驱动的智能分布式架构平台;提供开发、部署、运营的端到端服务框架;实现云计算和边缘计算的能力协同。

边缘计算产业联盟提出了边缘计算参考框架,如图 2 所示。边缘计算三层架构模式包括云计算层、边缘层和现场层。其中,云计算层提供智能化生产、个性化定制等应用程序支持,它接收来自边缘层的数据进行分析处理,并且对边缘层和现场设备进行调度优化;边缘层是整个参考框架的核心部分,由边缘管理器、边缘节点、边缘网关、边缘控制器、边缘云、边缘传感器等部分组成,向上支持与云计算层的数据传输,向下支持与现场设备的接入。现场设备层包括传感器等具体设备,通过现场总线或以太网与边缘层进行连接,进行数据流和控制流的交互。文中从商业角度、应用的业务流程角度、服务

和功能角度、部署实现角度对参考架构进行了详细全面的描述和介绍。

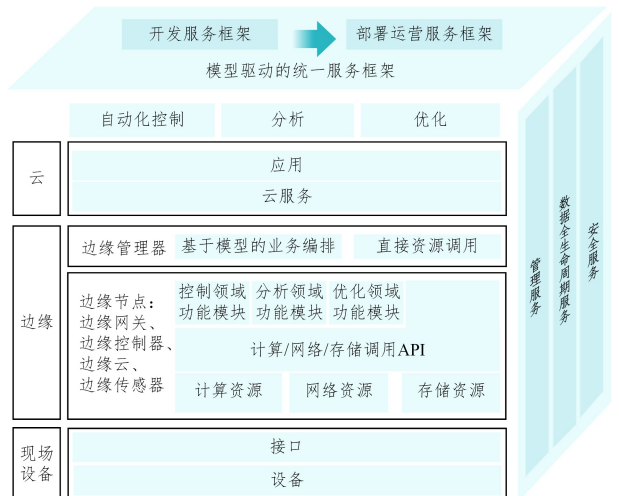


图 2 边缘计算参考框架

Fig. 2 Reference architecture of edge computing

3.3 OpenEdge

2018 年 12 月,ABC Inspire 企业智能大会上,百度正式发布国内首个开源边缘计算平台 OpenEdge^[17],该平台提供设备接入、消息路由、消息远程同步、函数计算,设备信息上

报、配置下发等功能。OpenEdge 和智能边缘 BIE 云端管理套件配合使用,以满足各种边缘计算的应用场景。

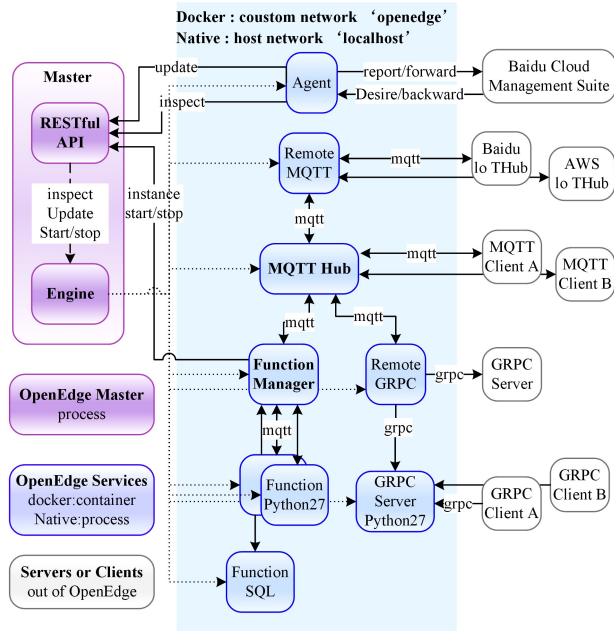


图3 OpenEdge 架构

Fig. 3 Architecture of OpenEdge

OpenEdge 主要由主程序模块、Hub 模块、远程 MQTT 模块、函数管理模块组成。其中,主程序是 OpenEdge 系统的核心,负责管理所有其他模块,由 Restful API 和引擎系统构成,Restful API 提供获取空闲端口、获取系统信息和状态、更新系统和服务、实例的启动或停止、引擎系统负责实例启停和守护等接口,来实现服务的不同运行模式,支持 Docker 容器模式和 Native 进程模式。Hub 模块提供基于 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport)的消息路由服务,服务边缘设备内部的数据交互。远程 MQTT 模块提供 Hub 和远程 MQTT 服务进行消息同步的服务,负责边缘设备和云端的数据交互。函数管理模块提供了函数计算服务,负责用户自定义的边缘计算任务的执行和管理。

4 边缘计算的典型应用

4.1 车联网

2018 年 12 月,工信部提出《车联网(智能网联汽车)产业发展行动计划》,标志着车联网技术的发展与应用得到了国家的大力支持。随着 5G 技术和物联网技术的不断发展,汽车和交通技术迎来了新的变革,通过人与车辆、车辆与车辆、车辆与交通设施之间的智能交互,来提高交通出行效率,促进智慧交通体系的建设。目前边缘计算在车联网领域的主要研究方向可分为:计算卸载、资源调度、内容分发、车载应用。

Wu 等^[18]提出一种基于支持向量机 SVM 的移动边缘计算的计算卸载算法,该算法根据边缘服务器的可用资源,将复杂任务划分为多个子任务并分配权重,边缘服务器会通过 SVM 算法来决定是否本地执行或卸载执行,从而满足快速卸载需求。Sasaki 等^[19]针对边缘服务器计算能力有限的问题,提出了一个边缘服务器和云服务器的资源调度方案。该方案通过共享边缘服务器和云服务器之间的内部状态,在动态分配计算资源的同时根据网络状况进行切换从而保证驾驶安全。Quan 等^[20]针对自动驾驶服务中边缘辅助内容分发的问题,提出了一个两级边缘计算架构,通过无线边缘的内容缓存和车辆

网络的内容共享显著降低了资源利用率,提高了服务质量。

4.2 工业生产

物联网和人工智能的发展促进了生产力和生产方式的变革,现代工厂不断趋向智能化和信息化。工业互联网的核心思想是通过结合互联网和机械设备,分析工业生产中产生的大量数据,从而提高生产效率。目前有研究正在探索边缘计算应用到工业领域的可能性。

Hu 等^[21]提出了智能机器人工厂的概念,阐述了智能机器人工厂的结构,并基于边缘计算提出了操作和维护、数据融合、通信和交互等重要功能的解决方案,通过实验证明了智能机器人工厂有更高的效率。Chen 等^[22]基于边缘计算的灵活性、实时处理和自主性优势,提出了基于物联网制造场景下的边缘计算架构,架构包括设备域、网络域、数据域和应用域。作者从边缘设备、信息融合、协同机制和云计算 4 个方面分析了边缘计算在基于物联网的制造中的作用,研究发现该边缘计算架构有助于提高工业制造的服务质量。

4.3 智慧城市

智慧城市的核心是指以物联网、云计算等为技术核心来改变人们的生活方式和社会运作方式^[23],以满足公共安全、交通运输、环境保护、医疗保健等各种需求。边缘计算将计算和存储下沉到边缘服务器上,以获得更低的网络延迟和更小的带宽压力,在实现智慧城市的过程中有着独特的优势和广泛的应用范围。

视频监控是保障城市安全的重要手段,目前的监控系统存在数据量大、带宽不足、易受攻击、隐私安全等问题。Wang 等^[24]提出了一种基于许可区块链和边缘计算的视频监控系统,该系统由物理层、数据服务层和应用层 3 部分组成。文中利用边缘计算来实现大规模无线传感器信息采集和数据处理,以实现视频数据存储和实时监控。

智慧医疗是智能城市的重要组成部分,目前基于边缘计算的研究内容包括健康监测、医疗数据分析等。智能医疗保健系统通过可穿戴传感器来获取用户健康指标并监测以跟踪用户监控情况。Akmandor 等^[25]描述了不同类型的智能医疗保健系统,从边缘计算的角度提出了设计挑战(精度、延迟、资源消耗、安全、可维护性等),并给出了一些解决方案。

5 边缘计算的军事应用

5.1 应用背景

随着各国军事技术不断的科技化和信息化,未来战争将具有海陆空天一体化、多兵种联合作战、作战力量无人化、突发性等特点。近年来,海军舰队联合作战体系的建设已成为各个国家海军的发展趋势。未来的指挥信息系统需要构建海、陆、空、天一体的多维度作战体系,实现战场态势的实时感知和预测,对多兵种多编队的无人有人作战资源进行辅助指挥和决策。

多舰艇、多武器的对空对海联合作战模式要求作战系统具备快速的信息交互能力和强大的计算能力^[26],低时延地完成各作战单元的海量数据集成、处理和分析。边缘计算具备安全性高、服务延迟低等特点,为未来的军事信息系统架构提供了新的解决方案。

5.2 应用特点

相比民用领域,边缘计算在军事领域的应用面对着更加复杂的网络环境和安全威胁,对指挥系统的敏捷性、灵活性和健壮性提出了更高的要求。民用和军用的特点对比如表 1 所列。

表1 边缘计算的民用和军用特点对比

Table 1 Features comparison of edge computing for civil and military use

特点	民用	军民
目标	提高生产力和生活水平	提升战斗力
机密性	一般	高
实时性	高	高
抗毁性	一般	高
应用网络	互联网	军用网
应用硬件	无要求	国产自主知识产权

5.3 架构设想

边缘计算通过广泛分布的边缘节点和计算下沉,能够提供强大的计算能力和较低的服务延迟,在战场环境下夺取时间优势和信息优势。基于海战场的应用特点,本文提出了一种基于边缘计算的“云-边-端”一体化的海上军事信息系统参考架构,如图4所示。



图4 基于边缘计算的海上军事信息系统参考架构

Fig. 4 Reference architecture of marine military information system based on edge computing

(1)资源管理:计算和存储资源的注册、管理和分配。负责边缘层中各个边缘节点中的计算和存储资源的整合,为边缘计算应用即作战任务提供资源存储和计算。

(2)网络管理:在通信带宽窄、信号不稳定等较差的网络环境下,保证位于岸基、海上、空中、水下的各边缘节点设施和终端装备以及云指挥中心的数据通信,在保证核心服务的前提下提高服务质量。提供统一的接口和通信协议,解决终端装备种类多、不同硬件和通信协议之间的兼容问题。

(3)安全管理:军事应用的安全性涉及边缘计算架构中数据及应用服务的机密性、可靠性和稳定性。主要负责整个指挥信息系统中所有节点间信息传输安全,保护信息隐私和安全;实现所有节点的监控和审计,实现新建节点的快速入网和安全验证以及故障节点的及时感知和信息收集。

(4)应用管理:为来自云端指挥中心的作战任务提供服务。在任务到来时,通过对任务的分解分析,来构建应对方案,动态调度相关计算和存储资源。

5.4 应用前景

边缘计算在军事领域中应用前景广阔,主要包括作战指挥、协同作战、军事训练、预警侦查等。

基于军事人员装备的头盔等智能设备获取军事人员的生理特征(如心率、步态、手势等)、定位信息和战场态势等,利用边缘节点和云节点进行处理和分析,将有助于复杂战场环境下的战场指挥和协同作战。基于战场环境,Singh等^[27]提出了基于语义边缘的分层物联网体系结构,实现了对军事人员的健康状态和武器状况的监测。传感器将获取到的原始数据发送到语义边缘上,供指挥员和控制中心进行分析,辅助做出相应的决策。

随着人工智能的不断发展,无人机无人船的出现为预警侦查提供了新的思路。搭载摄像头、雷达等传感器设备的无人机在执行任务的过程中会产生大量的数据,传统的云计算架构存在的延迟弊端将不再满足现代战场的需求,边缘计算在云和终端设备之间加入边缘计算节点,将提供更低的交互延迟,有助于更快的发现敌情并采取应对措施。

结束语 本文介绍了边缘计算的发展历史,综述了目前边缘计算的研究进展和相关成果,分析了当前流行的边缘计算架构:EdgeX Foundry、边缘计算参考架构 3.0 和 OpenEdge。边缘计算在网络边缘处理和存储数据方面的特性,满足了众多应用对时延、数据量、隐私安全等的需求。作为新的计算范式,边缘计算受到了学术界、工业界和政府界的广泛关注,不断促进着新应用场景的出现和相关应用落地。本文介绍了边缘计算典型的应用场景:车联网、工业生产、智慧城市,并总结了相关的研究方向。接着,本文总结了边缘计算在军事领域的应用特点,基于海战场的应用背景,提出了一种海上军事信息系统的参考架构。

目前,基于军事应用场景下的边缘计算研究和应用还面临着众多挑战,包括窄带宽适配、安全认证、节点抗毁、资源协同等问题,这是未来的主要研究方向。

参考文献

- [1] MICHAEL A, ARMANDO F. Above the clouds: A Berkeley view of cloud computing[EB/OL]. <http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-28.pdf>.
- [2] SATYANARAYANAN M, BAHL P, DAVIES N. The Case for VM-Based Cloudlets in Mobile Computing[J]. IEEE Pervasive Computing, 2009, 8(4): 14-23.
- [3] BONOMI F. Connected vehicles, the internet of things, and fog computing[C]// The Eighth ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking (VANET), Las Vegas, USA, 2011: 13-15.
- [4] SHI W, FELLOW, IEEE, et al. Edge Computing: Vision and Challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637-646.
- [5] LIU P, WILLIS D, BANERJEE S. ParaDrop: Enabling Lightweight Multi-tenancy at the Network's Extreme Edge[C]// 2016 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC), ACM, 2016.
- [6] NASTIC S, TRUONG H L, DUSTDAR S. A Middleware Infrastructure for Utility-Based Provisioning of IoT Cloud Systems[C]// Edge Computing. IEEE, 2016.
- [7] ECHEVERRIA S, KLINEDINST D, WILLIAMS K, et al. Establishing Trusted Identities in Disconnected Edge Environments[C]// 2016 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC), ACM, 2016.
- [8] QIB Z, KANGL, BANERJEE S. A vehicle-based edge computing platform for transit and human mobility analytics[C]// Proceedings of the Second ACM/IEEE Symposium on Edge Computing (SEC'17), New York: Association for Computing Machinery, 2017: 1-14.
- [9] MA L, YI S, LI Q. Efficient service handoff across edge servers via docker container migration[C]// Proceedings of the Second ACM/IEEE Symposium on Edge Computing (SEC'17), California: Acm/IEEE Symposium ACM, 2017: 1-13.

- tive clustering hierarchy with deterministic cluster-head Selection[C]//Proceedings of the 4th IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, San Francisco, USA, 2008.
- [6] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. IEEE Transactions on Networking, 2018, 11(1):2-16.
- [7] HEINZELMAN W, KULIK J, BALAKRISHNAN H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 5th ACM International Conference on Mobile Computing and Networks, Seattle, USA, 2009.
- [8] YIN L, YANG R, GABBOUJM, et al. Weighted median filters: a tutorial [J]. IEEE Transactions on Circuits System, 2006, 43(3):157-192.
- [9] SHEN O, ZHANG S Y, ZHONG Y P. Clustering routing protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2006, 17(7):1588-1600.
- [10] YU H B, ZENG P, WANG Z F, et al. Research on communication protocol of distributed wireless sensor network [J]. Journal of Communication, 2004, 25(10):102-110.
- [11] FAN X P, YANG X, LIU S Q, et al. Clustering routing algorithm for wireless sensor networks with energy supply [J]. Computer Engineering, 2008, 34(11):120-122.
- [12] YANG X, LIU S Q, FAN X P, et al. Research on multi-path routing of hybrid wireless sensor network based on real-time monitoring [J]. Computer Application Research, 2008, 25(4):1237-1239.
- [13] PENG L. Wireless sensor network technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [14] RAMANATHAN R, ROSALES H R. Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM, 2015:404-413.
- [15] JAROMCZYK J W, TOUSSAINT G T. Relative Neighborhood Graphs and their Relatives [J]. Proceeding of the IEEE, 2017, 80(9):1502-1517.



FENG Jun, born in 1983, master's degree, associate professor. His main research interests include wireless sensor network technology and artificial intelligence.

(上接第 272 页)

- [10] LI Y, GAO W. MUVr: Supporting Multi-User Mobile Virtual Reality with Resource Constrained Edge Cloud [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018:1-16.
- [11] LIU L, ZHANG X, QIAO M, et al. SafeShareRide: Edge-Based Attack Detection in Ridesharing Services [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018:17-29.
- [12] ZAVALYSHYN I, DUARTE N O, SANTOS N. HomePad: A Privacy-Aware Smart Hub for Home Environments [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018:58-73.
- [13] TRIMANANDA R, YOUNIS A, WANG B, et al. Vigilias: Securing Smart Home Edge Computing [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018:74-89.
- [14] MAO Y, YI S, LI Q, et al. Learning from Differentially Private Neural Activations with Edge Computing [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018:90-102.
- [15] EdgeX Foundry. EdgeX Foundry documentatin [OL]. <https://www.edgexfoundry.org>.
- [16] 边缘计算产业联盟(ECC)与工业互联网产业联盟(AII). 边缘计算参考架构 [OL]. <http://www.econsortium.org/Lists/show/id/334.html>.
- [17] OpenEdge. OpenEdge 架构 [OL]. <https://openedge.tech/zh/docs/overview/OpenEdge-design>.
- [18] WU S Y, XIA W W, CUI W Q, et al. An Efficient Offloading Algorithm Based on Support Vector Machine for Mobile Edge Computing in Vehicular Networks [C] // 10. 1109/WCSP. 2018:1-6.
- [19] SASAKI K, SUZUKI N, MAKIDO S, et al. V-ehicle control system coordinated between cloud and mobile edge computing [C] // 2016 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). IEEE, 2016.
- [20] QUAN Y, ZHOU H, LI J, et al. Toward Efficient Content Delivery for Automated Driving Services: An Edge Computing Solution [J]. IEEE Network, 2018, 32(1):80-86.
- [21] HU L, MIAO Y M, WU G X, et al. iRobot-Factory: An intelligent robot factory based on cognitive manufacturing and edge computing [J]. Future Generation Computer Systems, 2018: S0167739X1831183X-.
- [22] CHEN B T, WAN J F, CELESTI A, et al. Edge Computing in IoT-Based Manufacturing [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9):103-109.
- [23] WU X B, YANG Z G. The Concept of Smart City and Future City Development [J]. Urban Studies, 2010, 17(11):56-60.
- [24] WANG R, TSAI W, HE J, et al. A Video Surveillance System Based on Permissioned Blockchains and Edge Computing [C] // 2019 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp). Kyoto, Japan, 2019:1-6.
- [25] AKMANDOR A O, JHA N K. Smart Health Care: An Edge-Side Computing Perspective [J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2017, 7(1):29-37.
- [26] GUHA R. Toward the Intelligent Web Systems [C] // International Conference on Computational Intelligence, 2009.
- [27] SINGH D, TRIPATHI G, ALBERTI A M, et al. Semantic edge computing and IoT architecture for military health services in battlefield [C] // 2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas, NV, 2017:185-190.



ZHAO Ming, born in 1996, master's degree. His main research interest includes edge computing.