

边缘计算综述

Guo Mingming, undergraduate, BUAA

摘要— 随着物联网的普及不断加深,鸿蒙布局万物互联,小米智能家居也不断完善,智能终端设备的数量不断增加,使得数据的增长速度远远超过了网络带宽的增速;同时,增强现实、无人驾驶等众多新应用的出现对网络延迟提出了更高的要求,传统云计算模型已经无法有效应对,因此,边缘计算应运而生。边缘计算的基本理念是将网络边缘上的计算、网络与存储资源组成统一的平台为用户提供服务,使数据在源头附近就能得到及时有效的处理,减小了计算系统的延迟,减少数据传输带宽,缓解云计算中心压力,提高可用性,并一定程度保护数据安全和隐私。本文主要介绍了边缘计算的概念,并讲述了边缘计算的发展历程,接着对流行的边缘计算架构进行了介绍,并给出了边缘计算的典型应用,例如低功耗机器学习 TinyML。最后阐述了边缘计算面临的挑战和未来研究方向。

关键词— 物联网; 云计算; 边缘计算; 雾计算; 边缘智能

1 引言

随着互联网和计算机技术的发展,大数据、云计算、智能技术等也不断涌现,信息和数据呈现出爆炸式增长的态势,对计算模式提出了新的要求^[1]。而随着物联网(IoT)的普及,物联网设备产生的数据在地理上分散并且分布广,并对响应时间和安全性提出了更高的要求,并且这些信息将可能在未来超过云数据中心的数据规模。根据思科的预测^[2],2021年40ZB的全球互联网数据中有45%将由物联网等边缘设备产生。在这种情形下,以云计算模型为核心的集中式处理模式将无法高效地处理边缘设备产生的数据,因为它集中地将所有数据通过网络传输到云计算中心,利用云计算中心的高计算能力来集中式解决计算和存储问题^[3],云计算虽然为大数据处理提供了高效的计算平台,但是网络带宽的速度仍远远赶不上数据的增长速度,并且在复杂的网络环境下,网络延迟很难有突破性提升,传统的云计算模式无法解决在处理大量边缘设备时面临的带宽和延迟这两大问题^[4]。

为了解决上述问题,面向边缘设备所产生海量数据计算的边缘计算模型就应运而生。边缘计算是在网络边缘执行计算的一种新型计算模型,操作对象包括来自云服务的下行数据和来自于万物互联服务的上行数据,其中边缘指的是网络边缘上的计算和存储资源,这里的网络边缘和云数据中心相对,无论是从地理位置还是网络距离上来看都贴近用户,边缘计算就

是在利用这些资源在网络边缘为用户提供服务,在数据源就近处理数据。边缘计算和云计算并不是取代的关系,而是相辅相成的,边缘计算仍需要云计算中心强大的计算能力和海量存储的支持,而云计算中心也需要边缘计算对海量数据和隐私数据的预先处理。

相对于云计算,边缘计算可以更好地支持移动计算和物联网应用,具有以下优点:

1) 缓解网络带宽压力和云服务器能耗。思科在2016-2021年全球云指数^[2]中指出,随着物联网的发展,2021年全球的设备将会产生600ZB的数据,但其中只有10%是关键数据,其余90%都是临时数据无需长期存储。而边缘计算可以利用这个特点,在网络边缘处理大量的临时数据,不必全部传送云端处理,仅传送关键性数据,极大地减轻了网络带宽和数据中心的压力,也降低了云服务器能耗。

2) 提高服务响应能力。万物互联场景下应用对于实时性要求极高,传统云计算模型下,应用将数据传送到云计算中心处理后,再请求处理结果,增大了系统延迟,对于一些对延迟极为敏感的场景,比如无人驾驶,高速行驶的汽车有着毫秒级的延迟需求,一旦网络出现问题而增大了系统延迟,将会造成无法挽回的危险。受限于目前通信技术的发展,在复杂的网络环境中存在网络抖动和路由不稳定的问题,也会导致延迟过高的情况。而边缘计算在用户附近提供服

务，近距离服务保证了网络低延迟，减少网络抖动，提高服务响应能力。

3) 一定程度保护隐私数据。物联网应用中数据的安全性一直是关键问题，据调查^[5]显示，约有78%的用户担心他们的物联网数据在未授权的情况下被第三方使用。因为云计算模式下所有的数据与应用都在数据中心，用户很难对隐私数据进行访问权限控制，而边缘计算使得隐私数据可以保留在本地处理，而不必上传云端，减少了网络数据泄露的风险，保护了用户数据安全和隐私。

由于边缘计算具有独特优势，满足了未来万物互联的需求，在近几年得到了迅速的发展，一些国际组织ACM和IEEE也联合举办了边缘计算的顶级会议SEC，是近几年互联网新技术的一个典型。本文总结了边缘计算的相关概念，并讲述了边缘计算的发展历程，接着对流行的边缘计算的架构进行了介绍，并给出了边缘计算的典型应用，最后阐述了边缘计算面临的挑战和未来研究方向。



图 1. 云计算范式

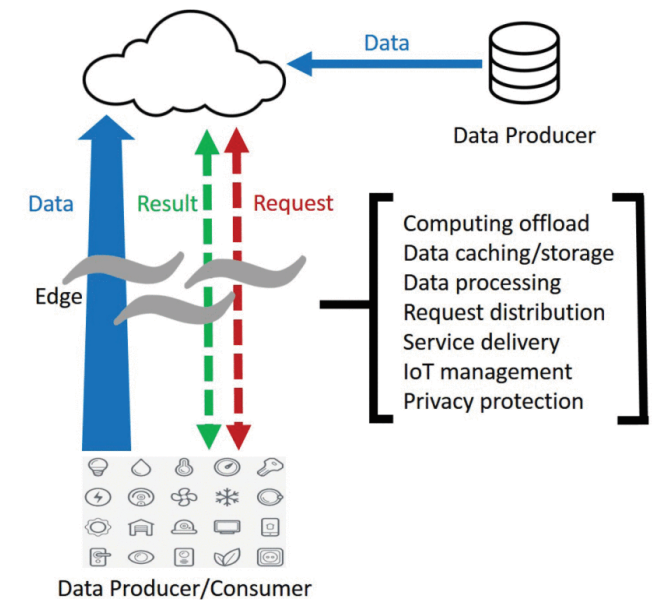


图 2. 边缘计算范式

2 边缘计算概览

查阅相关资料，并没有比较权威的定义，只能明确它是一个分布式计算的新范式，但不同研究者都从各自的视角来描述和理解了边缘计算的概念。美国的卡内基梅隆大学的 Mahadev Satyanarayanan 教授^[6]把边缘计算描述为：“边缘计算是一种新的计算模式，这种模式将计算与存储资源（如 Cloudlet、微型数据中心或雾节点）部署在更贴近移动设备或传感器的网络边缘。”美国韦恩州立大学的施巍松等人^[3]把边缘计算定义为：“边缘计算是云之外的在网络边缘侧的所有计算，更具体的是在用户端设备上运行的工作负载，可以根据面向用户的类型，可以分为用户端边缘计算、企业端边缘计算和设备端边缘计算。”

这些定义都强调边缘计算的核心理念是，将计算下放到更靠近数据的源头，更加地贴近用户。贴近既可以表示网络距离的“近”，这样由于网络规模的缩小，带宽、延迟、抖动这些不稳定的因素都易于控制与改进；也可以表示空间距离的“近”，这意味着边缘计算资源与用户同处一个情景之中，根据这些情景信息可以为用户提供个性化服务。网络距离和空间距离不具有较大的关联性，在实际中需选择合适的节点来提供服务。

网络边缘的资源主要包括移动手机、个人电脑、智能手表等终端，智能家居等物联网设备，WiFi 接入点、蜂窝网络基站与路由器等设施，摄像头、机顶盒等嵌入式设备，Cloudlet、Micro Data Center 等小型计算中心等。这些资源数量众多，并且相互相对独立，分散在用户周围，组成边缘节点。边缘计算的目的是将这些独立分散的资源统一起来，为用户提供服务。

图 2 展示了边缘计算的双向计算流，在边缘计算的范式中，终端事物不仅充当数据产生者，还充当数据消费者。在边缘，终端不仅可以从云端请求服务和内容，还可以从云端执行计算任务。同时，边缘端可以执行计算卸载、数据存储、缓存和处理，以及从云端向用户分发请求和交互服务。对于网络中的这些工作，边缘本身需设计有效，来满足现实的可靠性、安全性和隐私保护需求。

总的说来，我们可以把边缘计算定义为“一种新的计算模式，位于独立于云计算之外的网络边缘侧，

将地理距离或网络距离上相近的临近用户的资源统一起来,为应用提供计算、存储和网络服务。”^[7]

3 边缘计算发展

3.1 内容分发网络

边缘计算的概念最早追溯到 20 世纪 90 年代,阿卡迈 (Akamai) 公司为解决网络带宽小、用户访问量且不均匀的情况,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,降低网络拥塞,尤其在视频音频等流媒体服务商有效保证了服务质量。CDN 边缘服务器面向的是内容分发,强调数据的备份和缓存,而边缘计算面向的是数据处理,强调功能缓存。

3.2 云计算

2007 年,IBM 和 Google 宣布在云计算领域开展合作,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^[8]白皮书对云计算的定义是: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。图 1 展示了传统的云计算结构,数据产生者生成原始数据并传输到云端,数据消费者向云端发送获取数据请求,云端向其返回结果。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,但是也具有局限性,例如网络延迟波动大、带宽有限、传输成本高、数据安全问题。

3.3 Cloudlet

2009 年,Satyanarayanan 等提出了基于 Cloudlet 的体系架构^[9],Cloudlet 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 Cloudlet 的近距离交互降低网络时延并提高服务质

量。Cloudlet 可以像云一样为用户提供服务,又成为“小朵云”。此时边缘计算强调下行,即将云服务上的功能下行至边缘服务器,以减少带宽和时延。

3.4 雾计算

2011 年思科首次提出了雾计算概念,它通过在移动设备和云之间引入了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,雾计算的名字正来源于此——雾比云更贴近地面。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。此时雾计算与后来边缘计算不同的是,雾计算更强调在数据中心和数据源之间构成连续统一体,来为用户提供计算、存储和网络服务,使网络也成为数据处理的“流水线”,而不仅仅是数据管道,也就是说边缘和核心网络的组件都是雾计算的基础设施。此时雾计算已经具有了万物互联时代对计算模式的基本要求,实时的服务相应、稳定的服务质量已经成为用户的关注点。

3.5 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^[10]: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。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。

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 和车辆驾驶中的应用,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、引入 vigilia 实现 Java 语法赋予权限管控、引入差分隐私机制对神经网络训练进行管控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。

在政策层面，2016 年 5 月，美国自然科学基金委员会，在计算机系统研究领域将边缘计算替换云计算，列为突出领域；8 月，委员会和英特尔专门讨论针对无线边缘网络上的信息中心网络 (NSF/Intel partnership on ICN in Wireless Edge Networks)；10 月委员会举办边缘计算重大挑战研讨会 (NSF WorkShop on Grand Challenges in Edge Computing)^[11]，会议针对 3 个议题展开研究：边缘计算未来 5 10 年的发展目标，达成目标所带来的挑战，学术界、工业界和政府应该如何协同合作来应对挑战，这标志着边缘计算的发展已经在政策层面引起了重视。

在工业界，2015 年，欧洲电信标准化协会发表关于移动边缘计算的白皮书^[12]，并在 2017 年 3 月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 (multi-access edge computing, MEC)，致力于更好地满足边缘计算的应用需求和相关标准制定。2015 年 11 月，思科、ARM、戴尔、英特尔、微软和普林斯顿大学联合成立了 OpenFog 联盟，主要致力于 Fog Reference Architecture 的编写，为了推进和应用场景在边缘的结合，该组织与 2018 年并入了工业互联网联盟。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。

我们相信，经过前期的技术储备和最近几年的快速增长，边缘计算将成为学术界和产业界的热门话题，实现学术界和工业界的融合，加快产品落地，便利大众生活，步入稳健发展时期。

4 边缘计算架构

在本节中，我们展示了如图 3 所示的边缘计算的一般架构，它主要由三层组成：边缘设备层 (Edge Device Layer, EDL)、边缘服务器层 (Edge Server Layer, ESL) 和云服务器层 (Cloud Server Layer, CSL)。从计算能力来看，CSL 上构建的系统计算能力最强，其次是 ESL 上的系统。EDL 的设备通常计算能力最差。

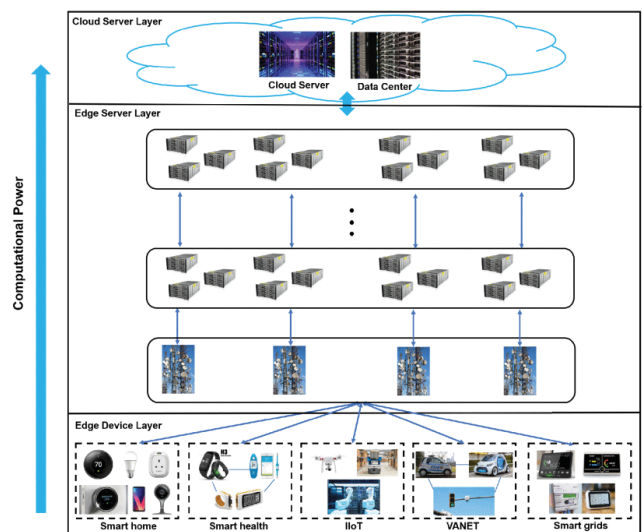


图 3. 边缘计算通用架构

4.1 设备边缘层

边缘设备是部署在设备边缘层 EDL 的那些低级电子设备,它们在物理世界中运行以完成传感、驱动和控制等任务。每个边缘设备都由一个或多个微控制器 (MCU) 进行逻辑控制,每个微控制器都是在单个集成电路上运行的小型计算机^[13]。在 MCU 中编程的低级软件接口为设备的硬件提供控制称为固件。所有功能,包括传感、控制和计算,都在固件中编码,因此由 MCU 处理。边缘设备可以进一步分为物联网设备和移动设备。物联网设备是轻量级的电子设备,通过 4G/5G、Wi-Fi 和蓝牙等无线协议与 ESL 中的边缘服务器互连或连接。它们通常运行在轻量级的抢占式/协作式实时操作系统 (RTOS) 上,例如 FreeRTOS 和 RT Thread。一旦 RTOS 被烧录到 IoT 设备的芯片中,它通常不会提供进一步的编程接口。物联网设备的一些示例包括工业化物联网 (IIoT) 中的智能家居设备、健康监测设备和智能仓库车。大多数物联网设备制造商采用意法半导体生产的 Cortex-M 系列 MCU 与物联网设备不同,移动设备通常拥有更先进、更昂贵的抢占式操作系统,例如 Android 和 iOS,为开发人员提供可编程接口,以便在操作系统的顶部编写自己的应用程序。移动设备的一些示例包括智能手机、平板电脑和智能车辆的中央控制器。

4.2 边缘服务器层

边缘服务器层 ESL 具有多个子层的层次结构,由各种边缘服务器组成,计算能力从下到上递增,如图 3 所示。位于最低子层的边缘服务器包括无线基站和接入点 (AP),它们主要用于通信目的,从边缘设备接收数据并通过不同的无线接口将控制流发送回它们。基站/AP 接收到来自边缘设备的数据后,将数据转发给位于上层子层的边缘服务器,边缘服务器主要负责处理计算任务。边缘服务器在接收到下层子层基站/AP 或边缘服务器传来的数据后,自行进行相关的计算和分析任务。如果任务的复杂度超过了当前边缘服务器的计算限制,它会将任务卸载到位于更高子层的服务器,这些服务器具有更强大的计算能力。然后,这些服务器以一系列控制流结束,并将它们传回基站/AP,最后将它们转发到边缘设备。边缘服务器处理大多数核心计算功能,例如边缘计算的身份验证、授权、计算、数据分析、任务卸载和数据存储。

4.3 云服务器层

云服务器层 CSL 承载着中心云服务器和数据中心,云服务器负责最高级别的认证和授权、计算以及从边缘服务器卸载的不同任务的集成,数据中心负责存储由边缘服务器产生的海量数据。边缘设备和边缘服务器。最先进的云服务器和云数据中心由功能强大的机器集群组成。

5 边缘计算典型应用

5.1 车联网

随着机器视觉、深度学习和传感器等技术的发展,汽车的功能不再局限于传统的出行和运输工具,而是逐渐变为一个智能的、互联的计算系统,我们称这样新型的汽车为智能网联车 (connected and autonomous vehicles, CAVs)。智能网联车的出现催生出了一系列新的应用场景,例如自动驾驶、车联网以及智能交通。Intel 在 2016 年的报告指出^[14],一辆自动驾驶车辆一天产生的数据为 4TB,这些数据无法全部上传至云端处理,需要在边缘节点 (汽车) 中存储和计算。

车联网将汽车接入开放的网络,车辆可以将自己的状态信息 (如油耗、里程等) 通过网络传到云端进行分析,车辆间也可以自由交换天气、路况、行人等信息,并进行实时的互动。韦恩州立大学在 GENIRacks 上构建了一个边缘计算平台,并在上面部署了实时 3D 校园地图、车量状态检测、车联网仿真 3 个应用。3D 校园地图通过将校园内监控录像与行驶车辆的录像数据融合,通过处理后可以增强为实时 3D 地图,校园安保人员可以无缝地监控校园状态;车量状态检测可以实时记录车辆的引擎转速、里程、油耗等状态,并对数据进行分析,从而检测车辆的性能,发现车辆的故障;车联网仿真将众多的车辆状态信息汇总,利用这些真实的交通信息可以进行车联网应用的仿真实验。这些应用都会产生大量的传感器数据,很多数据都需要进行实时处理,而边缘计算可以在数据源附近对数据进行处理,减少了不必要的网络传输,并提高了应用的响应速度。

5.2 医疗保健

健康领域的科学技术是许多研究人员的重要研究领域。与其他行业一样,边缘计算也可以帮助医疗

保健, 例如, 中风患者跌倒。据统计^[15], 中国大约每 40 秒就会发生一次中风。跌倒在中风患者中很常见, 主要患有低血糖、低血压、肌肉无力等。根据最近的研究, 三分之一的中风可以通过早期减轻跌倒事件来避免。为了检测和预防跌倒, 已经进行了大量的研究, 例如通过引入智能手机、智能手表、谷歌眼镜等人机交互设备, 但仍然存在一定的局限性。

最近, 研究人员提出了一种名为 U-fall 的智能医疗基础设施^[16], 它通过采用边缘计算技术来利用智能手机做检测。U-fall 基于跌倒检测算法, 该算法使用加速度幅度值和非线性时间序列分析设计。U-fall 借助陀螺仪和加速度计等智能设备传感器来感应运动检测。U-fall 智能维护智能手机和云服务器之间的完整性, 以确保实时检测。此外, 提议的基础设施能够提供准确的结果, 使其更加可靠。

此外, 包括角色模型、分层云架构和边缘计算的三层架构可以帮助健康顾问帮助他们的患者, 而不受其地理位置的影响。边缘计算使智能手机能够从智能传感器收集患者的生理信息和运动状况, 例如脉搏、体温等, 并在本地处理数据, 判断患者的健康情况和是否出现跌倒等问题, 也可以定时将其发送到云服务器进行存储、数据同步和共享。在需要时, 医生可以访问云服务器的健康顾问可以立即诊断患者并相应地为他们提供帮助。

5.3 TinyML

TinyML 是机器学习、硬件和软件交叉领域中一个快速发展的多学科领域^{[17] [18]}, 专注于在以极低功率范围(毫瓦范围及以下)运行的嵌入式(微控制器供电)设备上运行深度学习算法。TinyML 解决了设计节能、紧凑的深度神经网络模型、支持软件框架和嵌入式硬件方面的挑战, 这些挑战将在电池供电、资源受限的设备上实现广泛的定制的推理应用程序。TinyML 将为不依赖云处理但在分布式边缘推理和自主推理上蓬勃发展的新型边缘服务和应用程序提供帮助。

TinyML 正顺应了边缘计算的潮流, 它旨在直接在设备边缘端通过机器学习算法处理数据, 而不是上传云处理。不同于普通的机器学习需要将算法运行在云端, TinyML 将机器学习算法压缩, 使其可以在微控制器上运行机器学习算法, 并且降低能耗。它有许

多应用场景, 比如离线语音识别开关, 通过机器学习算法训练出可以识别开关灯指令的算法模型, 然后使用其提供的 TensorFlow-lite 模型转换为微型模型, 然后部署在微控制器上, 这样, 只要设备通电, 算法模型就可以离线的识别语音指令, 而不需要像 Siri 等上传云端才能识别指令。再比如, 它可以进行野生动物监测, 将图像识别模型导入微控制器, 借助其低能耗, 放置在野外, 可以进行离线的动物识别, 当发现动物时, 就可以提供提示, 供拍摄和追踪。

5.4 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, 以满足公共安全交通运输、环境保护、医疗保健等各种需求^[19]。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。

智慧城市利用先进的信息技术实现城市智慧式的管理和运行。2016 年阿里云提出了“城市大脑”的概念, 实质是利用城市的数据资源来更好地管理城市。2017 年 10 月 Alphabet 旗下城市创新部门 Sidewalklabs 建造名为 Quayside 的高科技新区, 并希望该智慧城市项目能够成为全球可持续和互联城市的典范。然而, 智慧城市的建设所依赖的数据具有来源多样化和异构性的特点, 同时涉及城市居民隐私和安全的问题, 因此应用边缘计算模型, 将数据在网络边缘处理是一个很好的解决方案。

边缘计算在智慧城市的建设中有丰富的应用场景。在城市路面检测中, 在道路两侧路灯上安装传感器收集城市路面信息, 检测空气质量、光照强度、噪音水平等环境数据, 当路灯发生故障时能够及时反馈至维护人员。在智能交通中, 边缘服务器上通过运行智能交通控制系统来实时获取和分析数据, 根据实时路况来控制交通信号灯, 以减轻路面车辆拥堵等。在无人驾驶中, 如果将传感器数据上传到云计算中心将会增加实时处理难度, 并且受到网络制约, 因此无人驾驶主要依赖车内计算单元来识别交通信号和障碍物, 并且规划路径。EdgeS 是一种基于边缘计算的面向智慧城市的系统级操作系统, 它分为 3 个部分, 底层的数据感知层、中间的网络互联层和顶层数据应用管理层。该操作系统可以有效管理智慧城市中的多来

源数据,提高了数据共享的范围和深度,以实现智慧城市中数据价值的最大化。

6 面临挑战

6.1 安全和隐私问题

虽然边缘计算将计算推至靠近用户的地方,避免了数据上传到云端,降低了隐私数据泄露的可能性。但是,相较于云计算中心,边缘计算设备通常处于靠近用户侧,或者传输路径上,具有更高的潜在可能被攻击者入侵,因此,边缘计算节点自身的安全性仍然是一个不可忽略的问题。边缘计算节点的分布式和异构型也决定了其难以进行统一的管理,从而导致一系列新的安全问题和隐私泄露等问题。作为信息系统的一种计算模式,边缘计算也存在信息系统普遍存在的共性安全问题,包括:应用安全、网络安全、信息安全和系统安全等。

在边缘计算的环境下,通常仍然可以采用传统安全方案来进行防护,如通过基于密码学的方案来进行信息安全的保护、通过访问控制策略来对越权访问等进行防护。但是需要注意的是,通常需要对传统方案进行一定的修改,以适应边缘计算的环境。同时,近些年也有一些新兴的安全技术(如硬件协助的可信执行环境)可以使用到边缘计算中,以增强边缘计算的安全性。此外,使用机器学习来增强系统的安全防护也是一个较好的方案。

可信执行环境(trusted execution environment, TEE)^[20]是指在设备上一个独立于不可信操作系统而存在的可信的、隔离的、独立的执行环境,为不可信环境中的隐私数据和敏感计算提供了一个安全而机密的空间,而 TEE 的安全性通常通过硬件相关的机制来保障。常见的 TEE 包括 Intel 软件防护扩展、Intel 管理引擎、x86 系统管理模式、AMD 内存加密技术、AMD 平台安全处理器和 ARM Trustzone 技术。通过将应用运行于可信执行环境中,并且将使用到的外部存储进行加解密,边缘计算节点的应用,可以在边缘计算节点被攻破时,仍然可以保证应用及数据的安全性。

6.2 编程模型

编程模型可以使开发者快速上手开发应用产品,从而快速推动领域的发展。在云计算领域,用户程序在目

标平台上编写和编译程序,然后运行到云服务器上,这些基础设施对于用户来说是透明的,极大地方便了用户,使得用户不必配置过多环境,就能管理和编写代码。而边缘计算模型与云计算模型存在较大的差别,从功能角度,边缘计算是一种分布式的计算系统,应具有弹性管理、协同执行和环境异构的特点。

因此,传统的云编程模型并不适合边缘计算,边缘设备中的大多数是异构计算平台,每个设备运行的环境和数据是大不相同,且边缘设备的资源相对受限,在边缘计算场景下部署用户应用程序会有较大困难。

7 未来研究方向

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^[21]。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。

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。

8 总结

本文总的来说介绍了边缘计算的概念, 讲述了边缘计算的发展历程, 简要讲了边缘计算的架构, 对边缘计算的典型应用进行了举例, 并介绍了边缘计算面临的挑战, 最后阐述了边缘计算的未来研究方向。

边缘计算经过近几年的技术储备, 已经得到了来自国内外政府、学术界和工业界的广泛重视和一致认可。边缘计算利用数据传输路径上的资源为用户提供服务, 作为一种新型的计算模式, 边缘计算在很多应用领域都具有巨大的潜力, 并对未来万物互联的趋势有着巨大推动作用, 华为鸿蒙的万物互联和小米的智能家居都是万物互联的未来。

参考文献

- [1] 赵梓铭, 刘芳, 蔡志平, and 肖依, “边缘计算: 平台, 应用与挑战,” 计算机研究与发展, vol. 55, no. 2, p. 327, 2018.
- [2] C. V. Networking, “Cisco global cloud index: Forecast and methodology, 2016–2021,” *White paper. Cisco Public, San Jose*, vol. 1, 2016.
- [3] 施巍松, 张星洲, 王一帆, and 张庆阳, “边缘计算: 现状与展望,” 计算机研究与发展, vol. 56, no. 1, p. 69, 2019.
- [4] M. Armbrust, A. Fox, R. Griffith, A. D. Joseph, R. Katz, A. Konwinski, G. Lee, D. A. Patterson, A. Rabkin, I. Stoica, and M. Zaharia, “Above the clouds: A berkeley view of cloud computing,” Feb 2009.
- [5] G. Fox and T. Lynn, *Examining Privacy Disclosure and Trust in the Consumer Internet of Things: An Integrated Research Framework*. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 123–140.
- [6] M. Satyanarayanan, “Edge computing: Vision and challenges.” Santa Clara, CA: USENIX Association, Jul. 2017.
- [7] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, “Edge computing: Vision and challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, 2016.
- [8] M. Armbrust, A. Fox, R. Griffith, A. D. Joseph, R. H. Katz, A. Konwinski, G. Lee, D. A. Patterson, A. Rabkin, I. Stoica *et al.*, “Above the clouds: A berkeley view of cloud computing,” Technical Report UCB/EECS-2009-28, EECS Department, University of California ..., Tech. Rep., 2009.
- [9] M. Satyanarayanan, P. Bahl, R. Caceres, and N. Davies, “The case for vm-based cloudlets in mobile computing,” *IEEE pervasive Computing*, vol. 8, no. 4, pp. 14–23, 2009.
- [10] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, “Edge computing: Vision and challenges,” *IEEE internet of things journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, 2016.
- [11] W. S. U. Mung Chiang, Princeton Edge Lab Weisong Shi, “Nsf workshop on grand challenges in edge computing,” 2016, <http://iot.eng.wayne.edu/edge/NSF%20Edge%20Workshop%20Report.pdf>.
- [12] Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher, and V. Young, “Mobile edge computing—a key technology towards 5g,” *ETSI white paper*, vol. 11, no. 11, pp. 1–16, 2015.
- [13] M. A. Mazidi, J. G. Mazidi, and R. D. McKinlay, *The 8051 microcontroller and embedded systems: using Assembly and C*. Pearson/Prentice Hall, 2006, vol. 626.
- [14] B. Krzanich, “Data is the new oil in the future of automated driving,” 2016, <https://newsroom.intel.com/editorials/krzanich-the-future-of-automated-driving/>.
- [15] X.-F. Zhang, J. Attia, C. D’Este, X.-H. Yu, and X.-G. Wu, “A risk score predicted coronary heart disease and stroke in a chinese cohort,” *Journal of clinical epidemiology*, vol. 58, no. 9, pp. 951–958, 2005.
- [16] Y. Cao, S. Chen, P. Hou, and D. Brown, “Fast: A fog computing assisted distributed analytics system to monitor fall for stroke mitigation,” in *2015 IEEE international conference on networking, architecture and storage (NAS)*. IEEE, 2015, pp. 2–11.
- [17] B. Li, P. Chen, H. Liu, W. Guo, X. Cao, J. Du, C. Zhao, and J. Zhang, “Random sketch learning for deep neural networks in edge computing,” *Nature Computational Science*, vol. 1, no. 3, pp. 221–228, 2021.
- [18] S. Soro, “Tinyml for ubiquitous edge ai,” *arXiv preprint arXiv:2102.01255*, 2021.
- [19] M. Batty, K. W. Axhausen, F. Giannotti, A. Pozdnoukhov, A. Bazzani, M. Wachowicz, G. Ouzounis, and Y. Portugali, “Smart cities of the future,” *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 214, no. 1, pp. 481–518, 2012.
- [20] M. Sabt, M. Achemlal, and A. Bouabdallah, “Trusted execution environment: what it is, and what it is not,” in *2015 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA*, vol. 1. IEEE, 2015, pp. 57–64.
- [21] 赵明, “边缘计算技术及应用综述,” 计算机科学, vol. 47, no. 6A, pp. 268–272, 2020.