



基于边缘计算的物端系统挑战与愿景

Challenges and Vision of Things System in Edge Computing

彭晓晖/PENG Xiaohui, 徐志伟/XU Zhiwei

(中国科学院计算技术研究所, 北京 100190)

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要: 针对物端计算系统面临的“昆虫纲悖论”和“数据过于集中”2大生态问题,从计算系统的角度,讨论分析了其在系统架构、应用层协议、资源管理、开发与运行时、计算负载调度5个方面面临的挑战。提出了物端控制域计算机设计愿景,即将物端计算系统划分为具有相同或兼容管理策略的控制域,并将每个域看作一台分布式计算机,为其设计物端信息总线架构原型。

关键词: 边缘计算;物端计算;物端控制域计算机;体系架构;应用层协议

Abstract: To address the two ecosystem problems of things system: “Paradox of Classis Insecta” and “Centralized Data”, five challenges of things system in perspective of computing system are discussed in this paper. These challenges include system architecture, application protocol, resource management, application development and runtime environment, and computing payload scheduling. Then, the design vision of the physical-zone-of-control computer is put forward, which divides things system into multiple zones of control with same or compatible management policy. The physical information bus architecture prototype which regards every zone as the distributed computer is finally proposed.

Key words: edge computing; things computing; physical zone of control computer; system architecture; application protocol

DOI: 10.12142/ZTETJ.201903005

网络地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190529.1507.004.html>

网络出版日期: 2019-05-29

收稿日期: 2018-12-22

1 物端系统的背景

1.1 万物互联与物端计算系统

信息技术正在进入人机物三元计算的万物互联新时代,计算设备正在被赋予了各种具体的形态并融入到物理环境中^[1],我们称这样的设备为物端设备,例如温湿度传感器、摄像头等。物端设备正以指数级增长的方式连入互联网,形成物端计算系统,是边缘计算^[2]

的重要组成部分。物端系统不断地从物理世界感知多源异构的数据,传输到信息世界进行计算,信息世界数据处理的结果也通过其反馈到物理世界,物端系统是感知和控制数据的出入口,是未来人机物三元计算空间的咽喉要塞。物端计算系统天生位于网络的边缘,具有天然的近数据源优势。将计算迁移至物端系统可以大幅减少网络带宽消耗,缩短应用响应延迟和保护用户

数据安全和隐私。

物端计算机的显著特征是需要与物理世界进行交互,不断地感知物理世界状态,并通过反馈控制改变物理世界状态。例如,空气净化器可以根据小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的细颗粒物(PM 2.5)传感器数据,调整净化器的净化强度,直至达到设定的目标。这是人机物三元空间中典型的感知-计算-控制循环,也是未来万物互联时代的基本计算模式之一。

其中,控制环节可以是系统根据某种策略或算法自动执行,或由用户根据计算结果选择控制动作。

在现有的物联网架构中,由于物端计算机的软硬件平台还未完全准备好计算负载迁移至离环境和人更近的物端上,该循环的计算环节通常在云端进行,造成应用的响应延迟和不确定性。人机物三元计算环境中,大量的应用对实时性有较为苛刻的要求。我们在利用亚马逊的Alex语音控制打开卧室照明灯的实验中,每次开灯平均耗时3 s以上^[3]。如图1所示,智能音箱采集的语音数据传输到位于美国的亚马逊云计算服务中心进行解析,识别出的开灯命令发送到位于新加坡的设备控制服务器,通过应用程序编程接口(API)打开位于本地的照明设备。由于数据通路过长,云计算模式显著增加了开灯操作的时延和不确定性。

1.2 物端计算系统的生态问题

物端计算系统面临的第一个生态问题是数据过于集中。随着联网

的设备不断增加,其产生的数据也是呈指数级增长。据国际数据公司(IDC)预测,到2025年,全球数据年产量将达160 ZB,其中75%以上是产生于网络边缘和物端设备^[4]。近年来人工智能和大数据的发展显示了用户数据在下一代信息系统中的重要作用,以至于被誉为信息时代的“新石油”。然而各大设备厂商均将物端设备感知到的用户数据收集到私有或公有的云计算中心存储和分析。边缘计算、雾计算和物端计算等新的计算模式均旨在将云计算中心的负载向下迁移,这种迁移目的之一也是为了解决数据过于集中的问题。万维网(Web)发明者Tim Breners-Lee在2018年提出了去中心化平台Solid,以解决数据过于集中带来的一系列问题。

物端计算系统面临的另外一大生态问题是昆虫纲悖论^[5],即物端设备的种类像昆虫一样繁多,其本质描述的是系统的多样性和无序性。多样性体现在应用场景、芯片架构、硬件接口、操作系统、应用软件、编程模式、通信协议等多个方

面。这造成了物端计算机应用开发、部署和运维十分困难,程序员通常需要熟练掌握从硬件选型、软件开发到通信协议选择的全栈知识,才能研发出高效、可靠的新产品。无序性表现在系统的架构、设计方法、编程模式等方面。由于缺乏统一的系统架构、设计和编程方法,物端应用变得十分碎片化,设备之间难以协同计算,从而对人机物三元空间人的行为做出适当的反应。

物端设备面向场景设计、功能较为单一、计算资源十分有限,是一台专用计算机。因此,并不需要太多的计算、存储和通信资源。随着人类生活水平的提高,对物端设备的能力要求也逐渐提高。例如,一些空调已经具备了无线联网的功能,而冰箱甚至有对内存食物分析,并结合家庭用户的健康数据推荐合适的采购清单的功能。因此,我们需要一个统一的、开放的系统技术栈和统一的、协调的分布式系统体系结构抽象来支持物端计算机和其分布式系统的具体设计与实现,从而承担由云端迁移下来的计算负载。

2 物端计算系统面临的问题

2.1 物端系统体系结构

本文所述体系架构包括2个方面:单个物端设备的软硬件系统结构和多个物端设备组成的物端域分布式架构。个人电脑(PC)Web和移动Web已经证明:应用的繁荣可以直接推动相关领域的快速发展。智能手机应用(APP)和应用商



▲图1 亚马逊智能音箱开灯命令执行过程^[3]

店(APP Store)的出现,使在手机上开发和部署应用的门槛大大降低,开发效率大大提升,促进了功能手机到智能手机的转变。物端计算系统的多样性和无序性已经严重影响了其应用开发和部署的效率,需要有合理的、统一的系统结构与编程方法,来支撑应用的高效开发和部署。而且,物端计算系统多是具有一定物理或概念边界的小型分布式计算系统,其开发环境需要分布式技术作为支撑,这进一步加大了系统的设计与应用开发复杂度。

自Web发明以来,信息系统经历了PC互联网时代、移动互联网时代,即将进入万物互联网时代。PC互联网时代经历过数十年的发展终于形成了x86+Windows/Linux的单机系统架构和以表述性状态传递(REST)原理为基础的分布式系统架构^[3]。这种统一架构促进了PC应用的爆发,从而使计算机应用到了各行各业,提高了人类的生产效率和生活水平。经过10多年的发展,智能手机也形成了ARM+Android/iOS的单机系统架构和以REST为基础的分布式系统架构^[4]。当前智能手机上很多应用代码均运行在服务器端,而手机端只需一个“浏览器”来向用户呈现服务器端计算的内容。20年来Web系统的成功证明:由超文本传输协议(HTTP)设计和开发实践总结而来的REST分布式架构基本原理^[5],是解决分布式系统多样性和可扩展性的最佳实践之一。因此,将REST原理拓展至万物互联的物端计算系统是一个潜在的解决方案。

然而,物端的多样性和无序性远远高于PC互联网和移动互联网系统,目前并无统一开放的单体系统架构和分布式架构来支撑物端运行Web的协议栈。物端有普通的微控制单元(MCU)、低功耗ARM、数字信号处理(DSP)处理器、神经网络加速器等多种芯片,以及集成电路总线(I2C)、串行外设接口(SPI)、控制器局域网络(CAN)总线、串行接口(UART)等多种外设总线接口。面向不同的应用场景和硬件资源限制,其操作系统更是多达几十种。它们多采用无线的方式连入互联网,根据连接距离、速度、功耗等具体要求,可选择的通信协议也多达数十种。因此,程序员通常需要熟练掌握软硬件技术栈相关知识,才能快速开发出高效、稳定的物端应用程序。学术界为了让物端计算系统更好承接计算任务的迁移,在架构和系统设计层面做了出色的工作,例如EdgeOS_H^[6]、BOSS^[7]等。文献[3]中,作者提出了 Φ -Stack,通过软硬件高度协同设计的方法为物端设备提供开放式技术栈,并支持Web和智能应用。文献[8]中,作者提出了物端分布式系统架构风格,通过拓展现代Web系统的基本架构约束REST,提出物端表述状态转移(T-REST)架构原理。

2.2 基于传输控制协议(TCP)/用户数据协议(UDP)的物端应用层协议、中间件

应用层协议是分布式系统的重要组成部分,例如HTTP协议族,是整个互联网系统架构的核心技术之

一。由于HTTP协议族开销过大,海量资源受限的物端设备通常无法运行该协议栈。而且,许多物端系统的应用对实时性要求较高,HTTP协议通常无法提供实时性保障。因此,为物端系统设计一套可伸缩、可扩展的物端设备应用层协议是一项十分具有挑战的工作。由于现存大量的基于HTTP协议族的网络基础设施,新协议的设计需兼容Web系统的REST架构约束。

为此,学术界和产业界做了大量的工作,这些工作多数基于TCP/UDP来设计。例如,面向资源受限环境和物联网设计的受限应用协议(CoAP)^[9]和消息队列遥测传输协议(MQTT)^[10]。“统一接口”是REST架构风格的重要设计原则之一,HTTP的GET、PUT、POST、DELETE等请求方法是“统一接口”设计原则的重要体现。CoAP遵循REST架构约束,并继承了HTTP协议的GET、PUT、POST和DELETE 4个主要请求方法,因此与现代Web系统有很好的兼容性。为了减少开销,CoAP网络层采用的是UDP协议,通常与基于IPv6的低速无线个域网标准(6LoWPAN)^[11]一起构成资源受限设备的网络通信协议栈。MQTT是为物联网设计的轻量级、支持发布/订阅模式的应用层协议,其构建于TCP/IP协议之上,可在一定程度上与现有的互联网系统兼容。MQTT的发布/订阅模式可有效支持一些物端应用场景的实时性要求,支持应用协议层的双向通信。然而,不足之处是MQTT并不完全遵循REST架构约束,用其构建的应用与

Web应用兼容性较差。

另外,学术界也提出了一些基于REST风格的协议或中间件,例如 UbiREST、TinyREST、SeaHTTP等,这些研究目前尚未大规模应用。UbiREST是遵循REST架构风格,为泛在计算网络设计的、面向服务的中间件,提供服务在运行时动态组合等高级功能。TinyREST是为智能家居的消费电子和传感器组成的网络设计的应用层协议,该协议用于Web系统的HTTP请求和TinyOS的消息之间的转换。SeaHTTP则通过实现BRANCH和COMBINE2个新方法,实现请求的拆分和合并,从而提高Web应用的执行效率。

MQTT和CoAP是物端设备的应用层协议的2个代表,已经在产业界和研究机构应用。基于发布-订阅模式的MQTT对实时性和服务器/客户端双向通信有着较好的支持,而遵循面向资源的REST架构风格所设计的CoAP协议则与现有的Web系统应用有着比较好的兼容性。

2.3 资源管理与发现

据IDC预测,到2025年,每个人每天与周围的设备交互4800次,平均每18s交互1次^[4]。这些服务进行管理和及时发现将是一个巨大的挑战。在万物互联时代,人们总是在不同的计算场景中切换,每一个场景即是一个具体的物端计算系统,彼此独立又相互联系。例如,在出差场景中,人们可能要连续经过智能家居、智慧交通、智能宾馆、智

能办公室等多个场景切换,每个场景都有一定的边界和自己的管理控制策略。人在这些场景中移动时,如何快速地对相关分布式资源进行注册、发现和销毁是提供无缝智能服务的关键。

现代Web系统的资源命名机制主要基于统一资源标识符(URI)标准,然而其并不具有严格的唯一性和可靠性。一个基于URI的URL链接所指向的资源有可能并不唯一,且很容易在互联网的交互访问过程中被第三方劫持和替换,从而指向劫持者设定的资源,形成安全隐患。除了传统Web系统的资源以外,物端计算系统资源还包括物理世界的实体,其通常需要和物理世界交互,一旦出现问题,极易威胁人们的生命财产安全;因此,需要更加严格的资源命名与管理策略,确保名称对资源的唯一标识和安全的访问。对物体的命名与标识是传统物联网的基础研究之一,代表成果有国际标准化组织(ISO)/国际电工委员会(IEC)18000、美国的EPCglobal和日本的Ubiquitous ID。

2.4 开发与运行时环境

应用是推动计算技术领域发展的核心动力之一。为了提高应用的开发和执行效率,开发与运行时环境是核心支撑技术。具体包括应用程序语言设计、开发与调试环境、运行时环境等。物端计算系统的多样性决定了其应用开发的困难,程序员经常要面对数十种硬件、系统软件、通信协议选择,并与具体场景适配。同时,物端计算系统通常是场

景驱动的小型分布式系统,计算负载通常需要在系统内部分割、调度和迁移,即对分布式应用的支持。

在程序语言方面,物端计算系统需要一种新的语言,在语言层面提供对物理世界感知和控制的功能。而且,人机物三元计算空间中,人(即用户)的角色十分重要,“感知-计算-控制”的计算模式通常需要人的干预。普通用户能在人机物三元空间高效地开发部署物端应用十分重要。物端计算系统的程序语言应具有比C/Java等语言更好的易用性。为了支持其分布式执行,在语言层面上还应支持程序的可分割性,即编写的应用程序可在编译或解释执行阶段被分割为更小的执行单元。

在开发环境方面,需要设计实现具有很少编程经验的程序员,甚至普通用户都可以高效编写应用的开发环境。物端计算系统的设备高度异构和多样化,传感器和控制器通常经过多种接口与物端设备相连。如何为开发环境抽象、设计一个中间层,向下屏蔽这些接口等资源,向上为应用开发提供统一的API接口,是物端应用开发与部署面临的重大挑战。物端设备是资源受限的,且处在动态的环境中,应用需要使用环境中的实时数据,这给应用的调试带来挑战。应用调试通常需要中断运行,这时从物理世界感知的数据有可能已经失效,当程序继续运行时可能无法得出正确的结果。

在运行时方面,需要设计高效的应用解析、执行环境,以适应大部

分物端设备资源受限的状况。为了提高应用的可移植性,物端计算系统软件架构通常分成多个层次,包括硬件抽象层、驱动、操作系统、应用支撑层、应用程序等。每一层都会带来功能冗余和额外开销,大大降低了应用的执行效率。物端计算系统设备计算能力各异,智能家居机器人、自动驾驶汽车的计算能力可媲美当前主流的计算机,而空调、冰箱等设备计算能力有限。因此,我们需要设计可灵活伸缩和扩展的模块化运行时环境,支持拥有不同计算能力的设备,在物端计算系统内部形成统一的运行时环境,从而更好地支持计算负载在不同设备上的调度。

2.5 计算负载的调度挑战

面向异构环境的分布式调度相关研究在云计算领域已经大量存在,是网格、云计算里基本的研究课题,而基于有向无环图(DAG)模型的分布式调度更是云计算的研究热点。物端计算系统是局部化的分布式系统,同样存在计算任务调度的问题,其调度与云端有明显不同。

首先,调度的目的不同。资源利用率最大化、吞吐量最大化、总费用最低、费用公平是目前云计算中多DAG任务调度的主要优化目标。物端计算系统是一个有一定“边界”的小型分布式系统,其计算以用户为中心,用户体验差的应用是没有价值的。因此,其任务调度的核心目标是减小应用响应延迟,提高用户体验,同时兼顾降低计算和传输的功耗。

其次,云计算中的任务划分多为“均分”的形式,其划分后形成的DAG任务图,子任务之间虽有依赖关系,但任务本身的异构性不大(对资源的需求差别不大);因此,无须对划分后的子任务进行详细的评估,计算其需要的具体资源。而在物端,其任务图通常十分异构。如何对任务进行合理的划分,对任务计算量进行精细评估也是物端计算系统任务调度的关键挑战之一。

第三,物端计算系统更加异构,资源建模更加复杂。云计算中心多是一些大型数据中心,其软硬件异构程度并不高。例如,当前机器学习采用的GPU服务器集群,通常有数十块甚至数百块型号相同的GPU和通用处理器中央处理器(CPU)组成,其异构程度并不太大。服务器之间多数通过光纤连接,通信速度对计算和调度的影响也较小。物端计算系统硬件的计算、存储和通信能力差异十分巨大。如何建立高效的分布式资源管理和评估模型,为计算负载的调度提供依据是物端计算系统的一项十分具有挑战的任务。

3 物端控域计算机

3.1 物端控域计算机架构

物端计算系统是由面向物理世界、具有物理功能的终端和通信设备及其环境组成的场景驱动的、具有一定边界的分布式系统。其显著特征是系统的多样性和设备的资源相对受限。可通过控域理论将其划分为具有类似或相同管理策略的

域,我们也称这样的域为物端控域计算机。

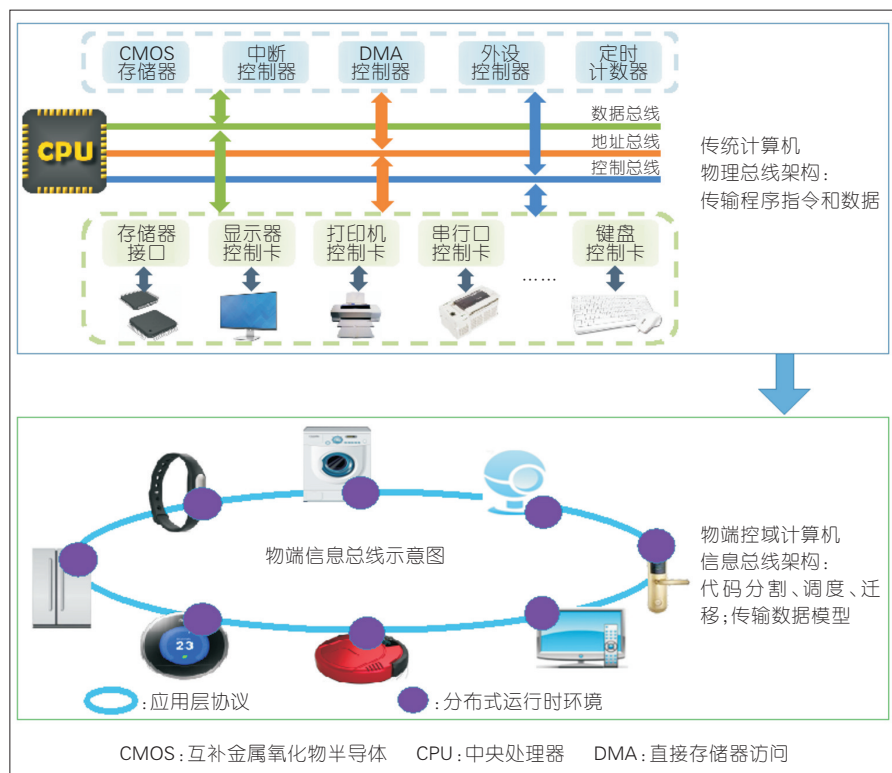
物端控域内众多异构的设备可看作该计算机的部件,它们在物理上是分散在环境中的,通过有线或无线的协议连接成“一台分布式计算机”。物端控域计算机是万物互联的不同场景抽象出来的概念。通常在这个“计算机”内有着统一或相似的控制和安全策略。我们倡导继承现代Web系统的基本架构原理REST,并针对物端特性做加强和拓展,设计适合物端控域计算机的新架构——物端信息总线架构,从而尝试解决这些问题。

3.2 物端信息总线

如图2所示,传统计算机物理上由不同的部件和外设通过总线连接而成,总线上传输的是程序指令和数据。而物端控域计算机的物端信息总线上传输的是微任务和数据模型,其中微任务是其计算负载的表现模式,数据模型是比原始数据更高一层的抽象。物端控域计算机的硬件由域内设备硬件和物理层通信协议组成,软件由各设备的系统软件、分布式应用运行时环境和分布式应用层协议组成。总体设计思路是将域内资源池化,统一域内软硬件资源管理和访问控制模式,并支持计算负载的分割、调度和在域内设备间自由迁移。

3.3 计算负载调度

物端设备远不如云端的计算资源丰富,计算负载从云端迁移到物端后通常无法由单个设备承担;因

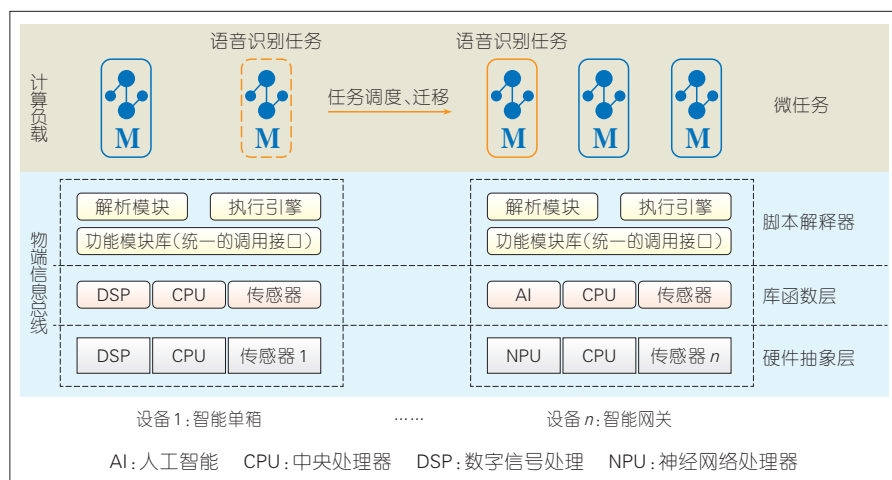


▲图2 物端控域计算机信息总线与传统计算机物理总线对比示意图

此,计算负载应具有运行时动态分割、域内自由迁徙和调度的能力。如图3所示,在智能家居的语音交互场景中,智能网关拥有对语音处理加速的硬件设施。语音需要先经过智能音箱的DSP采集和处理,得到的语音数据传输给智能网关进行

解析并得出控制命令,然后反馈给具体需要控制的设备执行。在这个过程中,智能音箱由于没有语音处理加速器,不适合处理语音解析的任务,需将处理任务迁移到具有语音处理加速器的智能网关处理。

这种计算负载的调度,除了需



▲图3 物端控域计算机及其负载调度示意图

要语言和支持外,还需要调度算法的支持。物端计算系统应用大多对响应时延较为敏感,而且对系统能耗要求更加苛刻。本文第2章已经详细阐述了物端计算系统的调度难题,调度的首要目标是满足不同计算负载的时延要求同时,最大限度降低系统的总功耗水平。而且,需要预留一部分计算资源,从而尽快处理紧急任务。

4 结束语

本文阐述了物端计算系统的概念,并讨论了该领域亟需解决的5个关键问题。物端设备位于网络边缘的末端,是处理人机物三元空间计算负载的理想场所。在即将到来的万物互联时代,物端计算系统将无处不在,人们的生活、学习、工作、甚至娱乐活动均在这些不同的物端计算场景之间移动。这些计算环境是高度动态的,场景之间的资源和访问控制策略各不相同,而且物端计算系统面临多样性和无序性的现状。同时,大部分设备资源受限,需要一套新的基础架构理论和系统设计方法来具体指导其软硬件的设计和实现。

本文基于控域理论和具体挑战问题分析,提出了物端控域计算机的愿景。通过研究物端控域计算机的分布式架构、物端信息总线(即分布式协议和运行时环境)、程序语言和计算负载调度策略,以域内资源池化为主要设计思想,构建物端控域分布式计算系统,统一调度和管理域内资源。物端控域计算机将在

➡下转第57页

工业互联网智能制造边缘计算面对的一个挑战。

5 结束语

随着物联网技术的发展,网络边缘侧数据呈现爆炸式的增长,云计算模式的缺陷日益突出,而边缘计算为解决工业互联网智能制造过程中数据分析和实时控制提供了有效手段。可以预见:在未来几年内,边缘计算将广泛应用于工业生产之中。把握边缘计算技术发展方向,促进边缘计算技术落地,必将有力地促进工业互联网智能制造的发展。

参考文献

- [1] Gartner. Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 [EB/OL]. [2019-01-02]. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>

- [2] 中国电子技术标准化研究院. 人工智能标准化白皮书(2018版)[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://www.cesi.ac.cn/images/editor/20180124/20180124135528742.pdf>
- [3] 施巍松, 张星洲, 王一帆, 等. 边缘计算: 现状与展望[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(1): 69
- [4] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924. DOI:10.7544/issn1000-1239.2017.20160941
- [5] SHI W, CAO J, ZHANG Q. Edge Computing: Vision and Challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016(5): 637-646. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198
- [6] MAO Q, HU F, HAO Q. Deep Learning for Intelligent Wireless Networks: A Comprehensive Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2595-2621. DOI: 10.1109/COMST.2018.2846401
- [7] MOHAMMADI M, AI-FUQAH A, SOROUR, et al. Deep Learning for IoT Big Data and Streaming Analytics: A Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2923-2960. DOI: 10.1109/COMST.2018.2844341
- [8] 汪海霞, 赵志峰, 张宏纲. 移动边缘计算中数据缓存和计算迁移的智能优化技术[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(2): 19-22. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.02.004
- [9] 王秋宁, 谢人超, 黄韬. 移动边缘计算的移动性管理研究[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(1): 37-41. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.01.008
- [10] 边缘计算产业联盟. 边缘计算参考架构 3.0 [EB/OL]. [2019-01-02]. <http://www.econsortium.org/Uploads/file/20181129/1543443431522383.pdf>

作者简介



宋纯贺, 中国科学院沈阳自动化研究所研究员, 中国科学院百人计划入选者, 中国自动化学会边缘计算专业委员会秘书长; 研究方向为工业互联网边缘计算; 发表论文 50 余篇。



曾鹏, 中国科学院沈阳自动化研究所所长助理、研究员, 中国科学院网络化控制系统重点实验室主任, 中国自动化学会边缘计算专业委员会主任, 国家“万人计划”创新领军人才; 研究方向为工业互联网; 获得国家科技进步一等奖等省部级科技奖励 6 项; 发表论文百余篇。



于海斌, 中国科学院沈阳自动化研究所所长、研究员, 国家杰出青年基金获得者, 国家“万人计划”创新领军人才, ISA Fellow, 中国自动化学会副理事长, 边缘计算产业联盟理事长; 研究方向为工业互联网; 获国家科技进步二等奖 4 项、技术发明二等奖 1 项; 发表论文百余篇。

上接第 36 页

满足应用的时延要求前提下,尽可能降低系统总体能耗,保持各计算节点负载均衡,及时响应紧急计算任务。

参考文献

- [1] 徐志伟, 曾琛, 朝鲁, 等. 面向控域的体系结构: 一种智能万物互联的体系结构风格[J]. 计算机研究与发展, 2019, (1): 90-102
- [2] SHI W, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge Computing: Vision and Challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, (3): 637-646
- [3] XU Z, PENG X, ZHANG L, et al. The Phi-Stack for Smart Web of Things [C]//Proceedings of the Workshop on Smart Internet of Things. USA: ACM. 2017: 1-6
- [4] REINSEL D, GANTZ J, RYDNING J. Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical[R/OL]. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/Seagate-WP-DataAge2025-March-2017.pdf>
- [5] FIELDING R T, TAYLOR R N. Architectural Styles and the Design of Network-Based Software Architectures [D]. University of California, 2000
- [6] CAO J, XU L Y, ABDALLAH R, et al.

- EdgeOSH: A Home Operating System for Internet of everything[C]//2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). USA: IEEE, 2017: 1756-1764. DOI: 10.1109/ICDCS.2017.325
- [7] DAWSONHAGGERTY S, KRIOUKOV A, TANEJA J, et al. BOSS: Building Operating System Services [EB/OL]. [2018-12-22]. <https://www.usenix.org/conference/nsdi13/technical-sessions/presentation/dawson-haggerty>
- [8] BORMANN C, CASTELLANI A P, SHELBY Z. CoAP: An Application Protocol for Billions of Tiny Internet Nodes [J]. IEEE Internet Computing, 2012, 16(2): 62-67. DOI: 10.1109/mic.2012.29
- [9] XU Z, CHAO L, PENG X. T-REST: An Open-Enabled Architectural Style for the Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2875912
- [10] HUNKELER U, TRUONG H L, STANFORD-CLARK A. MQTT-S — A Publish/Subscribe Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08). India: IEEE, 2008. DOI: 10.1109/COMSWA.2008.4554519
- [11] SHELLEY Z, BORMANN C. 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet [M]. USA: Wiley, 2009

作者简介



彭晓晖, 日本东京大学博士毕业, 中国科学院计算技术研究所副研究员、硕导; 现主要从事物联网计算系统的编程方法、应用协议与系统架构研究, 研究方向为分布式系统、边缘计算等; 主持和参与了数项国家、部委级研究课题; 发表论文近 20 篇。



徐志伟, 中国科学院计算技术研究所研究员、博士生导师、学术委员会主任, 中国科学院大学教授, CCF 会士, 曾担任国家自然科学基金委信息科学部专家咨询委员会委员, 《IEEE TC》《IEEE TSC》等多个国际著名期刊的编委等; 主要研究领域为高性能计算机、分布式计算、网格计算与系统软件, 近年来主要从事边缘计算、海云计算系统的研究, 并提出了物端计算方向; 曾获国家杰出青年科学基金、中国科学院科技进步一等奖、国家科学进步二等奖、中国科学院优秀青年科学家奖、中国科学院百人计划资助、中国科学院杰出科技成就团队奖等, 2007 年获中国计算机学会“王选奖”; 发表论文 100 余篇、专著 3 部。