软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2013,24(1):67−76 [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04296]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

网络计算中间件*

吴泉源

(国防科学技术大学 计算机学院,湖南 长沙 410073)

通讯作者: 吴泉源, E-mail: quanyuan.wu@gmail.com

摘 要: 网络计算中间件是随着互联网的发展而于 20 世纪 90 年代兴起的一类基础软件.网络计算中间件为各种网络应用系统的开发、部署、运行和管理提供了有力支持.随着信息网络技术和软件服务工程的快速发展,网络计算中间件又被赋予了新的内涵.首先从网络计算环境出发,就基础中间件、应用集成中间件和领域应用框架的基本概念和主要技术作较全面的诠释;然后聚焦于云计算和物联网等网络计算的热点研究方向,从中间件的角度指出当前值得关注的某些挑战性研究课题和需要深入探索的若干关键技术.

关键词: 网络计算环境;中间件;云计算;虚拟化;服务化;物联网

中图法分类号: TP311 **文献标识码**: A

中文引用格式: 吴泉源.网络计算中间件.软件学报,2013,24(1):67−76. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4296.htm

英文引用格式: Wu QY. Network computing middleware. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013,24(1):67−76 (in Chinese). http://www. jos.org.cn/1000-9825/4296.htm

Network Computing Middleware

WU Quan-Yuan

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Corresponding author: WU Quan-Yuan, E-mail: quanyuan.wu@gmail.com

Abstract: Middleware is a kind of fundamental software that boomed in 1990s with the rapid development of computer networks. Its main function is to effectively support the development, deployment, operation and management of the network application software systems. With a new connotation, the network computing middleware has encountered a breakthrough of information networks technology and service-oriented software engineering. The former part of this paper, which starts with the network computing environment, gives a comprehensive interpretation on the basic concepts and main technologies of basic middleware, application integration middleware and domain application framework; the second half focuses on hot research topics such as cloud computing, Internet of things, and indicates a number of concerned research directions as well as several challenges and key technologies that need deep exploration from the point view of middleware.

Key words: network computing environment; middleware; cloud computing; virtualization; service-oriented; Internet of things

信息与信息系统无处不在,信息化已成为当今的时代特征.计算的网络化、移动化、普适化和多样化,使得信息系统的规模越来越大,结构越来越复杂,开发与维护的难度越来越高.网络计算中间件是随着网络(特别是互联网)的发展而于 20 世纪 90 年代兴起的一类基础软件,其主要作用就是为各种网络应用与信息系统的有效开发、部署、运行和管理提供支撑环境.当前,随着信息网络技术和软件服务工程的快速发展,网络计算中间件又被赋予了新的内涵.本文将从网络计算环境出发,对网络计算中间件涉及的主要技术,特别是从中间件的角度对云计算和物联网技术中某些带有挑战性的研究课题和前沿技术,进行具有一定高度的综述.

* 基金项目: 国家“核高基”重大科技专项(2009ZX010043)

收稿时间: 2012-03-27; 定稿时间: 2012-07-23; jos 在线出版时间: 2012-08-29

CNKI 网络优先出版: 2012-08-29 10:53, http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20120829.1053.001.html

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

1 网络计算环境

为高可靠、低成本、高效率开发与管理各种复杂的网络应用系统,面向网络资源共享与集成的网络计算环境[1−4]得到迅速发展.在这样的环境下,网络不仅是信息传输的基础设施,而且是信息处理和服务共享的基础设施,网络可以为人们提供强大的一体化计算平台.从这个意义上说,网络就是计算机,目前,世界上最强大的“计算机”无疑是互联网.

为此,需要在网络原基础设施之上构造或装备一个支持一体化网络计算的平台软件,其作用是:管理网络上的各类软、硬件资源,支持网络资源的共享与集成,并为网络应用提供高效、可信的开发、部署和运行环境.像在裸机上需要配备操作系统等基础软件才能有效开发应用软件一样,该平台软件旨在有效支持快速构建网络应用,因而可视为网络上的操作系统.

但是,与单机不同,网络世界是开放的.分布性、自治性、异构性、可演化性已成为网络应用与信息系统的固有特征.为适应复杂信息世界的不断变化和发展,网络资源集成不能简单套用工业化的做法.如果说机械系统的集成是刚性的,那么信息系统的集成就是柔性的.一方面,需要以提高系统互操作性为主要目标,及时制订面向信息系统集成的各种技术体系和标准;另一方面,更需要研究一套支持随需应变的敏捷软件技术.相应技术已成为当前软件工程的研究热点[5−9],主要有:

(1) 微内核集成总线技术,支持软件模块的即插即用,适应软件功能需求的变化;

(2) 软构件和对象代理技术,支持程序代码的重用和分布对象之间的互访与通信,适应代码实现的变化与应用软件运行环境的变化.这里,软构件简称构件或组件,顾名思义,构之件也.一是构,强调其可构造性和可组装性;二是件,强调其信息隐蔽性和可包装性.构件作为计算机中一组可重用的二进制代码,可视为对象的一种发展.基于 Agent 的自适应构件还能动态适应运行环境的变化.构件化是当今信息系统软件开发的主流方法,也是软件体系结构的重要特征之一;

(3) 消息代理和各种适配机制,支持不同应用代码之间的互联互通互操作,适应应用软件业务逻辑和业务流程的变化;

(4) 软构件的组装、部署、动态重构与绑定等技术,支持网络应用与信息系统的静态和动态搭建,适应应用需求与操作环境的变化;

(5) 面向 Web 服务的架构技术,支持信息系统松散耦合的部门与部门之间的跨域集成,适应更大范围的网络环境的变化.

网络计算中间件是一种包含上述主要技术的平台软件,它以柔性的松散耦合方式对应万变,是灵活响应网络环境变化、应用需求变化和软件功能变化的平台软件,已经成为一体化网络计算的基础平台.

2 中间件平台[4,10,11]

按照《计算机科学技术百科全书》有关词条[12]的定义,在网络环境中,建立在具有基本通信协议的操作系统之上,支持应用软件有效开发、部署、运行和管理的支撑软件称为分布计算中间件.分布计算中间件是一种起承上(应用软件)启下(操作系统)作用的支撑软件,它支持一体化网络计算,故又称为网络计算中间件,或称为软件中间件,简称中间件.

中间件种类繁多.从通信机制和程序设计风范的角度看,中间件可以分为:

① 消息中间件[13]支持分布应用之间采用消息传递的异步方式进行通信,通过队列管理、路由管理和发布-订阅等服务,将基于包交换的低层通信模式作了自然扩展;

② 远程过程调用中间件[14]支持客户-服务器计算模式的分布式应用之间采用一种请求-响应的同步方式进行通信,是过程式程序设计风范在分布式应用中的扩展;

③ 面向对象中间件[15]支持面向对象的多层客户-服务器模式的分布式应用,客户通过本地的对象请求代理访问异地服务器上的对象,是面向对象程序设计风范在分布式应用中的扩展,CORBA,JEE 和.NET 是

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

目前面向对象中间件的 3 个有代表性的技术体系;

④ 面向服务中间件[16]支持分布式应用通过互联网上的 Web Services 技术实现跨域的信息通信,通常适用于部门与部门或行业与行业间松耦合、粗粒度的信息资源的共享和集成,为开创面向服务的程序设计风范提供了有力支持.

随着互联网技术的不断发展和中间件的广泛应用,中间件的内涵和外延不断拓展.从中间件的功能及其应用的层次来看,中间件可以分为基础中间件[17−19]和应用集成中间件[20−22]两大类.

基础中间件旨在建立中间件运行平台,可以视为计算机信息系统基础设施的扩展;应用集成中间件又可细分为数据、代码、流程、门户等几种集成中间件,分别支持信息系统资源层、业务层和表现层软件的集成.中间件的分类结构如图 1 所示.

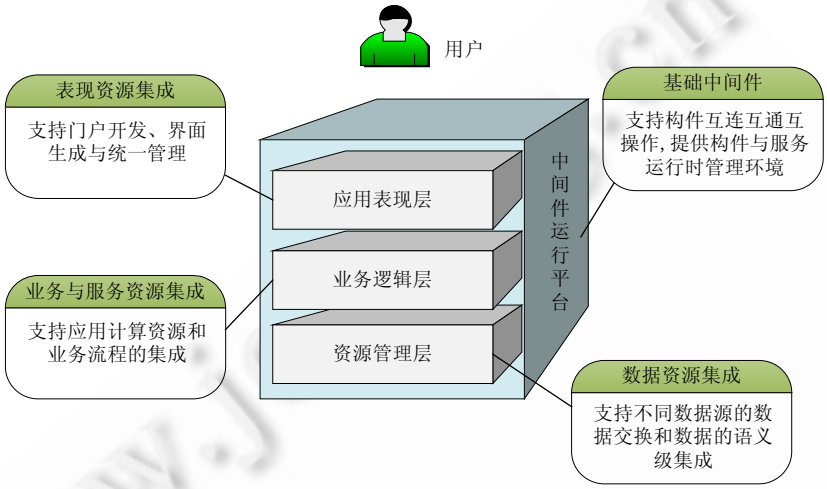

Fig.1 The classification structure of middleware

图 1 中间件分类结构图

基础中间件一般采用分布对象技术来实现,其作用主要是对网络上各种软、硬件资源进行调度和管理,并提供应用所必需的公共服务和各类构件的运行环境.相应的中间件运行平台的概念模型如图 2 所示.

Fig.2 The conceptual model of middleware runtime platform

图 2 中间件运行平台概念模型

(1) 微内核集成总线旨在屏蔽底层各种异构的网络和操作系统,在物理位置透明的情况下支持异地对象与服务之间的互访,实现软件模块的即插即用;通信服务通常能够支持 JRMP,SOAP,IIOP,HTTP/

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

HTTPS 等多种主流通信协议;公共服务提供名录、日志、时间、消息、事件、通告、安全、负载均衡、数据访问、事务等服务;构件容器提供 EJB,WEB,CCM 等实体构件、会话构件、过程构件和服务构件运行环境;业务引擎用于启动相关构件和服务,如 Portal,BPEL,BPMN 等;基本工具包括接口定义与编译工具,以及各种建模、开发、定制、部署、组装和构件管理工具.搭建在微内核集成总线上的基础中间件又称为应用服务器;

(2) 数据集成中间件的任务是支持信息系统数据资源的采集、抽取、转换、包装以及传输,把不同来源、格式、性质的各种异构数据源进行物理集成或逻辑集成,建立满足 QoS 要求的归一化数据访问服务.为此,该中间件向下需协调各数据库系统,向上应为集成数据的应用提供统一数据模式和数据访问的通用接口.如何解决好数据的异构性、完整性和语义冲突问题是该中间件技术的关键.基于 XML 的数据集成中间件已在实现异构数据的集成中得到广泛应用;

(3) 代码集成和业务流程集成中间件用于支持业务逻辑层软件的集成.其中,应用代码集成中间件利用适配机制把新建和遗留应用代码中各类方法统一成标准的应用接口,并包装为消息的形式,通过消息代理机制,支持应用资源的互联互通互操作;业务流程集成中间件对业务流程的整个生命周期进行管理和控制,以组织和协调参与流程的各应用代码之间的动态执行关系,并监控流程的执行状况.业务流程集成中间件通常提供可视化开发方法,应用开发者通过流程图便可定制或修改业务流程,从而达到零编程的目的;

(4) 门户集成中间件是针对信息系统的应用表现层构建的,其作用是支持不同的应用需求,通过调用信息系统业务层、资源层和基础设施软件,为不同角色的用户提供个性化服务.功能一般包括集中的门户管理和开发、个性化的内容组织与管理、单点认证登录以及统一而直观的用户界面和各类表格的自动生成等;

(5) 服务集成中间件是互联网环境下基于 Web Service 技术支持跨域集成的中间件.通过 Web Service 的服务包装以及语义 Web、服务组合、服务协同、服务发布、智能搜索和服务发现等技术,该中间件支持 Web 服务成为构建各类应用软件的基本单元,从而支持应用软件开发者无需进行底层的程序实现,而只需编写某些组合脚本便可构建一个复杂的业务应用.该中间件与下一节中介绍的云计算中间件有着密切的关联.

中间件一般属于通用软件平台.在某些重要应用领域,通过进一步提取具体应用领域中的共性业务需求,将相关解决方案服务化、构件化,便可建立中间件的扩展平台,称为领域应用框架.领域应用框架为构建适用于该领域的信息系统提供了综合集成的平台以及各种通用和专用的构件库,也为进一步搭建该领域的系统顶层设计提供了整体技术架构的支持.

目前,中间件已从支持网络应用消息通信、分布事务处理以及运行支撑的基础平台逐步发展成为支持网络应用开发、运行和部署的全生命周期支撑平台.除前面已经阐述较多的运行支撑外,在分布式应用开发方面,中间件主要研究基于 UML2 和模型驱动架构(MDA)等软件开发方法及相应的开发集成环境,以有效支持网络应用的建模分析、代码/流程集成、分布式应用的测试、服务组合与发布等.该集成环境能够与 Spring,Hibernate,Struts,JSF 等各类商业化 JEE 设计模式和开源框架等进行集成,还提供了一系列扩展点,开发人员可以根据自己项目的需求进行自由扩展.

我国从 20 世纪 90 年代初期就开始了中间件技术与系统的研究,20 年来,在国家高技术研究与发展计划等国家计划的持续支持下,我国的中间件研发工作基本上保持与国际同步发展的态势,多项成果获得了国家科技进步奖或国家发明奖,国产中间件平台产品在电信、电力、金融、交通、电子政务和国家安全等行业或领域已取得显著的经济与社会效益,在相关行业的数据整合、应用集成、流程衔接和服务共享等应用中显示出强大的支撑作用.特别是在国家“十一五”核高基重大科技专项的有力支持下,汇聚我国众家之长而研发的国产中间件参考实现及平台成果,融 CORBA,JEE 和 Web Service 等中间件技术体系于一身,并形成了一批涵盖微内核集成框架、公共服务、构件容器、开发与部署工具、应用集成和流程集成等一系列技术规范和标准,申报了一批发

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

明专利,多项技术标准已被国际相关组织所采纳.与此同时,遵循上述规范并各具特色的国产中间件套件产品,在市场上正逐步替代国际同类产品,为国家重大信息化工程、重要行业的信息化建设发挥重要作用.目前,以“四方国件(OrientalWare)”命名的中间件技术成果在国际上已产生重要影响,我国与欧盟共同创建了中间件开源组织 OW2.2012 年,该组织的新一届理事长由中国人当选.国产中间件的研发成果与产业化,对于我国自主可控的基础软件产品的广泛应用也产生了重要的推动作用.

当前,随着新一代互联网、云计算和物联网等信息网络技术及以软件为突破口的现代服务业的快速发展,使得网络计算中间件被赋予了新的内涵,提出了许多新的挑战性课题和需要深入探索的前沿技术.

3 云计算中间件

面向云计算的中间件简称云计算中间件,其主要任务是对云计算涉及的各类网络信息资源进行有效管理,并为云计算应用提供高效、可信的开发、部署和运行的支撑环境.云计算[23]是互联网上一种新型的网络计算商业模式,它将计算任务分布在由大量计算机所构成的资源池(云)上,使各类应用系统能够根据需要从(云)中获取计算能力、存储空间和各种数据与软件服务.云计算技术属于当前全球十大信息战略技术.

从系统角度看,“分久必合”,云计算把分布在网络上的各种资源,包括基础设施、平台、应用软件等信息资源逻辑上整合在一起,聚集到资源池中加以集中管理,并以虚拟化的有偿服务方式发布和提供给使用者.从用户角度看,云计算使用户不再关心如何根据自己的业务需求去购买服务器、软件和解决方案,而只需关心如何通过互联网来获取由云端提供的能够满足自己需要的各种信息资源服务.在云计算模式下,应用所需的大量资源虽然远在称为“资源池”的云端,却犹如近在身边,尽管不为我所有,但能为我所用,因而客户的数据不怕丢失,应用无需下载,客户也不会受到云层中的资源升级以及网络演化的影响.

按需索取而润泽万物,聚集即为“云”,充分利用云能量便能形成大气候.作为软件服务化、计算虚拟化、位置透明化、终端普适化的一种商业模式,云计算的服务设施不受客户端的局限,因而其规模和能力不可估量,它把用户的计算任务从桌面延伸到了互联网.云计算之所以用“云”描述计算,是因为计算设施不在本地而在网络中,用户不需要关心这些设施所处的具体位置,于是就用网络图中常用的一朵云形象地加以代替.

云计算的体系结构大致可以分为 4 层,自低向上依次是:① 物理资源层,包括各种计算机、存储设备、网络设施、数据库和软件等;② 资源池,包括计算资源池、存储资源池、网络资源池、数据资源池、软件资源池等;③ 中间件管理层,主要有资源管理、任务管理、用户管理和安全管理;④ 服务构建层,包括服务接口、服务查找、服务访问、服务工作流等.

可以看出,云计算中间件在云计算中处于核心地位,其作用向下是支持各类信息网络资源的集成和聚合,以及对资源池中各类资源实施有效管理;向上需要面向大规模客户端访问,通过资源按需部署和使用、任务自适应地调度与执行、服务质量控制、用户环境管理、账户管理和多租户的安全保障等支持,为各类用户提供灵活、可信和低成本的自助服务[24].事实上,中间件已成为发展云计算的重要抓手,不少云计算解决方案都是基于中间件提出来的.例如,IBM 的云计算解决方案是基于其 WebSphere[25]中间件体系的,Oracle 是基于其 WebLogic[26]的,微软则扩展了.net[27].由于中间件可以视为网络环境上的操作系统,目前有研究者把云计算中间件称为云操作系统.本文作者认为,从技术路线上看,云计算中间件更多地是从互联网应用的角度研究一体化互联网计算环境,而云操作系统是经典操作系统向互联网资源管理的拓展,两者支持网络计算的目标基本一致,因此,云计算中间件与云操作系统本质上属于同一概念.

云计算是互联网上以数据处理和信息服务为主的一种按需自助服务模式下松散耦合的网络计算,呈现出多种新的网络计算特征:大规模多样化网络资源聚合、按需自助和按量可伸缩性服务、大量客户端访问、多用户共享资源池、服务可度量等.云计算的这些新特征为云计算中间件提出了许多新的挑战性课题.

从技术层面上看,云计算是资源聚合、虚拟化、服务化和效用计算等概念与技术跃升的产物.资源聚合是云计算的基础,虚拟化是云计算的核心,服务化是云计算的灵魂,效用计算是云计算的宗旨.事实上,云计算中间件的研究都是围绕这些技术展开的.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

(1) 云计算是数据密集型计算,数据量达 PB 量级(千万亿量级),且仍在不断扩张,并发访问量达 GB 量级,且峰值与平均的访问量可能相差几个数量级.数据类型除数值型外,还涉及大量文本、图形、图像、音频和视频等半结构或非结构化数据[28],传统的关系数据库已难以满足云计算对海量数据的高效存储与快速检索的要求,也不具备数据存储无缝扩展到整个集群环境中的能力,不支持在运行时将数据存放于内存中.于是,一种放松了事务强一致性约束、但具有更好分区容错和更高可用性的非关系数据库 NoSQL[29]应运而生.在 NoSQL 的推动下,为有效支持云计算系统高可用、可伸缩的海量数据存储与服务,弹性缓存平台和弹性应用平台已成为云计算中间件的重要研究课题.拓展开来,如何根据应用、用户和数据规模,按需聚合云计算的各种服务资源[30],保持云计算服务容量、服务质量等关键能力的均衡性,是云计算中间件亟待攻克的技术难题.

(2) 虚拟化[31,32]是将实体计算资源进行逻辑抽象而创建虚拟计算资源的过程.由虚拟化创建的虚拟资源通常比实体资源具有更丰富的功能、更灵活的可配置性或者更友善的应用接口.经过逻辑抽象后,实体资源成为制式化和同构化的虚拟资源,从而能够达到屏蔽实体资源多样性的目的,使应用不必关心实际的服务资源.虚拟化的实现主要依靠软件技术,特别是中间件的解释、映射、包装、调度和管理等技术.实际上,从虚拟化的视角看,操作系统的主要作用便是将硬件裸机改造成为一台资源利用率更高、运行环境更好、使用和管理更加方便、功能更加强大的虚拟机器.在云计算中,基础设施或硬件的虚拟化是当前的研究热点,涉及的主要调度与管理技术有集群计算和分区计算两类.前者是多到一的虚拟过程,如将多台服务器虚拟化为具有单一映像的一台服务器,通过负载均衡等集群技术,以提高整个系统的计算能力和可扩展能力,或提升系统的容错水平;后者是一到多的虚拟过程,如通过动态可配置的分区等技术,将一台大型服务器虚拟化为可以同时满足不同租户要求的几台甚至上百台相互隔离的、运行不同操作系统实例的虚拟服务器,以实现不同应用在虚拟化平台上的整合,简化系统的部署和管理,提高资源的利用率,以及让信息技术对未来业务的变化更具适应力.实际上,前者属于资源聚合,后者属于按需服务,两者是密切关联的.上述虚拟化过程还应在网络、存储、数据、平台和软件服务各个层次加以展开.为了使云计算的各类实体资源变换成同构的虚拟资源,需要构建一个完整的信息资源的虚拟化环境.如何通过多层次、多方位的虚拟化技术实现云计算平台各类信息资源的无差别共享,使云计算平台成为集中式同构无限可扩展的网络计算平台,是云计算中间件需要不断深入探索的课题.

(3) 基础设施即服务(IaaS)、平台即服务(PaaS)、软件即服务(SaaS)、服务化[33,34]是当今信息社会各类信息资源共享的主流模式,它们也构成了云计算的基本概念框架.云计算面对大量存在、广泛分布、访问方式多样和对服务质量要求各异的云用户,必须具备泛在的快速提供各类云服务的能力.对于“无限”的云服务供给需求以及负载高可变的应用场景,云计算中间件平台应该具有良好的计算弹性和管理大规模计算的能力[33,34].为此,需要在面向服务的体系架构和面向服务的计算、基于服务分发技术的按需弹性云服务运行环境、资源按需使用的弹性伸缩技术和自适应集群调整方法[35]以及高效而准确的服务发现、自动而有效的服务组合和服务协同等方面取得新的更大的技术突破.

(4) 多承租效用计算旨在最大限度地使云计算各类信息资源为多租户提供优质而安全的共享服务.资源能否充分高效共享,是云计算有别于传统企业计算的本质特征.多承租是云计算资源的使用模式,它使云计算可以在应对峰值需求的同时有效避免大规模的资源闲置.多承租所面临的主要挑战是如何在多层次灵活地支持多承租以及如何在多租户之间实现有效的资源隔离与共享.显然,资源共享的程度越高,相应的资源管理的难度就越大[36].目前,支持多承租的各种资源共享方案、弹性管理技术[37]、自适应机制[38]、多级负载均衡策略以及面向多租户进行优化部署与资源使用等技术,已成为云计算中间件的重要研究课题.另一方面,因为云应用与云平台是松散耦合的,多种用户、多类应用和多种服务同时驻留、运行在云平台上,用户之间还可能存在着某种复杂的交互关系,因此,恶意破坏、数据泄密、账户或服务劫持等信息安全问题在云计算系统中显得尤为突出.云计算中间件如何在多个层次、多个租户之间灵活地支持云计算在公用计算环境下安全、可信的效用计算,是当前人们极为关切的又一个研究热点.相应的关键技术[39]主要包括权限分离框架、严密的访问控制和审计、加强的数据加密和各种隐私保护技术[40]等.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4 物联网中间件[41,42]

物联网[43]是通过传感设备按照约定的协议把各种物品与网络连接起来进行信息交换和通信,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络.这里,常见的传感设备与传感器包括电子标签(RFID)、摄像头、GPS 以及红外感应器、温度感应器和激光扫描器等.物联网的基本原理[44]是:在需要感知的物体上植入各种微电子芯片,用这些传感器获取物理世界的各种信息,再通过无线传感网接入新一代互联网,实现信息的传递交互,并基于云计算等中间设施进行信息存储管理,应用所需的信息处理和服务,实现对物理世界的深度感知.

目前,出现了民生物联、市政物联、装备物联、企业物联、农业物联、环保物联、物流物联、交通运输物联、医疗物联、校园物联和家庭物联等各类物联网[45−48],它们都是一种以感知为前提,实现人与人、人与物、物与物全面互联的网络.据称,物联网把人类社会、网络世界与物理系统三者整合在一起,使世界上所有物体,从轮胎到牙刷、从房屋到纸巾都能通过互联网主动进行信息交互,从而使人类能以更加精细和动态的方式管理生产和生活.

实际上,物联网与云计算是密切相关的.从网络计算的视角看,物联网可以说是普适计算[49](或移动计算)和云计算的融合,或者说,物联网是一种泛在化的或移动的云计算[50].因此,云计算中间件的所有关键技术原则上也应该是物联网中间件的关键技术,反之亦然.下面仅针对物联网的感知、互联互通和智能应用这三大核心功能,进一步指出物联网中间件涉及的主要技术.

(1) 在底层的感知和互联互通方面,物联网中间件的主要研究目标是屏蔽底层硬件及网络平台的差异,支持物联网应用开发与运行,保障物联网系统的高效部署与可靠管理.已经研制和正在不断发展的物联网中间件规范主要有:用于读取 RFID 标签数据的接口标准 EPC[51]、用于数据交换和过程控制的工业标准 OPC、用于无线传感网应用开发、维护、部署和运行的技术规范 WSN 以及为各种嵌入式设备提供的基于 Java 技术的通用运行环境的中间件及相关的开放标准 OSGi[52]等.物联网资源环境受限、系统规模庞大、设备异构、网络动态变化,如何用负载指派等技术和更有效的机制支持传感器节点的低功耗通信并延长传感器节点的寿命,支持在网络动态变化情况下维持整个系统的性能和健壮性,且在可靠性、能量消耗和系统响应速度之间加以折衷等,都是亟待物联网中间件深入探索和攻克的技术课题.

(2) 物联网智能应用的一大特点是对海量传感器数据或事件的实时处理[53].面对来自大量不同传感器数据源且不断增长的不确定海量时序关联数据和相关的海量传感器事件,面向服务的中间件技术已难以发挥作用,复杂事件处理中间件及其相应的事件驱动架构成为物联网大规模应用的核心研究内容.事件驱动架构[54]的优点在于能使物联网应用系统针对海量传感器事件,在很短的时间内做出反应.复杂事件处理中间件通过其边缘服务器从系统中获取大量统称为事件的信息,将其过滤组合,并进行基于规则引擎的智能处理[55]和基于数据流[56]的分析计算.如何有效支持不确定海量时序关联数据流的数据级、特征级和决策级等多层次的数据融合[57−59],支持物联网服务的动态发现和动态定位,以及应对越来越多的感知层、传输层和应用层等多层次的安全挑战[60−62],是当前物联网中间件的重要研究热点.

(3) 物联网是互联网向其他网络延伸的一种新型应用模式,物联网中间件还面对以互联网为中心的多网融合环境和泛在化的需求挑战.相关的关键技术[63]主要包括自适应软件体系结构和普适计算环境下的共性支撑服务两个方面,其中,运行时的构件自适应切换、服务自主组合和动态环境下的自适应应用等技术[21]都颇具挑战性.自适应软件体系结构[63]方面的研究课题主要有基于自主单元的普适计算空间建模方法、基于构件技术的轻量级自适应模型、基于微内核架构和内置策略管理的自适应软件实现机制等,共性支撑服务方面主要有信息空间与物理空间的整合技术、面向多网融合的自适应通信与互操作机制、面向分布实时嵌入式设备的服务质量保障等.

5 结束语

网络计算中间件以支持分布异构环境中的应用互操作为主要目的,正在朝着平台化、领域化和泛在化方向

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

发展.本文围绕中间件涉及的主要技术及其发展趋势进行了综述,特别是探讨了云计算和物联网中间件的若干关键技术.

信息网络技术的发展,给网络计算中间件提出了许多挑战性课题.未来的中间件将从支撑企业级分布计算向支持 CPS(cyber-physical system)转移,涉及的主要技术挑战包括泛在计算技术、大数据的实时采集、高效存储、有效管理和快速检索、基于 MapReduce[64]的分布计算机制、实时流处理以及在线智能分析和处理等.

挑战与机遇是并存的,且机遇往往大于挑战,以计算机为核心的各类信息技术就是在挑战中不断发展的.只要勇于面对挑战,刻苦攻关,坚持自主创新,相信我国网络计算中间件将会迎来新的发展期.

致谢 本文成稿过程中曾得到梅宏院士、王怀民教授、黄涛教授、王戟教授、史殿习研究员、周斌研究员、何连跃研究员、刘江宁教授和章文嵩博士等许多同行专家的帮助,某些素材来自《四方国件》等内部刊物,在此一并表示感谢.

References:

[1] Coulouris G, Dollimore J, Kindberg T, Blair G. Distributed Systems: Concepts and Design. 5th ed., Addison Wesley Press, 2011. 1−63.

[2] Cummins FA. Enterprise Application an Architecture for Enterprise Application and Systems Integration. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 2−35.

[3] Lu XC, Wang HM, Wang J, Xu J, Li DS. Internet-Based virtual computing environment: Beyond the data center as a computer. In: Proc. of the Future Generation Computer Systems. 2011,1(29):309−322. [doi: 10.1016/j.future.2011.08.005]

[4] Bakken DE. Middleware, Encyclopedia of Distributed Computing. Kluwer Academic Press, 2003. http://www.eecs.wsu.edu/2000~bakken

[5] Kapadia NH, Fortes JAB. PUNCH: An architecture for Web-enabled wide-area network-computing. Cluster Computing, 1999,2: 153−164. [doi: 10.1023/A:1019026725028]

[6] Object Management Group. Common object request broker architecture: Core specification v3.0.2. 2002.

[7] Papazoglou MP, Traverso P, Dustdar S, Leymann F. Service-Oriented computing: A research roadmap. Int'l Journal of Cooperative Information Systems, 2008,17(2):223−255. [doi: 10.1142/S0218843008001816]

[8] Liao BS, Li SJ, Yao Y, Gao J. Conceptual model and realization methods of autonomic computing. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2008,19(4): 779−802 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/779.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.00779]

[9] Natis YV. Service-Oriented Architectures Scenario. Gartner, 2003. 1−6.

[10] Geihs K. Middleware challenges ahead. Computer, 2001,34(6):24−31. [doi: 10.1109/2.928618]

[11] Bernstein PA. Middleware: A model for distributed system services. Communications of the ACM, 1996,39:86−98. [doi: 10.1145/230798.230809]

[12] Wang HM. Software middleware. In: Encyclopedia of Computer Science and Technology. 2nd ed., Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 633−634 (in Chinese).

[13] Korhonen M. Message oriented middleware (MOM[w12]). 1997. http://www.tml.tkk.fi/Opinnot/Tik-110.551/1997/mqs.htm

[14] Tanaka Y, Nakada H, Sekiguchi S, Suzumura T, Matsuoka S. Ninf-G: A reference implementation of RPC-based programming middleware for grid computing. Journal of Grid Computing, 2003,1:41−51. [doi: 10.1023/A:1024083511032]

[15] Bordini R. Agent and multi-agent software engineering: Modeling, programming, and verification. In: Proc. of the Declarative Agent Languages and Technologies IX. 2012. 149−151. [doi: 10.1007/978-3-642-29113-5_15]

[16] Erin T, Amy K. Software as a service taxonomy and research guide. In: Proc. of the IDC. 2005.

[17] Román M, Hess C, Cerqueira R, Ranganathan A, Campbell RH, Nahrstedt K. A middleware infrastructure for active spaces. Pervasive Computing of IEEE, 2002,1:74−83. [doi: 10.1109/MPRV.2002.1158281]

[18] Heineman GT, Councill WT. Component-Based software engineering: Putting the pieces together. Recherche, 2001,67:02.

[19] Huhns W, Singh M. Service-Oriented computing: Key concepts and principles. Internet Computing of the IEEE, 2005,9(1):75−81. [doi: 10.1109/MIC.2005.21]

[20] Alwakeel SS, Almansour H. Modeling and performance evaluation of message-oriented middleware with priority queuing. Information Technology Journal, 2011,10:61−70. [doi: 10.3923/itj.2011.61.70]

[21] Rouvoy R, Barone P, Ding Y, Eliassen F, Hallsteinsen S, Lorenzo J, Mamelli A, Scholz U. MUSIC: Middleware support for self-adaptation in ubiquitous and service-oriented environments. In: Proc. of the Eingereicht bei LNCS Hot Topics on Software

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Engineering for Self-Adaptive Software Systems. 2008. [doi: 10.1007/978-3-642-02161-9_9]

[22] Wu QY, Shi DX. Information systems and their comprehensive integration technologies. Computer Engineering & Science, 2009, 31(10):1−4 (in Chinese with English abstract).

[23] Armbrust M, Fox A, Griffith R, Joseph AD, Katz R, Konwinski A, Lee G, Patterson D, Rabkin A, Stoica I, Zaharia M. A view of cloud computing. Communications of the ACM, 2010,53:50−58. [doi: 10.1145/1721654.1721672]

[24] Amazon elastic computing cloud. http://aws.amazon.com/ec2

[25] Iyengar A, *et al*. WebSphere Business Integration Primer: Process Server, BPEL, SCA, and SOA. IBM Press, 2007. 1−67.

[26] Barnes T, Messinger A, Parkinson P, Ganesh A, Shegalov G, Narayan S, Kareenhall S. Logging last resource optimization for distributed transactions in Oracle WebLogic server. In: Proc. of the 13th Int'l Conf. on Extending Database Technology. New York, 2010. 651−656. [doi: 10.1145/1739041.1739119]

[27] Windows azure. http://www.microsoft.com/windowsazure

[28] Lynch C. Big data: How do your data grow? Nature, 2008,455:28−29. [doi: 10.1038/455028a]

[29] Meijer E, Bierman G. A co-relational model of data for large shared data banks. Communications of the ACM, 2011,54:49−58. [doi: 10.1145/1924421.1924436]

[30] Zhou HY, Wang W, Zhang WB. Self-Adaptive adjusting approach for cluster in cloud computing. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2011,5(4):347−355 (in Chinese with English abstract).

[31] Waldspurger CA. Memory resource management in VMware ESX server. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002,36: 181−194. [doi: 10.1145/844128]

[32] Barham P, Dragovic B, Fraser K. Hand Xen and the art of virtualization. In: Proc. of the 19th ACM Symp. on Operating Systems Principles (SOSP 2003). New York: ACM Press, 2003. 164−177. [doi: 10.1145/945445.945462]

[33] Lama P, Zhou X. Autonomic provisioning with self-adaptive neural fuzzy control for end-to-end delay guarantee. In: Proc. of the 18th Annual IEEE/ACM Int'l Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. IEEE Computer Society, 2010. 151−160. [doi: 10.1109/MASCOTS.2010.24]

[34] Chohan N, Bunch C, Pang S, Krintz C, Mostafa N, Soman S, Wolski R. AppScale Design and Implementation. 2009.

[35] Wang W, Zhang WB, Wei J, Zhong H, Huang T. Resource-Aware performance diagnostic method for web applications. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2010,21(2):194−208 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/3781.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03781]

[36] Bhuvan A, Prashant S, Timothy R. Resource overbooking and application profiling in shared Internet hosting platform. USAACM Trans. on Internet Technologies, 2002,9(1):239−254. [doi: 10.1145/1462159.1462160]

[37] Liu X, Heo J, Sha L, Zhu XY. Queuing-Model-Based adaptive control of multi-tiered Web applications. IEEE Trans. on Network and Service Management, 2008,5:157−167. [doi: 10.1109/TNSM.2009.031103]

[38] Padala P, Shin KG, Zhu XY, Uysal M, Wang ZK, Singhal S, Merchant A, Salem K. Adaptive control of virtualized resources in utility computing environments. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2007,41:289−302. [doi: 10.1145/1272998]

[39] Kandukuri BR, Paturi VR, Rakshit A. Cloud security issues. In: Proc. of the Service Computing. Bangalore, 2009. 517−520. [doi: 10.1109/SCC.2009.84]

[40] Wang C, Wang Q, Ren K, Lou WJ. Privacy-Preserving public auditing for data storage security in cloud computing. In: Proc. of the INFOCOM. San Diego, 2010. 1−9. [doi: 10.1109/INFCOM.2010.5462173]

[41] Nage M, Katasonov A, Khriyenko O, Nikitin S, Szydtowski M, Terziyan V. Challenges of Middleware for the Internet of Things. Automation Control—Theory and Practice. Chapter 14, 2009. 247−270.

[42] Li RF, Wei YH, Fu B, Chen HL. A review of middleware for wireless sensor networks. Journal of Computer Research and Development, 2008,45(3):383−391 (in Chinese with English abstract).

[43] Mattern F, Floerkemeier C. From the Internet of computers to the Internet of things. In: Proc. of the From Active Data Management to Event-Based Systems and More. LNCS 6462, Springer-Verlag, 2010. 242−259.

[44] Atzori L, Iera A, Morabito G. The Internet of things: A survey. Computer Networks, 2010,54:2787−2805. [doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010]

[45] Spiess P, Karnouskos S, Guinard D, Savio D, Baecker O, de Souza LMS, Trifa V. SOA-Based integration of the Internet of things in enterprise services. In: Proc. of the Web Services. Los Angeles, 2009. 968−975. [doi: 10.1109/ICWS.2009.98]

[46] Int'l Telecommunication Union UIT. ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things. 2005. http://www.itu.int/pub/S-POL-IR.IT-2005

[47] González GR, Organero MM, Kloos CD. Early infrastructure of an Internet of things in spaces for learning. In: Proc. of the ICALT. 2008. 381−383. [doi: 10.1109/ICALT.2008.210]

[48] Sarma AC, Girão J. Identities in the future Internet of things. Wireless Communications, 2009,49:353−363. [doi: 10.1007/s11277-

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

009-9697-0]
[49] Shiele G, Handte M, Becker C. Pervasive computing middleware. In: Handbook of Ambient Intelligence and Smart Environments. 2010. 201−227. http://cs.gmu.edu/~jpsousa/classes/895/readings/0201.pdf
[50] Satyanarayanan M. Mobile computing: The next decade. In: Proc. of the 1st ACM Workshop on Mobile Cloud Computing& Services: Social Networks and Beyond. San Francisco, 2010. 1−6.
[51] Beier S, Grandison T, Kailing K, Ranntzau R. Discovery services—Enabling RFID traceability in EPC global networks. In: Proc. of the Int'l Conf. On Management of Data COMAD 2006. 2006.
[52] OSGi Alliance. RFC 119 specifications. 2009. http://www.osgi.org/Specifications/HomePage
[53] Magid Y, Adi A, Barnea M,Botzer D, Rabinovich E. Application generation framework for real-time complex event processing. In: Proc. of the Computer Software and Applications. Turku, 2008. 1162−1167. [doi: 10.1109/COMPSAC.2008.146]
[54] Luckham DC. The Power of Events: An Introduction to Complex Event Processing in Distributed Enterprise Systems. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001.
[55] Paschke A, Kozlenkov A. Rule-Based event processing and reaction rules. In: Proc. of the Rule Interchange and Applications. 2009. 53−66. [doi: 10.1007/978-3-642-04985-9_8]
[56] Wu E, Diao Y, Rizvi S. High-Performance complex event processing over streams. In: Proc. of the 2006 ACM SIGMOD Int'l Conf. on Management of Data. New York, 2006. 407−418. [doi: 10.1145/1142473.1142520]
[57] Walzer K, Groch M, Breddin T. Time to the rescue-supporting temporal reasoning in the rete algorithm for complex event processing. In: Proc. of the Database and Expert System Applications. 2008. 635−642. [doi: 10.1007/978-3-540-85654-2_53]
[58] Rahman ASMM, Hossain MA, El-Saddik A. Spatial-Geometric approach to physical mobile interaction based on accelerometer and IR sensory data fusion. In: Proc. of the Presented at TOMCCAP. 2010. 28−28. [doi: 10.1145/1865106.1865112]
[59] Abdelgawad A, Bayoumi M. Resource-Aware data fusion algorithms for wireless sensor networks. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012,118:17−35. [doi: 10.1007/978-1-4614-1350-9]
[60] Medaglia CM, Serbanati A. An overview of privacy and security issues in the Internet of things. In: Proc. of the TIWDC 2009. Pula, 2009. [doi: 10.1007/978-1-4419-1674-7_38]
[61] Mayer CP. Security and privacy challenges in the Internet of things. In: Proc. of the WowKiVS 2009, Vol.17. 2009. 1−12.
[62] Yang G, Xu J, Chen W, Qi ZH, Wang HY. Security characteristic and technology in the Internet of things. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural), 2010,30(4):20−29 (in Chinese with English abstract).
[63] Ding B, Wang HM, Shi DX. An adaptive software architecture style for pervasive computing. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2009,20:113−122 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/09014.htm
[64] Dean J, Ghemawat S. MapReduce: Simplified data processing on large clusters. Communications of the ACM, 2008,51(1): 107−113.

附中文参考文献:

[8] 廖备水,李石坚,姚远,高济.自主计算概念模型与实现方法.软件学报,2008,19(4):779−802 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/779.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.00779]
[12] 王怀民.软件中间件.计算机科学技术百科全书.第 2 版,北京:清华大学出版社,2005.633−634.
[22] 吴泉源,史殿习.信息系统及其综合集成技术.计算机工程与科学,2009,31(10):1−4.
[30] 周欢云,王伟,张文博.面向云环境的自适应集群调整方法.计算机科学与探索,2011,5(4):347−355.
[35] 王伟,张文博,魏峻,钟华,黄涛.一种资源敏感的 Web 应用性能诊断方法.软件学报,2010,21(2):194−208. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3781.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03781]
[42] 李仁发,魏叶华,付彬,陈洪龙.无线传感器网络中间件研究进展.计算机研究与发展,2008,45(3):383−391.
[62] 杨庚,许建,陈伟,祁正华,王海勇.物联网安全特征与关键技术.南京邮电大学学报(自然科学版),2010,30(4):20−29.
[63] 丁博,王怀民,史殿习.一种面向普适计算的适应性软件体系结构风格.软件学报,2009,20:113−122. http://www.jos.org.cn/1000-9825/09014.htm

吴泉源(1942−),男,上海人,教授,博士生导师,主要研究领域为分布计算软件,海量数据处理,人工智能与专家系统.
E-mail: quanyuan.wu@gmail.com

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn