第 43 卷　第 11 期　　计　算　机　工　程　　2017 年 11 月
Vol. 43　No. 11　　Computer Engineering　　November 2017

·先进计算与数据处理·　　文章编号：1000-3428(2017)11-0001-07　　文献标志码：A　　中图分类号：TP39

基于个人计算机的智能家居边缘计算系统

宋朋涛，李　超，徐莉婷，梁晓峣

（上海交通大学 计算机科学与工程系，上海 200240）

摘　要：考虑边缘计算的作用与智能家居的需求，以节约计算资源及提高计算资源利用率为前提，将边缘计算应用于智能家居环境，基于个人计算机平台构建智能家居边缘计算系统。利用现有的虚拟化、容器等技术将多种云服务汇聚到个人计算机平台，形成本地的辅助计算单元，为用户提供边缘计算服务。通过服务管理程序与智能网关的协同工作，设计节能调度算法，实现系统节能管理。测试结果表明，在计算资源有限的情况下，该系统相比单纯使用云计算系统可提供更高的服务质量及更好的扩展性，且易于部署和管理。

关键词：边缘计算；云计算；个人计算机；物联网；智能家居

中文引用格式：宋朋涛，李　超，徐莉婷，等. 基于个人计算机的智能家居边缘计算系统[J]. 计算机工程，2017，43(11)：1-7.

英文引用格式：SONG Pengtao，LI Chao，XU Liting，et al. Edge Computing System for Smart Home Based on Personal Computer[J]. Computer Engineering，2017，43(11)：1-7.

Edge Computing System for Smart Home Based on Personal Computer

SONG Pengtao，LI Chao，XU Liting，LIANG Xiaoyao

(Department of Computer Science and Engineering，Shanghai Jiaotong University，Shanghai 200240，China)

【Abstract】Considering the benefits of edge computing and the demand of smart home，this paper applies edge computing to smart home environment at the premise of saving computing resources and improving computing resources utilization. A system based on personal computer is constructed to provide edge computing service for smart home environment. By using existing technologies such as virtualization and container，this system can converge cloud services on the personal computer platform，acting as a local computing unit to provide edge computing service for users. And energy-saving and scheduling algorithm is designed to implement system energy-saving management by making service management programs and smart gateway work together. Test results show that the system is easy to deploy and manage and it can provide better service quality and scalability with limited computing resources compared with simply using cloud computing system only.

【Key words】edge computing；cloud computing；personal computer；Internet of Things(IoT)；smart home

DOI：10.3969/j. issn. 1000-3428. 2017. 11. 001

0　概述

信息技术的发展推动物联网进入了一个高速发展的时期，越来越多的智能化设备开始进入到人们的日常生活中，如智能手环、智能摄像头等。但是由于硬件资源的限制，这些智能化的设备通常需要相应的云计算基础设施为用户提供服务[1]。在可以预见的未来，大量的智能设备将接入到互联网中，更高的带宽和更多的服务器资源将成为必不可少的需求[2-3]。现有的云计算是一种集中式的服务，资源集中在若干个数据中心，但这种模式不适合为未来大量的物联网设备同时提供服务[4]。将资源分散化，以在用户的邻近区域为用户提供服务的计算模式作为一种发展趋势，被认为更适合物联网的发展需求[4]。该计算模式称为边缘计算或雾计算[5-6]，其主要特点是提供一种数据就地处理的计算服务，使智能设备产生的数据在本地进行处理。

智能家居是物联网的一个重要应用场景[7-8]，随着物联网的发展，智能家居环境中会出现越来越多的智能化设备，如智能监控、智能动作识别等。通常这些智能化设备仅具备数据采集的能力，而不具备数据分析的能力，相应的数据分析任务由云计

基金项目：国家自然科学基金(61202026，61332001，61502302)。
作者简介：宋朋涛(1991—)，男，硕士研究生，主研方向为云计算、计算机系统结构；李　超，副教授；徐莉婷，工程师；梁晓峣，教授。
收稿日期：2016-09-29　　修回日期：2016-12-07　　E-mail：ptsong@ sjtu. edu. cn

算服务来完成。该方式需将数据传输到远程进行处理,存在以下问题:数据传输占用带宽,数据传输导致延迟,用户需将隐私数据交给第三方服务提供者,未来的网络架构必须为应对大量的网络需求进行升级。但在实际应用中有很多的数据可以在本地完成处理,如人脸识别、语音识别等。通过将部分数据在本地处理,可在一定程度上解决以上问题。因此,边缘计算在智能家居中有很大的应用价值和发展空间。

文献[9]论述基于云计算的智能家居系统,表明云计算在智能家居方面的重要作用,但是云计算存在一些不可避免的缺点。文献[10]分析边缘计算的优缺点及重要作用,并举例说明其在智能家居方面的应用。文献[11]提出一个基于智能网关的智能家居系统,通过智能网关将多个服务进行集成,这是一种边缘计算模式,但由于网关的硬件资源限制,该方法无法充分发挥边缘计算的优势。文献[12-13]提到边缘计算在智能健康领域的应用,在未来的智能家居环境下,智能健康是一个重要的应用方向,边缘计算更能充分发挥作用。但是这些方案均需要配置相应的硬件资源,无法快速实现部署和应用。基于此,本文以智能家居环境为背景,提出一个将边缘计算应用到智能家居环境中的创新解决方案,以个人计算机为平台构建智能家居边缘计算系统。

1 系统可行性及优缺点分析

利用个人计算机提供计算服务的示意图如图 1 所示,基本实现方法是通过将多个云服务汇聚到个人计算机平台,形成一个本地的辅助计算单元。但是个人计算机通常是作为服务使用者的角色,这种资源在智能家居环境下有潜在的应用场景,同时存在很多需要解决的问题,本节将在以下 3 个前提下分别从可行性、效益、存在的问题方面进行探讨:1)保证不影响或尽可能地减少对原个人计算机使用者的影响;2)保证服务质量不降低或至少不会损害用户体验;3)保证系统易于部署和管理。

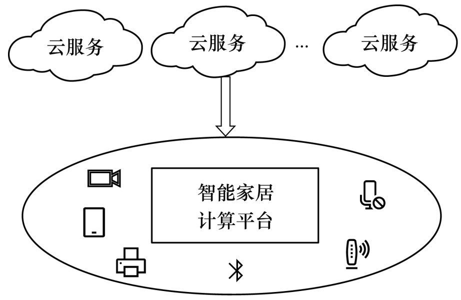

图 1 利用个人计算机提供智能家居计算服务的示意图

1.1 可行性分析

首先,从资源可用性角度考虑,个人计算机计算能力较强、价格低廉,已十分普及。随着移动设备的出现,个人计算机的利用率大大降低,计算资源被闲置[14]。因此,利用个人计算机为智能家居环境提供服务可以充分发挥个人计算机的潜力。

其次,从设备性能的角度考虑,必须在保证服务质量的前提下,合理利用设备。一般来说,无论是从扩展性角度还是单个设备而言,个人计算机的计算性能与可用性差于服务器。但是考虑到智能家居环境下,由于单个个人计算机设备所服务的对象仅是设备拥有者本身的家庭,服务的使用者和使用数量十分有限,因此在特定的应用场景下可以满足用户的需求。并且系统本身所考虑的是将个人计算机设备作为云服务的补充,在本地资源不足时,云服务自动承担相应的计算任务。因此,该系统可以保证服务质量。

最后,从软件技术上来讲,需要一套合适的系统,能够将用户的个人计算机设备扩展为服务提供者。由于使用目的不同,个人计算机设备的软件环境与服务器有相当大的差别。一般情况下,个人计算机大多使用 Windows 操作系统,服务器大多使用 Linux 操作系统,多数服务软件都需要 Linux 的运行环境。除了软件环境本身,软件的隔离也是一个必须要考虑的因素。用户的个人计算机设备通常安装一些常用的办公软件、娱乐软件,而服务软件本身可能要依赖很多其他的软件包。如果把用户的使用环境与服务环境混合,那么将会对用户造成很大的干扰。在现有的技术下,可以使用虚拟机[15]进行这一层面的隔离。考虑到多种服务可能共存的情况,需要有另一层面的隔离,将不同的服务隔离开来。安装多台虚拟机的方法不可取,因为这样会占用过多个人计算机的资源,对用户造成不利的影响。基于现有的技术,可以使用容器技术[16]来达到这一目的。使用容器技术不仅可以将不同的服务进行隔离,同时也可以更好地实现服务的部署和管理,服务提供方配置好相应的服务后,以镜像的方式推送给用户即可完成服务软件的安装和更新,无需用户干预。对于普通用户而言,由于配置复杂的软件环境是不可接受的,因此通过使用虚拟机与容器技术,普通的用户无需专业知识,便能够使用相应的服务。所以,利用现有技术将相应的软件构建成一个系统,可以有效利用个人计算机为智能家居提供计算服务。

1.2 效益分析

利用个人计算机提供服务的方法,广泛应用于 P2P 领域,如 P2P 下载[17]、志愿计算[18]等,但是此类应用仅是为了构成一个分布式系统,服务所面向的

对象并不是个人计算机拥有者本身。此类应用场景从侧面反映出了个人拥有的资源具有很高的潜在利用价值,以个人计算机为平台为智能家居系统提供服务具有很大的潜在价值。从服务提供者的角度考虑,如果一部分的计算任务在个人计算机上完成处理,那么所需的云服务便大大减少,节约了服务成本。当用户规模扩大时,服务规模无需线性增加,便可满足用户的需求,服务扩展性将会更强。

对于用户而言,增加了一定的设备运行时间,在与服务提供者协调的情况下,使用自己的设备为自己提供服务。在这种情况下,用户数据可以不必交由第三方保存,对于一些私密数据完全可以保存在本地。当用户有特别的需求时,可以根据自己的需求配置相应的硬件,然后定制相应的服务。在未来的智能家居环境下,会出现各种各样的智能化设备,仅使用云计算服务时,不同的智能设备的服务提供方不同,要实现设备间的智能交互将十分困难。但是若以用户的个人计算机为平台提供服务,不同的服务将位于同一平台下,实现智能交互将变得更加容易。因此,若以个人计算机为统一的智能家居计算平台,则不仅能保护用户隐私,而且更加容易实现设备间的智能交互。

1.3　存在问题

虽然利用个人计算机为个人用户提供服务时,不需要过多考虑扩展性问题,但是相比集群式服务器,单个计算机的功耗问题将会更加突出。首先,个人计算机的功耗一般在 50 W ~ 450 W,实际功耗依据任务的负载和所配置的硬件而异,差别很大。其次,全天候的工作不仅耗费大量电能,同时也会降低设备寿命。考虑到智能家居环境中,智能设备并不需要不间断的一直使用服务。因此,本文设计了一种节能算法控制能耗,在不需要的时候,使设备休眠。

安全问题也是一个重要的方面。个人计算机通常不具备数据中心的异地数据备份功能,而且容错性也较差,仅依靠个人计算机提供的服务无法保证百分之百的可用性。为了提高服务的可用性,必须能够在本地服务与云服务之间进行切换,在本地服务不可用时,使用云服务。同时,必须有一定的策略实现本地数据在云端的备份,保证数据不丢失。另一个安全问题是防止本地的设备被入侵或攻击,个人计算机通常不具备很强的防护入侵能力,一般也不会面对服务器所面对的强大威胁,但是适当的防护策略是必不可少的。因为一般的个人计算机设备通常处于内网,使用其提供的服务对象也是内网设备,所以可以配置适当的路由规则防止外部设备对内网服务的发现与访问。智能家居的发展必然会对安全性有更高的要求,同时内网设备的安全性也会得到提升,更加先进的网络防护措施得到应用后,使用个人计算机提供服务的安全性也会更加有保证。

2　系统设计与实现

基于以上各方面的分析,设计如图 2 所示的利用个人计算机提供边缘计算服务的智能家居系统。该系统由云计算服务、边缘计算服务、智能网关、智能设备组成。除边缘计算服务外,其他部分与现有的智能家居系统基本类似。云计算服务需要额外提供镜像服务,用于安装及更新提供边缘计算服务的软件。智能网关需要参与边缘计算服务的部分控制任务,一方面用于服务选择,另一方面用于节能管理。由于不同的智能设备可能采用不同的通信技术,因此需要一个智能网关直接与智能设备进行通信,并为智能设备提供使用其他服务的接口以及智能设备之间的交互功能接口。

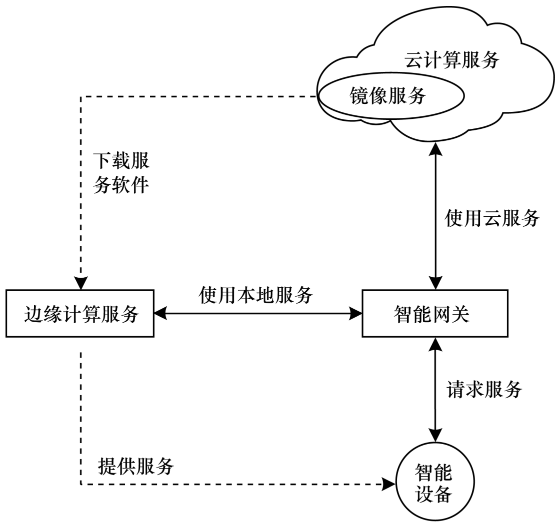

图 2　智能家居系统

该系统的设计重点是利用个人计算机设备提供边缘计算服务,通过将部分任务在本地完成处理,减轻对云计算服务的需求。边缘计算服务的软件框架如图 3 所示,分为 2 个部分,包括运行在 Windows 系统下的访问控制程序和运行在虚拟机 Linux 系统下的服务管理程序。另外,为达到节能管理的目的,服务管理程序与智能网关协同工作,实现了一个节能调度算法。

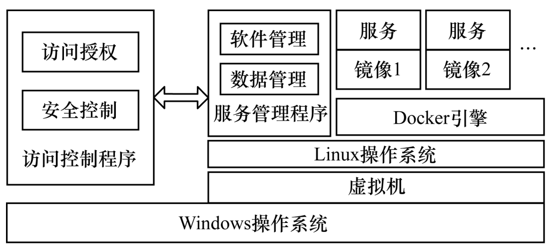

图 3　利用个人计算机提供服务的软件框架

2.1 服务管理程序

服务管理程序需完成服务软件管理和用户数据管理任务。服务软件管理包括服务软件的安装、更新以及启动和停止。考虑到性能和管理的需求,采用轻量级的基于容器的虚拟化技术,实现上选择成熟的 Docker[19] 容器技术。容器是利用 Linux 内核的名字空间和控制组实现的一种软件隔离和资源控制技术,该技术兼顾了虚拟机的隔离特性和虚拟化的开销问题,可以在占用极少资源开销的情况下实现一种比较理想的软件隔离。Docker 是一种成熟的容器解决方案,通过将软件及其相关依赖打包,提供方便的软件部署服务,软件以镜像的方式呈现。服务提供者通过将相应的软件打包成镜像,以镜像的形式提供给用户,用户无需经过复杂的配置便可以使用相应的服务软件。服务管理程序通过与云端的软件管理服务交互,实现本地的软件安装和更新。本地服务的启动和停止通过与访问控制程序的交互实现:在需要使用相应服务时,以容器的形式启动所需服务;当不再需要使用服务时,结束容器并停止相应的服务。

用户数据管理包括本地数据存储、维护和云端数据备份。容器的状态不是实时保存的,对容器的修改必须要提交之后才会得到保存,因此使用 Volume 容器进行数据存储。该方式将软件与数据分开,便于软件的更新。同时,备份数据时,将相应的 Volume 导出即可。由于个人计算机并不总是可靠的,因此使用智能网关做数据备份,数据每隔一段时间进行一次同步。同时,云端作为一种更可靠的存储空间,对于非敏感数据在本地服务与云服务之间也进行同步,以保证在本地计算服务不可用时,能够使用云端提供的服务。

2.2 访问控制程序

访问控制程序用于控制智能设备对本地服务的访问,包括访问授权和安全控制。访问授权是指控制何种程序可以访问何种本地服务,为保证数据的安全性,禁止未被授权的设备请求访问相应的服务,新安装的设备需要通过在访问控制程序中注册后才能获得本地服务的使用权限,所能访问的服务也必须先注册,然后才能访问。该方式可以避免未被授权的设备访问其他设备的数据,实现设备对特定服务的注册以及本地服务的自动部署。

安全控制指的是为防止个人计算机在提供服务时遭受攻击而采取的策略。通常来讲个人计算机仅作为服务使用者,不向外部设备提供服务。为实现用个人计算机提供服务,同时减少被入侵的可能性,对于网络安全做严格控制,仅允许特定的局域网地址和端口访问本地特定端口,每次的服务端口随机分配,实现上使用 Windows 的命令行工具 netsh advfirewall。通过该方式可以阻止一部分的远程攻击,但是并不能完全杜绝,因此需要研究更高级的防护措施。

在验证访问安全后,访问控制程序与服务控制程序进行通信,启动相应的服务,允许外部设备对服务的访问。服务完毕,停止相应的服务,并保存数据。访问控制程序采用多线程设计,允许多台设备同时请求服务。

2.3 系统节能调度算法

数据中心一般会采取适当节能策略,以降低整体功耗,使用个人计算机作为服务器时可以参考数据中心的节能策略。直接的方法是按需提供服务,在没有请求时使个人计算机休眠,需要时再唤醒。但是在设备休眠时,无法使用本地的服务,此时必须切换到云端服务,同时需要将所需的数据传输到云端。问题的关键是何时休眠与唤醒,休眠时间过长会导致本地服务不可用,休眠时间太短会导致不必要的能耗。因此,为实现一个合理的休眠策略,本文系统利用智能设备的信息检测结合静态的定时休眠方法,设计如图 4 所示的节能调度算法。首先,系统有一个定时的休眠策略,每隔一段时间检测一下当前系统是否有任务需要处理,任务处理完毕后,进入休眠状态,然后进入下一周期。其次,智能网关利用智能设备收集到的信息,如声音、红外传感器等,判断室内是否有人或紧急事件,在有人在室内或有紧急事件时保持本地服务的持续运行。通过综合使用定时策略与智能判断策略,实现一个服务可用性高且节能的管理方案。

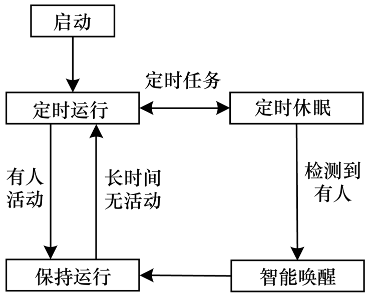

图 4 节能调度算法

3 系统测试与性能评估

以上文设计及实现的系统为基础,选取一些在智能家居环境下用到的设备与应用,搭建如图 5 所示的智能家居系统,对系统性能进行测试分析,并比较基于云计算的解决方案与基于边缘计算的解决方案的优缺点。

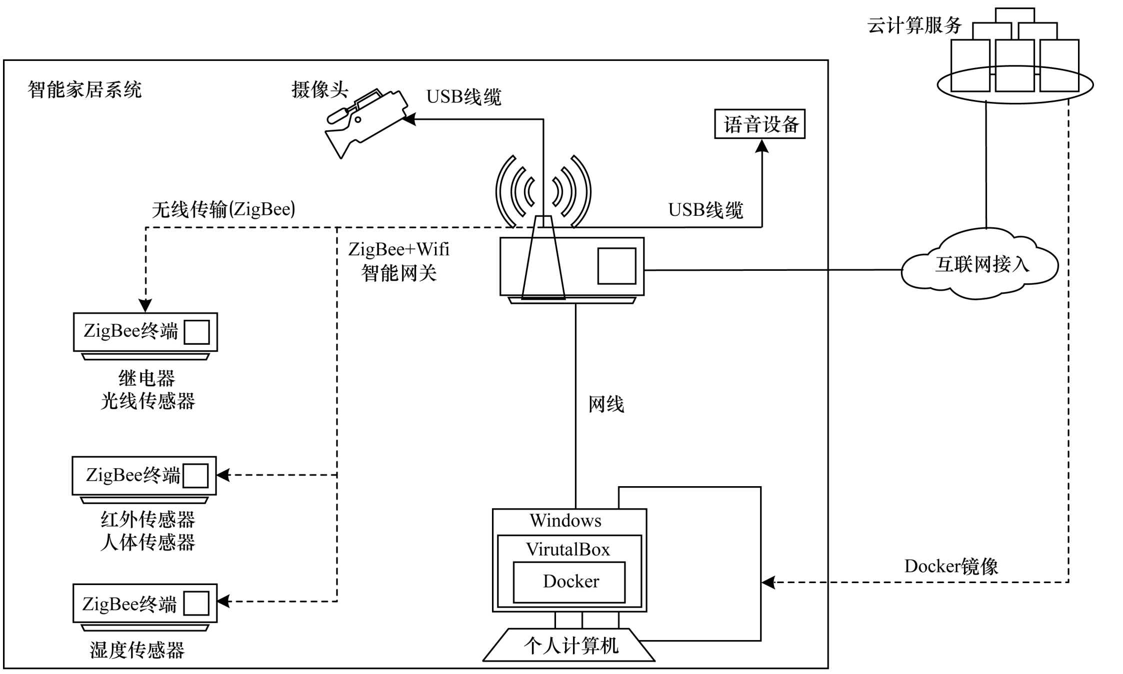

图 5　智能家居系统实现

3.1　软硬件平台描述

该系统由云计算服务、边缘计算服务、智能网关、智能设备构成。云计算服务由一台服务器构成,该服务器配置的处理器为 Intel Xeon E5-2650,具有 16 个逻辑核心,内存大小为 32 GB,运行 Ubuntu 14.04操作系统,安装有 Docker 软件环境,同时提供 Docker Registry 服务,该服务用于向边缘服务器提供应用所需服务的镜像文件。边缘计算服务部署在一台个人计算机上,该计算机配置 Intel Core i5-4960 四核处理器,拥有 8 GB 内存,运行 Windows 10 操作系统,使用 VirtualBox 虚拟机,虚拟机运行 Boot2docker 操作系统,服务以容器的形式运行在虚拟机上。实验时,统一为虚拟机分配 2 个处理器核心,内存分别采用 1 GB(配置 1)和 2 GB(配置 2) 2 种配置。智能网关使用 Ralink RT5350 硬件,运行 OpenWrt 系统,支持以太网、WiFi 和 ZigBee 网络。智能设备包括摄像头、语音设备、红外设备、光线传感器、湿度传感器等。

3.2　边缘服务与云服务结果对比

本文智能家居系统的基本实验环境中选取了一些智能家居领域可能会出现的应用,包括人脸识别、语音识别、视频压缩及多种传感器设备,搭建基于个人计算机的边缘计算服务和与之相对应的云服务,模拟一个基本的智能家居系统。从延时、带宽、成本、单任务性能及系统扩展性等角度对比基于个人计算机的边缘服务和云服务。

3.2.1　延时、带宽以及成本比较

基于个人计算机的边缘服务相比云服务最直接的优势是低延迟和高带宽,在家庭局域网内,本地服务与应用同处一个局域网,可以保证足够低的延时和足够高的带宽,而云服务一般由大型的数据中心提供,在空间上远离用户,延时会相对较高,同时带宽也会相对较低。表 1 显示了一般情况下的本地服务与云服务的延时、带宽对比,体现出本地服务相对于云服务在延时、带宽上的优势。该优势对于实时性要求较高的应用,如虚拟现实、动作识别等有较大影响,因此采用本地化的基于个人计算机的边缘服务更为合适。

表 1　延时与带宽对比

服务类型	延时/ms	带宽/(Mb·s^{-1})
边缘服务	<1	>100
云服务	>10	<20

由于边缘服务基于个人计算机,因此服务提供方无需部署过多的服务器资源,仅需部署适量的资源作为边缘服务的补充即可。由于服务成本依赖于所提供的服务,因此较难估计,但从整体上而言,服务提供方所需要的云计算资源大大减少,服务的价格也会适当降低。对于用户而言,将空闲的设备利用起来,成本是一定的电费,这部分费用因服务费用的降低得以弥补,同时用户也能获得更优的服务。因此,以个人计算机为平台部署边缘计算系统,服务提供方能够降低成本,用户能够在付出少量费用的情况下获得更好的服务。

3.2.2　系统单任务性能对比

基于个人计算机提供服务的前提是在服务性能上能满足用户的需求,考虑单个应用对性能的需求,首先对系统单任务进行性能测试,选择 2 种本地服

务硬件配置和 1 种云服务硬件配置,在每种硬件配置下分别单独运行一种应用,结果以云服务的任务处理时间为准进行归一化,结果如图 6 所示。

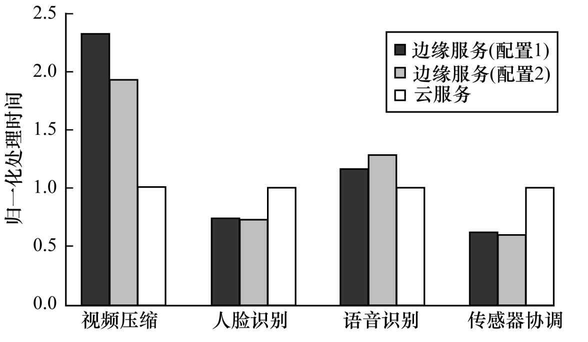

图 6 单任务处理时间对比

图 6 表明对于不同的任务,结果有很大的差异。视频压缩和语音识别应用本地的耗时要略多于云服务,而人脸识别和传感器数据处理,本地的结果优于云服务。原因是不同的应用所需的资源不同,云服务相对于本地有更多的处理器和内存,而本地服务有更高的带宽和较低的网络延迟。对于同一种应用而言,不同配置的本地服务也会导致略微的差异,但是除了视频压缩应用以外,对其他应用的影响不明显。总体来说,通过分配适当的个人计算机资源为智能家居应用提供边缘计算服务,在应用对硬件资源需求不是非常高的情况下,本地化的边缘服务是可以满足应用需求的,同时对于某些应用(低延时、高带宽需求),相对云服务有一定的优势。

3.2.3 系统扩展性对比

以个人计算机为平台提供边缘计算服务的另一个优势是系统规模随用户的规模扩大而扩大,但是服务提供方却不需要随之线性增加服务器的数量。大量的计算任务在以个人计算机为平台的边缘系统上完成处理,服务提供方仅需要部署适当的服务器以提供数据存储服务及少量的计算服务。图 7 对比了多用户情况下固定云服务资源和使用边缘服务时的系统扩展性。

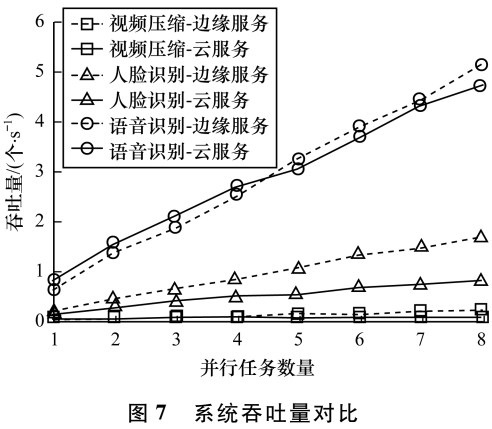

图 7 系统吞吐量对比

在本文实验中,基于个人计算机的系统是以使用者数量为规模扩展的,每一个智能家居系统均配备相应的本地边缘计算系统,因此扩展性是线性的,而云服务器资源是固定的,所有用户共享全部的云服务资源。由图 7 可知,使用本地边缘服务时,系统的吞吐量随着并行任务数量呈线性增长;使用云服务时,系统的吞吐量随任务数量增加而呈现递减趋势。对于语音识别应用而言,区别不是十分明显,原因是该任务所占用的处理器资源较少。而对于人脸识别、视频压缩类应用而言,区别很大,因为这类任务要占用较多的硬件资源。可见,以个人计算机为平台部署智能家居系统相对于单纯的采用云计算而言,能在资源有限的情况下获得更好的扩展性。

3.3 节能调度算法应用结果分析

本文采用节能算法的目的是降低个人计算机的能耗,过多的能耗会给用户带来更高的成本,同时会浪费大量的资源。以个人计算机为平台提供服务,节能调度功能是必不可少的,通过采用定时休眠与智能控制的策略可以显著降低能耗。

图 8 显示了在采用不同策略时 24 h 内的能耗对比,横坐标中的策略 1 ~ 策略 4 分别表示本地服务每小时的工作时长为 60 min/h,30 min/h,15 min/h 和 10 min/h。当系统持续保持运行时,功耗非常高,采取不同的定时休眠策略可以降低功耗。智能控制这一组数据是采用 10 min/h 的定时休眠策略,并在有需求时通过传感器设备唤醒服务,在节约电能的同时保证服务的可用性。相比仅采用 10 min/h 的定时策略,采用节能调度算法进行智能控制的方法功耗略有上升,但可以保证本地服务更高的可用性。

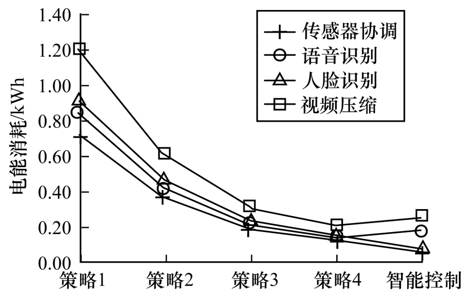

图 8 使用不同定时休眠策略时 24 h 内的电能消耗

上述实验结果反映的是在当前配置下的结果,在真实环境中会有较大差异。总体而言,利用个人计算机实现边缘计算服务是可行的,对于不同的应用可能导致较大的结果偏差,系统部署时,需要根据应用特点考虑使用何种服务。在使用边缘服务器后,系统整体扩展性会得到极大的提升,在未来更大规模的应用

场景下将更有优势。同时,使用一些智能控制方法,可以节省不必要的功耗,降低利用个人计算机提供边缘计算服务的成本,增加对用户的吸引力。

4　结束语

为应对物联网的发展需求,边缘计算是未来云计算模式的发展趋势。更多智能设备的出现,必然需要统一的管理平台,为设备提供计算服务以及实现设备间的复杂交互行为,而本地化的系统是较为理想的选择。本文以个人计算机为平台,设计适用于智能家居环境的边缘计算服务系统,构建一个基本的智能家居环境并搭建原型系统,通过设计节能调度算法控制系统能耗达到较好的节能效果,为智能家居系统设计提供了参考。下一步将对本文系统的可用性、安全性等方面进行优化,同时参考智能家居和边缘计算的发展趋势,设计更实用的智能家居边缘计算系统。

参考文献

[1] AAZAM M,KHAN I,ALSAFFAR A A,et al. Cloud of Things: Integrating Internet of Things and Cloud Computing and the Issues Involved[C]//Proceedings of the 11th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology. Washington D. C., USA: IEEE Press,2014:414-419.

[2] GUBBI J,BUYYA R,MARUSIC S,et al. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions [J]. Future Generation Computer Systems,2013,29(7):1645-1660.

[3] 徐琳莹. 基于云计算的物联网运营管理平台研究[D]. 长春:吉林大学,2013.

[4] WANTR, SCHILIT B N, JENSON S. Enabling the Internet of Things[J]. IEEE Computer,2015,48(1):28-35.

[5] BONOMI F,MILITO R,ZHU J,et al. Fog Computing and Its Role in the Internet of Things[C]//Proceedings of Workshop on Mobile Cloud Computing. New York, USA:ACM Press,2012:13-16.

[6] BONOMI F, MILITO R, NATARAJAN P, et al. Fog Computing: A Platform for Internet of Things and Analytics[M]. Berlin,Germany:Springer,2014.

[7] SOLIMAN M, ABIODUN T, HAMOUDA T, et al. SMART HOME:Integrating Internet of Things with Web Services and Cloud Computing[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Cloud Computing Technology and Science. Washington D. C., USA:IEEE Press,2013:317-320.

[8] 童晓渝,房秉毅,张云勇. 物联网智能家居发展分析[J]. 移动通信,2010,34(9):16-20.

[9] 吴佳兴,李爱国. 基于云计算的智能家居系统[J]. 计算机应用与软件,2013,30(7):240-243,314.

[10] YI S, HAO Z, QIN Z, et al. Fog Computing: Platform and Applications [C]//Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Hot Topics in Web Systems and Technologies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015:73-78.

[11] WILLIS D F,DASGUPTA A,BANERJEE S. ParaDrop: A Multi-tenant platform for Dynamically Installed Third Party Services on Home Gateways[C]//Proceedings of 2014 ACM SIGCOMM Workshop on Distributed Cloud Computing. New York,USA:ACM Press,2014:40-44.

[12] STANTCHEV V, BARNAWI A, GHULAM S, et al. Smart Items, Fog and Cloud Computing as Enablers of Servitization in Healthcare[J]. Sensors & Transducers, 2015,185(2):121-125.

[13] NANDYALA C S,KIM H K. From Cloud to Fog and IoT-Based Real-Time U-Healthcare Monitoring for Smart Homes and Hospitals[J]. International Journal of Smart Home,2016,10(2):187-196.

[14] KAWSAR F,BRUSH A J. Home Computing Unplugged: Why,Where and When People Use Different Connected Devices at Home [C]//Proceedings of 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. New York,USA:ACM Press,2013:627-636.

[15] WATSON J. Virtualbox:Bits and Bytes Masquerading as Machines[J]. Linux Journal,2008(166):1-10.

[16] SOLTESZ S,POTZL H,FIUCZYNSKI M E,et al. Container-based Operating System Virtualization: A Scalable, High-performance Alternative to Hypervisors[C]//Proceedings of ACM SIGOPS/EUROSYS European Conference on Operating Systems Review. New York, USA: ACM Press, 2007:275-287.

[17] POUWELSE J, GARBACKI P, EPEMA D, et al. The Bittorrent P2P File-sharing System: Measurements and Analysis [C]//Proceedings of International Workshop on Peer-to-Peer Systems. Berlin, Germany: Springer, 2005:205-216.

[18] CUNSOLO V D,DISTEFANO S,PULIAFITO A,et al. Volunteer Computing and Desktop Cloud:The Cloud@Home Paradigm [C]//Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009:134-139.

[19] MERKEL D. Docker: Lightweight Linux Containers for Consistent Development and Deployment [J]. Linux Journal,2014(239):2-10.

编辑　陆燕菲