

面向普适计算的自适应技术研究

李 允¹, 罗 蕾², 熊光泽²

(1 西南交通大学计算机与通信工程学院, 四川成都 610031; 2 电子科技大学计算机科学与工程学院, 四川成都, 610054)

摘 要: 在普适计算领域中, 终端设备所能够使用的资源是动态变化的, 要求终端具有自适应处理能力, 能够根据资源的变化作出相应的响应. 文中以嵌入式操作系统为基础, 提出了终端自适应处理的体系结构, 并详细分析了采用模糊控制理论的应用自适应设计方法. 在嵌入式浏览器的应用中, 具有自适应处理策略的浏览器在所需要的资源发生变化时, 能够获得比较稳定的上网性能.

关键词: 普适计算; 自适应系统; 模糊控制; 嵌入式操作系统; 嵌入式浏览器

中图分类号: TP316; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 037222112 (2004) 050740205

The Adaptive Technology for Pervasive Computing

LI Yun¹, LUO Lei², XIONG Guangze²

(1 School of Computer and Communications Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2 Computer Science and Engineering College, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: In pervasive computing, terminals should be adaptive to changes in the supply of available resources and respond to these dynamical and unpredictable changes. The paper proposes an adaptive architecture of terminals and analyzes the design method of adaptive application using fuzzy control theory. In the demonstration of an embedded browser application, the browser could obtain stable web browsing performance even if the needed resources changes dynamically.

Key words: pervasive computing; adaptive system; fuzzy control; embedded operating system; embedded browser

1 引言

随着计算机技术的深入发展, 计算已不再是局限于桌面系统的分离行为, 网络计算和移动计算将很快成为人们日常生活的一部分^[1]. 普适计算的目的就在于突破基于桌面系统的计算模式, 使人们能随时随地获得计算服务. 在普适计算模式下, PDA 和移动电话、家用电器等通用设备, 以及用于医疗、军事、娱乐等方面的专用设备将协同工作, 以快速、高效和便捷的模式为人们提供服务. 为满足服务使用的便捷性, 普适计算设备应该能够工作于移动环境. 因此, 同固定设备相比, 普适计算设备的局限性主要表现在资源有限和安全性比较低上. 资源有限性主要是由于终端在设计方面存在以下需求: 功耗低, 重量轻和物理尺寸比较小. 根据这些需求设计出来的设备所拥有的资源在以下方面存在不足: 磁盘容量, 物理内存大小, 处理能力, 缓存大小和屏幕大小. 尽管随着技术的发展, 普适计算终端的资源会得到不断增强, 但固定设备同样也能从技术发展中获益, 且固定设备不用考虑大小, 功耗和重量等约束^[2]. 因此, 资源有限性是普适计算终端的固有特性, 技术的发展过程也不能弥补它同固定设备之间的差距. 终端的安全性比较低, 主要是由于终端的移动性造成的. 由此, 普适计算

终端不能作为数据的可靠存放地方. 一方面, 有限的资源很难用来存储所有需要的内容. 另外, 从安全性考虑, 也不宜把数据长期存放在终端上. 因此, 数据应该保存在拥有丰富资源, 并具有高安全性的服务器上, 移动设备可以访问或是维护服务器上的数据, 以客户端设备的形式存在.

除终端本身的局限性外, 终端还受到所处网络环境的限制, 网络的连接性和远程资源对终端来说都是动态变化的. 根据环境的变化, 终端可能使用有线网络, 更多的情况则是使用无线网络. 同有线网络相比, 无线网络通常具有低带宽和高延迟的特性. 并且, 由于物理实现和经济方面的考虑, 无线网络由于基站信号强弱的限制, 基站覆盖区域内的移动终端不可能获得统一的高质量网络服务^[3,4]. 对终端来说, 在移动环境中所得到的网络连接特性可能是强连接, 也可能是弱连接, 甚至失去同网络的连接. 终端所能得到的远程资源也是变化的, 当工作于学校或办公环境时, 所得到的打印服务可能是高分辨率、彩色的; 若工作于公共场所, 得到的可能是低分辨率的黑白服务. 因此, 终端既不能作为数据的可靠存放场所, 也不能指望得到持续的高质量的网络服务. 这说明, 普适计算终端的环境是变化的, 可得到的资源, 也是变化的, 并且这种变化是动态的, 不可预期的. 这就要求终端具有自适应的环境处理

能力^[5,6],根据资源的变化做出相应的响应,当资源丰富时,为应用提供高质量的服务,当资源缺乏时,则提供降级服务。

关于自适应系统, Coda^[7]采用了系统自适应模型, S M2 Canne^[8]的 RLM 和 J Inouye^[9]的视频播放器则采用了应用自适应模型。若单纯由系统进行自适应处理,不能反映应用的特殊性;单纯由应用进行自适应处理则失去了并行应用共享资源的统一控制点。 Brian D

Noble^[2]提出了图 1 所示用于移动数据访问的系统和应用相协作的自适应模型))) Odyssey。其中, Viceroy 用来监控资源的可获得性,并通过 Up2

call 把资源情况传送给应用进行自适应决策; Interceptor 用来处理 UNIX 文件相关的操作; Warden 用来在系统级提供与特定应用类型相关的功能,但该结构由 4.4BSD UNIX 扩展而来,过分依赖于 UNIX 的特有特性,并且每类应用还需要在系统中添加相应的 Warden 处理模块,不利于处理应用的多样性。另外, Odyssey 还缺乏对自适应应用设计方法的分析。本文分析了基于嵌入式操作系统的、平台无关的终端自适应系统的体系结构,提出了采用模糊控制理论的自适应应用设计方法,并通过嵌入式浏览器对系统的自适应性进行了实验分析。

2 自适应系统体系结构

2.1 具有自适应特性的嵌入式操作系统

嵌入式实时操作系统 Delta OS 是电子科技大学微机所经过八五0和九五0项目研究的结果,其内核主要包括任务管理、内存管理、任务间通信、中断管理和时钟管理等模块,并包含有 GUI,浏览器,文件系统和网络等组件。

为了使普适计算终端能对环境变化作出自适应处理,需要在 Delta OS 中添加自适应处理模块,满足终端的自适应需要。具有自适应特性的嵌入式操作系统 Delta OS 的体系结构如图 2 所示,在 Delta OS 的基础上,主要添加了三个模块:资源监控模块,事件通道注册模块和事件管理模块。资源监控模块监测到普适计算终端的资源发生变化时,从事件通道注册模块获取事件通道的引用,并通过获取到的引用,以事件对象的方式把资源事件发送给事件管理模块中的事件通道,事件通道再使用事件传送机制,最终把反映终端资源变化的事件对象交给应用程序,由应用程序作出自适应处理。体系结构的灵活性在于把事件的传送机制同环境监控模块相分离。这种方式能够有效地隔离应用和监控模块,使应用完全能够以新



图 2 Delta OS 系统的体系结构

的监控方式接收事件信息,而不采用系统所提供的方式来获取环境状态。 Delta OS 采用系统)应用协作自适应模型^[10],系统可以对资源的可用性进行监控,对资源的分配进行决策,并对终端使用的资源进行优化。应用则可以通过系统提供的资源信息,根据应用自身的特性进行决策。

2.1.2 事件管理模块

事件管理模块由事件通道构成,每一个事件通道对应着一系列相近类型的事件。事件通道包括事件处理模块和事件传送模块两部分。事件处理模块的功能主要包括:提供通道信息,事件处理和维持事件日志。通道信息包括通道类型等内容,如网络事件通道对应的类型为网络类型。事件处理模块根据当前系统和应用的情况,对资源的分配进行决策,确定分配给特定应用的资源信息,还可以对实时应用进行资源预留。

为了保存移动环境的状态,事件处理模块需要对事件对象的事件日志进行维护。对于每一种类型的事件,最近的事件对象将被保存下来,直到出现新的同类型事件。当应用注册到通道时,保存的事件对象将按照事件发生的顺序发送给应用,以使应用能够与当前环境状况相适应。

在操作过程中,事件处理模块同事件传送模块进行交互,以把事件对象传送给应用的自适应处理模块。事件传送模块提供实现事件传送的框架结构,通过该模块,能够获取到应用的自适应处理模块的引用序列。事件传送模块按照该序列的顺序,把事件对象传送给引用。传送模块所拥有的引用序列来源于应用向事件通道注册的信息。

2.1.3 事件通道注册管理模块

每个事件通道对应一个名字,该名字用于对通道的引用。在创建事件通道的时候,需要向事件通道注册管理模块注册,由注册模块保证通道名字的唯一性,并为其他模块检索提供对需要的通道的引用。当资源监控模块需要把事件对象传送给事件通道时,就通过注册管理模块获取相应通道的引用。

2.1.4 资源监控模块

资源监控模块用来监控普适计算终端的移动环境,并根据从注册管理模块获取到的关于通道的引用,把获取到的事件对象提供给事件通道。当环境状态变化情况被监测到时,监控模块创建一个新的事件对象,并把该对象传送给事件通道。

资源监控模块能够抑制环境状态的瞬时变化,防止系统的抖动现象。比如,无线通讯网络在发生短暂信号衰减时,会导致网络暂时性地失去连接。在这种情况下,如果根据信号的短暂强弱来作为判断网络连接的依据,其结果将不会满足用户的需要,因为信号很快又会恢复到能够进行正常通信的水平。并且,如果频繁地对瞬时变化进行处理,也会导致系统处于一种不稳定的状态。

2.1.5 具有自适应处理模块的应用

自适应处理模块用来实现应用的自适应策略,典型的自适应策略包括:数据压缩,数据预取,数据缓存,负载分布等内容。通过自适应策略,为应用提供与当前系统资源情况相一致的稳定服务。

在体系结构中,应用的自适应处理模块表示了事件传送的终点。对于需要获取资源信息的应用来说,可以创建一个

自适应处理模块,生成该模块的引用,并把该引用绑定到相应的事件通道.应用在创建自适应处理模块的引用时,就指定相应的事件通道,该通道的引用可以从注册管理模块中获取到.当应用注册到相应的通道后,所关心的资源状态发生变化时,就能够通过资源监控模块和事件通道获取到资源的状态信息.

当事件对象到达自适应处理模块时,应用就会根据事件对象所包含的资源类型和资源的可用量做出响应.

216 自适应系统的工作过程

图3以普适计算终端的网络带宽发生变化为例,通过UML序列图的方式对系统工作过程进行了说明.图中包含Network Bandwidth、Network Monitor、Network Event Manager、Network Delivery Module、Registrar和Browser等六个对象,分别表示网络带宽资源、网络事件监控模块、网络事件处理模块、网络事件传送模块、事件通道注册管理模块和与网络相关的浏览器应用.这些对象分别对应着Resource、RMonitor、EventManager、DeliveryModule、Registrar和App,分别表示普适计算终端的资源、事件监控模块、事件处理模块、事件传送模块、事件通道注册管理模块和终端的应用.图中的箭头表示对象之间为完成所需功能而传递的消息,箭头自上而下的排列,意味着消息发生在时间关系上的先后关系.

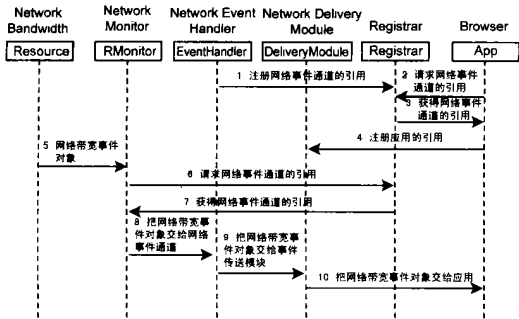


图3 处理网络事件对象的序列图

3 应用自适应决策的设计方法

311 线性自适应决策

在应用的线性自适应决策中,决策结果与资源数量成线性关系.如果用D表示决策结果,用R表示资源数量,则在某一时间t,决策结果D由式(1)的线性函数来确定.

$$D(t)=CR(t) \tag{1}$$

其中,C表示关系系数.当资源数量发生变化时,应用就会得到与资源数量相对应的自适应决策.

在浏览器应用中,如果只考虑网络带宽资源的情况,并把网络带宽转换为[1,3]的整数,数字越大所表示带宽范围的带宽越高.决策结果用[1,3]的整数来表示,其中,1表示不传送图形数据,2表示传送压缩后的图形数据,3表示整个网页内容的无压缩传送.自适应处理就是根据网络带宽来确定传送的网页内容的类型,决策结果与网络带宽之间的关系如表1所示,这种决策就属于线性决策,该决策过程可简单的用式

(2)来表示.

$$D(t)=R(t)$$

表1 网络带宽与决策结果之间的关系

(2)	网络带宽	决策结果
312 非线性自适应决策	1: 低带宽	1: 不传送图形数据
	2: 中带宽	2: 传送压缩后的图形数据
	3: 高带宽	3: 整个网页内容的无压缩传送

在实际的应用

中,自适应决策与资源数量之间一般都不是线性关系,而表现为一种非线性关系.对于浏览器来说,如果考虑CPU和网络带宽两种资源情况,其自适应决策可能表现为如下自然语言描述:

- 如果带宽比较高,则
无压缩传送整个网页的数据
- 如果带宽不高,且CPU比较空闲,则
压缩传送网页中的图形数据
- 如果带宽不高,且CPU不太空闲,则
不传送网页中的图形数据,只传送图形的替代文字

对于这种描述,用模糊控制理论来处理自适应决策是非常适合的.因此,对于这种非线性的自适应决策情况,可以采用模糊控制模型来进行处理.模糊控制模型的结构如图4所示^[11].模糊推理用来实现基于模糊逻辑的非线性自适应决策,决策过程依赖于特定应用相关的知识库中的语言规则和语言值的隶属函数.模糊推理以模糊集合作为输入,并以模糊集合的形式产生输出,因此,对于资源事件对象中量化的资源数据,需要进行模糊化处理,并需要对模糊集合形式的输出进行非模糊化处理,以形成应用所需要的自适应决策结果.

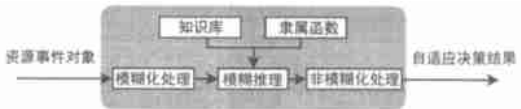


图4 模糊控制模型

知识库由模糊语言控制规则构成,通过语言值和语言变量来表示.每个语言变量对应着多个语言值.知识库中的语言值用自然语言来描述,如对于语言变量网络带宽来说,对应的语言值可能为比较高,比较低等形式,这些变量通过模糊集合建模为隶属函数来表示.知识库中的语言控制规则根据特定应用自适应决策的需要来确定.

知识库的设计分两个阶段,首先是确定语言控制规则,然后是确定语言值的隶属函数.模糊语言控制规则可通过if then形式的条件语句来表示,其通常形式为:

$$R^{(1)}: \text{if } X_1 \text{ is } A_1^{(1)} \text{ and } X_2 \text{ is } A_2^{(1)}, \text{ and } X_n \text{ is } A_n^{(1)} \text{ then } Y \text{ is } B^{(1)}$$
$$R^{(2)}: \text{if } X_1 \text{ is } A_1^{(2)} \text{ and } X_2 \text{ is } A_2^{(2)}, \text{ and } X_n \text{ is } A_n^{(2)} \text{ then } Y \text{ is } B^{(2)}$$
$$\vdots$$
$$R^{(m)}: \text{if } X_1 \text{ is } A_1^{(m)} \text{ and } X_2 \text{ is } A_2^{(m)}, \text{ and } X_n \text{ is } A_n^{(m)} \text{ then } Y \text{ is } B^{(m)}$$

其中, $R^{(k)}$ ($k=1, \dots, m$)表示第k条规则; $X_1, X_2, \dots, X_n, Y$ 为语言变量; $A_1^{(k)}, \dots, A_n^{(k)}$ 和 $B^{(k)}$ ($k=1, 2, \dots, m$)为语言值,这些语言值分别对应着模糊集合: $A_1^{(k)}, \dots, A_n^{(k)}$ 和 $B^{(k)}$ ($k=1, \dots, m$).语言变量也可通过对应模糊集合的隶属函数来表示.

分别为: $L_A^{(k)}(x)$ 和 $L_B^{(k)}(y)$ ($1=1, \dots, n; k=1, \dots, m$). 每个控制规则对应着一个模糊输入到模糊输出的处理过程. 通过非模糊化处理, 模糊输出就对应着应用的一个自适应决策结果.

4 实验分析

4.1 嵌入式浏览器自适应决策的模糊控制模型

浏览器 Delta 2 Browser 工作于 Delta 2 OS 之上, 是在 Delta Browser 中使用了自适应处理模块的嵌入式 HTML 浏览器, 该自适应处理模块使用模糊控制模型进行自适应决策.

对于浏览器来说, 其服务质量主要体现在两个方面: 网页获取时间和网页质量. 在 Delta 2 Browser 中, 采用自适应处理的目的是在兼顾网页质量的同时, 获得比较短的网页获取时间, 这可以根据浏览器当前能够获得的资源情况对所浏览网页的内容进行调整的方式来实现. 这些资源主要包括网络带宽和 CPU 的空闲程度. 对于网络带宽, 所对应的自适应决策主要为: (1) 是否传送图形, 可以通过传送或是不传送网页中所包含的图形来适应网络带宽的需求; (2) 图形质量, 通过影响图形质量的不同图形格式, 可以改变图形的大小, 从而满足网络带宽的需求情况. 对于 CPU 空闲程度, 所对应的自适应决策主要为: 图形压缩或是不压缩. 在浏览器的自适应处理模块中, 自适应选择表示为如下的知识库:

```

if NetworkBandwidth is High, then
    ContentChoice is Full
if NetworkBandwidth is Low and CPUIdle is Idle, then
    ContentChoice is GraphCompressed
if NetworkBandwidth is Low and CPUIdle is NotIdle, then
    ContentChoice is AlteredTextOfGraph
  
```

该知识库中采用了三个语言变量: NetworkBandwidth、CPUIdle 和 ContentChoice, 分别对应着网络带宽、CPU 的空闲程度和网页内容的传送方式. NetworkBandwidth 对应的语言值为 High, Low, 分别表示网络带宽比较高和比较低; CPUIdle 对应的语言值为 Idle, NotIdle, 分别表示 CPU 比较空闲和不太空闲; ContentChoice 对应的语言值为 Full, GraphCompressed, AlteredTextOfGraph, 分别表示无压缩传送整个网页的数据, 压缩传送网页中的图形数据和传送图形的替代文字而不传送网页中的图形数据. 语言变量的隶属函数^[12]如图 5 所示.

网络带宽由网络事件监控模块根据网络数据传送的情况来确定. 可通过式(3)得到粗略的估计数据. 其中, B 表示网络带宽, D 表示传送的字节数, t_1 表示发出数据请求的时间, t_2 表示获取到数据的时间.

$$B = D / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

CPU 的空闲程度量化为 $[0, 1]$ 之间的数据, 值越大表示 CPU 越空闲, 可通过式(4)进行计算. 其中, t_{in} 为进入 idle 任务的时间, t_{out} 为退出 idle 任务的时间, t_{record} 为记录的时间范围. 为获取该时间, 需要修改内核的任务管理模块, 把进入 idle 和退出 idle 任务的时间记录

下来.

$$E(t_{out} - t_{in}) / t_{record} \quad (4)$$

4.2 实验分析

在实验环境中, 终端为 Intel386 芯片构成的嵌入式设备 (该设备属于自行研制的产品原型), 包含一个 Ethernet 网卡和一个 modem, 可通过 Ethernet 和 PPP 上网, 网页内容使用 LCD 进行显示. 为了使浏览器在上网过程中获得变化的网络带宽资源, 自动随机地改变上网方式, 使 Ethernet 和 PPP 两种上网方式交替出现. 由于实验中需要考虑的是网络带宽数据的相对变化情况, 为使问题简化, 把网络带宽反映为通过 PPP 或 Ethernet 上网的平均数据传输率. 为了使 CPU 的空闲程度发生变化, 在系统中添加一个计算型任务, 完成从 1 到 100 的累加操作, 该任务与浏览器任务的优先级相同, 每执行完一次累加操作, 睡眠一段随机时间, 从而使 CPU 的空闲程度随时间发生变化. 网络带宽和 CPU 的空闲程度由事件监控模块分别以事件对象的方式通过事件管理模块传送到浏览器的自适应处理模块, 使用模糊控制模型进行自适应决策, 确定获取网页内容的方式, 从而获得比较稳定的上网性能.

浏览器浏览的内容由 Apache Server 提供, 具体内容可以根据实验需要在 Apache Server 上进行修改. 实验中, 在 Apache Server 上提供了三个文件: flower.gif, flower.jpeg 和 flower.txt, 大小分别为: 15.9kb, 5.6kb, 1kb, 分别对应着同一图形对象的不同格式. flower.jpeg 为 flower.gif 的有损压缩图形文件, flower.txt 则为图形的替代文字文件. 在浏览器中, 语言值 Full, Graph2 Compressed 和 AlteredTextOfGraph 分别对应着如下 HTTP 请求中的 Accept 部分的内容:

```

/ Accept: image/gif; q=110, image/jpeg; q=018, text/plain; q=010
/ Accept: image/jpg; q=110, image/gif; q=018, text/plain; q=010
/ Accept: text/plain; q=110, image/jpeg; q=018, text/gif; q=010
  
```

这些内容分别表示优先获取 GIF 图形、JPEG 图形和文本内容. 如, 若自适应决策的结果为 GraphCompressed, 则要求服务器传送 flower.jpeg.

浏览器根据自适应处理结果, 每隔 20s 就 flower 使用上述相应的 Accept 内容向 Apache Server 进行一次网页请求. 图 6、7、8、9 为实验结果. 图 6 表示网络平均数据传输率以 20s 为单位随时间变化的情况, 该数据在 HTTP 层获得, 具体反映为通过 PPP 或 Ethernet 上网过程中从发出网页请求至获取到网页数据之间的平均数据传输率. 图 7 表示 CPU 空闲程度以 20s 为统计单位随时间的变化情况. 在不采用自适应处理的情况下, 浏览器获取网页时, 将单纯地采用 GIF、JPEG 和文本内容中的一种格式进行网页请求, 其结果是: 若注重图形质量, 在资源不足的情况下将导致网页获取时间太长; 若注重网页获取时间, 则会在资源丰富时也不能获取到高质量的图形内容.

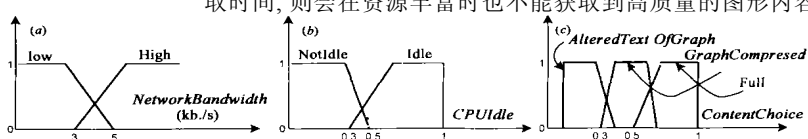


图 5 隶属函数

图 8 表示浏览器在不采用自适应处理并注重图形质量(获取 GIF 图形)的情况下,获取网页所需时间(该时间主要包括网页数据传送时间、数据解析时间和页面内容显示时间)的变化情况。图 9 表示浏览器采用自适应处理情况下的网页获取时间的变化情况。采用自适应处理后,浏览器能够根据当前资源情况选择图形的 GIF、JPEG 或是文本格式,既能保证在资源比较丰富的情况下能够获取到高质量的图形内容,也能保证资源不足时的网页获取时间,从而获得比较稳定的上网性能。

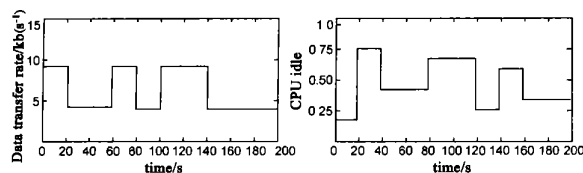
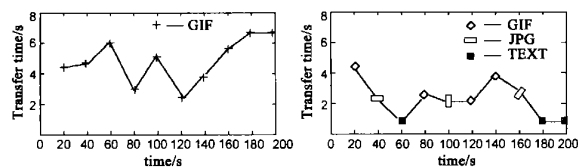


图 6 平均数据传输率

图 7 CPU 空闲程度

图 8 网页获取时间
无自适应处理图 9 网页获取时间
自适应处理

5 结束语

普适计算终端的环境是不断变化的,可得到的资源也是变化的,并且这种变化是动态的,不可预期的。这就要求终端具有自适应的环境处理能力,能够根据资源的变化做出相应的响应。本文根据系统-应用协作自适应模型提出了自适应系统的体系结构,详细描述了结构中各个组成部分的功能原理。该结构主要包含资源监控、事件通道注册和事件管理等模块,其目的在于为普适计算终端提供一个平台无关的、可伸缩的资源自适应处理结构,从而使得设计出的应用能够工作于各种普适计算终端。文中还提出了采用模糊控制模型进行自适应应用设计的方法,并通过嵌入式浏览器对该方法进行了详细说明。文中以浏览器为应用,对体系结构进行了实验分析。通过实验说明,具有自适应处理策略的浏览器在所需要的资源发生变化时,能够获得比较稳定的上网性能。通过本文的研究工作,对设计具有自适应特性的嵌入式操作系统和自适应应用,以及开发普适计算终端设备都具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Randy H Katz. Adaptation and mobility in wireless information systems [J]. Adaptation and Mobility in Wireless Information Systems, August 1995, 1: 6- 17.

- [2] Brian D Noble. Mobile Data Access[DB/OL]. Carnegie Mellon University, <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/coda/Web/docdir/bnoble2thesis.pdf> 1998.
- [3] J Mellor, P Wayner. Wireless mobile communications [J]. Byte Magazine, 1993: 147- 154.
- [4] 袁东风,王承祥,姚旗.移动衰落信道中多级编码的多级译码与并行译码的性能比较[J].电子学报,2001,29(4): 560- 562.
- [5] Vaduvur Bharghavan, Vijay Gupta. A framework for application adaptation in mobile computing environments [A]. Computer Software and Applications Conference. 97[C]. Washington: IEEE, 1997.
- [6] Dushyanth Narayanan, Jason Flinn, M Satyanarayanan. Using history to improve mobile application adaptation [A]. Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications [C]. Monterey, CA, December 2000. 61- 66.
- [7] M Satyanarayanan, J J Kistler, P Kumar, et al. Coda: A highly available file system for a distributed workstation environment [J]. IEEE Transactions on Computers, 1990, 39(4): 447- 459.
- [8] J Inouye, S Cen, C Pu, J Walpole. System support for mobile multimedia applications [A]. Proceedings of the 7th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video [C]. St. Louis, MO, 1997. 143- 154.
- [9] S McCarne, V Jacobson, M Vetterli. Receiver-driven layered multicast [A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM 96 Conference [C]. Stanford CA, 1996. 117- 130.
- [10] M Satyanarayanan. Fundamental challenges in mobile computing [A]. Fifteenth ACM Symposium on Principles of Distributed Computing [C]. Philadelphia, PA, 1996. 1- 7.
- [11] 王耀南.智能控制系统2模糊控制.专家系统.神经网络控制 [M].长沙:湖南大学出版社,1996.
- [12] 李人厚.智能控制理论和方法 [M].西安:西安电子科技大学出版社,1999.

作者简介:



李 允 男, 1971 年 9 月出生于重庆开县, 讲师, 1993 年 7 月于西南石油学院获得计算机专业学士学位, 1999 年 4 月获得计算机软件与理论专业硕士学位, 2002 年 6 月于电子科技大学获得计算机应用博士学位, 长期从事嵌入式操作系统和嵌入式应用方面的研究工作, 先后从事过国防科技/九五预研项目/实时并发软件可靠性测试评价系统0和/超微内核嵌入式实时操作系统0, 以及 863 计划软件重大专项/智能手机嵌入式实时软件平台0的研究工作。Email: liy@coretek.com.cn.

罗 蕾 女, 1967 年 2 月出生于四川成都, 教授, 长期从事嵌入式操作系统和嵌入式应用方面的研究工作。