

一种开放混合实时系统的开放自适应调度算法*

淮晓永⁺, 邹勇, 李明树

(中国科学院 软件研究所 互联网软件技术实验室,北京 100080)

An Open Adaptive Scheduling Algorithm for Open Hybrid Real-Time Systems

HUAI Xiao-Yong⁺, ZOU Yong, LI Ming-Shu

(Laboratory for Internet Software Technologies, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-82620803 ext 803, E-mail: huaixy@itechs.iscas.ac.cn, <http://itechs.iscas.ac.cn>

Received 2003-06-18; Accepted 2003-10-17

Huai XY, Zou Y, Li MS. An open adaptive scheduling algorithm for open hybrid real-time systems. *Journal of Software*, 2004,15(4):487-496.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/487.htm>

Abstract: To meet the system scheduling requirements of open hybrid real-time systems, an open adaptive real-time scheduling framework, called OARtS (open adaptive real-time scheduling), is presented in this paper, which comprises three key components: accept control, scheduling server and adaptive control. To guarantee the schedulability in the open environment, OARtS only accepts the task whose computing bandwidth requirement is no higher than the system's spare one. To schedule multi-constraint tasks, a two-layer scheduling mechanism is introduced. In the mechanism, the scheduling server components provide concurrent scheduling mechanism for multi-constraint tasks, and each of them is assigned to a bandwidth-independent computing bandwidth and has its specific scheduling policy to schedule its own task queue. To adapt to the change in the open environment, the adaptive control tries to tune the real-time service level so as to make full use of the system computing capability; to adapt to the uncertainty of execution time of the soft real-time task, a fuzzy control engine is used to regulate the task's computing bandwidth according to fuzzy rules of the scheduling error so as to eliminate the scheduling error and to get a satisfactory soft real-time performance.

Key words: real-time system; open system; quality of service (QoS); adaptive scheduling

摘要: 开放计算环境下的实时与非实时任务不确定并发,以及多种实时约束混合的复杂约束系统,即开放混合实时系统的需求越来越广泛.通过引入接收控制、调度服务器、自适应调节机制,提出一种开放环境下的自适应实时系统调度架构——OARtS(open adaptive real-time scheduling).它能适应开放计算环境的不确定性,有控制地接受实时任务运行;可根据系统空闲计算带宽变化,自适应地调节任务的实时等级,使得系统运行在最优的实

* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2001AA113201, 2003AA115440 (国家高技术研究发展计划(863))

作者简介: 淮晓永(1973—),男,山西万荣人,博士,副研究员,主要研究领域为实时与智能系统,嵌入式系统;邹勇(1976—),男,博士,工程师,主要研究领域为实时系统,操作系统;李明树(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为实时与嵌入式系统,Internet 智能软件工程.

时性能上;对于软实时任务,可根据其计算带宽需求变化,自适应地调节其计算带宽分配,以适应任务执行时间时变引起的实时不确定性。

关键词: 实时系统;开放系统;服务质量保证(QoS);自适应调度

中图法分类号: TP316 **文献标识码:** A

随着计算机应用的深入发展,硬实时、软实时及多类实时约束任务并发,开放环境下任务的动态加入和退出,以及任务的执行时间具有时变特性,这类开放混合实时系统需求不断增长。例如,多媒体系统要求稳定周期的帧处理和显示,而帧信息的处理计算时间又随着影片的不同而不确定地动态变化;网络服务系统需要针对不同类别的用户、不同服务请求的特性提供不同实时 QoS 保证的服务,且服务请求负载呈现动态不确定性变化等。随着计算机应用向高度(高性能)、广度(网络化、嵌入式)和深度(智能化)方向的不断深入发展,这类开放混合实时系统的需求将越来越突出。而传统的分时操作系统及单调度策略架构的实时操作系统,不能满足这种多类实时约束任务并发及任务特性、系统负载动态不确定变化的开放混合实时系统任务调度管理的需求。于是提出了针对开放混合实时系统的任务调度技术需求。

目前,国内外关于开放混合实时系统调度策略的研究主要有两类:一种是 Z.Deng 提出的两层架构的多调度策略集成研究^[1],另一种是 Yu-Chung Wang 提出的统一架构的多调度策略融合研究^[2]。前者强调面向应用系统的个性化任务调度,不同的约束采用不同的系统调度策略;同时,它采用接收控制的策略,保证开放环境下新任务的加入运行不会破坏系统的可调度性。后者强调多种调度策略的统一系统调度模型,采用统一的结构实现多类调度策略的配置,但系统中只存在一种调度策略,它强调调度策略配置的灵活性。两种调度架构均没有考虑开放环境下,任务存在多级实时约束、任务执行时间的时变特性等不确定性因素。文献[3]提出一种基于反馈控制的 EDF 调度架构——FC-EDF,提出根据调度偏差调整服务等级和接收控制的策略,但其仅适用于软实时任务集调度,且其基于 PID 的控制策略依赖于特定的任务模型,不能满足开放混合实时系统的任务调度需求。值得关注的是,将反馈控制策略引入实时系统调度,已逐步成为实时系统的一个研究方向^[4]。

本文针对开放混合实时系统中,硬实时、软实时任务和分时任务的混合不确定并发,以及任务动态加入和退出、任务执行时间时变等因素引起的系统负载不确定性,提出一种开放自适应实时系统调度架构——OARtS(open adaptive real-time scheduling)。

1 开放自适应实时系统调度——OARtS

1.1 基本概念

定义 1. 定义任务的实时 QoS 约束描述为

$$\text{QoS}=(P,B) \quad (1)$$

其中, P (period)表示任务的周期; B (budget)表示预算的任务计算用时。对于硬实时任务, B 为任务最坏情况下的执行时间 C ;对于软实时任务, B 为任务平均执行时间 E 。任务 τ 具有 (P,B) 约束,即要求系统每 P 时间间隔内对任务 τ 提供 B 段时间的计算资源服务。

定义 2. 定义实时 QoS 约束 (P,B) 的计算带宽需求为

$$u = \frac{B}{P} \quad (2)$$

定义 3. 多级实时约束是指任务具有柔性的实时约束,系统可根据可利用计算资源提供相应服务等级的实时计算资源分配。任务基于 QoS 约束的多级实时约束可描述为

$$\text{QoS}^M = \{(P_i, B_i)\} \quad (3)$$

其中, $i=1,2,\dots,N,N$ 为级数, $N \geq 1$;且有,若 $i < j$,则 $u_i > u_j$ 。

系统调度时,根据系统的空闲计算带宽,决定任务的实时等级。设可利用的计算带宽为 u_s ,则其实时服务等级为 $\text{QoS}^k = \{(P_k, B_k) | u_k \leq u_s < u_{k-1}\}$ 。

可以利用该模型来描述实际系统中的多级实时约束任务.例如,对于多媒体播放系统中的帧显示软实时任务,在时间充裕时采用高分辨率的帧刷新计算(即高级 QoS 约束),在时间紧张时采用低分辨率的帧刷新计算(即低级 QoS 约束).

定义 4. 开放混合实时系统是指具有下列特性的实时系统:

- ① 任务可动态地加入和退出;
- ② 任务的约束包括硬实时、软实时和多级实时约束;
- ③ 任务的执行时间具有时变特性.

1.2 OARtS的系统结构

通过引入接收控制、调度服务器 SS(scheduling server)、自适应调节机制,我们提出一种开放环境下的自适应实时系统调度架构 OARtS(如图 1 所示).其中,接收控制根据系统的剩余计算带宽有控制地接受实时任务运行,以保证新任务的加入不会破坏先前任务集的可调度性;由计算带宽独立的多个调度服务器实现对多类约束实时任务集的调度,每个调度服务器按照特定的调度策略调度其任务队列中的任务集,系统采用 EDF 策略调度各调度服务器;自适应地调节机构,感知动态的任务加入和退出引起的可利用计算带宽的变化,自适应地调整任务的实时服务等级,使得系统运行在最优的状态,并适应软实时任务执行时间的不确定性,以减小调度偏差为目的,按照调度偏差调节的模糊规则,自适应地调节其计算带宽分配,以满足其时变的软实时约束.

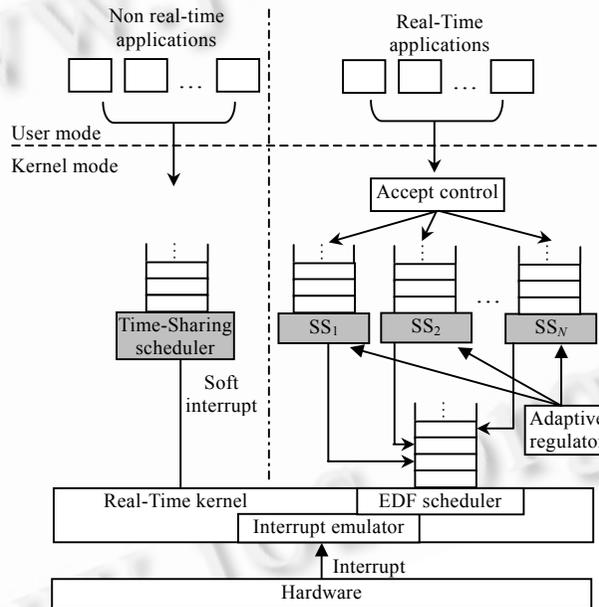


Fig.1 System architecture of OARtS
图 1 OARtS 系统结构

1.2.1 混合实时约束任务集调度

对于多类实时约束任务并存的混合实时系统,这里采用调度服务器机制.即对每一类实时约束任务,用一个调度服务器 SS 来进行相应约束类任务的调度计算.每个调度服务器占用一定的计算带宽,且其计算带宽独立,即每个服务器能且仅能得到相应带宽的计算资源.SS 的实时特性描述为(B, SP, P).其中, B 为 SS 的服务预算时间; SP 表示 SS 的服务器周期,也即 SS 的截止时间; P 为 SS 的调节优先级,调节服务等级时按照 P 的大小确定调节的优先顺序.

调度服务器 SS 是 OARtS 系统中的一类特殊的实时任务,它代表其服务的任务集请求系统进行资源分配,并在被调度时调度执行其任务集.调度服务器任务是本文调度调节的基本单位.下文提出的对任务的资源分配

和计算带宽的调节,如无特殊说明均表示是针对调度服务器任务而言的.

OARtS 的任务调度计算过程:

(1) 系统根据调度服务器任务的服务周期 SP ,按照 EDF 调度策略进行调度服务器集的调度:在调度时刻 t ,从调度服务器集中,计算选择截止时间最短的调度服务器 SS ;

(2) 当调度服务器 SS 被调度时,它按照其自己的调度策略,从其任务队列中选择一个实时任务,切换到该任务执行其计算;

(3) 在每个时钟中断服务处理过程中,对当前执行的调度服务器,将其剩余预算减去自上次时钟中断以来用去的时间;如果服务器的预算减小到 0,则重新以 B 值填充,并设置其截止时间为 d_k+P ,其中 d_k 为服务器当前的截止时间.

显然,一个任务调度经历了系统的 EDF 调度和服务器本地调度的两级调度过程.

1.2.2 开放实时控制

设系统中有 N 个调度服务器 SS, SS_i 占用的计算带宽为 B_i^{SS} ,服务器可利用计算带宽为 BS ,已知系统采用 EDF 调度策略进行调度服务器的调度计算,则按照 EDF 调度的可调度条件,易知系统可调度的充要条件为

$$\sum_{i=1}^N B_i^{SS} \leq BS \quad (4)$$

在 OARtS 系统中,新的实时任务集运行在一个新的调度服务器上.在开放实时系统中,接收控制按照此条件有控制地接受实时任务,确保在不破坏先前实时任务集运行的前提下,给新调度服务器任务分配实时计算资源.接收控制的算法如下:

算法. 实时任务接收控制.

begin

(1) 计算任务 $task$ 的每级 QoS 约束的计算带宽需求 $rb[i]$;

(2) 从最高级 QoS 约束开始,即 $i=1$,

如果第 i 级的计算带宽需求 $rb[i]$ 不大于系统剩余计算带宽 sb ,则给该任务分配第 i 级的计算带宽,并设置 $task$ 的实时 QoS 服务等级为 i ;否则,判断下一级,即 $i+1$ 级;

(3) 如果最低级 QoS 约束的计算带宽需求 $rb[N]$ 也大于系统剩余带宽 sb ,则拒绝 $task$ 的实时运行请求.

end.

2 OARtS 的自适应调度调节算法

在开放的计算环境下,由于任务动态地加入和退出,使得系统的可利用资源动态变化.此时,若任务存在多级实时约束,则需要自适应地调节分配给任务的实时资源,以最优地满足系统的实时约束,使得系统运行在最优状态.此外,任务的执行时间往往是时变的,如多媒体播放系统,当影片内容、播放窗口大小、显示器配置等发生变化时,其帧播放计算时间会动态变化.此时,需要感知任务执行时间变化引起的计算带宽需求的变化,自适应地调节对其计算资源的分配,以保证其实时运行性能.

在开放的混合实时系统环境中,由于硬实时、软实时任务的实时约束的不同要求,需要分别采用不同的自适应调节策略.

对于硬实时任务,要求其任务的每次运行都能满足其实时约束,所以必须按照其最坏情况下的执行时间分配计算带宽,才能保证其硬实时运行.此时的自适应调节主要是调节实时服务的等级.调节的规则是,当可利用资源增加时,提高其实时计算的等级;当可利用资源减小时,降低其实时计算的等级.

对于软实时任务,可以容忍任务的个别运行错过其截止时间,所以软实时任务通常按照其平均执行时间分配计算带宽.当任务的平均执行时间不确定或者发生时变时,自适应调节可以适应其执行时间的不确定变化,动态调节分配给它的实时计算资源,使得其能够获得令人满意的实时运行效果.

自适应调节的系统结构如图 2 所示,其中 sb 表示系统的剩余计算带宽(spare bandwidth).每个采样时刻,首先扫描系统接受的实时任务集,对于存在调度偏差的任务,通过模糊控制方法调节其计算带宽分配;根据调节后

sb' 的正负,决策对任务等级的调节:若 $sb' > 0$,则按照优先级由大到小的顺序提高任务的服务等级,直到 sb 小到不足以提高任何任务的服务等级为止;若 $sb' < 0$,则按照优先级由小到大的顺序降低任务的服务等级,直到 sb 大于0为止(详细调节计算过程见第2.3节中的算法描述).

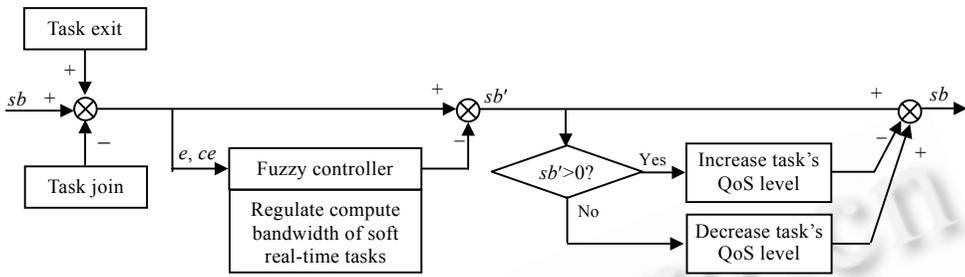


Fig.2 Adaptive regulating of real-time scheduling
图2 实时调度的自适应调节

自适应控制决策包括采样时刻选择、控制器设计和自适应调节机制3部分内容.

2.1 采样时刻选择

软实时任务的计算带宽调节按照一定的采样周期进行.采样周期太小,则调节过于频繁,调节计算的费用较高,甚至引起调节的不稳定振荡;反之,采样周期太大,则调节缓慢,起不到自适应调节的效果.需要考虑任务的时变特性,选择适当的采样周期.

采样周期的选择策略为:设任务的服务周期为 P ,则其采样周期为 $T_s = nP$.其中, n 通常取 $10 \sim 100$. n 较小时,则调节的快速性较好,但调节计算费用较大; n 较大时,则调节较缓慢,但调节计算费用较小.通常可根据 P 的大小来选择 n , P 较大时选择较小的 n 值, P 较小时选择较大的 n 值.

2.2 控制器的选择与设计

基本模糊控制器的系统结构如图3所示.采样时刻 k 的偏差 $e(k)$ 、偏差变化率 $ce(k)$ 由被控对象的输出采样值和给定值计算求得,再经过隶属函数进行模糊化,得到模糊输入信号;然后依据偏差控制的模糊规则,进行模糊合成推理,求得模糊调节量;最后再通过最大隶属度法、重心法等去模糊方法,求得精确控制量 $u(k)$,进而对被控对象进行控制调节,使得被控对象控制变量的偏差快速、稳定地趋向于0.针对自适应调度,这里即根据任务调度偏差 e 、偏差变化率 ce ,决策出对其资源分配的调节量 u .

考虑到系统调度计算的高效率、快速性要求,这里通过对图3的基本模糊控制器进行离线模糊推理合成运算,得到一种查表结构的快速实时模糊控制器(如图4所示).在实际调度计算时,只需根据当前的任务调度偏差 $e(k)$ 、偏差变化率 $ce(k)$,通过量化因子 k_e, k_{ce} 转换到决策表论域,查找决策表得到决策量,再通过比例因子 k_u 转换到实际控制量论域,即可得出实际控制量 $u(k)$.其中,量化因子 k_e 和 k_{ce} 、比例因子 k_u 是实现论域转换.设变量 x 的实际论域为 $X = [x_L, x_H]$,其模糊隶属函数的整数论域为 $[m, n]$,则相应的量化因子 k_e, k_{ce} 采用式(5)计算,比例因子 k_u 采用式(6)计算.对于 X 论域清晰值 a 转化为模糊离散论域中的元素 b 的计算采用式(7)计算,对于模糊离散论域中的元素 c 转化为 X 论域清晰值 d 的计算采用式(8)计算.

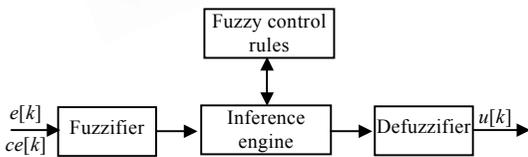


Fig.3 Basic structure of fuzzy controller
图3 基本模糊控制器结构

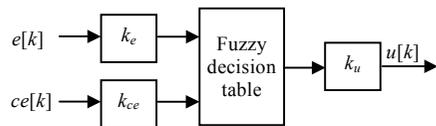


Fig.4 Structure of fast real-time fuzzy controller
图4 快速实时模糊控制器结构

$$k = \frac{n - m}{x_H - x_L} \tag{5}$$

$$k = \frac{x_H - x_L}{n - m} \tag{6}$$

$$b = k \left(a - \frac{x_H + x_L}{2} \right) \tag{7}$$

$$d = k_u c \tag{8}$$

考虑到开放系统中被控对象的多样性,这里采用一般经验的模糊子集、隶属函数和模糊规则定义方法.如只是针对某一类实时应用,则可根据实际对象特性,对模糊子集个数、隶属函数形状及模糊规则集进行优化,得到优化性能的模糊控制器.

取偏差 e 、偏差变化率 ce 、控制量 u 的模糊集分别为

$$E = \{NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB\},$$

$$CE = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\},$$

$$U = \{NB, NM, NS, PS, PM, PB\}.$$

其中,NB=负大,NM=负中,NS=负小,NZ=负零(-0),PZ=正零(+0),ZE=零,PS=正小,PM=正中,PB=正大.

取偏差 e 、偏差变化率 ce 、控制量 u 的论域分别为

$$e = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\},$$

$$ce = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\},$$

$$u = \{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}.$$

模糊集 E, CE, U 的隶属函数分别见表 1~表 3.

Table 1 Membership function of fuzzy variable E

表 1 模糊变量 E 的隶属函数表

$E \backslash \mu \ e$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	1	2	3	4	5	6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0	0
PZ	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
NZ	0	0	0	0	0.1	0.6	1.0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 2 Membership function of fuzzy variable CE

表 2 模糊变量 CE 的隶属函数表

$CE \backslash \mu \ ce$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.0	0.7	0.2	0	0
ZE	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.2	0.7	1.0	0.9	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 3 Membership function of fuzzy variable U

表 3 模糊变量 U 的隶属函数表

$U \backslash \mu \ u$	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0
ZE	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0	0.4	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

基于 E, CE 和 U 模糊集描述的模糊控制规则的一般描述为

IF $e(k)$ is E_i and $ce(k)$ is CE_i THEN $u(k)$ is U_i .

由控制工程师的经验知识,易得任务调度偏差 e 、偏差变化率 ce 和带宽调整量 u 之间的模糊规则集,见表 4.它是基于控制者的智能控制模型,而不是基于任务模型的经典控制,所以可针对多个任务对象实现满意的控制决策,适用于对象特性不确定变化的混合实时系统调度决策需求.

Table 4 Fuzzy control rules

表 4 模糊控制规则

$u \backslash ce$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	ZE	ZE
NM	NB	NB	NB	NB	NM	ZE	ZE
NS	NM	NM	NM	NM	ZE	PS	PS
NZ	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PZ	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZE	PM	PM	PM	PM
PM	ZE	ZE	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	ZE	PM	PB	PB	PB	PB

针对表 4 的模糊控制规则,按照 Mamdani 推理法^[5]计算可得控制决策表 5.易知该决策表遍布了整个决策空间,无决策盲区.实际使用时,只需根据采样的偏差 e 和偏差变化率 ce ,查表 5 即可求得控制量 u .它是一种可适用于调度计算需求的、确定的快速智能控制决策计算.

Table 5 Fuzzy control decision table

表 5 模糊控制决策表

$u \backslash ce$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-5.86	-5.79	-5.86	-5.73	-5.86	-5.80	-5.86	-4.37	-3.42	-2.40	-1.06	0	0
-5	-5.79	-5.79	-5.79	-5.73	-5.79	-5.79	-5.79	-4.37	-3.38	-2.40	-1.12	0	0
-4	-5.65	-5.57	-5.65	-5.49	-5.65	-5.58	-5.65	-4.11	-3.17	-2.22	-0.86	0.21	0.19
-3	-4.57	-4.57	-4.57	-4.57	-4.57	-4.57	-4.57	-2.81	-1.92	-1.12	0.12	1.08	1.08
-2	-4.05	-4.06	-3.76	-3.65	-3.55	-3.33	-3.37	-1.64	0.03	0.63	0.92	1.96	1.91
-1	-3.99	-3.99	-3.68	-2.94	-2.89	-2.47	-2.50	-0.92	0.93	2.12	2.46	2.71	2.71
0	-3.54	-3.51	-3.26	-2.53	-1.44	-0.50	0	0.5	1.44	2.53	3.26	3.51	3.54
1	-2.71	-2.71	-2.46	-2.12	-0.93	0.92	2.5	2.47	2.89	2.94	3.68	3.99	3.99
2	-1.91	-1.96	-0.92	-0.63	-0.03	1.64	3.37	3.33	3.55	3.65	3.76	4.06	4.05
3	1.08	-1.08	-0.12	1.12	1.92	2.81	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57
4	-0.19	-0.21	0.86	2.22	3.17	4.11	5.65	5.58	5.65	5.49	5.65	5.57	5.65
5	0	0	1.12	2.40	3.38	4.37	5.79	5.79	5.79	5.73	5.79	5.79	5.79
6	0	0	1.06	2.40	3.42	4.37	5.86	5.80	5.86	5.73	5.86	5.79	5.86

2.3 自适应调节机制

调节机制是指控制决策的执行,这里是指对计算带宽的调节.首先为了减小软实时类任务的调度偏差,需要调节分配给它的计算带宽.若系统的剩余带宽不能满足调节需求,还需要降低任务的服务等级;若调节后有富裕的剩余带宽,则需要提高任务的服务等级.具体调节算法如下:

算法. 自适应调度调节.

begin

- (1) 每当接收新任务加入时,剩余计算带宽减去分配给新任务的计算带宽;
- (2) 每当任务退出时,剩余计算带宽增加退出任务占用的计算带宽;
- (3) 每个采样时刻 k ,
- (3.1) 对于每个调度服务器任务,若存在调度偏差,则根据 $e(k)$ 和 $ce(k)$,查模糊决策表 FDT 求得带宽调节量 $u(k)$:

$$ce(k):=e(k)-e(k-1);$$

$$e':=k_e \times e(k);$$

$$ce':=k_{ce} \times ce(k);$$

$$u(k):=k_u \times \text{FDT}(e', ce')$$

$$\text{调节任务的计算带宽: } tb(k):=tb(k-1)+u(k)$$

计算剩余计算带宽: $sb(k):=sb(k)-u(k)$

(3.2) 如果 $sb(k)>0$,则提高调度服务器任务队列中任务的服务等级:

Inc_QoS_level; //按照高优先级任务优先原则提高任务的服务等级

(3.3) 如果 $sb(k)<0$,则降低调度服务器任务队列中任务的服务等级:

Dec_QoS_level; //按照低优先级任务优先原则降低任务的服务等级

end.

子算法 1. Inc_QoS_level.

begin

(1) 寻找不在最高服务等级的优先级最高的调度服务器任务 s_task;

(2) if (s_task != NULL) then

$\Delta rb:=s_task.rb[s_l-1]-s_task.rb[s_l];$ //s_l 为 s_task 的当前服务等级

if $sb>\Delta rb$ then

s_task.s_l:=s_l-1;

s_task.cb(k):=s_task.cb(k-1)+ Δrb ; //增加升级引起的计算带宽增量

sb:=sb- Δrb ; //更新系统剩余计算带宽

end if

end if

(3) 重复(1),(2),直到 $sb<0$ 或者 s_task=NULL; //s_task 为 NULL 时,表示已搜索完整个任务队列

end.

子算法 2. Dec_QoS_level.

begin

(1) 寻找在最高服务等级的优先级最低的调度服务器任务 s_task;

(2) if (s_task !=NULL) then

$\Delta rb:=s_task.rb[s_l]-s_task.rb[s_l+1];$

s_task.s_l:=s_l+1; //降低服务等级

s_task.cb(k):=s_task.cb(k-1)- Δrb ;

sb:=sb+ Δrb ; //回收降级释放的计算带宽

end if

(3) 重复(1),(2),直到 $sb>0$ 或者 s_task=NULL;

end.

3 仿真实验分析

文献[3]中提出了可模拟调度系统的一种水箱模型.这里利用水箱模型进行 OARtS 的调度仿真实验,以检验模糊自适应调节策略的可用性.基于水箱模型的模糊调节仿真系统结构如图 5 所示.水箱的输入为任务每次就绪发布,输出为任务计算完成.在每个采样时刻,计算水箱水位高度的变化 Δh (入水流量和出水流量之差),即任务的调度偏差(需求的计算带宽和分配的计算带宽之差),然后根据模糊控制决策求得控制量,调节水箱出水阀大小,使得水箱的高度稳定在定值上(即水箱高度稳定不变时,出水流量等于入水流量,即给任务分配的计算带宽等于其需求的计算带宽).在此模型中,任务执行时间的不确定性表现在入水流量的变化上.

在 Matlab 环境下,按照图 5 的仿真模型,利用 Simulink 工具进行了 OARtS 调度的仿真实验.系统有两个调度服务器 SS₁ 和 SS₂,SS₁ 上运行任务 1,其计算带宽需求(即水箱的入水流量)为 0.3 叠加一个正弦函数变化,SS₂ 上运行任务 2,其计算带宽需求为 0.3 叠加一个三角斜坡函数变化.此外,为了模拟调度计算中存在的抖动(jitter),仿真中给每个任务叠加了一个强度为 0.001 的白噪声干扰信号 σ .仿真实验结果如图 6 所示,其中,图 6(a)为任务 1 的计算带宽需求与实际分配的对比,图 6(b)为任务 2 的计算带宽需求与实际分配的对比.

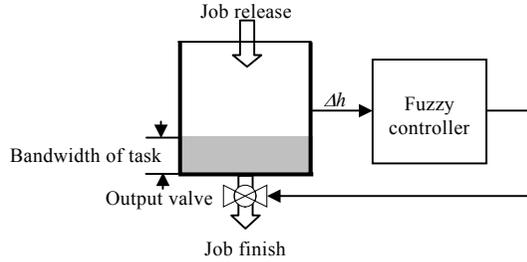


Fig.5 Fuzzy regulating simulation system
图 5 模糊调节仿真系统

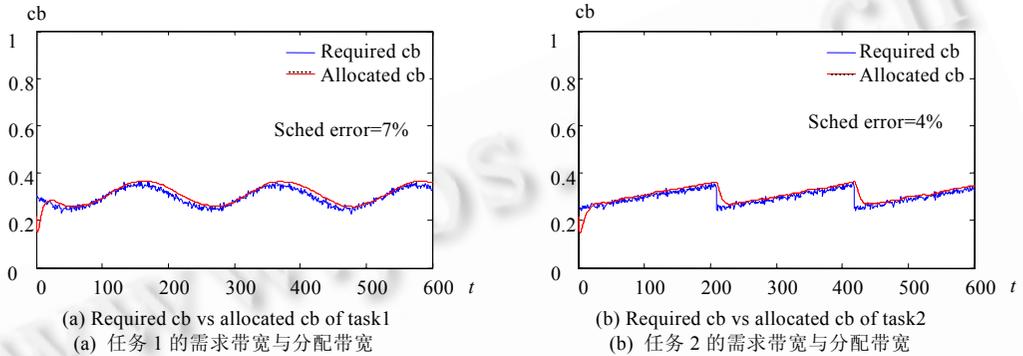


Fig.6
图 6

仿真实验表明,自适应模糊控制调节具有如下特性:

- ① 可适应系统负载的动态变化,自适应地调节任务的实时计算资源分配;
- ② 可适应被控对象的动态变化,模糊控制不依赖于任务对象的模型,同一个模糊控制器可为系统中的多个调度服务器任务提供调节决策计算;
- ③ 根据任务的需求分配计算带宽,使得系统具有较高的资源利用率.

此外,在仿真实验中发现,如果按照决策的结果分配计算带宽,通常调度偏差会大于 0,即任务多数情况下不能在截止时间前完成.为此,对于错过截止时间则执行无意义的软实时任务,则需在执行调节时乘以一个带宽裕度系数 ξ (实验中采用了 5%的带宽裕度),以使得分配给任务的带宽可保证在多数情况下任务能在截止时间前完成.带宽裕度 ξ 一般取值 1%~15%,可根据软实时任务的实时约束特性灵活调整:当软实时较严格、抖动较大时取较大值.

4 结 语

本文针对开放混合实时系统需求,提出一种开放自适应实时系统调度架构——OARtS,其特性体现为:

- ① 开放的实时环境.新任务可动态地加入系统,而不影响先前实时任务的运行(不破坏其可调度性);可根据系统可利用资源,给新任务配置相应服务等级的实时计算资源.
- ② 可有效调度混合实时约束任务集.在基于调度服务器的两层调度架构中,每个调度服务器具有带宽独立的计算资源,并按其特定的调度策略调度其任务队列中的任务.系统按照 EDF 的调度策略调度各调度服务器.这种两层的调度架构实现了多调度策略的并发调度.
- ③ 自适应调度.OARtS 可适应软实时约束任务执行时间的不确定性,自适应地调节其计算资源分配,使得其在不确定的计算环境下能获得满意的实时性能;可根据系统负载的变化,即可利用计算资源的变化,自适应地配置任务的实时 QoS 服务等级,使得任务能运行在资源允许的最优 QoS 上.

④ 可有效简化混合实时系统设计,系统可扩展性较好.开放实时系统技术减小了系统设计、开发的复杂性,各子系统可在弱耦合约束下,单独设计开发;系统扩展性好,在保证在线实时系统可靠运行的前提下,利用剩余计算资源进行系统扩充,或执行需要的辅助计算等,可有效延长实时系统的生命周期.

References:

- [1] Deng Z, Liu JW-S. Scheduling real-time applications in an open Environment. In: Proc. of the 18th IEEE Real-Time Systems Symp. (RTSS'97). San Francisco, CA, 1997. 308~319. <http://csdl.computer.org/comp/proceedings/rtss/1997/8268/00/8268toc.htm>
- [2] Wang YC, Lin KJ. Implementing a general real-time scheduling framework in the RED-Linux real-time kernel. In: Proc. of the 20th IEEE Real-Time Systems Symp. Phoenix, Arizona, 1999. 246~255. <http://csdl.computer.org/comp/proceedings/rtss/1999/0475/00/0475toc.htm>
- [3] Stankovic JA, Lu CY, Son SH, Tao G. The case for feedback control real-time scheduling. In: Proc. of the 11th Euromicro Conf. on Real Time Systems. York, 1999. 11~20. <http://csdl.computer.org/comp/proceedings/euromicro-rts/1999/0240/00/0240toc.htm>
- [4] Lu CY, Stankovic JA, Son SH, Tao G. Feedback control real-time scheduling: Framework, modeling, and algorithms. Real-Time Systems, 2002,23(1-2):85~126.
- [5] Li SY. Fuzzy Control, Neurocontrol and Intelligent Cybernetics. 2th ed., Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998. 254~280 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [5] 李士勇.模糊控制·神经控制和智能控制论(第2版).哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998.254~280.

第4届中国信息和通信安全学术会议(CCICS 2005)

征 文 通 知

中国信息和通信安全学术会议(CCICS)是国际信息和通信安全学术会议(International Conference on Information and Communications Security, 简称 ICICS)的地方版,已成功举办了3届,第1届由中国科学院信息安全技术工程研究中心主办,于1999年12月召开;第2届由上海交通大学计算机学院主办,于2001年5月召开;第3届由武汉大学计算机学院主办,于2003年3月召开.该会的规模和影响逐届扩大.第4届中国信息和通信安全学术会议(CCICS 2005)拟定于2005年5月在陕西西安举行.热忱欢迎所有涉及信息安全、通信安全理论和技术方面的研究论文提交本次会议进行交流.会议论文集将由科学出版社出版,会议的优秀论文将被推荐到《软件学报》.

一. 征文要求

论文须为未公开发表并且未向学术刊物和其他学术会议投稿的最新研究成果.文稿使用中文或英文书写,字数一般不超过6000字.请将论文(word文档)全文(注明作者的联系电话和E-mail地址)发送到 yangbo@mail.xidian.edu.cn.

二. 重要日期

征文截止日期:2004年7月31日

文章录用通知:2004年9月31日

录用论文定稿:2004年10月31日

三. 联系方式

联系人:西安电子科技大学通信工程学院 杨波 教授

通信地址:(710071)西安电子科技大学106信箱

电话:029-8203028

E-mail: yangbo@mail.xidian.edu.cn