

模糊反馈控制实时调度算法*

金宏⁺, 王宏安, 傅勇, 王强, 王晖

(中国科学院 软件研究所 人机交互技术与智能信息处理实验室, 北京 100080)

A Fuzzy Feedback Control Real-Time Scheduling Algorithm

JIN Hong⁺, WANG Hong-An, FU Yong, WANG Qiang, WANG Hui

(Human Computer Interaction & Intelligent Information Processing Laboratory, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62559307 ext 8058, E-mail: hjin@iel.iscas.ac.cn, http://iel.iscas.ac.cn

Received 2003-09-25; Accepted 2004-01-07

Jin H, Wang HA, Fu Y, Wang Q, Wang H. A fuzzy feedback control real-time scheduling algorithm. *Journal of Software*, 2004,15(6):791-798.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/791.htm>

Abstract: To solve the dynamic preemptive scheduling problem of a fuzzy uncertain task set under an unpredictable environment, a scheduling algorithm, by applying fuzzy rules and fuzzy scheduling theory, is presented based on fuzzy feedback control, and its corresponding scheduling structure, composed of a basic scheduler and a fuzzy feedback controller, is established. The fuzzy scheduling algorithm is used as the scheduling algorithm of the basic scheduler. By classifying tasks into different priority levels and scheduling the task with high priority level first, more critical tasks can be scheduled. A fuzzy controller constitutes the part of the fuzzy feedback control with the adjusting policy of task flow. Simulation results show that the proposed fuzzy feedback-control scheduling can effectively control the missed deadline rate of tasks, the scheduling problem with fuzzy characteristics or unpredictable environment can be solved, and the successful scheduling rate of critical tasks can be improved.

Key words: scheduling; real-time system; fuzzy; feedback control; missed deadline percentage; CPU utilization

摘要: 为了解决模糊不确定任务集在不可预测环境下的动态抢占调度问题,应用模糊规则和模糊调度理论,提出一个基于模糊反馈控制的调度算法,并建立相应的调度架构.该架构由基本调度器和模糊反馈控制两部分组成.用模糊调度算法作为基本调度器的调度算法,将任务集按不同优先级等级进行划分,优先级等级高的任务优先调度,从而使得更多的重要任务得到调度.模糊控制器与任务流调节策略一起构成模糊反馈控制部分.仿真结果表明,模糊反

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60374058, 60373055 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA413020 (国家高技术研究发展计划(863))

作者简介: 金宏(1962-),男,江苏如皋人,博士,副研究员,主要研究领域为实时调度,计算机控制系统,实时数据库,容错可靠性;王宏安(1963-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为实时智能系统,实时调度;傅勇(1973-),男,助理研究员,主要研究领域为自动控制,实时调度;王强(1972-),男,博士生,主要研究领域为实时数据库,实时系统;王晖(1967-),男,博士,主要研究领域为智能信息处理,进化算法,人工神经网络,调度算法.

馈控制调度可以很好地控制任务的截止期错失率,解决任务特征可能是模糊不确定或不可预测情况下的调度问题,提高重要任务的调度成功率。

关键词: 调度;实时系统;模糊;反馈控制;截止期错失率;CPU 利用率

中图法分类号: TP273 文献标识码: A

传统的实时调度算法所遇到的一个普遍问题^[1]是,任务的所有时间约束(如执行时间、截止期等)需要精确知道,并在可预测环境下才能提供性能保证.然而在许多实际问题中,系统的任务特征通常是模糊不确定的,比如,任务的执行时间通常是不准确的,从而空闲时间也是不准确的;任务的关键性也是相对的,通常不太适合用某个确切的数值来区分不同任务之间的关键程度;任务的截止期通常也不是准确的,它可以在某个范围内随机变化;至于就绪时间、周期等也不是绝对精确知道的.所有这些特征都可以看成是模糊不确定的.

为此,文献[2]提出了一种静态的扩展 EDF 模糊实时调度算法,文献[3]提出了一种扩展 LSF 的、动态的、非抢占式的模糊实时调度算法,文献[4]考虑用基于概率的模型来描述任务的模糊约束.文献[5]考虑用满意指标(satisfaction index)来表示一些约束规则和调度规则.以上方法都没有考虑任务的关键性特征,也没有考虑重要任务的优先执行,同时还没有考虑任务的优先级等级可能有限的情况.考虑任务关键性特征的调度算法有:价值最高最优先、价值密度最大最优先、基于相对截止期与关键性之比值的优先级分配方案以及基于绝对截止期与价值的加权方法,但这些方法都是基于精确的任务价值或任务关键性等特征,没有考虑到任务特征的模糊不确定性.

此外,系统的运行环境可能是不可预测的^[1],如互联网上的在线贸易和电子商务等开放系统,敏捷制造和 C⁴I 系统等.在这类应用中,资源需求和服务请求都是事先不确定的,甚至是不知道的.当系统运行在模糊不确定任务特征或不可预测环境中时,系统的精确负载模型变得不适用,这时,经典的调度算法,如 EDF(earliest deadline first)和 LSF(least slack first),已不能提供性能保证,并可能导致系统资源不能充分利用,甚至可能导致极端的资源浪费和系统的低利用率.在过载情况下,我们需要系统能够优雅降级,优先调度具有高优先级等级的任务,在不利的情况下,允许调度器具有一定的机动性来确保重要任务的优先调度.

为了实现在不可预测环境下的实时调度性能保证,Stankovic 等人^[6]采用将反馈控制技术与实时调度技术相结合的办法,构造了一个基于 PID 反馈控制的调度体系结构^[7],解决不可预测环境下 CPU 实时调度问题.但是他们的研究是基于精确的任务特征,没有考虑到任务特征可能是模糊不确定性的情况,同时,他们也没有考虑到重要任务优先调度的问题.此外,文献[8]针对开放式实时系统提出了利用模糊控制器代替 PID 控制来实现软实时应用的调度问题,但这种调度方式都需要知道精确化的控制量和精确的任务特征,也没有考虑任务的关键性特征.

本文采用模糊调度技术实现具有模糊不确定任务特征的实时任务动态调度,通过对任务进行优先级等级划分,采用优先调度具有高优先级等级任务的调度策略,提高重要任务的调度成功率;构造基于模糊规则和反馈控制的实时调度框架,解决因系统负载不能精确建模的不可预测环境下系统的实时调度问题.

1 任务模型

在描述具体的调度算法之前,首先给出后面讨论中将涉及到的有关任务特征参数的定义与表示,见表 1.

Table 1 Some characteristic parameters and their meanings of task T

表 1 任务 T 的若干特征参数及其意义

Characteristic	Meaning	Characteristic	Meaning
$a_T(i)$	Arriving time	$C_T(i)$	Actual executing time
$d_T(i)$	Absolute deadline	$V_T(i)$	Value to system ^②
$P_T(i)$	Period	c_T	Criticality ^③
$WCET_T(i)$	Actual WCET ^①	s_T	Slack time
$EC_T(i)$	Estimated executing time	π_T	Priority level ^④

① Actual worst-case executing time, ② smaller the value, smaller the contribution,

③ smaller the value, more important the criticality, ④ smaller the value, higher the priority level

表 1 中,参数 i 为 QoS 服务等级.假设每一个实时任务都有多个逻辑版本或服务等级,同一任务的不同版本具有不同的执行时间.假设周期任务 T 有 N 个 QoS 等级 ($N \geq 2$), T 的每个 QoS 等级 $i(0 \leq i \leq N-1)$ 由表 1 特征来刻画.在这个模型中, $EC_T[i] < EC_T[i+1]$, $C_T[i] < C_T[i+1]$, 即任务的更高 QoS 等级有一个更高(估计的和实际的)的 CPU 利用率,对系统贡献更高的值 ($V_T[i+1] > V_T[i]$), 最低的 QoS 等级 0 表示拒绝任务且 $V_T[0]=0$.在最简单的形式下,每个任务只有两个 QoS 等级,分别对应着任务的准入和拒绝.此表中, π_T 和 s_T 在调度中可以是变化的,而 c_T 可以是确定的,并考虑为与服务等级无关的参数.在后面的讨论中,将 c_T 和 s_T 用模糊数来描述.

2 FFC-RTS 的框架

图 1 给出模糊反馈控制实时调度算法(fuzzy feedback-control real-time scheduling, 简称 FFC-RTS)的体系框架.该框架由基本模糊调度器和模糊反馈控制组成,其中,模糊反馈控制部分由监测器、模糊控制器和任务流调节策略组成,并构成整个算法的核心.在这个框架体系中,共有 5 类任务队列:

- 队列 1. 由各种任务模板或应用产生的任务队列,每个任务附带有不同的服务等级,按 FIFO 排列.
- 队列 2. 经准入控制允许参加调度,并经 QoS 执行器确定了服务等级的就绪任务队列,按 FIFO 排列.
- 队列 3. 经模糊调度器确定了优先级等级的不同优先级等级任务队列,按截止期从小到大排列.
- 队列 4. 经过准入控制后未被允许参加系统调度的丢弃任务队列,按 FIFO 排列.
- 队列 5. 对于单处理器系统来说,一个正在执行并占用 CPU 的执行任务.

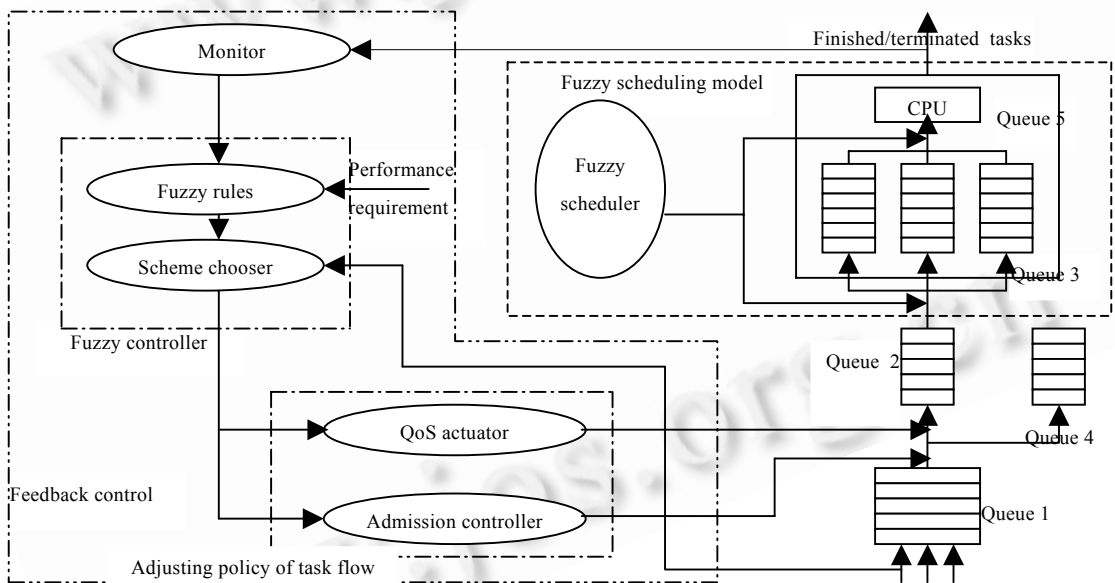


Fig.1 Structure of the fuzzy feedback-control real-time scheduling system

图 1 模糊反馈控制实时调度系统体系结构

FFC-RTS 将反馈控制设计与模糊实时调度设计集成在一起,通过对框架的设计,构造了一个基于模糊规则反馈控制的模糊实时调度器.在这个框架设计中,采用模糊调度算法作为任务的基本调度算法,解决因某些任务特征模糊不确定而不能采用相应经典调度算法所带来的困难.在模糊反馈控制部分,通过引入模糊规则解决因不准确的监测值造成不准确的控制量问题;通过引入方案选择器,定性地解决任务调节的策略,从而达到控制系统负载、确保系统的任务调度成功率的目的.

3 模糊调度器

模糊调度器用来解决具有模糊不确定特征的任务调度问题,同时解决重要任务优先调度问题.根据最大隶

属度原则确定任务的优先级等级,优先调度高优先级等级任务,实现重要任务较高的调度成功率。

3.1 任务的模糊特征参数

为了讨论简便起见,本文主要考虑任务的空闲时间和关键性,并用3个语言模糊集来描述,相应地,将任务的优先级划分成3个优先级等级,再综合这两个模糊不确定的任务特征来确定任务的优先级等级。

(1) 任务的空闲时间

任务的空闲时间由任务的截止期和剩余执行时间确定,由于任务的执行时间不能精确得到,因此空闲时间也不能精确获得,即使当截止期和剩余执行时间可以用精确数来表示时,由这两个参数计算得到的空闲时间值仍然是非准确值,这时需要对其进行模糊化处理,这里用“短”、“中”、“长”3个语言变量来描述。

(2) 任务的关键性

任务的重要程度可根据任务的关键性和对系统作出贡献的值来衡量,这里,我们把这两个参数看成是一致的,即越是关键任务,对系统的贡献就越大,所以本文只考虑用任务的关键性特征来确定任务的关键程度。本文将关键性作为模糊数,用“重要”、“一般”和“非重要”3个语言模糊集来描述。在仿真中,可假设任务的关键性特征不变,这样可以直接给出关键性的隶属度值,且任务的重要性程度由关键性参数来确定。

3.2 任务的优先级等级

将任务按“急需”调度、“普通”调度和“非急需”调度3个优先级等级划分,“急需”调度的任务具有最高优先级等级,“普通”调度的任务具有中等优先级等级,“非急需”调度的任务具有最低优先级等级。如果单从空闲时间模糊因素角度来看,“短”空闲时间、“中”空闲时间和“长”空闲时间分别对应于最高、中等和最低优先级等级。同样地,如果单从关键性模糊因素角度来看,“重要”的关键性、“一般”的关键性和“非重要”的关键性分别对应于最高、中等和最低优先级等级。对于新就绪任务,其优先级等级确定方法如下:

步骤 1. 计算隶属度函数值

根据给定的任务空闲时间的隶属函数,利用调度过程中计算得到的非准确的空闲时间值 s_T 作为输入值,确定任务属于“短”、“中”和“长”空闲时间的隶属度函数值 $\mu(s_T, i) (i=1,2,3)$; 同样地,计算任务属于“重要”、“一般”和“非重要”关键性的隶属度函数值 $\mu(c_T, i) (i=1,2,3)$ 。从而得到任务 T 的评判矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} \mu(s_T, 1) & \mu(s_T, 2) & \mu(s_T, 3) \\ \mu(c_T, 1) & \mu(c_T, 2) & \mu(c_T, 3) \end{pmatrix}.$$

步骤 2. 计算综合评判结果

考虑模糊不确定因素在综合评判中的重要程度,记 w_s 和 w_c 分别为空闲时间和关键性的权重分配系数由模糊矩阵的 Max-min 合成运算得到的综合评判结果为 $p = w \circ R$ 。其中,“ \circ ”为模糊矩阵的 Max-min 合成运算, $w = (w_s, w_c)$, $p = (p(1), p(2), p(3))$, $p(i)$ 表示综合考虑两个因素后,将任务 T 划入第 i 个优先级等级的可能性大小 ($i=1,2,3$)。权系数满足 $0 \leq w_s, w_c \leq 1$ 和 $w_s + w_c = 1$ 。

步骤 3. 确定优先级等级

根据最大隶属度原则,比较综合评判结果的各分量 $p(i) (i=1,2,3)$, 存在一个 k , 使得 $p(k) = \max_i \{p(i)\}$ 。最后,将任务 T 划入优先级等级为 k 的任务子集, $k=1,2,3$ 分别对应于最高、中等和最低优先级等级。

3.3 模糊调度算法

在应用模糊调度算法之前,首先确定需要考虑的模糊特征参数、优先级等级的个数以及每个优先级等级所对应的语言模糊集,其次确定每个模糊特征参数的语言模糊集及相应的隶属函数。具体算法步骤如下:

步骤 1. 对于就绪任务,确定任务的优先级等级,并将其插入具有相应优先级等级的任务队列中。如果考虑像空闲时间这样的动态模糊特征,则需要在每一个时间点确定每个任务的优先级等级;如果只考虑像关键性这样的静态模糊特征,只需要在每个新就绪任务到达时确定其优先级等级。

步骤 2. 如果当前 CPU 空闲,则依次从高优先级等级任务队列到低优先级等级任务队列选择有等待调度任务的队列,再从该任务队列中选择最前面的任务进行调度,即优先级等级越高、截止期越早的任务优先调

度,优先级等级最低的任务最后调度.

步骤 3. 如果任务 T_i 占用当前 CPU,其优先级等级记为 π_i ,则

(1) 如果有更高优先级等级的任务 T_j 存在(即 $\pi_j < \pi_i$),则 T_j 抢占 T_i ;

(2) 如果没有更高优先级等级的任务,但有相同优先级等级且截止期更早的任务 T_j 存在(即, $\pi_j = \pi_i$ 且 $d_j < d_i$),则 T_j 抢占 T_i ;

(3) 如果没有前两种情况发生,则 T_i 继续执行.当抢占发生时,被抢占任务将插入其原来所处的优先级等级任务队列中.

步骤 4. 循环反复直至实验结束.

4 模糊反馈控制

4.1 监视器

调度性能监视器周期性地对模糊调度器的调度性能进行监测和统计,然后将监测结果传递给模糊控制器.在后面的仿真中选择的监测性能指标为任务的截止期错失率和 CPU 的有效利用率,前一个指标作为反馈控制系统的被控量.在文献[1]中,监视器的监测周期(即抽样窗大小)取为任务的超周期,即所有任务周期的最小公倍数.

4.2 模糊控制器

模糊控制器根据监视器在上一次监测周期内获得的监测结果,利用给定的模糊规则和相应的方案选择确定在当前监测周期内各个任务的服务等级,或不准许任务参与调度,或降低/提高/维持任务的当前服务等级.

4.2.1 模糊规则

规则 1. 如果截止期错失率相对其参考指标值为“高”,则从上一次监测周期内已准入任务组中选择一个任务采取降级处理,降低其 QoS 服务等级(包括任务的拒绝准入);

规则 2. 如果截止期错失率相对其参考指标值为“低”,则从上一次监测周期内已降级处理的任务中选择一个任务采取升级处理,提高其 QoS 服务等级.

这里只给出了两个简单的模糊规则,而且将截止期错失率用语言变量“高”和“低”来描述,当然我们还可以用更多的语言变量来描述,从而确定更多的模糊规则.与文献[8]不同,在这里,模糊规则的结果部分,不是去确定某个控制量的模糊数(如比较 CPU 利用率增加值/减小值),而是一个模糊的执行指令,这个模糊执行指令由方案选择器去执行,具体的执行需要结合到上一次抽样周期内任务的服务等级来完成.

4.2.2 方案选择器

方案选择器提供的方案选择是与模糊规则对应起来的,一条模糊规则对应一种方案选择.

方案 1. 对应于规则 1,在上一次抽样窗内任务的服务等级基础上,在最高服务等级任务组中选择具有最大 CPU 利用率的任务,在当前抽样窗内进行降级处理,降低该任务的服务等级;

方案 2. 对应于规则 2,在上一次抽样窗内任务的服务等级基础上,在最低服务等级任务组中选择具有最小 CPU 利用率的任务,在当前抽样窗内进行升级处理,提高该任务的服务等级.

说明:(1) 方案选择器在确定当前抽样窗内各任务的服务等级时,预先假设任务的个数和类型不变;(2) 一旦发现前两次抽样窗内任务的个数和类型发生变化,也即当系统负载发生变化时,方案选择器则将当前抽样窗内各任务的服务等级都确定为最高级;(3) 一旦某个任务被确定为最低服务等级,则拒绝该任务准入,其被拒绝准入的信息将被传送到准入控制器,以供在下次抽样窗内确定任务的服务等级参考;(4) 当任务的执行时间模糊不确定时,用估计的 CPU 利用率来代替实际值.

4.3 任务流调节策略

任务流调节策略分为 QoS 执行器(即服务等级控制器)和任务准入控制器两个层次,两者之间起到互补作用.除了考察任务所占用的 CPU 资源大小以外,还可根据任务的价值密度大小来确定任务是否准入或是否降级

服务,以确保重要性强、价值大的任务能优先进入调度系统,优先得到较好的服务质量.经任务流调节策略后进入就绪任务队列的任务只附带指定的服务等级,而在初始任务队列中的任务附带所有的服务等级信息.

4.3.1 QoS 执行器

QoS 执行器根据方案选择器确定的任务服务等级调整方向,负责对在当前抽样窗内获准进入系统的任务进行服务等级调整.通过调整接受任务的服务等级,改变系统所需的 CPU 利用率,尽快地满足系统对截止期错失率指标的要求.模糊调度器再根据指定的服务等级,确定任务的优先级等级.

4.3.2 准入控制器

准入控制器根据方案选择器确定的任务准入信息,负责对进入调度系统的任务数目及未准入任务进行控制,起到对系统中负荷流的控制作用.每当新任务被提交给系统时,准入控制器都要进行相应的可准入检查,以决定该任务是否可以进入就绪任务队列,否则将进入丢弃任务队列而不参与当前抽样窗内的任务调度.

5 性能仿真

5.1 仿真条件

- (1) 任务 T_i 的估计执行时间 EC_i 在 7~13 个时间单元之间均匀地随机选择,实例 T_{ij} 的实际执行时间取为 $C_{ij}=EC_i+\Delta_j$,其中 Δ_j 为随机数;
- (2) 周期 P_i 按公式 $P_i=N \times EC_i / \rho$ 计算,其中 N 表示任务集中的总任务数, ρ 表示期望产生的工作负载;
- (3) 任务实例 T_{ij} 的周期、相对截止期和初始空闲时间分别为 $P_i, D_{ij}=P_i$ 和 $S_{ij}=D_{ij}-C_{ij}$.

仿真中,取 $\rho=3$,任务个数 $N(k)$ 随着抽样窗序列 k 为阶跃型变化(见图 2 和图 3 的上图,图中的 X 轴均为抽样窗序列),截止期错失率的参考值为 0.1,抽样窗大小为 1 200,权系数 $w_s=w_c=0.5$,空闲时间和关键性特征均取三角形隶属函数.此外,所有任务包括每个周期任务的所有任务实例,一个任务实例代表一个任务.

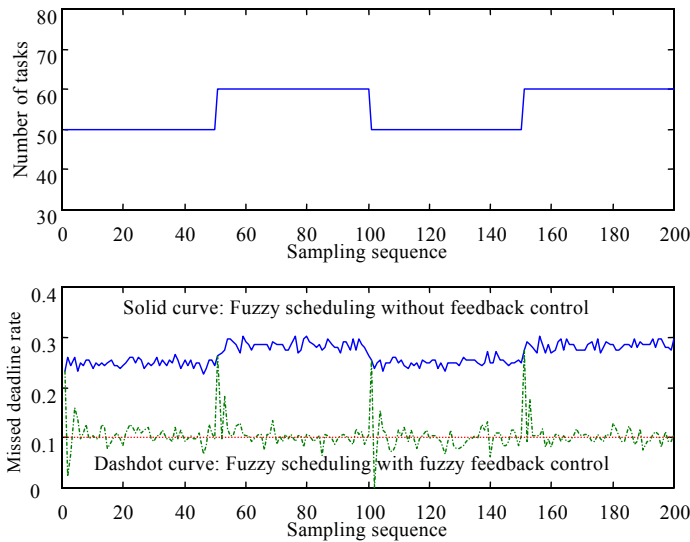


Fig.2 Number of tasks and missed deadline rate

图 2 任务个数和截止期错失率

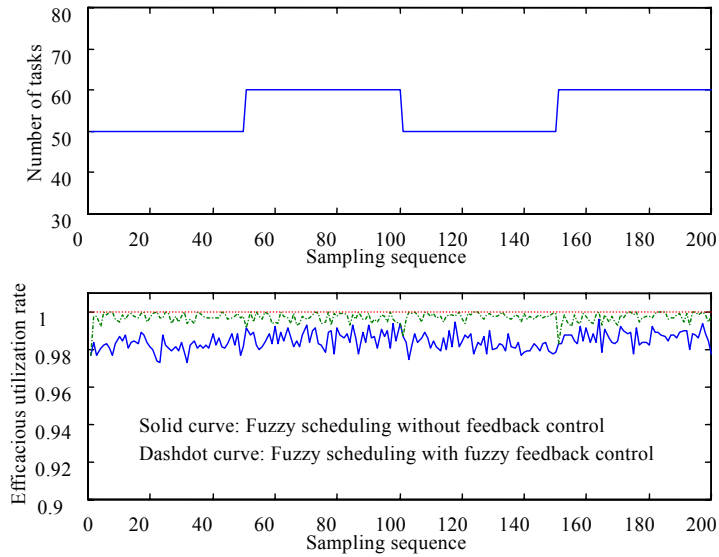


Fig.3 Number of tasks and efficacious utilization rate of CPU

图3 任务个数和 CPU 有效利用率

5.2 仿真过程

(1) 对于新任务,由准入控制器确定其是否允许参与系统的调度,若不允许,则进入“丢弃”任务队列;(2) 对于允许参加调度的任务,由 QoS 执行器确定任务的服务等级,然后进入“就绪”任务队列;(3) 对于就绪任务队列里的任务,由基本调度器确定的模糊调度算法进行调度;(4) 在一个抽样窗内,由监视器对参与调度的任务是完成调度或是中止调度两种情况进行监测统计,统计出任务的截止期错失率并送入模糊控制器,这里参与统计的任务为就绪任务;(5) 模糊控制器根据监视器提供的信息,由模糊规则来判断是需要提高还是降低任务的服务等级,再经过方案选择器确定当前抽样窗内任务的服务等级调整方向,有关信息分别送入 QoS 执行器和准入控制器;(6) 仿真过程循环执行。

在实际仿真实验中,采用查离线生成的控制表方式进行控制,其查找复杂度为 $O(1)$ 。

5.3 不同任务子集的调度成功率

记 $U(x,y)$ 表示在 x 和 y 之间的均匀随机整数.对于一组随机任务,任务总数 $N=100$,取 $a_T=U(0,2),d_T=U(10,250),WCET_T=U(1,5)$.表 2 给出基于 EDF、LSF 和模糊调度算法(加权系数相同)得到的不同重要任务的调度成功率(每个值都是经过 100 次实验得到的统计平均值).仿真结果见表 2。

Table 2 Mean scheduling success rate of different task subsets (%)

表 2 不同任务子集的平均调度成功率(%)

Scheduling algorithms	Important task	Common task	Unimportant task
FSA	98.15	69.30	67.16
EDF	73.88	75.56	74.28
LSF	76.68	75.86	75.71

(1) 基于 EDF 和 LSF 策略的调度,3 种任务子集的任务平均调度成功率相近,也就是说,重要任务、非重要任务和一般任务的调度成功率基本相近,这是因为这两种策略均未考虑任务的关键性程度。

(2) 而由模糊调度策略,更多的重要任务得到调度和提交,重要任务子集的平均调度成功率远远高于一般任务子集和非重要任务子集的平均调度成功率,实现了重要任务先调度、次要任务后调度的目的。

5.4 截止期错失率

截止期错失率=截止期错失的任务个数/任务总数.图 2 的下图为截止期错失率的变化曲线,图中实线为没

有采用模糊反馈控制时的截止期错失率,点划线为采用模糊反馈控制后得到的截止期错失率,点线为截止期错失率的参考值.由此可见,当负载突然增加或减少时,通过采用模糊反馈控制,截止期错失率在起始阶段有个较大幅度的变化后将逐步稳定在指定参考值(0.1)附近;如果不采取反馈控制措施,截止期错失率将一直都很高并远离指定参考值,而且随着负载的不同而不同.

5.5 CPU有效利用率

CPU有效利用率=所有完成任务的CPU占有时间/总时间,这里,总CPU时间包括完成任务占有的CPU,未完成任务占有的CPU,以及CPU空闲时间.图3的下图给出CPU有效利用率的仿真曲线,图中实线为没有采用模糊反馈控制时的CPU有效利用率,点划线为采用模糊反馈控制后得到的CPU有效利用率,点线为CPU有效利用率等于1.通过采取模糊反馈控制措施后,CPU有效利用率得到提高,并接近于1.此外,无论是否采用反馈控制,CPU有效利用率受任务负载不同的影响都不大.

6 结 语

当任务的某些特征模糊不确定或不可预测时,一些常用的调度算法不再适用.本文提出一种将模糊反馈控制设计与模糊实时调度设计集成的统一架构,提供系统在不确定任务特征/负载下实时调度的QoS保证.该架构主要由基本调度器和模糊反馈控制两部分组成,其中,基本调度器采用模糊理论与调度理论结合在一起构成基本调度算法,考虑任务的关键性、空闲时间两类模糊变量,按最大隶属度原理,将任务集划分为不同优先级等级的子任务集,优先级等级越高的任务优先调度,从而使得更多的重要任务得到调度.模糊反馈控制由模糊控制器、QoS执行器和准入控制器组成,其中,模糊控制器根据监视器监测的结果,运用模糊规则确定任务流的调节策略,QoS执行器和准入控制器根据模糊控制器确定的方案来调整任务的服务等级.

仿真结果表明,通过对任务的优先级等级进行模糊分类,运用模糊规则动态调整任务的QoS服务等级,可以很好地控制任务的截止期错失率,提高CPU资源的利用率,解决任务特征可能是模糊不确定和不可预测情况下的调度问题.

References:

- [1] Lu C. Feedback control real-time scheduling [Ph.D. Thesis]. Charlottesville: University of Virginia, 2001.
- [2] Terrier F, Chen Z. Fuzzy calculus applied to real time scheduling. In: Yen J, ed. Proc. of the 3rd IEEE Conf. on Fuzzy Systems, Vol 3. Piscataway: IEEE Computer Society. 1994. 1905~1910.
- [3] Lee J, Tiao A, Yen J. A fuzzy rule-based approach to real-time scheduling. In: Yen J, ed. Proc. of The 3rd IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems, Vol 2. Piscataway: IEEE Computer Society. 1994. 1394~1399.
- [4] Terrier F, Rioux L, Chen Z. Real time scheduling under uncertainty. In: Nakanishi, S. ed. Proc. of the 4th IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems, Vol 3. Piscataway: IEEE Computer Society. 1995. 1177~1184.
- [5] Litoiu M, Tadei R. Real-Time task scheduling with fuzzy deadlines and processing times. Fuzzy Set and Systems, 2001,117(1): 35~45.
- [6] Stankovic JA, Lu C, Son SH, Tao G. The case for feedback control real-time scheduling. In: Werner B, ed. Proc. of the 11th Euromicro Conf. on Real-Time Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society. 1999. 11~20.
- [7] Lu C, Stankovic JA, Tao G, Son SH. Feedback control real-time scheduling: Framework, modeling, and algorithms. Journal of Real-Time Systems, 2002,23(1-2):85~126.
- [8] Zou Y. Research on scheduling for open real-time systems [Ph.D. Thesis]. Beijing: Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, 2003 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [8] 邹勇.开放式实时系统的调度方法研究[博士学位论文].北京:中国科学院软件研究所,2003.