大规模设备协同中的时间建模与验证

荣晓慧 马世龙 邓 攀 陈 峰

(北京航空航天大学 软件开发环境国家重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 针对大规模设备协同系统中时间属性复杂、时间约束验证困难的特点,给出了大规模设备协同中的时间属性建模方法. 针对设备操作时间和状态维持时间 2 种时间属性,通过在操作上附加时间属性实现了对设备操作时间的建模,通过在连接符上附加时间区间属性,实现了对状态维持时间的建模. 在此模型的基础上,给出了大规模设备协同中 4 种基本结构的时间计算方法,并通过结构等价,将基本结构等价为一个连接符,从而实现了一个设备协同模型中所有节点的时间计算;并给出了大规模设备协同中的时间约束验证规则. 通过相关比较及实验分析,验证了该方法具有更高的准确度,计算偏差较低且稳定,能够满足大规模设备协同系统的性能要求.

关 键 词: 大规模设备协同; 时间建模; 时间约束验证

中图分类号: TP 39

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0091-07

Time modeling and constraint verification of large-scale device collaboration system

Rong Xiaohui Ma Shilong Deng Pan Chen Feng

(State Key Laboratory of Software Development Environment, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of complex time attributes and difficult time constraint verification in large-scale device collaboration system, a large-scale device collaboration model containing time attributes was presented. The time attribute was composed of device operation time and status duration time. By adding the time property on operations, the modeling of device operation time was achieved, and by adding the time property on connectors, the modeling of status duration time was achieved. Based on the time model, a calculation method of time of four basic structures in large-scale device collaboration was proposed. Through structural equivalence, the basic structure was equaled as a connector. So the time properties of all nodes in device collaboration model can be calculated. And the rule of time constraint verification was given. The result of comparison and simulation experiments shows that the method is more accurate, bias of the method is lower and it can satisfy the performance requirements of the large-scale device collaboration system.

Key words: large-scale device collaboration; time modeling; time constraint verification

在物联网、区域管理等领域,大规模设备协同日益发挥出其关键作用,成为重要的研究内容. 大规模设备协同中的时间管理是研究协同流程执行的时间维计划[1],其关键在于时间信息的有效建模与验证,这是一个最具挑战性的研究课题. 例如在奥运景观照明控制系统中,近万盏照明设备的灯光效果随时间逐渐变化,实现照明的艺术性.

现有关于协同中的时间建模主要集中在工作

收稿日期: 2010-07-30; **网络出版时间**: 2011-12-21 09:56; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111221.0956.005

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111221.0956.005.html

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAK12B11); 软件开发环境国家重点实验室探索性自主研究课题资助项目(SKLSDE-2010ZX-06)

作者简介: 荣晓慧(1982 -),女,山东威海人,博士生,rongxh@nlsde.buaa.edu.cn.

流领域[2-4]. 可是,大规模设备协同流程建模与实例化的复杂性使上述领域的时间建模技术不适用于设备协同中的时间管理.

大规模设备协同中的时间属性相对于其他领域的时间属性,其时间约束复杂性主要体现在以下几点:

1) 大规模设备协同中的时间属性包括2种:①设备操作的耗时,即执行一个设备操作需要的时间,例如,一个开灯操作需要5 s执行完成. 对于设备而言,一个操作的执行时间往往由硬件设备决定,因而相对固定. ②状态的维持时间,即对设备的控制结束后,需要在一段时间内维持设备状态. 例如在奥运中心区的景观照明控制过程中,为了实现一定范围内的照明效果,在一些灯具开启后,需要在一定时间区间内维持灯具的开启状态,保证在这段时间内设备的状态不被改变. 如何实现这2类时间属性建模是设备协同中的一个重要问题.

2) 在一次大规模设备协同过程中,往往存在多个并行执行的分支,当多个分支合并时,时间约束的验证成为一个重要的问题,特别是协同流程中同时存在操作的耗时属性和状态维持时间属性,多并行分支的时间约束验证成为研究难点.

目前关于时间管理的研究中,存在时间约束描述不全面的问题. 例如,文献[5]在对工作流中的时间属性建模时,活动的时间属性包括活动延时、最早开始时间、最晚结束时间. 该模型中没有考虑活动的持续时间,在对大规模设备协同流程建模时,表达能力欠佳. 同时,目前时间计算和约束验证的研究[6-13]中,在计算条件结构和循环结构时,将多个分支的时间区间进行合并,使用最大时间计算方法对条件结构和循环结构的时间进行计算,存在时间属性计算不准确的问题. 从而导致在对时间约束进行检验时,无法发现一些潜在的时间约束不满足的情况.

针对上述问题,本文给出了大规模设备协同中的时间属性建模方法,通过在设备协同模型[14]中的操作上附加时间属性,实现对操作耗时属性的建模,通过在设备协同模型中的连接符上附加时间区间属性,实现对状态维持时间属性的建模. 在此基础上,给出了大规模设备协同中的时间属性计算方法以及多分支合并时的时间约束验证准则,通过时间分化,实现了对条件结构和循环结构时间属性的精确描述和计算,通过精确时间属性建模,可以发现一些潜在的不满足时间约束的操作.

1 大规模设备协同时间建模

定义1 带时间属性的设备协同模型.

在设备协同系统中,时间属性包括设备操作的执行时间和设备状态的维持时间. 一个具有时间属性的设备协同模型 P_t 定义为 $P_t=(O,C;F,M_0,T_C,T_O)$. 其中,O 表示变迁;C 表示库所;F 表示有向弧,$F\subseteq(O\times C)\cup(C\times O)$,有向弧包括库所到变迁的有向弧和变迁到库所的有向弧2种,库所与库所之间、变迁与变迁之间不允许存在有向弧;M_0 表示初始状态;$T_C:C\to Z\times Z, Z\geqslant 0$,表示一个状态的持续时间$[\alpha,\beta]$,其中 α 表示该状态最少维持时间,β 表示该状态最多的维持时间. 状态最早开始的时间记做 T^{LB},状态最晚开始的时间记做 T^{LE}. 状态的持续时间由用户定义,默认的持续时间是$[0,0]$,即不在该状态;$T_O:O\to Z$,$Z\geqslant 0$,表示一个操作的执行时间. 默认的执行时间为0,即该操作可以立即完成. 对于设备协同模型中的占位操作 Z,其执行时间即为0. 一个操作最早的开始执行时刻记做 T^{EB},最晚开始执行时刻记做 T^{EE}.

在对一个协同流程进行建模时,使用变迁表示一个操作,库所表示操作执行完成后的状态,变迁到库所的有向弧表示一个设备操作执行完成并维持状态,库所到变迁的有向弧表示设备停止维持某状态开始执行新的操作. 对于条件结构和循环结构,使用条件函数表示不同分支的执行条件,只有当条件满足时才执行该分支的操作.

定义2 外延.

设 $P_t=(O,C;F,M_0,T_C,T_O)$ 是带时间属性的设备协同模型,$P_{t_1}=(O_1,C_1;F_1,M_{01},T_{C_1},T_{O_1})$ 是 P_t 的子模型,$C_1\subseteq C, O_1\subseteq O, F_1\subseteq F$,则

对于任意的 $x\in\{O\cup C\}$,定义 x 的前驱为

$$\dot{x}=\{y\mid y\in O\cup C\wedge(y,x)\in F\}$$

对于任意的 $x\in\{O\cup C\}$,定义 x 的后继为

$$x\dot{}=\{y\mid y\in O\cup C\wedge(x,y)\in F\}$$

P_{t_1} 后继外延定义为

$$P_{t_1}^{\cdot}=\{x\mid x\in(C-C_1)\cup(O-O_1)\wedge\exists y\in C_1\cup O_1, x\in y\dot{}\}$$

P_{t_1} 前驱外延定义为

$$\dot{}P_{t_1}=\{x\mid x\in(C-C_1)\cup(O-O_1)\wedge\exists y\in C_1\cup O_1, x\in\dot{}y\}$$

定义3 结构等价.

设 $P_t=(O,C;F,M_0,T_C,T_O)$ 是带时间属性的设备协同模型,$P_{t_1}=(O_1,C_1;F_1,M_{01},T_{C_1},T_{O_1})$ 是

P_t 的子模型,$C_1 \subseteq C, O_1 \subseteq O, F_1 \subseteq F$.

如果 $\cdot P_{t_1} \cup P_{t_1}^{\cdot} \subseteq C - C_1$,则 P_{t_1} 等价于一个操作,记做 $P_{t_1} \overset{\text{def}}{=\!=} P^O$.

如果 $\cdot P_{t_1} \cup P_{t_1}^{\cdot} \subseteq O - O_1$,则 P_{t_1} 等价于一个连接符,记做 $P_{t_1} \overset{\text{def}}{=\!=} P^C$.

对时间属性建模时,首先根据操作、连接符关系构造基本设备协同模型,之后,在为操作附加 T_O 属性,为连接符附加 T_C 属性,对于没有指定 T_C 属性的操作,设置属性[0, ∞],对于没有指定 T_O 属性的操作,设置属性 0.

与传统的与时序 Petri 网建模方法相比,本文给出的大规模设备协同时间建模方法通过将复杂的流程结构替换为等价的基本操作,简化了协同流程,实现了协同流程的压缩,从而降低了大规模协同流程时间属性验证的复杂度.

2　大规模设备协同中时间计算方法

在进行时间属性计算时,首先给出 4 种基本结构的时间计算方法,在此基础上,可以使用结构等价,将基本结构等价为一个连接符,从而实现一个设备协同模型中所有节点的时间计算.

2.1　串行结构

设 $P_t = (O, C; F, M_0, T_C, T_O)$ 是只包含了串行操作形成的包含时间属性的设备协同模型,其操作序列为 $s = c_s o_1 c_1 o_2 c_2 \cdots o_r c_r$. 对于一个操作 o_i,其操作的执行时间为 T_{O_i},对于一个连接符 c_i,其持续时间为 $T_{c_i} = [\alpha_i, \beta_i]$. 设 Z_a 和 Z_b 为 2 个操作,$\cdot s = \{Z_b\}, s^{\cdot} = \{Z_a\}$.

对于任意 $o_i, i > 1$,计算的最早开始执行时间为

$$\gamma_{\min}(o_i) = T_{Z_b}^{\text{EB}} + \alpha_s + \sum_{m=1}^{i-1} \alpha_m + \sum_{m=1}^{i-1} T_{o_m} \quad o_i \in O$$

计算的最晚开始执行时间为

$$\gamma_{\max}(o_i) = T_{Z_b}^{\text{EE}} + \beta_s + \sum_{m=1}^{i-1} \beta_m + \sum_{m=1}^{i-1} T_{o_m} \quad o_i \in O$$

从而可以获得操作 Z_a 计算的开始执行的时间区间为

$$[T^{\text{EB}}, T^{\text{EE}}] = \left[T_{Z_b}^{\text{EB}} + \alpha_s + \sum_{m=1}^{r} \alpha_m + \sum_{m=1}^{r} T_{o_m}, \; T_{Z_b}^{\text{EE}} + \beta_s + \sum_{m=1}^{r} \beta_m + \sum_{m=1}^{r} T_{o_m} \right]$$

根据结构等价性定义可知,串行结构 s 等价于一个连接符 c,在使用连接符 c 替换后,为了保持其时间上的等价,c 的持续时间为

$$\left[\alpha_s + \sum_{m=1}^{r} \alpha_m + \sum_{m=1}^{r} T_{o_m}, \beta_s + \sum_{m=1}^{r} \beta_m + \sum_{m=1}^{r} T_{o_m} \right]$$

2.2　并行结构

设 $P_t = (O, C; F, M_0, T_C, T_O)$ 是一个只包含并行结构的带时间属性的设备协同模型. P_1 和 P_2 是其中的 2 个分支,$P_1 = c_{10} o_{11} c_{11} o_{12} c_{12} \cdots o_{1r} c_{1r}$,$P_2 = c_{20} o_{21} c_{21} o_{22} c_{22} \cdots o_{2r} c_{2r}$,$Z_b$ 和 Z_a 是 2 个操作,$P_1^{\cdot} = \{Z_a\}, \cdot P_1 = \{Z_b\}, P_2^{\cdot} = \{Z_a\}, \cdot P_2 = \{Z_b\}$.

操作 Z_a 在 P_t 中计算的最早开始执行时间为

$$\gamma_{\min}(Z_a) = \max \left\{ T_{Z_b}^{\text{EB}} + \sum_{m=0}^{r} \alpha_{1m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_1 m} T_{Z_b}^{\text{EB}} + \sum_{m=0}^{r} \alpha_{2m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_2 m} \right\}$$

操作 Z_a 在 P_t 中计算的最晚开始执行时间为

$$\gamma_{\max}(Z_a) = \min \left\{ T_{Z_b}^{\text{EE}} + \sum_{m=0}^{r} \beta_{1m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_1 m} T_{Z_b}^{\text{EE}} + \sum_{m=0}^{r} \beta_{2m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_2 m} \right\}$$

从而可以获得操作 Z_a 计算的开始执行的时间区间为

$$[T^{\text{EB}}, T^{\text{EE}}] = \left[\max \left\{ T_{Z_b}^{\text{EB}} + \sum_{m=0}^{r} \alpha_{1m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_1 m}, T_{Z_b}^{\text{EB}} + \sum_{m=0}^{r} \alpha_{2m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_2 m} \right\}, \min \left\{ T_{Z_b}^{\text{EE}} + \sum_{m=0}^{r} \beta_{1m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_1 m}, T_{Z_b}^{\text{EE}} + \sum_{m=0}^{r} \beta_{2m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_2 m} \right\} \right]$$

根据结构等价性的定义可知,并行结构 P_1,P_2 等价于操作序列 c,为了保持其时间上的等价,c 的持续时间为

$$\left[\max \left\{ \sum_{m=0}^{r} \alpha_{1m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_1 m}, \sum_{m=0}^{r} \alpha_{2m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_2 m} \right\}, \min \left\{ \sum_{m=0}^{r} \beta_{1m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_1 m}, \sum_{m=0}^{r} \beta_{2m} + \sum_{m=1}^{r} T_{o_2 m} \right\} \right]$$

2.3　条件结构

设 $P_t = (O, C; F, M_0, T_C, T_O)$ 是一个只包含条件结构带时间属性的设备协同模型,P_1 和 P_2 为条件结构的 2 个分支,$P_1 = c_s o_{11} c_{11} o_{12} c_{12} \cdots o_{1m} c_e$,$P_2 = c_s o_{21} c_{21} o_{22} c_{22} \cdots o_{2m} c_e$,$Z_b$ 和 Z_a 是 2 个操作,$P_1^{\cdot} = \{Z_a\}, \cdot P_1 = \{Z_b\}, P_2^{\cdot} = \{Z_a\}, \cdot P_2 = \{Z_b\}$. 条件判断 c_s 的时间属性为 $T_{c_s} = [\alpha_s, \beta_s]$,表示操作 Z_a 执行完成后最少经过时间 α_s、最多经过时间 β_s 开始进入条件结构. 条件结束 c_e 的时间属性 $T_{c_e} = [\alpha_e, \beta_e]$.

由于 P_1 和 P_2 中只有 1 个分支会执行,因而操作 Z_a 的预测执行时间为 2 个时间区间,即

$$[T^{\text{EB}}, T^{\text{EE}}] =$$

$$\left[T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\alpha_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\alpha_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m}+\alpha_{\mathrm{e}},\right.$$
$$\left.T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\beta_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\beta_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m}+\beta_{\mathrm{e}}\right]$$

或者

$$[T^{\mathrm{EB}},T^{\mathrm{EE}}]=$$
$$\left[T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\alpha_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\alpha_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}+\alpha_{\mathrm{e}},\right.$$
$$\left.T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\beta_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\beta_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}+\beta_{\mathrm{e}}\right]$$

由于条件结构产生了时间的分化,为了保持其时间上的等价,在计算持续时间时,将条件结构等价于2个操作序列,从而实现条件结构时间属性的分化,在该方法下,条件结构等价于2个操作序列 $Z_{b_1}c_1Z_{a_1}$ 和 $Z_{b_2}c_2Z_{a_2}$.

操作 Z_{a_1} 的预测的执行时间为

$$[T^{\mathrm{EB}},T^{\mathrm{EE}}]=$$
$$\left[T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\alpha_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\alpha_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m}+\alpha_{\mathrm{e}},\right.$$
$$\left.T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\beta_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\beta_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m}+\beta_{\mathrm{e}}\right]$$

c_1 的持续时间为

$$\left[\alpha_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\alpha_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m}+\alpha_{\mathrm{e}},\right.$$
$$\left.\beta_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\beta_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m}+\beta_{\mathrm{e}}\right]$$

操作 Z_{a_2} 的预测的执行时间为

$$[T^{\mathrm{EB}},T^{\mathrm{EE}}]=$$
$$\left[T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\alpha_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\alpha_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}+\alpha_{\mathrm{e}},\right.$$
$$\left.T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\beta_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\beta_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}+\beta_{\mathrm{e}}\right]$$

c_2 的持续时间为

$$\left[\alpha_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\alpha_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}+\alpha_{\mathrm{e}},\right.$$
$$\left.\beta_{\mathrm{s}}+\sum_{m=1}^{r}\beta_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}+\beta_{\mathrm{e}}\right]$$

2.4 循环结构

设 $P_t=(O,C;F,M_0,T_C,T_O)$ 是一个包含循环结构的设备协同模型,P 为一个串行操作序列,$P=co_1c_1o_2c_2\cdots o_nc_no_z$,对于 o_i,其执行时间属性为 T_{o_i},对于 o_z,其执行时间属性为0,对于 c_i,其持续时间区间属性为 $[\alpha_i,\beta_i]$,Z_b 和 Z_a 是2个操作,$c^{\cdot}=\{Z_a,o_1\}$,$^{\cdot}c=\{Z_b\}$.

循环结构会根据循环条件判断是否进入循环体执行,因而循环结构中的操作 o_i 可能执行多次,对于 o_i 的第 k 次执行,其预测最早开始执行时间为

$$\gamma_{\min}^{(k)}(o_i)=T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+(k-1)\times(T_{o_i}+\alpha_i)$$

预测的最晚开始执行时间为

$$\gamma_{\max}^{(k)}(o_i)=T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+(k-1)\times(T_{o_i}+\beta_i)$$

因而,操作 o_i 的预测执行时间为多次执行的时间的并集,即

$$[T^{\mathrm{EB}},T^{\mathrm{EE}}]=\bigcup_{k=1}^{n}(T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+(k-1)\times(T_{o_i}+\alpha_i),$$
$$T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+(k-1)\times(T_{o_i}+\beta_i))$$

操作 Z_a 的执行时间为

$$[T^{\mathrm{EB}},T^{\mathrm{EE}}]=\bigcup_{k=1}^{n}(T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+k\times(T_{o_i}+\alpha_i),$$
$$T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+k\times(T_{o_i}+\beta_i))$$

由于循环结构产生了时间的分化,为了保持其时间上的等价,在计算持续时间时,将循环结构等价于多个操作序列 $Z_{b_1}c_1Z_{a_1},\cdots,Z_{b_2}c_2Z_{a_2}$,从而实现循环结构时间属性的分化. 这种方法适合在协同任务执行过程中对设备预约时使用,为防止过度分化,仅预测下次循环执行时间.

3 大规模设备协同中时间约束验证

对于一个包含时间属性的设备协同流程,即使其满足结构上可达性,并不能保证协同任务在执行过程中,可以通过调度使其满足时间约束. 特别是对于一个复杂的协同流程,其时间约束往往不能通过直观观察获得,而需要对流程中的时间属性进行考察,验证是否可以通过调整状态的持续时间使其满足时间约束.

定义4 设 o 是一个操作,$\gamma_{\min}(o)$ 为预测的最早开始执行,$\gamma_{\max}(o)$ 为预测的最晚开始执行时间,o 是满足时间约束的当且仅当 $\gamma_{\min}(o)\leqslant\gamma_{\max}(o)$.

如果 o 是满足时间约束的,则可以通过一定调度策略调整操作的持续时间,实现操作 o 在某个时刻执行. 如果对于设备协同模型 P_t 中所有的操作都是满足时间约束的,则称 P_t 是满足时间约束的.

定理1 大规模设备协同模型中串行结构是满足时间约束的.

证明

1) 设 P 是一个串行结构,对应的操作序列为 $o_1c_1o_2c_2\cdots o_mc_mo$.

2) 当 $m=1$ 时,$^{\cdot}o=S$,因而 o 是满足时间约束的.

3) 假设当 $m=n$ 时成立,即 $o_1c_1o_2c_2\cdots o_nc_no$ 是满足时间约束的,$\gamma_{\min}(o_n)\leqslant\gamma_{\max}(o_n)$.

4) 当 $m=n+1$ 时,操作序列为 $o_1c_1o_2c_2\cdots o_nc_no_{n+1}c_{n+1}o$. $\gamma_{\min}(o_{n+1})=\gamma_{\min}(o_n)+T_{o_n}+\alpha_n$, $\gamma_{\max}(o_{n+1})=\gamma_{\max}(o_n)+T_{o_n}+\beta_n$. 因为 $\alpha_n\leqslant\beta_n$, $\gamma_{\min}(o_n)\leqslant\gamma_{\max}(o_n)$,所以 $\gamma_{\min}(o_n)+T_{o_n}+\alpha_n\leqslant\gamma_{\max}(o_n)+T_{o_n}+\beta_n$,即 $\gamma_{\min}(o_{n+1})\leqslant\gamma_{\max}(o_{n+1})$.

5) 所以对于任意 m,都有 $\gamma_{\max}(o)=\min\left\{T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\sum_{m=1}^{r}\beta_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m},T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}\right\}$ 是满足时间约束的. **证毕**

定理 2　对于设备协同模型 P_t 中的任意操作 o,如果 $o\in O$, $|\{c|c\in{}^{\cdot}o\}|=1$,则 P_t 是满足时间约束的.

证明

1) 由于 P_t 中的任意操作 o 的前驱节点只有一个,P_t 因而不存在同步操作和并行结构.

2) 如果 P_t 是一个串行结构,则由定理 1 可得 P_t 是满足时间约束的.

3) 如果 P_t 是一个条件结构,根据条件结构的时间计算方法可知,条件结构可以通过分化,转换为 2 个串行结构,由于串行结构是满足时间约束的,因而条件结构是满足时间约束的.

4) 如果 P_t 是一个循环结构,根据循环结构的时间计算方法可知,循环结构可以通过分化,转换为多个串行结构,P_t 实际执行的流程是一个串行结构的多次执行,因而也是满足时间约束的.

证毕

定理 3　设设备协同模型 P_t 是仅包含 2 个分支 P_1, P_2 的并行结构,在 P_1, P_2 中,仅包含串行结构,P_1, P_2 在操作 o 处同步. 如果

$$\max\left\{\sum_{m=0}^{r}\alpha_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m},\sum_{m=0}^{r}\alpha_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}\right\}\leqslant\min\left\{\sum_{m=0}^{r}\beta_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m},\sum_{m=0}^{r}\beta_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}\right\}$$

则 P_t 是满足时间约束的.

证明

1) 根据设备协同模型并行结构的时间计算方法,在分支 P_1 中,o 的最早开始执行时间为 $T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\sum_{m=0}^{r}\alpha_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m}$,$o$ 的最晚开始执行时间为 $T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\sum_{m=0}^{r}\beta_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m}$. 在分支 P_2 中,o 的最早开始执行时间为 $T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\sum_{m=0}^{r}\alpha_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}$,$o$ 的最晚开始执行时间为 $T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\sum_{m=0}^{r}\beta_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}$.

2) 则 o 处的最早开始执行时间 $\gamma_{\min}(o)=\max\left\{T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\sum_{m=0}^{r}\alpha_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m},T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\sum_{m=0}^{r}\alpha_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}\right\}$,最晚开始执行时间 $\gamma_{\max}(o)=\min\left\{T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\sum_{m=0}^{r}\beta_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m},T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\sum_{m=0}^{r}\beta_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}\right\}$.

3) 因为 $\max\left\{T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\sum_{m=0}^{r}\alpha_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m},T_{Z_b}^{\mathrm{EB}}+\sum_{m=0}^{r}\alpha_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}\right\}\leqslant\min\left\{T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\sum_{m=0}^{r}\beta_{1m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_1m},T_{Z_b}^{\mathrm{EE}}+\sum_{m=0}^{r}\beta_{2m}+\sum_{m=1}^{r}T_{o_2m}\right\}$, 所以 $\gamma_{\min}(o)\leqslant\gamma_{\max}(o)$,根据定义可知 P_t 是满足时间约束的.

证毕

4　时间约束验证准确度比较

目前在时间约束验证的相关研究中[7-8],研究人员通常在计算条件结构的时间属性时,将条件结构的多个分支时间区间的最大范围作为条件结构的时间区间,然后通过验证各个结构的时间约束条件,实现整个流程中的时间约束验证. 该方法称为最大时间计算方法(MTI, Maximum Time Interval).

下面通过一个例子,分析 MTI 与本文提出的大规模设备协同中的时间计算方法(TID, Time Interval Divided)的差别,比较这 2 种方法在进行时间约束检验时的准确度.

设在大规模设备协同流程中有 2 个并行分支 P_1 和 P_2 需要在操作 Z_2 处同步,即 $P_1^{\cdot}=\{Z_2\}$, $P_2^{\cdot}=\{Z_2\}$. 根据 P_1 分支的时间计算,Z_2 的执行时间为 $[T_1,T_2]$,第 2 个 P_2 分支包含了条件结构,使用时间计算方法:操作 Z_2 的执行时间为

$$[T^{\mathrm{EB}},T^{\mathrm{EE}}]=[\gamma_{\min}^1(Z_2),\gamma_{\max}^1(Z_2)]$$

或者

$$[T^{\mathrm{EB}},T^{\mathrm{EE}}]=[\gamma_{\min}^2(Z_2),\gamma_{\max}^2(Z_2)]$$

1) MTI 方法. 首先计算操作 Z_2 在分支 P_2 中的时间,如果采用 MTI 方法,操作 Z_2 的执行时间区间为条件结构的 2 个分支执行时间区间的最大值,即为:$[T^{\mathrm{EB}},T^{\mathrm{EE}}]=[\min\{\gamma_{\min}^1(Z_2),\gamma_{\min}^2(Z_2)\},\max\{\gamma_{\max}^1(Z_2),\gamma_{\max}^2(Z_2)\}]$.

为了讨论方便,假设 $\gamma_{\min}^1(Z_2)\leqslant\gamma_{\min}^2(Z_2)$. 对于 $\gamma_{\min}^1(Z_2)>\gamma_{\min}^2(Z_2)$ 的情况可以与之类似,不再赘述.

当 $T_1\leqslant\gamma_{\min}^1(Z_2)\leqslant\gamma_{\min}^2(Z_2)$ 时,如果 $T_1\leqslant\gamma_{\min}^1(Z_2)\leqslant T_2\leqslant\gamma_{\max}^1(Z_2)$, $T_2\leqslant\gamma_{\min}^2(Z_2)\leqslant\gamma_{\max}^2(Z_2)\leqslant\gamma_{\max}^1(Z_2)$,即它们之间关系为:$T_1\leqslant$

$\gamma^1_{\min}(Z_2) \leqslant T_2 \leqslant \gamma^2_{\min}(Z_2) \leqslant \gamma^2_{\max}(Z_2) \leqslant \gamma^1_{\max}(Z_2)$.

由上述关系可知

$$\min\{\gamma^1_{\min}(Z_2), \gamma^2_{\min}(Z_2)\} = \gamma^1_{\min}(Z_2)$$

$$\max\{\gamma^1_{\max}(Z_2), \gamma^2_{\max}(Z_2)\} = \gamma^1_{\max}(Z_2)$$

即操作 Z_2 在 P_2 中的执行时间为 $[\gamma^1_{\min}(Z_2), \gamma^1_{\max}(Z_2)]$.

综合并行分支 P_1 和 P_2 计算操作 Z_2 的开始执行时间区间进行时间约束检验. 操作 Z_2 的最早执行时间为 $\max\{T_1, \gamma^1_{\min}(Z_2)\} = \gamma^1_{\min}(Z_2)$, 操作 Z_2 的最晚执行时间为 $\min\{T_2, \gamma^1_{\max}(Z_2)\} = T_2$, 由于 $\gamma^1_{\min}(Z_2) \leqslant T_2$, 因此操作 Z_2 是满足时间约束的, Z_2 的执行时间为 $[\gamma^1_{\min}(Z_2), T_2]$.

2) TID 方法. 在 TID 方法中, 根据并行结构时间计算方法, 操作 Z_2 的执行时间区间分化为 2 个时间区间, 分别为: $[T^{EB}, T^{EE}] = [\gamma^1_{\min}(Z_2), \gamma^1_{\max}(Z_2)]$ 和 $[T^{EB}, T^{EE}] = [\gamma^2_{\min}(Z_2), \gamma^2_{\max}(Z_2)]$, 则在分支 P_2 中, Z_2 的执行时间为 $[\gamma^1_{\min}(Z_2), \gamma^1_{\max}(Z_2)]$ 或者 $[\gamma^2_{\min}(Z_2), \gamma^2_{\max}(Z_2)]$. 在进行时间约束检验时, 进行时间区间分化, Z_2 处满足时间约束的条件为: 当 $T_1 \leqslant \gamma^1_{\min}(Z_2) \leqslant \gamma^2_{\min}(Z_2)$ 时, 考虑一种情况, $T_1 \leqslant \gamma^1_{\min}(Z_2) \leqslant T_2 \leqslant \gamma^2_{\min}(Z_2) \leqslant \gamma^2_{\max}(Z_2) \leqslant \gamma^1_{\max}(Z_2)$.

对于第 1 个区间, 由于 $\max\{T_1, \gamma^1_{\min}(Z_2)\} = \gamma^1_{\min}(Z_2)$, $\min\{T_2, \gamma^1_{\max}(Z_2)\} = T_2$, 而且 $\gamma^1_{\min}(Z_2) \leqslant T_1$, 因此满足时间约束, Z_2 的执行时间区间为 $[\gamma^1_{\min}(Z_2), T_2]$.

第 2 个区间的分析方法与第 1 个区间分析方法类似. 由于 $\max\{T_1, \gamma^2_{\min}(Z_2)\} = \gamma^2_{\min}(Z_2)$, $\min\{T_2, \gamma^2_{\max}(Z_2)\} = T_2$, 且 $T_2 \leqslant \gamma^1_{\min}(Z_2)$, 因此 Z_2 不满足时间约束.

因此当 $T_1 \leqslant \gamma^1_{\min}(Z_2) \leqslant T_2 \leqslant \gamma^2_{\min}(Z_2) \leqslant \gamma^2_{\max}(Z_2) \leqslant \gamma^1_{\max}(Z_2)$ 时, 如果使用 TID 方法进行验证, 则可以发现对于条件结构中的第 2 个分支无法满足时间约束. 使用 MTI 方法进行验证时, 无法发现该问题. 由此可见, 采用 TID 方法计算的时间及时间约束验证的准确度更高.

5 时间计算准确度实验分析

选取不同的任务负载下测试大规模设备协同中时间计算的准确度. 准确度用活动的计算时间 t_{es} 与最终时间监控所得的实际开始时间 t_r 之差来衡量, 即 $\Delta t = t_{es} - t_r$, 任务负载则通过提交一定数量的任务来模拟, 并且设置一次测试过程中所有任务的提交时间少于任务的平均执行时间以维持系统中一定的任务并发负载. 基于以上约定, 则系统任务负载可以近似用提交的任务数目来表示.

任务所执行的流程随机分配. 一组实验中提交任务数分别设置为 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80. 进行 10 组实验, 对每组实验数据根据不同的任务并发数分别求偏差的平均值 $\bar{t}$ 和标准差 $\sigma(t)$:

$$\bar{t} = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} t_i$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}(t_i - \bar{t})^2}$$

然后再将求得的 10 组平均值和标准差以不同的任务并发数归类求平均, 测得最终实验结果, 如图 1 所示.

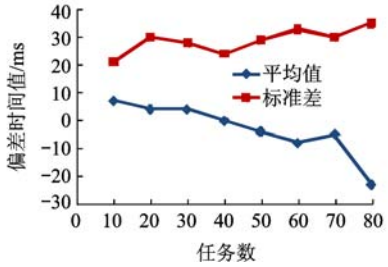

图 1 计算偏差实验结果

从总体上看, 由平均值可得系统的计算偏差在 0 的上下变动, 由标准差可见其偏差上下平均波动近似为 30 ms, 表示大部分实验数值和其平均值之间差异较小, 说明在不同的大规模设备协同任务中时间计算的偏差较为稳定, 接近平均值.

从任务负载对计算偏差的影响角度看, 随着任务并发数的增大, 计算偏差平均值呈下降趋势, 标准差呈上升趋势, 但两者的变化幅度较小. 计算偏差的下降说明随着任务并发数的增大, 系统对任务的处理速度略有下降, 执行时间增长, 故计算时间差在减小并趋于负数; 计算偏差的波动幅度稍有增大, 与任务并发数增大导致的系统处理速度降低和处理器资源分配有关. 可见, 任务并发数对计算偏差的影响不尽明显, 根据系统的任务运行负载调整计算参数是值得进一步讨论和分析的.

6 结 论

本文针对大规模设备协同系统中时间属性复杂、时间约束验证困难的特点, 给出了大规模设备协同中的时间属性建模方法. 在此模型的基础上, 给出了设备协同中的时间属性计算方法以及多分支合并时的时间约束验证准则.

本文建立的大规模设备协同时间模型包含设

备操作时间和状态维持时间,时间属性丰富,解决了时间模型中时间约束描述不全面的问题. 通过时间属性计算方法以及时间约束验证准则能够发现大规模设备协同过程中一些潜在的不满足时间约束的操作. 经过实验分析,验证了该方法的计算偏差能够满足大规模设备协同系统的性能要求.

参考文献(References)

[1] 李慧芳,范玉顺. 工作流系统时间管理[J]. 软件学报,2002,13(8):1552 - 1558
Li Huifang, Fan Yushun. Overview on managing time in workflow systems[J]. Journal of Software, 2002, 13(8): 1552 - 1558(in Chinese)

[2] Hyun Son J, Ho Kim M. Improving the performance of time-constrained workflow processing[J]. Journal of Systems and Software, 2001, 58(3): 211 - 219

[3] Julia S, de Oliveira F F, Valette R. Real time scheduling of workflow management systems based on a p-time Petri net model with hybrid resource[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16(4): 462 - 482

[4] Niu W, Yang Z. Workflow model based on time-extended and hierarchy-extended petri-net[C]//Proceedings of 2008 International Symposiums on Information Processing. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2008: 457 - 461

[5] Eder J, Panagos E, Rabinovich M. Time constraints in workflow systems[C]//Proceedings of the 11th Conference on Advanced Information Systems Engineering. Berlin: Springer, 1999: 286 - 300

[6] Nadeem F, Fahringer T. Predicting the execution time of grid workflow applications through local learning[C]//Proceedings of the Conference on High Performance Computing Networking, Storage and Analysis. New York: Association for Computing Machinery, 2009: 1 - 12

[7] 庞辉,方宗德,赵勇. 时间约束工作流模型的简化分析与可调度性验证[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(11):2217 - 2223
Pang Hui, Fang Zongde, Zhao Yong. Simplification analysis and schedulability verification of timing constraint workflow model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(11): 2217 - 2223(in Chinese)

[8] 唐达,刘丹妮. 基于层次时间 Petri 网的工作流模型可达性分析方法[J]. 计算机集成制造系统,2006,12(4):487 - 493
Tang Da, Liu Danni. Method of reachability analysis in HTPN based workflow model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(4): 487 - 493(in Chinese)

[9] 宋巍,窦万春,刘茜萍. 时间约束 Petri 网及其可调度性分析与验证[J]. 软件学报,2007,18(1):11 - 21
Song Wei, Dou Wanchun, Liu Qianping. Timing constraint petri nets and their schedulability analysis and verification[J]. Journal of Software, 2007, 18(1): 11 - 21(in Chinese)

[10] Han Rui, Liu Yingbo, Wen Lijie, et al. Dynamically analyzing time constraints in workflow systems with fixed-date constraint [C]//Proceedings of 2010 12th International Asia-Pacific Web Conference. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2010: 99 - 105

[11] 杜栓柱,谭建荣,陆国栋. 一个基于 TWF-net 的扩展时间工作流模型及其应用[J]. 计算机研究与发展,2003,40(4):1143 - 1151
Du Shuanzhu, Tan Jianrong, Lu Guodong. An extended time workflow model based on TWF-net and its application[J]. Journal of Computer Research and Development, 2003, 40(4): 1143 - 1151(in Chinese)

[12] 潘炎,汤庸,陈子聪. 一种工作流模型的时间性能评估方法[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(8):1539 - 1544
Pan Yan, Tang Yong, Chen Zicong. Time performance evaluation approach in workflow models[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(8): 1539 - 1544(in Chinese)

[13] 潘炎,汤庸. 模糊时态工作流网的建模和时间可能性分析[J]. 计算机集成制造系统,2006,12(11):1779 - 1784
Pan Yan, Tang Yong. Modeling of fuzzy temporal workflow nets and its time possibility analysis[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(11): 1779 - 1784(in Chinese)

[14] Chen Feng, Rong Xiaohui, Deng Pan. Modeling of device collaboration process based on Petri net[C]//Proceedings of 11th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2010: 29 - 33

(编　辑:文丽芳)