

物联网视频感知节点的动态同步建模与仿真

刘晓霞¹, 李芳²

(1.四川水利职业技术学院信息工程系, 四川 崇州 611231;

2.重庆大学计算机学院, 重庆 400044)

摘要: 针对物联网视频感知的动态同步问题, 本文用 π 网理论建立了物联网视频感知的抽象模型DSAM, 以描述其动态同步问题。首先建立基于 π 网的物联网视频感知抽象模型DSAM, 然后对模型进行了状态演变、模型变迁和动态交互等分析, 最后利用模型DSAM对实例进行分析和仿真。通过对模型DSAM的仿真和分析可知, 该模型能够正确处理物联网视频感知的动态同步并发性, 具有一定的实用价值。

关键词: π 网; 视频感知; 物联网; 同步模型; 动态演化

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Dynamic Synchronous Modeling and Simulation of Video Sensing of Internet of Things

LIU Xiaoxia¹, LI Fang²

(1. Department of Information Engineering, Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chongzhou 611231, China;

2. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming to solve the dynamic synchronous problems in the video sensing of Internet of Things, the paper establishes a Dynamic Synchronization Abstract Model (DSAM) based on the π -nets theory to describe the dynamic synchronous problems. At first, the DSAM of the video sensing of Internet of Things is established based on π nets. And then this paper analyzes state evolution, model transition and dynamic interaction. At last, the DSAM is used to analyze and simulate examples. Through the analysis and simulation of the DSAM, it is known that the model can be used to correctly deal with the dynamic synchronous concurrency of the video sensing of Internet of Things, and it has certain practical value.

Keywords: π -nets; video sensing; Internet of Things; synchronization model; dynamic evolution.

1 引言(Introduction)

随着信息与通信技术的发展, 物联网技术不断在现代城市中得以应用。物联网视频感知系统是一个综合系统, 具有其自身的特点, 如连续交互性、服务机制与质量和多种媒体信息的实时性、同步性等, 其中物联网视频感知信息的实时性和同步性是其关键性问题。

而物联网视频感知各种信息的同步问题, 主要是各种信息间的同步模型和同步机制的问题, 前者主要描述各种信息间的时态关系, 后者主要描述信息间时态关系的保证方法。就目前国内外学者的研究而言, 各种信息间的同步模型主要有时间轴同步模型、分层次同步模型和共同时间参考点同步模型。在同步模型中, 使用Petri网进行表述的、已提出的具有代表性的模型主要有OCPN、XOCPN^[1]、TSPN^[2]、

FTPN^[3]和DTPN^[4]。

物联网视频感知系统要求各种信息间动态同步特性, 而动态同步特性表现为可接受的扭曲时间、用户操作时间的动态性和延迟敏感性三个方面。而基于Petri网的模型未完善系统的动态同步问题。因此, 本文应用 π 网理论, 提出一种物联网视频感知动态同步抽象模型DSAM, 以解决系统的动态同步问题。

2 模型建立(Model establishment)

2.1 π 网

1962年, 德国的Carl Adam Petri博士在其博士论文中提出Petri网, 其目的是研究信息系统及其相互关系的一种数学模型。Petri网现已成为具有严密数学基础的一种数学和图形工具, 可用于对具有异步、分布和并发特征的系统。20世纪

90年代,由Robin Milner等人提出了一种新的并发理论— π 演算(π -calculus),用于研究计算机并行理论领域的并发计算模型,描述系统的动态特性。

文献[5]提出了将Petri网与 π 演算结合的 π 网,并给出了 π 网的定义、规则和形式化描述语言等,本文利用 π 网来研究物联网视频感知动态同步问题,以保证物联网视频感知系统的正常交互,并充分发挥和利用Petri网和 π 演算的互补性,而且也是现代形式化研究方法的发展趋势。

2.2 模型建立

物联网视频感知系统是一个典型的并发型动态系统。利用 π 网,建立了一种物联网视频感知动态同步抽象模型DSAM(Dynamic Synchronization Abstract Model)来描述其动态同步特性。

定义1 定义DSAM为一个 π 网,即 $DSAM = (C_p, X, T; C_f)$,其中, C_p 表示一个基本的令牌Petri网系统,为物联网视频感知的库所集; $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots\}$ 表示交互按钮的集合,是物联网视频感知信息的变迁集合,不同的按钮代表不同的变迁;且 $C_p \cap X = \emptyset$; T_t 表示物联网视频感知同步变迁的时间关系集合,是网DSAM的弧集,且 $T_t \subseteq (C_p \times X) \cup (X \times C_p)$; C_f 是定义在 $C_p \cup X \cup T_t$ 上的一个属性函数,表示位置集合的映射关系集合。

C_p 为一个六元组,即 $C_p = (P, T, B, F, I_D, M; M_0)$ 为一个基本Petri网,网中仅有“Normal”和“Master”两种类型的位置。其中: P 是一个位置集合; T 为变迁集合; $B: P \times T \rightarrow I, I = \{1, 2, 3, \dots\}$,表示从位置到变迁的有向弧集; $F: T \times P \rightarrow I, I = \{1, 2, 3, \dots\}$,表示从变迁到位置的有向弧集; $M: P \rightarrow I$ 是网系统的标识, $I = \{0, 1, 2, \dots\}$, M_0 是初始标识; I_D 为OPN(Object-oriented Petri Nets, OPN)元,即 $I_D = (C_{jp}, R_{token}, E_\pi)$,其中 C_{jp} 为基本Petri网定义的元, R_{token} 为 C_{jp} 的托肯; E_π 为 π 演算描述的DSAM模型的演化因子。

$X = \{X_1, X_2, X_3, \dots\}$ 为交互按钮集,共有六种按钮:“Skip”“Pause”“Back”“Replay”“Restart”和“Modify Speed”。

T_t 主要描述物联网视频感知系统的同步时间变迁的时间关系的集合,可利用TPN(Time Petri Net)可形式化定义 T_t 。

依据文献[6],DSAM符合 π 网的定义,是一个 π 网。在此还需对 T_t 进行定义,以更加完善的描述DSAM模型。

定义2 T_t 为时间关系集合,是一个TPN网的扩展,即:

$$T_t = (P_k, T_{dt}, Q_d, F_{kz}, F_{df}, S_{tbl}, W_{ma}, F_{yf}, G_{bx})$$

其中, P_k 为物联网视频感知系统的有限库所的集合。

$T_{dt} = \{t_{dt1}, t_{dt2}, \dots, t_{dtn}\}$ 为物联网视频感知系统的时间动态变迁的有限集合,且满足条件 $P_k \cup T_{dt} \neq \emptyset, P_k \cap T_{dt} = \emptyset$ 。

$Q_d = \{q_{d1}, q_{d2}, \dots, q_{dn}\}$ 表示物联网视频感知系统中各种信

息数据的有限变迁集合,且满足 $P_k \cap Q_d = \emptyset, Q_d \cap T_{dt} = \emptyset$ 。

$F_{kz} \subseteq (P_k \times T_{dt}) \cup (T_{dt} \times P_k) \cup (P_k \times Q_d)$ 是控制流的弧的集合, $F_{df} \subseteq (P_k \times Q_d) \cup (Q_d \times P_k) \cup (P_k \times T_{dt})$ 是数据流的弧的集合,表示系统的动态关系。

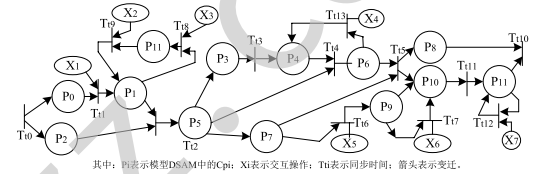
S_{tbl} 为 T_{dt} 到同步变迁规则的映射。

$W_{ma}: T_{dt} \rightarrow P_k$,即动态时间变迁集合到有限库所的映射关系,且满足 $\forall p_k \in \{master\}, \exists t_{dti} \in T_{dt} | W_{ma}(t_{dti}) = p_k$ 。

$F_{yf}: T_{dt} \rightarrow (R \cup \infty)$,为时间映射函数, R 是正实数集。

G_{bx} 为变迁与其相关联的交互按钮集合 X 的映射函数关系,即 $T_{dt} \rightarrow X$,可定义为 $\forall x \in X, \exists t_{dti} \in T_{dt} | G_{bx}(t_{dti}) = x$ 。

依据前面建立的模型,利用图形化描述方法,可得到模型DSAM的图形化描述图。在 T_{t0} 的同步时间约束下,使得 P_0, P_2 令牌发生变迁,在物联网视频数据帧 X_1 的交互操作下,使得变迁进一步发生转移,得到如图1所示的模型DSAM的图形描述。



其中: P_i 表示模型DSAM中的Cpi; X_i 表示交互操作; T_{ti} 表示同步时间;箭头表示变迁。

图1 模型DSAM的图形表示

Fig.1 Graphical representation of the DSAM

3 模型分析(Model analysis)

利用 π 网理论,分析DSAM模型的状态演变、变迁和动态交互。

3.1 状态演变

在研究DSAM模型时,首先要分析模型的状态,给出该模型的状态集合,然后在状态基础上对模型进行状态演变研究,给出状态演变规则。

定义3 模型状态集定义:DSAM的状态集用 Ss 表示,则 Ss 为一个三元组,即 $Ss = \{P_t, T_{det}, K_{ebt}\}$,其中: P_t 为模型中含有token的位置集合; T_{det} 为模型中各种信息的动态有效时间段表,表中数量与 P_t 标记的位置数一致,若某时刻用户进行了暂停操作,则 T_{det} 中的数值为该位置剩余的时间值; K_{ebt} 用户将要操作的按钮表,即记录用户从现在时刻到结束可选的操作。

规则1 状态演变规则:假设 $t_{det} \in T_{det}$ 是状态 Ss 在相对时间 R_t 使能的变迁,则模型可在动态有效时间 t_{det} 发生变迁,并演变为新的状态 Ss' ,即 $Ss' = \{P_t', T_{det}', K_{ebt}'\}$,其中:

$$\textcircled{1} P_t': (\forall p_k \in P_k) P_t'(p_k) = P_t(p_k) - R_t(t_{det}, p_k) + F_{kz}(t_{det}, p_k).$$

$\textcircled{2} T_{det}': T_{det}'$ 是 P_t' 标记的位置所具有的动态相对有效时间段表,设 $[a_i, n_i, b_i]$ 为库所 P_{ki} 在状态 Ss 呈现的时间间隔,则 T_{det}' 满足:

$$(i) \forall p_k \in P_k \wedge P_t'(p_k) > 0;$$

$$(ii) T_{det}'(p_{ki}) = \begin{cases} [L_{\max}(0, a_i - \theta), n_i - \theta, L_{\max}(0, b_i - \theta) P_t'(p_{ki}) > 0 \\ [a_i, n_i, b_i] P_t'(p_{ki}) = 0; \end{cases}$$

$$\textcircled{3} K_{ebt}': \forall t_i \in T_t$$

$$K_{cbr}^*(t_i) = \begin{cases} x, \exists x \in X \wedge P_i(p_{ki}) > 0 \wedge XP_i(t_i) = x \\ \emptyset & \text{否则;} \end{cases}$$

其中, p_{ki} 为变迁 T_{di} 的输入位置。

3.2 模型变迁

模型DSAM的变迁主要有“Key”型变迁和非“Key”型变迁^[7]。

定义4 变迁发生条件：设在时间 Δt_i 内, 变迁 t_{det} 在 Δt_i 内的时间点 θ_i 的触发由状态 θ_i 决定, 则必须满足:

- ① t_{det} 在时间点 θ_i 被 P_i 使能: $(\forall p_{ki} \in P_k)(P_k(p_{ki}) \geq F_{kz}(p_{ki}, t_{det}))$;
- ② θ_i 满足: $\min(i) \leq \theta_i \leq \max(i)$ 。

当满足定义4给出的变迁条件时, 变迁并不能发生, 因为还需要时间因子。定义2可知, 若时间 T_i 符合并满足TPN网要求, 则变迁 t_{det} 就能够发生^[8]。

规则2 模型通信变迁规则: 假设 P_{pi} 、 P_{pj} 为模型DSAM的一对共轭变迁, 若存在互补交互的网DSAM的两个子网 Net_1, Net_2 , 且标识网DSAM的所有库所状态项的函数对任意两个属于 Ss 的状态, 均有: $\forall t_1 \in Net_1, t_2 \in Net_2, \exists BS^*(t_1) = \alpha_{t_1}, BS^*(t_2) = \alpha_{t_2}$, 则 t_1 和 t_2 可在网DSAM中产生通信变迁 t_{th} , 即 $t_{th} = \langle t_1, t_2 \rangle$, $\omega_i = \xi$ (ω 表示库所的输入变迁、自由输出变迁、受限输出变迁、通信变迁和匹配变迁等各种信息间的变迁类型), 使得 $t_{th}^* = t_1^* \cup t_2^*$, $t_{th}^* = t_1^* \cup t_2^*$, $\forall s \in t_1^*, C_f(s, t) = C_f(s, t_1)$, 且具有的规则为:

设 $\lambda_{t_1} = ay\{y/x\}$, 其中 λ_{t_1} 为物联网视频感知各种信息的编号, x 为输出库所标号, y 为输出上的自由通道名; a 为通道名的替换; 则有:

- ① 当 $\omega_{t_2} = \bar{a}y$ 时, 则 $\omega_i = \xi\{y/x\}$, 且 $\forall s \in t_1^*, C_f(t, s) = C_f(t_1, s)$ 。
- ② 当 $\omega_{t_2} = \bar{a}(y)$, 则 $\lambda_t = \xi\{y/x\}$, 且 $\forall s \in t_1^*, C_f(t, s) = C_f(t_1, s) + (\varphi, \varphi, \varphi, \{y\})$ 。

3.3 模型动态交互

对物联网视频感知系统而言, 与用户的动态交互, 以实现物联网视频感知同步问题^[9]。若变迁在接受用户输入按钮时具有如图2所示的交互操作实现示意图 (其中 $\{X_1, X_2, X_3, \dots\}$ 为交互按钮集 X)。

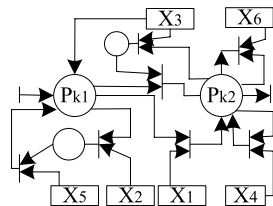


图2 模型交互的 π 网图形化描述

Fig.2 Graphical description of the π network of model interaction

- ① “Skip”：若用户输入按钮为“Skip”，则模型DSAM变迁即刻激活, 且不在执行的库所是否完成语义。

② “Pause” 和 “Restart”：若用户提交一个“Pause”，库所 C_p 接受一个令牌, 同时进行Nop操作, 直到下一个输入交互为“Restart”。

③ “Modify Speed”：若用户在时刻 θ_i 输入库所 C_p 的“Modify Speed”操作, 则其结果为改变物联网视频感知各种信息的执行速度。

④ “Back”：即用户输入了后退操作, 其结果是直接退到上一个时刻或时间段的物联网视频感知信息。

⑤ “Replay”：若用户输入为“Replay”按钮, 则模型DSAM表现为重新执行所操作的物联网视频感知的各种信息。

由以上分析可知, DSAM模型能够很好地实现和完成媒体与用户的动态交互。

4 模型仿真与性能分析(Model simulation and performance analysis)

4.1 实例仿真

为使用DSAM模型描述物联网视频感知动态同步问题, 在此假设物联网视频感知系统为视频、声音、文本和动画的复合数据流, 媒体对象和子对象之间的时序关系如图3所示。用户通过交互按钮集 X 完成与物联网视频感知各种信息进行交互。开始运行时可直接跳到 C_{pi} 进行表现, 可“Pause”和“Restart” Vdo_i 的表现, 可从 Vdo_3 回到 Vdo_2 进行表现, 也可使 am_i 重新表现^[10]。

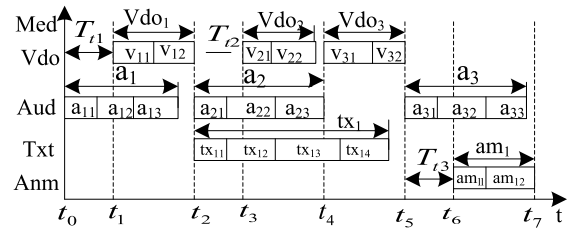
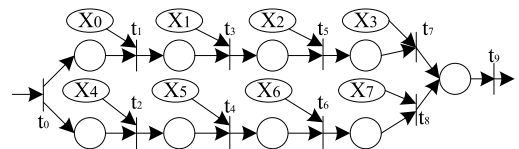


图3 物联网视频感知数据流时序图

Fig.3 IoT video sensing data flow timing diagram

声音、视频的同步如图4所示。声音、视频数据流速度为10帧/秒。QoS中最大扭曲为80ms, 最大抖动为10ms。



其中: P_i 表示模型DSAM中的 C_{pi} ; X_i 表示交互操作; t_i 表示同步时间; 箭头表示变迁。

图4 声音、视频同步模型DSAM图

Fig.4 Sound and video DSAM diagram

4.2 异常处理

由实例仿真可知, QoS中的最大扭曲和最大抖动是使物联网视频感知各种信息难以完全同步所致, 故需要对媒体数据流采用一定的方法进行处理。处理后的声音、视频如图5所示。

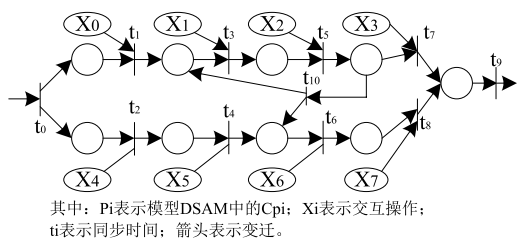


图5 声音、视频同步模型DSAM的异常处理

Fig.5 Exception handling of the sound and video DSAM

在物联网视频感知同步通信中，由于信号衰减、干扰和延迟等造成数据丢失是不可避免的。仿真实例中，对声音数据不能随意丢弃音频流的LDU，而引入抑止弧来进行异常处理；对视频媒体流，丢失少量的数据对视频QoS影响不大。因此，该模型能够实现异常处理，对于一定程度的对象丢包具有鲁棒性。

4.3 模型性能分析

对模型进行性能分析，先从媒体内部同步量化进行分析，然后从视频信息间的同步量化进行分析。

对视频内部同步量化进行分析，其指标主要是缓冲区下溢次数 $N_{DownFlow}$ 和数据信息丢包率 $X_{DataLost}$ ，经过实验得到表1所示数据。从表1数据可知，模型DSAM在测试验证时，得到的数据缓冲区下溢次数较其他两种模型要少；视频信息数据丢包率也较其他两种模型的丢包率要低。因此，模型DSAM在视频内同步控制方面具有一定的优越性。

表1 模型DSAM与MTFSC、3TFSC视频帧内同步量化比较
Tab.1 Quantitative comparison of intra-frame synchronization of DSAM with MTFSC and 3TFSC video

项目		比较结果								
缓冲区媒体数		50			100			200		
模型		DSAM	MTFSC	3TFSC	DSAM	MTFSC	3TFSC	DSAM	MTFSC	3TFSC
$N_{DownFlow}$		15	20	25	8	10	12	2	4	9
$X_{DataLost}(\%)$		1.02	1.50	2.15	1.07	1.98	2.18	1.09	1.99	2.28

对视频帧间同步进行量化测试，测试环境选用视频图像、语音、文本等，并在实验条件下，对物联网视频感知教室的老师讲课进行测试，以验证视频帧间同步。经过实验，得到表2所示数据。从表2数据可知，无同步控制时，视频帧间同步率较有同步控制时要低。

表2 视频帧间同步比较(%)

Tab.2 Comparison of video frames(%)

项目		比较结果		
测试时刻		9:15	9:25	9:35
无同步控制	老师音视频同步	77.23	70.12	71.02
	老师音频和屏幕同步	77.14	75.29	73.25
	屏幕文本和老师音频同步	75.48	69.58	70.46
有同步控制	老师音视频同步	99.12	99.75	99.14
	老师音频和屏幕同步	99.45	99.76	99.46
	屏幕文本和老师音频同步	98.17	99.25	99.74

综上所述可知，模型DSAM在视频内同步控制和视频帧间同步控制都具有优异的性能。

5 结论(Conclusion)

针对物联网视频感知动态同步问题，利用Petri网与 π 演算结合的 π 网，建立物联网视频感知系统抽象模型DSAM，实现对物联网视频感知系统的动态同步进行建模。通过对模型DSAM的仿真和分析可知，本文所提出和建立的模型，能够正确处理物联网视频感知的动态同步，具有一定的实用价值。

参考文献(References)

[1] Tan Kun, Shi Yuan-chun, Xu Guang-you. Supporting weak synchronization over world wide Web[J]. Journal of Software, 2000, 11(7): 863-866.

[2] 单志广, 杨扬, 王任, 等. 扩展的时间流Petri网物联网视频感知模型[J]. 计算机研究与发展, 2000, 37(2): 223-273.

[3] Han Yingjie, Sun Yong-qiang, Wu Zhe-hui. Fine-grained distributed multimedia synchronization model-Enhanced Fuzzy-timing Petri net[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, E-6(1): 62-66.

[4] Prabhakaram B, Raghavan S V. Synchronization models for multimedia presentation with user participation[P]. Multimedia Systems, 1994, 2(2): 53-62.

[5] 曹木亮. 基于 π -演算的Petri网和密码协议的形式化分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 20-75.

[6] 刘晓霞, 李芳. 物联网智能感知节点 π 网低功耗软硬件划分建模[J]. 工矿自动化, 2018, 44(9): 59-66.

[7] Bruscatto L T, Freitas E P, Heimfarth T. Self-Correcting Time Synchronization Support for Wireless Sensor Networks Targeting Applications on Internet of Things[J]. IFAC-Papers OnLine, 2016, 49(30): 355-360.

[8] Kim K S, Lee S, Lim E G. Energy-Efficient Time Synchronization Based on Asynchronous Source Clock Frequency Recovery and Reverse Two-Way Message Exchanges in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(1): 347-359.

[9] Stanković M. S., Stanković S. S., Johansson K H. Distributed time synchronization for networks with random delays and measurement noise[J]. Automatica, 2018, 93: 126-137.

[10] 陈珍萍, 黄友锐, 唐超礼, 等. 物联网感知层低能耗时间同步方法研究[J]. 电子学报, 2016, 44(1): 193-199.

作者简介:

刘晓霞(1976-), 女, 硕士, 副教授. 研究领域: 计算机形式化建模, 物联网信息感知与采集应用.

李芳(1979-), 女, 博士, 副教授. 研究领域: 计算机软件与形式化.