

基于扩展混成 Petri 网的 CPS 无人车系统建模与分析

宋相君¹ 张广泉^{1,2}

(苏州大学计算机科学与技术学院 苏州 215006)¹

(中国科学院计算机科学国家重点实验室 北京 100190)²

摘要 信息物理融合系统(Cyber-Physical System, CPS)是一个集计算系统、通信系统、感知系统、控制系统和物理系统于一体的复杂系统,其行为是一种由离散计算过程与连续物理过程深度融合并紧密交互的混成行为。针对这种特性,采用混成 Petri 网对 CPS 建模,并在此基础上添加时间约束,即对离散变迁关联一个延迟时间,对连续变迁关联一个激发速率函数,同时引入抑止弧和测试弧的概念以提高 Petri 网的表达能力,由此提出一种新的模型——扩展混成 Petri 网模型。然后,对 CPS 应用中无人驾驶车辆系统的躲避障碍物场景进行建模,将建立的模型按照一定的规则转化为与之对应的 Simulink 模型,并通过 Matlab 仿真对系统行为及属性进行分析。

关键词 CPS, 混成 Petri 网, Simulink/Stateflow

中图分类号 TP301 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.004

Modeling and Analysis of CPS Unmanned Vehicle Systems Based on Extended Hybrid Petri Net

SONG Xiang-jun¹ ZHANG Guang-quan^{1,2}

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)¹

(State Key Laboratory of Computer Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)²

Abstract Cyber-physical system (CPS) is a complex system that integrates computing system, communication system, perceptual system, control system and physical system. Its running is a kind of hybrid behavior that discrete computing process and continuous physical process are closely interacted and deeply integrated. Concerning this feature, hybrid Petri net is used for modeling CPS and on this basis adding the time constraint, in other words, adding time delay to discrete places and adding a function of velocity to continuous places. At the same time, the concept of inhibitor arcs and test arc are introduced to improve the expression ability of Petri net. A new model called extended hybrid Petri Net was proposed. Then obstacles avoidance for unmanned vehicle system was modeled, according to some rules, the models were converted into corresponding Simulink models. Through the simulation of Matlab, the dynamic behaviors and attributes of systems were analyzed.

Keywords CPS, Hybrid Petri net, Simulink/Stateflow

1 引言

信息物理融合系统是一种融合计算、通信和控制功能的复杂嵌入式系统,该系统中的计算进程和物理进程在开放环境下持续交互、深度融合,实现了大规模物理系统的实时感知、动态控制和信息服务。作为由离散事件系统和连续时间系统组成的混成系统,信息物理融合系统具有规模大、动态演化、自治性、高效性等特点和要求。针对 CPS 的这些特性,学术界和工业界对 CPS 的设计与开发进行了广泛且深入的研究^[1]。目前, CPS 建模与验证主要包括基于 Actor、AADL、混

成自动机、微分动态逻辑、通信顺序进程(CSP)以及 Petri 网等多种方法。

混成自动机对 CPS 的建模与验证有着广泛的影响。Platzer 提出的微分动态逻辑为 CPS 的建模与验证奠定了理论与实践基础^[2]。

Petri 网作为图形和数学模型工具,具有并行、不确定性、异步和分布等描述能力和分析能力。而普通的 Petri 网只能描述离散系统,因此需要对普通的 Petri 网进行改进。混成 Petri 网(Hybrid Petri Net, HPN)是由 David 和 Alla 于 1991 年首先提出的,作为建模混成系统的一个强有力的工具,它继

到稿日期:2016-08-20 返修日期:2016-10-21

宋相君(1992—),女,硕士生,主要研究方向为信息物理融合系统的建模与分析, E-mail:20144227045@stu.suda.edu.cn;张广泉(1965—),男,博士,教授,硕士生导师, CCF 高级会员,主要研究方向为网络软件工程、形式化方法、云计算、物联网等。

承了普通 Petri 网的建模能力,并能够以直观的方式描述连续变量变化的线性过程及系统内部的演变过程。

目前,采用混成 Petri 网方法对 CPS 建模的研究工作相对较少。文献[3-4]给出了离散、连续和混成 Petri 网的定义及属性说明。文献[5]提出了一种用混成 Petri 网作为信号控制交叉口市区交通网络的模型,并基于某些城市的真实交通数据对模型进行了验证。Thacker 等人^[6]提出了标记混成 Petri 网(Labeled Hybrid Petri Net, LHPN)模型,并针对状态空间爆炸问题给出了一种自动提取技术以简化 LHPN 模型,该方法能够应用于 CPS 的建模与验证。

然而在 CPS 的一些行业应用(如智能机器人、无人直升飞机等)中,时间约束也是 CPS 的一个重要属性。因此,本文在混成 Petri 网中引入时间属性,并添加抑止弧和测试弧的概念,针对 CPS 计算过程与物理过程的融合特征进行讨论,提出扩展混成 Petri 网的定义,并对 CPS 应用中的无人驾驶系统进行建模;最后,采用仿真的方法对系统进行分析。

2 扩展混成 Petri 网

混成 Petri 网将图形描述和数学分析相结合,兼具图形方法的直观性和逻辑方法的概括性,且能对离散和连续相结合的信息物理融合系统建模。首先给出混成 Petri 网的定义。

定义 1 混成 Petri 网是一个六元组 $HPN=(P, T, Pre, Post, h, M)$ ^[3],其中 $P=\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$ 是一个非空有穷库所集; $T=\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ 是一个非空有穷迁移集,并且满足 $P \cup T \neq \emptyset, P \cap T = \emptyset; h: P \cup U \rightarrow \{D, C\}$,称为混合函数,用以表示该节点是离散的或者连续的。离散库所(变迁)表示为 $P^D(T^D)$,连续库所(变迁)表示为 $P^C(T^C)$;因此,有 $P=P^D \cup P^C, T=T^D \cup T^C$ 。

Pre 是输入关联映射:

$$Pre: P \times T \rightarrow \begin{cases} R^+, & \forall p_i \in P^C \\ N, & \forall p_i \in P^D \end{cases}$$

该函数表明输入库所 p_i 和变迁 t_j 之间的有向弧权重,其中 R^+ 表示非负实数, N 为非负整数。

$Post$ 是输出关联映射:

$$Post: P \times T \rightarrow \begin{cases} R^+, & \forall p_i \in P^C \\ N, & \forall p_i \in P^D \end{cases}$$

$Post$ 函数表明变迁 t_j 和输出库所 p_i 之间的有向弧权重。

$M_i: P \rightarrow R^+ \text{ 或 } N$, 是库所集合上的标识。对于任一库所 $p_i \in P, M(p_i)$ 表示标识 M 中库所 p_i 所对应的分量,称为库所 p_i 的标识或者令牌(token)数, M_0 为初始标识。

通常, ${}^\circ p_i$ 和 p_i° 分别表示库所 p_i 的输入迁移集和输出迁移集。 ${}^\circ t_j$ 和 t_j° 则分别表示变迁 t_j 的输入库所集和输出库所集。

由于混成 Petri 网包含离散事件和连续变量以及它们之间的交互,其状态演变的规则要复杂得多。这些规则决定相

应变迁的激发,且激发后引起相应库所中令牌数目的变化。

定义 2 对于混成 Petri 网中任一离散变迁 t_j , 如果满足对 $\forall p_i \in {}^\circ t_j$, 有 $M(p_i) \geq Pre(p_i, t_j)$, 则称变迁 t_j 是使能的。

定义 3 对于混成 Petri 网中任一连续变迁 t_j , 如果满足对 $\forall p_i \in {}^\circ t_j$:

1) 若 $h(p_i)=D$, 并且 $M(p_i) \geq Pre(p_i, t_j)$;

2) 若 $h(p_i)=C$, 并且 $M(p_i) > 0$ 或者 p_i 是被供给的(即 $\{\exists t_k | t_k \in {}^\circ p_i \text{ 且 } t_k \text{ 被激发}\}$); 则称变迁 t_j 是使能的。

为保证离散库所的令牌数量为整数,对于连续变迁 t_j , 若 $\exists p_i^p \in {}^\circ t_j$, 则有 $Pre(p_i, t_j) = Post(p_i, t_j)$ 。

扩展混成 Petri 网是在定义 1 的基础上提出的一种新的模型,定义如下。

定义 4 扩展混成 Petri 网(Extended Hybrid Petri Net, EHPN)是一个九元组 $EHPN=(P, T, Pre, Post, h, \tau, A_I, A_C, M)$, 其中 $(P, T, Pre, Post, h, M)$ 的定义同 HPN。

$\tau: T \rightarrow R^+$ 为每个离散变迁指定一个非负实数 d_j , 表示变迁的延迟时间; $\tau: T \rightarrow V$ 为每个连续变迁指定常数或函数表示激发速率。

A_I 是从库所 p_i 到变迁 t_j 的抑止弧(也称抑制弧)集合,其作用是一旦该弧连接的输入库所中拥有的令牌数目大于或等于弧的权重,则该抑止弧将抑制所连接的变迁激发。抑止弧只对变迁是否允许发生起控制作用,即变迁一旦激发,抑止弧对由此引起的令牌数目变化不产生任何影响^[7]。 t_j 的抑止弧关联库所集合记为 $A_I(t_j)$, 抑止弧权重表示为 $A_I(p_i, t_j)$ 。

对于抑止弧,若其对应的输入库所 p_i 为离散库所,并且有 $A_I(p_i, t_j) = 1$, 则它是一个零测试弧,即仅当 $M(p_i) = 0$ 时,其对应的变迁才被激发。为了对输入为连续库所的情形建模一个零测试,引入 0^+ 来表示无穷小但不为空的权重,对于权重为 0^+ 的抑止弧,仅当库所标识为 0 时,相应变迁才能被激发。因此,输入为连续库所的弧权重范围为 $R^+ \cup \{0^+\}$ 。

A_T 是测试弧的集合,其作用主要体现在测试弧只读取(检测)输入库所中资源的情况,而不消耗库所中的令牌。 t_j 的测试弧关联库所集合记为 $A_T(t_j)$, 测试弧权重表示为 $A_T(p_i, t_j)$ 。

在普通弧的基础上引入抑止弧和测试弧的概念,提高了混成 Petri 网的表达能力,以及对 CPS 进行建模和分析;然而也导致了变迁的激发规则发生变化。对于变迁 t_j , 其激发除需满足基本规则外,还需满足以下条件:

1) 如果存在指向 t_j 的抑止弧,则对于 $p_i \in A_I(t_j)$, 需满足 $M(p_i) < A_I(p_i, t_j)$;

2) 如果存在指向 t_j 的测试弧,则对于 $p_i \in A_T(t_j)$, 需满足 $M(p_i) \geq A_T(p_i, t_j)$ 。

由于 EHPN 中既包含离散库所和离散变迁,又包含连续库所和连续变迁,因此为区别这两种类型的节点,一般采用圆圈表示离散库所,用双圈表示连续库所,用实心矩形表示离散

变迁,用空心矩形表示连续变迁。对于抑止弧,一般用空心圆圈结尾的线段符号表示,通常用实心结尾的线段符号表示测试弧。

3 CPS 建模与分析

目前 CPS 在很多领域已有应用,小到纳米级生物机器人,大到全球能源协调与管理系统等涉及人类基础设施建设的复杂系统,典型应用有智能交通^[8]、智能电网、航空航天、智慧医疗^[9]等。本文主要基于无人驾驶车辆系统观测其避障行为并进行建模分析。

无人驾驶车辆系统主要由环境感知系统、决策系统和车辆控制系统组成,各个子系统之间通过网络连接,以保证高速、可靠的数据传输。感知系统主要包括多台传感器设备和照相机,针对周围复杂的交通环境,进行障碍物、车道和交通标识的快速检测和准确识别。决策系统通过对环境识别的结果与导航定位系统内容相结合进行分析,为无人驾驶车辆寻找一条无碰撞、符合交通规范的最优路径,并将结果发送给控制系统。控制系统根据决策指令发送控制命令到各个控制对象,实现对车辆转向、制动、油门等的控制。无人车系统的感知、决策、控制系统类似于 CPS 的 3C(Compute, Communication, Control)结构,由无人车系统的运行方式可知该系统是 CPS 系统。

3.1 CPS 建模

无人车在指定道路行驶,将车辆最初位置作为原点 O ,假设无人车按直线以 10m/s 的速度匀速行驶。在行驶过程中,各传感器感知周围环境信息,这里用照相机来捕获前方道路信息,经过对图像的分析来感知障碍物信息,并将结果发往决策控制中心。决策控制中心综合周围环境信息发出制动命令,以防止车辆与前方障碍物碰撞。设无人车与障碍物的距离为 200m ,当障碍物距车小于 50m 时,进入无人车检测范围。图 1 示出了无人车检测障碍物并给出响应过程的扩展混成 Petri 网模型。

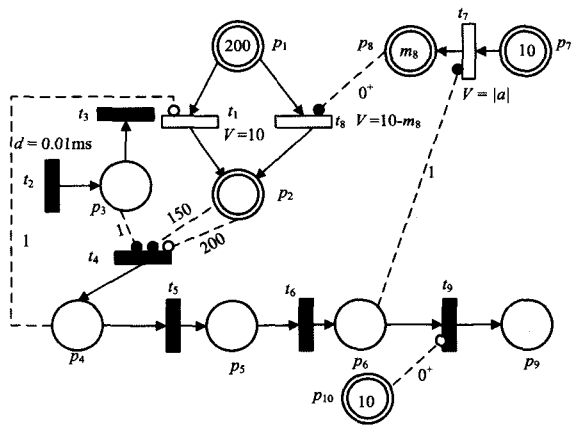


图 1 无人车避障的扩展混成 Petri 网模型

在图 1 中,引入了 3 条抑止弧。弧 (p_2, t_4) 表示当 $M(p_2) \geq 150, M(p_3) \geq 1$ 时,需同时满足条件 $M(p_2) < 200$,此时变迁 t_4 才能被激发。若 $M(p_3) \geq 1$ 且 $M(p_2) \geq 200$,则表示无人车

已经与障碍物相撞。此时,抑止弧将抑制 t_4 的激发以避免多余的操作。弧 (p_4, t_1) 表示当成功捕获障碍物时,无人车将不再匀速行驶,而是根据决策中心给出的加速度继续前进。同理,弧 (p_{10}, t_9) 表示在发出制动命令后仅当检测到速度为 0 时,才发送一条制动成功的反馈信息。同时,引入了多条测试弧。弧 (p_2, t_4) 和 (p_3, t_4) 表示仅当车距障碍物 50m 且照相机捕获到障碍信息时变迁 t_4 才被激发,弧 (p_8, t_8) 则表示仅当 $M(p_8) > 0^+$ 即速度大于 0 时 p_1 才按照激发速率变化。

其中各节点的设计如表 1 所列。

表 1 扩展混成 Petri 网各节点的含义说明

节点名称	含义说明
p_1	无人车与障碍物之间的距离,初始为 200m
p_2	无人车的行驶距离
p_3	照相机工作状态
p_4	障碍物信息捕获状态,若为 1 则表示成功捕获,发送结果到决策中心
p_5	决策中心收到障碍物信息并响应
p_6	控制中心接收命令执行制动并发送反馈
p_7	速度值,初始为 10m/s
p_8	速度变化值
p_9	制动状态
p_{10}	速度值检测,初始为 10
t_1	无人车匀速行驶,变迁以 $V=10$ 的速率激发
t_2	照相机定时刷新
t_3	p_3 标识清零,使得 p_3 仅在瞬间有效
t_4	障碍物产生并瞬间捕获
t_5	发送障碍物信息到决策中心
t_6	决策中心发制动力命令给控制中心
t_7	无人车减速行驶,速度发生变化
t_8	减速行驶,位移发生变化
t_9	发送制动成功反馈

3.2 CPS 仿真分析

Simulink 和 Stateflow 作为 Matlab 的重要组成部分,提供了一个动态混成系统建模、仿真、分析和综合的集成开发环境。其离散控制部分由 Stateflow 描述,连续部分则由各种线性和非线性求解器表示。本文将基于 Simulink 的开发环境,对无人车避障的场景进行分析。

由于照相机的刷新和处理时间极短,因此暂不考虑。假设 p_3 为 1 表示照相机已经感知障碍信息。对于图 1 所示的扩展混成 Petri 网模型,按照一定的规则将其转化为与之对应的 Simulink 模型。由于 Stateflow 是有穷状态机的图形实现,因此对于离散部分,用状态表示 Petri 网中的库所,用跃迁表示 Petri 网中的变迁,用状态的行为和跃迁上标识表示变迁规则。图 2 为与图 1 对应的 Simulink 模型。

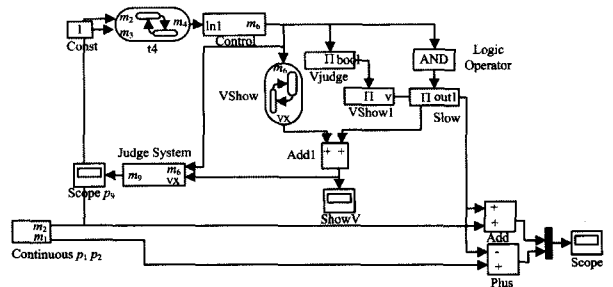


图 2 与图 1 对应的 Simulink 模型

图2中的连续模块、控制模块及反馈模块如图3所示。此外,图2中的Vjudge模块对减速过程中速度是否为0进行判断,当速度不为0时,Vshow模块输出速度值。Slow模块为减速模块,进行位移随时间变化的计算过程。

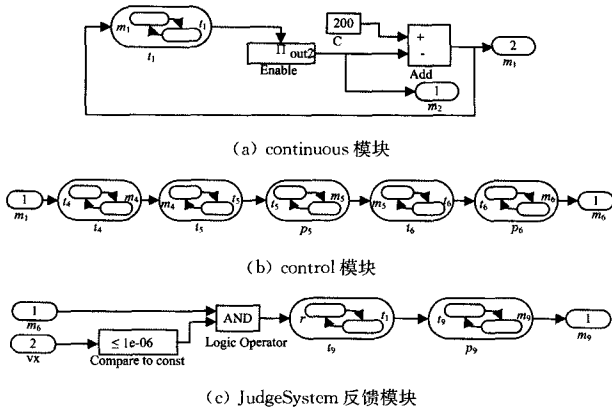


图3 模块内部结构

对图2中的Simulink模型进行仿真,所得结果如图4—图6所示。其中,图4表示随时间增加无人车速度的变化过程,由图4可知,初始无人车保持10m/s的速度匀速运动,在15s时开始减速行驶,最终V=0,即无人车停止。图5表示连续库所p1和p2的令牌数目随仿真时间的变化过程。

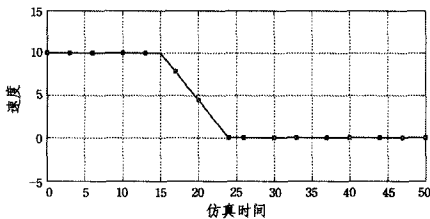


图4 无人车的速度的变化过程

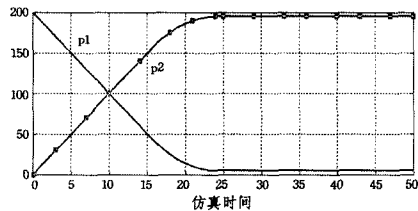


图5 连续库所p1和p2的令牌数目的变化过程

由图5可知,库所p2的令牌数目总是小于200,并且最终停在障碍物的左侧,因此可以得出该模型满足安全性的结论。图6示出了离散库所p9的令牌数目变化过程,表示无人车的制动状态。

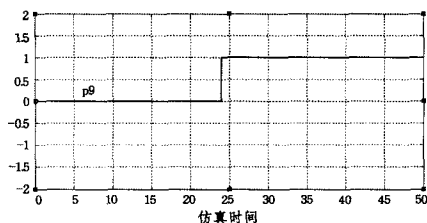


图6 离散库所p9的令牌数目变化情况

由图6可知,前24s $M(p_9) = 0$,表示无人车处于行驶状态;而大约在24s时 $M(p_9) = 1$,即无人车处于制动状态。

结束语 作为一个新兴领域,CPS在过去几年得到了众多研究人员的重视,也取得了一些成果,但仍面临许多新的问题和挑战。本文在混成Petri网的基础上添加时间约束,对连续变迁引入激发速率函数,有效地描述了连续部分的演化过程;并引入了抑止弧和测试弧的概念,增强了混成Petri网的描述能力。同时对CPS应用中无人车驾驶系统的躲避障碍物场景进行建模,将建立的EHPN模型转化为与之对应的Matlab/Simulink模型并仿真分析,最终得出该模型满足安全性的结论。对于更复杂的系统,所建立的模型可能也更加复杂,因此如何化简模型以节省内存以及缓解状态空间爆炸是下一步需要讨论的问题。

参考文献

- [1] CHEN M S, HUANG S J, LI A. Overview of CPS Research [J]. China Computer Federation, 2013, 9(7): 8-16. (in Chinese) 陈铭松, 黄赛杰, 李昂. CPS研究热点概述[J]. 中国计算机学会通讯, 2013, 9(7): 8-16.
- [2] PLATZER A. Differential Dynamic Logic for Hybrid Systems [J]. Journal of Automated Reasoning, 2008, 1(2): 143-189.
- [3] DAVID R, ALLA H. On Hybrid Petri Nets [J]. Discrete Event Dynamic Systems, 2001, 11(1/2): 9-40.
- [4] DAVID R, ALLA H. Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [5] DI FEBBRARO A, SACCO N. On Modeling Urban Transportation Networks Via Hybrid Petri Nets [J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(10): 1225-1239.
- [6] THACKER R A, JONES K R, MYERS C J, et al. Automatic Abstraction for Verification of Cyber-Physical Systems [C] // Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. ACM, 2010: 12-21.
- [7] LIU S J, YUE X B, ZOU Z. Modeling and Behavior Analysis of Petri Net with Inhibitor Arcs and Test Arcs [J]. Journal of System Simulation, 2009, 20: 76-81. (in Chinese) 刘石坚, 乐晓波, 邹峥. 含抑制弧和测试弧 Petri 网的建模及其行为分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 20: 76-81.
- [8] MOLLER D P F, XAVIER FIDENCIO A, COTA E, et al. Cyber-Physical Smart Traffic Light System [C] // IEEE International Conference on Electro/Information Technology. 2015: 546-551.
- [9] TAO L, FENG T, et al. From Off-line toward Real-Time: A Hybrid Systems Model Checking and CPS Co-Design Approach for Medical Device Plug-and-Play (MDPhP) [C] // Proceedings of International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs). 2012: 13-22.