

基于事件驱动的信息物理融合系统建模

尹忠海¹, 张凯成¹, 杜华桦², 周拥军¹, 梁晓龙¹, 孙 强¹

(1 空军工程大学, 陕西 西安 710051; 2 通信网络技术管理中心, 北京 100843)

摘 要: 讨论了信息物理融合系统的事件驱动特性, 针对目前基于框架事件模型没有充分考虑事件生命周期和事件融合的缺陷, 为保证事件响应的有效性和合法性, 提出了事件的多元组表示方法. 多元组包含事件的类型、观察者、发生对象、发生或产生的时间和地点、描述的变量属性、可信度值等要素, 通过基于事件机制的无人机编队控制仿真, 验证了相关定义与方法的有效性.

关键词: CPS 系统; 事件驱动; CPS 事件; 编队控制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)12-0126-04

Cyber Physical System Modeling Based on Event Driven

YIN Zhong-hai¹, ZHANG Kai-cheng¹, DU Hua-hua²

ZHOU Yong-jun¹, LIANG Xiao-long¹, SUN Qiang¹

(1 Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2 Communication Network Technology Management Center, Beijing 100843, China)

Abstract: The event driven characteristics of cyber physical system are discussed. Aiming at the defects of the current frame event model, which is the life cycle and the fusion of events are not considered enough, in order to ensure the validity and legitimacy of event response, the multiple group representation of the event is given. Multiple groups include the type of event, the observer, the occurrence of the object, the time and place of the occurrence, the variables that describe the variables, and the reliability value. Through the simulation of unmanned aerial vehicle formation control based on event mechanism, the validity of the method is verified.

Key words: cyber physical system; event driven; cyber physical system event; formation control

1 引言

CPS 是“Cyber Physical System”的缩写, 我国学者将其翻译成信息物理融合系统. 相关概念最早由美国 NSF 于 2006 年首先提出, CPS 的概念一经提出便获得了相关领域学者的充分关注, 分别从 CPS 的体系架构、事件抽象、混杂系统建模、CPS 的时空逻辑建模、模型校核与验证及 CPS 应用等不同方面进行了广泛研究^[1-2].

由于 CPS 自身的高度复杂性, 融合发展了多个学科的不同理论, 不同领域学者多从自己熟悉的领域出发加以诠释, 未能充分达成共识, 目前尚未给出

一个准确而全面的定义. 相关研究中基于框架事件模型没有充分考虑事件生命周期和事件融合, 本文在对 CPS 特性进行分析的同时, 进一步探究 CPS 的关键机制, 对基于事件驱动的 CPS 建模方法进行了研究.

2 CPS 的事件驱动性与事件建模

2.1 CPS 的事件驱动性

CPS 是一个由不同功能和属性组件构成的群智能系统, 涉及多模多态、广泛分布的物理与计算组件, 表现出复杂性、分布异构性、虚拟性、混杂性、时间关键性、事件驱动性等诸多特性. 为描述 CPS 的

收稿日期: 2015-04-20; 修回日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61472443); 陕西省自然科学研究发展计划(2013JQ8042)

有效协同,需要符号化描述系统协同动作的同步机制和时间约束机制,事件是描述相关机制的有效手段。事实上,事件驱动性是 CPS 的一种内在运行机制,物理环境和对象状态的逐渐变化构成系统状态的演变,这种状态的渐变达到一定程度则触发具体的 CPS 事件,控制命令的执行也会触发事件,形成节点或组件间的交互,在网络环境下,CPS 基于事件驱动的运行架构如图 1 所示。

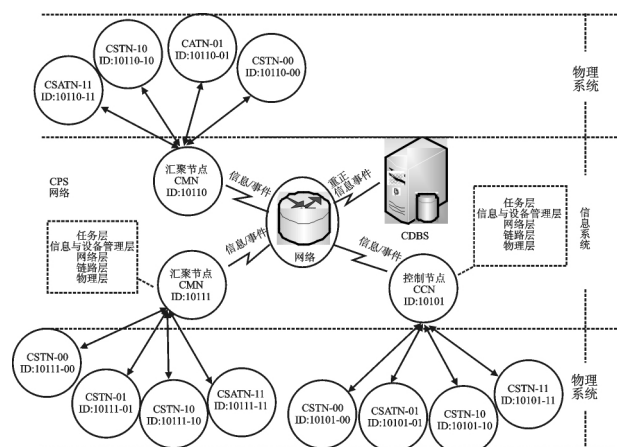


图 1 基于事件驱动的 CPS 运行架构

其中的 CPS 关键组件为传感器终端节点 (CPS Sensor Terminal Node, CSTN)、执行器终端节点 (CPS Actuator Terminal Node, CATN)、传感器/执行器终端节点 (CPS Sensor Actuator Terminal Node, CSATN)、汇聚节点 (CPS Mote Node, CMN)、控制节点 (CPS Control Node, CCN)、数据库服务器 (CPS Database Server, CDBS) 及 CPS 网络 (CPS Network, CN) 等。

2.2 时空条件下的事件建模

在 CPS 建模中,一般用事件描述 CPS 组件属性变量的变化情况,包括组件个体的位置、速度等属性的变化,如在铁路控制系统中,列车速度超过某一阈值,就会产生列车超速事件。在动态数据库领域,人们最早引入了事件—条件—行动建模方法 (Event-Condition-Action ECA),事件被定义为对条件进行估计判断的触发器,若条件为真,则进一步触发执行相应行为,但相关事件定义缺少时空特性。

2010 年, Ying Tan 给出了一个基于框架的事件模型^[3],模型明确定义了事件的时空属性,可以描述分布异构环境中事件的基本信息,后续相关文献^[4-8]多以此为参照展开研究。但在 CPS 工程应用中,我们发现上述文献中关于事件的定义仍存

在以下两个主要缺陷:一是没有充分考虑事件的生命周期,事件是一类特殊的信息,用于实现 CPS 组件的激励与响应机制,事件产生的时间越久,越没有响应的价值,该要素的缺少将影响事件响应的合理性,本文取一个以 $y=1$ 为渐近线的函数作为事件的生命周期进行研究;二是缺少类型与发生对象等要素,在 CPS 中,由于单个组件会对系统中个体的某一属性持续观察,且个体的某一属性也会被多个组件观察,一个实体同一属性可能会产生一系列多个事件,为保证事件响应的有效性和合法性,对同一实体同一属性相关的多个事件不能每次都给予响应,这就需要有事件的融合机制,将一段时间内关于同一实体同一属性的多个事件融合为一个事件,否则事件的后续处理与响应将非常困难,融合算法需要明确事件的事件类型、发生对象和相关属性等。

为保证 CPS 的有效交互,本文综合考虑事件的融合与响应需求,以事件类型、观察者、发生对象、发生或产生的时间和地点、描述的变量属性、可信度值等为事件要素,给出如下的事件定义。

“系统感兴趣,导致系统进化进程必须改变或需要做出反应的事务”称为 CPS 事件,事件 ϵ 可用以下多元组表示。

$$\epsilon = \{Type_{id}, OB_{id}, Comp_{id}, Attr_{id}, T^g, L^g, T^0, L^0, V^0, \rho_{OB}\}.$$

上述多元组中各项含义如下所示。

$Type_{id}$ 是事件类型标识符,表明该事件的类型编码,事件类型属于全局预定义,该编码主要用于后续的事件融合; OB_{id} 指明生成并通报事件的主体 ID 编码,也称为观察者 ID,表明生成该事件的节点或组件;个体事件必须有 $Comp_{id}$ 字段,用于指明事件发生对象的全局 ID 编号,用于唯一标识事件对应的单个对象或组件,指明此时系统组件所发出的相关事件是关于 $Comp_{id}$ 对象或组件的事件,该字段的作用在于在系统由多个组件发出多个关于 $Comp_{id}$ 对象的事件时,可由汇聚或控制节点根据 $Comp_{id}$ 及 $Attr_{id}$ 进行检索、归类和融合,提高组件交互的效率和稳定性; $Attr_{id}$ 指明相关事件是关于 $Comp_{id}$ 对象或组件某个确定属性或属性集的事件, $Attr_{id}$ 是全局的,必须全系统统一编码,如果 $Attr_{id}$ 指明的是某一属性集,该集合为预先定义; T^g, L^g 是事件观察者 OB_{id} 产生事件的时间和位置; T^0, L^0, V^0 是事件的三个属性,分别代表事件发生的时间,地点以及它的相关属性; ρ_{OB} 是观察者对于观察到的该事件给予的可

信度值. 事实上, 事件是有生命周期的, 如图 2 所示, 时间越长, 可信度值 ρ_{OB} 越小. 可信度值 ρ_{OB} 可取为 $\rho_0 \exp(-\lambda t)$, 其中 ρ_0 为初始可信度, $\lambda \in R^+$ 为正常数, t 为事件生成后的持续时间, 随着时间延长, 事件的可信度会逐步降低, 直至趋于 0.

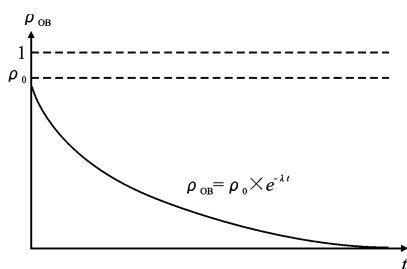


图 2 事件可信度

3 基于事件机制的无人机编队控制仿真

为验证相关概念与方法的正确性, 本文以无人机编队控制为应用对象, 提出了基于事件机制多无人机编队控制方法, 其核心思想是虚拟“长机”策略, 长机按预定航线或计划飞行, 僚机始终保持与长机按编队跟随. 为实现基于事件的多无人机编队控制, 长机与僚机之间始终保持交互. 相互通报位置信息或命令事件, 各无人机将获取的当前编队信息、命令事件提交系统的计算组件, 由计算组件对相关信息进行分析与处理, 形成是否需要队形调整的决策, 若需要调整, 则以命令的形式下传给队形控制组件, 队形控制组件根据当前命令事件进行编队控制调整.

3.1 事件实例

在基于事件机制的无人机编队控制仿真中, 事件观察者是无人机的相关传感或导航设备, 其航电系统能够收集数据, 并对数据进行运算, 以测试事件触发条件是否满足, 如果触发条件满足, 则产生一个相应的事件实例. 为简化软件实现, 本文的事件实例暂不考虑 $Attr_{id}$ 字段, 事件实例被定义为如下所示的一个九元组.

$$\epsilon_i = \{Type_{id}, OB_{id}, UCAV_{id}, T^g, L^g, T^o, L^o, V^o, \rho_{OB}^{\epsilon_i}\}$$

式中, $Type_{id}$ 是事件标识符, OB_{id} 是事件通报者或观察者 ID, $UCAV_{id}$ 是事件发生对象, T^g, L^g 分别是观察者产生事件实例时的时间, 观察者的位置, T^o, L^o, V^o 分别是事件发生的时间、地点以及事件的相关属性, $\rho_{OB}^{\epsilon_i}$ 为事件可信度, 取为 $0.9 \exp(-t)$, 其中 $\rho_0 = 0.9$ 为观察者 OB_{id} 的初始可信度, 它同时与事件实例 ϵ_i 产生后的持续时间 t 有关, 也是对事件实例 ϵ_i 保鲜程度或可用性的一个度量.

在某次交互中, 长机 $UCAV_{leader}$ 要通知僚机 $UCAV_3$ “无人机 $UCAV_3$ 最近三次飞行数据的平均飞行高度低于 1 000 m, 最小飞行高度低于 800 m”且“持续时间超过 3 分钟”这个基于属性和时间的复合事件, 若设无人机 $UCAV_3$ 获取最近三次飞行数据的时间分别为 T_1, T_2, T_3 , 相应的飞行高度测量值为 h_1, h_2, h_3 , 则相应触发条件可以表示为

$$(\min(h_1, h_2, h_3) < 800) \text{ and}$$

$$(\text{average}(h_1, h_2, h_3) < 1\,000) \text{ and } (t - T_1 > 3).$$

若设最近三次飞行数据测量时 $UCAV_3$ 的位置分别为 P_1, P_2, P_3 , $UCAV_{leader}$ 的可信度值为 $0.9 \exp(-\lambda t)$, 其中 t 为事件生成后的持续时间, 则上述事件被抽象为

$$\{Type_{id}, UCAV_{leader}, UCAV_3, t^g, (x^g, y^g, z^g), (T_1, T_2, T_3), (P_1, P_2, P_3), V^o, \rho_0 \times e^{-t}\}.$$

其中事件产生者为 $UCAV_{leader}$, 与该事件相关的描述对象是 $UCAV_3$, t^g 是 $UCAV_{leader}$ 生成该事件实例的时间, (x^g, y^g, z^g) 是观察者 $UCAV_{leader}$ 生成事件时的空间位置, (T_1, T_2, T_3) 对应 $UCAV_3$ 相关事件发生的时间信息, (P_1, P_2, P_3) 是 $UCAV_3$ 相关事件发生的位置信息, 事件的触发条件用 V^o 表示.

3.2 仿真实例

本文以 3 架无人机编队为实例, 每架无人机设为一个节点, 对本文提出的事件驱动建模方法进行仿真验证, 节点之间的相互影响和节点内的状态变迁采用分层次的方法表示. 第一层如图 3 所示, 用有向图表示节点间的影响关系, 如果将事件看作数据, 该图就是一个数据流向图; 第二层如图 4 所示, 是一个以事件集和转移条件为标记的状态转换图, 对每一个节点, 都有一个相应的转换图, 该图用以表示相关节点在事件激励下的状态变迁.

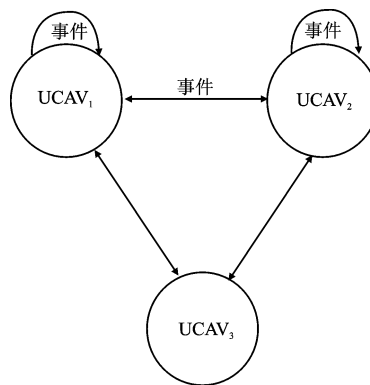


图 3 事件流向图

编队飞行航迹如图 5 所示, 图 6 所示为编队飞

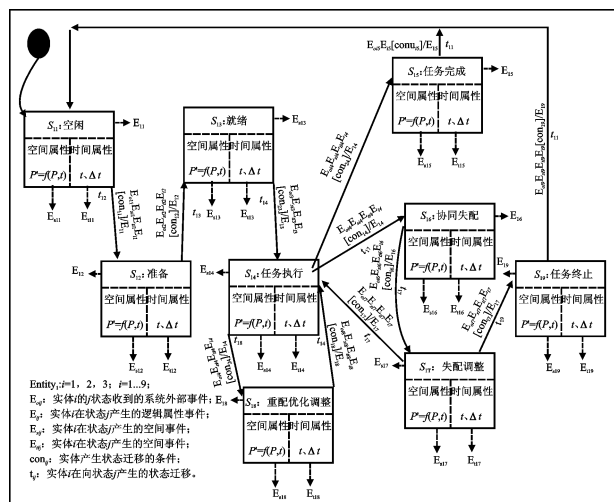


图4 状态转换图

行误差,仿真实验表明三机编队能够始终保持三角队形,编队误差在合理范围内,编队控制与模型稳定,相关算法有效.

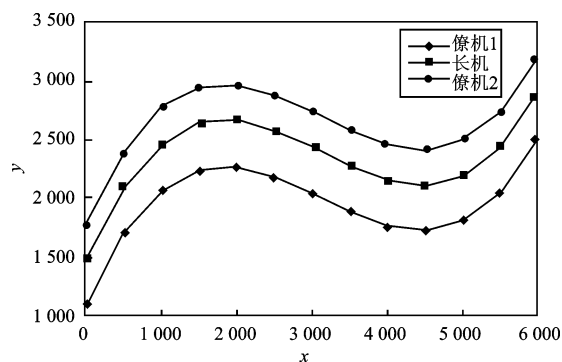


图5 编队飞行轨迹

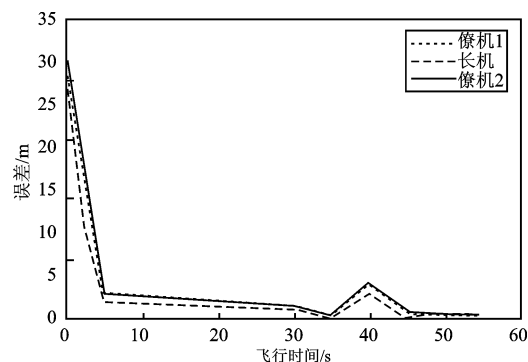


图6 编队飞行误差

4 结束语

本文对 CPS 事件驱动性进行了深入分析,综合考虑事件的融合与响应需求,以事件类型、观察者、发生对象、发生或产生的时间和地点、描述的变量属

性、可信度值等为事件要素,提出了基于十元组的事件定义,保证了 CPS 内各组件的有效交互.对基于 CPS 的多无人机编队控制建模方法进行初步研究,提出了一种基于事件驱动的编队控制建模方法,仿真实例表明多元组的表示方法和基于事件驱动的信息物理融合建模方法可靠、有效.在此基础上,后续研究工作拟针对域事件或事件发生的空间、时间因素不确定的情况,引入模糊事件的概念,以隶属度描述事件进展的程度,进一步研究基于模糊事件的融合模型与建模方法.

参考文献:

- [1] E Lee. Cyber-physical systems-are computing foundations adequate[J]. Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap, 2006,22(1): 1-9.
- [2] Sastry S S. Networked embedded systems: from sensor webs to cyber-physical systems[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control. Berlin, Germany: Springer, 2007: 1-1.
- [3] Tan Y, Vuran M C, Goddard S. A concept lattice-based event model for Cyber-Physical Systems[C]// Proc of CCPS. Stockholm, Sweden: IEEE, 2010.
- [4] Ziwei Liu, Jing Liu, Jifeng He. Spatio-temporal UML statechart for cyber-physical systems[C]// 17th International Conference on Engineering of Complex Computer Systems. Paris: IEEE, 2012:137-146.
- [5] 李仁发,谢勇,李蕊,等. 信息物理融合系统若干关键问题综述[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(6), 1149-1161.
- [6] Krogh B, Ilic M D, Sastry S S. Networked embedded control for cyber-physical systems: research strategies and roadmap [R]. USA: Team for Research in Ubiquitous Secure Technology, 2007.
- [7] Broyund M, Schmidt A. Challenges in engineering cyber-physical systems [J]. Computer, 2014, 47(2): 70-72.
- [8] Edward A Lee. Modeling cyber physical systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 13-28.

作者简介:

尹忠海 男, (1964-), 博士, 教授. 研究方向为计算智能和无线自组织网络.

张凯成 男, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为信息物理融合系统. E-mail: zhangkaichengx@126.com