

基于目标的信息物理融合系统事件模型的分析

刘春 黄冉冉 韩道军

(河南大学 开封 475001)

摘要 软件系统的事件模型能够有效地刻画软件系统的行为。但是,由于信息物理融合系统的异构性与分布式特征,建立信息物理融合系统的事件模型不仅需要了解系统的具体组成结构,还需要考虑事件的时空信息,这为信息物理融合系统事件模型的建立带来了新的困难。从需求分析的角度出发,提出一种基于目标的方法来分析并建立信息物理融合系统的事件模型。该方法认为用户建立系统的目标可以表达为事件之间的因果关系,即当一个事件发生时系统要能够感知并触发另外一个事件发生。基于此,该方法从用户对信息物理融合系统的需求出发,以目标的与/或分解为手段来分析满足用户需求的事件模型。以一个自适应巡航控制系统为案例来说明该方法。

关键词 信息物理融合系统,需求分析,面向目标的方法,事件模型

中图分类号 TP301 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.04.022

Goal Oriented Approach for Analyzing Event Model of Cyber-physical Systems

LIU Chun HUANG Ran-ran HAN Dao-jun

(Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract Event model of software systems can model system behaviors effectively. However, since the system structure should be known and the spatial-temporal attributes of events should be considered due to the hybrid and distributed properties of cyber-physical systems (CPS), new challenges arise when building CPS's event model. From the angle of requirements analysis, this paper proposed a goal oriented approach to deal with the challenges. This approach defines the users' goal on CPS as the causal relationships between events, that is a goal expresses the relationship that the occurrence of an event will cause of another event. Then, it analyzes and develops the event model based on users' requirements on CPS by means of "And/Or" decomposition. An adaptive cruise control system has been used to illustrate the proposed approach.

Keywords Cyber-physical systems, Requirements analysis, Goal oriented approach, Event model

1 引言

信息物理融合系统(Cyber-Physical Systems, CPS)是一个既包含物理实体又包含软件实体并将计算过程和物理过程融合在一起的混合系统。它将改变人类与物理世界的交互方式,提高物理过程的效率和安全性^[1-2]。

CPS的运行过程可看作是一个由事件驱动的闭环过程,物理过程的状态变化形成驱动计算过程的物理事件,而计算过程的计算结果又形成影响物理过程的逻辑事件。从物理事件到逻辑事件再到物理事件的事件链不仅体现了系统的组成结构,也体现了构成系统的各个组成部分的具体行为。因此,分析CPS运行过程中的事件链,建立CPS的事件模型,对分析信息物理融合系统的需求,明确CPS中的计算过程、物理过程以及它们之间的融合关系具有重要意义。

然而,如何分析和建立CPS的事件模型是一个具有挑战

性的任务。首先,不同于传统的软件系统,CPS的异构性决定了它包含不同的软件实体和物理实体,而建立CPS的事件模型却必须了解构成系统的这些软件实体和物理实体以及其关系;其次,这些不同的系统组成部分往往分散于不同的物理空间平台上,相同的物理实体在不同的空间上所产生的事件也可能不同,因此CPS的事件模型必须能够表达空间特征;此外,由于物理过程对时间具有敏感性,因此事件模型的建立过程也必须考虑时间的因素。

目标模型是软件需求分析的一个重要工具。它以目标来表达用户对软件系统的需求,并以目标的与/或分解为手段,提供了一种结构化的方式由高层抽象的用户需求推理分析软件的需求。基于目标模型,本文提出了一种分析CPS事件模型的方法,该方法认为用户对CPS的需求可以表达为一组事件到另一组事件之间的因果关系,即用户期望前者的发生可以引起后者的发生。而分析CPS事件模型的目的就是要建

到稿日期:2015-11-30 返修日期:2016-02-28 本文受国家自然科学基金(61300035),中国博士后基金项目(2014M552000),河南省教育厅科技攻关项目(14A520009)资助。

刘春(1982-),男,讲师,主要研究方向为需求工程,E-mail:liuchun@henu.edu.cn;黄冉冉(1989-),女,硕士生,主要研究方向为需求工程,E-mail:huangranran2015@163.com;韩道军(1979-),男,副教授,主要研究方向为形式概念分析、空间数据处理。

立两组事件之间的事件链条。因此,该方法通过将目标模型中的目标等概念表达为事件之间的因果关系,从用户对 CPS 的需求出发,以目标的与/或分解为手段来分析满足用户需求的事件链。本文首先对 CPS 中的事件做出具体定义,该定义使得 CPS 中的事件具有了时间和空间等属性;然后提出分析和建立 CPS 事件模型的具体过程。本文以一个自适应巡航控制系统(Cruise Control System,CCS)为案例来说明本文方法。

2 背景知识:目标模型

以 CCS 为例(见第 3 节),图 1 展示了 Jureta 等所提出的目标模型图^[3]。它包含了目标、领域假设、任务等概念。图 1 中,目标(字母 G 标注的矩形)表达用户对系统的功能需求;任务(字母 T 标注的矩形)表达软件系统的一个活动;领域假设(字母 K 标注的矩形)则表达人们对环境中的各种现象的认识;而这些概念之间的蕴含关系(小圆圈表示)是一种满足关系。

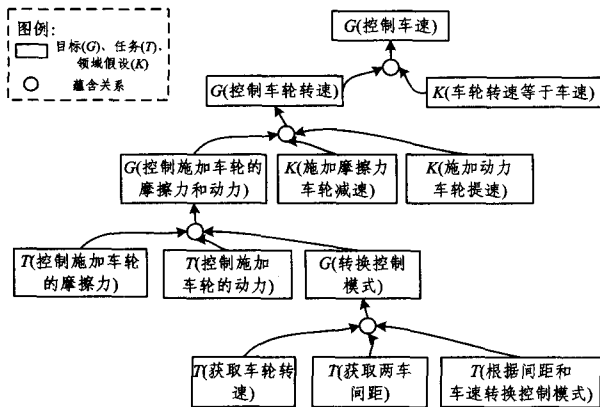


图 1 Jureta 等提出的目标模型图(以一个 CCS 为例)

3 案例介绍

对驾驶员来说,如果在驾驶过程中长期集中注意力将会很疲劳,因此他们希望有一个系统可以帮助他们自动地维持车辆的速度。当前方没有车辆时,控制车辆以巡航速度行驶;当前方有车辆时,控制车辆与前方车辆保持安全距离,这就是用户对于 CCS 的需求^[4]。为了满足该需求,CCS 一般包括巡航控制器、测速器等软件实体以及刹车、引擎等物理实体(如图 2 所示,以问题框架方法^[5]中的符号来展现 CPS 的软件实体、物理实体及其关系),因此 CCS 是一个典型的信息物理融合系统。

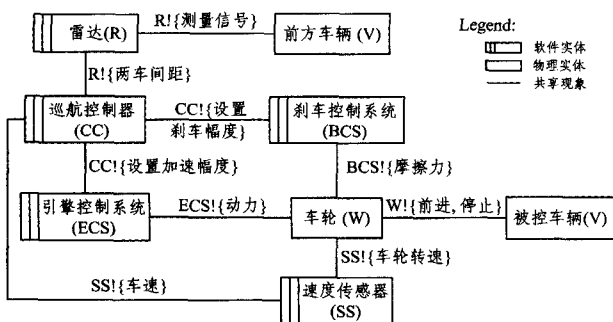


图 2 自适应巡航控制系统的结构图

4 方法介绍

本节以自适应巡航控制系统为案例来详细说明本文所提出的方法。

4.1 CPS 的事件概念

事件一般不仅是时空目标状态开始或终结的标志,而且还表示了状态变化的原因。由于 CPS 本身的特点,CPS 中的事件应具有时空特性^[6]。本文在分析过程中将 CPS 中的事件定义为如下的一个结构体:

Event: { name, time, location }

其中,name 是事件名称,用来标识不同的事件,time 是事件发生的时间,location 是事件发生的地点。

4.2 基于目标的事件模型分析和建立过程

下面以自适应巡航控制系统(CCS)为例,逐步介绍 CPS 事件模型的具体分析过程。

第一步:建立用户需求的事件表达式

用户需求指的是用户对信息物理融合系统的需求,其是建立信息物理融合系统的出发点和最终目的。它一般表达的是当用户所关注的某些事件发生时,系统能够观测到并且做出响应,从而促使另外一些事件的发生。因此,用户对信息物理融合系统的需求可以表达为一组事件与另外一组事件之间的因果关系。

以 CCS 为例,用户对于系统的需求就是系统根据前方的路况,及时控制车速的变化。具体来说,该需求可以表达为如下的一组事件之间的因果关系:

$$R = \{ r_1, r_2, r_3, r_4 \}$$

- $r_1 = e_1 : \{ \text{前方安全距离内没有车}, t_{e_1}, \text{被控车辆前方} \} \wedge$
- $e_2 : \{ \text{被控车辆速度不大于巡航速度}, t_{e_2}, \text{被控车辆} \} \xrightarrow{t_1} e_3 :$
- $\{ \text{被控车辆加速到巡航速度}, t_{e_3}, \text{被控车辆} \}$
- $r_2 = e_1 : \{ \text{前方安全距离内没有车}, t_{e_1}, \text{被控车辆前方} \} \wedge$
- $e_4 : \{ \text{被控车辆速度大于巡航速度}, t_{e_4}, \text{被控车辆} \} \xrightarrow{t_2} e_5 : \{ \text{被控车辆减速到巡航速度}, t_{e_5}, \text{被控车辆} \}$
- $r_3 = e_6 : \{ \text{前方安全距离内有车}, t_{e_6}, \text{被控车辆前方} \} \wedge e_7 :$
- $\{ \text{被控车辆速度不大于前车速度}, t_{e_7}, \text{被控车辆} \} \xrightarrow{t_3} e_8 : \{ \text{被控车辆加速到前车速度}, t_{e_8}, \text{被控车辆} \}$
- $r_4 = e_6 : \{ \text{前方安全距离内有车}, t_{e_6}, \text{被控车辆前方} \} \wedge e_9 :$
- $\{ \text{被控车辆速度不大于前车速度}, t_{e_9}, \text{被控车辆} \} \xrightarrow{t_4} e_{10} : \{ \text{被控车辆减速到前车速度}, t_{e_{10}}, \text{被控车辆} \}$

其中,事件之间的箭头代表事件之间的因果关系,箭头之上的时间代表箭头前后两组事件发生时间之间的约束关系,即从箭头前面的事件发生之时起,箭头后面的事件要在该时间范围内发生。例如,如上所述,当前方安全距离内没有车并且被控车辆速度不大于巡航速度时,被控车辆要在 t_1 时间内加速到巡航速度。

第二步:分析满足用户需求的事件链

通过将用户需求表达为事件表达式,就确定了满足用户需求的事件链的初始事件(需求表达式中箭头前面的事件)和目标事件(需求表达式中箭头后面的事件)。那么,进一步分析的目的就是识别初始事件到目标事件之间的中间事件。从需求分析的角度出发,本文实现这一目的的基本思路是基于

目标模型,将目标模型中目标 G 和领域假设 K 等表达为事件之间的因果关系,进而通过目标的与/或分解方式来识别初始事件和目标事件之间的中间事件。具体来说,假设用户需求为: $e_i \rightarrow e_j$ (见图 3),目标模型中的“与”分解可以表达满足用户需求的事件链的不同片段 $e_i \rightarrow e_k$ 和 $e_k \rightarrow e_j$,而“或”分解则可以表达为满足目标 $e_i \rightarrow e_k$ 而可能存在的不同事件链 $e_i \rightarrow e_h \rightarrow e_k$ 和 $e_i \rightarrow e_m \rightarrow e_k$ 。

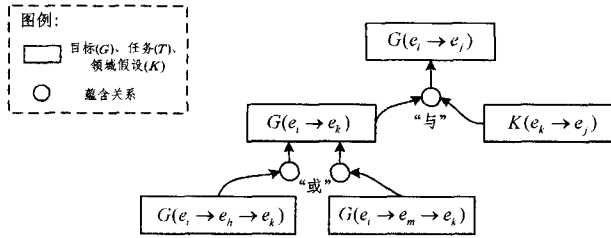


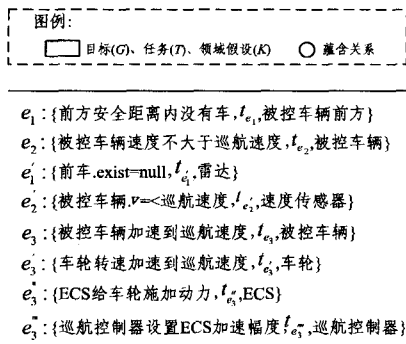
图 3 利用目标的“与/或”分解进行事件模型分析的示意图
具体分析过程采取从初始事件和目标事件出发、向中间

逼近的策略。在实际中有两种具体的实施方法:

1)发现已存在并可以利用的实体(物理实体或者软件实体),它可以接受一组输入事件并输出另外一组事件,其中输入事件或者输出事件是事件链中已知的事件。在这种情况下,可以将该实体引入作为 CPS 的一部分,并且其输入事件或者输出事件成为所识别的中间事件。此时,该实体的输入事件到输出事件之间的因果关系就可以表达为目标模型中的领域假设(如图 3 中的 $K(e_k \rightarrow e_j)$)。

2)如果从初始事件到目标事件的解决方案是已知的,则可以将该方案的具体过程分解为不同的步骤,定义每步的输入事件和输出事件,然后将每步的输入事件到输出事件之间的因果关系表达为目标模型中的目标,并定义新的实体来完成该目标。

遵循上述两种方法,以第一个因果关系 r_1 为例,图 4 的目标模型图示出了具体的分析过程:



- e_1 : {前方安全距离内没有车, t_{e_1} , 被控车辆前方}
- e_2 : {被控车辆速度不大于巡航速度, t_{e_2} , 被控车辆}
- e_1' : {前车.exist=null, $t_{e_1'}$, 雷达}
- e_2' : {被控车辆, $v \leq$ 巡航速度, $t_{e_2'}$, 速度传感器}
- e_3 : {被控车辆加速到巡航速度, t_{e_3} , 被控车辆}
- e_3' : {车轮转速加速到巡航速度, $t_{e_3'}$, 车轮}
- e_3'' : {ECS给车轮施加动力, $t_{e_3''}$, ECS}
- e_3''' : {巡航控制器设置ECS加速幅度 $f_{e_3'''}$, 巡航控制器}

图 4 基于目标的事件模型分析过程

首先,初始事件 e_1 可以通过雷达来感知,雷达将该事件转换为由雷达测量值所表达的事件 e_1' (前车. exist=null),初始事件 e_2 则可以通过测速传感器来感知,测速传感器将该事件转换为由具体的车速值所表达的事件 e_2' (被控车辆. $v \leq$ 巡航速度)。从事件 e_1 到 e_1' 和从事件 e_2 到 e_2' 的因果关系分别体现了雷达和测速传感器的性质,因此可以表达为目标模型中关于雷达和测速传感器具体性质的领域假设 $K(e_1 \rightarrow e_1')$ 和 $K(e_2 \rightarrow e_2')$ 。如图 4 所示,基于这两个领域假设, $e_1 \wedge e_2 \rightarrow e_3$ 这一因果关系(即目标 $G(e_1 \wedge e_2 \rightarrow e_3)$)通过目标分解可以转化为目标 $G(e_1' \wedge e_2' \rightarrow e_3)$,并且在此过程中,识别了构成 CPS 的两个实体:雷达和测速传感器(如图 5 所示)。与此同时,由于汽车的速度等于车轮的转速以及二者之间直接的关联性,因此可以通过触发事件 e_3' 来实现目标事件 e_3 的触发,即通过将车轮的转速加速到巡航速度来实现。从 e_3' 到 e_3 的因果关系体现了汽车和车轮之间关系所固有的性质,因此可以表达为领域假设 $K(e_3' \rightarrow e_3)$ 。并且,基于该领域假设,此时目标 $G(e_1' \wedge e_2' \rightarrow e_3)$ 可以进一步转化为目标 $G(e_1' \wedge e_2' \rightarrow e_3')$ 。更进一步,由于要控制车轮的转速达到巡航速度,可以通过 ECS(引擎控制系统)施加相应的动力来实现,因此可以通过触发事件 e_3'' 来实现事件 e_3' 的触发。同理,从 e_3'' 到 e_3' 之间的因果关系体现了车轮这一物理实体所固有的性质,因此

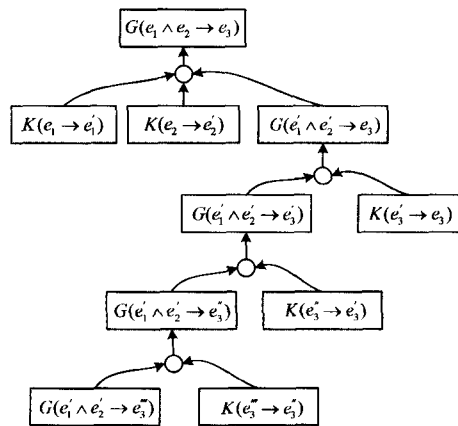


图 5 构成 CPS 的实体与 CPS 事件间关系的示意图

图 6 示出了从事件 e_1 和 e_2 到事件 e_3 之间的事件链。其中,承担箭头所代表的因果关系的具体实体如图 5 所示。并且,由于用户需求存在对事件 e_1 和 e_2 到事件 e_3 的时间约束 t_1 , 因此,显然 $\max(\Delta t_1 + \Delta t_1', \Delta t_2 + \Delta t_2') + \Delta t_3 + \Delta t_3' + \Delta t_3'' <$

t_1 应成立(Δt_1 等信息如图6所示)。

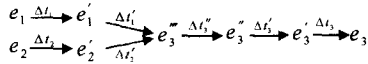


图6 从事件 e_1 和 e_2 到事件 e_3 之间的事件链

5 相关工作

首先,事件以及事件模型在很多领域都有相关的研究工作。在数据库领域,“事件-条件-动作(ECA)”模型最早在文献[7]中提出。在该模型中,事件表示触发验证条件是否为真的信号,并且如果条件为真,则相应的动作会被触发。在进一步的研究中,Gehani等[8]定义了一套事件操作算子(比如连接算子)来扩展上述ECA模型。通过这些事件操作算子,可以定义复合事件。由于不管是ECA还是扩展之后的ECA都认为事件发生于一个特点的时间点上(即点事件),Adaikkalavan等[9]进一步提出了时间间隔事件。而在实时处理领域,研究人员则明确地将时间约束引入到了ECA模型中,例如Mok等提出了基于实时逻辑的事件模型[10]。

其次,对于CPS的事件模型的研究,由于CPS的时空特性决定了CPS的事件模型分析必须考虑时间和空间维度,Tan等[6]提出了一种针对CPS系统的时空事件模型。该模型尝试用事件的属性、发生的时间和发生的地点3个维度来统一描述CPS的事件,并根据CPS的结构对CPS的事件进行分类(如物理事件、传感器事件等)。在文献[11]中,Tan等进一步认为CPS的事件应包含3部分:类型、内部属性和外部属性,其中内部属性和外部属性可以一起表征事件的时空信息以及事件的观测者;并且,通过基于概念格来进行事件的组合操作,它们还定义了一组事件的组合规则。由于上述CPS的时空事件模型不能体现外部环境的变化(比如变化的幅度和变化的结果),Wang等提出可以使用一个包含多个维度的元组来描述CPS的事件[12],该元组包含的维度有对象、时间、地点、性质、观测者等。对象是触发事件发生的实体,时间和地点是事件发生的时间和地点,性质是事件所满足的性质,观测者则是能够感知到事件发生的对象。

不同于上述关于CPS事件模型的研究工作,本文的重点不是研究如何定义CPS的事件,而是如何建立CPS的事件模型,分析了为了满足用户需求,CPS的运行过程应该涉及哪些事件链、每个事件链包含哪些事件以及为什么要有这些事件。本文的目的是通过对CPS事件模型进行分析来明确CPS的结构以及融合的计算过程和物理过程。

结束语 本文尝试从需求分析的角度出发,将面向目标的需求分析与CPS的事件模型分析结合起来,提出一种基于目标的CPS事件模型的分析方法。该方法认为用户对CPS的需求以及目标模型中的目标等概念都可以表达为事件之间的因果关系。基于此,该方法以目标模型的“与/或”分解为手

段,从用户对CPS的需求出发,推理分析满足用户需求的事件链。本文以一个自适应巡航控制系统为案例说明了所提方法的可行性。

参考文献

- [1] LEE E A. Cyber-physical systems-are computing foundations adequate[C]// Proceedings of the NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap. 2010;6-14.
- [2] LE E. Cyber physical systems; design challenges [C]// Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'08). 2008; 363-369.
- [3] JURETA I J, BORGIDA A, ERNST N A, et al. The requirements problem for adaptive systems[J]. ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS), 2014, 5(3): 17.
- [4] Adaptive cruise control system overview [OL]. http://sunnyday.mit.edu/safety-club/workshop5/Adaptive_Cruise_Control_Sys_Overview.pdf.
- [5] JACKSON M. Problem frames; analyzing and structuring software development problems[M]. Addison-Wesley, 2001.
- [6] TAN Y, VURAN M C, GODDARD S. Spatial-temporal event model for cyber-physical systems[C]// Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS'09). 2009;44-50.
- [7] MCCARTHY D, DAYALY U. The architecture of an active database management system[C]// ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM, 1989;215-224.
- [8] GEHANI N H, JAGADISH H V, Shmueli O. Composite event specification in active databases; model & implementation[C]// Proceedings of the Very Large Data Bases (VLDB'92). 1992; 327-338.
- [9] ADAIKKALAVAN R, CHAKRAVARTHY S. SnoopIB: interval-based event specification and detection for active databases [J]. Data & Knowledge Engineering, 2006, 59(1): 139-165.
- [10] MOK A K, KONANA P, LIU G, et al. Specifying timing constraints and composite events; an application in the design of electronic brokerages[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2004, 30(12): 841-858.
- [11] TAN Y, VURAN M C, GODDARD S, et al. A concept lattice-based event model for Cyber-Physical Systems[C]// Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-physical Systems. 2010; 50-60.
- [12] WANG J, CHENG L, LIU J. A new spatial-temporal event Model based on multi-tuple for cyber-physical systems[J]. International Journal of Control and Automation, 2013, 6(6): 51-62.