

一种保持编排与参与者间行为一致的映射方法*

代飞^{1,2}, 陈凤强³, 莫启^{2,3}, 王炜^{2,3}, 李彤^{2,3}, 梁志宏^{1,2}



¹(西南林业大学 大数据与智能工程学院, 云南 昆明 650224)

²(云南省软件工程重点实验室(云南大学), 云南 昆明 650091)

³(云南大学 软件学院, 云南 昆明 650091)

通讯作者: 莫启, E-mail: moqiyueyang@163.com

摘要: 将编排映射为 Peer(参与者), 是对编排进行可实现性分析的第 1 个步骤。现有文献提出的映射方法未考虑参与者中 τ 对行为的影响, 无法确保编排与参与者间的行为一致性。以 Petri 网作为形式化基础, 提出了一种能够保持编排与参与者间行为一致的映射方法, 允许: (1) 通过动作映射, 将交互式 Petri 网定义的编排映射为带 τ 的交互式 Petri 网; (2) 提出了 4 条 τ 删除规则, 用以对带 τ 的交互式 Petri 网中的 τ 进行有选择的删除; (3) 将编排与参与者间的行为一致性问题规约为检验两个交互式 Petri 网是否满足弱互模拟的问题, 并证明了这 4 条 τ 删除规则的正确性。实验结果表明, 该映射方法能够确保编排与参与者间的行为一致性。

关键词: 业务过程管理; 编排; 参与者; 映射; 可实现性

中图法分类号: TP311

中文引用格式: 代飞, 陈凤强, 莫启, 王炜, 李彤, 梁志宏. 一种保持编排与参与者间行为一致的映射方法. 软件学报, 2018, 29(5): 1451-1470. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5382.htm>

英文引用格式: Dai F, Chen FQ, Mo Q, Wang W, Li T, Liang HZ. Projection approach for keeping the behavior consistency between choreography and peers. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2018, 29(5): 1451-1470 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5382.htm>

Projection Approach for Keeping the Behavior Consistency Between Choreography and Peers

DAI Fei^{1,2}, CHEN Feng-Qiang³, MO Qi^{2,3}, WANG Wei^{2,3}, LI Tong^{2,3}, LIANG Zhi-Hong^{1,2}

¹(School of Big Data and Intelligence Engineering, Yunnan University, Kunming 650224, China)

²(Key Laboratory for Software Engineering of Yunnan Province (Yunnan University), Kunming 650091, China)

³(School of Software, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: That peers are generated by projection from choreographies is known as the first step in checking choreographies' realizability. However, the projection approaches proposed by the existing literature have not considered the behavioral influence of invisible action τ . This leads to behavior inconsistency between choreography and the generated peers. This paper proposes a projection approach based on Petri nets, which allows us to 1) generate the peers defined by interaction Petri nets with τ through action projection from a choreography defined by an interaction Petri net, 2) develop four types of tau deletion rules to selectively delete τ of interaction Petri nets, and 3) specify the behavior consistency between choreography and the generated peers to check whether two Petri nets meet the weak simulation. Moreover, the correctness of these four types of tau deletion rules is proved. Experimental results show that the projection approach can ensure the behavior consistency between choreography and peers.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61462095, 61702442, 61462092, 61379032); 云南省自然科学基金(2016FB102); 云南省教育厅科学研究基金重大专项(ZD2014001)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61462095, 61702442, 61462092, 61379032); Yunnan Province Natural Science Foundation (2016FB102); Yunnan Provincial Department of Education Fund for Scientific Research of Major Special Projects (ZD2014001)

收稿时间: 2016-10-17; 修改时间: 2017-01-18; 采用时间: 2017-08-15

Key words: business process management; choreography; peer; projection; realizability

对业务流程间的交互进行定义和分析,是实现自上而下式跨组织业务流程建模需要解决的两个关键问题.

一方面,为了实现不同组织业务流程间的有效协同,有必要提供全局性的契约,以规范业务流程间的交互.这种全局性的契约,被学术界和工业界称为编排(choreography)^[1].为了定义编排,大量编排建模语言被提出来,例如 BPMN 2.0^[2]、协作图(collaboration diagram,简称 CD)^[3]、Web 服务编排规约语言(Web services choreography description language,简称 WS-CDL)^[4]、Let's Dance^[5]、交互式 Petri 网 IPN(interaction Petri nets,简称 IPN)^[6]、会话协议(conservation protocol,简称 CP)^[7]、BPEL4Chor^[8]、BPEL^{gold}^[9]和消息序列图 MSCs(message sequence charts)^[10].按照建模交互的方式,这些编排建模语言可以分为互连式的编排建模语言和交互式的编排建模语言^[11].互连式的编排建模语言有交互式 Petri 网、BPEL4Chor 和 MSCs,其特征是:将通信双方的通信活动进行对偶互连,并用链接来表示业务流程间的消息交互^[12].交互式的编排建模语言有协作图、BPMN 2.0、WS-CDL、Let's Dance、会话协议和 BPEL^{gold},其特征是:将通信双方的通信活动视为原子交互,并通过原子交互及原子交互间的依赖关系来描述多个业务流程间的消息交互^[12].与互连式的编排建模语言相比,交互式的编排建模语言可以避免互连式编排建模语言存在的相容性问题

另一方面,给定一个上述编排建模语言定义的编排,参与者(peer)未必总能正确实现编排^[13].进一步来说,给定一个编排,从该编排映射得到每个参与者,但这些参与者间的交互未必总能满足该编排.这就是可实现性(realizability)分析的内涵^[14].为了分析编排,现有文献^[1,3,7,14-20]主要以自动机或进程代数为形式化基础,对编排进行可实现性分析.通常,编排的可实现性分析包括 3 个步骤:(1) 将编排映射为参与者;(2) 将参与者经同步通信或异步通信组合为编排实现;(3) 检验编排实现是否满足编排.其中,第 1 步在很大程度上决定了可实现性分析的结果.

但是,上述文献^[1,3,7,14-20]在将编排映射为参与者时,未考虑映射过程中不可见动作 τ 对行为的影响,无法确保编排与参与者间的行为一致性.进一步地,若编排与参与者间无法确保一致性,则将影响编排可实现性分析的最终结果.

本文关注将编排映射为参与者,其主要贡献如下.

- (1) 提出了一种能够确保编排与参与者间行为一致的映射方法.该映射方法以 Petri 网作为形式化基础,先通过动作映射,将交互式 Petri 网定义的编排映射为带 τ 的交互式 Petri 网;再提出 τ 删除规则,对交互式 Petri 网中的 τ 进行有选择性的删除,得到参与者;最后,从弱互模拟的角度,证明本文所提出的 τ 删除规则的正确性,即编排与参与者间满足行为等价,保持了行为一致;
- (2) 该映射方法已被实现成工具,并通过实验表明本文所提出的映射方法的有效性.

本文第 1 节通过举例进一步分析拟解决的问题.第 2 节介绍相关基础.第 3 节讨论映射方法.第 4 节提出 τ 删除规则.第 5 节证明 τ 删除规则的正确性.第 6 节是工具与实验.第 7 节是相关工作的比较.最后对本文进行总结.

1 例子与问题分析

图 1 是来自文献[16]的例子.图 1(a)是使用会话协议描述的编排,涉及 3 个角色:C(customer),V(vendor)和W(warehouse).会话协议的底层数学基础是自动机.在图 1(a)中,圆圈代表状态,有向边上的标号代表状态间的迁移动作,C \rightarrow V:order 表示 Customer 向 Vendor 发送了一个 order.圆圈 1 表示开始状态,同心圆圈 6 表示结束状态.图 1 中(b)是参与者 Customer,从图 1(a)所示的编排通过动作映射而来.在图 1(b)中,参与者具有 3 个不可见动作 τ :状态 2 和状态 3 间的 τ 、状态 3 和状态 4 间的 τ 及状态 3 和状态 5 间的 τ .图 1(c)是对图 1(b)使用 τ 移除操作(removal of tau transitions)^[14]得到的.与图 1(b)相比,图 1(c)中没有 τ .

现有文献^[1,3,7,14-20]提出的映射方法通过两步,将图 1(a)所示的编排映射为图 1(c)所示的参与者.

- 第 1 步,根据角色(customer),对图 1(a)所示的编排进行动作映射,得到图 1(b)所示该角色对应的参与者,

即保留与该角色相关的动作,把与该角色无关的动作映射为不可见动作 τ .对图 1(a)而言,图 1(b)与图 1(a)保持行为一致,因为该步只将编排中与 Customer 无关的动作映射为 τ .

- 第 2 步,使用 τ 移除操作,删除图 1(b)所示参与者中的 3 个不可见动作 τ ,得到图 1(c)所示的参与者.对图 1(b)而言,图 1(c)与图 1(b)行为不一致.究其原因在于,图 1(b)所示的参与者中具有不确定性,即从状态 3 出发存在两个相同的不可见动作 τ ;而图 1(c)所示的参与者不存在不确定性.

综上分析可知,图 1(a)所示的编排与图 1(c)所示的参与者间没有保持行为一致.事实上,从弱互模拟的角度看(参见定义 9),图 1(b)所示的参与者和图 1(c)所示的参与者间并不满足弱互模拟.

造成编排与参与者间行为不一致的原因在于第 2 步,即现有文献提出的映射方法均对参与者中的不可见动作 τ 全部删除,未考虑 τ 对行为的影响.为此,本文提出了一种能够确保编排与参与者间保持行为一致性的映射方法.该方法以 Petri 网作为形式化基础,将图 1(a)所示的编排映射为图 1(d)所示的参与者.该参与者对应的可达图如图 1(e)所示.与图 1(b)相比,图 1(e)所示的可达图删除了图 1(b)中状态 2 和状态 3 间的 τ ,但保留了图 1(b)中状态 3 和状态 4 间的 τ 及状态 3 和状态 5 间的 τ .也就是说,本文所提出的映射方法对参与者中的 τ 进行有选择的删除,而非全部删除.其目的是从弱互模拟的角度,确保图 1(a)和图 1(e)之间满足行为等价,即保证编排与参与者间的行为一致.

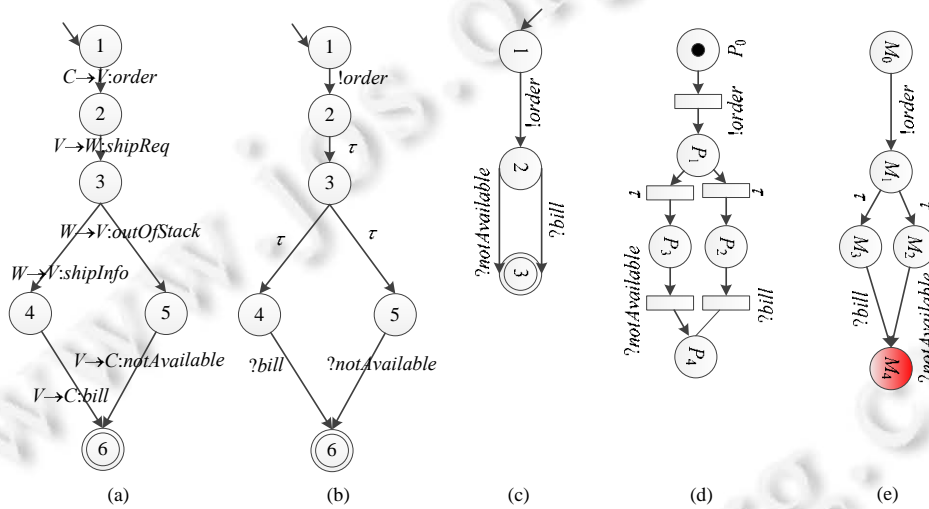


Fig.1 An example
图 1 一个例子

2 相关基础

2.1 Petri网

Petri 网是 1962 年由德国科学家 C. A. Petri 博士在他的博士学位论文《用自动机通信》中创立的一种网状结构^[15],它是一个有向二分图,由库所和变迁组成,其图形化的表示方式使得 Petri 网直观、易懂.通常,库所使用圆圈表示,变迁使用方框表示,流关系使用有向线段表示,托肯使用实心小黑点表示.

定义 1(Petri 网)^[21]. Petri 网是一个四元组 $\Sigma=(P,T;F,M)$,其中,

- (1) $P \cup T \neq \emptyset$,习惯称 P 为库所集, T 为变迁集;
- (2) $P \cap T = \emptyset$;
- (3) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$,称 F 为流关系;
- (4) 映射 $M:P \rightarrow \{0,1,2,3,\dots\}$ 称为 Petri 网的一个标识,通常用 M_0 表示 Petri 网的初始标识.

定义 2(前集和后集)^[22]. 设 $\Sigma=(P,T;F,M)$ 是一个 Petri 网,若 $x \in P \cup T, \bullet x = \{y | (y,x) \in F \wedge y \in P \cup T\}$,则称 $\bullet x$ 为 x 的前

集;若 $x \in P \cup T, x^* = \{y | (x, y) \in F \wedge y \in P \cup T\}$, 则称 x^* 为 x 的后集.

定义 3(变迁发生规则)^[22]. 设 $\Sigma = (P, T; F, M)$ 是一个 Petri 网, 并具有以下变迁发生规则(transition firing rule).

- 1) 对于变迁 $t \in T$, 如果 $\forall p \in {}^\bullet t: M(p) \geq 1$, 则称变迁 t 在标识 M 有发生权(enable), 记为 $M[t]$.
- 2) 若 $M[t]$, 则在标识 M 下变迁 t 可以发生(fire), 从标识 M 发生变迁 t 得到一个新的标识 M' , 记为 $M'[t]M$, $\forall p \in P$, 满足:
 - (1) 若 $p \in {}^\bullet t - t^\bullet, M'(p) = M(p) - 1$;
 - (2) 若 $p \in t^\bullet - {}^\bullet t, M'(p) = M(p) + 1$;
 - (3) 其他, $M'(p) = M(p)$.

定义 4(可达标识集)^[23]. 设 $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 是一个 Petri 网, 其中 M_0 是初始情态. Σ 的可达标识集 $R(M_0)$ 为满足下面条件的最小集合.

- (1) $M_0 \in R(M_0)$;
- (2) 若 $M \in R(M_0)$, 且存在 $t \in T$, 使得 $M'[t]M$, 则 $M' \in R(M_0)$.

可达标识集 $R(M_0)$ 描述了 Σ 所有可能的状态. 满足条件(1)和条件(2)的可达标识集会有多个, 其中最小的一个只包含 M_0 及由 M_0 出发经过有限步变迁发生到达的那些标识, 即 $R(M_0)$.

若以 $R(M_0)$ 中的元素为节点, 以有向弧描述标识间的后继关系, 就可以构造出 Σ 的可达图.

定义 5(可达图)^[23]. 设 $\Sigma = (P, T; F, M_0)$ 是一个 Petri 网, 其中 M_0 是初始情态. Σ 的可达图定义为一个三元组 $RG(\Sigma) = (R(M_0), E, Tran)$, 其中,

- (1) $E = \{(M_i, M_j) | M_i, M_j \in R(M_0), \exists t_k \in T: M_i[t_k]M_j\}$;
- (2) 映射 $Tran: E \rightarrow T$ 称为迁移, $Tran(M_i, M_j) = t_k$ 当且仅当 $M_i[t_k]M_j$.

称 $R(M_0)$ 为 $RG(\Sigma)$ 的顶点集, E 为 $RG(\Sigma)$ 的弧集. 若 $Tran(M_i, M_j) = t_k$, 则称 t_k 为弧 (M_i, M_j) 的旁标, 通常将其记为 $M_i \xrightarrow{t_k} M_j$.

2.2 编排和参与者

编排从全局视角描述了角色间的交互, 其关注点是角色间的消息交互. 参与者从局部视角描述了该角色在编排中参与的交互, 其关注点是在交互过程中的消息发送动作和消息接收动作. 两者的区别在于: 编排是角色间消息交互的全局契约; 参与者是该角色在编排中参与消息交互的局部契约.

我们将经典的 P/T 网(参见定义 1) 扩展为交互式 Petri 网(参见定义 6), 并使用交互式 Petri 网定义编排和参与者. 具体而言, 使用交互式 Petri 网定义编排时, 变迁用于描述两个角色间的单次消息交互, 即某个角色向另一个角色发送了消息; 变迁点火序列用于描述角色间的消息发送序列. 使用交互式 Petri 网定义参与者时, 变迁用于描述该角色在消息交互中的消息发送动作或消息接收动作; 变迁点火序列用于描述该角色在编排中的消息发送和消息接收序列.

定义 6(交互式 Petri 网). 一个交互式 Petri 网是一个七元组 $IPN = (P, T, F, R, MT, M, \lambda)$, 其中,

- (1) $P \cup T \neq \emptyset \wedge P \cap T = \emptyset$, 称 P 为库所集, T 为变迁集;
- (2) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$, 称 F 为流关系;
- (3) R 为角色集合;
- (4) MT 为消息集合;
- (5) 映射 $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ 称为 Petri 网的一个标识. 通常用 M_0 表示 Petri 网的初始标识;
- (6) 标记函数 $\lambda: T \rightarrow L' \cup L'' \cup \{\tau\}$, 用于给每个变迁指定字母表 L' 或 L'' 中的一个标记或空标 τ , 其中,

$$L' = \{r_1_r_2_m | r_1, r_2 \in R \wedge m \in MT\}, L'' = \{xy | x \in \{!, ?\}, y \in MT\}.$$

引入 3 个辅助函数: 发送者函数 sf 、接收者函数 rf 和消息 mf . 其中, $sf: T \rightarrow R, rf: T \rightarrow R, mf: T \rightarrow MT$.

需要说明的是:

- 1) 与文献[6]中定义的交互式 Petri 网(interaction Petri nets)相比, 定义 6 引入了标记函数 λ , 用于建立变迁

与标记间的映射,其中,标记存在 3 种形式:“角色 A_角色 B_消息”的格式、“?/!消息”或 τ 。“角色 A_角色 B_消息”表示角色 A(发送者)向角色 B(接收者)发送了消息,“?消息”表示消息发送动作,“!消息”表示消息接收动作.其中,“角色 A_角色 B_消息”用在编排定义中;“?/!消息”用在参与者定义中.

- 2) 当 $|R|>1$ 时,交互式 Petri 网定义的是编排,即使用交互 Petri 网描述多个角色间的消息交互;当 $|R|=1$ 时,交互式 Petri 网定义的是单个角色对应的参与者,即使用交互 Petri 网描述该角色对应的参与者在编排中的消息发送动作和消息接收动作.
- 3) 如果 $\lambda(t) \neq \tau$,则该变迁视为可见变迁;否则,视为不可见变迁.
- 4) 若变迁为可见变迁,则该变迁对应的标记或为“角色 A_角色 B_消息”,或为“?/!消息”.

图 2 是使用交互式 Petri 网定义的编排,该编排源于文献[14]中使用协作图定义的火车站服务编排.该编排涉及 4 个角色:Customer(客户)、TrainStation(火车站)、Availability(车票检查组件)和 Booking(车票预订组件),其中,Customer 是指火车票的预订者;TrainStation 是指火车站的代理端,用于接收用户的预订请求并返回预订结果;Availability 用于检查是否有可用的火车票;Booking 用于预订可用的火车票.图 2 描述了下述交互场景.

- 首先,Customer 向 TrainStation 发送请求消息(cus_ts_request);
- 其次,TrainStation 与 Availability 间进行消息交互,以检查火车票是否有可用的火车票(ts_ava_info,ava_ts_infoAvail,ava_ts_itinerary);
- 然后,TrainStation 与 Booking 间进行消息交互,以预定可用的火车票(ts_boo_book,boo_ts_ack,boo_cus_invoice);
- 最后,TrainStation 把最终的结果发送给 Customer(ts_cus_result).

其中,cus,ts,ava 和 boo 分别是 Customer,TrainStation,Availability 和 Booking 的缩写.此外,变迁 *null* 用于建模选择结构.

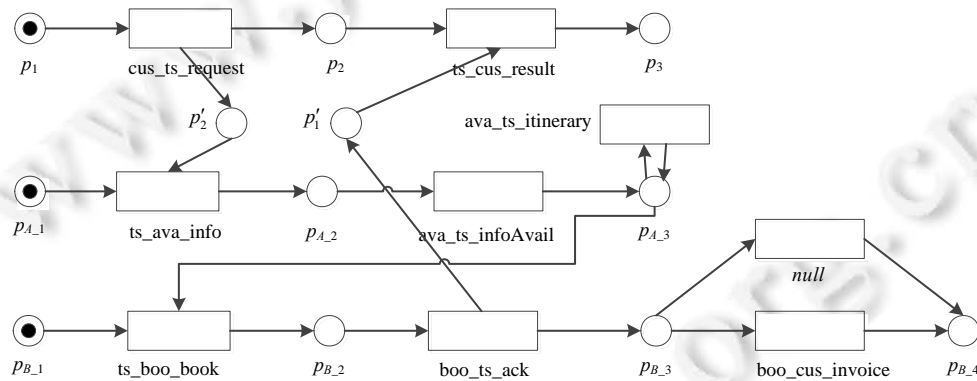


Fig.2 A choreography represented as an interaction Petri net

图 2 交互式 Petri 网定义的编排

进一步地,图 2 所示的交互式 Petri 网指定了 3 个消息发送序列,分别是:

- (1) cus_ts_request,ts_ava_info,ava_ts_infoAvail,ava_ts_itinerary*,ts_boo_book,boo_ts__ack,ts_cus_result,boo_cus_invoice;
- (2) cus_ts_request,ts_ava_info,ava_ts_infoAvail,ava_ts_itinerary*,ts_boo_book,boo_ts__ack,boo_cus_invoice, ts_cus_result;
- (3) cus_ts_request,ts_ava_info,ava_ts_infoAvail,ava_ts_itinerary*,ts_boo_book,boo_ts__ack,ts_cus_result.

其中,*表示该消息发送发生 $0, \dots, n$ 次.

图 3 是由图 2 所示的编排经本文所提出的映射方法得到的用使用交互式 Petri 网定义的 4 个参与者.需要注意的是,图 3 所示的 Transtation 和 Availability 中均有 τ .这两个 τ 不能删除,否则将造成编排与参与者间的行为

不一致性.

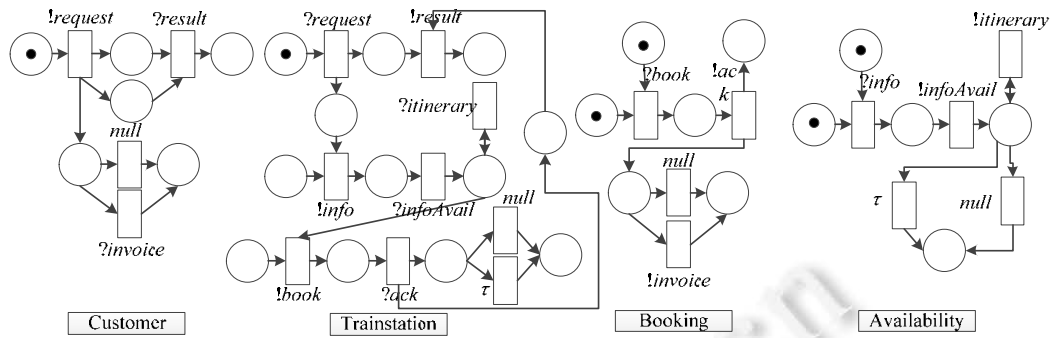


Fig.3 A peer represented as an interaction Petri net

图3 交互式 Petri 网定义的参与者

2.3 弱互模拟

借鉴进程代数中的弱互模拟的定义^[23],下面定义可达标识集上的弱互模拟.

定义 7(实验关系)^[24]. 设 $\Sigma=(P,T;F,M_0)$ 是一个 Petri 网,其中, M_0 是初始情态. Σ 的可达图为 $RG(\Sigma)=(R(M_0),E, Tran)$, $M_i, M_j \in R(M_0), s \in Act^*$, 其中, $Act=T \cup \{\tau\}$, 实验关系 $\overset{\tau}{\Rightarrow}$ 和 $\overset{s}{\Rightarrow}$ 定义如下.

- (1) $M_i \overset{\tau}{\Rightarrow} M_j$ 表示存在长度大于等于 0 的迁移序列 $M_i \xrightarrow{\tau} \dots \xrightarrow{\tau} M_j$. 或更形式地, $\overset{\tau}{\Rightarrow} = \xrightarrow{\tau} \overset{\tau}{\Rightarrow}^*$, 其中, $\xrightarrow{\tau}^*$ 是 $\xrightarrow{\tau}$ 的自反传递闭包.
- (2) 令 $s=t_1 \dots t_n$, 则 $M_i \overset{s}{\Rightarrow} M_j$ 表示 $M_i \xrightarrow{t_1} M_{i+1} \dots \xrightarrow{t_n} M_{i+n} \Rightarrow M_j$. 或更形式地, $\overset{s}{\Rightarrow} = \xrightarrow{t_1} \overset{s}{\Rightarrow} \xrightarrow{t_2} \dots \xrightarrow{t_n} \overset{\tau}{\Rightarrow} \dots$. 特别地, $\overset{s}{\Rightarrow}$ 表示在前面或者后面伴随着任意个 $\xrightarrow{\tau}$ 的 \xrightarrow{t} , 其中, $t \in T$.

定义 8(弱模拟)^[24]. 设 $\Sigma=(P,T;F,M_0)$ 是一个 Petri 网,其可达图为 $RG(\Sigma)=(R(M_0),E, Tran)$; $\Sigma'=(P',T';F',M'_0)$ 是一个 Petri 网,其可达图为 $RG(\Sigma')=(R(M'_0),E', Tran')$, 关系 S 是可达标识集 $R(M_0) \cup R(M'_0)$ 的一个弱模拟,当且仅当对于 $M_0 S M'_0$, 下面的条件成立.

- (1) 如果 $M_0 \xrightarrow{\tau} M_k$, 其中, $M_0, M_k \in R(M_0)$, 那么存在 $M'_k \in R(M'_0)$, 满足 $M'_0 \overset{\tau}{\Rightarrow} M'_k$ 且 $M_k S M'_k$;
- (2) 如果 $M_0 \xrightarrow{t} M_k$, 其中, $M_0, M_k \in R(M_0)$, 那么存在 $M'_k \in R(M'_0)$, 满足 $M'_0 \overset{t}{\Rightarrow} M'_k$ 且 $M_k S M'_k$.

如果 $M_0 S M'_0$, 则称 Σ 被 Σ' 弱模拟.

定义 9(弱互模拟)^[24]. 设 $\Sigma=(P,T;F,M_0)$ 是一个 Petri 网,其可达图为 $RG(\Sigma)=(R(M_0),E, Tran)$; $\Sigma'=(P',T';F',M'_0)$ 是一个 Petri 网,其可达图为 $RG(\Sigma')=(R(M'_0),E', Tran')$, 关系 B 是可达标识集 $R(M_0) \cup R(M'_0)$ 上的弱互模拟当且仅当 B 和它的逆都是弱模拟. 如果存在一个弱互模拟 B 满足 $M_0 S M'_0$, 则称 M_0 和 M'_0 是弱互模拟, 记作 $M_0 \approx M'_0$.

如果 $M_0 B M'_0$, 则称 Σ 与 Σ' 间满足弱互模拟.

需要说明的是:进程代数中的弱模拟和弱互模拟是基于进程空间定义;本文的定义 8 和定义 9 是基于可达标识集定义.

3 映射方法

3.1 方法概述

以图 2 所示的编排为例,本节介绍本文所提出的映射方法的基本思路,如图 4 所示.与现有文献^[1,3,6,7,14-20]所提出的映射方法相比,本文所提出的映射方法将对参与者中的 τ 进行有选择的删除,以确保编排与参与者间的行为一致性.具体而言,该方法包含两个步骤:动作映射和 τ 删除.其中,动作映射是指根据参与者的角色,将交互

式 Petri 网定义的编排映射为带 τ 的交互式 Petri 网; τ 删除用于将带 τ 的交互式 Petri 网中的 τ 有选择地删除,从而得到最终的参与者.

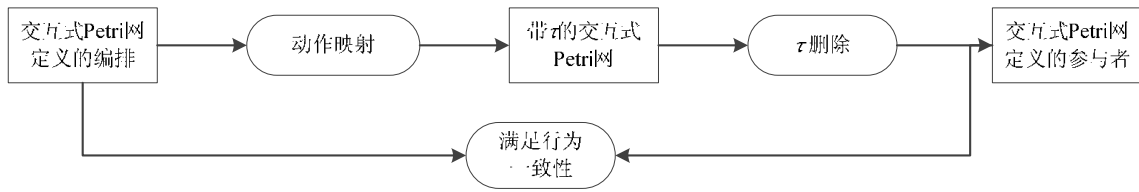


Fig.4 Overview of projection approach

图 4 映射方法的概述

3.2 动作映射

动作映射的本质是根据角色,将交互式 Petri 网定义的编排中与该角色相关的动作映射为消息发送动作或消息接收动作,并把与该角色无关的动作映射为不可见动作 τ ,具体可参见定义 10 的动作映射.

定义 10(动作映射). 设 $IPN=(P,T,F,R,MT,M,\lambda)$ 是一个交互式 Petri 网,根据角色 $r \in R$,通过动作映射得到的交互式 Petri 网 $IPN'=(P',T',F',R',MT',M',\lambda')$,其中,

- (1) $P'=P$;
- (2) $T'=T$;
- (3) $F'=F$;
- (4) $R'=\{r\}$;
- (5) $MT'=\{mf(t)|t \in T \wedge (sf(t)=r \vee rf(t)=r)\}$;
- (6) $M'=M$;
- (7) $\lambda'=\{(t,!mf(t))|t \in T \wedge \lambda(t) \neq \tau \wedge sf(t)=r\} \cup \{(t,?mf(t))|t \in T \wedge \lambda(t) \neq \tau \wedge rf(t)=r\} \cup \{(t,\tau)|t \in T \wedge \lambda(t)=\tau\}$.

需要注意的是,由于动作映射只是将编排中与该角色无关的动作映射为 τ ,并不删除编排中的任何库所、变迁、托肯及弧,所以我们认为, IPN' 与 IPN 间保持了行为一致性.

根据角色 TrainStation,从图 2 所示的编排中通过动作映射得到参与者,如图 5 所示.该交互式 Petri 网中具有 1 个 τ ,由原编排中的变迁 boo_cus_invoice 映射而来.因为变迁 boo_cus_invoice 的发送者为 Booking,接收者为 Customer,均与角色 TrainStation 无关,所以动作映射会将此变迁 boo_cus_invoice 映射为 τ .

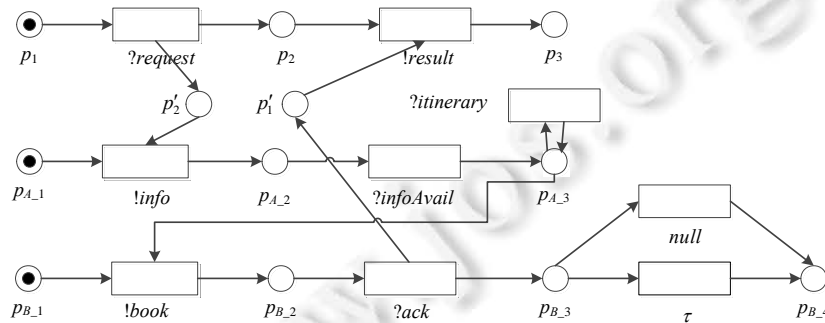


Fig.5 An interaction Petri net with τ

图 5 带 τ 的交互式 Petri 网

4 τ 删除规则

针对第 3.2 节通过动作映射得到的带 τ 的交互式 Petri 网,本节将提出 τ 的删除规则.对带 τ 的交互式 Petri 网

中的 τ 进行删除时,需要有选择地删除,否则,无法确保编排与参与者间的行为一致性.

4.1 τ 删除规则1

τ 删除规则 1. 设 $IPN=(P,T,F,R,MT,M,\lambda)$ 是一个交互式 Petri 网, $\exists t \in T \wedge \lambda(t)=\tau$, 若 $(\bullet t)^{\bullet}=\{t\}$, 则该 t 可被删除, 得到新的交互式 Petri 网为 $IPN'=(P',T',F',R',MT',M',\lambda')$, 其中,

- (1) $P'=P-\bullet t$;
- (2) $T'=T-\{t\}$;
- (3) $F'=F-\{(x,t)|x \in \bullet t\}-\{(t,y)|y \in t^{\bullet}\}-\{(x,y)|x \in \bullet t \wedge y \in t^{\bullet}\} \cup \{(x,y)|x \in \bullet t \wedge y \in t^{\bullet}\}$;
- (4) $R'=R$;
- (5) $MT'=MT-\{mf(t)\}$;
- (6) $\lambda'=\lambda-\{(t,\tau)\}$;
- (7) 若 $x \in \bullet t \wedge M(x)=0$, 则 $M'=M$; 若 $\forall x \in \bullet t \wedge M(x) \neq 0$, 则 $\forall y \in t^{\bullet} \wedge M'(y)=1$.

τ 删除规则 1 如图 6 所示,可应用在 4 种场景.粗箭头左边的是源交互式 Petri 网,该交互式 Petri 网中有 τ ;粗箭头右边的是目标交互式 Petri 网,从源交互式 Petri 网中删除 τ 后得到.图 6(a)所示是将 τ 删除规则 1 应用于具有串行结构的交互式 Petri 网中.图 6(b)和图 6(c)所示是将 τ 删除规则 1 应用于具有并发结构的交互式 Petri 网中.图 6(a)和图 6(c)的区别在于对 M' 的处理不同.图 6(d)所示是将 τ 删除规则 1 应用于具有迭代结构的交互式 Petri 网中.

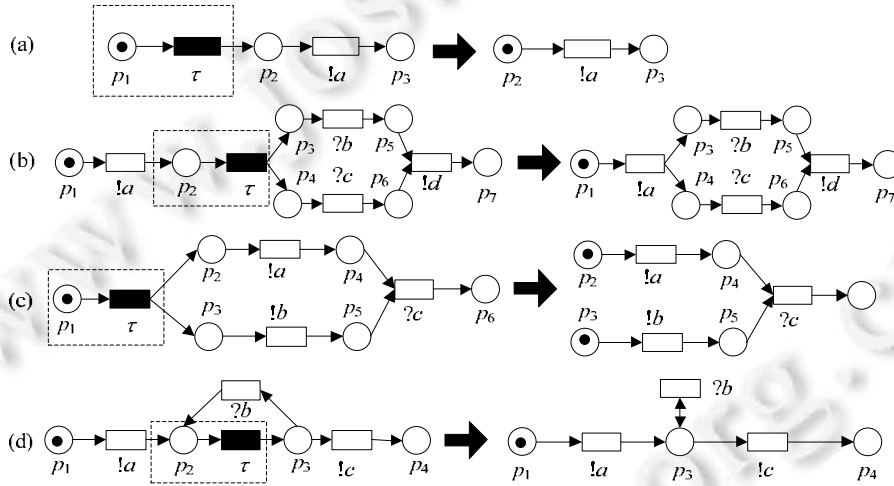


Fig.6 τ deletion rule 1

图 6 τ 删除规则 1

需要注意的是:为了直观区分 τ 和消息发送(接收)动作,用带填充的黑色方块表示 τ .此外,虚线方块所示区域为删除 τ 的过程中,源交互式 Petri 网中需要删除的相关元素.

4.2 τ 删除规则2

τ 删除规则 2. 设 $IPN=(P,T,F,R,MT,M,\lambda)$ 是一个交互式 Petri 网, $\exists t \in T \wedge \lambda(t)=\tau$, 若 $\bullet t=t^{\bullet}$, 则该 t 可被删除, 得到新的交互式 Petri 网为 $IPN'=(P',T',F',R',MT',M',\lambda')$, 其中,

- (1) $P'=P$;
- (2) $T'=T-\{t\}$;
- (3) $F'=F-\{(x,t)|x \in \bullet t\}-\{(t,y)|y \in t^{\bullet}\}$;
- (4) $R'=R$;

- (5) $MT' = MT - \{mf(t)\};$
- (6) $\lambda' = \lambda - \{(t, \tau)\};$
- (7) $M' = M.$

τ 删除规则 2 如图 7 所示.图 7 所示源交互式 Petri 网中的 τ 可以理解为单变迁的迭代,执行次数为 $0, \dots, n.$ τ 删除规则 2 用于将这个 τ 删除.

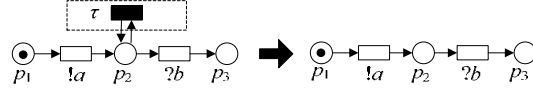


Fig.7 τ deletion rule 2
图 7 τ 删除规则 2

4.3 τ 删除规则3

τ 删除规则 3. 设 $IPN = (P, T, F, R, MT, M, \lambda)$ 是一个交互式 Petri 网, $\exists t_1, t_2, \dots, t_n \in T \wedge \lambda(t_1) = \tau \wedge \lambda(t_2) = \tau \wedge \dots \wedge \lambda(t_n) = \tau$, 若 $\bullet t_1 = \bullet t_2 = \dots = \bullet t_n \wedge t_1^* = t_2^* = \dots = t_n^* = t^*$, 则这 n 个 t_1, t_2, \dots, t_n 都可被删除, 得到新的交互式 Petri 网为 $IPN' = (P', T', F', R', MT', M', \lambda')$, 其中,

- (1) $P' = P - \bullet t_1;$
- (2) $T' = T - \{t_1\}^*;$
- (3) $F' = F - \{(x, y) | x \in \bullet t_1 \wedge y \in (t_1)^*\} - \{(x, y) | x \in (t_1)^* \wedge y \in t_1^*\} - \{(x, y) | x \in (t_1)^* \wedge y \in (t_1)^*\} \cup \{(x, y) | x \in (t_1)^* \wedge y \in t_1^*\};$
- (4) $R' = R;$
- (5) $MT' = MT - \{mf(t_1)\} - mf(t_2) - \dots - \{mf(t_n)\};$
- (6) $\lambda' = \lambda - \{(t_1, \tau)\} - \{(t_2, \tau)\} - \{(t_n, \tau)\};$
- (7) 若 $x \in \bullet t_i \wedge M(x) = 0$, 则 $M' = M$; 若 $\forall x \in \bullet t_i \wedge M(x) \neq 0$, 则 $\forall y \in t_i^* \wedge M'(y) = 1$. 其中, i 取值为 $1 \sim n$.

τ 删除规则 3 可应用在两种场景下, 如图 8 所示, 图 8(a) 和图 8(b) 的区别在于对 M' 的处理不同; 相同之处在于, 图 8(a) 和图 8(b) 所示的交互式 Petri 网中有 n 个 τ , 且这些 τ 的输入汇聚于库所 p_2 , 输出汇聚于库所 p_3 . τ 删除规则 3 用于将这些 τ 全部删除.

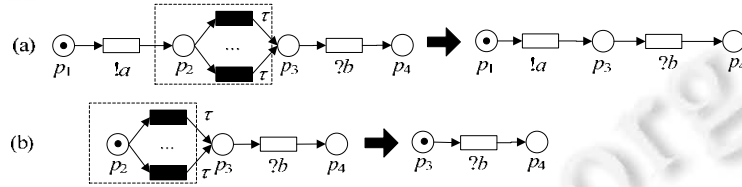


Fig.8 τ deletion rule 3
图 8 τ 删除规则 3

4.4 τ 删除规则4

τ 删除规则 4. $IPN = (P, T, F, R, MT, M, \lambda)$ 是一个交互式 Petri 网, $\exists t_1, t_2, \dots, t_n, t \in T \wedge \lambda(t_1) = \tau \wedge \lambda(t_2) = \tau \wedge \dots \wedge \lambda(t_n) = \tau \wedge (t) \neq \tau$, 若 $t_1 = t_2 = \dots = t_n = t \wedge \bullet t_1 = \bullet t_2 = \dots = \bullet t_n = \bullet t$, 则 $(t_1)^*$ 中的 τ 可以全部删除, t 变迁不能删除. 同时, 必须增加 1 个 τ 以保持交互式 Petri 网中存在的选择时机, 得到新的交互式 Petri 网为 $IPN' = (P', T', F', R', MT', M', \lambda')$, 其中,

- (1) $P' = P;$
- (2) $T' = T - \{x | x \in (t_1)^* \wedge \lambda(x) = \tau\} \cup \{t_{n+1}\};$
- (3) $F' = F - \{(x, y) | x \in \bullet t_1 \wedge y \in (t_1)^* \wedge \lambda(y) = \tau\} - \{(x, y) | x \in (t_1)^* \wedge y \in t_1^* \wedge \lambda(x) = \tau\} \cup \{(x, \tau) | x \in \bullet t_1\} \cup \{(\tau, y) | y \in t_1^*\};$
- (4) $R' = R;$
- (5) $MT' = MT - \{mf(t_1)\} - mf(t_2) - \dots - \{mf(t_n)\};$
- (6) $M' = M;$

(7) $\lambda'=\lambda$.

τ 删除规则 4 如图 9 所示.图 9 所示的源交互式 Petri 网中存在 n 个 τ 和 1 个消息发送动作 $!c$,且这些变迁的输入汇聚于库所 p_2 ,输出汇聚于库所 p_3 .若直接将这 n 个 τ 全部删除,则会破坏源交互式 Petri 网中选择时机,从而使得删除前后两个 Petri 网间无法保持行为一致性.因而,在把这 n 个 τ 删除以达到简化源交互式 Petri 网的同时,还需在目标交互式 Petri 网中增加 1 个 τ 变迁,用来保持源交互式 Petri 网中的选择时机.

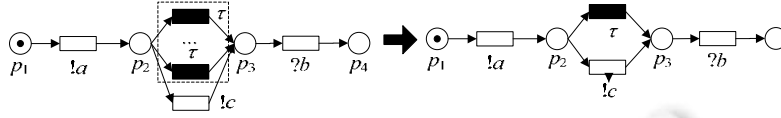


Fig.9 τ deletion rule 4

图 9 τ 删除规则 4

5 τ 删除规则的正确性分析

针对第 4 节提出的 4 个 τ 删除规则,本节将对这 4 个规则的正确性进行分析.所谓正确性是指:源交互式 Petri 网与目标交互式 Petri 网间是否保持行为一致性.由于源交互式 Petri 网中存在不可见动作 τ ,因而本文将采用弱互模拟作为检验行为是否一致的标准.这样,我们就可以把检验源交互式 Petri 网与目标交互式 Petri 网间是否保持行为一致性的问题规约为检验源交互式 Petri 网与目标交互式 Petri 网间是否满足弱互模拟的问题.

基于上述分析,下面给出行为一致性的定义.

定义 12(行为一致). 设 $IPN=(P,T,F,R,MT,M,\lambda)$ 是一个用交互式 Petri 网定义的编排,源交互式 Petri 网 $IPN'=(P',T',F',R',MT',M',\lambda')$ 是从 IPN 中通过动作映射得到的带 τ 的交互式 Petri 网,目标交互式 Petri 网 $IPN''=(P'',T'',F'',R'',MT'',M'',\lambda'')$ 是对 IPN' 使用 τ 删除规则得到的交互式 Petri 网,若 IPN'' 和 IPN' 间满足弱互模拟,则认为 IPN 和 IPN'' 间保持行为一致.

5.1 τ 删除规则1的正确性分析

对 τ 删除规则 1 进行正确性分析的关键问题是证明源交互式 Petri 网的可达图与目标交互式 Petri 网的可达图间是否满足弱互模拟.图 6 所示的 4 组 Petri 网(如图 6(a)~图 6(d)所示)的可达图分别对应图 10 所示的 4 组可达图(如图 10(a)~图 10(d)所示).在图 10 所示的每组可达图中,粗箭头左边对应的是源交互式 Petri 网的可达图,粗箭头右边对应的是目标交互式 Petri 网的可达图.填充圆圈表示该 Petri 网的结束标识.

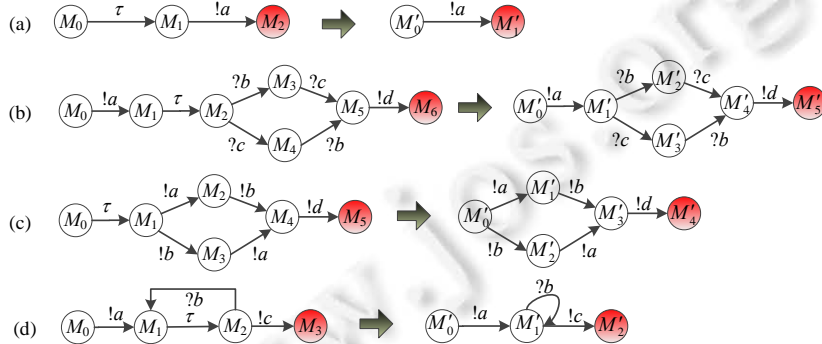


Fig.10 Reachability graph of the Petri net shown in Fig.6

图 10 图 6 所示 Petri 网对应的可达图

下面证明图 10(a)所示的两个可达图间满足弱互模拟.

先证明图 10(a)中粗箭头左边的可达图被粗箭头右边的可达图所弱模拟.

- 第 1 步,左边的可达图中,有 $M_0 \xrightarrow{\tau} M_1$; 右边的可达图中存在 M'_0 , 使得 $M'_0 \xrightarrow{\tau} M'_1$.
 - 第 2 步,左边的可达图中,有 $M_1 \xrightarrow{!a} M_2$; 右边的可达图中存在 M'_1 , 使得 $M'_0 \xrightarrow{!a} M'_1$.
- 综上所述可知, $M_0 S M'_0$. 关系 $S = \{(M_0, M'_0), (M_1, M'_1), (M_2, M'_1)\}$.

再证明关系 S 的逆 $S^{-1} = \{(M'_0, M_0), (M'_1, M_1), (M'_1, M_2)\}$ 是弱模拟, 即图 10(a) 中粗箭头右边的可达图被粗箭头左边的可达图所弱模拟.

- 第 1 步,右边的可达图中, M'_0 保持不变; 左边的可达图中存在 M_0 , 使得 $M_0 \xrightarrow{\tau} M_1$;
 - 第 2 步,右边的可达图中,有 $M'_1 \xrightarrow{!a} M'_2$; 左边的可达图中存在 M_2 , 使得 $M_1 \xrightarrow{!a} M_2$.
- 综上所述, 可知 $M'_0 S^{-1} M_0$. 由此证明了 $M_0 \approx M'_0$.

同理, 我们也可证明图 10(b)~图 10(d) 所示的两个可达图间满足弱互模拟. 限于篇幅, 这里不一一证明.

5.2 τ 删除规则2的正确性分析

图 7 所示 Petri 网的可达图如图 11 所示.



Fig. 11 Reachability graph of the Petri net shown in Fig. 7

图 11 图 7 所示 Petri 网对应的可达图

下面证明图 11 所示的两个可达图间满足弱互模拟关系.

先证明图 11 所示粗箭头左边的可达图被粗箭头右边的可达图所弱模拟.

- 第 1 步,左边的可达图中,有 $M_0 \xrightarrow{!a} M_1$; 右边的可达图中存在 M'_1 , 使得 $M'_0 \xrightarrow{!a} M'_1$;
- 第 2 步,左边的可达图中,有 $M_1 \xrightarrow{\tau} M_1$; 右边的可达图中存在 M'_1 , 使得 $M'_1 \xrightarrow{\tau} M'_1$;
- 第 3 步,左边的可达图中,有 $M_1 \xrightarrow{?b} M_2$; 右边的可达图中存在 M'_2 , 使得 $M'_1 \xrightarrow{?b} M'_2$;
- 第 4 步, M_2 和 M'_2 均为结束标识.

综上所述, 可知 $M_0 S M'_0$. 关系 $S = \{(M_0, M'_0), (M_1, M'_1), (M_2, M'_2)\}$.

再证明关系 S 的逆 $S^{-1} = \{(M'_0, M_0), (M'_1, M_1), (M'_2, M_2)\}$ 是弱模拟, 即图 11(a) 中粗箭头右边的可达图被黑色箭头左边的可达图所弱模拟.

- 第 1 步,右边的可达图中,有 $M'_0 \xrightarrow{!a} M'_1$; 左边的可达图中存在 M_1 , 使得 $M_0 \xrightarrow{!a} M_1$;
 - 第 2 步,右边的可达图中,有 $M'_1 \xrightarrow{?b} M'_2$; 左边的可达图中存在 M_2 , 使得 $M_1 \xrightarrow{?b} M_2$.
- 综上所述, 可知 $M'_0 S^{-1} M_0$. 由此证明了 $M_0 \approx M'_0$.

5.3 τ 删除规则3的正确性分析

图 8 所示两组 Petri 网的可达图分别对应图 12 所示的两组可达图: 图 12(a) 和图 12(b). 在图 12 所示的每组可达图中, $\tau/\tau/\dots/\tau$ 表示从 n 个 τ 变迁中选择一个变迁来发生.

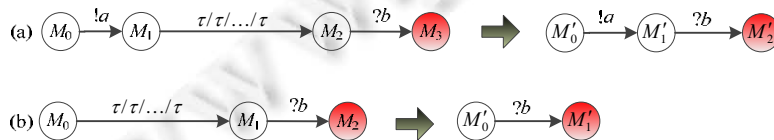


Fig. 12 Reachability graph of the Petri net shown in Fig. 8

图 12 图 8 所示 Petri 网对应的可达图

(1) 证明图 12(a)所示的两个可达图间满足弱互模拟.

先证明图 12(a)中粗箭头左边的可达图被粗箭头右边的可达图所弱模拟.

- 第 1 步,左边的可达图中,有 $M_0 \xrightarrow{!a} M_1$;右边的可达图中存在 M'_1 ,使得 $M'_0 \xrightarrow{!a} M'_1$;
- 第 2 步,左边的可达图中,有 $M_1 \xrightarrow{\tau} M_2$,这里的 τ 可以是 τ 或者 $\tau\dots$ 或者 τ ;右边的可达图中存在 M'_1 ,使得 $M'_1 \xrightarrow{\tau} M'_1$;
- 第 3 步,左边的可达图中,有 $M_2 \xrightarrow{?b} M_3$;右边的可达图中存在 M'_2 ,使得 $M'_1 \xrightarrow{?b} M'_2$.

综上所述,可知 $M_0 S M'_0$.关系 $S = \{(M_0, M'_0), (M_1, M'_1), (M_2, M'_1), (M_3, M'_2)\}$.

再证明关系 S 的逆 $S^{-1} = \{(M'_0, M_0), (M'_1, M_1), (M'_1, M_2), (M'_2, M_3)\}$ 是弱模拟,即图 12(a)中粗箭头右边的可达图被粗箭头左边的可达图所弱模拟.

- 第 1 步,右边的可达图中,有 $M'_0 \xrightarrow{!a} M'_1$;左边的可达图中存在 M_1 ,使得 $M_0 \xrightarrow{!a} M_1$;
- 第 2 步,右边的可达图中 M'_1 保持不变;左边的可达图中存在 M_2 ,使得 $M_1 \xrightarrow{\tau} M_2$;
- 第 3 步,右边的可达图中,有 $M'_1 \xrightarrow{?b} M'_2$;左边的可达图中存在 M_3 ,使得 $M_2 \xrightarrow{?b} M_3$.

综上所述,可知 $M'_0 S^{-1} M_0$.由此证明了 $M_0 \approx M'_0$.

同理,我们也可以证明图 12(b)所示的两个可达图间满足弱模拟关系.

5.4 τ 删除规则4的正确性分析

图 9 所示 Petri 网的可达图如图 13 所示.



Fig.13 Reachability graph of the Petri net shown in Fig.9

图 13 图 9 所示 Petri 网对应的可达图

下面证明图 13 所示的两个可达图间满足弱互模拟.

先证明图 13 所示粗箭头左边的可达图被粗箭头右边的可达图所弱模拟.

- 第 1 步,左边的可达图中,有 $M_0 \xrightarrow{!a} M_1$;右边的可达图中存在 M'_1 ,使得 $M'_0 \xrightarrow{!a} M'_1$;
- 第 2 步,左边的可达图中:或者有 $M_1 \xrightarrow{\tau} M_2$,右边的可达图中存在 M'_2 ,使得 $M'_1 \xrightarrow{\tau} M'_2$;或者有 $M_1 \xrightarrow{!c} M_2$,而右边的可达图中存在 M'_2 ,使得 $M'_1 \xrightarrow{!c} M'_2$;
- 第 3 步,左边的可达图中,有 $M_2 \xrightarrow{?b} M_3$;右边的可达图中存在 M'_3 ,使得 $M'_2 \xrightarrow{?b} M'_3$;
- 第 4 步, M_3 和 M'_3 均为结束标识.

综上所述,可知 $M_0 S M'_0$.关系 $S = \{(M_0, M'_0), (M_1, M'_1), (M_2, M'_2), (M_3, M'_3)\}$.

再证明关系 S 的逆 $S^{-1} = \{(M'_0, M_0), (M'_1, M_1), (M'_2, M_2), (M'_3, M_3)\}$ 是弱模拟,即图 13(a)中粗箭头右边的可达图被粗箭头左边的可达图所弱模拟.

- 第 1 步,右边的可达图中,有 $M'_0 \xrightarrow{!a} M'_1$;左边的可达图中存在 M_1 ,使得 $M_0 \xrightarrow{!a} M_1$.
 - 第 2 步,右边的可达图中:或者要么有 $M'_1 \xrightarrow{\tau} M'_2$,左边的可达图中存在 M_2 ,使得 $M_1 \xrightarrow{\tau} M_2$;或者要么有 $M'_1 \xrightarrow{!c} M'_2$,左边的可达图中存在 M_2 ,使得 $M_1 \xrightarrow{!c} M_2$.
 - 第 3 步,右边的可达图中,有 $M'_2 \xrightarrow{?b} M'_3$;左边的可达图中存在 M_3 ,使得 $M_2 \xrightarrow{?b} M_3$.
- 综上所述,可知 $M'_0 S^{-1} M_0$.由此证明了 $M_0 \approx M'_0$.

6 工具与实验

6.1 工具设计与实现

图 14 是我们实现的工具 Chor2Peer 的结构,其中,PIPE v4.3.0 是一个图形化的 Petri 网建模和分析工具^[25]; IPN 表示使用交互式 Petri 网定义的编排;Projection 是映射模块,用以实现第 3 节提出的动作映射,对交互式 Petri 网中的变迁进行映射,得到带 τ 的交互式 Petri 网;TauDeletion 是 tau 删除模块,用以实现第 4 节提出的 τ 删除规则,对带 τ 的交互式 Petri 网中的 τ 进行有选择性地删除,得到参与者.图 15 是工具实现的界面截图.

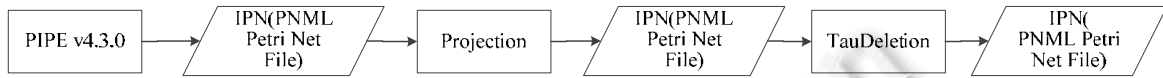


Fig.14 Architecture of Chor2Peer

图 14 Chor2Peer 的结构

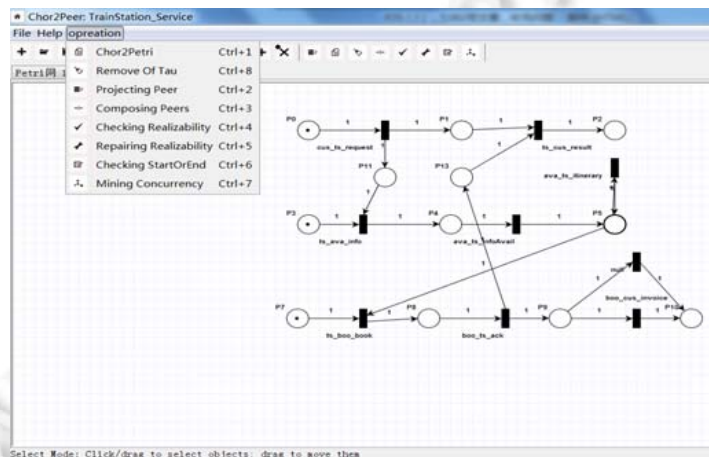


Fig.15 Screenshot of our implementation

图 15 工具实现的界面

6.2 对比实验

本文选取了 5 篇具有代表性的文献^[14-18],将本文所提出的映射方法与这些文献中所提出的映射方法做对比,具体实验结果见表 1、表 2.

表 1、表 2 的第 1 列为序号,其中,序号 1 对应的是文献[15],序号 2 对应的是文献[16],序号 3 对应的是文献[17],序号 4 对应的是文献[18],序号 5 对应的是文献[14].表 1 第 2 列是该文献定义的编排;第 3 列是该文献映射产生的参与者;第 4 列是根据第 2 列所示编排,使用交互式 Petri 网定义的编排.表 2 第 2 列是使用本文所提出的映射方法产生的使用交互式 Petri 网定义的参与者;表 2 第 3 列是该参与者对应的可达图.需要说明的是,在表 1 的第 1 列中,序号 1~序号 4 所对应的参与者使用自动机定义,有向箭头指向的圆圈表示开始状态,同心圆圈表示结束状态;序号 5 所对应的参与者使用标号迁移系统定义,有向箭头指向的圆圈表示开始状态,同心圆圈表示结束状态.通过对比表 1 第 3 列和表 2 第 3 列可知,现有文献将编排映射为参与者时,未考虑 τ 对行为的影响,将其全部删除,无法确保编排与参与者间的行为一致性.限于篇幅,这里不一一证明编排与参与者间不满足弱互模拟.本文所提出的方法则考虑了 τ 对行为的影响,有选择地删除 τ ,可确保编排与参与者间满足弱互模拟,保持行为一致性.

Table 1 Experimental evaluation 1

表 1 实验评估 1

编号	文献中定义的编排	文献中映射产生的参与者	交互式 Petri 网定义的编排
1			
2			
3			

Table 1 Experimental evaluation 1 (Continued)
表 1 实验评估 1(续)

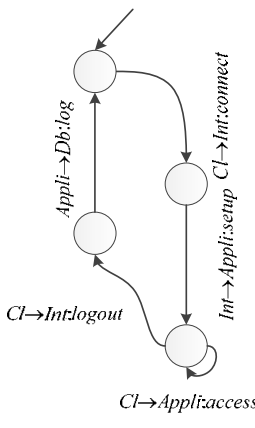
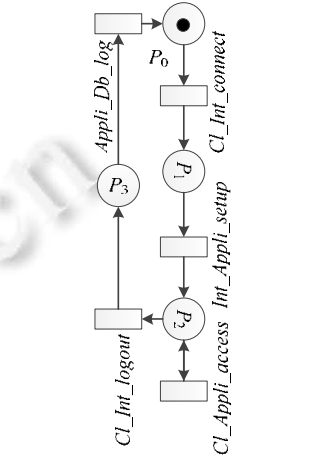
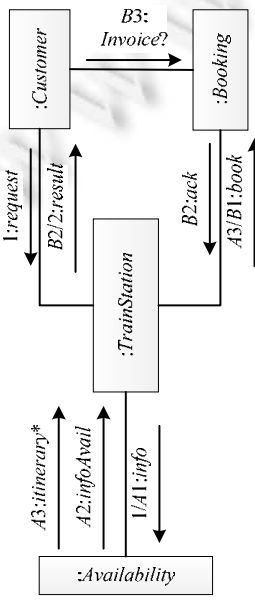
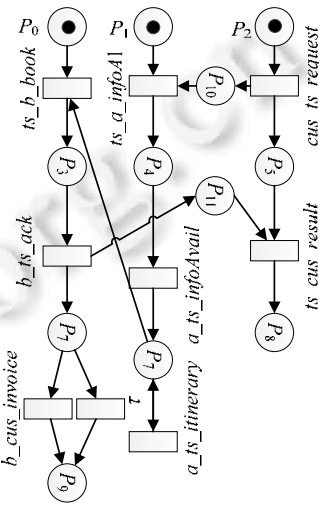
编号	文献中定义的编排	文献中映射产生的参与者	交互式 Petri 网定义的编排
4	 <p>Sequence diagram for example 4 showing interactions between Cl, Appli, Int, and Db. Cl sends !connect to Appli, which sends !log to Db. Cl sends !Intconnect to Int, which sends !setup to Appli. Cl sends !logout to Int. Cl sends !access to Appli.</p>	<p>Participants and their internal transitions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Cl: !connect, !logout, !access Appli: ?setup, !log, ?access Int: ?connect, ?logout, !setup Db: ?log 	 <p>Petri net for example 4 with places P_0, P_3 and transitions: Appli_Db_log, Cl_Int_connect, Cl_Int_logout, Int_Appli_setup, Int_Appli_access, Db.</p>
5	 <p>Sequence diagram for example 5 involving Customer, Booking, TrainStation, Availability, and Train station. Customer sends !request to TrainStation, which sends B2:ack to Booking. Booking sends B3: Invoice? to Customer. TrainStation sends A3:itinerary* to Availability, which sends A2:infoAvail to TrainStation. TrainStation sends !/A1:info to Availability. Booking sends A3/B1:book to TrainStation, which sends B2:ack to Booking. TrainStation sends !invoice to Booking. Train station sends ?request to Availability, which sends !info to Train station. Train station sends ?result to Availability, which sends !ack to Train station. Train station sends ?book to Availability, which sends ?infoAvail to Train station.</p>	<p>Participants and their internal transitions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Customer: !request, ?result, ?invoice Availability: ?info, !infoAvail, !itinerary Booking: ?book, B!ack, !invoice Train station: ?request, !info, ?result, !ack, ?book, ?infoAvail 	 <p>Complex Petri net for example 5 with places $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_{10}, P_{11}$ and transitions: ts_b_book, ts_a_infoA1, b_ts_ack, b_cus_invoice, a_ts_itinerary, a_ts_infoAvail, ts_cus_request, ts_cus_result.</p>

Table 2 Experimental evaluation 2

表 2 实验评估 2

编号	交互式 Petri 网定义的参与者	交互式 Petri 网对应的可达图
1	<p><i>P</i></p>	<p><i>P</i> 的可达图</p> <p>$M_0=\{P_0\}, M_1=\{P_2\}, M_2=\{P_1\},$ $M_3=\{P_4\}, M_4=\{P_3\}, M_5=\{P_5\}$</p>
	<p><i>Q</i></p>	<p><i>Q</i> 的可达图</p> <p>$M_0=\{P_0\}, M_1=\{P_2\}, M_2=\{P_1\}, M_3=\{P_4\},$ $M_4=\{P_3\}, M_5=\{P_3\}, M_6=\{P_6\}$</p>
	<p><i>R</i></p>	<p><i>R</i> 的可达图</p> <p>$M_0=\{P_0\}, M_1=\{P_1\}, M_2=\{P_2\}$</p>
2	<p><i>Customer</i></p>	<p><i>Customer</i> 的可达图</p> <p>$M_0=\{P_0\}, M_1=\{P_1\}, M_2=\{P_3\},$ $M_3=\{P_2\}, M_4=\{P_4\}$</p>
	<p><i>Vender</i></p>	<p><i>Vender</i> 的可达图</p> <p>$M_0=\{P_0\}, M_1=\{P_1\}, M_2=\{P_2\},$ $M_3=\{P_3\}, M_4=\{P_4\}, M_5=\{P_5\}$</p>
	<p><i>Warehouse</i></p>	<p><i>Warehouse</i> 的可达图</p> <p>$M_0=\{P_0\}, M_1=\{P_1\}, M_2=\{P_2\}$</p>
3	<p><i>A</i></p>	<p><i>A</i> 的可达图</p> <p>$M_0=\{P_0\}, M_1=\{P_2\}, M_2=\{P_1\}, M_3=\{P_3\}$</p>
	<p><i>B</i></p>	<p><i>B</i> 的可达图</p> <p>$M_0=\{P_0\}, M_1=\{P_3\}, M_2=\{P_1\},$ $M_3=\{P_2\}, M_4=\{P_4\}$</p>
	<p><i>C</i></p>	<p><i>C</i> 的可达图</p> <p>$M_0=\{P_0\}, M_1=\{P_3\}, M_2=\{P_1\}, M_3=\{P_2\}$</p>

Table 2 Experimental evaluation 2 (Continued)

表 2 实验评估 2(续)

编号	交互式 Petri 网定义的参与者	交互式 Petri 网对应的可达图
4	<p><i>Cl</i></p>	<p><i>Cl</i> 的可达图</p>
	<p><i>Appli</i></p>	<p><i>Appli</i> 的可达图</p>
	<p><i>Int</i></p>	<p><i>Int</i> 的可达图</p>
	<p><i>Db</i></p>	<p><i>Db</i> 的可达图</p>
5	<p><i>Customer</i></p>	<p><i>Customer</i> 的可达图</p>
	<p><i>Availability</i></p>	<p><i>Availability</i> 的可达图</p>
	<p><i>Booking</i></p>	<p><i>Booking</i> 的可达图</p>
	<p><i>Train station</i></p>	<p><i>Train station</i> 的可达图</p>

表 1、表 2 中使用本文所提出的映射方法得到的参与者,表 3 记录了使用 Chor2Peer 工具生成每个参与者对应的库所数量、变迁数量、 τ 变迁数量、弧关系数量及映射时间.值得注意的是:

- (1) 映射时间主要由 3 部分组成:判断 Petri 网中的结构特征并选择删除规则、删除 τ 变迁重构 Petri 网及遍历 Petri 网.
- (2) 参与者具有的库所、变迁、 τ 变迁及弧的数量越多,这意味着编排到参与者映射过程中 τ 变迁删除操作越少,因而映射时间就越短.
- (3) 表 3 中序号 1 对应的参与者 P 和 R ,虽然 P 拥有的库所、变迁、 τ 变迁及弧的数量比 R 的多,但 P 的映射过程中遍历 Petri 网 2 次,而 R 只遍历 Petri 网 1 次,因此 P 的映射时间比 R 的长.
- (4) 表 3 中序号 3 对应的参与者 A 和 C ,虽然 C 拥有的库所、变迁、 τ 变迁及弧的数量比 A 的多,但 C 的映射过程中判断 Petri 网结构特征并选择删除规则的时间比 A 多,因此 C 的映射时间比 A 的长.

Table 3 Experimental results

表 3 实验结果

文献	参与者	库所	变迁	τ 变迁	弧	映射时间(ms)
序号 1 对应的文献[15]	P	6	6	2	12	343
	Q	7	7	2	14	312
	R	3	3	2	6	322
序号 2 对应的文献[16]	<i>Customer</i>	5	5	2	10	327
	<i>Vender</i>	6	6	0	12	296
	<i>Warehouse</i>	3	3	0	6	312
序号 3 对应的文献[17]	A	4	3	0	6	265
	B	5	4	1	8	249
	C	4	3	1	6	281
序号 4 对应的文献[18]	Cl	2	3	0	6	250
	<i>Appli</i>	3	4	1	8	290
	<i>Int</i>	3	3	0	6	281
	<i>Db</i>	1	1	0	2	297
序号 5 对应的文献[14]	<i>Customer</i>	6	3	1	11	421
	<i>TrainStation</i>	11	7	0	19	359
	<i>Availability</i>	6	3	1	10	390
	<i>Booking</i>	5	3	1	9	411

7 相关工作

按形式化基础,现有文献^[1,3,6,7,14-20]主要以自动机或进程代数作为底层基础,讨论编排到参与者的映射.

以自动机作为形式化基础方面,文献[7]针对自动机定义的会话协议,最早提出了会话协议可实现需满足的 3 个充分条件:无损连接(lossless join)、同步兼容(synchronous compatible)、自治性(autonomous).文献[15]讨论了不同类型的协作图,即协作图(collaboration diagram)、协作图集(collaboration diagram set)和协作图图(collaboration diagram graph)的可实现性问题,并说明了这 3 种协作图的可实现性问题均可规约为会话协议的可实现性问题.文献[16]讨论了 3 种不同的可视化形式主义,即协作图、消息序列图(message sequence charts)及会话协议建模交互的异同,并详细论述了可实现性和同步性(synchronizability).文献[3]针对协作图,最早提出了协作图可实现需满足的充分条件:该协作图是分离的(seperated),且每个事件是好通知的(well-informed).与会话协议相比,协作图无法描述除单消息循环外的其他消息循环.文献[1]研发了一个工具:(1) 用于检测协作图定义的交互的可实现性;(2) 用于验证协作图定义的交互的 LTL 性质;(3) 用于从协作图中合成参与者(peer).文献[17]针对一类任意发起人的会话协议(arbitrary-initiator protocol),即存在一个状态多个参与者可以发送消息,由于文献[7]提出的充分条件用于分析该类会话协议的可实现性时会产生假阳性(false positive),提出了一种新颖的算法,用于判断该类会话协议的可实现性.文献[17]针对在异步通信模型下会话协议的可实现性不可判定的不足,通过同步性性质(synchronizability property),提出了一个充分必要条件,用于检验会话协议的可实现性.文献[18]针对不可实现的会话协议,提出了一种方法,通过监视器(monitor)和迭代增加的同步消息来强迫系统满足会话协议,从而使得该会话协议成为可实现的.但是,文献[1,3,7,16-19]将协作图或会话协议定义的编排映射

为基于有限状态机定义的参与者时,均使用 ε -move 操作将映射产生的 τ 全部删除,未考虑 τ 对行为的影响,无法确保编排与参与者间的行为一致性.

在以进程代数作为形式化基础方面,文献[18]针对 BPMN 2.0 编排(BPMN 2.0 choreographies),提出了一种检测 BPMN 2.0 编排可实现性的方法.该方法将 BPMN 2.0 编排编码为使用 LOTOS NT 定义的进程表达式,并在工具的支持下,使用等价性检测技术实现了对 BPMN 2.0 编排可实现性的自动检测.文献[14]针对协作图提出了一种检测协作图可实现性的方法.该方法将协作图编排编码为使用 LOTOS NT 定义的进程表达式,并在工具的支持下,使用等价性检测技术实现了对协作图可实现性的自动检测.但是,文献[14,20]在将 BPMN 2.0 或协作图定义的编排映射为基于标号迁移系统定义的参与者时,也使用“ ε -move”操作将映射产生的 τ 全部删除,未考虑 τ 对行为的影响,无法确保编排与参与者间的行为一致性.

在现有文献中,只有文献[6]以 Petri 网作为形式化基础,讨论编排到参与者的映射.文献[6]将 Petri 网扩展为交互 Petri 网,用于建模编排,并提出了映射方法,将交互式 Petri 网定义的编排映射为交互式 Petri 网定义的参与者.但是该文献也未考虑 τ 对行为的影响,无法确保编排与参与者间的行为一致性.以图 1(a)所示的编排为例,使用文献[6]所提出的映射方法得到的参与者 Customer 也如图 1(c)所示.该映射方法将使用文献[6]提出的两种约简规则(reduction rules)把映射产生的 τ 全部删除.

8 结束语

本文以 Petri 网作为形式化基础,提出了一种能够确保编排与参与者间行为一致的映射方法.首先,该方法通过动作映射,将交互式 Petri 网定义的编排映射为带 τ 的交互式 Petri 网;其次,提出了 4 条 τ 删除规则,用于有选择地删除带 τ 的交互式 Petri 网中的 τ ,得到参与者;然后,从弱互模拟的角度证明了上述 4 条 τ 删除规则的正确性,即可确保编排与参与者间的行为一致性;最后,通过实验验证了该方法的有效性.

本文的不足在于:4 条 τ 删除规则基于交互式 Petri 网的结构特征定义.若一个交互式 Petri 网具有可以删除的 τ ,但不满足上述 4 条规则对应的结构特征,那么本文所提出的映射方法将无法将其删除.因此,下一步的工作重点是提出交互式 Petri 网的化简规则,并证明这些化简规则针对这些结构特征而言是完备的.

References:

- [1] Bultan T, Ferguson C, Fu X. A tool for choreography analysis using collaboration diagrams. In: Proc. of the 7th Int'l Conf. on Web Services. 2009. 856–863. [doi: 10.1109/ICWS.2009.100]
- [2] OMG. Business process model and notation (BPMN) Version 2.0. 2011. <http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/>
- [3] Bultan T, Fu X. Specification of realizable service conversations using collaboration diagrams. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Service-Oriented Computing and Applications. 2007. 27–39. [doi: 10.1109/SOCA.2007.41]
- [4] W3C. Web service choreography description language (WS-CDL). 2005. <http://www.w3.org/TR/ws-cdl-10/>
- [5] Zaha JM, Barros A, Dumas M, Hofstede AT. Let's dance: A language for service behavior modeling. In: Proc. of the 14th Int'l Conf. on Cooperative Information Systems. 2006. 145–162. [doi: 10.1007/11914853_10]
- [6] Decker G, Weske M. Local enforceability in interaction Petri nets. In: Proc. of the Int'l Conf on Business Process Management. Springer-Verlag, 2007. 305–319. [doi: 10.1007/978-3-540-75183-0_22]
- [7] Fu X, Bultan T, Su J. Conversation protocols: A formalism for specification and verification of reactive electronic services. Theoretical Computer Science, 2004,328(1):19–37. [doi: 10.1016/j.tcs.2004.07.004]
- [8] Decker G, Kopp O, Leymann F. Modeling service choreographies using BPMN and BPEL4Chor. In: Proc. of the 20th Int'l Conf. on Advanced Information Systems Engineering. 2008. 79–93. [doi: 10.1007/978-3-540-69534-9_6]
- [9] Kopp O, Leymann F, Wagner S. Modeling choreographies: BPMN 2.0 versus BPEL-based approaches. In: Proc. of the Int'l Workshop on Enterprise Modelling and Information Systems Architectures. 2011. 225–230.
- [10] Alur R, Etessami K, Yannakakis M. Inference of message sequence charts. IEEE Trans. on Software Engineering, 2003,29(7): 623–633. [doi: 10.1109/TSE.2003.1214326]
- [11] Decker G, Weske M. Interaction centric modeling of process choreographies. Information Systems, 2011,36(2):292–312. [doi: 10.1016/j.is.2010.06.005]

- [12] Kopp O, Engler L, van Lessen T, Leymann F, Nitzsche J. Interaction choreography models in BPEL: Choreographies on the enterprise service bus. *Communications in Computer & Information Science*, 2011, 138:36–53. [doi: 10.1007/978-3-642-23135-3_3]
- [13] Roohi N, Salaün G, France V. Realizability and dynamic reconfiguration of chor specifications. *Informatica: An Int'l Journal of Computing and Informatics*, 2011,35(1):39–49.
- [14] Salaün G, Bultan T, Roohi N. Realizability of choreographies using process algebra encodings. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2012,5(3):290–302. [doi: 10.1109/TSC.2011.9]
- [15] Bultan T, Fu X. Realizability of interactions in collaboration diagrams. Technical Report, 2006-11, Santa Barbara: Computer Science Department, University of California, 2006.
- [16] Bultan T. Modeling interactions of Web software. In: *Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Automated Specification and Verification of Web Systems (WWV 2006)*. IEEE, 2006. 45–52. [doi: 10.1109/WWV.2006.10]
- [17] Hallé S, Bultan T. Realizability analysis for message-based interactions using shared-state projections. In: *Proc. of the 18th ACM SIGSOFT Int'l Symp. on Foundations of Software Engineering*. ACM, 2010. 27–36.
- [18] Gudemann M, Salaün G, Ouederni M. Counterexample Guided Synthesis of Monitors for Realizability Enforcement. *Automated Technology for Verification and Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 238–253. [doi: 10.1007/978-3-642-33386-6_20]
- [19] Basu S, Bultan T, Ouederni M. Deciding choreography realizability. *ACM Sigplan Notices*, 2012,47(1):191–202. [doi: 10.1145/2103621.2103680]
- [20] Poizat P, Salaün GN. Checking the realizability of BPMN 2.0 choreographies. In: *Proc. of the ACM Symp. on Applied Computing*. ACM Press, 2011. 1927–1934. [doi: 10.1145/2245276.2232095]
- [21] Petri CA. *Kommunikation mit automaten* [Ph.D. Thesis]. Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM 2, 1962.
- [22] Yuan CY. *The Principle and Application of Petri Nets*. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2005 (in Chinese).
- [23] Wu ZH. *Introduction to Petri network*. Beijing: Machinery Industry Press, 2006 (in Chinese).
- [24] Milner R. *Communicating and Mobile Systems—The π -calculus*. New York: Cambridge University Press, 1999.
- [25] Dingle NJ, Knottenbelt WJ, Suto T. PIPE2: A tool for the performance evaluation of generalised stochastic Petri Nets. *ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review*, 2009,36(4):34–39.

附中文参考文献:

- [22] 袁崇义.Petri 网原理与应用.北京:电子工业出版社,2005.
- [23] 吴哲辉.Petri 网导论.北京:机械工业出版社,2006.



代飞(1982—),男,四川乐山人,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为软件工程,业务过程管理.



王伟(1979—),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为软件工程,软件演化.



陈凤强(1992—),男,硕士,主要研究领域为业务过程管理.



李彤(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为软件工程.



莫启(1986—),男,博士,讲师,主要研究领域为业务过程管理.



梁志宏(1969—),男,博士,研究员,主要研究领域为软件工程.