

基于三维行为关系图的模型一致性检测方法

赵培海 王咪咪

(同济大学计算机科学与技术系 上海 201804)

(同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室 上海 200092)

摘要 在业务流程模型的相似性分析过程中,有时会出现环结构。已有的方法一般不考虑环结构,忽略了环结构对模型一致性分析的影响。以 Petri 网的多重变迁集为基础,提出一种新的一致性度测量方法。首先通过分析 5 种行为序列关系来刻画 Petri 网的变迁之间的相互关系,给出了三维行为关系图的概念;然后对 Petri 网的三维行为关系图间的关系进行研究,提出了基于 Petri 网的三维行为关系图的一致性检测方法。理论分析和实例测试均表明了该方法的有效性。

关键词 Petri 网,一致性测量,三维行为关系图,环,多重变迁集

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.06.027

Consistency Detction Method of Models Based on Three-dimensional Behavior Relation Graph

ZHAO Pei-hai WANG Mi-mi

(Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China)

(The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract In the similarity analysis process of business process models, sometimes there may be loop structure in the business process model. Existing methods do not consider the loop structure, and ignore the influence of loop on consistency. A behavior consistency measure method was proposed based on transition multi-sets of Petri nets. Firstly, this paper analyzed five kinds of behavior relations of transitions, and proposed a three-dimensional behavior relation graph based on Petri net branching processes to compare the behavior relations between two models. Secondly, by analyzing the relations between two three-dimensional behavior relation graphs, this paper proposed a consistency measure method based on three-dimensional behavior relation graphs. The theoretical analysis and specific examples show that the method is very effective.

Keywords Petri net, Consistency measure, Three-dimensional behavior relation graph, Loop, Transition multi-set

1 引言

随着计算机技术的飞速发展,网上支付平台的应用越来越广泛,对用户支付过程中的行为一致性检测技术的要求也越来越严格。系统设计师和建模者由于对相同现象持有不同观点,因此建立了不同的模型。

模型的一致性主要是指模型匹配基础上的元素的一致性。对流程模型进行一致性分析吸引了国内外越来越多的研究者的关注。在管理业务流程时,模型一致性分析方法^[2-4]是一个基本的操作过程^[5]。在此阶段,分析师需要比较模型的一致性并准确理解多个模型之间的差异,从而更好地完成协作,因此检测两个模型之间的一致性尤为重要。

Petri 网^[1]是一种数学工具,适用于许多并发系统。它可

以对一些业务流程、生产系统等进行建模。同时, Petri 网适用于描述异步的、并发的系统等。本文以 Petri 网为工具来研究两个模型的行为一致性。

现有的行为一致性分析方法包含:任务标签、结构和行为^[6]。只考虑任务标签或结构,不符合复杂和多变的应用程序的需求,因此行为分析具有重要的理论意义和实用价值。文献[7]使用期望来测量模型的一致性,但没有涉及一致性度。文献[8]分析了基于进程片段的行行为一致性问题,该方法适用于两个活的有界网,但计算量较大。文献[9]提出了基于行为匹配的行为模式和偏差检测方法,但并未提及度量问题。文献[10]提出一种方法来计算模型的协议互模拟。文献[11]使用一个 $n \times n$ 的矩阵代表二元关系集,给出了一个 4C 光谱的概念,并分析了两个变迁之间的行为关系,同时通过比较两

到稿日期:2018-01-06 返修日期:2018-04-20 本文受国家自然科学基金项目(61572035,61272153)资助。

赵培海(1989-),男,博士,CCF 会员,主要研究方向为软件行为分析、可信服务、Petri 网、数据挖掘;王咪咪(1985-),女,博士生,CCF 会员,主要研究方向为 Petri 网、可信软件、模型检测、电子商务行为安全, E-mail: wangmimi2013@hotmail.com(通信作者)。

个矩阵来计算一致性度,但其并未解决环问题。文献[12]提出一种诊断行为不一致的方法,其通过事件的并发来判定等价关系,未涉及一致性度的概念。文献[13-16]提出了一种检测模型一致性的方法,通过研究两个模型间的 3 种行为序列关系,给出了计算两个模型间一致性度的方法,但其仅仅考虑模型行为间 3 种关系的一致性度,对模型一致性的检测不够精确,且并未涉及含有环结构的模型。

综上所述,现有的业务流程模型的一致性测量方法大多没有考虑环结构。

为了研究带有环结构的 Petri 网模型之间的行为一致性,需要对环结构中变迁之间的行为关系进行具体分析,考虑环结构对其行为关系的影响。首先,对含有环结构的 Petri 网内部的行为关系进行区分;在此基础上,研究基于 Petri 网的三维行为关系图的一致性测量方法。本文基于 Petri 网的三维行为关系图来研究行为一致性问题,提出了三维行为关系图的概念,并基于此给出了含有环结构的网的一致性度测量方法。

本文第 2 节给出一个动机例子;第 3 节详述基于三维行为关系图的一致性测量方法;最后总结全文。

2 动机例子

首先,给出文献[14]中行为轮廓的相关概念。

定义 1(弱序)^[14] 令 (N, M_0) 为一个网系统,其中 $N = (P, T; F)$ 且 $T' \subseteq T$ 是一个变迁集。一对变迁 $(x, y) \in (T' \times T')$ 是 T' 上的弱序关系,当且仅当存在一个发射序列 $\sigma = \langle t_1, t_2, \dots, t_n \rangle$, 其中 $(N, M_0) [\sigma >$ 并且 $j, k \in N, 1 \leq j < k \leq n$, 使得 $t_j = x, t_k = y$, 记为 $x > y$ 。

定义 2(行为轮廓)^[14] 令 (N, M_0) 是一个网系统,其中 $N = (P, T; F)$ 且 $T' \subseteq T$ 是一个变迁集。一对变迁 $(x, y) \in (T' \times T')$ 可满足下列一种关系:

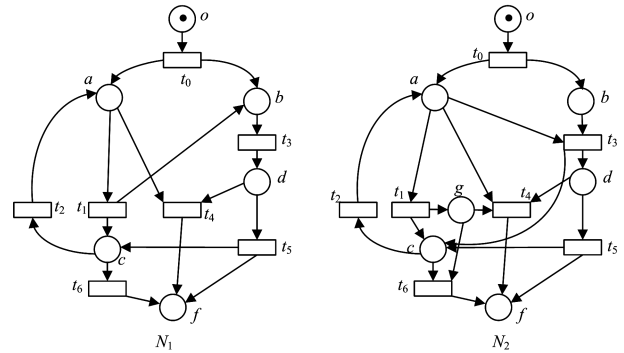
- 1) 严格序关系 \rightarrow , 即当且仅当 $x > y, y \not> x$;
- 2) 排他性关系 $+$, 即当且仅当 $x \not> y, y \not> x$;
- 3) 交叉序关系 \parallel , 即当且仅当 $x > y, y > x$ 。

$B = \{\rightarrow, +, \parallel\}$ 是在 T' 上的行为轮廓。

由定义 1 和定义 2 可知,图 1 中的两个网中都有 $t_0 \xrightarrow{\sim} t_i$ ($i=1, 2, \dots, 6$), $t_1 \parallel t_j$ ($j=2, 3, 5$); $t_1 \xrightarrow{\sim} t_k$ ($k=4, 6$), $t_2 \parallel t_l$ ($l=1, 3, 5$), $t_2 \xrightarrow{\sim} t_m$ ($m=4, 6$), $t_3 \parallel t_n$ ($n=1, 2, 5$), $t_3 \xrightarrow{\sim} t_s$ ($s=4, 6$), $t_4 \xrightarrow{\sim}^{-1} t_p$ ($p=1, 2, 4, 5$), $t_4 + t_6, t_5 \parallel t_q$ ($q=1, 2, 3$), $t_5 \xrightarrow{\sim} t_4$, $t_5 \xrightarrow{\sim} t_6, t_6 \xrightarrow{\sim}^{-1} t_u$ ($u=1, 2, 3, 4, 5$)。

由文献[14]的方法可知,这两个网是完全一致的。但实际上,其中一个网是弱活的,一个是活的,即这两个网是不完全一致的。究其原因,是图 1 中的环结构导致了这样的结果,即用两个模型的行为轮廓来计算一致性度已经无法从行为发生角度动态地对两个网模型进行区分。事实上,针对两个含有环结构的模型的一致性测量问题,文献[14]的方法已不能满足需求。因为它是以 3 种行为弱序关系为基础来定义变迁间的行为发生关系,即同一个行为发生序列无论是在环结构

或不在环结构中,又或者在不同的环结构中,其定义都没有区别,因此其不能区分含有环结构的网模型。



(a) 用户预期模型 (b) 电子交易用户实时模型

图 1 动机例子图

Fig. 1 Motives examples

鉴于此,文中提出一种针对含有环结构的模型一致性度测量方法。

3 基于三维行为关系图的一致性测量方法

3.1 行为关系

本节主要介绍与本文相关的一些概念和定义。Petri 网及分支进程 unfolding(BPU) 方面的相关定义可参考文献[17-18]。

定义 3(影子变迁) 令 $(N, [i])$ 是一个 Petri 网,它的变迁集为 T , 那么它的分支进程 unfolding(BPU) 中的重复变迁是影子变迁。

如果 BPU 中的 t_1 和 t_2 是影子变迁,则可以说 t_1 是 t_2 的影子变迁,或 t_2 是 t_1 的影子变迁。包含所有影子变迁的变迁集合 L 为影子变迁集。

定义 4(多重变迁集) 设 $(N, [i])$ 是一个 Petri 网,它的变迁集为 T , 它的分支进程 unfolding 为 BPU, 那么集合 $T \cap L$ 是 T 的多重变迁集。

定义 5(行为序列关系) 令 $S = (N, [i])$ 是一个网系统,其中 $N = (P, L; F)$, 一对变迁 $(x, y) \in (L' \times L')$ 可满足下列一种关系:

1) 选择关系 \diamond , 即当且仅当不存在任何一条发生序列 σ , 使得 $(N, M_0) [\sigma >, xy \in \sigma$ 或 $yx \in \sigma$ 。

2) 顺序关系 Δ , 即当且仅当存在一条发生序列 σ_1 , 使得 $(N, M_0) [\sigma_1 >, t_j = x, t_k = y$; 且不存在任何一条发生序列 $\sigma_2 = t_i, \dots, t_m$ ($i \in l, \dots, m-l, l < f \leq m$), 使得 $t_i = y, t_f = x$ 。

3) 并发关系 $\#$, 即当且仅当仅存在一条发生序列 $\sigma_1 = t_1, t_2, \dots, t_n$, 使得:

- ① $(N, M_0) [\sigma_1 >, t_j = x, t_k = y$;
- ② $t_i = y, t_f = x$ ($j, k \in \{l, \dots, n-l\}, l < f, k \leq n$)。

4) 类并发关系 \natural , 即当且仅当存在一条发生序列 $\sigma_1 = t_1, t_2, \dots, t_n$, 使得:

- ① $(N, M_0) [\sigma_1 >, t_j = x, t_k = y$;
- ② 存在另一条发生序列 $\sigma_2 = t_i, \dots, t_m$ ($i \in l, \dots, m-l, l < f \leq m$), 使得 $t_i = y, t_f = x$ 。

5)逆顺序关系 ∇ ,即当且仅当存在一条发生序列 $\sigma_1 = t_1, t_2, \dots, t_n$,使得:

$$\textcircled{1} (N, M_0) [\sigma_1 >, t_j = y, t_k = x;$$

$\textcircled{2}$ 不存在另一条发生序列 $\sigma_2 = t_i, \dots, t_m (i \in L, \dots, m - l, l < f \leq m)$,使得 $t_i = x, t_f = y$ 。

3.2 三维行为关系图 (TDBRG)

下面引入三维行为关系图的方法来计算一致性。

定义 6(三维行为关系图) 令 $(N, [i])$ 是一个 Petri 网,其多重变迁集 $L = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$,那么它的三维行为关系图 (TDBRG)定义为:

$$M = [a_1, \dots, a_n; a_1, \dots, a_n; a_{ij} = (s_0, s_1, s_2, s_3, s_4 | s_i = \{0, 1\})], i = 0, 1, 2, 3, 4$$

其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} s_j = 0, & \text{如果 } a_i \text{ 和 } a_j \text{ 属于行为关系序列} \\ s_j = 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$t = 0, 1, 2, 3, 4; i, j = 1, 2, \dots, n$$

事实上, TDBRG 中的点集为 $V = \{v_1, \dots, v_n\}$,向量集为 $E = \{e_1, \dots, e_s\}$ 。TDBRG 中的点可以表示为 $(x_i, y_j, z_t) (t = 0, 1, 2, 3, 4; i, j = 1, 2, \dots, n)$, x 轴和 y 轴代表变迁, z 轴代表类行为序列关系。TDBRG 中的点 (x_i, y_j, z_t) 代表变迁 x_i 和 y_j 属于行为序列 z_t 。向量 e_i 连接着两个点,且代表了这两个点的关系。很容易得到: $|V| + |E| = |T \times T|$ 。算法 1 给出了 TDBRG 的构建过程。

算法 1 TDBRG 构建算法

输入: $S_1 = (N_1, M_1), BPU_1, L_1 = \{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n}\}$, 5 种行为关系 SR, OR, CR, SCR, IOR

输出: TDBRG

1. $BRG_V = \emptyset, BRG_E = \emptyset;$
2. $oneR = \{SR, OR, CR, SCR, IOR\};$
3. $twoR = \{\{SR, OR\}, \{SR, CR\}, \{SR, SCR\}, \{SR, IOR\}, \{OR, CR\}, \{OR, SCR\}, \{OR, IOR\}, \{CR, SCR\}, \{CR, IOR\}, \{SCR, IOR\}\};$
4. For 每个 $t_{1i} \in L_1$ 在 x 轴 do
5. For 每个 $t_{1j} \in L_1$ 在 y 轴 do
6. If (t_{1i}, t_{1j}) 存在一个序列关系 $k \in oneR$ then
7. $v_{ij} = (t_{1i}, t_{1j}, k);$
8. $BRG_V = BRG_V \cup v_{ij};$
9. endif
10. If (t_{1i}, t_{1j}) 存在两个序列关系 $u \in twoR$ then
11. $v_{ij1} = (t_{1i}, t_{1j}, u_1), v_{ij2} = (t_{1i}, t_{1j}, u_2);$
12. If u_1 先于 u_2 then
13. $e_{ij} = v_{ij1} \rightarrow v_{ij2};$
14. Else
15. $e_{ij} = v_{ij2} \rightarrow v_{ij1};$
16. endif
17. $BRG_E = BRG_E \cup e_{ij};$
18. endif
19. $TDBRG = TDBRG \cup \{BRG_V \cup BRG_E\};$
20. end For
21. end For
22. Return TDBRG

由于含有环结构的网的 BPU 中存在重名变迁,因此在网

中的两个变迁可能存在不止一种行为关系,如图 2 所示。图 2(a)是一个含有环结构的网,图 2(b)是其 BPU,可以看出其 BPU 中存在重名变迁 t_0 和 t_2 。根据算法 1 可得到图 2 的 BPU 的三维行为关系图,如图 3 所示。

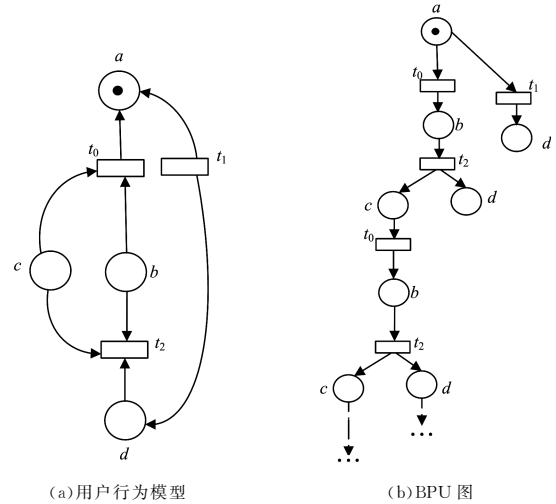


图 2 用户行为模型及其 BPU 图
Fig. 2 User behavior model and its BPU

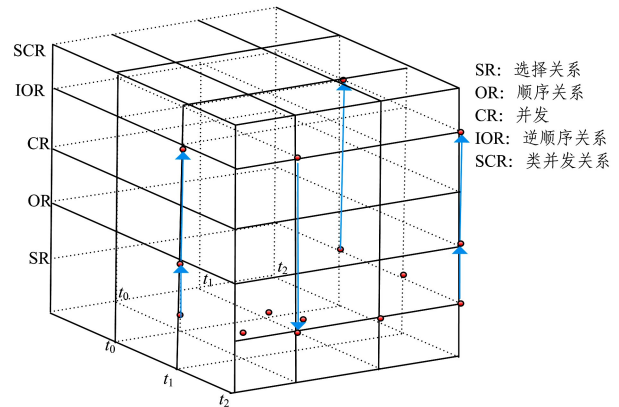


图 3 图 2 中 BPU 的三维行为关系图
Fig. 3 Three-dimensional behavior relation graph of BPU in Fig. 2

3.3 基于三维行为关系图的一致性度

本文在三维行为关系图的基础上研究行为一致性度。

定义 7(一致的点) 令 $S = (N, M)$ 和 $S' = (N', M')$ 是两个网系统,它们的分支进程展开后分别为 BPU_1 和 BPU_2 。 $TDBRG_1 = (V_1, E_1)$ 和 $TDBRG_2 = (V_2, E_2)$ 分别是它们的三维行为关系图,且其点集分别为 $V_1 = \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}\}$ 和 $V_2 = \{v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2m}\}$,向量集分别为 $E_1 = \{e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1s}\}$ 和 $E_2 = \{e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2t}\}$ 。对于任意两个图中的一一对应点 (v_{1s}, v_{2s}) (其中 $v_{1s} = (x_{1i}, y_{1j}, z_{1t}), v_{2s} = (x_{2i}, y_{2j}, z_{2t})$ 且 $v_{1s} \in V_1, v_{2s} \in V_2$),它们是一致的,当且仅当 $z_{1t} = z_{2t}$ 。

这些 V_1 中的向量与 V_2 中一致的向量构成一个集合,记为 CV_1^- 。类似地,有 CV_2^- 。

定义 8(一致的向量) 令 $S = (N, M)$ 和 $S' = (N', M')$ 是两个网系统,它们的分支进程展开后分别为 BPU_1 和 BPU_2 。 $TDBRG_1 = (V_1, E_1)$ 和 $TDBRG_2 = (V_2, E_2)$ 分别是它们的三维行为关系图,且其点集分别为 $V_1 = \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}\}$ 和 $V_2 =$

$\{v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2m}\}$, 向量集分别为 $E_1 = \{e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1s}\}$ 和 $E_2 = \{e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2t}\}$ 。对于任意两个图中的一一对应向量 (e_{1s}, e_{2s}) (其中 $e_{1s} = v_{1i} \rightarrow v_{1j}, e_{2s} = v_{2i} \rightarrow v_{2j}$ 且 $v_{1s} \in V_1, v_{2s} \in V_2$) , 它们是一致的, 当且仅当 $e_{1s} = e_{2s}$ 。

这些 E_1 中的向量与 E_2 中一致的向量构成一个集合, 记为 CE_1^- 。类似地, 有 CE_2^- 。

定义 9 (基于 TDBRG 的一致性度) 令 $S = (N, M)$ 和 $S' = (N', M')$ 为两个网系统, 它们的分支进程展开后分别为 BPU_1 和 BPU_2 。 $TDBRG_1 = (V_1, E_1)$ 和 $TDBRG_2 = (V_2, E_2)$ 分别是它们的三维行为关系图, 且其点集分别为 $V_1 = \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}\}$ 和 $V_2 = \{v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2m}\}$, 向量集分别为 $E_1 = \{e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1s}\}$ 和 $E_2 = \{e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2t}\}$; 一致的点集分别为 CV_1^- 和 CV_2^- , 一致的向量集分别为 CE_1^- 和 CE_2^- 。则基于 TDBRG 的一致性度为:

$$D_p = \frac{|CV_1^-| + |CV_2^-| + |CE_1^-| + |CE_2^-|}{|T_1^- \times T_1^-| + |T_2^- \times T_2^-|} \quad (2)$$

算法 2 给出了基于 TDBRG 的一致性度 D_p 的计算算法。

算法 2 基于 TDBRG 的一致性度 D_p 计算算法

输入: TDBRG₁, TDBRG₂, 对应的变迁集合 T_1^- 和 T_2^-
输出: D_p

```

1.  $V_1, E_1 \in TDBRG_1 \& V_2, E_2 \in TDBRG_2$ ;
2.  $V_{t1} = V_1, E_{t1} = E_1, V_{t2} = V_2, E_{t2} = E_2; CV_1^- = CV_2^- = \emptyset, CE_1^- = CE_2^- = \emptyset$ ;
3. For 每个  $v_{1i} \in V_1$  do
4.   For 每个  $v_{2j} \in V_2$  do
5.     If  $v_{1i}, v_{2j}$  不满足对应关系 then
6.        $V_{t1} = V_{t1} \setminus \{v_{1i}\}$ ;
7.        $V_{t2} = V_{t2} \setminus \{v_{2j}\}$ ;
8.     EndIf
9.     If  $v_{1i}, v_{2j}$  满足一致的对应关系 then
10.       $CV_1^- = V_{t1}; V_{t2} = V_{t2}$ ;
11.    Else
12.       $CV_1^- = V_{t1} \setminus \{v_{1i}\}$ ;
13.       $CV_2^- = V_{t2} \setminus \{v_{2j}\}$ ;
14.    EndIf
15.  EndFor
16. EndFor
17. For 每个  $e_{1i} \in E_1$  do
18.   For 每个  $e_{2j} \in E_2$  do
19.     If  $e_{1i}, e_{2j}$  不满足对应关系 then
20.        $E_{t1} = E_{t1} \setminus \{e_{1i}\}$ ;
21.        $E_{t2} = E_{t2} \setminus \{e_{2j}\}$ ;
22.     EndIf
23.     If  $e_{1i}, e_{2j}$  满足一致的对应关系 then
24.       $CE_1^- = E_{t1}; CE_2^- = E_{t2}$ ;
25.    Else
26.       $CE_1^- = E_{t1} \setminus \{e_{1i}\}$ ;
27.       $CE_2^- = E_{t2} \setminus \{e_{2j}\}$ ;
28.    EndIf

```

29. End For

30. End For

31. $D_p = (|CV_1^-| + |CV_2^-| + |E_1^-| + |E_2^-|) / (|T_1^- \times T_1^-| + |T_2^- \times T_2^-|)$;

32. Return D_p

定理 1 给出两个 Petri 网以及它们的对应关系, 其行为轮廓一致性度 $BP_p^{[7]}$ 和基于 TDBRG 的一致性度 D_p 之间必然存在关系 $BP_p \geq D_p$ 。

证明: 令 $T_{11} - T_{21}, \dots, T_{1n} - T_{2n}$ 为所有的对应。由于 $|V_1| + |E_1| = |T_1 \times T_1|, |V_2| + |E_2| = |T_2 \times T_2|, T_1^- \subseteq T_1, T_2^- \subseteq T_2, |CT_1^-| + |CT_2^-| \geq |V_1^- \times V_2^-| + |E_1^- \times E_2^-|$, 则有:

$$\begin{aligned} BP_p &= \frac{|CT_1^-| + |CT_2^-|}{|T_1^- \times T_1^-| + |T_2^- \times T_2^-|} \\ &\geq \frac{|CV_1^-| + |CV_2^-| + |CE_1^-| + |CE_2^-|}{|T_1^- \times T_1^-| + |T_2^- \times T_2^-|} \\ &= D_p \end{aligned}$$

证毕。

由定理 1 可知, 对于两个网模型的一致性检测问题, 本文方法比文献[14]的方法更精确。

引理 1 [14] 对于一个合理的自由选择 workflow 网, 若变迁个数为 n , 那么需要花费 $O(n^3)$ 的时间来计算它的行为关系。

性质 1 对于一个合理的自由选择 workflow 网, 若变迁个数为 n , 那么计算它的行为序列关系可以在 $O(n^3)$ 的时间内解决。

证明: 由引理 1, 易知此结论成立。

性质 2 对于一个合理的自由选择 workflow 网, 若变迁个数为 n , 那么需花费 $O(n^3)$ 的时间来计算它的 TDBRG。

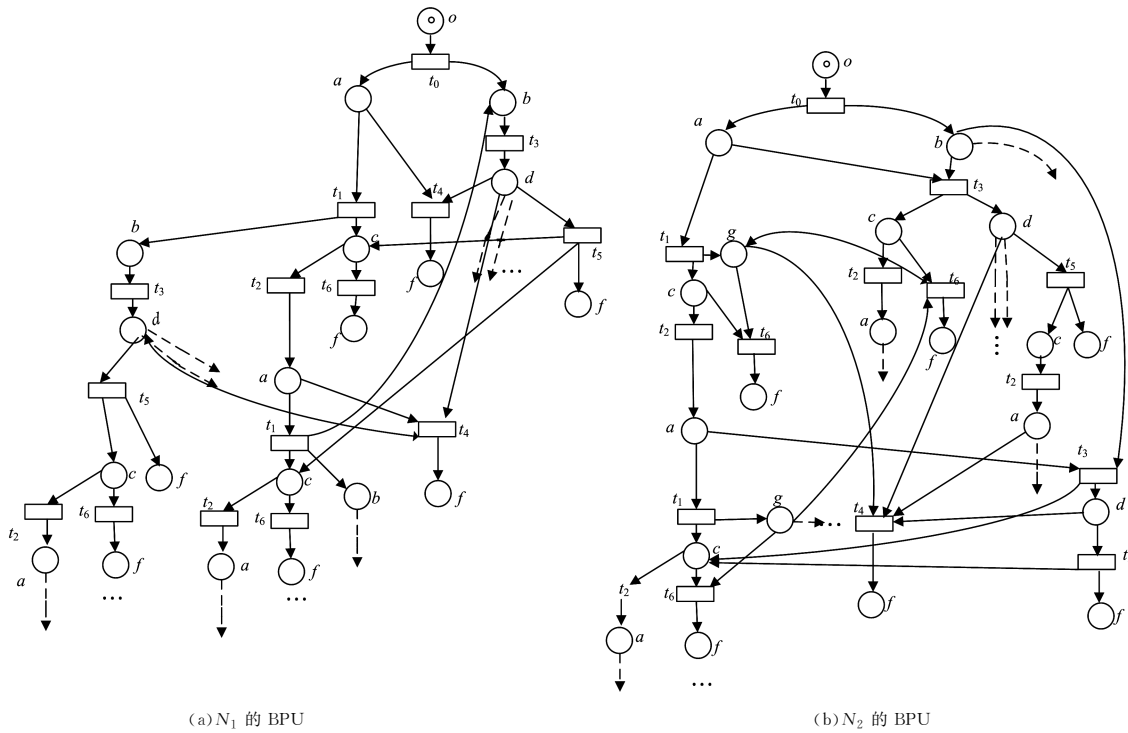
此结论易证。事实上, 构造 TDBRG 时要求对两个变迁集的关系进行逐一计算, 该过程的计算时间复杂度为 $O(n^2)$ 。根据性质 1, 整个计算过程的时间复杂度为 $O(n^3)$ 。

性质 3 对于一个合理的自由选择网, 若系统的变迁数为 n , 那么需要花费 $O(n^3)$ 的时间来计算它的一致性度。

证明: 由性质 1 和性质 2, 易知此结论成立。

3.4 例子分析

分析第 2 节提出的动机示例, 可以得到图 1 的分支进程如图 4 所示, 根据算法 1 得到其 TDBRG 如图 5 所示。图 1 的变迁 t_3, t_4, t_5 在 N_2 中仅发生一次, 但在 N_1 中不止发生一次, 即在 N_2 中有 $t_3 \diamond t_3, t_4 \diamond t_4, t_5 \diamond t_5$, 而在 N_1 中有 $t_3 \# t_3, t_4 \# t_4, t_5 \# t_5$ 。根据算法 2, 可以得到 N_1 和 N_2 的基于 TDBRG 的一致性度为 $\frac{44+44}{49+49} \approx 0.8979$, 说明大约有 89.8% 的点或向量是一致的, N_1 和 N_2 大约有 10.2% 是不一致的。这是因为 t_3 和 $t_3; t_4$ 和 $t_4; t_5$ 和 $t_5; t_1$ 和 $t_3; t_1$ 和 t_4 的行为序列关系是不一致的, 其余的对应点和对应向量都是一致的, 此处不一一罗列。我们发现在 N_1 的 BPU 中, t_1 和 t_4 是选择关系和顺序关系, 因此 t_1 和 t_4 的行为序列关系在 TDBRG 中就是一个向量 $R_{(t_1, t_4)} = SR \rightarrow OR$ 。同样地, 有 $R_{(t_1, t_5)} = CR \rightarrow SCR$ 。然而在 N_2 的 BPU 中, 有 $R_{(t_1, t_4)} = OR, R_{(t_1, t_5)} = SR \rightarrow SCR$ 。



(a) N_1 的 BPU

(b) N_2 的 BPU

图4 图1中 N_1 和 N_2 的 BPU

Fig. 4 BPU of N_1 and N_2 in Fig. 1

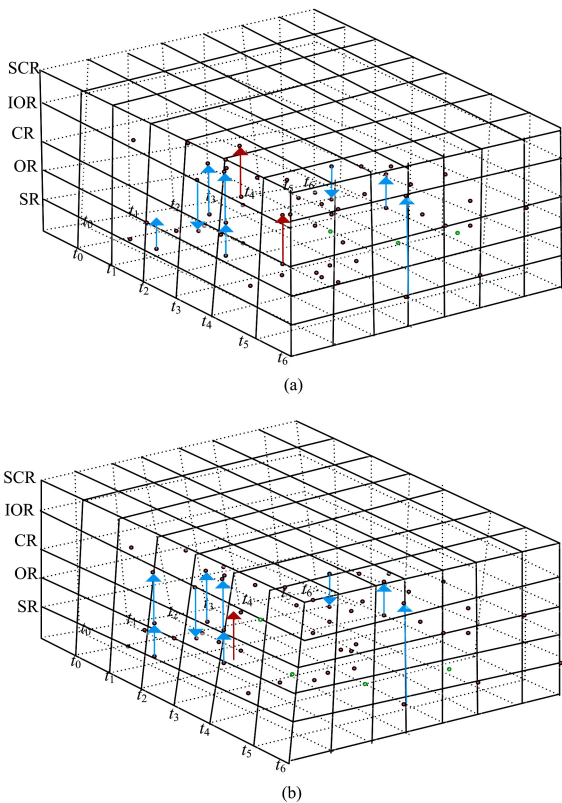


图5 图1的 TDBRG

Fig. 5 TDBRG of Fig. 1

结束语 本文针对业务流程中出现的环结构问题,给出了一种含有环结构的行为关系分析方法,并定义了多重变迁集;基于分支进程展开(BPU)理论,给出了5种行为序列关系,并分析了BPU间的行为相关关系。通过研究两个网的

BPU,给出了三维行为关系图(TDBRG)来表示两个网的行为关系,并提出了基于TDBRG的行为一致性度量方法。

未来还有很多问题需要研究,如分支进程的求解算法、基于分支进程的描述、含有数据信息的行为一致性检测等。

参考文献

- [1] MURATA T. Petri nets: Properties, analysis and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580.
- [2] WANG M, LIU G, JIANG C, et al. Computation of Secure Consistency for Real Systems[C]// International Conference on Security, Privacy and Anonymity in Computation, Communication and Storage. Springer, Cham, 2016: 84-97.
- [3] LIU X, FANG X, WANG M, et al. The Behavior Trustworthiness Analysis Methods of Composite Web Services Based on Process Mining [J]. Applied Mathematics and Information Sciences, 2013, 7(5): 1985-1992.
- [4] FANG X, WANG M, YIN Z. Behavior Consistency Analysis Based on the Behavior Profile about Transition Multi-Set of Petri Net [J]. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2013, 89(1b): 171-173.
- [5] DIJKMAN R, DUMAS M, VAN DONGEN B, et al. Similarity of business process models: Metrics and evaluation [J]. Information Systems, 2011, 36(2): 498-516.
- [6] WALSH B. Identifying complex semantic matches[M]// The Semantic Web: Research and Applications. Springer, Berlin; Heidelberg, 2012: 849-853.
- [7] SCHÖNBERGER A, WIRTZ G. Taxonomy on Consistency Requirements in the Business Process Integration Context[C]// Proceedings of 2008 Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering(SEKE'2008). 2008: 593-598.

(下转第 165 页)