

基于一致性检测的资源感知日志修复方法

陈咏琪, 方 娜

安徽理工大学 数学与大数据学院, 安徽 淮南 232001

摘 要:目的 日志修复是业务流程管理的主要研究内容之一,当业务流程模型中包含资源约束时,以控制流为基础的流程建模技术和以往的控制流修复方法难以察觉模型中资源视角存在的问题;因此提出了基于一致性检测的资源感知日志修复方法。方法 首先使用 Petri 网对流程进行建模,然后将资源视角融入已有 Petri 网中形成流程的资源感知 Petri 网,建立流程中活动与资源的关联关系;再根据对齐方法分析所产生事件日志的控制流和数据流的偏差,最后对资源数据异常的事件日志进行分类修复。结果 以城市轨道全自动驾驶系统的日常运营流程融合故障处理流程为例验证了方法的可行性,并根据迹的拟合度扩展出复合拟合度,拟合度能够计算控制流视角和资源视角对模型拟合的综合影响程度;提出的方法与传统局限于控制流对齐的修复方法相比,其复合拟合度更高,日志修复的结果更好。结论 通过使用加入资源约束的流程建模技术,并将传统的只针对控制流进行日志修复的方法拓展到数据流方面,可以使流程中资源视角下可能发生的数据异常不再被忽略,扩大了日志修复的适用范围,有利于解决日志中资源方面可能存在的问题。

关键词: 日志修复;一致性检测;资源感知;全自动驾驶系统;流程模型

中图分类号: TP301.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0002.014

A Resource-aware Log Repair Method Based on Consistency Checking

CHEN Yongqi, FANG Na

School of Mathematics and Big Data, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China

Abstract: Objective Log repair is one of the main research topics in business process management. When business process models include resource constraints, control-flow-based process modeling techniques and traditional control-flow repair methods struggle to detect issues from a resource perspective in the model. Therefore, a resource-aware log repair method based on consistency detection was proposed. **Methods** Firstly, the process was modeled using Petri nets, and then the resource perspective was integrated into the existing Petri net to form a resource-aware Petri net of the process. The association between activities and resources in the process was established. Then, deviations between the control flow and data flow of the generated event logs were analyzed using alignment methods, and finally, event logs with resource data anomalies were classified and repaired. **Results** The feasibility of the method was verified by integrating the daily operation process of the fully automated urban rail driving system with the fault handling process, and the composite fitness was extended based on trace fitness. This fitness can calculate the comprehensive impact of the control flow perspective and the resource perspective on model fitting. Compared with traditional repair methods limited to control-flow alignment, the proposed method achieves higher composite fitness and better results in log repair. **Conclusion** By using process modeling techniques with added resource constraints and extending traditional log repair methods, which focus only on control flow, to the data flow aspect, potential data anomalies from a resource perspective in the process are no longer ignored, expanding the scope of log repair and helping to address potential resource-related issues in logs.

Keywords: log repair; consistency detection; resource awareness; fully automated driving system; process modeling

收稿日期:2023-09-23 修回日期:2023-10-26 文章编号:1672-058X(2025)02-0105-07

基金项目:国家自然科学基金(61572035);安徽省高校领军骨干人才项目。

作者简介:陈咏琪(2000—),女,安徽合肥人,硕士研究生,从事过程挖掘研究。

通讯作者:方娜(1994—),女,河南新县人,博士,讲师,从事低频行为、业务流程变化域分析等研究。Email:1239188096@qq.com。

引用格式:陈咏琪,方娜.基于一致性检测的资源感知日志修复方法[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(2):105-111.

CHEN Yongqi, FANG Na. A resource-aware log repair method based on consistency checking [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(2): 105-111.

1 引言

业务流程管理结合了信息技术知识和管理科学知识,使其应用于可操作的业务流程中,极大地提高了生产率和节约成本的潜力^[1]。而在这些业务流程运行中,由于各种原因,会产生不完备的事件日志。这些含有错误的事件日志会降低业务流程管理的效果。

当前的事件日志研究侧重于从流程的活动、行为视角入手分析,很少考虑带有资源约束的流程模型涉及的数据问题。文献[2]提出了事件日志质量问题。为了提高流程挖掘的分析质量,文献[3]开发了一种使用事件日志作为流程挖掘项目指导方针的流程挖掘方法,方法侧重于数据清理步骤。现有的日志修复研究工作主要分为两类:基于事件日志与业务流程模型对齐^[4]的对齐法和基于将业务流程模型同态映射为分支网络^[5]的分支法。对齐法能够对日志进行合规性检查,但当业务过程较大,存在较多并发时,对齐法的效率会大大降低。而分支法则没有考虑时间缺失以外的可能偏差情况。针对这些方法的不足,文献[6]提出了启发式的流程日志修复方法,能够在日志存在“噪音”的情况下进行有效的修复。文献[7]提出基于跟踪集群分解日志,使用对缺失的迹进行聚类的方法来处理不完备日志。此外,文献[8]提出了一种通过学习事件日志中观察到的事件结构特征对缺失的分类时间进行修复的方法,该方法恢复缺失分类事件的不完备事件日志。现有的基于 Petri 网的全自动驾驶系统文章大都针对运营安全性进行分析。文献[9]和文献[10]利用

Petri 网的结构特性对全自动驾驶系统运营安全性进行优化。文献[11]则使用随机 Petri 网构建马尔科夫链对车站应急系统的安全性能进行分析。然而,使用这些方法对模型进行研究时,其侧重点通常在模型的控制流视角上,忽略了流程涉及的资源可能存在的问题。模型中的可用资源是否满足资源分配约束、模型产生的日志是否正确记录资源的调用情况等问题都未能得到妥善解决。因此,解决这些涉及资源信息的问题时,以上的分析方法不再适用。

为了更好地分析具有资源约束的流程,引入了资源感知模型这一概念,将模型涉及的资源方面扩展到 Petri 网中。采用资源感知 Petri 网建模方法来对全自动驾驶系统的运营流程进行描述,对其产生的事件日志进行资源视角下的修复,扩展了日志修复的考虑范围,即不再局限于控制流,提高了事件日志的完整性,帮助解决流程分析在事件日志方面可能存在的问题。

2 系统模型设计与分析

2.1 基于 Petri 网的故障场景流程模型

目前,已经采用全自动驾驶系统的日常运营场景主要有以下内容:列车上电、唤醒、出库、在正线运行、自动进站停车、自动折返换端运行、停止正线服务、清扫、休眠等^[12]。为了更方便地对轨道交通场景进行研究,使用 Petri 网对日常运营场景的流程进行场景分析和元素提取,并在原有流程中将检测车门是否存在异物的检查流程融入其中,根据库所和变迁的行为关系建立了如图 1 所示的带有异常场景处理的运营流程模型。

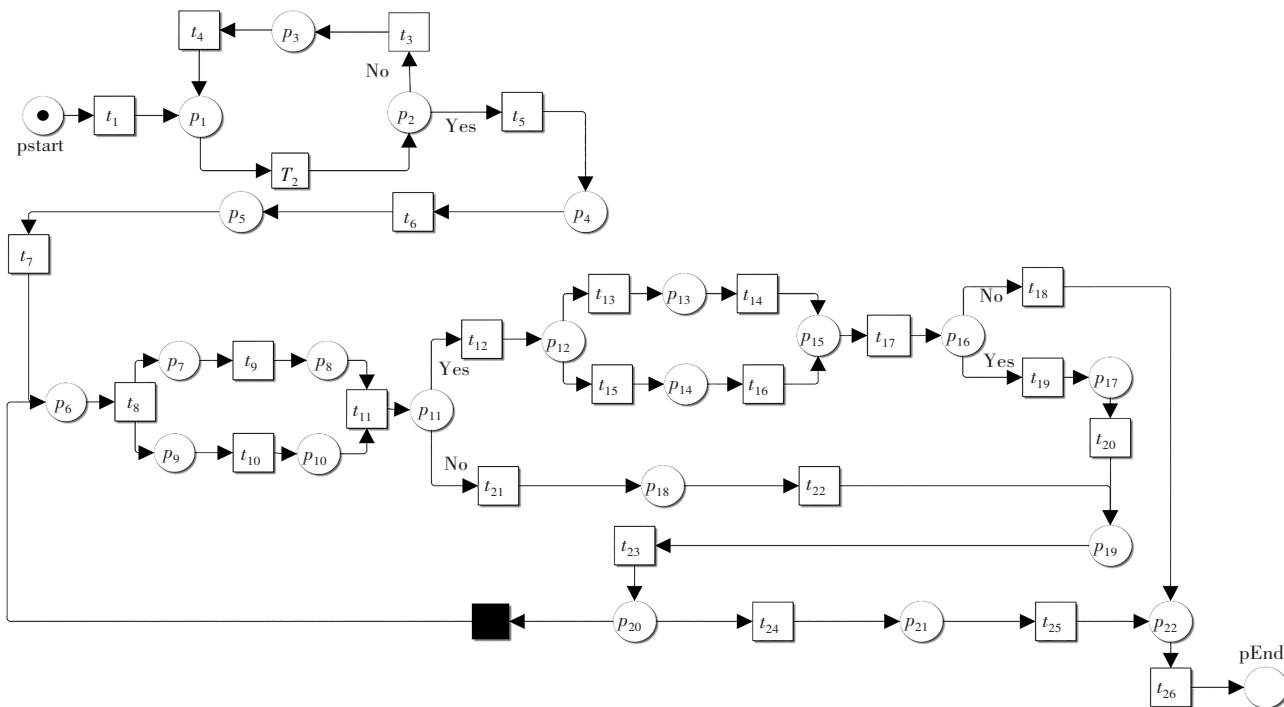


图 1 带有故障场景流程的 Petri 网

Fig. 1 Petri net with malfunction scenario process

模型大致分为两个部分。第一个部分是车门与站台门间存在异物的处理流程,第二个是没有检测到异物的正常流程。在列车通电(t_0)自检(t_1)后,若自检失败则会启动备用列车(t_3),备用列车同样需要执行通电步骤(t_4)。自检成功的列车测试(t_5)成功后,便可以出库(t_6),并在出库时需要打开空调和照明。之后全自动驾驶系统在正线运行,进站自动停车(t_7)、自动开门上下客(t_8)。当列车准备再次启动时,闭锁车门(t_9)与站台门(t_{10})后,站台门系统会向异物检测系统发送检测请求(t_{11})。若存在异物,异物检测系统向站台门报告(t_{12})后,站台门系统会将画面推送给运行控制中心(OCC)(t_{13}),调度台显示故障画面并报警(t_{14})。同时站台门系统打开站台门(t_{15}),人工处理现场后手动关闭站台门(t_{16})。处理完毕后,联锁(CI)设备会采集处理信息(t_{17}),若故障仍未解决则选择清客,人工驾驶列车下线(t_{18})。若故障解决,则联锁向(VOBC)发送无异物信息(t_{19}),VOBC启动列车发车车载控制器(t_{20})。异物检测系统检测后向站台门报告无异物(t_{21})时,列车便可发车(t_{22})。列车继续运行中可自动进行折返换端(t_{23}),继续运行。若无运行任务,运行至终点站后关闭空调、照明等服务设备(t_{24})。之后,开始清扫列车(t_{25}),此时列车需要打开照明。清扫结束后,执行列车休眠(t_{26})。表1详细阐述了模型中变迁的具体含义。

表1 故障场景流程 Petri 网中变迁代表的事件

Table 1 Events represented by transitions in Petri net with malfunction scenario process

变 迁	变 迁 名 称	变 迁	变 迁 名 称
t_1	列车电源通电	t_{14}	显示画面并报警
t_2	列车进行自检	t_{15}	打开站台门
t_3	启动备用列车	t_{16}	人工处理现场
t_4	备用列车接通电源	t_{17}	采集信息
t_5	列车进行测试	t_{18}	列车下线
t_6	列车出库	t_{19}	发送无异物信息
t_7	进站自动停车	t_{20}	列车发车
t_8	自动开门上下客	t_{21}	报告无异物
t_9	闭锁车门	t_{22}	列车发车
t_{10}	闭锁站台门	t_{23}	自动折返换端
t_{11}	发送异物检测请求	t_{24}	终点站结束运行
t_{12}	报告有异物	t_{25}	开始清扫
t_{13}	推送站台门画面	t_{26}	列车休眠

图1对全自动驾驶系统日常运营流程进行了建模。但由于轨道运营流程的安全性方面存在不确定性和不稳定性^[13],基于控制流视角建模下的事件日志分析只能检测出事件的执行顺序是否符合一致性,并不

能显示流程的事件日志在资源约束方面的异常。即使日志中流程行为、活动方面的记录不存在偏差,这些行为、活动涉及的资源信息仍然会存在出现错误的可能。现将针对这一问题提出解决方法,利用事件日志中所包含的资源信息对日志进行修复。除此之外,还基于方法适用的范围沿着不同维度对可能出现的各种情况进行分类,以便所提出的方法能够发挥更好的性能表现。

2.2 资源感知 Petri 网模型设计

定义1^[14] (资源感知 Petri 网)资源感知 Petri 网 $N=(P,T;F,R,D)$ 是一个五元组满足以下条件:

- (1) $S \cap P = \emptyset, S \cup P \neq \emptyset$;
- (2) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$;
- (3) $dom(F) \cup cod(F) = P \cup T$ 。

其中 $dom(F) = \{x \in P \cup T \mid \exists y \in P \cup T: (x, y) \in F\}$; $cod(P) = \{x \in P \cup T \mid \exists y \in P \cup T: (y, x) \in F\}$ 。

- (4) R 是资源的有限集合;
- (5) $D \subseteq (R \times T) \cup (T \times R)$;

资源感知 Petri 网用资源视角扩展了经典的 Petri 网。它描述了每个活动执行的所需资源属性的值。图2所示的带有资源的 Petri 网的简单流程,其中圆形是库所,方形为变迁,椭圆形则代表活动执行所需的资源。当活动执行需要资源的参与时,椭圆与方形之间使用虚线将两者连接起来。图2的 A_1 活动便需要 R_1 的参与才能顺利执行, A_2 活动则需要 R_1 和 R_2 共同参与才能执行。

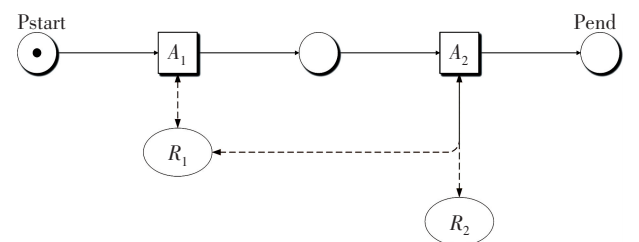


图2 简单的资源感知 Petri 网

Fig. 2 A simple resource-aware Petri net

定义2^[15] (事件日志)业务流程的执行通过事件日志来进行记录。事件日志 L 是迹的多集。一个日志迹 $\sigma^L = \langle e_1, \dots, e_n \rangle \in L$ 将一个特定流程执行描述为一系列事件。事件 e 指的是活动的执行,可以由不同属性来描述。例如在事件 $e = \{ \langle activity: A_2; resource: R_1, R_2 \rangle \}$ 中, $activity: A_2$ 是对应执行活动的名称, $resource: R_1, R_2$ 是执行活动所需的资源。

定义3^[16] (对齐)设 σ 为一条迹, $N=(P,T,F)$ 是一个 Petri 网流程模型。 M_i, M_f 分别是网 N 的开始标识和结束标识。设 A 是活动的集合,且 A 是活动标签的

集合,且 $\gg \notin A \cup T \in \Lambda, \gg \neq \tau$ 。序列 $\gamma \in (A^{\gg} \times T^{\gg})^*$ 是对齐的需要满足以下条件:

(1) $(\pi_1(\gamma)) \downarrow_A = \sigma$, 即 γ 的活动部分在 A 上的投影等于 σ 。

(2) $M_i \xrightarrow{(\pi_2(\gamma)) \downarrow_T} M_f(\pi_2(\gamma)) \downarrow_T$, 即从初始标识 M_i 到结束标识 M_f , γ 的模型部分在 T 上的投影是 N 的完整执行序列。

(3) $\forall (a, t) \in \gamma (a \neq \gg \vee t \neq \gg)$, 即 $(\gg, \gg)$ 在对齐 γ 中是不合法的。

3 资源感知流程模型的日志修复

3.1 问题维度分类

由于日志修复是基于资源感知模型的,且在分析时发现方法并不是对所有可能出现的问题都可行。因此依照表2所示的维度来描述日志中可能发生错误的类型。首先,基于控制流视角,日志中事件的执行顺序是可能发生异常的。第二,资源视角的数据值也可能出现错误,即目标事件使用的资源与模型中对应的资源出现偏差。不过这种分类并不是绝对的,针对不同的流程应该有适当的变化。

表2 日志异常的不同维度

Table 2 Different dimensions of log anomalies

资 源	控制流	
	异 常	无异常
异常	H	M
无异常	M	L

表2包含3种主要的区域,每个区域都表示不同的情况: L 区域是事件日志中控制流与资源视角都不存在异常,但这种情况非常理想。 M 区域有两块,较浅的部分指的是双视角下有其中一个视角保持一致性即部分无异常状态。 H 是两个视角都存在异常,它与现实世界的拟合度最高,处理方法也最复杂。提出的方法则建议运用于右上角的 M 区域,即资源视角存在异常,控制流视角无异常的对象。对于其他区域,则需要根据具

体条件进行相应的策略变更。

3.2 异常事件日志修复方法

传统的日志修复方法大部分都将修复范围局限在控制流,所以隐藏在控制流视角下的其他问题便不能得到解决。而对加入资源视角的事件日志进行分析能够更加全面地分析流程的潜在问题。算法1为修复含有资源约束事件日志的具体实现步骤。

Algorithm 1: 修复日志

```

Input : 资源感知Petri网 $N$ , 事件日志 $L$ 
Output: 基于模型修复后的事件日志 $L'$ 

(1) begin
(2)    $L' \leftarrow \{\}$  /* 初始化新的事件日志集 */
(3)    $flag \leftarrow false$  /* 设定哨兵变量 */
(4)   for each  $n \leftarrow 0$  to  $|L|$  do
(5)     if  $M_i \xrightarrow{(\pi_2(L_n)) \downarrow_T} M_f(\pi_2(L_n)) \downarrow_T$  then
(6)       for each  $i \leftarrow 0$  to  $|\Sigma|$  do
(7)         if  $(\pi_1(L_n) \downarrow_A) = \Sigma_i$  then
(8)            $flag \leftarrow True$ 
(9)           break /* 结束该循环 */
(10)        end if
(11)      end for each
(12)    end if
/* 若迹  $L_n$  满足对齐 */
(13)    if  $flag = True$  then
(14)      for each  $j \leftarrow 0$  to  $|L_n|$  do
(15)        if  $L_n^j.resourc \neq \Sigma_i^j.resourc$  then
(16)           $repair(L_n^j.resourc)$ 
(17)        end if
(18)      end for each
(19)       $L' \leftarrow L' \cup L_n$ 
(20)    end if
(21)  end for each
(22)  return  $L'$ 
(23) end

```

算法1中,行(4)——(12)利用控制流对齐的定义判断日志中的迹是否满足对齐,找到模型中与之对齐的迹 Σ_i ,其中 Σ 是符合模型的迹集合;行(13)——(14)根据哨兵变量 $flag$ 的结果,对符合条件的迹中每一个活动进行遍历;行(15)——(17)判断每个活动的资源属性是否与其在模型中对应迹 Σ_i 的资源属性相等,若不相等,则对该属性进行修复;最后行(19)使用修复后的迹以构造新的事件日志集合。

接下来的内容会具体阐述如何对不同的资源属性比较结果进行处理。首先从事件日志中得到其控制流和活动的资源属性,再使用控制流对齐技术进行日志与资源感知Petri网的对齐。对齐后得到表3所示的迹。

表3 示例事件日志对齐结果

Table 3 Alignment of example event logs

活动名称	A_1		A_2		A_3		A_4		A_5		A_6	
资源	日志	模型	日志	模型	日志	模型	日志	模型	日志	模型	日志	模型
	R_1	R_1	—	R_2	R_3	R_3R_4	R_3R_4	R_2R_5	R_6	R_1	R_1	R_3R_6

(1) A 事件需要 x 资源,但日志中 A 事件没有用到。对于迹中活动 A_2 来说,该活动的执行需要资源 R_2 ,但在缺失了信息。因此,需要使用模型中与它对应的 A_2 活动的资源属性 R_2 进行修复。

(2) A 事件中需要 x 资源,但日志中 A 事件使用了

y 资源。在模型中,活动 A_5 的执行需要资源 R_1 ,但迹中的 A_5 所对应的资源属性只显示 R_6 ,这并不符合活动执行要求。需要修改日志中 A_5 的资源属性使其与模型中对应活动的资源属性一致。活动 A_4 和 A_5 的问题属于同类型,区别只在于使用的资源数量,因此对于活动 A_4

出现的日志错误,与活动 A_5 执行相同操作,即修改资源属性,使其与模型对应的数据相同即可。

(3) A 事件中需要 x 和 y 资源,但日志中 A 事件只使用了 x 资源。当事件需要多个资源的共同操作时,可能会出现日志中对应活动资源的记录缺少。如迹中的 A_3 活动的资源属性值是 R_3 ,而在与它对齐的模型中的资源属性值是 R_3 和 R_4 。使用方法进行日志修复的适用范围如 4.1 节所述,因此对于迹中的 A_3 活动,在此认为是日志错误地记录了所需的资源属性值。之后,添加日志中 A_3 活动缺失的资源属性部分值即可。

(4) A 事件中需要 x 和 y 资源,但日志中 A 事件使用了 z 资源。对于事件 A_6 来说,模型中对事件 A_6 其资源属性的规定为 R_3 和 R_6 ,但日志错误地记录了活动 A_6 使用了 R_1 资源,不仅在资源数量上出了错,在模型中的对应属性数据中也没有匹配的部分。与第 3 个情况中所描述的前提假定同理,将日志中 A_6 的资源属性修改使其与对齐模型的资源属性值一致便可完成针对该

情况的修复。

4 实例应用与结果分析

4.1 实例应用

利用第二节的动机案例来证明算法 1 的可行性。为了使流程的活动与其涉及的资源联系起来,在第二节所建立模型的基础上,使用资源视角对已有模型进行扩充,得到图 3 所示的资源感知模型。图 3 中黄色椭圆和蓝色椭圆便代表活动所需要的资源,即每个事件发生所需要的系统设备。根据列车的系统集成关系,将集中在列车上的系统设备用黄色椭圆表示,其他系统设备则使用蓝色椭圆表示。当模型中的活动与黄色或蓝色椭圆相连时,便代表该活动发生需要设备提供的信息或活动会影响设备之后的行为。对建立好的模型进行仿真模拟,提取记录运行的日志,得到如表 4 所示的部分事件日志,并使用图 3 中的变迁序号来代表执行活动的名称。

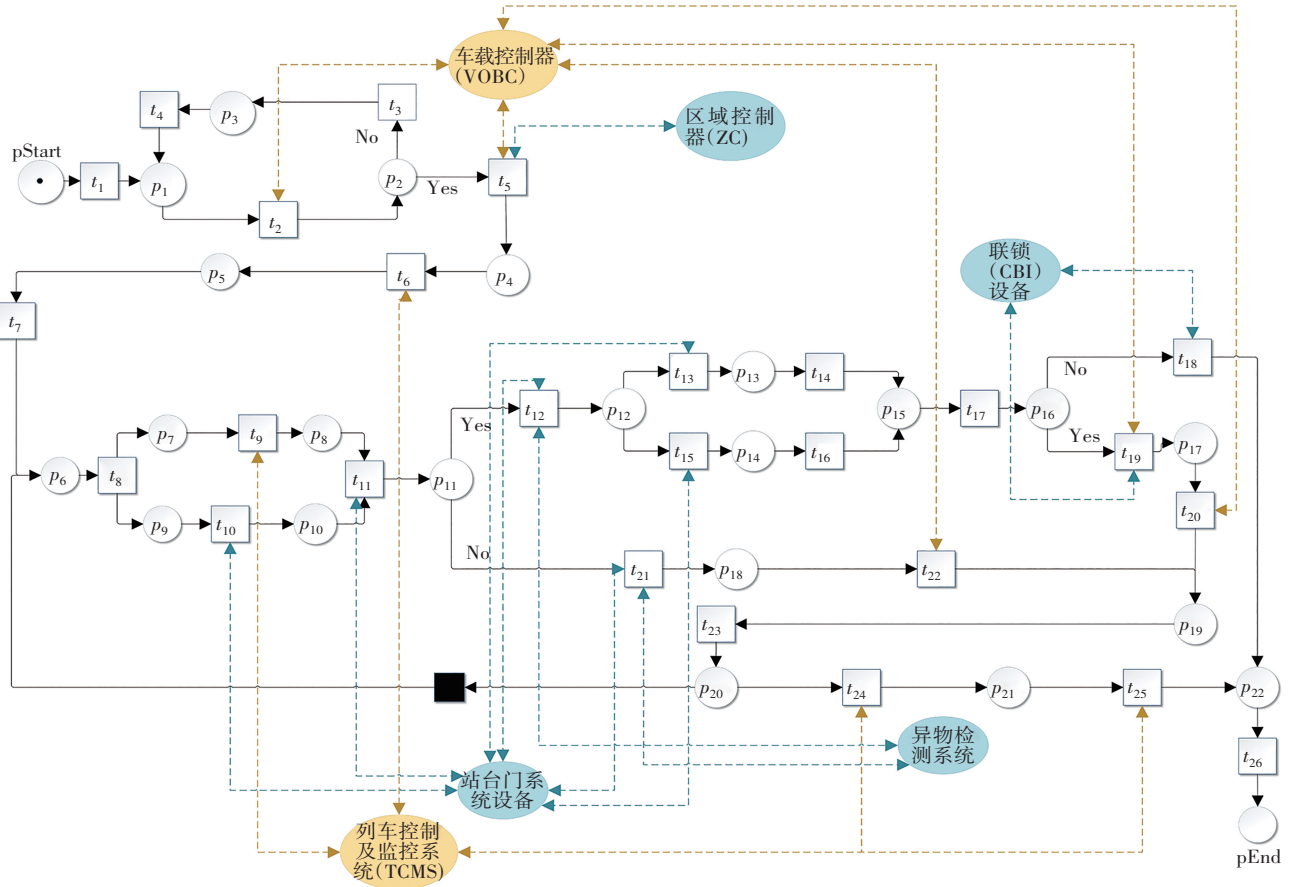


图3 带有资源的全自动驾驶系统流程模型

Fig. 3 Process modeling of fully automated driving systems with resources

首先,使用得到的日志进行控制流一致性检测,并筛选符合一致性的事件日志,得到了如表 4 所示的一条迹。之后,将满足条件的事件日志中的活动与模型

中对应的活动进行对齐,与对应资源属性值进行比较,对齐和比较结果如表 5 所示。对齐结果显示偏差的地方使用红色进行突出显示。

表 4 日志中的迹 σ
Table 4 Trace σ in log

活动名称	Start	t_1	t_2	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{21}	t_{22}	t_{23}	t_{24}	t_{25}	t_{26}	End
资源	—	—	VOBC	VOBC	—	—	—	TCMS	站台门系统设备	TCMS	站台门系统设备, ZC	VOBC	—	TCMS	TCMS	—	—

表 5 日志中的迹 σ 与模型对齐
Table 5 Trace σ in log aligned with the model

活动名称	Start	...	...	t_2		t_5		t_6	...	...	t_{11}		t_{21}		t_{22}	...	...	End	
	日志	模型	...	日志	模型	日志	模型	日志	模型	...	日志	模型	日志	模型	日志	模型	...	日志	模型
资 源	—	—	...	VOBC	VOBC	VOBC	VOBC, ZC	—	TCMS	...	TCMS	TCMS	站台门系统设备, ZC	站台门系统, 异物检测系统	VOBC	VOBC	...	—	—

由表 5 可知,在变迁 t_5 、 t_6 和变迁 t_{21} 处日志和模型的资源信息出现了不一致。变迁 t_5 在模型中规定的所需资源为 VOBC 和 ZC,而在日志中只记录了 VOBC。所以需要根据模型将其资源信息修改为 VOBC 和 ZC。对于变迁 t_6 ,在模型中变迁执行所需要的资源为 TCMS,而在日志中并没有记录。因此,应该修改日志中

变迁 t_6 的资源为 TCMS,使日志与模型在资源视角中也保持一致。在事件日志中,记录了变迁 t_{21} 在执行时,使用了站台门系统设备和 ZC 资源。但模型中对应活动的资源属性为站台门系统设备和异物检测系统。将记录的 ZC 资源数据修改为异物检测系统即可。修复后的 σ' 与模型对齐结果如表 6 所示。

表 6 修复后的 σ' 与模型对齐情况
Table 6 The repaired trace σ' aligned with the model

活动名称	Start	… …	t_2	t_5	t_6	… …	t_{11}	t_{21}	t_{22}	… …	End								
	日志	模型	… …	日志	模型	日志	模型	日志	模型	… …	日志	模型	日志	模型	日志	模型	… …	日志	模型
资 源													站台门系统设备, 异物检测系统	站台门系统设备, 异物检测系统					
	—	—	… …	VOBC	VOBC	VOBC	VOBC	TCMS	TCMS	… …	TCMS	TCMS	备, 异物检测系统	备, 异物检测系统	VOBC	VOBC	… …	—	—

4.2 结果分析

为了比较方法与以往基于控制流的方法的效果,采用拟合度计算修复后日志对模型的拟合程度。基于迹的拟合度公式^[17],将资源部分对拟合情况可能产生的影响也拓展到公式中,利用新的复合拟合度式(1)来判断修复后的迹是否与模型有着更高的拟合度。

复合拟合度的计算公式:

$$F(\Sigma, N) = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{m}{c} \right) + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{r}{p} \right) + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{f}{a} \right) \quad (1)$$

当在网 N 上重演迹 Σ 时, p 为产生的 token 数, c 为

消耗 token 数, m 为缺失的 token 数, r 为遗留的 token 数, a 为迹 σ 中活动的数量, f 为迹 σ 中错误使用资源的活动数量。复合拟合度 $F(\Sigma, N)$ 的取值为 0~1 之间。如果重演过程中网 N 没有缺失的 token,重演完成后没有遗留的 token,且迹中的所有活动都使用了正确的资源,则 $F(\Sigma, N) = 1$,即迹 σ 能够在网 N 中正确地重演。同理,如果所有消耗的 token 都缺失,重演产生的 token 在重演完成后都遗留在网 N 中,且迹中的所有活动都使用了错误的资源,则 $F(\Sigma, N) = 0$,即迹中的所有活动都不可能网 N 中被重演。

分别将修复前后的迹使用复合拟合度计算公式进

行测量, $F(\sigma, N) = 0.937\ 5$, $F(\sigma', N) = 1$ 。由计算结果可知,迹 σ 的复合拟合度表示了该迹中有 93.75% 的活动和资源能够在网 N 中正确重演,但仍然存在小部分的偏差情况。这是因为在基于控制流的对齐结果中,无法察觉资源是否被活动正确使用。而修复后迹 σ' 的复合拟合度达到了 1,这说明迹 σ' 中的所有活动在网 N 上均能被正确地重演,且活动使用的资源均符合模型要求。结果表明:修复后的迹与模型拟合度更高,即所提出方法在修复资源感知流程模型的事件日志时比仅考虑控制流对齐有更好的效果。

5 结 论

本文主要贡献在于对城市轨道全自动驾驶系统采用了控制流与数据流融合的建模方式,并将资源信息加入日志修复的考虑范围中,使得全自动驾驶系统流程的分析结果更加符合实际。针对全自动驾驶系统在建模方面的缺乏和处理具有资源约束模型时存在的问题,首先使用 Petri 网对日常运营模型的基础上融入了故障流程,进一步完善了流程模型。之后,又在控制流建模的视角下对流程模型增加了资源属性,并使用控制流结合资源视角的属性数据对流程的事件日志进行修复。

本研究在迹的拟合度的基础上将资源因素与公式融合,得到的复合拟合度可以计算资源数据与模型拟合产生的影响。在修复方法中,始终认为模型与日志的控制流对齐不会存在偏差,因此未来将会继续研究全自动驾驶系统的流程,在丰富流程模型的同时减少修复方法的局限性,将日志中可能存在的控制流偏差考虑其中,并加入多视角流程分析从而扩大日志修复的适用范围。

参考文献(References):

- [1] VAN DER AALST W M P. Business process management: A comprehensive survey[J]. ISRN Software Engineering, 2013: 1–37.
- [2] VAN DER AALST W M P, ADRIANSYAH A, DE MEDEIROS A K A, et al. Process mining manifesto[C]//Business Process Management Workshops: BPM 2011 International Workshops. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 169–194.
- [3] VAN ECK M L, LU X, LEEMANS S J, et al. PM: A process mining project methodology[C]//International conference on advanced information systems engineering. Cham: Springer International Publishing, 2015: 297–313.
- [4] FAHLAND D, VAN DER AALST W M P. Model repair—aligning process models to reality[J]. Information Systems, 2015(47): 220–243.
- [5] 朱笑尘. 异质过程数据集成与修复[D]. 北京: 清华大学, 2015.
ZHU Xiao-chen. The integration and repair of heterogeneous event data[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [6] 夏小旭. 启发式过程日志修复技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
XIA Xiao-xu. A heuristic event log repair technique[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
- [7] XU J, LIU J. A profile clustering based event logs repairing approach for process mining[J]. IEEE Access, 2019(7): 17872–17881.
- [8] SIMS, BAE H, LIU L. Bagging recurrent event imputation for repair of imperfect event log with missing categorical events[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2023, 16(1): 108–121.
- [9] 张娣, 何杰. 基于 Petri 网的城市轨道交通车辆子系统运营安全性模型[J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, 7(4): 109–113.
ZHANG Di, HE Jie. Constructing security model of vehicle in urban mass transit system based on Petri net[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2009, 7(4): 109–113.
- [10] 许治威. 基于 Petri 网的城市轨道交通无人驾驶系统安全分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
XU Zhi-wei. Safety analysis of urban rail transit driverless system based on Petri net[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2020.
- [11] 殷洁, 凌攀, 王斌. 基于随机 Petri 网的城市轨道交通车站火灾应急系统安全性能分析[J]. 现代职业安全, 2022(12): 47–50.
YIN jie, LING Pan, WANG bin. Safety performance analysis of urban railway station fire emergency response system based on stochastic Petri nets[J]. Modern Occupational Safety, 2022(12): 47–50.
- [12] 包峰, 侯忠伟. 城市轨道交通全自动运行系统运营场景分析[J]. 信息技术与信息化, 2018(5): 189–191.
BAO Feng, HOU Zhong-wei. Analysis of operation scenarios of fully automated urban rail transit system[J]. Information Technology and Informatization, 2018(5): 189–191.
- [13] ZHU L, YU F R, NING B, TANG T. Communication-based train control (CBTC) systems with cooperative relaying: design and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 63(5): 2162–2172.
- [14] PLA A, GAY P, MELÉNDEZ J, et al. Petri net-based process monitoring: A workflow management system for process modelling and monitoring[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2014(25): 539–554.
- [15] TAGHIABADI E R, GROMOV V, FAHLAND D, VAN DER AALST W M P. Compliance checking of data-aware and resource-aware compliance requirements[C]//On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2014 Conferences. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 237–257.
- [16] ZAMAN R, HASSANI M, VAN DONGEN B F. Conformance checking of process event streams with constraints on data retention[J]. Information Systems, 2023, 117: 102228.
- [17] VAN DER AALST W M P. Process mining: Discovery, conformance and enhancement of business processes[M]. Berlin: Springer, 2011.

责任编辑:田 静