

基于颜色 Petri 网的网格服务组合

翟正利

(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804) (青岛理工大学计算机工程学院 青岛 266520)

摘 要 在新的面向服务的网格计算架构下,网格服务为 Internet 上的分布式计算提供了一种重要范例。对服务提供者和消费者来说,通过组装已有网格服务来创建新的增值网格服务的应用模式已经出现。网格服务的组合已经成为网格研究领域中的一个重要课题。由于可用网格服务的复杂性,许多网格服务表现出复杂的会话协议,要求其提供的操作能根据特定的规则进行调用。讨论了以下几个问题:(1)如何精确描述网格服务的会话协议;(2)如何建立组合规则来对选定的组件服务进行合成;(3)如何验证整个网格服务组合的正确性,尤其是被合并的组件服务的一致性和它们的会话协议。Petri 网提供了描述并发系统同步的结构,高级编程语言提供了描述和操作数据值的结构,而颜色 Petri 网结合了 Petri 网和高级编程语言的表达能力。为了解决上述问题,提出了一个基于颜色 Petri 网的会话协议和网格服务组合模型,其使用颜色 Petri 网的带颜色的 token 来模拟业务流程的不同消息和事件类型,把服务的会话协议和网格服务组合过程转换为颜色 Petri 网(CPN),利用现有的 CPN 的专门工具(如 CPN Tools)来对 CPN 进行模拟以分析评价系统的性能和行为性质。

关键词 网格服务组合,组件服务,会话协议,过程组合,颜色 Petri 网

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Grid Services Composition Based on Colored Petri Nets

ZHAI Zheng-li

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

(College of Information Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China)

Abstract Under the new service-oriented grid computing architecture, grid services offer a prominent paradigm for distributed computing on the Internet. It is an emerging opportunity for both service providers and service consumers to create the value-added service by assembling new, value-added grid service out of existing ones. grid services composition has become an important research issue in Grid field. As the complexity of the available Grid services, many of them exhibit complex session protocols, requiring that the offered operations are invoked according to specific rules. This paper addressed the problems: (1) how to specify complex session protocols of grid service, (2) how to construct composition rules to composite component service, and (3) how to verify grid services composition, especially its conformance to component services' session protocols. Petri net provides the constructions for specifying synchronization of concurrent processes, and the programming language provides the constructions for specifying and manipulating data values, while colored Petri net (CPN for short) combines the strengths of Petri net with the expressive power of high-level programming language. In order to address the above problems, we proposed a CPN-based model for the specification of both the session protocol and the composition of grid services. Through using the colored token of CPN to model different message and event type of business process, we can transform services session protocols and grid service composition process into CPN, then analyze and evaluate behavioral properties and performance of the system by CPN Tool, an available specific tool for CPN.

Keywords Grid service composition, Component service, Session protocol, Process combination, Colored Petri nets

1 引言

随着 WSRF^[1] 的提出,网格服务和 Web 服务已经汇聚到一起。网格服务是跨平台、异构、动态的,并且现实中的应用

一般都非常复杂。为了分散和简化应用逻辑,提高服务的可重用性,单个网格服务都不可能做得太复杂,因此需要组合多个简单的网格服务来满足现实中的复杂应用。其次,不同的网格服务是基于不同的异构系统而建立的。为了将松散耦合

到稿日期:2013-09-25 返修日期:2013-11-18 本文受国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB328101),国家自然科学基金(61173181),上海市自然科学基金(13ZR1443100),山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2010DX009),青岛市科技计划项目(12-1-4-4-(7)-JCH)资助。

翟正利(1972—),男,博士后,副教授,CCF 会员,主要研究方向为 Petri 网、信息服务、网格/云计算、智能信息处理,E-mail:zhaizhl@163.com。

的、分散的各类网格服务有机地组织成一个可用系统,服务的集成需要组合异构的服务。因此,为了实现网格服务的全部优势,使其被更为广泛地接受,必须通过组装已有网格服务以创建新的增值网格服务来满足实际应用需求。在网格服务领域,研究者所面临的其它问题都与缺少设计网格服务及其组合的正确方法学有关。现在还没有如何得到在服务组合中的业务规则^[2]的任何相应策略。网格服务的组合已经成为网格领域中一个重要的研究课题。

许多创建的网格组合服务其组件服务只涉及简单的请求/响应式调用(或同步或异步)。然而,随着网格服务应用范围的扩大,大量可用的组件服务可能需要更复杂的交互(会话)协议,涉及一系列根据明确定义的同步规则执行的消息交换。

在本文中,我们着重解决利用复杂会话协议合成组件服务的网格服务组合问题。主要讨论下述问题:

- 如何精确描述网格服务的会话协议;
- 如何建立组合规则来对选定的组件服务用复杂会话协议进行合成;
- 如何验证整个网格服务组合的正确性,尤其是和被合并的组件服务的一致性和它们的会话协议。

本文提出了一个基于颜色 Petri 网(CPN)^[3]的网格服务组合过程模型,它能表示复杂的会话协议和组件服务的过程组合。这样得到的颜色 Petri 网可以用专门的模拟工具 CPN Tools^[4](其前身为 Design/CPN^[5])来进行分析和验证,从而提高网格服务组合的可靠性。

本文第 2 节概述了当前的相关工作;第 3 节给出了一个启发例子;第 4 节讨论了如何用颜色 Petri 网来表示复杂会话协议;第 5 节中提出了一个涉及具有复杂会话协议的组件服务的过程组合模型;在第 6 节中,用提出的模型创建了一个旅游代理的组合服务;第 7 节利用相关技术工具对其进行模拟和分析;最后概括总结本文并对进一步工作做了展望。

2 相关工作

文献[6]概述了 Web 服务的基本架构及特征,从多种角度概括了 Web 服务的不同描述和定义,分析了 Web 服务的主要研究问题及 Web 服务的核心支撑技术,主要包括服务发现和服务组合。

为了进行网格服务组合,现在已经提出了网格服务流语言(GSFL)^[7]。GSFL 模拟网格服务之间的对等服务交互来避免由集中式执行管理带来的瓶颈。但 GSFL 仅支持顺序执行,缺少灵活的控制流。文献[8]提出了一个基于领域本体(ontology)的制造网格服务自动组合体系结构及算法。

文献[9]给出了 OGSA 框架下的网格服务组合语言 GSCoL,其设计思路是以网格服务间的流程逻辑的描述为核心,增加 OGSA 下网格服务组合所必需的特性描述能力,如组合服务的显式导出、服务数据定义、支持订阅/发布机制、用户透明等。GSCoL 是用 XML Schema 定义的,并且提供了一组精心选择的语法结构,以支持灵活的、递归的网格服务组合。GSCoL 的核心是流程模型和组合模型。流程模型用于定义服务构件之间的协同逻辑,而组合模型则用于描述网格服务的组合规划。

在文献[10]中,Narayanan 研究小组采用 DAML-S 本体

来描述 Web 服务的性能,并以一阶逻辑语言定义 DAML-S 的相关子集的语义。他们用 Petri 网形式化方法把服务描述代码化,给出了 Web 服务仿真、验证和组合的决策程序。

Petri 网^[11-16]已成为对包含通讯、并发、同步、资源共享的系统进行建模的有力工具。使用 Petri 网来模拟和验证业务流程组合是另外一种选择。

Van der Aalst 提出了一类 Petri 网(workflow 网)^[17]来表示和验证工作流过程。

为了适应网格环境的动态变化,文献[18]基于颜色 Petri 网,通过 Web Services 与 Agent 技术设计了一个网格服务工作流系统,讨论了如何定位 Web 服务以及如何调用它们提供的服务,还探讨了如何使 Web Services 和 Agent 协作以创建高度灵活、动态的网格服务工作流系统。

文献[19]给出了一种基于模糊 Petri 网的网格服务发现、匹配机制并能支持语义部分匹配,提供定位和选择组件服务的策略。

Adam 研究小组^[21]开发了一种基于 Petri 网的方法,该方法使用几个结构化性质来确定在工作流中的不一致的从属规范,测试其安全终端,检查当有时序约束时对于给定开始时间其执行的可行性。然而,该方法只能用于非循环工作流。

3 启发例子

考虑利用一个航空服务和一个信用卡服务创建新的旅游代理组合服务的任务。为了简明起见,假定信用卡服务只提供一个单一的操作,因此有一个简单的会话协议。然而,航空服务提供几个相关的操作,必须根据复杂会话协议来调用这些操作。假定航空服务提供了 5 个不同的操作:checkTicketAvailability、reserveTickets、cancelReservation、bookTickets 和 notifyExpiration,每个操作能执行一个和航空旅行有关的任务。客户必须根据下列会话规则调用这些操作:

- checkTicketAvailability 必须是第一个被调用的操作;
- reserveTickets 只有当客户已经调用 checkTicketAvailability 操作并且所请求的机票确实可以得到时才能调用,预订状态只能保持一定的时间;
- 只有当机票已经被预订(通过 reserveTickets 的成功操作)并且预订没有过期时才能调用 bookTickets 或者 cancelReservation;
- 如果客户在规定时间内既没有调用 bookTickets 也没有调用 cancelReservation,航空服务本身会调用 notifyExpiration 操作来通知客户其预订已经过期。

现在要根据下面的业务流程方案通过组合航空服务和信用卡服务创建一个旅游代理组合服务来对旅行者提供一个增值服务。

旅行者向旅游代理提交一个旅行订单(TripOrder),希望得到一个旅行计划(getPlan)。旅行订单包含诸如出发地、目的地、出发日期和时间、返回日期和时间、最大转乘次数、旅行者数目等信息。

旅游代理基于费用最低或转乘次数最少等找出到达目的地的最佳旅行计划。在向旅行者提出旅行计划之前,旅游代理调用航空服务的 checkTicketAvailability 操作来验证航班机票的可用性。在没有航班机票的情况下,旅游代理通知旅行者并等待旅行者提交修改后的旅行订单。

如果该航班有机票,则把旅行计划发送给旅行者进行确认。旅行者决定预订该机票并把其联系信息告诉旅游代理以便航空服务能给他发送机票。

接下来,旅游代理和航空服务交互完成预订。假定航空服务只保持这种预订 D 个时间单位。

在这时,旅行者可以订购或者取消预订。如果他决定接受该旅行计划则给旅游代理发送订购申请,包含其信用卡信息。旅游代理调用信用卡服务进行收费。如果信用卡服务批准收费,旅游代理则调用航空服务的 `bookTickets` 操作以完成机票订购,并向旅行者发出机票,还同时向旅行者发送一个有旅行计划详细描述的宣传。另一方面,如果信用卡收费被拒绝,旅游代理则通知旅行者并等待旅行者提供另外的支付信息。如果在 D 个时间单位内没有收到订购或者取消订购的申请,则取消该机票的预留并通知旅游代理。旅游代理把结果消息发送给旅行者进行确认。

4 会话协议规范

正如在上面例子中所看到的,实际网络服务的操作经常是相互有联系的,需要在服务提供者和消费者之间有一个会话来完成一次成功的事务。然而,WSDL 没有提供定义这些交互规则(会话协议)的方法。

本文提出了网络服务会话协议的颜色 Petri 网模型。Petri 网模型提供了详细说明过程交互的原语,token 可以表示模拟系统中的消息或资源。Petri 网比有限状态机有更强的描述能力^[12]。颜色 Petri 网在标准 Petri 网的基础上增加了定义数据类型和对数据值操作的原语。颜色 Petri 网模型能克服有限状态机的弱点,可以用于表示会话:(1)一个操作可以用颜色 Petri 网的变迁表示;(2)消息可以用特定类型的 token 模拟,消息类型用 token 的颜色集表示,消息的缓冲区用库所表示,由于在设计阶段并不知道消息的具体内容,抽象颜色集是对消息和变量声明的,这样可以保持较小的颜色集以加快分析的速度;(3)可以用带时间的 token 来描述超时;(4)会话的同步可以用位于变迁之间的内部库所来刻画;(5)颜色 Petri 网的分层结构能用来组合会话。例如,前述航空服务的会话协议如图 1 所示。此外,当前的一些颜色 Petri 网的模拟工具 CPN Tools 和 Design/CPN 可以对颜色 Petri 网进行直观的分析。

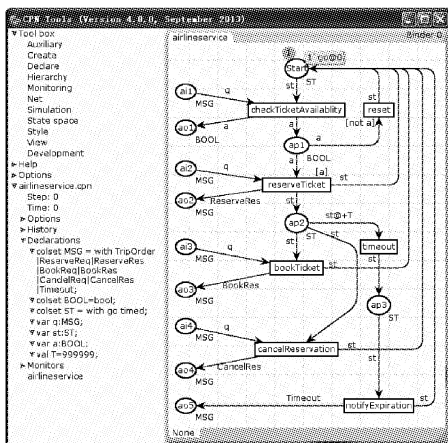


图 1 航空服务会话协议的颜色 Petri 网表示

如图 1 所示,每个航空服务操作都用一个变迁表示,该变

迁名字和操作名字相同。每个变迁有一个输入库所缓存输入信息和一个输出库所缓存输出信息。初始标识只是在库所 `start` 中有一个 token,其它库所为空。操作之间的关系用图 1 中所示的发生规则来模拟:

- 如果在其输入库所中收到 `CheckReq` 消息, `checkTicketsAvailability` 是第一个能发生的变迁;
- 当①从申请者收到一个 `ReserveReq` 消息并置入其输入库所(此处为 `ai2`),②`checkTicketsAvailability` 已经发生并且值为“yes”的 token 被置入库所 `aol` 和 `apl` 时, `reserveTickets` 会发生;
- 一旦 `reserveTickets` 已经发生,随后将会出现 3 种情况:①如果预订还没过期并且从申请者收到 `BookReq` 消息,则 `bookTickets` 发生;②如果预订仍然有效并且从申请者收到 `CancelReq` 消息,则 `cancelReservation` 发生;③如果从申请者既没有收到 `BookReq` 消息,也没有收到 `CancelReq` 消息,则经过 D 个时间单位之后 `notifyExpiration` 发生。

5 网络服务过程组合规范

网络服务会话协议是把组件服务合并到更大服务的过程组合规则的集合,因此有必要把协议和过程组合都用一种统一的模型来表示,这样能允许过程组合中每个组件服务协议的无缝集成。另外,如果该统一模型有清晰定义的语义,则对新创建的组合过程能进行形式验证。

为了确保所设计的统一模型能刻画网络服务组合的所有必需元素,我们把网络服务的过程组合和会话协议都表示为活动工作流。有两种类型的活动:基本活动和结构化的活动。每个活动都可以用 CPN 的变迁表示。

一个网络服务过程可以表示为一个 CPN,其中,最基本的活动表示为变迁,结构化的构件表示为 CPN 模式。由于封装在构件中的活动可能也是结构化的活动,模式可用来创建更为复杂的过程。一个更复杂的过程可以基于分层颜色 Petri 网^[3]用模块化方式构建。

由于在第 4 节中讨论的会话协议也是用 CPN 表示的,所有组件服务的协议和服务过程组合都能用一个统一的模型表示,其中:

- 颜色 Petri 网的变迁表示过程组合中的一个活动或者会话协议中的一个服务操作。
- 一个变迁可以表示一个具有输入库所缓存其输入消息、输出库所缓存其输出消息的请求/响应式网络服务操作,也可以表示一个具有输出库所缓存其输出消息的通知操作。
- 条件表明一个活动何时将开始(或一个操作即将被调用),该活动何时完成是通过输入库所、输入弧表达式和对应变迁的岗哨来刻画的。颜色 Petri 网的发生规则决定了活动或操作调用的控制流。
- 颜色 Petri 网的颜色集表示消息类型,而 token 变量表示过程变量。

上面给出的统一模型能用来创建具有复杂会话协议的组件服务的过程组合。

6 旅游代理服务的过程组合

作为一个例证,我们把统一模型应用到第 3 节中提到的旅游代理服务的例子中。旅游代理服务的接口包括 5 个操

作,其 WSDL 文档描述如图 2 所示,旅游代理服务的完整过程组合模型如图 3 所示。过程组合利用了现有的航空服务和信用卡服务。虽然信用卡服务具有很简单的会话协议,而航空服务要求所有的客户必须遵循图 1 中所示的会话协议。

```

<wsdl:definitions
  targetNamespace="http://grid.ustb.edu.cn/~zsl/airline"
  xmlns:tns="http://grid.ustb.edu.cn/~zsl/airline"
  xmlns:wsdl="http://www.w3.org/2003/02/wsdl">
  <wsdl:message name="TripOrder"/>
  ...
  <wsdl:message name="Timeout"/>
  <wsdl:portType name="AirlineServicePortType">
    <wsdl:operation name="GetPlan">
      <wsdl:input message="tns:TripOrder"/>
      <wsdl:output message="tns:Plan"/>
      <wsdl:fault name="TicketsNotAvailableFault"/>
    </wsdl:operation>
    <wsdl:operation name="Reserve">
      <wsdl:input message="ReserveReq"/>
      <wsdl:output message="ReserveRes"/>
    </wsdl:operation>
    <wsdl:operation name="Cancel">
      <wsdl:input message="CancelReq"/>
      <wsdl:output message="CancelRes"/>
    </wsdl:operation>
    <wsdl:operation name="Book">
      <wsdl:input message="BookReq"/>
      <wsdl:output message="BookRes"/>
      <wsdl:fault name="CreditCardRejectFault"/>
    </wsdl:operation>
    <wsdl:operation name="NotifyTimeout">
      <wsdl:output message="Timeout"/>
    </wsdl:operation>
  </wsdl:portType>
</wsdl:definitions>

```

图 2 旅游代理服务接口的 WSDL 代码片段

为了更详细地说明操作发生的不同情况,我们把每个操作内部细化为若干个变迁,如 book 操作分成了 receive31、invoke31、reset3、receive32 和 invoke32 等若干个具体变迁(见图 3)。

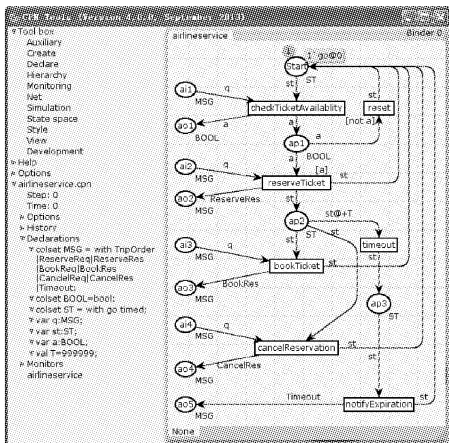


图 3 旅游代理服务过程组合的颜色 Petri 模型

操作 getPlan 从旅行者那里收到一个 TripOrder。随后基于旅行者的标准构造最优旅行计划,然后调用航空服务验证机票的有效性。根据航空服务会话协议(见图 1),checkTicketsAvailability 是该会话中第一个被调用的操作(当其输入库中所放入一个 token 时,它是该会话协议中唯一使能的操作)。收到航空服务的响应后,如果没有机票,旅游代理将向旅行者发送一个失效消息,同时,通过变迁发生向开始库所送回一个 token;如果机票有效,则得到一个旅行计划并将其作为一个应答发送到旅行者,同时通过变迁发生在允许调用下一个操作(此处为 reserveTickets)的库所中放入 token。

收到 ReserveReq 后,旅游代理服务调用航空服务的 reserveTickets 操作来完成预订。旅游代理服务从航空服务收到预订请求的结果后,将其发送给旅行者。同样地,将在允许调用订购或取消预订操作的库所中放入 token。

航空服务只保留预订一段时间,该规则如图 1 所示。

如果在截止日期之前从旅行者收到一个 BookReq,旅游代理服务调用信用卡服务,然后调用航空服务的 bookTickets 操作来订购预订的机票。

如果在截止日期之前从旅行者收到一个 CancelReq,旅游代理服务调用航空服务的 cancelReservation 操作,得到回应后向开始库所中发送一个 token 终止整个过程。

如果订购或取消订购操作在截止时间之前没有被旅行者调用,航空服务调用旅游代理服务的 notifyTimeout 操作,随后旅游代理服务通知旅行者并向开始库所中发送一个 token 终止整个处理过程。

7 模拟与分析

在把会话协议和过程组合部署前进行分析是非常关键的。在过程模型中提出的会话协议和过程组合能用颜色 Petri 网的各种各样的分析技术和计算机工具进行分析。

颜色 Petri 网模型是可执行的,这意味着可以通过对 CPN 模型进行仿真来研究系统行为。CPN tools 支持交互和自动模拟,它可以设置断点并形象地显示模拟结果。自动模拟与程序执行相似,它可以非常方便地通过大量变迁的快速执行来研究过程组合和会话协议的功能正确性或者评价过程组合的性能。

尽管模拟对理解和调试过程组合和会话协议是有益的,但是不可能通过模拟的方法得到它们动态性质的完整证明。幸运的是,CPN tools 提供了一些形式化分析方法,如状态空间法可以用来分析下列性质:

- 可达性:到达某给定状态的可能性。通过把应用领域特定的性质表达为 CPN 模型的可达性,我们能够验证组合过程的模型是否能得到预期结果。
- 死标识:在死标识中没有使能的绑定元素。服务过程实例的最后状态是一个死标识。如果状态分析报告的死标识数比预期的要多,则在服务过程设计阶段必然有错误。
- 死变迁:永远不会使能的变迁。在组合过程中没有不能实现的活动。如果有死变迁存在,则该组合过程设计有错误。
- 公平性:各个变迁发生的频率。公平性能用来表明在每个过程中的执行次数。通过公平性分析可以发现永远不会

(下转第 177 页)

- [5] Tang C, Xu Z, Mahalingam M. PSearch: Information retrieval in structured overlays[C]//ACM SIGCOMM. 2003; 89-94
- [6] Rajmohan R, Padmapriya N. A Domain Ontology Based Service Matching for Chord Based Super Peer network[C]//ICDSE. 2012; 214-219
- [7] 陈蕾, 杨庚, 张迎周, 等. 基于核 Batch SOM 聚类优化的语义 Web 服务发现机制研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1307-1312
- [8] Rosch P, Sattler K, Weth C, et al. Best effort query processing in DHT-based p2p systems[C]//ICDE. 2005; 1186-1189
- [9] Szekeles A, Baranga S H, Dobre C, et al. A Keyword Search Algorithm for Structured Peer-to-Peer Networks[C]//SYNASC. 2010; 253-260
- [10] Zhu Y W, Hu Y M, Ferry A. A P2P-Based Architecture for Content-Based Publish/Subscribe Services[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(5): 672-685
- [11] Harren M, Hellerstein J M, Huebsch R, et al. Complex queries in DHT-based peer-to-peer networks[C]//IPTPS. 2002; 242-259
- [12] Ganesan P, Sun Q, Garcia-Molina H. Adlib: A self-tuning index for dynamic peer-to-peer systems[C]//ICDE. 2005; 256-257
- [13] Jin X, Yiu W P K, Chan S H G. Supporting multiple keyword search in a hybrid structured peer-to-peer network[C]//ICC. 2006; 42-47
- [14] Tang C, Dwarkadas S. Hybrid global-local indexing for efficient Peer-to-Peer information retrieval[C]//NSDI. 2004; 25-39
- [15] 赵文栋, 张进, 彭来献, 等. 一种基于 Bloom 过滤器的服务模糊匹配算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(3): 175-179
- [16] Bloom B. Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors[J]. Communications of the ACM, 1970, 13: 422-426

(上接第 155 页)

执行的死活动。

• 有界性: 在分析过程组合或者会话协议时, 如果库所表示一个状态或者条件, 则它包含的 token 的数量要么是 0, 要么是 1, 否则就意味着出错。如果一个库所表示用来交换消息的缓冲区, 则有界性能用来检查缓冲区是否溢出。

组合过程如果违反任何组件服务会话协议将不能有效工作。对会话协议的任何违反将导致 token 陷于对应的颜色 Petri 网中, 从而成为整个 Petri 网的死标识。因此, 协议的一致性验证可以简化为在颜色 Petri 网中进行死标识的检测。

结束语 我们提出了基于颜色 Petri 网的网格服务复杂会话协议和过程组合的统一模型, 颜色 Petri 网比有限状态机和传统 Petri 网更适合这种任务, 能帮助网格服务设计者以一种与过程组合中的组件服务的会话协议一致的方式来构造过程组合。由于模型有坚实的颜色 Petri 网的理论基础, 模型中的网格服务会话协议和过程组合能用许多技术和模拟工具来进行颜色 Petri 网的设计与验证, 这样有利于在设计阶段尽可能早地发现错误并进行纠正。

我们下一步的工作是开发一个能自动导出组合服务的会话协议的算法, 并基于 Petri 网标识语言 PNML^[21] 对 WSDL 进行扩展以使其包含复杂会话协议规范。

参 考 文 献

- [1] Globus Alliance, IBM, HP. Web Service Resource Framework [OL]. <http://www.globus.org/wsrf>, 2004-06
- [2] Orriens B, Yang J, Papazoglou MP. A Framework for Business Rule Driven Service Composition[A]//Proceedings of 4th International Workshop on Conceptual Modeling Approaches for e-Business Dealing with Business Volatility, LNCS 2819[C]. Berlin; Springer-Verlag, 2003; 14-27
- [3] Jensen K, Kristensen L M, Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems [J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2007(9): 213-254
- [4] CPN tools[EB/OL]. <http://www.cpnools.org/>, 2013-09-15
- [5] Design/CPN[EB/OL]. <http://www.daimi.au.dk/designCPN/>, 2013-09-15
- [6] 岳昆, 王晓玲, 周傲英. Web 服务核心支撑技术: 研究综述[J]. 软件学报, 2004, 15(3): 428-442
- [7] Krishnan S, Wagstrom P, Laszewski G. GSFL: A workflow framework for grid services[R]. Technical Report, ANL/MCS-P980-0802. Argonne National Laboratory, 2002
- [8] 张磊, 苑伟政, 王伟. 基于领域本体的制造网格服务自动组合技术研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(1): 57-60
- [9] 吕庆中, 刘梅彦, 麦中凡. GSCoL: OGSA 框架下的网格服务组合语言[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(3): 7-11, 44
- [10] Narayanan S, McIlraith S. Analysis and simulation of Web services[J]. Computer Networks, 2003, 42(5): 675-693
- [11] Peterson J L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems [M]. Englewood Cliffs; Prentice-Hall, 1981
- [12] Murata T. Petri nets; Properties, analysis and applications[J]. Proceedings of IEEE, 1989, 77(4): 541-580
- [13] 蒋昌俊. Petri 网的行为理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003
- [14] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [15] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [16] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [17] Aalst WMP. Verification of Workflow Nets[A]//Application and Theory of Petri Nets 1997, LNCS 1248[C]. Berlin; Springer-Verlag, 1997; 407-426
- [18] Zhai Zheng-li, Zhou Lei, Yang Yang, et al. A Multi-agent Framework for Grid Service Workflow Embedded with Coloured Petri Nets[A]//Proceedings of 4th International Conference on Grid and Cooperative Computing, LNCS 3795[C]. Berlin; Springer-Verlag, 2005; 117-122
- [19] Zhai Zheng-li, Yang Yang, Tian Zhi-min. A Multi-agent based Grid Service Discovery Framework Using Fuzzy Petri Net and Ontology[A]//Proceedings of 8th Asia Pacific Web Conference, LNCS3841[C]. Berlin; Springer-Verlag, 2006; 911-916
- [20] Adam N, Alturi V, Huang W K. Modeling and Analysing of Workflows Using Petri Nets[J]. Journal of Intelligent Information Systems, 1998, 10(2): 131-158
- [21] Hu X, Hu M, Liu S. Petri Net Markup Language[J]. Computer Technology and Development, 2011, 21(12): 66-69