

Web 服务组合行为一致性的形式化描述和分析

李 劲^{1,2*}, 张 华¹, 吴浩雄¹, 向 军¹

(1. 湖北民族学院 信息工程学院, 湖北 恩施 445000; 2. 华中师范大学 信息管理系, 武汉 430079)

(* 通信作者电子邮箱 lj05921@tom.com)

摘 要: Web 服务编排和 Web 服务编制从全局和局部分别定义了 Web 服务组合的全局交互行为和每个参与者的局部行为, 为了保证 Web 服务组合实现的正确性, Web 服务组合的全局交互行为和每个参与者的局部行为必须是一致的。首先利用进程代数给出了对 Web 服务组合的全局交互行为、局部行为以及二者之间的映射关系的形式化描述, 在此基础上分别通过分析全局会话变迁和局部进程变迁的关系和进程互相似理论给出了 Web 服务组合全局交互行为和局部行为的一致性的两个形式化判定准则。同时通过案例说明了如何形式化地检测 Web 服务组合的全局交互行为和局部行为之间的一致性。结果显示提出的 Web 服务组合一致性形式化定义和检测方法能检测组合行为的一致性, 从而能有效地保证 Web 服务组合的正确性。

关键词: Web 服务组合; 一致性检查; Web 服务; 形式化方法

中图分类号: TP311.5 **文献标志码:** A

Formal description and analysis of conformance of composite Web service behavior

LI Jin^{1,2*}, ZHANG Hua¹, WU Hao-xiong¹, XIANG Jun¹

(1. School of Information Engineering, Hubei University for Nationalities, Enshi Hubei 445000, China;

2. Department of Information and Management, Central China Normal University, Wuhan Hubei 430079, China)

Abstract: Web service choreography and orchestration defines the global interaction of composite Web service and the local behavior of each participant from global and local perspectives, respectively. The conformance of each participant's local behavior to global interaction is the guarantee of the correctness of Web service composition. The paper firstly presented a set of definitions to formally describe the global interaction of composite Web service, the local behavior of each participant and the mapping rules between them based on process algebra. Accordingly, two formal judgmental rules for the conformance of each participant's local behavior to global interaction were proposed. The two formal rules were based on the relationship between the transition of global interaction and local process and bisimulation theorem. At last, the conformance formal checking approach was described through a case study. The result of the case study shows that the proposed conformance definition of Web service composition and conformance checking approach can formally check the conformance of Web service composition effectively. As a result, the correctness of Web service composition can be guaranteed.

Key words: Web services composition; conformance test; Web services; formal method

0 引言

云计算作为一种基于互联网、以服务方式提供的新型计算模式, 目前已引起工业界和学术界的广泛关注, 其服务高度互操作、跨平台和松耦合等特点使得服务之间能够组合形成功能强大的应用^[1]。云计算中 Web 服务是基本的计算实体。但是, 单一的 Web 服务功能是有限的, 难以满足不断变化的业务需求, 因此有必要将现有的单个、基本的 Web 服务组合起来, 以实现功能增值的 Web 服务来满足不断变化的业务需求。因此, Web 服务组合已经成为实现云计算按需服务的关键技术。

Web 服务组合的一个重要手段是基于工作流的方法^[2], 即将 Web 服务看成一个商业流程 (business process), 而 Web 服务组合则是不同商业流程的组合执行。基于工作流的 Web 服务组合可以从两个层次来描述^[3-4]: Web 服务编排 (choreography) 的和 Web 服务编制 (orchestration)。Web 服务

编排规范由 Web 服务编排描述语言^[5] (Web Services Choreography Description Language, WS-CDL) 来定义, 它从全局的角度描述了 Web 服务组合的全局交互行为; Web 服务编制规范则由 Web 服务商业流程执行语言^[6] (Business Process Execution Language for Web Services, BPEL4WS) 来定义, 它从一个局部参与者的角度来定义该参与者其他 Web 服务的交互操作, 即描述了 Web 服务组合参与者的局部行为。

Web 服务组合的全局交互行为可以看作 Web 服务组合的设计时规范 (specification), 它规定了每个参与者应该如何交互; 而 Web 服务组合的实现 (implementation) 则由 Web 服务组合的每个参与者局部行为来描述。因此, 对于一个正确实现的 Web 服务组合, 其每个参与者的局部行为应该遵守 Web 服务组合的设计时规范, 即必须和 Web 服务组合的全局交互行为保持一致 (conformance)。

WS-CDL 和 BPEL4WS 从两个不同层次上描述了 Web 服务组合的全局交互行为和局部行为。但是 WS-CDL 和

收稿日期: 2011-07-18; 修回日期: 2011-09-23。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61040006); 湖北省自然科学基金资助项目 (2010CDZ027); 湖北省教育厅科技项目 (B20101909)。

作者简介: 李劲 (1973 -), 男, 湖北恩施人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向: 数据挖掘、Web 服务; 张华 (1978 -), 男, 湖北恩施人, 讲师, 硕士, 主要研究方向: 计算机网络; 吴浩雄 (1979 -), 男, 湖北建始人, 工程师, 主要研究方向: 网络安全; 向军 (1978 -), 男, 湖北来凤人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 移动计算、实时数据库系统、软件测试。

BPEL4WS 都是基于 XML 的描述性语言,缺乏形式化的验证机制来保证 Web 服务组合的参与者之间的正确交互;特别是当用 WS-CDL 和 BPEL4WS 规范分别定义了 Web 服务组合的全局交互行为和局部行为后,仍然缺乏形式化的定义和验证方法以保证 Web 服务组合全局交互行为和局部行为的一致性。

解决上述问题的一种有效方法是利用形式化的方法分别对 Web 服务组合的全局交互行为和局部行为建立形式化的描述,并利用形式化的验证方法和工具来验证 Web 服务组合参与者的动态行为能正确交互以及全局交互行为和局部行为的一致性,从而保证 Web 服务组合的正确性。相关的研究工作有:Samik 等^[7]针对 Web 服务在异步通信的情况下,Web 服务全局交互行为与局部行为的一致性难以判定的问题,提出了在一定条件下 Web 服务之间的异步通信可以被同步通信来替代而不会影响服务之间交互的一致性。Kohei 等^[8]利用类型化理论,对 Web 服务的全局交互行为和局部行为,特别是 Web 服务之间的会话建立了类型化的形式化模型,给出了类型化操作语义,并给出了全局到局部的类型化映射规则。Nadia 等^[9]定义了简单的形式化语言来分别描述 Web 服务全局和局部行为,并在此基础上给出了 Web 服务间全局交互行为和局部行为一致性的形式化定义,但是有些 WS-CDL 中的行为在 CL 中不能描述,而且他们没有定义如何将基于全局的交互协作映射到参与协作的每个角色上从而得到每个角色的局部行为。Fu 等^[10]利用 Büchi 自动机来形式化描述 Web 服务的局部动态行为和全局交互行为(他们将之定义为全局会话),同时将全局会话映射分解到每个角色的局部行为上。Baldoni 等^[11]则利用有限状态自动机来描述服务组合,并验证全局行为和局部行为的一致性。

本文定义了形式化模型框架 Formalized WS-CDL 来描述 Web 服务组合的全局交互行为,同时利用进程代数 Pi-演算形式化描述每个参与者局部行为,并给出了从全局交互行为到局部行为的映射关系。在以上基础上,给出了 Web 服务组合全局交互行为和局部行为一致性的两个形式化判定准则。最后通过案例给出了 Web 服务组合全局交互行为和局部行为一致性的判定方法。

1 Formalized WS-CDL

WS-CDL 规范描述了 Web 服务组合的全局交互行为。为了形式化建模 Web 服务组合的全局交互,本章定义了 WS-CDL 的形式化模型框架 Formalized WS-CDL,包括语法和操作语义以及从全局交互行为到局部行为的映射。

1.1 WS-CDL 基本概念的形式化描述

在 WS-CDL 中定义的 Activities 元素描述了 Web 服务之间的相互交互和协作的动作。在 Formalized WS-CDL 中用一个交互 Interaction 来表示一个 Activity 或 Activities 的组合(如顺序、迭代、并发执行)。参与一个交互的每个 Web 服务在 WS-CDL 规范里由元素 Role(角色)来定义。

对于一个 Interaction I ,其中一个参与角色 r 有以下重要的属性:代表角色 r 状态的变量以及角色 r 同其他角色进行交互的通道。特别地, $v(r)$ 表示角色 r 所拥有的一个变量 v 。

角色间的交互通过通道进行,通道由通道名来唯一地标识。通道上的类型有: request、respond、request-respond,分别对应了三种基本交互类型:请求、响应、请求—响应。通道位于信息的接受者上。如果角色 r_a 通过通道 ch 发送信息给 r_b ,则通道 ch 位于角色 r_b ,记为 $ch:r_b$ 。

1.2 Formalized WS-CDL 的语法

对一个 Interaction I ,其形式化描述的语法如下:

$$I ::= I_B \mid I_1 + I_2 \mid I_1 \parallel S_2 \mid I_1, I_2 \mid (\text{while } A) \text{ do } I \mid$$

$$(\text{if } A) \text{ do } I \mid I_{\text{call}}$$

$$I_B ::= I_{\text{no}} \mid I_{\text{silent}} \mid I_{\text{assign}} \mid I_{\text{req}} \mid I_{\text{resp}} \mid I_{\text{rr}} \mid I_{\text{rs}} \mid \text{NULL}$$

$$I_{\text{no}} ::= r(0)$$

$$I_{\text{silent}} ::= r(\tau)$$

$$I_{\text{assign}} ::= e(r) \rightarrow x(r)$$

$$I_{\text{req}} ::= r_1 \rightarrow r_2 [ch:r_2, x(r_1) \rightarrow y(r_2)]$$

$$I_{\text{resp}} ::= r_1 \leftarrow r_2 [ch:r_1, x(r_1) \leftarrow y(r_2)]$$

$$I_{\text{rr}} ::= r_1 \rightarrow \leftarrow r_2 [ch:r_2, x(r_1) \rightarrow y(r_2), s(r_1) \leftarrow t(r_2)]$$

$$I_{\text{rs}} ::= r_1 \rightarrow \leftarrow r_2 [ch:r_2, x(r_1) \rightarrow y(r_2);$$

$$ch:r_1, s(r_1) \leftarrow t(r_2)]$$

在 Interaction I 的形式化描述语法中: $I_1 + I_2$ 表示交互的选择执行; $I_1 \parallel I_2$ 代表交互的并行执行; I_1, I_2 代表交互的顺序执行; $(\text{while } A) \text{ do } I$ 表示迭代执行的交互,如果条件 A 为真,交互 I 被迭代执行直到条件 A 为假; $(\text{if } A) \text{ do } I$ 表示条件执行的交互,如果条件 A 为真,则交互 I 被执行; I_B 为原子不可分的基本交互动作。

基本交互动作 I_B 包括 $I_{\text{no}}, I_{\text{silent}}, I_{\text{assign}}, I_{\text{req}}, I_{\text{resp}}, I_{\text{rr}}, I_{\text{rs}}$ 和 NULL 。 I_{req} 为角色 r_1 通过通道 $ch:r_2$ 向 r_2 发送的请求行为,角色 r_1 的变量 x 发送到角色 r_2 后保存在变量 y 中; I_{resp} 为角色 r_2 通过通道 $ch:r_1$ 向 r_1 发送的应答行为; I_{rr} 为角色 r_1 和 r_2 间的请求—应答行为, r_1 通过通道 $ch:r_2$ 向 r_2 发送请求, $x(r_1)$ 通过请求被传递到 $y(r_2)$, r_2 通过通道 $ch:r_2$ 向 r_1 发送应答, $t(r_2)$ 通过应答被传递到 $s(r_1)$; I_{rr} 和 I_{rs} 的区别在于前者的请求和应答通过同一个通道传递,而后者的请求和应答通过不同的通道完成; NULL 代表一个空交互行为(即不执行任何交互); I_{no} 为角色 r 上不执行任何动作的行为; I_{silent} 为角色 r 上的一个不可见的内部行为,对全局交互没有任何影响; I_{assign} 为角色 r 上变量 $x(r)$ 被赋值为 $e(r)$ 的赋值行为。

1.3 Formalized WS-CDL 的操作语义

Formalized WS-CDL 的操作语义描述了 Web 服务全局交互行为的动态变迁,它通过形如 $I \xrightarrow{A, \alpha} I'$ 的交互行为变迁来描述。 $I \xrightarrow{A, \alpha} I'$ 是指当条件 A 为真同时交互 I 执行一个原子不可分的基本交互 α 后其行为变迁为交互 I' 。基本交互 α 定义为:

$$\alpha ::= I_{\text{no}} \mid I_{\text{silent}} \mid I_{\text{assign}} \mid I_{\text{req}} \mid I_{\text{resp}} \mid I_{\text{rr}} \mid I_{\text{rs}} \mid \text{NULL}$$

Formalized WS-CDL 的推演规则定义如下:

$$1) \frac{I \equiv I' \quad I \xrightarrow{A, \alpha} J \quad J \equiv J'}{I' \xrightarrow{A, \alpha} J'}$$

$$2) \frac{}{\alpha \xrightarrow{\text{true}, \alpha} \text{NULL}}$$

$$3) \frac{}{\alpha, S \xrightarrow{\text{true}, \alpha} S}$$

$$4) \frac{S \xrightarrow{A, \alpha} S'}{S, T \xrightarrow{A, \alpha} S', T}$$

$$5) \frac{S \xrightarrow{A, \alpha} S'}{S \parallel T \xrightarrow{A, \alpha} S' \parallel T}$$

$$6) \frac{S_1 \xrightarrow{A, \alpha} S_1'}{S_1 + S_2 \xrightarrow{A, \alpha} S_1'}$$

- $$\begin{aligned}
7) & \frac{}{(\text{while } A) \text{ do } I \xrightarrow{\neg A, \alpha} \text{NULL}} \\
8) & \frac{I \xrightarrow{A, \alpha} I'}{(\text{while } A) \text{ do } I \xrightarrow{A, \alpha} I'. (\text{while } A) \text{ do } I} \\
9) & \frac{}{(\text{if } A) \text{ do } I \xrightarrow{\neg A, \alpha} \text{NULL}} \\
10) & \frac{I \xrightarrow{A, \alpha} I'}{(\text{if } A) \text{ do } I \xrightarrow{A, \alpha} I'}.
\end{aligned}$$

每个规则的形式为 $\frac{\text{条件}}{\text{结论}}$, 若条件为空则表示条件为真。其中:

规则1) 说明了同构的交互行为其变迁过程是相同的。规则2) 指一个基本交互行为的交互动作被执行后变迁为 NULL, 即基本交互行为具有原子不可分性。规则3) 和4) 定义了会话的顺序执行, 说明了顺序执行的会话在执行一步基本会话 α 后是如何变迁的。规则5) 和6) 分别定义了并行、选择执行的会话在执行一步基本会话 α 后是如何变迁的。规则7) 和8) 则定义了会话的迭代执行, 其中规则7) 指当迭代条件为假时, 交互 $(\text{while } A) \text{ do } I$ 不会被执行, 从而表现为空行为; 规则8) 指当迭代条件为真, 同时交互 I 经过基本交互行为 α 的执行后其行为表现为 I' , 则交互 $(\text{while } A) \text{ do } I$ 经过基本交互行为 α 的执行后其行为表现为 I' 。 $(\text{while } A) \text{ do } I$, 即首先执行完 I' 后再继续判断迭代条件 A 是否为真。规则9) 和10) 定义了会话的条件判断执行, 它们的解释与规则7) 和8) 类似。

2 Web 服务局部行为的形式化描述

Web 服务的局部行为是指从一个 Web 服务组合的参与者(即某一个 Web 服务)的角度来看该 Web 服务是如何与其他参与组合的 Web 服务进行交互。在这里我们采用进程代数 Pi-演算^[12]来描述一个 Web 服务的局部行为, 即把每个参与组合的 Web 服务的局部行为用 Pi-演算形式化描述为一个 Pi-演算进程。一个 Pi-演算的进程 P 可以定义如下:

$$\begin{aligned}
P ::= & 0 \mid \bar{a}x. P \mid a(x). P \mid \sum_{i \in I} P_i \mid [x = y]P \mid \\
& [x \neq y]P \mid (vx)P \mid !P \mid A(y_1, \dots, y_n) \mid P_1 \mid P_2
\end{aligned}$$

其中 $\bar{a}x$ 表示通过通道 a 输出变量 x ; $a(x)$ 表示从通道 a 输入一个变量; 空进程 0 表示不执行任何动作; $\bar{a}x. P$ 表示先执行前缀动作 $\bar{a}x$, 然后执行进程 P ; $\sum_{i \in I} P_i$ 表示选择执行; $[x = y]P$ 表示当变量 $x = y$ 时, 执行进程 P ; $[x \neq y]P$ 表示当变量 $x \neq y$ 时, 执行进程 P ; $(vx)P$ 表示名字 x 被局限在进程 P 内部, P 外部不可见; $!P$ 表示 P 被重复执行无穷多次; $A(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 为带实参 y_1, y_2, \dots, y_n 的进程调用; $P_1 \mid P_2$ 表示2个进程的并行执行。

Web 服务局部行为的动态变化同样可以由 Pi-演算的操作语义来表示。在 Pi-演算理论中, $P \xrightarrow{\alpha} P'$ 表示进程 P 经过动作 α 变迁成为进程 P' 。由于篇幅所限, 这里不再详细介绍 Pi-演算的操作语义。

3 从全局交互行为到局部行为的映射

作为 Web 服务组合的设计规范, Web 服务编排规定了 Web 服务组合的全局交互行为。因此如果将 Web 服务组合的全局交互行为的形式化描述映射到每个参与者(角色)上, 就可以得到每个角色局部行为的形式化描述。映射的过程为: 对于一个由 Formalized WS-CDL 描述的全局交互 I , 对 I 的

每个参与者 r , 执行从全局到局部的映射, 得到描述角色 r 局部行为的 Pi-演算进程。一个交互 I 对角色 r 的映射记为 $P(I, r)$, 即 $P(I, r)$ 为角色 r 所对应的 Pi-演算进程。

从全局交互行为到局部行为的主要映射规则如下:

- $$\begin{aligned}
1) P(I_{\text{req}}, r) &= \begin{cases} \bar{c}hx, & r = r1 \\ ch(y), & r = r2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
2) P(I_{\text{resp}}, r) &= \begin{cases} ch(x), & r = r1 \\ \bar{c}hy, & r = r2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
3) P(I_{\pi}, r) &= \begin{cases} \bar{c}hx. ch(s), & r = r1 \\ ch(y). \bar{c}ht, & r = r2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
4) P(I_{\text{res}}, r) &= \begin{cases} \bar{c}h1x. ch2(s), & r = r1 \\ ch1(y). \bar{c}h2t, & r = r2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
5) P(I_{\text{assign}}, r) &= \begin{cases} (vsvevx)(\bar{s}e.s(x)), & r = r_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
6) P(I_{\text{no}}, r) &= 0; \text{ all } r \\
7) P(I_{\text{silent}}, r) &= \begin{cases} \tau, & r = r_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
8) P(I_1 \parallel I_2, r) &= P(I_1, r) \mid P(I_2, r) \\
9) P(I_1 \mid I_2, r) &= P(I_1, r). P(I_2, r) \\
10) P(I_1 \text{ or } I_2, r) &= P(I_1, r) + P(I_2, r)
\end{aligned}$$

以上规则中的 0 表示一个全局交互行为对不相关角色做映射时所得到的局部 Pi-演算进程为空进程 0 。规则1) 指一个 Request 类型的基本交互 I_{req} 对参角色 r_1 的映射得到的 Pi-演算进程为 $\bar{c}hx$, 即 r_1 作为请求者从通道 ch 输出变量 x ; 类似地, I_{req} 对参角色 r_2 的映射得到的 Pi-演算进程为 $ch(y)$, 即从通道 ch 输入变量 y ; 对其他无关角色的映射结果为空进程 0 。规则2)、3)、4)、6)、7) 的映射方法与规则1) 类似。规则7) 中的 τ 代表 Pi-演算的一个内部动作。规则5) 利用内部通道 s 上输入输出内部变量来模拟变量间的赋值。规则8)、9)、10) 分别指两个并行、顺序和选择执行的交互行为对角色 r 的映射得到的也分别是两个并行、顺序和选择执行的 Pi-演算进程。

4 组合服务行为一致性形式化描述

一个组合 Web 服务的各个子服务之间的交互行为可以从全局和局部两个不同的角度来定义, 本文第2、3章分别从两个不同的角度给出了参与 Web 服务组合的各角色间的全局交互行为以及每个角色的局部行为的形式化描述。显然, 组合 Web 服务的各个子服务之间的交互行为的全局定义和局部定义必须保证一致性, 即:

1) 对于任意2个角色 r_i, r_j 之间发生的一次全局交互, 必须对应着角色 r_i, r_j 相应的局部行为。例如: 如果根据 Web 服务组合的全局定义, 角色 r_i 向 r_j 发送了请求, 则角色 r_i 的局部行为必须存在一个输出动作, 同时角色 r_j 的局部行为必须存在一个输入动作。

2) 任意2个角色 r_i, r_j 之间发生的一次全局交互和角色 r_i, r_j 相应的局部行为的逻辑顺序必须一致。例如: 如果根据 Web 服务组合的全局定义, 角色 r_i 向 r_j 发送了请求, 接着角色 r_j 向角色 r_i 返回了应答, 则角色 r_i, r_j 的局部行为都必须存在一个输出动作和一个输入动作, 且角色 r_i 的输出动作发生在前, 输入动作发生在后, 而角色 r_j 则正好相反。

为了给出 Web 服务全局交互行为和局部行为一致性的形式化定义,首先给出如下定义。

定义 1 Web 服务组合的局部行为。对于一个由 Formalized WS-CDL 描述的一个全局交互 I ,其对应的局部行为记为 $L(I)$,且 $L(I) = \prod_r P_r$,其中 P_r 为参与全局交互 I 的角色 r 对应的 Pi-演算进程, \prod 代表多个 Pi-演算进程的“|”运算。

定义 2 行为一致性符号表示。如果全局交互 I 和其对应的局部行为 $L(I)$ 是一致的,则记为 $I \equiv L(I)$ 。

本章给出了从 Web 服务全局交互行为到局部行为的映射规则,通过映射规则可以把定义好的 Web 服务组合的全局交互行为通过映射分解到每个相关的角色上,从而得到每个角色的局部行为。这些映射规则保证了基本的全局交互动作映射分解得到的是 Pi-演算的输入输出动作或者对行为的一致性没有影响的 Pi-演算内部动作或空动作,动作的逻辑次序也一致。因此,如果每个角色的局部行为都是通过 Web 服务组合的全局交互行为通过映射分解而得到的,则 Web 服务组合的全局交互行为和局部行为是一致的。因此下面给出 Web 服务组合全局交互行为和局部行为一致性的定义。

定义 3 行为一致性。对于一个由 Formalized WS-CDL 描述的一个全局交互 I ,如果其对应的局部行为 $L(I) = \prod_r P(I, r)$,则 $I \equiv L(I)$ 。其中 $P(I, r)$ 为参与全局交互 I 的角色 r 由全局交互 I 映射分解得到的局部行为的 Pi-演算进程描述。

然而,当每个角色的局部行为不是由全局交互行为映射分解得到,而是直接根据业务逻辑来描述和设计时,如何判断全局行为和局部行为的一致性是一个必须要解决的问题。

角色间的全局交互行为的动态变化是通过 Formalized WS-CDL 的操作语义,即形如 $I \xrightarrow{p, \alpha} I'$ 的会话变迁规则来描述,每个角色的局部行为的动态变化通过 Pi-演算的操作语义,即形如 $P \xrightarrow{\alpha} P'$ 的进程变迁来描述,因此可以通过全局会话变迁和局部进程变迁的关系来给出全局行为和局部行为一致性的另一个定义。其基本思想是:如果全局交互 I 和其对应的局部行为 $L(I)$ 是一致的,则当全局会话 I 执行某个全局交互动作 α 而变迁为会话 I' ,同时全局交互动作 α 的相关角色执行了相应的局部动作后导致局部行为 $L(I)$ 变迁为 $L(I')$,则 I' 和 $L(I')$ 应该仍然保持一致。

为了方便给出行为一致性的判定准则,下面首先给出相关的形式化符号定义,然后在以上分析的基础上给出全局行为和局部行为的一致性的两个判定准则。

定义 4 全局交互行为相关角色集合。对于一个 Web 服务间的全局交互行为 I ,参与该交互的角色集合记为 $I(R)$,集合中角色的个数记为 $|I(R)|$ 。

定义 5 全局交互行为对局部映射得到的局部行为集合。对于一个 Web 服务间的全局交互行为 I ,对参与交互的每个角色 $r \in I(R)$ 作映射得到的局部行为的集合记为 $S_L(I)$, $S_L(I) = \bigcup_{r_i \in I(R)} P(I, r_i)$ 。

定义 6 行为一致性判定准则 1。全局交互 I 和其对应的局部行为 $L(I)$ 是一致的,即 $I \equiv L(I)$,如果 $I \equiv L(I)$ 蕴含着:如果对于基本交互行为 α 有 $I \xrightarrow{\text{true}, \alpha} I'$,则对 $\forall r_i \in I(R)$, $i = 1, 2, \dots, |I(R)|$, $\exists P_{r_i}'$,使得 $P_{r_i} \xrightarrow{P(I, r_i)} P_{r_i}', L(I') =$

$$\prod_{r_i \in I(R)} P_{r_i}' \mid \prod_{r \notin I(R)} P_r, I' \equiv L(I');$$

定义 6 通过分析全局会话变迁和局部进程变迁的关系给出了全局行为和局部行为的一致性的形式化定义。在定义 3 和定义 6 的基础上,可以利用 Pi-演算理论中进程的动态行为的等价性质和互相似理论来分析如何判定 Web 服务组合的全局交互行为和局部行为的一致性。

互相似和动态行为的等价是 Pi-演算为了证明不同并发系统的行为等价性而建立的一套概念和定理。互相似是指从系统外观察者的角度来看不同并发系统的行为的等价性。在 Pi-演算理论里,进程 P 和 Q 是互相似的蕴涵着当进程 $P \xrightarrow{\alpha} P'$,则必定存在进程 Q' ,使得 $Q \xrightarrow{\alpha} Q'$,且 P' 和 Q' 仍然是互相似的。如果 P 和 Q 是互相似的,则记为 $P \trianglelefteq Q$ 。

根据 Pi-演算里进程互相似的定义,如果进程 P 和 Q 是互相似的,则每当进程 P 执行一个动作,则进程 Q 也执行同样的动作,且进程 P 和 Q 执行同样动作后变迁成为的后续进程也是互相似的。根据定义 3,全局会话 I 和 $\prod_r P(I, r)$ 是一致的,因此如果对于参与全局会话的每个角色 r ,其局部动态行为 P_r 和 $P(I, r)$ 完全一致,则全局会话 I 和 $\prod_r P(I, r)$ 是一致的。在此基础上,下面给出 Web 服务组合的全局交互行为和局部行为一致性的另一个判定准则。

定义 7 行为一致性判定准则 2。全局会话 I 和其对应的局部行为 $L(I)$ 是一致的,即 $I \equiv L(I)$,如果 $L(I) = \prod_r P(I, r)$ 且对每个角色 r ,有 $P_r \trianglelefteq P(I, r)$ 。其中 P_r 为描述参与全局交互 I 的角色 r 的局部行为 Pi-演算进程, $P(I, r)$ 为全局交互 I 对角色 r 作映射而得到的 Pi-演算进程。

5 行为一致性的判定

本章通过一个案例来说明行为一致性的判定方法。考虑一个订单系统的 Web 服务组合案例,该案例来自于 WS-CDL 规范 1.0 中的例子并作了简化。首先用 Formalized WS-CDL 来描述角色间的全局交互行为。这个 Web 服务组合案例的基于全局的交互如图 1 和图 2 所示。

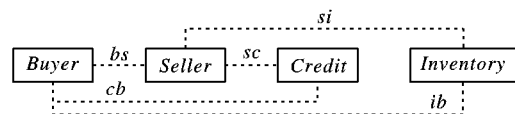


图1 订单系统角色间交互通道

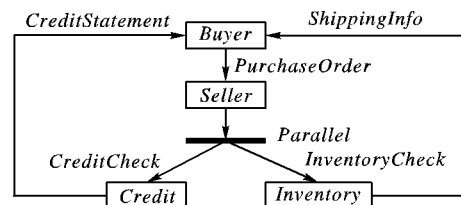


图2 角色间的全局交互

在这个案例中 4 个角色分别为:Buyer(记为 B)、Seller(记为 S)、Credit Checking Service(记为 C) 和 Inventory(记为 I)。图 1 的虚线为 4 个角色之间相互交互的通道:Buyer 和 Seller 间交互的通道为 bs , Seller 和 Credit Checking Service 间交互通道为 sc , Seller 和 Inventory 间交互通道为 si , Buyer 和 Credit Checking Service 间交互的通道为 cb , Buyer 和 Inventory 间交互的通道为 ib 。4 个角色间的全局交互如图 2 所示:Buyer 向 Seller 发送订单 ($PurchaseOrder$); Seller 收到订单后发起两个并行的交互:

一是向 *Credit Checking Service* 核查信用卡 (*CreditCheck*), *Credit Checking Service* 核查后向 *Buyer* 发送信用卡账单 (*CreditStatement*); 另外一个并行的交互为 *Seller* 首先向 *Inventory* 核查产品生产情况 (*InventoryCheck*), *Inventory* 核查产品生产情况后向 *Buyer* 发送送货单 (*ShippingInfo*)。

这4个角色间的全局交互协作过程用 Formalized WS-CDL 可以描述如下:

$$I_{cho} = I_{order} \cdot (I_{credit} \parallel I_{inventory})$$

其中 I_{order} 为 *Buyer* 和 *Seller* 之间的交互, $I_{credit} \parallel I_{inventory}$ 为两个并发的交互行为: I_{credit} 形式化描述了从 *Seller* 到 *Credit Checking Service* 以及从 *Credit Checking Service* 到 *Buyer* 的顺序交互; $I_{inventory}$ 为从 *Seller* 到 *Inventory* 以及从 *Inventory* 到 *Buyer* 的顺序交互。它们的形式化描述为:

$$I_{order} = B \rightarrow S[bs; S, PurchaseOrder(B) \rightarrow PurchaseOrder(S)]$$

$$I_{credit} = S \rightarrow C[sc; C, CreditCheck(S) \rightarrow CreditCheck(C)]. C \rightarrow B[cb; B, CreditStatement(C) \rightarrow CreditStatement(B)]$$

$$I_{inventory} = S \rightarrow I[si; I, InventoryCheck(S) \rightarrow InventoryCheck(I)]. I \rightarrow B[ib; B, ShippingInfo(I) \rightarrow ShippingInfo(B)]$$

$$I_{cho} = B \rightarrow S[bs; S, PurchaseOrder(B) \rightarrow PurchaseOrder(S)]. (S \rightarrow C[sc; C, CreditCheck(S) \rightarrow CreditCheck(C)]. C \rightarrow B[cb; B, CreditStatement(C) \rightarrow CreditStatement(B)] \parallel S \rightarrow I[si; I, InventoryCheck(S) \rightarrow InventoryCheck(I)]. I \rightarrow B[ib; B, ShippingInfo(I) \rightarrow ShippingInfo(B)]$$

若这4个角色的局部行为的 Pi- 演算描述分别记为 P_B (*Buyer* 的局部行为)、 P_S (*Seller* 的局部行为)、 P_C (*Credit Checking Service* 的局部行为)、 P_I (*Inventory* 的局部行为), 且分别为:

$$P_B = \overline{bs}PurchaseOrder. (cb(CreditStatement). 0 \mid ib(ShippingInfo). 0)$$

$$P_S = bs(PurchaseOrder). (\overline{sc}CreditCheck. 0 \mid \overline{si}InventoryCheck. 0)$$

$$P_C = sc(CreditCheck). \overline{cb}CreditStatement. 0$$

$$P_I = si(InventoryCheck). \overline{ib}ShippingInfo. 0$$

首先用定义6来判断该 Web 服务组合的全局交互行为 I_{cho} 是否和局部行为 $P_B \mid P_S \mid P_C \mid P_I$ 一致。假设 $I_{cho} \cong P_C \mid P_D \mid P_B \mid P_W$, 首先利用 Formalized WS-CDL 操作语义对 I_{cho} 的一种可能的会话顺序作推导:

1) 基于规则3(会话的顺序执行)和2(基本会话的原子性), 可以推导出:

$$I_{cho} = I_{order} \cdot (I_{credit} \parallel I_{inventory}) \xrightarrow{\text{true}, \alpha} \text{NULL} \cdot (I_{credit} \parallel I_{inventory})$$

其中:

$$\alpha = B \rightarrow S[bs; S, PurchaseOrder(B) \rightarrow PurchaseOrder(S)]$$

根据定义4~6, 对于全局基本交互 $\alpha, I(\alpha) = \{B, S\}$, $P(\alpha, B) = \overline{bs}PurchaseOrder, P(\alpha, S) = bs(PurchaseOrder)$ 。同时对于角色 B, S 的 Pi- 演算进程 P_B 和 P_S , 可以推导出:

$$P_B \xrightarrow{P(\alpha, B)} P_B'$$

$$P_B' = cb(CreditStatement). 0 \mid ib(ShippingInfo). 0$$

$$P_S \xrightarrow{P(\alpha, C)} P_S'$$

$$P_S' = \overline{sc}CreditCheck. 0 \mid \overline{si}InventoryCheck. 0$$

因此根据定义6和假设, 有

$$\text{NULL} \cdot (I_{credit} \parallel I_{inventory}) \cong P_B' \mid P_S' \mid P_C \mid P_I$$

2) 基于规则3和4(会话的顺序执行)、规则2(基本会话的原子性)、规则5(会话的并行执行), 可以推导出:

$$\text{NULL} \cdot (I_{credit} \parallel I_{inventory}) \xrightarrow{\text{true}, \alpha^*} \text{NULL} \cdot (\text{NULL} \parallel I_{inventory})$$

其中:

$$\alpha^* = S \rightarrow C[sc; C, CreditCheck(S) \rightarrow CreditCheck(C)]. C \rightarrow B[cb; B, CreditStatement(C) \rightarrow CreditStatement(B)]$$

为了节省篇幅, 这里 α^* 代表两步连续的基本交互。同样地根据定义4~6, 对于全局基本交互 $\alpha^*, I(\alpha^*) = \{S, C, B\}$, $P(\alpha^*, S) = \overline{sc}CreditCheck, P(\alpha^*, C) = sc(CreditCheck), \overline{cb}CreditStatement, P(\alpha^*, B) = cb(CreditStatement)$ 。同时对于这两步连续的基本交互的参与者 S, C, B 各自的 Pi- 演算进程, 可以推导出:

$$P_B' \xrightarrow{P(\alpha^*, B)} P_B'', P_B'' = ib(ShippingInfo). 0$$

$$P_S' \xrightarrow{P(\alpha^*, S)} P_S'', P_S'' = \overline{si}InventoryCheck. 0$$

$$P_C \xrightarrow{P(\alpha^*, C)} P_C'', P_C'' = 0$$

因此根据定义6和推导步骤1)的结论, 得到:

$$\text{NULL} \cdot (\text{NULL} \parallel I_{inventory}) \cong P_B'' \mid P_S'' \mid P_C'' \mid P_I$$

3) 基于规则3和4(会话的顺序执行)、规则2(基本会话的原子性)、规则5(会话的并行执行), 可以推导出

$$\text{NULL} \cdot (\text{NULL} \parallel I_{inventory}) \xrightarrow{\text{true}, \alpha^*} \text{NULL} \cdot (\text{NULL} \parallel \text{NULL})$$

其中:

$$\alpha^* = S \rightarrow I[si; I, InventoryCheck(S) \rightarrow InventoryCheck(I)]. I \rightarrow B[ib; B, ShippingInfo(I) \rightarrow ShippingInfo(B)]$$

同样地根据定义4~6, 对于全局基本交互 $\alpha^*, I(\alpha^*) = \{S, I, B\}$, $P(\alpha^*, S) = \overline{si}InventoryCheck, P(\alpha^*, I) = si(InventoryCheck), \overline{ib}ShippingInfo, P(\alpha^*, B) = ib(ShippingInfo)$ 。同时对于这两步连续的基本交互的参与者 S, I, B 各自的 Pi- 演算进程, 可以推导出:

$$P_S'' \xrightarrow{si(InventoryCheck)} P_S''', P_S''' = 0$$

$$P_I \xrightarrow{P(\alpha^*, I)} P_I'', P_I'' = 0$$

$$P_B'' \xrightarrow{P(\alpha^*, B)} P_B''', P_B''' = 0$$

因此根据定义6和推导步骤2)的结论, 得到:

$$\text{NULL} \cdot (\text{NULL} \parallel \text{NULL}) = \text{NULL} \cong$$

$$P_B''' \mid P_S''' \mid P_C'' \mid P_I' = 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0 = 0$$

而 $\text{NULL} \Leftrightarrow 0$ 是成立的, 因此推导步骤1)~3)的结论以及最初的假设 $I_{cho} \cong P_C \mid P_D \mid P_B \mid P_W$ 也是成立的。对任何一种其他可能的会话顺序用同样的方法作推导, 都可以得出同样的结论。

根据定义7, 可以用另外一种方式判断 Web 服务组合的

全局交互行为和局部行为是否一致:首先将会话 I_{cho} 根据第 4 章定义的映射规则对角色 B, S, C, I 分解,得到:

$$P(I_{cho}, B) = \overline{bsPurchaseOrder}. (cb(CreditStatement). 0 | ib(ShippingInfo). 0)$$

$$P(I_{cho}, S) = \overline{bs(PurchaseOrder)}. (\overline{scCreditCheck}. 0 | \overline{siInventoryCheck}. 0)$$

$$P(I_{cho}, C) = \overline{sc(CreditCheck)}. cbCreditStatement. 0$$

$$P(I_{cho}, I) = \overline{si(InventoryCheck)}. ibShippingInfo. 0$$

然后判断 $P(I_{cho}, B), P(I_{cho}, S), P(I_{cho}, C), P(I_{cho}, I)$ 是否分别和这四个角色的局部交互行为 P_B, P_S, P_C, P_I 互相似。这里采用的是一个用来分析基于 Pi-演算描述的并发系统的工具 Mobility Workbench (MWB)^[13] 来判断 Pi-演算进程的互相似性,在 MWB 下,利用 eq 命令,可以验证它们彼此之间都是互相似的。因此, $I_{cho} \cong P_C | P_D | P_B$ 。

6 结语

Web 服务组合可以从全局和局部两个不同层次来描述参与组合的角色间的全局交互行为和每个角色的局部行为。为了保证 Web 服务组合全局交互行为和局部行为的一致性,本文通过对 Web 服务组合全局交互行为和局部行为的形式化描述以及从全局到局部的映射,给出了 Web 服务组合全局交互行为和局部行为的一致性的形式化定义和验证方法,以保证 Web 服务组合设计的正确性。

参考文献:

- [1] VOUK M A. Cloud computing—Issues, research and implementations [J]. Journal of Computing and Information Technology, 2008, 16(4): 235–246.
- [2] SRIVASTAVA B, KOEHLER J. Web service composition—current solutions and open problems [C]// ICAPS'03: Proceedings of the 13th International Conference on Automated Planning & Scheduling. Trento: [s. n.], 2003: 28–35.
- [3] BUCCHIARONE A, GNEISI S. A survey on services composition languages and models [C]// WS-MaTe: Proceedings of the International Workshop on Web Services Modeling and Testing. Palermo, Italy: [s. n.], 2006: 51–63.
- [4] DIJKMAN R, DUMAS M. Service-oriented design: a multi-view-point approach [J]. International Journal of Cooperative Information Systems, 2004, 13(4): 337–368.
- [5] KAVANTZAS N, BURDETT D, RIZINGER G, et al. Web services choreography description language: Version 1.0 [EB/OL]. (2005-09) [2011-04-09]. <http://www.w3.org/TR/WS-CDL-10/>.
- [6] ANDREWS T, CUBERA F, DHOLAKIA H, et al. Business process execution language for Web services: Version 1.1 [EB/OL]. (2005-09) [2011-04-09]. <http://www-128.ibm.com/developerworks/library/specification/ws-bpel/>.
- [7] SAMIK B, TEVFIK B. Choreography conformance via synchronizability [C]// WWW 2011: Proceedings of the 20th International World Wide Web Conference. New York: ACM, 2011: 795–804.
- [8] KOHEI H, NOBUKO Y, ANDI B, et al. Multiparty asynchronous session types [C]// POPL 2008: Proceedings of the 35th Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages. New York: ACM, 2011: 273–284.
- [9] NADIA B, ROBERTO G, CLAUDIO G. Choreography and orchestration: A synergic approach for system design [C]// ICSOC 2005: Proceedings of the third International Conference on Service Oriented Computing, LNCS 3826. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 228–240.
- [10] FU X, BULTAN T, SU J. Conversation protocols: a formalism for specification and verification of reactive electronic services [C]// CAV 2003: Proceedings of the 8th International Conference on Implementation and Application of Automata, LNCS 2759. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 188–200.
- [11] BALDONI M, BAROGLIO C, MARTELLI A, et al. Verifying the conformance of Web services to global interaction protocols: a first step [C]// WS-FM 2005: Proceedings of the 2th International Workshop on Web Services and Formal Methods, LNCS 3670. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 257–271.
- [12] MILNER R, PARROW J, WALKER D. A calculus of mobile process: Parts I and II [J]. Information and Computation, 1992, 100(1): 1–77.
- [13] VICTOR B, MOLLER F. The mobility workbench—A tool for the pi-calculus [C]// CAV'94: Proceedings of the 6th International Conference on Computer Aided Verification, LNCS 818. London: Springer-Verlag, 1994: 428–440.
- [14] FENG D, WONG K-P, WU C-M, et al. A technique for extracting physiological parameters and the required input function simultaneously from PET image measurements: theory and simulation study [J]. IEEE transactions on Information Technology in Biomedicine, 1997, 1(4): 243–254.
- [15] de GEUS-OEI L-F, VISSER E P, KRABBE P F M, et al. Comparison of image-derived and arterial input functions for estimating the rate of glucose metabolism in therapy-monitoring F-FDG PET studies [J]. The Journal of Nuclear Medicine, 2006, 47(6): 945–949.
- [16] FENG D, LI X-J, HUANG S-C. A new double modeling approach for dynamic cardiac PET studies using noise and spillover contaminated LV measurements [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 1996, 43(3): 319–327.
- [17] 周婷, 徐向民, 吕华琳. 基于医学图像分割的半自动 ROI 提取 [J]. 视频技术应用工程, 2007, 31(2): 78–80.
- [18] WONG K-P, FENG D. Segmentation of dynamic PET images using cluster analysis [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(1): 200–207.
- [19] DOMENICHELLI S, D'AMBROSIO D, TRESPIDI S, et al. Quantitative cardiac dynamic imaging of small animal PET images using cluster analysis [J]. Computers in Cardiology, 2008, 35: 337–340.
- [20] ZHENG X-J, TIAN G-J, HUANG S-C, et al. A hybrid clustering method for ROI delineation in small-animal dynamic PET images: application to the automatic estimation of FDG input functions [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2011, 15(2): 195–205.
- [21] HUANG H, TRUONG D. The virtual experimentation lab (regional tissue and integrated whole body) [CP/OL]. [2011-06-08]. <http://kis.nuc.ucla.edu/>.
- [22] TRUONG D. Mouse quantitation program [DB/OL]. [2011-04-15]. <http://dragon.nuc.ucla.edu>.

(上接第 537 页)