

基于概率模型检测的 Web 服务组合多目标验证

周女琪 周 宇

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 210016)

(江苏省软件新技术与产业化协同创新中心 南京 210023)

摘 要 Web 服务组合是服务计算领域的重要研究内容。用户的非功能性需求是 Web 服务组合中衡量服务的标准之一,然而开放环境下用户的需求具有一定的不确定性和多目标性特点。为了解决此种不确定性,提出了一种基于概率模型检测的多目标验证方法。首先,将 Web 服务组合过程建立为定量多目标马尔可夫决策过程,并将该模型转换为 PRISM 模型。同时,将不同的用户需求建模成多目标时序逻辑公式,使用概率模型检测器 PRISM 对其进行验证,获得多个目标约束下关键目标的期望值,并导出相关策略。最后,通过实例来进一步说明该方法的有效性与可行性。

关键词 Web 服务组合,概率模型检测,多目标验证,用户需求

中图分类号 TP305 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.08.052

Multi-objective Verification of Web Service Composition Based on Probabilistic Model Checking

ZHOU Nv-qi ZHOU Yu

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(The Collaborative Innovation Center of Novel Software Technology and Industrialization, Nanjing 210023, China)

Abstract Web service composition becomes an important research topic in service computing field. The non-functional requirements of the users are the most frequently used criteria for Web service composition. However, users' non-functional requirements have certain uncertainties and multi-objective characteristics in the open environments. This paper proposed a multi-objective verification method to tackle this problem. Firstly, the Web service composition process is modeled as a quantitative multi-objective Markov decision process, and then it is transformed to the PRISM language. Simultaneously, different user requirements are expressed by multi-objective temporal logic formulas. With the input of the above two models, the optimal solution is found via model checking. Finally, an example is delivered to illustrate the method and the experiment result indicates that the proposed approach can be used for Web service composition effectively.

Keywords Web service composition, Probabilistic model checking, Multi-objective verification, Requirements of users

1 引言

1.1 研究背景及意义

Web 服务组合是将不同的独立服务组合起来,以完成功能更强大的组合服务的技术^[1]。通过组合现有的单一服务来构建复杂和增值的应用,可大量减少部署时间与成本。随着 Web 服务技术的快速发展,功能属性类似而服务质量(Quality of Service, QoS)不同的服务的数量急速增加。根据服务质量为用户偏好选择的服务,被称为 QoS 感知的 Web 服务组合^[2]。

在面向服务架构(SOA)和面向服务计算(SOC)领域,QoS 感知的 Web 服务组合成为了目前的研究热点。如何选择具体服务,使服务组合的服务质量最大化,是服务组合研究中的关键。评判 Web 服务组合的服务质量的标准一般是用户的非功能性需求,如服务价格、提供商声誉、可靠性等。

然而,在复杂的开放环境下,用户的非功能属性具有一定

的不确定性和多目标性,不同的用户有不同的需求。在线购物服务场景中,可能存在以下多个目标:花费的总价格、快递到达时间或者调用服务的消耗。此外,用户对不同目标的侧重也不同,用户 1 可能更在乎快递到达的时间而愿意花费更高的成本,用户 2 则可能更在乎花费而不考虑到达时间。因此,用户的非功能性需求具有多目标性和不确定性。

为解决这种不确定性,本文提出了一种新的基于概率模型检测的 Web 服务组合的多目标验证方法。该方法将用户需求建模成多目标时序逻辑公式,当用户需求发生变化时,多目标时序逻辑公式随之改变。本文具体描述将 Web 服务组合建模成马尔可夫决策过程的步骤,并解释建模成马尔可夫决策过程的原因。同时,考虑多目标验证时,服务数量与目标个数的增加对验证效率的影响,并给出未来的研究方向。最后,通过实例说明本文方法的可行性与可支持的最大服务数量。

到稿日期:2017-06-12 返修日期:2017-09-08 本文受江苏省自然科学基金项目(BK20151476),973 项目(2014CB744903),863 项目(2015AA015303),中央高校基本科研业务基金(NS2016093),国家自然科学基金(61202002)资助。

周女琪(1993—),女,硕士生,主要研究方向为概率模型检测,E-mail:zhounvqi@163.com;周 宇(1981—),男,副教授,CCF 会员,主要研究方向为软件演化分析、形式化验证技术,E-mail:zhouyu@nuaa.edu.cn(通信作者)。

1.2 贡献

本文提出了一种基于概率模型检测的 Web 服务组合方法。其目标是通过概率模型检测技术对 Web 服务组合模型进行计算,以获得基于多目标约束的最优解与策略。具体贡献主要有以下几点:

1) 提出了一种新的定量多目标马尔可夫决策过程(QMOMDP),用于描述 Web 服务组合;

2) 提出了一种基于概率模型检测的 Web 服务组合多目标验证方法,以将不同的用户需求建模成多目标 QoS 属性,从而解决用户的非功能性需求的多目标性与不确定性。

本文第 2 节主要定义 Web 服务组合多目标验证方法中用到的基本概念;第 3 节从 Web 服务组合建模、多目标 QoS 属性建模、多目标验证 3 个部分介绍本文提出的 Web 服务组合方法;第 4 节通过“在线购物服务”对该方法进行验证,并得到相关的实验结果以进行评估;第 5 节对实验结果进行分析与总结;第 6 节讨论了相关工作;最后总结全文并讨论后续工作。

2 基础知识

2.1 Web 服务组合模型的基本定义

一个具体的服务可以通过其服务标识和 QoS 属性进行描述。需要注意的是,标识一个服务需要两个标识符,因为不同的服务是属于不同的抽象服务的,具体的定义如下。

定义 1(Web 具体服务) 一个 Web 具体服务是一个三元组 $cs = \langle i, n_i, Q \rangle$, 其提供具体某项单一功能的服务,用 $cs_{n_i}^i$ 表示。其中, i 用于标识此具体服务的抽象服务序号, n_i 用于标识同一抽象服务中序号为 i 的不同具体服务, Q 代表该具体服务的服务质量,是一个 k 元组 $\langle Q_1, Q_2, \dots, Q_k \rangle$, 其中 Q_k 定义为一个具体服务中的一个 QoS 属性。

定义 2(Web 抽象服务) 一个 Web 抽象服务是指提供具体某项单一功能的 Web 具体服务的集合,用 AS_i 表示,即 $AS_i = \{cs_1^i, cs_2^i, \dots, cs_{n_i}^i\}$ 。其中, cs 指在定义 1 中的具体服务。

定义 3(Web 服务组合) 一个 Web 服务组合是指从每一个 Web 抽象服务中选取一个 Web 具体服务组成的集合。

定义 4(马尔可夫决策过程) 马尔可夫决策过程是一个四元组 $M = \langle S, A, P, R \rangle$ 。其中, S 是有限的状态集合; A 是所有状态下可调用的动作集合,如 $A(s)$ 表示在状态 s 下可调用的集合; P 是描述马尔可夫决策过程的动态性的转移函数, $P: S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$, $P(s' | s, a)$ 表示在状态 s 下调用动作 a 后转移到状态 s' 的概率; $R: S \times A \times S \rightarrow \mathcal{R}$, \mathcal{R} 是实数, $R(s, a)$ 表示在状态 s 下调用动作 a 所得到的结果的回报值。

由上述内容可知,一个马尔可夫决策过程是一个离散时间随机控制的过程。此决策过程处于某种状态 s , 决策者可以选择在状态 s 下可用的任何动作 a 。该过程在下一个时阶做出反应,随机移动到一个新的状态 s' , 并给予决策者相应的奖励 $R(s, a)$ 。选择 s' 作为新状态的概率将受到所选动作的影响。具体来说,此概率由状态转变函数 $P(s' | s, a)$ 来规定,因此下一个状态 s' 取决于当前状态 s 和决策者的动作 a 。但是,状态 s 和动作 a 不依赖以往所有的状态和动作是有条件的,即一个 MDP 状态转换具有马尔可夫特性。马尔可夫特性是指一个随机过程未来发展的概率规律与决策之前的历史无关。

Web 服务组合的过程符合此项性质。服务选择即是动

作,而当前时刻的选择与当前时刻的状态和奖励回报值有关,因此服务的当前选择与历史选择无关,我们通过对当前的奖励值进行评估来确定下一个服务的选择。因此,本文使用马尔可夫决策过程对 Web 服务组合进行建模。另外,为了实现 Web 服务组合的多目标验证,对以上单目标的 MDP 进行扩展,并使用定量多目标马尔可夫决策过程(Quantitative Multi-Objective Markov Decision Process, QMOMDP)对 Web 服务组合进行建模。

定义 5(定量多目标马尔可夫决策过程) 一个定量多目标马尔可夫决策过程是一个六元组: $M = \langle I, S, N, A, P, R \rangle$ 。其中, I 是一个标识符,用于标识不同的类别,是正整数; S 是一个函数,自变量为 i ,描述当 $i \in I$ 时有限的状态集合; A 是一个函数,用于描述当 $i \in I$ 时 $A(i)$ 在状态 $s \in S_i$ 下的动作集合; N 是一个函数,自变量为 i ,表示当 $i \in I$ 时 $A(i)$ 动作集合中的元素个数; P 是一个概率数值,表示马尔可夫决策过程的动态性的转移函数 $P: S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$, 表示 $P(s' | s, a)$ 在状态 s 下调用动作 a 后转移到状态 s' 的概率; R 是一个奖励函数,在 $s \in S_i$ 这个状态下,当 A_i 中某一个动作被执行而发生转换时,系统将得到一个即时奖励值 r_i ,其预期值为 $R_i(s_i' | s, a)$, R_i 表示在状态 s 下调用动作 a 所得到的结果回报值。如果有 $M > 1$ 个目标需要被考虑,当动作执行时,系统将得到奖励向量:

$$R(s, a, s') = [r_1(s, a, s'), r_2(s, a, s'), \dots, r_m(s, a, s')] \quad (1)$$

本文使用上述定义的 QMOMDP 对 Web 服务组合进行建模,使用标识符 I 表示不同类别的 Web 抽象服务,对于每一个 $i \in I$, 动作集合 A_i 即是每一类 Web 抽象服务中的具体服务。 $N(i)$ 指 Web 具体服务的数量,对应于 $AS_i = \{cs_1^i, cs_2^i, \dots, cs_{n_i}^i\}$ 中的 n_i 。本文把这个基于 QMOMDP 的 Web 服务组合模型称为 QMOMDP-WSC(Quantitative Multi-Objective Markov Decision Process based Web Service Composition)。

定义 6(QMOMDP-WCS) 一个 QMOMDP-WCS 是一个六元组 $M = \langle I, S_i, AS_i, N_i, P_i, R_i \rangle$ 。其中, I 是一个标识符,用于标识不同类别的 Web 抽象服务,是正整数; S_i 描述当 $i \in I$ 时的有限状态集合; AS_i 是一个集合,描述的是提供具体某一项单一功能的 Web 具体服务的集合; $N(i)$ 是一个函数,表示当 $i \in I$ 时 AS_i 集合中的元素个数 n_i ; P_i 是一个概率数值,表示马尔可夫决策过程的动态性的转移函数 $P: S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$, 表示 $P(s' | s, a)$ 在状态 s 下调用动作 a 后转移到状态 s' 的概率; R_i 是一个奖励函数,在 $s \in S_i$ 状态下,当 $A_i(\cdot)$ 中的某一个动作被执行而发生转换时,系统将得到一个即时奖励值 r_i ,其预期值为 $R_i(s_i' | s_i, a)$, R_i 表示在状态 s 下调用动作 a 所得到的结果回报值。如果有 $M > 1$ 个目标需要被考虑,当动作执行时,系统将得到奖励向量:

$$Q(s, cs, s') = [Q_1(s, cs, s'), Q_2(s, cs, s'), \dots, Q_m(s, cs, s')]^T \quad (2)$$

其中,每一个 Q_k 定义了 cs 的一个 QoS 属性。

2.2 多目标 QoS 属性的基本定义

定量多目标 QoS 属性实际上是概率谓词与奖励谓词的组合。

定义 7(概率谓词) 一个概率谓词 $[\Phi]_{\sim\rho}$ 包含一个常规属性 $\Phi \subseteq (a_\phi)$ 、一个常规操作符 $\sim \in \{<, \leq, >, \geq\}$ 以及一个概率边界 ρ ,其中 $a_\phi \subseteq A_m$ 。若 M 在策略 π 下满足概率谓词 $[\Phi]_{\sim\rho}$,则定义:

$$M, \pi \models [\Phi] \Leftrightarrow Pr_M^\pi(\Phi) \sim \rho \quad (3)$$

其中, $Pr_M^\pi(\Phi)$ 的定义为:

$$Pr_M^\pi(\{\omega \in IPaths \mid tr(\Phi) \uparrow a_\phi \in \Phi\}) \quad (4)$$

其中, $IPaths$ 是 M 中所有路径的集合。

定义 8(奖励谓词) 一个奖励谓词 $[\rho]_{\sim r}$ 包含了一个常规属性 $\rho: a \rightarrow R_{>0}$ 、一个常规操作符 $\sim \in \{<, \leq, >, \geq\}$ 以及一个概率边界 r ,其中 $a_\rho \subseteq A_m$ 。若 M 在策略 π 下满足奖励谓词 $[\rho]_{\sim r}$,则定义:

$$M, \pi \models [\rho] \Leftrightarrow ExpTot_M^\pi(\rho) \sim r \quad (5)$$

其中, $ExpTot_M^\pi(\rho)$ 的定义为:

$$\int \rho(\omega) dPr_M^\pi \quad (6)$$

有了上述两个定义,就可以清楚地描述定量多目标属性。

定义 9(定量多目标属性) 一个定量多目标属性(qmoproperty)对于一个QMOMDP模型 M 来说,就是概率谓词和奖励谓词的布尔组合,其表达式如下:

$$\Psi ::= true \mid \Psi \wedge \Psi \mid \Psi \vee \Psi \mid \neg \Psi \mid [\Phi]_{\sim\rho} \mid [\rho]_{\sim r} \quad (7)$$

其中, $[\Phi]_{\sim\rho}$ 和 $[\rho]_{\sim r}$ 是模型 M 的概率谓词与奖励谓词。我们认为一个公式中的一个谓词为一个目标。

2.3 定量多目标验证的定义

为了求得模型QMOMDP-WSC的解,本文用定量多目标验证技术来解决Web服务组合的问题。一个QMOMDP-WSC的解就是基于多目标属性公式的一个策略及对应的定量验证的结果,即每一个抽象服务类别下的服务选择过程和具体的某个目标在其他目标下的预期值,用 s 表示,定义如下。

定义 10(QMOMDP-WSC的解) 一个解 s 是一个二元组 $s = \langle v, \pi \rangle$ 。其中, v 是基于多目标公式求出的具体数值, π 是一个策略,实际上是从状态到动作的映射,即:

$$\pi: S \rightarrow A \quad (8)$$

如上,一个QMOMDP-WSC的解就是某个QoS属性的最优值及其对应路径。一条路径就是一个策略,而对于一条路径,系统得到的QoS向量即不同的目标会有不同的奖励值。

综上所述,求QMOMDP-WCS的解,就是对定量多目标属性进行分析,求得在多个不同的QoS目标的约束下用户最看重的目标的最优值及其对应的路径。

3 基于定量多目标验证的Web服务组合方法

基于定量多目标验证的Web服务组合方法一共分为3个步骤:

- 1) 将Web服务组合过程建模成定量多目标马尔可夫决策过程;
- 2) 将不同的用户需求建模成多目标时序逻辑公式;
- 3) 将定量多目标马尔可夫决策过程与时序逻辑公式作为方法的输入,最终输出满足用户需求的定量结果并导出其策略,即Web服务组合方案。

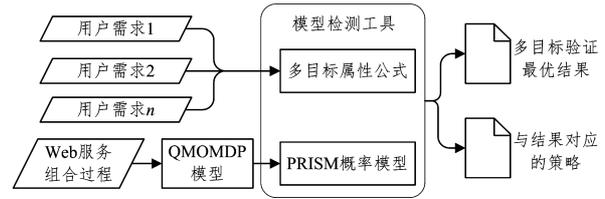


图1 本文方法的框架

Fig. 1 Framework of proposed method

3.1 Web服务组合建模

对Web服务组合建模,首先将需建模的对象抽象成Web服务组合过程,然后使用QMOMDP对该服务组合进行建模,得到QMOMDP-WSC。

抽象一个完整的Web服务组合过程,需确定研究对象一共要完成的任务的数量,即抽象服务的个数。若抽象服务的个数为 a ,那么抽象服务的集合为: $\{AS_n \mid 0 < n \leq a\}$ 。其中,每一个抽象服务中包含功能属性类似的不同数量的具体服务 n_i 个。而Web服务组合的过程就是从每一个抽象服务中选出一个具体服务的过程。一个完整的Web服务组合过程如图2所示。

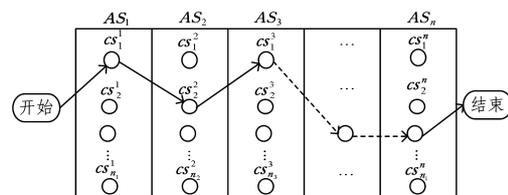


图2 Web服务组合过程

Fig. 2 Web service composition process

图2中,Web服务组合的解为 $s = \{v_1, \pi_1\}$ 。其中, v_1 是一个实数, $\pi_1 = \{cs_1^1, cs_2^2, cs_3^3, \dots, cs_n^n\}$ 。从 n 个抽象服务中求最优解 s 的过程,即Web服务组合过程。

然后,使用QMOMDP对该过程建模。在QMOMDP模型中,使用动作的集合 $A_i(\cdot)$ 表示调用第 i 类抽象服务中的具体服务,因此选择调用抽象服务时的状态由 S_i 标识。当 $s \in S_i$ 时,QMOMDP中的动态性的转移函数 P_i 用调用服务的成功率表示。同时,为了描述多目标的QoS属性,在系统模型中增加 q 个单目标的奖励结构。

将Web服务组合建模成系统模型,将多目标的QoS属性通过奖励结构在模型中表示出来,最后用时序逻辑公式对奖励结构进行建模。将系统模型和时序逻辑公式作为多目标验证方法的输入,使用概率模型检测工具PRISM导出策略,并得到定量分析结果。

3.2 多目标QoS属性建模

在多目标QoS属性建模中,首先确定影响服务质量的因素。影响服务质量的因素与QMOMDP模型中的奖励函数 R 中的分量逐一对应。对于 R 中的每一个分量,根据其代表的具体意义,使用一定的奖励结构在模型中表示,如表1所列。

表1 奖励结构

Table 1 Reward structure

| 影响服务质量的因素 | 奖励结构 |
|-----------------|------|
| 调用服务的消耗 | R1 |
| 用户在购物场景下花费的总价钱 | R2 |
| 用户在购物场景下收到快递的时间 | R3 |

用户的非功能属性需求具有不确定性。对于某一个用户,他可能期望服务消耗越小越好,而不在于总价钱和快递到达时间。对于其他用户,他们可能期望总价钱最低,而不在于服务消耗与快递到达时间。另外,可能还有一些用户在乎总价钱和服务消耗,而不在于快递到达时间。

因此,为解决这种不确定性与多目标性,本文将不同的用户需求建模成单目标的时序逻辑公式。属性的具体含义如表 2 所列。

表 2 QoS 属性的含义

Table 2 Meaning of QoS property

| QoS 属性 | 含义 |
|--------|---------------------|
| P1 | 调用的服务总消耗最少是多少 |
| P2 | 用户在购物场景下花费的总价钱最少是多少 |
| P3 | 用户在购物场景下收到快递的时间 |

其中,一个 QoS 属性就是一个目标,用不同的奖励谓词表示。然后,根据用户对不同目标的需求,将其综合成一个多目标 QoS 属性。根据用户需求,将目标分为两类:1)关键目标,即用户最在意的 QoS 属性;2)约束目标,即用户次在意的或者不在意的 QoS 属性。对约束目标进行单目标验证,以求得其在多目标验证中的取值范围。将属性 P1 和 P2 建模成单目标时序逻辑公式,如表 3 所列。

表 3 单目标时序逻辑公式

Table 3 Single-objective temporal logic formula

| QoS 属性 | 单目标时序逻辑公式 |
|--------|---|
| P1 | $R\{\text{"R1"}\} \max = ? [F \text{ completed}]$ |
| P2 | $R\{\text{"R2"}\} \max = ? [F \text{ completed}]$ |

假设属性 P1 的定量验证结果为 $P1_{max}$,代表调用服务消耗的最大值;属性 P2 的定量验证结果为 $P2_{max}$,代表用户花费的总价格的最大值。

最后,根据以上结果,结合用户需求,得到多目标 QoS 属性。假设用户 1 的关键目标为属性 P3,而用户 2 的关键目标为 P2。对于用户 1,通过求解 $P1_{max}$ 与 $P2_{max}$ 的值,可以得到其多目标时序逻辑公式。同理,可得到用户 2 的多目标时序逻辑公式。用户 1 和用户 2 的多目标时序逻辑公式如表 4 所列。

表 4 多目标时序逻辑公式

Table 4 Multi-objective temporal logic formula

| 用户 | 多目标时序逻辑公式 |
|------|---|
| 用户 1 | $\text{Multi}(R\{\text{"R3"}\} \min = ? [C], R\{\text{"R2"}\} \leq P2_{max}[C], R\{\text{"R1"}\} \leq P1_{max}[C])$ |
| 用户 2 | $\text{Multi}(R\{\text{"R2"}\} \min = ? [C], R\{\text{"R1"}\} \leq P1_{max}[C], R\{\text{"R3"}\} \leq P3_{max}[C])$ |

表 4 中,对于用户 1,根据其需求产生的多目标时序逻辑公式的意义是,在小于或等于调用服务消耗的预期值时,用户在购物场景下花费的最少时间。对于用户 2,其需求产生的多目标时序逻辑公式的意义是,在小于或等于用户的预期花费时间时,用户在购物场景下花费的总价钱。通过模型检测工具对表 4 中的性质进行验证,可定量地求得各自的最小值,同时导出最优策略,即 QMOMDP-WSC 的解。

3.3 定量多目标验证

3.3.1 模型检测工具 PRISM

本文中使用的工具是概率模型检测器 PRISM^[18],它可

以支持 3 种类型的模型:离散时间马尔可夫链、连续时间马尔可夫链以及马尔可夫决策过程。本文使用马尔可夫决策过程这一类型。PRISM 是通过对时间逻辑 PCTL 与 CSL 表示的属性进行验证来分析概率模型,它基于多终端二进制决策图(MTBDDs)实现了 PCTL 和 CSL 的模型验证。

3.3.2 多目标定量验证

多目标定量验证实际上是一个求解的过程。将 PRISM 模型与多目标时序逻辑公式作为输入,利用概率模型检测技术对状态空间进行搜索,获得多目标奖励结构下的最优解。首先,将 QMOMDP 模型转换为 PRISM 模型。表 5 对 PRISM 模型中的变量进行了说明。

表 5 PRISM 模型中的变量

Table 5 Variables in PRISM model

| 变量 | 含义 |
|-------------------------------------|--------------------|
| $cs_i: [0 \dots n_i]$ init 0 | 具体服务的标号 |
| user: $[0 \dots i]$ init 0 | 标识 QMOMDP 中的标识符 I |
| $cs_i_completed$: bool init false | 标识抽象服务 i 的选择过程是否完成 |

表 5 中,变量 1 代表抽象服务 i 中选择的具体服务的标号,在选择过程中一共有 n_i 个具体服务供抽象服务 i 选择,若其选择了第 j 个具体服务,其中 $j \in [i, n_i]$,则 $cs_j = j$ 。变量 2 的不同分量用于标识 QMOMDP 中的标识符 I,根据抽象服务的个数 i,变量 2 一共包含了 $i+1$ 个状态。变量 3 是一个布尔型变量,用以标识抽象服务 i 的选择过程是否完成,若已完成,则 $cs_i_completed = \text{true}$,否则 $cs_i_completed = \text{false}$ 。

在 PRISM 语言转换过程中,根据建模步骤中确定的 i 与 n_i 的数值给定 PRISM 语言中 i 与 n_i 的数值。将 QMOMDP 模型转化为 PRISM 模型后,将其作为输入,概率模型检测器会搜索该模型的状态空间,验证给出的多目标时序逻辑公式,并给出基于多目标约束的最优解。

同时,在多目标定量验证过程中,应当考虑系统的开销与验证的效率问题。服务数量的增长会明显影响验证的效率,并导致模型的状态数量迅速增加。而 QoS 属性的增加对状态数量增加的影响较小,对效率的影响也不如服务增加的影响明显。因此,在后续对方法的进一步优化中将以增加模型支持的服务数量为首要任务。同时,在服务数量维持一定的情况下,提高对 QoS 属性数量的支持。

4 案例研究:在线购物服务

本节选取“在线购物服务”场景作为研究对象,将该场景下的 Web 服务组合过程抽象出来,并建模成 QMOMDP 模型。首先,使用第 2 节定义的基本概念描述用户使用“在线购物服务”的行为,并将其抽象成 Web 服务组合过程。在此案例中,假设用户需要执行如下步骤来完成整个“在线购物服务”过程:

- 1)选择合适的购物平台,如京东、淘宝;
- 2)选择合适的商店作为不同的店铺,各店铺中相同商品的价格可能并不一样,拥有的折扣也会不一样;
- 3)选择支付平台,目前使用最多的是支付宝平台和微信支付平台;
- 4)选择快递,不同快递的到达时间与价格不同。

从以上 4 个步骤可以看出,“在线购物服务”场景中一共定义了 4 种抽象服务:销售平台 AS_1 、店铺 AS_2 、支付平台

AS₃、快递 AS₄。在抽象服务 AS₁ 中又存在两种具体服务,分别是 cs₁¹ 和 cs₂¹,即 AS₁ = {cs₁¹, cs₂¹}。这两种具体服务表示提供了销售平台的服务,cs₁¹ 代表淘宝,cs₂¹ 代表京东。在抽象服务 AS₂ 中又存在 3 种具体服务,即 AS₂ = {cs₁², cs₂², cs₃²}。其中 cs₁² 代表交通银行,cs₂² 代表中国银行,cs₃² 代表建设银行。在抽象服务 AS₃ 中有 2 个具体服务,即 AS₃ = {cs₁³, cs₂³}。cs₁³ 代表支付宝平台,cs₂³ 代表微信支付平台。在抽象服务 AS₄ 中有 4 个具体服务,即 AS₄ = {cs₁⁴, cs₂⁴, cs₃⁴, cs₄⁴}。cs₁⁴ 代表顺丰快递,cs₂⁴ 代表韵达快递,cs₃⁴ 代表圆通快递,cs₄⁴ 代表中通快递。因此,“在线购物服务”的 Web 服务组合过程如图 3 所示。

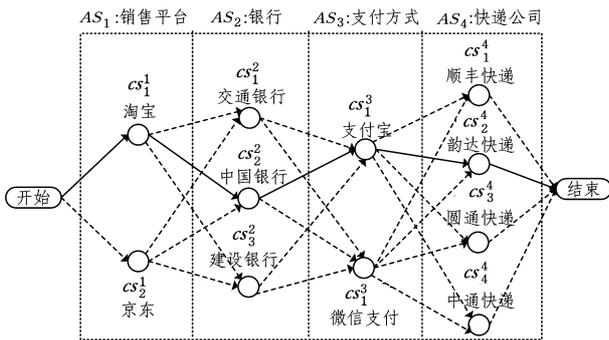


图 3 Web 服务组合过程的实例

Fig. 3 Example of Web service composition process

得到 Web 服务组合过程后,用本文的方法,使用 QMOMDP 对该过程进行建模。同时,定义了 3 种 QoS 属性的奖励结构,分别用“express_arrive_time”“price”“consumption”表示,如表 6 所列。

表 6 QoS 属性的奖励结构

Table 6 Reward structure for QoS property

| QoS 属性 | 奖励结构的名称 |
|--------|---------------------|
| 快递到达时间 | express_arrive_time |
| 总价格 | price |
| 调用服务消耗 | consumption |

本节描述了如何具体地将“在线购物服务”场景抽象为 Web 服务组合过程并对其进行建模。第 5 节将针对该实例进行实验,并分析实验数据。

5 实验及数据分析

5.1 实验配置

本文实验的运行环境为 Ubuntu14.04 LTS 系统,英特尔酷睿 I7 处理器,31.3 GB 内存;实验工具为概率模型检测器 PRISM,版本号为 4.3.1-linux64。其中,PRISM 的基本配置如表 7 所列。

表 7 PRISM 的基本配置参数

Table 7 Basic configuration parameters in PRISM

| 名称 | 参数 |
|-------------------------------------|-----------------|
| Engine | Hybrid |
| MDP multi-objective solution method | Value iteration |
| CUDD max. memory | 10g |

参数名称 MDP multi-objective solution method 代表在模型验证过程中求解 PRISM 模型的使用方法。本实验中有两个变量:抽象服务的数量和每一个抽象服务中具体服务的数量。表 8 列出了 PRISM 模型的基本参数。

表 8 模型参数

Table 8 Parameters in model

| 参数 | 含义 | 数值 |
|----------------------|------------|-----|
| M | 服务调用失败的概率 | 0.1 |
| expectedExpressPrice | 用户预期的快递价格 | 6 |
| expectedExpressTime | 用户预期商品送达时间 | 2 |

5.2 实验结果及分析

5.2.1 实验 1

实验 1 使用两个 QoS 属性作为不同的目标,用以验证多目标验证方法的可行性,同时求得在两个目标的条件下方方法所能支持的服务规模。其中,使用的 QoS 属性分别是调用服务的消耗 consumption 和总价格 price。

本实验分为两个步骤:首先对约束目标进行单目标验证,以求得多目标验证时约束目标的基本范围;然后对模型进行多目标验证。本实验中有两个变量:1)抽象服务的数量;2)每一个具体服务的数量。

首先,进行单目标验证。模型验证的结果用 consumption_max 表示,代表服务消耗的最大值。固定变量即具体服务的数量为 4,其实验结果如表 9 所列。

表 9 单目标验证结果

Table 9 Single-objective verification results

| 抽象服务的数量 | consumption_max |
|---------|-----------------|
| 3 | 9.445 |
| 4 | 13.445 |
| 5 | 19.667 |
| 6 | 19.667 |

然后,根据以上结果确定目标 consumption 的范围值,并给出多目标时序逻辑公式,如表 10 所列。

表 10 多目标时序逻辑公式

Table 10 Multi-objective temporal logic formula

| 多目标时序逻辑公式 | 含义 |
|---|-----------------------------|
| multi(R{"price"} min=?[C], R{"consumption"} <= 8 [C]) | 在服务总消耗小于 8 的情况下,使用的最低总价格是多少 |

最后,对表 10 中表示的多目标时序逻辑公式进行验证分析,在不同抽象服务与具体服务下的验证结果与数据规模如表 11 所列。

表 11 多目标验证结果

Table 11 Multi-objective verification results

| 抽象服务数量 | 结果 | 状态数 | 转移数 |
|--------|--------|---------|----------|
| 3 | 15.67 | 50897 | 126804 |
| 4 | 23.333 | 50897 | 126804 |
| 5 | 39.167 | 610769 | 1717076 |
| 6 | 55.112 | 7329233 | 22982484 |

实验 1 的结果表明,将在线购物服务的 Web 服务组合过程建模成 PRISM 模型,并对其进行多目标验证的方法是可行的,且能支持一定的服务数量。

5.2.2 实验 2

在实验 1 的基础上进行扩展,验证在两个单目标下使用本文方法对模型进行验证可达到的最大数据规模。实验参数与实验所用的多目标逻辑公式都与实验 1 相同。表 12 列出了以不同的抽象服务数量与具体服务数量为变量的实验数据规模。

表 12 实验结果 1

Table 12 Experiment results 1

| 抽象服务数量 | 具体服务数量 | 状态数 | 转移数 |
|--------|--------|--------|---------|
| 4 | 4 | 50897 | 126804 |
| 4 | 5 | 122946 | 307025 |
| 4 | 6 | 253177 | 633198 |
| 4 | 7 | 466754 | 1168587 |
| 4 | 8 | 崩溃 | 崩溃 |

表 13 实验结果 2

Table 13 Experiment results 2

| 抽象服务数量 | 具体服务数量 | 状态数 | 转移数 |
|--------|--------|----------|----------|
| 5 | 4 | 610769 | 126804 |
| 5 | 5 | 5710693 | 9405846 |
| 5 | 6 | 34264165 | 56435094 |
| 5 | 7 | 崩溃 | 崩溃 |

表 14 实验结果 3

Table 14 Experiment results 3

| 抽象服务数量 | 具体服务数量 | 状态数 | 转移数 |
|--------|--------|---------|----------|
| 6 | 3 | 1328602 | 4153065 |
| 6 | 4 | 7329233 | 22982484 |
| 6 | 5 | 崩溃 | 崩溃 |

5.2.3 实验 3

实验 3 进行多目标扩展性实验,即在同等抽象服务数量与具体服务数量的条件下,更换关键目标进行实验,或增加目标个数进行实验。本次实验中固定抽象服务的数量为 5,具体服务的数量为 4。本次实验的 QoS 属性如表 15 所列。

表 15 QoS 属性的含义

Table 15 Meaning of QoS property

| QoS 属性 | 含义 |
|--------|----------------------|
| P1 | 调用的服务总消耗最少为多少 |
| P2 | 用户在购物场景下花费的总价钱最少为多少 |
| P3 | 用户在购物场景下快速到达的时间最快为多少 |

首先,根据用户需求确定约束目标与关键目标,并对约束目标的单目标时序逻辑公式进行验证。为了方便,本实验中首先求出所有属性的单目标结果,如表 16 所列。

表 16 单目标验证结果

Table 16 Single-objective verification results

| 单目标时序逻辑公式 | 结果 |
|---|--------|
| $R\{\text{"consumption"}\} \min = ? [F \text{"completed"}]$ | 11.556 |
| $R\{\text{"consumption"}\} \max = ? [F \text{"completed"}]$ | 16.556 |
| $R\{\text{"price"}\} \min = ? [F \text{"completed"}]$ | 31.667 |
| $R\{\text{"price"}\} \max = ? [F \text{"completed"}]$ | 69.167 |
| $R\{\text{"express_arrive_time"}\} \min = ? [F \text{"completed"}]$ | 14.778 |
| $R\{\text{"express_arrive_time"}\} \max = ? [F \text{"completed"}]$ | 32.278 |

然后,根据用户需求确定多目标时序逻辑公式,并求其结果,如表 17 所列。根据第 3 节对多目标时序逻辑公式的建模方法,用户 1 的公式和其结果的含义为:在花费的价钱小于预期值 40 与快速到达时间少于 32 的情况下,调用服务的最小消耗为 12.556。

表 17 不同用户的关键目标

Table 17 Key objectives for users

| 用户 | 关键目标 | 约束目标 |
|----|------|--------|
| 1 | P1 | P2, P3 |
| 2 | P2 | P1, P3 |
| 3 | P3 | P1, P2 |

根据关键目标与约束目标的分类,不同用户的多目标 QoS 时序逻辑公式及验证结果如表 18 所列。

表 18 多目标验证结果

Table 18 Multi-objective verification results

| 用户 | 多目标时序逻辑公式 | 结果 |
|----|--|--------|
| 1 | $\text{Multi}(R\{\text{"consumption"}\} \min = ? [C], R\{\text{"price"}\} \leq 40[C], R\{\text{"express_arrive_time"}\} \leq 32[C])$ | 12.556 |
| 2 | $\text{Multi}(R\{\text{"price"}\} \min = ? [C], R\{\text{"consumption"}\} \leq 14[C], R\{\text{"express_arrive_time"}\} \leq 32[C])$ | 39.167 |
| 3 | $\text{Multi}(R\{\text{"express_arrive_time"}\} \min = ? [C], R\{\text{"price"}\} \leq 40[C], R\{\text{"consumption"}\} \leq 16[C])$ | 18.278 |

实验 3 的结果展示了在增加目标的个数之后,求解关键目标的最优解是可行的。该结果表明了本文方法在目标个数上的可扩展性。同时,在关键目标与约束目标变化时,通过改变多目标时序逻辑公式求解关键目标的最优解,可解决用户需求的不确定性。

QoS 感知的 Web 服务组合方法研究中的关键问题是如何选择具体服务使得服务组合的服务质量最大化。在本文的模型中,Web 服务组合的服务质量由奖励结构的数值体现,因此实验中验证的多目标时序逻辑公式都是基于奖励结构的。在上述 3 个实验中,将用户的非功能属性抽象为奖励结构,再根据用户的偏好将奖励结构建模成多目标时序逻辑公式并使用概率模型检测技术进行计算。实际上,概率模型检测技术除了计算概率系统满足时序逻辑公式时系统奖励结构的具体回报值之外,还可计算满足时序逻辑公式的具体概率。因此,将基于概率的计算加入实验中,并考虑对奖励结构和概率进行多目标优化,是我们后续工作中的重要方向之一。

6 相关工作

Web 服务组合是服务计算领域的重要研究内容,已有大量学者对此展开相关研究。本节列举了与本文方法相关性较强的部分代表性工作,并简要分析其与本文工作的异同点。

Wang 等^[2]提出了一种用于 Web 服务组合的多代理强化学习模型,其基本思想是将强化学习建模成马尔可夫决策过程,并引入 Q 学习算法来加快收敛时间和提升学习效率。Su 等^[3]使用了参数化的模型检测来评估计算 QoS 的可靠性,以确保在运行时 QoS 数据的准确性。Hwang 等^[4]提出了一种新的方法来解决 QoS 值是随机变量而非常数的问题。Moustafa 等^[5]提出使用强化学习方法来处理开放和分散环境中固有的不确定性问题。Benveniste 等^[6]提出了一个中间件平台,以质量驱动 Web 服务组合的选择。Daniel 等^[7]则提出了新的自适应框架,以应对环境中的 QoS 属性变化。Ma 等^[8]提出了一种人口多样性处理遗传算法,用于全局 QoS 属性约束的 Web 服务选择。Gabrel 等^[9]提出一个新的混合整数线性程序来表示 QoS 感知的 Web 服务组合问题,并使用 CPLEX 得到实验结果。Menasc 等^[10]提出了一种优化算法应用于 Web 服务选择,并找出最佳解决方案。Zeng^[11]提出了一个中间件平台,以解决 Web 服务组合问题,同时比较了两种选择方法:1)基于服务的本地选择;2)基于整数规划的选择。Jungmann 等^[12]将现有的符号组合方法与机器学习技术相结合,开发了一个学习推荐系统,扩展了现有组合算法的功能,促进了方法的适应性,并减小功能差异。Zhao 等^[13]提出了一种轻量级的服务组合框架,该框架分析了以自然语言表

达的最终用户的目标。Mohebi 等^[14]提出了一种用于解决以用户收入为基础的双目标 QoS 模型的属性冲突的方法。Xu 等^[15]提出了解决运行时服务属性冲突问题的方案,并将该问题转化为基于用户收入的双目标模型,同时提供解决方案。Ai 和 Hilton 等^[16-17]使用遗传算法解决基于 QoS 感知的服务组合问题。

综上所述,已有不少研究者对遗传算法、强化学习算法等经典的自适应算法进行了优化,以解决服务组合问题。这类方法的缺点是只能通过算法的收敛速度与可支持的服务数量来评估方法的有效性,而无法评估其可靠性与正确性,因此得到的结果可能存在偏差。另外,多数 Web 服务组合方法对 QoS 属性的处理过于简单,即使用双目标的 QoS 模型解决冲突或者仅仅将多个 QoS 属性简单地聚合成单一的聚合函数。实际上,由于开放环境和用户需求的不确定性,QoS 属性存在着极大的多目标性与不确定性,将 QoS 属性建模成多目标时序逻辑公式可解决这个问题,然后通过概率模型检测技术对该公式进行验证,以得到最佳策略。同时,验证多目标时序逻辑公式时,概率模型检测器将对 Web 服务组合模型进行状态搜索,这样可遍历组合中的所有路径,因此能确保所得最优策略的可靠性。最后通过实验说明了方法的可行性与有效性。

本文使用 MDP 对 Web 服务组合进行建模。实际上,在概率模型检测技术中,除马尔可夫决策过程之外,也可用马尔可夫链(MC)对系统进行建模。马尔可夫链根据其时间是否是离散的,又分为离散时间的马尔可夫链(DTMC)与连续时间的马尔可夫链(CTMC)两种。在此基础上,分析这几种不同的马尔可夫模型的区别。首先,MDP 是对马尔可夫链的一种扩展,MDP 在马尔可夫链的基础上加入了动作和奖励。相反,如果忽视奖励,由于每一状态只有一个动作存在,那么马尔可夫决策过程即简化为一个马尔可夫链。可以看出,在 Web 服务组合模型中,具体服务的选择被建模成为动作,一个抽象服务中有若干的动作。而奖励结构被建模成为多目标时序逻辑公式,验证逻辑公式时,通过计算其奖励结构的回报值来确定服务质量。因此,马尔可夫链无法真实地描述 Web 服务组合模型。实际上,DTMC 与 CTMC 都是一种马尔可夫链,两者的区别在于时间是否是离散的。根据以上分析,DTMC 与 CTMC 都无法真实地描述 Web 服务组合过程。最后,从时间是否离散的角度考虑,本文使用的 MDP 模型并未考虑时间是离散的或是连续的,在今后的研究中,可将此维度考虑进去,使之有更好的可用性。

结束语 本文将 Web 服务组合过程建模成定量多目标马尔可夫决策过程,将开放环境下多变的非功能属性建模成多目标时序逻辑公式,以解决其不确定性问题,从而通过概率模型检测技术对模型进行验证,获得在多目标约束下关键目标的期望值与对应的最优策略。最后,通过实验验证了方法的可行性和有效性。未来将对本文方法进行进一步优化,使之在验证效率保持稳定的情况下支持更大的验证规模。此外,还需对方法进行应用上的扩展,使其具有更好的可用性。

参考文献

- [1] LIU C, XU X, HU D. Multiobjective Reinforcement Learning: A Comprehensive Overview[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 45(3): 385-398.
- [2] WANG H, WANG X, HU X, et al. A multi-agent reinforcement learning approach to dynamic service composition[J]. Information Sciences, 2016, 363(C): 96-119.
- [3] SU G, ROSENBLUM D S, TAMBURRELLI G. Reliability of Run-Time Quality-of-Service Evaluation Using Parametric Model Checking[C]// IEEE/ACM, International Conference on Software Engineering. IEEE, 2017: 73-84.
- [4] HWANG S Y, HSU C C, LEE C H. Service Selection for Web Services with Probabilistic QoS[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2015, 8(3): 467-480.
- [5] MOUSTAFA A, ZHANG M. Multi-Objective Service Composition Using Reinforcement Learning [M] // Service-Oriented Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 298-312.
- [6] BENVENISTE A, JARD C, KATTEPUR A, et al. QoS-aware management of monotonic service orchestrations [J]. Formal Methods in System Design, 2014, 44(1): 1.
- [7] MENASCÉ D A, EWING J M, GOMAA H, et al. A framework for utility-based service oriented design in SASSY[C]// Joint Wosp/sipew International Conference on Performance Engineering. San Jose, California, 2010: 27-36.
- [8] MA Y, ZHANG C. Quick convergence of genetic algorithm for QoS-driven web service selection [J]. Computer Networks, 2008, 52(5): 1093-1104.
- [9] GABREL V, MANOUVRIER M, MURAT C. Web services composition: Complexity and models[J]. Discrete Applied Mathematics, 2015, 196(2): 100-114.
- [10] MENASCÉ DANIEL A, CASALICCHIO E, et al. A heuristic approach to optimal service selection in service oriented architectures[C]// International Workshop on Software and Performance (Wosp 2008). Princeton, NJ, USA, DBLP, 2008: 13-24.
- [11] ZENG L, BENATALLAH B, ANNE H H N, et al. QoS-Aware Middleware for Web Services Composition[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2004, 30(5): 311-327.
- [12] JUNGMANN A, MOHR F. An approach towards adaptive service composition in markets of composed services[J]. Journal of Internet Services and Applications, 2015, 6(1): 5.
- [13] ZHAO Y, WANG S, ZOU Y, et al. Mining User Intents to Compose Services for End-Users[C]// IEEE International Conference on Web Services. IEEE, 2016: 348-355.
- [14] MOHEBI A. An Efficient QoS-Based Ranking Model for Web Service Selection with Consideration of User's Requirement [D]. 2012.
- [15] XU J, NING X, REIFF-MARGANIEC S, et al. Run-time resolution of service property conflicts in web service composition[J]. International Journal of Web & Grid Services, 2016, 12(2): 142.
- [16] AI L. QoS-aware Web service composition using genetic algorithms [D]. Brisbane, Queensland: Queensland University of Technology, 2011.
- [17] HILTON A B C, CULVER T B. Constraint Handling for Genetic Algorithms in Optimal Remediation Design[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2000, 126(3): 128-137.
- [18] KWIATKOWSKA M, NORMAN G, PARKER D. Probabilistic symbolic model checking with PRISM: a hybrid approach[J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2004, 6(2): 128-142.