

采用 PDDL 的 Web 服务组合方法研究

杨博, 张选平, 邵利平

(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

摘要: 针对单个智能(AI)规划器在解决 Web 服务组合问题时通用性不高以及性能受问题搜索空间影响较大的情况,基于本体描述语言(OWL-S)和规划描述语言(PDDL)结构上有极大的相似性,提出了一种将 Web 服务转化为 PDDL 描述的算法. 该算法通过对 OWL-S 和 PDDL 中相应元素的转换,将 Web 服务组合问题成功地转换为规划问题. 完成该转换后,就可自由选择 AI 规划器对 Web 服务进行组合. 以查询天气信息作为组合案例,对本文提出的组合方法进行了验证,结果表明,文中所提的组合方法可用于解决 Web 服务组合问题,提高了 AI 规划器在 Web 服务组合问题上的普适性.

关键词: 规划描述语言; Web 服务组合; 智能规划器; 本体描述语言

中图分类号: TP351 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)02-0021-06

Study on Web Service Composition Based on Planning Domain Definition Language

YANG Bo, ZHANG Xuanping, SHAO Liping

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Since artificial intelligence(AI) planners have different application domains and precondition, while the method of Web service composition using single AI planner has restricted the development of AI planner in Web service composition, we propose a novel approach to translates Web service to planning domain definition language(PDDL) in consideration of the similarity between Web ontology language for services(OWL-S) and PDDL. In this method, the problem of Web service composition is translated to the problem of plan by the corresponding elements translation between OWL-S and PDDL. After the translation, we can choose the most suitable AI planner to compose Web service. The composition method is verified by the experiment of weather finder. The result of experiment shows that the proposed method can be used in the problem of Web service composition, and it increases the AI planner's universality in resolving the Web service composition problem.

Keywords: planning domain definition language; Web service composition; artificial intelligence planner; Web ontology language for services

随着 Web 服务的不断发展,网络上出现了越来越多的 Web 服务应用,但是单个 Web 服务提供的功能比较有限,有时需要将多个 Web 服务组合在一起形成一个功能更加强大的服务,以满足用户的需求,这就是所谓的 Web 服务组合技术. 目前已提出

了多种 Web 服务组合方法,包括基于自动机的方法^[1-2]、基于 Petri 网的方法^[3]、基于回溯树的方法^[4]和基于智能(AI)规划器的方法等. 因为 Web 服务组合与 AI 规划 2 个科学问题间存在着很多相似之处,许多研究者认为 AI 规划器是解决 Web 服务组

合问题的一种有效途径. 基于此, 研究人员提出了多种基于 AI 规划的 Web 服务组合方法. Sirin 等^[5]提出了一种基于 HTN 的规划方法, 该方法使用 SHOP2 规划器半自动化地解决了 Web 服务组合问题. Rao 等^[6]总结了使用经典 AI 规划方法解决 Web 服务组合问题的思路和建议, 并指出了使用该方法所存在的问题. MCLLRATH 等^[7-8]使用一阶逻辑语言定义了 Web 服务, 并使用 Petri 网形式化描述了 Web 服务, 最后给出了基于 Petri 网的 Web 服务组合方法. 尽管这些方法可用于解决某些 Web 服务组合问题, 但由于 AI 规划器在适用性和规划性能方面存在着很多差异, 因此使用单一 AI 规划器来解决 Web 服务组合问题可能会造成组合方案漏寻或者组合开销过大. 除此之外, 使用特定的 AI 规划器解决自动服务组合问题可能会极大地增加 AI 规划器和其他应用程序间的耦合性, 而这会极大地限制 Web 服务组合的应用领域, 不利于该技术的推广.

针对上述问题, 本文提出了一种基于 PDDL (Planning Domain Definition Language) 的 Web 服务组合方法, 该方法将 Web 服务组合问题转换为使用 PDDL 描述的规划问题, 然后根据规划问题的规模和描述方式来选择最合适的 AI 规划器, 从而避免了传统方法中基于某个特定的 AI 规划器在解决 Web 服务组合上存在的问题.

1 OWL-S 与 PDDL 描述元语

1.1 OWL-S 描述语言

Web 服务描述语言 OWL-S^[9] (Web Ontology Language for Services) 是一种无歧义的具有显式语义的机器可理解标记语言, 用来描述语义 Web 服务的标记.

在 Web 服务组合过程中, 主要涉及 Service-Model. ServiceModel 提供被建模为过程的操作, 这里的过程是与特定服务进行交互的描述. 在 OWL-S 中, 涉及 3 种过程: ①原子过程; ②组合过程; ③简单过程. 在调用者看来, 原子过程可理解为一个简单动作, 可直接调用, 一步即可完成; 组合过程是由原子过程和(或)其他组合过程通过控制构造符组合而成的过程; 简单过程是抽象化的过程, 它没有对应的服务基点, 不能被直接调用, 只对某个过程提供抽象化描述. 在 OWL-S 中, 可使用的组合控制构造符有以下 9 种: Sequence, Split, Split + Join, Any-Order, Choice, If-Then-Else, Iterate, Repeat-While 和

Repeat-Until.

1.2 PDDL 描述语言

PDDL^[10] 是规划问题形式化的标准输入描述语言, 支持规划领域和规划器功能的统一描述, 是一种以动作为核心的描述语言.

在 PDDL 中, 规划描述问题被分成领域描述和问题描述 2 个部分, 其中领域描述由参数化的动作构成, 用以反映领域的行为; 问题描述主要包括待规划问题中的对象、初始条件和目标, 用以对需要规划的实际问题进行描述. 一个领域描述可用在多个问题描述之上, 但是一个问题描述并不能供多个领域描述同时使用. 目前, PDDL 被广泛地认为是规划问题的标准输入描述语言, 支持规划领域和规划器功能的统一描述.

1.3 OWL-S 与 PDDL 元素之间的联系

OWL-S 在很多方面都吸收了 PDDL 的宝贵经验, 在结构上也比较接近 PDDL. 表 1 给出了 OWL-S 与 PDDL 中元素的对应关系.

表 1 OWL-S 与 PDDL 中元素的对应关系

OWL-S 中的元素	PDDL 中的元素
Class	type
Property	predicate
Process	action
Input	
Precondition	precondition
Output	
Effect	effect
Individual	object
Description	literal

由表 1 可看出, OWL-S 中的元素与 PDDL 中的元素存在着相似性很大的对应关系. OWL-S 中元素划分粒度更小, 分工更明确, 但在服务 (PDDL 中的动作) 的结构描述方面, 实质上并没有超越 PDDL, 这一点对于 Web 服务组合问题尤为重要, 因为如果将 OWL-S 描述的 Web 服务转换为使用 PDDL 描述的规划问题, 不会损失较多语义信息. 在 Web 服务组合过程中, 需要重点考虑的是服务的输入 (Input)、输出 (Output)、前提条件 (Precondition)、服务的效果 (Effect) 以及服务的过程 (Process), 这几个元素也正是 AI 规划问题中需要重点考虑的要素, 作为 AI 规划问题的通用描述语

言,PDDL 对于这几个要素的表达也是相当出色的. 相对于 OWL-S 而言,PDDL 的动作(action)描述能力较弱,不过这个缺点在组合过程中是无关紧要的. 毕竟 PDDL 语言在 Web 服务组合问题中只是作为一种中介描述语言来使用,只要在转换过程中不改变服务的应用场景、服务效果、服务的内在结构,就不会影响服务的组合效果,因此在转换过程中损失的信息对于 Web 服务组合结果不会产生实质影响. 所以,可以通过将 OWL-S 本体转换为 PDDL 逻辑公式来解决 Web 服务组合问题^[6].

2 转换算法

图 1 给出了使用 PDDL 进行 Web 服务组合的算法流程. 在图 1 中:相关 OWL-S 服务集指的是通过 Web 服务发现所获取的相关 OWL-S 服务集;目标 OWL-S 服务是指用户所需要的 OWL-S Web 服务;OWLS2PDDL 领域转换算法的作用是把所需的 OWL-S 相关服务转换为用 PDDL 表示的规划领域描述;OWLS2PDDL 问题转换算法负责将目标服务描述转换为使用 PDDL 表示的规划问题描述;规划器分配模块负责将规划领域描述和规划问题描述分配给可使用的 AI 规划器;规划决策模块负责对多个 AI 规划器的规划结果进行总结,根据服务请求选择出最佳的规划方案,也就是得出服务质量最佳的组合服务;PDDL2OWLS 转换算法的功能是把由 AI 规划器得到的动作序列转换为组合 Web 服务.

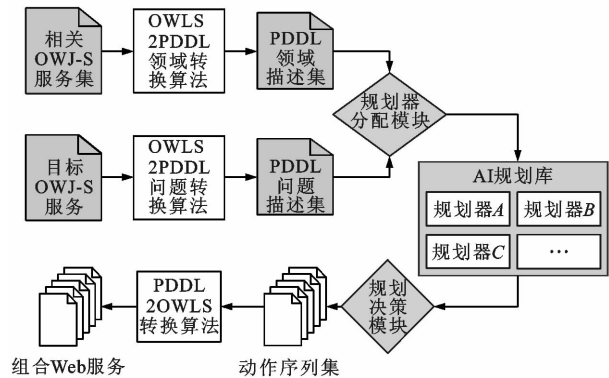


图 1 基于 PDDL 的 Web 服务组合流程图

在 OWL-S 中,服务请求是通过 ServiceProfile 本体来描述的. 在 ServiceProfile 本体中,尽管包含很多信息,例如 OWL 个体定义、信息描述、服务质量、平均反应时间、安全协议、服务位置和服务信用等,但在服务组合算法中,只需考虑规划过程中必需

的信息,例如 OWL-S 个体定义和信息描述. 如表 1 所定义,OWL 中的个体定义 Individual 对应于 PDDL 中的 object 对象,信息描述 Description 对应于 PDDL 中关于初始世界状态的描述 literal,这 2 种元素均可表示为一阶谓词逻辑公式,问题转换算法类似于领域转换算法中的前件和效果转换,因此问题转换算法可看作领域转换算法的一个子算法.

因此,本文将不再介绍 OWLS2PDDL 问题转换算法,而主要描述 OWLS2PDDL 领域转换算法. 在领域转换过程中,由于 PDDL 不支持动作循环执行和无顺序执行动作,因此本文算法没有包含 Repeat-While, Repeat-Until, Any-Order 和 Split + Join 结构的转换过程. 在 PDDL 中,对动作是否包含了动作扩展并没有进行区分,而在本文中,动作构成方式是映射过程的重要标志,因此必须加以区分. 为叙述方便,将不包含动作扩展的动作称为原始动作,包含动作扩展的动作称为组合动作. 以下分别给出原始动作和组合动作的定义.

定义 1(原始动作) 在 PDDL 中,原始动作是形为 $(a(\vec{v})\text{Pre Eff})$ 的表达式,其中 a 是动作函数符, $\vec{v}$ 是 a 的输入参数列表;Pre 为动作前件;Eff 是动作效果,也就是动作在正确执行后对世界的改变.

定义 2(组合动作) 在 PDDL 中,组合动作是形为 $(a(\vec{v})\text{Pre Eff exp})$ 的表达式,其中 a 是动作函数符, $\vec{v}$ 是 a 的输入参数列表;Pre 为动作前件;Eff 是动作效果,也就是在正确执行后对世界的改变;exp 是动作扩展,也就是以何种方式来执行更简单的动作以达到一个组合动作效果.

结合以上 2 个定义,可得出具体的转换过程. 如前所述,OWL-S 中的 Class、Property、Individual 和 Description 均可表示为一阶逻辑公式,与 PDDL 中的对应元素相类似,可以直接转换;剩余的元素如输入、输出、前件和效果均为 OWL-S 过程中的元素. OWL-S 过程转换可根据过程的分类来进行,将 OWL-S 原子过程转换为 PDDL 原始动作,将 OWL-S 简单过程和组合过程转换为 PDDL 组合动作. 以下对具体的过程转换进行描述.

1) OWL-S 过程模型转换. OWL-S 过程模型转换算法通过对原子过程、简单过程和组合过程分别处理来实现从 OWL-S 过程集到 PDDL 领域描述的转换. 对于原子过程,将其区分为信息提供型 Web 服务和世界改变型 Web 服务,然后分别处理;对于简单或组合过程,根据过程控制结构,将其转换为组合动作,具体的实现伪码如图 2 所示,用以实现

将 OWL-S 过程集合转换为 PDDL 领域描述。

```

伪码1: OWL-S过程模型转换
输入: OWL-S过程模型集K;
输出: PDDL动作序列集AS;
过程:
(1) AS=0;
(2) for K中每个原子过程  $k \in K$  do
(3)   if  $k$ 是只有输出的原子过程 then
(4)      $A = \text{TranslateAtomicProcessOutput}(k)$ ;
(5)   end
(6)   if  $k$ 是只有效果的原子过程 then
(7)      $A = \text{TranslateAtomicProcessEffect}(k)$ ;
(8)   end
(9)   将A添加到AS中;
(10) end
(11) for K中每个简单过程  $k \in K$  do
(12)    $A = \text{TranslateSimpleProcess}(k)$ ;
(13)   将A添加到AS中;
(14) end
(15) for K中每个组合过程  $k \in K$  do
(16)   根据K的组合结构进行相应转换
(17)   将A添加到AS中;
(18) end
(19) return AS;

```

图2 OWL-S过程模型转换图

在图2中,针对过程的类型分别进行了转换。(2)~(10)为原子过程的转换伪码,该过程将原子过程转换为PDDL原始动作,并添加到动作集中,其中:(3)~(5)针对只具有输出的原子过程进行了转换;(6)~(8)针对只具有效果的原子过程进行了转换;(11)~(14)为简单过程的转换伪码,该段代码将简单过程转换为PDDL组合动作,并添加到动作集中;(15)~(18)针对组合过程的控制结构分别进行了转换,将组合过程转换为PDDL组合动作,并添加到动作集中。以下针对不同类型的过程分别叙述其转换算法。

在对原子过程进行转换之前,必须对原子过程类型进行区分。根据OWL-S的情景演算形式语义^[11],Web服务效果是执行Web服务所产生的物理效果,输出是执行Web服务所产生的知识效果,因此OWL-S过程模型K中的每个原子过程不能同时具有效果和输出,其中只有效果的过程可看作是纯粹世界改变类型的Web服务,而只有输出的过程可看作是纯粹信息提供类型的Web服务。一般来说,在规划过程中不能对世界状态进行任何改变,但在规划过程中,又需从信息提供Web服务中收集到足够的信息,以做出更理性的规划。为收集足够的信

息,需要将原子过程细分为信息提供型和世界改变型2种,并且原子过程不能同时具备这2种类型。限于篇幅,本文只描述有代表性的过程转化算法。

2)信息提供型原子过程转换。信息提供型原子过程转换伪码如图3所示,用以实现将只有效果的OWL-S原子过程转换为使用PDDL表示的原始动作。

```

伪码2: 信息提供型原子过程转换
输入: 只有效果的原子过程P的形式化定义K;
输出: PDDL原始动作A;
过程:
(1)  $\vec{v} = K$ 中所定义P的输入参数列表;
(2)  $\text{Pre} = K$ 中所定义P的所有前提公式的合取式;
(3)  $\text{Eff} = K$ 中所定义P的所有效果的合取式;
(4) return  $A = (P(\vec{v}) \text{ Pre Eff})$ .

```

图3 信息提供型原子过程转换图

在图3中,原始动作将会通过改变世界状态来模拟Web服务的世界改变效果。由于规划阶段不允许改变世界状态,因此这个动作不会在规划阶段执行。

3)If-Then-Else结构组合过程转换。If-Then-Else结构组合过程转换如图4所示,用以实现将具有If-Then-Else控制结构的OWL-S组合过程转换为使用PDDL表示的组合作。

在图4中,由于PDDL没有If-Then-Else的类似结构,因此在本文中使用了in-context和series的组合结构来模拟If-Then-Else结构。

```

伪码3: If-Then-Else结构组合过程转换
输入: 具有If-Then-Else控制结构的组合过程P的形式化定义K;
输出: PDDL组合作A;
过程:
(1)  $\vec{v} = K$ 中所定义P的输入参数列表;
(2)  $\text{Pre} = K$ 中所定义P的所有前提公式的合取式;
(3)  $\text{Eff} = \emptyset$ ;
(4)  $\pi_{ij} = K$ 中所定义的If条件;
(5)  $p_1 = K$ 中所定义的If条件成立时所执行的过程,
 $p_2 = K$ 中所定义的If条件不成立时所执行的过程;
(6)  $\text{Exp} = (\text{series}(\text{in-context } p_1; \text{precondition})$ 
 $(\text{in-context } p_2; \text{precondition}(\text{not } \pi_{ij})))$ , 在PDDL中,
结构(in-context action:precondition pre)的定义如下:
in-context是该结构的关键字,动作action只有在在前提
条件Pre为真的条件下才执行;
(7) Return  $A = (P(\vec{v}) \text{ Pre Eff})$ .

```

图4 If-Then-Else结构组合过程转换图

问题,提出了一种将 Web 服务描述转化为规划描述语言 PDDL 的算法,进而将 Web 服务组合问题转换为规划问题.完成转换后,就可根据规划问题的规模及应用领域选择最适合的 AI 规划器去组合 Web 服务,从而解决了使用 AI 规划器进行 Web 服务组合通用性不强、性能因规划不同而波动较大等问题.

本文所提出的 Web 服务组合方法与使用特定 AI 规划器的组合方法相比,具有以下优点:①提高 AI 规划器对于 Web 服务组合问题的解决能力,因为单个 AI 规划器对于规划问题的解决能力有限,自由选择 AI 规划器无疑会弥补该问题;②减少使用特定 AI 规划器解决 Web 服务组合问题的开销,因为 AI 规划器的规划效率与规划问题的搜索空间有着密切的联系,根据搜索空间的规模选择合适的 AI 规划器可以变相地提高规划效率;③降低系统各模块之间的耦合性,因为将特定的 AI 规划器绑定到 Web 服务组合问题中不利于系统的升级与维护,而将 AI 规划器独立出来有利于系统的模块化.

参考文献:

- [1] DIAZ G, PARDO J J, CAMBRONERO M E, et al. Automatic translation of WS-CDL choreographies to timed automata[C]//Proceedings of the International Workshop on Web Services and Formal Methods. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005: 230-242.
- [2] 雷丽晖,段振华.一种基于扩展有限自动机验证组合 Web 服务的方法[J].软件学报,2007,18(12):2980-2990.
LEI Lihui, DUAN Zhenhua. An extended deterministic finite automata based method for the verification of composite web services[J]. Journal of Software, 2007, 18(12): 2980-2990.
- [3] 钱柱中,陆桑璐,谢立.基于 Petri 网的 Web 服务自动组合研究[J].计算机学报,2006,29(7):1057-1066.
QIAN Zhuzhong, LU Sanglu, XIE Li. Automatic composition of Petri net based web services[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(7): 1057-1066.
- [4] 邓水光,吴健,李莹,等.基于回溯树的 Web 服务自动组合[J].软件学报,2007,18(8):1896-1910.
DENG Shuiguang, WU Jian, LI Ying, et al. Automatic web service composition based on backward tree[J]. Journal of Software, 2007, 18(8): 1896-1910.
- [5] SIRIN E. Combining description logic reasoning with AI planning for composition of web services[D]. College Park, MD, USA: Univ. of Maryland, 2006.

- [6] RAO Jinghai, SU Xiaomeng. A survey of automated web service composition methods[J]. Semantic Web Services and Web Process Composition, 2005, 3387: 43-54.
- [7] MCLLRAITH S, SON T C. Adapting golog for composition of semantic web services[C]//Proceedings of the 8th Int. Conf. on Knowledge Representation and Reasoning. Toulouse, France: Morgan Kaufmann Publishers, 2002: 482-496.
- [8] NARAYANAN S, MCILRAITH S. Simulation, verification and automated composition of web services[C]//New York, USA: ACM, 2002: 77-88.
- [9] MARTIN D, BURSTEIN M, HOBBS J, et al. OWL-S: semantic markup for web services [EB/OL]. (2004-11-22)[2010-04-01]. <http://www.w3.org/Submission/OWL-S/>.
- [10] GHALLAB M, HOWE A, KNOBLOCK C, et al. PDDL: the planning domain definition language[EB/OL]. (1998-10-01)[2010-03-26]. <http://cs-www.cs.yale.edu/homes/dvm/>.
- [11] REITER R. Knowledge in action: logical foundations for specifying and implementing dynamical systems [M]. Cambridge, MA, USA: The MIT Press, 2001.
- [12] BLUM A, FURST M. Fast planning through planning graph analysis[J]. Artificial Intelligence, 1997, 90(1/2): 281-300.
- [13] RUSSELL S, NORVIG P. Artificial intelligence: a modern approach [M]. 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002.

[本刊相关文献链接]

- 面向服务级别协议的核实与规划服务质量系统框架研究. 西安交通大学学报,2010,44(6):1-5.
- 利用服务质量参数值预测的 Web 服务选择方法. 西安交通大学学报,2010,44(6):57-61.
- 内容寻址网络的 P2P 语义 Web 服务组合系统架构. 西安交通大学学报,2010,44(2):6-10.
- QoS 敏感的服务组合动态配置研究. 西安交通大学学报,2010,44(2):25-30.
- 以语义规则刻画服务请求的 Top-k Web 服务发现方法. 西安交通大学学报,2010,44(2):35-38.
- 面向 Web 服务总线集成的分阶段优先级事件驱动. 西安交通大学学报,2009,43(12):16-20.
- 面向 Pareto 最优遗传算法的服务组合方法. 西安交通大学学报,2009,43(12):50-54.
- 一组编制模式下组合 Web 服务模型的约简规则与算法. 西安交通大学学报,2009,43(6):20-23.

(编辑 武红江)