

基于模糊多属性决策理论的语义 Web 服务组合算法*

李 祯⁺, 杨放春, 苏 森

(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

Fuzzy Multi-Attribute Decision Making-Based Algorithm for Semantic Web Service Composition

LI Zhen⁺, YANG Fang-Chun, SU Sen

(State Key Laboratory of Networking and Switching, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: E-mail: jasonlizhen@gmail.com

Li Z, Yang FC, Su S. Fuzzy multi-attribute decision making-based algorithm for semantic Web service composition. Journal of Software, 2009,20(3):583-596. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3341.htm>

Abstract: Choosing the global optimal execution plan is an important process in the semantic Web service composition. The plan selection based on QoS is still challenging because the heterogeneous QoS values make data aggregation and decision making hard. This paper presents a novel Fuzzy Multi-attribute decision making-based semantic Web service Composition algorithm (FuMuCom) to solve the above difficulties for the first time. FuMuCom takes all possible QoS expression types (real number, interval and linguistic expression) into consideration. It includes three main steps: defuzzifying linguistic data, normalizing the decision matrix and evaluating alternatives synthetically. Other contributions of the paper include an extensible QoS ontology to express the heterogeneous QoS values, an ontology evolution strategy for aggregating QoS and a set of experiments that demonstrate the benefits and effectiveness of our approach.

Key words: semantic Web service; service composition; quality of service (QoS); fuzzy multi-attribute decision making (FMADM) theory; workflow technology

摘 要: 综合评估数据异构的服务质量(QoS)从而选择出全局最优的执行计划是语义 Web 服务组合研究中的难题之一.提出一种基于模糊多属性决策理论的语义 Web 服务组合的优化选择算法(FuMuCom)以解决上述难题.该算法能够评价以实数、区间数和语言型数据描述的 QoS 信息,从而进行综合决策.FuMuCom 包括 3 个步骤:语言型数据的去模糊化、异构决策矩阵的标准化和 QoS 综合评估.同时还介绍了一个可扩展的本体用来描述异构的 QoS 数据;同时,从本体进化的角度介绍了一种异构 QoS 的聚合算法.最后,通过对真实的服务质量数据进行实验,验证了该算法的优越性和有效性.

关键词: 语义 Web 服务;服务组合;服务质量(QoS);模糊多属性决策(FMADM)理论; workflow 技术

中图法分类号: TP311 文献标识码: A

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.90204007 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z164 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Basic Research Program of China under Grant No.2003CB314806 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2007-10-12; Accepted 2008-03-28

语义 Web 服务组合技术能够帮助在线的商业应用自治地整合成增值的复杂服务,从而满足客户的需求^[1]. 在一个服务组合场景中,客户首先向服务组合引擎提供他对于组合服务的功能性和非功能性(在本文中主要指 QoS)的需求,然后组合引擎基于 workflow 技术生成组合服务的执行路径^[2,3],随后,组合引擎将访问服务发现主体通过语义匹配的方法^[4]为执行路径中的每个任务找到满足功能性需求的服务实例.在这之后,相对于每个任务都有众多的功能相似的候选服务,这些候选服务的每一个可能的组合被称作一个服务组合执行计划^[2].最后,最优的执行计划通过一个 QoS 感知的服务组合过程得出,并将其返回给客户.本文主要围绕组合中的最后一个过程进行讨论,从概念上讲,该过程可分为 3 个顺序的步骤:QoS 聚合(根据单个服务的 QoS 值计算整个计划的总体 QoS 值)、语义 QoS 匹配^[5,6](找到满足客户总体非功能需求的计划)和最终决策^[7-13](在满足需求的候选计划集中找到最优的方案).

然而,目前的 QoS 聚合算法和最终的决策算法都基于一个假设:所有的服务质量数据必须以实数的形式明确给出.这个假设早已不能满足当今商业应用对 QoS 描述的需求,越来越多的学者认为这种描述方法会丧失大量有用的数据信息,对于某些 QoS 属性应该以不确定的形式给出,以增强模型描述的能力.其中,可以采用区间型数据描述某些 QoS 属性在某一时间段内的突发最大值和最小值^[5,6],同时采用语言型数据描述那些不能以具体数值表示的 QoS 属性^[8].然而,目前的决策方法均不能有效地支持这种数据异构的 QoS 模型.本文根据异构数据描述的 QoS 给出了基于模糊多属性决策理论的服务组合决策算法(FuMuCom).FuMuCom 包括 3 个主要的步骤:首先介绍一种去模糊化的方法将语言型表示的数据转变为实数,然后给出决策矩阵的标准化方法,最后提出一个优良度指标来综合衡量每个执行计划的质量.本文还介绍了一个用于描述异构 QoS 的本体;在考虑本体进化策略的同时提出了一套异构 QoS 的聚合算法,并通过真实数据对 FuMuCom 进行实验以证明其优越性和有效性.

本文第 1 节介绍 QoS 本体及其进化策略.第 2 节讨论 FuMuCom 的算法细节.第 3 节给出实验结果和分析.第 4 节介绍相关工作并与 FuMuCom 进行比较.第 5 节总结本文,并同时给出在服务组合领域中未来的研究计划.

1 QoS 本体和进化

语义网和语义 Web 服务研究工作的基础在于创建领域相关的本体,用来明确地描述概念和概念之间的关系,从而为参与的智能主体能够自治地完成相应任务提供必要的知识基础.WWW 联盟(World Wide Web Consortium, W3C)为此提出了 Web 本体语言(Web ontology language, 简称 OWL)^[14]用来对 Web 上的资源进行语义描述和 OWL-S(OWL service ontology)^[15]基于 OWL 并用来对 Web 服务进行语义建模.本节要介绍的 QoS 本体就是扩展自 OWL-S,从而确保该本体能够与其他遵从 OWL-S 标准的 Web 服务本体进行无缝解释和融合.

1.1 QoS 本体

通常情况下,3 类智能主体将会参与到 QoS 感知的语义 Web 服务组合过程中来:智能客户主体、服务组合引擎和服务注册中心.智能客户主体负责转达客户需求、偏好以及完成一部分的 QoS 测量工作(提供反馈信息),服务组合引擎接收来自客户和服务注册中心的相关信息完成决策过程,服务注册中心负责收集来自服务提供商和客户反馈的 QoS 信息.为了使上述过程能够自治地执行,我们需要定义一个 QoS 顶层本体,用来描述相关的概念以达到丰富相关主体知识的目的.图 1 给出了该本体.

图中以圆形表示的概念为 OWL-S 定义的顶层概念,白色椭圆形表示为参与 QoS 感知的语义 Web 服务组合的智能主体的通用概念,灰色椭圆形表示组合引擎特有的概念.在该本体中,根概念是 QoS,所有的 QoS 属性均为 QoS 概念的子概念.每个 QoS 属性拥有一个性质,成本型和效益型是两种不同的属性性质.成本型的属性值越小,表明其质量越优,反之,效益型的属性值越大,其质量越优.另外,每个 QoS 属性都有其自身的度量方式,使用度量方式可以得到该属性的值,该值可为实数、区间数或语言型数据,每个 QoS 值还拥有与其对应的单位.总体来说,度量方式可分为两类:(1) 由服务提供商进行度量并直接给出 QoS 值,随后将其发布(例如:价格);(2) 由客户主体提供度量的原始数据(反馈)并由注册中心进行度量,从而得到属性值(例如:时延).另外,在服务组合场景中,客户需要提供必要的客户数据(QoS 需求和 QoS 偏好)给组合引擎,随后,组合引擎将根据 workflow 模型自治地执行

QoS 聚合算法计算执行计划的总体 QoS 并执行决策算法,为客户选择出最优方案.所有 QoS 属性概念定义在中层本体中并继承自 QoS 根概念,其他与 QoS 相关的描述可以方便地与顶层本体或中层本体中的概念建立连接.在本文中,我们提出了描述性更强的模型用来增加 QoS 提供的信息量.下面我们以 5 种常见的 QoS 属性为例加以说明.

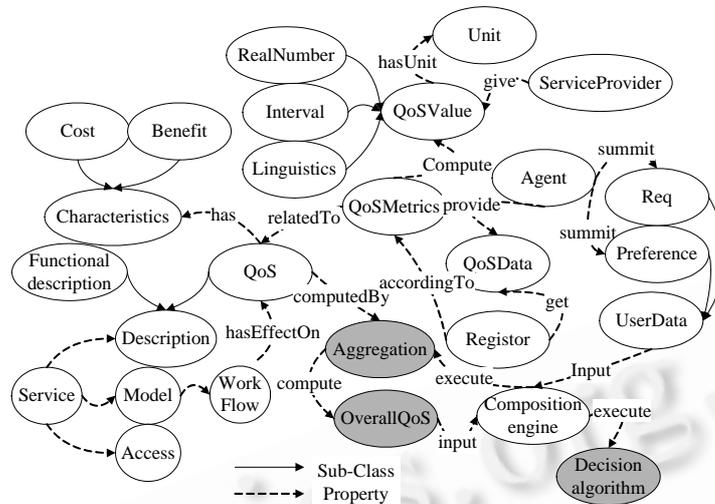


Fig.1 QoS upper ontology

图 1 QoS 顶层本体

价格:指一个服务请求者在访问服务时需要的花销,该属性需要由服务提供商给出且按照式(1)计算:

$$P_{ws} = P_r + P_s \quad (1)$$

其中, P_{ws} 表示访问服务的总价格, P_r 是货品交易(trade-off)的价格(如:机票), P_s 是 Web 服务的软件(software)执行价格.

可用性:指 Web 服务可访问的概率.其模型由下式给出:

$$A_{ws} = \frac{T_r}{n} \quad (2)$$

其中, A_{ws} 表示服务的可用性, T_r 表示在一定时间区间内该服务可用(ready)的次数, n 表示在此时间段内的访问总次数.可用性应由注册中心基于客户的反馈进行计算.每个客户主体在提出服务请求后自治地提供反馈,如果请求得到响应则反馈为 1,反之则为 0. T_r 可由下式得出:

$$T_r = \sum_{i=1}^n f_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中, f_i 表示第 i 次请求后的反馈值.

时延:表示从客户的请求消息发出到最终服务执行结束所需的时间开销.下式给出单次访问的时延模型:

$$l_{ws} = t_{transaction} + t_{transmission} \quad (4)$$

其中, l_{ws} 表示一次访问的时延, $t_{transaction}$ 表示软件服务事务的执行时间, $t_{transmission}$ 表示网络数据传输的时间.注册中心需要计算和统计一个服务在固定时间段内的时延信息并将其发布.我们使用区间数的形式表示一定时间段内的服务时延信息,其模型如下:

$$L_{ws} = [\min(l_{ws1}, l_{ws2}, \dots, l_{wsn}), \max(l_{ws1}, l_{ws2}, \dots, l_{wsn})] \quad (5)$$

式(5)说明一个服务的时延信息通过其在一定时间段内的 n 个单次访问时延的最小值和最大值表示.

以往,时延常以一定时间段内的服务访问时间的平均值进行计算.但是,我们定义了该属性的更为丰富的信息,能够使得决策结果更加合理、有效.例如:服务 1 和服务 2 具有相同的时延均值 200ms,但 $L_{ws1} = [100ms, 350ms]$, $L_{ws2} = [80ms, 230ms]$.在这种情况下,如果时延按照平均法进行定义,两个服务的时延质量没有任何区别,但是按照

我们的定义可以明显看出,在以往的历史中,服务 2 的时延表现较之服务 1 更为稳定且服务 2 的最大和最小时延均优于服务 1,所以我们可以得出服务 2 的时延在某种程度上优于服务 1.

可靠性:表示 Web 服务正确执行其功能的能力.它是对服务质量的一个综合评判,其计算数据来自于客户访问服务后的反馈.这种反馈以往简单地被定义为精确值(如在 1~10 的整数中选择一个作为可靠性的值).但是,这种定义方式不够严谨,也不能表达客户的真实意愿,因为客户不是 QoS 专家,其对于某些属性的语义必定存在理解上的困难.在访问服务之后,客户对于服务的整体 QoS 至多是有个模糊的“感觉”,例如:较高.从模糊理论的角度来看,在这种情况下,任何一个精确的数据都不能作为客户意愿的准确表达.所以,我们建议以语言型的数据描述服务的可靠性指标.在一次服务访问结束后,服务请求者为服务的可靠性打一个模糊的分数,该分数是集合(高(very high),较高(high),一般(normal),较低(low),低(very low))中的一个元素.虽然语言型数据具有正确合理的描述能力,但却不易计算,所以为了后续综合决策的需要,我们将语言数据量化.常用的量化方法是将模糊打分映射为相应的三角模糊数^[16],如 $[a^l, a^m, a^u]$.其中 a^l, a^m 和 a^u 分别表示三角模糊数的下界、核和上界值.这种映射的基本思想是:将一个语言数据与一个区间内的实数相对应,且区间内的不同实数按照一定的概率(隶属度函数)与该语言数据等价.例如:使用[1,3,4]表示较低,其含义是,[1,4]中的任何一个实数按照一定的概率可以表示为较低,且用 3 表示的可能性为 1.三角模糊数的取值一般需要由领域专家(QoS 专家和客户专家)给出(给出表示一个语言数据的上下界和核值),例如,我们可以使用([0,0,2],[1,3,4],[3,5,6],[5,7,9],[8,10,10])分别表示上面 5 种模糊打分,如图 2 所示.

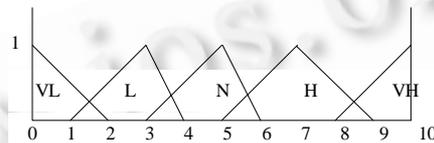


Fig.2 Examples of the triangular fuzzy number

图 2 三角模糊数

现在,我们根据客户每次的反馈,定义可靠性的模型如下:

$$R_{ws} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [a_i^l, a_i^m, a_i^u] = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^l, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^m, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^u \right] \quad (6)$$

其中, n 表示在一定时间间隔内服务被访问的总次数(i 表示某次访问).由式(6)可见,一个服务的可靠性定义为一定时间内所有客户反馈的平均值.

需要特别指出的是,任何主观打分系统都可能受到恶意客户的严重侵害,例如:某些客户与服务提供商串通,永远给其竞争对手提供的服务可靠性打以“低”分.对于可靠性来说,这种情况极难控制,因为可靠性指标涵盖的 QoS 范围较广,不易辅以客观评价的策略.对该问题的深入探讨已超越了本文的研究范畴,但是,我们在声誉定义时给出了一个恶意打分影响的削减策略(对于声誉来说,这种控制要相对简单),希望能够对其他 QoS 的研究者改善可靠性模型提供思路.

声誉:我们在以前的工作中介绍了一个改进的 Web 服务声誉模型——WSrep^[17].WSrep 集成了主观的客户打分和客观的对于 QoS 广告信息的可信性(credibility of Web service,简称 CoWS)的判断(基于贝叶斯学习理论),用来减少恶意打分攻击所带来的影响.其模型如下(进一步了解 WSrep 请阅读相关文献):

$$WSrep = \alpha \times \frac{\sum_{i=1}^n Rating}{n} + \beta \times CoWS \quad (7)$$

其中, α 和 β 为平衡因子, n 为一定时间段内服务访问的总次数(i 表示某次访问).

显而易见,在这 5 种服务质量属性中,价格和时延为成本型数据,而其他 3 种均为效益型属性.

1.2 组合引擎本体进化(ontology evolution)

参与服务组合的智能主体所掌握的 QoS 知识不是一成不变的,这种改变主要可以分为两类:(1) QoS 属性

改变,服务注册中心会根据自身的需求增加和减少 QoS 属性(例如,应客户的需求加入吞吐率属性,用来描述服务的网络性能).这种改变会波及到其他的相关主体,例如,客户主体的知识需要进行相应的改变以适应客户对于新 QoS 属性集合的需求和偏好;组合引擎的 QoS 知识也需要进行进化以能够理解新的属性集合并需要对新出现的属性制定聚合算法,用以自治地计算整个执行计划的总体 QoS 指标,为决策过程提供输入数据.(2) QoS 实例改变,这种改变主要体现在注册的服务更新了其 QoS 数据,对于实例变化的处理比较简单,这种变化不导致组合引擎的知识变化,我们只需在组合请求到来时,实时下载最新的数据进行聚合和评估即可.为了便于进行本体演化,我们提供 3 类对于该本体的操作接口(为了不破坏不同智能主体本体的一致性,我们不允许直接对本体对应的 OWL 文档进行修改):

(1) QoS 属性增加,其接口定义为 $\text{add}(\text{QoS}, \text{name}, \text{characteristic}, \text{metric}, \text{agent}, \text{value})$. 该接口只能由服务注册中心首先调用.服务注册中心可以根据具体的需求增加发布某些 QoS 属性,在增加属性时,需要提供根概念名(QoS)、属性名(name)、属性性质(characteristic)、度量方法(metric)、测量主体(agent)和值类型描述(value).

(2) QoS 属性删除,其接口定义为 $\text{delete}(\text{name})$. 该操作也只能由注册中心首先发起,一旦该操作被调用,则与该属性相关的一切描述将被删除.

(3) 更新 QoS 实例,其接口定义为 $\text{update}(\text{id}, \text{newValue})$. 该操作的输入为实例 id 和新属性值.

下面将主要讨论关于概念的操作导致组合引擎知识所产生的进化,这种进化主要表现在组合引擎中的 QoS 概念需要同步增减,更为重要的是,组合引擎需要为新加入的 QoS 概念产生聚合算法,还需产生相应的整体 QoS 属性(例如,整体价格)来描述执行计划的 QoS 属性,而整体 QoS 属性值由聚合算法按照组合结构模型实例计算得出(每个整体 QoS 属性均是整体 QoS 概念的子概念,且被定义在中层本体中).下面介绍 QoS 聚合算法.组合服务的执行路径应基于 workflow 模型加以生成,其基本的原子结构有顺序结构、循环结构、选择结构和并行结构(如图 3 所示,图中的椭圆形标志代表组合服务的一项任务).顺序结构表示其中的 n 个任务按照顺序依次执行;处于循环结构中的一个任务将被重复执行 k 次;选择结构中包含 m 个任务分支,但在运行时只有一个分支被执行,该分支依靠相应的条件为真触发;并行结构中的 m 个分支必须全部同时被执行.

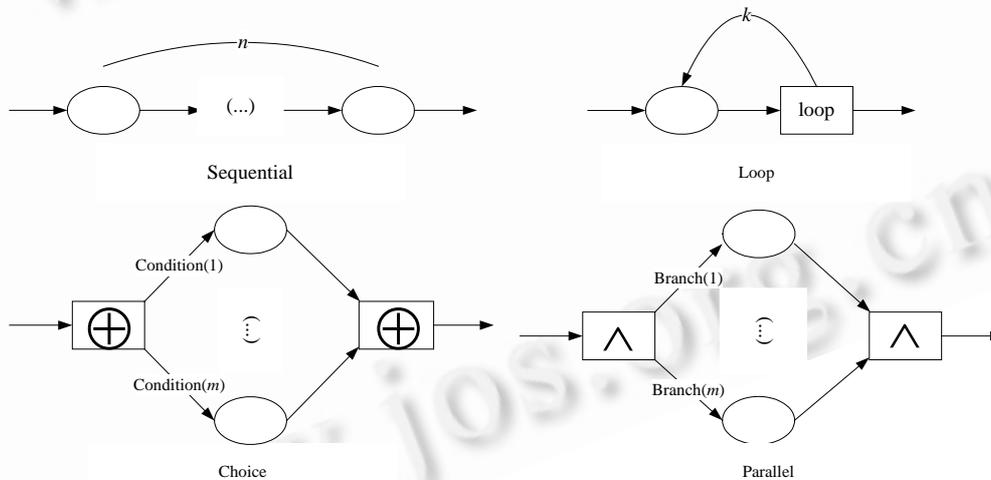


Fig.3 Atomic structures of Web service composition

图 3 Web 服务组合原子结构

这些原子结构可以自由组合和嵌套,从而形成整个服务组合的逻辑.按照这些原子结构的定义,我们给出执行计划总体 QoS 的计算方法(P, A, L, R 和 Rep 分别表示总体价格、可用性、时延、可靠性和声誉):

$$P = \begin{cases} \sum_{i=1}^n P_{wsi} & \text{顺序} \\ kP_{ws} & \text{循环} \\ \sum_{i=1}^m c_i P_{wsi} & \text{选择} \\ \sum_{i=1}^m P_{wsi} & \text{并行} \end{cases} \quad (8)$$

$$A = \begin{cases} \prod_{i=1}^n A_{wsi} & \text{顺序} \\ A_{ws}^k & \text{循环} \\ \sum_{i=1}^m c_i A_{wsi} & \text{选择} \\ \prod_{i=1}^m A_{wsi} & \text{并行} \end{cases} \quad (9)$$

$$L = \begin{cases} \left[\sum_{i=1}^n L_{wsi}^l, \sum_{i=1}^n L_{wsi}^u \right] & \text{顺序} \\ [kL_{wsi}^l, kL_{wsi}^u] & \text{循环} \\ \left[\sum_{i=1}^m c_i L_{wsi}^l, \sum_{i=1}^m c_i L_{wsi}^u \right] & \text{选择} \\ [\max_i(L_{wsi}^l), \max_i(L_{wsi}^u)] & \text{并行} \end{cases} \quad (10)$$

$$R = \begin{cases} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{wsi}^l, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{wsi}^m, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{wsi}^u \right] & \text{顺序} \\ [R_{ws}^l, R_{ws}^m, R_{ws}^u] & \text{循环} \\ \left[\sum_{i=1}^m c_i R_{wsi}^l, \sum_{i=1}^m c_i R_{wsi}^m, \sum_{i=1}^m c_i R_{wsi}^u \right] & \text{选择} \\ \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{wsi}^l, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{wsi}^m, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{wsi}^u \right] & \text{并行} \end{cases} \quad (11)$$

$$Rep = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n WSrep_i & \text{顺序} \\ WSrep & \text{循环} \\ \sum_{i=1}^m c_i WSrep_i & \text{选择} \\ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m WSrep_i & \text{并行} \end{cases} \quad (12)$$

其中, c_i 为 0-1 变量, 当 $c_i=1$ 时表示条件 c_i 被满足, 反之表示不满足. 由复杂的 Web 服务组合路径产生的执行计划的总体 QoS 可由上述算法按照 workflow 模型层层整合得到. 例如, 文献[2]介绍了一个服务组合的实例, 其 workflow 模型图如图 4 所示.

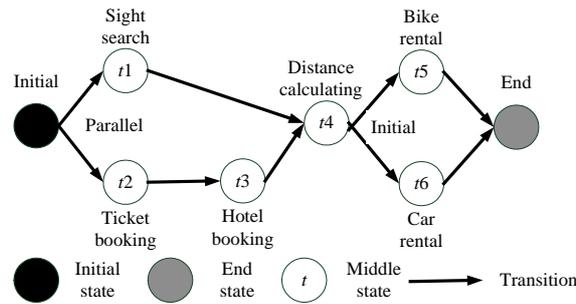


Fig.4 Example of the service composition model

图 4 服务组合模型示例

图 4 景点查询任务与机票预订和旅馆预定任务并行执行,随后,任务 t_4 负责计算旅馆和景点间的距离,然后根据计算结果选择自行车出租任务或者汽车出租任务.为了便于说明,我们假设对于每个任务都只有一个候选服务且我们以任务名代替服务名.对于这样的服务组合模型,我们首先按照顺序聚合规则聚合 t_2 和 t_3 的 QoS,然后,将其作为一个整体与 t_1 的 QoS 按照并行规则聚合,然后,并行结构的 QoS 与 t_4 的 QoS 和 t_5, t_6 中的一个 QoS 按照顺序聚合规则进行聚合,最终得到整个执行计划的 QoS.

本节详细介绍了组合引擎本体进化策略的核心:QoS 聚合,实际上,完成本体进化的工作还需要特别考虑其他的问题,例如:本体进化检测(ontology change detection)^[18,19]、本体版本控制(ontology versioning control)^[20]以及本体一致性和完整性控制(consistency and completeness)^[21],用来保证进化的合理性和提高本体的可重用性.但这已超过了本文讨论的范围,有兴趣的读者可以进一步阅读相关文献.

2 FuMuCom

本文提出的 QoS 模型虽然具有较强的描述能力,但是其中含有的不确定数据(区间型和语言型)却使得目前的决策算法失去了效力.在本节中,我们介绍 FuMuCom 用来对这种以异构形式描述的 QoS 数据进行综合评估并最终为客户选择出全局最优的执行计划.多属性决策理论是解决在多种且互相冲突的属性基础上得出最优方案的基本方法^[4].FuMuCom 借鉴了该理论的核心思想,并将其拓展以适应异构的属性数据.首先基于算法输入构造决策矩阵.我们让 $p=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 代表一个离散的候选计划的集合, $q=\{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ 代表候选计划的总体 QoS 属性, $D=(d_{ij})_{n \times m}$ 为决策矩阵,其中 d_{ij} 为第 i 个候选计划的第 j 个总体属性值.不失一般性,我们假设在决策矩阵中的实数型数据均大于 0,区间型数据的上下限均大于 0 且三角模糊数的上下界和核值均大于 0.下面介绍 FuMuCom 的具体步骤.

2.1 去模糊化

首先,为了能够对执行计划的总体 QoS 进行综合评估并进一步地进行最优决策,我们必须将矩阵 D 中的三角模糊数去模糊化.去模糊化方法是对于模糊数据的近似解释,对于每个三角模糊数来说,其重心是常用的最佳解释^[22].所以我们用下面公式将总体可用性数据去模糊化:

$$R' = \frac{\int_S x\mu(x)dx}{\int_S \mu(x)dx} = \frac{\int_{R^L} x\mu(x)dx + \int_{R^U} x\mu(x)dx}{\int_{R^L} \mu(x)dx + \int_{R^M} \mu(x)dx} \quad (13)$$

其中, $\mu(x)$ 表示 R 的隶属度函数, S 表示相应的积分区间.在去模糊化过程结束之后,初始矩阵 D 转变成为 $\tilde{D}=(\tilde{d}_{ij})_{n \times m}$,其中仅包含实数型数据和区间型数据.去模糊化的方法会对模糊数据造成一定的语义损失,但这种方式却能够极大地简化综合决策过程.去模糊化后所得到的数据比精确描述有更为正确的语义且能够与其他数值型数据进行综合计算,所以我们认为这种方法是处理决策矩阵中模糊数据的最佳方法.

2.2 规格化

为了便于数据的评估和比较,我们需要将矩阵 \tilde{D} 中的数据规格化至一个相同的量纲.我们将 \tilde{D} 中的每个实数型数据看作一个上下界相等的区间数.让 $\tilde{N} = (\tilde{n}_{ij})_{n \times m}$ 表示规格化矩阵.我们所使用的规格化定理见下面公式:

$$\begin{cases} \tilde{n}_{ij} = \tilde{d}_{ij} / \|\tilde{d}_j\|, & \text{Characteristic} = \text{Benefit} \\ \tilde{n}_{ij} = \tilde{d}_{ij}^{-1} / \|\tilde{d}_j^{-1}\|, & \text{Characteristic} = \text{Cost} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\|\tilde{d}_j\|$ 为矩阵 \tilde{D} 中第 j 个列向量的欧几里德模(该向量的长度)且 $\|\tilde{d}_j\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \tilde{d}_{ij}^2}$, $\|\tilde{d}_j^{-1}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \tilde{d}_{ij}^{-2}}$.根据区间数的四则运算法则,公式(14)可以被推导为式(15)和式(16):

$$\begin{cases} n_{ij}^L = d_{ij}^L / \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_{ij}^L)^2} \\ n_{ij}^U = d_{ij}^U / \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_{ij}^L)^2} \end{cases}, \text{Characteristic} = \text{Benefit} \quad (15)$$

$$\begin{cases} n_{ij}^L = (d_{ij}^U)^{-1} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_{ij}^L)^{-2}} \\ n_{ij}^U = (d_{ij}^L)^{-1} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_{ij}^U)^{-2}} \end{cases}, \text{Characteristic} = \text{Cost} \quad (16)$$

容易看出,在矩阵 \tilde{N} 中,对于所有 i 和 j 都有 $0 \leq n_{ij}^L \leq 1 \wedge 0 \leq n_{ij}^U \leq 1$ 且当 n_{ij}^L 和 n_{ij}^U 越大时,表明其质量越优.

2.3 综合评估

我们让 $\tilde{\omega} = \langle \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m \rangle$ 为客户的权重向量且 $\omega_j \in R \wedge \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \wedge \omega_j \geq 0$.现在我们可以得到加权的规格化决策矩阵 $\tilde{W} = (\tilde{w}_{ij})_{n \times m}$,其中 $\tilde{w}_{ij} = \omega_j \tilde{n}_{ij} = [\omega_j n_{ij}^L, \omega_j n_{ij}^U]$.在介绍 QoS 综合评估模型之前,我们需要定义矩阵 \tilde{W} 中的正理想点和负理想点作为评估的基准.

定义. 正理想点(\tilde{s}^+)和负理想点(\tilde{s}^-).

$$\begin{aligned} \tilde{s}^+ &= \langle \tilde{s}_1^+, \tilde{s}_2^+, \dots, \tilde{s}_m^+ \rangle, \\ \tilde{s}_j^+ &= [s_j^{+L}, s_j^{+U}] = [\max_i(w_{ij}^L), \max_i(w_{ij}^U)], \\ \tilde{s}^- &= \langle \tilde{s}_1^-, \tilde{s}_2^-, \dots, \tilde{s}_m^- \rangle, \\ \tilde{s}_j^- &= [s_j^{-L}, s_j^{-U}] = [\min_i(w_{ij}^L), \min_i(w_{ij}^U)]. \end{aligned}$$

容易看出,正理想点表示理想的最优服务组合执行计划,而负理想点表示理想的最劣计划.下面我们介绍一个优良度函数用来评估候选的服务组合执行计划:

$$fin(\tilde{w}_i, \tilde{s}^+, \tilde{s}^-) = \frac{d(\tilde{w}_i, \tilde{s}^-)}{d(\tilde{s}^+, \tilde{s}^-)} \times 100\% = \frac{\sum_{j=1}^m \sqrt{(w_{ij}^L - s_j^{-L})^2 + (w_{ij}^U - s_j^{-U})^2}}{\sum_{j=1}^m \sqrt{(s_j^{+L} - s_j^{-L})^2 + (s_j^{+U} - s_j^{-U})^2}} \times 100\% \quad (17)$$

优良度函数将第 i 个执行计划的加权 QoS 信息和正、负理想点作为输入,函数 $d()$ 表示两个区间型向量的距离.容易看出,优良度越高的执行计划其综合质量越好.这样我们就可以对决策矩阵中的每个执行计划按照优良度的高低进行降序排序,从而得到最优的决策结论.

3 实验

我们首先分析 FuMuCom 算法的时间复杂度,假设输入的候选计划数量为 n ,实现去模糊化过程时积分区间被分成的个数为 r ,QoS 属性的种类为 m ,其中 1 个属性以模糊数据定义.该算法中,我们首先将决策矩阵中的 $l \times n$ 个三角模糊数去模糊化,其时间复杂度为 $O(l \times r \times n)$,规格化带来的时间复杂度为 $O(m \times n)$,综合评估带来的时间复杂度为 $O(n)$.所以,整个算法的时间复杂度为 $O((l \times r + m) \times n)$,其中, l, r 和 m 可看作常数.线性的时间复杂度说明 FuMuCom 具有很高的运行效率.

本节通过对真实服务的 QoS 数据进行实验来验证 FuMuCom 的优势和有效性.实验可以分为两个部分:在第 1 部分中,我们将 FuMuCom 和另一种单目标决策算法(single objective decision making,简称 SODM)进行比较,证明了通过 FuMuCom 选择出的计划才是综合最优的;随后,我们通过实验验证了在执行计划的 QoS 改变时 FuMuCom 具有极高的决策灵敏性和稳定性.

3.1 实验初始设置

由于 FuMuCom 是针对描述能力更强的度量异构的 QoS 模型提出来的,所以我们无法基于现有的 QoS 数据(目前的 QoS 数据均以确定的实数进行描述)对其进行实验.我们的实验方法是自行开发 Web 服务并按照本文提出的模型实时测量其 QoS 数据,最终完成决策过程.本实验所采用的服务组合场景为一个简单的旅游服务,该服务包括机票预定任务、旅馆预订任务和租车任务,这 3 项任务按照顺序依次执行.我们为这 3 项任务分别实现了 3 个 Web 服务实例,同时,我们开发了一个服务组合引擎用来运行 FuMuCom.

对于每个服务实例,我们首先统计它的 QoS 信息,这主要是通过以下方法来进行:每个服务的价格由实验组成员指定(服务提供商);每个服务的声誉值是按照模型自动生成的(因为真实的交易并未进行,所以我们不可能得到真实的声誉值);其他的 QoS 信息均通过本校 100 名志愿者(客户)通过反馈的形式得出,每个客户被要求在一周内对每个服务访问 100 次(在任何时间、学校内的任何地点、通过任何网络进行访问),客户提交的信息包括服务是否可用、时延和对于可靠性的模糊打分(这些反馈全部是诚信的).在此动态测试之中,客户和服务提供者之间的行为是互相独立的,换句话说,提供者们可以对服务进行任意开关设置,可自由使用运行服务的 PC 和网络资源.然后,我们根据这些反馈信息并按照相关公式计算出每个服务的 QoS.而后,另外一个客户(组合服务的客户)提出自己对于组合服务的 QoS 需求($P \leq \$150$).组合引擎生成所有可能的执行计划($3^3=27$)并且计算出每个执行计划的总体 QoS.随后在客户需求的限制下,第 15 项计划被选出作为决策主体的输入,它们的整体 QoS 值列于表 1.

Table 1 Service composition candidate set

表 1 服务组合执行计划候选集

Plan\QoS	Price(\$)	Availability	Response time(ms)	Reliability	Reputation
1	120	0.97	[200,350]	[8,10,10]	0.91
2	150	0.97	[180,320]	[5,7,9]	0.98
3	130	0.98	[240,310]	[8,10,10]	0.93
4	95	0.95	[280,320]	[3,5,6]	0.86
5	125	0.85	[190,360]	[0,0,2]	0.62
6	140	0.93	[210,260]	[3,5,6]	0.40
7	120	0.98	[220,340]	[8,10,10]	0.98
8	110	0.99	[230,300]	[8,10,10]	0.28
9	135	0.87	[180,280]	[1,3,4]	0.56
10	100	0.94	[260,270]	[3,5,6]	0.97
11	105	0.93	[196,269]	[5,7,9]	0.99
12	110	0.96	[219,318]	[5,7,9]	0.99
13	125	0.95	[208,271]	[8,10,10]	0.55
14	115	0.99	[237,346]	[0,0,2]	0.89
15	130	0.89	[188,332]	[1,3,4]	0.96

3.2 结果和讨论

对于度量异构的 QoS 数据,我们还可以以一种 SODM 的方法进行评估,这种方法只考虑一个客户最为关注

的 QoS 属性而不考虑其他属性.其他的服务组方法均不能对异构的 QoS 数据进行比较和评估.我们假设 5 组供测试的客户偏好向量 $\omega_1=(0.36,0.21,0.23,0.05,0.15)$, $\omega_2=(0.05,0.36,0.23,0.15,0.21)$, $\omega_3=(0.05,0.21,0.36,0.15,0.23)$, $\omega_4=(0.15,0.23,0.05,0.36,0.21)$ 和 $\omega_5=(0.23,0.21,0.15,0.05,0.36)$.容易看出,这 5 组偏好体现了客户的关注点在 5 个 QoS 属性之间变化.我们通过执行两种算法来证明 FuMuCom 的优选结果才是综合最优的.图(5)给出了两种算法在不同权重限制下的排序结果(当使用 SODM 且客户的关注点在时延上时,我们对候选计划使用时延上下界的平均值进行排序).

为了更精确地说明 FuMuCom 的优势,我们介绍一项指标(*dif*)来计算两个计划的综合 QoS 差.

$$dif(p_i, p_j) = fin(p_i, \bar{s}^+, \bar{s}^-) - fin(p_j, \bar{s}^+, \bar{s}^-) \tag{18}$$

该指标的正值表示计划 *i* 综合优于计划 *j*,反之则表示 *i* 综合劣于 *j*.

表 2 列出了通过两种算法选择出的计划,以及通过 FuMuCom 选择出的最优计划与通过 SODM 算法选择出的计划的综合 QoS 差.从该表可以看出,FuMuCom 在 5 组权重的限制下选出的最优计划分别为 11,1,2,7 和 11,同时,这 5 个计划在很大程度上优于通过 SODM 算法选出的服务.例如:在 ω_1 的限制下,计划 11 综合优于计划 4 达 13.0851%,我们也可以从表 1 中直观地看出,虽然计划 4 具有最低的价格,但其可靠性很差,这可能会引起多发的运行时错误,使客户蒙受损失.本组实验证明了 FuMuCom 更能够确保选择出的服务组合执行计划具有最优的综合 QoS,而 SODM 算法只能片面地选择出客户最关注、属性最优的计划,这种忽视其他服务质量的算法可能导致服务访问的失败或使客户受到欺诈(例如:声誉表现差).

另外,当服务组合执行计划的 QoS 发生变化时,一种好的服务组合算法应该具有很高的灵敏性来体察这种改变.同时,还应确保未改变的计划在综合排序中保持相对稳定的位置.为此,我们介绍两项新颖的指标来考察这种灵敏性和稳定性.

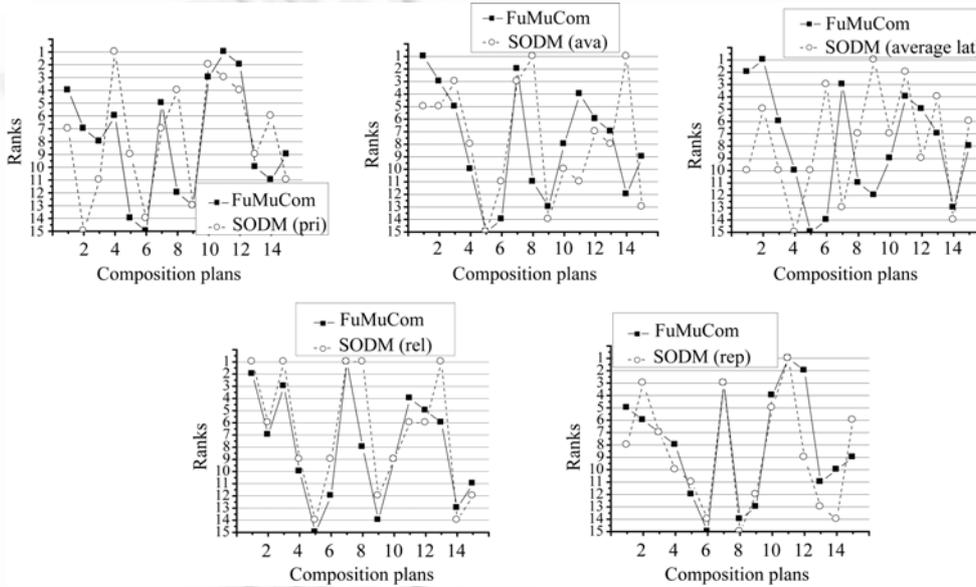


Fig.5 Comparison of FuMuCom and SODM

图 5 FuMuCom 与 SODM 的比较

Table 2 Comparative analysis of results

表 2 实验结果比较分析

Weight/Algorithm	FuMuCom (Plan)	SODM (Plan)/Exceed (%)
ω_1	11	4 /13.0851
ω_2	1	8/31.6132; 14/41.133
ω_3	2	9/37.3857
ω_4	7	1/1.989; 3/3.529; 7/0; 8/21.0867; 13/15.2455
ω_5	11	11/0; 12/3.967

$$sen(p_i) = \left| \frac{fin(p'_i, \tilde{s}^+, \tilde{s}^-) - fin(p_i, \tilde{s}^+, \tilde{s}^-)}{fin(p_i, \tilde{s}^+, \tilde{s}^-)} \right| \times 100\% \tag{19}$$

$$sta(p_j) = 1 - \left| \frac{fin(p'_j, \tilde{s}^+, \tilde{s}^-) - fin(p_j, \tilde{s}^+, \tilde{s}^-)}{fin(p_j, \tilde{s}^+, \tilde{s}^-)} \right| \times 100\% \tag{20}$$

$$\bar{sta} = \frac{\sum_{j=1}^n sta(p_j)}{n-1}, j \neq i \tag{21}$$

如果第 i 个计划的 QoS 改变了,我们使用 $sen()$ 函数来表示 FuMuCom 相对于该计划的灵敏性,使用函数 $sta()$ 表示 FuMuCom 相对于某个 QoS 未改变的计划 j 的稳定性, \bar{sta} 表示该算法对于所有 QoS 未改变计划的平均稳定性.在本组实验中,我们使用 ω_1 作为限制.在 ω_1 的限制下,计划 6 为最劣.下面我们该计划为例说明 FuMuCom 具有很高的灵敏性和稳定性.图 6 给出了实验结果.我们首先假设计划 6 的价格被改变(以每次\$2 递减).图 6(a)给出了 FuMuCom 相对于计划 6 改变价格时的灵敏性.灵敏性从 3.1328% 一直上升到 31.8367%.另外,当价格减少了\$18 时,计划 6 的排名上升了 1.然而,计划 6 的价格改变对于其他计划的平均优良度影响甚微.图 6(a)同时显示了 FuMuCom 相对于其他计划的平均稳定性都接近于 100%.接下来我们将计划 6 的价格设置为初始值,然后分别改变其时延的下界和上界(以每次 10ms 递减).图 6(b)给出了实验结果.当我们改变其下界时 FuMuCom 相对于计划 6 的灵敏性从 3.2308% 上升至 33.1256%.同时,相对于其他计划的平均稳定性均高于 95.3209%.当我们改变其上界时(下界值置回),灵敏性的最大值达 9.9324%,平均稳定性均高于 95.2368%.该组实验以价格和时延为例验证了 FuMuCom 能够响应细微的服务质量变化并且能够最大限度地保持服务质量未变的计划的优良度.换言之,如果某个候选计划的服务质量得以改善,则其优良度会大幅度提升,其排序的名次也可能因此而上升.反之,如果某个计划的质量下降,那么它将快速地丧失其竞争力.

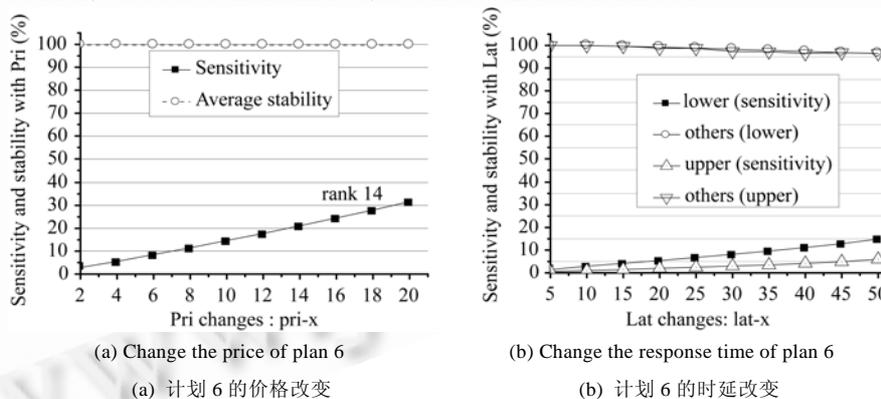


Fig.6 Sensibility and stability of the FuMuCom

图 6 FuMuCom 的灵敏性和稳定性

4 相关工作介绍

在语义 Web 服务的相关研究工作中,文献[2,3,5-8,23,24]等均提出了他们的 QoS 本体模型,其中以文献[5,8]

提出的本体模型描述能力最强,涵盖了较为广泛的 QoS 相关概念.前者的最大优势在于定义了一个 QoS 顶层本体用来描述与 QoS 管理策略和匹配相关的概念,后者则定义了度量异构的 QoS 模型,提出了 QoS 度量应多样化的建议,其中包含了对于区间型和语言型度量的定义.本文提出的 QoS 本体结合了以往本体的优势,主要定义了与服务组合相关的 QoS 概念,特别地,我们补充了关于 QoS 属性性质、整体 QoS、客户数据和 QoS 测量相关概念的定义.使用本文提出的本体丰富智能主体的知识能够使得 QoS 感知的语义 Web 服务组合高效、自治地进行.

就我们的认知而言,目前存在的服务组合计划优选算法可以分为 3 类.第一,QoS 计算.例如,文献[7]介绍了一种在动态服务选择中的 QoS 计算算法(基于简单的加权平均)并且建立了一个开放、公平的算法框架来评估候选服务的 QoS.文献[8]改进了上述算法,提出了基于 WSMO(Web service modeling ontology)^[25]的 QoS 综合评估算法.第二,数学规划.文献[2]介绍了一种基于中间件平台的 QoS 感知的 Web 服务组合算法.该文的作者使用整数规划作为模型对执行计划进行选择.然而,该方法没有考虑语义 QoS 匹配的过程,因而需要对所有可能的执行计划进行评估,该算法的效率随着任务的增加而大幅度地降低.第三,启发式算法.文献[9,10]使用不同的 QoS 基因编码方式讨论了遗传算法在 Web 服务组合中的应用.文献[11]讨论了基于 QoS 的 Web 服务组合的多目标遗传模型.在文献[12]中,QoS 感知的服务组合被建模为多维的、多选择的 0-1 背包问题和多限制的最优路径算法.文献[13]介绍了一系列的 QoS 聚合算法和基于回溯的计划选择算法.上述方法都用到了启发式思想,他们的实验结果表明,用于处理服务组合问题的启发式算法比整数规划方法具有更好的性能和可测性.

然而,上述方法都将 QoS 属性值定义为实数(虽然文献[8]的作者建议 QoS 度量应该考虑区间方法和语言方法,但在其选择算法中,为了寻求简便仍然假设所有的 QoS 数据均以确定的实数形式给出).这样的 QoS 模型无法准确地描述某些 QoS 属性的信息(如时延和可靠性).另外,他们对于声誉的定义均完全基于客户的主观反馈,这样的模型无法抵御恶意打分的攻击.在本文和文献[17]中,我们改进了这些属性的定义以满足复杂多样的商业 QoS 建模需求.对于改进的 QoS 模型,以往的决策算法均不能满足对于异构 QoS 数据的综合评估需求,这主要表现在他们的方法无法处理决策矩阵中实数、区间数和语言型数据的统一规格化和综合决策问题.我们在前面的工作^[26]中介绍了一种决策算法用来评估以实数型和区间型数据描述的 QoS.另外,我们扩展了上述工作将语言型 QoS 也纳入到算法框架中来^[27],同时,还给出了在客户权重信息未知情况下的自动偏好生成算法.然而,这两种算法仅仅考虑了在服务组合中的局部优化问题(对组合逻辑中的每个任务进行优化).

FuMuCom 算法进一步扩展了我们以前的算法以达到全局优化的目的,并且与其他方法相比,具有着显著的优势:首先我们给出了一个 QoS 本体来描述以实数型、区间型和语言型数据描述的 QoS 值及服务组合的相关概念,该本体是其他服务组合相关主体的知识基础,同时也是服务组合算法自治运行的保障;另外,我们介绍了一个基于 QoS 聚合的本体进化框架用来实时更新组合引擎的知识;第三,我们介绍了 FuMuCom 的细节用以解决异构 QoS 的综合评估问题,这包括一个语言型数据的去模糊化过程、一个异构决策矩阵的规格化过程和一个 QoS 综合决策过程;最后的实验结果证明了 FuMuCom 能够有效地解决已有算法所不能解决的服务组合中的 QoS 异构问题,同时证明了 FuMuCom 的优势和效力.

5 结束语及展望

日益复杂多样的在线商业应用需要描述能力更强的、灵活的 QoS 模型,这种模型中将包含确定的(实数模型)、不确定的(区间模型和语言模型)信息.然而,目前的语义 Web 服务组合算法均不能支持这种异构的 QoS 数据,无法有效地对这些数据进行统一规格化和综合评估.本文提出了一种基于模糊多属性决策理论的语义 Web 服务组合算法(FuMuCom)来综合评估候选执行计划的异构 QoS,最终为客户选择出全局最优的组合方案.本文首先介绍了一个新颖的 QoS 本体来描述与服务组合、QoS 监测和客户数据相关的概念;然后我们介绍了一种基于异构 QoS 的聚合算法的组合引擎本体进化策略,用来对组合引擎的知识进行高效地管理和更新.在此之后,我们给出了 FuMuCom 的细节,这包括对于语言型数据的去模糊化过程,对于混合数据的标准化过程和基于优良度函数的 QoS 综合决策过程.最后,我们通过对于真实数据的实验,证明了 FuMuCom 比单目标决策算法更具

效力且具有极高的决策灵敏性和稳定性。

FuMuCom 中的 QoS 聚合算法在组合逻辑任务众多的情况下会在很大程度上影响整个算法的执行效率,我们正在为 FuMuCom 设计一套分布式与启发式相结合的执行框架,其目的在于能够在生成少数执行计划总体 QoS 的基础上达到组合优化的目的,同时满足客户的需求。另外,我们正在考虑:1) 如何在模糊客户偏好和不完备客户偏好的限制下应用 FuMuCom;2) 为一类特殊的服务组合场景(多客户参与)设计群决策算法;3) 设计和实现一个自治的多主体框架来应用我们的服务组合决策算法。

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是北京邮电大学副校长杨放春教授、北京邮电大学计算机科学技术系苏森教授以及参与实验的同学们,表示感谢。

References:

- [1] McIlraith SA, Son TC, Zeng HL. Semantic Web services. *IEEE Intelligent Systems*, 2001,16:46–53.
- [2] Zeng LZ, Benatallah B, Ngu AHH. QoS-Aware middleware for Web services composition. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2004,30(5):311–327.
- [3] Hu CH, Wu M, Liu GP, Xu DZ. An approach to constructing Web service workflow based on business spanning graph. *Journal of Software*, 2007,18(8):1870–1882 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1870.htm>
- [4] Sycara K, Paolucci M, Ankolekar A, Srinivasan N. Automated discovery, interaction and composition of semantic Web services. *Journal of Web Semantics*, 2003,1(1):27–46.
- [5] Maximilien EM, Singh MP. A framework and ontology for dynamic Web services selection. *IEEE Internet Computing*, 2003,8:84–93.
- [6] Zhou C, Chia LT, Lee BS. DAML-QoS ontology for Web services. In: Zhang LJ, ed. *Proc. of the ICWS 2004*. IEEE Computer Society, 2004. 472–479.
- [7] Liu Y, Ngu AHH, Zeng LZ. QoS computation and policing in dynamic Web service selection. In: Feldman SI, Uretsky M, Najork M, Wills CE, eds. *Proc. of the WWW 2004*. New York: ACM Press, 2004. 42–53.
- [8] Wang X, Vitvar T, Kerrigan M, Toma I. Synthetical evaluation of multiple qualities for service selection. In: Asit D, Winfried L, eds. *Proc. of the ICSOC 2006*. LNCS 4294, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 152–162.
- [9] Canfora G, Penta MD, Esposito R, Villani ML. An approach for QoS-aware service composition based on genetic algorithms. In: Beyer HG, O'Reilly UM, eds. *Proc. of the GECCO 2005*. Washington: IEEE Computer Society, 2005. 1069–1075.
- [10] Zhang CW, Su S, Chen JL. Genetic algorithm on Web services selection supporting QoS. *Chinese Journal of Computers*, 2006,29(7):1029–1037 (in Chinese with English abstract).
- [11] Liu SL, Liu YX, Zhang F, Tang GF, Jing N. A dynamic Web services selection algorithm with QoS global optimal in Web services composition. *Journal of Software*, 2007,18(3):646–656 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/646.htm>
- [12] Yu T, Lin KJ. Service selection algorithms for composing complex services with multiple QoS constraints. In: Benatallah B, Casati F, Traverso P, eds. *Proc. of the ICSOC 2005*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 130–143.
- [13] Berbner R, Spahn M, Repp N, Heckmann O, Steinmetz R. Heuristics for QoS aware Web service composition. In: Leymann F, ed. *Proc. of the ICWS 2006*. Chicago: IEEE Computer Society, 2006. 72–82.
- [14] Smith MK, *et al.* OWL Web ontology language overview. <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-guide-20040210/>
- [15] Martin D, Burstein M, Hobbs J, Lassila O, McDermott D, McIlraith S, Narayanan S, Paolucci M, Parsia B, Payne T, Sirin E, Srinivasan N, Sycara K. OWL-S: Semantic markup for Web services. <http://www.w3.org/Submission/2004/SUBM-OWL-S-20041122/>
- [16] Klir GJ, Yuan B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall PTR, 1995. 128–132.
- [17] Li Z, Su S, Yang FC. WSrep: A novel reputation model for dynamic Web services selection. In: Nguyen NT, ed. *Proc. of the KES-AMSTA 2007*. LNAI 4496, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 199–207.
- [18] Plessers NT, De Troyer O, Casteleyn S. Understanding ontology evolution: A change detection approach. *Journal of Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 2007,5(1):39–49.
- [19] Karimi-Mostowfi F, Fotouhi PF. Change management in ontology management systems [Ph.D. Thesis]. Wayne: Wayne State University, 2006.
- [20] Noy NF, Musen MA. Ontology versioning in an ontology management framework. *IEEE Intelligent Systems*, 2004,19(4):6–13.

- [21] Maedche A, Motik B, Stojanovic L, Studer R, Volz R. Ontologies for enterprise knowledge management. *IEEE Intelligent Systems*, 2003,18(2):26–33.
- [22] Deng HP, Yeh CH. Simulation-Based evaluation of defuzzification-based approaches to fuzzy multiattribute decision making. *IEEE Trans. on Systems, Man, Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2006,36(5):968–977.
- [23] Ran SP. A model for Web services discovery with QoS. *ACM SIGecom Exchanges*, 2004,4(1):1–10.
- [24] QoS for Web services: Requirements and possible approaches. <http://www.w3c.or.kr/kr-office/TR/2003/ws-qos/>
- [25] de Bruijn J, Bussler C, *et al.* Web service modeling ontology (WSMO). <http://www.w3c.org/submission/2005/SUBM-WSMO-20050603/>
- [26] Li Z, Shuang K, Yang FC, Su S. A decision making approach for semantic Web services selection with heterogeneous QoS values. In: Muntean GM, Brennan C, Sadleir R, eds. *Proc. of the CIICT 2007*. 2007. 783–790.
- [27] Li Z, Su S, Yang FC. Towards autonomic semantic Web services selection with heterogeneous QoS values and uncertain user weights. In: Harmid RA, ed. *Proc. of the SWWS 2007*. CSREA Press, 2007. 535–543.

附中文参考文献:

- [3] 胡春华,吴敏,刘国平,徐德智.一种基于业务生成图的 Web 服务 workflow 构造方法. *软件学报*,2007,18(8):1870–1882. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1870.htm>
- [10] 张成文,苏森,陈俊亮.基于遗传算法的 QoS 感知的 Web 服务选择. *计算机学报*,2006,29(7):1029–1037.
- [11] 刘书雷,刘云翔,张帆,唐桂芬,景宁.一种服务聚合中 QoS 全局最优服务动态选择算法. *软件学报*,2007,18(3):646–656. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/646.htm>



李祯(1981—),男,北京人,博士生,主要研究领域为下一代互联网服务,语义 Web 服务.



苏森(1971—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为下一代互联网服务,通信技术.



杨放春(1964—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为下一代互联网,下一代电信网.