

## 基于云模型的不确定性 QoS 感知的 Skyline 服务选择\*

王尚广<sup>1+</sup>, 孙其博<sup>2</sup>, 张光卫<sup>2</sup>, 杨放春<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(北京交通大学 下一代互联网互联设备国家工程实验室, 北京 100044)

<sup>2</sup>(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

### Uncertain QoS-Aware Skyline Service Selection Based on Cloud Model

WANG Shang-Guang<sup>1+</sup>, SUN Qi-Bo<sup>2</sup>, ZHANG Guang-Wei<sup>2</sup>, YANG Fang-Chun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(National Engineering Laboratory for NGI Interconnection Devices, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: E-mail: sgwang@bupt.edu.cn

**Wang SG, Sun QB, Zhang GW, Yang FC. Uncertain QoS-aware Skyline service selection based on cloud model. Journal of Software, 2012, 23(6):1397-1412. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4084.htm>**

**Abstract:** Because traditional QoS-aware Web service selection approach cannot ensure the reliability and the real-time of service selection, this paper proposes an uncertain QoS-aware Skyline service selection approach based on cloud model. The approach first uses cloud model to compute the uncertainty of QoS and then adopts Skyline computing to extract Skyline services from Web services to prune redundant services. Finally, mixed integer programming is employed to perform service selection from Skyline services. The study evaluates the approach experimentally using both real and synthetically generated datasets. The experimental results show that the proposed approach can accomplish service selection for users reliably and quickly.

**Key words:** QoS; uncertainty; cloud model; Web service; Skyline; service selection

**摘要:** 由于传统 QoS 感知的 Web 服务选择方法无法保证服务选择的可靠性和实时性,提出了一种基于云模型的不确定性 QoS 感知的 Skyline 服务选择方法.该方法首先通过云模型计算 QoS 的不确定性,然后采用 Skyline 计算提取 Web 服务中的 Skyline 服务,剔除冗余服务,最后采用混合整数规划在 Skyline 服务中进行服务选择.在公共有效数据集和合成数据集上的实验结果表明,所提出的方法能够为用户提供可靠、快速的服务选择.

**关键词:** 服务质量;不确定性;云模型;Web 服务;Skyline;服务选择

中图法分类号: TP311 文献标识码: A

由于 Web 服务技术迅速成为下一代商业服务应用事实上的标准,在面向服务的体系架构(service-oriented architecture,简称 SOA)中,Web 服务将成为下一代商业服务应用运行的基石<sup>[1]</sup>.现有的行业标准,如 WSDL,UDDI,WS-BPEL,为注册、发现和组合 Web 服务提供了强大的技术支持,能够将 Web 上的现有服务无缝地组合成功能

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60833002, 60821001); 国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB320406); 国家高技术研究发展计划(863)(2008AA01A317); 北京市自然科学基金(4091003); 核高基国家科技重大专项(2009ZX01039-001-002-01)

收稿时间: 2010-07-14; 修改时间: 2011-01-20; 定稿时间: 2011-07-01

更加强大的增值服务,以满足用户多样化的需求或应用<sup>[2]</sup>.

虽然目前的 SOA 架构能够很好地支持 Web 服务的注册、发现和组合,但在如何将 Web 上的服务根据用户的 QoS 请求可靠、快速、有效地整合成为新的服务,仍然存在诸多挑战,但却吸引了来自工业界和学术界的热切关注,尤其是对服务组合过程中 QoS 感知的服务选择方法的优化.

图 1 给出一个实际应用中的 Web 服务选择的例子,即二手车购买服务<sup>[3]</sup>.在该应用中,用户首先向系统提交他们的购车服务请求,该请求中包含有用户选择汽车的 QoS(如品牌、车型、型号等)请求.当系统收到用户请求后,将根据用户提出的 QoS 请求返回给用户一个最佳报价清单.该清单上为每一辆车都提供了最佳的信贷服务报价和保险服务报价.进一步分析该例子中的某些任务,如图 1 中的灰色盒子所示.它含有多个功能属性相同但非功能属性(QoS)不同的候选服务组成,本文称为服务类.服务类不是指具体的服务,而是完成某项具体任务的候选服务(具体服务)的抽象.例如提供信贷服务的信贷服务类包含了多个候选服务、工行的信贷服务、建行的信贷服务、农行的信贷服务等.服务类中的每个候选服务或许来自不同的服务提供者.例如,信贷服务(credit offer service)的提供者可能来自工商银行、建设银行或其他银行和金融机构.当用户在发出服务请求时,通常不关注所涉及的具体服务,而仅仅指出他们的 QoS 请求,以便在服务水平协商(service level agreement)中能够满足其端到端的 QoS 约束(如端到端的平均响应时间、最低的吞吐量、最大的花费开销).所以,基于全局 QoS 约束的服务选择目标是,在每个任务(服务类)中选择一个候选服务,使得 QoS 的聚合值满足其 Web 服务应用中对 QoS 的所有约束要求.

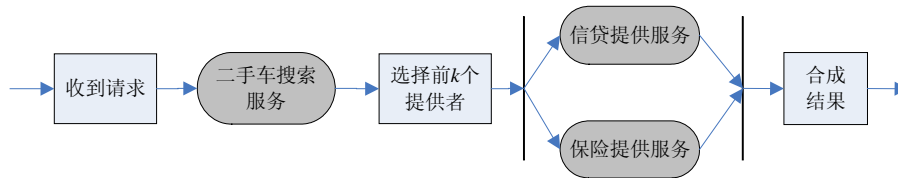


Fig.1 An example of Web service selection

图 1 一个 Web 服务选择的例子

因此,基于 QoS 感知的 Web 服务选择可以抽象为根据用户的 QoS 请求,从多个服务类(服务类不是指具体的服务,而是实现具体功能或完成某项任务的具体服务的抽象,如图 1 中提供信贷服务的信贷服务类、提供保险服务的保险服务类等)中选择那些满足用户 QoS 要求的候选服务(候选服务是实现具体任务或功能的服务)的一个选择过程.由图 1 可以看出,从众多功能属性相同 QoS 不同的候选服务中选择满足用户要求的 Web 服务时,Web 服务中的 QoS 属性扮演了非常重要的角色.因此,与目前众多服务选择方法<sup>[4-14]</sup>类似,本文主要研究如何从存在的众多功能属性相同但 QoS 不同的候选服务中,选择满足用户 QoS 要求的组合服务.本文称其为 QoS 感知的服务选择问题.

尽管已有的服务选择方法取得了较好的研究成果,为 Web 组合服务的应用起到了重要的推动作用,但其仍存在以下不足:

首先,忽视了 QoS 内在的不确定性,导致服务选择可靠性差.已有的选择方法通常假定候选服务的 QoS 是真实可信且不随时间发生变化的,然而在实际应用中,由于 QoS 具有内在的不确定性,使得上述假设往往不成立.导致 QoS 不确定性的主要原因有以下两点:第一,服务提供者可能出于利益考虑,为了吸引更多的用户使用,发布了与其实际服务水平相差较大的 QoS 数据;第二,由于 Web 服务环境的动态性,对于通过多次交易聚合计算或相应的服务描述得到的 QoS 值,并不能如实地反映该服务的实际性能(服务性能波动较大).而目前现有的服务选择方法通常无法有效地涵盖上述不确定性,这使得服务选择结果与实际结果偏差较大,服务选择质量难以得到长期和稳定的保证,最终导致服务选择失败.因此,针对 QoS 内在的不确定性,研究具有可靠 QoS 保障的服务选择方法有着重要的现实意义.

其次,服务选择计算时间过长,导致实时性差.当服务选择的前一个阶段获得了满足其功能要求的 Web 服务后,如何降低该阶段(考虑非功能属性要求的服务选择)的时间花费,一直是许多研究者<sup>[4-14]</sup>关注的一个热点.目前,已有的选择方法通常在降低计算时间(或时间复杂度)方面过多地关注服务选择优化算法本身,而忽视了影响服务选择时间花费最根本的因素,即那些呈指数级增加的候选服务,导致服务选择超出时间要求.世界最大的 Web 服务搜索引擎 Seekda!(<http://webservices.seekda.com/>)公布的统计数字显示,在过去 3 年时间里,Web 服务的数量呈指数性增长.另外,随着按次付费的云计算商业模式的推广,将促使服务供应商为用户提供更多的为满足其 QoS 需求的(软件)服务<sup>[5]</sup>.因此可以预计,不久的将来,服务用户将不得不面对功能相同但 QoS 不同的海量服务信息.众所周知,基于 QoS 全局约束的服务选择可以转化为多选择多空间的背包问题,而该问题是 NP 难题<sup>[8]</sup>.因此,如果不从新的角度来透视服务选择中的时间复杂度问题,或许当前众多优秀的服务选择优化算法在面对成千上万的候选服务时,仍将消耗巨大的计算时间,这在实际应用中是无法忍受的.所以,如何从新的视角研究快速的服务选择方法就变得非常紧迫<sup>[15]</sup>.

针对当前服务选择方法存在的不足,我们采用一种新的视角去研究 Web 服务选择中的可靠性和实时性问题,其核心是采用云模型计算 QoS 的不确定性,以保障服务选择的可靠性,然后引入 Skyline 计算剔除冗余候选服务以降低服务选择的时间花费,其实现方式是我们提出的基于云模型的不确定性 QoS 感知的 Skyline 服务选择方法,简称为 SSSCM(Skyline service selection based on cloud model).在 SSSCM 中:首先,采用云模型中的逆向云算法对候选服务 QoS 进行定量到定性的转换,计算其不确定性,剔除 QoS 波动较大的服务;然后,运用 Skyline 计算获得不被其他服务支配的候选服务,即 Skyline 服务;最后,应用混合整数规划从所有的 Skyline 服务中选择满足用户全局 QoS 约束的最优服务组合.为了验证所提出的 SSSCM 方法,我们在实验中不仅采用了从网络上收集到的公共有效数据集,而且还采用了合成数据集.实验结果表明,SSSCM 不仅有效地保障了服务选择的可靠性,而且还显著地降低了服务选择的时间花费.

与已有的研究工作相比,本文的主要贡献是:首先,分析了 Web 服务中 QoS 内在不确定性产生的原因,同时给出了当前 QoS 感知的服务选择在计算时间方面面临的挑战;其次,为了克服 QoS 内在不确定性导致的服务选择可靠性差的问题,采用云模型计算 QoS 的不确定性,提高服务选择的可靠性;然后,面对网络中存在的大量候选服务导致服务选择计算时间过长的问题,引入 Skyline 计算剔除冗余服务,在保障服务选择可靠性的同时,提高服务选择的实时性;再次,为了可靠、快速地选择出满足用户 QoS 要求的组合服务,提出了基于云模型的不确定性 QoS 感知的 Skyline 服务选择方法;最后,在实验中采用公共真实数据集和合成数据集对我们提出的方法进行了验证,并与已有方法进行了比较.

本文第 1 节是本文研究中的相关知识介绍.在第 2 节中给出研究方法 SSSCM,包括 QoS 不确定性计算、Skyline 计算和 Skyline 服务选择.第 3 节是实验评价部分,包括实验建立、实验结果对比.第 4 节是相关工作介绍.最后总结全文并指出下一步研究工作.

## 1 相关知识

为了便于理解我们提出的研究方法,本节将有针对性地给出服务选择中的相关定义及概念.

**定义 1(QoS)**<sup>[4]</sup>. 目前,不同标准和研究组织(如 ITU,ETSI,ISO,IETF 等)对 QoS 的定义不尽相同,但国际标准 ISO 8402 和 ITU E.800 对 QoS 的定义更好地反映了 Web 服务 QoS 的特点.即 QoS 是由一些非功能属性组成,包括服务价格(cost)、服务执行时间(time)、服务可用性(availability)和服务可靠性(reliability)等.这不但体现服务提供者提供的服务质量本身的物理意义,还反映了用户的需要并将对用户的满意度产生影响.

服务类中,每个候选服务的 QoS 属性可以分为积极属性和消极属性两类.积极属性考虑 QoS 的最大化,如吞吐率、可用性;消极属性考虑 QoS 的最小化,如价格、响应时间.出于简化的目的,本文仅考虑消极属性.对于积极属性,通过负值计算(乘以-1)可以将其转化为消极属性<sup>[8]</sup>.

假设一个组合服务  $S=\{S_1,\dots,S_n\}$ ,每个服务类  $S_j$  中都包含  $l$  个功能属性相同但 QoS 不同的候选服务,即  $S_j=\{s_{j1},\dots,s_{jl}\}$ .每个候选服务  $s$  的 QoS 属性值可用向量  $Qs=\{q_1(s),\dots,q_n(s)\}$  表示,即  $q_i(s)$  表示服务  $s$  的第  $i$  个属性

的数值函数,它决定了该属性质量的大小.为了定量地计算出组合服务的 QoS 属性值,QoS 聚合函数被提出.

**定义 2(QoS 聚合函数).** QoS 聚合函数是由候选服务的 QoS 属性值和相应的组合模型(如顺序、概率、循环等)聚合获得,它由被期望的 QoS 属性值的候选服务聚合得到.

例如,在顺序模型下,组合服务  $S$  的 QoS 属性中价格和响应时间的聚合函数为  $q(S) = \sum_{j=1}^n q(s_j)$ ,吞吐率的聚合函数为  $q(S) = \min_{j=1}^n q(s_j)$ .虽然服务的组合类型不同(如顺序、概率、循环等),但均可通过文献[7,16]中的技术将其分解为顺序类型的聚合函数,有关 QoS 聚合函数的更多信息见文献[4,8].

在 Web 服务选择中,由于候选服务具有的多个 QoS 属性,导致其 QoS 属性值的单位或范围不尽相同,不利于从全局 QoS 最优角度上对每个候选服务的 QoS 属性值进行计算或评估.因此,QoS 效用函数被提出.

**定义 3(QoS 效用函数).** QoS 效用函数是用来将服务类中的每个候选服务的 QoS 属性向量  $Q_s$  映射到一个实数值,通过该值对每个候选服务进行排序或分类,以便于选择到满足 QoS 约束的服务组件.其构造方法是,将 Web 服务中的候选服务(或服务类)与其对应的最大值或最小值进行比较,从而将多个 QoS 属性值进行归一化处理,使其转化到一个综合衡量的实数值.其中,加权值代表用户偏好或优先级.

例如,在顺序模型中,候选服务  $s \in S_j$  和组合服务  $S$  的 QoS 效用函数  $U(s)$  和  $U(S)$  可通过下式计算:

$$U(s) = \sum_{k=1}^r \frac{Q_{j,k}^{\max} - q_k(s)}{Q_{j,k}^{\max} - Q_{j,k}^{\min}} \cdot w_k \quad (1)$$

$$U(S) = \sum_{k=1}^r \frac{Q_k^{\max} - q_k(S)}{Q_k^{\max} - Q_k^{\min}} \cdot w_k \quad (2)$$

其中,  $w_k \in R^+$  ( $\sum_{k=1}^r w_k = 1$ ) 表示用户偏好;  $Q_{j,k}^{\min} \left( Q_{j,k}^{\min} = \min_{\forall s_{ji} \in S_j} q_k(s_{ji}) \right)$  表示服务类  $S_j$  中所有候选服务中第  $k$  个属性的最小值;  $Q_k^{\min} \left( Q_k^{\min} = \sum_{j=1}^n Q_{j,k}^{\min} \right)$  表示所有服务类中第  $k$  个属性的最小值;类似地,  $Q_{j,k}^{\max} \left( Q_{j,k}^{\max} = \max_{\forall s_{ji} \in S_j} q_k(s_{ji}) \right)$  和  $Q_k^{\max} \left( Q_k^{\max} = \sum_{j=1}^n Q_{j,k}^{\max} \right)$  为最大值.

## 2 SSSCM 方法

本文提出的 SSSCM 方法分为 3 个阶段:第 1 阶段是 QoS 不确定性计算(第 2.1 节),将通过运用云模型对 Web 的 QoS(来自 QoS Monitoring<sup>[17]</sup>)进行定量到定性的转换来计算 QoS 的不确定性,目的是为了保证服务选择的可靠性;第 2 阶段是 Skyline 计算(第 2.2 节),将通过采用 Skyline 计算剔除冗余候选服务,目的是降低服务选择的时间花费;最后阶段是 Skyline 服务选择(第 2.3 节),在上述两阶段的基础上,通过使用混合整数规划进行服务选择,目的是可靠、快速地获得满足用户全局 QoS 约束要求的组合服务.

### 2.1 QoS 不确定性计算

为了降低 QoS 不确定性对服务选择可靠性的影响,SSSCM 方法采用云模型对 Web 服务 QoS 进行定量到定性概念的转换,计算 QoS 的不确定性.首先,有针对性地给出云模型的部分相关概念和定义.

#### 2.1.1 云模型

云模型<sup>[18]</sup>是李德毅院士在概率理论和模糊集合理论基础上,重点考虑随机性和模糊性的关联性而发展起来的定性知识描述和定性概念与其定量数值表示之间的不确定性转换模型,已经在智能控制、模糊评测、进化计算等多个领域得到应用<sup>[19-21]</sup>.

**定义 4(云和云滴<sup>[21]</sup>).** 设  $U$  是一个用数值表示的定量论域, $C$  是  $U$  上的定性概念.若定量值  $x \in U$  是定性概念  $C$  的一次随机实现, $x$  对  $C$  的确定度  $\mu(x) \in [0,1]$  是有稳定倾向的随机数  $\mu: U \rightarrow [0,1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$ ,则  $x$  在论域  $U$  上的分布称为云,记为云  $C(x)$ ,每个  $x$  称为一个云滴.

定义中提及的随机实现是概率意义下的实现,每一次实现的随机样本又具有一个随机的确定度;定义中提及的确定度是模糊集意义下的隶属度,同时又具有概率意义下的分布,这些体现了模糊性和随机性的关联性.如果概念对应的论域是  $n$  维空间,那么可以拓广至  $n$  维云,这意味着它能对本文研究中的多个 QoS 属性提供定量到定性的转换支持.

云模型所表达概念的整体特性可以用云的数字特征来反映.云用期望  $Ex$ (expected value)、熵  $En$  (entropy)、超熵  $He$ (hyper entropy)这 3 个数字特征来整体表征一个概念(本文用其表示 QoS 的稳定程度,即不确定性).期望  $Ex$  是云滴在论域空间分布的期望;熵  $En$  代表定性概念不确定性的度量;超熵  $He$  是熵的不确定性度量.用 3 个数字特征表示的定性概念的整体特征记作  $C(Ex,En,He)$ ,称为云的特征向量.在云模型的相关运算中,正向云算法和逆向云算法是最重要的两种.通过正向云算法,可以把定性概念的整体特征变换为定量数值表示,实现概念空间到数值空间的转换;通过逆向云算法,可以实现从定量到定性概念的转换,将一组定量数据转换为以数字特征  $\{Ex,En,He\}$  来表示的定性概念.

### 2.1.2 QoS 定量到定性的转换

我们以两个功能相同的酒店 Web 服务  $A$  和  $B$  为例,说明通过逆向云算法中定量到定性的转换功能计算 QoS 的不确定性.在酒店 Web 服务中,服务  $A$  和  $B$  的性能表现可以通过一系列的服务运行日志获得,从而能够监测到每一个被激活的 Web 服务的实际 QoS 数据.由于服务环境的动态性,实际运行中的 Web 服务性能经常呈现不确定性,而该不确定性可以通过对同一 Web 服务在不同时刻或组合场景中 QoS 属性数值的波动上给予体现,即 QoS 内在的不确定性.虽然实际中 Web 服务的交易记录数量非常巨大,但为了便于说明,本文仅以表 1 中  $A$  和  $B$  的 5 个交易记录中的响应时间属性为例,阐述 QoS 不确定性计算.

Table 1 A record of Web services execution

表 1 Web 服务运行记录

Web 服务:A		Web 服务:B	
ID	响应时间(ms)	ID	响应时间(ms)
$A_1$	29	$B_1$	16
$A_2$	26	$B_2$	40
$A_3$	30	$B_3$	31
$A_4$	26	$B_4$	34
$A_5$	26	$B_5$	12
$A$	27.4	$B$	26.6

表 1 给出了两个 Web 服务在响应时间属性上的运行记录, $A$  和  $B$  分别代表了服务  $A$  和  $B$  在响应时间属性上的运行统计平均值,其通常直接用于 QoS 感知的 Web 服务选择.由于  $B < A$ ,所以与服务  $A$  相比, $B$  通常要优先于  $A$  被选择用于组合服务.然而,如果仔细分析上述两个服务的每一个运行记录,我们惊奇地发现以下两点:1) 尽管服务  $B$  的平均响应时间略小于  $A$ ,但服务  $A$  中的 3 个记录( $A_2, A_4, A_5$ )都小于  $B$ ,而服务  $B$  中的 3 个记录( $B_2, B_3, B_4$ )都大于  $B$ .表明在大部分时间内,服务  $A$  的响应时间要小于服务  $B$ ;2) 服务  $B$  的响应时间波动明显大于服务  $A$ ,即  $B$  的响应时间属性的不确定性要明显大于  $A$  的.

根据上述两点,如果按照通常的服务选择方法选择服务  $B$  用于组合服务,则或许会导致服务  $B$  的实际运行结果与用户的响应时间属性请求偏离较大,导致服务选择,并且用户获得的组合服务也并非最优解.另外,正如文献[10]所指,在服务选择中,对于用户来讲,选择 QoS 较好且稳定的 Web 服务比 QoS 波动较大的服务更为重要.因此,本文将通过逆向云算法计算 QoS 的不确定性.

**算法 1.** 逆向云算法<sup>[21]</sup>.

输入:某个 Web 服务中的某个 QoS 属性(该算法也支持多维,更多信息见文献[21])的  $n$  个运行记录值,即  $n$  个云滴  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ;

输出:这  $n$  个云滴表示该 QoS 属性的期望值  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$ .

步骤:

1. 根据  $x_i$  计算该组数据的样本均值  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 、一阶样本中心距  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}|$ 、样本方差

$$T^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2;$$

2.  $Ex$  的估计值为  $\widehat{Ex} = \bar{X}$ ;
3.  $En$  的估计值为  $\widehat{Ee} = \frac{\sqrt{\pi/2}}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \widehat{Ex}|$ ;
4.  $He$  的估计值为  $\widehat{He} = \sqrt{T^2 - \widehat{Ee}^2}$ .

将上述算法应用到表 1,我们将能计算出以期望值  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$  表示的该 QoS 属性的不确定性程度.通过计算,服务 A 的 3 个数字特征为 {27.40,2.11,3.10},服务 B 的 3 个数字特征为 {26.60,12.63,144.25}.由服务 A 的熵  $En=2.11$  和超熵  $He=1.63$  可以看出,服务 A 的不确定性程度较低,且其不确定性状态变化较小;而由服务 B 的  $En=12.63$  和超熵  $He=144.25$  可以看出,服务 B 的不确定性程度及其状态变化均明显大于服务 A.显然,服务 A 的 QoS 较为稳定,而 B 的 QoS 则存在较大的波动.因此,通过对云模型中  $En$  和  $He$  参数设置判决门限,服务代理<sup>[22]</sup>能够剔除服务类中 QoS 不确定性程度较大的候选服务,保留 QoS 较为稳定的服务,从而为服务选择获得较为可靠的组合服务提供了保障.而对于 QoS 较为稳定的候选服务,本文使用其期望值  $Ex$  代表该服务的性能.

QoS 感知的服务选择目标是在满足所有指定的 QoS 约束的条件下,从每个服务类中选择 QoS 总效用函数最大的一组服务.然而,并不是只要在每个服务类中选择出 QoS 效用函数最大的候选服务就能够保证获得正确的解,即使该服务的 QoS 是稳定可靠的.主要原因是它不能保证满足端至端的 QoS 约束.因此,每个服务类中的所有候选服务都需要给予考虑,但并不是所有的候选服务都是最优组合服务的潜在候选者.由于每个服务类中仅仅存在一个候选服务被选为服务组件,所以对于服务选择方法来讲,大部分服务都是冗余的.

因此,在 QoS 不确定性计算的基础上,SSSCM 方法通过引入 Skyline 计算剔除那些被其他服务支配的候选服务,保留那些可能成为服务组件的潜在候选者,以便减少服务选择方法的搜索空间,降低计算时间.

## 2.2 Skyline 计算

Skyline 计算(查询)<sup>[23]</sup>就是从数据库中抽取不被其他任何数据对象支配的数据对象集合,也称为 Pareto(帕累托,在不损害他方利益的条件下,自身已达最优).近年来,Skyline 计算引起了越来越多研究者的关注,已经在数据挖掘、数据可视化、对等网络等多个领域得到了应用<sup>[24-28]</sup>.

**定义 5(Skyline 计算).** Skyline 计算是指从一个给定的  $d$  维空间内,选择那些不被其他点支配(dominate)的点.所谓支配是指对于点  $\bar{p}(p_1, \dots, p_d)$  和  $\bar{q}(q_1, \dots, q_d)$ , 如果  $\forall i \in [1, d], p_i \geq q_i$  ( $\geq$  表示好于或等于)且  $\exists i \in [1, d], p_i > q_i$  ( $>$  表示好于),则称  $\bar{p}$  支配  $\bar{q}$ .

由定义 5 可以看出,Skyline 计算的目的是从海量信息中选择最好或最有意义的对象.因此,根据定义 5,我们将 Skyline 计算应用到 Web 服务中,用于剔除那些被其他服务支配的冗余候选服务,降低服务选择的搜索空间.首先给出服务支配和 Skyline 服务的定义.

**定义 6(服务支配).** 设存在一个服务类  $S=\{s_1, s_2\}$ ,它包含两个候选服务  $s_1$  和  $s_2$  且每个服务都有  $k$  个 QoS 属性.如果  $\forall i \in [1, k], s_i \geq s_i$  且  $\exists i \in [1, k], s_i > s_i$ , 则有  $s_1 \prec s_2$  ( $\prec$  表示服务支配),即服务  $s_1$  的 QoS 中的每一个属性都好于或等于服务  $s_2$  的 QoS 属性,且至少有一个属性要好于  $s_2$  的 QoS 属性.

**定义 7(Skyline 服务).** 所谓 Skyline 服务是指在一个服务类  $S$  中不被其他服务支配的候选服务集合  $SkyS$ , 即  $SkyS = \{s_i \in S | \neg \exists s_j \in S: s_j \prec s_i\}$ .

图 2 给出了服务类  $S_j$  的一个 Skyline 服务( $SkyS_j$ )的例子.在该例中,服务类  $S_j$  包含 7 个候选服务,每个候选服务都有 2 个 QoS 属,即响应时间和价格(其值即是逆向云算法输出的期望值  $Ex$ ),且每一个候选服务可以认为是 2 维空间中的一个点.根据定义 6 和定义 7,由于服务  $s_{j2}$  不被该服务类中的任何其他服务支配,即没有其他服务的 QoS 属性比  $s_{j2}$  中的响应时间更短、价格更低,因此服务  $s_{j2}$  是 Skyline 服务( $s_{j2} \in SkyS_j$ ).同理,  $s_{j5}$  和  $s_{j6}$  也是 Skyline

服务.因此,服务类  $S_j$  的 Skyline 服务为  $SkyS_j = \{s_{j2}, s_{j5}, s_{j6}\}$ .

而对于该服务类中的其他服务,由于其被  $\{s_{j2}, s_{j5}, s_{j6}\}$  支配,所以不属于 Skyline 服务,部分服务支配关系是:由于  $1 < 3$  且  $14 = 14$ ,所以  $s_{j2}$  服务支配  $s_{j3}$ ;由于  $2 < 4$  且  $12 < 13$ ,所以  $s_{j5}$  服务支配  $s_{j4}$ ;由于  $3 < 5$  且  $11 = 11$ ,所以  $s_{j6}$  服务支配  $s_{j7}$ ;由于  $1 = 1$  且  $14 < 16$ ,所以  $s_{j2}$  服务支配  $s_{j1}$ .

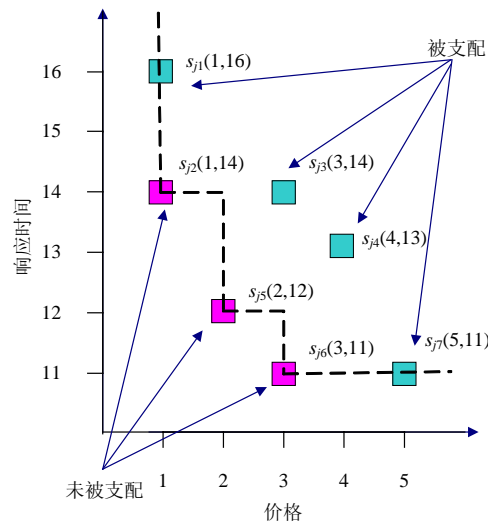


Fig.2 An example of Skyline services

图2 一个 Skyline 服务的例子

通过上述例子可以看出,服务类  $S_j$  中的候选服务数量由最初的 7 个降到了 3 个.4 个冗余的候选服务被剔除,显然达到了降低服务选择搜索空间的目的.当然,在确定每个服务类的 Skyline 服务时,需要对所有候选服务的多个 QoS 属性进行比较.如果候选服务数量较大时,该过程或许将耗费较多计算时间.然而,由于服务选择与 Skyline 计算是互相独立的,因此可以采用已有的 Skyline 计算方法<sup>[29]</sup>进行离线计算(负责 Skyline 服务的更新),从而不影响服务选择的时间性能.另外, Skyline 服务体现了服务的不同 QoS 属性之间的权衡,在没有明确地给出 QoS 属性的优先级时, Skyline 服务中的候选服务是没有可比性的,从而保留了许多更有价值的 QoS 信息,用于满足用户的多样 QoS 需求.例如,对于某个用户,服务  $s_{j7}$  或许是最好的选择,尽管它的价格较高,但响应时间却较短;而对于另外一个用户,服务  $s_{j2}$  或许是最好的选择,尽管其响应时间较长,但它的价格较低.

通过 Skyline 计算后,获得了每个服务类中的 Skyline 服务.由于 Skyline 服务的 QoS 较为稳定且剔除了冗余服务,因此 SSSCM 方法将从每个服务类的 Skyline 服务中进行 Skyline 服务选择.

### 2.3 Skyline 服务选择

众所周知,基于全局 QoS 约束的服务选择的重点是从所有可能的服务组合中选择一个 QoS 效用函数值最大且满足全局 QoS 约束的组合服务.例如,如果全局 QoS 约束  $CS = \{C_1, \dots, C_m\}$ ,  $0 \leq m \leq r$ , 求得的组合服务  $S = \{s_1, \dots, s_n\}$  是最优组合服务,则必须满足以下两个条件<sup>[9]</sup>:

1. 组合服务中所有服务类的 QoS 效用函数值  $U(S)$  最大;
2. 组合服务的 QoS 聚合值  $q(S) \leq C, \forall C_m \in CS$ .

由于 SSSCM 方法采用云模型屏蔽了 QoS 不确定性较大的服务,且通过 Skyline 计算剔除了冗余服务,从而在保证获得可靠服务的同时,降低了服务选择的搜索空间.因此,本文只需从 Skyline 服务中进行服务选择,就能得到满足用户全局 QoS 约束的最优组合服务.

**命题 1.** 假设满足上述两个条件的最优组合服务为  $S=\{s_1, \dots, s_n\}$  ( $s_i$  是对应服务类  $S_i$  中的服务), 则对于  $S$  中的每一个服务, 都属于其对应服务类的 Skyline 服务  $SkyS_i$ , 即  $s_i \in SkyS_i$ .

证明: 假设  $s_i \notin SkyS_i$ , 则根据定义 6 和定义 7, 必存在另一个服务  $\bar{s}_i, \bar{s}_i \in S_i$  且  $\bar{s}_i \prec s_i$ . 令  $\bar{s}_i$  代替  $s_i$ , 从而得到一个新的组合服务  $\bar{S}=\{s_1, \dots, \bar{s}_i, \dots, s_n\}$ . 由于  $s_i, \bar{s}_i \in S_i$  (它们都属于相同的服务类) 且顺序模型下 QoS 聚合函数的单调性(见第 2.1 节), 即越大(小)的 QoS 属性值产生越大(小)的 QoS 聚合值, 所以  $\bar{S}$  满足服务选择的第 2 个条件. 另外, 由于 QoS 效用函数  $U(s)$  和  $U(S)$  也是单调的, 即越大(小)的 QoS 聚合值产生越大(小)的 QoS 效用函数值, 所以  $\bar{S}$  的效用函数值大于  $S$  的, 满足服务选择的第 1 个条件. 综上, 新的组合服务满足服务选择的两个条件. 因此,  $\bar{S}$  是比  $S$  更好的组合服务. 这显然与已知条件  $S$  是最优组合服务矛盾, 故假设不成立, 必有  $s_i \in SkyS_i$ , 命题成立.

因此, 基于云模型和 Skyline 计算获得的 Skyline 服务, 混合整数规划被用于求解满足上述两个条件的最优组合服务. 令  $x_{ji}$  代表第服务类  $S_j$  中候选服务  $s_{ji}$  对应的二进制变量, 如果  $x_{ji}=1$ , 则意味着  $s_{ji}$  被选为最优组合服务中的服务组件; 否则  $x_{ji}=0$ , 该服务被丢弃. 此时, SSSCM 方法获得的最优组合服务, 即是下列多目标优化问题的解:

max(组合服务效用函数):

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^l U(s_{ji}) \cdot x_{ji} \quad (3)$$

s.t(全局 QoS 约束):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^l q_m(s_{ji}) \cdot x_{ji} \leq C_m, & 1 \leq m \leq r \\ \sum_{j=1}^l x_{ji} = 1, & 1 \leq j \leq n \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $n$  为服务类的数量,  $l$  为服务类中候选服务的数量,  $r$  是 QoS 属性的数量,  $m$  为 QoS 属性受约束的数量,  $C_m$  为 QoS 的约束值.  $\square$

因此, 通过上述混合整数规划, SSSCM 方法能够从每个服务类中的 Skyline 服务中快速、可靠地选择出满足用户全局 QoS 约束的最优组合服务.

### 3 实验评价

为了评价我们提出的 SSSCM 方法, 实验不仅采用了从网络上收集到的公共有效数据集, 还采用了合成数据集. 实验评价的重点是 SSSCM 方法的成功率(验证可靠性)、时间花费以及与已有方法<sup>[7]</sup>在两者上的对比. 为便于实验对比, 我们用 ASCA 表示文献[7]中的方法.

#### 3.1 实验建立

本文中的所有实验均在相同的软硬件环境(Pentium Dual 2.4GHz, 2.0GB RAM, Windows XP SP3, MATLAB 7.6, lpsolve 5.5, Java 1.8)进行, 实验中无论是在时间花费还是在成功率上的评价输出, 都采用相同的数据集、测试用例、QoS 约束条件等.

对于实验数据集, 我们采用了两种数据集合, 即公共有效数据集 QWS 和合成数据集. 第 1 个数据集是 QWS 真实数据集, 该数据集中的所有数据均来自互联网上的公共 Web 服务. 该数据集包含了 2 500 个 Web 服务及其对应的 9 个 QoS 属性值, 如响应时间、可用性等, 对该数据集更详细的介绍和描述在文献[30–32]. 第 2 个数据集由 Skyline dataset generator<sup>[23]</sup>产生(每个服务产生 9 个 QoS 属性值), 它含 3 种不同类型的 QoS 数据类型: 1) 正相数据(correlated data), 即服务的 QoS 属性值都较好; 2) 反相数据(anti-correlated), 即服务的 QoS 属性值一部分较好但另一部分较差; 3) 独立数据(independent data), 即 QoS 属性值通过随机生成. 图 3 给出了 3 种数据类型下 Skyline 服务(2 个 QoS 属性)的例子. 该例子中每种数据均有 30 个 Web 服务, 其中浅色点为 Skyline 服务, 支配其他服务(深色点). 可以看出: 在这 3 种数据中, 反相数据的 Skyline 服务数量最多, 如图 3(a)所示; 其次是独立数据,



如图 3(b)所示;正向数据最少,如图 3(c)所示.

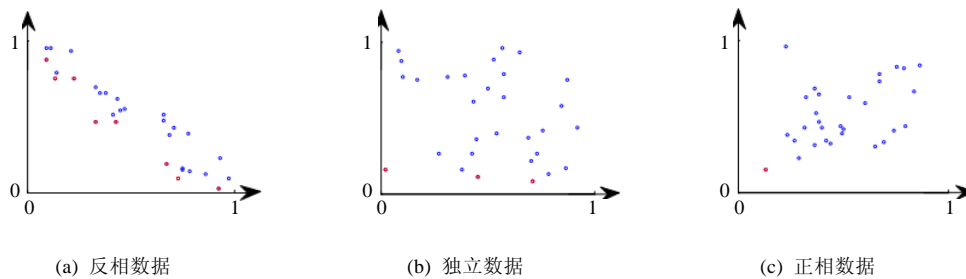


Fig.3 An example of synthetically generated QoS dataset

图 3 一个 QoS 合成数据的例子

实验中通过设置顺序组合类型的不同服务类数量  $n$  和候选服务数量  $l$ ,产生不同的测试用例.测试用例中含有 10 个服务类,每个服务类中候选服务的数量从 100~1000,QoS 属性数量从 9 个属性中随机选取 5 个,全局约束数量从上述 5 个属性中随机选取 3 个.实验中,所有方法分别运行 20 次取平均值.

### 3.2 成功率

由于现有服务选择方法中,关于候选服务的 QoS 是真实可信且不随时间发生变化的假设在实际应用中往往无法成立,使得其无法有效地涵盖 QoS 的不确定性,导致组合服务与实际结果偏离较大,可靠性差,服务选择失败.所以,即使服务选择能够获得最优解,但由于 QoS 的内在不确定性,并不能保证根据用户的 QoS 请求选择到的 Web 服务能够照用户的要求提供可靠的组合服务.因此,本节中实验的目的是为了验证 SSSCM 方法在服务选择中的成功率,同时给出与 ASCA 方法在成功率上的实验对比.首先给出服务选择成功率的定义.

**定义 8(成功率(success ratio,简称 SR)).** 指在某个组合服务运行  $t$  次,它的 QoS 总效用函数(overall utility,简称 OU)与其实际运行监测结果(monitring result,简称 MR)的比值不小于设定门限值( $h$ ),且该用户的 QoS 约束属性值( $C_i$ )与监测到的该属性的聚合值( $\bar{U}_i(S)$ )之间的比值也不小于设定门限值( $h$ )的次数与  $t$  的百分比,即

$$SR = \frac{srn}{t} \times 100\%, srn = \sum_{i=1}^{100} \begin{cases} 1, & \prod_{i=1}^m \frac{C_i}{\bar{U}_i(S)} \geq h \cap \frac{OU}{MR} \geq h \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中,SR 越大,表示其成功率越高,所采用服务选择方法越好.实验中, $h=0.9, t=200$ .

图 4 给出了 SSSCM 方法在 4 种 QoS 数据类型下成功率的实验结果.图 5 给出了与 ASCA 方法在成功率上的对比结果.

从图 4 可以看出,不论候选服务数量的多少,也不论 Web 服务 QoS 是哪种数据类型,SSSCM 方法的成功率平均为 99.75%,几乎达到 100%,从而有效地克服了由于 QoS 的不确定性导致的组合质量低下、可靠性差、服务选择失败的问题.例如,在图 4 中的  $4 \times 10$  组实验结果中,对于 QoS 正相数据类型,服务选择的成功率均为 100%;虽然其他 QoS 数据类型的成功率没有完全达到 100%,但其平均成功率均大于 99.5%,接近于 100%.考虑到实际应用中的网络因素,几乎可以认为,SSSCM 方法能够为用户提供 100%可靠的服务选择.因此,上述实验结果表明,在开放动态的网络环境中,SSSCM 方法有效地克服了 QoS 的不确定性对 Web 服务选择可靠性的影响.它不仅为用户提供了可靠的 QoS 约束保障,而且还能够为用户提供高质量的可靠组合服务.

从图 5 可以看出,不论候选服务数量的多少,也不论 Web 服务的 QoS 是哪种数据类型,SSSCM 方法的成功率要明显好于 ASCA 方法.例如,在 QoS 独立数据上的成功率对比中,如图 5(a)所示,SSSCM 方法具有明显优势,其成功率平均高达 99.7%(几乎为 100%),而 ASCA 方法的成功率却仅有 55.5%;在 QoS 正相数据上的成功率对比如图 5(b)所示,SSSCM 方法的成功率全部为 100%,而 ASCA 方法的成功率却仅有 52.9%,明显劣于 SSSCM 方法;在 QoS 反相数据上的成功率对比如图 5(c)所示,SSSCM 方法的平均成功率接近 100%(达到 99.6%),而 ASCA

方法的平均成功率却低于 50%(仅为 48.6%),SSSCM 方法优势明显;在 QWS 数据上的成功率对比如图 5(d)所示,SSSCM 方法的成功率平均高达 99.7%,仍接近 100%,而 ASCA 方法的平均成功率却仍未超过 50%(仅为 48.8%).因此上述结果表明,SSSCM 方法的成功率明显高于 ASCA 方法(SSSCM 方法的整体平均成功率为 99.75%,而 ASCA 方法仅为 51.45%).其主要原因是,SSSCM 方法采用了云模型计算 Web 服务 QoS 的不确定性.在云模型中,通过期望值  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$  这三个数字特征对每个 Web 服务的 QoS 历史监测数据进行不确定性计算,剔除不确定性较高的 Web 服务,保留 QoS 稳定的服务.因此,SSSCM 方法中的云模型降低了每个服务类中候选服务 QoS 的不确定性,减小了组合服务于实际执行结果之间的偏离度,提高了服务选择的可靠性.

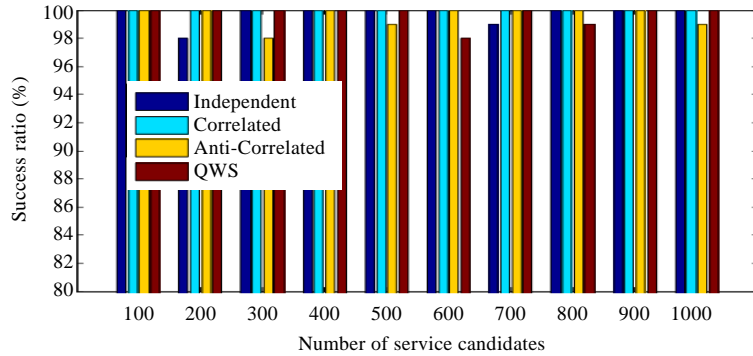


Fig.4 Success ratio of SSSCM with respect to four kinds of QoS data

图 4 SSSCM 在 4 种 QoS 数据类型上的成功率

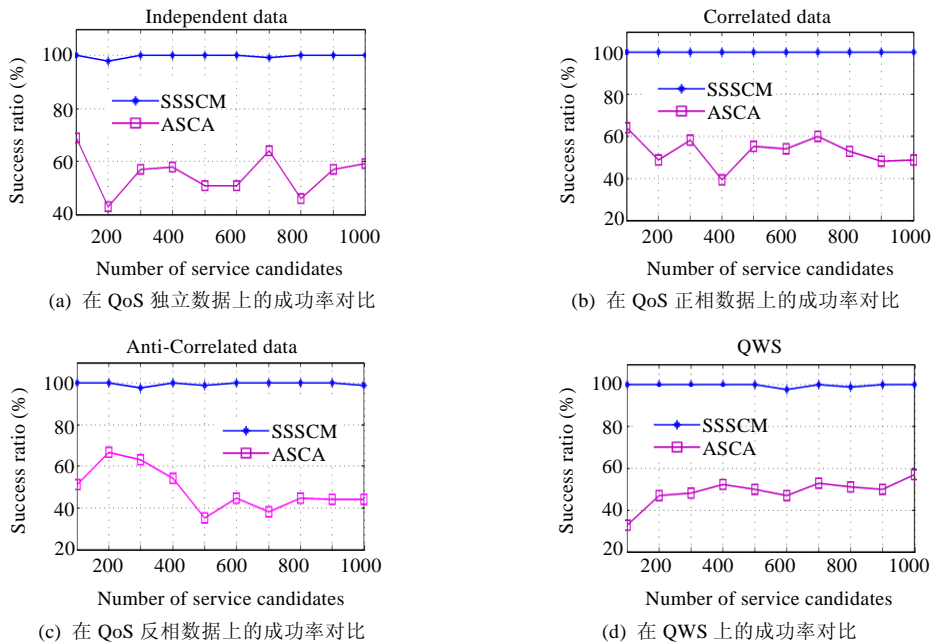


Fig.5 Comparisons on success ratio with SSSCM and ASCA

图 5 SSSCM 和 ASCA 的成功率对比

3.3 时间花费

由于当前选择方法忽视了影响服务选择时间花费的最根本因素,即候选服务数量的优化,导致服务选择超

出时间要求,无法在对时间花费敏感的实际组合服务中应用.因此,本节中实验的目的是为了验证 SSSCM 方法在服务选择中的时间花费,同时与 ASCA 方法的时间花费进行对比.

图 6 给出了 SSSCM 方法在 4 种不同 QoS 数据类型上的时间花费实验结果.图 7 给出与 ASCA 方法在时间花费上的对比结果.

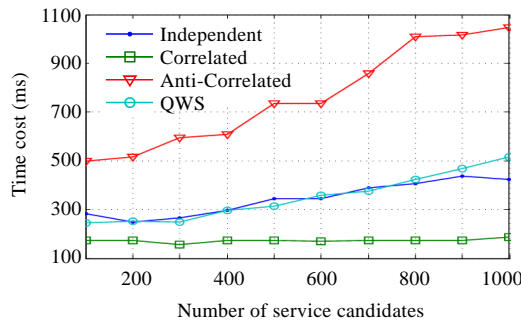


Fig.6 Time cost of SSSCM with respect to four kinds of QoS data  
图 6 SSSCM 在 4 种 QoS 数据类型上的时间花费

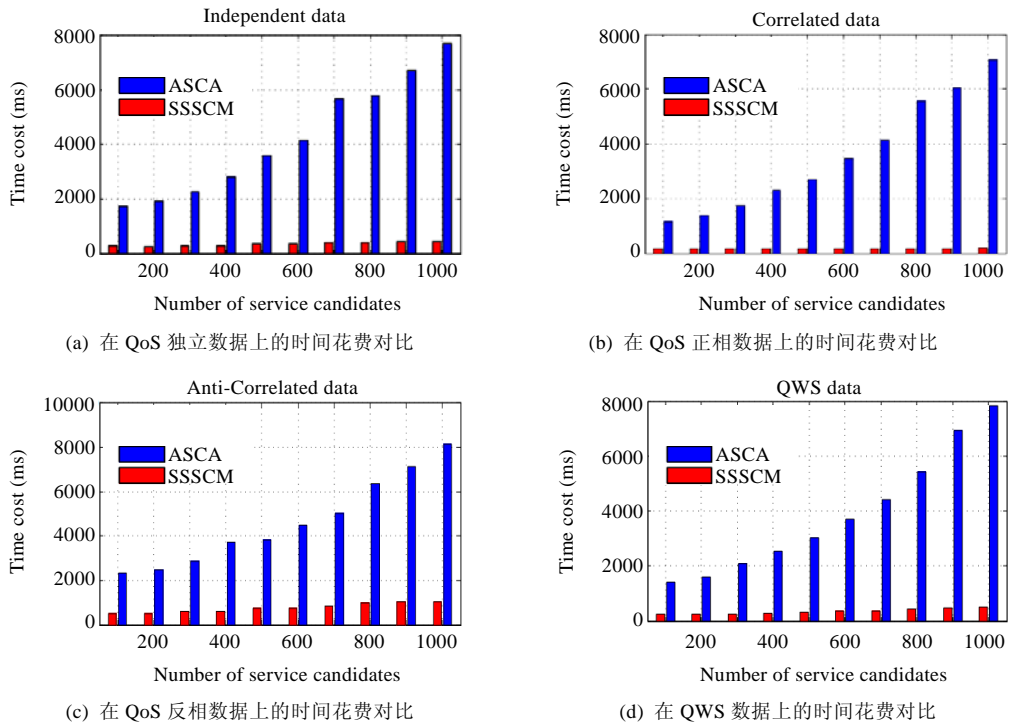


Fig.7 Comparisons on time cost with SSSCM and ASCA  
图 7 SSSCM 和 ASCA 的时间花费对比

从图 6 可以看出,无论候选服务数量的多少,在 4 种 QoS 数据类型上的 Skyline 服务选择中,SSSCM 方法的时间花费都较低,整体平均仅为 406.85ms.显然,它能够充分满足用户在实际应用中对 Web 服务选择实时性的要求.例如:时间花费最少的是在 QoS 正相数据上的 Skyline 服务选择,平均不到 200ms,且时间花费较为稳定,受候选服务数量变化影响较少(主要原因是,虽然候选服务数量不同,但每个服务类中的 Skyline 服务数量差别不大);其次是在 QoS 独立数据和 QWS 数据上的 Skyline 服务选择,时间花费平均都小于 400ms,计算时间消耗也较少;

时间花费最多的是在 QoS 反相数据上的 Skyline 服务.尽管当候选服务的数量大于 800 时,时间花费超过 1s,但由于其时间花费最多也仅为 1047ms(候选服务数量为 1000 时),况且其平均时间花费不到 800ms,所以仍然能够满足用户对服务选择实时性的要求.因此,上述实验结果表明,SSSCM 方法显著地降低了服务选择过程中的时间花费,在满足用户对服务选择实时性要求方面是有效的.

从图 7 可以看出,不论候选服务数量的多少,也不论哪种 Web 服务 QoS 数据类型,SSSCM 方法都要好于 ASCA 方法,即我们方法的时间花费都远远小于 ASCA 方法的时间花费.例如:在 QoS 独立数据上的时间花费对比中,如图 7(a)所示,SSSCM 方法的时间花费平均仅为 343.8ms,而 ASCA 方法的时间花费却高达 4217ms,是 SSSCM 的 10 多倍;在 QoS 正相数据上的时间花费对比如图 7(b)所示,SSSCM 方法的时间花费平均仅为 172.2ms,而 ASCA 方法的时间花费却高达 3549.9ms,是 SSSCM 的 20 多倍;在 QoS 反相数据上的时间花费对比如图 7(c)所示,SSSCM 方法的时间花费平均仅为 761.6ms,而 ASCA 方法的时间花费却高达 4645.2ms,是 SSSCM 的 6 倍多;在 QWS 数据上的时间花费对比如图 7(d)所示,SSSCM 方法的时间花费平均仅为 349.8ms,而 ASCA 方法的时间花费却高达 3893.4ms,是 SSSCM 的 11 倍多.因此,SSSCM 和 ASCA 在上述 4 组数据上的时间花费对比明显表明,我们方法的时间花费最少,相比 ASCA 方法具有更好的时间性能.SSSCM 方法比 ASCA 方法在服务选择时间花费较少的主要原因是,SSSCM 对每个服务类的候选服务采用了 Skyline 计算.通过 Skyline 计算,SSSCM 方法剔除了每个服务类中的冗余服务,仅仅保留 Skyline 服务.这使得每个服务类中的候选服务冗余度降低,从而减小服务选择的搜索空间,降低了服务选择过程中的时间花费.

因此,由 SSSCM 方法在服务选择成功率和时间花费的实验结果以及与 ASCA 方法在两者上的对比可以看出,本文提出的 SSSCM 方法在保证获得可靠服务的同时,显著地降低了服务选择的时间花费.因此,SSSCM 方法有效地克服了当前服务选择方法存在的两个不足,具有重要的现实意义和实用价值.

#### 4 相关工作

基于 QoS 感知的 Web 服务选择算法是服务计算领域中的一个重要研究方向,吸引了众多研究者的关注,取得了许多显著的研究成果.下面将回顾其中一些有代表性的服务选择方法.

文献[1]针对在故障多发的 Web 服务组合环境中,由于受到 Web 服务激活操作顺序的限制,无法为用户提供可靠 Web 服务组合的情况,提出了一种具有动态性和渐进性的 Web 服务选择方法.在该方法中,作者通过将服务组合建模为马尔科夫链(Markov chain)来计算每一个 Web 服务当前状态的可靠性聚合(aggregated reliability,简称 AR),然后提出了用于服务选择的基于 AR 与 CAR(composability and AR)的两种动态 Web 服务选择策略.尽管该方法在一定程度上提高了服务组合的成功率,但存在以下不足:1) 该方法仅仅考虑 Web 服务的可靠性属性,缺少对其他 QoS 属性(如响应时间、价格等)的支持,导致无法满足用户对其他服务属性的要求,且可扩展性和实用性都较差;2) 该方法过度地关注服务选择的成功率,而缺少对时间花费的考虑,导致其无法满足用户对服务选择的实时性要求;3) 虽然该方法中假设每一个 Web 服务操作都以相同的概率被激活,但是该假设在实际 Web 服务环境中往往很难成立.

文献[9]提出了一种用于发现近似最优解的混合最优服务选择方法,与求最优解的纯粹最优服务选择方法<sup>[33]</sup>相比,该方法的显著特征是通过寻找近似最优解服务来降低服务选择的计算时间.在该研究中,作者提出用于服务组合的两个模型,即联合模型和图模型,并将混合最优服务选择方法用于上述两个模型.虽然对于图模型时间花费是指数级的,但对于联合模型,时间花费却是多项式的.尽管该方法取得了较好的研究成果,但仍存在以下不足:首先,作者由于缺少对 QoS 不确定性的考虑,当面对动态多变的服务环境时,导致服务选择结果与实际值偏离较大,可靠性太差;另外,随着网络中候选服务数量的急剧增加,对于使用混合最优服务选择方法的联合模型所需的时间花费仍然超出用户要求,以至于无法在对时间花费敏感的组合服务中应用.

与文献[9]相似,文献[8]也提出了一种混合最优方法.该方法通过使用混合整数规划法将全局 QoS 约束映射为质量水平,然后通过将获得的质量水平用于局部最优选择中的局部约束,从而通过联合全局最优和局部最优获得近似最优解.尽管该方法较好地解决了服务选择的时间花费过长问题,但也存在一些不足.例如,虽然质量

水平在一定程度上降低了服务选择的搜索空间,但服务数量增加时,将导致质量水平求解的时间花费增大而无法满足用户实时性的需求.此外,该方法当面对 QoS 属性相关性较强的用户请求时,求解效果较差.另外, QoS 的内在不确定性进一步恶化了该方法的求解效果和质量,导致用户的 QoS 请求失败.

与文献[8]相似,文献[3]也是利用质量水平降低服务选择的搜索空间,但质量水平的求解方法不同.作者采用 *K-means* 算法对部分候选服务给予聚类,并通过混合整数规划,从 *K* 个聚类中选择能代表该服务类中所有候选服务的质量水平,最后通过将获得的质量水平作为局部约束来选择服务组件.尽管该方法在面对大量候选服务时显著降低了服务选择的时间花费,但由于对 QoS 内在的不确定性考虑不足,造成服务选择结果往往偏离用户的 QoS 请求.另外,该方法获得的组合服务是近似最优解,在 QoS 稳定的情况下,该组合服务几乎就是最优解;但当 QoS 波动(不确定性)较大时,则无法保证该组合服务是近似最优解,导致服务组合质量较差,甚至失败.

文献[7]针对 QoS 感知的服务选择问题,提出了一种新的服务选择优化方法.该方法具有以下 3 个主要特征:1) 对组合类型中的循环结构进行剥离,使其转化为选择顺序(sequence of branch)结构,明显地改善了服务选择中循环结构较多而导致服务选择性能低下的不利局面;2) 当用户的 QoS 请求无法得到满足时(无解),通过用户与服务提供者之间的 QoS 参数协商(negotiating QoS parameters)进行二次寻优(reoptimization),以进一步寻找具有 QoS 端到端保障的组合服务,从而减少了服务选择失败的概率;3) 引入了状态 Web 服务(所谓状态 Web 服务即是同样的一个 Web 服务被多个任务使用)概念.尽管该方法中的 3 个主要特征能够为用户提供切实有效的组合服务,尤其对规模较大的服务选择方案,但仍存在两个缺点:第一,该方法未能考虑 QoS 的不确定性,从而无法从根本上保证服务组合的成功.由于 QoS 数据的不稳定性,使得服务组合结果无法满足用户端到端的 QoS 保障,从而偏离了用户需求,导致用户满意度下降,甚至服务组合失败.尽管该方法中的 QoS 参数协商能够通过二次寻优在一定程度上起到弥补作用,但如果服务提供者本身就是恶意或不诚实的(通过提供虚假或恶意服务来获得非法利益)<sup>[34]</sup>,将导致二次寻优的组合服务仍然失败;第二,尽管该方法通过将循环剥离提高了服务选择的性能,但由于它未能从根本上减少服务选择的搜索空间或剔除冗余的 Web 服务,导致服务选择时间花费较长,仍然无法满足用户对组合服务实时性的要求.鉴于文献[7]在 QoS 感知的服务选择方法领域的重要地位,本文将通过实验与我们提出的研究方法进行比较.

针对目前 QoS 计算中使用的质量属性过于局限以及缺少确保其可信的计算机制这两个问题,文献[34]提出了一种考虑 QoS 数据可信性的服务选择方法.该方法中对 QoS 数据可信性的充分考虑,使得该研究中的服务选择结果更加可信.针对已有的服务组合方法都很少考虑 Web 服务的随机性和 Internet 环境的动态性,文献[35]提出了一种基于马尔可夫决策过程的可靠 Web 服务组合方法.该方法中的 Web 服务 QoS 值的自适应地动态更新,能够有效地提高服务组合的成功率.

其他研究工作还有面向服务计算环境的可靠性预测<sup>[36]</sup>、服务工作流构造方法<sup>[37]</sup>、可靠的动态服务选择<sup>[38]</sup>、动态网络环境下的透明服务组合<sup>[39]</sup>、基于全局 QoS 约束分解的服务选择<sup>[40]</sup>等,也都取得了较好的研究成果.

## 5 结论及未来工作展望

在基于 QoS 感知的 Web 服务选择中,服务的 QoS 属性在其中扮演了重要的角色.现有的服务选择方法通常假定 QoS 是不会随时间变化的.然而由于 Web 服务环境的动态性,QoS 经常产生波动,具有内在的不确定性.另外,已有的方法过度依赖算法的最优化,这使得当面对大量功能相同但 QoS 不同的服务时,即使较好的优化算法在寻找最佳组合时,也将超出服务执行所需的时间限制.因此,为了克服上述不足,我们提出了一种快速、可靠的服务选择方法,称为基于云模型的不确定性 QoS 感知的 Skyline 服务选择,即 SSSCM. SSSCM 首先通过云模型中逆向云算法的定量到定性的转换功能计算 QoS 的不确定性,以提高服务选择的可靠性.然后采用 Skyline 计算剔除冗余的候选服务,以降低服务选择的时间花费.在合成数据集和真实数据集上的实验结果表明, SSSCM 方法不但能够有效地降低服务选择的时间花费、提高服务选择的实时性,而且还能显著地降低 QoS 的不确定性对服务选择质量的影响,使服务选择的成功率几乎达到 100%,从而提高了服务选择的可靠性.另外,与已有方法的实验对比结果,进一步验证了 SSSCM 方法的在服务选择时间花费和可靠性方面的优越性.

虽然我们提出的 SSSCM 方法具有较好的服务选择性能,但也存在不足.例如:该方法缺少一种根据 Web 服务环境变化自适应调整参数设置的机制,导致其自适应不足;由于该方法中的云模型和 Skyline 计算在服务代理运行,这或许将增加服务代理的压力或负载.因此,针对上述不足,我们将进一步对其进行改进或优化,提高 SSSCM 方法的实用性和应用价值.

**致谢** 在此,我们对提供 QWS 数据集的加拿大圭尔夫大学的 Eyhab Al-Masri 和 Qusay H. Mahmoud 博士表示感谢.

#### References:

- [1] Hwang SY, Lim EP, Lee CH, Chen CH. Dynamic Web service selection for reliable Web service composition. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2008,1(2):104–116. [doi: 10.1109/TSC.2008.2]
- [2] Yang FC, Su S, Li Z. Hybrid QoS-aware semantic Web service composition strategies. *Science in China (Series F—Information Sciences)*, 2008,51(11):1822–1840. [doi: 10.1007/s11432-008-0159-1]
- [3] Alrifai M, Skoutas D, Risse T. Selecting Skyline services for QoS-based Web service composition. In: *Proc. of the 19th Int'l Conf. on World Wide Web (WWW 2010)*. 2010. 11–20. [doi: 10.1145/1772690.1772693]
- [4] 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).
- [5] Jiang ZY, Han JH, Wang Z. Optimization model for dynamic QoS-aware Web services selection and composition. *Chinese Journal of Computers*, 2009,32(5):1014–1025 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2009.01014]
- [6] Wang HC, Lee CS, Ho TH. Combining subjective and objective QoS factors for personalized Web service selection. *Expert Systems with Applications*, 2007,32(2):571–584. [doi: 10.1016/j.eswa.2006.01.034]
- [7] Ardagna D, Pernici B. Adaptive service composition in flexible processes. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2007,33(6): 369–384. [doi: 10.1109/TSE.2007.1011]
- [8] Alrifai M, Risse T. Combining global optimization with local selection for efficient QoS-aware service composition. In: *Proc. of the 18th Int'l Conf. on World Wide Web (WWW 2009)*. 2009. 881–890. [doi: 10.1145/1526709.1526828]
- [9] Yu T, Zhang Y, Lin KJ. Efficient algorithms for Web services selection with end-to-end QoS constraints. *ACM Trans. on the Web*, 2007,1(1):1–26. [doi: 10.1145/1232722.1232728]
- [10] Qi Y, Bouguettaya A. Computing service Skyline from uncertain QoWS. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2010,3(1):16–29. [doi: 10.1109/TSC.2010.7]
- [11] Kritikos K, Plexousakis D. Mixed-Integer programming for QoS-based Web service matchmaking. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2009,2(2):122–139. [doi: 10.1109/TSC.2009.10]
- [12] 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 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3341.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03341]
- [13] Kritikos K, Plexousakis D. Requirements for QoS-based Web service description and discovery. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2009,2(4):320–337. [doi: 10.1109/TSC.2009.26]
- [14] El Hadad J, Manouvrier M, Rukoz M. TQoS: Transactional and QoS-aware selection algorithm for automatic Web service composition. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2010,3(1):73–85. [doi: 10.1109/TSC.2010.5]
- [15] Liu X, Huang G, Mei H. Discovering homogeneous Web service community in the user-centric Web environment. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2009,2(2):167–181. [doi: 10.1109/TSC.2009.11]
- [16] Jang J-H, Shin D-H, Lee K-H. Fast quality driven selection of composite Web services. In: *Proc. of the 4th European Conf. on Web Services (ECOWS 2006)*. 2006. 87–96. [doi: 10.1109/ECOWS.2006.21]
- [17] Li F, Yang FC, Shuang K, Su S. A policy-driven distributed framework for monitoring quality of Web services. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Web Services (ICWS 2008)*. 2008. 708–715. [doi: 10.1109/ICWS.2008.123]
- [18] Li DY, Meng HJ, Shi XM. Membership cloud and membership cloud generator. *Journal of Computer Research and Development*, 1995,32(6):16–21 (in Chinese with English abstract).

- [19] Li DY, Liu CY, Du Y, Han X. Artificial intelligence with uncertainty. *Journal of Software*, 2004,15(11):1583–1594 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1583.htm>
- [20] Zhang GW, He R, Liu Y, Li DY, Chen GS. Evolutionary algorithm based on cloud model. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(6):1082–1091 (in Chinese with English abstract).
- [21] Li DY, Du Y. *Artificial Intelligence with Uncertainty*. Beijing: National Defense Industry Press, 2005 (in Chinese).
- [22] Li F, Yang F, Shuang K, Su S. Q-Peer: A decentralized QoS registry architecture for Web services. In: *Proc. of the 5th Int'l Conf. on Service-Oriented Computing (ICSOC 2007)*. 2007. 145–156. [doi: 10.1007/978-3-540-74974-5\_12]
- [23] Börzsönyi S, Kossmann D, Stocker K. The Skyline operator. In: *Proc. of the 17th Int'l Conf. on Data Engineering (ICDE 2001)*. 2001. 421–430. [doi: 10.1109/ICDE.2001.914855]
- [24] Cui B, Chen LJ, Xu LH, Lu H, Song GJ, Xu QQ. Efficient Skyline computation in structured peer-to-peer systems. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2009,21(7):1059–1072. [doi: 10.1109/TKDE.2008.235]
- [25] Sacharidis D, Arvanitis A, Sellis T. Probabilistic contextual Skylines. In: *Proc. of the 2010 IEEE 26th Int'l Conf. on Data Engineering (ICDE 2010)*. 2010. 273–284. [doi: 10.1109/ICDE.2010.5447887]
- [26] Pan LQ, Li JZ, Luo JZ. Approximate Skyline query processing algorithm in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010, 21(5):1020–1030 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3703.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03703]
- [27] Huang ZH, Wang ZH, Guo JK, Wang W, Shi BL. Efficient preprocessing of subspace Skyline queries in P2P networks. *Journal of Software*, 2009,20(7):1825–1838 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3325.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03325]
- [28] Wei XJ, Yang J, Li CP, Chen H. Skyline query processing. *Journal of Software*, 2008,19(6):1386–1400 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1386.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01386]
- [29] Papadias D, Tao Y, Fu G, Seeger B. Progressive Skyline computation in database systems. *ACM Trans. on Database Systems*, 2005, 30(1):41–82. [doi: 10.1145/1061318.1061320]
- [30] Al-Masri E, Mahmoud QH. Discovering the best Web service. In: *Proc. of the 16th Int'l Conf. on World Wide Web (WWW 2007)*. 2007. 1257–1258. [doi: 10.1145/1242572.1242795]
- [31] Al-Masri E, Mahmoud QH. QoS-Based discovery and ranking of Web services. In: *Proc. of the 16th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN 2007)*. 2007. 529–534. [doi: 10.1109/ICCCN.2007.4317873]
- [32] Al-Masri E, Mahmoud QH. Investigating Web services on the World Wide Web. In: *Proc. of the 17th Int'l Conf. on World Wide Web (WWW 2008)*. 2008. 795–804. [doi: 10.1145/1367497.1367605]
- [33] Zeng L, Benatallah B, Ngu AHH, Dumas M, Kalagnanam J, Chang H. QoS-Aware middleware for Web services composition. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2004,30(5):311–327. [doi: 10.1109/TSE.2004.11]
- [34] Li Y, Zhou MH, Li RC, Cao DG, Mei H. Service selection approach considering the trustworthiness of QoS data. *Journal of Software*, 2008,19(10):2620–2627 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2620.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02620]
- [35] Fan XQ, Jiang CJ, Wang JL, Pang SC. Random-QoS-Aware reliable Web service composition. *Journal of Software*, 2009,20(3): 546–556 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3339.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03339]
- [36] Grassi V, Patella S. Reliability prediction for service-oriented computing environments. *IEEE Internet Computing*, 2006,10(3): 43–49. [doi: 10.1109/MIC.2006.64]
- [37] Hu CH, Wu M, Liu GP, Xu DZ. 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> [doi: 10.1360/jos181870]
- [38] Hwang SY, Lim EP, Lee CH, Chen CH. On composing a reliable composite Web service: A study of dynamic Web service selection. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Web Services (ICWS 2007)*. 2007. 184–191. [doi: 10.1109/ICWS.2007.133]
- [39] Li G, Ma XJ, Han YB, Wang J. Transparent service composition in dynamic network environments. *Chinese Journal of Computers*, 2007,30(4):579–587 (in Chinese with English abstract).

- [40] Wang SG, Sun QB, Yang FC. Web service dynamic selection by the decomposition of global QoS constraints. Journal of Software, 2011,22(7):1426-1439 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3842.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03842]

#### 附中文参考文献:

- [4] 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.
- [5] 蒋哲远,韩江洪,王钊.动态的 QOS 感知 Web 服务选择和组合优化模型.计算机学报,2009,32(5):1014-1025. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2009.01014]
- [12] 李祯,杨放春,苏森.基于模糊多属性决策理论的语义 Web 服务组合算法.软件学报,2009,20(3):583-596. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3341.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03341]
- [18] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器.计算机研究与发展,1995,32(6):16-21.
- [19] 李德毅,刘常昱,杜鹞,韩旭.不确定性人工智能.软件学报,2004,15(11):1583-1594. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1583.htm>
- [20] 张光卫,何锐,刘禹,李德毅,陈桂生.基于云模型的进化算法.计算机学报,2008,31(7):1082-1091.
- [21] 李德毅,杜鹞.不确定性人工智能.北京:国防工业出版社,2005.
- [26] 潘立强,李建中,骆吉洲.无线传感器网络中一种近似 Skyline 查询处理算法.软件学报,2010,21(5):1020-1030. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3703.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03703]
- [27] 黄震华,王智慧,郭建魁,汪卫,施伯乐.有效预处理 P2P 网络中的子空间 Skyline 查询.软件学报,2009,20(7):1825-1838. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3325.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03325]
- [28] 魏小娟,杨婧,李翠平,陈红.Skyline 查询处理.软件学报,2008,19(6):1386-1400. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1386.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01386]
- [34] 李研,周明辉,李瑞超,曹东刚,梅宏.一种考虑 QoS 数据可信性的服务选择方法.软件学报,2008,19(10):2620-2627. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2620.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02620]
- [35] 范小芹,蒋昌俊,王俊丽,庞善臣.随机 QoS 感知的可靠 Web 服务组合.软件学报,2009,20(3):546-556. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3339.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03339]
- [37] 胡春华,吴敏,刘国平,徐德智.一种基于业务生成图的 Web 服务工作流构造方法.软件学报,2007,18(8):1870-1882. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1870.htm> [doi: 10.1360/jos181870]
- [39] 李刚,马修军,韩燕波,王菁.动态网络环境下的透明服务组合.计算机学报,2007,30(4):579-587.
- [40] 王尚广,孙其博,杨放春.基于全局 QoS 约束分解的 Web 服务动态选择.软件学报,2011,22(7):1426-1439. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3842.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03842]



王尚广(1982-),男,河南周口人,博士,CCF 会员,主要研究领域为服务计算,云计算.



张光卫(1970-),男,博士,主要研究领域为人工智能.



孙其博(1975-),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为网络智能化,下一代网络安全.



杨放春(1957-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为服务计算,网络智能化,网络安全,通信软件.