

## 基于 QoS 随机性和信任评价的全局动态服务组合

卢卫娜<sup>1,2</sup>, 胡晓惠<sup>1</sup>, 王尚广<sup>3</sup>, 李小涛<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 2. 河北科技师范学院 机电工程学院, 河北秦皇岛 066604; 3. 北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 由于 Internet 环境的开放性和动态性, 导致 Web 服务质量稳定性较差, 进而严重影响服务组合的准确度. 为此, 提出一种基于 QoS 随机性和信任评价的全局动态服务组合方法. 首先, 剔除导致客观 QoS 不稳定的异常值, 并估计其真实值; 然后, 分析服务提供商和用户的信任度, 聚合计算主观 QoS 评价; 最后, 结合主、客观 QoS 约束条件, 构建全局动态服务组合优化模型, 求解最优组合服务. 基于真实和仿真数据的实验结果表明, 所提出的方法能够显著提高服务组合的稳定性和准确度.

**关键词:** 服务组合; 服务质量; 信任评价; *t* 检验; 全局动态优化

中图分类号: TP393

文献标志码: A

## Global dynamic service composition based on randomness of QoS data and trust evaluation

LU Wei-na<sup>1,2</sup>, HU Xiao-hui<sup>1</sup>, WANG Shang-guang<sup>3</sup>, LI Xiao-tao<sup>1</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. School of Mechanics and Electronics, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066004, China; 3. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China. Correspondent: LU Wei-na, E-mail: luweina1981@126.com)

**Abstract:** In an open and dynamic Internet environment, the randomness of Web services with unreliable quality leads to low accuracy of optimization in service composition. Therefore, a global dynamic service composition approach is proposed based on randomness of QoS data and trust evaluation. Firstly, the uncertain outliers which lead to unstable objective QoS are removed, and the true values of objective QoS are estimated. Then, the credibility of the evaluation data from the providers and customers are analyzed to obtain the subjective QoS evaluation of current service. Finally, with the objective and subjective QoS data, the global dynamic service composition model is constructed and the optimal result is calculated. Experiment results with real and simulated data show that the proposed approach significantly improves the stability and accuracy of service composition.

**Key words:** service composition; quality of service; trust evaluation; *t*-test; global dynamic optimization

## 0 引言

近年来,“服务”成为开放性网络环境下资源封装与共享的核心概念,特别是随着 Web 服务技术的发展和推广,面向服务的体系架构(SOA)正在日臻成熟. 现有大部分的行业标准和技术支持旨在将多个服务无缝地组合成为功能更强大的新服务,以满足企业和用户不断变化的应用需求. 目前的 SOA 体系能够实现 web 服务的注册、发现和组合,然而在异构和变化的 Internet 分布式环境中, Web 服务的数量和种类与日俱增,很多不同的提供商开发了功能相同或类似的

服务,如何根据用户的功能请求和服务质量(QoS)约束对大量服务进行可靠、有效、实时地整合仍然存在诸多的挑战.

一些在 QoS 感知的服务组合中亟待解决的热点问题引起了学者们的普遍关注,并取得了许多显著的研究成果. 文献[1]将全局 QoS 约束自适应地分解为满足用户偏好的局部约束,通过混合整数规划方法获得最优的组合服务;文献[2]采用分支限界的选择算法进行 QoS 感知的服务组合,并提出扩展的灵活约束满足框架,根据等级将 QoS 的限制条件划分

收稿日期: 2013-05-28; 修回日期: 2013-10-12.

作者简介: 卢卫娜(1981—),女,讲师,博士生,从事智能系统、服务计算和云计算的研究;胡晓惠(1960—),男,研究员,博士生导师,从事综合信息系统与集成、优化决策等研究.

为硬约束和软约束, 解决相应的优化问题; 文献 [3] 将候选 Web 服务的 QoS 度量分为主观性和客观性两种类型, 结合用户偏好和 QoS 全局约束, 利用 Brown-Gibson 启发式算法求解 Web 服务的 QoS 聚合最优值. 上述方法在服务选择优化的有效性和实时性方面都取得了一定进展, 但普遍缺乏对 QoS 动态变化性<sup>[4]</sup>的考虑, 因而不能保障服务最优组合的准确度. 文献 [5] 利用云模型计算了 QoS 的不确定性, 提出 Skyline 算法减少了搜索空间, 剔除了冗余服务, 并提高了服务组合的效率; 文献 [6] 使用不确定的属性和非参数检验方法检测客户端的历史 QoS 信息, 然后将检测值作为 Web 服务选择的标准. 上述两种方法虽然考虑了 QoS 客观的不确定性, 但仅是用其不确定程度作为服务筛选的依据, 没有进行实质上的 QoS 稳定性改善, 服务组合的信任度不可保证. 文献 [7-8] 设计了协同过滤的方法, 利用用户们过去的对 Web 服务的 QoS 进行预测, 并推荐最佳的 Web 服务; 文献 [9] 讨论了基于环境感知的可信 QoS 评价与服务选取方法, 虽然通过特征向量的方法给出了信任推理演化的 QoS 评价结构, 但其中的信任度仅是通过实体间评价的差值对梯度取模来实现, 缺乏对实体评价本身的特征考虑, 导致服务组合成功率的不稳定. 综上所述, 针对 QoS 感知的服务组合技术研究, 学者们分别从服务组合优化、QoS 不确定性判据和服务信誉度等方面取得了不同的进展, 而实际的 QoS 包含客观和主观两种属性<sup>[10]</sup>, 目前鲜少有研究将 QoS 客观随机性和主观信任评价综合考虑到问题的解决中, 导致组合结果与实际需求的偏离较大, 服务组合的成功率和准确度并不高.

针对上述问题, 本文提出一种 QoS 多重评估的全局动态服务组合方法. 首先针对 Web 服务 QoS 的变化性进行统计检验和估计, 其次融入可信度驱动下的 QoS 提供商评价和用户评价, 最后利用全局优化进行服务组合. 提出这种方法是为了先确保 QoS 主、客观属性的稳定性和可靠性, 将全局约束自适应地分解为局部约束, 以便更好地满足服务组合需要. 各阶段的实验结果表明, 该方法能够有效检测多次采集 QoS 数据的异常值, 同时排除虚假的提供商评价和用户评价对服务组合的影响, 获得接近或达到全局最优解的服务组合方案, 提高了组合的准确性.

## 1 服务质量的多重评估

基于 QoS 随机性和信任评价的全局动态服务组合方法, 考虑了客户、提供商和第三方网络环境的多重影响, 建立在一个服务质量多重评估的体系上. 在这样的 SOA 架构中, Web 服务的 QoS 属性主要分为客观属性和主观属性两类<sup>[10]</sup>. 客观属性是对服务执行

过程进行监测得到的数据, 例如吞吐量、执行时间、可靠性和成本等, 其值主要受到网络环境不确定因素的影响; 主观属性是人为对服务质量的评价体会, 主要来自提供商和用户两个方面. 提供商在注册和发布服务时, 在服务本体上做出质量评价标记, 而用户则通过对服务的使用体验给出相应的质量评价<sup>[11]</sup>. 由于各类 QoS 数据的特性不同, 在 QoS 准确度量时必须结合不同的方法分别对主、客观 QoS 的真实值进行计算. 本文充分考虑不同利益方的立场, 对服务的 QoS 建立多重评估标准, 目的是满足服务提供商、服务用户和网络环境资源的多种复杂需求. 在按照任务流程进行服务组合时, 考虑各个服务的 QoS 客观属性随网络环境变化的动态性, 以及 QoS 主观属性中提供商评价和用户评价的可信性, 从而完善和修正服务的 QoS 值, 形成综合的 Web 服务质量评估体系, 在此基础上实现 Web 服务的选择和成功组合.

结合电子商务中跨企业间交互的实际应用, 以大型公司采购、生产、销售和配送产品过程中的订单管理流程为实例<sup>[12]</sup>来说明本文的方法. 这个处理过程需要管理顾客向特定供货商提交的订购单, 供货商端可以通过组合多个交互的 Web 服务来完成, 涉及到信用服务、库存服务、账单服务和运送服务等 4 个任务的服务类环节. 每个服务类包含了多个候选服务, 这些候选服务由不同的服务提供商发布, 并已被不同的用户使用和体验. 例如信用服务, 既可以由建设银行、工商银行等多家银行提供信用检查服务, 也可以被很多企业用户和个人用户所使用. 基于 QoS 不确定性和信任评价的服务组合方法就是在满足用户对服务 QoS 需求的同时, 改善候选服务 QoS 数据的准确性, 并从中选出最合适的服务进行组合, 提供最优的订购方案. 具体流程如下: 1) 收到用户的服务请求后, QoS 代理首先查找到满足用户功能需求的所有 Web 服务, 即信用、库存、账单和运送任务的所有候选服务; 2) 由用户所关心的质量属性对已获得的客观 QoS 监测数据进行  $t$  检验, 排除异常值, 保证 QoS 的真实性; 3) 对服务提供商发布的服务评价和以往用户的经验评价进行可信度计算, 得出本次请求对各个服务 QoS 的综合评价; 4) 由服务 QoS 的客观属性值和主观综合评价值对同一服务类下的候选服务进行筛选, 并结合用户的组合服务质量需求约束, 进行多个服务组合, 将客户端响应至服务请求者; 5) 全程监控和采集运行数据, 用来修正服务的质量属性值.

### 1.1 QoS 客观随机性的计算

目前, 大部分已实现的服务组合系统平台还处于静态服务组合的阶段, 这种组合方式将服务的客观 QoS 属性认为是静态的真实可靠数据, 常常直接用

作服务选择的依据<sup>[13-14]</sup>. 然而, 实际的Web服务组合处在一个开放式的网络环境中, 动态的网络拓扑结构、传输信道的干扰、节点性能变化等不稳定现象会造成服务质量的随机性和不真实性<sup>[5]</sup>. 此时, 监控系统采集的服务QoS值经常出现异常, 如果不加以处理, 将直接影响到服务组合的结果. 针对此问题, 本文对服务的QoS数据进行假设检验, 去除异常数值, 并利用统计结果计算QoS的各项属性值.

对于真实性保证, 首先利用 $t$ 检验法进行检测. 根据文献<sup>[15-16]</sup>中服务QoS客观属性, 如执行时间、成本等具有正态分布特性, 此处假设服务的客观QoS值来自正态总体, 并服从正态分布. 在多次运行服务的实验中, 有个别较大或较小的QoS采集值被认为是可疑数据, 需要进行假设检验. 因为客观QoS数据呈正态分布, 所以可以应用 $t$ 检验法<sup>[17-21]</sup>. 将被检验的可疑值 $Y$ 和其他QoS值 $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}$ 分别看作来自两个独立的正态总体 $N(\mu_1, \sigma^2)$ 和 $N(\mu, \sigma^2)$ 的样本, 判断数值 $Y$ 是否可信的过程, 就是在某个显著性水平 $\alpha (\alpha \in [0, 1])$ 下, 判断 $\mu_1$ 与 $\mu$ 是否一致. 所以, 要检验假设

$$H_0: \mu_1 = \mu \longleftrightarrow H_1: \mu_1 \neq \mu,$$

令检验统计量为

$$T = \frac{Y - \bar{X}}{S}. \quad (1)$$

其中

$$\bar{X} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} X_i, \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} (X_i - \bar{X})^2}. \quad (3)$$

在假设 $H_0$ 成立的条件下,  $T \sim t(n-2)$ , 给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ , 使

$$P\{|T| \geq t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2)\} = \alpha, \quad (4)$$

故检验的拒绝域为

$$W = \left\{ \frac{|Y - \bar{X}|}{S} \geq t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2) \right\}. \quad (5)$$

即当 $|Y - \bar{X}| \geq t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2) * S$ 时,  $Y$ 为异常值, 应剔除; 否则予以保留.

例如, 对于执行时间属性, 若采集的数据集为 $U = \{x_i\}, i \in N, i < \infty$ , 按以下步骤进行检验判断.

**Step 1:** 找到数据集 $U$ 中的最大值 $x_{\max}$ 和最小值 $x_{\min}$ , 并计算 $U$ 的均值 $\bar{x}$ .

**Step 2:** 设定被检验值 $x_j \in U$ .

若 $|x_{\max} - \bar{x}| \geq |x_{\min} - \bar{x}|$ , 则 $x_j = x_{\max}$ ;

若 $|x_{\max} - \bar{x}| < |x_{\min} - \bar{x}|$ , 则 $x_j = x_{\min}$ .

**Step 3:** 令新数据集 $U_1 = U - x_j$ .

**Step 4:** 计算新数据集 $U_1$ 的均值 $\bar{x}'$ 和方差 $S'$ .

**Step 5:** 判断. 若 $|x_j - \bar{x}'| \geq t(0.05, \text{length}(U_1) - 1) * S$ 成立, 则剔除 $x_i$ 合理, 令 $U = U_1$ , 转至Step 1; 否则, 不合理, 保留 $U$ , 结束.

经过剔除异常值的QoS数据集服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ , 对于某一种属性值 $i$ (如可靠性), 可以采用求均值的方法得到其正态分布的期望 $E(X) = \mu$ , 以此作为该属性值的统计结果, 即为QoS的客观属性值 $\hat{q}_i(s)$ .

## 1.2 QoS主观评价的计算

服务的QoS评价是对服务质量主观属性的描述, 它反映了提供者或使用者对服务质量的主观感受, 受各种主、客观因素的影响, 服务的评价数据可能存在不可信的信息. 基于信任度的QoS评价就是根据评价主体的信任度不同, 利用已知服务的QoS评价计算当前请求者对所有候选服务的QoS评价, 并以此作为Web服务选择的依据. 其中QoS评价包括两种: 服务提供商SP(Service Provider)评价和服务用户SC(Service Client)评价<sup>[11]</sup>. 本文采用两种不同的模型分别对这两类评价进行分析和演算, 最后通过加权聚合得到服务的综合QoS评价.

### 1.2.1 基于直接信任度的QoS评价

服务提供商评价是指提供商在注册服务时发布的初始QoS评价. 为了吸引更多用户使用, 对于某些服务的评价, 提供商可能发布了超出实际水平的数值<sup>[22]</sup>. 为此, 本文采用基于直接信任度的QoS评价模型, 以修正提供商的服务评价价值.

直接信任度是根据所有用户直接调用某服务的历史记录得出对该服务提供商的信任度, 是使用者与请求的服务实例之间经多次历史交互后产生的. 这里采用极大似然法估计直接信任度 $C_{sp}$ .

令直接信任度 $\theta_{ij}$ 表示服务使用者 $SC_i$ 对服务提供商 $SP_j$ 的信任度. 使用者每执行一次提供商的服务, 记录一次调用结果.  $SC_i$ 对 $SP_j$ 的服务调用记录 $x_{ij} = \{s_{ij}, f_{ij}\}$ . 其中:  $s_{ij}$ 表示成功执行服务的次数,  $f_{ij}$ 表示失败执行服务的次数. 汇聚所有用户对提供商 $SP_j$ 的调用记录 $x_{ij}(i = 1, 2, \dots, m)$ , 则提供商的全局信任度 $\theta_j$ 的似然函数为

$$L = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}; \theta_j) = \prod_{i=1}^m \theta_j^{s_{ij}} (1 - \theta_j)^{f_{ij}} = \theta_j^{\sum_{i=1}^m s_{ij}} (1 - \theta_j)^{\sum_{i=1}^m f_{ij}}. \quad (6)$$

其中:  $1 - \theta_j$ 表示服务失败的虚假信任程度, 当直接信任度 $\theta_j$ 增大时, 对虚假信任的程度必然会减小. 式(6)的对数似然函数为

$$\ln L(\theta_j) = \sum_{i=1}^m s_{ij} \ln \theta_j + \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln (1 - \theta_j), \quad (7)$$

$$\frac{\partial \ln L(\theta_j)}{\partial \theta_j} = \frac{\sum_{i=1}^m s_{ij}}{\theta_j} - \frac{\sum_{i=1}^m f_{ij}}{1 - \theta_j} = 0. \quad (8)$$

解得  $\theta_j$  的极大似然估计值  $\hat{\theta}_j$  即为服务提供商的直接信任度  $C_{sp}$ . 因此, 服务提供商的 QoS 最终评价为  $R_{sp_j} = C_{sp} * R_{s_j}$ ,  $R_{s_j}$  为服务提供商发布的初始 QoS 评价.

### 1.2.2 基于推荐信任度的 QoS 评价

服务请求者选择服务进行组合时, 除了参考提供商的 QoS 评价, 还会接收其他用户推荐的反馈信息 (已执行的用户对 Web 服务的 QoS 评价), 受环境、用户上下文和偏好等影响, 不同用户对同一服务的评价也不相同<sup>[10]</sup>. 此外, 也不排除存在虚假用户和恶意用户, 为了让请求者使用自己推荐的服务, 而刻意提高或降低对某些同类服务的评价. 因此, 请求者需要对推荐用户的可信度进行判断, 然后再参考其做出的服务评价. 服务请求者与用户对相同服务的评价越相似, 这些用户的信任度就越高, 反之越低. 本文以请求者与用户的相似度作为 QoS 评价的推荐信任度, 将不同用户的评价按照推荐信任度进行聚合, 得出对当前服务 QoS 的准确评价.

$i$  表示服务请求者,  $j$  表示已评价用户, 以往服务请求者  $i$  评价的服务集合为  $I_i$ , 用户  $j$  评价的服务集合为  $I_j$ , 经过请求者  $i$  和用户  $j$  共同评价过的服务集合为  $I_{ij}$ , 则请求者  $i$  与用户  $j$  的相似度为

$$\text{sim}(i, j) = \frac{\sum_{s \in I_{ij}} (R_{i,s} - \bar{R}_i)(R_{j,s} - \bar{R}_j)}{\sqrt{\sum_{s \in I_i} (R_{i,s} - \bar{R}_i)^2} \sqrt{\sum_{s \in I_j} (R_{j,s} - \bar{R}_j)^2}}. \quad (9)$$

其中:  $R_{i,s}$  表示请求者  $i$  对服务  $s$  的使用评价,  $R_{j,s}$  表示用户  $j$  对服务  $s$  的使用评价,  $\bar{R}_i$  表示请求者  $i$  对服务的平均评价,  $\bar{R}_j$  表示用户  $j$  对服务的平均评价.  $\text{sim}(i, j)$  描述的是请求者  $i$  与用户  $j$  的评价相似度, 其取值范围是  $[-1, 1]$ .  $\text{sim}(i, j) > 0$  表明请求者  $i$  与用户  $j$  是正相关;  $\text{sim}(i, j) < 0$  表明请求者  $i$  与用户  $j$  是负相关. 当  $\text{sim}(i, j) > 0$  时, 可以令用户  $j$  的推荐信任度  $C_{i,j} = \text{sim}(i, j)$ ; 反之, 当  $\text{sim}(i, j) \leq 0$  时, 请求者  $i$  已经对用户  $j$  不可信, 用户  $j$  的推荐信任度  $C_{i,j} = 0$ . 如果  $C_{i,j} > C_{i,k} > 0$ , 则表示请求者  $i$  对用户  $j$  的信任度大于对用户  $k$  的信任度.

获得服务请求者对用户的推荐信任度以后, 可以计算请求者对服务的 QoS 评价  $R_{sc}$ , 公式为

$$R_{sc} = \sum_{j=1}^n C_{i,j} R_{j,s_i} / \sum_{j=1}^n C_{i,j}. \quad (10)$$

其中:  $C_{i,j}$  表示请求者  $i$  对用户  $j$  的推荐信任度,  $R_{j,s_i}$

表示用户  $j$  对服务  $s_i$  的使用评价.

将可信的服务提供商评价和用户评价进行加权聚合, 得到对服务质量的综合评价为

$$R = \mu R_{sp} + (1 - \mu) R_{sc}. \quad (11)$$

其中:  $\mu = 1/(1 + b/N)$ , 这里的  $b$  为评价用户的个数,  $1 - \mu$  使得用户评价的权重随用户个数的不断增加而增大, 这里的常数  $N$  控制用户评价所占权重随数据量增长的速度, 可以根据需要设计不同的  $N$  值. 当  $b = 4N$  时,  $\mu = 0.2$ , 综合评价已经基本由用户评价的统计值决定. 如果无法收集到用户的 QoS 评价, 则令  $b = 0$ , 此时将直接采用来自服务提供商的数据进行选择.

### 1.3 全局优化的服务组合

全局 QoS 约束的动态服务组合, 即根据功能需求和 QoS 属性要求, 采用自适应局部分解的方式, 从多个候选服务中选择合适的服务进行组合, 形成粒度更大的组合服务功能整体, 从而使整个工作过程的状态呈现最优.

对于单个服务, 经过前面的 QoS 数据处理和计算已分别得到真实可信的 QoS 客观属性值 (监控采集数据) 和主观属性值 (服务评价). 考虑不同服务请求者对质量属性的侧重程度不同, 最终 QoS 聚合函数采用质量属性加权的形式描述如下:

$$M_{s_i} = \alpha \hat{Q}(s_i) + \beta R(s_i). \quad (12)$$

其中:  $\alpha + \beta = 1$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ ,  $0 \leq \beta \leq 1$ ;  $R(s_i)$  为服务  $s_i$  的综合评价;  $\hat{Q}(s_i)$  为服务  $s_i$  的客观质量效用值. 令  $\hat{Q}(s_i) = \sum_{j=1}^z \omega_j \hat{q}_j$ . 其中:  $\hat{q}_j$  为某属性的估计值,  $\omega_j$  为权重,  $z$  为服务客观质量的属性个数. 则式 (12) 变为

$$M_{s_{ij}} = \alpha \sum_{j=1}^z \omega_j \hat{q}_j + \beta R(s_i). \quad (13)$$

服务组合问题陈述: 设一项工作中有  $m$  个任务 (即需要组合  $m$  种服务); 每个任务有  $n$  个候选服务; 引入变量  $x_{ij}$  ( $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ ), 若第  $i$  个任务由第  $j$  个服务 (即服务  $s_{ij}$ ) 来完成, 则  $x_{ij} = 1$ , 否则  $x_{ij} = 0$ . 本文设定服务的客观属性包括执行时间、可靠性、可用性和吞吐量, 故服务的 QoS 属性总集合为  $Q = \{\text{执行时间 } T, \text{可靠性 } D, \text{可用性 } U, \text{吞吐量 } H, \text{综合评价 } R\}$ . 以顺序执行为例, 服务组合的 QoS 决策目标函数如下.

1) 执行时间  $T$ :

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} t_{ij}; \quad (14)$$

2) 可靠性  $D$ :

$$\max \prod_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} d_{ij},$$

取对数后

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln(d_{ij}) \cdot x_{ij}; \quad (15)$$

3) 可用性  $U$ :

$$\max \prod_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} u_{ij},$$

取对数后

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln(u_{ij}) \cdot x_{ij}; \quad (16)$$

4) 吞吐量  $H$ :

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} h_{ij}; \quad (17)$$

5) 综合评价  $R$ :

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} R_{ij}. \quad (18)$$

理想的情况是, 经过服务筛选后, 参与组合的服务各个 QoS 属性都能达到最优, 服务组合后将结果返回给用户. 但实际运行中, QoS 属性之间是互相制约和冲突的, 各个决策目标函数不能同时全部满足最优, 这属于多维多选择的 NP 难问题<sup>[23]</sup>. 所以, 需要在属性目标函数与全局最优之间加以折中, 以得到一个组合后的 QoS 总体相对最优或近似最优解. 即归一化后, 优化的目标函数为

$$\text{QoS} = \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^z x_{ij} \cdot \omega_{ij}^k p_{ij}^k. \quad (19)$$

其中:  $p_{ij}^k$  为服务  $s_{ij}$  的第  $k$  个质量属性,  $\omega_{ij}^k$  为服务  $s_{ij}$  的第  $k$  个质量属性的权重系数.

在每个服务组合的实例中, 用户对服务的质量属性偏好都是组合前已确定的. 因此, 对于顺序组合的每一个服务  $s_{ij}$  来说, 它的  $\sum_{k=1}^z \omega_{ij}^k p_{ij}^k$  是一个已确定的效用值, 故令

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^z \omega_{ij}^k p_{ij}^k. \quad (20)$$

综上所述, 经过归一化后, 全局约束的服务组合优化模型为

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} a_{ij}. \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} t_{ij} \geq T;$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \ln d_{ij} \geq \ln D;$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} h_{ij} \geq H;$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \ln u_{ij} \geq \ln U;$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} R_{ij} \geq R;$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, x_{ij} = 0 \text{ or } x_{ij} = 1.$$

采用混合整数规划法求解上述的优化模型, 能够针对每一项任务, 从每个服务类中快速可靠地找到满足全局约束的最佳服务, 从而得到最优的服务组合.

## 2 实验结果和分析

为了评价本文所提出的方法, 分阶段地进行相关算法的实验, 包括 QoS 客观随机性的期望和方差对比实验, QoS 的主观评价对比实验, 以及服务组合最优度及其偏差对比实验. 实验采用的数据一部分来自于真实服务数据集, 一部分来自模拟的服务数据集. 所有的实验均在相同的软硬件环境 (Pentium Dual 2.4 GHz, 2.0 GB RAM, Windows 7, Matlab 7.0, Java 1.7) 下进行.

### 2.1 QoS 客观值的期望和方差对比

采用真实的服务数据集对 QoS 客观的随机性进行实验分析. 此数据集来自 142 台分布式计算机在 64 个时间间隔内对 4 532 个 Web 服务采集的 QoS 信息, 含有执行时间和吞吐量两个属性<sup>[24]</sup>. 为了说明算法能够克服随机性环境的影响, 将本文方法与基于均值的统计方法进行比较, 如图 1 所示. 通过实验次数的递增, 比较单个服务执行时间的期望和标准方差. 期望值反映了采集样本的 QoS 估计值, 而标准偏差反映了 QoS 数据的精确度.

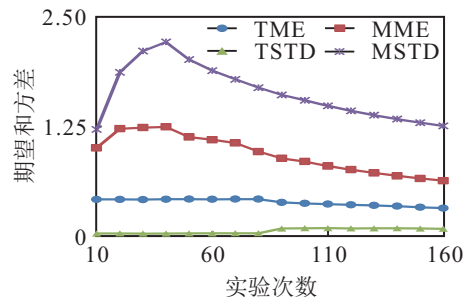


图 1 QoS 数据的期望和方差分布对比

由图 1 可知, 本文提出的  $t$  检验法能够将异常值剔除, 得到相对平稳的期望值 (TME) 和标准偏差 (TSTD), 期望值在 0.4 附近微动, 而标准方差则保持在 0.085 以内; 反之, 平均法在期望值 (MME) 和方差 (MSTD) 的估计上都有明显的波动, 且方差值已经超出了本文方差的百倍以上. 由实验结果可知, 在利用真实世界的服务 QoS 数据之前, 对其进行随机统计和真实性辨别是十分有效且必要的.

## 2.2 QoS 的主观评价对比

为了进一步验证本文 QoS 评价模型的优越性, 将提出的算法与其他两种算法(距离法<sup>[10]</sup>、差值法<sup>[25]</sup>) 用户评价的平均绝对误差进行对比, 同时将不同虚假率下的提供商和用户综合评价进行对比. 用户的评价来自模拟的 2000 个用户, 其中可信用户为 500 个, 其余为不可信用户, 提供商评价来自于 100 个 Web 服务. 实验中, 为了使结果更具公正性, 考虑对这 100 个 Web 服务的性能进行评价, 随着不可信用户比例以 10% 递增, 观察每次评价结果与理想值的误差, 然后取其平均. 用户评价的平均绝对误差计算公式为

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |R_{sc_i, s_i} - R_{s_i}|}{N}$$

其中:  $R_{s_i}$  为被请求服务  $s_i$  的理想评价值,  $R_{sc_i, s_i}$  为服务请求者  $sc_i$  对服务  $s_i$  的评价值.

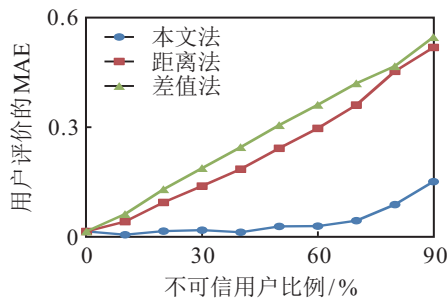


图 2 用户评价的平均绝对误差对比

由图 2 可知, 在出现不可信用户后, 本文提出的信任用户评价方法的误差明显很低, 且其值随着不可信用户比例的增大呈现较平稳的缓慢增进, 在不可信比例低于 70% 的情况下, 本方法评价结果的误差在 0.0076 ~ 0.04 之间, 与理想值非常接近. 而其他两种方法的误差都远高于本文方法, 且随着不可信用户比例的增加, 误差幅度呈近似线性增长, 当不可信用户比例超过 40% 时, 距离法和差值法产生误差已分别达到 0.19 和 0.25, 其评价结果的准确度已经很低, 基本不再适合作为服务选择的参考.

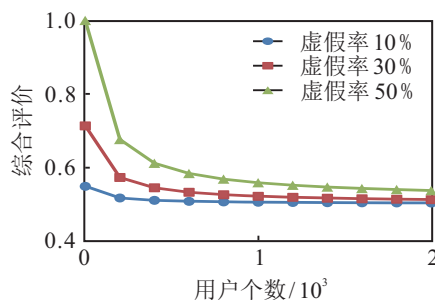


图 3 提供商/用户的综合评价对比

图 3 显示的是基于信任的提供商和用户综合评价的实验结果. 针对同一服务  $s_i$  的性能, 设定其理想

的评价值为 0.5, 常数  $N = 100$ . 将提供商评价虚假率和用户评价虚假率均设定为 10%、30% 和 60% 三个量级, 并且假设评价结果均高于服务质量的实际值. 从结果可以看出, 随着虚假率的降低, 综合评价结果更加接近实际值 0.5. 此外, 无论虚假率是多是低, 随着用户个数的增多, 3 类评价值的曲线均逐渐降低并最终趋近理想值 0.5. 这是因为根据前面的实验, 用户评价经过推荐信任度的过滤后已经与实际值很相似, 误差率非常低, 当用户个数还没有增加到一定程度时 (比如, 低于 400 个), 综合评价值取决于提供商和用户两者, 而当用户个数增加到足够多时, 提供商的评价已经不占主要, 综合评价主要取决于过滤后的用户评价, 从而更加接近理想值. 采用提供商和用户的综合评价算法, 兼顾了利益双方的考虑, 符合 SOA 体系的实际需求, 加快了评价体系的收敛速度.

## 2.3 服务组合最优度及其偏差对比

分别采用两个数据集来验证本文全局服务组合算法的准确度. 一个数据集是 QWS 的真实数据集<sup>[26-28]</sup>, 此数据集含有 2500 个真实服务, 每个服务包含 9 个质量属性; 另一个数据集通过模拟方式随机产生, 其中主观 (含提供商和用户) 的评价值来自 2.2 节的模拟数据, 客观的 QoS 属性数据由模拟器随机产生, 并且混入了异常数值. 实验测试用例的任务数设定为 5 ~ 40 个, 每个任务的候选服务个数为 5 ~ 200 个, 约束条件个数为 3 和 5 两种情况. 同一比较的实验中, 采用相同的数据集、测试用例、QoS 约束条件等.

为了更有效地反映真实服务组合优化的结果, 定义组合最优度为

$$OpDe = \frac{O_{\text{global}}}{O_{\text{pure}}}$$

其中:  $O_{\text{global}}$  表示全局优化目标值,  $O_{\text{pure}}$  表示局部的纯粹优化目标值.

图 4 的仿真实验分析了在不同的任务数量情况下, 本文全局动态最优方法组合结果 (GCP) 与局部的纯粹最优方法<sup>[29]</sup>组合结果 (PP) 的对比. 其中: GCP(3) 表示约束条件为 3 个 (执行时间、可靠性和可用性) 的组合最优度, GCD(5) 表示约束条件为 5 个 (执行时

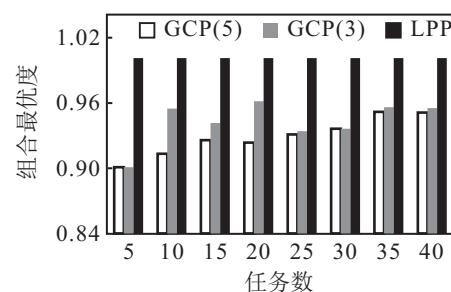


图 4 真实数据集 QWS 的组合最优度对比

间、可靠性、可用性、吞吐量和用户评价)时的组合最优度. 为了保证准确性, 记录的实验结果均是进行 20 次组合的最优度平均值.

由图 4 可知, 局部的纯粹最优方法因只选取某个局部任务的候选服务质量最优值, 其结果是理想化的最优值. 而本文的组合方法是寻找满足全局约束条件下的 QoS 质量最优的服务, 因此得到的是较优值. 当约束为 3 个时, 平均最优度在 0.942 (即 94.2%) 的水平, 当约束增加至 5 个时, 平均最优度保持在 0.929 (即 92.9%) 的水平, 两种情况都很接近理想最优度 1, 在大规模的工业实际生产中是完全可以接受并应用的. 从结果还可以看出, GCP(3) 的最优度值高于 GCP(5) 的最优度值, 说明约束范围不变的情况下, 当约束个数动态增加时, 组合的最优程度会有所降低, 这是因为全局服务组合过程中, 约束个数越多, 服务筛选的条件越严格, 有些效用值较高但不满足 QoS 约束的服务就会被舍掉, 因此最终服务组合的总效用值会有所降低, 这也说明了本文全局动态优化算法的有效性.

为了反映本文提出的 QoS 不确定性和可信评价对服务组合最优度的影响, 定义了最优度偏差率为

$$OpDiv = \frac{|O_{global} - O_{true}|}{|O_{ture}|} \times 100\%.$$

其中:  $O_{value}$  表示全局动态组合的最优目标值,  $O_{true}$  表示服务组合的真实 QoS 聚合值. 图 5 的实验考虑了随服务 QoS 虚假率的增加, 两种组合方式的最优度偏差率变化情况. 其中: QoS 包括 QoS 的客观采集值和主观评价, 它们的虚假率以相同的 10% 倍率递增; GCPD 表示使用本文假设检验和信任评价模型的组合最优度偏差率; UTED 表示未使用检验和评价模型的组合最优度偏差率.

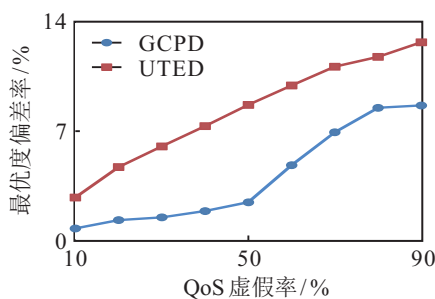


图 5 模拟数据集的最优度偏差率对比

由图 5 可知, 随着 QoS 虚假率的递增, GCPD 和 UTED 的最优度偏差率均有增加的趋势, 但 UTED 增加幅度明显较大, 而 GCPD 变化幅度相对较小, 这说明算法具有更好的稳定性. 此外, GCPD 的平均偏差率为 4.05%, 其数值小于 UTED 的 8.36%, 这说明本文的方法更接近最优目标, 原因在于 GCPD 的 QoS 数据经过  $t$  检验方法过滤, 以及信任评价模型的重新修正

后, 更加集中而准确, 因此服务的组合结果更加接近理想值; 而 UTED 的 QoS 数据中含有明显的异常值和虚假值, 导致其数据的不准确性, 因而服务组合的最优度偏差率较大.

### 3 结 论

本文提出了一种基于 QoS 随机性和信任评价的全局动态服务组合方法. 与以往研究不同的是, 本文较全面地设计了服务质量的多重评估标准, 考虑了导致 QoS 动态变化的网络不稳定因素、提供商和用户可信度的影响, 在剔除 QoS 异常值和修正了虚假评价之后, 进行基于 QoS 客观和主观约束的全局优化服务组合. 实验结果表明, 所提出的算法既能够适应动态变化的环境, 又可保证真实的服务质量, 克服了评价标准的个体差异性. 在本文使用的信任函数中, 对于推荐信任度  $C_{i,j}$ , 利用协同过滤的用户相似度  $\text{sim}(i, j)$  来表征, 根据相似度计算公式, 参与评价的用户相似度越小, 彼此的信任度越小, 因此对于虚假信任起到了一定的惩罚作用. 如何进一步优化惩罚函数, 将是未来研究工作的重点.

### 参考文献(References)

- [1] Mohammad Alrifai, Thomas Risse, Wolfgang Nejdl. A hybrid approach for efficient Web service composition with end-to-end QoS constraints[J]. J ACM Trans on the Web, 2012, 6(2): 7:1-7:31.
- [2] Min Liu, Mingrui Wang, Weiming Shen, et al. A quality of service (QoS)-aware execution plan selection approach for a service composition process[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(7): 1080-1089.
- [3] Sun Y, He S, Leu J. Syndicating Web services: A QoS and user-driven approach[J]. Decision Support Systems, 2007, 43(1): 243-255.
- [4] Sara Mahdavi-Hezavehi, Matthias Galster, Paris Avgeriou. Variability in quality attributes of service-based software systems: A systematic literature review[J]. Information and Software Technology, 2013, 55(2): 320-343.
- [5] 王尚广, 孙其博, 张光卫, 等. 基于云模型的不确定性 QoS 感知的 Skyline 服务选择[J]. 软件学报, 2012, 23(6): 1397-1412.  
(Wang S G, Sun Q B, Zhang G W, et al. Uncertain QoS-aware skyline service selection based on cloud model[J]. J of Software, 2012, 23(6):1397-1412.)
- [6] Kulnarattana L, Rongviriyapanish S. A client perceived QoS model for Web services selection[C]. Proc of the 6th Int Conf on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Pattaya, 2009: 731-734.

- [7] Xi Chen, Zibin Zheng, Xudong Liu, et al. Personalize QoS-aware web service recommendation and visualization[J]. *IEEE Trans on Services Computing*, 2013, 6(1): 35-47.
- [8] Zibin Zheng, Hao Ma, Lyu Michael R, et al. QoS-aware web service recommendation by collaborative filtering[J]. *IEEE Trans on Services Computing*, 2011, 4(2): 140-152.
- [9] 龙军, 袁鑫攀, 桂卫华. 基于环境感知的可信 QoS 评价与服务选取策略[J]. *电子学报*, 2012, 4(6): 1133-1140. (Long J, Yuan X P, Gui W H. A Policy for the trusted QoS evaluation and service selection with environment aware[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(6): 1133-1140.)
- [10] Nguyen H T, Zhao W, Yang J. A trust and reputation model based on bayesian network for Web services[C]. *IEEE Int Conf on Web Services (ICWS)*. Miami, 2010: 251-258.
- [11] Sathya M, Swarnamugi M, Dhavachelvan P, et al. Evaluation of QoS based web-service selection techniques for service composition[J]. *Int J of Software Engineering*, 2010, 1(5): 73-90.
- [12] Papazoglou M P. Web 服务: 原理和技术[M]. 龚玲, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2009: 3-4. (Papazoglou M P. *Web service: Principles and technology*[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 3-4.)
- [13] Kaijun Ren, Junqiang Song, Min Zhu, et al. A bargaining-driven global QoS adjustment approach for optimizing service composition execution path[J]. *The J of Supercomputing*, 2013, 63(1): 126-149.
- [14] Sun Sherry X, Jing Zhao. A decomposition-based approach for service composition with global QoS guarantees[J]. *Information Sciences*, 2012, 199: 138-153.
- [15] Klein A, Ishikawa F, Bauer B. A probabilistic approach to service selection with conditional contracts and usage patterns[M]. *Service-Oriented Computing*. Berlin: Springer, 2009: 253-268.
- [16] Xiong P C, Fan Y, Zhou M C. QoS—aware web service configuration[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2008, 38(4): 888-895.
- [17] 王斌会, 徐勇勇. 正态性检验的图示方法及其应用[J]. *数理统计与应用概率*, 1996, 11(3): 249-256. (Wang B H, Xu Y Y. Test for the normality on the probability plots and its application[J]. *Mathematical Theory and Applied Probability*, 1996, 11(3): 249-256.)
- [18] 赵选民, 徐伟, 师义民, 等. *数理统计*[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 148-165. (Zhao X M, Xu W, Shi Y M, et al. *Mathematical statistics*[M]. Beijing: Science Press, 2002: 148-165.)
- [19] 李娟生, 丁建生, 李曼生. 浅释  $t$  检验、方差分析的应用条件[J]. *中国卫生统计*, 2002, 19(5): 318. (Li J S, Ding J S, Li M S. Explanation for the application conditions of  $t$ -test and analysis of variance[J]. *Chinese J of Health Statistics*, 2002, 19(5): 318.)
- [20] 王岩, 隋思涟. *试验设计与 Matlab 数据分析*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 41-45. (Wang Y, Sui S L. *Experimental design and Matlab data analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 41-45.)
- [21] Douglas C Montgomery. *实验设计与分析*[M]. 傅珏生, 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 31-62. (Douglas C Montgomery. *Experimental design and analysis*[M]. Beijing: People Post Press, 2009: 31-62.)
- [22] Qi L, Yang R, Lin W, et al. A QoS-aware web service selection method based on credibility evaluation[C]. *The 12th IEEE Int Conf on High Performance Computing and Communications(HPCC)*. Melbourne, 2010: 471-476.
- [23] Can Fora G, Di Penta M, Esposito R, et al. A lightweight approach for QoS aware service composition[C]. *Proc of the 2nd Int Conf on Service Oriented Computing*. New York, 2004: 36-47.
- [24] Yilei Zhang, Zibin Zheng, Lyu Michael R. WSPred: A time-aware personalized QoS prediction framework for Web services[C]. *Proc of the 22th IEEE Symposium on Software Reliability Engineering*. Hiroshima, 2011: 210-219.
- [25] 舒振, 马建威, 罗雪山. 一种基于信誉度的 Web 服务质量预测方法[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(5): 1764-1772. (Shu Z, Ma J W, Luo X S. A Web service QoS prediction method based on reputation[J]. *J of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(5): 1764-1772.)
- [26] Al-Masri Eyhab, Mahmoud Qusay H. The qws dataset[EB/OL]. [2008-03-16]. <http://www.uoguelph.ca/qmahmoud/qws/index.html/>.
- [27] Al-Masri Eyhab, Mahmoud Qusay H. Qos-based discovery and ranking of web services[C]. *Proc of the IEEE Int Conf on Computer Communications and Networks*. Honolulu, 2007: 529-534.
- [28] Al-Masri Eyhab, Mahmoud Qusay H. Investigating web services on the world wide web[C]. *Proc of the 17th Int World Wide Web Conf*. Beijing, 2008: 795-804.
- [29] Danilo Ardagna, Barbara Pernici. Adaptive service composition in flexible processes[J]. *IEEE Trans on Software Engineering*, 2007, 33(6): 369-384. (责任编辑: 齐 霖)