

# 基于贝叶斯网络的网格 QoS 可信度评估方法

胡志刚, 付毅, 肖鹏, 胡周君

(中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 提出一种基于贝叶斯网络的网格服务 QoS 可信度评估方法, 用于实现信任增强的服务选择。该方法利用服务的历史性能信息建立贝叶斯网络, 根据用户的 QoS 需求评估服务 QoS 的可信度, 并解决传统方法中忽略 QoS 提供一致性的问题。实验结果表明, 在动态的服务网格环境中, 该方法能增强服务信息的可信度, 提高服务匹配合理性。

**关键词:** 服务网格; 服务质量; 可信度; 贝叶斯网络

## Bayesian Network-based Grid QoS Trustworthiness Evaluation Method

HU Zhi-gang, FU Yi, XIAO Peng, HU Zhou-jun

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

**【Abstract】** To provide trust-enhanced service selection, a Bayesian network-based approach is presented to evaluate the trustworthiness of grid service. The approach employs performance history to construct an evaluation model, which ranks the services in terms of their trustworthiness of Quality of Service(QoS) information and considers degree of consistency in QoS provision. Experimental result shows that the proposed approach can effectively enhance trustworthiness of service information and improve feasibility of service selection.

**【Key words】** service grid; Quality of Service(QoS); trustworthiness; Bayesian network

### 1 概述

服务网格<sup>[1]</sup>作为大规模的分布式计算系统, 通过服务的形式来解决动态、跨组织的资源协同共享。随着功能相似的各类服务不断增多, 基于 QoS 的服务选择成为服务网格研究的热点<sup>[2]</sup>。用户在进行服务选择时期望获得准确可信的 QoS 信息。在开放的网格环境下, 服务 QoS 的可信度评估需要考虑 2 个方面的问题: 资源负载动态变化使得服务的实际性能可能与其所声明的存在一定的偏差; 服务提供者可能夸大资源的 QoS 服务能力用于提高其收益。

当前, 服务 QoS 信息可信度评估相关的研究大多基于服务执行阶段收集的历史信息。文献[3]将 QoS 信息与声誉关联, 通过声誉来评估服务质量; 文献[4]提出通过统计性能信息对服务 QoS 可信度进行评估, 引入“事实”作为服务质量一致性的测量方法。以上研究的不足在于, 简单采用统计信息中 QoS 指标的平均值来评估服务性能, 忽略了服务 QoS 提供的一致性, 导致无法准确评估服务的真实 QoS 能力。文献[5]提出了基于历史记录相似度评估 QoS 可信度方法: 首先计算用户请求与历史请求的相似度, 采用一个相似度阈值来筛选历史记录。在此基础上通过累加顺应值(compliance)来选择最能满足用户需求的服务。该方法存在的问题是当服务性能波动较大时一次很好的执行结果可能会掩盖几次较差的执行结果, 导致评估不准确。

本文提出基于贝叶斯网络的 QoS 可信度评估方法, 根据服务 QoS 历史记录建立贝叶斯网络, 针对用户提出的不同 QoS 需求评估服务 QoS 可信度, 并优化服务选择过程。

### 2 服务 QoS 可信度评估方法

网格服务 QoS 用向量表示为  $Q=(q_1, q_2, \dots, q_n)$ ,  $n$  为 QoS 参数种类。在服务选择过程中, 用户向服务提供者发出请求

QoS(requested QoS), 记为  $Q_r=(q_{r1}, q_{r2}, \dots, q_{rm})$ ; 随后进行服务级别协商, 签署服务协议(SLAs)。将 SLA 中协定 QoS(agreed QoS)记为  $Q_a=((q_{a1}^{\min}, q_{a1}^{\max}), (q_{a2}^{\min}, q_{a2}^{\max}), \dots, (q_{an}^{\min}, q_{an}^{\max}))$ , 范围值表示用户能接受的 QoS 范围。服务执行完成后, 实际交付 QoS(delivered QoS)记为  $Q_d=(q_{d1}, q_{d2}, \dots, q_{dn})$ 。SLA 协定的执行结果是反映服务可信程度和用户满意状况的重要参考, 为了量化评价服务的完成情况, 定义了 QoS 满意度的概念。

**定义 1** QoS 满意度(QoS satisfactoriness), 用户在服务完成后对实际 QoS 的一个综合的满意度评价, 记为  $S$ 。

QoS 满意度是反映 QoS 各个属性值是否达到其在 SLA 中承诺水平的一个综合因素。当服务执行后, 如果有一个实际 QoS 参数不能满足 SLA 协商的最小值时, QoS 满意度为 0; 只有当所有实际 QoS 参数都能满足 SLA 协商的最小值时, 才能认为服务提供者没有违约, 需要计算具体的 QoS 满意度。计算过程如下: 将 QoS 表示成  $n$  维的布尔向量  $T^q$ ,  $n$  为所有 QoS 参数的种类。若  $T^q[k]=1$ , 则表示该用户的第  $k$  个 QoS 参数要求得到满足(或用户对此参数没有提出要求); 反之, 若  $T^q[k]=0$ , 则第  $k$  个分量对应的 QoS 参数没有满足用户的最低要求。用特征值  $\mu'$  来表征 QoS 向量  $T^q$  包含的所有值为 1 的分量所对应的最低要求是否都被满足: 若都被满足,  $\mu'=1$ ; 否则,  $\mu'=0$ , 则 QoS 满意度  $S$  计算如下:

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60673165, 60433020)

**作者简介:** 胡志刚(1963—), 男, 教授、博士后、博士生导师, 主研方向: 并行计算, 网格计算; 付毅, 硕士研究生; 肖鹏、胡周君, 博士研究生

**收稿日期:** 2008-09-05 **E-mail:** csufuyi@126.com

$$S = \mu \cdot \sum_{k=1}^n T^q[k] \cdot c_k \cdot \omega_k \quad (1)$$

$$q_{ak}^{\max} = q_{ak}^{\min}, c_k = \begin{cases} 1 & \text{if } q_{dk} \geq q_k^{\max} \\ 0 & \text{if } q_{dk} < q_k^{\min} \end{cases} \quad (2)$$

$$q_{ak}^{\max} \neq q_{ak}^{\min}, c_k = \begin{cases} 0 & \text{if } q_{dk} < q_{ak}^{\min} \\ \frac{q_{dk} - q_{ak}^{\min}}{q_{ak}^{\max} - q_{ak}^{\min}} & \text{if } q_{ak}^{\min} \leq q_{dk} < q_{ak}^{\max} \\ 1 & \text{if } q_{dk} \geq q_{ak}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $c_k$  为用户对 QoS 属性中第  $k$  个参数的满意度函数;  $\omega_k$  为用户对相应的 QoS 属性的偏好权重, 满足  $\sum_{k=1}^n \omega_k = 1$ 。针对

不同的 QoS 参数, 不同的用户可以根据自己的要求定义不同的  $c_k$  函数。为了一致地量化服务提供者信守其 SLA 承诺的程度, 本文定义线性关系的  $c_k$ , 如式(2)、式(3)。

**定义 2** QoS 可信度(QoS trustworthiness), 用户对服务能成功执行且满足 QoS 要求的信任程度, 记为  $T$ 。

服务运行过程中的历史信息是反应服务性能和服务提供策略最有力的证据, 同时, QoS 满意度是用户对服务执行结果的重要反馈。因此, 本文综合这 2 个因素来评估 QoS 可信度。将历史记录记为如下一个三元组  $\langle id, q_d, S \rangle$ , 其中,  $id$  为记录标识;  $q_d$  为服务运行过程中实际 QoS 记录(delivered QoS);  $S$  为 QoS 满意度。因此,  $T$  的计算公式如下:

$$T = P(S' \geq S | q_{d1} \geq q_{r1}, q_{d2} \geq q_{r2}, \dots, q_{dn} \geq q_{rn}) \quad (4)$$

其中,  $S'$  为服务执行前用户对 QoS 满意度的期望值;  $S$  为服务执行完成后实际的 QoS 满意度。

### 2.1 基于贝叶斯网络的QoS可信度评估

贝叶斯网络表示为  $B = \langle G, \Theta \rangle$ , 其中, 网络结构图  $G$  是一个有向无环图(DAG), 图中的所有节点分别对应随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 有向边集合表示变量之间的直接依赖关系, 体现了领域知识定性方面的特征;  $\Theta$  为局部概率分布, 表示每个变量  $X_i$  局部概率分布的集合。  $\Theta$  中的元素是给定每个变量  $X_i$  的父节点, 该节点取不同的条件概率  $P(x_i | Val(Parent(X_i)))$  得到条件概率表(CPT), 其中,  $Parent(X_i)$  表示图  $G$  中  $X_i$  的父节点集。CPT 体现了领域知识定量方面的特征。QEMBN 以贝叶斯网络来描述网格服务 QoS 的可信度模型, 对 QoS 可信度评估包括以下 3 个部分:

(1)QoS 参数量化: 不失一般性, 本文选取网格服务中较有代表性的 3 个 QoS 属性, 分别为执行时间(execution time)、价格(price)、可用性(availability)。为提高贝叶斯网络的学习效率, 各个属性先按文献[2]的方式进行归一化处理。

贝叶斯网络结构生成算法如下:

#### 算法 1 网络结构生成算法

输入: 历史记录变量  $H = (V_1, V_2, \dots, V_k)$

输出: 贝叶斯网络 DAG

Begin

1 For  $j = 1$  to  $k$  Do.

2 令  $V_{T(j)}$  表示  $T$  中第  $j$  个次序最高的变量, 设为原因变量。

3 令  $\pi(V_{T(j)}) = \{V_{T(1)}, V_{T(2)}, \dots, V_{T(j-1)}\}$  表示排在  $V_{T(j)}$  前面的变量的集合。

4 使用服务领域先验知识, 以  $V_{T(j)}$  为参照, 把  $\pi(V_{T(j)})$  分为结果变量集  $\pi_r V_{T(j)}$  和非结果变量集  $\pi_n V_{T(j)}$ 。

5 在  $V_{T(j)}$  和  $\pi_r V_{T(j)}$  中的变量之间建立有向边。

6 End for

End

(2)网络结构生成: 网络结构生成过程是依据领域知识来确定节点及节点之间的依赖关系, 建立一个表示条件独立的有向无环图。由定义 1 可知, 服务的 QoS 满意度受由所有 QoS 属性的综合值决定, 各个 QoS 属性之间并非完全独立, 属性之间的相关性将影响最终的评估结果。以执行时间、价格和可用性为例, 根据计算经济原理, 功能相同的服务在资源市场中参与竞争, 执行时间和可用性将对服务在市场价格造成影响。由算法 1 生成的贝叶斯网络结构如图 2 所示。

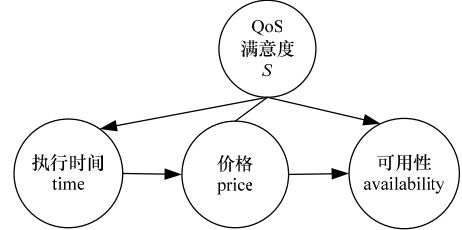


图 2 用于 QEMBN 的贝叶斯网络

(3)网络参数学习: 参数学习的过程是根据历史记录中的样本数据, 求得局部概率  $P(x_i | Parent(X_i))$ , 并填写节点的条件概率表。在历史记录中, 设  $q_d = (q_t, q_p, q_a)$ , QoS 满意度为  $S'$ 。假设当前用户请求 QoS 为  $q_r = (q_t, q_p, q_a)$ , QoS 满意度要求为  $S$ 。条件概率表的更新规则如表 1 所示。

表 1 BN 中节点的 CPT 规则

节点	条件	条件概率值	
$t$ Node:	$S' \geq S$	$P(q_t \geq q_t   S' \geq S)$	
	$q_t \geq q_t$	$S' < S$	$P(q_t \geq q_t   S' < S)$
$a$ Node:	$S' \geq S$	$P(q_a \geq q_a   S' \geq S)$	
	$q_a \geq q_a$	$S' < S$	$P(q_a \geq q_a   S' < S)$
	$q_t \geq q_t$	$P(q_p \geq q_p   q_t \geq q_t, q_a \geq q_a, S' \geq S)$	
	$q_a \geq q_a$		
$p$ Node:	$S' \geq S$	$P(q_p \geq q_p   q_t \geq q_t, q_a \geq q_a, S' < S)$	
	$q_t \geq q_t$		
	$q_a \geq q_a$		
	$S' \geq S$		

### 2.2 QEMBN的可信度推理

由式(2)可知, 用户可以求出不同的 QoS 请求条件下的 QoS 可信度  $T$ ,  $T$  的具体推理过程可以转换成求解贝叶斯网络的联合概率分布。由概率的链规则可知:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_1, X_2, \dots, X_{i-1}) \quad (5)$$

对网络任一节点  $X_i$ , 可以找到一个与  $X_i$  都不独立的最小子集  $Parent(X_i) \subseteq (X_1, X_2, \dots, X_{i-1})$ , 使得  $P(X_i | X_1, X_2, \dots, X_{i-1}) = P(X_i | Parent(X_i))$ 。因此, 当 BN 中变量元组  $\langle X_1, X_2, \dots, X_n \rangle$  赋予具体数值  $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$  时, BN 联合概率分布可以由式(6)表示:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | Val(Parent(X_i))) = \prod_{i=1}^n \theta_{x_i | Val(Parent(x_i))} \quad (6)$$

根据式(6), 结合图 2 的网络结构,  $T$  可以推导如下:

$$T = P(S \geq S | q_t \geq q_t, q_p \geq q_p, q_a \geq q_a) = \frac{P(S \geq S, q_t \geq q_t, q_p \geq q_p, q_a \geq q_a)}{\sum_S P(S, q_t \geq q_t, q_p \geq q_p, q_a \geq q_a)}$$

$$= \frac{P(S \geq S) \cdot P(q_t \geq q_t | S \geq S) \cdot P(q_p \geq q_p | S \geq S, q_t \geq q_t) \cdot P(q_a \geq q_a | S \geq S, q_t \geq q_t, q_p \geq q_p)}{\sum_S P(S) \cdot P(q_t \geq q_t | S) \cdot P(q_p \geq q_p | S) \cdot P(q_a \geq q_a | S, q_t \geq q_t, q_p \geq q_p)}$$

上式中各概率值分别查询表 1 中各个节点的条件概率表获得。

根据 QoS 可信度的定义和求解过程,将 QEMBN 方法总结为: 首先将服务执行的结果(QoS 满意度)与 QoS 属性之间的依赖关系用 DAG 表示; 服务运行过程中, 实际的 QoS 性能信息以条件概率的形式融入模型; 通过贝叶斯推理来预测服务未来的 QoS 能力。

### 3 实验设计与分析

在仿真实验中, 构建了一个网格服务市场模型, 用于检验 QEMBN 能否在服务性能动态变化的服务网格环境中提高服务匹配成功率和增强服务信息的可信度。同时比照了文献[5]中的 QoS 评估方法(简称为 compliance 方法)和随机服务选择方法(简称为 random 方法)。

#### 3.1 实验设置

服务市场中包括了用户、服务和调度器 3 类实体。服务实体中包括 24 个服务, 所有服务功能相同, 且具有相同维度的 QoS 属性。这里选取执行时间、可用性、价格 3 个属性作为参考。QoS 属性值按正态分布产生, 每个属性可以分为高、低两类。24 个服务共分为 8 组分别代表 3 种 QoS 属性的 8 种组合方式。同组的服务 QoS 属性具有相同的均值和不同的方差。这样设置的理由是使得整个服务市场环境中具有能够满足各种 QoS 组合条件要求的服务, 并且对具有相同 QoS 声明的服务, 性能和稳定性上有所差异, 以尽量真实地模拟服务市场环境。仿真流程如下: 用户按均匀分布随机产生 QoS 请求; 调度器根据服务请求, 计算 QoS 可信度, 对服务排序; 用户选择 QoS 可信度排名最高的服务执行; 服务完成后, 调度器按照服务执行的情况, 计算 QoS 满意度, 将 QoS 历史记录存档。

#### 3.2 实验数据与分析

实验 1 比较了用户对 QoS 满意度有不同的预期时, QoS 可信度的变化情况。S 分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7 时, 服务市场的平均 QoS 可信度 T 如图 3 所示。

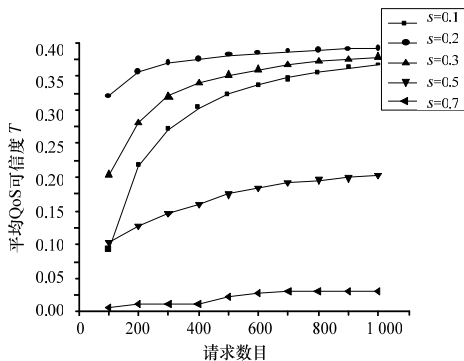


图 3 平均 QoS 可信度变化情况

当用户对满意度期待过高时(如  $S=0.5, 0.7$ ), 大部分服务的实际服务能力都不能满足服务预期, 这样服务匹配的结果导致平均 QoS 可信度较低; 当用户对服务市场的满意状况期待较低, 符合服务实际能力时(如  $S<0.4$ ), 调度器能有效地根据 QoS 请求评估 T 值, 甄别出不同级别的服务, 使平均 QoS 可信度较高。平均 QoS 可信度反映了服务匹配的状况, 调

度器可以此为观测值调节服务市场。用户可以将 T 值作为服务选择的判断信号, 根据服务市场状况对自己所提 QoS 要求做出调整。

实验 2 比较了 Random 方法、Compliance 方法和本文方法的服务匹配情况。本文的方法中取  $s=0.2$  和  $s=0.3$  这 2 种情况。从图 4 可以看出, 在相同的一组服务请求下, Random 方法将导致极低的匹配成功率; Compliance 方法表现比较稳定, 而使用本文的方法, 请求成功率均高于 80%。在服务运行的开始阶段, 处于 BN 网络构建的阶段, 请求成功率较低; 随着服务的运行, 服务 QoS 历史数据的增多, 请求成功率逐步提高。

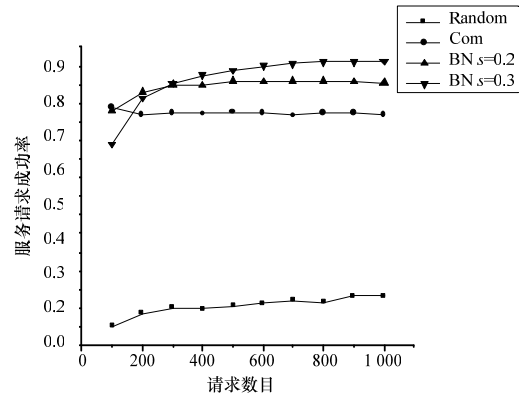


图 4 3 种方法服务请求成功率比较

### 4 结束语

针对动态和不确定的服务网格中服务质量可信度评估问题, 本文提出了基于贝叶斯网络的服务质量评估方法(QEMBN), 根据用户服务质量需求评估服务 QoS 的可信度, 并解决了传统方法中忽略服务质量提供一致性的问题。仿真实验表明, QEMBN 在服务性能动态变化的情况下具有较好的适应性。

#### 参考文献

- [1] 胡春明, 怀进鹏, 沃天宇, 等. 一种支持端到端 QoS 的服务网格体系结构[J]. 软件学报, 2006, 17(6): 1448-1458.
- [2] Zeng L, Benatallam B. QoS-aware Middleware for Web Services Composition[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2004, 30(5): 311-327.
- [3] Yu B, Singh M P. An Evidential Model of Distributed Reputation Management[C]//Proceedings of the 1st International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems. New York, USA: ACM Press, 2002: 294-301.
- [4] Kalepu S, Krishnaswamy S, Loke S W. Reputation=f(User Ranking, Compliance, Verity)[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services. San Diego, USA: IEEE Computer Society Press, 2004: 200-207.
- [5] Sherchan W, Krishnaswamy S, Loke S W. Relevant Past Performance for Selecting Web Services[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Quality Software. Melbourne, USA: IEEE Computer Society Press, 2005: 439-445.

编辑 索书志