

支持 QoS 约束的自主单元语义服务匹配

张 琨^{1,2} 许满武¹ 张 宏² 刘凤玉²

(南京大学计算机科学与技术系 南京 210093)¹ (南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)²

摘 要 主体服务描述和主体服务匹配是利用主体和多主体系统为用户提供各种有效和高效服务的关键。综合考虑了语义和服务质量对匹配的影响,提出了自主单元主体服务描述模型,并在此基础上重点研究了一种支持 QoS 约束的自主单元语义服务匹配算法。该算法通过语义相似度匹配和服务质量匹配两个过程,有效获得满足给定语义相似度的阈值,且具有最佳服务质量水平的主体服务。

关键词 自主单元,语义服务匹配,QoS 约束,主体服务,自主计算

中图法分类号 TP18

Semantic Service Matchmaking for Autonomic Unit with QoS Constraints

ZHANG Kun^{1,2} XU Man-wu¹ ZHANG Hong² LIU Feng-yu²

(Department of Computer Science & Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)¹

(School of Computer Science & Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)²

Abstract Agent service description and matchmaking are the key for providing to efficient and effective services for users by using agent and multi-agent systems. Considering impact of semantic and quality-of-service on the matchmaking, an agent service description model for autonomic unit was proposed. On basis of this model, a semantic service matchmaking algorithm with QoS constraints was studied detailedly. The proposed algorithm lies over two fundamental processes: semantic similarity matchmaking and QoS matchmaking, which can efficiently obtain agent service with optimal QoS performance and satisfying the given threshold of semantic similarity.

Keywords Autonomic unit, Semantic service matchmaking, QoS constraints, Agent service, Autonomic computing

1 引言

软件复杂性危机严重阻碍了 IT 产业向前发展,解决软件复杂性危机是进入下一个计算时代的先决条件。自主计算技术^[1]就是为了解决软件复杂性危机而提出的一门新兴的研究课题。自主计算所要解决的是日益复杂的计算环境中所面临的管理与成本问题,满足人们日益增长的按需计算需求,该方法使得 IT 系统能自管理和自适应,包括自配置、自恢复、自优化和自保护。

随着主体(Agent)和多主体(Multi-Agent)系统越来越受到分布式人工智能领域研究者的广泛关注,基于主体的自主计算也逐渐成为研究热点^[2-6]。这些研究以主体充当自主计算元素(自主单元),重点关注如何利用主体和多主体系统为用户提供各种有效和高效的服务(即基于主体的服务),通过自配置使自主计算实现自我管理能力。在这些研究中,如何对主体进行能力描述(即服务描述)及能力匹配(即服务匹配),即在自配置中实现自主单元的服务匹配是关键。

主体服务能力描述的语义问题和服务质量问题是主体服务匹配过程中的两个重要因素。基于语义的主体服务匹配能克服基于语法的服务匹配存在的查全率、查准率较低,无法保

证主体服务组合的相容性等问题。另外,在对主体服务功能进行匹配时,还应考虑服务代价、时间、可靠性等服务质量(Quality of Service, QoS)非功能因素的影响,从而保证服务匹配结果是用户最满意的。但是,目前大量的研究工作并没有将二者有效地结合起来,大都是分别针对语义或服务质量进行主体服务匹配。因此,本文综合考虑了语义和服务质量对服务匹配的影响,给出具有服务质量属性的自主单元语义服务描述模型,并在此基础上提出一种支持 QoS 约束的自主单元语义服务匹配算法。该算法能有效找到满足给定语义相似度的阈值,且具有最佳服务质量水平的主体服务。

2 相关工作

自从主体和基于主体的自主计算研究以来,主体或自主单元的服务匹配已经受到广泛深入的研究。Wickler 研制了主体能力描述语言 CDL^[7],它采用动作语言来表示能力,但它的描述是基于语法层的,没有考虑在语义层上的描述。另外,它没有考虑服务的协商机制,也不支持数据类型的定义。

Sycara 等^[8]采用 LARKS 语言来描述主体服务,并且利用了语义距离的机制来实现近似服务匹配,提供了多种匹配策略,考虑了服务质量与服务效率的平衡。但由于语义距离

到稿日期:2008-04-16 本文受国家自然科学基金重大研究计划项目“可信软件风险多层次综合管理技术”(项目批准号:90718021)资助。

张 琨(1977-),女,副教授,硕士生导师,博士,博士后,主要研究方向是自主计算和性能保持、软件形式化与智能化、信息安全、网络通信等, E-mail: zhangkunw@126.com; 许满武 教授,博士生导师; 张 宏 教授,博士生导师; 刘凤玉 教授,博士生导师。

的建立工作量大、主观因素和不确定性因素很多,因而它们的服务匹配算法的实用性和可靠性都有一定的局限性。

Arisha 等人^[9]提出了一种主体服务描述语言 SDL,该语言非常简单,但不支持数据类型的定义,不能有效地描述服务。它主要利用分层机制和同义词词典来刻画服务描述的语义问题,利用语义距离的机制来提供近似服务匹配,而语义距离的建立工作量大,主观因素很重。

文献[10]针对上述研究工作中存在的问题,提出一个服务质量(QoS)模型,来客观反映主体服务非功能属性的特征,研究了该 QoS 模型上各质量标准所对应的初始化方法、计算和评价方法以及 QoS 模型的总体评价方法,并在 QoS 模型的基础上给出了一种新的主体服务匹配算法。但该匹配算法是语法层的服务匹配,无法表达出主体服务间的语义相关性并实现基于语义的服务匹配。

文献[11,12]对基于语义的主体服务匹配进行了深入研究。其中文献[11]利用描述逻辑的思想来研究服务匹配问题,采用描述逻辑描述服务概念进而实现概念的自动分层(即判断概念间包含关系),提出了基于描述逻辑的主体服务匹配算法,弥补了基于语义距离进行服务匹配的不足。文献[12]提出了领域概念化语言(DCL),采用概念-关系-属性和约束规则的形式表示领域本体论,进而支持描述复杂的主体服务和约束;提出服务语义相容度的概念,通过计算概念的相容度来定义服务语义的相容度,实现基于语义的服务匹配。该方法直接利用领域本体论中概念的分类体系,根据概念的上下位关系计算出概念的相容度,比手工建立的术语间的语义距离而得出的术语相似度的方法更快捷。但是,基于逻辑推理的方法还存在代价和性能方面的问题,而且这两种算法在主体服务匹配过程中都没有考虑服务代价、时间、可靠性等服务质量属性的影响,因此无法保证服务匹配的结果是用户最满意的。

3 自主单元主体服务描述模型

实现自主单元主体服务的匹配,首要任务是要实现主体服务的能力描述(服务描述)。

定义 1 自主单元主体服务描述模型是一个四元组:

$$ASDM_Q = \langle GD, FD, QA, SC \rangle \quad (1)$$

GD 表示通用描述(General Description),是主体服务最基本的属性,包括服务名、服务领域分类(确定服务的领域范围、具体主体领域分类编码内容可参考文献[13])、文本描述等概要性描述;

FD 表示功能描述(Function Description),包括接口类型、参数列表以及其他服务功能或行为描述;

QA 表示主体服务的服务质量属性(QoS Attribute),既包括与主体服务领域特性无关的通用服务质量参数,如响应时间、代价、可靠性、满意度和真实度等,这些参数可以度量任何一个主体服务的质量,还包括与主体服务特定领域中的业务内容、业务上下文以及主体服务提供者等相关的质量属性。通过计算获得该主体服务的总体服务质量水平,从而进行 QoS 匹配。具体内容参见定义 2;

SC 表示对服务的约束(Service Constraints),是对服务适用性约束的描述,通过条件表达式表示。

定义 2 自主单元主体服务 QoS 模型是一个六元组:

$$ASQ = \langle time, cost, reliability, satisfaction, fidelity, domain_attr \rangle \quad (2)$$

其中,服务时间(time)、服务代价(cost)、可靠性(reliability)、满意度(satisfaction)和真实度(fidelity)是主体服务的通用 QoS 属性;domain_attr 是主体服务的领域服务质量属性,是与主体服务特定领域中的业务内容、业务上下文以及主体服务提供者等相关的质量属性。domain_attr 没有标准或统一的规定,一般由领域专家或设计者根据自己的经验制定,也可以从业界已经存在的领域本体中学习得到。本文对此不做详细讨论。因此,当有多个主体满足服务请求时,要综合考虑 5 种通用属性,通过计算获得每个主体服务的总体服务质量水平,再选择质量水平最高者作为用户最满意的服务提供主体。

主体服务时间(time)是指发出服务请求到收到服务结果所经历的时间,包括服务处理时间和服务延迟时间;主体服务代价(cost)是指用户要向主体服务提供者所支付的费用;可靠性(reliability)是指主体服务能正确提供它所注册服务的概率,是其可靠程度的度量;满意度是指用户对主体服务的可满意程度;真实度(fidelity)是每个通用服务质量属性对应的真实度,反映用户对服务属性的依赖程度。

基于 ASDM_Q 服务描述模型,遵循 XMLSchema,本文给出主体服务描述格式,如图 1 所示。

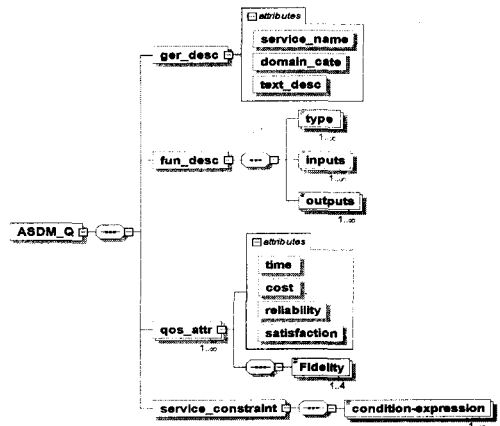


图 1 主体服务描述格式

4 支持 QoS 约束的语义主体服务匹配

4.1 相关定义

定义 3(主体服务匹配类型) 给定主体服务提供者 AS_p 和主体服务请求者 AS_r ,如果 AS_p 和 AS_r 满足在语义上完全等价,即 $AS_r = AS_p$,称为主体服务精确匹配,即 $Exact(AS_r, AS_p)$;如果满足 $AS_r \subseteq AS_p$,即 AS_p “包含” AS_r ,相对于 AS_r 来说, AS_p 能提供更多的服务, AS_r 能“插入”到 AS_p 中,称为主体服务插入匹配,即 $Plugin(AS_r, AS_p)$;如果采用数值计算主体服务请求描述与提供者描述的相似程度,称为主体服务松弛匹配,即 $Relaxed(AS_r, AS_p)$ 。

通常情况下,主体服务请求者的需求是多层次的,而且请求描述往往不完全描述。这就要求主体服务匹配应有一定的张弛能力,不仅要求返回匹配结果,还要求能返回相应的匹配程度(相似程度)。相对于主体服务精确匹配和插入匹配,主体服务松弛匹配更加实用。因此,本文考虑主体服务松弛匹配。

定义 4(主体服务的语义相似度匹配) 给定主体服务提

供者 $SAS_p = \{AS_{p1}, AS_{p2}, \dots, AS_{pn}\}$ 和主体服务请求者 AS_r , 要求获得满足语义相似度 $T_{semantic}$ 的主体服务提供者, 如式(3)所示:

$$match_{sm}(AS_r, AS_{pi}) = \lambda_1 \cdot match_{sm}^{GD}(AS_r, AS_{pi}) + \lambda_2 \cdot match_{sm}^{FD}(AS_r, AS_{pi}) \geq T_{semantic}, 1 \leq i \leq n \quad (3)$$

其中, $match_{sm}^{GD}(AS_r, AS_{pi})$ 和 $match_{sm}^{FD}(AS_r, AS_{pi})$ 分别表示主体服务通用描述和功能描述的语义相似度; λ_1 和 λ_2 分别表示通用描述的权值和功能描述的权值, 可由用户决定, 一般来说, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1, \lambda_1, \lambda_2 \in [0, 1]$ 。

定义 5 (主体服务的服务质量匹配) 给定主体服务提供者 $SAS_p = \{AS_{p1}, AS_{p2}, \dots, AS_{pk}\}$ 和主体服务请求者 AS_r , 要求获得服务质量水平最高的主体服务提供者, 如式(4)所示:

$$match_{qm}(AS_r) = \text{Max}\{QoS(AS_{pi})\}, 1 \leq i \leq k \quad (4)$$

定义 6 (主体服务匹配) 给定一组主体服务提供者 $SAS_p = \{AS_{p1}, AS_{p2}, \dots, AS_{pn}\}$ 和主体服务请求者 AS_r , 给定语义相似度 $T_{semantic}$, 要求获得满足语义相似度匹配和服务质量匹配的主体服务提供者, 即 $AS_match(AS_r, SAS_p) = match_{sm} \wedge match_{qm}$ 。

4.2 支持 QoS 约束的语义主体服务匹配算法

算法 1 支持 QoS 约束的语义主体服务匹配算法

输入: 一组主体服务提供者 $SAS_p = \{AS_{p1}, AS_{p2}, \dots, AS_{pn}\}$, 主体服务请求者 AS_r , 语义相似度 $T_{semantic}$ 。

输出: 满足语义相似度匹配和服务质量匹配的主体服务提供者 AS_p' 。

算法的主要思想是: 首先通过语义相似度匹配计算主体服务通用描述和功能描述的语义相似度, 如果总的语义相似度满足给定的相似度阈值, 则作为备选主体服务提供者; 然后, 在所有备选的主体服务提供者中, 通过服务质量匹配获得服务质量总体水平最高的一个, 最终作为满足主体服务请求描述的最佳主体服务。算法伪代码如图 2 所示。

```

ASM_SQ( $SAS_p, AS_r, T_{semantic}$ )
begin
1   $SAP_p' = \emptyset; Q_{max} = 0; m = 0;$ 
2  for  $i=1$  to  $n$  {
3     $match_{sm}^{GD}(AS_r, AS_{pi})$ 
4     $match_{sm}^{FD}(AS_r, AS_{pi})$ 
5    if  $(match_{sm}(AS_r, AS_{pi}) = \lambda_1 \cdot match_{sm}^{GD}(AS_r, AS_{pi}) + \lambda_2 \cdot match_{sm}^{FD}(AS_r, AS_{pi})) \geq T_{semantic}$  then
6       $SAS_p' = SAS_p' \cup AS_{pi};$ 
7  }
8  if  $SAS_p' \neq \emptyset$  then {
9    for  $j=1$  to  $|SAS_p'|$  {
10     if  $QoS(AS_{pj}) \geq Q_{max}, AS_{pj} \in SAS_p'$  then {
11        $Q_{max} = QoS(AS_{pj}); m = j;$ 
12     }
13   }
14    $AS_p' = AS_{pm}$ 
15   return  $AS_p';$ 
16 }
17 else return 没有符合请求的主体服务;
end

```

图 2 支持 QoS 约束的语义主体服务匹配算法的伪代码

算法 2 主体服务语义相似度匹配算法

目前用于计算概念间语义相似度的方法主要有基于几何距离、基于属性和基于信息容量的方法。通过分析这几种方

法的优劣, 将概念信息容量引入基于几何距离的方法中, 并考虑边的强度^[14], 从而综合计算主体服务语义相似度。这种方法能有效解决同等条件下的概念难以区分的缺点, 从而提高匹配效果。

假设 v_r, v_p 分别表示本体语义概念网中的两个节点, 对应请求者描述概念和提供者描述概念, 用式(5)来计算 v_r 和 v_p 概念的语义相似度:

$$\text{sim}(v_r, v_p) = 1 - \frac{1}{2 \times d_{max} - \text{Dist}(v_r, v_p)} \quad (5)$$

其中, d_{max} 表示本体的最大深度; $\text{Dist}(v_r, v_p)$ 表示两个节点间的总距离, 用式(6)计算:

$$\text{Dist}(v_r, v_p) = \sum_{v \in V} wt(v, f(v)) \quad (6)$$

其中 $V = \{path(v_r, v_p) - LSup(v_r, v_p)\}$ 。式中, $f(v)$ 表示子节点 v 的父节点; $wt(v, f(v))$ 表示连接父节点 $f(v)$ 和子节点 v 的边的总强度, $path(v_r, v_p)$ 表示节点 v_r 和 v_p 的最短路径中所有节点的集合; $LSup(v_r, v_p)$ 表示节点 v_r 和 v_p 的最近共同祖先节点。 $wt(v, f(v))$ 的具体计算过程不再赘述。

整个匹配算法分别计算主体服务通用描述和功能描述的语义相似度, 再通过式(3)获得总的语义相似度, 并和给定的相似度阈值进行比较。

算法 3 主体服务服务质量匹配算法

服务质量匹配采用简单加权法^[15] 计算每个主体服务的总体服务质量水平, 其基本思想是先通过规格化方法将原始度量指标从原来的值域线性变换到 $[0, 1]$ 区间上, 形成 QoS 规格化矩阵; 再通过各服务质量属性的权重计算总体水平。本文在其基础上, 增加每个质量属性的真实度 (fidelity) 因素, 全面、客观反映各个主体服务的服务质量性能。

步骤 1 建立规格化矩阵 M 。

将各 QoS 属性分为两类: 一类是逆向质量属性, 即属性量值越大, 服务质量越差, 例如服务时间和代价; 另一类是正向质量属性, 即属性量值越大, 说明服务质量越好, 例如可靠性和满意度。对于主体服务时间和代价 (逆向质量属性), 通过式(8)进行规格化; 对于服务的可靠性和满意度 (正向质量属性), 通过式(9)进行规格化。

$$M(i, j) = \begin{cases} \frac{Q_{max}(j) - Q(i, j)}{Q_{max}(j) - Q_{min}(j)}, & Q_{max}(j) - Q_{min}(j) \neq 0, Q_{min}(j) \leq Q(i, j) \leq Q_{max}(j) \\ 1, & Q_{max}(j) - Q_{min}(j) = 0, Q(i, j) \leq Q_{min}(j) \\ 0, & Q_{max}(j) - Q_{min}(j) = 0, Q(i, j) \geq Q_{max}(j) \end{cases} \quad j=1, 2 \quad (8)$$

$$M(i, j) = \begin{cases} \frac{Q(i, j) - Q_{max}(j)}{Q_{max}(j) - Q_{min}(j)}, & Q_{max}(j) - Q_{min}(j) \neq 0, Q_{min}(j) \leq Q(i, j) \leq Q_{max}(j) \\ 1, & Q_{max}(j) - Q_{min}(j) = 0, Q(i, j) \geq Q_{max}(j) \\ 0, & Q_{max}(j) - Q_{min}(j) = 0, Q(i, j) \leq Q_{min}(j) \end{cases} \quad j=3, 4 \quad (9)$$

(下转第 192 页)

- [6] Lawrence N D. Gaussian process models for visualization for high dimensional data. *Advances in Neural Information Processing Systems, The MIT Press*, 2004, 16: 329-336
- [7] Lawrence N D. Learning for large datasets with the Gaussian process latent variable models. *Advances in Neural Information Processing Systems, The MIT Press*, 2004, 16: 329-336
- [8] Wang J M, Fleet D J, Hertzmann A. Gaussian process dynamical models for human motion. *IEEE Trans. Pattern Recognition and machine Intelligence*, 2008, 30(2): 283-298

(上接第 125 页)

其中, $M(i, j)$ 表示规划化矩阵中主体服务 AS_{μ} 的第 j 项 QoS 属性规格化值, $Q_{\max}(j)$ 表示第 j 项 QoS 属性值中的最大值, $Q_{\min}(j)$ 表示第 j 项 QoS 属性值中的最小值, $Q(i, j)$ 表示主体服务 AS_{μ} 第 j 项 QoS 属性值。

步骤 2 通过式(10)计算各个主体的总体 QoS 水平。

$$QoS(AS_{\mu}) = \sum_{j=1}^4 (\mu_j \times M(i, j) \times fid(j)) \quad (10)$$

其中, μ_j 表示第 j 项 QoS 属性对应的权重, $0 \leq \mu_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^4 \mu_j = 1$, $fid(j)$ 表示第 j 项 QoS 属性对应的真实度, $0 \leq fid(j) \leq 1$ 。

4.3 算法分析

定理 1 支持 QoS 约束的语义主体服务匹配算法是有效的, 即该算法的返回结果能满足主体服务请求的要求。

证明: 本文提出的算法是一种松弛匹配算法, 由主体服务语义相似度匹配过程可知, 在语义相似度阈值范围内, 可以有效找到通用描述和功能描述相似语义的主体服务。服务质量匹配过程是在上述主体服务中获得总体水平最高的一个。因此, 本文算法返回结果能满足语义和服务质量要求的主体服务请求。证毕。

定理 2 支持 QoS 约束的语义主体服务匹配算法的时间复杂度是 $O(n^3)$ 。

证明: 采用 Dijkstra 最短路径算法进行几何距离计算的时间复杂度是 $O(n^2)$, 因此, 主体服务语义相似度匹配的时间复杂度是 $O(n^3)$ 。规格化矩阵计算的复杂度是 $O(4 \times |SAS_p'|)$, 其中 $|SAS_p'|$ 是满足相似度匹配的主体服务数量, 通常为常数。因此, 整个算法的时间复杂度为 $O(n^3)$ 。证毕。

结束语 本文研究了自主单元的主体服务匹配问题, 给出了自主单元主体服务描述模型。该模型能全面描述主体服务的功能语义, 客观反映主体服务的服务质量特征。在此基础上, 本文提出一种支持 QoS 约束的自主单元语义服务匹配算法。该算法首先通过语义相似度匹配, 综合计算主体服务通用描述和功能描述的语义相似度; 并在所有满足给定相似度阈值的主体服务中, 利用简单加权法思想计算每个主体的总体服务质量水平, 最终求得满足主体服务请求描述的最佳主体服务。

本文提出的主体服务匹配算法具有以下特征: (1) 综合考虑了语义和服务质量因素, 既解决了传统语法级服务描述的异构性, 提高了查准率, 又能充分体现出服务请求者对主体服务性能的不同需求, 选择出最佳服务; (2) 在语义相似度匹配中, 将概念信息容量引入基于几何距离的方法中, 并考虑边的强度, 从而综合了基于几何距离和基于信息容量两种方法的优点, 有效解决了同等条件下的概念难以区分、匹配效果不佳的缺点; (3) 提出的服务质量模型和匹配算法简单有效, 不限制 QoS 属性的类型、数量以及值的大小, 可扩展性和灵活性

- [9] Sugiyama M. Local Fisher discriminant analysis for supervised dimensionality reduction // *Proceedings in the 23rd International Conference on Machine Learning*, Pittsburgh, PA, 2006
- [10] Bishop C M, James G D. Analysis of multiphase flows using dual-energy gamma densitometry and neural networks. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, series A*, 1993, 327: 580-593
- [11] Urtasun R, Darrell T. Discriminant Gaussian process latent variable model for classification // *Proceedings in the 24th International Conference on Machine Learning*, Corvallis, OR, USA, 2007

好; (4) 在计算每个主体服务的总体服务质量水平过程中, 在简单加权和规格化思想基础上, 引入每个质量属性的真实度因素, 全面、客观反映各个主体服务的服务质量性能。

进一步的研究工作是提高服务匹配算法的效率以及在模糊条件下的主体服务匹配。

参考文献

- [1] Kephart J, Chess D. The Vision of Autonomic Computing [J]. *IEEE Computer Society*, 2003, 1: 41-59
- [2] Gerald T, David M C, William E, et al. A Multi-agent Systems Approach to Autonomic Computing [C] // *Proceedings of AAMAS'04*, New York, USA, July 2004
- [3] Tom D W, Tom H. Towards Autonomic Computing: Agent-based Modeling, Dynamical Systems Analysis, and Decentralized Control [J] // *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 2003, 470-479
- [4] 张海俊. 基于主体的自主计算研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005
- [5] 廖备水. 基于 PDC-Agent 的面向服务的自治计算研究 [D]. 杭州: 浙江大学计算机学院, 2006
- [6] 胡军. 面向自治计算的基于政策的多 agent 协同体系研究 [D]. 杭州: 浙江大学计算机学院, 2006
- [7] Wickler G J. Using expressive and flexible action representations to reason about capabilities for intelligent agent cooperation [D]. Edinburgh, U K; University of Edinburgh, 1999
- [8] Sycara K, Widoff S, Klusch M, et al. LARKS: dynamic match-making among heterogenous software agents in cyberspace [J]. *Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, 2002, 5 (2): 173-203
- [9] Arisha K, Kraus S, Ozcan F, et al. IMPACT: the interactive Maryland platform for agents collaborating together [J]. *IEEE Intelligent Systems*, 1999, 14 (2): 64-72
- [10] 蒋运承, 史忠植. QoS 驱动的主体服务匹配 [J]. *小型微型计算机系统*, 2005, 26(4): 687-692
- [11] 史忠植, 蒋运承, 张海俊, 等. 基于描述逻辑的主体服务匹配 [J]. *计算机学报*, 2004, 27(5): 625-635
- [12] 胡军, 高济, 李长云. 多主体系统中基于本体论的服务相容匹配机制 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, 18(5): 694-701
- [13] Hu J, Gao J, Zhou B, et al. Ontology based agent services compatible matchmaking mechanism [C] // *Proceedings of the 3rd International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Shanghai, 2004, 111-116
- [14] 裘江南, 仲秋雁, 崔彦. 服务匹配模型中综合语义匹配方法研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2007, 47(6): 914-919
- [15] Zeng L Z, Benatallah B, et al. QoS-aware middleware for web services composition [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2004, 30(5): 311-327