

# 基于本体和多 Agent 的个性化主动服务模型

苏正炼 严 骏 朱 亮 钱海波

(解放军理工大学工程兵工程学院 南京 210007)

**摘 要** 为了突破传统主动服务模型的性能瓶颈,更好地为用户提供满足个性化需求的服务,基于领域本体建立并维护了本体用户个性模型,提出了基于本体和多 Agent 的个性化主动服务模型,分析了模型的运行过程,详细描述了模型中各部分功能。在详细分析模型运行的关键技术之后,阐明了模型的推与拉协作运行机制,实现了用户感兴趣信息的主动推送和用户个性需求的快速检索。最后,基于模型思想的原型系统的实验结果表明,模型能有效提高服务的性能。

**关键词** 本体, Agent, 个性化服务, 主动服务, 用户个性模型

**中图分类号** TP311 **文献标识码** A

## Personalized Active Service Model Based on Ontology and Multi-Agents

SU Zheng-lian YAN Jun ZHU Liang QIAN Hai-bo

(Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract** In order to break through performance bottlenecks of traditional active service model, and offer better service to satisfy users' personalized service request, firstly, ontological user personalized model was established based on domain ontology, and personalized active service model based on ontology and multi-agents was proposed in this paper. Afterwards, we analysed the running process of the model, described the function of each part in the model in detail. Based on the analysis of the key technologies of model running, we expatiated the collaborative operational mechanism of Push and Pull. In the end, the experimental results of the prototype system based on our model indicate that the service performance can be improved effectively.

**Keywords** Ontology, Agent, Personalized service, Active service, User personalized model

## 1 引言

随着 Internet 技术的飞速发展,网络信息资源正呈几何级数增长。如何在信息海洋里方便、迅速、准确地获取所需信息,成了用户当前普遍关注的问题<sup>[1]</sup>。面对网络信息服务的现状,一种将用户感兴趣的信息主动推荐给用户的 service 方式,即个性化的主动信息服务应运而生<sup>[2]</sup>。智能 Agent<sup>[3]</sup>是一种具有智能的实体,采用 Agent 技术可将一个静态的系统转变成一个有效的由用户驱动的动态信息平台。多个智能 Agent 在逻辑上彼此相互独立,在工作中通过共享知识、任务和中间结果协同形成问题的解决方案,被广泛用于个性化信息服务系统中。徐小龙等<sup>[4]</sup>提出了基于智能 Agent 的科技文献协作推送模型,其通过引入由智能 Agent 技术构建的多 Agent 系统,联合为每个用户主动提供最符合其需求的科技文献。王艳侠等<sup>[5]</sup>提出了基于案例推理及多属性决策的推荐模型,其应用多 Agent 技术实现了智能交互、搜索、决策、推荐等功能。Vedran 等<sup>[6]</sup>提出了在电子商务领域中基于多 Agent 的个性

化服务框架,使用户能够选择最合适的服务提供者。这些研究成果中,基于传统关键词建立的用户模型难以精确描述用户的个性特征和需求,服务质量受到制约。

个性化主动服务的核心是建立合理的用户模型。本体以其丰富的语义含义和关系描述,能够更加精确地刻画用户兴趣偏好,更为准确地描述服务信息。本文将本体和多 Agent 技术结合起来,改进传统的主动服务模型,提出了基于本体和多 Agent 的个性化主动服务模型;利用 Agent 的自主性与智能性,建立并维护用户个性信息,建立本体用户模型;详细描述了模型中各部分功能、关键技术和推拉协作运行机制;最后基于模型思想建立了原型系统并进行了初步应用。

## 2 个性化主动服务模型

### 2.1 模型框架

个性化主动服务是以用户需求、兴趣爱好、检索策略等为依据,通过服务的主动发现、定制、加载与使用机制,一方面使用户能够根据特定需求选择合适的服务,另一方面将用

到稿日期:2011-07-06 返修日期:2011-10-17 本文受总装预研基金(531006040157),理工大学青年基金(QN20100311)资助。

苏正炼(1984-),男,博士生,主要研究方向为装备保障信息化技术, E-mail: sujy1984@yahoo. cn; 严 骏(1962-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为装备管理与运用、装备保障信息化技术;朱 亮(1983-),男,博士生,主要研究方向为装备保障智能决策技术;钱海波(1981-),男,博士生,主要研究方向为装备保障信息集成技术。

户感兴趣的服务主动提交给用户。多个 Agent 以一种松散耦合的 Agent 网络(Multi-Agent System, MAS)出现,相互之间通过结构化的 ACL(Agent Communication Language)进行交互、协作,完成某一任务。传统的主动服务模型中,ASB 相对集中,难以维护海量的用户个性化信息,而且面对海量的服务需求,同时承担着用户需求描述、服务挖掘和服务组合的 3 大重任,存在严重的性能瓶颈。本文提出的基于本体和多 Agent 的个性化主动服务模型,是在传统的主动服务模型<sup>[7]</sup>基础上引入个性化服务 Agent 集(Personalized Service Multi-Agents, PSMA),其作用是全面接管服务使用者角色,为主动服务中介(Active Service Broker, ASB)减负,并针对服务使用者实现个性化服务。模型框架如图 1 所示。

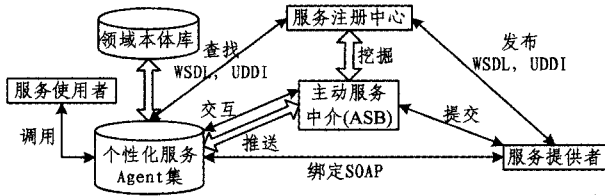


图 1 基于本体和多 Agent 的个性化主动服务模型

## 2.2 模型的运行过程

模型中 PSMA 与 ASB 按照任务分工,相互协作地完成个性化主动服务。其主要运行过程为:1)用户提出服务请求后,模型首先试图调用 PSMA 中现有的服务组合案例来满足用户需求,如果现有的组合案例资源库中有这样的服务,则直接调用现有服务;2)如果不存在,则调用 PSMA 中的服务资源进行服务定制,如果定制成功,则返回定制服务;3)如果定制不成功,PSMA 就与 ASB 交互,请求 ASB 挖掘现有注册服务,并组合出满足需求的服务;4)当服务注册中心有新的服务注册或旧的服务注销时,ASB 主动将更新服务推送到 PSMA,经过滤后存储到相应的个性化服务资源库中。在上述过程中,领域本体库所包含的概念以及概念间的语义关系是所有动作的基础。ASB 主要负责深度挖掘 Web 服务资源,并将服务资源的更新主动推送到相关的 PSMA。“挖掘”和“推送”采用粗箭头,表示它们是 ASB 常用的、重要的工作。与此相配合,PSMA 一方面根据用户的个性模型过滤从 ASB 主动推送过来的服务资源,另一方面承担绝大部分的针对服务使用者的用户需求辨识、服务挖掘和服务组合任务,以满足个性化服务需求。

在基于本体和多 Agent 的个性化主动服务模型中,ASB 相对集中,主要追求服务资源挖掘的查全率;PSMA 中的各个 Agent 则是分布式的,可以存在于 Web 网络的任一服务器中,也可与 ASB 存在于同一个服务器中,主要追求服务资源挖掘的查准率。这样,新模型将能在绝大部分情况下给服务使用者提供非常快速、准确和高质量的个性化服务,有效减轻 ASB 的工作量,消除性能瓶颈,提高服务效率。

## 3 模型各部分功能

### 3.1 个性化服务 Agent 集(PSMA)

PSMA 是基于本体和多 Agent 的个性化主动服务模型

中实现个性化服务的关键,承担大部分给用户提供服务的工作,其 4 个基本库和 5 种 Agent 相互独立而又相互合作,在领域本体的支持下共同完成服务任务,结构如图 2 所示。

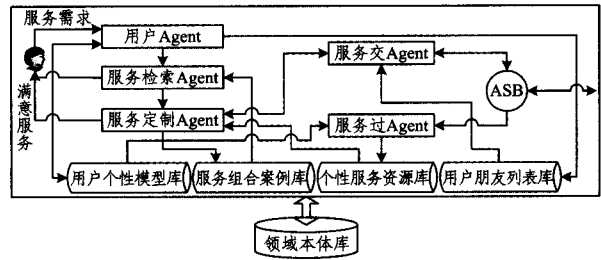


图 2 个性化服务 Agent 集的结构

下面具体介绍各个基本库及 Agent 的组成和功能。

### 3.2 5 种 Agent

(1)用户 Agent:对用户输入的服务请求进行用户需求辨识,生成请求服务,送给服务检索 Agent,并根据用户的服务请求更新用户个性模型库和用户朋友列表库。

(2)服务检索 Agent:对用户 Agent 送过来的请求服务,先从服务组合案例库中检索匹配服务。若匹配成功,则返回该组合案例;若没有匹配成功,则将该请求服务送给服务定制 Agent。

(3)服务定制 Agent:对服务检索 Agent 送过来的请求服务,从个性服务资源库中发现服务,然后对匹配出的服务进行服务组合,生成定制服务。若定制成功,则返回该定制服务,并更新服务组合案例库;若定制不成功,则将服务请求送给服务交互 Agent。

(4)服务交互 Agent:接收从服务定制 Agent 送过来的服务请求,从用户朋友列表库的朋友用户个性服务资源库中定制满足需求的服务。若定制成功,则返回定制服务,并更新用户朋友列表库和服务组合案例库;若不成功,则将服务请求发送给 ASB,请求 ASB 从服务注册中心的所有服务中匹配组合出满足需求的服务。

(5)服务过滤 Agent:当服务注册中心的服务注册情况发生改变时,ASB 主动将更新的服务资源服务过滤 Agent,根据用户个性模型库中的个性信息进行服务过滤,将更新服务选择性地存储到相关用户的个性服务资源库中。

### 3.3 4 个基本库

(1)用户个性模型库(User Personalized Model Library, UPML):记录不同用户的个性模型,以便收集不同用户的个性服务资源,是实现精准的个性化主动服务的基础和核心。

用户模型反映了某个领域内用户对不同主题的不同兴趣程度。本体给用户兴趣描述所需的各种上下文和内容资源提供了规范的概念模型和语义关系,有利于实现知识共享和逻辑推理,因而建立基于领域本体的本体用户模型能够精确地描述用户兴趣以及兴趣之间的关系,便于过滤用户个性资源和选择用户朋友列表。本文提出如下的本体用户模型(Ontological User Model, OUM),形式化表示为

$$OUM = \{PI, C, D, S\} \quad (1)$$

式中,PI 表示用户个人信息,包含本体用户模型的标识,用于

用户登录后获取本体用户模型;  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  表示领域本体中用户感兴趣的概念集合;  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  表示用户对集合  $C$  中所有概念的兴趣度集合;  $S = [S_{ij}]_{n \times n}$  表示集合  $C$  中所有两两概念之间的语义相似度, 元素  $S_{ij}$  表示概念  $C_i$  与  $C_j$  之间的语义相似度, 可以根据领域本体中概念的层次结构按照文献[8]的方法求出。

当用户输入服务请求后, 用户 Agent 对用户请求进行辨识, 根据领域本体知识确定用户感兴趣的概念, 相应的兴趣度加 1。然后按照激活扩散理论[9], 更新模型中其它概念的兴趣度。最后标准化全部概念的兴趣度, 完成用户模型的更新。这样, 本体用户模型能够不断学习用户需求的变化, 从而精确描述用户长期和短期的兴趣偏好。

(2) 个性服务资源库 (Personal Service Resource Library, PSRL): 存储用户感兴趣的服务列表, 包括用户信息和服务信息, 方便进行快速的服务检索和服务定制。每个个性服务资源可形式化描述为

$$PSR = \{PI, BI\}$$

式中,  $PI$  表示用户个人信息, 用于获取本体用户模型;  $BI$  表示服务基本信息, 用于从服务提供者获取具体的服务。

(3) 服务组合案例库 (Service Composition Case Library, SCCL): 存储成功解决用户需求的服务组合案例的集合, 包括用户服务需求和所需服务集合, 每个服务组合案例可形式化描述为

$$SCC = \{RS, S\}$$

式中,  $RS$  (Request Service) 表示请求服务, 具体形式在下一节描述;  $S$  表示解决请求服务所需的服务集合, 按照服务组合顺序排列。

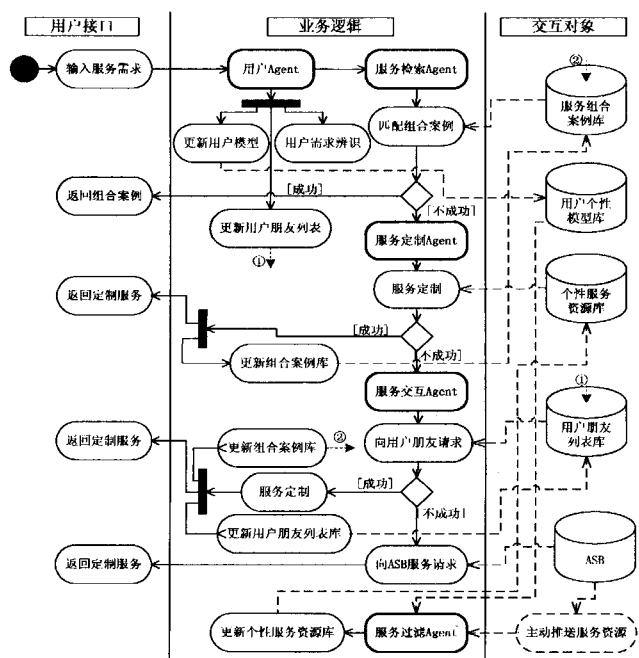


图 3 个性化服务 Agent 集的活动图

(4) 用户朋友列表库 (User  $k$ -Nearest Neighbors Library, UNNL): 存储用户的  $k$  最邻近朋友用户群的集合, 包括与每个朋友用户的相似度。每个用户朋友列表可形式化描述为

$$UNN = \{U, S\}$$

式中,  $U$  表示朋友集合,  $S$  表示与  $U$  中每个朋友的相似度集合。

模型运行过程中, 基于模型实现的业务逻辑、各个基本库与 Agent 之间的交互活动如图 3 所示。

## 4 模型运行机制

### 4.1 模型运行的关键技术

#### 4.1.1 服务表示

在本模型中, 对服务进行良好、有效的表示, 是进行服务检索、服务定制、服务过滤和个性化服务的基础。用户提出服务需求后, 用户 Agent 生成请求服务 (Request Service, RS), 而服务提供者向服务注册中心提交服务注册后, 生成广告服务 (Advertise Service, AS)。这两类都可以形式化表述为

$$S = \{K, F, N\}$$

其中,  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  为服务的关键字列表, 由领域本体中的相关概念组成, 表示服务涉及的相关领域;  $F = \{f_{pre}, f_{ass}, f_{post}, f_{eff}\}$  表示服务的功能信息;  $f_{pre}, f_{ass}, f_{post}, f_{eff}$  分别是 WSMO 规范中描述服务能力的 Precondition, Assumption, Postcondition 和 Effects;  $N = \{QoS, Time, \dots\}$  表示服务的非功能信息, 比如服务质量 QoS、服务时间 Time 等信息。

#### 4.1.2 服务检索

服务检索是指用户输入服务需求后, 由用户 Agent 生成请求服务  $RS_u$ , 并与服务组合案例库中每个组合案例所包含的请求服务  $RS_c$  进行服务匹配, 找出满足需求的组合案例。本文提出 3 阶段匹配算法: 1) 基于关键词的服务范围匹配。服务的关键词反映了服务所对应的领域范围, 对描述请求服务  $RS_u$  的  $K_u$  和组合案例  $RS_c$  的  $K_c$  进行相似度计算。如果结果大于规定的阈值, 则该组合案例进入下一阶段的候选组合案例子集。2) 基于服务描述的服务功能匹配。对  $RS_u$  的  $F_u$  和组合案例  $RS_c$  的  $F_c$  进行相似度计算[10], 得到每个组合案例的匹配度。如果匹配度大于设定的阈值, 则该组合案例进入下一阶段的候选组合案例子集。3) 基于非功能信息的服务选择。对于候选服务子集, 按照服务功能匹配度和非功能信息进行综合选择。如果存在满足需求的组合案例, 则返回该组合案例。具体算法描述如下:

#### 算法 1 服务检索算法

输入: 请求服务 RS

服务组合案例库 SCCL

输出: 服务组合案例  $S_R$

$S_R = \Phi$ ; // 初始化返回案例

Candidates1 =  $\Phi$ ; // 初始化候选组合案例子集 1

Candidates2 =  $\Phi$ ; // 初始化候选组合案例子集 2

// Step1, 基于关键词的服务范围匹配

foreach SCC in SCCL do // 对库中的每一个组合案例

if (similarity(RS, K, SCC, K) > threshold) then

// 相似度大于阈值

Candidates1.Add(SCC); // 添加到候选子集 1

end if

```

end
//Step2:基于服务描述的服务功能匹配
foreach SCC in Candidates1 do
  if(serviceMatch(RS, F, SCC, F)>threshold) then
    //服务匹配度大于阈值,serviceMatch 返回匹配度
    Candidates2. Add(SCC); //添加到候选子集 2
  end if
end
//Step3:基于非功能信息的服务选择
Candidates2. Order(); //按匹配度降序排列
foreach SCC in Candidates2 do
  if(nonfunctionSatisfy(RS, N, SCC, N)>0) then
    //服务非功能信息的满意度大于 0
    SR = SCC; //获取满足需求的服务组合案例
    break;
  end if
end
return SR; //返回服务检索结果

```

#### 4.1.3 服务定制

在服务检索未能获取到满意的案例组合时,服务定制包括两个步骤:1)根据请求服务 RS,从服务个性资源库中发现和挖掘与请求服务相近或匹配的服务资源。服务个性资源存储的是广告服务 AS,进行服务发现和挖掘就是将 AS 与 RS 进行服务匹配,可运用服务检索中提出的 3 阶段匹配算法进行计算。2)找到相近或相似的服务资源后,对其装配或组合,生成定制服务,提供给用户。在服务定制过程中装配合适的服务,就是要求服务在一定程度上进行组合来满足服务需求者的要求和保证服务质量,可用基于 BPEL 的服务组合方式<sup>[11]</sup>来实现服务定制。

#### 4.1.4 服务交互

当服务定制无法定制出满意的服务时,请求服务被送到服务交互 Agent 进行服务交互。交互过程包括:1)根据用户需求产生的请求服务,从用户朋友的个性服务资源中产生定制服务,这一过程遵从上述的服务定制过程;2)如果从用户朋友的个性服务资源中还不能定制成功,则将请求服务发送到 ASB,从服务注册中心的所有服务中进行服务匹配和组合,返回关于匹配度大小的 top-N 服务组合列表,以便用户从中选择需要的服务。

#### 4.1.5 服务过滤

当新服务注册或旧服务注销后,ASB 向服务过滤 Agent 主动推送更新的服务资源。服务过滤就是将这些更新的广告服务 AS 选择性更新到可能感兴趣的用户的个性服务资源库中,以便定制服务。过滤的过程就是将 AS 的 K 与用户模型的 C 进行相似度匹配的过程。匹配算法的过程可以参照服务检索的关键词相似度计算过程。当计算出的相似度大于某一设定的阈值时,该服务就更新到该用户的个性服务资源库中。

#### 4.1.6 选择朋友用户

在进行服务交互时,需要从用户朋友中获取个性服务资源,因此需要维护每个用户一定数量的朋友用户。从式(1)的

用户模型可以看出,用户偏好由用户对基于领域本体的相关概念的兴趣度大小来表示,因此两个用户之间的相似度可以由用户模型的概念兴趣度的向量相似度来计算<sup>[12]</sup>。根据计算出的相似度大小,选择 top-N 用户作为用户的朋友用户,并维护与每个用户的相似度大小。

## 4.2 推运行机制

“推”是指 ASB 感知到服务注册中心有新的服务资源注册或旧的服务资源注销时,主动地将这些发生变化的服务推送到服务过滤 Agent,过滤后更新到相关的个性服务资源 PSR 的过程。

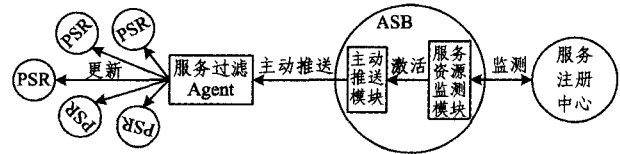


图 4 主动推送机制

“推”的具体流程如图 4 所示。1)当 ASB 监测到服务注册中心的服务资源有更新时,激活主动推送模块,提交更新的服务资源信息;2)主动推送模块将更新的服务资源推送到服务过滤 Agent;3)如果是新服务注册,在服务过滤时,若匹配相似度大于一定阈值,将其存储到相关的 PSR;4)如果是旧服务注销,在服务过滤时,若匹配度为 1(完全匹配),删除相关 PSR 中的该注销服务。

采用主动推送机制,使得用户感兴趣的服务资源被有效地存储到了个性服务资源,便于在服务定制时方便、快速、高效地定制服务,这样在用户不知不觉中提高个性化服务的质量。

## 4.3 拉运行机制

“拉”是指当服务定制 Agent 无法成功定制服务来满足用户需求时,服务交互 Agent 从用户朋友列表 CNN 或 ASB 寻求解决方案的过程。具体为:1)当服务定制 Agent 无法定制服务来满足用户需求时,将请求服务送给服务交互 Agent;2)服务交互 Agent 遍历用户朋友列表中的朋友用户,得到按相似度大小排序的朋友用户;3)按相似度大小依次对请求服务进行服务定制,如果定制成功,则返回该定制服务;4)将定制服务更新到服务组合案例库,并将与该朋友用户的相似度增加一预定值 d;5)如果基于用户朋友中的所有个性服务资源都无法定制出满足用户需求的服务,则向 ASB 发送服务请求,以生成按匹配度排序的、满足请求服务的列表供用户选择。

在用户自身的个性服务资源无法满足需求的情况下,采用这种协同求解机制可快速搜索网域中其它朋友用户提供的个性服务,迅速高效地实现查准率,而且可通过请求 ASB 得到提供的所有服务来实现查全率。

## 5 原型系统及性能分析

应用本文提出的模型思想,设计开发了基于电影领域本体和多 Agent 的个性化电影主动服务模型的实验原型系统。该原型系统采用 B/S 结构,运用 Java 和 Eclipse 工具开发,选用 SQL Server 2008 作为存储数据库,采用 IKV++ 的

Grasshopper<sup>[13]</sup>构建系统的各个 Agent,电影领域本体采用已有的电影本体<sup>[14]</sup>。

实验过程中,系统对 236 个注册用户使用 968 部电影服务进行个性化主动服务,分别测试服务检索和主动推送性能。服务检索性能主要通过查全率和查准率两个指标进行刻画;主动推送性能主要通过推送多样性来评价,即对任意两个用户,计算系统推荐的 20 个电影服务中不相同服务的数量,其除以 20 得到每两个用户之间的推送多样性,最后计算所有两两用户多样性的均值。实验结果如图 5 所示。

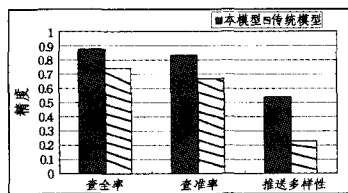


图 5 实验结果对比图

从实验结果可以得到:①针对服务检索,本模型的服务查全率和查准率与传统的主动服务结果相比有明显的提高,检索服务质量明显提升;②针对主动推送,本模型的推送多样性比传统服务的两倍还高,说明模型对个性化服务的质量有显著提升。

**结束语** Web 服务的前进方向就是提供智能的主动服务和个性化服务。本文针对经典主动服务模型的缺陷,提出了基于本体和多 Agent 的个性化主动服务模型,引入领域本体和个性化 Agent 集,在推与拉的协作运行机制下,力图给用户方便快捷的个性化主动服务。原型系统的实验结果表明,本模型能够提供良好的服务性能。在下一步的研究工作中,将重点对模型运行中的服务定制算法做进一步研究,并进行更多的性能测试。

## 参 考 文 献

[1] Gauch S, Chaffee J, Pretschner A. Ontology-based personalized search and browsing[J]. Web Intelligence and Agent System,

2003, 1(3/4):219-234

[2] 李家清. 个性化信息服务方式与策略研究[J]. 现代情报, 2006, 9: 45-48

[3] 王汝传, 徐小龙, 黄海平. 智能 Agent 及其在信息网络中应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006

[4] 徐小龙, 赵昌耀, 耿卫健, 等. 一种基于智能 Agent 的科技文献快速协作推送机制[J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 249-253

[5] 王艳侠, 董东, 康振科. 基于 CBR 和 MADM 的多 Agent 推荐系统[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(1): 157-161

[6] Vedran P, Maja M, Ignac L, et al. Agent-based framework for personalized service provisioning in converged IP Networks[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2009, 59(07): 83-94

[7] 张尧学, 方存好. 主动服务: 概念、结构与实现[M]. 北京: 科学出版社, 2005

[8] Ganesan P, Garcua-molina H, Widom J. Exploiting hierarchical domain structure to compute similarity[J]. ACM Transaction on System, 2003, 21(1): 64-93

[9] Anderson J R. A spreading activation theory of memory[J]. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 1983, 22: 261-295

[10] 陈文字, 张忠全, 向涛, 等. 基于相似度的语义 Web 服务发现技术研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(6): 896-899

[11] Dong Wen-li, Hu Jian-hua. Test Method for BEPL-Based Web Service Composition Based on Data Flow Analysis[J]. Journal of Software, 2009, 20(8): 2102-2112

[12] 余正涛, 宋丽哲, 樊孝忠. 基于本体的个性化领域信息服务[J]. 计算机工程, 2005, 31(5): 22-24

[13] IKV +. Grasshopper[EB/OL]. <http://www.Grasshopper.de/>, 2010-01-16

[14] Yevs R, Samer A, Mark S, et al. The Music Ontology[C]//Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval(ICMIR). 2007

(上接第 128 页)

[2] Plasil F, Visnovsky S. Behavior Protocols for Software Components[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2002, 28(11): 1056-1076

[3] 贾仰理, 张振领, 李舟军. 构件行为协议实时性扩展及相容性验证[J]. 计算机科学, 2010, 37(10): 143-1147

[4] Reed G M, Roscoe A W. A timed model for communicating sequential processes[J]. Lecture Notes in Computer Science Automata Languages and Programming, 1986, 22(6): 314-32

[5] He Ji-feng. From CSP to Hybrid Systems[C]//Roscoe A W, ed. A Classical Mind, Essays in Honour of C. A. R. Hoare, International Series in Computer Science. Prentice Hall, 1994: 171-189

[6] Bergstra J A, Middleburg C A. Process algebra for Hybrid Systems[J]. Theor. Comput. Sci., 2005, 335(2/3): 215-280

[7] Alur R, Dill D L. A theory of timed automata[J]. Theory Computer Science, 1994, 12(6): 183-235

[8] Kaynar D K, Lynch N, Segala R, et al. The Theory of Timed 1/

O Automata[R]. Cambridge MA: MIT Laboratory for Computer Science, November 2004

[9] Lynch N, Segala R, Vaandrager F. Hybrid I/O automata[J]. Information and Computation, 2003, 185(1): 105-157

[10] Thacker R A, Jones K R, Myers C J, et al. Automatic Abstraction for Verification of Cyber-physical Systems[C]//Proc of IC-CPS 10. 2010: 12-21

[11] 李晓山, 周巢尘. 时段演算综述[J]. 计算机学报, 1994, 17(11): 842-850

[12] 郭亮, 唐稚松. 基于 XYZ/E 描述和验证容错系统[J]. 软件学报, 2002, 13(5): 913-920

[13] Wang Han-bo, Zhou Xing-she, Dong Yun-wei, et al. Modeling timing behavior for cyber-physical systems[C]//Proc of Int Conf on Computational Intelligence and Software Engineering. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 1-4

[14] 陈波. 基于软件体系结构的构件模型和语言研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007