

基于本体的服务推荐及其衡量标准*

杨志, 吴步丹⁺, 陈俊亮

(网络与交换国家重点实验室(北京邮电大学),北京 100876)

Ontology-Based Service Recommendation and Its Measure Standard

YANG Zhi, WU Bu-Dan⁺, CHEN Jun-Liang

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications), Beijing 100876, China)

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

Yang Z, Wu BD, Chen JL. Ontology-Based service recommendation and its measure standard. *Journal of Software*, 2011,22(Suppl.(2)):52-62. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11026.htm>

Abstract: Web Service is becoming the next generation of web-based application. With enhancement of quality of services and increasing quantity of services, how to recommend the suitable services according to personalized requirement becomes an urgent question. In the existing approaches of service recommendation, the result of service recommendation is the service list in which there is not evaluation standard that can be used to distinguish services with high relevancy or low relevancy. Therefore, in the real-world, users may obtain low relative services. To address the aforementioned problems, in this paper, membership function is analyzed and recommendation measure standard is proposed. With dynamic programming theory, an ontology-based approach of service recommendation is provided. In the result of service recommendation, membership as measure index is used to divide high relative services and low relative services. High relative services are recommended to the user, so the recommended services are accurate and available.

Key words: service discovery process and methodology; dynamic programming; service recommendation standard; ontology; service recommendation approach

摘要: Web 服务正逐渐成为下一代基于 Web 的应用程序开发的核心.随着服务质量的提高和数量的增加,如何按照个性化需求推荐合适的服务成为一个亟急需解决的问题.现有的服务推荐方法关注的是如何根据用户的需求推荐服务,至于被推荐的服务如何,能否满足用户潜在的需求等问题没有进一步处理;另外,在服务推荐结果列表中,没有衡量标准来区分相关度高低的.为了解决上述问题,分析了服务的隶属度函数,提出了一种推荐服务的衡量标准.利用动态规划思想,提出了一种基于本体的服务推荐方法.在服务推荐的结果中,隶属度作为衡量指标在服务推荐结果中区分相关度高低的.在备选的推荐服务列表中,只有相关度高的服务推荐给用户,非相关度高的服务不会推荐给用户.验证结果显示,推荐的服务是有效的和准确的.

关键词: 服务发现过程和方法;动态规划;服务推荐标准;本体;服务推荐方法

* 基金项目: 国家自然科学基金(61003067, 61132001); 国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB302704); 科技重大专项课题(2011ZX03002-002-01)

收稿时间: 2011-05-02; 定稿时间: 2011-11-07

Web 服务是分布式系统的实现模式之一,它正逐渐成为下一代基于 Web 的应用程序开发的核心.可用的 Web 服务描述和发布后,它们可以被其他应用程序发现和组合来创造新的增值系统^[1].这些 Web 服务非常方便地按照用户的需求实现基于 Web 服务的软件动态组合^[2].因此它们越来越普及和被广大用户所接受^[3].当前随着服务功能的提高和服务数量的增加,如何按照个性化需求推荐合适的服务成为了一个迫切需要解决的问题.

服务推荐现有的方法主要分两类.一类是基于语法和语义信息的,比如文献[4-6].这类方法的基本原理是利用功能、上下文信息、QoS(quality of service)或者用户偏好等信息来推荐相关的服务.这类方法主要依靠语法和语义信息,通过对这些信息内在联系的挖掘来获取用户潜在的需求,从而进行推荐相应的服务.另外一类是基于本体的,比如文献[7-10].它的基本原理是利用逻辑关系或者本体推理来推荐服务.这类方法借助于第三方技术——本体,用本体来描述概念和概念之间的关联关系.在本体中通过推理发现用户潜在的需求,然后根据这些需求进行服务推荐.由于语义信息可准确反映出用户的需求,我们可以借助于本体技术从用户需求中获取比第 1 类方法更多的信息.因此,第 2 类方法在智能服务推荐方法中更加有效.

上面两类方法主要关注的是如何根据用户的需求推荐服务,其目的就是根据用户的需求推荐一些相关服务.至于被推荐的服务如何,能否满足用户潜在的需求等问题没有进一步处理,这样容易造成相关度高的服务服务和相关度低的服务一起推荐给了用户.另外,在服务推荐结果列表中,没有衡量标准来区分相关度高低的的服务.在现实社会中,用户不想得到相关度低的服务,在没有相关度高的服务时,也不想得到相关度低的服务.如果没有区分,都推荐给用户,则很容易让用户意识到服务推荐方法可用性低,效果差,这样推荐方法也就失去了实际意义.因此制定一种衡量标准是当前需要解决的问题之一.

为了解决上述问题,在本文中,首先分析了服务的隶属度函数(service membership function,简称 SMF),并在此基础上提出了一种衡量相关度高低的的标准.该标准由两个公式组成,一个公式分析服务属于相关度高集合(high correlation set,简称 HCS)的程度,另一个公式根据阈值判断这个服务是否属于 HCS.其次,利用动态规划思想,提出了一种基于本体的服务推荐方法.在这种方法中,隶属度作为衡量指标在服务推荐结果中区分相关度高低的的服务.在备选的推荐服务列表中,只有相关度高的服务推荐给用户,非相关度高的服务不会推荐给用户.验证结果显示,推荐的服务是有效的和准确的.

本文第 1 节分析动态规划的思想,并提出服务推荐衡量标准.第 2 节提出服务推荐算法.第 3 节利用实验验证该方法.第 4 节对本文进行总结.

1 动态规划理论和服务推荐标准

1.1 动态规划理论

动态规划,也称为过程优化,是一种解决最优化的理论^[11].这个理论早期主要用在有限状态的路径规划中.它的优点是理论上保证全局最优结果.

目前随着动态规划的广泛研究,其应用范围越来越广泛,比如工程、运筹学、经济学等领域都有应用.它针对非线性动态随机系统提供最优的解决方案^[12].动态规划是系统的过程,应用在需多步解决的问题中,在这个过程中,需要系统评价大量的可能结果,然后选择最优的方法^[13].

过程优化策略的特点是不管原始状态和策略是什么,随后的决策构成最优的策略.动态规划的基本方程用数学语言描述如下所示:

$$f_k(s_k) = \text{opt}[d_k(s_k, U_k) + f_{k+1}(s_{k+1})] (k = n, n-1, \dots, 1), f_{k+1}(s_{k+1}) = 0.$$

上式中, opt 可以被 max 或者 min 替换. s_k 表示从原始位置到最终位置的最短路径上的点.

定理 1(最优原则). 在多步最优策略中, $U(i) (i = 0, 1, 2, \dots)$ 表示在第 i 步中, $U(i)$ 是最优策略.如果 N 步的 $U(0), U(1), \dots, U(N-1)$ 是最优的,那么具有 $N-1$ 步的 $U(1), U(2), \dots, U(N-1)$ 也是最优的.系统初始状态是 $X(1) = f(X(0), U(0))$.

解决动态规划问题的思路是把多步过程转变成一系列的单步过程.利用相邻两步的关系,一个个地获得单步解决方法.最后获得全局最优的解决方法.例如,图 1 表示一个动态规划的过程.

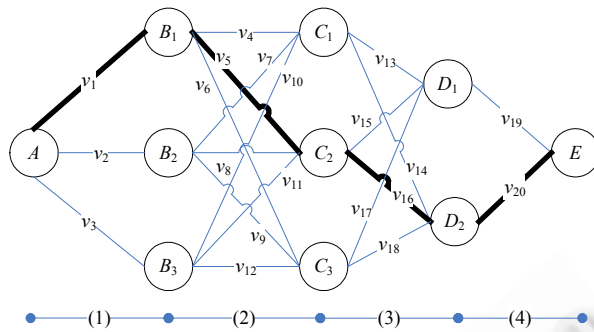


Fig.1 Process of dynamic programming

图 1 动态规划的过程

从图 1 中我们可以看到,整个过程被分成了 4 步.其中,最优路径如黑线所示,最佳路径为 $(V_1, V_5, V_{16}, V_{20})$.

本文利用这个动态规划的理论,提出了一种基于本体的服务推荐方法.这种方法主要有两个步骤:服务选择和服务推荐.每一步都有最优的策略.但是整体最优策略并不是简单地每步最优策略的累加,而是需要系统考虑全局最优.

1.2 服务推荐标准

一般来说,服务推荐的结果,即服务列表是按照一定的相似度排列的,在这个列表中既有相关度高的服务也有相关度低的服务.

相关度高低是一个不确定的、模糊的范围.这个范围没有明确的界限,因此说相关度高低是模糊集合.其中 HCS 集合是我们关注的.这里,我们利用下面的 SMF 函数来处理这个模糊的集合.

$$A(u_i) = S(x; a, \alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{1}{1 + \alpha(x - a)^{-\beta}}, & x > a \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $\alpha > 0, \beta > 0$. x 表示相似度值,这个值是实际中测量得到的服务的相似度的数值. a 表示初始条件,即用户认为相关度高的一个程度. α 和 β 是两个参数,可以根据实际情况确定其值.通过这个公式,我们可以得到每个服务属于 HCS 的概率.每个服务都是按照一定的概率属于 HCS.为了明确服务是否属于 HCS,我们利用下面的公式来计算.

$$A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq b \\ 1, & x > b \end{cases} \quad (2)$$

上式中, b 是阈值.若 $A(x) = 1$, 则 x 这个元素属于 HCS 集合;否则,它不在这个集合中.这个公式的含义如图 2 所示.

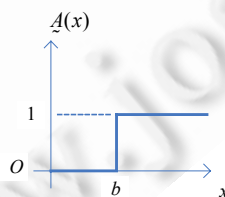


Fig.2 Schematic diagram of membership relation

图 2 隶属关系的示意图

从图 2 中我们可以看出, b 是阈值.当 $x > b$ 时, $A(x) = 1$, 否则其值为 0.

为了明确服务推荐列表中的每个元素的隶属关系,我们利用上面的公式来计算相关的值.所有的满足条件 $A(x) = 1$ 的服务构成服务的 HCS,也就是推荐的服务集合.

2 基于本体的服务推荐方法

基于以前的工作^[14],提出了一种基于本体的服务推荐方法.利用之前的工作,首先得到服务选择的服务集合.接着利用本体推理,得到相关的服务.计算服务的相似度之后,得到服务推荐的备选服务.最后利用 SMF,可以得到推荐给用户的列表.

服务推荐的相关理论知识如下所示:

2.1 本体(ontology)

本体是一个重要的语义技术.它是一种概念化的说明,是对客观存在的概念和关系的描述^[15].本体最早是一个哲学上的概念^[16].Studer 等人于 1998 年在前人提出的本体定义基础上进行了进一步研究,认为本体是共享概念模型的明确的形式化规范说明^[17].作为知识表示工具,本体就是根据领域内的知识,构造各个知识点之间的联系,提供对该领域知识的一种说明或描述方式,便于获取领域的知识.

本体可用 OWL(Web ontology language)来描述.OWL 是 W3C(World Wide Web Consortium,万维网联盟)推荐的描述语言的标准.为了解决面向应用程序和环境之间的语义互操作的问题,它通过本体来显式地表达词汇、概念的意义及其相互之间的关系^[9].

2.2 基于本体的服务推荐方法

根据动态规划的思想,我们把服务推荐整体过程划分服务选择和服务推荐两个过程.在本方法中,首先是服务选择过程,利用本体进行了查询重写,这样,我们就把关键字查询变成本体查询.其主要过程分为两个子过程:语法查询阶段和语义查询阶段.我们分析逻辑关系找出潜在的本体信息,最后在数据库中搜索本体的详细信息.我们把本体作为查询条件在数据库中搜索服务,这样就得到了服务选择集合.这个集合就是根据用户输入的不明确需求查询出来的服务列表.

接着是服务推荐过程.根据用户的选择在本体库中,利用本体推理发现潜在的需求,然后搜索发现相关的服务.计算服务的相似度之后,得到服务推荐的备选服务.利用 SMF,我们就得到了服务的 HCS,这个集合就是推荐给用户的集合.

详细过程如下:

1. 服务选择

(a) 语法查询阶段

数据库表 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 和视图 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 的预处理主要是去除无关项,保留相关项.获得的视图集合 $V' = \{V'_1, V'_2, \dots, V'_n\}$ 为下一步语义查询准备好数据.

(b) 语义查询阶段

用户的查询条件被认为是本体的一部分.利用本体的一部分在本体数据库中查询,发现本体的其他部分信息.这个就是通过部分发现整体的思想.用户的查询条件可表示为 $q(X): -X_1, X_2, \dots, X_n$, 其中, $q(X)$ 表示逻辑头,代表整个查询. X_1, X_2, \dots, X_n 表示条件主体(通常查询条件是不完全的),用来在本体库中查询本体的其他部分.这样我们把获得的本体来组成条件集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$. 这个条件被认为是查询条件.通过它,我们可以重写用户的查询条件,也就是把关键字查询转变成本体查询.最后,得到一个可用的结果集.

2. 服务推荐

(a) 服务选择完成后,在本体数据库中,某个服务首先被用户选择之后,这个服务的兄弟服务和子服务通过本体推理可以得到.其关系如图 3 所示.另外,在服务相关的流程中,这个服务的前驱和后继服务通过查询业务流程数据库也可以得到.其在业务流程中的关系如图 4 所示.这两种情况得到的服务存放在一个集合中.这样,我们就得到了备选的服务推荐集合.通过计算服务的相似度,我们可以得到一个服务列表.

(b) 利用 SMF,我们可以获得每个服务的隶属程度.这个隶属度显示这个服务是否属于服务的 HCS 集合中.最后,我们获得推荐给用户的列表.

在图 3 中, S_3 表示被选择的服务,其兄弟服务是 S_2 和 S_4 子服务是 S_5, S_6 和 S_7 .图 3 表明,当 S_3 被用户选择时,

被推荐的备选服务有 S_2, S_4, S_5, S_6 和 S_7 .

在如图 4 所示的流程中, S_5 表示被用户选择的服务. 这个服务的前驱服务是 S_3 , 后继服务是 S_6 和 S_7 . 图 4 表明, 当 S_5 被用户选择时, 被推荐的备选服务有 S_3, S_6 和 S_7 .

整个过程如图 5 所示.

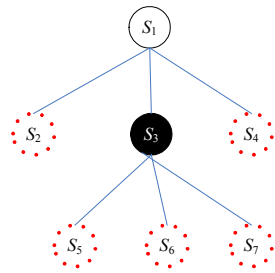


Fig.3 Service relation structure

图 3 服务之间关系结构

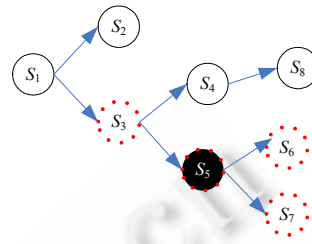


Fig.4 Service process

图 4 服务流程

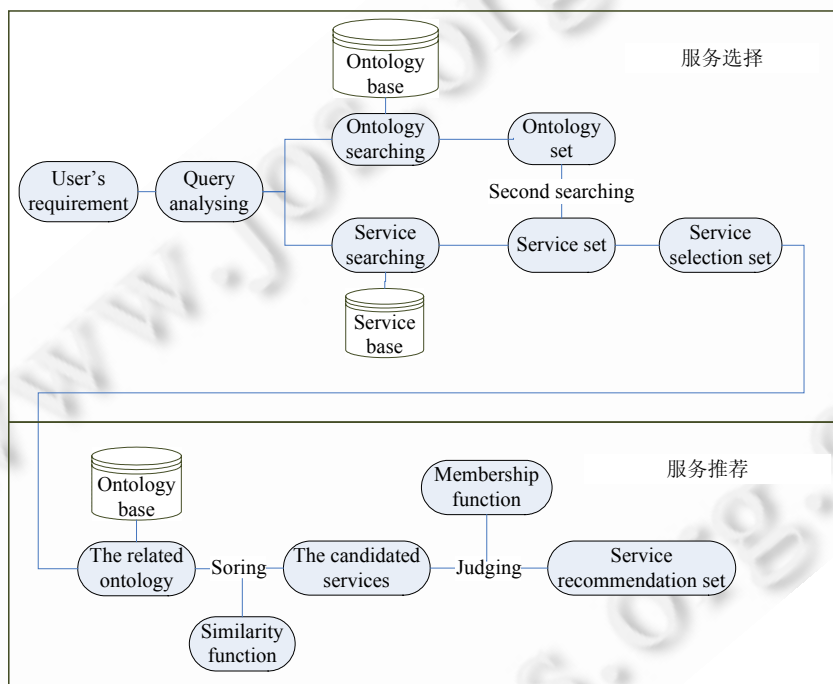


Fig.5 Whole process of service recommendation

图 5 服务推荐的整个过程

在服务推荐过程中, 相似度是衡量指标, 用来表示两个服务的相似程度. 服务的每个属性都被计算, 其计算公式如下:

$$V_n = \begin{cases} 1, & s_{i_n} = s_{j_n} \\ 0, & s_{i_n} \neq s_{j_n} \end{cases}$$

上式中, s_i 和 s_j 表示两个服务, s_{i_n} 表示 s_i 服务的第 n 个属性, V_n 表示第 n 个属性是否一致. 如果 $V_n = 1$, 则表示第 n 个属性是一致的; 否则说明不一致.

两个服务的相似度计算公式如下:

$$Sim(s_i, s_j) = \frac{\sum V_k}{|s_i|} \times 100\%$$

上式中,结果表示 s_i 和 s_j 服务的相似程度.如果 $Sim(s_i, s_j) = 1$, 则表明 s_i 和 s_j 完全一致.如果 $Sim(s_i, s_j) = 0$, 则说明 s_i 和 s_j 完全不一致.当 $0 < Sim(s_i, s_j) < 1$ 时,表明 s_i 和 s_j 部分一致. $Sim(s_i, s_j)$ 的值越大,表明两个服务的相似程度越高.

方法分析:

- (1) 从整个过程中我们可以看出,利用动态规划思想,把服务推荐的过程划分成服务选择和服务推荐两个子过程,在这两个子过程中分别获取最佳,然后把这两种最佳有机地结合在一起.这样就在方法中实现了全局最优策略.利用这个理论得到了 HCS 的服务推荐列表.
- (2) 借助于本体推理,可以从服务库中得到准确的服务.本体是由概念和概念之间的关系构成,在这里服务本体是由服务和它们之间的关系构成.由于语义信息比语法信息更能准确地描述服务之间的关系,因此从定性角度来看,通过语义获得的结果比用语法获得的更好、更准确.
- (3) 利用 SMF,设置一个阈值,我们就可以判断出哪个服务相关度高,哪个服务相关度低.这个函数是一个衡量标准.在这个标准之下,我们能判断出一个服务是否是相关度高的服务.这样,相关度低的服务就不会推荐给用户.
- (4) 在服务选择中,通过查询重写思想,查询从关键字查询转变成本体查询.这样,查询粒度变大.关键字查询是在原子粒度上进行的,关键字是最小的,不可再分.本文提出的本体查询使得查询粒度变大.因为本体由多个概念(关键字)构成.粒度变大,利用本体来查询更加方便.

3 实验和分析

本文提出的方法在服务生成平台(service generating platform,简称 SGP)上进行了验证.SGP 是基于 MVC (model-view-control)架构并参考了全过程复用的思想^[18].在 SGP 中,用到的开发语言是 BPEL(business process execution language)语言.OASIS(Organization for the Advancement of Structured Information Standards)^[19]组织开发了语言,并把它作为一个标准.这个语言主要通过编排 Web 服务生成抽象的业务流程^[20].不管是创建业务模型过程还是具体地创建 BPEL 模型过程都需要消耗大量的时间,并且易于出错.SGP 采用全过程复用思想来解决这个问题.业务流程复用已经被证明为一种很有价值的办法,这种办法可以避免重新发明一个工具.复用可以减轻用户的重复性工作,提高业务建模的质量和效率.

SGP 平台是基于现有的 BPEL 编码平台开发的.这个平台把自然语言描述的流程转变成用 BPEL 描述的流程.在这个平台中,我们可以把具体业务抽象成逻辑过程或者拼接流程成更高层次(或粒度)的服务.因此,业务流程开发人员并不需要考虑描述语言的具体知识,他们只需考虑他们熟悉的业务流程即可.这个平台的目的就是减轻开发者的负担,提高开发软件的效率.

多媒体视频会议系统是这个平台的一个应用.多媒体所有的数据都存放在数据库中.存放在数据库中的 Web 服务是最小的粒度.基于 Web 服务,我们可以构造模板.模板分成两类:合作模板(collaborating model,简称 CM)和合作模板实例(collaborating model example,简称 CME).CM 和 CME 的区别在于,在现实世界中,CM 是不可执行的,CME 是可执行的.这是因为 CM 保留了逻辑关系没有保留相应的 Web 服务;而 CME 不仅保留了逻辑关系,而且也保留了相应的 Web 服务.这两者的关系如图 6 所示.图 6 中,左边的是 CME,

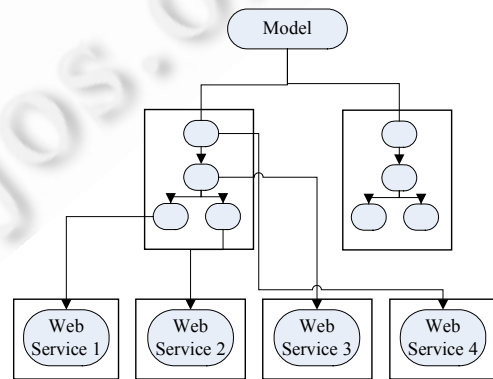


Fig.6 CM and CME in model

图 6 模板中的 CM 和 CME

右边的是 CM.

在 SGP 中,我们通过 CM,CME 和 Web 服务产生不同粒度的业务流程.这样我们就能提高开发效率为开发者节约时间.

利用上面的 SGP 平台测试服务推荐方法和衡量标准,其测试环境是:CPU 是双核,1.8G;内存是 2G;操作系统是 WindowsXP;数据库是 MySQL.数据库中的数据模式如下:

```
Service_Ontology(ServiceID, ServiceName, FunctionDescription, Domain, Input, Output)
```

```
Service_view(ServiceID, ServiceName, Domain, ApplyScope, Precondition, Postcondition, Restrictcondition, Namespace, Location)
```

所有的多媒体视频会议的服务都存储在数据库中,数据库中的每一行信息代表一个服务.

为了进行服务查询,我们首先要定义描述 Web 服务的信息.

文献[21]提出了服务的统一定义内容:

```
{
  Primary Information and Provider Information
  Functional Description
  Quality Description
  Other Attributes Description
}
```

参考上面的 4 部分,我们制定了详细的服务结构:

```
{
  ServiceName //服务名称
  FunctionDescription //功能说明
  Domain //服务应用领域
  ApplyScope //服务应用范围
  Input //服务输入参数
  Output //服务输出参数
  Precondition //服务的前驱
  Postcondition //服务的后继
  Restrictcondition //限制条件
  Namespace //WSDL 文件的命名空间
  Location //WSDL 文件的路径
}
```

Web 服务是用 WSDL(Web service description language)^[22]来描述的.WSDL 是一个基于 XML 的语言,用来在接口和绑定层面上描述 Web 服务.在接口层面上,Web 服务的抽象接口被描述成由一系列操作构成的接口.一个

wb_ID	wb_Name
1	createConference
2	disconnectUser
4	getConfStatus
9	endConference
12	inviteUser
13	applyJoin
14	applyQuit
23	Distract
25	enforceEnd

个操作是由输入、输出和默认信息来定义的.XML Schema 语言是用来描述这些信息的内容.在绑定层面上,服务的抽象接口和传输协议绑定在一起.这个协议定义了具体的实现信息,比如编码格式和地址信息.WSDL 文档是半格式化的数据,这些数据描述了功能和非功能的语义信息.

现在,我们假设用户的查询条件是:Domain="videomedia"和 FunctionDescription LIKE '% conference %'.

查询结果如图 7 所示.

这个数据展示给用户,用户选择其中一个满足要求的服务.这里我们假设用户选择了第 1 个服务:createConference.

Fig.7 Query result

图 7 查询结果

所有多媒体服务利用 protégé 工具创建成本体.protégé 是斯坦福大学开发的本体编辑和知识获取软件.开发语言为 Java,为开放源代码软件.它提供了基于 Java 的应用程序接口 API (application programming interface).利用它可以创建基于知识的工具和应用程序.由于其灵活的设计和众多的插件,protégé 成为目前使用最广泛的本体编辑器之一.它可用来创建、维护多个格式的本体.本文利用 protégé 工具创建的多媒体视频会议的本体如图 8 所示.

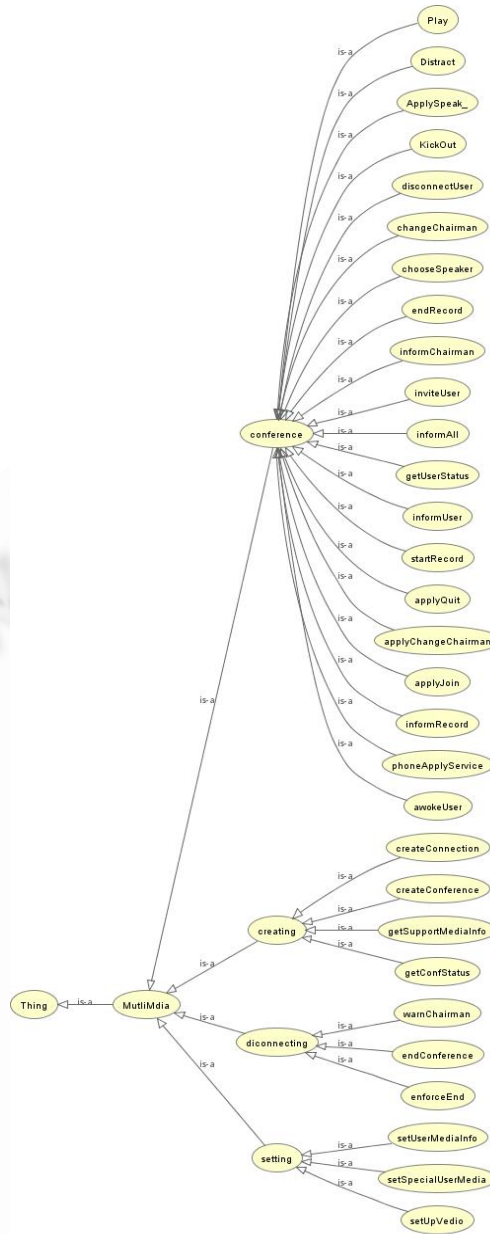


Fig.8 Multi-Media ontology

图 8 多媒体本体

利用本体和 SPARQL(simple protocol and rdf query language)语言,我们可以得到选中服务的兄弟和儿子服

务,其结果如图 9 所示.

```

-----
| brother |
-----
| multimedia:getsuppMdiaInfo |
| multimedia:getconfStatus |
| multimedia:createConnection |
-----

```

Fig.9 Result of ontology reasoning

图 9 本体推理的结果

得到左右的兄弟服务之后,从服务库中,我们搜索选中服务的前驱和后继服务.接着,每个服务都计算和分析其相似度.结果见表 1.

Table 1 Result of similarity

表 1 相似度结果

Service name	Similarity
getSupportMediaInfo	0.56
getConfStatus	0.57
createConnection	0.63

接着,我们利用 SMF 计算每个服务的隶属度.参数设置如下: $S(x;0.5,0.005,1)$.

$$A(u_i) = S(x;0.5,0.005,1) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.5 \\ \frac{1}{1 + 0.005 \times (x - 0.5)^{-1}}, & x > 0.5 \end{cases}$$

利用隶属度函数,我们计算每个服务的隶属度.结果见表 2.

Table 2 Result of membership value

表 2 隶属度计算结果

Service name	Membership value
getSupportMediaInfo	0.923
getConfStatus	0.933
createConnection	0.963

我们设定隶属度的阈值为 0.95.根据公式(1)和公式(2),在相关度高的推荐服务列表中只有 1 个服务.因为只有 createConnection 服务的隶属值超过了阈值.因此服务推荐的列表是 {createConnection},也就是

$$HCS = \{createConnection\}.$$

从表 2 中我们可以看出,虽然备选服务推荐列表中有 3 个服务,但是只有 1 个服务属于服务的 HCS 集合.其他两个相关度不高.在这种情况下,只有相关度高的服务被推荐给用户.这样,我们就可以避免相关度低的服务推荐给用户的情况.

4 总 结

现有的服务推荐方法关注的是如何根据用户的需求推荐服务,至于被推荐的服务如何,能否满足用户潜在的需求等问题没有进一步处理;在服务推荐结果列表中,没有衡量标准来区分相关度高低的.为了解决这个问题,本文提出了一种有效的方法.这种方法利用动态规划的思想.动态规划便于解决多步最优化问题,其目的就是发现全局最优的解决方案.本文提出的方法是把服务推荐方法分成两步:服务选择和服务推荐.SMF 作为衡量标准把推荐的服务划分成相关度高的和非相关度高的,非相关度高的服务不会被推荐给用户.实验结果显示该方法是可行的、有效的.

随着 Web 服务技术的快速发展和用户需求的不断变化,我们会面临越来越多的新问题和 Web 服务技术的挑战.本文中提出了一种解决服务推荐的方法,但是需要进一步研究其他算法,从中发现更佳的办法来解决这个问题.

利用工程技术办法解决问题,推动了技术的发展.但是还有许多未解决的问题需要我们进一步研究.例如,在数据量大的情况下,本文提出的算法的性能如何?我们今后将收集越来越多的 Web 服务来研究这个问题.

References:

- [1] Tran VX, Puntheeranurak S, Tsuji H. A new service matching definition and algorithm with SAWSDL. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Digital Ecosystems and Technologies (DEST 2009). Industrial Electronics Society, 2009. 371–376. [doi: 10.1109/DEST.2009.5276750]
- [2] Liang QHA, Lam H. Web service matching by ontology instance categorization. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Services Computing (SCC 2008). IEEE Computer Society, 2008. 202–209. [doi: 10.1109/SCC.2008.133]
- [3] Lu HG. Semantic Web services discovery and ranking. In: Proc. of the 2005 IEEE/WIC/ACM Int'l Conf. on Web Intelligence. IEEE Computer Society, 2005. 157–160. [doi: 10.1109/WI.2005.132]
- [4] Liu D, Meng XW, Chen JL. A framework for context-aware service recommendation. In: Proc. of the 10th Int'l Conf. on Advanced Communication Technology (ICACT 2008). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. 2131–2134. [doi: 10.1109/ICACT.2008.4494210]
- [5] Lee CO, Lee MY, Han DS, Jung S, Cho J. A framework for personalized healthcare service recommendation. In: Proc. of the 10th Int'l Conf. on e-Health Networking, Applications and Services (HealthCom 2008). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. 90–95. [doi: 10.1109/HEALTH.2008.4600117]
- [6] Chen ZK, Shao Z, Xie ZJ, Huang XD. An attribute-based scheme for service recommendation using association rules and ant colony algorithm. In: Proc. of the Wireless Telecommunications Symp. (WTS). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. 1–6. [doi: 10.1109/WTS.2010.5479624]
- [7] Lo CC, Cheng DY, Chen CH. A semantic Web methodology for situation-aware curative food service recommendation system. In: Proc. of the Int'l Conf. on Computer Science and Software Engineering. IEEE Computer Society, 2008. 444–447. [doi: 10.1109/CSSE.2008.519]
- [8] Liu D, Chen JL, Guo J. An ontology-based LBS system. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2008). IEEE Communications Society, 2008. 1–4. [doi: 10.1109/WiCom.2008.1188]
- [9] Xia HX, Yoshida T. Web service recommendation with ontology-based similarity measure. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2007). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. 412. [doi: 10.1109/ICICIC.2007.620]
- [10] Zhang L, Meng XW, Chen JL, Duan K, Peng Y. Personalized service recommendation algorithm. In: Proc. of the 2nd IEEE Int'l Conf. on Computer Science and Information Technology (ICCSIT 2009). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 522–526. [doi: 10.1109/ICCSIT.2009.5234516]
- [11] Yuan Y, Cao ZQ, Hou ZG, Tan M. Dynamic programming field based environment learning and path planning for mobile robots. In: Proc. of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2010). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. 883–887. [doi: 10.1109/WCICA.2010.5554151]
- [12] Si J, Yang L, Lu C, Sun J, Mei SW. Approximate dynamic programming for continuous state and control problems. In: Proc. of the 17th Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED 2009). IEEE Control Systems Society, 2009. 1415–1420. [doi: 10.1109/MED.2009.5164745]
- [13] Park JH, Kim SK, Park GP, Yoon YT, Lee SS. Modified dynamic programming based unit commitment technique. In: Proc. of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE Power & Energy Society, 2010. 1–7. [doi: 10.1109/PES.2010.5588184]
- [14] Yang Z, Chen JL, Wu BD. A new ontology-based service matching algorithm. In: Proc. of the 6th World Congress on Services (SERVICES-1). IEEE Computer Society, 2010. 170–171. [doi: 10.1109/SERVICES.2010.101]
- [15] Lin Y, Song BH, Duan HB, Huang FL. Overview of semantic technology and applications. *Application Research of Computers*, 2005,(6):130–135 (in Chinese with English abstract).
- [16] Deng ZH, Tang SW, Zhang M, Yang DQ, Chen Jie. Overview of ontology. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2002,38(9):728–730 (in Chinese with English abstract).

- [17] Studer R, Benjamins VR, Fensel D. Knowledge engineering: Principles and methods. Data and Knowledge Engineering, 1998, 25(122):161-197.
- [18] Wu BD, Jin Z, Zhao B. A modeling approach for service-oriented application based on extensive reuse. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Web Services (ICWS 2008). IEEE Computer Society, 2008. 754-757. [doi: 10.1109/ICWS.2008.95]
- [19] OASIS. <http://www.oasis-open.org/who/>
- [20] Ma ZL, Leymann F. BPEL fragments for modularized reuse in modeling BPEL processes. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Networking and Services (ICNS 2009). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 63-68. [doi: 10.1109/ICNS.2009.76]
- [21] Fan J, Ren B, Xiong LR. An approach to Web service discovery based on the semantics. In: Proc. of the 2005 Int'l Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 1103-1106. [doi: 10.1007/11540007_142]
- [22] Booth D, Liu CK. Web Services Description Language (WSDL) 2.0. 2006. <http://w3.org/TR/2006/CR-wsdl20-primer20060327/>

附中文参考文献:

- [15] 林岳,宋保华,段海波,黄风雷.现代语义技术及其应用.计算机应用研究,2005,(6):130-135.
- [16] 邓志鸿,唐世渭,张铭,杨冬青,陈捷.Ontology 研究综述.北京大学学报(自然科学版),2002,38(9):728-730.



杨志(1977-),男,河北保定人,博士生,助理工程师,主要研究领域为服务发现,本体推理,语义互操作.



陈俊亮(1933-),男,博士,教授,博士生导师,中国科学院院士,中国工程院院士,主要研究领域为通信软件,服务计算.



吴步丹(1982-),女,博士,讲师,主要研究领域为服务计算,软件工程.