

基于协同过滤的可信 Web 服务推荐方法

张璇^{1,2}, 刘聪^{3*}, 王黎霞⁴, 赵倩¹, 杨帅³

(1. 云南大学 软件学院, 昆明 650091; 2. 云南省软件工程重点实验室, 昆明 650091;

3. 云南大学 信息学院, 昆明 650091; 4. 云南大学 经济学院, 昆明 650091)

(* 通信作者电子邮箱 chqyylc@foxmail.com)

摘要: 为了实现对可信 Web 服务的推荐, 在分析了 Web 服务推荐技术与电子商务推荐技术不同的基础上, 提出了一种基于协同过滤的可信 Web 服务推荐方法。首先, 根据已有成果对待组装应用的可信需求进行评估, 根据此需求对相似用户进行首次筛选; 然后在首次筛选的用户中, 根据用户使用服务后的评分数据和用户信息来对相似用户进行二次筛选, 经过两次筛选得到最终推荐用户。在根据用户对服务的评分数据计算用户之间的相似性时, 考虑了不同服务对于用户间相似性的贡献值; 在根据用户信息计算用户之间的相似性时, 考虑到用户信息之间非线性的特点, 引入了欧几里得距离公式来计算其相似值; 在产生推荐的过程中还考虑了不诚实用户和用户数不足的问题。模拟实验结果表明该方法能够有效地对可信 Web 服务进行推荐。

关键词: Web 服务; 协同过滤; 非功能需求; 可信服务; 相似用户

中图分类号: TP391.027; TP312.8 **文献标志码:** A

Trustworthy Web service recommendation based on collaborative filtering

ZHANG Xuan^{1,2}, LIU Cong^{3*}, WANG Lixia⁴, ZHAO Qian¹, YANG Shuai³

(1. School of Software, Yunnan University, Kunming Yunnan 650091, China;

2. Key Laboratory of Software Engineering of Yunnan Province, Kunming Yunnan 650091, China;

3. School of Information, Yunnan University, Kunming Yunnan 650091, China;

4. School of Economics, Yunnan University, Kunming Yunnan 650091, China)

Abstract: In order to recommend trustworthy Web services, the differences between Web service recommendation and electronic commerce recommendation were analyzed, and then based on the collaborative filtering recommendation algorithm, a trustworthy Web service recommendation approach was proposed. At first, non-functional requirements of trustworthy software were evaluated. According to the evaluation results, similar users were filtered for the first time. Then, by using the rating information and basic information, the similar users were filtered for the second time. After finishing these two filtering procedures, the final recommendation users were determined. When using users' ratings information to calculate the similarity between the users, the similarity of the different services to the users was taken into consideration. When using users' basic information to calculate the similarity between the users, the Euclidean distance formula was introduced because of the nonlinear characteristics of the users. The problems of the dishonesty and insufficient number of users were also considered in the approach. At last, the experimental results show that the recommendation approach for trustworthy Web services is effective.

Key words: Web service; collaborative filtering; Non-Functional Requirement (NFR); trustworthy service; similar user

0 引言

Web 服务技术屏蔽了不同平台之间的差异, 使 Web 服务组装成为可能, 当我们将 Web 服务视为可复用的软件构件实体时, Web 服务组装也可看作是一种在 Internet 上的基于构件的软件开发^[1]。在 Web 服务组装中传统的服务选择方案是基于服务质量 (Quality of Service, QoS) 来对服务进行选择的, 即在服务满足功能性的前提下, 根据服务 QoS 来对相同功能的服务进行选择^[2-3]。但是随着服务规模的增大、服务提供者恶意欺骗, 以及其他外在因素的变化, 导致 QoS 的可

信性无法得到保证^[4]。这时就需要一种可信的 Web 服务推荐方法来向用户提供选择。

在可信服务的推荐方面, 通常采用的方法有 3 种^[5]: 1) 通过可信的第三方推荐; 2) 通过用户使用服务的历史经验产生推荐; 3) 通过其他服务使用者推荐。在可信的第三方推荐中, 第三方通常基于监控代理和认证中心来收集注册的服务信息^[6]。文献[5]是通过计算用户推荐等级、领域相关度和评价相似度等来对用户的推荐信息进行过滤从而达到推荐可信服务的目的, 该方法没有考虑服务本身的可信属性而是从用户的角度对服务的可信度进行度量。文献[7]提出了一

收稿日期: 2013-07-26; **修回日期:** 2013-09-13。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61379032, 61262024, 61262025); 云南省应用基础研究计划项目(2012FB118, 2012FB119); 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2012Y257, 2012C108); 云南省软件工程重点实验室开放基金资助项目(2011SE09); 云南大学“中青年骨干教师培养计划”专项经费资助项目。

作者简介: 张璇(1978-), 女, 江苏南京人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向: 信息安全、软件工程; 刘聪(1989-), 男, 重庆人, 硕士, 主要研究方向: Web 应用、软件工程; 王黎霞(1962-), 女, 云南昆明人, 副教授, 主要研究方向: 软件工程; 赵倩(1989-), 女, 山西晋中人, 硕士, 主要研究方向: 可信软件属性; 杨帅(1987-), 男, 陕西西安人, 硕士, 主要研究方向: 软件过程演化。

种开放的具有信任和推荐关系的服务网络模型,通过在这个模型上进行推荐从而实现可信服务的发现,该方法的缺点是只有在该模型上才能实现可信服务的发现,这不适用于现有的 Web 体系结构。文献[8]提出了一种可信的服务选择模型,该模型在现实推荐的过程中只考虑了用户信息而没考虑用户所组装应用的信息。文献[9]提出了一种对可信软件非功能属性进行度量的模型,通过该模型软件项目组可以计算出待开发可信软件对于各个非功能属性的等级需求。

在保证服务的可信方面,文献[10]认为开发人员需要直接的证据来论证软件满足其可信性要求;王怀民等^[11]从系统、用户体验、网络行为、资源共享的角度总结了软件可信的4个不同表述;文献[12-13]认为软件可信性是通过软件可信属性进一步描述的,一种可信属性表达了软件的一种相关可信能力,它将“可信性”定义为由正确性、可靠性、安全性、可用性等众多属性构成的一个新属性。本文的可信服务推荐采用了文献[12-13]中可信性的定义来支持对可信服务的推荐,从而完成对可信服务的推荐。

1 服务推荐与电子商务推荐比较

推荐系统是实现信息过滤的重要手段,在推荐系统中最广泛应用和最成功的算法是协同过滤推荐算法^[14],它基于相似用户的选择而预测目标用户的选择。在电子商务中推荐系统有很普遍的应用,但是服务推荐和电子商务推荐有一些不同之处,其不同之处如表1所示。

表1 电子商务推荐与服务推荐的差别

比较项	电子商务推荐	服务推荐
用户需求	用户需求不确定,推荐商品类型不确定,推荐用户可能感兴趣的商品	用户需求确定,推荐服务类型明确,推荐满足用户需要的该类型服务
面向用户	推荐系统面向的用户为商品的最终用户,他们直接使用商品	推荐系统面向的用户一般为软件开发,他们使用服务是为了组合成新的服务供别人使用
用户关注	用户一般只注重商品的功能属性	用户除了注重服务的功能属性外,还注重服务的非功能属性(如安全性,可靠性等)
产品差别	产品为商品,同类产品只有好坏之分,产品本身没有等级之分	产品为服务,同类服务既有好坏之分也有等级之分(如:与安全性相关的服务,安全等级有高中低之分)
评分区别	用户对商品的评分一般是固定不变的	用户对服务的评分在不同的服务组装过程中可能不同(如:对于一个安全性高的服务,用户在进行银行领域服务组装时对其评分高,而在进行其他领域服务组装时由于其高安全性可能使系统的运行效率降低,而对其评分较低)

根据电子商务推荐与服务推荐的差别,可知传统的在电子商务中运用的推荐算法不能简单地迁移到服务推荐中进行运用。从表1中列出的电子商务推荐与服务推荐的区别中可以看出电子商务推荐与服务推荐最主要的不同就在于:随着用户所组装应用的不同,用户对于同一个服务的评分也可能不同。因此,在使用协同过滤算法寻找相似用户时,要考虑到用户对服务进行评分时的环境,也就是说只有当用户所组装的应用相似时,其对于当前用户的推荐才是有价值的,而应

用的相似可以由应用的非功能属性(在本文也就是应用的可信属性)来进行度量。

针对以上所述,本文提出了一种基于协同过滤的可信 Web 服务推荐算法,该算法综合考虑了用户评分和用户评分环境来得到推荐用户,在计算推荐用户的过程中还对传统的推荐算法做了一些改进,并引入了欧几里得距离来计算非线性数据的相似性。

2 推荐数据获取

在利用推荐算法进行推荐之前首先要获得用于推荐的数据,在本文中用到的数据有待组装应用的可信需求数据和用户对于服务的评分数据。

2.1 用户可信需求数据获取

由前面对于可信性的定义知,可信性是由安全性、可靠性、可用性等属性构成的。用户组装不同应用将会对应着不同的可信需求。为了度量不同应用的可信需求,需要将构成可信的每一个可信属性进行分级,这样才能对不同应用的可信需求进行度量。

对于一个应用的某个属性,不同的用户对该属性的需求可能不同。例如对于一个应用的易用性来说,学术界可能认为易用性的等级并不要求很高而安全性要求很高,但是行业界却认为易用性要求高而安全性要求相对低,而一般来说易用性和安全性属性是相互抑制的。面对不同观点需要综合不同的意见来对各个可信属性进行权衡。文献[9]提出了一个用于对用户可信属性进行权衡的模型,该模型综合了项目中所有相关对象对可信属性的等级需求,通过综合权衡所有需求得到一个最终的权衡结果。本文也采用该方法来对用户的可信需求进行评估。

采用文献[9]方法,对于可信需求的具体度量过程如下:首先,对于所有的可信属性建立一个分解层次图,然后,使用一个模拟算法将所有对象对可信属性的模糊评价信息转换为定量值,最后对定量的可信属性值进行计算,通过计算最终得到每个可信属性的权衡值。

为了便于计算,本文对每个属性计算得到的权衡值做进一步的处理,即按权衡值的大小对属性的需求进行分级,在本文中需求等级分为5级,属性权衡值在不同的区间属性的需求将会选择不同的等级。

以安全性属性的等级选择为例,对于一个应用的安全性,学术界、行业界和用户可能会提出不同的需求,应用组装者通过文献[9]中的模型来综合所有对象提出的需求得到一个最终的权衡值,应用组装者根据这个权衡值的数值大小在1~5级中选择对应的属性需求等级。

根据这种方法就收集到了每个用户的可信需求数据。设所有用户为 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$, 所有可信属性用 A_1, A_2, \dots, A_m 表示,每个属性分为5级,用户对每个属性都有选择值,则用户的可信需求数据表如表2所示。

表2 用户可信需求数据表

用户	可信属性			
	A_1	A_2	...	A_m
U_1	1	2	...	5
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
U_n	3	5	...	2

用户可信需求数据表的首行代表所有可信属性,首列代表所有用户;行列交叉处则代表用户对相应可信属性的需求等级。根据用户可信需求数据表可以得到对应的用户可信需求数据矩阵。

2.2 用户服务评分数据获取

用户服务评分数据是用户在使用服务以后对服务满意度的评价,这与电子商务中用户对于商品的评分相似。

假设所有 Web 服务为 $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_m$, 用户在使用每个服务后都会对服务进行评分,将评分值分为 10 级,分别为 1, 2, ..., 10; 所有用户为 U_1, U_2, \dots, U_n 则用户使用服务评分数据如表 3 所示。

表 3 用户服务评分表

用户	Web 服务			
	S_1	S_2	...	S_m
U_1	1	2	...	5
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
U_n	8	4	...	9

用户服务评分表的首行代表所有的 Web 服务,首列代表所有用户;行列交叉处则代表用户对其使用服务的评分。根据用户服务评分表可以得到对应的用户服务评分矩阵。

3 可信 Web 服务推荐算法

在得到用户可信需求数据和服务评分数据后下一步就是运用这些数据来计算得到推荐用户从而产生推荐。本文在计算线性相关数据的相似性时用的是相关相似性计算方法。在计算相似性上常用的算法还有余弦相似性度量算法和修正的余弦相似性方法,在这些算法中余弦相似性度量算法没有包含用户的统计特征,而修正的余弦相似性方法更多地体现的是用户之间的相关性而非相似性,而相关性算法更体现了用户之间的相似性^[15]。系统运行过程如图 1 所示。

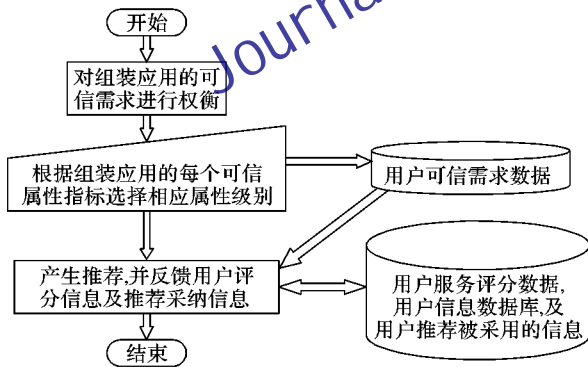


图 1 系统运行过程

3.1 推荐算法

输入 用户可信等级需求矩阵,用户服务评分矩阵,用户信息。

输出 预测满足目标用户需求的可信 Web 服务。

步骤如下:

第 1 步 使用当前用户待组装应用的可信需求矩阵与数据库中用户已组装完成应用的可信需求矩阵进行计算,计算应用之间的相似值 $sim1$, 筛选出相似值最大的前 M (M 为系统设定值,用户也可以根据自己的需要对其进行设置) 个用户,从而完成相似用户的第一次筛选。计算公式为:

$$sim1 = \frac{\sum_{a \in I_{ij}} (R_{i,a} - \bar{R}_i)(R_{j,a} - \bar{R}_j)}{\sqrt{\sum_{a \in I_{ij}} (R_{i,a} - \bar{R}_i)^2} \sqrt{\sum_{a \in I_{ij}} (R_{j,a} - \bar{R}_j)^2}} \quad (1)$$

其中: i 表示当前用户 U_i , j 表示数据库中用户 U_j , $R_{i,a}$ 表示用户 i 将要组装应用对可信属性 a 的等级选择值, $R_{j,a}$ 表示用户 j 已组装应用对可信属性 a 的等级选择值, I_{ij} 表示组装应用共同的可信属性集合, 在这里这一集合始终是相同的, 即集合 $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 。 \bar{R}_i 和 \bar{R}_j 分别表示用户 i 待组装应用和用户 j 已组装应用对各个可信属性等级评价的平均值。

第 2 步 在第 1 步中筛选出的用户中,根据筛选出用户的服务评分矩阵与当前用户的服务评分矩阵计算筛选用户与当前用户之间的相似值 $sim2$ 。在计算时考虑到不同的服务对用户之间的相似值影响并不等价,本文对计算相似值公式做了一些改进,为每一个服务增加了权重,其计算公式为:

$$sim2 = \frac{\sum_{s \in I_{ij}} q_s \times (R_{i,s} - \bar{R}_i)(R_{j,s} - \bar{R}_j)}{\sqrt{\sum_{s \in I_{ij}} (R_{i,s} - \bar{R}_i)^2} \sqrt{\sum_{s \in I_{ij}} (R_{j,s} - \bar{R}_j)^2}} \quad (2)$$

其中: i 表示当前用户 U_i , j 表示筛选用户 U_j , $R_{i,s}$ 表示用户 i 对服务 s 使用后的评分值, $R_{j,s}$ 表示用户 j 对服务 s 使用后的评分值, I_{ij} 表示用户 i, j 共同使用并评分的服务集合, \bar{R}_i 和 \bar{R}_j 分别表示用户 i 和用户 j 对所使用服务的平均评分值, q_s 表示服务 s 所占的权重,其中 $\sum_{s=1}^n q_s = 1$, 即所有服务的权重之和为 1。

第 3 步 在第 1 步中筛选出的用户中,根据用户资料计算用户之间的相关程度 $sim3$ 。用户选择服务的相似性除了与用户评分、用户所组装的目标服务有关外,还与用户的背景相关,如用户的年龄、性别、学历等。在第 1 ~ 2 步中应用的可信数据和用户的评分数据都是线性相关的数据,可以运用相似相关性方法来计算其相似值,然而用户信息数据并不是线性相关的数据,所以在此提出另外一种方法也就是欧几里得距离来计算用户的相关程度。将每个用户视为空间中的一个点,这样两点间的相似度可以由两点间的距离来反映,两点间距离越大,表示两点的相似度越低;反之,则越高。将用户信息看作一个向量,则计算公式为:

$$d(x, y) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2\right)} \quad (3)$$

其中: x, y 表示用户 x 和用户 y , x_i 表示用户 x 的信息所组成向量的第 i 个分量, y_i 表示用户 y 的信息所组成向量的第 i 个分量。为了便于比较计算结果,将结果规约到区间 $(0, 1]$ 内,规约公式为:

$$sim3 = \frac{1}{1 + d(x, y)} \quad (4)$$

第 4 步 在第 1 步中筛选出的用户中,综合 $sim2, sim3$ 的值得到每个推荐用户的最终推荐度,若该推荐用户为用户 j 则用户 j 的推荐度计算公式为:

$$RD_j = (u \cdot sim2 + v \cdot sim3) \times (1 + f) \quad (5)$$

其中: $sim2$ 为根据用户服务评分矩阵计算得到的用户相似度, $sim3$ 为根据用户信息计算得到的用户相关程度, f 是推荐用户 j 的推荐被接受的次数产生的增值系数。 f 主要是为了校正不诚实用户的问题,不诚实用户是指用户不按照真实情况对服务进行评价的用户,对于不诚实用户的推荐其他用户采用的概率很小, f 的计算方法为:

$$f = E_j/E \quad (6)$$

其中: E_j 为推荐用户 j 的推荐信息被采用的次数, 而 E 为所有推荐用户(在第1步中筛选出的用户)推荐信息被采用的总次数。这样可以有效地使系统形成反馈, 消除由不诚实用户产生的推荐误差, 从而使推荐更加精确。参数 u 和 v 代表的是各个值所占的权重, 其中 $u + v = 1$; 在实际使用中可以调节 u 和 v 的值来适应不同的需求。

第5步 得到最终推荐用户。在第4步中计算出了每个用户对于当前用户的推荐度, 根据每个用户的推荐度按推荐度从大到小的顺序进行排序, 将排在前面的前 G 个用户作为最终推荐用户, 系统根据这 G 个推荐用户产生推荐结果。

第6步 根据推荐用户预测用户评分得到推荐结果: 设有一组待推荐功能相同的候选 Web 服务 $\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$; 本文根据推荐用户来预测当前用户对这组相同功能的 Web 服务的评分, 令多个用户对某个服务的评分为这些用户对服务的评分之和, 对于服务 S_i 预测当前用户对该服务的评分为:

$$S_i = \sum_{i=1}^G \theta_i(S_i)/G \quad (7)$$

其中: $\theta_i(S_i)$ 为推荐用户 i 对于服务 S_i 的评分, G 为设定的推荐用户个数。即各个服务的预测评分等于所有推荐用户对服务的平均评分。在得到这组 Web 服务的预测评分后按照预测评分大小将这组服务排序, 将预测评分排在前面的 Web 服务推荐给当前用户供用户选择。

3.2 异常处理

上面的算法是在假定用户数据库中用户量足够多的情况下进行的, 然而当用户数据库中用户数为零, 或者用户数太少时, 系统没有相似用户可以参考, 此时, 则不能使用上面的算法来得到推荐, 本文采取其他方式来处理这一情况。

给数据库中用户数设一个阈值 Y 。当数据库中的用户数大于 Y 时, 系统采用上面的算法来实现推荐。当数据库中的用户数小于 Y 时, 此时没有相似用户可以参考, 应该根据用户的可信需求数据来实现推荐。一个应用是由多个服务组合而成的, 对于每个服务也可以将其看成是一个应用, 因此每个服务也具有其相应的可信属性, 可以利用式(1)来计算单个服务与应用之间的可信性质差异, 从而将与应用的可信性质最相似的服务推荐给用户。

4 模拟实验与结果分析

对于推荐系统的评价标准主要有两类^[15]: 一类是统计精度度量方法, 一类是决策支持精度度量方法。一般常用的方法是统计精度度量方法中的平均绝对偏差 (Mean Absolute Error, MAE) 度量方法。本文也采用此方法来作为度量标准。

设预测的用户对于服务的评分集合为 $\{p_1, p_2, \dots, p_N\}$, 对应的实际评分集合为 $\{q_1, q_2, \dots, q_N\}$, 则 MAE 的计算定义为^[11]:

$$MAE = \sum_{i=1}^N |p_i - q_i| / N \quad (8)$$

在模拟实验中使用的可信属性包括可靠性、防危险性、易用性、安全性、可移植性和可维护性, 将每一个可信属性分为5级。为了使仿真实验更加真实, 在实验中按文献[16]的分类方法对服务进行划分, 服务分类情况为: 访问控制/安全类服务、地址/定位类服务、金融商业类服务、开发工具类服务、目录/数据库类服务、政府/政策类服务、在线验证类服务、证券

类服务、搜索/探测类服务、自动销售类服务、零售类服务。对服务的分类也可用于对组装的应用进行分类, 对于同类应用其可信属性需求等级相似, 通过分类可以降低用户对于可信属性等级选择的误差。在实验中服务总数为500个, 实验中模拟了200个服务使用者, 在初始阶段每个用户都对30~40个服务进行过评价。

为了对比本推荐方法的性能, 在本模拟实验中使用了3种推荐方法来进行推荐对比: 方法1是传统的推荐算法, 即仅使用用户服务评分矩阵进行推荐; 方法2是仅使用用户可信需求矩阵进行推荐; 方法3是本文提出的推荐方法。为了便于实验, 在实验中没有考虑各个服务对用户相似性影响的权值, 且设定 u, v 的值均为1。

设定用户阈值 $Y = 50$, 推荐用户个数 $G = 10$, 首次筛选的用户数 $M = 30$, 则随着用户数的增加3种方法的 MAE 变化情况如图2所示。

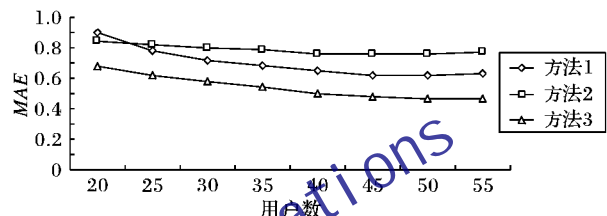


图2 MAE变化图 ($Y=50, G=10, M=30$)

从图2可见, 当用户数较小时方法2优于方法1, 这是由于当用户数较少时根据用户服务评分数据计算得到的相似用户误差较大; 但随着用户数的增加由于可信属性的有限性, 根据可信属性需求计算出的相似用户范围过于宽广, 所以方法2的性能低于方法1; 方法3的性能在整个过程中最好, 这是由于方法3在得到推荐的过程中综合了几种数据, 所以方法3的推荐效果最好。

当设定 $Y = 100, G = 20, M = 50$, 则随着用户数的增加3种方法的 MAE 变化情况如图3所示。

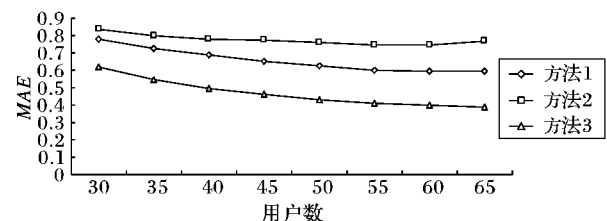


图3 MAE变化图 ($Y=100, G=20, M=50$)

根据图3的结果可以看到: 随着 Y, G 和 M 的改变, 推荐的结果也会改变, 当 Y, G 和 M 增大时推荐的精度也相应地增大了。因此, 在实际的应用中应该根据用户量来调整 Y, G 和 M 的大小, 从而得到更好的推荐结果。

5 结语

基于 Web 服务的组合已经得到了人们的广泛关注, 本文提出了一种 Web 服务组装过程中的可信服务推荐方法, 模拟实验结果表明该方法可以得到预期的推荐效果。在 Web 服务组装中服务组合时可能存在服务之间的冲突问题, 这是在上面的推荐过程中没有考虑到的, 另外, 随着 Web 服务的不断增加和 Web 服务用户数的不断增多, 如何能使推荐过程更快将是未来要解决的问题, 在下一步工作中将着重研究这两个问题。

参考文献:

- [1] ZHAO J, XIE B, ZHANG L, *et al.* A Web services composition method supporting domain feature[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(4): 731–738. (赵俊, 谢冰, 张路, 等. 一种支持领域特性的 Web 服务组装方法[J]. 计算机学报, 2005, 28(4): 731–738.)
- [2] LI M, ZHAO J F, WANG L J. CoWs: an Internet-enriched and quality-aware Web services search engine[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Web Services. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 419–427.
- [3] HU J, LI J, LIAO G. A multi-QoS based local optimal model of service selection[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(3): 526–534. (胡建强, 李涓子, 廖桂平. 一种基于多维服务质量的局部最优服务选择模型[J]. 计算机学报, 2010, 33(3): 526–534.)
- [4] AL-MASRI E, MAHMOUD Q H. Investigating Web services on the World Wide Web[C]// Proceedings of the WWW 2008. New York: ACM Press, 2008: 795–804.
- [5] ZHU R, WANG H, FENG D. Trustworthy services selection based on preference recommendation[J]. Journal of Software, 2011, 22(5): 852–864. (朱锐, 王怀民, 冯大为. 基于偏好推荐的可信服务选择[J]. 软件学报, 2011, 22(5): 852–864.)
- [6] TIAN M, GRAMM A, NAUMOWICZ T, *et al.* A concept for QoS integration in Web services[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Web Information Systems Engineering Workshops. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003: 149–155.
- [7] LIU Y, ZHENG X, CHEN D. Trustworthy services discovery based on trust and recommendation relationships[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012, 32(12): 2789–2795. (刘迎春, 郑小林, 陈德人. 基于信任和推荐关系的可信服务发现[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(12): 2789–2795.)
- [8] WANG H, ZHANG D. A trustworthy service selection model based on collaborative filtering[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 349–354. (王海燕, 张大印. 一种可信的基于协同过滤的服务选择模型[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 349–354.)
- [9] ZHU M X, LUO X X, CHEN X H, *et al.* A non-functional requirements tradeoff model in trustworthy software[J]. Information Sciences, 2012, 191: 61–75.
- [10] JACKSON D. A direct path to dependable software[J]. Communications of ACM, 2009, 52(4): 78–88.
- [11] WANG H, TANG Y, YIN G, *et al.* Credible mechanism of Internet software[J]. Science in China Series E: Information Sciences, 2006, 36(10): 1156–1169. (王怀民, 唐扬斌, 尹刚, 等. 互联网软件的可信机理[J]. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2006, 36(10): 1156–1169.)
- [12] LIU K, SHAN Z G, WANG J, *et al.* Overview on major research plan of trustworthy software[J]. Science Foundation in China, 2008, 22(3): 145–151. (刘克, 单志广, 王戟, 等. “可信软件基础研究”重大研究计划综述[J]. 中国科学基金, 2008, 22(3): 145–151.)
- [13] LANG B, LIU X, WANG H, *et al.* A classification model for software trustworthines[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2010, 4(3): 231–239. (郎波, 刘旭东, 王怀民, 等. 一种软件可信分级模型[J]. 计算机科学与探索, 2010, 4(3): 231–239.)
- [14] BREESE J, HECHERMAN J, KADIE C. Empirical analysis of predictive algorithms for collaborative filtering[C]// UAI 1998: Proceedings of the 14th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998: 43–52.
- [15] XU H, WU X, LI X, *et al.* Comparison study of Internet recommendation system[J]. Journal of Software, 2009, 20(2): 350–362. (许海玲, 吴潇, 李晓东, 等. 互联网推荐系统比较研究[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 350–362.)
- [16] SAHA S, MURTHY C A, PAL S K. Classification of Web services using tensor space model and rough ensemble classifier[C]// ISMIS 2008: Proceedings of the 17th International Symposium, LNCS 4994. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 508–513.
- (上接第 207 页)
- [5] XIAO J, YAN Y P, ZHANG J, *et al.* A quantum-inspired genetic algorithm for K-means clustering[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(7): 4966–4973.
- [6] CHANG D X, ZHANG X D, ZHENG C W. A genetic algorithm with gene rearrangement for K-means clustering[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(7): 1210–1222.
- [7] ZHENG X M, LYU S Y, WANG X D. Clustering algorithm based on immune particle swarm optimization[J]. Computer Engineering, 2008, 34(15): 179–184. (郑晓鸣, 吕士颖, 王晓东. 基于免疫粒子群优化的聚类算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(15): 179–184.)
- [8] KARABOGA D. TR06, an idea based on honey bee swarm for numerical optimization [R]. Kayseri, Turkey: Erciyes University, 2005.
- [9] LUO J, WANG Q, FU L. Application of modified artificial bee colony algorithm to flatness error evaluation[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 422–430. (罗钧, 王强, 付丽. 改进蜂群算法在平面度误差评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 422–430.)
- [10] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459–471.
- [11] ZHU L J, MA B X, ZHAO X Q. Clustering validity analysis based on silhouette coefficient[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(2): 139–141. (朱连江, 马炳先, 赵学泉. 基于轮廓系数的聚类有效性分析[J]. 计算机应用, 2010, 30(2): 139–141.)
- [12] WU Y, LI Y X, XU X. Novel oppositional hybrid differential evolution algorithm based on swarm intelligence[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 30(5): 903–907. (吴昱, 李元香, 徐星. 基于群智能的新型反向混合差分进化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(5): 903–907.)
- [13] University of California, Irvine. UCI machine learning repository [DB/OL]. [2013-06-19]. <http://archive.ics.uci.edu/ml>.
- [14] AGUSTIN-BLAS L E, SALCEDO-SANZ S, JIMENEZ-FERNANDEZ S, *et al.* A new grouping genetic algorithm for clustering problems[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(10): 9695–9703.