

动态 Web 服务组合研究^{*})

张佩云 孙亚民

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

摘要 Web 服务作为一种崭新的分布式计算模型,是 Web 上数据和信息集成的有效机制。动态 Web 服务组合作为一种灵活、快速集成信息的重要方法,成为开放异构环境中复杂分布应用的新的研究热点。本文首先分析了几种 Web 服务描述方式并给出了动态 Web 服务组合定义及模式;其次,结合目前存在的一些组合平台和框架,重点分析了基于工作流和基于 AI 规划的动态 Web 服务组合原理与典型应用,并分析了其它相关的一些动态 Web 服务组合策略;最后提出了动态 Web 服务组合面临的挑战和进一步的研究方向。

关键词 Web 服务,动态服务组合,工作流, AI 规划,组合策略

A Survey on Dynamic Web Services Composition

ZHANG Pei-Yun SUN Ya-Min

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

Abstract As a new application model for decentralized computing, Web services is becoming an effective mechanism for the data and service integration on the Web. As an important method for flexible and rapid integration, dynamic Web services composition becomes a new hot research of complex distribute application in open and heterogeneous environment. Firstly, in this paper, several descriptions of Web services are analyzed, model and definition of dynamic Web services composition are presented. Then, combining current some composition platforms and frameworks, the theory of workflow based and AI planning based dynamic Web services composition as well as the typical application of the two composition methods are presented. And some other relative dynamic composite strategies are analyzed. In the end, the challenges of Web services dynamic composition and the future research work are proposed.

Keywords Web services, Dynamic service composition, Workflow, AI planning, Composition strategy

1 引言

随着 Web 服务技术的发展,面向服务的计算逐渐成为开放异构环境中复杂分布应用的主流计算模型。为提高 Web 服务的可重用性,当不存在一个服务满足用户的需求时,需要按照共享上下文,将多个功能有限的简单 Web 服务按照服务描述、约束、可用资源及服务等进行服务组合,实现用户定义的组合目标,产生增值服务^[1]。Web 服务组合是解决现实 Web 任务和 B2B 应用问题的重要技术,在工业界和学术界受到了广泛的关注。基于 Web 服务的动态服务组合作为实现灵活、快速信息集成的重要方法,成为新的研究热点^[2]。

2 Web 服务描述

动态 Web 服务组合依赖于 Web 服务描述。目前存在服务描述可以分成两大类:句法层描述和语义层描述。

(1) WSDL(Web Services Description Language)

WSDL 是一种基于句法层描述的 Web 服务描述语言^[3]。其句法是对操作和消息进行抽象描述后,将其绑定到具体的网络协议和消息格式上以定义端点,相关的具体端点即组合成为抽象端点(服务)。

WSDL 是最初的 Web 服务,只是从句法层对 Web 服务进行描述,不支持丰富的语义描述。为了解理解并使用一个

Web 服务,软件实体需要一个计算机可解释的服务描述。语义 Web 可看成是当前 Web 技术的一个延伸和扩展,Web 服务作为 Web 上的一类越来越重要的资源,需要语义对 Web 服务提供广泛的语义支持。

(2) OWL-S(Semantic Markup for Web Services)

OWL-S 是一种服务本体,该服务本体主要由 profile, process 和 grounding 三部分组成^[4],如图 1 所示。

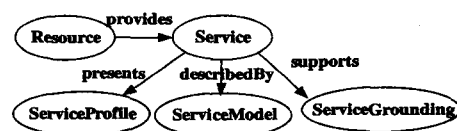


图 1 Web 服务的上层本体

ServiceProfile 描述了服务能做什么,主要用于自动服务发现;ServiceModel 描述了服务是如何工作的,即描述了服务的过程(Process)模型(包括数据流与控制流),主要用于自动服务组合和互操作;ServiceGrounding 描述了如何实现对服务的访问。OWL-S 兼容了 WSDL,采用 OWL 类表达 WSDL 中抽象类型的声明,并使用 WSDL 的绑定结构表达消息的格式。

(3) WSMO(Web Service Modeling Ontology)

作为 Web 服务建模本体,WSMO 描述了语义 Web 服务

^{*} 本文得到国家 863 计划项目(2003AA103510)和高等学校博士点科研基金(20050288015)资助。张佩云 博士生,讲师,研究方向为语义网、Web 服务和智能信息处理等;孙亚民 教授,博导,研究方向为计算机网络技术。

不同方面的概念模型,主要解决服务集成问题。WSMO 定义的四个主要的要素是^[5]:1)本体;2)目标;3)Web 服务;4)中介器(Mediators)。其中,本体用来提供被其它元素使用的术语;目标定义了 Web 服务应当解决的问题;Web 服务描述定义了一个 Web 服务的不同方面;中介器用于实现交互。WSMO 与 OWL-S 的关系是:WSMO 采用一阶逻辑学和框架逻辑来定义形式化的声明,它覆盖了 OWL-S 的大部分描述元素,并引入了额外的元素,以增加现实领域的适应性。另外,OWL-S 不关注一个特定的服务应用领域或问题,而 WSMO 考虑到特定的应用领域(如商业领域)。从相关文献资料归纳可知,目前采用 WSMO 描述 Web 服务的应用不多。

3 动态 Web 服务组合定义及模型

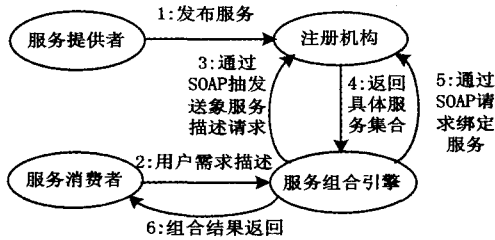


图 2 动态 Web 服务组合模型

Web 服务是自包含、自描述的模块化的应用,可以通过 Web 被发布、定位和调用^[6]。广义的动态 Web 组合是根据用户动态定义的组合目标、语义描述和约束,以及可用资源和服务,在运行时创建组合方案^[7]。狭义的动力 Web 服务组合是指要求预先制定抽象的组合过程,然后在应用运行时根据一定的条件限制来动态地选取合适的服务并绑定选取到的服务^[8]。当 Web 服务环境不变或很少变化时,狭义的动力服务

组合能很好地满足应用。当服务提供者更新了服务或提供了新的服务时,将产生不一致性,导致要改变软件体系结构甚至要重新设计,因此有必要自动、动态适应不可预测的 Web 环境变化。动态服务组合通常由服务提供者、注册中心、服务组合引擎和服务消费者 4 部分组成^[9],其组合模型如图 2 所示。

4 动态 Web 服务组合

动态 Web 服务组合主要有基于工作流和基于 AI 规划两种,前者属于狭义动态服务组合范畴,后者属于广义动态服务组合范畴。此外,还有其它相关的一些动态 Web 服务组合策略,下面一并进行分析。

4.1 基于工作流的动态服务组合

4.1.1 基于工作流的 Web 服务组合语言

在明确的过程模型驱动,商业活动的协作需要长期的交互。因此,通过商业过程模型,借助适合 Web 服务的商业过程建模语言来捕获一个组合服务的逻辑,将是一个很自然的选择。这种商业过程建模语言主要有 BPEL4WS, XLANG, WSFL, BPML 和 WSCI。文[10]给出了这几种组合语言在工作流应用上的区别,指出 BPEL4WS 比其它的过程建模更具有表达能力。BPEL4WS 作为 Web 服务商业流程执行语言,提供了组合工作流的框架,是结合 IBM 的 WSFL 和 Microsoft 的 XLANG 而形成的、专为整合 Web 服务而制定的一项规范标准。BPEL4WS 过程是一种活动组合流程,其主要作用是对可执行过程和抽象过程进行建模^[11],完成 Web 服务调用、操作数据、抛出故障或终止一个流程等工作的不同活动,从而创建出复杂的流程。对于图 3 所示的两组并发活动执行所形成工作流,其 BPEL4WS 表示的过程建模如表 1 所示。Sa 和 Sb 是两个并发执行的顺序序列,链接 L 表示活动 A2 只能在活动后执行。

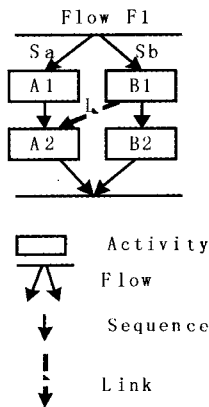


图 3 工作流过程建模的图形化表示

表 1 BPEL4WS 表示的工作流过程建模

```

<flow name="F1">
  <links>
    <link name="L"/>
  </links>
  <sequence name="Sa">
    activity B1
    <source linkName="L"/>
    activity B2
  </sequence>
  <sequence name="Sb">
    activity A1
    activity A2
    <target linkName="L"/>
  </sequence>
</flow>
    
```

4.1.2 应用分析

文[8]分析了基于工作流的服务组合项目:METROR-S (METROR for Semantic Web services)。METROR-S 是由 LSDIS 实验室研究开发的项目,关注工作流管理技术及语义 Web 服务的工作流管理。该项目首先采用 BPEL4WS 作为工业标准,设计抽象的 Web 服务组合过程,包括使用 BPEL4WS 提供的控制流结构来创建过程流、在过程中通过服务模板来表示每个服务需求、指定过程约束以达成优化等;其次对给定过程和服务模板,服务发现引擎将返回和该服务

模板匹配的一个服务集合,根据约束关系选择最优的待组合服务;最后在运行时,将抽象的过程和服务模板转换成一个可执行的 Web 过程,即自动将 Web 服务绑定到一个抽象的过程,当一个最优集被选中并被执行时,表明实现了基于工作流的语义 Web 服务的动态组合。该项目的关键特性是,在语义 Web 过程的整个生命周期中使用了语义(使用 OWL-S 对 Web 服务语义描述包括数据语义、功能语义等),以表示语义 Web 服务中的复杂的交互。另外,在文[12]中,Wang 等人提出了基于动态工作流的设计阶段和运行阶段的服务组合,

解决了运行时过程变化问题,并且设计了 workflow 本体,以在设计阶段实现模块重用。但该方法的应用范围有限,没有实现跨企业 Web 服务动态组合。由上述分析可知,基于工作流的狭义动态 Web 服务组合主要存在的问题是自动性不够。

4.2 基于 AI 规划的动态服务组合

在 Web 服务组合上,工业界倾向于采用 BPEL4WS 建模服务流程,而语义网研究团体则吸取 AI 规划的思想以实现 Web 服务组合。

4.2.1 AI 规划组合原理

Russel 和 Norvig 在 1995 年将 AI 规划刻画为一种问题求解。一个规划问题 P 形式化地定义成一个三元组: $\langle I, G, A \rangle$ 。I 是初始状态的完全描述, G 是最终状态的部分描述, A 是可执行的行动的集合。如果 S 能从初始状态 I 到达最终状态 G, 则行动序列 S 是一个规划。一个规划器通过评价行动和在可能的世界状态或在偏序空间中搜索来发现规划。

OWL-S 的出现为基于 AI 规划的组合方法提供了可能。在 AI 规划时,将 Web 服务看成 AI 中的动作。AI 规划适合于动态服务组合,并且在给定个初始状态、一个明确的目标和一系列可能的状态转移时,可以合成一个复杂的行为。在服务组合时,将 Web 服务描述映射为动作的形式化描述,在 Web 服务空间中以构造 Web 服务组合为目标,通过形式化的推理来得出 Web 服务的组合序列,动态地形成服务组合方案。AI 方法形式化地表示了本体环境下 Web 服务的能力,使用面向目标的技术对服务组合进行推理规划^[10]。近年来, McDermott 于 2002 年^[13]、Srivastavagf 和 Koehler 于 2003 年^[14]、Sirin 和 Parsia 于 2003 年^[15]研究了将 AI 规划应用到 Web 服务组合以达到既定目标的可能性及边界问题。

Web 组合规划问题不同于传统的 AI 规划问题,表现在如下几个方面^[16]:关于世界的信息是不完备的并且是不断变化的;领域知识(Web 服务描述)是由不同机构开发的并遍布在 Web 上;规划的产生涉及到多个其它 agents(即服务提供者)之间的信息交互和通信。在这种情况下,创建一个组合服务以实现一个目标,需要规划和执行的交替进行,并且在规划的过程中同时收集到关于世界状态和关于规划算子的领域知识,即存在 Web 服务的分布性、动态性和信息的不完备性。Sirin 指出 AI 规划技术在不完全信息下,通过扩展可以自动产生有用的、有目标的服务组合^[16]。

基于 AI 规划的动态服务组合框架由 Web 服务描述、用户需求描述、领域本体信息、AI 规划过程及转换器等部分组成,如图 4 所示。客户目标通常编码形成初始条件和领域本体信息作为 AI 规划的输入;Web 服务描述被映射成动作定义后作为规划 AI 规划的输入;商业逻辑提供了规划集合的约束^[6];Web 本体用于推理以推动自动组合任务的实现。

4.2.2 具体应用分析

AI 规划有多种不同的形式化方法来表示规划域,主要有 HTN 规划、情境演算、基于规则的规划等方法。

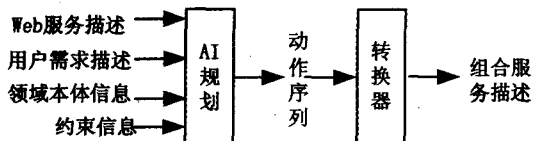


图 4 基于 AI 规划的 Web 服务组合框架

1) HTN 规划(Hierarchical Tack Network)

HTN 规划采用分层分解的方法将复杂问题分层分解,将

高层行动分解为一个低层的偏序级的规划方法^[17]。基于 HTN 的规划系统在执行服务组合时将用户的需求目标任务分解为子任务的集合,子任务再分解成更小的子任务,直到所有的子任务仅包含原子 Web 服务。在每一轮任务的分解过程中,都会检验是否违反给定的约束条件(如子任务数不能超过一定数目)。如果在违反任何给定的约束条件下,用户的需求目标任务能被成功分解成原子任务集,则规划问题成功求解。

HTN 技术应用于 Web 服务组合领域的思想最初是马里兰大学 J. Hendler 及 E. Sirin 等人在 2003 年提出的^[18],开发的典型系统为 SHOP2^[18],随后 D. Nau, E. Sirin 等人促进了 SHOP2 系统的发展^[19,20]。该方法的核心思想是:将基于 OWL-S 描述的服务组合过程变换到一个层次任务网络,将用 OWL-S 描述的 Web 服务映射到 SHOP 规划域,同时关注信息的不完备性、规划执行与规划过程的交互及在规划过程中如何处理本体的表达性和扩展到推理过程^[16],并基于描述逻辑的 OWL 推理器,以发现 Web 服务组合和基于用户约束过滤结果,实现了动态自动服务组合。文^[16]指出,OWL-S 描述语言给出很多关于服务的功能描述信息,可以将这些描述映射到规划算子(operator)。文^[20]给出了 OWL-S 过程描述映射到 SHOP 规划域的算法,其思想是:

- 带有效果(effects)的每个原子服务被编码成 SHOP2 的一个算子(operator);
- 带有输出的每个原子过程被编码成 SHOP2 的一个算子,该算子的前提包含了对提供信息的 Web 服务的一个调用;
- 每个简单(simple)或复合(composite)过程被编码为一个或多个 SHOP2 方法。这些方法将告知如何分解一个 HTN 任务,以表示简单或复合过程。

文^[21]给出了 SHOP2 系统中 Web 组合的一个规划算法。SHOP2 系统在规划时能成功实现收集信息,需在初始描述时明确详述提供信息的 Web 服务,所以缺少灵活性。因为现实中更多的情况是领域并不包含这样的描述,而是在需要时由规划器本身计算出何时和如何收集信息。为此,Ugur Kuter 等人将 SHOP2 系统改进为 ENQUIRER 系统,提出了当初始状态不完备时的 ENQUIRER 算法,扩展了 SHOP2,使得在实现规划时收集需要的信息^[19]。但是,该方法并没有解决 SHOP2 存在的另外一个问题:不支持 OWL-S 复合结构中的 Split 和 Split-join 控制结构,即 SHOP2 不支持并发控制^[16]。

HTN 规划方法在描述了预先定义的活动之后,使得服务描述和 HTN 任务网络之间的变换相当自然。HTN 规划的优点是能够处理非常大的问题领域,支持模块化,易于扩展,尤其适合服务的自动组合^[21]。该方法的不足之处是需要提供明确的任务描述规划器,而在动态的环境中可能难以获得任务描述。

2) 情境演算

情景演算属于一阶逻辑语言规划方法,是关于状态、动作和动作作用于状态结果的形式化谓词演算。在情境演算中,世界上的所有变化都是动作执行的结果。Narayanan 和 McIlraith 于 2002 年提出了一个形式化的方法,将 OWL-S 转换到情境演算,将 Web 服务组合问题转换为一个满足目标属性要求的程序执行问题^[22]。该方法采用 OWL-S 对 Web 服务进行语义描述,包括各个操作的语义信息、参数的语义信息

和服务的语义信息。在实现动态服务组合规划时,每一个原子流程的前提条件表示为情境演算中活动的一个前提条件,服务的语义描述模型转换成情境演算下的公理。当有 n 个前提条件时: $\text{Poss}(a, s) \rightarrow \pi_1 \wedge \pi_2 \wedge \pi_3 \cdots \wedge \pi_n$, 其中 $\pi_i (i \in [1, n])$ 为状态 s 下的前提条件。此外,活动在执行前需要知道输入参数的具体值,

$$\text{Poss}_k(a, s) \rightarrow \text{Kref}(\varphi_1, s) \wedge \text{Kref}(\varphi_2, s) \wedge \text{Kref}(\varphi_3, s) \cdots \wedge \text{Kref}(\varphi_m, s),$$

$\varphi_j (j \in [1, m])$ 为输入信息, s 表示状态。根据完备性假设,当原子流程的所有前提完全描述了活动完成需要的前提条件,则可以表示为情境演算中活动的前提公理:

$$\text{Poss}_k(a, s) \rightarrow \pi_1 \wedge \pi_2 \wedge \pi_3 \cdots \wedge \pi_n \wedge \text{Kref}(\varphi_1, s) \wedge \text{Kref}(\varphi_2, s) \wedge \text{Kref}(\varphi_3, s) \cdots \wedge \text{Kref}(\varphi_m, s),$$

通过对该表达式真值的判断来确定该服务是否可以被调用。只有为真时,活动才能被调用^[23]。此处当一阶逻辑表达式为真时,活动 a 才被执行。

3) 基于规则的规划

Medjahed 和 Athman Bouguettaya 于 2003 年提出了一种从高层次声明描述产生组合服务的技术,使用组合规则来决定两个服务是否可以组合^[24]。Liu 等人在 2005 年提出一种最小执行代价的基于规划的服务组合方法^[25]:采用规则对 Web 服务进行建模,使用参数本体来消除语义冲突,定义并使用一个演绎网络和一个后向演绎方法以发现所有的组合规划并选择一个最优规划。

AI 规划实现 Web 服务组合的特点是:规划的性质受限于偶然规划。AI 规划时的对象不能在初始时得到,而是在运行时产生。这样导致的问题是:规划时有可能有很多分枝,但是用户只是对特定的分枝感兴趣。如何快速搜索到特定的规划分枝是目前面临的问题之一。AI 规划实现 Web 服务组合还存在不少问题,正如 J. Hendle 所言, AI 规划和语义 Web 服务组合本身是两个不同的问题,要建立两者之间的映射,还有很多问题需要解决,纯粹依赖计算机自动进行 Web 服务的组合至少在目前尚未成熟。

4.3 其它动态 Web 服务组合策略

在其它动态 Web 服务组合策略方面,国内外不少研究者针对不同的问题提出了若干对策。

刘必欣等人针对开放环境对大规模服务组合的可伸缩性及自治性的需求,提出基于角色的分布式动态服务组合方法^[2]。该方法通过将全局定义的流程模型划分为各个角色的本地流程模型,从而使得组合服务的控制逻辑能够依据执行活动的角色分布到多个结点,并在服务结点之间直接交换数据。但该方法没有基于组合服务的异常建模,没有分析异常处理逻辑的划分及分布式错误恢复技术和分布式结构带来的开销问题。

郑永清等人提出了一种基于匹配策略的动态 Web 服务组合方法^[26]。利用已有的业务流程技术 Web 和服务技术利用匹配的思想,采用反向链算法从组合服务的输出参数开始逐步得到一组合适的服务,使其满足组合要求。在服务执行时,可以根据 Web 服务的状态进行动态调整,自动地将原子服务组合成满足要求的组合服务。但该方法是基于关键字匹配的服务匹配和服务组合,不支持语义匹配,必然导致误匹配和漏匹配的发生。

李景山等人针对普及计算环境,提出了基于接口语义的服务描述、基于语义的服务匹配算法、预定义方案的多实例选

择和执行及组合服务的实例生成算法等,以灵活地、动态地组合出更加复杂的服务^[27]。该算法能有效地利用系统的资源,降低服务设计和实现的复杂性,但该方法缺乏对 Web 服务组合正确性的验证。

韩永国等人提出将组合方案表示为一个有向无环图的动态服务组合方法^[7]。该方法以目标服务的输入为指标集,将服务表示成图的节点,服务交互表示成边,并给出了候选组合方案的构造算法;以服务费用为测度,通过费用转移,提出了基于经典 Dijkstra 算法的最优组合服务算法。但该方法没有涉及服务组合时的服务的语义和服务的安全性问题。

Rao 等人^[28]提出了一种线性逻辑定理证明的方法来实现在语义 Web 服务组合。该方法使用语义 Web 服务语言来表示服务的外在信息,通过逻辑方法将服务内在表示成线性逻辑(LL),利用线性逻辑形式化地定义 Web 服务的属性,包括参数、状态和非功能属性,并使用 Pi-演算来表示组合服务的过程模型。但是该方法存在如何降低搜索空间,以提高 Web 服务组合效率的问题。

5 动态 Web 服务组合研究热点和发展趋势

首先是动态 Web 服务组合对自动服务集成的支持。Web 服务的动态创建和更新导致难以手动分析和产生组合设计的问题,有必要将本体论引入到 Web 服务的描述中,使 Web 服务具有充足的语义信息,以减少 Web 服务发现、匹配和组合中的不确定性。但是目前 Web 可用的 Web 服务都是 WSDL 描述而不是语义描述,所以利用本体论领域模型,实现动态、自动 Web 服务是目前的一个重要和热点研究课题。

其次是动态 Web 服务组合对信息的不完备性、领域复杂性和目标复杂性的支持。理想情况下,Web 服务通过恰当的服务发现机制在动态环境下有效地定位服务,服务组合过程应当在最少用户干预的情况下随着环境的变化而变化。但是目前 Web 服务组合技术对信息的不完备性、领域复杂性和目标复杂性的支持不够。组合的服务依赖于各个分布的、异构的服务才能实现协同运行。而为了完成某一组合过程而涉及的服务可能是处于不断变化中的,同时用户的需求也可能发生变化,所以在服务的协同过程中需要提供动态调整和可靠性保障机制来解决这种不确定性,保证服务协同模型的正常运行,提高协同模型对上述变化的适应能力。

再次是动态 Web 服务组合对组合模型正确性验证的支持。目前很多的服务组合缺少对正确性的验证,不能避免组合的服务中是否存在死锁等因素。由于组合后的服务的正确性是服务的一个重要保证,正确性验证将是一个重要的研究方向。

小结 动态 Web 服务组合是 Web 服务领域中一个重要发展方向。通过对国内外动态服务组合的分析可知,动态 Web 服务组合研究是一个热点和难点问题。本文主要比较了两类动态 Web 服务组合方法:工业上的基于工作流方法、语义网领域中基于 AI 规划方法,并对这两类方法的典型应用问题进行了详细分析。另外,实现动态 Web 服务组合时,有很多针对具体问题的解决策略,这些策略在动态 Web 服务组合中起着重要作用。目前,动态 Web 服务组合已经有较深入的研究,我们下一阶段的研究目标是着重于动态 Web 服务组合及其自动组合机制,并关注组合模型的正确性验证问题。

(下转第 24 页)

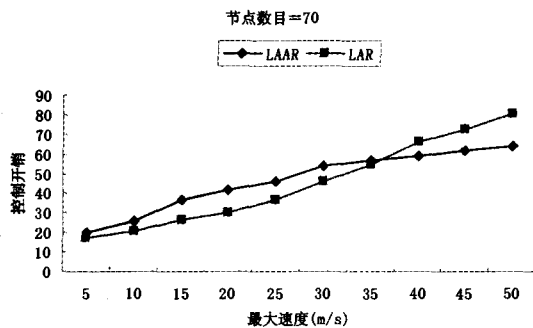


图 4 控制开销随节点运动速度变化示意图

参考文献

- 1 史美林. 自组网路由协议综述. 通信学报, 2001
- 2 Johnson M D. Dynamic Source Routing in Ad hoc Wireless Networks. Mobile Computing, 1996
- 3 Charles B P, Perkins E. Highly Dynamic Destination Sequenced

Distance Vector Routing for Mobile Computer. In: SIGCOMM, 1994

- 4 Charles R E M, Perkins E. Ad hoc on Demand Distance Vector Routing. In: IEEE WMCSA, 1999
- 5 Ivan Stojmenovic R J. Position-based Routing in Ad hoc Networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 40
- 6 Ko Y-B N H V. Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks. In: Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, 1998
- 7 Zhang B. Position-aided on Demand Routing Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. In: ICC, 2004
- 8 Basagni S, Chlamtac I, Syrotiuk V R, et al. A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM). In: MOBICOM, 1998
- 9 Su S J L W, Gerla M. Mobility Prediction in Wireless Networks. 2000
- 10 Blazevic S G I S L. Position Based Routing Algorithm for Ad Hoc Networks: a Taxonomy. 2004
- 11 K E. Understanding GPS: Artech House, 1996
- 12 Fall K V K. ns notes and documentation. UC Berkeley, LBL, USC/ISI and Xerox PARC, 1997

(上接第 7 页)

参考文献

- 1 McIlraith S, Narayanan S, Paolucci I, et al. OWL-S: Semantic Markup for Web Services. <http://www.daml.org/services/owl-s/1.1/overview/>
- 2 刘必欣, 王玉峰, 贾焰, 等. 一种基于角色的分布式动态服务组合方法. 软件学报, 2005, 16(11): 1659~1687
- 3 Christensen E, Curbera F, et al. Web Services Description Language (WSDL) 1.1. <http://www.w3.org/TR/wsdl>, 2001
- 4 Martin D, Burstein M, Lassila O, et al. OWL-S: Semantic Markup for Web Services. <http://www.daml.org/services/owl-s/1.1/overview/>
- 5 Roman D, Keller U, Lausen H, et al. Web Service Modeling Ontology (WSMO). <http://www.wsmo.org/2004/d2/v1.0/20040920/>. 2004
- 6 Rao Jinghai, SU Xiaomeng. A Survey of Automated Web Service Composition Methods. In: Semantic Web Services and Web Process Composition-First International Workshop, SWSWPC, 2004. 43~54
- 7 韩永国, 孙世新. 动态服务组合构造与最优组合服务算法研究. 计算机科学, 2005, 32(12): 104~105, 139
- 8 Aggarwal R, Verma K, et al. Dynamic Web Service Composition in METEOR-S [EB/OL]. <http://lsdis.cs.uga.edu/lib/download/iecc-scc-2004.pdf>, 2004
- 9 Haiyan S, Wang Xiaodong, Zhou Bin, et al. Research and Implementation of Dynamic Web Services Composition. In: APPT 2003, LNCS 2834, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. 457~466
- 10 Agarwai V, Dasgupta K, et al. A Service Creation Environment Based on End to End Composition of Web Services. In: WWW2005, 2005. 128~137
- 11 Woheid P, van der Aalst W M P, Dumas M, et al. Analysis of Web Services Composition Languages: The Case of BPEL4WS [EB/OL]. <http://is.tm.tue.nl/research/patterns/download/bpel-er.pdf>. 2004
- 12 Wang S, Shen W, Hao Q. Agent based workflow ontology for dynamic business process composition. Computer Supported Cooperative Work in Design. In: 2005. Proceedings of the Ninth International Conference on, Volume 1, 2005. 452~457
- 13 McDermott D. Estimated-regression planning for interactions with web services. In: Proceedings of the 6th International Conference on Artificial Intelligence Planning and Scheduling. AAAI Press, 2002
- 14 Srivastava B. Automatic Web services composition using planning. In: Proceedings of 3rd International Conference on Knowl-

edge-based Computer Systems, 2002. 467~477

- 15 Sirin E, Parsia B, Wu Dan, et al. HTN Planning for Web Service Composition Using SHOP2. In: Proceedings of 2nd International Semantic Web Conference (ISWC2003), Sanibel Island, Florida, USA, 2003. 20~23
- 16 Sirin E. Automated Composition of Web Services Using AI Planning Techniques. <http://www.cs.umd.edu/Grad/scholarlypapers/papers/aiplanning.pdf> [EB/OL], 2004
- 17 Russell S, Norvig P. Artificial Intelligence-A Modern Approach. Second Edition [M]. Pearson, 2004. 1~46
- 18 Sirin E, Parsia B, Wu Dan, et al. HTN Planning for Web Service Composition Using SHOP2. In: Proceedings of 2nd International Semantic Web Conference (ISWC2003), Sanibel Island, Florida, USA, 2003. 20~23
- 19 Kuter U, Sirin E, Parsia B, et al. Information gathering during planning for Web Service composition. In: Web Semantic, Science, Services and Agents on the World Wide Web, 2005. 183~205
- 20 Wu D, Parsia B, Sirin E, et al. Automating DAML-S Web services composition using SHOP2. In: Proceedings of 2nd International Semantic Web Conference (ISWC2003), Sanibel Island, Florida, October 2003
- 21 Sirin E, Hendler B J, et al. HTN planning for Web service composition using SHOP2. Web Semantic, Science, Services and Agents on the World Wide Web, 2004. 337~379
- 22 Narayanan S, McIlraith S A. Simulation, verification and automated composition of Web services. In: Proc. of the 11th Int'l World Wide Web Conf WWW2002. Honolulu: ACM, 2002. 77~88
- 23 Sun Haiyan, Wang Xiaodong, Zhou B, et al. Research and Implementation of Dynamic Web Services Composition. In: APPT 2003, LNCS 2834, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. 457~466
- 24 Medjahed B, Bouguettaya A, Elmagarmid A K. Composing Web Services on the Semantic Web. The VLDB Journal The International Journal on Very Large Data Bases, 2003, 12(4): 333~351
- 25 Liu Jiamao, Fan Chenhui, Gu Ning. Web services automatic composition with minimal execution price Web Services, 2005 (ICWS2005). In: IEEE International Conference, 2005. 302~309
- 26 郑永清, 梁伟. 一种基于匹配策略的 Web 服务组和方法. 计算机科学, 2005, 32(9): 127~130
- 27 李景山, 廖华明, 侯紫峰, 等. 普及计算中基于接口语义描述的动态服务组和方法. 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1124~1134
- 28 Rao Jinghai, Kungas P, Matskin M. Composition of semantic Web services using linear logic theorem proving. Information System, 2006(31): 340~360