

物联网服务发现初探:传统SOA的可行性和局限性*

魏 强¹, 金 芝^{1,2+}, 李 戈², 李力行¹

1. 中国科学院 数学与系统科学研究院, 北京 100190

2. 北京大学 高可信软件技术教育部重点实验室, 北京 100871

Preliminary Study of Service Discovery in Internet of Things: Feasibility and Limitation of SOA*

WEI Qiang¹, JIN Zhi^{1,2+}, LI Ge², LI Lixing¹

1. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Key Laboratory of High Confidence Software Technologies of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

+ Corresponding author: E-mail: zhijin@pku.edu.cn

WEI Qiang, JIN Zhi, LI Ge, et al. Preliminary study of service discovery in Internet of things: feasibility and limitation of SOA. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2013, 7(2): 97-113.

Abstract: In IoT (Internet of things) based on SOA (service-oriented architecture), functionalities of devices are encapsulated as services with a unified and common interface to be provided to the outside world. However, due to the massive, mobility and highly resource-constrained natures of devices, the unreliability of wireless network in IoT, services provided by devices have different characteristics with traditional Web services, and existing Web service discovery approaches can't satisfy the requirements of service discovery in IoT. This paper introduces some typical Web service discovery approaches firstly from two aspects: Web service discovery architecture and Web service matchmaking strategy. Then combining characteristics of service providing in IoT, it analyzes the problems of Web service discovery in IoT and possible solutions from four aspects: scalability, limited resource, heterogeneity and dynamic environment. Finally, it discusses some problems of Web service discovery in IoT which need be resolved.

Key words: Web service; service discovery; Internet of things (IoT)

* The National Grand Basic Research 973 Program of China under Grant Nos. 2009CB320701, 2011CB302704 (国家重点基础研究发展规划(973)).

Received 2012-10, Accepted 2012-12.

摘要:基于SOA(service-oriented architecture)的物联网(Internet of things, IoT)把设备的功能服务化,以一种统一和通用的接口向外界提供服务。由于物联网中设备的海量性、移动性和资源高度受限性,以及无线网络自身的不可靠性,设备服务与传统的Web服务相比具有不同的特点,现有的Web服务发现方法不能有效地满足物联网中服务发现的需求。从Web服务发现体系结构和匹配策略两个方面对典型的Web服务发现方法进行了分析;结合物联网中服务提供的特点,从可扩展性、资源有限性、异构性和环境的动态变化性四个方面,分析了将Web服务发现方法应用于物联网服务提供中所面临的问题,并讨论了可能的解决思路;探讨了物联网中服务发现需要解决的问题。

关键词:Web服务;服务发现;物联网(IoT)

文献标志码:A **中图分类号:**TP311

1 引言

物联网(Internet of things, IoT)是新一代信息技术的重要组成部分,是物物相连的互联网。它将互联网扩展到物理世界中,通过射频识别(radio frequency identification, RFID)、传感器、全球定位等信息传感技术,按约定的协议,把物理世界中的物体与互联网相连接,进行信息交换和通信,从而实现对物体的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理。

物联网这个概念,最早是在1999年由MIT Auto-ID中心的Ashton教授在研究RFID时提出的。然后,在2003年EPC(electronic product code)研讨会上,Auto-ID中心给出了自动识别和跟踪供应链中货物物流的EPC网络的初步设想,使得物联网开始受到业界的广泛关注。

随着技术不断进步,国际电信联盟(ITU)发布了《ITU互联网报告2005:物联网》报告,正式提出了物联网概念。在这个报告中,物联网的范围有了较大的拓展,不再局限于基于RFID技术的物联网,而是泛指通过使用自动识别技术、传感器和执行器等,实现物理世界和虚拟世界的无缝集成的泛在网络。

与互联网相比,物联网具有以下特征:

(1)集成RFID、传感器等多种感知技术,自动获取具有实时性的数据和信息,及时捕获物理世界中物体的动态变化。

(2)物联网是一种建立在互联网上的泛在网络,具有多样化的终端设备和更大的网络规模,虽然其技术基础和核心仍是互联网,但是它可以通过各种有线和无线网络与互联网融合,使物理世界中的物

体能实时互联互通。

(3)物联网不仅能感知物理世界,本身还具有智能处理的能力,能够对物体实施智能控制。

(4)物联网是与许多关键领域物理设备相关的网络,必须保证其稳定性;部分物联网系统还需要具有高可靠性;其绝大多数应用都涉及到个人隐私或企业机密,故还需要提供严密的安全性和可控性。

物联网的技术架构主要包括四层,即设备感知层,网络层,应用层,以及安全、隐私和信任层,如图1所示。设备感知层由各种传感器和传感器网关构成,是物联网识别物体、采集信息的来源,其主要功能是识别物体和采集信息。网络层由各种私有网络、互联网、有线和无线通信网、网络管理系统和云计算平台等组成,负责传递和处理感知层获取的信息。应用层是物联网和用户(包括人、组织和其他系统)的接口,它与行业需求结合,实现物联网的智能应用,比如环境监控、智能城市、智能医疗、智能物流和智能家居等。安全、隐私和信任层,负责解决数据安全和用户隐私保护问题。



Fig.1 The technology architecture of IoT

图1 物联网技术架构

面向服务架构(service-oriented architecture, SOA)是一种组件模型,它将异构平台上的应用程序的不同功能单元封装为具有良好定义接口和规范的服务,并以松耦合的方式整合在一起,能有效地解决资源重用和异构组件之间的互操作性问题。目前一些研究^[1-4]将其思想引入到物联网中,把物理世界中各个设备的功能服务化(称为现实世界服务或设备服务),以一种统一和通用的接口向外界提供其自身的功能,使各种异构设备之间,设备与传统 Web 服务之间能够很好地进行交互,从而实现物理世界与虚拟世界的无缝整合。

基于 SOA 的物联网^[4]架构在物联网技术架构的网络层和应用层之间引入服务层和服务组合层。其中,服务层负责将各种异构设备的功能封装为服务;而服务组合层负责将设备服务、传统 Web 服务进行组合,以满足复杂的应用需求。基于 SOA 的物联网的核心价值在于智能服务提供,在实时数据和信息感知的基础上,通过对数据和信息的分析处理,智能地部署需要的服务。其智能型体现在:动态感知、实时跟踪和定位、基于位置信息的服务发现和部署。

在基于 SOA 的物联网中,服务由设备服务和传统的 Web 服务两部分构成。与传统的 Web 服务相比,设备服务具有不同的特点。首先,设备服务是嵌入在物理设备中,且能够提供实时数据反映物理世界现状的服务,而传统的 Web 服务仅仅是封装了业务功能的虚拟实体;其次,设备服务部署在资源受限的设备中(比如有限的计算和存储能力、带宽和电池等),而传统 Web 服务部署在资源丰富的计算机中;再次,由于物联网中设备的资源有限性和移动性,以及无线网络自身的不可靠性,设备服务往往处于高度动态变化的环境中,服务经常消失或重新出现,而传统的 Web 服务变化相对不频繁。

随着 RFID、无线传感技术、嵌入式设备和移动智能设备技术的快速发展和物理设备的廉价化,越来越多的物理设备将被连接到物联网中。如何从海量的、资源受限的异构设备中发现具有特定功能的服务来满足用户的需求,显得越来越重要。由于设备服务和传统的 Web 服务相比,具有不同的特点,传统的 Web 服务发现方法不能有效地满足物联网服务发

现的需求。本文试图通过结合传统的 Web 服务发现方法和物联网中服务提供的特点,分析将 Web 服务发现方法应用于物联网服务发现中(特别是设备服务发现)可能面临的问题,并探讨相应的解决思路。

本文组织结构如下:第2章从 Web 服务发现体系结构和服务匹配策略两个方面,分析典型的 Web 服务发现方法;第3章结合物联网中服务提供的特点,分析将 Web 服务发现方法应用于物联网服务提供中可能面临的问题和相应的解决思路;第4章总结全文,并简单讨论物联网中服务发现的前景和挑战。

2 典型的 Web 服务发现方法

W3C 将 Web 服务发现定义为查找满足特定功能的 Web 服务的行为,它包含一组服务描述匹配准则,最终目的是找到满足用户请求的 Web 服务。Web 服务发现包含两个活动:服务匹配和服务选择。其中,服务匹配是服务发现的核心,主要判断两个服务是否具有相同的功能;当获取到匹配的服务集后,服务选择过程根据 Web 服务的上下文或者 QoS (quality of service) 等因素对匹配的服务集进行过滤,并按照质量从高到低进行排序。

下面从 Web 服务发现体系结构和服务匹配策略两个方面对典型的 Web 服务发现方法进行分析。

2.1 Web 服务发现体系结构

在传统的 Web 服务发现方法中,Web 服务发现体系结构主要分为三类:集中式体系结构、分布式体系结构和混合式体系结构。下面分别介绍这三种体系结构。

2.1.1 集中式体系结构

基于 UDDI (universal description discovery and integration) 的服务发现方法是典型的采用集中式体系结构的服务发现方法。采用该体系结构的服务发现流程,如图2所示。服务提供者首先向 UDDI 服务注册中心发布服务;然后服务请求者通过 UDDI 服务注册中心查找相应的服务;接着 UDDI 服务注册中心将匹配的服务信息返回给服务请求者;最后服务请求者直接调用服务。在该体系结构中,服务发布和服务发现都仅依赖唯一的 UDDI 服务注册中心。

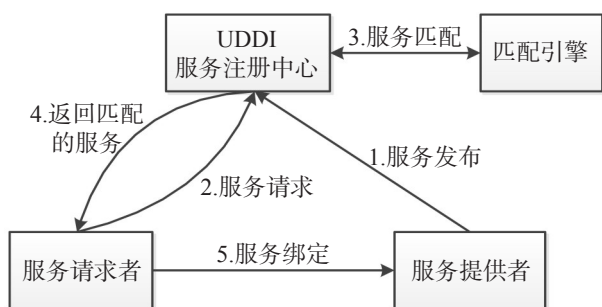


Fig.2 The centralized architecture of Web service discovery

图2 Web 服务发现集中式体系结构

集中式体系结构的主要特点是,服务发现仅依赖于单个服务注册中心,服务发现过程简单。但是其存在单点失败问题,而且随着服务请求数量和服务数量的增加,UDDI 服务注册中心成为系统瓶颈,可扩展性较差。

2.1.2 分布式体系结构

分布式体系结构,即P2P(peer to peer)体系结构,主要被用于移动网络环境中的服务发现,如图3所示。在该体系结构中,没有服务注册中心节点,每个服务提供者的服务都存储在本地图,而且每个节点(peer)既可以是服务提供者,也可以是服务请求者或者两者都是。服务请求者采用广播的通信机制将服务请求发送到P2P网络中,服务提供者将满足服务请求者需求的服务返回给服务请求者;然后服务请求者根据自己的服务匹配算法来进行相应的服务选择和服务调用。因为主要采用广播的通信机制进行服务发现,所以通信开销较大。为了减少服务发现的通信开销,Nidd^[5]采用多播而非广播的机制来限制服务请求范围;Chakraborty 等人^[6]提出了限制搜索步数和选

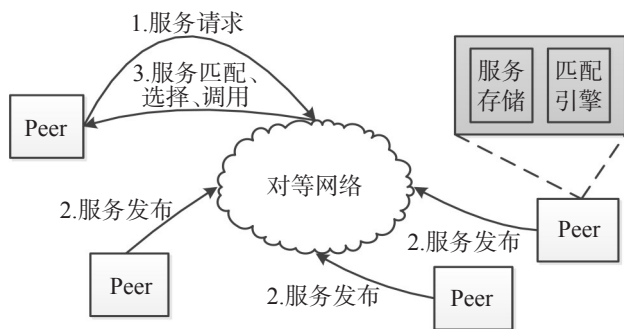


Fig.3 The distributed architecture of Web service discovery

图3 Web 服务发现分布式体系结构

择性转发的服务请求机制,使得服务请求总是被转发给具有最大可能性满足请求者需求的服务提供者。

分布式体系结构的主要特点是:(1)具有很好的可扩展性,且不存在单点失败的问题;(2)能很好地支持具有可移动节点环境中的服务发现;(3)能保证服务状态的实时性;(4)每个服务请求者都可以实现自己特有的服务匹配算法,而不受服务注册中心的约束。但是与集中式体系结构相比,分布式体系结构存在服务发现通信开销较大的问题,而且由于缺乏服务注册中心,服务发现过程较复杂。

2.1.3 混合式体系结构

混合式体系结构,也称为基于目录的分布式体系结构,它充分利用了集中式和分布式两种体系结构的特点。在混合式体系结构中,多个peer形成一个组,它们都将服务发布到super-peer,即目录节点中。super-peer除保存组中所有peer发布的服务信息外,还保存其他super-peer中的服务信息。基于该体系结构的服务发现流程,如图4所示。当某个peer向其super-peer发出服务请求时,super-peer首先检查组中是否有匹配的服务,若存在满足需求的服务,则直接将匹配的服务返回给服务请求者;否则super-peer将服务请求转发给其他可能满足需求的super-peer。在获取到P2P网络中其他super-peer发布的满足服务请求的服务信息后,服务请求super-peer根据其匹配规则返回匹配的服务给请求节点。

混合式体系结构的主要特点是,它在分布式体系结构的基础上,将多个节点分组,减少了全局服务发现的可能性,从而降低了服务发现的通信开销和响应时间。同时,它还能很好地应对随着服务数量和服务请求量增加而带来的可扩展性问题。但是其服务发现过程较复杂,而且在动态变化的环境中,还需要解决节点分组和目录节点选择等问题。

2.2 Web 服务匹配策略

服务匹配是服务发现的核心过程,它主要涉及两个方面:匹配元素和匹配策略。目前的服务发现方法中匹配的元素主要包括以下几种:(1)服务的输入和输出;(2)前件和效果(或后件);(3)非功能属性,比如QoS、服务成本、服务的位置或者服务请求者的偏好、时空信息等;(4)其他描述信息,比如服务名

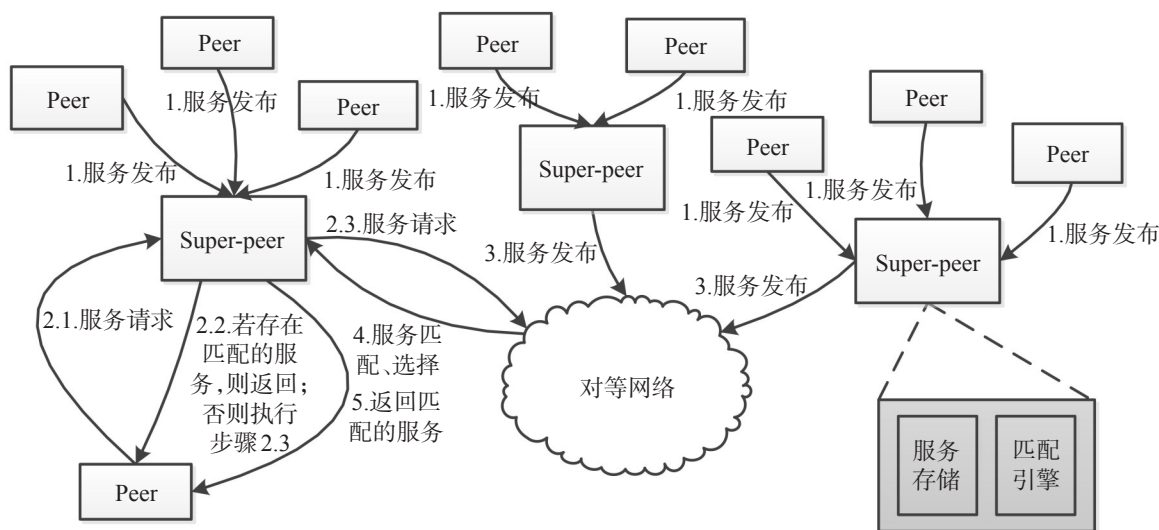


Fig.4 The hybrid architecture of Web service discovery

图4 Web 服务发现混合式体系结构

称、服务类型、操作名称和数量、服务的文本描述和 WSDL (Web services description language) 描述等^[7-8]。而服务匹配策略主要分为四大类: 基于语法的服务匹配策略, 基于语义的服务匹配策略, 混合的服务匹配策略和注重实效的服务匹配策略。下面分别介绍这些服务匹配策略。

2.2.1 基于语法的服务匹配策略

基于语法的服务匹配策略主要分为两类: 基于关键字的服务匹配策略和基于相似度的服务匹配策略。下面分别对这两种匹配策略进行介绍。

(1) 基于关键字的服务匹配策略

该匹配策略是实现 Web 服务发现最简单的一种匹配策略, 它主要通过比较服务请求关键字和服务名称或类别 (简单的字符串匹配) 来发现服务。传统的基于 UDDI 的服务发现算法是采用该匹配策略的代表性工作。由于基于关键字匹配的服务发现方法精确率较低, 一些工作使用同义词典 WordNet^[9] 来扩展服务请求, 以发现更多满足服务请求者需求的 Web 服务。

基于该匹配策略的服务发现算法简单, 且具有较好的响应时间。但是这种方法存在以下几方面的问题: 首先, 服务提供者和服务请求者往往使用不同的关键字描述服务能力和服务请求, 并且仅仅使用简单的关键字不能有效地描述服务能力和服务请求者的真实需求, 因此服务匹配的质量较低; 其次, 服

务匹配的质量还受限于自然语言本身存在的二义性问题, 比如一词多义、一义多词; 再次, 服务匹配结果数量众多, 但是其中大多数服务不满足服务请求者的真实需求; 最后, 该匹配策略缺乏对服务描述的语义理解, 不能实现服务发现的自动化。

(2) 基于相似度的服务匹配策略

该匹配策略主要是基于 Web 服务描述 (比如服务的语法结构、文本描述或者 QoS 等信息) 来计算服务之间的相似度。目前存在多种服务相似度计算方法, 比如基于信息检索的相似度计算^[10]、基于聚类算法的相似度计算^[11-12]、基于二部图的相似度计算^[13]。基于信息检索技术的服务相似度计算方法核心思想是, 使用信息检索的数据模型来表示 Web 服务, 即把一个 Web 服务描述表示成一个文本向量, 然后采用相应的相似度度量方法 (比如余弦相似度) 来计算服务之间的相似度。基于聚类算法的服务相似度匹配算法同样也是采用向量空间模型的思想, 将服务表示成向量, 然后利用聚类将具有不同 QoS 和相同功能的服务 (具体服务和实例) 抽象为一类服务 (抽象服务)。服务的匹配过程就是寻找与服务请求具有最小距离的服务类, 然后根据 QoS 来返回具体服务。基于图形匹配的服务相似度计算方法主要采用二部图匹配的思想。如图 5 所示, 服务请求 R 和服务 S 构成二部图的两个不同点集 V_R 和 V_S , 而 R 和 S

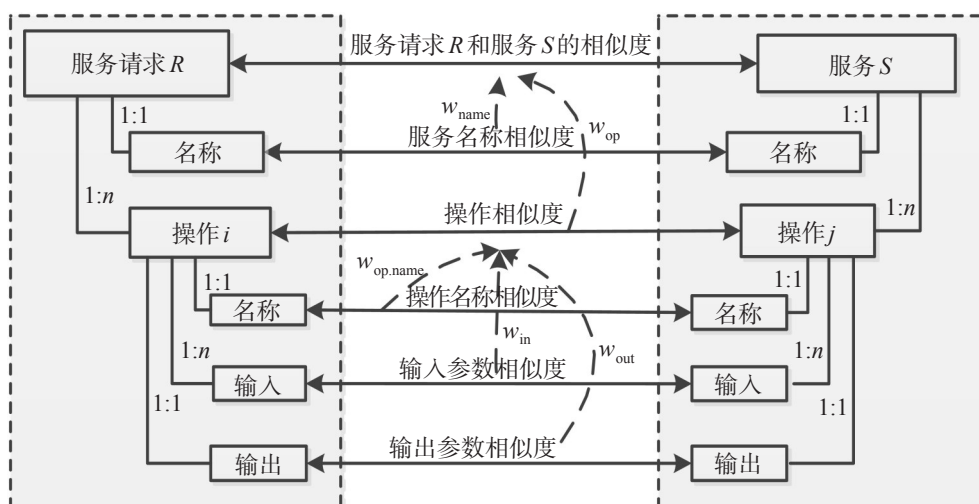


Fig.5 Web service matchmaking based on bipartite graph matching

图5 基于二部图的Web服务匹配

的各个组成部分之间的相似度及其所占的权重构成二部图的边集。这样,两个操作的相似度则可通过计算它们的输入、输出参数相似度与操作名称相似度的加权和来得到;然后, R 和 S 的相似度则为它们所有操作的相似度与服务名称相似度的加权和。

较基于关键字的匹配策略,基于相似度的匹配策略的精确率有所提高;然而服务发现还是基于服务的语法结构进行匹配,其服务匹配质量仍然受自然语言二义性问题的影响,且不能实现服务发现的自动化处理。

2.2.2 基于语义的服务匹配策略

该匹配策略又称为基于本体或逻辑推理的服务匹配策略,它主要是基于服务语义注释和特定领域本体来计算服务请求 R 和服务 S 的语义匹配度。通过采用某种语义Web服务技术,比如OWL-S(Web ontology language for service, <http://www.w3.org/Submission/OWL-S/>),WSMO(Web service modeling ontology, <http://www.w3.org/Submission/WSMO/>),SA-WSDL(semantic annotations for WSDL, <http://www.w3.org/2002/ws/sawsdl/>)等,为服务加入语义注释信息,然后在特定领域本体的基础上,通过机器理解服务的语义并进行逻辑推理,从而实现自动化的Web服务发现、调用和组合。一些代表性工作如下,基于语义Web技术的匹配框架^[14],基于环境本体的语义服务匹配^[15]等。Li和Horrocks^[14]引入了五种语义匹配度

来度量两个服务的关联度:

- (1)完全匹配(exact),表示服务 S 和服务请求 R 具有相同的功能或者说两者完全等价;
- (2)包含(plugin),表示服务 S 除了能够提供服务请求 R 所需的所有功能外,还包括一些额外的功能;
- (3)蕴含(subsume),表示服务 S 提供的所有功能只能满足服务请求 R 所需的部分功能;
- (4)相交(intersection),表示服务 S 提供的部分功能只能满足服务请求 R 所需的部分功能;
- (5)匹配失败(fail),表示服务请求 R 和服务 S 完全不匹配。

从服务请求者的角度来看,完全匹配和包含可以被认为服务 S 完全满足服务请求 R ;蕴含和相交可以被认为服务 S 部分满足服务请求 R 。

较基于语法的匹配策略,基于语义的匹配策略具有更好的精确率和召回率;同时,由于机器可以理解服务的语义信息,可实现服务发现自动化。但是其逻辑推理耗时,计算复杂度较高,而且不能有效区分两个具有相同语义匹配度的服务。

2.2.3 混合的服务匹配策略

该类方法的核心思想是提供多种不同的服务匹配策略来供用户选择,以适应不同的应用需求,或者结合不同的服务匹配策略进行多阶段匹配,以提高服务发现的精确率。为适应不同的应用场景,SAWSDL-iMatcher^[16]提供了多种服务匹配策略,用户

可以根据他们的偏好,选择不同的匹配策略进行服务发现。Li 等人^[17]采用基于关键字的匹配策略来发现不具备语义描述的 Web 服务,采用基于语义的匹配策略来发现基于 WSDL-S(<http://www.w3.org/Submission/WSDL-S/>)的 Web 服务。Klusck 等人^[18]和 Kiefer 等人^[19]采用基于相似度匹配和基于 OWL-S 语义匹配的混合匹配策略,不同点在于,前者采用的是基于信息检索的相似度匹配策略,而后者采用了多种文本相似度匹配策略。类似,Klusck 等人^[20]采用基于相似度匹配和基于 WSMO 语义匹配的混合匹配策略;Bianchini 等人^[21]先使用基于语义的匹配策略来计算服务请求 R 与服务 S 的匹配度,然后再使用基于图形的相似度匹配策略将 R 和 S 的相似度进行量化。

混合的服务匹配策略灵活度高,可以适应不同的应用场景,而且它还克服了基于语义匹配策略不能区分两个具有相同语义匹配度的服务的问题,提高了服务匹配精确率。但同时其计算复杂度也随之增加,需要根据不同的应用需求,在计算复杂度和服务匹配精确率两方面进行权衡。

2.2.4 注重实效的服务匹配策略

该匹配策略又称为上下文感知(context aware)的服务匹配策略。Dey 等人^[22]将上下文定义为用于描述实体情景(situation)的任何信息,其中实体可以是人、地理位置,或者与用户和应用程序之间交互相关的物体,包括用户和应用程序本身。

基于该匹配策略的服务发现方法的主要思想是,在上述匹配策略(基于语法的匹配策略、基于语义的匹配策略、混合的匹配策略)的基础上,强调根据用户上下文(比如设备能力、用户配置文件、偏好、位置和时间约束等)或服务上下文(比如服务类别、位置、可获取时间和成本等)来发现最合适的服务,以适应动态变化的环境和改善用户体验。文献[23-25]是基于该匹配策略的代表性工作。

基于该匹配策略的服务发现方法的关键在于如何对上下文进行建模和不确定性推理。常见的上下文建模方法^[26]包括:(1)键-值对模型(key-value pair model);(2)标记语言模型(markup scheme model);(3)图模型(graphical model);(4)面向对象模型(object oriented model);(5)基于逻辑的模型(logic

based model);(6)基于本体的模型(ontology based model)。其中,键-值对模型简单直观;标记语言模型能够有效地表示具有层次结构的上下文信息;基于本体的模型能够有效地表示具有复杂结构的上下文信息以及它们之间的依赖关系,并且具有良好的形式化表达能力和强大的推理能力。

由于采集到的上下文信息往往是未加工的,具有不精确性和不完整性,而且不同来源的上下文信息之间存在不一致的问题,需要不确定的推理方法从低层的上下文信息中获得高层的有实用价值的上下文来进行辅助决策。常见的上下文不确定性推理方法^[27]包括:(1)模糊逻辑(fuzzy logic);(2)概率逻辑(probability logic);(3)贝叶斯网络(Bayesian network);(4)隐马尔科夫模型(hidden Markov model)等。其中,模糊逻辑常用于不精确概念的捕获、表示和推理;概率逻辑主要适用于事件发生概率已知的场景;贝叶斯网络能够有效地刻画事件之间的因果依赖关系和多源信息的表达与融合;隐马尔科夫模型能够从观测序列中推出隐藏状态之间的概率转移关系。

注重实效的服务匹配策略可以捕获用户的真实需求,减小服务匹配数量,从而提高匹配效率和服务发现质量,并且适用于动态变化环境中的服务发现。但是其存在以下几方面的缺点:(1)需要花费大量时间对收集的上下文信息进行预处理,以获取精度较高的信息;(2)涉及用户隐私问题的上下文信息难以收集;(3)虽然服务匹配的精确度有所提高,但是模型变得更加复杂。

3 物联网服务提供的特点和对服务发现方法的要求

3.1 物联网服务场景

首先以智能超市作为物联网服务的现实场景来分析物联网服务提供的特点。

在智能超市中,所有商品和手推车都嵌有 RFID 标签和传感器,并且所有设备的功能都以服务的形式向外界提供。

消费者的应用场景有:(1)使用智能手机中的 RFID 读取器获取商品的详细信息;(2)使用价格对比服务比较不同超市的商品价格,或根据医疗健康服

务提供的建议,来确定是否购买某商品;(3)当消费者经过曾经购买过的商品时,系统根据其购买行为进行商品推荐;(4)当消费者支付时,手推车通过感知器自动获取购买商品的详细信息,生成消费清单。

超市管理者的应用场景有:(1)通过计算机来查看所有商品的详细信息;(2)分析商品信息流,预测商品的销售量和库存量的关系,提前订购供不应求的商品,防止商品短缺所带来的利润损失;(3)在订购商品发货后,可以实时地查询商品的当前位置和抵达日期等信息;(4)通过传感器来获取消费者在某个区域或商品前的逗留时间,并利用这些信息分析用户的购买行为。

从上述智能超市场景可知,物联网服务提供主要具有以下四个特点:

(1)较大规模的服务数量。上述智能超市场景包含了大量设备,比如嵌入在每件商品上的RFID标签和传感器,超市中所使用的温度、湿度和烟感传感器,摄像头,计算机,消费者携带的智能手机和其他嵌入式设备等,它们提供了大量的设备服务。此外,物联网系统中还包括一些与设备服务进行交互的封装了业务功能的传统Web服务。在更加复杂的物联网系统中,服务数量规模将随着设备数量和业务复杂度的增加而增加。

(2)资源高度受限的轻量级设备服务。在上述智能超市场景中,RFID标签、传感器、摄像头、打印机等都是资源高度受限的设备,较传统的Web服务而言,这些设备提供的服务具有高度受限的可利用资源,比如计算能力、存储能力、电池、带宽等。

(3)异构的服务描述模型。由于设备种类和所具有资源量的异构性,不同的设备所提供的服务具有异构的服务描述模型,比如DPWS(device profile for Web services, <http://docs.oasis-open.org/ws-dd/ns/dpws/2009/01>), RESTful Web服务等。除轻量级的设备服务外,物联网系统中还包括基于WSDL模型的传统Web服务。

(4)动态变化的服务环境。设备的移动性导致设备服务的位置和所处的环境不断变化。比如,消费者所携带的智能手机和挑选的商品(嵌有RFID标签和传感器)会随着消费者的移动而移动;超市所订购

的商品在物流运输途中也具有移动性。此外,设备的资源高度受限性以及无线网络自身的不可靠性,都会导致设备服务可获取性动态变化,从而导致在物联网系统中,服务的状态和环境具有动态变化性。

3.2 物联网服务发现面临的问题

由于上述物联网服务提供的特点,使得将Web服务发现方法应用于物联网环境中的服务发现存在以下几方面的问题:

(1)与传统的Web服务发现方法相比,物联网中的服务发现具有更大规模的搜索空间。另外,由于设备的资源高度受限性和移动性,设备服务具有动态的可获取性,需要实时快速地发现满足请求的服务。而现有的Web服务发现方法仅局限于小规模的服务发现,且其主要强调服务匹配的精确度,而未考虑匹配的实时性。

(2)在物联网中,服务主要由资源高度受限的设备提供,而现有的Web服务发现方法(基于WS-*标准)过于复杂,资源消耗较大。另外,除基于WSDL的传统Web服务外,物联网中还包括大量的基于DPWS或REST的轻量级设备服务,而现有的Web服务匹配方法仅基于WSDL模型,或者基于RESTful Web服务模型进行匹配,缺少一种能同时支持这两种服务的通用描述模型和相应的服务匹配方法。

(3)语义Web服务技术在自动化服务发现和组合中扮演着非常重要的角色,然而现有的语义Web服务技术对于物联网中资源高度受限的设备过于复杂,资源消耗较大,而且它们仅支持对基于WSDL的Web服务或者RESTful Web服务添加语义信息,缺少一种同时支持这两种服务的轻量级语义服务技术。

(4)物联网的核心在于智能服务提供,它能够通过RFID、传感器等感知技术实时获取丰富的环境信息。为自适应环境的动态变化,物联网系统需要从收集的数据中快速提取出有意义的知识,识别当前情景,在用户发出或未发出请求的情况下,为用户提供智能服务。而现有的Web服务发现方法并未考虑服务的动态环境信息,而只是仅基于服务请求和上下文信息被动为用户提供个性化服务。

(5)在服务选择过程中,设备服务嵌入在资源受

限的物理设备中,除服务自身的QoS信息外,其QoS还严重依赖于设备的质量(比如资源的高度有限性等)。而现有的服务发现方法在服务选择时,只考虑服务自身的QoS信息。

3.3 解决思路

下面分别从可扩展性、资源有限性、异构性和环境的动态变化性四个方面,详细分析将Web服务发现方法应用于物联网环境服务提供中所面临的问题以及相应的可能解决思路。

3.3.1 可扩展的服务发现

随着RFID、无线传感器、嵌入式设备和移动智能设备技术的快速发展,越来越多的物理设备将被连接到物联网中。截至2011年,被连接的物理设备数量是130亿,而5年后,物理设备数量将达到500亿^[28]。若将物联网中所有设备的功能都以Web服务的形式向外界提供,与传统的Web服务发现相比,物联网中的服务发现具有更大规模的搜索空间,面临着如何高效快速地从海量服务中发现满足特定需求服务的问题。下面主要从服务发现体系结构和服务发现方法两个方面进行分析:

(1) 服务发现体系结构

为应对物联网中设备数量日益增加的情况,设计一个具有高可扩展性的体系结构对于物联网服务发现来说至关重要。目前,一些研究工作开始关注物联网服务发现体系结构。Evdokimov等人^[29]对现存的物联网服务发现体系结构,比如EPCglobal(<http://www.gs1.org/epcglobal>),BRIDGE(<http://www.bridge-project.eu/>),Afilias(<http://www.afilias.info/>)和DHT-P2P(distributed Hash tables-P2P)等进行了分析,认为前三种方法的可扩展性较差,而只有基于P2P的DHT-P2P方法具有较好的可扩展性,但是其可维护性不尽人意。Polytarchos等人^[30]对基于目录的服务发现方法进行了分析,认为在物联网中,集中式的服务发现体系结构不能很好地满足物联网服务发现的可扩展性需求。Zhang等人^[31]认为一个松耦合的分布式体系结构更加适合物联网应用。也就是说,在Web服务发现方法的三种体系结构中,分布式体系结构和混合式体系结构具有较好的可扩展性。因此在

仅考虑服务数量规模的情况下,分布式体系结构和混合式体系结构能够很好地满足物联网服务发现的可扩展性需求。但是如何在二者中进行选择,还需要结合特定的物联网服务提供场景来考虑。

(2) 高效快速的服务发现方法

物联网服务发现面临着大规模搜索空间的挑战,如何减小搜索空间是快速发现服务的关键因素之一。Zhang等人^[31]认为物联网具有超大规模搜索空间和实时性的特点,为了支持实时搜索,可以采用基于上下文的搜索机制来减小搜索空间,从而减小搜索响应时间,并节省资源受限设备的能量。Teixeira等人^[32]认为在具有海量资源受限设备的物联网中,即使执行一个简单的服务发现操作,其资源消耗都有可能超过设备所具有的资源量,提出采用概率发现的方法来寻找满足请求的近似服务集,以加速服务发现和减小资源消耗。

通过分析发现,一些策略可能对快速发现满足需求的服务是有效的。比如,预先对服务进行分类,或者利用聚类算法根据服务的功能、物理位置和移动模式的相似性等特征进行分类,通过建立分类机制,提高搜索效率;或者根据服务请求上下文(如用户偏好、地理位置、可获取时间等)对匹配的服务数量进行快速过滤,以减小搜索空间。

此外,物联网服务发现方法还应该能够有效地发现海量服务之间存在的潜在语义关系,当单个服务不能满足用户需求时,可以快速地构建满足用户需求的组合服务。

3.3.2 支持资源受限服务的描述与匹配

在物联网中,资源受限的轻量级设备(比如RFID、传感器等)和资源丰富的设备(比如计算机)往往是共存的,即轻量级的设备服务和传统的Web服务往往是共存的。因此物联网服务发现面临着这样的挑战,即如何选择服务描述模型和匹配算法,既能最大程度地降低资源消耗,又能最小程度地描述物联网服务,同时还能保证服务发现的精确率。下面从服务描述模型和服务匹配两方面进行分析:

(1) 服务描述模型

传统的Web服务技术(即WS-*标准)对于资源受限的设备来说过于复杂,资源消耗较高,无法很好

地满足资源受限环境中异构设备互联与协同的需求,因此轻量级的服务开始受到研究人员的青睐。Li 等人^[33]将资源受限的轻量级设备所提供的服务统称为资源受限的 Web 服务(resource-constrained Web services, RCWS),并分析了基于轻量级 SOAP(simple object access protocol)和 REST(representational state transfer)的 Web 服务的优缺点,最后指出轻量级的服务模型和以 REST 作为基础研究面向 RCWS 的轻量级系统结构,将是降低资源消耗的有效途径。Guinard 等人^[4]建议使用轻量级的面向服务范型将资源受限设备的功能服务化,并给出了两种轻量级的服务描述方法:

①使用 DPWS 及其动态发现机制。DPWS 仅定义了 WS-* 标准的一个精简子集,并且被设计用于服务化资源受限的设备。

②将资源受限设备的功能封装为 RESTful Web 服务。Guinard 等人^[34-35]和 Shelby^[36]都采用轻量级的 RESTful Web 服务封装资源受限设备的功能。也就是说,轻量级的服务描述模型对于减少资源受限设备的资源消耗非常关键。

在物联网中,服务主要以资源受限的设备服务为主,企业 Web 服务为次,因此在选择服务描述模型时需要重点考虑其轻量性,减小资源消耗,但同时仍需要保证其能够最小程度地描述传统的企业 Web 服务。这样才能保证设备和设备之间,设备和传统的企业 Web 服务之间能够很好地进行交互与协作,即需要在服务描述能力和服务开销两方面进行权衡。

(2) 服务匹配

同样从降低资源消耗的角度出发,轻量级的服务匹配算法更加适合于资源受限设备之间的服务发现。目前在移动 Ad hoc 网络中,人们开始研究轻量级的服务发现方法,以降低资源受限设备的资源消耗。Bianchini 等人^[37]考虑到移动设备的资源有限性,提出了一种只对服务操作名称和输出进行匹配的轻量级服务发现方法;而 Zhang 等人^[38]只是对服务的输入、输出和 QoS 进行匹配。Mokhtar 等人^[39]认为语义推理的时间开销较大,它通过对服务进行分类来减少语义匹配的数量,并对特定领域本体中的概念进行编码来降低语义推理的复杂度。在 Web 服务发现

的几种匹配策略中,基于关键字的匹配策略简单、快速,但是服务发现的精确率较低;而基于语义和混合的匹配策略精确率较高,但是服务发现的响应时间较高。在设计物联网服务发现算法时,应该根据不同的应用场景选择不同的匹配策略,并且在匹配算法的轻量级(主要体现在匹配元素、匹配策略和匹配算法的优化三个方面)和精确率方面进行权衡。比如,设备之间的服务发现更加注重在保证匹配质量的情况下,如何最大程度地减少资源消耗;而基于集中式体系结构的服务发现更加注重服务发现的精确率。

3.3.3 支持异构服务的互操作

物联网设备的异构性主要体现在以下几方面:

(1)异构的设备的种类,比如 RFID、传感器、嵌入式设备、移动设备等;

(2)异构的通信协议,比如 IEEE 802.15.4、ZigBee、Bluetooth、6LoWPAN(<http://www.6lowpan.org/>)等;

(3)不同种类的设备在移动性、资源有限性上也有所不同;

(4)异构的服务描述模型,比如 DPWS、RESTful Web 服务等。

目前语义 Web 技术被认为是解决异构设备可交互性和服务自动化发现与组合问题的关键技术,因此一些研究工作强调将其引入到物联网服务提供中。Song 等人^[40]将设备的功能服务化,并使用 OWL-S 为服务添加语义信息,从而使异构的设备之间可以相互协作来完成复杂的任务。为解决异构设备间的可交互性, Yang 等人^[41]提出了一个物联网语义设备总线,定义了一个设备服务本体模型,所有的设备服务都按照该模型进行描述。Alam 等人^[42]提出了一个事件驱动的 SOA 与物联网结合的语义服务代理框架,它将事件本体、物联网本体和语义服务描述技术三者进行结合,为异构服务添加语义信息,使得服务之间能更好地协作。然而现有的工作使用了不同的语义服务描述技术(比如 OWL-S、WSMO、SAWSDL 等),引入了新的语义异构问题;且它们对于资源受限的设备过于复杂,资源开销较大;此外,它们只支持对 RESTful Web 服务或者基于 WSDL 的 Web 服务进行语义描述。

为应对异构的、资源受限设备之间的互操作,物

联网服务发现方法应该采用一个统一的轻量级语义服务描述模型;而且因为物联网服务同时包含 RESTful Web 服务和基于 WSDL 的 Web 服务,所以该语义服务描述模型还应该能够同时支持这两种服务。

3.3.4 应对动态变化环境的自适应服务发现方法

由于无线网络自身的不可靠性,设备故障或损坏,设备的移动性,以及有限的网络带宽和电池等因素,在物联网中,设备的环境往往是动态变化的,而且其所提供的服务也具有动态的可获取性(在某些时间内服务是可获取的或者说服务的可获取性存在一定的概率)。下面主要从服务发现体系结构、服务选择和上下文感知的服务提供几个方面进行分析:

(1) 服务发现体系结构

Mian 等人^[43]分析了在移动 Ad hoc 网络中,如何根据设备数量和移动速度来选取服务发现体系结构。纯粹的分布式体系结构更加适合于具有少量设备,且设备移动性较快的网络环境;而基于目录的分布式体系结构更加适合于具有中等或超大规模数量设备,且设备移动性较慢的网络环境。Ververidis 等人^[44]给出了在移动 Ad hoc 网络中选择服务发现体系结构的三个基本准则:服务可获取性、通信开销和延迟。纯粹的分布式体系结构在具有较低服务请求率和较高移动性的网络环境中更有效,而基于目录的分布式体系结构更适合于具有较高服务请求率的网络环境。

与移动 Ad hoc 网络相比,物联网包含大量资源高度受限的设备,需要重点考虑资源消耗问题;另外,由于设备的移动性和资源高度受限性,网络环境变化更加频繁,需要尽量减少服务信息维护。在 Web 服务发现体系结构中,分布式体系结构和混合式体系结构都能很好地适应动态变化的环境;但是基于分布式体系结构的 Web 服务发现方法具有较大的通信开销,资源消耗较大,并且其可维护性较差。因此为适应环境的动态变化性,在设计物联网服务发现体系结构时,应该根据设备资源量、服务移动性、服务数量和服务请求频率等多方面的因素,在混合式体系结构的基础上进行修改或扩展,以满足特定的物联网服务提供场景的需求。

(2) 服务状态信息的维护

由于设备的移动性,当设备离开或重新出现后,物联网服务发现方法应该能够感知到环境的变化(即服务状态信息的变化),从而自动适应环境。因此物联网服务发现需要有效的方法来维护服务状态信息。Mian 等人^[43]认为在没有目录节点的情况下,可以通过多播通信机制来通知其他节点更新服务的状态;而在有目录节点的情况下,可以使用三种方法来维护服务的状态信息:①定期更新,服务提供者必须定期更新其服务的有效期限,以保证服务的可获取性;②重新发现,服务请求者通过询问服务的状态信息,以确定目前可获取的服务集;③减小服务发布范围和时间间隔,该方法主要是为了解决快速变化的环境所导致的服务状态信息频繁更新的问题。Ververidis 等人^[44]将服务的状态分为硬状态(由于设备移动造成的服务不可获取)和软状态(由于服务的有效期满而造成的服务不可获取)。对于前者,设备必须在移动前解除服务注册;而对于后者,设备可以定期地更新其有效期。此外,还给出了维护服务状态信息的两种策略:通知和轮询。通知策略是指当服务状态改变时,服务提供者主动通知相应的服务请求者,其在服务状态频繁改变的环境中效率不高;而轮询策略是指服务请求者主动查询服务的状态信息,其比通知策略具有较低的实时性。

(3) 服务选择

在传统的 Web 服务发现方法中,服务选择过程主要取决于服务的 QoS。而在物联网中,设备服务嵌入在资源受限的物理设备中,其可获取性主要由设备的移动性和资源有限性决定。与传统的企业 Web 服务相比,除了服务本身的 QoS 外,设备服务的 QoS 更加依赖于设备本身的质量,它对于刻画设备服务 QoS 以及后期服务选择至关重要。因此物联网服务发现面临着如何通过设备的移动性和资源有限性来刻画设备服务 QoS 的问题。

在移动 Ad hoc 网络中,一些研究工作强调通过设备的移动性和资源有限性来刻画设备服务的 QoS。Su 等人^[45]认为设备资源的有限性与服务的质量紧密相关,且执行质量越高的服务,消耗的资源越多。通过为设备的四个非功能属性(服务距离、响应延迟性、可获取性和可靠性)分别定义效益估计函

数,来刻画设备的资源有限性,然后将其与服务的质量等级进行加权来刻画设备服务的质量。为了构建一个可靠的服务组合,Wang^[46]使用非概率和概率两种模型来刻画服务移动的不可预测性,并将服务的可获取性刻画为时间窗口(非概率模型)和随机时间变量(概率模型);Jiang等人^[47]认为服务的可获取性不能有效地刻画移动网络中服务的动态变化性,因此引入服务中断频率和持续时间来刻画服务的不可获取性。

为应对环境的动态变化,物联网服务发现方法应该构建一个与设备资源有限性和移动性相关的QoS评估模型,以利于后期的服务选择和服务组合。此外,当设备离开或者重新出现后,物联网服务发现方法还应该能够感知环境的变化,有效地维护服务状态信息,并且提供某种机制(比如聚类或上下文感知)快速定位具有相似功能的服务,替换已有服务组合方案中缺失或不满足需求的服务。

(4)上下文感知的服务提供

传统的基于用户请求的上下文感知服务发现方法,主要是利用用户上下文信息为用户提供个性化服务。而物联网的核心在于智能服务提供,除了传统的基于用户请求的服务发现方法外,还应该能够在用户未发出服务请求的情况下,感知环境的动态变化,在恰当的时候主动为用户提供合适的服务。

Tong等人^[48]结合物联网的特点,从上下文信息的采集、建模、推理和情景感知系统结构四个方面分析了物联网上下文感知所面临的技术挑战,并且提出了一个物联网环境下的上下文感知系统结构。Zeng等人^[49]认为物联网的最终目的是构建一个面向用户的,能够自适应环境变化的服务提供平台。He等人^[50]为实现物联网服务的智能化提供,在传统的服务上下文的基础上,加入了物理实体的上下文(context of thing)信息。Preuveneers等人^[51]从上下文感知的角度分析了物联网服务提供对上下文建模的要求,并且提出了一个整合设备服务和企业Web服务的上下文感知体系结构。

上下文感知的物联网服务提供的最终目的是从采集到的数据中发现隐藏的知识,感知用户的当前环境,提供智能服务,其关键在于知识库的构建、不

确定性推理和高效快速的决策。在物联网中,从传感器获取到的数据往往具有低精度、冗余性、不完整性和不一致性等特点,不同的数据之间还具有一定的关联性,不同类型的上下文还具有不同的时效性,比如通过传感器获取的数据往往在短时间内有效,而通过用户profile获取的上下文往往在较长时间内有效。因此物联网中的上下文建模方法应该能够捕获具有复杂结构的上下文,并且支持对上下文的不确定性、时效性进行建模和推理。基于本体的上下文建模方法是目前主流的上下文建模方法,其具有良好的形式化表达能力和强大的推理能力,但是其不支持对上下文的不确定性和时效性进行建模。对上下文本体模型进行扩展,以支持对上下文不确定性和实效性的建模,将是很好的思路。而在不确定性推理方面,贝叶斯网络、隐马尔科夫模型和神经网络都具有强大的不确定性推理能力,但是否适用于物联网中上下文的不确定性推理,还有待验证。

此外,传感器产生的数据还具有连续性和时效性,因此物联网智能服务提供方法还应该能够进行高效快速的决策。对于具有时效性的数据流的分析,可以借鉴数据挖掘中对数据流的处理思想^[52],基于数据采样、滑动时间窗口等数据概要技术,进行频繁模式的挖掘(比如Lossy counting)、分类(比如CVFDT, concept-adapting very fast decision tree)和聚类(比如STREAM),寻求一个具有较小误差的近似解,快速作出决策。

综上所述,将Web服务发现方法应用于物联网服务提供中所面临的问题以及可能的解决思路如表1所示。经过分析,物联网服务发现的一些可能需要解决的问题如下:

(1)高效、快速的轻量级语义服务发现方法

由于物联网具有设备资源有限、海量服务、异构性和实时性的特点,如何构建一个高效、快速的轻量级语义服务发现方法非常重要。高效、快速和轻量级主要体现在以下三个方面:①如何选择合适的服务发现体系结构以满足可扩展性和设备的移动性;②如何建立合理有效的分类机制和上下文感知机制以满足快速响应服务请求,或根据当前上下文主动为用户提供满足需求的服务;③如何构建一个轻量

Table 1 Problems of Web service discovery in IoT and possible solutions

表1 物联网服务发现所面临的问题及可能的解决思路

研究项目	可扩展性	资源受限和资源丰富设备共存	异构性	环境的动态变化性	可能的解决思路
体系结构	海量服务	(1)设备的资源有限性影响服务的可获取性;(2)需具有较小的服务发现开销	—	设备的移动性影响服务的可获取性	需根据设备数量、资源有限性、移动性、服务请求频率等多方面因素在混合式体系结构的基础上进行扩展或修改,以满足特定的物联网应用场景
服务描述	—	(1)大部分设备具有有限的资源,需考虑设备资源消耗问题;(2)基于 WSDL 的 Web 服务和 RESTful Web 服务共存	采用不同的服务描述模型	服务的位置、可获取性、设备资源和环境都在动态变化	(1)统一的轻量级语义服务描述模型;(2)能同时描述基于 WSDL 的 Web 服务和 RESTful Web 服务;(3)需要支持对服务上下文环境信息的描述(比如位置、可获取时间等);(4)需要在服务描述能力和服务开销两方面进行权衡
服务匹配	海量服务	(1)需考虑资源消耗问题;(2)资源受限设备间的服务发现和基于目录的服务发现共存;匹配策略的多样性	—	服务的位置、可获取性、设备资源和环境都在动态变化	(1)上下文感知的服务匹配算法;(2)需视不同的应用场景,在轻量级的匹配算法和匹配精确率两方面进行权衡。比如资源受限的设备之间的服务发现,应该注重匹配的轻量性;而基于目录的服务发现,应该注重匹配的精确率
服务选择	—	设备的资源有限性影响服务的可获取性	—	设备的移动性影响服务的可获取性和位置	对于设备服务,需建立一个与设备质量相关的 QoS 评估模型,以利于服务选择
快速的服务发现	具有较大规模的搜索空间	—	—	设备的移动性影响服务的可获取性和位置	预先对服务进行分类,或利用聚类算法根据服务的功能、物理位置或者移动模式的相似性等特征进行分类;或基于上下文搜索机制,减小搜索空间
服务信息维护	—	设备的资源有限性影响服务的可获取性	—	设备的移动性影响服务的可获取性	需根据不同的服务发现体系结构来选择不同的服务状态信息维护方法
对服务组合的支持					
高效	海量服务	—	服务描述模型不同	—	(1)采用统一的语义服务描述模型;(2)应该支持服务间的语义关系分析,以利于快速的服务组合
可靠	—	设备的资源有限性影响服务的可获取性	—	设备的移动性影响服务的可获取性	和服务选择的解决思路类似
服务替换	—	设备的资源有限性影响服务的可获取性	—	设备的移动性影响服务的可获取性	应支持服务之间的相似性分析(分类或聚类),当服务不可获取或能更好满足用户需求的新服务出现时,可快速发现相似的服务进行替换

级的语义服务描述模型和轻量级的匹配方法(匹配元素和匹配策略的轻量级以及匹配算法的优化),既能降低设备的资源消耗,又能保证服务发现的精确率。

(2) 上下文感知的物联网服务提供方法

上下文感知的物联网服务提供的最终目的是在用户发出或不发出服务请求的情况下,根据环境的动态变化,为用户提供智能化的服务。实现智能化的服务提供,关键要解决三个方面的问题:①构建一

个适合物联网服务提供的上下文模型;②支持上下文不确定性、时效性的建模和推理方法;③高效快速的决策方法。

(3)有效的与设备质量相关的QoS评估模型

由于设备的移动性和资源有限性与其所提供服务的可获取性和QoS紧密相关,如何通过设备质量来刻画设备服务的QoS,即构建一个与设备质量相关的QoS评估模型来帮助服务选择,对于物联网服务发现方法和在后期建立一个可靠的服务组合非常关键。

(4)基于WSDL和REST的服务匹配方法

由于物联网设备资源的高度受限性,现有工作主要采用基于WSDL的轻量级Web服务(比如DPWS等)和RESTful Web服务来将资源受限设备的功能进行封装。但是现有的Web服务发现方法所采用的匹配策略主要是基于WSDL的,而只有少量基于RESTful Web服务匹配的研究工作^[53],因此同时支持WSDL和REST两种服务的匹配方法是一个值得研究的课题。

4 结束语

本文从Web服务发现体系结构(集中式体系结构、分布式体系结构和混合式体系结构)和Web服务匹配策略(基于语法的匹配策略、基于语义的匹配策略、混合的匹配策略和注重实效的匹配策略)两个方面分析了典型的Web服务发现方法,以及各种体系结构和服务匹配策略的优缺点。然后结合物联网环境中服务提供的特点,从可扩展性、资源有限性、异构性和环境的动态变化性四个方面,分析了将Web服务发现方法应用于物联网服务提供中所面临的问题以及相应的解决思路。最后探讨了物联网中服务发现可能需要解决的一些问题。

目前,物联网服务提供的研究工作还停留在如何使用轻量级的服务将物理世界中的设备互连起来。随着物联网逐渐深入到各个领域,如何发现提供特定服务的设备,并构建组合服务以满足复杂的应用需求将成为下一步研究趋势。然而由于物联网服务提供具有大规模的搜索空间,高度受限的设备资源,动态变化的环境和多种服务描述模型共存等特点,物联网服务发现面临着严峻的挑战,研究轻量级的语义服务模型,高效、快速的服务匹配算法,

情景感知的智能服务提供和有效的与设备资源相关的QoS评估模型是解决物联网服务发现问题的一个可能的思路。

References:

- [1] Souza L M S D, Spiess P, Guinard D, et al. SOCRADE: a Web service based shop floor integration infrastructure[C]// LNCS 4952: Proceedings of the 1st International Conference on the Internet of Things (IOT 2008), Zurich, Switzerland, Mar 2008. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 50-67.
- [2] Wu Yanbo. Realizing the Internet of things in service-centric environments[C]//CEUR Workshop Proceedings 421: Proceedings of the PhD Symposium at the 6th International Conference on Service Oriented Computing (ICSOC 2008), Sydney, Australia, Dec 2008. Netherlands: Tilburg University, 2008: 1-6.
- [3] Spiess P, Karnouskos S, Guinard D, et al. SOA-based integration of the Internet of things in enterprise services[C]// Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Web Services (ICWS '09), Los Angeles, CA, USA, Jul 2009. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009: 968-975.
- [4] Guinard D, Trifa V, Karnouskos S, et al. Interacting with the SOA-based Internet of things: discovery, query, selection, and on-demand provisioning of Web services[J]. IEEE Transactions on Service Computing, 2010, 3(3): 223-235.
- [5] Nidd M. Service discovery in DEAPspace[J]. IEEE Personal Communications, 2001, 8(4): 39-45.
- [6] Chakraborty D, Joshi A, Yesha Y, et al. Toward distributed service discovery in pervasive computing environments[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(2): 97-122.
- [7] Mohebbi K, Ibrahim S, Khezrian M, et al. A comparative evaluation of semantic Web service discovery approaches[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services (iiWAS '10), Paris, France, Nov 2010. New York, NY, USA: ACM, 2010: 33-39.
- [8] Saadon N A, Mohamad R. A comparative evaluation of Web service discovery approaches for mobile computing[C]// Communications in Computer and Information Science 254: Proceedings of the International Conference on Informatics

- Engineering and Information Science (ICIEIS 2011), Kuala Lumpur, Malaysia, Nov 2011. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 238-252.
- [9] Fellbaum C. WordNet: an electronic lexical database[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1998: 445.
- [10] Hao Yanan, Zhang Yanchun, Cao Jinli. Web services discovery and rank: an information retrieval approach[J]. Future Generation Computer Systems, 2010, 26(8): 1053-1062.
- [11] Kim Y, Shim Y, Lee K. A cluster-based Web service discovery in MANET environments[J]. Mobile Information Systems, 2011, 7(4): 299-315.
- [12] Dasgupta S, Bhat S, Lee Y. Taxonomic clustering and query matching for efficient service discovery[C]//Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Web Services (ICWS '11), Washington, DC, USA, Jul 2011. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2011: 363-370.
- [13] Umesh B, Kulkarni R. Improved matchmaking algorithm for semantic Web services based on bipartite graph matching[C]//Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Web Services (ICWS '07), Salt Lake City, Utah, USA, Jul 2007. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007: 86-93.
- [14] Li Lei, Horrocks I. A software framework for matchmaking based on semantic Web technology[C]//Proceedings of the 12th International Conference on World Wide Web (WWW '03), Budapest, Hungary, May 2003. New York, NY, USA: ACM, 2003: 331-339.
- [15] Wang Puwei, Jin Zhi, Liu Lin, et al. Building towards capability specifications of Web services based on an environment ontology[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2008, 20(4): 547-561.
- [16] Wang Ting, Wei Dengping, Wang Ji, et al. SAWSDL-iMatcher: a customizable and effective semantic Web service matchmaker[J]. Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, 2011, 9(4): 402-417.
- [17] Li Ke, Verma K, Mulye R, et al. Designing semantic Web processes: the WSDL-S approach[M]//Cardoso J, Sheth A P. Semantic Web Services, Processes and Applications. [S.l.]: Springer US, 2006, 3: 161-193.
- [18] Klusch M, Fries B, Sycara K. OWLS-MX: a hybrid semantic Web service matchmaker for OWL-S services[J]. Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, 2009, 7(2): 121-133.
- [19] Kiefer C, Bernstein A. The creation and evaluation of iSPARQL strategies for matchmaking[C]//LNCS 5021: Proceedings of the 5th European Semantic Web Conference (ESWC '08), Enerife, Spain, Jun 2008. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 463-477.
- [20] Klusch M, Kaufer F. WSMO-MX: a hybrid semantic Web service matchmaker[J]. Web Intelligence and Agent Systems, 2009, 7(1): 23-42.
- [21] Bianchini D, Antonellis V D, Melchiori M. Capability matching and similarity reasoning in service discovery[C]//CEUR Workshop Proceedings 160: Proceedings of the Open Interop Workshop on Enterprise Modeling and Ontologies for Interoperability (EMOI-INTEROP '05), Porto, Portugal, Jun 2005: 285-296.
- [22] Abowd G D, Dey A K, Brown P J, et al. Towards a better understanding of context and context-awareness[C]//LNCS 1707: Proceedings of the 1st International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing (HUC '99), Karlsruhe, Germany, Sep 1999. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1999: 304-307.
- [23] Al-Masri E, Mahmoud Q H. MobiEureka: an approach for enhancing the discovery of mobile Web services[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2010, 14(7): 609-620.
- [24] Toninelli A, Corradi A, Montanari R. Semantic-based discovery to support mobile context-aware service access[J]. Computer Communications, 2008, 31(5): 935-949.
- [25] Gu Tao, Pung Hungkeng, Zhang Daqing. A service-oriented middleware for building context-aware services[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2005, 28(1): 1-18.
- [26] Strang T, Linnhoff-Popien C. A context modeling survey[C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Advanced Context Modelling, Reasoning and Management, Nottingham, England, Sep 2004: 31-41.
- [27] Bettini C, Brdiczka O, Henriksen K, et al. A survey of context modelling and reasoning techniques[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2010, 6(2): 161-180.
- [28] Presser M, Krco S, Kowatsch T, et al. The Internet of things comic book: inspiring the Internet of things[M]. Denmark: Alexandra Institute and Partially Funded by the FP7 ICT Internet of Things Initiative, 2011: 25.
- [29] Evdokimov S, Fabian B, Kunz S, et al. Comparison of discovery service architectures for the Internet of things[C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing

- (SUTC '10), California, USA, Jun 2010. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010: 237-244.
- [30] Polytarchos E, Eliakis S, Bochtis D, et al. Evaluating discovery services architectures in the context of the Internet of things[M]//Ranasinghe D C, Sheng Q Z, Zeadally S. Unique Radio Innovation for the 21st Century. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 203-227.
- [31] Zhang Daqiang, Laurence T Y, Huang Hongyu. Searching in Internet of things: vision and challenges[C]//Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA '11), Busan, South Korea, May 2011. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2011: 201-206.
- [32] Teixeira T, Hachem S, Issarny V, et al. Service oriented middleware for the Internet of things: a perspective[C]//Proceedings of the 4th European Conference on Towards A Service-based Internet (ServiceWave '11), Poznan, Poland, Oct 2011. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 220-229.
- [33] Li Gang, Sun Hongmei, Li Zhi, et al. Resource constrained Web services[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(2): 193-207.
- [34] Guinard D, Trifa V, Wilde E. A resource oriented architecture for the Web of things[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on the Internet of Things (IOT 2010), Tokyo, Japan, Nov 2010. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010: 1-8.
- [35] Guinard D, Mueller M, Pasquier-Rocha J. Giving RFID a REST: building a Web-enabled EPCIS[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on the Internet of Things (IOT 2010), Tokyo, Japan, Nov 2010. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010: 1-8.
- [36] Shelby Z. Embedded Web services[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(6): 52-57.
- [37] Bianchini D, Antonellis V D, Melchiori M, et al. Lightweight ontology-based service discovery in mobile environments[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Database and Expert Systems Applications (DEXA '06), Krakow, Poland, Sep 2006. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2006: 359-364.
- [38] Zhang Ying, Qu Youli, Huang Houkuan, et al. An ontology and peer-to-peer based data and service unified discovery system[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 5436-5444.
- [39] Mokhtar S B, Kaul A, Georgantas N, et al. Efficient semantic service discovery in pervasive computing environments[C]//Proceedings of the ACM/IFIP/USENIX 2006 International Conference on Middleware (Middleware '06), Melbourne, Australia, Nov 2006. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2006: 240-259.
- [40] Song Zhexuan, Cárdenas A A, Masuoka R. Semantic middleware for the Internet of things[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on the Internet of Things (IOT 2010), Tokyo, Japan, Nov 2010. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010: 1-8.
- [41] Yang Kun, Li Shijian, Zhang Li, et al. Semantic device bus for Internet of things[C]//Proceedings of the 2010 IEEE/IFIP 8th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing, Hong Kong, China, Dec 2010. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010: 341-346.
- [42] Alam S, Noll J. A semantic enhanced service proxy framework for Internet of things[C]//Proceedings of the 2010 IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications & International Conference on Cyber, Physical and Social Computing, Hangzhou, China, Dec 2010. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010: 488-495.
- [43] Mian N A, Baldoni R, Beraldi R. A survey of service discovery protocols in multihop mobile Ad hoc networks[J]. IEEE Pervasive Computing, 2009, 8(1): 66-74.
- [44] Ververidis C N, Polyzos G C. Service discovery for mobile Ad hoc networks: a survey of issues and techniques[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2008, 10(3): 30-45.
- [45] Su W-T, Liao I-H, Lee K-R, et al. Service-oriented device composition in resource constrained ubiquitous environments[C]//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '08), Las Vegas, NV, Mar 2008. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008: 3110-3115.
- [46] Wang Jianping. Exploiting mobility prediction for dependable service composition in wireless mobile Ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2011, 4(1): 44-55.
- [47] Jiang Shanshan, Xue Yuan, Schmidta D C. Minimum disruption service composition and recovery in mobile Ad hoc networks[J]. Computer Networks, 2009, 53(10): 1649-1665.
- [48] Tong Endong, Shen Qiang, Lei Jun, et al. Study on context-

- aware technologies for Internet of things[J]. Computer Science, 2011, 38(4): 9-14.
- [49] Zeng Deze, Guo Song, Cheng Zixue. The Web of things: a survey[J]. Journal of Communications, 2011, 6(6): 424-438.
- [50] He Jing, Zhang Yanchun, Huang Guangyan, et al. A smart Web service based on the context of things[J]. ACM Transactions on Internet Technology (TOIT), 2012, 11(3): 1-23.
- [51] Preuveneers D, Berbers Y. Internet of things: a context-awareness perspective[M]//Yan Lu, Zhang Yan, Yang L T, et al. The Internet of Things: from RFID to the Next-Generation Pervasive Networked Systems. London: Auerbach Publications, 2008: 287-307.
- [52] Han Jiawei, Kamber M, Pei Jian. Data mining: concepts and techniques[M]. 2nd ed. Singapore: Elsevier, 2005: 467-534.
- [53] Lampe U, Schulte S, Siebenhaar M, et al. Adaptive matchmaking for RESTful services based on hRESTS and Micro-WSMO[C]//Proceedings of the 5th International Workshop on Enhanced Web Service Technologies (WEWST '10), Ayia Napa, Cyprus, Dec 2010. New York, NY, USA: ACM, 2010: 10-17.

附中文参考文献:

- [33] 李刚, 孙红梅, 李智, 等. 资源受限 Web 服务[J]. 计算机学报, 2010, 33(2): 193-207.
- [48] 童恩栋, 沈强, 雷君, 等. 物联网情景感知技术研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 9-14.



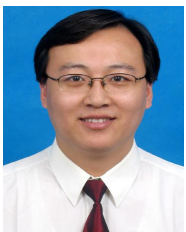
WEI Qiang was born in 1985. He is a Ph.D. candidate at Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences. His research interests include service modeling and discovery in Internet of things, machine learning.

魏强(1985—),男,中国科学院数学与系统科学研究院博士研究生,主要研究领域为物联网服务建模与发现,机器学习。



JIN Zhi was born in 1962. She is a professor and Ph.D. supervisor at Peking University. Her research interests include service-oriented computing, knowledge engineering and requirement engineering.

金芝(1962—),女,北京大学教授、博士生导师,主要研究领域为服务计算,知识工程,需求工程。



LI Ge was born in 1977. He is an associate professor at Peking University. His research interests include software engineering and software reusing technology.

李戈(1977—),男,北京大学副教授,主要研究领域为软件工程,软件复用技术。



LI Lixing was born in 1983. He is a Ph.D. candidate at Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences. His research interests include service-oriented computing and formal methods.

李力行(1983—),男,中国科学院数学与系统科学研究院博士研究生,主要研究领域为服务计算,形式化方法。