

Web 服务测试研究 *)

白晓颖 赵冲冲 戴桂兰

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

摘要 Web 服务技术为软件测试研究带来了新的挑战。Web 服务测试需要能够适应面向服务的新的分布式计算体系架构。为保证服务的质量,Web 服务需要从多个层次进行验证与确认,包括基础设施、单元服务、集成服务等;测试需涵盖服务的功能、性能、可靠性、安全等各个方面。本文从 Web 服务体系架构和应用模式出发,讨论了 Web 服务测试的主要问题。文章分析当前相关研究的现状,并归纳总结了 SOAP 协议验证、WSDL 语言扩展、基于模型的服务集成验证、和测试构架等主要研究成果。本文最后讨论了当前存在的主要问题及进一步的研究方向。

关键词 Web 服务,测试

Research on Web Service Testing

BAI Xiao-Ying ZHAO Chong-Chong DAI Gui-Lan

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract As an evolutionary technology, Web services poses new challenges for software testing. Web service testing need to be adaptive to distributed coordinated environment. To ensure the quality of Web services, services need to be verified and validated at different levels including infrastructure, unit and integration, from different perspectives including functionality, performance, reliability, security, etc. The paper analyzes the issues of web service testing and gives an overview of testing techniques on SOAP protocol verification, WSDL extension, and model-based verification techniques of composite service specification. It finally discusses future research and practice on Web service testing.

Keywords Web services, Testing

1 引言

面向服务的体系架构(SOA, Service-Oriented Architecture)已成为基于 Web 的分布式系统(如电子商务、电子政务等)的主要发展趋势。SOA 提出了一种松散耦合的、基于标准的、面向服务的体系架构,以有效解决分布式、异构环境下,应用系统的集成问题^[7]。Web 服务采用 SOA 体系架构,引入了一种新的 Web 应用的开发、部署和集成的模式。Web 服务是一组部署在应用服务器上的软件构件,其服务接口及绑定形式可以通过 W3C 等国际标准组织制定的基于 XML 的标准(如 WSDL, UDDI, SOAP 等)定义、描述、检索和调用^[4, 20~23],是实现各种异构平台上的应用间的互连互通的主要技术方向,松散耦合性、简单性、高度可集成性、规范性、开放性和行业支持是 Web 服务的几大特点和优势^[11]。

Web 服务可信性是服务选择、应用和集成的关键依据之一。Web 服务分布应用、具有各种运行时行为、涉及多种标准协议,可能在硬件、软件、通信、对象管理等各个环节出现各种缺陷。其体系结构和应用的复杂性,以及技术和规范不断地发生变化,对测试研究提出了新的挑战。Web 服务的测试主要特点与难点主要体现在以下几个方面^[5, 4]:

1. Web 服务的开发环境与其应用环境有很大的不同。在发布之前,很难对其实际的运行场景进行预测,如访问的用户类型、并发用户数量、Web 服务调用的装载模式和访问方式等,这些差异和应用的不确定性都增加了 Web 服务测试的

困难。

2. Web 服务测试主要基于服务接口进行设计和实现,因此必须采用自动化测试方法,与传统的需要大量人工干预的测试方法截然不同。

3. 由于 Web 服务的分布特征,会出现大量用户通过不同的环境访问一个服务的情形,因此,性能和可扩展性是 Web 服务测试的重要方面。

4. Web 及服务集成的发布、发现和绑定都是动态完成的,其过程的不确定性和不可见性增加了测试难度。

5. Web 服务访问接口和访问方法发布后增加了 Web 服务的安全隐患,提高了被系统攻击的机会。此外,对于所调用的分散、异构的外部 Web 服务的安全性的管理更为困难。如何提高 Web 服务的安全性也是测试者要考虑的重要问题。

6. Web 服务的应用通常涉及到服务提供者、发布者和使用者三种角色,都需要参与到测试的不同阶段。其分布式合作的特征使得测试的组织、缺陷管理、结果评估等活动都更加困难。

随着面向产品的体系结构逐步向面向服务的体系结构的转变,传统的软件测试技术难以适应 Web 服务的技术发展。目前,针对 Web 服务的测试方法和技术的研究还处于初始阶段,代表性的研究主要包括基于形式化方法对协议及规格说明的验证(如 WSFL 验证技术、SOAP 验证)和 Web 服务的集成测试的研究。本文在 Web 服务体系结构分析的基础上,研究了与传统测试技术相比,Web 服务测试所面临的主要问

*)本文受到以下项目资助:国家科技攻关项目(编号:2002BA904B13);国家自然科学基金项目(编号:60403022)。白晓颖 博士,讲师,研究方向为软件工程和软件测试。

题,分析了现有的研究成果,并对未来研究方向进行了初步的探讨。

2 Web 服务体系架构

Web 服务本质上是一种消息传递体系结构,通过在不同的系统/操作环境/程序语言间传送 XML 格式的数据,实现松散耦合的应用程序之间的相互协作,最终达到 Web 应用间无缝集成的目的。Web 服务由服务描述和服务实现两部分构成的。服务描述(Service Description)用于描述服务调用的接口信息,如服务的数据类型、操作、绑定信息、网络位置等。此外还可以包括方便服务请求者发现和利用的分类及其他元数据。服务即服务描述的实现,是一个软件模块,部署在可通过网络访问的服务平台上。

图 1^[19]描述了 Web 服务中所涉及的主要角色和构件及其相互之间的关系。Web 服务的应用通常涉及到服务提供者(Service Provider)、服务请求者(Service Requestor)及服务注册中心(Service Registry)三种应用程序。服务所有者通过向服务注册中心注册服务描述来发布(Publish)服务,并通过服务访问平台提供服务;服务提供者在服务注册中心搜索(Find)满足需求的服务,根据其服务描述解析服务调用方式,并动态绑定(Bind)服务提供者,获取服务。

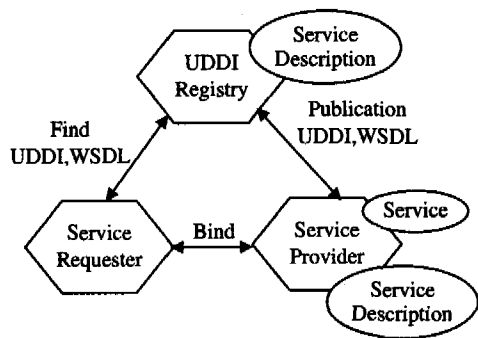


图 1 Web 服务体系架构

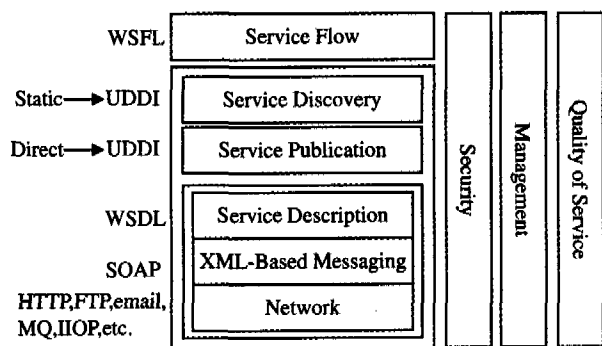


图 2 Web 服务概念性协议栈

图 2 描述了 Web 服务的概念性协议栈^[25](Web Services Conceptual Stack)。

(1)Web 服务协议栈的最底层是网络层(Network),该层根据 Web 服务应用程序的需要选择适当的网络协议,可以是 HTTP,FTP, email、消息排队(MQ, Message Queuing)、因特网 ORB 间协议(IIOP, Internet Inter ORB protocol)上的远程方法调用等。对 Web 服务开发者来说,网络技术的选择是透明的。

(2)网络层之上是消息传递层,由 SOAP(Simple Object

Access Protocol)^[20]协议实现。SOAP 是一种简单轻量级的、基于 XML 的、用于在网络应用程序之间交换结构化数据的机制。

(3)服务描述层使用 WSDL(Web Services Description Language)^[21]作为基本的服务描述规范,是降低服务提供者和请求者之间耦合程度,实现动态绑定服务、自动集成应用的关键。

(4)协议栈的中间两层是 Web 服务的发布和发现,推荐的规范是 UDDI(Universal Description, Discovery and Integration)^[22]。Web 服务的发布包括服务描述的生成和发布;Web 服务发现包括获取和使用服务描述。

(5)最上面的一层是业务流程的建模,采用工作流描述规范如 WSFL(Web Services Flow language)^[23]描述如何执行服务到服务的通讯、合作和流程。

(6)Web 服务的服务能力的提高有赖于安全性、管理和服务质量的综合提高。协议栈的垂直条描述了协议栈的每一层都必须解决的问题。

3 Web 服务测试的主要挑战

Web 服务对传统的测试方法理论和技术都提出了新的挑战,例如,对于相对独立的各个环节,如何规范和管理测试过程如缺陷跟踪过程?在多方并行参与的结构下,如何组织测试并统一、度量测试结果?在分布式的环境中,如何测试远程的服务?在用户环境不确定的情况下,如何定义并检验服务的质量?在服务软件演化的过程中,如何进行回归测试?等等。

在 Web 服务的模式下,任何人都可以在任何时间、任何地点提交、注册和请求 Web 服务。与之相适应,Web 服务的测试也需要由集中式变成分布式,并能动态地适应各种环境,即在服务构件创建、发布、注册、执行、集成、演化的整个生命周期中,服务提供者、发布者和请求者都需要能够在各自的环境中,对服务构件进行测试和回归测试。服务提供者有责任保证所提供服务的可靠性和可用性,满足注册所需的服务水平要求。发布者需要能确认并评估注册服务的质量,其检测及评估结果可作为服务检索的依据。服务请求者需要能检验服务功能、性能、可靠性等与其需求的吻合程度。

根据 Web 服务架构和业务模型,Web 服务测试可分为三个层次:基础设施测试、独立的 Web 服务测试以及 Web 服务集成测试,如图 3 所示。同时,测试组织和管理是 Web 服务测试的三个层次中都需要解决的问题,对测试的系统性、有效性至关重要。

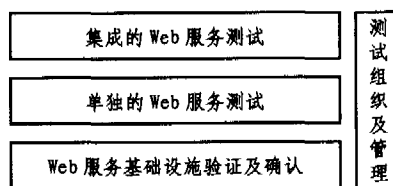


图 3 Web 服务测试整体结构

3.1 Web 服务基础设施的验证与确认

虽然标准化和开放性是 Web 服务的主要宗旨,但与传统的应用系统相比,Web 服务中间件的稳定性和可靠性相对薄弱。一方面,是由于 Web 服务的整个技术架构还尚未成为成熟的产业标准。在 W3C 联盟以及相关研究机构的大力支持

下,标准规范体系还处于不断发展和完善的过程中,不同的标准之间的概念模型和表示体系可能互不兼容,并进一步导致相关应用程序的不兼容。

另一方面,Web 服务规范体系采用 XML 作为基本的编码语言。由于 XML 技术的简单、灵活、可伸缩、易定制,基于 XML 数据描述和 XML Schema 数据建模定义的 Web 服务的协议栈具有标准化和开放性的特点。但是同时,XML 为描述性语言,其通用性和灵活性为协议的可证明性提出了挑战。当 Web 服务用于高可信性或实时要求较高的应用中,需要更严格的验证方法。例如,SOAP RPC(Remote Procedure Call)是 Web 服务的基础和核心协议,由于编码格式的不同,SOAP RPC 与传统的 DCE RPC 及 ONC RPC 采用了完全不同的消息映射和消息处理机制。SOAP 协议还处于完善过程中,对于 SOAP 协议本身的验证还有待于进一步加强。

3.2 独立的 Web 服务测试

Web 服务首先作为独立的功能节点发布,再通过工作流定义和解析动态集成为完整的业务流程。独立的 Web 服务测试就是从以下三个方面保证各服务节点的质量:

- 1)服务的实现应在功能、性能等各方面与发布的服务描述相一致。为验证一致性,除服务提供者外,服务中介及用户都应能在一定的安全约束下,远程测试该服务。
- 2)由于服务发布的开放性,对于每一个服务请求,可能存在多个满足需求的服务描述。服务中介应根据一定的度量和评价标准,对多个服务进行测试、比较和评估,并依照需求的满足程度排序。
- 3)在服务实现的演化过程中,应建议一定的机制来支持对不同版本的跟踪及回归测试。

3.3 集成的 Web 服务测试

通过对服务流描述的解析,Web 服务可以动态地集成。Web 服务集成的描述、解析和执行将是 Web 服务区别与其它分布式计算技术的一个主要特征。目前已经提出了多种 Web 服务描述语言,如 IBM 的 WSFL^[23],微软的 XIANG^[13],以及 IBM 的 BPEL4WS^[26]。

集成的 Web 服务测试就是在服务流描述执行前,通过静态验证以及动态模拟的方法,确认服务描述能够正确地描述业务需求,能够由服务中介正确地解析,并能由所有服务节点正确地执行。

3.4 Web 服务测试组织和管理

传统的应用系统开发中,测试过程和测试资产通常为集中管理和监控的模式。在传统的测试流程中,测试架构人员根据系统特征点,设计测试用例和测试场景。测试工程师执行测试,捕捉测试结果,报告缺陷,并跟踪缺陷的修复过程。对于修复的系统,还要通过回归测试来确认缺陷已经被正确地更改,并且系统没有引入新的缺陷。

Web 服务的分布式特征使这一过程变得更加复杂。如图 4 所示和前文所述,服务提供者、中介和使用者三方需要在一个分布合作的环境下,共同建立和维护测试方案、测试结果、和缺陷数据库,并跟踪缺陷修复过程。测试及回归测试都必须通过自动化的测试引擎,通过互联网远程调度、执行。为模拟用户的实际应用环境和场景,亦需在一个分布式的环境下,统一调度多个测试引擎。不同测试方案、测试引擎和测试运行的测试结果需要能够进行综合和分析,并最终给出评价结果。

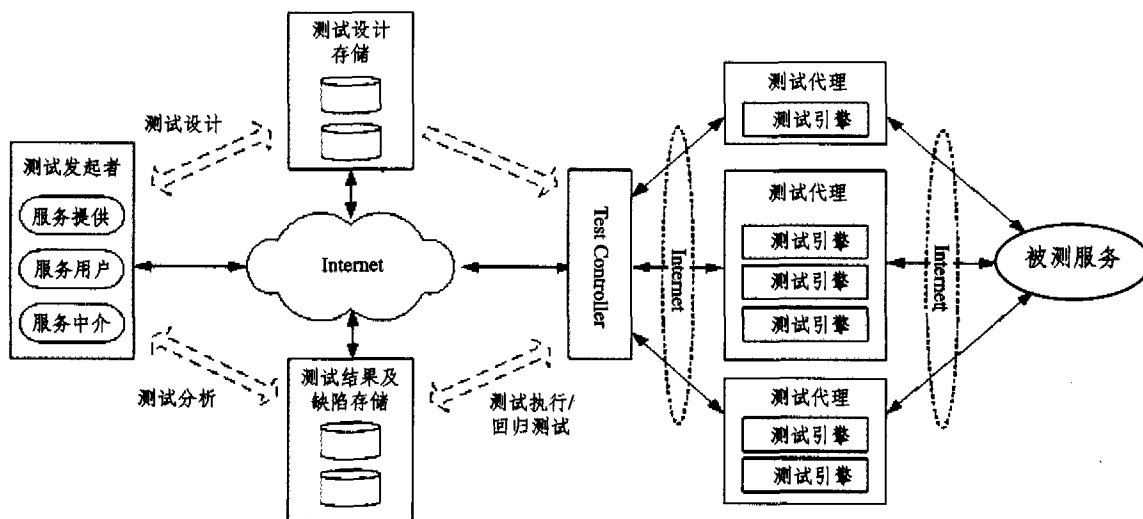


图 4 Web 服务测试组织

4 Web 服务测试研究现状

Web 服务测试的研究尚处于起步阶段。目前主要是采用基于模型的技术,验证就 Web 服务的相关协议和描述。通过 Web 服务的 XML 说明转化成形式化的模型(如有限状态机模型, Petri 网模型等),借助模型检测器(Model Checker)等自动化工具,验证协议和服务描述的完整性和一致性。

4.1 SOAP 协议可信性测试

N. Looker 和 J. Xu 采用错误植入的技术来测试 SOAP 协议的可信性,并采用一种基于度量的评估技术分析监测结果^[12]。他们分析了 Web 服务中间件层的错误模式,如服务

中断、服务器中断、服务挂起、中间件内数据崩溃、中间件外数据崩溃、消息重复、消息丢失和消息延迟等,并开发了相应的错误植入工具软件,通过与 SOAP APT 挂钩,将错误注入消息流中。系统响应被监测并记录,并对不可靠链接上的 Web 服务可靠性进行分析和度量。

4.2 WSDL 扩展

WSDL 是描述 Web 服务的基本信息,包括 Web 服务可以识别的数据类型、消息模式、交互方式、服务的位置、错误信息和标头信息等。W. T. Tsai 及其研究人员指出,应进一步扩展 WSDL 的定义,增强其描述能力,以支持对特定服务的测试^[15]。他们建议了 WSDL 四方面的扩展机制:对输入/输

出依赖性的描述,对服务间调用序列的描述,对并发序列的描述以及对功能层次关系的描述。输入/输出依赖可用于识别服务接口之间的联系,在回归测试中,可排除非相关测试,以减少测试用例的数量。服务调用序列捕获服务间的数据流/控制流依赖关系,并发序列捕获多个服务事件间的并发生行为,这两类序列描述可用于基于路径的测试用例设计。功能层次描述采用层次化的结构描述接口功能,可用于生成基于功能分解的测试用例。

4.3 基于模型的集成的 Web 服务验证

Shin 采用模型检测器 SPIN,提出了一种模型检查技术来验证服务流^[8,9]。Web 服务流的 WSFL 描述首先转化成 SPIN 的形式化描述语言 Promela。WSFL 活动映射为 Promela 的过程(automata);控制及数据链接映射为 Promela 进程间的通信管道。应用程序特定的属性采用 LTL (Linear Temporal Logic)描述。SPIN 接受 Promela 和 LTL 两种互补的描述信息,验证各服务节点的可达性、服务流无死锁等特性。

Howard 及其研究人员提出了一种基于 FSP (Finite State Process)服务流描述语言和验证机制。Howard 首先采用 MSC(Message Sequence Charts)^[24]来设计服务流,并采用 CASE 工具将 MSC 描述转换成 FSP 描述,并编译成状态机以分析所有允许的状态序列。然后,采用 BPEL4WS 描述 Web 服务流实现,并转换成 FSP。Web 服务流设计与实现的 FSP 描述相比较,并分析两个模型区别。不一致的特征被记录和跟踪。

X. Yi 和 K. J. Kochut 提出了一种 CP-net 模型,用以描述和验证 Web 服务流^[18]。CP-net 是一种扩展的 Petri 网模型。他们认为对话描述(conversational specification)应是服务流描述必不可少的组成部分。Petri 网比 FSM 能更清晰地描述对话特征。CP-net 扩展了 Petri 网数据类型和数据操作的原语,允许对于并发和过程间同步的描述,因此更适宜于 Web 服务流的验证。

Srini 和 Sheila 通过模拟执行不同的输入条件来测试 Web 服务^[9]。他们借用了语义网的概念,并采用了 DAML-S ontology 来描述 Web 服务的语义。DAML-S 是一种 DAML+OIL ontology, DAML+OIL 是一种基于逻辑的标识语言,用以描述分类信息。基于这种语义分析,服务流描述被转换成 Petri 网描述,并用以进行服务的模拟、测试、集成和验证。

4.4 Web 服务测试框架

W. T. Tsai 及其研究人员基于 progressive group testing 的理论,提出了一种可信的服务中介(trustworthy service broker)体系架构^[16]。如图 5 所示,这种架构增强了传统的 UDDI 中心的测试能力。UDDI 中心的测试主要包含检入和检出两个过程:

检入测试(Check-in Test):在服务提交到 UDDI 中心之后,位于该注册中心的测试引擎 TestMaster 依据本地的测试数据库,对提交的服务首先对进行服务质量检测。不合格的服务将被拒绝。

检出测试(Check-out Test):在接到服务请求之后,TestMaster 要查询符合需求的服务说明,并对候选的服务进行回归测试。测试有两个目的:一是对多个候选服务进行评估,选取最符合用户需求的服务;二是确认服务注册后没有新的变更,或是确定变更对服务质量造成的影响。

该测试方法既可用于测试单独的 Web 服务,也可用于测

试组合的 Web 服务。并且,为保证服务的质量,服务用户和服务提供者不再直接绑定,而是有 UDDI 中心对动态的绑定和服务链接进行管理。

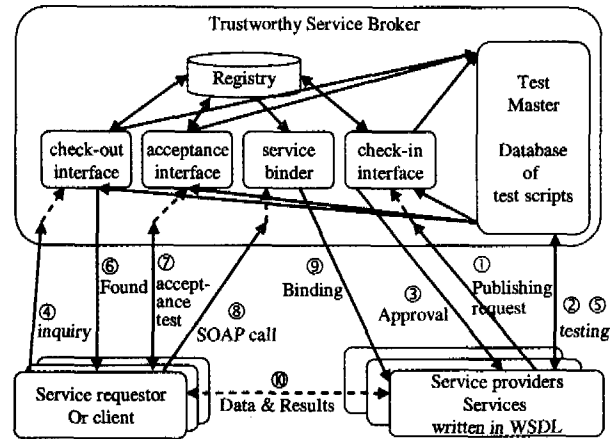


图 5 可信的 Web 服务框架

5 存在的问题及进一步研究方向

到目前为止,Web 服务测试还是一个崭新的研究领域。尽管已经有部分的理论模型用于 Web 服务的验证和确认,但绝大多数的 Web 服务测试问题还尚未涉及。现有的部分工具功能还极其有限。

B. D 指出了 Web 服务测试的 10 个主要问题,并强调 Web 服务是否能够成功广泛应用最终将取决于这些问题的解决能力^[5]。这些问题主要包括:Web 服务的基本功能测试、Web 服务协议测试、面向服务体系结构的发布、查找和绑定能力的测试、Web 服务的集成能力测试、Web 服务的服务质量测试、Web 服务的性能与负载测试以及 Web 服务的安全性测试。B. De 将 Web 服务测试研究归结为三个阶段^[4]。在第一阶段,主要是测试服务的基本特征,如功能、SOAP 消息和 WSDL 描述等。在第二阶段,主要测试面向服务的特征,如服务发布、查询和绑定能力,同步能力等。第三阶段主要测试服务的动态特性,如服务的组装和版本等。

为解决上述测试问题,下列测试技术的研究至关重要:

建立 Web 服务测试过程模型,以便在分布式的环境下,有效地、系统地组织各个相对独立的测试环节。

基于模型的验证技术的进一步研究,以有效验证协议族及各层 XML 描述的正确性、完整性和一致性。

测试自动化技术,包括基于规格说明的测试用例自动生成技术、测试脚本技术、远程测试执行、分布式环境下测试的调度和规划、测试结果的分析 and 度量。

Web 服务用户使用模式的捕捉、分析和预测,这是测试模拟的基础。尤其是对于性能测试,需要模拟典型的用户行为,以及高峰期的用户数、数据量和并发链接数。

CASE 工具的研发,以支持 Web 服务测试的管理、自动化、调度和监控。

结论 Web 服务为 Web 应用的体系架构、业务模型带来了重大变革。Gartner 研究报告表明,在世界范围内,Web 服务 2003 年占有 \$ 620 亿的软件市场,到 2007 年将增长 41%,占有 \$ 4450 亿的市场^[2],并预测 Web 服务技术将在 2005 年达到成熟发展的阶段^[3]。为达到 SOA 无缝链接服务的目的,并使 Web 服务被产业广泛接受,服务可信性是其成功的重要保证,测试是其中的关键环节。Web 服务测试尚缺乏有效的

方法、技术和工具。随着 Web 服务开发技术的完善, Web 服务测试也将从理论和实践两个方面, 不断地研究探讨新的更有效的方法和技术。

参考文献

- 1 Brooks F D. No Silver Bullet - Essence and Accident in Software Engineering, 1986
- 2 Gantera M. IT Professional Services Forecast and Trends for Web Services. Gartner, Inc., Jan, 2004
- 3 David S. Web Services Scenario: Setting and Resetting Expectations. Gartner SYMPOSIUM ITXPO, 2003
- 4 De B. Web Services - Challenges and Solutions. WIPRO white paper, 2003. <http://www.wipro.com>
- 5 De B. Testing Web Services - An Overview. WIPRO white paper, 2003. <http://www.wipro.com>
- 6 Foster H, Uchitel S, Magee J, Kramer J. Model-based verification of web service compositions. In: Proc. ASE'03, 2003
- 7 He H. What is Service-Oriented Architecture?. <http://webservices.xml.com/pub/a/ws/2003/09/30/soa.html>. Sep. 2003
- 8 Nakajima S. Model-checking verification for reliable web service. In: Proc. OOPSLA'02 Workshop on OOWeb Services, 2002
- 9 Narayanan S, Mellraith S. Simulation, verification and automated composition of web services. In: Proc. WWW'02. ACM, 2002
- 10 罗玲, 白晓颖. 基于 XML 的 RPC 技术分析. 计算机科学, 2004, 31(2): 167~170, 174
- 11 罗玲, 白晓颖. Web Services 技术分析. 计算机科学, 2004, 31(4): 19~23
- 12 Looker N, Xu J. Assessing the Dependability of SOAP RPC-Based Web Services by Fault Injection. In: Proc. of the Ninth IEEE Intel. Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS'03)
- 13 Thatte S. XIANG-Web Services for Business Process Design. Microsoft Corporation, May 2001

- 14 Tsai W T, Paul R, Cao Z, Yu L, Saimi A, Xiao B. Verification of Web Services Using an Enhanced UDDI Server. In: Proc. of IEEE WORDS, 2003. 131~138
- 15 Tsai W T, Paul R, Wang Y, Fan C, Wang D. Extending WSDL to Facilitate Web Services Testing. Department of Computer Science and Engineering, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, 2002
- 16 Tsai W T, Chen Y, Cao Z, Bai X, Huang H, Paul R. Testing Web Services Using Progressive Group Testing. Lecture Notes in Computer Science, 2004, 3309: 314~233
- 17 Wu D. et al. Automating DAML-S Web Services Composition Using SHOP2. <http://www.mindswap.org/papers/ISWC03-SHOP2.pdf>
- 18 Yi X, Kochut K J. A CP-nets-based Design and Verification Framework for Web Services Composition. In: Proc. of the IEEE International Conference on Web Services, March, 2004
- 19 Web Services Architecture [s]. W3C Working Draft, <http://www.w3.org/TR/ws-arch/>, Nov. 2002
- 20 Simple Object Access Protocol (SOAP) 1.1 [s]. W3C Note 08 May 2000. Available at: <http://www.w3.org/TR/SOAP/>
- 21 Web Services Description Language (WSDL 1.1) [s]. W3C Note 15 March, 2001. Available at: <http://www.w3.org/TR/WSDL/>
- 22 UDDI Version 3.0. Published specification [s], 19 July, 2002. Available at: <http://uddi.org/specification.html>
- 23 Web Services Flow Language (WSFL 1.0) [s], IBM Software Group, May 2001
- 24 MSCs: ITU-T Recommendation Z. 120: Message Sequence Charts, ITU-T, 1996
- 25 Web Services Conceptual Architecture (WSCA 1.0) [s], IBM Software Group, May 2001
- 26 Specification: Business Process Execution Language for Web Services. <http://www-128.ibm.com/developerworks/library/ws-bpel/>, May, 2003
- 27 W3C Extensible Markup Language (XML) page, <http://www.w3.org/XML/>

(上接第 247 页)

其中 w_i 为权系数, 且满足 $\sum_{i=1}^3 w_i = 1, 0 < w_i < 1$. 因此图像重建就等价于:

$$\min F(\vec{x}) = \sum_{i=1}^3 w_i f_i, (A\vec{x} \leq \vec{P}, \vec{x} \geq 0) \quad (3)$$

5.2 遗传算法求解

由于遗传算法具有通用性、鲁棒性和求解复杂问题的全局最优性等优点, 因此文中选择其中的 SGA 算法求解问题。但是 SGA 适用于单目标无约束优化问题, 要先将式(3)中的约束条件化去。为此, 要引入罚函数, 从而得出适应度函数。

设 $\vec{U} = \frac{A\vec{x} - \vec{P}}{\|A\vec{x} - \vec{P}\|}$ 中共有 q 项大于 0, 则罚函数 1 为:

$$g_1(\vec{x}) = \begin{cases} 0, & q=0 \\ -\sum_{i=1}^q u_i, & q>0 \end{cases}, \text{其中 } u_i \text{ 为向量 } \vec{U} \text{ 中的元素, 且 } u_i > 0.$$

又设 $\vec{V} = \frac{\vec{x}}{\|\vec{x}\|}$ 中有 r 项小于 0, 则罚函数 2 为: $g_2(\vec{x}) =$

$$\begin{cases} 0, & r=0 \\ -\sum_{i=1}^r v_i, & r>0 \end{cases}, \text{其中 } v_i \text{ 为向量 } \vec{V} \text{ 中的元素, 且 } v_i < 0.$$

由上可得, 适应度函数为: $f(\vec{x}) = F(\vec{x}) + \beta(g_1(\vec{x}) + g_2(\vec{x}))$, 其中 β 为惩罚系数。

遗传迭代算法两个重要参数是交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 。但由于种群过早收敛将会导致局部最优解而非全局最优解, 为此选取一参数 γ 作为早熟判定指标, 从而将 P_c 和 P_m 设计为 γ 的函数。

设某代种群适应度函数平均值为 $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i$, 其中 f_i 为

该代第 i 个体的适应度函数, N 为该代种群规模。令 $\gamma = f_{\max} - \bar{f}$, 其中 f_{\max} 为最优个体的适应值, \bar{f} 为所有大于的个体适应值的平均值, 这样就可以得出, 当 γ 增大时, 种群有早熟趋势。

$$P_c \text{ 和 } P_m \text{ 的函数式为: } P_c = 1 + 0.4 \left(-\frac{1}{1 + \exp(-k_1 \gamma)} \right)$$

$$P_m = 0.04 + 0.04 \left(-\frac{1}{1 + \exp(-k_2 \gamma)} \right)$$

其中 k_1, k_2 为大于 0 的常数。由此可看出, 当 γ 增加时, P_c 和 P_m 下降, 从而有效地阻止了种群早熟。

结束语 本文介绍了两种在不完全投影情况下的 CT 图像重建算法, 其中快速共轭梯度算法在保证重建图像质量的同时还大大加快了迭代速度, 多约束准则图像重建的遗传算法在保证较好重建质量时还存在不足, 但这两种方法都为迭代法求解少数数据投影重建问题提供了有效方法和切实的研究方向。

参考文献

- 1 Leahy R, Byrne C. Editorial. Recent development in iterative reconstruction for PET and SPECT. IEEE Trans. Medical Imaging, 2000, 19: 257~260
- 2 Liu W C, et al. Dynamic elastic interpolation for 3D medical image reconstruction from serial cross-sections. IEEE Trans. Med. Imag., 1988, 7(3): 225~232
- 3 Horbelt S, Liebling M, Unser M. Discretization of the Radon-Transform and of Its Inverse by Spline Convolutions. IEEE Transactions on Medical Imaging, April, 2002, 21(4): 363~376
- 4 Grevera G J, Udapa J K. An objective comparison of 3-D image interpolation methods. IEEE Trans. Med. Imag., 1998, 17(4): 642~652
- 5 王新成. 高级图像处理技术. 中国科学技术出版社, 2001
- 6 邓先礼. 最优化技术. 重庆: 重庆大学出版社, 1998
- 7 孙家广. 计算机图形学. 北京: 清华大学出版社, 1998