第 29 卷 第 7 期
2006 年 7 月
计 算 机 学 报
CHINESE JOURNAL OF COMPUTERS
Vol. 29 No. 7
July 2006

基于遗传算法的 QoS 感知的 Web 服务选择

张成文 苏 森 陈俊亮

（北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876）

摘 要 提出一种用于 QoS 感知的 Web 服务选择的遗传算法. 该算法采用关系矩阵编码方式，克服了一维编码方式表示的局限性，并且可以通过简单的方法来表示组合服务重计划及 Web 服务循环路径等情况，通过该算法一次运行，就可以从所有组合路径的组合方案中选出满足用户 QoS 需求的组合方案，而一维编码遗传算法在多路径情况下需多次编码、多次运行. 算法还采用一种变异策略来提高算法的适应度. 通过仿真比较，关系矩阵编码遗传算法比一维编码遗传算法获得了更优解，变异策略在提高算法适应度方面也发挥了作用.

关键词 Web 服务选择；QoS 感知；遗传算法；关系矩阵编码方式

中图法分类号 TP393

Genetic Algorithm on Web Services Selection Supporting QoS

ZHANG Cheng-Wen SU Sen CHEN Jun-Liang

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

Abstract A novel genetic algorithm is presented for Quality of Service (QoS)-aware Web services selection. The genetic algorithm includes a special relation matrix coding scheme of chromosomes that can express simultaneously all of composite paths, which can not be expressed simultaneously by the one dimension coding scheme. This matrix can also represent effectively the composite service re-planning and cyclic paths with the help of a simple method. Many composition scenarios can also be showed by the matrix but not by the one dimension. Elements along the main diagonal of the matrix are used to represent all tasks in all of composite paths and others elements in the matrix for the direct relationship between every two tasks. The proposed genetic algorithm running only once can construct the composite service plan according with the QoS requirements from a great deal of services compositions with different QoSes. Meanwhile, the algorithm adopts a mutation policy to improve the fitness. Experiments on QoS-aware Web services selection show that the genetic algorithm with this matrix can get more excellent composite service plan than the genetic algorithm with the one dimension coding scheme, and that the mutation policy plays a role at the improvement of the genetic algorithm fitness.

Keywords Web services selection; QoS-aware; genetic algorithm; relation matrix coding scheme

---

收稿日期：2006-01-04；**修改稿收到日期**：2006-04-13. **本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金**（2003CB314806）、**国家自然科学基金**（90204007）、**教育部新世纪优秀人才支持计划基金**（NCET-05-0114）、**长江学者创新研究团队计划基金**（PCSIRT）**资助**.
张成文，**男**，1972 **年生**，**博士研究生**，**主要研究方向为新一代互联网服务**、Web **服务**. E-mail：zwjcbj2007@gmail.com；zcwbupt@sohu.com. **苏 森**，**男**，1971 **年生**，**博士**，**副教授**，**主要研究方向为新一代互联网服务**. **陈俊亮**，**男**，1933 **年生**，**教授**，**博士生导师**，**中国科学院与中国工程院院士**，**主要研究领域为通信网络**、**通信软件**.

1 引 言

凭借着崭新的基本构架及其核心支撑技术[1]，Web 服务的应用范围不断扩大. 随着 Web 服务数量逐渐增多，不可避免地出现了许多服务提供者提供相同功能服务的情况，而这些服务具有不同的服务质量(QoS)，因此，在服务组合过程中，就需要基于用户的 QoS 要求对具有相同功能的 Web 服务进行选择. 基于 QoS 的 Web 服务选择在 Web 服务组合当中扮演着相当重要的角色[2,3].

基于 QoS 的服务选择方法有基于 QoS 语义[4~6]的也有基于 QoS 属性计算的[7~11]. 而采用 QoS 属性计算方法可以很好地满足用户对组合服务的全局限制. 穷尽计算方法[7~9]与遗传算法[10,11]是两种 QoS 属性计算方法. 获得用户期望的全局限制及寻找最优组合方案属于组合优化范畴，采用穷尽计算的组合优化方法存在扩展性差、计算量相对较大的弊端，相比之下，遗传算法更适合于解决优化组合问题[12].

遗传算法中各算子及参数的设计会对遗传算法产生很大的影响[13]，尤其编码方式是遗传算法的基础，它会直接影响遗传算法的选择算子、交叉算子和变异算子的设计，进而影响遗传算法的收敛性、复杂度及效率. 标准遗传算法中采用了二进制编码方式，而不同问题应采用不同的编码技术. 基于 QoS 的服务选择的编码方式不仅要反映 Web 服务组合情况，也要反映路径信息.

目前所提出的基于遗传算法解决 Web 服务选择方案虽然在一定程度上解决了服务选择问题，但由于都采用一维染色体编码方式，不能很好满足具有多路径特征的 Web 服务选择的需要，而且无法采用简单的方法表示组合服务重计划及 Web 服务循环路径等情况. 服务组合包含多种类型[3]，分为概率型、顺序型、并发型等，一维编码方式也无法同时表示这些类型.

采用一维编码方式不适合基于 QoS 的 Web 服务选择场景，需要设计一种新颖的编码方式来适应服务组合，针对这个问题，作者基于 Web 服务选择特征，提出了一种关系矩阵编码方式，通过关系矩阵编码定义，解决了多个路径用一种编码方式同时表示的问题，可以简单、有效地表示动态重计划及 Web 服务循环路径等情况，并且具有同时表示服务组合多种类型的能力. 通过关系矩阵编码与一维编码在基于 QoS 的 Web 服务选择上的仿真对比，验证了关系矩阵编码方式的有效性与合理性.

作者还设计了特定的适应度函数，并提出了一种变异策略，通过仿真研究，发现该策略可以有效提高算法适应度.

本文第 2 节简单介绍基于 QoS 属性计算的 Web 服务选择方面的研究进展；第 3 节详细讨论所提出的遗传算法，包括关系矩阵编码方式、交叉算子、变异算子及变异策略、适应度函数；第 4 节介绍仿真工作，并讨论仿真结果；第 5 节给出结论并指出下一步研究内容.

2 基于 QoS 属性计算的 Web 服务选择

2.1 QoS 定义

虽然目前不同标准和研究组织(如 ITU，ETSI，ISO，IETF 等)对 QoS 的认识仍然有一定差别，但国际标准 ISO 8402[14]和 ITU E.800[15]对 QoS 的定义更好地反映了 Web 服务 QoS 的特点. 根据上述标准的定义，QoS 由一些非功能属性组成，包括服务价格(cost)、执行时间(time)、服务可用性(availability)和执行的可靠性(reliability)等，这些都反映了用户的需要也影响了用户的满意度.

2.2 服务的多维 QoS 参数

组合服务由多个服务组件构成，组合服务总体 QoS 可以由单个服务组件 QoS 来表示. 因此需要定义一个开放的、公平的 QoS 计算模型，根据各个 Web 服务的属性值计算整个 Web 组合服务的 QoS 值.

表 1 仅列出了顺序、概率两种组合类型的 QoS 属性计算公式，若组合中存在多种类型时，将同时采用两类组合的计算公式，其它组合类型也有相应计算公式，在这里略去.

表 1 组合 QoS 计算

QoS 属性	顺序结构表达式	概率结构表达式
价格	$C(s)=\sum_{i=1}^{n}C(i)$	$C(s)=\sum_{i=1}^{m}p_iC(i)$
执行时间	$T(s)=\sum_{i=1}^{n}T(i)$	$T(s)=\sum_{i=1}^{m}p_iT(i)$
可用性	$A(s)=\prod_{i=1}^{n}A(i)$	$A(s)=\sum_{i=1}^{m}p_iA(i)$
可靠性	$R(s)=\prod_{i=1}^{n}R(i)$	$R(s)=\sum_{i=1}^{m}p_iR(i)$

概率结构表达式中的 p_i 表示第 i 个服务组件的执行概率，并且 $\sum_{i=1}^{m} p_i = 1$.

2.3　相关计算方法研究

通过建立 QoS 属性矩阵进行 QoS 计算是一种具有代表性的 QoS 属性计算方法，文献[7]的策略是建立在 QoS 属性矩阵定义与计算的基础上的，但它采用的算法属于局部优化算法，而不是全局优化算法.

文献[8,9]的作者在文献[7]工作的基础上做了进一步研究，提出了局部优化算法与全局优化算法. 两个算法适用于不同场景. 局部优化算法计算量少于全局算法，但是无法考虑全局 QoS 限制，而全局算法计算量大，尤其在动态环境下，但是它可以考虑全局 QoS 限制，因此这两个算法都存在计算局限性.

基于 QoS 的 Web 服务选择是 NP 难问题[11]，而遗传算法可以有效地解决这类问题[13]. 文献[10]采用的是一维染色体编码方式. 每个基因位表示一个候选 Web 服务，功能数、候选 Web 服务数越多，染色体越长，由于只能为每个任务从众多候选服务中选出一个服务，因此在每个组合方案当中，属于每个任务的基因位中会存在 1 个基因位取值为选中状态而所有其余取值都为未选中状态的情况，因此可读性不强. 文献[11]采用的也是一维染色体编码方式，基因位表示组合服务中的任务，基因位取值范围是候选 Web 服务，染色体长度比文献[10]的明显缩小，并且不会因为候选服务数量的改变而引起染色体长度发生变化，长度稳定性优于文献[10].

由于文献[10,11]的策略都是采用一维染色体编码方式，因此无法通过一次编码来表示所有组合路径. 它们只能一次表示一条路径，多条路径需要多次不同编码并通过多次算法执行才能最终从多条路径中选出最佳组合方案. 根据它们的编码定义，也无法简单地表示组合服务重计划及 Web 服务循环路径等情况. 另外，编码方式、交叉及变异算子也无法表示概率型、并发型等其它的服务组合类型.

3　基于关系矩阵编码方式的遗传算法

针对上述算法的局限性，本文根据 Web 服务组合特性提出了一种基于关系矩阵编码方式的遗传算法. 它首先根据服务组合逻辑进行编码，生成关系矩阵，通过将它的主对角线具体化为不同的组合来构成种群中的个体，并按特定的适应度函数进行个体选择. 由于种群是由属于不同组合路径的组合构成，因此交叉或变异操作需要依据矩阵的任务关系位判断新生成组合是否存在，直到生成新种群. 新种群再次经历选择、交叉、变异生成下一代种群，如此迭代，直到满足算法终止条件后算法终止. 下面详细讨论所提出的关系矩阵编码方式、变异策略与适应度函数.

3.1　染色体关系矩阵编码方式

3.1.1　Web 服务组合特性

Web 组合服务的功能可以分成多个子功能，本文称这些子功能为任务，会存在多个任务组合方案来完成相同的组合服务功能，这些组合方案在任务组成数量、组合顺序上是不同的. 本文将一个任务组合称为一条从起始任务到终止任务的路径，在服务组合过程中，每个任务会有多个服务组件与它对应，这些服务组件具有对应任务所要求的功能但具有不同的 QoS 属性，因此每条路径又存在多个具有不同 QoS 属性的组合方案. 理想的基于 QoS 的服务选择方法应能从众多路径、众多方案中选出一个符合用户 QoS 限制与需求的服务组合方案.

下面举例说明，这里采用文献[9]中使用的状态图来表示 Web 组合服务状况，一个简单的完全顺序类型的 Web 组合服务状态图的例子如图 1 所示.

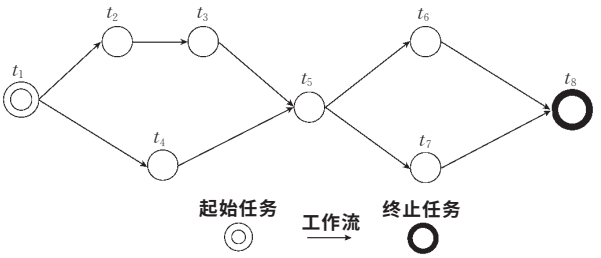

图 1　Web 组合服务状态图

图 1 中 t_i 表示 Web 组合服务中的第 i 项任务，也表示完成组合服务中的某个子功能. 从起始任务到终止任务路径上的任务关系可以用工作流来表示，即图 1 中的箭头线. 图 1 中有 8 个任务，从始到终的路径有 4 条，假设可实现每个任务功能的服务组件都是 10 个，那么完成组合服务功能的组合数量为 $10^6+10^6+10^5+10^5$，它的数值是十分大的. 随着任务数及服务组件的增多，总的组合数量会更大，在这种情况下，遗传算法具有更强的优势.

由此可知，Web 服务组合具有多种特性，如顺序性（各个任务按照一定的执行顺序运行）、多路径（完成同样功能的组合会覆盖不同任务）、一对多（每

个任务会对应多个可完成任务功能并具有不同 QoS 属性的候选 Web 服务)、动态性(组合服务在运行当中会出现已选 Web 服务失效或其 QoS 属性发生变化的情况).

3.1.2 关系矩阵编码定义

基于 Web 服务组合特性的分析,作者采用图论中邻接阵的思想,设计出了既能反映 Web 服务组合关系又能反映路径信息的新颖编码方式——"关系矩阵编码方式",如图 2 所示.

$$\begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & \cdots & g_{2n} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & \cdots & g_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1} & g_{n2} & g_{n3} & \cdots & g_{nn} \end{pmatrix}$$

图 2 染色体关系矩阵编码方式

图 2 中的 n 为组合当中的所有任务数,下面是关系矩阵编码方式的定义:

(1) g_{ii} 对应组合当中的所有任务,矩阵主对角线上的位置表示基因位,并且固定对应于 Web 组合服务中的任务,取值含义为

① "0"表示本次服务组合中未包含该任务;

② "−1"表示当发生组合服务重计划时,该任务处于正在执行状态;

③ "−2"表示当发生组合服务重计划时,该任务处于无效状态(该任务的所有候选服务都处于无效状态或由于规划等原因取消了该任务);

④ "−3"表示当发生组合服务重计划时,选上的服务发生变化(服务无效或服务的 QoS 属性发生变化);

⑤ 其它值对应被选上的 Web 服务,表示本次服务组合中包含该任务.

(2) g_{ij},其中 $i<>j$,是任务关系位,表示任务 i 与任务 j 在组合服务工作流中的直接前后关系,在工作流确定后,在不发生重计划的情况下,位取值不再发生改变.

在说明位取值含义之前,首先定义表示并发任务的标志数,分别为 $k1$,$k2$,$k3$,$k4$,这 4 个数是可调整的经验值,它们都表示某任务存在多个并发前趋(后续)任务.

g_{ij} 位取值含义为

① "0"表示任务 i 在工作流中不是任务 j 的直接前趋;

② "p",$0<p\leq 1$,表示任务 i 在工作流中是任务 j 的直接前趋,并且从 i 到 j 的分支概率为 p;

③ "m",$1\leq m<\min\{k1, k2, k3, k4\}$,表示任务 i 是任务 j 的直接前趋,且任务 i 与任务 j 间存在多次直接前后运行关系,m 表示运行次数;

④ "$k1$":对于任意一个任务,若对应的主对角线元素所处列的任务关系位数值中存在 2 个或以上的数值由 $k1$ 构成,则认为任务 j 存在属于同一组并发的多个并发直接前趋任务,任务 i 是其中的一个;

⑤ "$k2$":对于任意一个任务,若对应的主对角线元素所处行的任务关系位数值中存在 4 个或以上的数值由 $k2$ 构成,则认为任务 i 存在属于同一组并发的多个并发直接后续任务,任务 j 是其中的一个;

⑥ "$k3$":对于任意一个任务,若对应的主对角线元素所处列的任务关系位数值中存在两个或以上的数值由 $k3$ 构成,则认为任务 j 存在属于多组并发的多个并发直接前趋任务,任务 i 是某并发组中的一个;

⑦ "$k4$":对于任意一个任务,若对应的主对角线元素所处行的任务关系位数值中存在 4 个或以上的数值由 $k4$ 构成,则认为任务 i 存在属于多组并发的多个并发直接后续任务,任务 j 是某并发组中的一个.

对于 $k3$ 与 $k4$ 表示的情况,还需要查该任务对应的"并发情况表"来进一步确定哪些并发任务属于同一组并发团体.

借助于 p,m,$k1$,$k2$,$k3$,$k4$ 的组合,可以表示多种服务组合类型,图 3 列出了一些组合类型.

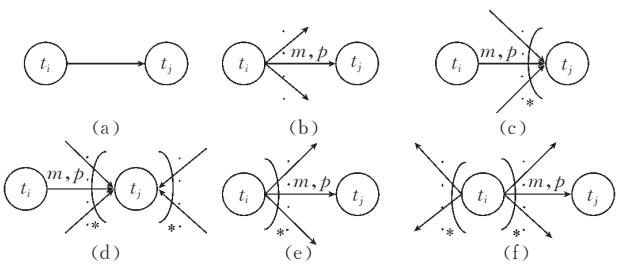

图 3 服务组合类型

表 2 中列出了与图 3 各种组合类型相对应的 g_{ij} 取值.

表 2 任务关系位取值

组合类型	含义	g_{ij}
图 3(a)	存在 m 次直接前后运行关系,且任务 i 是任务 j 的唯一直接前趋	m
图 3(b)	存在 m 次直接前后运行关系,且任务 i 到任务 j 的直接关系概率为 p	$m+p$
图 3(c)	任务 j 只有一组并发直接前趋任务,且任务 i 是其中的一个,存在 m 次直接前后运行关系,且任务 i 到任务 j 的直接关系概率为 p	$k1+m+p$
图 3(d)	任务 j 有多组并发直接前趋任务,且任务 i 是某并发组中的一个,存在 m 次直接前后运行关系,且任务 i 到任务 j 的直接关系概率为 p	$k3+m+p$

（续　表）

组合类型	含义	g_{ij}
图 3(e)	任务 i 只有一组并发直接后续任务，j 是其中的一个，存在 m 次直接前后运行关系，且任务 i 到任务 j 的直接关系概率为 p	$k2+m+p$
图 3(f)	任务 i 有多组并发直接后续任务，j 是某并发组中的一个，存在 m 次直接前后运行关系，且任务 i 到任务 j 的直接关系概率为 p	$k4+m+p$

从上面可以看出，矩阵编码可以表示组合当中的概率分支情况及前趋/后续分支并行执行的情况. 显然，m，$k1$，$k2$，$k3$，$k4$ 的取值应该能够互相区分开，并且不应该影响 g_{ij} 的取值分解，例如当 m 不大于 100 时，可以将 $k1$，$k2$，$k3$，$k4$ 分别取值为 100，200，400，800，这样由 m，$k1$，$k2$，$k3$，$k4$ 任意相加而成的 g_{ij} 会被无二义性地分解，从而可以精确获得任务间的关系.

根据关系矩阵编码的定义，可知基因位为矩阵主对角线上的元素，代表服务组合工作流中的任务；基因代表可实现任务功能的 Web 服务或其它定义值；染色体是矩阵主对角线上任务排列的具体表现，代表组合服务的一个组合方案；种群是组合服务方案集合中的一部分；交叉、变异操作只对矩阵主对角线上的任务位进行操作. 由此可知，该编码方式具有动（主对角线的进化操作）静（任务关系位的表示）结合的特点. 但在每次交叉、变异操作后，有可能生成无效的任务组合，需根据关系矩阵编码中的任务关系位来判断新生成染色体的有效性，若无效，需重新生成.

对图 1 的位置矩阵编码如图 4 所示.

$$\begin{pmatrix} t_1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & t_5 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_6 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_7 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_8 \end{pmatrix}$$

图 4　位置矩阵编码

在具体的编码中，图 4 主对角线将由具体数值取代.

3.1.3　关系矩阵编码方式的能力分析

关系矩阵编码具有如下能力：

(1) 全路径搜索能力. 任务位为 0 或不为 0 就能表示组合中不包含或包含该任务，如果交叉、变异操作按一定概率取 0 或某一候选服务，就可达到按一定概率改变组合路径的目的，从而实现全路径搜索，最终通过遗传算法的一次运行找出最佳组合方案；

(2) 路径重计划或任务重计划计算能力. “－1/－2/－3”取值的设定会使该编码方式具有路径重计划（后段路径需重新选择）与任务重计划（仅重新选择指定任务对应的服务）计算能力；

(3) 循环路径解决能力. 不论是两个任务间的直接循环还是多个任务间的循环，都需在矩阵关系位上设置循环次数值，且循环终止在循环次数值大的一方；

(4) 同时表示概率型、顺序型、并发型等多种服务组合类型的能力.

Web 服务运行于 Internet 之上，处于运行期间的 Web 组合服务难免发生动态变化，包括选择上的 Web 服务突然无效或它的 QoS 属性发生改变，为保持用户透明性，需重新选择有效的 Web 服务组合. 重计划有两种情况：① 若在组合服务运行期间，某任务变成了无效状态（对应该任务的所有服务都处于无效状态或由于规划等原因取消了该任务），分别对处于正在运行状态的任务及无效状态的任务所对应的基因位赋值，同时修改与无效任务相关的关系位，将处于运行状态的任务作为后段选择的起始任务，重选后面的任务组合，从而完成重计划操作；② 当前被选中服务处于无效状态，并且还存在有效候选 Web 服务对应该任务，则分别对处于正在运行状态的任务及 Web 服务发生变化的任务所对应的基因位赋值，并从 Web 服务发生变化的任务开始计算，从而完成重计划操作.

3.1.4　关系矩阵编码复杂度分析

编码方式决定了个体的组成结构，应该根据编码方式的特点设计算法的进化算子. 在一维编码方式中，种群由属于同一组合路径的个体构成. 交叉或变异操作生成的新组合都是合法组合. 算法获得的是同一条路径中的最优组合. 但是在矩阵编码方式中，主对角线由组成所有路径的所有任务构成，根据主对角线可以产生代表任何路径的个体（这也是矩阵编码方式的最大优势所在），算法获得的是所有组合路径中的最优组合，因此种群中会存在代表不同路径的个体，由于实际存在的组合路径数量只占主对角线元素可组合数量的很少一部分，再加上遗传算法固有的随机性，造成交叉或变异操作生成的新个体可能不代表任何现有的组合路径，需要交叉与变异操作，根据关系矩阵中的任务关系位检查新生成个体的路径合法性.

关系矩阵编码方式显然在操作复杂度上不优于

一维编码方式,但由于提供了不同路径间交叉及生成不同路径的机率,相当于在有限代数内扩大了解空间的搜索范围,会比一维编码方式获得更优的收敛性,后面的仿真验证了这一点.

3.2 交叉与变异算子的路径合法性检查

目前有两种新生成个体的路径合法性检查方法,一种是在进化操作时进行控制,另一种是在进化操作后进行检查.后一种方法是在形成新染色体后,从起始任务开始,通过编码中的任务关系位来检查路径是否合法,若不合法,则重新执行进化操作.这个方法的优点是不需更改交叉与变异操作;缺点是若非法分支处于整个路径的后部,则路径前部合法分支的检查工作是完全没有必要的.而采用前一种方法就可避免这种缺点,但它需要更改交叉与变异操作,使得交叉与变异操作具有对每一个被操作的任务进行合法性检查的能力.

3.2.1 交叉操作中的合法性检查

(1)若交叉点在两个待交叉染色体上的取值都是被选上的服务或都是 0,则交叉后的路径都是合法路径,相当于一次进行了多点变异操作;否则进行下一步操作;

(2)根据矩阵任务关系位判定两个新染色体是否在交叉点处形成连续有效的染色体.

3.2.2 变异操作中的合法性检查

(1)某任务在路径中由存在变异成不存在(也就是任务位取值变异成 0):若该任务是并发任务中的一个,则变异失败,需重新变异;若不存在与它并发的任务,应根据矩阵任务关系位寻找与该任务具有相同父任务的子任务,如果路径中至少存在一个这样的子任务,则新路径有效;否则重新进行变异操作;

(2)某任务在路径中由不存在变异成存在(也就是任务位取值由 0 变异成"某一候选服务"):根据矩阵关系位检查发生变异的任务在路径中是否存在前后相联的任务(后继并发也要考虑),只要有一个不存在,则重新进行变异操作,在前后任务存在的情况下,变异成功,但变异任务的前趋任务因为新增加一个变异成功的后继任务而出现分支,变异操作使原来的合法路径变成两个合法路径,因此需将它分成两个染色体,在极端情况下,变异后的种群个数会是原来个数的许多倍,但经过个体选择后,种群数将恢复正常;

(3)某任务变异前后在路径中都存在,只是由某一"候选服务"变异成另一"候选服务",不用进行合法性检查.

3.3 变异策略

作者提出了以下变异策略,来改善适应度.

规则 1. 某任务变异前在路径中存在,则该任务在变异后路径中存在与不存在的机率为 50%,若存在 n 个候选服务,上面的规则相当于将变成 0 的机率由 $1/(n+1)$ 增加到 50%,增加了生成不同路径的机会;

规则 2. 某任务变异前在路径中不存在(基因位变异前取值为 0),则该任务在变异后路径中存在与不存在的机率为 $1/(n+1)$,其中 n 代表候选服务数目.

3.4 适应度函数设计

设组合服务 s 由 n 个任务组成 $\{t_1,t_2,\cdots,t_n\}$,且服务的 QoS 由 m 个 QoS 属性来刻画,即 $\{Q_1,Q_2,\cdots,Q_m\}$,根据 QoS 计算模型,我们得出个体目标函数 f 的计算公式

$$f=\sum_{i=1}^{m}(w_i\times Q_i) \tag{1}$$

其中,w_i 为相应 QoS 属性的权值,表示用户对 QoS 属性的关注程度,并且 $0\le w_i\le 1$,$\sum_{i=1}^{m}w_i=1$;Q_i 为个体第 i 项 QoS 属性值;m 为 QoS 属性个数.

由于不同 QoS 属性值可能会相差几个数量级,例如服务执行时间和服务可用性,并且不同服务的 QoS 属性值也可能相差几个数量级,这样直接将 QoS 属性值代入式(1)必然会由于巨大的数量级差异影响函数的公平性.而且有些 QoS 参数对于服务评价产生负面影响,其值越大服务的 QoS 评价就应该越低,像服务价格和执行时间;而有些 QoS 参数对服务评价产生正面影响,其值越大服务的 QoS 评价就应该越高,像可用性和可靠性,所以需要对 QoS 属性按照式(2),(3)进行处理:

$$Q_i'=\begin{cases}\dfrac{Q_i^{\max}-Q_i}{Q_i^{\max}-Q_i^{\min}}, & Q_i^{\max}-Q_i^{\min}\neq 0\\ 1, & Q_i^{\max}-Q_i^{\min}=0\end{cases} \tag{2}$$

$$Q_i'=\begin{cases}\dfrac{Q_i-Q_i^{\min}}{Q_i^{\max}-Q_i^{\min}}, & Q_i^{\max}-Q_i^{\min}\neq 0\\ 1, & Q_i^{\max}-Q_i^{\min}=0\end{cases} \tag{3}$$

式(2),(3)中的最大值 $Q_i^{\max}$ 和最小值 $Q_i^{\min}$ 是所有组合服务当中第 i 项 QoS 属性的最大值与最小值,在计算出组合服务的第 i 项 QoS 属性值 Q_i 后,利用式(2),(3)求出 Q_i 对应的新数值 Q_i',其中对服务评价产生负面影响的 QoS 属性使用式(2)进行处理,产生正面影响的 QoS 属性使用式(3)进行处理.

最后组合服务的评价函数 f 可以表示为

$$f=\sum_{i=1}^{m}(w_i\times Q'_i) \tag{4}$$

其中 $\sum_{i=1}^{m}w_i=1$，$0\leq w_i\leq 1$，$0\leq Q'_i\leq 1$.

用户通常对组合服务提出全局 QoS 要求与限制，如 $Cost<60$，$Time<150$ 等，目标函数值大且满足全局 QoS 限制的个体具有高竞争力，罚函数法是一种通用的处理受限优化问题的方法，采用罚函数法将全局限制与目标函数综合在一起，来构成适应度函数 Fit：

$$Fit=f-\lambda\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\Delta P_j}{R_{j\max}-R_{j\min}}\right)^2 \tag{5}$$

其中，$R_{j\max}$，$R_{j\min}$ 分别为第 j 个约束条件中的最大值与最小值，n 为约束条件个数，λ 为系数，属于经验值，P_j 表示某个或某些 Q_i 的运算值（因为某些全局限制条件是对多个 Q_i 计算结果的限制），ΔP_j 定义如下：

$$\Delta P_j=\begin{cases}P_j-R_{j\max}, & P_j>R_{j\max}\\ 0, & R_{j\min}\leq P_j\leq R_{j\max}\\ R_{j\min}-P_j, & P_j<R_{j\min}\end{cases}.$$

4　仿真分析

我们分别进行了编码方式仿真对比与变异策略对比，无论哪种仿真对比，都采用相同的仿真软硬件环境，即 CPU 为奔腾 1.6GHz，内存 512MB，OS 为 Windows XP 专业版，开发语言为 Java，IDE 为Eclipse 3.1，并采用相同的运行数据，即相同的任务及任务关系、相同的候选 Web 服务及相同 QoS 属性值，这里采用随机生成每个任务所对应的候选服务数，范围从 15 到 50，每个服务拥有 4 个 QoS 属性值，具体属性值也是分别在一定的取值范围内随机生成.

4.1　编码方式仿真对比

首先讨论关系矩阵编码遗传算法与一维编码遗传算法[11]的仿真对比. 它们都采用标准遗传算法结构，相同的进化操作与概率值，采用本文的 QoS 模型、本文所提的适应度函数，个体选择采用轮盘赌法，为保证对比条件相同，采用如下的初始种群生成机制：在每次对比运行周期，随机生成矩阵算法的初始种群，并且保证代表每条路径的个体存在并且数量相同；而采用一维编码的算法分别以前面生成的代表每条路径的个体为初始种群进行计算. 对比方式是一维算法计算并对比各个路径的最佳组合，从而得出在一维编码方式下的全路径的最佳组合，然后再对比两种算法下的最佳组合.

我们在除了编码方式不同外、所有其它条件都相同的条件下进行了两种算法的对比实验，分别收集了统计对比数据与算法运行数据. 图 5、图 6 给出了两种算法在代数增加情况下适应度大小的对比结果，表 3 给出了在多次运行情况下最大适应度平均值、最大适应度时间平均值的对比结果.

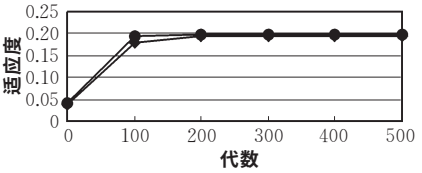

图 5　矩阵与一维编码适应度对比（任务数 10）

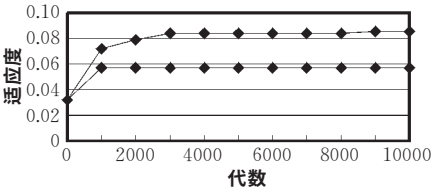

图 6　矩阵与一维编码适应度对比（任务数 30）

图 5、图 6 是种群数 400、交叉率 0.7、变异率为 0.1 的适应度比较结果，位于上面的线条都是矩阵编码遗传算法的仿真结果，位于下面的线条都是一维编码遗传算法的仿真结果，矩阵编码遗传算法可获得比一维遗传算法更大的适应度.

表 3 为两种算法分别运行 50 次的对比结果. 运行条件为种群数 400，遗传代数 400，交叉率 0.7，变异率 0.1，并记矩阵编码遗传算法为 $N(ew)$，记一维编码遗传算法为 $O(ld)$.

表 3　最大适应度平均值以及时间平均值对比结果（$N:O$）

任务数	最大适应度平均值	时间(ms)
10	0.198 : 0.197	278 : 768
25	0.084 : 0.062	5078 : 2716
30	0.066 : 0.052	7355 : 3161

从上面的仿真数据可以看出，矩阵编码遗传算法比一维编码遗传算法获得了更优解. 矩阵编码方式优于一维的原因是矩阵方式提供了通过多条路径的进化操作生成新路径的机会，相当于扩大了解的搜索范围，从而可以获得一维编码方式所不及的更优解；当任务数增多时，矩阵编码方式会发挥更大的作用，原因是矩阵编码的优点在于可以在原有路径的基础上生成新路径. 在任务数减少并且路径数也

减少的情况下,矩阵编码的优势就没有在路径多的情况下体现得明显.

4.2 变异策略仿真对比

下面是变异策略改善算法适应度的仿真对比,很显然,对比条件应该建立在矩阵编码的基础之上.我们分别与另两个变异方案进行了对比,首先约定采用本文所提变异策略的遗传算法为 A,另两种方案中的第一种变异方案:无论变异前任务在路径中存在还是不存在,都按 $1/(n+1)$ 的机率选取对应任务的每个"候选服务"与"0",其中 n 代表候选服务数目,并约定采用该方案的遗传算法为 B;第二种变异方案:无论变异前任务在路径中存在还是不存在,都按 50% 的机率选取对应任务的"候选服务"与"0",并约定采用该方案的遗传算法为 C.

仿真采用的 QoS 模型及适应度函数与上小节的仿真相同,其它运行参数为:种群数 200、遗传代数 500、交叉率 0.7、变异率 0.1、运行次数 50 次. A 与 B,C 的仿真比较结果见表 4.

表 4 最大适应度平均值对比($A:B:C$)

任务数	最大适应度平均值
10	0.194 : 0.192 : 0.190
20	0.233 : 0.151 : 0.151
25	0.181 : 0.094 : 0.081
30	0.103 : 0.071 : 0.065

从表 4 可以看出,A 可以比 B 获得更优解,原因在于 A 的变异策略规则 1 增加了生成新路径的机会,相当于在相同代数内增加了解的搜索空间,因而可以获得更优解;A 可以比 C 获得更优解,原因在于 A 的变异策略规则 2 比 C 增加了生成新路径的机会.

5 结论及未来工作展望

Web 服务以其特有优势使人们看到其广泛的应用前景,而基于 QoS 的 Web 服务选择的有效解决为 Web 服务的普及起到了有力的推动作用,使 Web 服务由一种技术转化为真正可以为人们使用的工具.人们提出许多方案来解决基于 QoS 的 Web 服务选择问题,其中基于遗传算法的解决方案是一种新颖的全局优化解决方案[10,11],但这些方案中染色体编码方式均采用一维编码方式,只能表示固定的前后任务关系,无法表示多个任务间的关系,无法通过一次编码来表示 Web 组合服务多条路径的情况,也无法同时表示概率型、顺序型、并发型等多种服务组合类型[3].在深入研究 Web 服务组合特点和遗传算法的基础上,作者提出了一种新颖的遗传算法,该算法采用关系矩阵编码方式,通过将任务取值与任务关系取值统一在关系矩阵中,使得该编码方式体现了染色体特征由基因及基因关系共同决定的特点,通过将 0 包括在任务位取值范围之内以及定义任务关系位,使得该编码方式可以表示组合服务的所有路径的组合方案、也可以表示多种服务组合类型,最终达到通过一次算法搜索就可以从所有工作流路径当中选出满足用户 QoS 需求的 Web 服务组合方案,并有效解决了动态重计划、Web 服务循环路径等问题.由于通过进化操作可以生成不同的路径,相当于扩大了解空间的搜索范围,搜索解空间范围比一维编码方式大,能获得比一维更优的解.通过两种编码方式仿真对比,验证了所提关系矩阵编码方式的合理性与有效性.在矩阵编码的基础上,基于矩阵编码的特点,提出了一种变异策略,通过仿真验证,该策略有效改善了矩阵遗传算法的适应度.

目前,遗传算法适应性研究是遗传算法的一个十分重要的研究领域[16~18],Web 组合服务遗传算法的自适应性方面还有许多要研究的工作;服务选择与不同服务领域特性相结合是提高选择效率与准确性的一种思路,已有相关成果出现[19,20].

未来的研究工作主要包括:

(1) 在遗传算法中增加自适应性,更好地服务于基于 QoS 的 Web 服务选择;

(2) 遗传算法与服务领域的研究相结合.

参 考 文 献

1 Yue Kun, Wang Xiao-Ling, Zhou Ao-Ying. Underlying techniques for Web services: A survey. Journal of Software, 2004, 15(3): 428~442(in Chinese)
(岳 昆,王晓玲,周傲英. Web 服务核心支撑技术研究综述. 软件学报, 2004, 15(3): 428~442)

2 Menascé D. A.. QoS issues in Web services. IEEE Internet Computing, 2002, 6(6): 72~75

3 Menascé D. A.. Composing Web services: A QoS view. IEEE Internet Computing, 2004, 8(6): 88~90

4 Tian M., Gramm A., Ritter H., Schiller J.. Efficient selection and monitoring of QoS-aware Web services with the WS-QoS framework. In: Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence, Beijing, China, 2004, 152~158

5 Soydan B. A., Singh Munindar P.. A DAML-based repository for QoS-aware semantic Web service selection. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services, California, USA, 2004, 368~375

6 Zhou Chen, Chia Liang-Tien, Lee Bu-Sung. DAML-QoS on-

tology for Web services. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services, California, USA, 2004, 472～479

7 Liu Y., Ngu A. H., Zeng L.. QoS computation and policing in dynamic Web service selection. In: Proceedings of the 13th International Conference on World Wide Web, New York, USA, 2004, 66～73

8 Zeng Liang-Zhao, Benatallah B., Dumas M., Kalagnanam J., Sheng Q. Z.. Quality driven Web services composition. In: Proceedings of the 12th International Conference World Wide Web, Budapest, Hungary, 2003, 411～421

9 Zeng Liang-Zhao, Boualem B. *et al*. QoS-aware middleware for Web services composition. IEEE Transactions on Software Engineering, 2004, 30(5): 311～327

10 Zhang Liang-Jie, Li Bing, Chao Tian *et al*. On demand Web services-based business process composition. In: Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics, Washington, USA, 2003, 4057～4064

11 Canfora G., Penta M. Di, Esposito R., Villani M. L.. A lightweight approach for QoS-aware service composition. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Service Oriented Computing, New York, USA, 2004, 36～47

12 Srinivas M., Patnaik L. M.. Genetic algorithm: A survey. IEEE Computer, 1994, 27(6): 17～26

13 Ignacio R., Jesús G., Héctor P. *et al*. Statistical analysis of the main parameters involved in the design of a genetic algorithm. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews, 2002, 32(1): 31～37

14 ISO 8402. Quality management and quality asssurance-Vocabulary

15 ITU-T Recommendation E.800. Terms and Definitions Related to Quality of Service And Network Performance Including Dependability, 1994

16 Hinterding R., Michalewicz Z., Eiben A. E.. Adaptation in evolutionary computation: A survey. In: Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Indianapolis, USA, 1997, 65～69

17 Zhao Shu-Guang, Jiao Li-Cheng *et al*. Uniform design based multi-objective adaptive genetic algorithm and its application in evolutionary design of analog circuits. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(10): 1723～1729(in Chinese)
(**赵曙光,焦李成等.基于均匀设计的多目标自适应遗传算法及应用.电子学报**, 2004, 32(10): 1723～1729)

18 Chen Xian-Fu, Zhuang Zhen-Quan, Wang Xu-Fa. Adaptive evolution strategies of genetic algorithms and genetic optimization of the traveling salesman problem. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(7): 111～114(in Chinese)
(**陈贤富,庄镇泉,王煦法.遗传算法的自适应进化策略及 TSP 问题的遗传优化.电子学报**, 1997, 25(7): 111～114)

19 Zhao Jun-Feng, Xie Bing, Zhang Lu, Yang Fu-Qing. A Web services composition method supporting domain feature. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(4): 731～738(in Chinese)
(**赵俊峰,谢 冰,张 路,杨芙清.一种支持领域特性的 Web 服务组装方法.计算机学报**, 2005, 28(4): 731～738)

20 Yang Wen-Jun, Li Juan-Zi, Wang Ke-Hong. Domain-adaptive service evaluation model. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(4): 514～523(in Chinese)
(**杨文军,李涓子,王克宏.领域自适应的 Web 服务评价模型.计算机学报**, 2005, 28(4): 514～523)

ZHANG Cheng-Wen, born in 1972, Ph. D. candidate. His research interests are in the areas of Web services, NGI services, etc.

SU Sen, born in 1971, Ph. D., associate professor. His research interests are in the areas of NGI services, etc.

CHEN Jun-Liang, born in 1933, Ph. D. supervisor, professor, member of Chinese Academy of Sciences and Chinese Academy of Engineering. His research interests include communications network and communications software, etc.

Background

This research is supported by the National Basic Research Program (973 Program) of China under grant No. 2003CB314806; the National Natural Science Foundation of China under grant No. 90204007; the Program for New Century Excellent Talents in University of China under grant No. NCET-05-0114; the program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (PCSIRT).

QoS-aware Web services selection is one of the most significant issues of Web services composition. The authors' main objectives are to provide a special genetic algorithm for QoS-driven Web services selection. In this paper, a novel genetic algorithm, which is composed of a special relation matrix coding scheme of chromosomes, a mutation policy and a special fitness function, is presented. All of composite paths, the composite service re-planning and cyclic paths can be expressed simultaneously with this matrix coding scheme. The mutation policy is to improve the fitness of genetic algorithm. The experimental results show that the genetic algorithm with this matrix can get more excellent composite service plan than the genetic algorithm with the one dimension coding scheme, and that the mutation policy plays a role at the improvement of the genetic algorithm fitness. A number of directions for the future research on the genetic algorithm for QoS-aware Web services selection are also presented.