

文章编号: 1001-0920(2003)02-0185-05

一种基于免疫突现计算的生物网络结构的设计

丁永生, 任立红

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 200051)

摘要: 基于生物免疫系统的机理, 研究生物免疫系统的突现特征。在此基础上设计一种新颖的生物免疫网络结构及其仿真平台, 讨论了生物网络结构仿真平台的整体框架设计、功能和生物机理及其原型实现。该平台可用于研究未来的智能 Internet 网络体系结构, 并仿真和构造复杂的大规模的 Internet 网络服务与应用。

关键词: 生物免疫网络; 突现计算; 生物网络结构

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Design of a bio-network architecture based on immune emergent computation

D IN G Yong-sheng, R EN L i-hong

(College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: The emergent characteristic of the biological immune system is studied based on its mechanism. A new bio-network architecture and its simulation platform are designed. The design of the overall scheme, the functions and the biological mechanisms, and the prototype implementation of the bio-network architecture are also discussed.

Key words: Biological immune system; Emergent computation; Bio-network architecture

1 引言

生物信息系统的开发为工程领域提供了各种富有成效的智能技术和方法, 例如模糊系统、神经网络、进化计算和免疫计算等在许多实际问题中都得到了成功的应用。从某种意义上讲, 基于生物系统原型开发的各种计算模型, 其整体行为超过了各个部分的总和, 例如联接模型、分类器系统、元胞自动机、人工生命模型以及没有中心主体的社会合作系统等。在这些系统中, 局部相互作用能突现全局行为^[1, 2]。本文将出现这些突现的计算称为突现计算, 它包含 3 个重要方面: 自组织、聚集现象和协作行

为。自组织意味着从一个初始的随机系统自发产生突现; 聚集现象指系统中有多个主体, 它们之间相互作用, 但强调的是全局模式; 协作行为指系统的整体行为超过了其各个部分的总和。

近年来, 智能 Internet 网络已成为人们研究的热点。未来的 Internet 要求: 1) 新的应用程序和用户界面使 Internet 对用户越来越“透明”; 2) 移动计算正成为一个越来越受关注的发展领域; 3) 服务商必须能够根据用户不同的应用需求提供不同的价格方案; 4) Internet 演变过程的控制机制; 5) Internet 网络节点的安全等。其关键需求有自扩充性、对异构和

收稿日期: 2001-11-26; 修回日期: 2002-01-14。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(60004006); 上海市青年科技启明星计划基金资助项目(00QD 14038); 上海市青年教师基金资助项目(01QN 33)。

作者简介: 丁永生(1967—), 男, 安徽怀宁人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事网络智能自动化、计算智能和 DNA 计算等研究; 任立红(1966—), 女, 内蒙古赤峰人, 副教授, 博士, 从事网络智能自动化、DNA 计算和软计算等研究。

动态条件的自适应性、安全性、自救性及服务和应用的简单易操作性等。这些需求促使我们有必要进一步优化 Internet 网络体系结构,并设计其应用。本文基于以上背景,研究生物免疫系统的突现特征,并在此基础上设计一种新颖的生物网络体系结构及其平台,该平台可用于仿真复杂的大规模的 Internet 网络服务与应用。

2 生物免疫系统的突现计算及其特性

免疫系统由具有免疫功能的器官、组织、细胞、免疫效应分子以及有关的基因等组成,可以保护机体抗御病原体、有害的异物和癌细胞等致病因子的侵害。从信息处理的角度看,生物免疫系统中有一些关键概念和许多特性可用于 Internet 网络服务与应用。

1) 突现行为及其特征:生物免疫系统是由许多淋巴细胞组成的,每个淋巴细胞(个体)遵循一组简单的行为规则(如迁移、再生、变异和死亡等),而一群个体(如免疫网络)则展示复杂的突现行为(如适应性、进化、安全性和自救性等),也就是说,免疫系统是由一组展示突现行为的自治个体通过局部相互作用组成的^[3,4]。生物免疫系统是安全的、可生存的,即使一定比例的个体被入侵者、事故或疾病损伤,它们仍然能起作用,这些都是突现行为的结果。生物免疫系统在维持机体内环境平衡中主要起防御、自稳态和免疫监视 3 种作用,通过对抗体的抑制和促进作用,能自我调节产生适当数量的必要抗体,维持免疫平衡。以上机理可用于网络稳定、自救、防御和安全等方面。

2) 生物免疫系统的细胞和分子分布式地通过生物体,是一个没有中心控制器的鲁棒的自治分布系统,而且是一类能有效地处理问题的非线性自适应网络。免疫系统是一个动态维持的自组织存储器,具有内容可访记忆和能遗忘很少使用的信息等进化学习机理,以及通过学习外界物质的自然防御机理。生物免疫系统的组成细胞和分子具有与它们的服务和应用相关的功能,而且通过变异和自然选择机理进化到期望的行为,能自治地适应异构和动态变化的环境条件,在局部范围内进行自治可获得自扩充性。网络服务和应用同样可借鉴生物免疫网络的这些能力来适应异构和动态变化的网络条件,获得自扩充性。

3) 生物免疫系统的多样性遗传和细胞选择机理等可用于优化网络服务,它的一些特性(如侵入检测、自主复制、算法多样性和生物个体分散性等)可

用于设计网络服务和应用。

4) 免疫学中的各种免疫网络学说,可被借鉴用于建立各种网络拓扑结构模型^[3,4]。例如互联耦合免疫网络模型,其核心就是通过自底向上方式的小规模免疫网络(局部免疫网络)之间的相互作用来实现免疫系统的重要功能。免疫系统识别抗原由抗原-抗体反应网络从系统水平上完成,其总体行为是许多局部免疫网络相互作用的突现特性。

5) 免疫系统的局部记忆学说表明,将免疫系统的各种特性集成在一个统一的框架下,可开发一种移动 Agent 自治系统。故可采用移动 Agent 技术来建立免疫移动 Agent 的生物网络结构,动态地学习和适应外界环境,以用于移动网络和无处不在的计算方面。

生物免疫系统中还有与 Internet 网络有关的其他特性,在此不一一赘述。

3 生物免疫网络结构设计

从生物免疫系统的机理看,将免疫系统的各种特性集成在一个统一框架下,与移动 Agent 系统有很多相似之处。下面讨论采用移动 Agent 技术实现生物免疫网络结构的总体框架和各个组成部分的设计与实现。

3.1 整体框架设计

生物免疫网络结构的整体框架包括:生物网络软件平台、各种重要组成元件(通有主体、资源主体和超级主体等)和生物网络结构仿真器等,其节点结构如图 1 所示。它的运行环境为 Windows 2000 和 Java 虚拟机。每个节点上的生物网络平台软件为各种主体提供运行环境及与各节点上软、硬件通讯的桥梁。

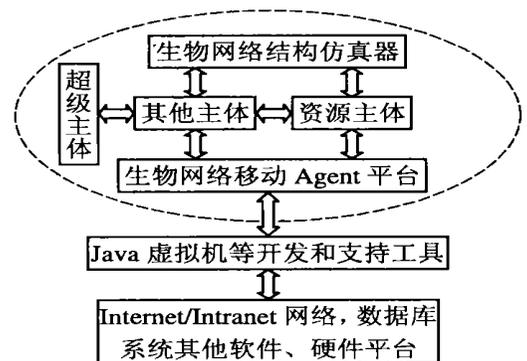


图 1 生物网络结构中的节点结构

3.1.1 基于移动 Agent 系统的生物网络软件平台

移动 Agent 系统是生物网络结构的基础,它由多个在网络中移动 Agent 宿主上运行的自治移动

A gent 组成。移动 A gent 具有动态性、分布计算和自主性等特点, 很容易适应运行环境和网络状态的变化, 可保护重要的应用在稳定的网络环境下免遭破坏, 并可在网络通讯正常后恢复应用的状态。我们可在移动 A gent 系统上添加上面介绍的免疫系统的生物机理(如防御、遗传、复制、死亡等)建立一个更加完善的生物免疫网络模型。基于移动 A gent 技术的生物免疫网络的仿真平台, 能支持移动对象的迁移、通讯和查表服务等。它包括 A gent 执行平台、A gent 编程模型、Inter-agent 通讯、A gent 监控各种 A gent (如辅助 A gent、杀伤 A gent 和抑制 A gent)、分布组多点、支持和管理测试 A gent 行为建模和目录服务等。

3.1.2 各种重要组成元件

这些重要元件包括通有主体、资源主体和超级主体等。

在网络环境下, 移动 A gent 系统主要通过通有主体来执行网络服务和应用。通有主体由属性、本体和行为等部分组成。属性部分包含该主体本身的信息(如唯一主体 ID 号、所属的超级主体、本体类型、本体包含的内容或任务、需要的系统资源、能量水平、当前位置、年龄等); 本体部分包含要处理的任务和实现的功能。通有主体的任务有: 1) 如何在生物免疫网络结构中活动; 2) 如何感知生物免疫网络结构中的状态; 3) 如何与其他同类主体通讯; 4) 如何添加属性和规则, 使通有主体实体化, 用于某类网络服务和应用; 5) 如何移动规则代码等。行为定义和控制主体的自治作用主要有: 1) 资源购买行为; 2) 迁移行为; 3) 复制/再生行为; 4) 死亡行为; 5) 关系行为; 6) 保护行为; 7) 通讯行为等。

资源主体管理和分配资源到网络节点上的其他主体。主体在网络节点上运行生物网络平台软件, 付代价给资源主体以允许其在网络节点上使用资源, 并且也付代价用于迁移和再生。资源主体的本体包含与它所管理的资源有关的参数, 例如网络带宽、CPU 时间和内存。

超级主体是由多个主体的行为和相互作用形成的, 它不依赖于任何特定的主体, 也不需要确定数目的主体。在生物网络结构中, 超级主体的行为和特性产生需要的服务和应用。主体与生物个体(如免疫系统中的抗体)类似, 具有与它们的服务和应用相关的功能, 遵循一组简单的行为规则。多个主体相互作用则展示复杂的突现行为, 以形成超级主体。

图 2 为模拟生物免疫系统的可变动态性得到的

超级主体, 它表明在生物免疫系统中, 网络结构不是固定的, 而是不断变化的, 它根据动态变化的条件自组织形成。新的细胞由骨髓中基因重组和活化细胞繁殖过程中的变异而产生。虽然每天有新的细胞产生, 但大多对网络没有影响, 并很快死亡。这种可变动态性能维持细胞的适当复制, 使得网络系统能处理环境的变化。

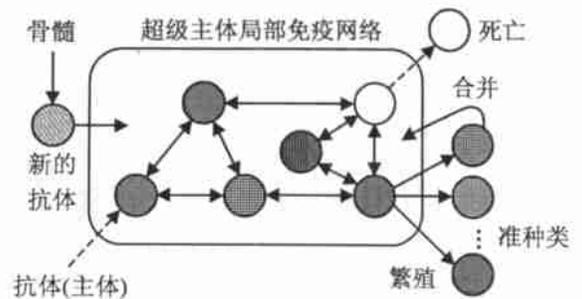


图 2 生物网络中超级主体的形成过程

3.1.3 生物网络结构仿真器

可以在该仿真器中构造各种静/动态网络, 并通过参数设置, 仿真大规模的复杂的异构网络。可用实验来评价在仿真环境中不同的生物概念和机理, 探索生物网络结构的基本行为、主体行为和突现行为之间的映射关系及网络服务模型等。通过对生物免疫网络的建模, 使生物网络结构在仿真环境中能产生所期望的突现行为, 尤其是群体的动态特性、自适应、自扩充性和进化机理等创发性机制。通过这种方式来构建 Internet 网络服务和应用非常简单, 因为仅需要设计主体层次上的相对简单的行为。而其他要求(如适应性、安全性和自救能力)则是多个主体共同作用的突现行为。

3.2 功能和生物机理

(1) 突现行为和特征

在生物免疫网络结构中, 期望的行为、功能或服务是通过一组分布、聚集的主体自治形成超级主体突现的。每个主体具有与它们服务相关的基本功能, 当主体请求服务时, 它创建一个服务请求, 并发送给所在环境内的主体。某一主体的环境主要指该主体能与其他主体通讯的区域。主体是提供所需服务的超级主体的成员。超级主体是使用生物免疫网络结构建立的服务, 网络中可以包含多个超级主体, 它们可通过主体的相互作用同时突现。超级主体可以通过自然选择过程, 使得只有成功的主体得以生存, 而不成功的主体则从网络中消除。例如, 主体可与临近的主体建立一种关系, 提供一种相似或互补的服务

以形成超级主体。

使用生物免疫网络建立的服务和应用将共享一组共同的重要特性,例如:1)自扩充性:超级主体是可扩充的,因为它的所有主体是基于环境的局部信息而设计成自治和局部的;2)自适应性:超级主体通过其主体的突现行为和关系来适应异构和动态的网络条件;3)进化:生物网络可以通过多样性和自然选择等机理来提供服务的进化;4)简单性:仅需要设计单个主体的相对简单的行为,且主体可以自治地学习超级主体的关系,使超级主体的构建得以简化;5)安全性和可生存性:超级主体有多种突现的安全性和可生存性行为 and 特性,它们可作为抵御攻击和失败的附加层,添加到现有的网络安全技术中。

(2) 服务的进化

生物网络结构中的服务突现是通过多样性的创建和自然选择来进化的:1)环境学习:主体自治地迁移,它们可与将要迁移到的节点上存在的主体建立一种新的关系,于是一个超级主体便可动态地获取新的主体。服务和应用是通过动态地创建和修改超级主体的关系,即通过动态地添加和移去主体以形成一个新的超级主体来突现的。例如,当相同服务类型的主体相遇时,它们可以交换彼此之间具有的关系信息。2)遗传操作:当一个主体复制时,或当相同服务类型的主体相遇并重组时,被复制的(多个)主体所具有的关系可通过遗传操作(如变异和交叉)来产生新的关系。服务的进化促进了系统的自适应性。

(3) 能量

每个主体可以存储和花费能量用于生存。主体可以提供服务而赢得能量,也花费能量用于使用网络和计算资源。存储能量可作为一种自然的选择机理,它的充足和缺乏会影响主体行为和生物免疫网络的资源选择过程。存储能量充足表明主体具有较高的需求,它就可与存储能量较高水平的主体进行相应的重组。如果一个主体不能偿付它所需要的网络资源,它将由于缺乏能量或饥饿而死亡。

(4) 关系的建立

主体通过与其他主体建立关系以形成社团或小组。例如:属于相同超级主体的主体可以相互间建立超级主体关系;属于不同超级主体的主体可以建立友元关系;属于相同团体的主体可以建立团体关系;在相同节点的主体可以建立局部关系。相互间有关系的主体可以通讯。

(5) 环境的感知

主体的环境包括与之有关系的所有主体和可以

访问的网络资源。在生物免疫网络中,主体监控它们的环境。例如一个主体可以知道环境中有哪些主体,以及它们提供什么服务。一个主体也可以监控环境以获取信息,例如用户信息和网络资源信息。对于某一给定的主体,它的环境仅包含那些与它有关系的主体。对于不同的主体,它的环境是不相同的。

(6) 相互作用

每个主体自治地与环境中合适的主体相互作用,以聚集地提供服务。可以设计不同的算法和策略来发现与某个主体相互作用的合适的主体。例如一个主体可以选择与它最近相互作用的主体。

(7) 迁移

主体可以从一个网络节点迁移到另一个网络节点。服务请求(即抗原)可以通过 Inter-agent 通讯信息结合到移动 Agent 系统。服务主体(即抗体)会被抗原吸引并向之迁移。然而,移动 Agent 宿主会基于迁移一个 Agent 时的带宽和计算代价来收取一定的费用,也会由于频繁地迁移而获得惩罚,使得移动 Agent 在迁移代价(花费网络和宿主资源)与迁移得到的利益(较少的网络阻塞)之间寻求平衡。迁移行为包含确定迁移到哪或什么时候迁移。向一个临近节点移动的利益可以包含较低的价格,用于在临近节点上的资源。迁移也可以获取一个新的关系。一个主体在它将要迁移到的节点上会与新的主体相遇,这将增加建立新关系的可能性,从而创建新的服务。

(8) 复制和重组

生物免疫系统的可生存性机理,是指生物组织为了适应变化的环境而不断地复制,并阻止某一类型的攻击。这种可变化机理可用于设计移动 Agent 系统,以阻止对服务主体的攻击。主体可以通过复制来拷贝自己,两个双亲主体可以重组产生一个孩子主体。变异选择在环境中寻找一个相似的合作者。交叉混合了双亲的行为规则和关系列表以产生后代的新的行为。

(9) 自然选择

在生物免疫网络中,自然选择机理是基于超级主体水平上的能量交换。存储能量充足表明对该主体有较高需求,这样的主体可被设计成与较高水平的存储能量相对应的合适的重组。如果一个主体的存储能量不足以平衡它提供给其他主体为其服务所需的能量,它将不能偿付它所需要的网络资源,也就是说,它将由于缺乏能量或饥饿而死亡。

(10) 死亡

主体可以由于年纪或缺乏能量的原因而死亡。超级主体中一些主体的死亡, 将导致服务的终止(如果超级主体中没有其他主体提供相同的服务)或不会导致服务终止(如果在超级主体中存在该主体的一个复制)。

(11) 多样性

生物免疫网络的主体层提供了足够的多样性。我们可以设计带有不同行为的多主体, 用于执行相同任务以确保足够的多样性。为了确保进化过程涉及到足够范围的行为因素, 而且导致的服务能执行自然选择使得系统适应和进化, 以满足许多种类的环境条件。

(12) 通讯机理

生物网络结构中的主体必须能够通讯。一个主体能够简单地观察或检测它所处环境中的一些状态, 以获取信息。

3.3 原型实现

目前, 本文已采用 Windows 2000 运行环境和 Java 语言编程环境实现了生物网络平台软件, 通有主体和仿真器的部分功能。Java 的网络通讯模块支持 Sockets, URL 通讯和分布式对象协议(RMI), 很容易实现分布主体间的通讯; 标准 Java 虚拟机、对象序列化机制和基于 Server 的软件结构等特点, 使移动 Agent 技术在 Java 中易于实现。在具体设计时, 采用面向 Agent 和面向对象的程序设计技术。

在生物平台仿真软件中, 有生物网络结构的不同软件包, 如仿真器、图形用户界面、节点和主体等。我们通过搭建虚拟网络, 并在其上运行生物网络平台软件, 显示生物网络各个组成部分的基本操作, 并研究了突现行为: 首先独立地设计每个单个元件, 然后将所有元件看作一个组来构造局部网络, 再通过局部网络来构造全局网络, 从而发现超级主体, 展现

突现行为。我们还验证了一些生物机理, 例如管理主体的生命周期循环, 提供初始化、复制、变异、重组、交叉、销毁等操作; 能量管理服务; 资源分配; 社会网络服务; 关系管理服务以及发现主体的方法等。

4 结 语

生物免疫网络结构是生物信息学、免疫学、突现计算、智能科学、计算机科学、系统工程、数学、物理和哲学等领域的交叉研究。本文的生物网络结构将为未来网络结构的自组织、自维护、自修复、安全、优化和控制等研究开辟一条新颖的途径, 提供一个良好的理论研究的仿真环境和实际应用实验平台。在此平台上可研究未来 Internet 网络结构及设计 Internet 新的信息智能服务和应用。其进一步的工作是扩充生物网络软件仿真平台的功能, 并在此平台上进一步开发生物网络结构应用和服务的仿真器, 实现和构造复杂的生物网络结构的服务和应用。

参考文献(References):

- [1] 李夏, 戴汝为. 突现(emergence)——系统研究的新观念[J]. 控制与决策, 1999, 14(2): 97-102
(Li X, Dai R W. Emergence—A new concept of system research [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(2): 97-102)
- [2] Bhalla U S, Lyengar R. Emergent properties of networks of biological signaling pathways [J]. *Science*, 1999, 283(5400): 381-387.
- [3] Zak P. Immune network—Model inspired by immune system [J]. *Neural Network World*, 1997, 7(6): 739-756
- [4] 丁永生, 任立红. 人工免疫系统: 理论与应用[J]. 模式识别与人工智能, 2000, 13(1): 44-51
(Ding Y S, Ren L H. Artificial immune systems: Theory and applications [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2000, 13(1): 44-51)

(上接第 184 页)

参考文献(References):

- [1] Gilboa I, Schmeidler D. Case-based decision theory [J]. *Quarterly J of Economics*, 1995, 110(3): 605-639
- [2] Gilboa I, Schmeidler D. Case-based knowledge and induction [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 2000, 30(2): 85-95
- [3] 田大钢. DSS 结构的联接主义观点[D]. 武汉: 华中理工大学, 1999
- [4] Dubois D, Esteva F, Garcia P, et al. Fuzzy modeling of case-based reasoning and decision [A]. *Case-based Reasoning Research and Development. Proc ICCBR-97* [C]. New York: Springer-Verlag, 1997. 1266: 599-610

- [5] Zadeh L A. 模糊集与模糊信息粒理论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2000
- [6] Dubois D, Prade H. Decision-theoretic foundations of qualitative possibility theory [J]. *European J of Operational Research*, 2001, 128(3): 459-478
- [7] Schmeidler D. Subjective probability and expected utility without additivity [J]. *Econometrica*, 1989, 57(3): 571-581