

自然计算的新分支——膜计算

张葛祥¹⁾ 潘林强²⁾

¹⁾(西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

²⁾(华中科技大学控制科学与工程系 武汉 430074)

摘 要 作为自然计算的新分支,膜计算是当前计算机科学、数学、生物学和人工智能等多学科交叉的研究热点.概述膜计算的最新动态,以一个简单膜系统为例介绍膜计算的基本概念和基本原理,从细胞型、组织型和神经型三类膜系统以及它们的计算能力和计算效率方面介绍膜计算理论研究进展,通过概括膜计算国内外应用研究成果讨论其应用前景和方向,并从软硬件发展历程分析膜系统软硬实现研究现状.最后给出有关膜计算研究的重要网络资源、热点研究领域和重点关注的问题.

关键词 自然计算;膜计算;细胞;膜系统;计算能力;计算效率

中图法分类号 TP301 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2010.00208

A Survey of Membrane Computing as a New Branch of Natural Computing

ZHANG Ge-Xiang¹⁾ PAN Lin-Qiang²⁾

¹⁾(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

²⁾(Department of Control Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract As a new branch of natural computing, membrane computing is a hot cross-discipline topic, which involves computer science, mathematics, biology and artificial intelligence, etc.. This paper outlines the recent development of membrane computing. A simple membrane system is taken for an example to introduce basic concepts and fundamental principles of this area. The theoretical development is surveyed from cell-like, tissue-like, neural-like P systems and their computational power and efficiency. The prospect and directions are discussed by summarizing research fruits of applications in the literature. The software/hardware implementation for P systems is analyzed to generalize the research advance. Finally, some important online resources, hot topics and further research paths are provided.

Keywords natural computing; membrane computing; cell; membrane system; computational power; computational efficiency

1 引 言

膜计算(membrane computing)是自然计算的新分支,旨在从生命细胞的结构与功能中以及从组织和器官等细胞群的协作中,抽象出计算模型^[1].膜

计算是由欧洲科学院院士、罗马尼亚科学院院士 Păun于1998年在芬兰图尔库计算机中心的研究报告中提出,正式论文于2000年见刊发表^[2].2003年,该论文被美国科学情报研究所(ISI)列为计算机科学领域的快速突破文章(参见 <http://www.esi-topics.com>),也成为当年被引用率最高的论文之

收稿日期:2009-07-06;最终修改稿收到日期:2009-11-16. 本课题得到国家自然科学基金(60702026,60674106,30870826)、四川省青年科技基金资助项目(09ZQ026-040)和水路公路交通安全控制与装备教育部工程研究中心开放式基金(HUTERCTS2009A01)资助. 张葛祥,男,1974年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为自然计算、模式识别和信号处理等. E-mail: zhgxlyan@126.com. 潘林强,男,1972年生,博士,教授,博士生导师,研究领域为膜计算和图论.

一,标志着膜计算已经成为一个新兴的研究领域。

膜计算自提出以来,受到众多学者的广泛关注,迄今已有包括约 25 篇博士论文、30 余卷国际会议论文集和 15 本国际期刊专刊在内的约 1400 多篇文献,涵盖计算机科学、生物学、生物医学、生物信息学、数学、人工智能、自动控制、经济学等多个学科或领域;多种计算模型分别从数学、计算机科学、生物学等基础上进行构建和研究,例如细胞型膜系统、组织型膜系统和神经型膜系统等,其应用也渗透到了计算机图形学、近似优化、密码学、并行计算等众多领域。目前,每年将举行两个关于膜计算的专题国际会议 WMC(Workshop on Membrane Computing)和 BWMC(Brainstorming Week on Membrane Computing),还有 BIC-TA、UC、CompMod、MeCBIC、DCFS、IWNC、NICSO、IEEE BIBM、GCB、CBM、CIAA、WCC、ISBRA、BICS、DNA14 等多个国际会议都包含膜计算主题。

虽然膜计算在国际上已成为新的研究热点,但在国内鲜有文献报道。截至目前,还没有中文综述文章系统介绍此新研究领域。由此,本文从膜计算的提出、基本概念、基本原理、研究进展等方面进行概述,旨在吸引更多的人员关注或加入到此领域中来,以推动国内在此方面的研究。

2 膜计算基本概念或原理

自然计算是指受自然界中生物体的启发,模拟或仿真实现发生在自然界中、易作为计算过程解释的动态过程^①。到目前,从生物体的结构、功能和相互作用中抽象出的计算模型可概括为如图 1 所示的对应关系图^[3]。从生物群体的行为中抽象出群智能算法,包括模仿蚂蚁觅食行为的蚁群算法、模拟鸟群觅食行为的粒子群算法和模仿鱼群觅食、聚群及追尾行为的人工鱼群算法等。由生物群体到生命个体,

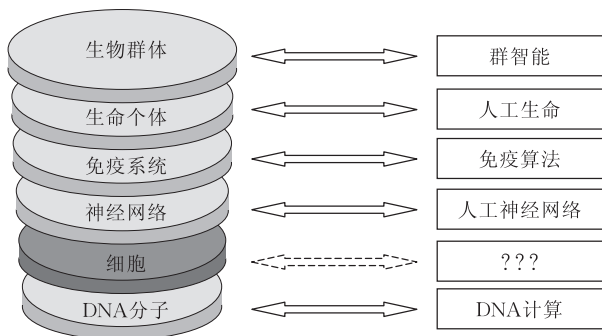


图 1 生物计算模型^[3]

到生命个体的各种子系统(免疫系统、神经网络),再到分子(DNA 分子),都抽象出了相应的计算模型。细胞是生命的基石,从细胞中是否也能建立相应的计算模型呢?

在多年研究 DNA 计算的基础上,受生物细胞的启发,Păun于 1998 年 11 月提出了膜计算,旨在从生命细胞在分层结构中处理化合物的方式中抽象出计算模型。该类计算模型被称为膜系统或 P 系统。一般地,一个度为 n 的 P 系统可表示为如下的多元组^[4]:

$$\Pi = (V, T, C, \mu, \omega_1, \dots, \omega_m, (R_1, \rho_1), \dots, (R_m, \rho_m)) \quad (1)$$

其中,

(1) V 是字母表,其元素被称为对象;

(2) $T \subseteq V$ 是输出字母表;

(3) $C \subseteq V - T$ 是催化剂,其元素在进化过程中不发生变化,也不产生新字符,但某些进化规则必需它的参与才能执行;

(4) μ 是包含 m 个膜的膜结构,各个膜及其所围的区域用标号集 H 表示, $H = \{1, 2, \dots, m\}$, 其中 m 称为 Π 的度;

(5) $\omega_i \in V^*$ ($1 \leq i \leq m$) 表示膜结构 μ 中的区域 i 里面含有对象的多重集, V^* 是 V 中字符组成的任意字符串的集合;

(6) 进化规则是二元组 (u, v) , 通常写成 $u \rightarrow v$, u 是 V^* 中的字符串, $v = v'$ 或者 $v = v'\delta$, 其中 v' 是集合 $\{a_{\text{here}}, a_{\text{out}}, a_{\text{in}_j} \mid a \in V, 1 \leq j \leq m\}$ 上的字符串, δ 是不属于 V 的特殊字符,当某规则包含 δ 时,执行该规则后膜就被溶解了。 u 的长度称为规则 $u \rightarrow v$ 的半径。 R_i ($1 \leq i \leq m$) 是进化规则的有限集,每一个 R_i 是与膜结构 μ 中的区域 i 相关联的, ρ_i 是 R_i 中的偏序关系,称为优先关系,表示规则 R_i 执行的优先关系。

概括地说, P 系统由三部分构成:膜的层次结构、表示对象的多重集和进化规则。下面用一个例子进一步说明膜计算中的基本概念和完成简单计算的过程。图 2 给出一个包含 4 个膜的 P 系统。

在图 2 中, P 系统置于环境中,系统中的 4 个膜按层次结构组织,分别标号为 1、2、3 和 4,最外层的膜称为表层膜,膜 3 因不含有其它膜而被称为基本膜,每个膜所包围的部分称为区域,区域内包含着对象 a, b, c, e 和相应的进化规则。像任何其它计算机器、抽象模型或者计算机程序一样, P 系统从初始状

① <http://www.gcn.us.es/>

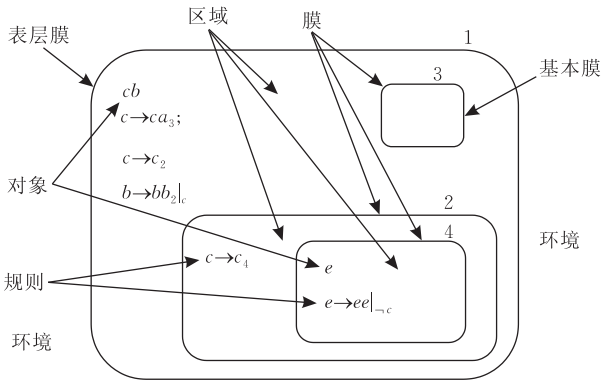


图 2 P 系统示意图

态(用对象的多重集表示)开始,运用膜结构中进化规则编码的程序,完成计算.图2所示例子的计算过程为:

(1)在初始状态时,在表层膜定义的区域1中,包含一个对象 b 和一个对象 c ,在区域4中有一个对象 e ,其它区域均为空;

(2)区域1中存在催化剂 c ,进化规则 $b \rightarrow bb_2 | c$.在每一步计算中将一个对象 b 送入区域2中,并同时保留一份在区域1中,同时规则 $c \rightarrow ca_3$ 在催化剂 c 的作用下将对象 a 不断送入到区域3中,直到对象不可用为止;

(3)在区域1中,如果规则 $c \rightarrow c_2$ 被使用,则一个对象 c 被送入区域2中.这样,区域1中不再有催化剂 c ,规则 $b \rightarrow bb_2 | c$ 将不再向区域2发送对象 b ;

(4)当对象 c 到达区域2后,将会根据其中的规则 $c \rightarrow c_4$ 继续到达区域4中;

(5)当对象 c 到达区域4后,其中对象 e 的产生将停止,因为 c 是规则 $e \rightarrow ee | c$ 中的抑制剂.

在P系统中,使用规则的通常方式是极大并行,即凡是能使用的所有规则都必须使用;一个对象只能被一个规则使用,该规则按优先关系选择(如果优先关系 ρ_i 为空集,则非确定性选择规则);需要强调的是:任何能被规则使用的对象必须选择一个规则,按该规则进化.在上面这个例子中,经过计算操作后的结果为,区域3中将产生 n 个 a ,区域2中将产生 $n+1$ 个 b ,区域4中将产生 $n+3$ 个 c .

由此可看出,P系统是具有分布式、极大并行性和非确定性的计算模型.大量研究表明^[5-7],许多简单的膜计算模型在理论上具有与图灵机同等的计算能力,甚至还有超越图灵机局限性的可能.因而,膜计算迅速发展成为具有勃勃生机的新研究领域,并像神经网络、进化计算一样成了自然计算的分支之一.

3 膜计算研究进展

关于膜计算的研究工作可归为三类:理论研究、应用研究和软、硬件实现研究.膜计算的理论研究主要集中于各种计算模型的建立及其计算能力(computation power)和计算效率(computation efficiency)的分析,膜计算的应用研究主要是利用膜系统的特点和各种模型求解生物学、计算机科学、语言学、经济学等方面的实际问题,而膜计算的软硬件实现研究则侧重于在现有计算机上用程序实现或开发新的处理器实现有关的膜计算模型或求解有关问题.这三方面研究相互联系、相互促进.下面分别进行归纳和介绍.

3.1 理论研究进展

膜计算理论研究主要是讨论如何从细胞的结构和功能中以及从组织、器官(包括脑)和其它细胞群(如细菌)高级结构中建立计算模型,并分析其计算能力和计算效率^[8].计算能力是指计算模型的通用性,能否计算 Turing 可计算函数.计算效率是指计算模型能否以有效方式解决计算难问题.截至目前,主要有三种类型的膜计算模型:细胞型^[2]、组织型^[6,9-10]和神经型^[11-13]膜系统.下面逐步介绍三种膜系统及它们的计算能力和效率方面的研究工作:

细胞型膜计算模型是模仿细胞(包括真核细胞)的结构和功能,其基本组成要素包括膜结构、对象和规则,如图2所示.细胞型模型的结构是将膜(也可理解为三维囊)进行分层安排,膜用于划分放置对象多重集的区域,这些划分出的区域被称为隔间.对象通常用字母表中的字符或字符串表示.规则用于处理隔间中的对象(字符的多重集)或膜(也称膜对象),每条规则明确地指出需要处理的对象或膜以及具体需要执行的操作.

细胞型膜计算模型主要包括转移P系统、转运P系统和活性膜P系统^[8,14].转移P系统是最早引入和最基本的膜计算模型,主要采用多重集重写和通信规则完成计算,其规则的使用采用非确定性和极大并行的方式.转移P系统的结构如式(1)所示.转移P系统中的规则来源于细胞(主要在隔间里)中发生的生化反应,但在细胞中,常常有物质(如蛋白质)穿过膜.为了模拟这一物质交换过程,文献^[15]提出了转运P系统,采用字符在膜间穿梭来完成计算,其对象本身不发生变化.转运P系统的规则有两种类型:共运输和逆运输.前者指两个对象同

时进入或退出膜,且方向相同,而后者指两个对象以相反方向同时穿过膜.转运 P 系统采用非确定性和极大并行方式使用运输规则.还有一类重要的细胞型膜计算模型是活性膜 P 系统^[16-18].此类 P 系统将膜也作为规则处理对象,其规则包括膜的溶解、膜分裂、膜创建和膜合并等.采用活性膜 P 系统进行计算时,膜结构随着膜操作规则的执行而发生着变化.膜操作规则是以非确定性、极大并行方式进行的,通常可以在线性操作步内产生指数增长的空间,有助于在可行时间范围内(如线性、多项式时间)解决如 NP 完备问题等计算难问题.细胞型膜系统是最早的一种膜计算模型,其理论研究已较为完善.

组织型膜系统是细胞型膜系统的一种重要拓展模型,是将多个细胞自由放在同一环境中,细胞和环境之间均可以包含对象,各细胞之间和细胞与环境之间采用转运规则进行通信^[9-10,19].典型的组织型膜系统有三种:基本组织型 P 系统、种群 P 系统和 P 群.如果组织型膜系统中需要通信的各细胞之间的通信通道是事先通过规则给定的(固定的),则此类膜系统称为基本组织型 P 系统^[9-10],如果通信通道是在计算过程中采用规则动态建立的,既可以修改,也可以删除,则此类膜系统称为种群 P 系统^[19].种群 P 系统主要是利用细胞间的动态特性进行计算.如果环境中的细胞都是简单细胞(细菌群或蚁群等),且细胞中的对象和使用的规则都是有限的,则此种组织型膜系统称为 P 群^[20-22].在 P 群中,细胞间不直接通信,且在初始状态时,细胞环境是一致的,仅有某一类符号,主要依赖细胞间的合作完成计算.到目前,组织型膜系统仍有许多问题正待研究,详细情况可参考文献^[23].

神经型膜系统是最新提出的一种计算模型,是当前膜计算理论研究的热点.该膜系统中的细胞均采用神经元细胞,其思想来源于生物神经系统.神经型膜系统有两种类型:基本神经型膜系统和脉冲神经型膜系统.前者是在组织型 P 系统基础上建立起来的,主要是采用神经元代替了组织型 P 系统中的计算单元.关于神经型膜系统的研究主要集中在脉冲神经膜计算系统.这种膜计算模型源自于生物神经系统中神经元通过突触传递脉冲交换信息的机制.模型中的对象中只有一种,即脉冲.文献^[24]系统介绍了脉冲神经膜计算系统的基本概念、简单实例、研究进展和进一步研究的问题,需要补充的是,有关神经型膜系统的研究问题,可参考文献^[23].

膜计算的理论研究重点是讨论和对比分析各种

计算模型的计算能力和计算效率.研究膜计算模型的计算能力主要是将建立的膜系统与计算理论中的标准模型(特别是图灵机)进行比较,分析其通用性.从细胞的结构和功能中抽象出计算模型,并分析其计算能力是提出膜计算理论的初衷.大量研究成果表明,无论是细胞型、组织型膜计算模型,还是神经型膜计算模型,无论是符号对象,还是字符串对象,无论是产生模式还是识别模式下,都具有图灵机的计算能力.由此表明,细胞或细胞组织都可以作为强大的“计算机”^[14].研究膜计算模型的计算效率主要是分析膜系统是否能在可行时间范围内解决计算难问题,如 NP 难问题、PSPACE 问题等.在膜计算的三种类型中,利用膜的分裂、溶解、创建、合并和串复制等操作规则,可产生指数增长的计算空间,因而可通过空间换时间,解决多种计算难问题,如可满足性问题、点着色问题等.

3.2 应用研究进展

膜计算有多个适于求解应用问题的特征^[8,14]: (1)分布性;(2)并行性;(3)非确定性;(4)可拓展性;(5)易程序实现;(6)易读性;(7)易实现通信.到目前,膜计算已在生物、生物医学、计算机图形学、语言学、经济学、计算机科学和密码学等领域有了一些应用.在文献^[25]所在的专刊中,讨论了 P 系统在系统生物学方面的多种应用,如对基因表达控制进行建模、采用动态隔间仿真生物化学过程、建立膝关节受伤和修复模型、用代谢 P 系统仿真两栖胚胎的有丝分裂振荡器、分析 HIV 感染的动态特性等.文献^[26]讨论了膜计算在语言学方面的应用,给出了一种语言学 P 系统及其在语用学、语音学和对话方面的应用实例.文献^[27-28]利用膜计算的极大并行性求解经典的整数排序问题.文献^[29]把 P 系统引入到图形学中建立了植物生长模型.文献^[30]给出了采用膜计算对经济过程进行建模的两点尝试:建模的可能性和看似可行的生产商-零售商-消费者之间相互作用的表示方法.

膜计算应用研究中发展得最好且充满勃勃生机的领域是采用 P 系统设计近似优化算法(也称为膜算法)求解实际应用中的问题.Nishida 在文献^[31]中提出嵌套结构的膜算法求解旅行商问题,获得比模拟退火算法更好的结果.文献^[32]将嵌套结构膜算法用于求解最小存储问题.文献^[3,33-34]讨论了基于遗传算法的嵌套结构膜算法,并用于求解单目标和多目标优化问题,且应用于控制器设计和过程控制领域中的优化问题.文献^[35]提出基于量子进

化计算的单层膜结构的膜算法,并采用背包问题进行实验,获得比嵌套结构膜算法更好的结果.文献[36-37]进一步讨论了单层膜结构膜算法在可满足性问题和雷达辐射源信号中的应用.此外,文献[38]采用进化算法求解 P 系统中的广播问题,给出了进化计算与膜计算结合算法的新应用.

总而言之,与理论研究相比,膜计算的应用研究尚处于初步阶段,正期待有突破性的进展和重要的应用领域拓展,并一直被 Păun 列为急需解决的重要问题之一^[23].

3.3 软、硬件实现研究进展

除了建模、计算能力和效率分析等理论研究和应用研究之外,膜计算的另一个重要研究方向是软件实现,即使用普通计算机仿真膜计算的过程.由于 P 系统的内在不确定性和规则执行的极大并行性,普通计算机很难有效完成 P 系统的计算过程,获得预期的结果.不过,为了教学和作为研究的辅助工具,目前已经开发出了多种 P 系统软件.文献[39]介绍了细胞型膜系统的 10 余个仿真软件,包括 Malita 在 2000 年开发出的基于 LPA-Prolog 的转移 P 系统仿真软件、Suzuki 和 Tanaka 在 2000 年开发出的基于 LISP 语言的转移 P 系统仿真软件、西班牙马德里科技大学自然计算研究组于 2003 年开发出的基于 Haskell 语言的转移 P 系统仿真软件、Balbontin 等于 2002 年用 MzScheme 开发的转移 P 系统仿真软件、Ardelean 和 Cavaliere 于 2003 年开发的用于生物建模的过渡 P 系统仿真软件、Ciobanu 和 Wenyuan 于 2003 年采用 C++ 开发的并行转移 P 系统软件、Syropoulos 等于 2003 年用 Java 开发的 P 系统分布式软件等.文献[40]介绍了实现膜系统的并行硬件/软件结构,并以转移 P 系统为例介绍了实现过程.文献[41]介绍了一种采用 Java 语言开发的细胞型 P 系统软件 P-Lingua 2.0,并给出了用此系统仿真生态系统的过程.文献[42]介绍了自动产生脉冲神经型 P 系统格局转移图表的软件工具,可以用于脉冲神经型 P 系统计算模型的形式验证.这里介绍的部分软件可在网站 <http://ppage.psyste.ms.eu/> 下载.目前,关于各种膜计算模型的硬、软件开发还正在研究和完善中,期待采用膜计算模型解决实际问题的实验结果.

4 总结与展望

本文旨在向国内介绍膜计算这一新的研究领

域,概述了膜计算的发展状态,举例介绍了膜计算中的基本概念和基本原理,并从理论研究、应用研究和软硬件实现等方面综述了膜计算的研究进展和需要进一步研究的问题.关于膜计算的参考资料、仿真软件、有待研究的问题、会议信息和主要学者的联系方式等均可从膜计算网站 <http://ppage.psyste.ms.eu/> 获得.参考文献[1]是由全球膜计算领域几十位顶尖学者共同编写的最新著作,涵盖了膜计算理论与应用研究的最新进展,已于 2009 年年底出版,该书各章节摘要的中译本可从本文作者的个人主页获得.

虽然膜计算从提出到现在只有短短十年时间,但取得的研究成果是令人瞩目的.本文第 3 节对其理论研究、应用研究和软硬件实现的进展进行了概述,在此基础上,仍有如下研究问题值得关注和进一步探讨:

(1) 各种 P 系统的计算能力仍需要进一步研究,如有或无溶解规则情况下催化 P 系统的计算能力;非同步 P 系统的计算能力;组织 P 系统的计算能力,特别是种群 P 系统和 P 群的计算能力;由对象数量控制通信的 P 系统的计算能力.再者,共运输/逆运输 P 系统的最小化问题,即达到图灵机的计算能力,共运输/逆运输 P 系统最少只需要多少个膜以及每条规则中最少只需要多少符号.神经 P 系统,特别是脉冲神经 P 系统也是当前研究的热点问题,各种脉冲神经 P 系统的构建及其计算能力的分析都是值得进一步探讨的问题.

(2) P 系统计算效率的分析也是值得关注的问题.通过折衷考虑计算时间和计算空间,利用膜的分裂、合并等操作建立多种 P 系统计算模型,求解 NP 难和 PSPACE 问题.除了背包问题、旅行商问题等之外,还需要研究求解更多这一类问题的计算模型.同时,改进已有计算模型的解的质量,也是值得探讨的.另外,一致解 (uniform solutions) 和半一致解 (semi-uniform solutions) 的关系,确定性、非确定性、强合流解 (strongly confluent solution) 和弱合流解 (weakly confluent solution) 之间的关系以及 P 系统计算模型与经典计算模型的比较分析等都有待研究.

(3) P 系统具有极大并行性,但目前尚缺乏 P 系统与已有并行计算系统的对比研究.量子计算具有较好的并行性,是否可将量子计算中的量子位叠加、量子纠缠和量子干扰等引入到膜计算中,还有待研究.

(4) 相对于 P 系统的理论研究,其应用研究还非常薄弱,如何将 P 系统用于求解各种实际工程问题一直是膜计算领域的重要问题.与自然计算的另两个分

支(进化计算和神经网络)相比,膜计算的应用研究还处于在非常初步的阶段。但令人鼓舞的是,近年来受到关注的膜算法有非常好的前景,可望用于求解更多的实际问题。此外,模糊理论、粗糙集理论和概率理论已有广泛的应用,能否将膜计算与他们结合,构建近似计算模型,有待进一步研究。

(5)除了理论和应用研究外,P系统的软、硬件实现仍在研究之中。如何用现有的计算机实现P系统或如何开发出新的计算机都是备受关注和期待的问题。

参 考 文 献

- [1] Păun G, Rozenberg G, Salomaa A. Handbook of Membrane Computing. Oxford: Oxford University Press, 2009
- [2] Păun G. Computing with membranes. Journal of Computer and System Sciences, 2000, 61(1): 108-143
- [3] Huang Liang. Research on membrane computing optimization methods [Ph. D. dissertation]. Zhejiang University, Hangzhou, 2007(in Chinese)
(黄亮. 膜计算优化方法研究[博士学位论文]. 浙江大学, 杭州, 2007)
- [4] Păun G, Rozenberg G. A guide to membrane computing. Theoretical Computer Science, 2002, 287(1): 73-100
- [5] Păun G, Suzuki Y, Tanaka H. On the power of membrane division in P systems. Theoretical Computer Science, 2004, 324(1): 61-85
- [6] Bernardini F, Gheorghe M. Cell communication in tissue P systems: Universality results. Soft Computing, 2005, 9(9): 640-649
- [7] Krishna S N. Universality results for P systems based on brane calculi operations. Theoretical Computer Science, 2007, 371(1-2): 83-105
- [8] Ibarra O H, Păun G. Membrane computing: A general view. Annals of European Academy of Sciences (online edition), 2008, 83-101
- [9] Martin-Vide C, Păun G, Pazos J, Rodriguez-Paton A. Tissue P systems. Theoretical Computer Science, 2003, 296(2): 295-326
- [10] Freund R, Păun G, Perez-Jimenez M J. Tissue P systems with channel states. Theoretical Computer Science, 2005, 330(1): 101-116
- [11] Păun A, Păun G. Small universal spiking neural P systems. Biosystems, 2007, 90(1): 48-60
- [12] Ionescu M, Păun G, Yokomori T. Spiking neural P systems. Fundamenta Informaticae, 2006, 71(2-3): 279-308
- [13] Ibarra O H, Woodworth S. Characterizations of some restricted spiking neural P systems//Proceedings of the 7th Workshop on Membrane Computing. Lecture Notes in Computer Science 4361. Berlin: Springer, 2006: 424-442
- [14] Păun G. Introduction to membrane computing//Proceedings of Brainstorming Workshop on Uncertainty in Membrane Computing. Palma de Mallorca, España, 2004: 1-42
- [15] Păun A, Păun G. The power of communication: P systems with symport/antiport. New Generation Computing, 2002, 20(3): 295-305
- [16] Alhazov A, Martin-Vide C, Pan L Q. Solving a PSPACE-complete problem by recognizing P systems with restricted active membranes. Fundamenta Informaticae, 2003, 58(2): 67-77
- [17] Bernardini F, Gheorghe M. Languages generated by P systems with active membranes. New Generation Computing, 2004, 22(4): 311-329
- [18] Freund R, Martin-Vide C, Păun G. From regulated rewriting to computing with membranes: Collapsing hierarchies. Theoretical Computer Science, 2004, 312(2-3): 143-188
- [19] Bernardini F, Gheorghe M. Population P Systems. Journal of Universal Computer Sciences, 2004, 10(5): 509-539
- [20] Cshaj-Varju E, Kelemen J, Kelemenova A, Păun G, Vaszil G. Computing with cells in environment: P colonies. Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing, 2006, 12(3-4): 201-215
- [21] Freund R, Oswald M. P colonies working in the maximally parallel and in the sequential mode//Proceedings of 7th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing, Timisoara, Romania, 2005: 419-426
- [22] Kelemen J, Kelemenova A, Păun G. On the power of a biochemically inspired simple computing model P colonies//Proceedings of the Workshop on Artificial Chemistry and Its Applications. Boston, ECAL, 2005: 82-86
- [23] Păun G. Tracing some open problems in membrane computing. Romanian Journal of Information Science and Technology, 2007, 10(4): 303-314
- [24] Pan Lin-Qiang, Zhang Xing-Yi, Zeng Xiang-Xiang, Wang Jun. Research advances and prospect of spiking neural P systems. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(12): 2090-2096(in Chinese)
(潘林强, 张兴义, 曾湘祥, 汪隽. 脉冲神经膜计算系统的研究进展及展望. 计算机学报, 2008, 31(12): 2090-2096)
- [25] Gheorghe M, Krasnogor N, Camara M. P systems applications to systems biology. Biosystems, 2008, 91(3): 435-437
- [26] Enguix G B. Preliminaries about some possible applications of P systems in linguistics//Proceedings of the International Workshop on Membrane Computing. Lecture Notes in Computer Science 2597. London: Springer-Verlag, 2003: 74-89
- [27] Alhazov A, Sburlan D. Static sorting algorithms for P systems//Proceedings of the Workshop on Membrane Computing. Tarragona, 2003: 17-40
- [28] Ceterchi R, Martin-Vide C. P systems with communication for static sorting//Proceedings of the Brainstorming Week on Membrane Computing. Tarragona, 2003: 101-117
- [29] Georgiou A, Cheorghe M, Bernardini R. Membrane-based devices used in computer graphics//Ciobanu G et al eds. Applications of Membrane Computing. Natural Computing. Berlin: Springer, 2006: 253-281
- [30] Păun G, Păun R. Membrane computing and economics: Numerical P systems. Fundamenta Informaticae, 2006, 73(1-2): 213-227
- [31] Nishida T Y. An application of P-system: A new algorithm for NP-complete optimization problems//Proceedings of the

- 8th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Orlando, IIS, 2004; 109-112
- [32] Leporati A, Pagani D. A membrane algorithm for the min storage problem//Proceedings of the Workshop on Membrane Computing. Lecture Notes in Computer Science 4361. Berlin: Springer, 2006; 443-462
- [33] Huang L, Sun L, Wang N, Jin X. Multiobjective optimization of simulated moving bed by tissue P system. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2007, 15(5): 683-690
- [34] Huang L, Suh I H. Controller design for a marine diesel engine using membrane computing. International Journal of Innovative Computing Information and Control, 2009, 5(4): 899-912
- [35] Zhang G X, Gheorghe M, Wu C Z. A quantum-inspired evolutionary algorithm based on P systems for knapsack problem. Fundamenta Informaticae, 2008, 87(1): 93-116
- [36] Zhang G X, Liu C X, Gheorghe M, Ipate F. Solving satisfiability problems with membrane algorithms//Proceedings of the 4th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications. Beijing, 2009; 29-36
- [37] Liu C X, Zhang G X, Zhu Y H, Fang C, Liu H W. A Quantum-inspired evolutionary algorithm based on P systems for radar emitter signals//Proceedings of the 4th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications. Beijing, 2009; 24-28
- [38] Lefticaru R, Ipate F, Gheorghe M, Zhang G X. Tuning P systems for solving the broadcasting problem//Proceedings of the 10th Workshop on Membrane Computing. Curtea de Arges, 2009; 337-354
- [39] Gutierrez-Naranjo M A, Perez-Jimenez M J, Riscos-Nunez A. Available membrane computing software//Applications of Membrane Computing. Natural Computing Series, Berlin: Springer, 2006; 411-436
- [40] Gutierrez A, Fernandez L, Arroyo F, Alonso S. Hardware and software architecture for implementing membrane systems: A case of study to transition P systems//Garzon M H et al eds. Proceedings of the 13th International Meeting on DNA Computing. Lecture Notes in Computer Science 4848. Berlin: Springer, 2008; 211-220
- [41] Garcia-Quismondo M, Gutierrez-Escudero R, Martinez-Del-Amor M A, Orejuela-Pinedo E, Perez-Hurtado I. P-Lingua 2.0: A software framework for cell-like P systems. International Journal of Computers Communications & Control, 2009, 4(3): 234-243
- [42] Gutierrez-Naranjo M A, Perez-Jimenez M J, Ramirez-Martinez D. A software tool for verification of spiking neural P systems. Natural Computing, 2008, 7(4): 485-497



ZHANG Ge-Xiang, born in 1974, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include natural computing, pattern recognition and signal processing, etc.

PAN Lin-Qiang, born in 1972, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His main research interests include graph theory and membrane computing.

Background

The whole history of computer science, in a manner, is making attempts at to discover, investigate, and, if possible, implement computing ideas, models, paradigms from the way nature—the humans included—computers. Inspired by the nature, evolutionary computing and neural computing has been well established and DNA computing is developing in this area of computer science. Such kinds of computing models are generally called natural computing. As a young and vigorous branch of natural computing, membrane computing, using models called P systems, was initiated by u in 1998 (with the seminal paper published in 2000) and has made a significant impact on the development of various disciplines, such as theoretical computer science, biology, linguistics, etc.. Thompson Institute for Scientific Information, ISI, has qualified the initial paper as “fast breaking” and the domain as “emergent research front in computer science” in 2003 (see <http://esi-topics.com>).

As the first survey paper of this new area in Chinese, this paper outlines the recent development of membrane com-

puting. A simple membrane system is taken for an example to introduce basic concepts and fundamental principles of this area. The theoretical development is surveyed from five aspects: cell-like, tissue-like, neural-like P systems and their computational power and efficiency. The prospect and directions are discussed by summarizing research fruits of applications in the literature. The software/hardware implementation for P systems is analyzed to generalize the research advance. Finally, some important online resources, hot topics and further research paths are provided.

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (60702026, 60674106 and 30870826) and the Scientific and Technological Funds for Young Scientists of Sichuan (09ZQ026-040). The authors' research group has been focusing on building various computing models, their computational power and efficiency, and membrane algorithms for a variety of solving real-world problems. They have published more than twenty papers in this area.