

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23020141153204

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

通用使用规则的脉冲神经膜系统的语言产生能力研究

On String Languages Generative Power of Spiking
Neural P Systems with a Generalized Use of Rules

谢诗悦

指导教师姓名: 刘向荣 教授

专业名称: 计算机技术

论文提交日期: 2017 年 月

论文答辩时间: 2017 年 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2017 年 月

通用使用规则的脉冲神经膜系统的语言产生能力研究

谢诗悦

指导教师

刘向荣 教授

厦门大学

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

膜计算作为自然计算的重要分支,主要研究目标是从组织或器官等活细胞的结构与功能当中抽象出的一种计算模型。经过将近 20 年的发展,膜计算领域已硕果累累:在理论研究方面,有一些计算能力与图灵机等价的计算模型已被提出,还有若干能够在多项式时间内解决 NP 完全问题的计算模型也被提出;在实际应用方面,已有科学家成功地将膜计算这一学科广泛应用于机器人控制机制、某些系统故障诊断和数据建模等领域。

脉冲神经膜系统是一种新型的膜计算模型,受到神经元之间以脉冲作为信号进行通讯的方法启发。传统的脉冲神经膜系统一般以顺序模式(一个时间单元内某个可用规则只能应用一次)或穷举模式(一个时间单元内某个可用规则尽可能多次使用)来使用规则。基于这两种不同应用规则模式的脉冲神经膜系统已经得到大量研究,因此本文考虑一种通用模式(将顺序使用规则的方式与穷举使用规则的方式做一个结合):如果某条规则在某一个时间单元内可用,那么它可以被系统非确定地选择应用最大范围内任何可能的次数。已有研究证明以通用使用规则方式的脉冲神经膜系统可以生成或识别图灵可计算的数字集合,本文主要在此基础上通过把该系统作为语言产生装置继续做一些相关研究。具体来说,本文将某个时间单元内输出神经元发出的脉冲标记为一个字符,以此构建了该系统所产生的语言集。主要工作如下:

- (1) 本文通过构造通用使用规则的脉冲神经膜系统准确刻画了有限语言族 **FIN**,同时还探究了由该系统产生的语言集与正则语言族 **REG** 的关系。初步探究以通用模式应用规则的该系统的语言产生能力。
- (2) 在允许足够充足的神经元的情况下,通过将以顺序模式和穷举模式相结合的一种以通用模式使用规则的脉冲神经膜系统来模拟注册机,以此证明其能够刻画递归可枚举语言族 **RE**,从而可以得到该系统的计算完备性。
- (3) 基于通用模式下的脉冲神经膜系统,给出了判定形式下大数分解问题的一种解。

综上,本文以基于以通用模式应用规则的脉冲神经膜系统的语言产生能力为

研究目标,最终证实其计算能力与图灵机等价,还在解决数学问题上进行了应用,不仅丰富了脉冲神经膜系统领域的理论研究,并且为后续对其计算效率的研究证明以及实际应用都奠定了理论基础。

关键词: 脉冲神经膜系统; 通用使用规则; 语言产生能力

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Membrane computing, as an important branch of natural computing, focuses on computational models that are abstracted from the structure and function of living cells such as tissues or organs. After nearly 20 years of development, the field of membrane computing has made a lot of fruitful results. In theoretical research, there are some computational models equivalent to Turing machines that have been proposed. There are also a number of computational models have been presented that can solve NP hard problems in polynomial time. In practical applications, scientists have successfully applied membrane computing to the robot control mechanism, some system fault diagnosis, data modeling and other fields.

Spiking neural P systems are a class of distributed parallel computing devices inspired from the way neurons communicate by means of spikes. Traditional spiking neural P systems apply the rules generally in a sequential way (an available rule can only be used once in a time unit) or exhaustive way (an available rule is used as many times as possible in a time unit). The spiking neural P systems with these two ways have got a lot of research, so this article considers a generalized method which is a “combination” of the sequential method and exhaustive method: if a rule is available in a time unit, it can be applied by the system randomly for any possible number of times. It has been proved that spiking neural P systems with a generalized use of rules can generate or recognize Turing computable set of numbers. In this work, we continue the study of spiking neural P systems with a generalized use of rules by considering these computing devices as language generators. Specifically, mark the moment that the output neuron emitted spikes as a character, thus constitutes the language generated by that system. The main work is as follows:

First, the family of finite languages can be accurately characterized by constructing spiking neural P systems with a generalized use of rules in this work. And we can obtain several relationships between the families of languages generated by

spiking neural P systems with a generalized use of rules and the family of regular languages. The language generative power of spiking neural P systems with a generalized use is initially investigated.

Second, in the case of allowing sufficient enough neurons, it was proved that spiking neural P systems with a generalized use of rules can characterize the family of recursively enumerable languages by using them to simulate register machines. Therefore, we can obtain the computational completeness of the systems in the end.

Finally, based on spiking neural P systems with a generalized use of rules, given the decision form of integer factorization problem of a solution.

In summary, this paper focuses on the language generative ability of spiking neural P systems with a generalized use. And finally proved that the calculate ability of the systems is equivalent to Turing machine. Also it can be proved to solve the problem of mathematics on the application. The research work of this paper not only enriched the theoretical study of the field of spiking neural p systems, but also laid a theoretical foundation for the subsequent research and practical application of its computational efficiency.

Key words: spiking neural P systems; generalized use of rules; languages generative power

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	V
Content.....	VIII
1. 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 膜计算国内外研究进展	2
1.2.1 细胞型膜系统研究进展.....	2
1.2.2 组织型膜系统研究进展.....	4
1.2.3 神经型膜系统研究进展.....	5
1.3 研究内容与创新点	6
1.3.1 本文研究内容.....	6
1.3.2 本文创新点.....	7
1.4 本文组织框架	7
1.5 本章小结	8
2. 膜计算研究预备知识	9
2.1 生物基础知识	9
2.1.1 生物膜.....	9
2.1.2 神经细胞.....	10
2.2 形式语言与自动机理论	11
2.2.1 基本概念及对应符号.....	11
2.2.2 语言的运算.....	12

2.2.3 Chomsky 文法.....	13
2.2.4 有穷自动机和图灵机.....	14
2.3 膜计算模型理论基础	15
2.3.1 计算模型.....	15
2.3.2 膜计算模型.....	15
2.3.3 脉冲神经膜计算模型.....	17
2.4 本章小结	18
3. 通用使用规则的脉冲神经膜系统产生的语言研究.....	19
3.1 通用使用规则的脉冲神经膜系统	19
3.1.1 通用使用规则的方式.....	19
3.1.2 实例说明.....	20
3.2 计算结果的定义方式	23
3.2.1 脉冲神经膜系统输出结果的若干个定义方法.....	23
3.2.2 通用使用规则的脉冲神经膜系统的输出结果.....	23
3.3 与有限语言族 FIN 的关系	24
3.3.1 只有一个神经元的系统与 FIN 的关系.....	24
3.4 与正则语言族 REG 的关系	27
3.4.1 与正则语言族 $L\{b0\}$ 的关系	27
3.4.2 只含有两个神经元的系统与正则语言的关系.....	29
3.4.3 一个引理的证明过程.....	32
3.4.4 一个能产生非正则语言的系统.....	36
3.5 本章小结	41
4. 通用使用规则的脉冲神经膜系统的计算能力.....	42
4.1 计算能力	42
4.2 通用使用规则的脉冲神经膜系统的计算完备性证明	43
4.2.1 构造系统模拟注册机.....	43
4.2.2 模拟注册机的工作过程.....	46
4.2.3 构造系统模拟加法指令与减法指令.....	48

4.2.4 构建 ADD 模块.....	49
4.2.5 构建 SUB 模块.....	51
4.2.6 综合分析.....	57
4.3 求解大数分解问题	57
4.3.1 大数分解问题.....	57
4.3.2 求解大数分解问题过程.....	58
4.3.3 结果分析.....	61
4.4 本章小结	62
5. 总结与展望	63
5.1 总结	63
5.2 展望	63
参考文献.....	65
攻读硕士学位期间发表论文及科研情况	69
致谢.....	70

Content

Abstract	I
Content	V
1. Introduction	1
1.1 Background and Significance of Project	1
1.2 Research Progress of Membrane computing	2
1.2.1 Research Progress of Cell-like P Systems	2
1.2.2 Research Progress of Tissue-like P Systems.....	4
1.2.3 Research Progress of Neural-like P Systems	5
1.3 Research Content and Innovation	6
1.3.1 Research Content	6
1.3.2 Innovation	7
1.4 Structure of Thesis	7
1.5 Conclusion	8
2. Prerequisites of Membrane computing	9
2.1 Biological Basics	9
2.1.1 Biomembrane	9
2.1.2 Neurons	10
2.2 Formal Language and Automata Theory	11
2.2.1 Basic Concepts and Corresponding Symbols	11
2.2.2 Language Operations	12
2.2.3 Chomsky Grammar	13
2.2.4 Finite Automata and Turing Machines.....	14
2.3 Theoretical Basis of Membrane Computing	15
2.3.1 Calculation Model.....	15

2.3.2 Membrane computing Model.....	15
2.3.3 Spiking neural P computing Model	17
2.4 Conclusion	18
3.On String Language Generated by SNP Systems with a Generalized Use of Rules	19
3.1 SNP Systems with a Generalized Use of Rules	19
3.1.1 The Generalized Mode.....	19
3.1.2 Example Description.....	20
3.2 The Definition of The Calculation Results.....	23
3.2.1 Some Definitions of The Results of SNP Systems	23
3.2.2 Output of SNP Systems in a Generalized Mode	23
3.3 The Relationship with FIN.....	24
3.3.1 The Relationship between The System with Only a Neuron and FIN.....	24
3.4 The Relationship with REG	27
3.4.1 The Relationship with $L\{b0\}$	27
3.4.2 The Relationship between The System with Only two Neurons and REG.....	29
3.4.3 A Proof of a Lemma.....	32
3.4.4 A System That Produces Irregular Language.....	36
3.5 Conclusion.....	41
4.The Calculate Power of SNP Systems with a Generalized Use of Rules	42
4.1 Calculate Power.....	42
4.2 The Proof of Completeness of SNP Systems with a Generalized Use of Rules.....	43
4.2.1 Simulate The Register Machine	43
4.2.2 The Work Process of Simulation.....	46

4.2.3 Simulaions of Addtion Instruction and Subtraction Instruction	48
4.2.4 ADD Module.....	49
4.2.5 SUB Module	51
4.2.6 Comprehensive Analysis.....	57
4.3 Solving Mathematical Problem.....	57
4.3.1 The Problem of Integer Factorization	57
4.3.2 The Solution to Integer Factorization	58
4.3.3 Result Analysis.....	61
4.4 Conclusion.....	62
5. Conclusion And Prospect	63
5.1 Conclusion.....	63
5.2 Prospect	63
References	65
Achievements.....	69
Acknowledgements	70

1. 绪论

1.1 研究背景及意义

如今，计算机科学处于高速发展与变革的阶段，随着研究的深入，计算机科学与自然之间密切的关系也越来越明朗。正如美国麻省理工学院的 Seth Lloyd 教授说的：整个宇宙就是一个计算自己行为的量子计算机[1]。通过各个科学家对自然界中存在的计算模式不断的探究以及抽象处理之后，衍生出了自然计算这一新兴研究领域。具体来说，自然计算是一种来自自然的智能计算模式，尤其是来自一些典型的生物系统和物理系统的相关函数，特性和动作。此外，它还能够通过提炼相关计算模型和设计智能算法，以及凭借相关模块（如信息感知和积累模块，知识和方法升级模块，任务调度和实现模块等）的并行行动来试图获取智能信息处理机制[2]。自然计算涉及的领域十分宽广，包含神经计算、进化算法、人工免疫系统、膜计算、DNA 计算、人工生命、模糊计算、粒度计算、无定形计算、分形几何学、分子计算等。关于自然计算的算法研究一般将被用于处理大，复杂且动态的问题，同时自然计算对自然界中每个层次的物理特性与大多数生物的共同特征的作用机制也使得它能够有益地引导各种有关算法以及计算模型的应用与设计。

膜计算是自然计算众多分支里最年轻的一个，1998 年由罗马尼亚科学院院士 Gheorghe Păun 在研究报告 *Computing with Membranes*[3]中提出。为了纪念 Păun 教授对于膜计算研究领域所做出的杰出贡献，膜计算模型（即膜系统）又被命名为 P 系统[4]。膜计算模型的研究工作受到了自然界活细胞的启发，因此膜计算模型也被比喻为“具有计算功能的细胞”。细胞是宇宙中最小的生命体，体积微小但结构复杂，是生物可能进行的所有活动的基础功能单元，由细胞壁，细胞膜，细胞质，细胞器以及细胞核构成[5]。细胞膜对于细胞的结构和功能来说有着极为重要的地位，膜计算模型正是一种由其特质获得启发进而形式化为具体的计算框架。除了类细胞的膜计算模型，我们还应该考虑网格结构的膜计算模型，因为本文研究的神经元细胞是网络结构。神经元也称为神经细胞，与其他普通细胞的结构大致相同，由一个细胞膜和一个带核的细胞体组成。神经元拥有两种重要

的神经纤维：树突和轴突，并通过他们进行神经元内部以及神经元之间的连接与通信传递[6]。传递在神经元之间的物质称为脉冲，代表一种信号，分为激励脉冲和抑制脉冲。对于所有细胞来说，细胞膜的一个基础功能是将细胞与环境分隔开来，同时保护细胞免于受到外界有害物质的侵害。此外，细胞还有三个重要功能，其一是细胞内膜将细胞内部划分为若干个区域；其二是它为细胞内部之中以及细胞和外界环境间提供了通信通道；其三是它能够为一些化学反应提供场所。科学家们通过探索细胞膜的各种结构与功能特征的计算性质，研究如何在计算模型中使用这些特征，最终抽象化一些基本的生物膜的功能特征，并由此构建膜计算模型。

膜计算的计算完备性（即计算能力等价于图灵机）以及计算高效性（即在计算过程中的表现）都使得它在理论研究和应用研究两个领域都取得了不俗的成绩。在理论研究方面，膜计算的研究重点在于分析各种计算模型的计算能力（是否具有图灵机的计算能力）和计算效率（能否于可行时间范畴里求解出计算难问题）[7]。在实际应用方面，目前膜计算已经在机器人的控制，数据建模，以及故障诊断等领域有了一些成功应用。

在此背景之下，本文对膜计算的相关理论知识进行了深度研究与学习，对某种脉冲神经膜计算模型（膜系统）的计算能力（表现为能够做什么）做出了具体的研究。

1.2 膜计算国内外研究进展

自从 1998 年膜计算被提出以来，一直备受学者们的关注，经过近 20 年的快速发展，膜计算已经取得了大量的研究成果，现将部分重要研究成果按照膜系统的三大基本类型：细胞型膜系统，组织型膜系统和神经型膜系统进行简要介绍，使读者能够更加全面地认识膜计算的研究情况。

1.2.1 细胞型膜系统研究进展

细胞型膜系统是最基本且最早提出的一类膜计算模型[4]。基于膜结构中物体的进化，一种基础的细胞型膜系统即转移细胞型膜系统被首次提出。相关论文

详细地介绍了转移细胞型膜系统的构造与运行机制,并说明转移细胞型膜系统内的规则来自细胞内发生的生化反应,采用非确定性和极大并行方式,最终证实转移细胞型膜系统具有计算完备性[3]。与此同时,基础细胞型膜系统的两种变型膜系统,重写细胞型膜系统[3]与粘贴细胞型膜系统[3]在文中也被讨论研究,这两种细胞型膜系统的计算完备性以及递归可枚举的自然数集合的特征和递归可枚举语言的特征都被证明获得。

为了得到一个仅通过通信完成的计算框架,考虑了化学物质跨膜转运这样的一种生物学现象,由此提出了细胞型通信膜系统,它采取字符于膜间穿行的计算方式,对象自身并不会产生改变[8]。细胞型通信 P 系统又被称为共运输/逆运输细胞型 P 系统,这是因为它的内部规则有两种,分别是共运输(二个对象同时以同一方向通过膜)和逆运输(二个对象同时通过一个膜,但方向相反)。在该文中,不仅细胞型通信膜系统的结构,运行机制以及规则都被详细介绍,它的计算完备性也被很好地证明。这种类型的 P 系统被继续研究,有文章[9]通过跟踪共运输/逆运输细胞型 P 系统中的某个特殊字符的轨迹,改进其对递归语言的刻画。

已有一些文献证实越来越多的细胞型膜系统的变型的计算能力与图灵机等价,基于此背景,[10]提出了活性膜细胞型膜系统,膜作为其主要的活性组成成分,通过膜溶解、膜分裂、膜创建以及膜合并等特性它能够直接调和对象的进化以及通信。[10]文中,不仅证明了活性膜细胞型膜系统具有计算完备性,还证明其能够于可行时间范畴里解决计算难问题,同时于文中用其解决布尔逻辑的可满足性问题作为一个说明实例。近些年[11]提出一种模拟酵母菌的出芽繁殖方式的带有 d -分裂的细胞型膜系统(d 是大于等于 2 的一个限制常数),从计算的角度来看,出芽繁殖能够在 n 个时间单位内产生 d^n 个细胞,因此这样的系统在理论上可以在线性时间中产生指数倍的工作空间,并且由此提供一种通过以空间换取时间的方式在多项式时间中来解决计算难问题。文章[12]证明了只有两个催化剂的催化膜系统就足够证明它是计算通用的,之后有研究显示若这个膜系统只有一个催化剂并且只有催化规则[13],则该系统仅能计算半线性集合。

细胞型膜系统在文献[14]、[15]和[16]中被考虑作为一个具有动态膜结构的树状的处理器的处理器,包括产生和溶解细胞膜、合并和内吞等操作。

从上文可知,细胞型膜系统作为早期提出的一种膜计算模型,学者们已从多

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库