

人工免疫算法及其应用

谢克明 郭红波 谢 刚 续欣莹
(太原理工大学信息工程学院,太原 030024)
E-mail:kmxie@tyut.edu.cn

摘 要 阐述了人工免疫系统的基本概念,讨论了几种典型的算法,包括基于免疫系统基本机制的免疫算法、基于免疫特异性的否定选择算法、基于免疫系统克隆选择理论的克隆选择算法、基于接种疫苗及免疫多样性的免疫进化算法、AIS与神经网络混合智能算法和模糊免疫系统;以年代为序简述了 AIS 发展历史,介绍了 AIS 在若干具有代表性的领域中的应用情况。最后通过对 AIS 的特性和存在问题的分析,展望了今后的研究重点和发展趋势。

关键词 人工免疫系统 免疫算法 否定和克隆选择 免疫进化 模糊免疫

文章编号 1002-8331-(2005)20-0077-04 文献标识码 A 中图分类号 TP18

Overview of Artificial Immune System and Algorithm

Xie Keming Guo Hongbo Xie Gang Xu Xinying

(School of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: According to the prototype of living body's immune system, AIS(Artificial Immune System) is proposed. Based on the main function of immune system, the typical algorithms are described, such as immune algorithm, negative and clonal selection algorithms, immune evolutionary algorithm, AIS-neural network mix intelligent system, fuzzy immune system and so on. A Chronological list of AIS models and techniques that are found in the literature is showed. Based on the AIS, the development directions and research emphases are discussed at last.

Keywords: Artificial Immune System(AIS), immune algorithm, negative and clonal selection, immune evolutionary, fuzzy immune

1 引言

从上世纪 50 年代至今,人工智能飞速发展并应用于工程实践中。人工免疫系统 AIS(Artificial Immune System)理论源于生物学、医学领域,目前的定义主要有以下几种:“AIS 是一种数据处理、归类、表示和推理策略,该模型依据一种似是而非的生物范式,即人体免疫系统”^[1];“AIS 由生物免疫系统启发而来的智能策略所组成,主要用于信息处理和问题求解”^[2];“AIS 是一种由理论生物学启发而来的计算范式,它借鉴了免疫系统的功能、原理和模型并用于复杂问题的解决”^[3];人工免疫系统是遵循可信的生物学范例——人类免疫系统原理的数据处理、分类、表示和推理策略系统^[4];人工免疫系统是基于自然免疫系统方法的计算系统^[5]。该文认为人工免疫系统是以人类等高等脊椎动物的免疫系统为原型,利用生物免疫系统各种原理和机制而发展的各类模型、算法及其在工程和科学中应用而产生的各种智能系统的统称。它是与生物免疫系统相对应的工程概念,如同人工神经网络与脑神经系统;进化计算与遗传系统;模糊控制与人类模糊思维等。

2 典型人工免疫算法

Immune(免疫)是从拉丁文 Immunise 衍生而来的。很早以前,人们就注意到传染病患者痊愈后,对该病有不同程度的免疫力。因此,在相当长时期内,免疫在微生物学和病毒学上是指免除瘟疫;换言之,是指对传染因子的再次感染有抵抗力,这是机体在初次感染后对该传染因子产生了免疫应答的结果。在医

学上,免疫是指机体接触抗原性异物的一种生理反应^[6]。免疫系统有能力产生很多种抗体,免疫系统的控制机制可完成这一调节功能,即只产生所需数量的抗体。根据网络理论,如果任一细胞系中的细胞由于抗原的刺激而被激活并开始繁殖,其它能识别这种基因类型的细胞系也被激活并开始繁殖。这样,如果这一过程连续地进行,就构成了对自身的免疫,并且通过所有淋巴细胞的作用实现了调节机制。生物免疫过程宏观描述如图 1 所示。

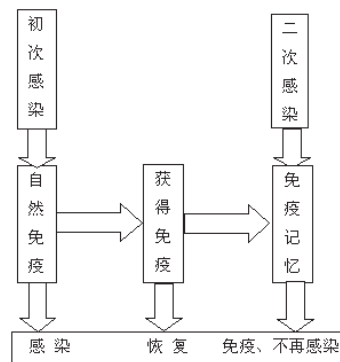


图 1 生物免疫过程

2.1 基本免疫算法

基本免疫算法基于生物免疫系统基本机制,模仿了人体的免疫系统。基本免疫算法从体细胞理论和网络理论得到启发,

实现了类似于生物免疫系统的抗原识别、细胞分化、记忆和自我调节的功能^[7],基本免疫算法如图 2 所示。如果将免疫算法与求解优化问题的一般搜索方法相比较,那么抗原、抗体、抗原和抗体之间的亲和性分别对应于优化问题的目标函数、优化解、解与目标函数的匹配程度。

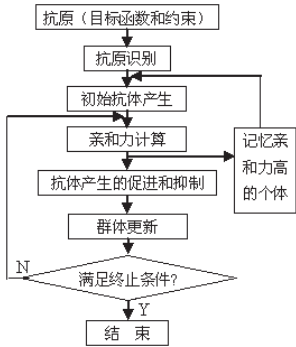


图 2 基本免疫算法流程图

2.2 否定选择算法

否定选择算法基于生物免疫系统的特异性,借鉴生物免疫系统中胸腺 T 细胞生成时的“否定选择”(Negative Selection)过程。Forrest^[8]研究了一种用于检测变数据变化的否定选择算法,用于解决计算机安全领域的问题。该算法通过系统对异常变化的成功监测而使免疫系统发挥作用,而监测成功的关键是系统能够分清自己和非己的信息:随机产生检测器,删除那些测到自己的检测器,以使那些测到非己的检测器保留下来。否定选择算法流程如图 3 所示。

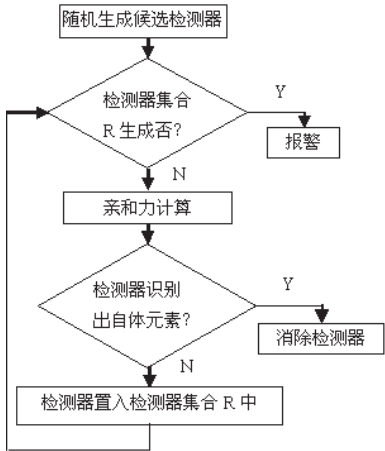


图 3 否定选择算法流程图

2.3 克隆选择算法

1959 年著名的免疫学家 Burnet 提出克隆选择学说,并以克隆清除(clonal deletion)学说解释免疫耐受现象。Burnet 的克隆选择学说指出体内约存在 $10^5 \sim 10^7$ 具有免疫活性的细胞克隆,每一克隆细胞都具有特异的功能与其相应抗原决定簇起反应的受体。但处于未成熟阶段的 T、B 反应细胞系因接触抗原而被清除,则造成免疫耐受。现已知大量未成熟自身反应性 T 细胞在胸腺内因接触相应的自身抗原后,发生程序性死亡而被清除,这是维持自身耐受最有效的机制。

Castro^[9]基于免疫系统的克隆选择理论提出了克隆选择算法,这是一种模拟免疫系统的学习过程的进化算法。克隆选择

算法模拟这一过程进行优化,算法流程如图 4 所示。Castro 进一步将免疫网络理论和克隆选择算法相结合,提出了人工免疫网络学习算法用于知识发现,冗余数据挖掘,自动分类,并对算法的参数灵敏度特性进行了分析。

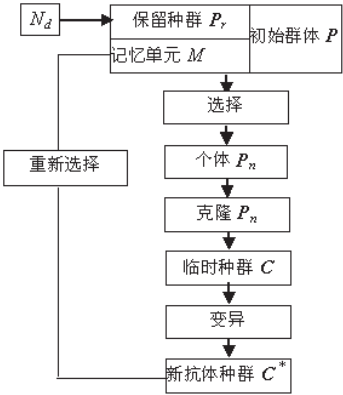


图 4 克隆选择算法流程图

3 复杂人工免疫算法

3.1 免疫进化算法

进化计算作为一种有向随机搜索的优化算法已得到了广泛的应用,与基本免疫算法相结合,可构成“免疫-进化算法”,已成为 AIS 研究和应用的成功领域之一。

文献[10]提出了集免疫机制和进化机制于一体的一种全局并行算法——基于免疫策略的进化算法,证明了算法的全局收敛性,并且给出了免疫疫苗的选取策略和免疫算子的构造方法,并较好地解决了已有算法中出现的退化现象,且收敛速度有显著提高。文献[11]提出了一种具有免疫功能的遗传算法。把待求解的问题对应为抗原,问题的解对应为抗体,在免疫算法中加入了遗传算子,与遗传算法相比,增加了抗原识别、记忆功能和调节功能,不降低遗传算法的鲁棒性,而且兼顾了搜索速度、全局和局部搜索能力。文献[12]设计了具有免疫体亲近性特征的遗传算法。该算法增加了在已知的优秀个体中扩大同类个体范围的功能,避免了在同类个体中的最优秀者被丢失的可能性,同时保留了通常的遗传算法的交叉、变异等遗传算子,扩大了全局的搜索范围,避免了局部收敛。可快速求解具有多个离散变量及多结点的网络优化问题。文献[13]提出了基于免疫抗体记忆的免疫算法,模拟生物特征引入了两种记忆机制,并把算法有效地应用于 n-TSP(n-th agents' travelling salesman problem)问题。文献[14]借鉴抗体的多样性保持策略,弥补遗传算法在群体多样性差时易陷入局部极优的缺点,大大提高了算法的群体多样性。该算法具有较好的全局收敛性,能有效解决装箱问题。这些算法可以快速求出满足一定精度要求的最优解,对解决实际的工程应用问题具有很大价值。

免疫算法和进化算法之间区别主要表现在:(1)免疫算法在记忆单元基础上运行,确保了快速收敛于全局最优解;进化计算则是基于父代群体,不能保证概率收敛;(2)免疫算法评价标准是计算亲和性抗体-抗原的亲和度以及抗体-抗体亲和度,反映了真实的免疫系统的多样性,而进化算法则是简单计算个体的适应度;(3)免疫算法通过促进或抑制抗体的产生,体现了免疫反应的自我调节功能,保证了个体的多样性,而进化算法只是根据适应度选择父代个体,并没有对个体多样性进行调节。

表 1 人工免疫算法研究概况

时间	研究者(组织)	技术特征	生理原型	工程应用
1986[22]	Farmer	提出了免疫系统的动态模型	Jerne 的免疫网络学说	机器学习
1990[23]	Ishida	PDP 学习算法	免疫系统网络防御体系	传感器网络故障诊断
1994[8]	Forrest	计算机系统自体-非自体检测	抗原-抗体检测	计算机安全和病毒检测
1996	日本	首次举行免疫系统国际专题会议	生物体基本免疫机制	首次提出人工免疫系统的概念
1997[24]	Dasgupta	人工神经网络与人工免疫系统比较	脑神经系统与免疫系统	综合神经网络和免疫系统进行信息传输
1998[25]	Dote	把免疫网络纳入软计算的范畴	Jerne 的免疫网络学说	拓展了软计算的概念
1998[25]	Jang-Sung	免疫算法数学模型和基本步骤	生物体基本免疫机制	用于多峰值函数寻优
1999[26]	Hunt	基于免疫网络的机器学习系统	抗原-抗体复合性	机器破损检测及学习
1999[27]	Dasgupta	结合免疫系统和遗传算法解释化学光谱	抗原-抗体复合性,自体-非自体识别	化学光谱分析
1999[28]	Williams	多智能体计算免疫系统	自体-非自体识别	计算机安全
2000[29]	Tarakanov	免疫系统模型	抗原-抗体复合性	Biosystem 建模
2000[30]	Timmis	资源受限的人工免疫系统	Jerne 的免疫网络学说	数据分析
2000[31]	DeCastro	基于克隆选择和亲和力成熟的模式识别和优化系统	抗原-抗体复合性克隆选择原理	模式识别和优化
2000[27]	Hofmeyr	基于人工免疫系统的计算机安全网络	抗原-抗体复合性自体-非自体识别	计算机安全
2000[32]	Bradley	基于人工免疫系统的容错检	自体-非自体识别	硬件故障诊断及容错
2000[21]	Ding.Y	模糊自调节免疫反馈控制器	免疫系统反馈原理	超高问控制
2001[17]	DeCastro	免疫网络学习算法(aiNet)	克隆选择原理	数据分析
2002[33]	Tarakanov	组建具有免疫性的芯片结构	免疫网络	模式识别
2002[34]	Nasraoui	使用模糊理论模拟抗原-抗体匹配的免疫网络算法	抗原-抗体复合性	Web 数据挖掘
2002[35]	Hart	基于松散分布记忆模式的非静态数据分析系统	免疫记忆	多 Agents 间分布数据传输和采样
2002[36]	Coello	基于 GA 优化的抑制方法	抗原-抗体复合	优化
2002[37]	Kim	变化环境下的动态学习算法	克隆选择原理	动态学习
2002[20]	Nasaroui	模糊人工免疫系统	抗体识别抗原的模糊性和不确定性	WEB 站点数据挖掘和分类
2003[38]	Nasraoui	基于免疫网络理论的动态自学习模型	免疫网络	动态学习
2003[39]	Dasgupta	多级免疫学习算法	否定选择、克隆选择	异物检测、模式识别
2004[40]	宫新保	基于免疫聚类和遗传算法的 RBF 网络设计	生物体基本免疫机制	多用户检测
2004[41]	舒栋才	基于免疫进化算法的投影寻踪聚类及其在地下水动态分类中的应用	免疫进化	地下水动态分类

3.2 AIS 与人工神经网络混合算法

神经系统和免疫系统之间有许多异同,文献[15]描述了两种系统生理上的一般相同点和不同点。AIS 和人工神经网络(ANN)都是受生物启发而产生的技术,二者利用学习、记忆、联想恢复等能力实现在高度分布式系统中识别问题功能。由于 AIS 能学习并记住曾被识别的模式并能高效地组建新的模式检测器,所以 Glenn W.[16] 认为免疫系统是继神经系统之后的“第二大脑系统”。免疫系统中亲和力成熟过程等同于神经网络中权值更新过程,二者都是增加对被识别模式的响应能力。

文献[10]在探讨与分析生物自然界中免疫现象的基础上,提出了一种集免疫机制和神经信息处理机制于一体的免疫神经网络。该网络可以使人们直接利用待求问题的特征信息,并通过注入先验知识来调节隐层单元的激励函数,以达到简化网络的结构,提高其工作的效率和准确性。

Casto 提出的 aiNet 算法[17]模拟了免疫网络对抗原刺激的过程,主要包括抗体-抗原识别、免疫克隆增值、亲合度成熟以及网络抑制、免疫网络被认为是一个付权无向图,而且不是全连接的。

Sasaki[18]提出了一种基于免疫系统反馈机理的自适应学习的神经网络控制器,根据免疫系统反馈机理抗体迅速识别抗原、消灭抗原并保持免疫系统稳定平衡状态的性能,用于改进神经网络学习算法的下降梯度,使学习步长尽可能大,以保持学习的稳定性。

Neidhoefer[19]使用免疫神经网络进行复杂系统识别,把免疫系统的鲁棒性引入到神经网络中,使神经网络具有动态自适应能力,解决了后向神经网络在动态变化环境中的无效性,该方

案能成功控制在线不确定系统、持续变化的动态系统等。

对 AIS 和 ANN 二者混合系统的研究表明,AIS 对 ANN 不仅是有效的补充,更重要的是它们之间可以互相促进,提出多种解决问题新的思路。

3.3 模糊 AIS

目前 AIS 结合模糊控制系统的研究很少,比较有影响的是 Nasaroui[20]和 Ding.Y[21]所做的研究。免疫系统能够对付几乎无穷的抗原和细菌,免疫系统能够识别的异己分子的种类数是未知的。Nasaroui 利用抗原-抗体匹配、识别过程中的不确定性和模糊性,提出了一种模糊免疫算法。通过 WEB 站点数据挖掘、WEB 请求预测等仿真实验证明了算法的有效性。Ding.Y 利用免疫系统反馈原理,设计了一种模糊自调整免疫 PID 控制器,该控制器结构简单,参数调整方便、快捷,并成功应用于过高温自动控制系统中的温度调节。

4 人工免疫算法的工程应用

AIS 在近几年得到了迅速发展,已经渗透到诸如计算机病毒检测及网络安全、认知模型、多 Agent 系统、设计与规划、模式识别、自组织、学习、函数优化、故障诊断检测、机器人学等各类研究领域中。表 1 以年代为序简述了 AIS 发展概况,介绍了 AIS 在若干具有代表性的领域中的应用情况。

5 展望

AIS 在短期内已发展成为计算智能领域研究的一个重要的分支,显示出巨大的潜力和强劲的发展势头。但是免疫系统是非常复杂的系统,医学界关于免疫机理目前还有许多问题没

有研究明白,对已有的研究成果还有很多争议。甚至有学者认为智能行为不能用简单的数学模型描述,人工智能“应该从生物学而不是物理学受到启示”,基于“还原论”的传统的 AI 应该转向“进化论”^[42]。AIS 取得成功的大小受制于免疫系统的发展及其发展程度,它作为一个新的研究领域只是刚刚开始,目前多数研究还处在探索阶段,现有的算法没有统一的标准,而且开放性的问题不断涌现。随着人类对免疫系统的深入研究,AIS 在理论和实践上有待取得新的突破。

生物系统中的信息处理系统部分包含遗传系统、脑神经系统、免疫系统和内分泌系统 4 种类型,它们之间相互区别、相互制约,又相互联系、相互依赖的机理为人工智能的综合集成提供了坚实的生物基础。人工免疫系统可以与进化计算、神经网络、模糊控制等技术紧密结合在一起,人们可更大胆地设想借鉴生物内分泌系统(虽然目前还没有关于内分泌系统在智能控制工程应用研究的报道)以形成一个具有多学科、多手段、多技术的协同集成框架,为模拟具有人类的智能提供一种崭新的思路。(收稿日期:2005 年 1 月)

参考文献

1. <http://www.streamonthe-fly.com/pdf/in.pdf>
2. Dasgupta D, Attoh Okine N. Immunity based systems: A survey[C]. In: Proc IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Orlando, Florida, 1997: 369~374
3. Timmis J, Knight T. Artificial immune system: Using the immune system as inspiration for data mining[C]. In: Abbass H A, Sarker R A, New ton C S eds. Data Mining: A Heuristic Approach, Hershey: Idea Publishing Group, 2001: 209~230
4. De Castro L N, Von Zuben F J. Artificial Immune Systems: Part I Basic Theory and Applications[R]. Technical Report-RT DCA, 1999; (01): 89
5. Timmis J, Hunt J. An artificial immune system for data analysis[J]. Biosystems, 2000; 55(1/3): 143~150
6. <http://user.nankai.edu.cn/sky/myxkc/introduction/1-1-1.html>
7. Chun J S, Jung H K, Ha Hn S Y. A study on comparison of optimization of performance between immune algorithm and other heuristic algorithms Magentics[J]. 1998; 34(5): 2972~2975
8. Forrest S, Perelson A, Cherukuri R. Self-nonself discrimination in a computer[C]. In: Proceedings of 1994 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy, Los Alamos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1994: 202~212
9. CASTRO L N, VON ZUBEN F J. Data mining: a heuristic approach [M]. USA, dea group, 2001
10. 王磊. 免疫进化计算理论及应用[D]. 博士学位论文. 西安电子科技大学, 2001, 9
11. 莫宏伟, 王科俊, 金鸿章. 计算智能的融合应用研究[J]. 自动化技术及应用, 2002; (1): 12~16
12. 孟繁桢, 杨则, 胡云吕等. 具有免疫体亲近性的遗传算法及其应用[J]. 天津大学学报, 1997; 30(5): 624~627
13. Endon S, Toma N, Yamada K. Immune algorithm for n-TSP[C]. In: IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics, 1998-04: 3844~3849
14. 曹先彬, 刘克胜, 王煦法. 基于免疫遗传算法的装箱问题求解[J]. 小型微型计算机系统, 2000; 21(4): 361~363
15. Dasgupta D. Artificial neural networks and artificial immune systems: similarities and differences[C]. In: IEEE International Conference

- on Computational Cybernetics and Simulation, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997
16. Glen W Rowe. The Theoretical Models in Biology[M]. first edition, Oxford University Press, 1994
17. Castro L N D, Zuben F J V. An evolutionary immune network for data clustering[C]. In: Proceedings of the Sixth Brazilian Symposium on Neural Networks, 2000: 84~89
18. Sasaki M, Kawafuku M, Takahashi k. An immune feedback mechanism based adaptive learning of neural network controller[C]. In: ICONIP'99 6th International Conference on Neural Information Processing, IEEE Computer Society Press, 1999: 502~507
19. Neidhoefer J C, Krishnakumar K. System Theory, Immunized neural networks for complex system identification[C]. In: Proceedings of the SSST '93, Twenty-Fifth Southeastern Symposium, 1993-03: 383~387
20. Nasaroui O, Gonzalez F, Dasgupta D. The fuzzy artificial immune system: motivations, basic concepts, and application to clustering and Web profiling, Fuzzy Systems[C]. In: FUZZ-IEEE'02, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference, Vol 1, 2002-05: 711~716
21. Ding Y Ren L. Fuzzy self-tuning immune feedback controller for tissue hyperthermia, FUZZ IEEE 2000, The Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol, 2000-05: 534~538
22. Farmer J D, Packard N H, Perelson A S. The Immune System, Adaptation and Machine Learning. Physical 22D, 187~204
23. Ishida Y. Fully Distributed Diagnosis by PDP Learning Algorithm: Towards Immune Network PDP Modle[C]. In: Proc of IJCNN 90, San Diego, 1990
24. Dasgupta D. Artificial neural networks and artificial immune systems: similarities and differences[C]. In: IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997
25. Mitsumoto N, Fukuda T, Arai F et al. Control of Distributed Autonomous Robots System Based on the Biologically Inspired Immunological Architecture[C]. In: Proc of the 1997 IEEE Int Conf on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, 1997: 3351~3556
26. J Hunt, J Timmis, D Cooke et al. The Development of an Artificial Immune System for Real World Application[J]. Artificial Immune system and Their Applications, 1999
27. D Dasgupta. Immune-based intrusion detection system: a general framework[C]. In: Proceedings of the 22th national information systems security conference, 1999
28. P D Williams, K P Anchor, J L Bebo et al. CDIS: Towards a computer immune system for detecting network intrusions[J]. Lecture notes in Computer Science, 2001; 2212: 117~133
29. Alexander Tarakanov, Dipankar Dasgupta. A formal model of an artificial immune system. BioSystem, 2000
30. Jon I Timmis. Artificial Immune Systems: A Novel Data Analysis Technique Inspired by the Immune Network Theory[D]. Dissertation. University of Wales, 2000
31. L N DeCastro, F J V Zuben. The clone selection algorithm with engineering application[C]. In: Proceedings of GECCO, 2000
32. D Bradley, A Tyrell. Immunotronics: Hardware fault tolerance inspired by the immune system[C]. In: Proceedings of the 3th International conference on Evolvable Systems (ICES2000), Springer-verlag, INC, 2000
33. A Tarakanov, D Dasgupta. An immune chip architecture and its emulation[C]. In: 2002 NASA Conference on Evolvable Hardware, 2002

(下转 84 页)

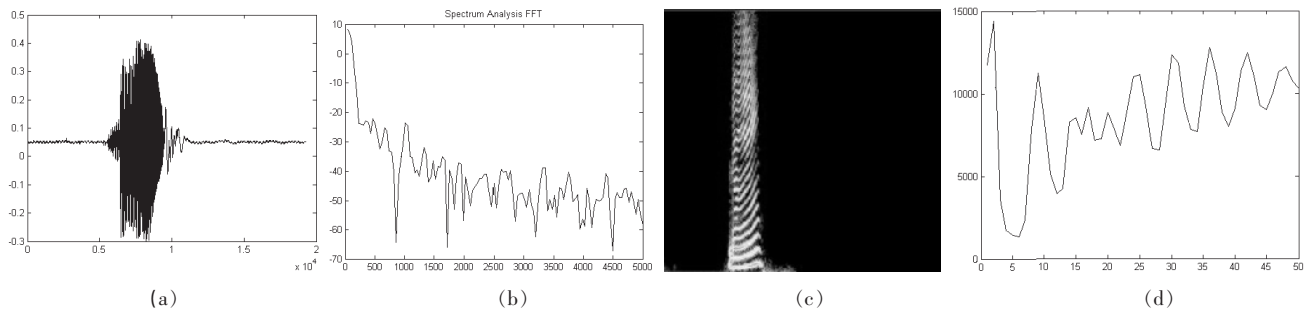


图5 话者2发音“0”的结果

表2 库中6个说话人发音“0”语谱图的 PCNN 输出熵序列欧氏距离比较

欧氏 距离	话者 A			话者 B		话者 C		话者 D		话者 E		话者 F	
	1	2		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
话者 A	1	0	0.338	1.185	1.111	0.799	0.652	0.481	0.583	0.742	0.503	0.586	1.131
	2	0.338	0	1.247	1.311	0.987	0.852	0.628	0.607	0.759	0.586	0.710	1.297
话者 B	1	1.185	1.247	0	0.419	0.663	0.808	0.883	1.211	0.534	0.881	0.769	1.051
	2	1.111	1.311	0.419	0	0.502	0.648	0.889	1.200	0.619	0.831	0.699	0.939
话者 C	1	0.799	0.987	0.663	0.502	0	0.269	0.675	0.874	0.513	0.486	0.915	0.486
	2	0.652	0.852	0.808	0.648	0.269	0	0.596	0.733	0.507	0.856	0.586	0.657
话者 D	1	0.481	0.628	0.883	0.889	0.675	0.596	0	0.401	0.438	0.501	0.489	0.895
	2	0.583	0.607	1.211	1.200	0.874	0.733	0.401	0	0.727	0.709	0.623	1.206
话者 E	1	0.742	0.759	0.534	0.619	0.513	0.507	0.438	0.727	0	0.427	0.537	0.830
	2	0.503	0.586	0.881	0.831	0.486	0.856	0.501	0.709	0.427	0	0.691	0.591
话者 F	1	0.586	0.710	0.769	0.699	0.915	0.586	0.489	0.623	0.537	0.691	0	0.388
	2	1.131	1.297	1.051	0.939	0.486	0.657	0.895	1.206	0.830	0.591	0.388	0

5 结论

基于以上实验仿真结果,说明可以使用脉冲耦合神经网络(PCNN)进行说话人语音信号特征提取,并根据特征来区分不同的说话人,这对于 PCNN 的理论研究和实际应用开发具有非常重要的现实意义。另外,该文首次将 PCNN 引入到语音识别的应用研究中,开拓了信号处理中两个极其重要的部分——语音信号处理和图像信号处理结合的新领域,实验结果说明该算法已经在这方面获得了不错的效果。但是,关于 PCNN 在识别领域的进一步应用还有待于研究和探讨,下一步的工作主要是围绕识别分类器展开;还有在实验装置结构上也可以做更多的改进和优化,使该算法更适用于实时处理系统。

(收稿日期:2005 年 1 月)

参考文献

1.R Eckhorn,H J Reitboeck,M Arndt et al.A Neural Network for Fea-

ture Linking via Synchronous Activity:Results from Cat Visual Cortex and from Simulations[C].In:R M J Cotterill ed.Models of Brain Func-tion,Cambridge University Press,255~272

2.L Deng,I Kheirallah.Dynamic Format Tracking of Noisy Speech using Temporal Analysis on Outputs from a Nonlinear Cochlear Mo-del[J].IEEE Trans on Biomedical Engineering,1993

3.R Eckhorn,H J Reitboeck,M Arndt et al.Feature Linking via Syn-chronization Among Distributed Assemblies:simulation of results from cat cortex[J].Neural Computing,1990;(2):293~307

4.J L Johnson.Pulse-coupled Neural Networks[C].In:Adaptive Comput-ing:Mathematics,Electronics and Optics,Proc of a conference,Orlando FL,1994~04;CR55

5.马义德,吴承虎.基于 PCNN 脉冲耦合神经网络的有噪图像特征提取[C].见:第十二届全国神经计算学术大会,661~668

(上接 80 页)

34.O Nasaroui,F Gonzalez,D Dasgupta.The Fuzzy AIS:Motivations, Basic Concepts,and Application to Clustering and Web Profiling[C]. In:IEEE International Conference on Fuzzy Systems,2002

35.E Hart,P Ross.Exploiting the analogy between immunology and Spare Distributed Memories:A system for Clustering Non-stationary data[C].In:the first ICARIS,2002

36.C A Coello,N Cruz Cores.A parallel implementation of the artifi-cial immune system to handle constraints in genetic algorithms:pre-liminary results[C].In:Proceedings of the 2002 Congress on Evolu-tionary Computation,CEC2002,Honolulu,2002

37.J Kim,P J Bentley.Toward an artificial immune system for network intrusion detection:An investigation of dynamic clonal selection[C].In:Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation,CEC2002,Honolulu,2002

In:Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, CEC2002,Honolulu,2002

38.O Nasaroui,F Gonzalez,D Dasgupta.A Scalable Artificial Immune System Model for Dynamic Unsupervised learning[C].In:GECCO,2003

39.Dasgupta,Senhua Yu,Nivedita Sumi Majumdar.MILA-Multilevel Immune Learning Algorithm[C].In:the Proceedings of GECCO,2003~07

40.官新保,周希朗.基于免疫聚类和遗传算法的 RBF 网络设计方法[J].应用科学学报,2004;(1):81~84

41.舒栋才,樊明兰,林三益.基于免疫进化算法的投影跟踪聚类及其在地下水动态分类中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2004;(1):15~18

42.戴汝为,王珏.关于智能系统的综合集成[J].科学通报,1993;38(4):645~655