



唐孝威 郭爱克 吴 思 主编
翟 健 梁培基 杨炳忻

神经信息学 与计算神经科学

 浙江出版联合集团
浙江科学技术出版社



中国科学院大学
UNIVERSITY OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

神经信息学 与计算神经科学

中国科学院大学
UNIVERSITY OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



神经信息学 与计算神经科学

唐孝威 郭爱克 吴 思 主编
翟 健 梁培基 杨炳忻

图书在版编目(CIP)数据

神经信息学与计算神经科学 / 唐孝威等主编. —杭州:
浙江科学技术出版社, 2012. 5

(中国科技前沿探索)

ISBN 978-7-5341-4499-8

I. ①神… II. ①唐… III. ①神经科学-信息学②神经科学-计算机科学 IV. ①Q189

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 086360 号

丛 书 名 中国科技前沿探索

书 名 神经信息学与计算神经科学

主 编 唐孝威 郭爱克 吴 思
翟 健 梁培基 杨炳忻

出版发行 浙江科学技术出版社

杭州市体育场路 347 号 邮政编码:310006

联系电话:0571-85164982

E-mail:msm@zkpress.com

网址:www.zkpress.com

排 版 杭州兴邦电子印务有限公司

印 刷 浙江新华数码印务有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 787×1092 1/16 印 张 24.75

字 数 374 000 插 页 5

版 次 2012 年 5 月第 1 版 2012 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5341-4499-8 定 价 98.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现倒装、缺页等印装质量问题,本社负责调换)

责任编辑 莫沈茗 陈 岚 沈秋强

装帧设计 孙 菁

责任校对 赵 艳

责任印务 田 文

序

·

当今,信息科学已经渗透到科学应用和经济发展的各个领域。人脑是人类进行复杂的信息处理的中枢系统,很多信息科学家纷纷把注意力转向对脑的研究,希望从脑的机理研究中得到启发,实现信息科学新的突破。

了解脑及思维的生物学原理,包括遗传基础和神经网络机制,是二十一世纪最主要的科学挑战之一。随着各项新技术的快速发展,如高密度多电极记录、用大量钙敏感染料的双光子成像技术、fMRI 技术、PET 技术等,实验数据以空前的速度增加。为了解读这些实验数据,并据此提出和检验各种科学假说,新的计算工具和方法是必不可少的。

另一方面,脑是一个异常复杂的动力学系统,具有多种反馈机制和多层时空结构。用现代数学、物理的框架及分析工具对脑的活动进行定量分析,并与实验研究互动,将对深入阐明脑的行为起到重要的作用。

神经信息学与计算神经科学作为神经科学与信息科学相结合的一门尖端科学技术,正成为发达国家在科学技术领域相互竞争的一个制高点。可以预料,通过理论和实验研究的紧密配合,神经信息学与计算神经科学在未来的 10~20 年内将有一个突破式的发展。

本书以介绍当今神经信息学与计算神经科学的前沿为目的,以“神经信息学与计算神经科学的前沿问题”第 367 次香山科学会议内容为基础,由国内外生物、数学、物理、计算机、电子、通信与自动控制等学科领域的 40 多位专家共同撰写。希望通过本书的出版,推动我国在这个领域的研究。本书也可以作为其他研究方向的学者、研究生等进入这个领域的参考书。

本书围绕以下四个中心议题:神经编码的理论及实验基础、不

确定和不稳定的神经系统如何处理信息、大脑内记忆及决策的神经生物学基础、神经系统的学习机制以及复杂网络在神经计算中的应用,就神经信息学与计算神经科学的现状和未来发展前景,以及所面临的机遇和挑战进行详细的分析.

书中有疏漏和错误之处,希望读者提出宝贵意见.在本书的编写过程中,蔡智辉和赵昶做了许多工作,特此致谢.

唐孝威 郭爱克 吴思 翟健 梁培基 杨炳忻

2012年3月

目录

第一章 计算神经科学的发展

1.1	计算神经科学的发展现状	2
1.1.1	计算神经科学的广泛影响	2
1.1.2	计算神经科学的迅猛发展	4
1.1.3	计算神经科学的应用方向	4
1.2	有关计算神经科学的思考	8
1.2.1	神经计算的基本单元	9
1.2.2	计算神经科学研究中的还原论观点和动力学观点	12
1.2.3	“人工脑”的研究	14
1.3	意识研究的理论和实验进展	24
1.3.1	意识研究的部分理论框架	24
1.3.2	意识研究的实验进展	33

第二章 神经信息处理的模型与应用

2.1	神经信息的定量化研究与 S 空间编码	48
2.1.1	稳定性和定量化分析	48
2.1.2	S 空间的引入	51
2.1.3	对于“简并”的解释	53
2.1.4	用 S 空间理论分析人工智能	57
2.2	大脑皮层的背景活动	60
2.2.1	Hilbert 方法与电影画面假说	60
2.2.2	静息态脑皮层的背景活动	64
2.3	混沌边缘的神经网络	71
2.3.1	神经系统与动力学	71

2.3.2 混沌边缘的神经元网络	73
2.4 神经网络上的雪崩和功能连结组	80
2.4.1 静息态	80
2.4.2 神经雪崩	82
2.4.3 脑神经系统处在混沌边缘	91
2.4.4 脑功能连结组	95
2.5 网络科学与大脑	101
2.5.1 网络科学及国内外发展概况	101
2.5.2 探索大脑“运转”奥秘之路	102
2.5.3 大脑网络的构建方法和描述方式	106
2.5.4 大脑皮层功能网络的研究进展	109

第三章 计算方法在神经科学中的应用

3.1 精神分裂症的计算神经模型	118
3.1.1 精神分裂症简介	118
3.1.2 维纳控制论对精神分裂症机制的推测	119
3.1.3 精神分裂症的计算神经科学模型介绍	120
3.1.4 对精神分裂症计算模型的思考	122
3.2 神经信息流的耦合强度与方向	129
3.2.1 网络流	129
3.2.2 计算信息流方向的各种算法简介	131
3.2.3 大鼠海马区信息流研究简介	142
3.3 多通道神经元信号分析的基本方法	151
3.3.1 神经元电信号的记录	151
3.3.2 多通道神经元信号分析方法	155
3.3.3 多通道神经元信号分析方法的选取、比较及研究展望	178
3.4 脑电研究的几个新方向	190
3.4.1 稀疏性与脑电逆问题	191
3.4.2 脑电的零参考技术与脑网络研究	194
3.4.3 脑电与功能性磁共振成像结合的新技术	197

3.4.4 基于脑电的脑机交互	202
3.5 人脑分类决策的神经机制	210
3.5.1 fMRI 信号的多维数据分析	211
3.5.2 分类决策的神经机制	212
3.5.3 分类规则的神经表征	214
3.5.4 简单形状类别神经信号的区别性	218
3.5.5 通过学习改变分类决策的规则	221

第四章 神经动力学及突触可塑性

4.1 神经元的兴奋动力学性质及其可塑性和调节	230
4.1.1 自动兴奋神经元的兴奋动力学	230
4.1.2 静息神经元在刺激作用下表现出的兴奋性类型	233
4.1.3 在动力学神经元网络中引入节点兴奋性的调节和可塑性	236
4.2 Hebbian 突触修饰:学习和记忆的突触模型	243
4.2.1 长时程突触可塑性的发现和特性	244
4.2.2 计算神经科学中的“Hebbian 突触学习”规则的描述和应用	247
4.2.3 长时程突触可塑性研究的基本问题及主要实验进展	249
4.3 离子通道小尺寸团簇的随机动力学和熵效应	259
4.3.1 钠离子通道团簇模型	260
4.3.2 大团簇极限动力学	262
4.3.3 小团簇自发动作电位发放频率	264
4.3.4 熵密度调制的自发放电频率	266
4.3.5 熵密度调制的弱周期信号编码能力	269

第五章 感觉神经信息处理

5.1 初级视皮层动力学	278
5.1.1 V1 的基本特性	278

5.1.2 V1 的大尺度计算模型	280
5.1.3 简单细胞与复杂细胞	281
5.1.4 涨落可控的临界点	282
5.1.5 朝向选择性	283
5.1.6 V1 皮层的自发活动	285
5.1.7 直线—运动视错觉	288
5.2 视觉感知稳定性的神经机制研究	295
5.2.1 感受野重构	296
5.2.2 快速眼动抑制	307
5.3 神经元协同放电及神经信息编码	316
5.3.1 感觉系统的协同放电活动	316
5.3.2 运动系统的协同放电活动	326
5.4 神经信息编码的实验观察与探讨	332
5.4.1 神经元放电序列模式的多样性	332
5.4.2 神经元活动的动力学状态对反应性的影响	335
5.4.3 神经元兴奋性的分类与转型	337
5.4.4 一种新异的神经信息编码方式——“传导编码”	339
5.4.5 突触传递的非线性分析	341

第六章 计算神经科学发展展望

6.1 计算神经科学的重要研究方向	348
6.1.1 神经信息的编码机制	348
6.1.2 学习、记忆及信息储存的神经网络机制研究	350
6.1.3 感觉系统及不同感觉模式之间信息整合的计算理论	353
6.1.4 简单模式动物的神经系统研究	358
6.1.5 大尺度神经网络的计算特性	362
6.1.6 高级认知行为的计算模型	365
6.1.7 脑功能研究中的数据分析和算法	369
6.1.8 人工智能研究中的计算神经科学	374
6.2 计算神经科学的机遇和挑战	385

第一章

计算神经科学的发展

1.1 | 计算神经科学的发展现状

► 1.1.1 计算神经科学的广泛影响

了解大脑及思维的生物学原理,包括从遗传基础到神经网络机制,是 21 世纪最主要的科学挑战之一^[AHL08]. 随着各项新技术的快速发展,如高密度多电极记录、用大量钙敏感染料的双光子成像技术、脑基因组学以及脑连接组学,我们预计在未来的数年时间里,实验数据将以空前的速度增加. 因此,展望未来,为了解读这些实验数据,并据此提出和检验各种科学假说,新的计算工具和方法是必不可少的. 另外,大脑是一个异常复杂的动力学系统,具有多种反馈机制和多层时空结构,它的行为不能仅仅依靠直觉来理解,定量分析和从概念上深入阐明也是至关重要的. 这就是为什么计算神经科学使用现代数学、物理的框架及分析工具,并通过与实验的互动,对形成新概念和基本原理起到相当的作用^[1]. 在此举几个具体的成功例子:

(1) 网络中突触兴奋性和抑制性的动态平衡. 这个概念最初出于理论分析和模型,现在已被公认为神经科学的一个核心概念,用于理解脑皮层的动力行为、注意对神经元的调制、中枢神经系统的稳态调节等诸多问题.

(2) 抑制性神经元之间的同步化活动. 人们一直以为兴奋性神经元之间的兴奋性突触引起脑的节律同步化. 但是,理论的结果提出,大脑节律的同步化一般不是由兴奋性突触单独产生的,而是强烈依赖于抑制性突触,特别是抑制性神经元之间的互动可引起同步化活动. 这个理论已被大量的实验所证实,广泛应用于理解神经同步化活动在认知

中的作用,以及与神经系统疾病相关的异常大脑节律及同步化活动。

(3) 工作记忆和决策(Decision-Making)的神经机制. 人们长期认为工作记忆可由正反馈网络实现,近年来的理论模型结果将这个想法具体到兴奋性神经元之间的、NMDA 受体介导的慢交互连接(Recurrent)网络中。而且,最新的研究也发现,决策可由同样的机制来实现. 这表明,我们开始找到“认知型”脑皮层微网络的基本性质。

(4) 强化学习理论. 学习理论最初是在计算机科学中发展起来的,现在被用来研究与奖赏有关的抉择行为,特别是帮助我们解释多巴胺神经元的放电特征及其网络在奖赏行为中的功能。

从这几个例子可以看出计算神经科学的重要性. 因此,要成功建立一流实验神经科学,尤其是系统神经科学,一定需要发展配套的一流计算神经科学。

除了在基础研究方面的贡献外,计算神经科学通过与神经科学其他分支结合,也会对社会的各个层面产生广泛的影响. 例如,心理学、神经科学以及机器学习能够为学习、教育提供新的模式^[MKM09];对大脑如何做决策的研究^[W08]已经开始对微观经济学和社会抉择行为学产生影响,开拓了“神经经济学”这个新领域;由于对许多精神障碍病的治疗必须先了解其相应的认知缺陷以及相关的分子和网络机制的失调,人们已经开始为精神病学发展新的计算和系统的研究方法(比如工作记忆和抉择能力的损坏被认为是精神分裂症的核心征兆之一,计算模型能为揭示其机理提供帮助)^[W06]。

另一个相关的广阔领域是未来的计算机技术、人工智能. 作为开发下一代智能机器人平台的脑计算机仿真现已受到人们的广泛关注. 2008年2月,美国国家工程院(NAE)发表了用工程方法重建人脑的重大挑战书^[2]. IBM 和 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 目前都积极地投入到这项研究中. 欧洲共同体也有以脑科学为基础的“RobotCub”大计划. 在 2009 Kavli Futures Symposium 有关“幻想的计算机”的讨论会上,达成了一个共识:和计算神经科学的紧密合作能帮助人类在未来设计出具有创新型结构的机器人^[3]。

由此可见,计算神经科学的研究,不仅对于我们实现建设世界一流的神科学的目标十分重要,而且对很多其他相关领域,特别是机器学

习、机器人技术以及神经工程学的发展也将产生深远影响。

1.1.2 计算神经科学的迅猛发展

数学理论和模型在脑研究中的应用已有很长历史^[A52]。从 20 世纪 30 年代开始, McCulloch 和 Pitts 建立了第一个神经网络的数学模型; Norbert Wiener 和 John von Neumann 推测了计算机和脑的关系; Hodgkin、Huxley 和 Rall 建立了第一个符合生理学性质的神经元和突触模型, 从而奠定了研究生物学神经网络的理论基础。

1988 年前后, 计算神经科学作为一个新学科领域开始形成。那一年, Sejnowski、Koch 和 Churchland 在 *Science* 杂志上发表了这个领域的“宣言”^[SKC88], 同年, 介绍计算神经方法的课程首次在 Woods Hole 的海洋生物学所由 Christof Koch 和 Jim Bower 开设。20 世纪 80 年代后期, 有 3 个领域的成果汇聚令人振奋: (1) 人工智能, Parallel Distributed Processing (PDP), 也就是“并行与分布式处理”的发展正处于它的高峰, 影响颇大的两卷 PDP 手册于 1986 年出版; (2) 神经网络的物理研究, Hopfield 模型及 Amit、Gutfreund 和 Sompolinsky 对此模型的分析于 20 世纪 80 年代中期发表; (3) 现代神经生理学, 1988 年 Rodolfo Llinás 在 *Science* 杂志上发表的综述是其典型代表。因此, 计算神经科学始于实验神经科学、神经网络理论和人工智能的发展。这个领域从一开始就是一个学科高度交叉的领域, 它吸引了大量来自物理学、认知心理学、数学和计算机科学等学科的科学家的参与。在过去的 20 多年时间里, 这个领域飞速发展^[A08], 其中一个标志就是每年在美国、欧洲和日本等地都要举办计算神经科学年会(如 Cosyne、CNS、NIPS, 每一个均有数百名参会者)和暑期学校。

作为一个新兴的前沿科学领域, 计算神经科学的迅猛发展也必将为中国未来科学的发展提供一个良好的契机。

1.1.3 计算神经科学的应用方向

1. 高维随机的神经系统

目前, 如何应用数学方法来描述高维空间中的随机性神经活动过程以及如何处理高维数据的方法甚少。针对此问题, 数学家们已经开始

发展一些新的理论工具,例如压缩传感(Compressed Sensing).网络数学理论、大规模随机性的储备型网络(Reservoir Network)的设想也开始用来描述复杂神经网络.20世纪对物理系统的理论研究曾经促进了数学的长足发展,也许在21世纪中对生物系统,尤其是对大脑的理论研究,也将起到同样的效果.

2. 神经化学计算

细胞生物学研究显示在神经元中存在大量的分子活动过程,包括细胞内钙、cAMP、G蛋白、激酶、磷酸酶类等.我们知道它们包含了大量信息,也知道它们对长时程的突触可塑性和神经调制等机能非常重要.但是对于它们在神经计算中的作用,仍缺乏概念性的了解以及综合理论的分析.理论科学家在基于电活动模型来解释某些神经计算(如时间整合)时遇到了一些困难.要克服这些困难,我们也许需要考虑神经元内部和突触上的“细胞化学计算”.如何跨尺度地将分子过程与网络计算联系起来是一个值得深入研究的课题.

3. 大尺度神经环路的理论

人们对局部神经网络(例如一个皮层区)的研究较多,而对包括许多局部神经网络的大神经组织结构和功能机制的了解甚少.研究者们对于自上而下的信号(如注意力在感觉神经元中的介导)如何在微环路层次上得以实现还知之甚少.另外,我们也不太了解大尺度的神经环路的运作机制,例如在决策过程中,不同的大脑皮层区与皮层下的结构是如何通过动态相互作用进而做出抉择的,我们还缺乏一套关于大尺度神经环路工作的基本理论.

4. 认知神经生理学

得益于功能磁共振成像技术的发明,认知脑科学近年来有了很大的发展.认知科学和神经生理学之间仍存在较大的鸿沟,但近年来人们已经开始应用精确设计的动物实验、单细胞记录和网络模型来研究一些关键的认知行为,如决策、工作记忆和选择性注意.一个神经生理学与认知科学相结合的新领域正在形成.在这个新领域中,理论方法和建模将起到重要的作用.其中的一个前沿学科便是社会认知学,它致力于了解社会行为及情感的脑神经基础.这个领域的研究成果将会对社会产生大的影响,包括发展培养儿童认知能力的新方法、改进经济和金融

抉择理论、抗衰老领域里对老年认知功能的修复和增强。

为了促进计算神经科学取得富有成效的研究成果,建立一个理论科学家和实验科学家互相合作的机制十分必要,以确保理论与实验之间的双向交流,使之相辅相成. 理论模型的建立是基于实验数据的获取,而模型做出的理论预测又反过来促进新的实验设计,有时甚至可对实验的设计有定向性的指导意义. 如果我们能建立理论科学家和实验科学家紧密合作的优良机制,那么不仅能确保计算神经科学有坚实的实验基础,而且实验神经科学也将能从它与理论科学的相互影响中获益而更富创新.

参考文献

- [A08] L. F. Abbott. Theoretical neuroscience rising. *Neuron*, 2008, 60(3): 489 - 495.
- [A52] W. R. Ashby. Design for a brain: The origin of adaptive behavior. London: Chapman Hall, 1952.
- [AHL08] B. M. Altevogt, S. L. Hanson, A. I. Leshner. Molecules to minds: grand challenges for the 21st century. *Neuron*, 2008, 60(3): 406 - 408.
- [MKM09] A. N. Meltzoff, P. K. Kuhl, J. Movellan, T. J. Sejnowski. Foundations for a new science of learning. *Science*, 2009, 325(5938): 284 - 288.
- [SKC88] T. J. Sejnowski, C. Koch, P. S. Churchland. Computational neuroscience. *Science*, 1988(241): 1299 - 1306.
- [W06] X. J. Wang. Toward a prefrontal microcircuit model for cognitive deficits in schizophrenia. *Pharmacopsychiatry*, 2006, 39 Suppl 1 (781): 80 - 87.
- [W08] X. J. Wang. Decision making in recurrent neuronal circuits. *Neuron*, 2008, 60(2): 215 - 234.
- [1] 汪小京. 理论神经科学//韩济生. 神经科学. 3 版. 北京: 北京大学医学出版社, 2009: 1003 - 1018.
- [2] <http://www.engineeringchallenges.org/cms/8996/9109.aspx>.
- [3] <http://www.kavlifoundation.org/extreme-machine-2009-kavli-futures-symposium>.