

理论神经科学

Theoretical Neural Science

汪云九

(中国科学院生物物理研究所, 研究员)

在文献中终于看到“理论神经科学”一词,是令人欢欣鼓舞的。这是神经科学走向成熟的标志,也意味着人类对于自己的大脑——世界上最复杂的系统之一的认识进入了一个新的阶段。

一、理论神经科学的重要性和意义

自然科学各分科的发展大体都要经历观察—实验—理论这样一个变化过程。一门学科有了理论体系以后,可以根据已有的实验结果和将要进行的实验,提出理论假设,做出预测和分析(包括类比和模拟),然后与实验结果比较,修正理论假设,设计下一个实验。现在,神经科学研究中也越来越多地使用这种成熟的科学研究方法了。

神经科学研究的对象是神经系统(包括脑)的结构和功能。中国古代认为思想、感情、智能等脑的高级功能产生于心脏。孟子曰:“心之官则思……”。即使在欧洲,直至中世纪进行人体解剖还被认为是违反教律的。与中国相面术相差无几的颅相学,在上世纪欧洲的大学讲坛上仍在传授。可见,人类对自身大脑的认识一直远远落后于其他学科的发展。在神经系统内部结构尚未了解清楚之前,研究其功能的唯一手段是宏观的心理学方法。由于神经系统特有的复杂性,仅用心理学方法不免带上神秘主义和不可知论的色彩。今天,世界上数以万计的神经科学家,使用现代化的仪器设备,在神经系统功能各层次上进行了无数次的实验研究,对以往认为神秘莫测的感知觉、学习、记忆、语言、思维等方面开始有了规律性的认识,进入了理性发展的轨道。在此基础上产生的理论神经科学,不能不说在哲学和认识论上具有重要意义。

神经系统是生物进化的产物,高等动物的神经系统极为复杂。如人脑大约由100亿个细胞组成,即便是视网膜也有五大类上亿个神经细胞。所以,神经科学研究对象的复杂程度是任何物理学科无

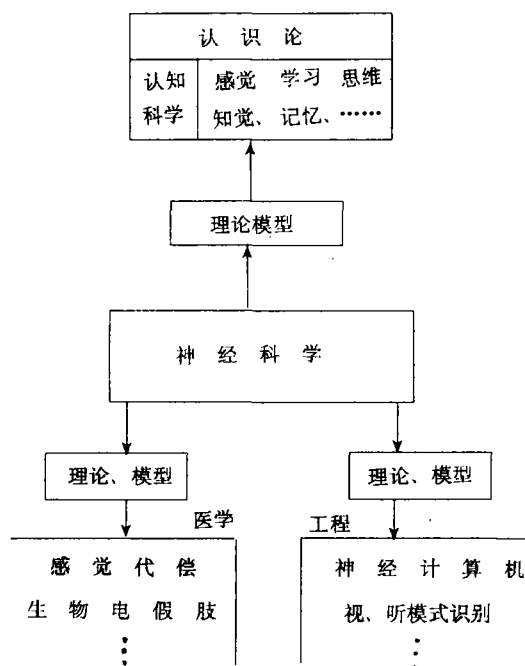
法比拟的。被公认为神经网络计算机揭幕人的美国理论物理学家霍普菲尔德(Hopfield)在他那篇有名的关于神经网络模型的文章中,使用emergence一词,意味着关于复杂系统的功能不能从它的元件性质直接推理出来。也就是说,仅有微观的、局部的、还原论的研究路线是远远不够的,还须从整体的系统的角度进行探索。也需要提出假设,建立模型和理论,进行实验验证和计算模拟。国际脑研究协会前主席伊藤正男在《神经科学往何处去?》一文中曾明确指出这一点。毕生从事记忆定位研究的拉什利(Lashley)在进行大量动物实验后,提出关于记忆的两条定律:等势律(Equipotential law)和质量律(Mass action law),已经接近神经系统中信息存储的真理的边缘,但他最后总结其几十年工作时,不无遗憾地声称:“探明记忆的机制简直是不可能的”。他的实验结果从机械论的冯纽曼(Von Neumann)式的计算机角度来看,确实不可理解,如果他能看到60年代中后期关于记忆的全息理论,以及80年代中后期关于神经网络计算机中分布式存储原理,他就会感到应庆幸自己的先见之明,而不是抱憾终生。神经科学的这段研究历程说明,实验工作者急切需要正确的理论指导和实验解释。理论神经科学正是顺应了这一客观需要,具有方法论上不可或缺的特色。

今天,理论和模型对于神经科学已不再是可有可无的点缀。从事脑的感知功能研究半个多世纪的著名科学家K. H. Pribram在《Brain and Perception—Holonomy and Structure in Figural Processing》(1991)一书中总结了在1500只灵长类动物身上进行实验的结果,并在50名博士生和50个博士后工作基础上提出了大脑工作的全息论(Holonomy)理论,这一理论使用了非线性变换等数学工具描述信息在感觉系统中的处理过程和表达过程。Pribram在该书的序言中写道,他创作该书的目的在于发展一套脑功能结构的半定量模型,并深信只有通过这

种形式化的理论才能把感觉过程的神经生物学水平的研究与心理学水平的研究联系起来。当用数学形式进行互相交流时,在不同水平层次上工作的科学家之间的理解盲区才会减少。

神经系统本质上是一种非线性的、进化的动态系统。这种系统是当代非线性科学和复杂性科学的研究对象之一。物理学家普利高里提出的自组织理论,哈肯提出的协同论,认知科学家提出的PDP理论框架等,还不足以完善地描述神经系统复杂的功能。面向神经科学的理论工作者,现在已经和可能在探索过程中发现神经科学特有的规律和原理,并开拓出具有生命力的新的学科领域。

正确的理论可以指导实践,而且神经科学的研究结果一旦上升为理论(特别是用数学模型表达后),就有实际应用的前景(附图)。



1982年,霍普菲尔德根据神经元的一些基本性质提出神经网络的数学模型,证明了在一定条件下动态性质的收敛定理,指出模拟联想记忆的可能性,与当时计算机技术相结合,形成80年代中后期神经网络发展的新高潮。霍普菲尔德列出的神经元方程中,根据突触电位的连续可加性引入 $\sum w_{ij}x_j$ 项,这是对早期电生理学大量实验研究的理论抽象。我国著名脑科学家、学部委员张香桐早在40~50年代曾做出过这类奠基性实验。这也是张香桐被国际神经网络协会1992年北京会议授奖的原因。

理论神经科学在医疗保健实践上也能发挥作用。掌握耳蜗毛细胞在将声振动刺激转换为神经脉冲的数量规律后,即可制成电子装置植入耳内,为某些类型的失聪患者恢复听力。在搞清感觉信息在神经系统中传递和处理的规律后,可为感觉代偿提

供必要的理论基础,并可为肢体残疾患者的康复装置提供设计思想。脑电波的破译,对控制人的情绪,增强智能,改善睡眠等都有重要的意义。东京大学清水博从东方哲学思想出发,结合已知的视觉生理和心理学资料,提出全息视觉(Holovision)的认知模型,据日报披露该模型已制成硬件装置,可用于机器视觉。诸如此类的例子已日见频繁,其中理论神经科学起了不可忽视的作用。

二、理论神经科学发展概况

笛卡尔(1596—1650)最早把动物在神经系统控制下的活动比拟为“自动装置”,如当时技术上的最高代表钟表、水力机械之类。马赫(1838—1916)用心理物理方法对视觉进行定量研究,发现视知觉中的马赫带现象,并从理论上预言它是神经网络中相互作用的结果,而不是不可解释的错觉。

本世纪30年代美籍俄人拉沙夫斯基(Rashavsky)在芝加哥组织一批数学家、生理学家举行经常性的学术讨论,编辑出版国际性杂志《Bulletin of Mathematical Biophysics》。芝加哥学派的许多工作和该刊上发表的不少文章是关于神经系统的理论研究的。经常参加芝加哥学派讨论的精神病理学家麦卡洛克(McCulloch)和数理逻辑学家皮茨(Pitts)于1943年提出神经网络的一般模型。他们根据当时对神经元及神经网络的生理学资料,使用数理逻辑的工具描述客观事件在神经网络中的表达和处理,第一次把神经网络的信息处理能力加以形式化和理论化。在此模型基础上发展出有限自动机理论。现在,理论上已证明,该模型逻辑上等价于有限记忆的图林机,其功能等价于任何一种通用计算机。美国著名数学家维纳在与许多生理学家,特别是心脏病专家罗森布卢塞(Rosenblueth)长期交往中提出“控制论”,明确指出有机体和机器在其控制过程和通讯过程方面有共同之处。当代数字计算机设计思想的提出者冯纽曼在其生前由夫人整理发表的《The Computer and the Brain》一书,类比了这两大类信息处理系统在结构和功能上的异同。心理学家赫布(Hebb)提出著名的假设,认为动物的学习过程是有关的神元之间突触联系强度的改变。这一假设后来被许多实验所证实,并成为神经网络计算机中一些重要学习算法的理论根据。1975年美国马萨诸塞大学成立“系统神经科学中心”,1977年美国科学出版社出版《系统神经科学》一书。1982年以马尔(D. Marr)名义发表,但实际上由他的同事和学生最后完成的《Vision》一书提出了视觉感知的一个理论框架,即应当从三个不同层次上去研究一个感知过程。从图象输入到最后形成感知须经历三个不同阶段的处理和加工。同年

霍普菲尔德根据神经元的空间总和性、适应性和阈值特性建立神经元的动态模型,并指出由这类神经元组成的网络可解决一类计算上困难的数学问题。尔后,他又推广了“计算”的概念。在1982年还有一件重要事件,费尔德曼(Feldman)参照神经系统处理信息的方式提出设计计算机的新原理(联结主义思想Connectionism)。美国一批认知科学家提出认知的微结构,即平行分布式处理的理论框架(PDP理论框架)。

神经网络理论在计算机上的应用具有诱人的前景,同时它对神经科学在理论化和模型化的进程中也提出了更高、更迫切的要求。因此,80年代后期和90年代初国际上出版了数以十计的有关专著,新创刊了三个国际刊物(《Neural Networks》,《Network — Computation in Neural System》,《IEEE Trans. on Neural Networks》),学术活动频繁,发表论文的数量及其增长的速度,给人留下深刻的印象。规模之大和势头之猛,在自然科学史上也是罕见的。

美国一些理论工作者,经过几年反复讨论,就计算神经科学的历史、研究范围、典型事例等发表意见,于1990年出版了一本包含31章内容的巨著《Computational Neuroscience》,从突触、网络、回路、投射和系统各级水平介绍了计算神经科学的研究内容,使读者体会到计算神经科学多层次、多方位的丰富内涵。

理论神经科学的目标在于寻求建立神经科学内部规律的理论框架。一些有远见的实验神经科学家如伊藤正男明确提出,脑的高级功能是“不能用还原论方法来解决的……模型就变得越来越重要了。”美国洛克菲勒大学专门设立了理论神经生物学计划,其任务是邀请有造诣的实验工作者,召开各种学术讨论会,著书立说,把神经科学的理论体系建立起来。新近德国成立神经信息研究所,相当精力化在模型和模拟上。意大利神经科学家Arnaldo Arduini在《Principles of Theoretical Neurophysiology》(1987)一书中谈到,他在进行了许多复杂的电生理实验以后,深入思索隐蔽在这些实验结果之中的脑功能的一般原理时,深感彷徨。然后,他读遍了所有关于物理世界规律的论著(热力学、相对论、量子论等),以及各种时髦的现代科学观(控制论、信息论……),发现所有这一切都不能生硬地搬来建造理论神经科学的大厦。他根据自己在神经生理学上多年的实验经验以及所掌握的数理方法,提出建立理论神经科学的28条原理。暂且不论他提出的原理最终是否能被人们所接受,以及能否为实验所证实,他的著作表达了实验工作者寻求理论体系的强烈愿望,标志着神经科学的发展进入一个新的阶段。此外,笔者认为从神经科学内

部提出理论框架的想法是合理的。

文献中也常见“计算神经科学”一词,按施瓦茨(Schwartz)的说法,计算神经科学是神经科学与计算机科学之间的交叉部分。珀克尔(Perkel)在《计算神经科学:范围和结构》一文中避免对此做出明确定义,只说计算神经科学分成三部分:把计算作为实验技术;把计算作为中心理论手段;神经科学与计算机之间的类比。生物物理学家Sejnowski、科克(Koch)等人认为计算神经科学的最终目标是要阐明大脑是怎样使用电信号和化学信号来表达信息和处理信息的。他们认为计算神经科学使用的观点是信息,采用的研究方法是建立数学模型和计算机模拟,隐喻的对象是计算机。由此看来,计算神经科学应当属于理论神经科学的一部分。当然,由于计算机科学的发展,计算神经科学近年来得到迅速发展。

三、理论神经科学中的范例

这里,我们列举几个神经科学中理论与实验相结合的典型事例。这些事例中有的获得了诺贝尔生理和医学奖,有的在神经科学或计算机科学发展中产生过重大影响。

霍奇金(Hodgkin)和赫克斯利(Huxley)在枪乌贼的巨轴突上关于神经冲动的产生和传导问题的一系列出色的研究获1963年诺贝尔生理和医学奖。他们从离子通道的角度对神经冲动的机制做出合理的假设,并提出一组理论方程加以刻划,即有名的H—H方程。在某些条件下,H—H方程的解与电生理实验结果符合良好。一二十年后单通道片模箝位技术发展起来,证明当时霍奇金和赫克斯利关于动作电位产生和传导的离子通道假设是正确的,从而显示理论和实验的良好配合对神经科学中一些重大问题的阐明会起多么巨大的作用。

霍奇金和赫克斯利最初提出的钾、钠、钙等离子通道理论由一组4变量非线性微分方程描述,数学上难以研究其解析解的性质。菲茨休(Fitz hugh)对此进行简化,提出BVP模型。日本东京大学的南云仁一教授用类似于隧道二极管组成的有源线路中信号传输的原理,提出一组更为简单的数学模型。有趣的是,近年来非线性科学中的混沌现象在南云简化模型中也有反映。大阪大学佐藤俊辅的计算和模拟工作表明,在南云模型中会出现非线性系统中典型的“魔鬼阶梯现象”。自霍奇金和赫克斯利提出H—H方程以来,开展了大量的理论研究和计算机模拟工作。塔克维尔(H. C. Tuckwell)化了七八年时间,于1988年出版了《Introduction to Theoretical Neurobiology》一书,分上下二册。上册论述线性电缆理论和树突结构,下册是非线性和随机

理论。书中总结了近30年来关于神经元电活动的理论研究。

如果说H-H方程是从分子基础上说明神经轴突上膜电位的产生和传导的良好范例,那么,哈特兰(Hartline)的工作是从神经元(感光细胞、小网模细胞及偏心细胞)之间相互作用关系上说明神经网络处理空间信息的功能,而且是可进一步完美解释视觉心理中的一种现象的一个杰出范例。哈特兰在进行视觉电生理研究时,偶然发现构成蜚复眼的约一千个小眼之间存在一种抑制性相互作用,经过大量精心设计的深入研究,终于找出这种相互作用的定量规律,并用下列方程加以刻划:

$$r_p = e_p - \sum k_{pj}(r_j - r_{pj}^0) \quad p=1, 2, \dots, n.$$

其中 e_p 是第 p 个小眼在单独受光时的反应,也可理解为网络的输入。 r_p 是第 p 个小眼在其他小眼也受光照时的反应,可理解为网络的输出。 k_{pj} 是 j 小眼对 p 小眼的抑制系数, r_{pj}^0 是 j 对 p 的抑制阈值,括号表示阈值作用,从数学上考虑为时间过程,即 $r_p(t)$,则上述方程组变为非线性递推方程。笔者在60年代对此做出过计算机模拟,从理论上研究过它的动态性质,发现在动态过程中侧抑制效应增强,还探讨了这类网络在图象处理中的作用和意义。

侧抑制网络的发现和数学模型的建立,有两个方面的意义:一是用一定的图形作为这一网络的输入,用侧抑制公式可计算出马赫带现象,尽管马赫带现象是一种较简单的视觉心理现象,但这是首次明确地说明,一种心理现象有可能以适当的方法和手段,从神经生理学加以阐明。这是神经心理学中的光辉范例。二是侧抑制神经网络的功能意义在于对图象进行处理时可达到突出边框增强轮廓的功效。从信号处理角度来看起到“空间微分”的作用,或更具体地说,相当于图象处理技术中的常用的DOG函数滤波(或Marr理论中 $\nabla^2 G * I = 0$)的作用。说明生物在长期进化中形成的功能和策略与人在高科技开发中发展起来的方法有异曲同工之妙。

侧抑制网络毕竟是一种结构固定的单层循环网络,不可能具备更复杂的功能,也不可能说明更高层次上脑的功能。下面要举的一个例子是认知水平上的一种抽象结构模型。根据神经元的一般性质,以及神经系统处理信息的一般特点,美国一批认知心理学家如鲁姆哈特(Rumelhart)、麦克莱兰(McClelland)、欣顿(Hinton)等人提出“平行分布式处理”(PDP)的认知微结构理论,试图用来构造感知、学习、记忆等脑的高级功能的模型。这一理论框架的提出基于下列假设:认知过程是由一个有层次的可变结构的网络系统产生的,网络由一组类似于神经元的基本信息单元构成,单元之间通过错综复

杂的联系实现信息交换。层间的联系按一定规则变化,从而实现学习和记忆。信息在这个系统中是平行处理的,信息的存储是分散于单元之间的联系上,相当于神经科学中认为的,记忆发生在神经元之间的突触联接点上。在这样一种理论框架之下,构造一些特殊的网络模型,可良好地模拟和再现认知过程中的一些现象,如词汇的认知规律,家谱亲缘关系的辨认,视觉中基本功能单元感受野结构的形成,等等。他们还设计出一些切实可行的算法,如反传算法(Back Propagation, BP),波尔兹曼学习机(Boltzman机),等等,具有学习功能,并已在模式识别、信号分析、机器人控制等工程技术,以及军事、商业、管理等领域有实际应用价值。PDP学派也是当代神经网络计算机的理论基础,又是新一代计算机重要的设计思想之一。

但是,从基础理论角度来看,PDP框架中的一些算法(如BP算法)虽有许多具体应用,可是它的生理学和心理学背景仍在进行探索和讨论。BP算法假设误差讯号从输出端反馈到中间联系层,至今缺乏足够的神经生理证据。再则,生理学和心理学研究表明,真实的学习和记忆过程在内容、类型、时程、机制、原理等方面的复杂程度远远超过PDP框架。近年来,学术界对此问题颇感兴趣,一些国际会议和专著多有论及。

与国际学术界研究非线性科学、复杂性系统的大趋势相呼应,神经科学的理论思维十分活跃。德国协同学的创始人哈肯主编的一套丛书,自30卷以后越来越多的篇幅放到感知觉、学习和记忆等问题上。日本东大教授清水博提出的全息视觉融合东西方文化的特点,对视觉识别过程提出符合生理心理过程的模型,经六七年发展,松下电器公司已制成相关的电子器件。1972年诺贝尔生理学 and 医学奖得主埃德尔曼(Edelman)提出神经集团选择理论,又称神经达尔文主义,引起人工智能界的极大重视。诸如此类的理论观点,在理论科学的领域内形成百花齐放,争奇斗艳的局面。它使人预感到,关于学习记忆、感知、思维(当今自然科学最后堡垒之一),正在酝酿着和将要有重大突破。

结 论

国际上在大力发展神经科学的研究,实验结果和新发现不断涌现,与此同时,理论思维也空前活跃。此种情景在某种程度上类似于本世纪初20~30年代物理学中实验与理论交相辉映,互相激励的局面。可以预见神经科学实验和理论的发展必将在哲学认识论、医疗保健、信息科学和计算机科学等方面产生重大的革命性影响。(责任编辑 蔡德诚)