

专论与综述

对大脑与思维关系的新认识

郭 爱 克

(中国科学院生物物理研究所, 北京)

提 要

人类大脑是已知宇宙中最复杂最完善最有效的信息处理系统。揭示脑的工作原理, 认识思维本质是人类面临的重大挑战。本文选择在脑研究中涉及到观念性转变的一些进展, 分别从理论、系统、网络、细胞和分子各个水平, 并从脑科学与人工智能、计算机科学的相互关联上, 阐述对于大脑与思维关系的新认识, 指出脑科学的进展需要新理论, 新观念, 新思想和新技术, 需要各个水平, 各个学科研究的共同奉献。

一、脑科学的任务

物质、生命、思维是人类认识自然和理解自身的三大科学任务。二十世纪以来, 人类对物质世界的认识发生了两次革命性变革。一次是在物理学领域。其标志是量子力学与相对论。使人们对原子的内部世界以及时间和空间的结构有了深刻的了解。著名物理学家魏尔 (Weyl) 在 1924 年写了“什么是物质”一书^[1]。

另一次变革是在生物学领域。其主要标志是分子生物学——研究生命的物质基础, 这是人类向什么是生命、能不能干预与创造新的生命这样一些根本性问题的进军。著名的理论物理学家, 波动力学理论的创始人薛定谔 (Erwin——Schrödinger) 在 1944 年写了“生命是什么?”那影响深远的书^[2]。

在信息时代里, 人类正面临着更为重大的科学堡垒, 揭示脑的工作原理, 认识思维的本质。这是信息时代的脑科学所肩负的崇高任务。这将是深刻揭示人类本质的科学探索。因此, 它的意义将是前两次变革所不能代替及不

可比拟的。我们深信, 将来一定会有人去写“思维是什么?”一书, 来回答什么是人类智能的本质。人类的大脑是已知宇宙中最复杂最完善和最有效的信息处理系统, 是生物进化的最高和最后产物。它具有极其非凡的性质。人类大脑的能力是一块可以永远无止境扩张的疆域, 同时也是一块永远有界线的疆域。

对于脑科学的目标, 怀疑也还是存在的。思维能最终理解思维吗? 脑能认识脑吗? 我们是否陷入了自我相关的悖论? 就仿佛说: “一个人能够依靠自己的力量, 把自己举起来吗? ”。但是, 著名物理学家, DNA 双螺旋结构的提出者之一, 克里克 (Crick)^[3] 对此作了肯定的回答。他认为, 关于脑的总体理论的建立, 有四条显著的约束条件: 第一, 物质世界的性质; 第二, 生物化学, 遗传学, 胚胎学的限制; 第三, 数学, 特别是信息论加上的限制; 第四, 脑是进化而来的。所有这些约束条件都不是超自然的, 是可以被认识的。

信息时代的脑科学有两个特点: 第一, 它包括了理论的、系统的、细胞的、分子的各个不同水平的研究。正如诺贝尔医学奖获得者威瑟

尔^[4] (Wiesel) 指出的,脑科学的真正进展依赖于上述各个水平研究的会聚。第二个特点是脑科学与人工智能及计算机科学的相互作用,也促进着人类对脑及思维认识的深化。下面,我想从各个水平,选择有代表性的新进展来阐明对大脑与思维关系的新认识。

二、细胞水平的脑研究

脑科学,首先是一门实验科学。所以脑首先是作为组织学与生理学的研究对象开始的。一个世纪以来,逐渐形成了一些重要观念和很有效的实验技术。其中最重要的是神经元学说及其联结成复杂网络并进行信息处理的思想 and 电生理及递质分析技术。在今天,人们单从神经生理学的观点来看待脑,并不觉得有任何超自然的困惑存在。虽然未知还极多,但从心理学的观点看,神经生理还难于解释脑的功能,甚至著名的神经生理学家也还得出“二元论”的结论。这自然成为脑科学关心的问题。由此激发各种新的思想和工作路线。其中之一就是选择视觉作为脑研究的一个突破口。构成了视觉—脑—思维的认识路线。人们常说,眼睛是心灵的窗口。这是有道理的:首先,从胚胎发育讲,视网膜是脑的外延,是脑的一部分。19世纪末20世纪初的西班牙神经解剖学家 S. R. Cajal 指出,视网膜也是神经中枢。第二,眼睛是大脑与外界信息交换的主要接口。大约有90%的外部世界的信息是通过眼睛进入人类大脑的。第三,图象识别,景物理解不仅是视觉功能的结果,也是大脑的学习与记忆,知识与体验等高级智能的表现。第四,视觉信息处理过程是一复杂的形象思维过程。形象思维被看作是思维科学的一个突破口。所以,近年来,视觉的脑机制研究成为较发展的领域。神经生理学家休伯尔 (Hubel) 和威瑟尔 (Wiesel)^[5] 开拓了视觉的脑机制研究,并且20年来一直在引导这一研究领域的发展,从而使视皮层成为皮层区域被了解得较为清楚的一个区域。他们因此获1981年诺贝尔医学奖。他们认为,视觉系统

在处理图像信息时,采用的一种基本方式是通过不同形式的感受野逐级进行抽提,即在每一水平抛弃一些不太重要的信息,抽提更为有用的信息。在视网膜中,中心一周边拮抗的感受野组织方式就意味着抛弃了背景信息,而抽提了明、暗对比的信息。这种信息的抽提在视皮层继续进行。外膝体细胞的感受野仍为中心一周边拮抗的构形。但是,视皮层细胞的感受野通常不再具有这种形式,而对特异朝向的线段有最佳反应。按其感受野的复杂程度可分为简单、复杂和超复杂细胞。

近年来,还发现对复杂图形选择的神经元。大脑皮层某些特殊区域的一些神经元,对视觉刺激有高度特异性。这些区域包括下颞皮层^[6],外额叶皮层^[7]和颞上沟底^[8]。根据 Bruce 等^[8]的报道,在颞上沟底的多种感觉区有些细胞对头的形状敏感,有些对头的形状敏感,特别是有少数细胞选择性地对脸型有反应。他们证明这些细胞的反应(见图1)有如下特点。

(1) 不同人、猴的面部或面部照片和幻灯片都引起细胞冲动的最大发放;(2) 反应与图的大小,彩色的还是黑白的、静止的还是运动着的以及在视野中的位置都无关;(3) 将照片上的眼睛盖住,反应减弱但并不完全消失;(4) 将照片剪碎,再杂乱地拼在一起,细胞就不再有反应。上述结果说明,这些细胞对整个面部而不是对脸的某一特征反应。对此一种解释是,这些细胞的功能得到了高度特化,变为特定图形的检测器;另一种解释是,这些细胞处于某特化的网络的某一环节上,其反应反映了网络某环节的活性。视觉图象识别的特征检测理论似乎达到完美的程度。许多人觉得,高级知觉活动的神经元特征研究已经建立了基础。

近年来,Hubel 和 Wiesel 的理论与实验也遭到了一些批评,也出现一些反例。有人认为,这是长期以来,试图用还原论解释心理过程的最新尝试。Hubel 和 Wiesel 理论的局限性来源于认识论与方法论两个方面。他们主要采用微电极单细胞记录的方法,记录到的是细胞反应。他们忽视了脑系统的非线性及神经元网

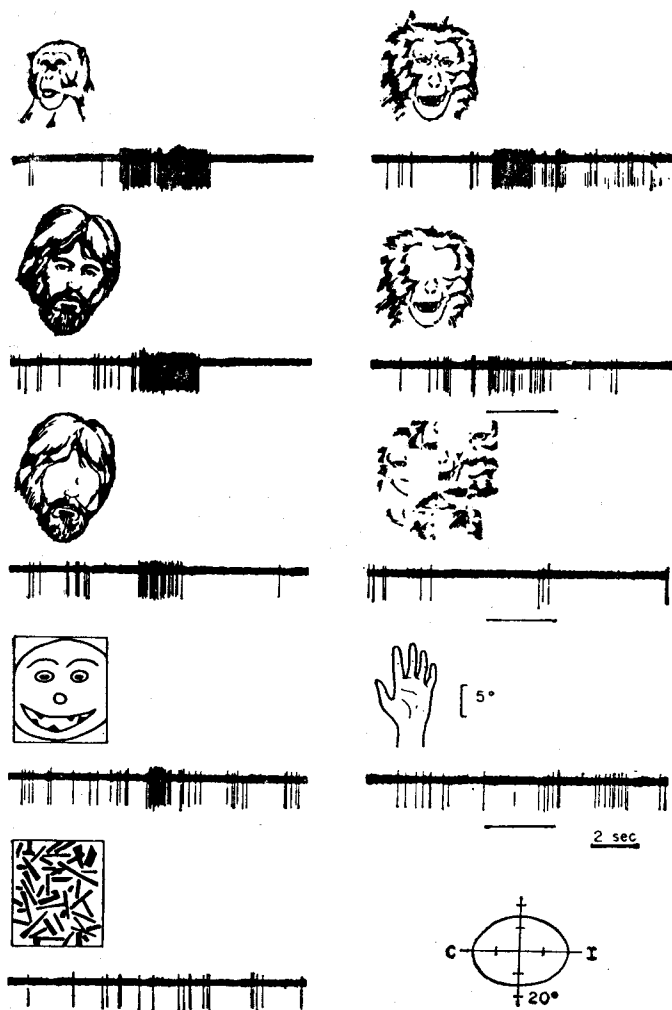


图1 在颞上沟底的少数细胞对脸形具有选择性反应。不同的人、猴的面部照片和幻灯片都引起细胞冲动的最大发放;将眼睛盖住,反应减弱但并不消失;将照片换成漫画,反应减弱,但不消失;对随机线段图,反应消失;将猴脸的照片剪碎,再杂乱地拼在一起,反应消失;对手形也不敏感。引自[8]

络的集团性质。神经生理学家伊藤正男 (Massalto)^[9] 在这样的历史时刻,对神经生理学在脑科学研究中的可能性及局限性进行了深刻的分析,提出了“神经生理学家向何处去?”的严肃问题。他指出,随着神经生理学的深入,中心议题正在发生转移。……八十年代是解决局部神经元网络组装成大规模神经网络系统,以理解更高层次复杂功能的时代。例如认知,运动控制,情感,觉醒,睡眠,注意,记忆,意识,语言等问题。所有这些问题都是必需在系统水平进行探讨,不能指望仅仅在还原论的基础上就能理解它们。我们对于思维本质的认识不

能只靠对构成脑的基本单元的不断微观化来得到。客观世界并非其组成单元的简单集合,它是由不同性质的基本单元相互作用构成不同层次的复杂世界。因此,还必须对各单元在时间空间中相互作用构成的整体进行研究。所以,当前在脑研究中是要引入新技术及与理论家合作,来开创一个通向理解与认识脑的工作原理的新时代。于是,一种新的视觉计算理论便应运而生。

三、计算的脑科学

视觉计算理论是马尔 (Marr)^[10] 开创的。

其基本出发点是直接研究视觉的信息处理问题。由此得出一套符号系统，而视觉所完成的正是这些符号的运算。在 Marr 学术思想的带动下，科学家们正在开创计算的脑科学。

Marr 的视觉信息的计算理论主要包括视觉信息处理的三个描述水平和视觉计算理论的三级表象结构。目的是要阐明怎样从图像中提取三维物体的形状信息，识别三维几何形状。视觉信息处理的三个描述水平是：

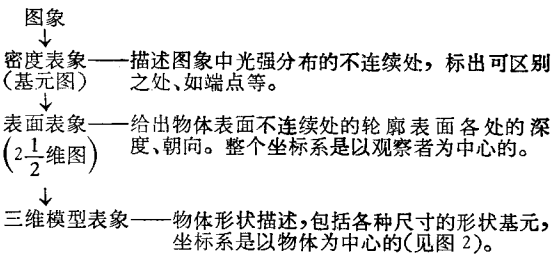
(1) 计算理论 (computational theory)——主要解决做什么和为什么的问题。按照信息处理由什么开始，期望得到什么结果，把所要解决的问题公式化，提出条件和假设；

(2) 算法 (algorithm)——解决如何做的问题，在理论所限定的范围内，用以解决特定问题的抽象解法或程序。所以，算法是指如何对输入进行操作而得出期望得到的输出表象。

(3) 硬件 (hardware)——指完成某一特殊算法的物理实体或“硬件”。它是由一些最基本的单元构成的。

在上述三个水平中，计算理论最为重要。这正是脑科学与计算机科学及人工智能联系最为紧密的层次。

三级表象结构指密度表象、表面表象和三维模型表象。密度表象是整个信息处理过程中的第一级，它从视网膜上二维图象开始。这三级表象可以表达为：



Marr 的整个视觉识别理论是建立在三级表象结构之上的。他的“功能块” (modules) 概念也与传统概念不同。他的理论在立体视觉及其它视觉初级过程的研究中取得了进展。整个识别过程是可计算的，并置于严格的分析推理上。有人认为，Marr 第一次把复杂的视觉信

息处理过程，象物理和力学一样，置于严密的数学基础上，利用约束条件，以正则化技术求解。因此，它是视觉研究中的一个里程碑。

近年来，Marr 的同事 Poggio 在计算理论上有所发展。Poggio 认为视觉识别过程是一个与光学成像相反的逆过程。就是人(或机器)在视网膜(或摄象底片)上接受到景物的二维图象后，整个视觉的任务就是要根据二维图象恢复景物的三维形象。但是，从数学上来说，从二维图象到三维形象的逆变换是一种“提得不好的问题”(ill-posed Problem)。因为，这类问题或无解，或有许多解，或对噪声干扰十分敏感。为了处理这类提得不好的问题，必须引入适当的



图 2 用几根棒条构成的动物图形

形状识别由两个过程组成：一是由图象建立三维模型表象，二是把它与人脑中预先储存的物体表象匹配起来。用来描述动物形状的表象非常简单，仅仅是几根棒条而已，但它们之间的空间关系构成了三维形状描述。引自Marr^[10]

先验知识，这些知识是物体的物理性质所决定的，在数学上可称为约束条件，因而可以把问题搞准确了，这就是正则化过程。Poggio 就是用这一方法把视觉的初级信息处理阶段的各个方法，用同一理论框架把它们统一起来。

最近，美国脑科学家 V. B. Mountcastle^[11]指出，探讨认知功能的神经机理的研究已经可以直接进行了。他列举的三个根据之一就是 Marr 等的工作。

但是，Marr 的理论究竟能走多远？计算

理论是否完全正确,视觉信息加工问题是否一定可以计算?这都是值得探讨的问题。Marr的工作还仅限于初级视觉过程,所以计算理论还不适于描述大脑的思维活动。

四、网络水平的脑科学

脑的特征检测理论认为,事物在大脑中是以神经元来表征的。如外祖母神经元(grandmother neurons)只有在人们看到自己的外祖母时才会发放(fire)。但是,事物、概念不可能由单个神经元来表征。人类大脑的神经元数目为100亿左右,相当于银河系的星星数。但是,这个数字还是有限的,我们要处理的信息、形成的概念,思考的问题几乎是无限的,它们以神经元集合及其状态来表征就会经济许多。如果由 10^{10} 个神经元构成每5个神经元的集合,包括各种重叠,就会有 10^{48} 个可能性^[12]。从这样的角度,我们才可能理解概念的联想、概念的创造及有时有概念的混淆。

关于神经元集合及细胞群的概念可以追溯到Hebb^[13]。到了1982年,Hopfield^[14,15]模拟神经元之间的相互作用,提出了一个阈值自动机网络。这标志着研究局部神经网络如何装配成具有高级功能(如思维、运动控制、动机和记忆)的大规模神经网络系统的新时期已经开始了。Hopfield的阈值自动机网络显示了集体运算性质(collective computational properties),其中包括联想记忆性质,即按内容寻址性质(content-addressable)。Hopfield的原初模型采用了两个双态的阈值神经元(two-state threshold “neurons”)及随机算法(stochastic algorithm)。模型的神经元*i*具有两个状态,该神经元输出 V_i 取值 V_i^0 或 V_i^1 。每个神经元的输入有两个来源,外输入 I_i 和来自别的神经元的输入 V 。这样,神经元*i*接收的全部输入为:

$$H_i = \sum_{j \neq i} T_{ij} V_j + I_i$$

T_{ij} 可看作是神经元*j*对神经元*i*的突触联系程度。联想记忆性质和其它有用的计算性质就

孕育在系统状态随时间而变化之中。由*N*个神经元构成的系统状态在状态空间的运动就描述着该神经元集合所能执行的计算。Hopfield模型描述了状态的随机演化过程(stochastic evolution)。每个神经元都在随机时刻对它的输入进行抽样。根据阈值原理,神经元改变它的输出值或保持不变: (U_i 为阈值)

$$V_i \rightarrow V_i^0 \text{ 若 } \sum_{j \neq i} T_{ij} V_j + I_i < U_i$$

$$\rightarrow V_i^1 \text{ 若 } \sum_{j \neq i} T_{ij} V_j + I_i > U_i$$

我们可将在状态空间中特定的稳定点位置想像为某系统记忆的信息,那么靠近这个特定点的状态就含有被记忆的部分信息。从关于记忆的部分信息,最终可以找到记忆的全部信息。

Hopfield网络提出之后,美国麻省理工学院的计算机视觉科学家们立刻敏感地引入到视觉初级过程的研究中,提出了视觉初级过程的“模拟神经元”网络模型^[16,17]。

美国的一些光学相位共轭专家采用“时间反演”光技术^[18],实现了Hopfield的联想记忆网络功能。它的基本思想是一种数学算法,将一给定的数据串与存储器中的数据串进行比较,产生新的数据串,然后再重复之。这种比较、选择、反馈不断反复进行,直到输入与输出收敛为止。采用一张通常的固定全息图来存储记忆信息。用相位共轭提供必要的图像反馈。这种以平行方式进行图像处理很像我们的大脑(见图3)。在图3给出的联想存储器能识别有共同特点的两个图形。在一个全息胶片上分别拍出方形、三角形,圆形的全息图。并将其置于两个位相共轭镜之间。要加以分类的图像(此处为一个有缺陷的正方形)被半反射镜反射到全息图上。每当来自图像的光线与来自存储的全息图的光线相一致时,便产生强的输出光线(粗线);如果不相一致,输出就弱(中等粗线和细线)。强输出光线和中强输出光线受到右方的位相共轭镜的共轭反射。但弱输出光线的能量不足以引起位相共轭现象发生,因而直接穿过位相共轭镜。在强光和中强光被左方位相共

镜作了第二次位相共轭处理后,上述过程又重复进行。这样一次又一次地重复,便产生了方形输出。换句话说,该系统按“内容寻址”方式认出了输入的图象是一个有缺陷的正方形,而不是有缺陷的圆或三角形。

美国科学家根据 Hopfield 模型,已经研制成功两种不同的集成线路^[19]。

我国王宝翰^[20]最近在 Hopfield 模型基础上,引进胶质细胞的作用,提出了“复合神经元”的新概念,从而提出了新的可以学习记忆的神

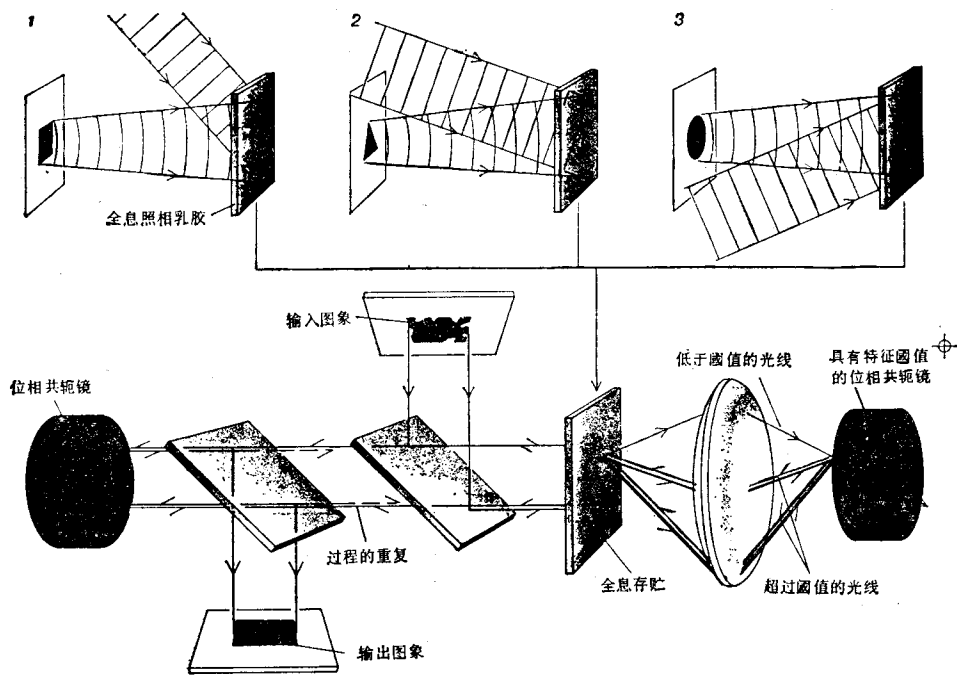


图 3 采用相位共轭技术实现“联想记忆”

经网络自动机设想。

人们从 Hopfield 模型中似乎看到了“思维”在这些“硬件”中流动。

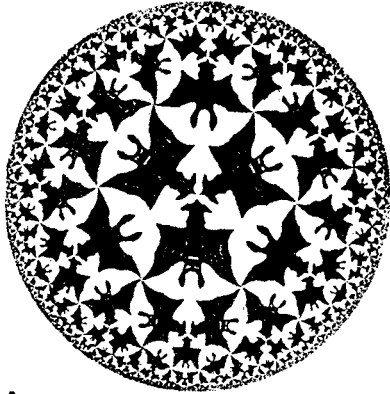
对于 Hopfield 工作可能引发的新结果,应十分重视。人之所以能有效地识别图象,可能是因为人脑具有集体计算能力。有人预言,未来的智能机一定是一个由许许多多处理器组成的系统,在这个系统中不再按顺序执行指令和查找信息,而是并行处理,按内容寻址,最大限度地利用各处理器,各存贮器的集体效应。

五、时间、混沌与思维

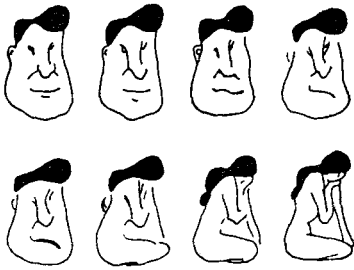
物理学一直是自然科学的基础,这是因为所有自然科学研究的对象都是物质的运动,而物理学研究的是物质运动的最基本形式。近年

来,由于耗散结构理论^[21]、协同学^[22,23]、突变论^[24](人称“新三论”)的接连问世,以及混沌理论^[25]的发展都对大脑与思维的研究发生日益深刻的作用。图 4 仅举一例来说明协同学的模式识别及模式形成中的应用。图 4 引自 Haken^[23]。图 4A 叫做“天使”或“恶魔”,图 4B 叫做“脸形与少女”。初看 A 时,这不过是被圆圈包围着的黑白斑块;细看时,若假定黑色斑块为前景,则感知到的是一个带翅膀的大小大小不等的黑色“恶魔”;反之,若白色斑块作为前景,则感知的是大小不一的白衣“天使”。这种在“天使”与“恶魔”之间的二择一,在“协同学”中叫对称破缺;在图 4B 中,当视线从左向右移动,我们会发现在某一时刻一个长者的脸型跃迁为一个少女;从右向左反过来,在另一时刻,少女又变回为脸型。在两个方向上发生跃迁的时刻是不一

样的。这种模式识别中的现象在协同学中叫滞后。无论模式形成中的“对称破缺”，还是模式识别中的“滞后”，都是大脑在感知过程中的时间结构与不确定性的反映。



A



B

图4 “对称破缺”与“滞后”

目前，正在形成以物理学语言描述的，以“新三论”为指导的，以建立思维的 dynamics 为目标的脑科学。以期在思维的本质问题上，驱逐与摒弃超物质超自然的神秘力量(如上帝，神灵等)，形成脑的原理及思维本质的新物理学观。

人类大脑是已知最为复杂的动力学系统，或者说是最远离平衡点的耗散结构。宇宙与进化在创造它的过程中，使它进入了最复杂的非线性动力学系统。这样的多维系统存在奇异性的吸引子，具有混沌态等，是可期望的。

从实验证据看，思考着的人的脑电图波形表现为混沌，而癫痫病人的脑电图表现为周期性。用以表征混沌程度的维数也与思考的紧张程度有关。虽然还不能得出思维就是混沌态，思维就是分维，但是前景是诱人的。这使我想起了薛定谔的“什么是生命？”一书的思想。在

探讨生命与非生命的界线时，他提出了非周期性晶体结构的思想。这既区别于当时生物学中早期的非物质的基因与性状等概念，又区别于物理学中熟知的非生命体系中大量存在的周期性晶体结构，从而给出了大分子的最不平凡的存在形式。如果把周期性晶体结构比作美丽的图案，那么非周期性晶体结构就是艺术大师的作品了。

从思维的特点看，它的不确定性，它对初始条件的敏感性，它在形成过程中“乱七八糟”性(即随机性)，它的“乱中有治”性(即微观的混浊性和宏观的规则性)，它的创造性等，都表明它与“时间”的本质相联系。普利高金 (Prigogine) 认为时间是有层次的：一是与动力学过程联系的时间，在此层次上时间是可逆的，只是系统运动的外界几何参量；二是与热力学(熵)有关的时间，在此层次上时间与不可逆过程有关；三是与生物进化有关的时间，它与“历史”相关，与事物由简单到复杂的发展方向有关。普利高金认为我们正从“存在的物理学”走向“进化物理学”。事实可能是物理学的这种进步，才使它有希望给出思维的物理观。

将物理学的动力学观点引入脑科学是一个正在热起来的“热点”。现在世界上有成千上万名学者热衷于混沌理论。人们期望对混沌理论的探讨有助于揭示神经元的简单反应与令人捉摸不透的大脑思维的联系。在这方面，徐京华^[26]的工作是突出的。他对 E-C 大规模神经网络模型进行了改造。原有模型在考虑了神经元的兴奋性抑制性，阈值和突触联结的平均强度(相关几率)等生物学制约并做适当简化后，这个模型最后所表现的形式是一个两变量的常微分方程组，从数学上可以证明存在不动点和极限环，但不出现混沌。单从数学(或物理学)的考虑出发，改进方程的途径是多方面的。如增加方程的独立变量数目等。但从生物学背景考虑，徐京华引进了胶质细胞的作用。胶质细胞的作用使整个神经元网络的动力学行为发生了质的变化，从非混沌进入混沌，而与脑电图的表现极为相似。徐京华指出，脑的信息处理方式可能是

在混沌中进行的。在混沌中,有的部位脑系统的李氏指数大于零,那里就会散发出大量的轨线,一个微小的变化就会产生差之毫厘失之千里的现象,这可以看成是个信息源;而有的地方李氏指数小于零,那里有大量轨线被压缩到很小的区域,可以看成是信息汇。思维活动可以看成是轨线在源与汇之间的运动,这样就构成了申农信息论中的“通道”与“处理过程”。从这一观点出发,也许有可能理解和重新认识胶质细胞在脑的工作中的作用,从而改变其“灰姑娘”的地位。

看来,从脑系统的物质观→脑系统的动力学行为→脑系统应是远离平衡点的开放系统→脑系统是远离平衡点的存在混沌运动的开放系统→这样的动力学系统在脑中应考虑胶质细胞的作用与地位,这确是一条不容忽视的探索脑与思维关系的认识路线。

六、分子水平的脑科学

近年来,分子生物学研究正以崭新的面貌进入脑科学的主流。在1984年冷泉港讨论会上,报告了数十种神经肽递质,到了1986年10月,已经报道了百余种神经肽递质^[27]。脑科学家们正从分子水平上探讨脑的信息处理过程。

我们仅以Kandel的工作为例介绍分子水平的脑科学^[28,29]。他试图建立系统-细胞-分子的大统一的学习与记忆理论。他们以海兔(*Aplysia californica*)作模型系统。海兔仅有1—10万个神经元,分布在几个神经节。他认为,人脑的神经元数目巨大,相互关系复杂,试图搞清楚每一个联结的细节是不可能的。就如同阻断尼亚格拉瀑布(Niagara Falls)去计算水的分子个数。Kandel实验室对海兔的缩鳃反应进行了深入的研究。海兔的外套腔里有鳃,鳃上盖一保护层,叫套架(mantle shalf),套架的终端是一个多肉质的水管(siphon)。轻触水管或套架,水管、套架和鳃都会收缩而退入外套腔中。这是海兔的一种防御性回避反应,称为缩鳃反应。这种缩鳃反应可以因为连续多次

轻触水管皮肤或套架而渐渐减弱,呈现习惯化的学习现象;也可以在习惯化后因为强电震刺激动物的尾部,再轻触水管或套架而加强,呈现敏感化的学习现象。如果给水管一个弱刺激后,立即给尾部强电震刺激,这样几次结合以后,单独给予水管弱刺激就可以引起强烈的缩鳃反应(比单独电击尾部的反应还强),表明形成了条件反射,一种联想性学习(associative learning)。Kandel实验室证明,缩鳃反应敏感化的关键变化发生在感觉神经元的突触处,敏感化是感觉神经元末梢处发生突触前易化作用的结果。他们在海兔的腹神经节中找到一小群电突触联系的神经元(L_{29}),它们的轴突末梢与感觉神经元的神经末梢形成突触。当动物的尾部受电击时, L_{29} 被激活,感觉神经元的轴突释放递质的量子数增加。单独刺激 L_{29} 中的一个细胞,也可引起感觉神经元的递质释放增加。如果将神经节浸在 10^{-4} mol/L的5-羟色胺溶液5分钟,感觉神经元产生突触前易化作用,内含的环-磷酸腺苷量增加,而其他递质不能引起这种现象。当采用阻断膜上钙通道或钾通道的方法检测时,发现5-羟色胺或环-磷酸腺苷可以阻断膜上的一种特殊钾通道,而使钙的内流增加。因此,联想性学习过程可能的分子事件如下(见图5)。

1. 正常刺激肉质喷水管时,引起感觉神经元兴奋,冲动到达神经元末梢,引起 Na^+ 内流,随后 Ca^{++} 内流。 Ca^{++} 的多寡决定递质释放的量子数,而递质量又决定了运动神经元的兴奋程度;

2. 强烈电震刺激海兔尾部,冲动经中间神经元传至感觉神经元的轴突末梢,并释放兴奋性递质5-羟色胺,作用于突触后的5-羟色胺受体,并激活腺苷酸环化酶;

3. 产生第二信使环化腺苷酸cAMP;

4. cAMP活化蛋白激酶,启动蛋白磷酸化系统;

5. 磷酸蛋白激酶使膜上 K^+ 通道蛋白质磷酸化而改变构型,导致钾通道关闭,复极化延迟;

6. Ca^{++} 内流增加,递质释放量增多。敏感化过程建立;
7. 当再次轻触水管时,就会引起比单独电击还强的缩鳃反应。

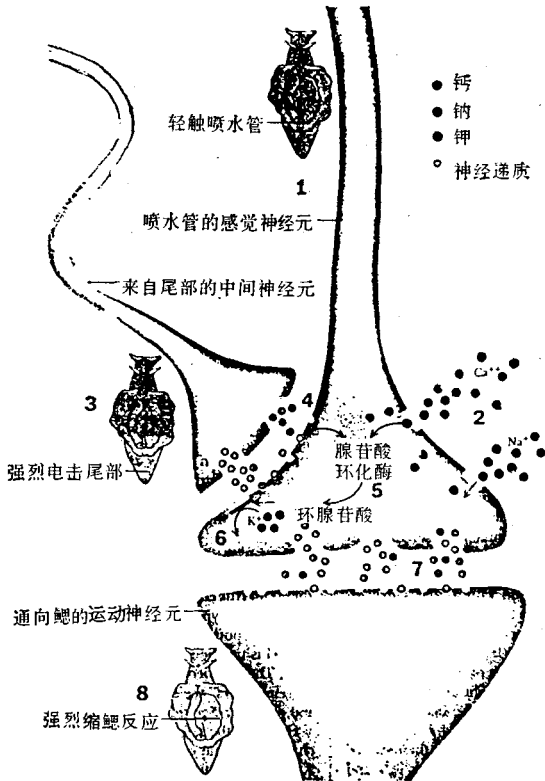


图5 海兔联想式学习与记忆的分子机制

当前, Kandel^[29] 实验室正在跟踪学习的信息如何从膜受体流向基因组, 引起基因表达的变化(见图6)。模型中的细胞外信号, 由调制神经元(MOD)释放的递质, 作用于突触前神经元并引发具有不同时间程的记忆过程。短程记忆(时程为几分钟到一小时, 通路1), 包含前蛋白的共价修饰。细胞质部分的信号为: 膜受体, 转移蛋白, 腺苷酸环化酶, 磷酸激酶C, cAMP, Ca^{2+} , 二酰基甘油以及用于修饰靶蛋白的蛋白激酶(激酶A, B或C)。这些调制过程的时间就确定了记忆的保留时间; 通过类似的共价修饰, 短程记忆可以延长至几小时, 这是自我强化(self-reinforcing), 如蛋白激酶自动催化的磷酸化过程(见通路2); 长程记忆是保持一天以上

的记忆(见通路3与4)。这与诱导新蛋白有关(■和▲)。这种诱导过程由第二信使启动, 并修饰转录作用因子(从□到○), 激活早期作用因子和早期调节基因。保持一天的记忆是由早期作用因子基因的相应蛋白的半衰期决定的。保持更为长久(周, 月)记忆是由晚期作用因子基因(late effector genes)的持续表达来实现的。他们的工作使我们确信, 学习与记忆理论的最后完成是分子水平的工作。Kandel 的工作将细胞之间的信息传递与细胞内的生物化学过程联系起来。相当一个时期, 电生理与脑化学的研究是相互分离的。递质曾被一般地看成两个

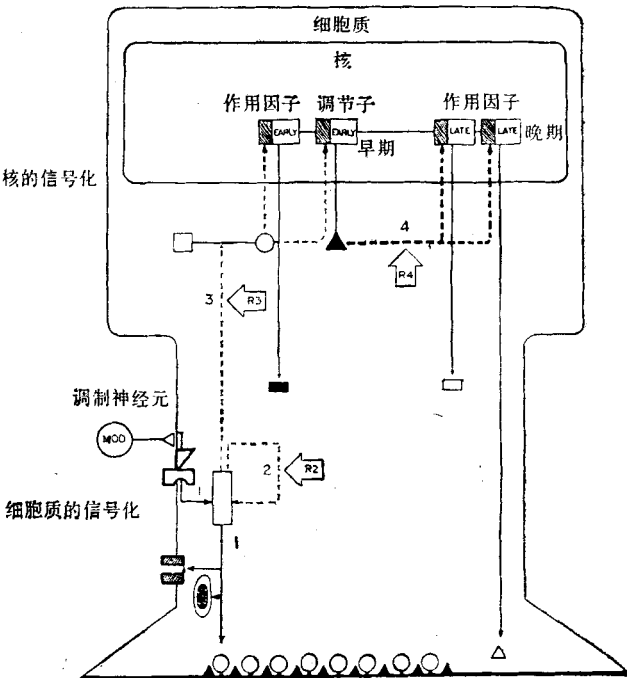


图6 记忆的系统与信号模型

电现象之间的“掇客”。现在看来, 它可能具有更广泛的意义, 即改变整个网络性能的作用。在神经细胞间相互识别并形成网络时, 其网络性能与细胞中特异的标识物质及识别这种物质的分子机制有关。神经细胞之间的信息传递除了靠过去人们知道的乙酰胆碱等神经递质以外, 还靠多种神经肽。所以, 脑“硬件”与现有电子硬件的差别不仅在于神经元联合方式的多样性与复杂性上, 也许更在于化学环路参与并

导致的电-化环路相互作用,互相嵌合的动力学中,这是应特别引起重视的。

七、脑科学与人工智能

目前,脑科学与人工智能科学之间的相互作用与协同发展正在加强^[30]。这种作用是双向的。一方面,人工智能与计算的研究可以指导与设计脑科学中的实验并用来解释实验结果。另一方面,在人工智能研究的若干领域,如机器视觉(machine vision),机器人学(robotics),平行结构(parallel architecture)等可根据脑科学提供的数据与思想来构造人造系统(artificial system)。我们各举一例。首先从脑科学到人工智能:用零交叉实现的边界检测(edge detection using zero-crossing)。这里计算机视觉中采用的方案来源于脑科学的研究结果。计算机视觉领域中的一个重要问题是如何获取输入图象的原始结构及表征,如何将视觉图像转换成为一些原始符号构成的描述,以利于进一步加工。图象的边缘表征(edge representation)就是一种有希望的符号描述,表示图象中光强从一个水平向另一个水平发生明显变化的部位(见图

7)。这是一个十分困难的问题。但是,脑科学研究提供了非常好的处理方式。网膜神经节细胞具有“中心-周边”拮抗型感受野^[31]。它通常用两个空间常数不同的高斯函数描述,其中之一兴奋,另一个抑制。概括地说,对于给定的分辨率,图象光强变化可以由“中心-周边”型滤波器对图象滤波。这表明脑科学的研究结果给计算机视觉及人工智能提供了设计思想。

下面的例子是从人工智能到脑科学:运动测量的综合(integrating motion measurements)为例。这里人工智能与计算研究能够帮助脑科学进行实验设计及结果解释。运动感知实际上是测量图象中的边缘和轮廓的运动。由于“孔径问题”(aperture problem)使运动检测不能从局部测量中得出。为了实现运动检测,需将全部测量结果综合起来。这个问题在人工智能研究中较为成熟。Hidreth^[31]提出了一种算法,运动知觉有二步,第一步为局部速度场测量,第二步为局部测量的综合。Movson, et al.^[32]在恒河猴的MT区记录到这种“综合单元”(‘integration units’)。采用的视觉刺激为两个不同朝向的光栅构成的图形。这个单元仅对整个图形的运动反应,而对光栅的朝向不反应。



图7 从图象 A 到滤波后的模式 B

当然,脑科学与人工智能的相互作用和协同发展绝不限于视觉领域。其中如运动控制及平行分布网络就是非常有前景的领域。

在脑科学与计算机科学之间的相互作用及协同发展也是必然的。这涉及到脑理论与计算机科学理论的大问题。因为它涉及到确定性计算(通常认为这是计算机的特点)和非确定性计算(通常认为这是人类智能的特点)的异同问题。

早期的人工智能学者普遍有一种盲目的乐观情绪,认为计算机可以模拟人类智能行为,或至少可以使计算机具有某种形式的智能行为,今天看这是一种错觉。因为智能并不是现代计算理论中所说的计算,更确切地说,智能行为无法用元计算机科学能接受的方式表述为一个可计算的问题类。

结 束 语

若实现脑科学的艰巨任务,人类还必须走过一个漫长的路程。像哥白尼、达尔文那样的发现,像沃森-克里克那样的突破尚未到来。我们也不知道,在脑科学中是否存在着那样的发现与突破。在脑科学的道路上,也会有一种倾向掩盖另一种倾向,一种理论掩盖另一种理论,一种现象掩盖另一种现象,一个学派掩盖另一个学派,一个层次的研究掩盖另一个层次的情况。但是,我们确信,谬误与超自然观念将会不断排除,人类将不断地接近认识脑与思维的本质。

脑科学需要新理论,新思想,新观念,新技术,并需要各个水平各个学科研究的共同奉献。

参 考 文 献

- [1] Weyl.: *GA*, II, 510, 1924.
- [2] Schrödinger, E.: *What is life*, 1944.

- [3] Crick, F. G.: *Scientific American*, 241(3), 219, 1979.
- [4] Wiesel, T. N. et al.: *Trends in NeuroSciences*, 9(10), 509, 1986.
- [5] Hubel, D. H. et al.: *Scientific American*, 241(3), 150, 1979.
- [6] Errett, D. I. et al.: *Neurosci Lett Supp*, 12, 240, 1979.
- [7] Pigarev, I. N. et al.: *Neurosci Lett*, 12, 207, 1979.
- [8] Bruce, C. et al.: *J. Neurophysiol*, 46, 369, 1981.
- [9] Massa, Ito.: *News in Physiological Sciences*, 1, 30, February 1986.
- [10] Marr, D.: *Vision*, San Francisco, CA: Freeman, 1982.
- [11] Mountcastle, V. B.: *Trends in NeuroSciences*, 9(10), 505, 1986.
- [12] Palm, G.: *Neural Assemblies*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1982.
- [13] Hebb, D. O.: *The organization of behavioural*, John Wiley, New York, 1949.
- [14] Hopfield, J. J.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 79, 2554, 1982.
- [15] Hopfield, J. J.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 81, 3088, 1984.
- [16] Poggio, T. et al.: *Nature*, 317, 314, 1985.
- [17] Koch, C.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 83, 4263, 1986.
- [18] David, M.: «科学» (*Scientific American*), 5, 28, 1985.
- [19] Horgan.: *IEEE Spectrum February*, 1986.
- [20] 王宝翰等:《第五届全国生物物理学术会议论文摘要汇编》, 109, 1986.
- [21] Prigogine, I.: *Proceedings of the first international conference on theoretical physics and biology*, 1969.
- [22] Haken, H.: *Synergetics: An introduction*, Berlin, Springer, 1977.
- [23] Haken, H.: *Pattern formation by dynamic system and pattern recognition*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1979.
- [24] Thom, R.: *Synergetics* (ed. by H. Haken, Springer-Verlag), Berlin, 25, 1977.
- [25] Feigenbaum, M. J.: *J. Stat. Phys.*, 19, 25, 1978.
- [26] 徐京华:《百科知识》, 1, 68, 1987.
- [27] Eipper, B. A., *Trends in NeuroSciences*, 9(10), 463, 1986.
- [28] Stephen, S. H.: *Science*, 31, May, 1985.
- [29] Goelet, P. et al.: *Trends in NeuroSciences*, 9(10), 492, 1986.
- [30] Ullman, S.: *Trends in NeuroSciences*, 9(10), 531, 1986.
- [31] Ullman, S. et al.: *Physical and biological processing of images* (ed. by Braddick, O. J. & Sleigh, A. C.), Springer Verlag, 154, 1983.
- [32] Movson, J. A. et al.: *Pattern recognition mechanisms* (ed. by Chagas, G., Gattar, R., and Gross, C. G.) Vatican Press, 117—151, 1984.

[本文于1987年1月20日收到]