

观点,一种认为视觉系统的结构和功能是由遗传密码决定的,是先天的,另外一种认为是后天的,可以改变的。两种观点各有一定的实验依据。例如有人把小猫出生后刚睁开眼时把一只眼的上下眼睑缝起来,只能用另一只看东西,过几星期后记录它的视皮层上细胞的反应,发现几乎所有的细胞都仅对另一眼来的刺激有反应。如果几周后又把缝上的眼剪开,同时把另一只眼缝上,几周后再做实验,记录到的细胞又变成仅对先缝后打开的眼的刺激有反应。如果小猫生下来后放在特殊的环境中饲养,让它只能看到单一的视觉图形(如只能看到水平条纹),几周后对猫皮层单细胞研究,证明它只对水平条纹敏感。这些以及其他大量资料令人信服地证明,视觉系统,特别是个体发育的早期,具有很大的可塑性。这种可塑性是动物适应外界环境的神经基础,也是前述特征检测器的形成基础。

从神经生理的角度看来,可以把记忆(信息贮存)考虑为脑胚胎发育的能力在成年动物身上的继续延伸,是神经网络的部分修改,这种修改是按个体最常用的方式在某一点或某些方向进行的。幼年动物视系可塑性实验表明,神经网络的突触联系可在一定条件下改变和恢复。

学习过程就是接通新的神经联系的过程。这种突触选择机制在动物早期生活中起作用,在成年个体仍部分地保存,但在整个生命过程中这种能力越来越弱。总之,视觉过程的研究是脑功能研究的一部分。视觉图形识别的研究不与学习和记忆问题联系起来,是很难深入下去的。

## 参 考 文 献

- [1] 汪云九:生物化学与生物物理学报,1978年第10卷,第1期,第1页。
- [2] 汪云九:生物化学与生物物理学报,1979年第11卷,第1期,第1页。
- [3] Rodieck R. W.: *Vision Res.*, 5, 583, 1965.
- [4] 安田稔、樋渡清二:电子通信学会论文志,53-c, 823, 1970.
- [5] Zorkoczy P. I.: *Computers in Biology and Medicine*, 1, 97, 1970.
- [6] Herscher M. B. et al.: *IEEE-MIL-7*(2-3), 98, 1963.
- [7] Runge R. G. et al.: *IEEE-BME-15*(3), 138, 1968.
- [8] Zeevi Y. Y. et al.: *Signal Analysis and Pattern Recognition in Biological Engineering*, p. 261, 1975.
- [9] Barlow H. B. et al.: *Science*, 177, 4049, p. 567, 1972.
- [10] Grose E. E.: *Methodologies of Pattern Recognition*, 1969.
- [11] Caianiello E. R.: *New Concepts and technologies in parallel information processing*, 1975.

[本文于1978年11月20日收到]

# 神经元和神经网络的模拟

金 贵 昌

(中国科学院生物物理研究所)

## 前 言

在科学研究中,构造模型是解释自然现象和探索自然规律的一种间接但有效的方法。所谓模型是指与所模拟之物功能相似,但其结构和来源不同。神经模拟总是伴随着实验神经生理学的实验设计、测量、描述和解释而产生,对神经生理学家来说,神经模拟的目的是:一、对提出的假说作初步检验;二、把不同的生理资

料进行概括和统一;三、引导设计新的生理实验。随着对神经系统信息加工研究的日益重视,理论研究就增长了重要性。理论神经生理学家应用各种各样的工具和技术来研究膜,逼真地模拟单个神经细胞以及神经网络的作用。有些问题只用目前的实验技术是不能完全解决的,在这种情况下,模型成为生理实验的补充。从目前神经模拟所获得的进展可以预料,神经模拟在神经生理学研究中将日益增加其影响。

人们应从历史唯物的观点来正确评价历史上出现的各种神经模型, 尽管目前看来这些模型多么简单, 甚至有谬误之处, 但它们的历史价值是不能怀疑的。人类对自然界客观规律的认识由简单到复杂, 由低级到高级, 不断深入和发展, 作为组成连续链条中的一环, 任何一种模型在历史上都是起了一定的作用的。

本文就神经模拟的有关资料作一综述。

## 一、神经元的结构和功能

神经元是神经系统基本的结构和机能单位。它由细胞体、树突和轴突构成。神经元的种类是多种多样的。从形态上分, 按胞突的数目可分为假单极、双极及多极神经元三大类。神经元的机能也是多种多样的, 根据机能归纳起来也可分为三大类: (1) 感觉神经元, 其树突的末端分布于身体的外周部, 成为各种感受器感应各种刺激的细胞, 有的并传导冲动到达中枢神经系统。假单极神经元属于这种类型。(2) 运动神经元, 其轴突到达肌细胞及腺细胞。运动神经元的兴奋可引起它们的活动。(3) 联系神经元, 它介于上述两种神经元之间, 把它们联系起来, 构成一个反射弧, 或组成复杂的网络, 建立了神经元之间的机能联系。

在神经元中, 信息携带在频率变化而振幅不变的简单的神经电脉冲上, 沿着轴突从细胞体开始一直传到它的末端。在与另一个神经细胞体或树突接触处(称为突触), 信息由一个神经元传到另一个神经元。这通常是通过轴突末端的小泡或液囊释放出化学物质来进行的。神经脉冲到达时, 化学物质才开始释放。有两类突触, 一类, 由突触释放的物质, 对突触后的树突和细胞体有兴奋效应, 有可能使突触后细胞发放。另一类突触, 它释放的化学物质对突触后细胞有抑制效应, 使突触后细胞不发放(见图1)。

神经元具有以下性质:

(1) 神经细胞有许多个输入, 分兴奋性输入和抑制性输入两类, 仅有一类输出。

(2) 信息传递是单向的。

(3) 神经细胞的活动表现为电脉冲形式。

(4) 对输入实现空间、时间和阈下综合, 当兴奋超过一定阈值, 就产生一个或一系列脉冲。

(5) 神经细胞根据“全或无”定律起作用。

(6) 对阈上刺激细胞所产生的脉冲有一些延迟, 这一延迟称之为潜伏期, 潜伏期的长短取决于刺激的强度及膜的兴奋状态。

一些模型是考虑了上面列举的神经细胞的个别特点或全部特点的, 而一些更复杂的模型还提出了以下的性质: 突触输入的权重变化, 阈值的任意适应变化及某些多重性质等。

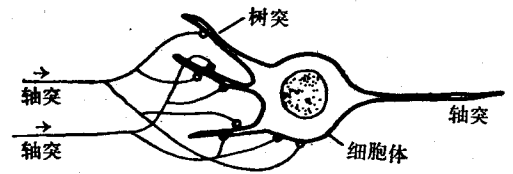


图1 神经元的示意图

信息从一个神经元轴突末端通过化学传递物质, 越过细胞间隙被传送到另一个细胞的细胞体或树突。由兴奋细胞来的冲动(—○)使突触后细胞兴奋发放, 由抑制细胞来的冲动(—●)使细胞不发放

## 二、神经模拟的简史

神经系统的最早模型起因于考虑神经与肌肉的作用。其中有代表性的是十七世纪的 Descartes 理论模型, 他把动物的神经和水力机械的水管以及当时的自动机作了比较, 把这些机械看作很好的神经传导模型。Descartes 的机械观点影响了十七世纪的很多科学家。

十八世纪, Haller 构成了神经元的髓球模型。他认为肌肉不是仅仅等待受“神经流体”(nervous fluid)作用而膨胀或收缩的被动元件。肌肉含有为收缩所需要的所有成分, 而仅仅需要一个刺激使它暴发罢了。另一个在十八世纪十分流行的观点是牛顿提出的, 他假设神经硬而透明, 兴奋象通过神经的光振动那样(以“以太”的方式)被传播。牛顿的影响很大, 这些假说在十八世纪关于神经传递的概念中占主导。

十八世纪末期, 生物电的概念开始出现。特别是 1791 年, 意大利解剖医学家(Galvani)用蛙作实验的二个结果表明: 第一, 电能诱导肌

肉收缩;第二,在肌肉中存在电。

在 1840—1850 年, Bios-Reymond 做了一个非常灵敏的电流计,测量神经与肌肉活动有关的电流。他用电化学模型检验他自己的生物电的假说,建立了“近极分子理论”(peripolar molecular theory),人们认为这是离子假说的先驱。此后 Matteucci (1863 年), Hermann, Borutlau, Hering 等生理学家用心线模型(Core model)研究神经的性质。

1900—1910 年期间,膜理论开始为生理学家所注意,心线导体理论不那么流行了,这时出现了 Bernstein 的离子假说。同时还出现了电化学模型,例如 Lillie 于 1916 年注意到发生在神经膜中的电现象和铁-硝酸系统电现象的相似性,提出了神经传递的铁丝模型。

在 20 世纪 30 年代末期, Fabre 和 Schmitt 做了一个电子模型,探索过兴奋理论(作为模型的一部分, Schmitt 发明的电子线路,现已普遍应用,通常称为 Schmitt 触发器)。这是首次用电子线路构成的神经元模型。

在本世纪的 30 年代期间,出现了另一类神经模型,这就是数学模型。其中最早的一个模型是 Rashevsky 提出的用两个一阶线性常微分方程描述神经中的兴奋过程。

1943 年麦克洛奇和彼斯 (McCulloch and Pitts) 在神经元的数学模型方面发表了一个“革命性”的概念。他们用布尔代数和网络理论讨

论神经系统。他们提出的神经元模型的要点是:(1)神经元的活动遵守“全或无”定律(他们认为这个性质很重要);(2)神经元之间有兴奋抑制和两种联系方式;(3)神经元具有突触延迟;(4)每一种神经元以一定值(正整数)作为阈值;(5)用这样的神经元构成的网络参数不随时间变化,麦克洛奇和彼斯证明了用这种类型神经阈值元件(现在称为形式神经元)联成的整个网络行为能以比例算法(Propositional calculus)来对待,并且能找到具有相应功能的网络的逻辑表达式。

形式神经元的模拟研究在几个方向上展开。例如克林(Kleene)在这个模型基础上继续建立有限自动机理论。Pierce 检测了计算元件网络的可靠性,虽然主要与数字计算机有关,但也讨论了许多有关神经网络的稳定性和可靠性的论题。

1952 年出现了一种新的数学模型,这就是英国人霍奇金和赫胥黎(Hodgkin and Huxley)根据他们自己的实验数据,导出了四个联立微分方程,这些方程的解,描述了乌贼神经轴突的峰电位及其后效应。

20 世纪中期,在已建立数字和模拟计算机的概念和技术的基础上,越来越明确地认为神经系统是一个信息加工站,像一架生物计算机。在神经生理学研究中,引入了越来越多的新概念和新技术,它们成为一种有效的研究工具。

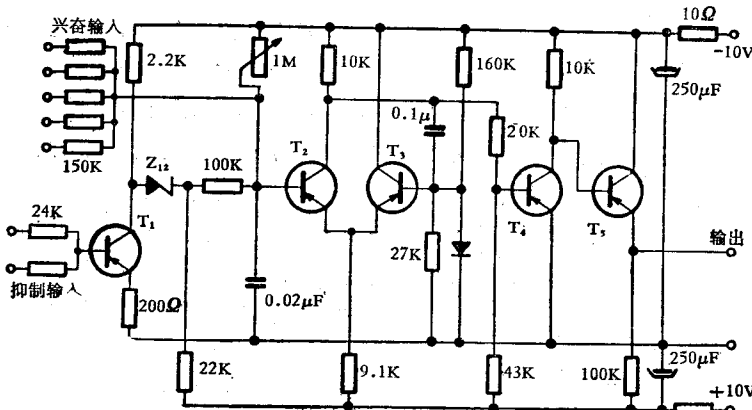


图 2 哈蒙的电子神经元模型

L. D. Harmon 的电子神经元模型模拟了生物神经元的兴奋、抑制、时间综合、空间综合、阈值、不应期、“全或无”定律

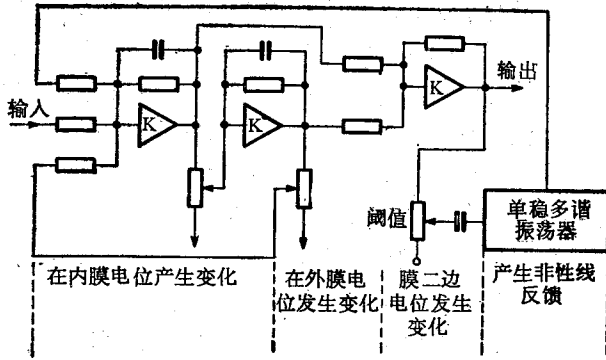


图3 Hiltz 的模拟计算机神经细胞模型

Hiltz 的模拟计算机神经元模型由两个积分器，一个加器和一个单稳多谐振荡器构成，模式了生物神经元的兴奋、阈值大小，强度与兴奋建立的速率

择最适宜的模拟技术。

数学模型常常是做物理模拟的起点。但已知的数学方法往往不能对神经元的性质提供一个完整的描述和分析。涉及到神经元的多变因素及非线性的复杂情况时，数学描述就无能为力。在用数学工具对整个的网络进行分析时也常常感到很困难。可是，无论如何，在并未出现严重非线性失真，合理限制大量可变因素(即对神经细胞模型进行简化)的情况下，数学模型具有宝贵的用途。例如前面提到的霍奇金和赫胥黎的有关膜兴奋理论的数学模型就是一个突出的例子。

因而，很多类神经模型开始达到成熟。

20世纪60年代初至70年代初初期了多种神经细胞的电子模型和模拟计算机模型。其中比较著名的有美国麻省理工学院工程师哈蒙(L. D. Harman)的电子模型(图2)<sup>[1]</sup>。英国伦敦大学学院泰勒(W. K. Taylor)的神经元电子模型<sup>[2]</sup>及赫里兹(F. F. Hiltz)的模拟计算机神经元模型(图3)以及波兰科学院自动化研究所仿生学实验室的神经元的电子模型<sup>[2]</sup>。这些模型通常模拟了生物神经元的一般共性，如兴奋、抑制、时间综和、空间综和、不应期、“全或无”定律、阈值等性质。在这里需要特别提到的是1966年Harmon, L. D. 对人工神经元模型所作的综述，他收集了305篇文献，是这方面的重要参考文献。

1972年美Colorabo大学的R. J. Mac Gregor和R. M. Oliver构成了神经元的任意构形的通用电子模型<sup>[3]</sup>，由44块基本组件构成，模拟了神经细胞和带有突触的轴突。这个模型的优点是具有构成几种神经网络的能力。

### 三、神经模拟的技术

神经模拟有各种形式，从语言描述式的模型到精心构成的数学和物理模型。20世纪50年代起，已出现的很多模型采用化学系统，电子线路，数学公式的形式或用计算机模拟。每一类模拟各有优缺点，对一特定的模拟问题要选

子。

电子模型能准确地模拟连续可变的非线性运算。在实验条件可控的情况下，可以观察实时的时间信号。当刺激和模型参数发生变化时，可以直接观察波形，相位关系等现象。这样的优点对模拟一个或几个相互联结的单元是最有效的，但对大规模网络，参数的观察，控制及其联结却很困难。

神经元的模拟计算机模型具有同电子模拟相似的优点。它不要求过分简化的模型。

数字电子计算机的广泛应用，它的存储能力和计算速度的增长，有可能灵活地逼真地模拟神经系统。用数字计算机模拟大规模的神经网络比用其它技术更容易处理。高速数字计算机在计算速度、存储能力等方面具有很大的优点，如果平行运算再不断有所进展，则可能解决连续可变的非线性运算。高速数字计算机很有可能最终为模拟复杂的神经系统提供一个最满意的工具。

数字计算机模拟的另一个优点是模型能很方便的改变参数，这等于可在计算机上进行很多实验。数字计算机模拟的一个有重要价值之处，是利用离散符号可以完全表达被控制的和需要观察的变量。例如，在任何时间都可以方便地获得整个网络的状态的资料，这样一个准确的多态表达无论用模拟计算机还是电子模型都不容易得到。

## 四、用于视觉模式识别的 神经网络的模拟

随着新技术的应用,实验神经生理学研究日益深入,对动物的特种感官,如视觉系统的研究,取得了不少进展。从本世纪六十年代起提出了各种视觉模型,模拟了动物视觉系统各级水平的功能及特点。构成这些模型的方法和手段也不相同,有的是数学模型,有的是电子模型及电子计算机模拟等。在这里举几个有关视觉模式识别的神经网络的例子。

第一个例子是有关蛙视觉系统的模型。

经过许多神经生理学家和组织学家的研究,发现蛙视网膜由五类神经细胞构成(即光感受器,水平细胞,双极细胞,无长足细胞及神经节细胞)。对各类细胞的机能也有了一定的了解。在此基础上,出现了模拟蛙视网膜各种细胞机能和特点的电子模型。

1963年美麻省理工学院仪器实验室的 Louis. L. Sutro 模拟了蛙视网膜的光感受器和双极细胞层及其联结<sup>[4]</sup>。这个模型是以 Lettvin. Maturans 及 Pitts 和 McCulloch 的文章中阐述的蛙眼中感受器和双极细胞层之间的联接为根据。其最终搞成的电子模型是用商业出售的光导摄像管模拟蛙视网膜中的感光元件,输入细胞用光导摄像管上的六角形光栅表示,用磁带记录和数字积分决策部件模拟双极细胞。

1965年 Louis. L. Sutro 又设计了蛙视网膜的电子模型<sup>[5]</sup>,并且建立了两种系统,一种称 $\alpha$ 系统,一种称 $\beta$ 系统。据称这种线路已被电视摄像机和计算机设计者应用。但 $\alpha$ 和 $\beta$ 系统的详细资料未见公开发表。

在蛙的功能电子模型中比较有名的一个模型是美国的 M. B. Herscher 和 T. P. Kelley 于1963年发表的<sup>[6]</sup>。作者根据生理学家 Lettvin 及其同事的对蛙的生理学研究工作发现蛙视网膜中,能区分出四类视神经纤维,能抽取以下四类特征:(1)边缘,(2)运动凸边,(3)反差变化;(4)变暗。模型用了32,000个电子元件,其中包括3793个光导管和2652个氖灯。分七层,用

平行加工和重迭感受野来抽取输入图象的以下特征:(1)凸边,(2)运动凸边,(3)反差变化,(4)纯暗边。作者认为这个模型是向研制监视、侦察及制导等复杂装置迈出有意义的一步。

日本东京广播科学研究实验室福岛(Kunihiko Fukushima)构成了一个蛙视网膜的电子模型,发表于1970年<sup>[7]</sup>。作者宣称,其构成的电子模型采用了新的细胞间连接技术(用兴奋性的电阻网络和抑制性的电阻网络)。模型由700个光感受器和同样的输出细胞的二维阵列构成。输出细胞有同心的 on 中心型感受野,输出细胞的反应显示在指示灯阵列上。该模型能显示心理学上熟知的效应——Mach 带和 Broca-Sulzer 效应。

第二个例子是鸽眼视网膜的电子模型<sup>[8]</sup>。

美国道格拉斯(Douglas)航空公司的 R. G. Runge 等人从1963年到1967年2月,构成了模拟鸽视网膜上几种检测器的电子模型。其根据是 H. R. Maturana 生理实验所描述的鸽视网膜上有几种神经节细胞,分别对图形的下列特征敏感:(1)亮度;(2)边缘;(3)曲率;(4)沿某一方向的运动;(5)垂直边;(6)水平边。

模型包含六种检测器:(1)亮度检测器;(2)一般边检测器;(3)普通边检测器;(4)凸边检测器;(5)垂直边检测器;(6)方向检测器。

该模型分三大部分:由光敏元件组成的接受器(145个硫化镉感受器);信息加工设备,由58个水平细胞,80个双极细胞,88个无长足细胞,7个神经节细胞组成。显示装置用监听器(扬声器)。

这一模型的信息加工原理,对于图象识别的预加工系统的设计有一定的参考意义。

第三个例子是鲎眼电子模型<sup>[9]</sup>。根据 Hartline 等人发现的鲎眼的侧抑制作用,60年代初,美国构成了一种鲎眼电子模型,这是一种专用的模拟机。作者认为,根据鲎眼的相互抑制原理可设计一系列装置,可突出边框和轮廓,而使电视或雷达屏的聚焦更清楚。

第四个例子是西德柏林自由大学生理所神经生理系 R. Eckmiller 于1971年发表了题为

“视网膜和视觉系统的电子模型”的论文<sup>[10]</sup>。作者模拟了脊椎动物视网膜的五种细胞（115个光感受器，25个水平细胞，115个双极细胞，25个无长足细胞，25个神经节细胞），模拟了外侧膝状体核的25个神经元和25个中间神经元。构成一类专用的模拟计算机。

近年来，除了电子模型外，在数字计算机上模拟动物视觉系统的信息加工，成为一个重要的研究方面。下面介绍一下福岛和泰勒的有关工作。

1970年，日本东京广播科学研究实验室的福岛（Kunihiko Fukushima）构成了一种曲线图形的特征抽取器<sup>[11]</sup>，这是由哺乳动物视觉系统，特别是猴、猫皮层神经元感受野的结构提出的一种网络设计。这种特征抽取器是由模拟阈元件组成的一个多层平行网络。它由六层串联构成。第一层由光感受器的二维阵列构成。第二层是一个反差检测层，它的每一个元件都有一个“on”中心型的感受野。第三层是一个线检测层，这一层的元件相当于一个“简单型”的皮层细胞，它对取向合适的线条反应。第四层也是线检测器，它相当于一个“复杂细胞”，但它并不对线的准确位置敏感。第五层的元件，相当于一个“超复杂”细胞，当在前一层检测的线是曲线时，它才反应。在最后一层，检测线的曲率，这与线的位置无关。这就是说这一层元件的输出与呈现在它的感受野上的线的曲率成比例。在数字计算机上模拟了该网络的功能，结果表明，网络能成功地由输入模式抽取上述特征。

1975年福岛又构成了一个“自组织多层神经网络”称之为“Cognitron”<sup>[12]</sup>，一共4层，每一层有 $12 \times 12 = 144$ 个兴奋细胞和相同数目的抑制细胞，并在数字计算机上模拟了“Cognitron”的功能。这是根据突触机构的新假说，推导出多层神经网络的新算法。“Cognitron”具有自组织功能。当几个刺激模式重复呈现时，在较深层，细胞的感受野变得比较大，最后一层的每一个细胞从第一层的各部分集合信息，并对特殊的刺激模式或特征进行选择性的反应。因为

“Cognitron”有一个多层结构，比以前提出的脑模型或学习机都有较大的信息加工能力。

另一个例子是英国人 F. J. Muller 和 W. K. Taylor 于1974年提出的模拟动物脑中模式识别机理的平行加工模型<sup>[13]</sup>。这个模型能区分许多模式而不需要复杂技术。感受部分或“眼”把模式影像转换为电信号，加工部分或“脑”区分它们。加工部分的基本元件是一个“模式检测单元”，它对呈现在感受矩阵上的特殊模式产生最大反应。在一个包含几个“模式检测单元”的网络中，受最大刺激的单元由一个“最大振幅滤波器”自动选择，并独自反应。

一个由十一个“模式检测单元”组成的“脑”，能区分象棒那样的一些简单模式，并且作者们还根据 Hubel 和 Wiesel 的研究工作，把它们排列成类似皮层上神经组织的柱状结构。这就使模型能区分各种模式而不管其位置或大小如何，从而模拟了视觉皮层细胞的某些性质。

作者宣称，这种平行加工的模式识别方法有很大前途，它可以激励工程师们做这样一些模式识别的设备，因为它所根据的原理与通常的原理很不同，而且也给神经生理学家提供了分析脑中信息加工机理的许多新概念。

## 讨 论

模式识别机理的研究在工程学和神经生理学中都是一个重要课题。视觉模型的进一步发展受到神经生理学等学科的影响。有人认为视觉模型的进一步发展可能在以下两个方面进行。一是扩大模型的范围，考虑更高一级中枢的细胞层和中枢其它区域的信号流、色觉，扫视图象时眼运动的控制，运动物体的时间和空间测量，或视觉过程中听觉和前庭器官信号流的影响。二是改进模型的结构和所用部件，例如，应发展一个特殊的积分电路，具有神经元最重要的信号加工特性，具有多个兴奋和抑制输入端，而且应价格便宜，来源丰富。其参量调整可自动进行（如电子的或伺服电位计），能对整个细胞层兴奋过程进行连续时间显示。

有的研究者指出，在研究中枢神经系统和

视觉过程中,最主要的障碍之一是不能显示三维的与时间有关的过程,但应想法使对每一矛盾都可以显示一个尽可能明显的中间结果。

我们还注意到,目前用分离的电子器件构成神经元及神经网络的工作已不多见报道,如研究神经元电子模型的先驱之一——美麻省理工学院工程师哈蒙,在1966年写了一篇“神经模拟”的综述性文章<sup>[14]</sup>之后已转入对人脸特征的识别研究工作<sup>[15]</sup>。目前在数字电子计算机上模拟神经网络功能和视觉系统模型的功能,以及模拟具有自组织功能的神经网络的工作日益增多。

我们知道,对模式识别机的研究已有20多年的历史了。尽管其结构如何多种多样,但它们基本上可以分为两类,即根据加工外部刺激信息的方式不同来区分。一种是将信息顺序加工,这就是说,对被识别的模式点对点的扫描以后,按顺序来加工一组输入的信号。用数字电子计算机进行模式识别就是用这种方法进行。第二种是将信息平行加工。这里没有模式的扫描,而仅仅把模式呈现在一个感受器矩阵上,这些感受器同时地把这个物理模式转换成一个电的模式。这种电信号触发能辨识这个模式的一个特殊的“识别单元”。一些研究者认为动物和人的视觉搜索和语言辨识都利用了平行加工原理。具有平行通道的感觉系统的解剖和组织结构及生理性质支持了这种平行加工的概念。目前,虽然用于平行加工的设备还没有象顺序加工的那样精巧和完善,但发展前途很大,应大力研究和发展。我们在前面谈到,目前用顺序加工的方法在电子计算机上模拟动物视觉

系统的功能,但动物的视觉系统是利用了平行加工的原理,这是一个矛盾,如何解决这一矛盾,这是摆在我们面前有待解决的问题。

有关神经模拟内容非常丰富,由于收集的材料有限,不可能全面介绍,只从一个侧面反映了有关情况,以供参考。

## 参 考 文 献

- [1] L. D. Harmon et al.: IRE Trans. on Information Theory, IT-8(2), 107, Feb. 1962.
- [2] RYSZARD GAWRONSKI: Bionics. The Nervous System as a Control System, p. 67, 87.
- [3] R. J. Macgregor et al: J. theoretical biology, 38(3), 527, 1973.
- [4] Louis L. Sutro: Plan for the simulation of the photoreceptor and bipolar cell layers of a frog's retina, AD: 408790.
- [5] Louis L. Sutro: Cybernetic problems in bionics, p. 811.
- [6] M. B. Herscher et al: IEEE Trans. on Military Electronics 7(2-3), 98, 1963.
- [7] K. Fukushima: Proceeding of the IEEE, 58(12), 1950, 1970.
- [8] R. G. Runge et al: IEEE Trans. BME-15(3), 138, 1968.
- [9] Проблемы бионики, биологические прототипы и синтетические системы издательство «МИР» 1965, p. 149.
- [10] R. E. Eckmiller: Pattern Recognition in Biological and Technical Systems, p. 143.
- [11] K. Fukushima: Kybernetik, 7(4), 153, Sept. 1970.
- [12] K. Fukushima: Biol. Cybernetics, 20(3-4), 121, 1975.
- [13] F. J. Muller et al: Pattern recognition, 8(1), 47, Jan. 1976.
- [14] L. D. Harmon et al: Physiological Reviews, 46(3), 513, July 1966.
- [15] L. D. Harmon: Sci. Amer., 229(5), 70, Nov. 1973.

[本文于1979年1月9日收到]

(上接第76页)

## 参 考 文 献

- [1] R. S. Payne: Nat. Hist., 67, 316, 1959.
- [2] R. S. Payne: J. Exp. Biol., 54, 535, 1971.
- [3] M. Konishi: Amer. Sci., 61, 414, 1973.
- [4] ERKERT, H. G.: Z. Vergl. Physiol., 64, 37, 1969.
- [5] D. G. Martin: New Scientist, 77, 1085, 72, 1978.

- [6] Oehme, H.: Zool. Jb. Abt. Anat. u. Ontog 79, 439, 1961.
- [7] Katherine V. Fite: Vision Res., 13, 2, 219, 1973.
- [8] Valerie, B. Morris: J. Comp. Neur., 129, 313, 1967.
- [9] Adolph I. Cohen: Exp. Eye Res., 2, 88, 1963.
- [10] Walls, G. L.: Amer. J. Ophthal., 17, 892, 1934.
- [11] 串田弘:《超薄切片法》, 1971.

[本文于1978年9月20日收到]