

生物神经网络信息加工机理研究的动向与展望

陈惟昌

(卫生部中日友好临床医学研究所生物物理研究室,北京 100029)

神经系统是结构和功能极其复杂的系统。神经生物学研究的主要目标是探索大脑的工作原理,阐明意识与思维活动的奥秘,并为研制新型智能化的神经计算机提供生物学的原型和新的启示。因此,有关神经网络的研究是当前数理科学、信息科学和生命科学共同关注的焦点。神经网络的研究从 80 年代开始,呈现蓬勃发展的势头。神经网络研究分为人工神经网络和生物神经网络两大部分。据初步统计,目前生物神经网络的研究工作约占 1/3,且有逐年增加趋势。目前国内外有关生物神经网络的研究主要集中在以下几个方面:

1 计算神经科学的理论研究 神经科学近年取得很大的进展,累积了很丰富的实验资料。根据这些资料,应用系统论、信息论和非线性科学的方法开展脑功能的理论分析研究,是计算神经科学这门新兴学科的主要研究内容。目前进行的研究工作有三个方面。一是感知觉的理论模型,对视觉的研究较多亦较突出。如感受野和特征抽取,初级视觉的函数模型,整合野的功能和同步振荡等。在听觉和嗅觉等方面也有一些工作,如嗅觉的浑沌模型。二是学习记忆的神经网络机制研究,以海马的学习记忆系统模型的研究为代表。三是脑的高级整合功能和运动控制方面的研究,如小脑的运动控制,感觉运动整合,眼动控制等。

2 离体的和人工培养的生物神经网络的研究 这是以生物神经网络原型为基础,分析研究生物神经网络的动态特性。例如,用大脑或海马的厚切片,或人工培养大脑和海马的神经元形成的神经网络进行实验研究,并广泛采用点阵式的多导联集成电路电极或多点玻璃微电极进行记录,通过多个神经元电活动来分析它们之间的联系和动力学过程。还可应用神经光学记录技术,记录神经网络兴奋过程的空间分布。这些实验研究对生物神经网络的理论和模型是一种实际的检验,并为建立新的理论和模型提供实验依据。

3 整体脑功能活动的研究 这是用宏观的机能图象的方法,开展定位的脑功能研究。常用的方法有正电子断层图,生物脑磁图,远红外脑层析图和功能脑核磁图等先进技术。应用 PET 技术已能确定记忆、语言、色觉、运动视觉等的机能定位。功能核磁图具有无创、快速、高分辨率和监测脑化学成分定量变化的优点,预期在将来检测人脑功能活动中可有广泛的应用。

4 生物神经网络生成机制的研究 神经网络的形成有一定规律。从遗传、发育和进化等方面研究各种神经生长因子、营养因子、趋向因子和遗传基因等因素对神经元的形态发生,树突分化,轴突生长和突触形成等的作用,可阐明脑神经网络形成的机理以及结构和机能的相互依存关系。应用分形与分维的概念研究神经元的分化过程和形态特征,也是值得重视的研究方向。

5 生物神经网络结构及联系的定量研究 生物神经网络的结构十分复杂,神经元的数目很大,神经元的种类繁多,其间的突触联系亦十分复杂。因此有必要对一些主要的生物神经网络,如海马,小脑,视觉皮质等神经元的种类、数量、联结特征、突触结构、神经递质、神经回路等进行定性及定量的研究,为生物神经网络的建模提供基本数据,为研究其动力学特性奠定基础。

生物神经网络是结构和功能极其复杂的非线性动力学系统,它是以水为基质,并以镶嵌在双层脂膜上的离子通道蛋白、离子泵以及作用于膜受体上的神经递质、神经调质以及胞浆中的第二信使系统以及胞核内的基因信息系统等有序分子组成的液态生物大分子信息器件,并由此组成不同层次的信息网络。生物神经网络的载流子为正负离子,故其运动速度比人工电子神经网络为慢,其基本电路元件为离子通道,其能源是以化学高能键通过离子泵提供;其结构经常处于合成与分解的动态过程,具有很强的可塑性和易变性,以及复杂的自组织、自增殖、自复制和自装配的功能;它与复杂的生物化学过程耦联并受大量的内源性遗传信息的调控。所以,生物神经网络远比人工神经网络要复杂得多。生物神经网络的重要特征是,以其高度的复杂性、易变性以及独特的运算法则,以补偿其运算速度之不足。

由于生物神经网络特性和人工电子神经网络之间有很大的差异,因此对生物神经网络信息加工机理的研究必须从生物神经网络的基本特性出发,而又高度概括简约地建立神经网络的理论模型,然后通过理论计算和分析,推断这些神经网络的动态特性与运行规律,再进一步设计新的神经生物学实验,对这些理论与模型进行分析与验证,并通过实验,收集新的数据,发现新的问题,为改进和建立新的神经网络理论奠定基础。通过以上步骤建立起来的生物神经网络信息加工理论是能反映神经网络生物学特性的理论。

生物神经信息载体与信息编码方式是生物神经网络信息加工机理研究的最关键的问题和悬而未决的难题。选择生物神经网络信息的载体和编码作为主攻方向的理由是,因为只有了解生物神经信息是以什么方式表达、存储和编码这些基本问题之后,才能进一步深入研究神经信息的加工机理。分子生物学之所以取得飞速的发展,正是因为掌握了遗传信息载体核苷酸三联编码的缘故。针对这一问题,我们对大脑联想记忆的关键部位——海马神经网络进行了深入的研究。发现,海马的神经元呈规则的六角点阵排列,且具有丰富的返行侧支,形成复杂的神经回路网络。海马还具有特殊的突触结构,称为苔状纤维突触集群,在其中,多个突触(最多可达14个)之间的相互作用是比单一突触作用更复杂的层次结构,称为高阶神经网络。苔状纤维突触复合体的突触后膜上具有学习记忆功能的生物大分子NMDA受体,这些受体在综合刺激的作用下能形成长程增强效应,是记忆的分子生物学基础。故此我们提出,生物神经网络信息存储的载体是神经突触,尤其是苔状纤维突触集群更为主要。其信息编码方式可分为神经元状态编码和突触位势编码两个层次。每个神经元的状态可有0(静止)和1(兴奋)两种状态。由 N 个神经元组成的网络,其不同状态的组合组成 N 维信息编码空间。我们证明,这 N 维空间的 2^N 个顶点集合对逻辑加(按位加)运算组成一个Abel加法群。外界信息的输入,以系列的神经元状态编码表示。这些信息进入神经网络之后,促使突触的联系强度进行调整,形成新的突触联系格局,组成慢变的突触编码。神经网络的计算能量函数——信息位势,是与神经元状态编码和突触联系强度编码二者密切相关的综合函数,在神经网络的高维信息空间中具有极其复杂的分布形式,并形成多个的能量极小值,不同的事件信息即存储于局域的能量分布极小值之中。提示信息的输入,可自动进入某一局域极小值而将信息读出,实现信息的自动寻址提取。故神经网络不仅仅是存储信息的本身,而且还保存寻找信息的能力。根据信息距离(Hamming距离)的概念,我们对 N 维空间的特性进行分析并提出一种 N 维空间神经信息位势分布的图示方法。 N 维超方体的标准侧视图的表达方法是将原点置于最左侧,与原点对偶的顶点置于最右侧,其余各顶点则根据其与原点的汉明距离的顺序,从左到右,按二项式系数以中心对偶的

方式排列,再将相邻顶点以棱连结即可作出。图1给出4维超方体的标准侧视图和5维超方体顶点的排列图。我们发现,不同的神经网络结构,不同的算法,对神经信息位势的分布有很大影响。突触联系强度的层次越多,高维空间信息势的分布越复杂。

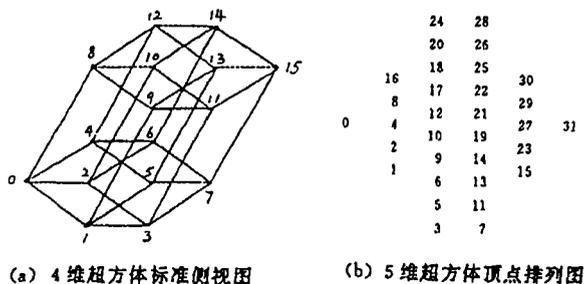


图1

根据上述分析,我们认为可从两个方面研究这一问题:一是从视觉和其他感觉的角度研究外界输入信息的神经脉冲系列的编码方式;另一是以海马神经网络和人工培养的生物神经网络为对象,研究突触联系强度编码及高维信息空间能量分布的格局,分析神经信息的存储机理与信息提取的动态过程。

TRENDS AND PROSPECTS ON THE RESEARCH OF INFORMATION PROCESSING MECHANISMS OF THE BIOLOGICAL NEURAL NETWORK

Chen Weichang

(China Japan Friendship Institute of Medical Sciences, Beijing 100029, China)

膜受体与传感器

任 恕

(同济医科大学,武汉 430030)

1 问题的提出

生命科学的进步需要借助物理科学,这是历史的经验,人们的共识。计算机与传感器是现代生命科学配套的支撑技术,传感器实现信号的转换或信息的提取,计算机完成信息的处理。如果把计算机比作大脑,则传感器便是感官。目前技术发展的情况是:计算机技术发展的水平和受重视的程度远远超过传感器技术,形成头脑发达感官失灵的畸形状态。大力发展传感器技术已成为当务之急。

新技术的发展需要正确的导向。在计算机发展的初期,冯诺曼的专著“计算机与大脑”曾经起了很好的导向作用,尔后的神经网络理论和神经计算机等的提出都是沿着这一方向的深入和发展。如果说向大脑学习曾经是发展计算机的成功之路,那么借鉴生物体的传感器来发展人工传感器也很有必要。这就是提出“传感器与膜受体”的依据。

2 膜受体是传感器的理想模型

机体是各类传感器荟集之处。生物体的传感器是在种系发生与个体发生的历史长河中发