

大脑、知觉模型和计算机模拟

Brain, Consciousness Model and Computer Simulation

董 聪

(清华大学, 博士 北京 100084)

现代神经生物学的研究表明, 大脑的知觉活动可能和脑里神经脉冲的图型有关。为了充分评价这一假设的含义并在计算机上模拟知觉过程, 必须研究神经元是如何工作的; 它们之间是如何通信的; 它们是如何组织成局部的或散布的网络的, 以及神经元之间的连接是如何随经验而改变的。

一、神经元的工作和通信机制

神经元是极化了的细胞, 它们接收其细胞体高度分枝的伸出物(树突)上的信号(动作电位), 同时沿着长而粗的索(轴突)发送信号。每个细胞体只有一个主轴突, 有时它也通过分枝而形成侧枝, 并利用它们与其他细胞相连接, 以传递自身的电信号。轴突可以和目标细胞体直接相连, 但多数情况下是由目标细胞体分出的树突接收轴突传递的信号, 然后将信号回传给自己的细胞体, 最后在目标细胞体内进行复合。只有当目标细胞体的成百上千个树突接收的信号之和超出某一特定阈值时, 神经元才会被激活。卡扎尔(Cajal)发现生物的细胞体外形, 树突的树状结构和轴突的长度存在巨大差异。卡扎尔辨明了有着能和相邻细胞通信的短轴突的细胞和有着伸向其他区域的长轴突的细胞之间的基本差别。在人工神经网络中, 神经元的特性是由节点函数表征的。因此, 神经元之间的差异可通过节点函数的不同选择来描述。

动作电位的再生需要几个毫秒的时间, 而动作电位沿轴突的传输(脉冲信号)速率又很慢, 因此, 快速的思维过程必须依靠同时通过许多轴突传播的脉冲之相对定时(时间整合)和由每个轴突形成的数以千计之连接(空间整合)来实现。

脑不是合胞体, 动作电位不能从一个细胞跳到另一个细胞。神经元之间的通信通常是由化学递质介导的。这些递质在轴突和另一细胞的树突的接触点——突触处释放出来, 当一个动作电位到达轴突末端时, 递质就从一些小泡里释放出来。小泡里的递质都装在由突触前膜和突触后膜隔开的宽 20 毫

微米的间隙里。钙离子在动作电位的高峰期进入神经末端, 它们的活动为同步化的胞吐作用, 即为神经递质分子的协调释放提供信号。

递质一旦被释放出来, 就和突触后受体结合而促使膜的渗透性发生变化。当电荷的运动使膜接近电位逆转的阈值时, 就起兴奋作用; 当膜被稳定于接近其静止值时, 就起抑制作用。每个突触只产生一个小小的作用。为了固定其输出的强度, 每个神经元必须持续不断地积累到 1 000 次突触输入。

脑内许多不同类的递质已经鉴定出来, 其多样性对脑的功能来说有着巨大的意义。我们已经清楚地了解到递质是怎样合成的, 它们是怎样被释放的, 以及它们是怎样激活突触后膜里的受体的。递质受体可以分成两大总族, 一个受体总族包括离子通道——能形成含水孔(离子即通过此孔而穿过膜)的蛋白质, 它们是膜的渗透性变化的基础; 另一个总族不形成通道, 它们调节离子通道对刺激应答的方式。

对知觉过程的模拟若想细化到在离子通道及其调节过程上和真实神经系统完全一致是不可能, 也是不必要的。但是关于知觉过程的理论和模拟方法概括进描述低级过程的那些学说和实验现象却是应当的。在我们关于知觉过程的模型中, 将通过对有关信息作有组织的协同编码来反映已经发现的在离子通道层次上的现象和规律。

二、神经元组织成局部或散布的网络, 其连接随经验(刺激)而改变

迄今我们已经清楚了单个神经元是怎样工作的, 以及神经元之间是如何通信的, 那么神经元是如何组织成局部的或散布的网络的, 以及神经元之间的连接是如何随经验(刺激)而改变的呢?

大脑神经网络来自何处? 它是由 DNA 所特化的, 还是在个人早期经历的影响下, 逐渐生长而形成的具有个人特点的结构? 对这个问题的两种不同的回答, 反映了自 19 世纪以来哲学史上的一场

激烈的争论,它常被称为先天说和后天说之争。现代脑科学的研究表明,脑内大的神经连接模式是由基因确定的,而突触间的连接是可以随经验而改变的。改变突触功能的途径很多。例如,可通过增加神经末端的钙离子浓度增加递质的释放量,从而影响突触后受体的激活概率。而在较长时间内,活动的变化可能改变功能受体的数量。不论改变突触功能的具体途径怎样,概括起来,一个神经元受其它神经元的影响可以归为两种基本类型:一是改变每个突触的反应强度;二是增减属于同一细胞体的突触数。这两种类型在人工神经网络中均可以用节点间连接数的变化加以描述。

活动不仅能改变突触的功能和数量,还能改变突触的位置。塞尔科(D. J. Selkoe)的研究表明,轴突在与其相邻的突触开始静止后,还会产生新的末端,而且树突状主干的末端分枝总是再造的。沙茨(C. J. Shatz)对发育中的大脑的研究更清晰地阐明了轴突生长和定位的机制。对脑发育过程的研究表明,神经连接是从大体上接近于成熟型的未成熟状态完善而成的。换句话说,在胚胎发育过程的初期,轴突生长和通路选择是由DNA控制的。但是,轴突前部的尖端一旦伸到合适的区域(靶位),发生于脑里的或由其自身中的活动激发的神经脉冲就会影响对特定靶子(靶址)的选择。其过程表现为轴突有选择地收缩及长出不同分枝的重新安排,轴突在其靶结构内试探性地伸到不同的地址,然后再通过竞争消除选址中的错误。反映到人工神经网络中,这一问题就是典型的多层前向网络的拓扑优化问题。笔者已提出了一种算法结构用于模拟这一生长和发育过程。

在新达尔文进化论的范式中,生物系统从根本上说是动态的。就像已经发生的那样,是进化过程逐步将大脑塑造出来的。对于每一个偶然的形态上的变化,生物体皆用已经进化出来的一系列特征去应付生存考验,在此之前并没有一个经过内省的有意识的筹划。雅各布(F. Jacob)认为:进化就像是个修补匠,它只能从当时所能得到的材料中,有选择地进行调整(使生物体适应环境),其能力受到以前的决定所限制。不仅如此,每个特定的能力看起来都像一个惊人优美的设计,但实际上,它也许不能同更大一些的系统很好地整合在一起,并且可能同神经系统的整体布局不相匹配。丘赫兰德(P. S. Churchland)认为:进化不可能从头就是有计划地开始,尽管从优化设计的角度讲,它应当这样。因此我们说,进化的产物都是分阶段局部优化的结果,其初始形态、生存环境和环境的演变过程造就了它今天的形态和功能。要研究大脑的认知过程和建立相应的知觉模型,考虑大脑神经生物学的约束是十分必要的。

三、以视觉系统为例,看脑内信息是如何传递的

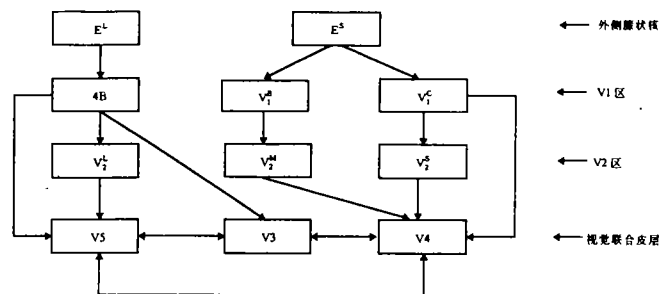
要建立知觉的过程模型,首先要研究智力训练过程中脑内信息是怎样流动的。我们选择视觉系统为突破口,其部分原因在于视觉系统能够准确地将功能与结构联系起来,并能确证从外界刺激到生理反应的准确通道。泽基(S. Zeki)对视像与脑的关系进行了深入的研究。他认为,脑的任务是从获自物体的大批不断变化的信息中抽取物体恒定不变的特征,而解释则是感觉的一个非常复杂的部分。因此,脑要对可见的东西有所认识,就不能只分析视网膜得到的影像,它还得主动创造一个视觉世界。主动创造视觉世界是我们构建新的知觉过程模型的思想基础。在阐述这一模型之前,我们先来看看真实的视觉系统是如何处理信息的,它的解剖结构和功能分区有何特点。

视觉系统的一个主要特点就是综合与分工。在构造上,它表现为各皮层区和各区中的专门发挥种种特定视觉功能的分区的分立;在病理学上,它表现为有关功能组织受到特定损伤时,它就不能认识视觉世界的某个方面。似非而是的是,脑内的这种细分和专门化,一般都没有明显到可知觉水平。因此,脑内的各部分必须通过协同工作的方式,才能完成对认知对象的统一描述。换句话说,知觉感受到的东西要比眼睛直接看到的多得多。将协同工作原理引入知觉过程模型是我们提出的通过分阶段局部整合和协同的方式消除运动视像重构过程中不封闭现象的生物基础。

视通道的传输途径是:视网膜→外侧膝状核→视觉皮层。外侧膝状核包括6层细胞。顶上的4层称为小细胞层,其功能是记录颜色;底下的2层是大细胞层,其功能是采集光。视觉皮层主要包括初级视觉皮层(V1区)和视觉联合皮层(V3~V5区)。从解剖结构看,V1区和视觉联合皮层之间被另一皮层区(V2区)隔开。已有的研究结果证实,脑内有4个并行的知觉通道用于传输视觉的不同特征:1个是针对运动的,1个是针对颜色的,2个是针对形状的。两个计算上大不相同的系统是运动系统和颜色系统。对于运动系统来说,关键性视觉联合皮层是V5;其输入信号的传递是从视网膜经外侧膝状核的大细胞层到V1的4B层,再以直接的和通过V2粗条纹区的两种方式传送到V5;颜色系统是依靠V4区;其输入信号经外侧膝状核的小细胞层传递给V1的色斑区,然后以直接的和通过V2细条纹区的两种方式前往V4。

两个形状通道中,一个是与颜色密切相关的,而另一个则与颜色无关。前者是基于V4,是从外侧

膝状核的小细胞层经由 V1 的色斑间区和 V2 的中间条纹区得到输入信号；后者是基于 V3，更多的是与动态形状——物体运动时的形状——相关。它是从外侧膝状核的大细胞层经由 V1 的 4B 层得到输入信号，然后以直接的和通过 V2 粗条纹区的两种方式前往 V3。



脑内用于传输视觉不同特征的 4 条并行的知觉通道示意图

运动通道：由外侧膝状核的大细胞层(E^1)到 V1 的 4B 层，再以直接的和通过 V2 的粗条纹区(V_2)两种方式传送到 V5；颜色通道：由外侧膝状核的小细胞层(E^2)传递给 V1 的色斑区(V_1^c)，然后以直接和通过 V2 的细条纹区(V_2^c)两种方式前往 V4；动态形状：由 E^3 经 V1 的 4B 层，然后直接的和通过 V_2 两种方式前往 V3；有色形状：由 E^4 经 V1 的色斑间区(V_1^s)，然后传送到 V4。

视觉皮层内部的深奥分工自然而然地提出了这样一个问题：各专门化区怎样相互作用才造成了统一的影像。解剖学证据表明，只与某一视觉联合皮层直接相连接的单一主区并不存在，相反，各专门化区都直接或通过其他区彼此相连。

例如，V4 和 V5 区彼此就是直接和通过 V3 来回相连的。V4 和 V5 区的信号还投射到脑的顶叶和颞叶(存储记忆的一个主要部位)区域，在接收区内各自信号的重叠甚少。这有利于记忆的存储和利用。

从病理学的研究中我们已经清楚，V3 区的细胞对动态形状很敏感，V4 区的细胞对颜色和与颜色有关的线条很敏感，V5 区的细胞对运动，主要是运动方向很敏感，并且 V3 和 V5 区对颜色基本上是惰性的。但是，我们并不清楚这些视觉联合皮层区里究竟存储了一些怎样的信息。换句话说，我们已有的关于知觉的理论基本上是定性的、描述性的，而量化的、预测性的体系并没有建立起来。而要建立量化的、预测性的知觉理论，就不仅要知道在认识过程中，大脑各皮层区及其它相关部位是否有神经元在活动，而且要清楚地知道这些活动究竟意味着什么。换句话说，我们不仅要知道大脑如何进行计算，而且要清楚大脑究竟计算了什么。

尽管目前还不清楚认知过程中视觉皮层里发生的现象究竟意味着什么，但已经发现了一些重要的规律，其中之一就是感觉系统是分层排列的。随

着距离——根据来自刺激源的突触类目所测定的——的增加，神经元对复杂刺激的愈来愈抽象的方面起反应。V1 里的神经元只对线而不对点起反应，V5 里的神经元仅对运动方向而不对运动的其它特征或颜色起反应。

综合以上提到的那些关于脑的解剖学、神经生物学和病理学方面的研究成果和发现，我们推测由图表示的知觉通道的作用是对视觉的不同特征进行分类、主特征抽取、特征压缩和编码。特征识别、记忆的存储与合成则发生于脑的其它区域。

要对信号的特征进行压缩和编码，需要有一个参照物来提供反馈指导信号。没有教员的帮助，人们也能学会大多数事物，尤其是在视觉领域。因此有理由推测，这一参照物来自大脑内部。泽基认为视觉联合皮层向初级视觉皮层 V1 有一条反馈回路，并发现了一些有关的证据。在图所示的模型中，通过在视觉联合皮层(经过 V2)和 V1 之间建立一条反馈回路，我们便能够精确地确定认识过程中视觉通道里究竟发生了怎样的过程 and 变化。换句话说，我们就能清楚大脑在这一过程中究竟计算了什么。将 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow$ 视觉联合皮层 $\rightarrow V_2 \rightarrow V_1$ 用人工神经网络来描述，就是一个含有多个隐层，层间存在跨层连接的前向网络系统。通过求解网络的拓扑优化和参数优化问题就可以特化这一网络。前向网络的参数优化问题已为人们所熟知，最著名的算法就是 BP 算法，笔者已给出了 BP 算法的一种广义描述形式；前向网络的拓扑优化问题笔者也已解决，并可实现全局最优拓扑构造。因此，建立知觉过程的量化模型的条件已经成熟。

在所有视区中，具有最精确的眼底断层图的视区是 V1，其次是 V2，这是泽基最初猜测视觉信息会向 V2 和 V1 回授的一个主要的生物学原因。已有的实验结果显示，向 V1 和 V2 输入可重入信号的连接和该两区与专门化区(视觉联合皮层区)的连接根本不同。这些向前投射连接点是相互分散的补丁状的，原因是在向前投射过程中 V1 和 V2 不仅要协助完成主特征抽取和特征压缩功能，还要完成特征的分类功能。对分类功能的要求使 V1 和 V2 中的同类细胞集聚成群并向具有相应视觉特征的专门化区发送其输出信号。作为对比，向回投射则既分散又几乎没有什么特色，原因是向回投射过程中，信号的合成是主导性的，信号的分类并无必要。

四、生物视觉系统可能通过网络的局部连接和神经元的协同动作完成对认知对象的统一描述

生物体构造上的分区必有其功能上的蕴合，这是我们在对脑的解剖结构、病理学现象和神经生理

学反应进行解释和模拟时遵循的一条基本原则。在视觉信号由视觉联合皮层向初级视觉皮层 V1 回传的过程中,没有分类过程出现,神经元间的连接不出现分区集中现象。作为对比,在视像由视网膜向视觉联合皮层传输的过程中,视像的不同特征被分类、压缩、编码,以形成抽象表示。功能相似的神经元集聚成柱状或板状结构穿过皮层,以形成分隔构形。这种强烈的反差原因何在?我们认为主要有以下 4 个方面:视像的抽象表示有利于提取恒定不变的特征,使知觉在一定程度上保持稳定性和鲁棒性;压缩后的特征减少了形成长期记忆所需的网络规模;特征的分类和压缩有利于类比推理,从而有利于联想记忆的实现;特征的抽象表示有利于和来自其它感觉或知觉通道的关于同一对象的信息(以其抽象表示形态)合成以共同作出反应。关于这方面的系统分析笔者将另文介绍。

在视像由外侧膝状核→V1→V2→视觉联合皮层的传输过程中,由于每一中继站(隐层)中的神经元对前一中继站输出信号的接受域很小,因此,要使顶层神经元的感受野完全覆盖整个视区,并完成对认识对象的统一描述,则必须采用大量中继站序贯连接的方式(如 K. Fukushima 的神经认识机)。且不说这种序贯连接的方式受到生物神经系统真实解剖结构的严重制约,即使仅从数学的角度考虑,这种扩充感受野的方式通常也是不经济的。因此我们推测,生物视觉系统可能采用了一种经济快捷的方式——通过网络的局部连接和相关神经元的协同动作完成对认知对象的统一描述。以视觉系统的形状通道为例:将整个视野按照某种方式划分为有限个子域;在子域内部,视像的处理按并行方式各自独立地进行,需要协调的只是子域间的界面;在每一中继站,通过相关神经元的局部连接进行分阶段整合。阶段整合的作用是将小的子域整合为较大的子域,同时平滑被整合的小子域间由于前一阶段的独立处理而可能出现的不协调之处。通过连续几次阶段整合,便可以构成一幅协调的完整视像。分阶段整合的过程就是一个特征抽取、压缩和编码的序贯过程,在这一过程中,视像完成其愈来愈抽象

的表示。视像的分阶段整合,很象几个小孩子一起玩拼图游戏:他们各自将一些小块拼接成较大的块,再将较大的块拼接成更大的块……,最后拼接成一幅完整的图像。拼接过程可分阶段同步进行。开始的时候,细节信息是很重要的。在逐步拼接过程中,细节信息愈来愈不重要,起支配作用的逐渐演变成为一些关于整体的抽象概念。也就是说,图形的拼接过程实质上就是关于图形的特征抽取、压缩和编码的过程,最终呈现给大脑的是关于图形的抽象描述——噢,原来这是一幅达·芬奇的蒙娜丽莎画像!

从计算的角度讲,上述视像的表示过程无疑是十分经济的,但它是否真的是大脑运行的实际过程呢?泽基发现:在大脑内部存在大量平行于皮层表面的局部连接;在顶叶或颞叶区域内发生的信号整合都是通过网络的局部连接实现的。因此,有理由推测,上述视像的表示方式也恰是大脑所采用的。

我们已经初步解决了视像的抽象表示问题,我们已经清楚长期记忆(LTP)和大脑海马部位的神经网络的图型有关,我们甚至有理由猜测理解过程发生于额叶前部……。在过去 20 年里,在探索和掌握认知过程与大脑解剖结构之间的关系上,神经科学家们已经取得了巨大进展。将神经科学家的发现表示为严格的关于知觉的定量理论是一项艰难的工作,它需要心理学家、神经科学家和理论工作者之间的紧密合作。

参考文献

- [1]Selkoe DJ. 大脑衰老、智力减退,科学,1993(1):69~75
- [2]Shatz C J. 发育中的大脑,科学,1993(1):11~19
- [3]董聪,人工神经网络研究进展,北京:北京航空航天大学出版社,1995
- [4]Zeki S,头脑中的视像与脑,科学,1993(1):20~27
- [5]董聪,多层前向网络的全局最优化问题,大自然探索,1996 15(4):27~31
- [6]Fukushima K, Miyake S. Neocognitron: A New Algorithm for Pattern Recognition Tolerant. Pattern Recognition, 1982, 15(6):455~469

(责任编辑 王宏章)

(上接第 48 页)

于国家的财力状况,在短时间内实现这部分企业转型,无论在资金方面,还是技术装备方面都是难以办到的。而外商对华投资自 1992 年以来一直保持高增长,1992~1995 年期间的年平均增长率高达 51%。近两年来,累计投资规模庞大的外资企业在外贸方面已与国有企业发生了冲突,在国内市场方面已对国有企业构成了威胁。针对这种状况,为避免规模继续扩张的外资给转型期的国有经济带来难以预料的冲击和影响,我国政府不得不以外贸出

现“滑坡”、外商来华投资减少为代价,在尚无其它更为完善的吸引外资政策出台的情况下,转而采取“取消外资企业优惠政策”等措施。那么,如何以较小的代价,在保持外资有合理增长势头的条件下,既能实现国有企业,尤其是大中型企业的顺利转型,又不至于使外资给我国国有经济带来较大的或致命的冲击,仍是我国政府面临的战略性难题。

(责任编辑 肖庆山)