

适应共振神经网络

史超 汪云九 姚国正

(中国科学院生物物理研究所, 北京 100080)

提 要

本文介绍了 S. Grossberg 的适应共振神经网络。网络由注意子系统和定向子系统构成, 当注意子系统高、低层网络的模式互相调谐时, 即发生所谓“共振(resonance)”。这一理论特别强调网络的结构层次, 具有深刻的生理、心理背景, 因而有比较广阔的应用前途。

关键词 共振, 短期记忆, 长期记忆

Stephen Grossberg 提出的适应共振神经网络理论(adaptive resonance theory, ART)^[1-3]是目前比较有影响的神经网络理论之一。它在整体结构、学习和记忆、适应和自组织等方面都有独到之处, 并以强调数学、计算机的作用和重视生理、心理实验依据而著称。在神经网络及大脑模型等研究领域值得给予应有的重视。

一、基本观点

S. Grossberg 认为脑的行为和功能主要表现在生物个体在复杂环境中的实时(real time)适应和自组织, 因而有必要从这个根本点出发分析和设计网络的结构和行为。他认为系统在环境中的适应行为并不是由单独的细胞个体所能完成的, 而是整体结构共同协作的结果, 所以仅分析单个神经元的机能不可能得到整体水平的行为。因而他认为应当根据大量的生理学、心理学和解剖学等知识, 在结构水平上去考察神经网络在环境中的学习、适应等功能。S. Grossberg 的研究方法颇具特点。他从分析最基本的行为现象如巴甫洛夫条件反射开始, 引进所谓的“思想实验(thought experiment)”, 建立能够实现基本行为现象所必需的神经构造。进而又根据模型在环境中的工作过程试图去解释大量的行为实验结果, 并对一些传统的争论问

题提出自己独到的观点和看法。

S. Grossberg 非常重视数学分析和计算机模拟在这个过程中的作用。他认为在我们这个研究领域里对一个理论的解释没有适当的数学语言是不可能的。基本的非线性动力学、自组织和自适应原理、网络模型和计算机模拟可以很好地帮助我们理解大脑的结构和功能。作为这个领域的研究者至少要通晓数学、计算机、生理学和心理学这四门领域中的三门, 他称之为“3/4 律 (3/4 rule)”。要在这个领域取得突破需要多个领域的研究者的共同合作才有可能。

二、一些特点^[1]

适应共振网络(adaptive resonance network)由一个高层次网络和一个低层次网络组成, 并有一个与判断有关的定向子系统。依靠这种网络, 可以对任意的输入判断是否“熟悉”并能进行识别、学习和自组织, 使每一个内容都成为全局性自洽(globally self-consistence), 也就是说, 任何新模式的定义和归类都要依靠网络中已有的有意义的活动模式以及它过去的学习历史。由于引进了定向子系统, 适应共振神经网络不需要外部“教师”, 它可以自动地进行模式归类, 可以自动地发现不熟悉的、非预期的模式并能重新自组分类。外部也可以通过非特

异系统直接干预分类的方式,从而影响网络的行为。

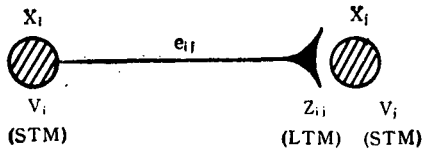


图1 神经元的短期记忆和长期记忆

网络采用了新的学习和记忆方式:“非赫布学习律 (non-hebbian)”,如图1,两个神经元 X_i , X_j 依靠 e_{ij} 联系起来,其中 X_j 是 X_i 的靶细胞,是一种单向联系。 V_i 、 V_j 分别是 X_i , X_j 的膜电位,突触调制强度为 Z_{ij} ,可以经过学习而改变。与赫布学习律的不同在于当 X_i 兴奋而 X_j 抑制时,联系强度可以降低。 $V_j = Z_{ij}(V_i)$ 表示信号的传递过程。S. Grossberg 引入了长期记忆 (long term memory, LTM) 和短期记忆 (short term memory, STM) 的概念。他认为短期记忆指细胞个体的膜电位及其衰减,而长期记忆指细胞间的联系调制强度。

S. Grossberg 的适应共振网络在分布存储、并行计算、自组织等许多方面与其它神经网络有类似之处,它对非熟悉事件的处理也类似于 McClelland, Rumelhart 的反传播 (back propagation) 理论,但它也有很多独到的地方。它比较重视的是结构而不是局部网络的功能,强调的是上层网和下层网互相的作用,利用共振的概念把自下而上和自上而下两个过程统一起来。由于存在一个定向子系统对网络进行指导,能自动地进行自调整记忆搜寻和学习,因此适应共振网络几乎不存在其它神经网络理论中存在的比较突出的不稳定性 and 假目标等问题。网络学习稳定后,对熟悉模式的识别可以通过一次运算而一步达到目标,不再需要一个收敛、叠代过程。另外,由于 S. Grossberg 的出发点在于用适应共振理论去解释和模拟脑在环境中的适应过程,而不象其它神经网络理论只局限于功能和局部的工程应用,因而适应共振网络有更多的生理、心理方面的依据和基础。几乎

结构的每一组成部分及工作过程都力求大量的生理背景和实验依据,内容涉及认知心理、解剖、电生理、病理、生化和药理学等多个方面。目前适应共振网络已被应用于模式识别、视觉理论、运动和语言模拟、人体节律等广阔领域,取得了很好的效果。

三、适应共振理论^[1]

系统由两部分组成:注意子系统 (attentional subsystem) 和定向子系统 (orienting subsystem) (图2)。两个子系统的相互作用构成了对熟悉和非熟悉事件的处理过程。熟悉事件的处理是在注意子系统完成的,它为熟悉事件建立了精确的内部表达和反应,但它不能够为非熟悉事件创立新的模式。定向子系统可以判断一个新的输入模式是否“熟悉”,并帮助注意子系统从新的经验中学习新的模式。

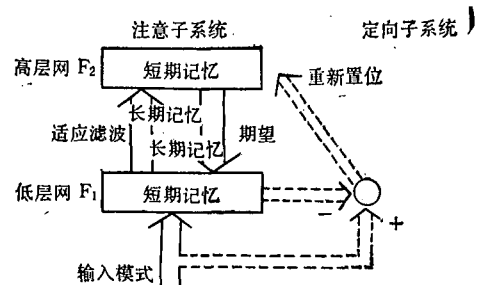


图2 适应共振神经网络

虚线表示非特异系统,注意低层网对定向子系统起抑制作用

注意子系统由低层次的神经网络 F_1 和高层次的神经网络 F_2 组成。输入模式首先进入低层神经网络 F_1 , 在 F_1 建立一个模式,称为低层网的短期记忆。然后通过一个自下而上的适应滤波过程,低层模式受到系统过去存储的长期记忆的调制,在高层网 F_2 建立一个新的短期记忆模式 (图3a)。然后这个模式激发自上而下的过程,在低层网 F_1 产生一个模板或期望,与低层网过去的短期记忆相比较。假若输入的模式是熟悉的,因而能成功匹配 (图3d), 就会抑制定向子系统,此时高、低层网络模式的互相调谐即所谓“共振 (resonance)”。

假若是非熟悉事件被注意子系统处理,由于它与已记录的模式有很大的不同,因而它激发的自上而下的模板不能在低层网匹配(图3 b),这样会激活定向子系统。定向子系统是

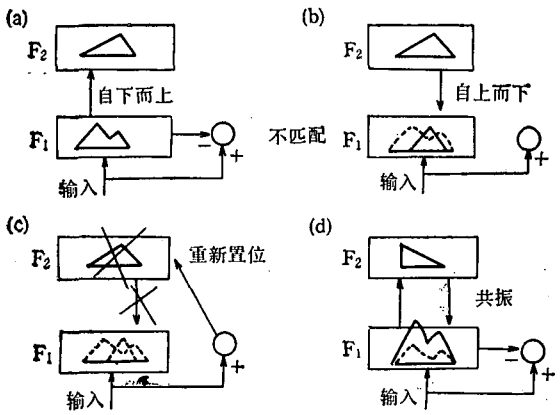


图3 网络对输入模式的处理过程
(a)表示自下而上的过程,(b)表示自上而下的过程,(c)表示由于F₁不匹配而不能抑制定向子系统,致使F₂被置位,F₂的模式被消除,(d)表示共振时的匹配

非特异性的(non-specific),与模式的具体内容没有关系。定向子系统的激活会迅速导致注意子系统的高层网F₂的重新置位(reset),原来的模式被压抑(图3 c)。但是由于网络内部特有的竞争和对比放大的特性,这时会在F₂重新出现一个新的模式并产生一个新的自上而下的模板。如果新的模板仍不能满足匹配要求,定向子系统会继续对高层网进行重新置位,选择新的表达,直到一个模板发生匹配;假如全部所存的模式寻找完毕而没有发生匹配时,网络会自动地为这个新的模式建立一个新的类别并学入网络。由于定向子系统也可以被外部直接控制,因而可以很方便地控制系统的分类方法。

注意子系统的具体构造如图4所示,在F₁网的每个神经元通过不同强度的长期记忆与F₂的所有神经元联系起来,具体过程参考图1。同样还存在一个类似的自上而下的结构联系,每个F₂的神经元以不同的长期记忆强度与F₁的神经元联系起来。当F₁有输入模式时,每个神经元的兴奋强度通过长期记忆的调制对F₂的神经元发生影响,这些影响在F₂被叠加起来

并在F₂内部进行竞争放大后就产生了一个F₂的模式。假若输入模式是熟悉时,由于曾发生过学习,在F₂产生的模式必定同于以前所产生过的模式。这时F₂的模式再通过已学习过的自上而下的记忆调制,必得到一个与输入相似的模式,可以发生匹配,这就是识别的基础。假若输入是不熟悉的模式,F₂的模式所产生的自上而下的模板与输入模板不可能匹配,F₁网也就不可能产生较大的非特异输出去抑制定向子系统,因而会导致定向子系统的激活。至于网络F₁可以根据匹配情况产生非特异输出及F₂网络被重新置位后会自动产生一个新的模式的能力是由网络内部特性决定的,它可以用on中心、off周边的感受野网络很容易地实现。

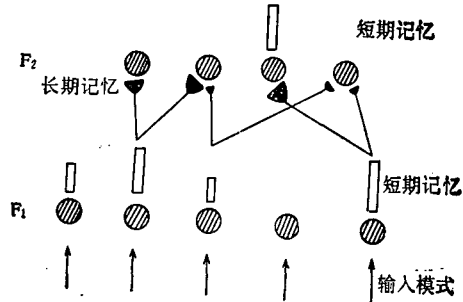


图4 适应滤波(自下而上)过程的具体结构
细胞上的竖框代表活动强度即短期记忆,突触的大小代表长期记忆的大小

四、讨 论

1. 网络的学习和记忆

网络的学习一般在过去的模式查询完后,在F₂建立一个新模式时发生,因而称之为快速学习(fast learning)。采用的非赫布学习律的最大特点是联系强度可以衰减,即在自上而下和自下而上过程中F₁不活动的细胞和F₂活动的细胞间联系发生减弱。一般在模型中记忆的强度是一次达到某个值,而不象有些类型的神经网络那样联系强度是逐渐地变化。

一个很突出的问题是系统如何能有效地区分大、小模式并在识别时一步达到其类别而不发生混淆。为此网络引进了韦伯定律(Weber

law), 规定学习后的长期记忆强度为 $\frac{\alpha}{\beta + |I|}$,

其中 α, β 是常数, $|I|$ 是输入模式大小的测度. 我们看一下它如何能有效地解决这一问题.

假设有两个输入模式 $I^{(1)}, I^{(2)}$, 其中 $I^{(1)}$ 是 $I^{(2)}$ 的子集, 即 $I^{(1)} \in I^{(2)}$. 根据韦伯定律, 它们到各自模式类的长期记忆分别为 $\frac{\alpha}{\beta + |I^{(1)}|}$,

$\frac{\alpha}{\beta + |I^{(2)}|}$. 网络学习稳定后, 若再次输入 $I^{(1)}$,

那么到模式类(1)的总强度为 $\frac{\alpha |I^{(1)}|}{\beta + |I^{(1)}|}$, 到模式

类(2)的总强度为 $\frac{\alpha |I^{(1)}|}{\beta + |I^{(2)}|}$, 由于 $|I^{(2)}| >$

$|I^{(1)}|$, 因而模式类(1)的兴奋度比较大, 可以

实现正确的选择. 假若输入模式是 $I^{(2)}$, 根据

非赫布学习律, 那些不属于 $I^{(1)}$ 的 $I^{(2)}$ 神经元对模式类(1)的贡献为零, 因此到模式类(1)的

强度贡献仍是 $\frac{\alpha |I^{(1)}|}{\beta + |I^{(1)}|}$, 而对模式类(2)的

总强度贡献是 $\frac{\alpha |I^{(2)}|}{\beta + |I^{(2)}|}$. 由于 $\frac{\alpha |I|}{\beta + |I|} =$

$\alpha \left(1 - \frac{\beta}{\beta + |I|}\right)$ 是 $|I|$ 的增函数, 而 $|I^{(2)}| >$
 $|I^{(1)}|$, 则模式类(2)的兴奋度大于模式类(1)的兴奋度, 因此在任何情况下都可以对小模式

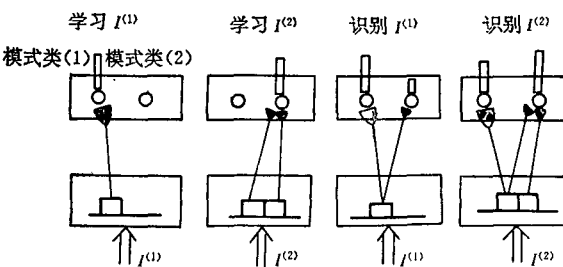


图5 韦伯定律可以保证网络有效区分大、小模式

2. 生理、心理依据

适应共振网络的实验证据非常丰富. 它的结构的每一组成部分及工作过程都可以在生理、心理中找到证据. 这里仅举一例. 人和动

物的海马受损常常表现出近事遗忘 (Korsakoff 综合症), 但它们的长期记忆常常没有损伤. 切除海马的动物也常常对新鲜事件缺乏好奇和反应. 假若我们把海马类比为定向子系统, 那么这些现象可以很好地用适应共振理论来解释.

由于定向子系统不再起作用, 因而系统不可能建立新的模式类别, 短期记忆也就不可能转化为长期记忆, 对新鲜的刺激也会缺乏反应, 但注意子系统已有的模式仍旧可以照常工作, 因而不会发生逆行性遗忘. 这也提醒我们海马也许并不是真正的记忆位置, 而很可能是将短期记忆转化为长期记忆的一个重要环节.

如果读者了解心理学家 J. Piaget 关于认识的发生理论^[4]的话, 在看了上面介绍的 ART 的工作原理以后, 很自然地会联想到, 它们之间有某些相似之处. J. Piaget 认为在儿童的认知过程中, 一定的刺激被个体同化于一定的认知结构之中, 主体使用已有的感知-运动或概念的图式 (schema) 对刺激作出反应. 但同化 (assimilation) 不能使图式改变或创新. 如果主体不能同化刺激, 就会有一个“顺应” (accommodation) 过程, 引起认知结构质的变化, 创立新的图式结构, 最终达到主体结构与客体结构间的同构. 生物个体的适应行为包括同化和顺应两种作用和机能, J. Piaget 把这两者的平衡和连续不断的发展看作整个心理智力的发生过程. 这种设想与 S. Grossberg 的适应共振神经网络的工作原理在原则上是很相似的.

S. Grossberg 的适应共振神经网络既简洁, 又能解释生理、心理现象, 给人以深刻的印象. 我们从中认识到这样一种可能性, 即能够把许多领域的研究结果和问题统一到一个简单的结构上来加以解释. 因此, 我们认为适应共振理论将有助于促进和帮助我们的大脑的研究和理解.

参 考 文 献

- 1 Grossberg, S. *The adaptive brain* I, II. London: North-Holland, 1987: 1—208

(下转第 101 页)

S+; 在 S+ 的镜像和一个新模式之间选择时, 蜜蜂绝大多数是选择 S+ 的镜像; 在一个新模式和 S+ 经旋转 90 度或 S+ 上下倒置得到的模式之间进行选择时, 蜜蜂不表示出优势选择。这种行为不是视觉模式识别系统的完全模糊, 而是对镜像的一种能力上的模糊。在学习过的模式不存在时, 蜜蜂容易接受左右转换的镜像。由于在许多情况下不是所有的花都是双边对称的, 识别系统的这种容许就肯定不是缺点。在某种环境下, 如在学习时一个花的半边在阴影里, 随后花又被完全照明; 或者花面对相反方向, 相反的一边有可能被遮掩, 这时就可以采取这种容许的模糊。当花最初看见时, 通常是从一侧, 只能看见部分; 或者花被遮掩了部分时, 也可以应用这类似的优点。镜像模糊在动物中从头足纲动物到哺乳动物都存在。在人类的婴儿识别小写字母“b”和“d”时就存在镜像模糊, 对于“b”和“p”以及“b”经旋转 90 度而得到的图像则不表现类似的模糊。因此, 这在蜜蜂学习记忆的研究中也具有普遍的意义。

四、蜜蜂学习记忆能力的差别

Martin^[14] 的实验中, 随着给食地点与蜂巢之间距离的增大, 蜜蜂的学习能力及记忆固化过程明显得到改善。一般来说, 近给食地点, “拜访”频率较高, 较高的学习频率将会提高从短期记忆至长期记忆的转化, 加速固化过程。但这里却与一般情况不同。Martin 认为能量考虑的解释比较合理, 但是也存在问题, 即训练刺激的一般化是否仍然可以看作是静止不变的。

一般认为低能力学习表现的原因是: 1) 在条件刺激和非条件刺激之间形成联想的能力较低; 2) 最初形成的没有固化成永久记忆。Brandes^[15] 等选择学习能力好和学习能力差的蜜蜂, 比较在单次气味刺激学习试验后其记忆的

时间过程。好的学习者表现出明显的两相时间过程, 即学习之后的瞬时较高速率的条件反应, 在随后的 1—3 min 内稍微减弱, 3—5 min 内又再次上升, 在 5 min 后的时间逐步稳定固化成长期记忆。差的学习者在对应的固化期和初始反应率是明显不同, 学习之后瞬时反应率较低, 1 min 内明显上升, 以后都偏低, 10 min 后逐步衰退。结果表明, 蜜蜂低能力学习表现的可能原因是最初形成的联想没有固化成永久记忆或固化率很低。此外, 糖水刺激触角敏化效应结果表明, 初始期 (不到 1 min) 不仅被学习试验的联想记忆控制, 而且受被用作非条件刺激的糖水刺激敏化效应的影响。差的学习者对糖水刺激敏化效应的灵敏度比较低。

参 考 文 献

- 1 Menzel R. In: Menzel R, Mercer, A eds, *Neurobiology and behavior of honeybees*, Berlin: Springer-Verlag, 1987: 310—325
- 2 Hertz M. *Z vergl Physiol*, 1931: 14: 629
- 3 Anderson A M. In: Wehner R ed, *Information processing in the visual system of arthropods*, Berlin: Springer-Verlag, 1972: 207—212
- 4 Anderson A M. *Anim Behav*, 1977; 25: 67
- 5 Anderson A M. *Anim Behav*, 1977; 25: 80
- 6 Cruse H. In: Wehner R ed, *Information processing in the visual system of arthropods*, Berlin: Springer-Verlag, 1972: 201—206
- 7 Gould J L. In: Menzel R, Meroer A eds, *Neurobiology and behavior of honeybees*, Berlin: Springer-Verlag, 1987: 298—309
- 8 Gould J L. *Anim Behav*, 1987: 35: 1579
- 9 Gould J L. *Anim Behav*, 1987: 35: 26
- 10 Dyer FC. *J Comp Physiol A*, 1987: 160: 621
- 11 Wehner R. In: Autrum H ed, *Handbook of sensory physiology*, Berlin: Springer-Verlag, 1981: 287—316
- 12 Gould J L. *Science*, 1986: 232: 861
- 13 Martin H, Heiny R. *Naturwissenschaften*, 1987: 74: 599
- 14 Brandes Ch, Frisch B, Menzel R. *Anim Behav*, 1988, 36: 981
- 15 Gould J L. *Anim Behav*, 1988; 36: 487

[本文于 1990 年 1 月 19 日收到, 3 月 29 日修回]

(上接第 97 页)

- 2 Grossberg, S. *Studies of mind and brain*. Boston: Reidel press, 1982: 49—53
- 3 Grossberg, S. *Neural dynamics of adaptive sensory-motor control—ballistic eye movement*. Amsterdam: North-

Holland, 1986: 21—28

- 4 Piaget, J. *The principles of genetic epistemology*. London: Routledge and Kegan Paul, 1972: 1—23

[本文于 1990 年 1 月 31 日收到, 3 月 1 日修回]