

能学习与记忆的复合胶质细胞-神经元 网络自动机——自旋玻璃理论

王宝翰

(中国科学院生物物理研究所)

徐京华

(中国科学院生物化学研究所)

李 薇

(中国科学院心理研究所)

仿生特征的智能机做为高技术的重要组成部分日益引人注目,而具有学习与记忆性能的智能机的研究是一个关键。一个共同的研究途径是从大量神经网络的活动规律中找出所需要的特征而加以利用。最近对 Hopfield 的神经网络研究已引起巨大关注,他仿袭神经元性能,结合神经生理学与心理学结果,提出一个令人兴奋的能学习与联想记忆的神经网络模型。能用于模式识别与早期视觉信息加工,按模型原理设计的电路能解决现代计算机不能解决的“旅行推销员问题”。更重要的是,根据报道已按模型原理用超大规模积成电路技术制成了高密度芯片。

在神经生物学研究中,人们长期忽视胶质细胞的作用,而最近积累的实验事实:(1)胶质细胞大多围绕突触裂 (Synaptic cleft) 神经元接触,(2)胶质细胞由低电阻的间隙连接 (gap-junction) 互相连接,(3)神经元放电引起胶质细胞慢去极化,反之胶质细胞去极化亦引起神经元放电,(4)胶质细胞可作为神经递质库,(5)更重要的是,最近用膜片-箝位 (patch-clamp) 技术发现胶质细胞是有动作电位的兴奋性细胞。它使我们相信胶质细胞的电活动密切关联到神经元的电活动,在此考虑基础上,我们提出复合的胶质细胞-神经元 (Glia-Neuron) 概念,设计出新的网络自动机,亦能记忆与学习。推广 Hopfield 理论使之更接近于生物学。我们所用的理论,也为近代凝聚态物理中的自旋玻璃理论提供新的模型。

复合的 Glia-Neuron 是神经元加上围绕着 Synaptic cleft 处的胶质细胞组成的集合体。每

个复合神经元 i 用 $S_i(\sigma_i, \mu_i) = \pm 1$ 描述它是否发放 (firing)。 $\sigma_i = \pm 1$ 为神经元的兴奋或抑制状态, $\mu_i = \pm 1$ 描述胶质细胞状态(去极化或超极化态),故我们的复合 Glia-Neuron 网络自动机为:

$$S_i(\sigma_i, \mu_i) = \begin{cases} 1, & \text{当 } \sum_{j \neq i} J_{ij} S_j(\sigma_j, \mu_j) - U_i \geq 0 \text{ 时,} \\ -1, & \text{当 } \sum_{j \neq i} J_{ij} S_j(\sigma_j, \mu_j) - U_i < 0 \text{ 时,} \end{cases}$$

其中 $J_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^M \vec{a}_i^{(r)T} B \vec{a}_j^{(r)}$ 表示前后突触相

互联系强度,按 Hebb 学说及 Cooper 规定,记忆图案被编码于 J_{ij} 上,定义一称为哈密顿的量 $\mathcal{H}$:

$$\mathcal{H} = -\frac{1}{2} \sum_{(i,j)} \vec{a}_i^T \vec{G}_{ij} \vec{a}_j + \sum_i U_i A \vec{a}_i$$

如果

$$(\delta \vec{a}_i, \sum_{j \neq i} G_{ij} \vec{a}_j - U_i A) \geq 0,$$

则系统随时间演化趋向稳定,保证网络具有联想记忆能力。

当系统有噪音干扰时,其长时间行为用自旋玻璃理论分析比网络,基本结果是:用序参量 Q_k 描述 Glia-Neuron 网络的状态与记忆图案重叠相相关的状况,则当高噪音干扰时,网络

处于某一不受“欢迎”的状态 $Q_k = \frac{\Delta_k(0)}{|D(0)|}$ 。当噪音降低到某一阈值 $\beta_c = 1/T_c$ 时,系统失稳有新的记忆状况出现,当 $\beta \rightarrow \infty$ 即无噪音时,我们求得 Q_k 的表达式,它们都较为复杂。

[本文于 1987 年 1 月 2 日收到]