

注意机制及其在模式匹配认知中的作用*

曾晓东 汪云九 齐翔林**

中国科学院生物物理研究所 视觉信息加工重点实验室, 北京 100101

摘要 引入注意函数, 定量地描述“集中注意”的程度. 它由系统内部的状态分布决定, 并调控系统演化的规则, 特别是调控系统对信息处理的策略, 可称为自组织注意(或策略性注意), 以别于一般所谓的选择性注意, 且不需引入附加皮层. 数值模拟表明, 具有自组织注意机制可以很快捷有效地完成匹配任务, 尤其是对输入有快速或突然变化时更为重要.

关键词 注意 选择性注意 自组织注意 策略 动态连接匹配 认知

注意是脑信息处理的一种主动策略, 具有选择性、竞争性、定向性等特点. 神经生理学和心理学实验表明, 注意并不是单一脑区的行为, 它与上丘、后顶叶、丘脑后结节等脑区的活动有关^[1,2], 并出现在信息处理的各个层次上, 即涉及从单个神经元到整个网络的各个层次. 因而, Britten 认为^[3]: “注意无所不在”. 这是脑对信息处理的特点. 脑对信息进行分层次大规模处理, 但在信息的传递通道上存在着瓶颈, 仅有少量信息能得到高层处理, 因而需要对输入信息有所选择. 另一方面, 脑还需对信息作出识别, 并据此产生相应的输出, 以便对运动等进行协调有效的控制. 故脑也要对处理策略、输出、乃至控制进行选择 and 调控.

尽管注意起如此重要的作用, 但至今尚未形成可普遍接受的理论. 其中一个关键问题是, 究竟注意系统是与数据处理系统分离的(即是否存在单独的注意皮层或区域), 还是两者紧密结合?^[4,5] 大多数关于注意的理论属于前者. 如 Crick 等^[6] 提出的“注意的探照灯理论”(spotlight metaphor), 认为注意就像探照灯一样在信息处理空间移动和搜索, 使被注意的区域(或特征)的信息处理得到增强, 而另外的信息则被削弱甚至忽略. 注意点转移时, 要先解除原注意, 并在新地点再形成注意. 在神经网络模型中, 又常引入单独的注意模块^[7,8].

Duncan 等^[5,9] 则把感觉、记忆、控制及肢体运

动等诸系统作为一个整体, 认为不存在单独的仅用于注意的系统, 甚至注意的各功能组分(如裁剪、竞争、整合等)也没有显著的定位; 选择性乃是多个脑区相互竞争、协调的结果. 他们提出了注意的整合竞争假设(integrated competition hypothesis), 认为注意是解决这些竞争的许多神经机制的一种实现特性.

本文支持与 Duncan 等相近的观点. 注意与识别都是同一个信息处理系统的功能, 两者共同起作用, 密不可分. 特别是注意对信息处理策略(即系统演化规则)进行调节, 从而加速识别过程, 或提高识别的成功率. 从这种观点出发, 我们提出存在着由识别的自组织过程自身所决定和表达的注意机制, 它控制着系统的某些结构或功能, 从而达到对处理策略的调控. 我们称之为自组织注意机制, 因它与通常的对信息的选择性注意不同. 本文以随时间变化的模式匹配过程为例进行说明, 首先阐述与模式匹配任务相关的动态连接匹配的收敛机制和消散机制, 然后提出该匹配系统中注意的度量方法, 及其对信息处理规则的选择性调控作用. 由系统的内部功能状态定义一个“注意函数”, 用它调控识别演化过程.

1 认知的动力过程模式

1.1 动态连接匹配算法

动态连接匹配算法是解决匹配问题的神经算法

2002-03-08 收稿, 2002-08-19 收修修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 39893340-06; 69835020; 30170231)及中国科学院脑-智中心项目资助项目

** 联系人, E-mail: qixl@sun5.ibp.ac.cn

之一。其主要思想是：两个待匹配的图像(如感知模式及记忆模式)之间的变换关系是通过它们之间的投射连接分布来表示的，求解则通过该投射分布在某些规则指导下的自组织演化过程来实现¹⁾。

设有场景 A 及记忆模板 B ，分别由一组特征检测器的特征 $e_A(a)$ 和 $e_B(b)$ 表示(其中 a, b 分别表示 A, B 中像素的坐标)。在 (a, b) 间有动态连接 $w(a, b; t)$ ，满足约束条件 $w(a, b; t) \geq 0$ ，且 $\sum_a w(a, b; t) = 1$ 。其演化方程形式上可写为

$$\dot{w}(a, b; t) = \lambda[-w(a, b; t) + K(a, b; t)], \quad (1)$$

其中 λ 为常系数； $K(a, b; t)$ 为相互作用项，使动态连接匹配成为自组织过程。

1.2 收敛机制

若匹配是静态的或准静态的(即输入图像随时间不变或缓慢变化)，则相互作用项 $K(a, b; t)$ 的功能主要是使 w 迅速收敛到正确的投射关系，不妨称其为收敛机制，而将相应的 K 记作 $K_c(a, b; t)$ ，称为收敛演化函数。我们前已导出了 $K_c(a, b; t)$ ，它反映了匹配图像的局部相似性及变换的局部几何约束对动态连接演化过程的指导规则。最重要的一点是其中引入了点偶 (a, b) 自身及其邻域满足几何约束的所有点所组成的集合 $\{(a, b)\}$ ；而此集合上投射强度之总和(并归一化)称为邻域作用势，记作 $N(a, b; t)$ 。 N 越大则 a 投射到 b 的可能性越大。若令 N 为上述投射的加权平均，即

$$N(a, b; t) \equiv \mu^{-1} \sum_{(a', b') \in \{(a, b)\}} [G(a, b; a', b') \cdot w(a', b'; t)], \quad (2)$$

其中 μ 为归一系数。一般权重 $G(a, b; a', b')$ 随 (a', b') 与 (a, b) 的距离而减小。为简单起见，取匹配图像为随机点灰度图，此时相似性函数可简单地取为

$$H(e_A(a), e_B(b)) = \begin{cases} 1 & \text{若 } I_A(a) = I_B(b) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (3)$$

于是有动态连接的演化方程为

$$\begin{cases} K_c(a, b; t) = \frac{L(a, b; t)}{\bar{L}'_b(b; t)} \cdot w(a, b; t) \\ L(a, b; t) = N(a, b; t) \cdot H(e_A(a), e_B(b)) \\ \bar{L}'_b(b; t) = \sum_{a \in A} [L(a', b; t) \cdot w(a', b; t)]. \end{cases} \quad (4)$$

1.3 消散机制

若场景是随时间变化的，即在匹配模式发生变化时进行匹配，特别是输入是高速变化或有突变时，生物识别系统应有及时消去原匹配关系的机制(不妨称其为消散机制)，以利于向由收敛机制作用所产生的新匹配关系转移，及时迅速地对随时间而变的图像进行有效的匹配。应该指出，即使输入图像是缓变的，引入消散机制也是有益的。为了避免计算容易陷入局域极值，消散机制甚至是必需的。

记 $K(a, b; t)$ 中对应于消散机制的函数为 $K_d(a, b; t)$ (称为消散演化函数)。在数理方程中，其类比就是扩散过程，可套用其法构造 K_d 。不过，为了计算和表观上的方便起见，这里取

$$\begin{cases} K_d(a, b; t) = \frac{L(a, b; t)}{\bar{L}'_b(b; t)} \cdot w_0 \\ \bar{L}'_b(b; t) = \sum_{a \in A} L(a', b; t) \cdot w_0, \end{cases} \quad (5)$$

其中 $w_0 > 0$ 为小正数， $L(a, b; t)$ 定义同前。可证，若在(1)式中令 $K(a, b; t) = K_d(a, b; t)$ ，则 $t \rightarrow \infty$ 时， w 将趋向于均匀。

1.4 调控的选择

这样，在对变动图像的匹配过程中，系统有两种机制起作用，即形成恰当的连接分布的收敛机制，以及为实现新的匹配而消除原有匹配的消散机制。系统则通过某种指导规则选择使用这两种机制。不妨取

$$K(a, b; t) = \alpha \cdot K_c(a, b; t) + \beta \cdot K_d(a, b; t), \quad (6)$$

其中系数 α 和 β 可随时间变化，表示对演化规则的选择性也随时间而改变，如，当 $\beta = 0$ 时即为纯粹的收敛过程，而 β 很大时则主要表现为消散过程。

1) 曾晓东. 视觉感知的神经机制及其模拟研究. 中国科学院生物物理研究所博士论文, 1998

1.5 自组织注意机制及其对匹配过程的调控

事实上,生物识别过程存在着多种由系统内部状态或识别系统更高层决定的控制,它们对系统所表达的信息、神经元发放及内部结构的变化进行调控,而注意正是这样一种重要的选择性调控机制的表现^[1,2],故可认为(6)式中参数 β 与“注意”有关.显然,它与信息处理系统内部信息与结构的自组织过程有关,是该处理系统的功能之一,为系统的内部功能状态自身所表达,而无需引入另外的专门功能皮层.我们将这种注意机制称为“自组织注意”,以区别于现有文献中的选择性注意.下面我们就以动态连接匹配过程为例进行讨论.

演化过程中系统对输入图像的匹配程度即其有序度,其最简单的数学描述为二次型.1.1节中定义的邻域作用函数 $N(a, b)$ 就是一种局部有序度的度量,而描述全局有序度的量则可简单地取其在全空间的加权平均值,即取为 w 的一个泛函,简记作 s ,例如可取为(全局)匹配函数 $E(t) = \mu^{-1} \cdot \sum_{a,b} (w \cdot L)$.在灰度图情况下,因 H 取0或1,就有

$$s(t) \equiv \mu^{-1} \cdot \sum_{a,b} [w(a, b; t) \cdot N(a, b; t)], \quad (7)$$

其中常数 $\mu = \sum_{a,b} w(a, b)$ 为归一化系数(等于模板 B 的结点数).当系统处于匹配状态时, a 与 b 一一对应(即到记忆皮层的每一点的投射中有且仅有一个投射为1),其对应的 $N(a, b) = 1$,而来自其他各点的投射均为0,故此时 $s = 1$,取得最大值;而当动态连接为均匀分布时, s 取最小值.

显然,匹配过程中系统所采取的演化策略应该与这种有序度有关.例如,当 s 较大时匹配程度较好,因此应主要采用收敛机制,而避免消散机制,即 β 应取较小值;特别地,当 $s = 1$ 时,系统实现完全匹配,其时应有 $\beta = 0$.反之,当 s 很小时系统处于匹配过程初期,应使用消散机制以避免陷入局域极值,或从原有匹配关系中解脱出来,于是可取 $\beta \rightarrow \beta_0$ (一个较大的正值).另一方面,如果有有序度 s 突然急剧下降,表示输入图像有较快变化,需要较强的消散机制以便迅速消除原匹配关系.由此,可取 β 为

$$\beta(t) \equiv \beta_0 \cdot (1 - s(t)) + \beta_1 \cdot \Theta \left[- \int_0^t s(t - \tau) \cdot g(\tau) d\tau \right], \quad (8)$$

其中 β_0, β_1 为正的常数; $g(t)$ 随时间衰减,例如可取 $g(t) = \exp(-t^2/\sigma^2)$;而 $\Theta(x)$ 为阈值函数

$$\Theta(x) = \begin{cases} x & \text{当 } x \geq 0 \\ 0 & \text{当 } x < 0. \end{cases}$$

由此可见,有序度 s 不仅描述了匹配过程中系统的功能状态(即匹配程序),更用来调控策略选择性的参数 β ,它确实反映出在认知过程中“注意集中”的程度(这里“注意力集中”就是通常所理解的含意),因此我们又把 s 称为“注意函数”,而(8)式则表现出注意对系统演化策略选择调控.由于它只由系统内部状态决定,而与外界输入无直接关系,因而这种注意机制就可称为“自组织注意机制”.

2 数值模拟结果

我们作了大量模拟试验,分别模拟了3种匹配过程,即:(i)初始连接分布具有小的随机扰动;(ii)匹配目标在场景中向右平移一格;(iii)匹配目标在场景中的位置突然发生大的跳动.模拟分两组,一组具有注意调控,另一组则没有调控.对所有这两组模拟都进行了比较.(由于篇幅所限,本文主要阐述注意机制的理论部分,模拟结果可参看文献[10].)结果表明,具有注意控制的匹配过程更快更准确,优越性十分明显.

3 讨论

本文以图像匹配的过程为例,提出了一种模拟生物信息处理的自组织过程起作用的注意机制,称为自组织注意机制.不需引入一个在信息处理系统之外的附加的注意皮层,注意及其动态变化由信息处理系统内部的状态决定.其作用主要是对匹配过程的演化规则进行调控选择.

将这种自组织注意与常说的对信息的选择性注意进行比较,可知:

(1)产生方式不同.匹配过程中系统存在两种不同形式的状态分布.一种即感受器及初级视皮层的神经元的发放分布等,是对外界输入刺激的直接表达;另一种,如动态连接强度分布,则体现了外界刺激下系统所处的功能状态(这里即对输入的识别程度).对信息的选择性注意主要是由第一种分布驱动的,而自组织注意机制则是由后一种分布驱

动的。

(2) 作用机制不同。识别系统由两部分组成, 即: (i) 神经元的发放状态及突触连接强度, 它们反映出被处理的外部及内部信息; (ii) 神经元发放及突触强度的变化规则(包括系统对信息处理的策略)。选择性注意是对前者(信息自身)进行选择, 而自组织注意则是对后者(演化规则及策略)进行选择和调控。

(3) 作用的时空特性不同。信息选择性注意主要是一种稳态作用机制, 是对信息表达的空间分布的某种选择性调节。而自组织注意则是一种动态作用机制, 它描述的是系统的自组织过程演化策略随时间的变化。故系统处于稳定的平衡状态(此时自组织注意值 s 保持不变, 从而 β 不变), 自组织注意不产生作用。

另一方面, 两种主要机制之间也必有内在联系。如在匹配过程中, 自组织注意机制的结果也导致某种空间信息的选择性, 即: 当注意函数 s 增大时, 收敛机制起主导作用, 动态连接分布的有序性增加, 相当于系统在集中注意力(focus attention)。当注意函数 s 达到最大值, 匹配完成; 而当注意函

数 s 迅速下降时, 消散机制起主导作用, 系统表现为选择性注意的解除。

参 考 文 献

- 1 Desimone R, et al. Neural mechanism of selective visual attention. *Annu Rev Neurosci*, 1995, 18: 193
- 2 Kastner S, et al. Mechanisms of visual attention in the human cortex. *Annu Rev Neurosci*, 2000, 23: 315
- 3 Britten K H. Attention is everywhere. *Nature*, 1996, 382: 497
- 4 Posner M I. The attention system of the human brain. *Annu Rev Neurosci*, 1990, 13, 25
- 5 Duncan J, et al. Competitive brain activity in visual attention. *Current Opinion in Neurobiology*, 1997, 7: 255
- 6 Crick F. The function of thalamic reticular complex: The searchlight hypothesis. *Proc Natl Acad Sci*, 1984, 81: 4586
- 7 Niebur E, et al. A model for the neuronal implementation of selective visual attention based on temporal correction among neurons. *J Computational Neurosci*, 1994, 1: 141
- 8 Wiskott L. Face recognition by Dynamic Link Matching. In: Sirosh J, et al. eds. *Lateral Interactions in the Cortex: Structure and Function*, 1996, Chapter 11
- 9 Duncan J, et al. Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, 1998, 96: 433
- 10 Zeng X. Attention mechanism and its role in invariant pattern recognition. *Neurocomputing*, 2001, 38-40: 1611