

1 生物神经网络与人工神经网络的异同

本部分将整合课上所讲、网络资料、前沿论文的内容，从整体和局部的角度分析生物神经网络与人工神经网络的差异。

1.1 整体架构和具体实现差异

生物神经元和人工神经元都能对每个输入的信号进行处理以确定其强度，他们都能够实现一个从输入到输出的映射。生物神经元通过轴突、树突等结构实现信号的传递，而人工神经网络则直接通过晶体管阵列的通道，以电子电路的方式，通过电压值的大小变化对这一过程进行模拟。

生物神经元中大量的突触具有不同的性质和强度，人工神经元中可以对输入加权求和，来模拟生物神经元中突触的强度及传递特性。通常情况下，人工神经元可以接受来自上层神经层的全部输入，对其进行加权求和，并向特定层（通常是下一层）产生单个输出。^[1]

生物神经元中能够产生不同强度的膜电位，但是并不是所有的膜电位都能激起神经元的冲动，生物神经元内部动作电位有着自己的阈值。另外生物神经网络并不是实现了完全的线性变换，其中有着大量的非线性成分。在人工神经元中，现行的办法是通过激活函数对这两个机制进行模拟。一方面，通过调节激活函数自身的形式，它能够根据需求表达多种我们需要的非线性形式；另一方面，它也能够通过类似于门函数的方式实现不同阈值的处理。

1.2 时间特性差异

通过课程所学，我们知道生物神经元的反应速度是远远慢于当代以晶体管为构建骨架的人工神经元的。这种缓慢一方面体现在生物神经元需要更多的时间才能通过突触传递刺激，另一方面也体现在生物神经元有着疲劳期，即当刺激脉冲实现之后，被刺激的神经元并不能立即恢复到它原有的、被刺激前的状态，需要经历一定的反应时间才能再次接受刺激，而晶体管不需要这样一种反应时间。

究其根本，此差异是因为生物神经网络不但通过电信号传递信息，还要借助化学信号和一些生物神经机制，比如说在突触处要通过神经递质将冲动从突触前膜传递到突触后膜；而这样就造成了时间上的延迟。

1.3 体积和能量消耗差异

生物神经元作为天然元件，无论是从空间体积占用和能量消耗的角度来看，其都远小于人造电子元器件。实际上，即便是在现代超大规模集成电路已经很普遍架设的情况下，单位体积内能够容纳的晶体管数量仍然是完全无法和生物神经元相比的。这样的结果就是虽然生物神经元在信息处理上慢于晶体管，但是在同样时间内，在总容量相等的作用器官中，天然元件比人造元件所能完成的动作数目要多上 4 个数量级左右。

1.4 信号处理差异

生物神经元在真实的神经网络中既使用数字信号（如通过离子浓度控制的动作电位），也能使用模拟信号；而人工神经元使用的是数字信号。从准确度的角度来看，生物神经元相对低于人工神经元，但是整个神经系统所形成的架构却有着非常高的可靠性。究其原因，生物信息系统本质是统计性质的，带来了较低的算术准确度水平，却得到较高的逻辑可靠度水平，表现在局部神经元信号传递出现误差不会影响整体的表现。相应的，计算机所需要达到的准确度水平，要比这个计算问题的物理本质所需要的准确度水平高得相当多，因为人工

神经网络并不存在一个整体调整和校准的机制，其在计算过程中每个步骤所产生的误差不但会叠加，前面各个部分的误差还会被后面的部分所放大。从这个角度来讲，生物神经网络系统有着更高的鲁棒性。[7]

1.5 信息传递模式差异

生物神经网络在信息传播的方式上有着较高的自由度和灵活度。举例来说，在生物神经网络中，信息传播的方向是可以灵活调整的，比如神经递质在特殊情况下可以通过突触后膜返回到突触前膜，这种特殊的传递方式赋予了生物信息系统更多的可能性。再比如，同样一个突触小体可以释放出不同类型的神经递质，比如兴奋性递质和抑制性递质，而人工神经网络目前只能通过数值来模拟这种兴奋或抑制。[3]

从整体架构上来讲，生物神经网络的拓扑结构远远复杂于人工神经网络，生物神经网络表现为一种网状结构，而人工神经网络通常是分层结构，层内的神经元之间并没有连接，所以也就没有实现一种层内传递参数的机制；但是真实的生物神经网络的神经元之间的连接模式非常的多元化。

而且生物神经网络具有发育性，表现在生物神经网络是存在着一个不断进化的过程的，神经元之间的连接随着生命体的发育会发生一定的变化，神经元互相影响的模式也会发生改变，原本连接紧密的神经元可能会断开连接，新的突触也会随着生命体学习的过程建立。[2] 人工神经网络虽然也有 dropout 等机制，但是在很多方面还是很难真正意义上模仿和实现生物神经网络的真实功能。

2 昆虫的视觉神经回路及其机制与灵长类的异同

2.1 昆虫的视觉神经回路

结合昆虫脑结构概念图，基于光学显微镜的昆虫视觉系统研究 [6] 和昆虫视觉系统的运动模型 [4]，我手绘了如下的昆虫视觉神经回路简图1。

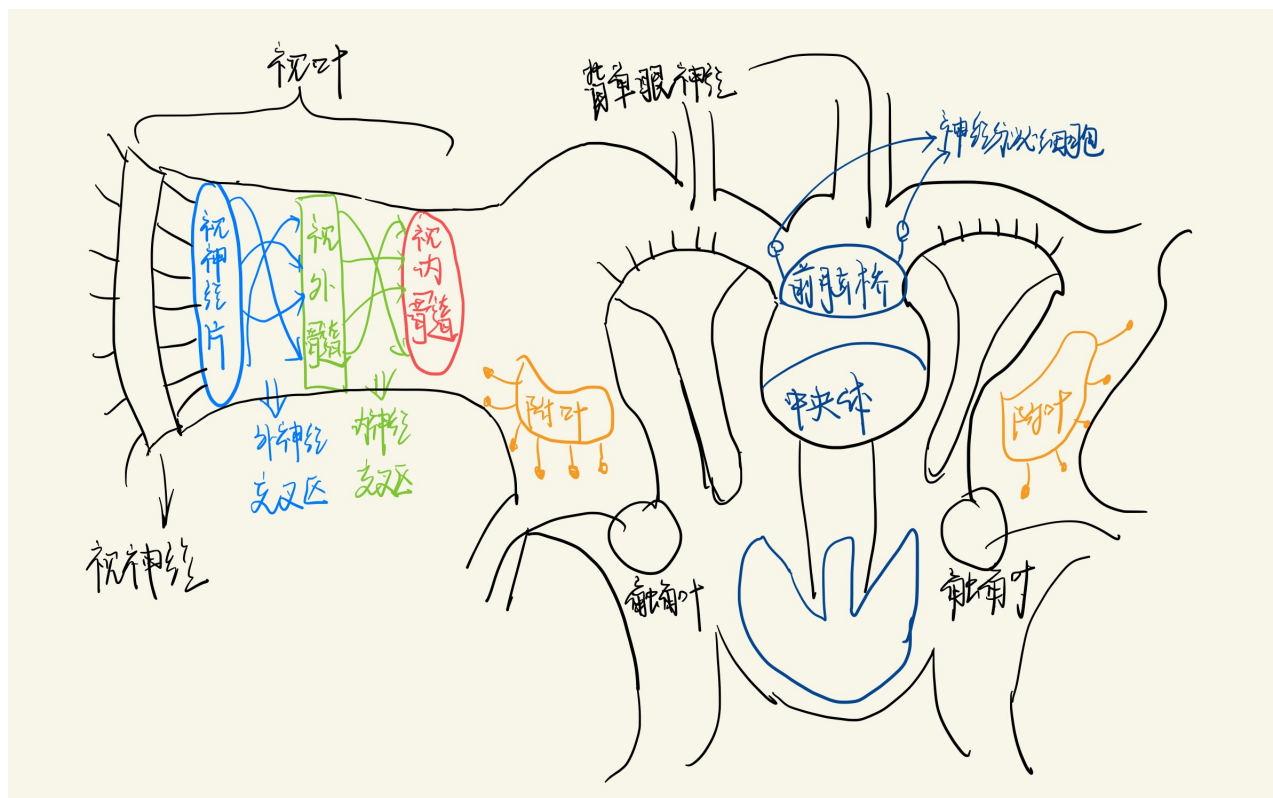


图 1: 昆虫视觉神经回路

2.2 与灵长类的异同

2.2.1 感光细胞差异

上一问的视觉神经回路中1有着对昆虫形成视觉信号的重要模块，但是实际上在进入视神经之前，首先要通过感光器官接收来自环境的光信号，而在这一环节中，昆虫和人类之间就有着较大的不同。

复眼是昆虫的主要视觉器官已经被人所熟知，实际上正是这样一种独特的结构赋予了昆虫更为优秀的动态视力。不过昆虫也是具备单眼的。资料表明，单眼可以提高昆虫复眼所感知的视觉刺激的兴奋水平部位，昆虫的单眼可以分为两类，即背单眼和侧单眼。背单眼有大量的网膜细胞，紧密排布在一起，每个网膜细胞大都有一个轴突，穿过单眼的基膜，终止于单眼后面的突触丛处，与脑的次级神经元形成突触。背单眼是一种激发器官，它可以提高昆虫复眼所感知的视觉刺激的兴奋水平，来自于背单眼的信息可以用于调整复眼对于刺激的反应 [8]。

2.2.2 视锥细胞差异

通过课上所学，我们知道人类和其他灵长类动物只有三种视锥细胞和两大类对立颜色视网膜神经节细胞，而大多数蛾、蝶类生物有着高达五种视锥细胞；蜜蜂还能直接通过视觉神经系统感受到紫外线的存在以及强弱。从这一角度来讲，灵长类和昆虫眼中的世界并不是完全一致的。昆虫进化出更复杂的视锥细胞赋予了他们更好地识别色彩鲜明目标的能力。

2.2.3 每度视觉差异

每度视觉可以用来表征生物的视觉清晰度。其定义为生物在视线变模糊前，每度视角内能辨别的黑白条周数，单位为周（/度）。人眼的空间频率为 60 周/度，而鹰和一些其他猛禽能从数千英尺的高空辨认出小猎物，这是由他们的每度视觉多达 140 周。通常意义上，当一个人类的每度视觉不超过 10 周时，他可以被视为盲人，但是大多数昆虫的每度视觉只有 1 周，也就是说昆虫的视觉清晰度是相当低的。

3 由视觉系统神经回路的启发，设计新的神经网络模型

Reddy 等人 2020 年发表的文章 [5] 指出，尽管卷积神经网络在视觉识别任务上取得了卓越的表现，但它们在有些任务上仍然落后于人类的视觉系统。比如，神经网络对于微小的对抗扰动十分脆弱，而人眼对于视觉刺激上的微小扰动则非常鲁棒。

受到他们论文内容的启发，考虑到视网膜对视觉刺激有着空间上的非均匀空间采样机制，我的设计是在现有的神经网络基础上增加一个“视皮层注视滤波（VAF）”模块，具体的结构如下。

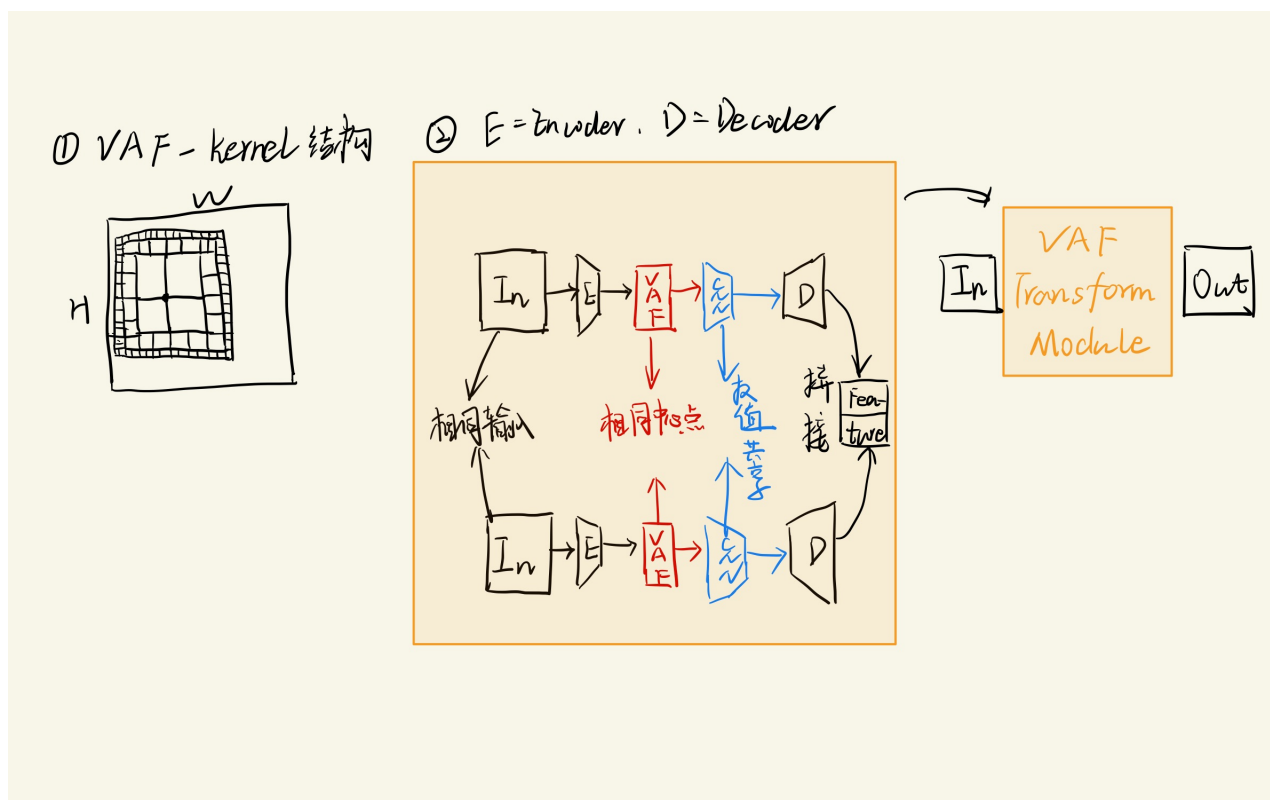


图 2: VAF 模块局部细节和整体概念

其中，图①一展示了一个 VAF 核的计算方法。一个 VAF 核类似于一种池化操作，但是他内部有着多个池化步长。为了模拟视网膜的非均匀空间采样性质，一个 VAF 设定了一个中心，在中心处池化步长较大，而随着到中心点距离的增加，池化步长相应减小。这样做的好处是，对于视觉中心位置所关注到的信息，受到扰动的影响会更小。

之后，在图②中，将 VAF 模块和传统的方法结合起来，以组成一个可扩展和复用的模块。对于任何一个输入，可以通过传统的 MLP 形式 Encoder 将其 encode 成一个 feature，之后在此基础上，通过 VAF 层，来进行一次特征提取，之后再通过卷积层和 Decoder 解码得到另一张 feature，以实现端到端的输入输出。这样的一个模块可以被抽象成为一个 VAF Transform Module，并在多个地方得到移植和应用。

参考文献

- [1] Radoslaw Martin Cichy, Aditya Khosla, Dimitrios Pantazis, Antonio Torralba, and Aude Oliva. Comparison of deep neural networks to spatio-temporal cortical dynamics of human visual object recognition reveals hierarchical correspondence. *Scientific Reports*, 6(1):27755, 2016.
- [2] V. M. Eskov, V. F. Pyatin, V. V. Eskov, and L. K. Ilyashenko. The heuristic work of the brain and artificial neural networks. *Biophysics*, 64(2):293–299, 2019.
- [3] Dwight J. Kravitz, Kadharbatcha S. Saleem, Chris I. Baker, and Mortimer Mishkin. A new neural framework for visuospatial processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(4):217–230, 2011.
- [4] Gilbert D McCann. The fundamental mechanism of motion detection in the insect visual system. *Kybernetik*, 12(2):64–73, 1973.
- [5] Manish V. Reddy, Andrzej Banburski, Nishka Pant, and Tomaso A. Poggio. Biologically inspired mechanisms for adversarial robustness. *CoRR*, abs/2006.16427, 2020.
- [6] Nicholas J Strausfeld. The organization of the insect visual system (light microscopy). *Zeitschrift für Zellforschung und mikroskopische Anatomie*, 121(3):377–441, 1971.
- [7] Gido M van de Ven, Hava T Siegelmann, and Andreas S Tolias. Brain-inspired replay for continual learning with artificial neural networks. *Nature Communications*, 11:4069, 2020.
- [8] 刘红霞, 彩万志. 昆虫单眼的结构和功能. *昆虫知识*, 2007.