

A Memory Mechanism Based on Strongly Connected Neuron Network

Jingjing Xu^{1,2,a}, Song Ge¹ and Shengyong Xu^{1,b,*}

¹Electrical Department, Peking University, Beijing, China

²School of Microelectronics, Shandong University, Jinan, Shandong, China

^axujj@sdu.edu.cn, ^bxusy@pku.edu.cn

*corresponding author

Keywords: Memory, Two-dimension Code, Neuron network, Education

Abstract: Several memory models have been presented, including the working memory concept, the associative memory, the parallel distributed processing model, the model for adaptive control of thought and the concept for retrieving effectively from memory (REM). Recently, more efforts were made in gene and molecular analysis, synapse transition, sleeping behavior, self-resonating and so on. Yet to date it is still not clearly whether the memorized data in a brain are stored in a neuron network or synapse, or in molecules, or even in nuclear spin. Here we present a model for the material foundation of memory. We believe that the basic information data of memory in a brain are stored in the form of 2D codes. Each 2D code consists of many neurosomes that are strongly connected with electrical synapses. This model indicated that the memory capacity was limited in brain, which may help us to explore better education strategies.

基于强链接关系的神经元网络的脑记忆机制

徐晶晶^{1,2,a}, 葛松¹, 许胜勇^{1,b,*}

¹电子系, 信息科学技术学院, 北京大学, 北京, 中国

²微电子学院, 山东大学, 济南, 山东, 中国

^axujj@sdu.edu.cn, ^bxusy@pku.edu.cn

*通讯作者

关键词: 记忆, 二维码, 神经网络, 教育

摘要: 目前大脑如何记忆的问题, 科学家们提出了多种记忆机制模型, 包括工作记忆模型、关联记忆模型、平行分布式处理模型、自适应控制模型和有效检索模型等。近几年, 该领域主要关注在基因和分子水平的分析、突触转化、睡眠行为和自震荡现象等方向。然而至今为止, 关于记忆数据存储的位置是神经网络、突触、分子还是核自旋中这一关键问题, 仍没有定论。本文提出了一种新的基于现有实验现象的记忆模型, 即记忆的数据存储在由电突触定义的强链接关系所连接的神经元二维网络中。这种记忆模型支持记忆有限性的概念, 可能为教育理念和教育方法的改善提供新的理论指导和方向。

1. 引言

“记忆如何存储和提取?” 这个问题至今未解。近几十年来, 人们观察到突触的长时程记忆现象, 对此, Wilder Penfield [1], Geoge Miller [2], Richard Atkinson & Richard Shiffrin [3], Fergus Craik & Robert Lockhart [4] 等人提出了各种记忆模型。Alan Baddeley 和 Graham Hitch

首先提出了工作记忆的概念[5]。Jerome Raaijmaker 和 Richard Shiffrin 提出了联想记忆模型[6]，James McClelland, David Rumelhart 和 Geoffrey Hinton 提出了平行分布式处理模型[7]，John Anderson 则提出了自适应控制模型[8]，Shiffrin 提出的记忆有效检索模型至今得到许多应用[9]。近年来，该领域主要关注在基因和分子水平的分析[10]、突触转化[11]、睡眠行为[12]和自震荡现象[13] 等方向。然而至今为止，关于记忆数据存储的位置是神经网络、突触、分子还是核自旋[14] 中这一关键问题，仍没有定论。

除了人类，猿猴、大象、海豚和乌贼都是众所周知的很聪明的动物，它们拥有有限的智力和记忆容量。有些老鹰知道如何将动物腿骨从高空摔到地上的岩石上将其摔碎以食其骨髓。甚至是一只小小的蚂蚁，似乎也能记住蚁穴的位置，甚至可以在大量蚁群活动中保持协调与一致。因此，人类和其他动物大脑的记忆机制可能遵循某种普遍的规律。

2. 记忆模型

2.1. 基于神经元二维码的记忆模型

基于目前关于大脑中神经元和突触的基本事实，我们提出了新的记忆模型。

当一个神经元被刺激时，它的胞体、树突和轴突都会被激发，这个过程伴随着跨膜蛋白通道打开后跨膜离子流的产生、以及神经递质释放到突触等过程。神经元之间的连接关系有三种：化学突触、电突触和混合突触。化学突触中，由于突出间隙的存在，两个神经元之间的连接比较松散，被定义为“弱连接”。电突触中，两个神经元末梢被蛋白质组紧密地绑定在一起，被定义为“强连接”。而混合突触中，既有化学突触的部分又有电突触的部分，强度应该介于二者之间。研究表明，这三类突触之间是可以相互转化的[15]。在混合突触上的实验结果表明，经过电突触后神经信号几乎没有延时，而经过化学突触的信号会延时 1-2ms。所以，这里强调的“强连接关系”意味着神经元之间是通过电突触连接的，而具有强连接的关系的神经元群体能够同时兴奋。

人类大脑皮层的表面积非常大，而神经元在大脑皮层中可以分六层，每一层神经元均呈二维层状结构分布[16]。比如，一张图片的视觉信息通过视网膜上视杆细胞和视锥细胞的光敏传感器，被转化为神经电脉冲，随后这些电脉冲经由轴突阵列传导到大脑视觉区，被一组视皮层上的二维神经元胞体网络接收。类似地，一串声音、一种味道、一次压触的信息均在大脑皮层的特定区域以一组兴奋的神经元胞体网络得以表现。

我们认为，信息储存在同一层内具有强连接关系的神经元群体中，因为它们的空间形成了二维拓扑结构，故简称其为“二维码”。也就是说，在脑内，具有强连接关系的神经元组成的二维码是脑内信息记录、表达和记忆的基本单元和载体。例如，图片的视觉信息被记录并通过视网膜上的视杆细胞和视锥细胞将其变神经成电脉冲。然后电脉冲通过轴突阵列传递，最后被大脑皮层中的二维神经细胞阵列接收引起特定的兴奋图案。类似地，声音，气味，身体接触等的信息也表现为在皮质特定区域的神经细胞上激发兴奋的模式。

这一点可以从古老的生物水螅的神经系统中得到一些佐证。目前已经发现的水螅身上有四个互不干扰的神经网络，每个神经网络均由大量神经元组成。这四个神经网络分别负责不同的运动模式。当某一网络中的神经元受到刺激时，会激起该网络中所有神经元的兴奋，从而引发水螅特定的运动方式 [17]。也就是说，对于水螅而言，运动信息存储在它的神经网络中，这可能是记忆的雏形。该想法很符合这样一个认知：神经元细胞没有智慧，理论上只有兴奋和不兴奋两种状态，单个神经元不可能有记忆功能。

2.2. 记忆的形成和调取

忆的形成，也就是强连接的形成需要两个条件：（1）刺激条件：相邻或者相连接的两个神经元同时兴奋，并且向对方传递电刺激信号，则二者间开始形成强连接；（2）兴奋持续条件：兴奋在神经元层与层之间的来回振荡，维持兴奋过程，增加兴奋次数。

第一点的解释：起初，神经元之间的关系是具有大量的不连接或者松散连接。据查阅，在一个脊髓细胞上可染出 286 个终扣（轴突末端膨大结构，多以游离形式出现在大脑神经细胞之间的神经丛中，若其形成突触则为突触前膜）；在不同的神经元上，树突的侧棘形态和数量都不同。相较而言，大脑锥体细胞树突上的侧棘数量多得多，且结构也复杂得多。人的一个锥体细胞的侧棘可达 3497 个，而家兔的仅有 1000 个[18]。当信号来临导致某些神经元同时兴奋时，它们就会通过树突和轴突向外传递兴奋。只有当两个神经元几乎同时向对方发出兴奋信号时，它们之间的连接突触同时接收来自两个神经元的电脉冲，然后连接处接收到的信号将被极大地加强，它们之间才开始形成较强连接。在连接突触区可能存在局部电场的阈值，超过该阈值会发生化学突触或混合突触到电突触的转换。例如，阈值高于由单个电脉冲产生的电场值，但小于该值的两倍。若兴奋只是单向传递则不会促使连接突触区发生变化。与实际情况相比对，形态学上发生的变化就是建立突触连接以及化学突触或混合突触转变为电突触的过程。

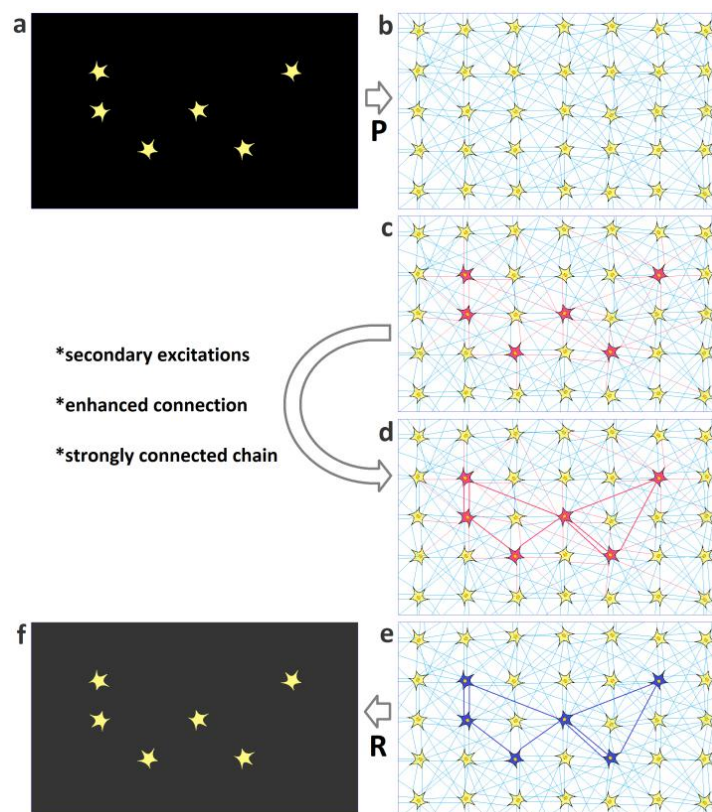


图 1 信息二维码的形成、存储和调取示意图：（a）在单次刺激中感觉层中被激发兴奋的神经元，它们直接接收并显示来自身体感受器传来的电脉冲信息；（b）记忆层中的原始神经元阵列，其中神经胞体之间通过化学突触或混合突触进行弱连接（浅蓝线显示）；（c）当感觉层中被激发兴奋二维码被线性投射到记忆层时，（用“P”和箭头突出显示），记忆层中相应的神经胞体被激发兴奋；（d）同时兴奋的两个神经元间开始形成强连接，即弱连接开始向强连接关系的电突触转变；（e）兴奋在两个记忆层之间往复振荡延长了兴奋时间和刺激次数后，神经元之间的强连接被慢慢固定（深蓝色显示），形成用于临时或长期记忆的稳定二维码；（f）一旦被触发，作为信息载体的神经网络被同时激发，兴奋二维码被投影到分析层上，从而发生回忆，即记忆的调取

第二点的解释：正如前面所讲，神经元的兴奋只维持 1ms，这个短暂的时间不足以使神经元间的连接方式发生改变。但是大脑拓扑结构中，双层或多层神经元的存在，能够使神经元间的兴奋在层与层之间来回激发振荡，以维持足够的兴奋时间来形成强连接。

具备这两个条件之后,关于某一特定信息的神经元间就会建立强连接关系,从而形成记忆,该过程见图 1 所示。外来刺激的强度和重复次数决定了信息二维码中神经元间的连接强度,也决定了这段信息的存储时间,即记忆的时间。

记忆形成之后,其中任意一个被调取指令激发后都会引起与之强关联神经元(记忆的二维码)的激发,并投射到分析层上,形成记忆的回现。记忆调用时,应该存在“关键”神经元(组),当主意识要回忆跟这个关键词相关的记忆时,实际上能调用很多跟这个关键词有关的场景,这些场景在脑中部分地或者全部地闪现,主意识会根据其他关键线索快速筛选出想调用的具体场景并加以强化。

2.3. 记忆的衰减、缺失、修正和加强

不管是从行为学还是生理学角度,记忆具有巩固、衰减、缺失和修正等特点是很显然的现象和事实。我们认为这些过程的生理学基础就是不同突触间的转化过程。

强连接关系的神经元二维码是记忆载体,连接强度决定了记忆的强度和ación。在自然情况下,随着时间的推移,强连接关系会弱化,与已有的研究结果相符[19]。当载有信息的神经元网络中的一个神经元因为时间退化、受损或死亡失去与其伙伴的强连接时,会导致记忆的衰减和缺失[20],对于长期记忆来说,这个逆转过程的阈值要高得多。而如果增加刺激的次数或者强度,则会加强强连接关系的强度,使记忆加深,增长记忆时间。比如,如果在一段时间内学习过程重复了足够的时间和次数,那么信息就会从短期记忆转变为长期记忆,这个过程所需要的时间和次数阈值取决于二维码的复杂程度。

记忆在形成过程中也会发生错误,主要发生在兴奋二维码在层间映射时,两个记忆层之间的兴奋振荡过程也可能导致兴奋二维码发生错误并丢失信息。这与临时记忆的典型性质一致。记忆修正通过化学奖赏或惩罚作用以及主意识的主动强化作用,来弱化旧的错误的连接,建立和强化新的正确的连接[21]。记忆修正的时间通常比较长,也是因为错误的连接的弱化过程和正确的连接的强化过程都是需要时间来进行的。

2.4. 记忆的衰减、缺失、修正和加强

不管信息是从感受层和/或分析层储存到记忆层,还是从短期记忆到长期记忆,信息的流向均是一对多的关系,即感受层和分析层的一个神经元会将信号传至记忆层的 N 个等同的神经元细胞,短期记忆层的单个神经元也会将信号传至长期记忆层的 M 个等同的细胞,这样才能保证有充分的空间来暂存和分析时时刻刻接受到的信息,以及有充分的空间存储长期记忆。这种结构会引发以下问题:如何保证已经开始固化的神经元不再被从下层(感受层/分析层/短期记忆层)神经元的兴奋所激发而参与到别的信息记忆中去?

我们认为,当某强连接关系的二维码开始固化时,其中的神经元不能再参与到其他信息的记忆中去,这是由强连接中的自振荡效应导致这些神经元无法再响应下层信号的激发。若其他原因导致该二维码中的连接弱化或者断裂,则其中的神经元容易被其他下层激发影响,导致旧记忆的丢失和遗忘,以及新记忆的产生和覆盖。

该记忆机制意味着每一个固化的信息链中的神经元不能身兼多职,即一个神经元只能参与到一个信息单元的储存中,而大脑中神经元的数目是有限的,也就意味着记忆容量是有限的,最多为 N/n , N 是神经元总数, n 是单个记忆所需的平均神经数。大脑中的神经元总数预计约为 1000 亿,如果单个二维码平均需要 100 - 1000 个神经元组成,则存储在人脑中二维码信息的最大数量约是 0.1G - 1G。老年人在记忆时,类似于在一张反复存贮抹擦多次的磁盘上记录数据,由于空间碎片化导致存储复杂,也就是记忆困难。由此可见,可能大脑当中的大量脑细胞是存储细胞,主要用于记忆等,用于感知和分析推理的神经元数量可能相对偏少。

所以,语言和抽象符号的出现,能够让人类将占用神经元数目多的图像信息、声音信息等简化为占用数目少的抽象信息,从而释放了大量的脑容量供人类思考和推理,这可能也是人类智力超出一般生物的一个很重要的契机。语言和符号在后期信息处理过程中,起到最为关键的

作用，是人类大脑的延伸、扩展。

比如，许多鸟类都是好歌手，有些甚至会学习人的声音，还有一些动物，如鲸鱼，海豚，大象，猿可以通过一些简单的声音相互沟通。只有人类开发出复杂的语言和符号系统，一种发达的人类语言有数千个单词，这些单词的组合可以描述数百万个日常主题、抽象概念和事件。一段声音可能代表一个非常复杂的被精确定义的情境，并且可以通过教育和交流被一大群人接受和记忆。相较于情景，一个声音的二维码载体需要更少的神经元就可以进行记忆，这显然节省了个人大脑的记忆空间，从而得以储存大量的文明成果，也为进一步的分析、比较、模仿和逻辑思维提供了巨大的元素库和空间，极大地促进了人类智力的发展。正如 Sapir-Whorf 假设所言：高水平的思维过程是基于语言的[22]。在语言和符号的帮助下，人类建立了普遍接受的抽象概念，将过去的生存技能传授给下一代，提高了整个群体的生存率，也可以用于传达信仰，使成千上万的人精神上紧密相连。

在一百万年的时间里，人类发明了大量符号和工具。书法，艺术和音乐等符号占据了人类智慧非常重要的记忆。拥有数百万上亿册书籍的图书馆是典型的人类发明符号的集合，展示了数百代人的生活经验。任何时候，通过教育或学习过程，人类的大脑都可以检查并比较自己的记忆和生活经历与这些外部符号是否相符。作为“外部大脑存储”，这些符号将个人的大脑与数百代优秀人类的大脑连接起来。所有的学科知识，如数学，物理学，社会学，法律和宗教等也是符号，由整个历史中的一个大脑发明并发展而成。许多与知识相关的工具和技术则将人类大脑和身体的能力扩展到接近无限的水平，计算机和互联网的发展明显加速了这一进程。

该记忆机制可能会对我们的教育和医疗理念产生一些启示。就教育而言，让我们会更好地理解为何不能进行填鸭式教育，促使我们改变教育模式，教授孩子们基本常识和学习方法即可。就医疗而言，如果该模型验证成功，则我们可以通过某些物理或者化学药物手段选择性地断开负责某段痛苦回忆或者消极思维模式的那群神经元细胞间的强连接关系，这对抑郁症群体和记忆力下降群体均会有所帮助。

3. 结论

本文基于神经元兴奋时间与记忆时间之间的巨大矛盾，通过大量的文献调研和分析，提出了基于强连接的神经元二维码是信息载体这一基本论点的脑记忆模型，并详细阐述了二维码作为信息和记忆载体的合理性、形成条件和调取方式，得到记忆的容量是有限的这一推论。该推论提醒我们要注意教育的方式和方法：拒绝填鸭式教育，着重学习学习方法，释放更多的脑空间用于创造和想象。

致谢

本文为国家重点研发计划项目《人工视觉系统中的基础科学问题和变革技术》中第二课题《视神经系统的信息传递》(编号：2017YFA0701302) 的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] H. Herbert: Epilepsy and the functional anatomy of the human brain. Journal of Medical Education. 1954, Vol. 29, No. 4, pp. 64-64
- [2] G. A. Miller: Information and Memory. Scientific American. 1956, Vol. 195, No. 2, pp. 42-46
- [3] R. C. Atkinson and R. M. Shiffrin: Human memory: A proposed system and its control processes. Psychology of Learning & Motivation. 1968, Vol. 2, pp. 89-195
- [4] F. I. M. Craik and R. S. Lockhart: Levels of processing: A framework for memory research. Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior. 1972, Vol. 11, No. 6, pp. 671-684
- [5] A. Baddeley: Working memory. Psychology of Learning & Motivation. 1974, Vol. 8, No. 4, pp. 47-89
- [6] J. G. Raaijmakers and R. M. Shiffrin: Search of Associative Memory. Psychological Review.

1981, Vol. 88, No. 2, pp. 93-134

- [7] D. E. Rumelhart and J. L. McClelland: *Parallel Distributed Processing*. The MIT Press, 1986, pp. 45-76
- [8] J. R. Anderson: *How can the human mind occur in the physical universe?* Oxford University Press, 2007.
- [9] R. M. Shiffrin and M. Steyvers: A model for recognition memory: REM - retrieving effectively from memory. *Psychonomic bulletin and review*. 1997, Vol. 4, pp. 145-166.
- [10] X. Chen and M. Rosbash: MicroRNA-92a is a circadian modulator of neuronal excitability in *Drosophila*. *Nature Communications*. 2017, Vol. 8, pp. 14707
- [11] H. J. Park and K. Friston: *Structural and Functional Brain Networks: From Connections to Cognition*. *Science*. 2013, Vol. 342, No. 6158, pp. 1238406
- [12] T. Andrillon, D. Pressnitzer, D. Léger and S. Kouider: Formation and suppression of acoustic memories during human sleep. *Nature Communications*. 2017, Vol. 8, No. 1, pp. 179
- [13] E. Mirzakhali, E. Gourgou, V. Booth and B. Epureanu: Synaptic Impairment and Robustness of Excitatory Neuronal Networks with Different Topologies. *Frontiers in Neural Circuits*. 2017, Vol. 11, pp. 38
- [14] S. A. Selesnick, J. P. Rawling and G. Piccinini: Quantum-like behavior without quantum physics I: Kinematics of neural-like systems. *Journal of Biological Physics*. 2017, Vol. 43, No. 3, pp. 1-30
- [15] Y. C. Yu, S. He, S. Chen, Y. Fu, K. N. Brown, X. H. Yao, J. Ma, K. P. Gao, G. E. Sosinsky and K. Huang, Preferential electrical coupling regulates neocortical lineage-dependent microcircuit assembly, *Nature*. 2012, 486 (7401): 113-117.
- [16] G. J. Swanson: *The Central Nervous System of Vertebrates*. *Trends in Neurosciences*. 1998, Vol. 21, No. 12, pp. 538-539
- [17] C. Dupre and R. Yuste, Non-overlapping Neural Networks in *Hydra vulgaris*, *Current Biology*. 2017, 27 (8): 1085-1097.
- [18] R. W. Wyckoff and J. Z. Young, The motoneuron surface, *Proceedings of the Royal Society of London*. 1956, 144 (917): 440.
- [19] J. L. McGaugh, Memory--a century of consolidation, *Science*. 2000, 287 (5451): 248.
- [20] Y. Shen, P. He, Z. Zhong, C. Mcallister and K. Lindholm, Distinct destructive signal pathways of neuronal death in Alzheimer's disease, *Trends in Molecular Medicine*. 2006, 12 (12): 574.
- [21] S. Waddell, Dopamine reveals neural circuit mechanisms of fly memory, *Trends in Neurosciences*. 2010, 33 (10): 457.
- [22] T. Regier and Y. Xu, The Sapir-Whorf hypothesis and inference under uncertainty, *Wiley Interdisciplinary Reviews Cognitive Science*, 2017, e1440.