



中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心 (神经科学研究所)

Institute of Neuroscience, Chinese Academy of Sciences

> [2024年](#)

猕猴额叶皮层对空间序列信息的工作记忆编程

发布时间：2024-09-27

2024年9月27日,《Science》期刊在线发表题为《[猕猴额叶皮层对空间序列信息的工作记忆编程](#)》的研究论文。该研究由中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心(神经科学研究所)王立平研究组完成。通过训练猕猴在工作记忆中完成对空间序列的排序任务,发现了猕猴群体额叶神经元

对于时序信息的编码、存储、操作和使用是众多高级认知功能的基础。人们日常生活中听到的话语、看见的事物,会以不同方式暂存储,而后根据当前目的进行加工处理,比如对言语中句法和语义的下意识理解、对购物金额的加减乘除心算。然而,虽然学界广泛深入探索了时序记忆的存储原理(Xie et al., Science, 2022; Chen et al., Neuron, 2024),但学界对于下游的加工控制机制

为了深入研究时序记忆的加工控制机制,研究人员选取了对序列记忆内容的排序作为研究对象。研究人员训练猕猴记忆一串数字(记忆期1),并根据随后出现的规则提示去对该序列进行排序(正向排序或者逆向排序),最后在一段记忆时间(记忆期2)内对猕猴的额叶皮层神经元活动进行了记录。

首先,研究人员对规则提示出现前(记忆期1)和规则出现后(记忆期2)群体神经元对工作记忆信号的表征进行了分析。研究发现,活动强度有高有低,于是,每时每刻的大脑状态可以被一定程度上简化成这个高达亿维空间中的一个点,若是只关注某一特定“点”便在这个空间中组成了纷繁复杂、难以捉摸的几何结构。研究组前期工作表明(Xie et al., Science, 2022),大脑中不同次序上的信息被表征在不同的亚平面(或子空间)中,其表征结构忠实反映了外在刺激的结构,而且不同次序所在的子空间

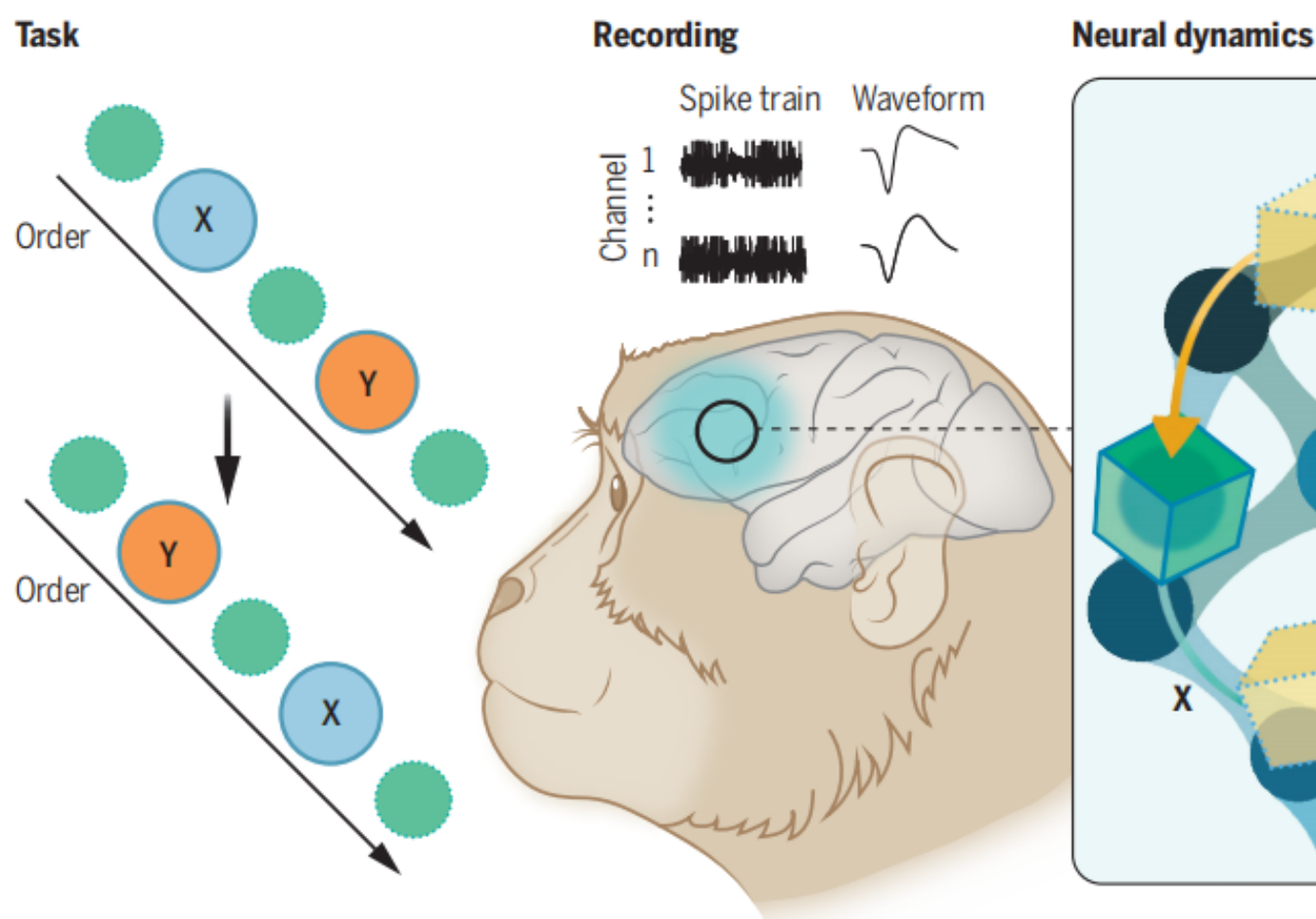
在本研究中,研究人员发现,对空间序列记忆信息进行重新排序时,在记忆期1里不同次序的子空间中的位置信息会从原来的顺序将原本的信息放入其对应次序的子空间中——就像两个盒子分别装着红球和绿球,当排序发生后,红绿球一起从自己的盒子中。研究人员进一步通过跨时间解码分析验证了在不同次序所在的子空间中,若不发生排序操作,则各自原本的空间记忆信息在记忆期1到2的过程中发生了交换。通过对于错误试次的分析也表明,若是本不应排序的时候发生了重排,解码成功率会下降。

研究人员进一步发现,在对不同子空间之间的信息进行交换时,每个子空间额外招募了一个临时存储自己信息的新的子空间。当需要交换时,给新的临时子空间,待到自身内部的记忆被清空之后,再将临时子空间中的记忆信号传递给对方,这样便完成了子空间之间记忆信息的交换。对排序记忆子空间中信号强度与动力学时间特征的关联分析,证明了找到的临时子空间确实用于存储和交换记忆信号。

最后,研究人员还发现了一个表征规则的子空间。在这个子空间中,不同规则下动力学的轨道有着显著差异,通过解码泛化能力分析发现,这个过程确实存在关联。研究人员推测,该规则子空间可能是将外界具体的规则信号与内部抽象的动力学轨道进行联系,进而用于指导排序子空间与临时子空间之间的信息流动,使得这些子空间在不同的排序规则下发生不同的动力学过程。

该研究第一次系统地阐释了工作记忆的排序机制。一方面,这种排序机制作为多种智能活动的基本运算之一,不仅仅用于排序,还可以推广到因果推断、逻辑推理等复杂的认知活动中,对其机理的发现为进一步揭示诸多高级认知功能的神经机制提供重要线索。另一方面,该机制有着惊人的相似(如用于信息交换的临时子空间和操作过程),提示了对大脑认知机制的进一步深入研究或许有助于揭示意识。研究中发现的作为中间步骤的临时子空间,尽管在主观上无法被大脑感知,但这些意识下计算的神经基础在物质层面上确实存在,为明确意识的操作定义、揭示意识的生物学基础提供了新的见解。

中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心(神经科学研究所)的博士研究生田拯赫(与中国科学院自动化研究所联合培养)为第一作者,中国科学院自动化研究所徐波教授指导了该工作,临港国家实验室的闵斌研究员和中国科学院神经科学研究所的王立平研究组近年来在空间序列工作记忆方向一系列工作延续,如Current Biology (2018), Journal of Neuroscience (2020)等。该工作获得国家自然科学基金委、中国科学院、科技部和上海市的经费资助。



专家点评：

蒲慕明 中国科学院脑智卓越中心学术主任

人类成为万物之灵，源于大脑特有的高等智能，使得人类能对外来和内在的信息进行复杂的处理，并做出最佳的行为反应。间顺序及间隔进行编码，并进一步存储、理解、操纵和提取这些编码的信息。有了这种信息处理能力，我们才能拥有语言、运动等高级功能。就是要理解大脑的神经网络如何产生这些高等智能；这些智能是在灵长类动物演化过程中逐渐涌现的，而且在非人灵长类上（如猴子）也有类似的表现。理解，我们需要用侵入式的记录方法来观测大脑中大群神经细胞（神经元）在进行高等认知行为时的动态活动，并理解它们的放电模式。王立平研究组近年来建立了一项基于空间位置序列的学习和记忆的猕猴研究范式，并在猕猴大脑获取了大量神经数据。他们在一项前年发表在Science上的研究中发现，前额叶神经元集群可以用它们放电的动态变化模式（动态空间的“子空间”）来描述。在今天发表的Science论文工作中，他们进一步探讨了这些前额叶神经元集群在学会（存储）和提取（回忆）信息时的动态变化模式，并依据指令正确地提取即时存储在各个子空间的序列信息，用于启动“新一轮”的学习。他们发现在接收到外来指令后的一个短暂时刻（所谓工作记忆的存储期），前额叶神经元的另外两个（异于编码空间序列信息的）子空间也会发生动态变化，发现为研究工作记忆（需要进行操作的短期记忆）如何在脑中进行短程编码，以及如何按照规则加工、提取即时存储的序列信息。

北京大学计算机学院教授，北京智源人工智能研究院理事长 黄铁军

工作记忆机理是揭示生物智能奥秘的重要突破口。团队在两年前揭示空间序列记忆表征几何结构规律性的基础上，通过对工作记忆子空间的动态变化模式的研究，揭示了工作记忆子空间的存在，是理解工作记忆机理的重大进展。与生物神经网络相比，包括大模型在内的人工神经网络，其工作记忆机理尚不清楚，大模型可解释性研究，并启发大模型新架构的探索。