

### 时空信息如何在大脑中高效整合?中国科学家揭示其独特处理模式,推翻关键假设

# 记忆“抽屉”打上时间戳,大脑这样应对“先来后到”

■本报记者 许琦敏

北京冬奥会上,当17岁小将苏翊鸣在单板滑雪男子大跳台决赛中“翊鸣惊人”、谷爱凌在自由式滑雪女子大跳台最后一跳突破自我时,大脑中闪现的是怎样一串信息,指引他们行云流水般完成一连串高难度动作?

在大脑的认知活动中,这些与时序有关的工作记忆与日常生活息息相关。唱一首歌、听一段音乐、跳一支舞蹈,都得靠大脑按照时间顺序将一个信息元素存储下来,在需要的时候再进行读取和加工。我们每天需要处理海量信息,大脑究竟是怎样对这些序列工作记忆进行高效处理的?这是一个巨大的谜团,破解它将对理解人类的认知和人工智能的发展起到极大的推动。

新近出版的国际顶级学术期刊《科学》以长文形式发表了我国科学家的最新发现:首次揭示了序列工作记忆在非人灵长类动物大脑中表征的几何结构,解释了大脑对于具有时序信息记忆的神经编码机制。该研究推翻了经典序列工作记忆模型的关键假设,为神经网络如何进行符号表征这一难题提供了全新见解。

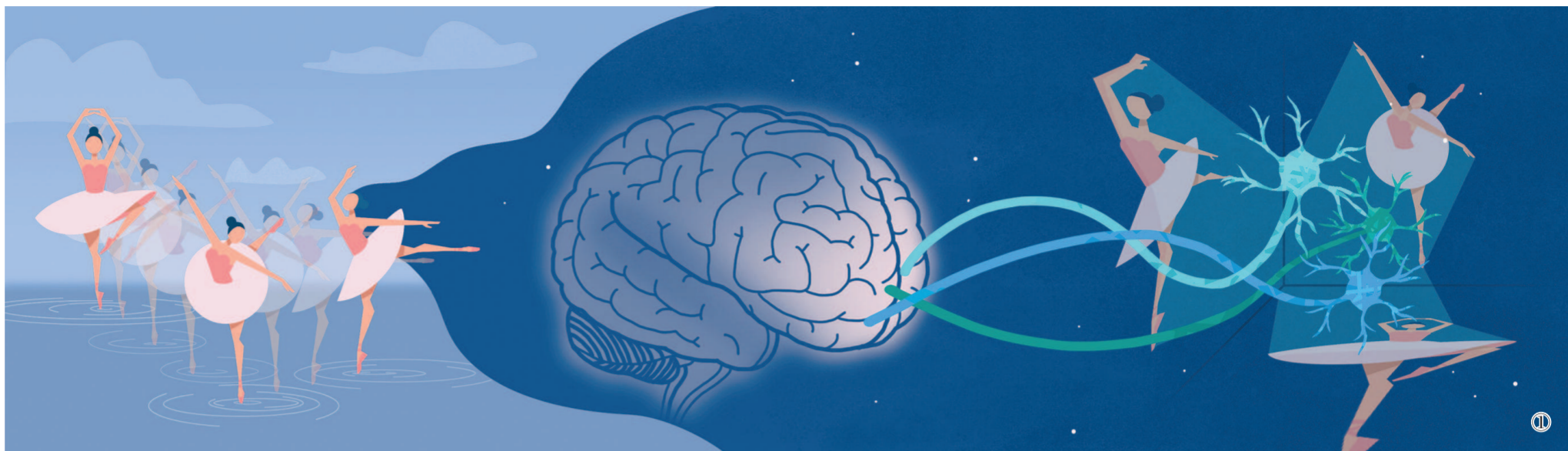
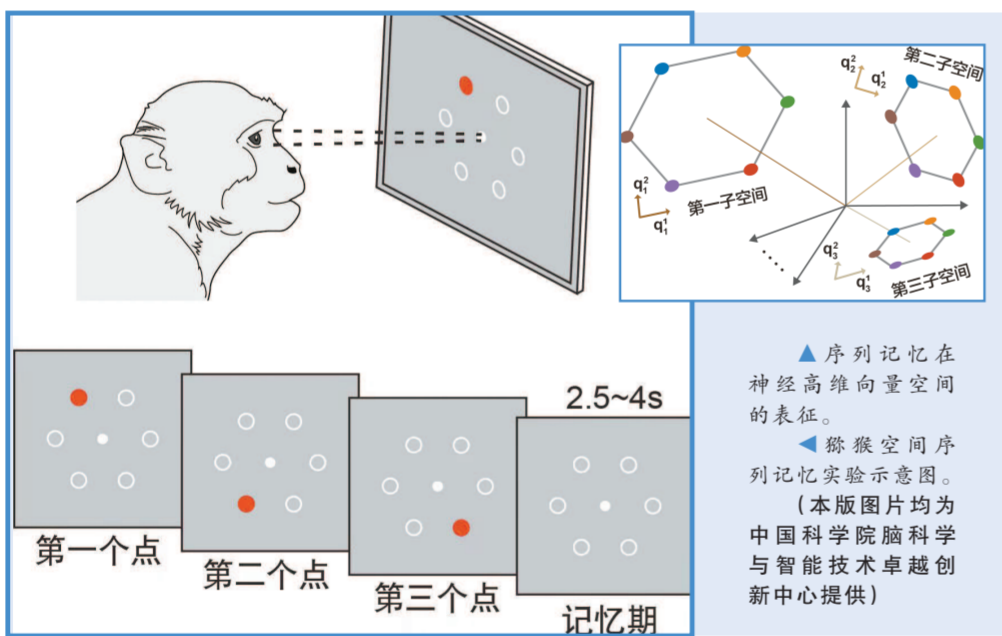
## 时序工作记忆

### 生活中无处不在,大脑中不甚了了

时序是认知活动的核心维度。时序信息的表征和处理是包括记忆、语言等重要认知活动的基础,在我们的生活中可谓无处不在。举一个简单的例子,我们需要在走路时记住指路人给出的“向前走”“往左拐”等一系列方向指引,如果记错了顺序,就无法准确到达目的地。又如,学习一段新的舞蹈,我们也必须记住老师演示的一连串动作模式。此外,背诵一篇文章、唱一首歌曲,哪怕我们说的每一句话,都包含了时间序列的信息。拓展而言,中国农历的24个节气也是华夏先祖对大自然时序信息的记忆结晶。

不过,这些序列记忆在大脑中是如何存储、处理的,人们却一直不甚明了。这牵涉到一个重要的概念,就是大脑对信息是如何表征的。

此次论文的通讯作者、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)、中国科学院灵长类神经生物学重点实验室王立平研究员解释,人类的思维分两种,一种是直觉、情绪的“快思维”,另一种则是带有逻辑性的“慢思维”。



带有时序信息的工作记忆,就属于“慢思维”范畴。过去,这方面的研究大多停留在对单个神经元的低维度研究,很难深入高级认知功能,去理解大脑如何形成一些复杂的、高维度的记忆。

打一个比方,我们如果用“快思维”的方式去识别一辆卡车,或许我们可以判断“它不是苹果”“它不是火车”“它不是自行车”“它不是跑车”……但如果要理解“卡车”这个概念,就需要“慢思维”对各种信息进行时间与空间的整合,最后形成对事物的特定认知。比如,“卡车有四个轮子”“卡车有一间驾驶室和一个车厢”等等。

王立平说,判断一辆卡车看似简单,但实际上已经复合了多重信息判断,所以这是一个大脑高维度信息处理的结果。

实现这种高维度的复杂记忆功能,显然不是由单个神经元细胞能够完成的,它需要有一群神经元细胞参与。在日本东京大学、法国国家健康中心 NeuroSpin 研究所先后完成博士后研究后,王立平在六年前来到中科院神经所建立课题组,希望从神经元群体的活动入手,尝试解开大脑高级认知功能之谜。

## 猕猴模型立功

### 跟踪五千神经元,关键假设被推翻

自2009年起,中科院神经所在所长蒲慕明院士的带领下,开始建设非人灵长类模式动物平台。

2018年,来自该平台克隆猴“中中”“华华”姐妹登上国际著名学术期刊《细胞》,向世界表明中国正式开启了批量化、标准化创建克隆猴模型的时代。而此次这篇题为《序列工作记忆在猕猴前额叶表征的几何结构》的论文,是该平台支持的脑科学研究成果首次登上《科学》杂志。

猕猴是演化上最接近人类的模式动物,其认知能力、大脑结构与功能,比其他模式动物更接近人类,是研究时间序列等复杂高级认知功能的最佳模型。因此,研究人员选用猕猴作为实验对象。

为破解大脑时序记忆编码的奥秘,王立平和博士后谢洋一起,设计了一个“最简单的时序记忆游戏”。研究人员在一只经过训练的猕猴面前放一块屏幕。实验中,屏幕上会依次闪现三个不同的点,猕猴需要在几秒钟后将这些点按照之前呈现的顺序汇报出来。汇报前的几秒钟,就是大脑的工作记忆保持期。

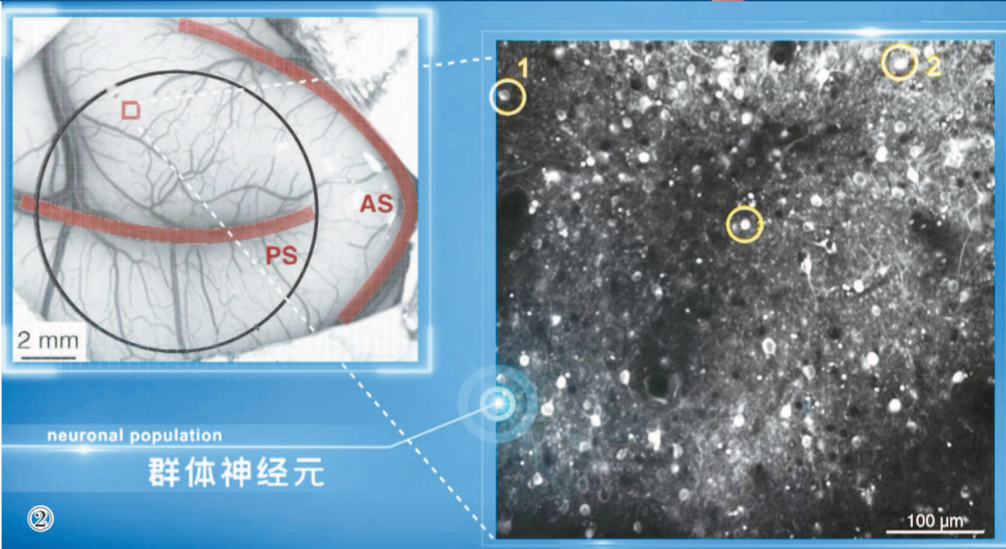
为了记录大脑神经元群体在猕猴进行任务时的活动状态,研究人员对工作记忆的大脑本营——外侧前额叶皮层进行了双光子钙信号成像。这种技术只需在猕猴大脑上安装一个透明的记录窗口,便可在窗口范围内自由选择记录的区域,一次可以同时记录到该区域中几百个神经元的活动。负责开发这部分实验技术的北京大学生命科学院教授唐世明,是该领域的权威学者。三年前,他来到上海时,与王立平只聊了十几分钟,就决定与其合作开展这一激动人心的课题。

此前,王立平团队的常用手段是电生理记录。他介绍,电生理实验可以在更大尺度上覆盖多脑区,而钙成像技术则能更集中观察一群神经元的活动,并能够记录下神经元在大脑中的空间位置。唐世明的加盟,使研究团队可以从神经元群体水平去收集数据,还能分析编码了序列信息的神经元的空间分布。

钙信号可以反映神经元的脉冲放电活动,而序列信息表征的关键就在记忆期神经元群体的活动模式中。不过,面对来自一大群神经元的闪烁信号,还需要强大的数学方法加以分析,才能从中透视大脑的工作模式。

数学专业出身的上海脑科学与类脑研究中心副研究员闵斌挑起了重担,指导谢洋和物理专业出身的研究助理胡沛桃进行数据处理和分析。团队发现,此次实验所跟踪的5000多个神经元,其中有相当部分在不同次序的记忆过程中会扮演完全不同的角色。

一直以来,经典序列工作记忆模型假设“单个神经元是计算的基本单元,在不同次序扮演相似的角色”。这项研究推翻了这一假设——研究大脑序列记忆的编码,应更加关注整体神经元水平,而非单个神经元层面。



① 大脑序列工作记忆形成艺术示意图。② 双光子钙成像技术观察到的神经元活动。

简言之,过去,人们总以为神经元在记忆时是单打作战,但通过本实验,科学家发现它们是群体工作的。

## 神经元“抱团”解码

### 信息降维存入,“屏幕”嵌入高维空间

从研究单个神经元到研究神经元“群像”,是研究思路上的飞跃。

闵斌觉得,这就像观察单个铁屑,可能并不能看出什么异样,但若观察某个区域的一堆铁屑,却可能从它们的排列趋势看出影响它们的磁场形状。

通过分析钙成像获得的高维数据,研究人员发现,经过猕猴大脑的编码,序列信息被存储在额叶的神经元群体中,最终整合成了三个独立的二维平面。

闵斌解释,在神经元群体活动的高维状态空间中,可以找到对应不同时间次序的低维子空间。这些子空间就像一个“个抽屉”,可以存放不同的信息。这个实验中,屏幕上第一、第二和第三个点的空间位置,分别被存放在三个子空间里的二维平面上(即大脑中的“屏幕”)。在“屏幕”上的点所属的位置,与真实屏幕上的环状结构是相对应的。

中科院院士、著名神经科学家和生物物理学家郭爱克在随文论发表的同行评议中写道:“这个发现揭示了序列信息编码有了降维原则,从而降低了神经计算复杂性。”“这使我想起了哲学家叔本华所说,‘简约性永远是真理和天才的共同特征’”。

有趣的是,这三个“屏幕”上的环尽管相似,却依次变小。一个可能的解释是,次序靠后的信息所分配到的注意资源更少,导致对应的信息区分度降低。另外,第二和第三个“屏幕”之间会有略微重叠,这也对应了猴子有时会后面两个点的顺序搞反。

王立平认为,这与人们“先入为主”的记忆经验也比较符合,即总是对最先听到、看到的内容印象较为深刻,后面的就容易记混或记错。研究人员进一步用机器学习的方法对数据进行了解码分析,发现用于存储不同次序信息的子空间是稳定而通用的。

比如,用第一天的数据训练的解码器可以在第四天的数据上依旧获得较好的解码效果——这意味着同一群神经元在不同天做着相同的事情。胡沛桃补充解释,他们还获得了猴子做两个点的序列时的数据集,而不同长度序列的数据集所训练的解码器是通用的。这说明不管是做长度为2还是3的序列,猴子都用到了相同的“屏幕”来存储前两个信息。

这项研究阐释了前额叶群体神经元将序列信息从带有时间轴的视觉空间变换到抽象的神经表征空间的过程。中科院院士、著名神经生物学家王以政认为,这一原创发现“也为理解神经网络如何进行符号表征这一难题提供了新的思路”。

作为一项基础研究,该工作在破译大脑高级认知功能上迈出了第一步。它勾起了人们心中更多的“为什么”。比如,人的记忆空间是固定的,还是可拓展的?大脑中这根“时间轴”是如何产生的?人的创造力是否也来自大脑某种高级“算法”?这些大脑谜团有待更多科学研究去破解。

# 时序记忆“交响乐”令人“脑洞大开”

当我们记忆一连串的数字、动作、声音等信息时,我们的大脑进行着如此有趣的活动:在短短几秒钟内,一群细胞根据输入的信息组成带有时间戳的“抽屉”,将这些信息依据输入的先后顺序存储下来。这些记忆“抽屉”中的信息,还能根据需要进行重新调用、组合。神经元这种分工合作方式,就像一支交响乐队协同演奏出时序记忆的交响乐。这无疑为理解大脑的认知功能带来了一些新的启示。于是,记者与论文主要作者之间,有了下面这些“脑洞大开”的问答(Q&A)。

**Q:**有的人听一遍歌就会唱,看一段舞就会跳,这部分人群的序列工作记忆能力是不是特别强?

**A:**实际上,很难说有人天生能做到一遍就会歌曲或舞蹈这样复杂的序列。这背后往往是有足够的相关积累,使得有些人能够快速建立新序列与已经掌握的序列模式之间的关联,或是将新的序列简化成更概括的抽象结构。

简单来说,大脑的序列工作记忆容量是有限的,一般情况下只能同时记住四五个月不同的内容。当然,记忆容量越大,序列记忆能力确实会更强,但这并非序列工作记忆能力差别的主要来源。

要记住较长的序列,更重要的可能是去尝试提取序列中的抽象规则,用序列中元素的抽象关系来帮助压缩信息,这样序列记忆能力才会有显著提升。

比如,“5 4 7 3 3 7 4 5”这样一串数字,如果直接一个个数字来记的话,可能超过了我们的记忆容量,但如果我们发现了其中对称的抽象关系,就能轻松记住。实际上,我们在实验室也在训练猴子做这些任务的简化版本,期望能从神经层面探索相关机制。

**Q:**有些人在某方面的序列工作记忆能力突出,这背后有没有先天的生理基础?这种能力可否后天训练获得?

**A:**虽然目前在序列记忆的专项训练方面还



大脑对于时序工作记忆有着特殊编码机制,不仅每个步骤的内容要被记住,还不能混淆时间上的先后顺序。

没有专门的研究,但有关工作记忆训练的研究已经有比较长的历史了。

工作记忆的训练往往是通过练习一些特定的认知任务来完成。比如,我们可以设计一个类似本研究的序列记忆任务,但屏幕上依次闪现的点的数量可以不止三个,而是随着训练难度的加大而增加。

根据相关研究,进行过类似工作记忆训练的人群,在相关任务中的表现往往会有显著提升。例如,在用n-back任务进行工作记忆训练的人群中,很多人能够轻松完成10-back以上的任

务,即记住10个以上的信息。

但是,现在学术界的主流观点是,成年人进行工作记忆训练所获得的成效很难有迁移效果。因此,就算我们在记忆空间序列任务上能够记住长度为10以上的序列,我们在记忆与语言相关的序列时,工作记忆表现并不会显著提升。

所以,工作记忆确实是可以训练提高的,但训练效果一般只会局限于所训练的任务和极其类似的任务。一些更偏门的记忆训练,如记忆扑克牌组之类,迁移效果则更加有限。

目前为止,科学家还未能找到可显著提高

总体工作记忆容量的训练方法。如果人们希望能更高效地处理和记忆某类序列信息,最好的方法还是集中对该任务进行训练,或者对该类序列积累更多的知识和经验,以便快速提取其中的抽象规则。

**Q:**大脑这种将信息先进行“降维”存储,再加以应用、组织、处理的方式,对于人工智能的发展有何借鉴意义?

**A:**这项研究的一大创新之处,就是对神经元在群体水平上进行分析,从而研究大脑的高级认知

功能。其中的一个重要发现是,序列中的符号信息可以在神经网络中以一种解耦的方式进行表征。

我们每个人都具有符号运算的能力,这说明大脑神经网络是可以做符号运算的。但大脑究竟怎样表征符号信息、进行符号运算的呢?过往研究还没有弄明白,因此存在很多争议。

这次我们的研究发现,符号表征是可以转变成神经表征,并保持其原有几何结构的。如果找到了符号在神经网络中表征的可能方式,则意味着可以为人工智能领域“符号主义”与“连接主义”两大学派的融合找到一些契合点。在过往发展历程中,这两大学派相对独立发展,一直没有找到合适的兼容方式。近年来,越来越多的研究者开始关注两者的结合,这可能是实现通用人工智能的重要方向。

**Q:**如果符号在神经网络中可以进行运算,将会带来什么?

**A:**如果解决了符号在神经网络中的表征问题,那么就有可能在神经网络中更自然、更高效地实现符号运算。这意味着人工智能可能从目前模仿人的“快思维”,进入到模拟“慢思维”的阶段。

神经网络具有可学习、可编程的特性,这是符号系统所缺乏的。但神经网络在与下游交互时,却存在“黑盒”现象。这是因为我们目前还不是很清楚神经网络的工作机理,对于它哪些能做、哪些不能做,还无法明确其边界。我们的研究可以为探究“神经网络黑盒”的可解释性提供一些见解。

如果这个大难题得以解决,那么人类就可能将人工智能应用从目前的“皮毛”推向更深层。比如,有人质疑无人驾驶的安全性,一个重要的原因是人工智能很容易被图像所欺骗。这是因为我们还不了解人到底对符号信息是如何做决策的。如果有基于符号的神经网络的加入,或能帮助自动驾驶系统更好地理解规则,使系统做出更接近于人的判断,从而真正提高自动驾驶系统的安全性。