

网格细胞能否帮助我们了解大脑？

Edvard I. Moser^{1*} 和 Noa Segev^{2*}

¹挪威科技大学, 科维理系统神经科学研究所和大脑皮层算法中心 (挪威, 特隆赫姆)

²Frontiers for Young Minds (瑞士, 洛桑)

少年审稿人



DEERFIELD

ELEMENTARY

年龄: 9-10



OZZY

年龄: 11



THEO

年龄: 11

网格细胞 (Grid Cells)

位于大脑内嗅皮层的神经元, 其激活位点在大脑中形成坐标系, 帮助动物在环境中导航。

神经元 (Neurons)

神经细胞, 在大脑中产生电脉冲, 以便向身体、大脑或其他神经元发送信号。

本文基于两位作者的访谈撰写。

网格细胞是一种特殊的脑细胞, 在大脑导航系统中发挥着关键作用。相关研究已成为当今脑科学界最受关注、发展最快的领域之一。自从 2005 年我和同事发现网格细胞, 乃至 2014 年我们获得诺贝尔奖之后, 这个领域已发生巨大变化。本文将阐述推动网格细胞研究变革的突破性进展, 介绍当前的研究方法, 并展望如何将网格细胞作为了解全脑功能的“窗口”。

本文假设读者已通过之前的文章基本了解 网格细胞 与 位置细胞。

Edvard Moser 教授、May-Britt Moser 教授和 John O'Keefe 教授 因发现大脑定位系统细胞, 共同获得 2014 年诺贝尔生理学或医学奖。

网格细胞简述

你是否想过大脑如何绘制空间地图以实现精准导航? 正如我们在之前的诺贝尔奖合辑文章 中介绍的那样, 网格细胞作为特定类型的神经元

内嗅皮层 (Entorhinal Cortex)

包含导航细胞（网格细胞、头方向细胞、物体向量细胞、边界细胞）的大脑区域。

图 1

大脑中的网格细胞：**(A)** 网格细胞存在于大脑内嗅皮层；**(B)** 当动物在环境中移动时（灰色虚线，代表运动轨迹），每个网格细胞会在特定位置激活（蓝点，代表单个网格细胞活动），在空间中呈现六边形网格状结构的活动模式（黄色六边形，代表其中某个网格细胞的活动模式）。插图：Iris Gat。

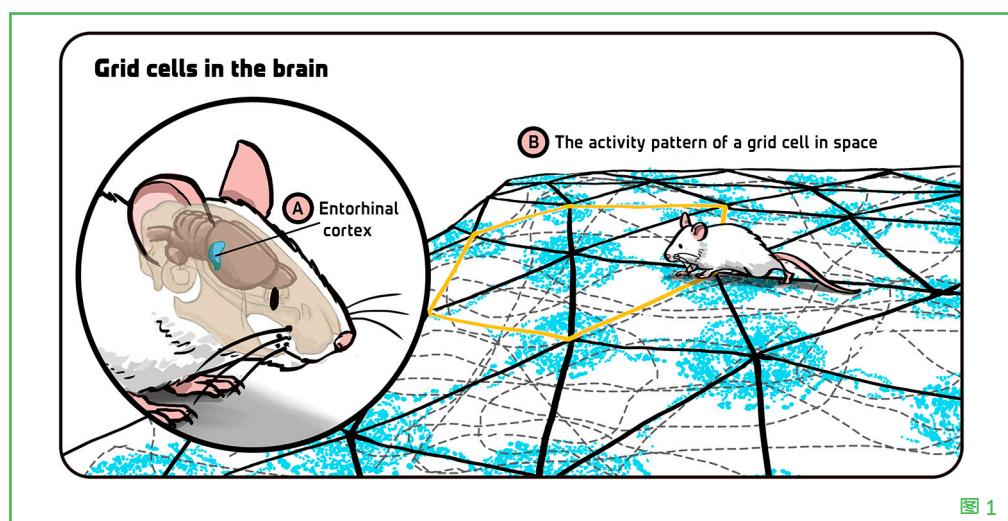


图 1

网格细胞与内嗅皮层中的头方向细胞、物体向量细胞、边界细胞等其他导航细胞协同工作，并与大脑另一区域海马体中的位置细胞密切配合 [2]。我们的目标是解析网格细胞群的内在工作机制以及它们与其他细胞的协同机制。

网格细胞研究现状

自从我们发现网格细胞以来，此研究领域的变化很快很大。2005 年，我们通过逐一检测单个网格细胞的电活动，揭示了其独特的六边形活动模式。到了近几年，单细胞研究方法已被同时研究多个网格细胞活动的方法所取代。如今，科学家致力于探索网格细胞网络的活动机制及其对动物环境的空间表现方式。不过，我们要如何同时追踪大量活跃的网格细胞呢？

电极 (Electrodes)

用于记录神经元电活动的测量装置。

神经群体记录 (Neural Population Recording)

同时记录大量神经元的电活动。

两项突破性技术必不可少：第一项技术是 Neuropixels 探针，这种新型电极能同时记录多个神经元的电活动，从而“聆听”神经信号（图 2A）[3, 4]。最新型的 Neuropixels 探针包含 5000 多个记录点，可捕捉单个神经元的电信号。借助这种探针，科学家能记录整群神经元的活动，即神经元群体记录。目前，我们通过微芯片一次可记录约 380 个位点，同时监测超千个细胞活动。预计到 2025 年有望实现接近全位点同步记录，将细胞捕获量再提升一个数量级。

第二项技术是超轻量显微镜，这种可装在动物头部 [5] 的微型双光子显微镜能检测神经元内钙离子 (Ca^{2+}) 的流动变化（图 2B），实时显示

图 2

网格细胞研究的技术进展: (A) 最近出现了一种可同时测量多个神经元电活动的新装置, 名为 Neuropixels 探针 (1)。此装置本质上是具有多个记录位点 (黑色方形) 的微型计算机芯片 (2); (B) 装于动物头部的微型双光子显微镜 (1) 向神经元发射激光束 (2), 神经元内的钙离子发出绿色荧光, 便于科学家观测特定脑区的活跃神经元 (3)。插图: Iris Gat。

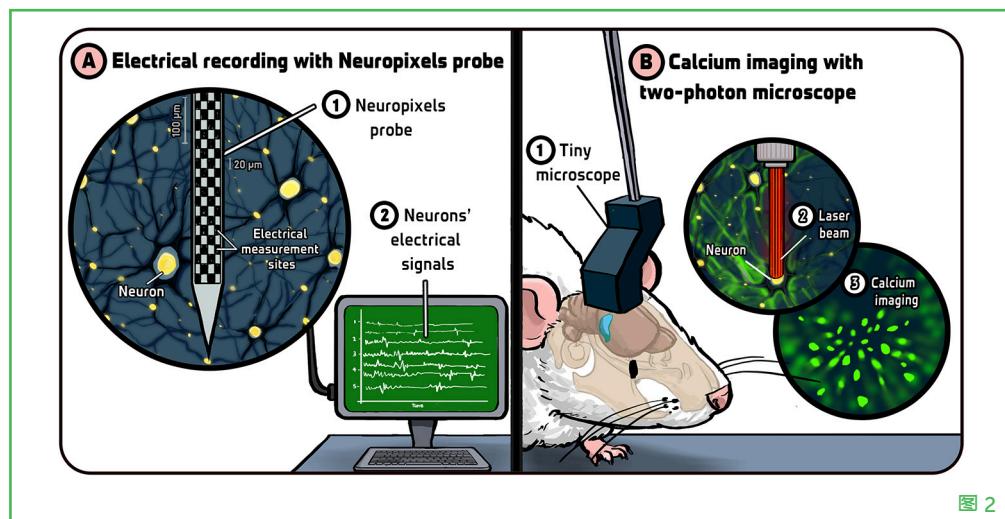


图 2

视频 1 (Video 1)

双光子显微镜钙成像: 通过微型双光子显微镜, 我们可在动物自由活动时 (屏幕右侧) 追踪其大脑的钙活动 (屏幕左侧亮斑), 实时观察内嗅皮层网格细胞的活跃状态 [视频截取自 [6]]。

细胞活动状态。通过钙成像技术, 我们可“看见”网络中的活跃网格细胞, 并将连续图像合成为细胞活动视频 (视频 1) [6]。

我们在挪威的实验室运用上述技术研究网格细胞网络: 通过 Neuropixels 探针同步记录内嗅皮层的多细胞活动, 根据网格细胞特征从记录中分离出目标细胞, 然后进行小组研究。我们重点关注特定网格细胞群在动物移动时是同步活动, 还是存在特定的激活序列。如果发现此类“规则”, 即可 (运用先进统计方法与机器学习技术) 更好地了解整个网络的活动机制。通过将新数据与现有理论模型对比 [7], 可验证模型准确性, 进而规划后续实验方向, 看看需要收集哪些新数据, 如何改进分析方法。这种理论与实验相辅相成的模式, 正是科学的研究的理想范式。

网格细胞研究的未来方向

关于网格细胞, 还有许多未解之谜: 它们的活动模式是如何产生的? 网格细胞子网络 (模块) 如何协同工作? 网格细胞网络如何与其他各类导航细胞网络共同构建脑内完整空间地图? 我们相信, 随着对各类细胞运作机制的理解不断深入, 我们将逐步破解这些细胞的协同工作机制。下一项挑战将是弄清楚这种集体活动如何形成动物的空间感知——这些细胞的活动如何让动物在现实世界中认清方向?

研究人员关注的另一问题是网格细胞是否参与导航规划: 它们能否预测或规划动物的后续移动轨迹? 如果能, 预测距离有多远? 现有迹象表明, 网格细胞包含动物的下一步位置信息。不过, 当动物穿越迷宫 (获取美食) 时, 究竟是从起点就规划完整路线并记忆轨迹 (图 3A), 还是在每个岔路口实时决策 (图 3B) 呢?

当下还有一个研究方向: 探索大脑是否利用网格细胞处理其他需测量的维度, 即所谓的度量计算 [8]。科学家推测网格细胞可用于多种度量任

度量计算 (Metrics)

可提供某参数 (本文指距离) 定量信息的测量方法。

图 3

网格细胞如何进行“规划”？科学家通过研究网格细胞探索动物导航策略：**(A)** 规划好从 A 点到 B 点全程路线；还是 **(B)** 在每个岔路口实时决策。
插图: Iris Gat。

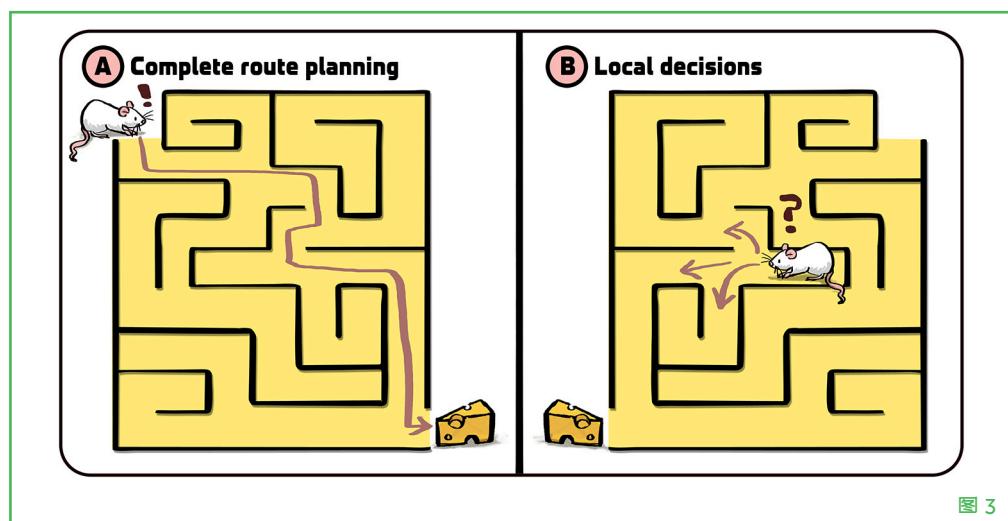


图 3

务，如追踪社交网络并了解其中的“社交距离”。通常，我们将网格细胞视为执行大脑计算的神经网络，希望通过研究该网络及其与导航系统中其他细胞网络的关联，揭示大脑计算和信息处理的一般原理。网格细胞系统或将成为了解脑内大规模神经网络运作机制的“窗口”，最终让我们弄明白认知的本质——这无疑令人振奋！

认知 (Cognition)

用于获取知识与了解的心理过程（如思维、记忆）。

给年轻人的建议

当代科学家最重要的品质是好奇心（图 4）。如果想要了解某个东西，请保持这份好奇心与热情，全力以赴寻求答案。不要纠结于这个东西挣不挣钱或有没有用之类的问题。我认为心怀远大志向同样关键——要立志为人类作出贡献。如果目标暂时遥不可及，不妨将其分解为阶段性任务，逐个突破。好奇心与远大志向都是能培养出来的品质，重要的是在应对重大挑战和解决问题的过程中锻炼自己。

图 4

给年轻人的三条建议。
插图: Iris Gat。

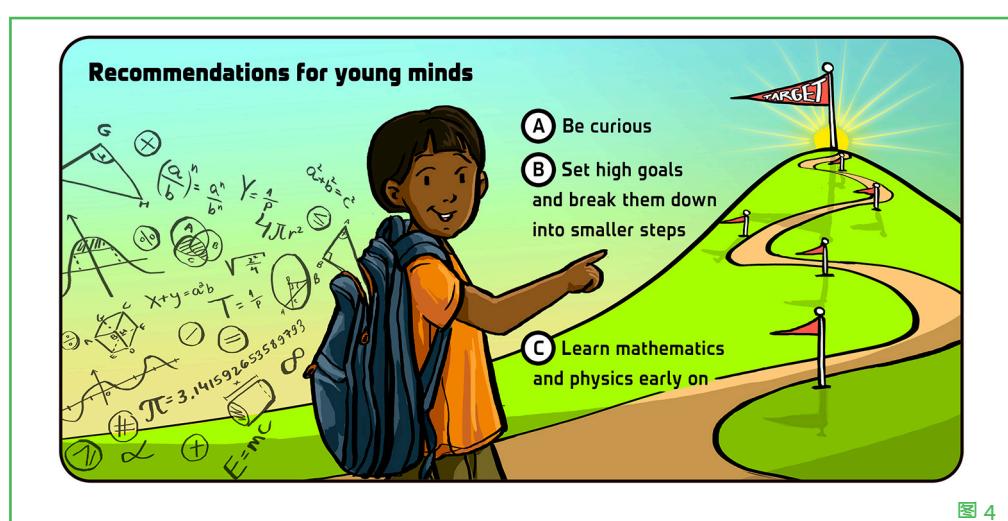


图 4

如果想投身神经科学研究, 建议夯实物理与数学基础。随着时代发展, 这些学科变得越来越重要, 趁年轻掌握它们比后期学习更容易。生物学、心理学等方面的知识虽然也很重要, 但后期再学不算困难。自 20 世纪 80 年代我开始做研究以来, 神经科学领域日新月异, 未来 40 年内还将发生更大的变化。其实不仅限于神经科学, 所有科学领域都是这样。正因如此, 科研工作注定是一场令人振奋、收获颇丰的探险。

补充资料

1. 大脑中的 GPS 会让你知道自己身在何处、从哪里来 - 科学美国人。
2. Moser 夫妇是如何发现网格细胞的 - 科维理系统神经科学研究所。

致谢

在此感谢 Iris Gat 提供所有插图。本研究获得了以下资助: 欧洲研究委员会授予 E.I.M. 与 Yoram Burak 的协同基金 ("KILONEURONS" 项目, 编号 951319); 挪威研究委员会授予 May-Britt Moser 与 E.I.M. 的卓越中心计划基金 (编号 223262); 科维理基金会对 May-Britt Moser 与 E.I.M. 的资助; 以及挪威教育与研究部对 May-Britt Moser 与 E.I.M. 的直接资助。

AI 人工智能工具使用声明

本文中所有图表附带的替代文本 (alt text) 均由 Frontiers 出版社在人工智能支持下生成。我们已采取合理措施确保其准确性, 包括在可行情况下经由作者审核。如发现任何问题, 请随时联系我们。

参考文献

1. Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M. B., and Moser, E. I. 2005. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature* 436:801–6. doi: 10.1038/nature03721
2. Moser, E. I., Kropff, E., and Moser, M. B. 2008. Place cells, grid cells, and the brain's spatial representation system. *Annu. Rev. Neurosci.* 31:69–89. doi: 10.1146/annurev.neuro.31.061307.090723
3. Jun, J. J., Steinmetz, N. A., Siegle, J. H., Denman, D. J., Bauza, M., Barbarits, B., et al. 2017. Fully integrated silicon probes for high-density recording of neural activity. *Nature* 551:232–6. doi: 10.1038/nature24636
4. Steinmetz, N. A., Aydin, C., Lebedeva, A., Okun, M., Pachitariu, M., Bauza, M., et al. 2021. Neuropixels 2.0: A miniaturized high-density probe for stable, long-term brain recordings. *Science* 372(6539):eabf4588. doi: 10.1126/science.abf4588

5. Zong, W., Wu, R., Li, M., Hu, Y., Li, Y., Li, J., et al. 2017. Fast high-resolution for brain imaging in freely behaving mice. *Nat. Methods* 14:713–9. doi: 10.1038/nmeth.4305
6. Zong, W., Obenhaus, H. A., Skytøen, E. R., Eneqvist, H., de Jong, N. L., Vale, R., et al. 2022. Large-scale two-photon calcium imaging in freely moving mice. *Cell* 185:1240–56. doi: 10.1016/j.cell.2022.02.017
7. Gardner, R. J., Hermansen, E., Pachitariu, M., Burak, Y., Baas, N. A., Dunn, B. A., et al. 2022. Toroidal topology of population activity in grid cells. *Nature* 602:123–8. doi: 10.1038/s41586-021-04268-7
8. Moser, E. I., Roudi, Y., Witter, M. P., Kentros, C., Bonhoeffer, T., and Moser, M. B. 2014. Grid cells and cortical representation. *Nat. Rev. Neurosci.* 15:466–81. doi: 10.1038/nrn3766

线上发布: 2025 年 12 月 12 日

编辑: Bob Knight

科学导师: Alexandra Decker 和 Eitan Schechtman-Drayman

引用: Moser EI 和 Segev N (2025) 网格细胞能否帮助我们了解大脑? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2023.1151734-zh

英文原文: Moser EI and Segev N (2024) Can Grid Cells Help us Understand the Brain? *Front. Young Minds* 11:1151734. doi: 10.3389/frym.2023.1151734

利益冲突声明: 作者声明本研究不涉及任何潜在商业或财务关系。

版权 © 2024 © 2025 Moser 和 Segev. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例, 在注明原作者和版权所有者, 及在标明本刊为原始出处的前提下, 允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款, 则不得使用、传播或复制文章内容。

少年审稿人



DEERFIELD ELEMENTARY, 年龄: 9–10

我们是一群来自加利福尼亚州尔湾的四年级学生, 热爱批判性思维, 享受竞争、协作和创造性活动, 还喜欢一起玩游戏。我们班 33 人就像一个团结的大家庭。



OZZY, 年龄: 11

我叫 Ozzy, 热爱地理与交通系统, 喜欢观察和乘坐火车与飞机, 还爱学几门外语 (还不熟练)。我觉得这个世界十分有趣, 尽情探索就是我的人生目标。我还是游泳与音乐爱好者 (钢琴和单簧管)。



THEO, 年龄: 11

我叫 Theo, 今年 11 岁, 上五年级, 热爱阅读、数学, 也喜欢帮助他人与动物, 立志成为一名职业棋手。我目前就读于美国马萨诸塞州波士顿的一所注重个性化关注的家庭学校。我的兴趣包括: 国际象棋、阅读、数学、编程与电子游戏。



作者

EDWARD I. MOSER

Edvard Moser 教授是一位挪威神经科学家, 成长于挪威海岸的一个偏远小镇, 曾在奥斯陆大学学习数学与统计学, 于 1990 年获得心理学学位, 随后在 Per Andersen 教授的指导下读研, 专注于海马体 (负责空间感知的脑区) 的大脑活动研究, 1995 年获得神经生理学博士学位。次年, 在爱丁堡大学与英国神经科学家 Richard Morris、在伦敦大学学院与 John O'Keefe 教授进行短暂博士后研究后, 他返回挪威, 担任特隆赫姆挪威科技大学生物心理学教授。他与 May-Britt Moser 教授共同发现了内嗅皮层中的网格细胞, 以及边界细胞和头方向细胞。2007 年, 他参与创立了挪威科技大学科维理系统神经科学研究所, 2013 年参与创立神经计算中心。目前, Edvard Moser 与 May-Britt Moser 担任科维理研究所科学主任, 他们的实验室专注于大脑导航系统研究。在职业生涯中, Moser 教授荣获多项重要奖项, 包括挪威皇家科学院青年科学家奖 (1999 年)、路易 - 让泰医学奖 (2011 年)、珀尔 - UNC 神经科学奖 (2012 年) 及诺贝尔生理学或医学奖 (2014 年)。他育有两个女儿, 即 Isabel Maria 与 Ailin Marlene。
*edvard.moser@ntnu.no



NOA SEGEV

Noa Segev 是《Frontiers for Young Minds》的科学撰稿人兼项目协调员, 拥有耶路撒冷希伯来大学物理学学士学位、以色列理工学院可再生能源工程硕士学位。自 2019 年起, 她不断采访诺贝尔奖得主并参与撰写《Frontiers for Young Minds》诺贝尔专栏文章, 致力于以通俗易懂的方式揭示诺贝尔奖获奖成果背后的科学原理, 并分享诺奖得主宝贵而丰富的专业与人生经验。
*noasegev@gmail.com

中文翻译由下列单位提供

Chinese version provided by

