

自适应共振理论：大脑如何学会会有意识地参与、学习和识别不断变化的世界

Adaptive Resonance Theory: How a brain learns to
consciously attend, learn, and recognize a changing world

Stephen Grossberg

*Center for Adaptive Systems, Graduate Program in Cognitive and Neural Systems,
Boston University, 677 Beacon Street, Boston, MA 02215, United States*

*Center for Computational Neuroscience and Neural Technology, and Department of
Mathematics, Boston University, 677 Beacon Street, Boston, MA 02215, United States*

(translated by Zang jie)

摘要：自适应共振理论或 ART 是一种认知和神经理论，涉及大脑如何自主学习在不断变化的世界中对物体和事件进行分类、识别和预测。本文回顾了 ART 的经典和最新发展，并综合了概念、原理、机制、架构以及它们帮助解释和预测的跨学科数据库。该评论表明，ART 是目前可用的最高度发达的认知和神经理论，具有最广泛的解释和预测范围。ART 预测能力的核心是它能够针对不断变化的世界进行快速、增量和稳定的无监督和有监督学习。ART 指定了无监督和有监督学习过程中意识、学习、期望、注意力、共鸣和同步过程之间的机械联系。ART 为层流皮层电路等不同主题提供了功能和机械解释；不变的对象和环境要点学习和识别；原型、表面和边界注意；伽马和贝塔振荡；内嗅网格细胞和海马位置细胞的学习；计算内嗅-海马系统的同源空间和时间机制；自闭症和内侧颞叶健忘症期间的警惕性下降；以自适应时间方式将注意力集中在有价值的对象上的认知-情感互动；item-order-rank 工作记忆和学习列表块，用于规划和控制语言、空间和运动信息的序列；受未来语境影响的有意识的言语感知；源隔离期间噪声中的听觉流；和说话人归一化。功能描述的大脑区域包括视觉和听觉新皮层；特异性和非特异性丘脑核；颞下、顶叶、前额叶、内嗅、海马、海马旁、鼻周和运动皮质；前眼视野；补充眼场；杏仁核；基底神经节；小脑；和上丘。由于大脑的互补组织，ART 没有描述许多匹配和学习规律与 ART 不同的空间和运动行为。列出了工程和技术的 ART 算法，以及与其他类型模型比较。

关键词：自适应共振理论意识、学习期望注意力识别同步工作记忆、强化学习、自适应时间、工作记忆、语音感知、Gamma 和 beta 振荡、下颞叶皮层、顶叶皮层、前额叶皮层、内嗅皮层、海马皮层、杏仁核、基底神经节

1、简介：稳定-可塑性困境和终身快速学习

1.1. 没有灾难性遗忘的快速识别学习

自适应共振理论或 ART 是一种认知和神经理论，涉及大脑如何自主学习在不断变化的世界中对物体和事件进行分类、识别和预测。学习问题使意识体验的统一性变得难以理解，因为人类能够在一生中依靠自己快速学习大量新信息。人类如何将所有这些信息整合到统一的体验中，从而形成自我意识？一部激动人心的电影只需看一次就可以惊叹于这种能力，因为我们可以以后告诉我们的朋友很多关于它的细节，即使个别场景一闪而过。更一般地说，我们可以快速了解新环境，即使没有人告诉我们每种环境的规则有何不同。在一个显着的程度上，人类可以快速学习新的事实，而不会被迫同样快速地忘记他们已经知道的东西。因此，我们可以自信地走向世界，而不必担心在学习识别新朋友的面孔时，我们会突然忘记家人和朋友的面孔。这有时被称为灾难性遗忘问题。

1.2. 一些经历灾难性遗忘的模型

许多当代学习算法确实经历了灾难性的遗忘，特别是当它们试图快速学习以应对不断变化的世界时。其中包括竞争学习、自组织映射、反向传播、模拟退火、新认知机、支持向量机、正则化和贝叶斯模型。大脑解决了许多当前生物和技术学习模型尚未解决的具有挑战性的问题：它是一个自组织系统，能够从不断变化的环境中实时快速、稳定、自主地学习大量数据。可能会充满意外事件。发现大脑对这一关键问题的解决方案对于了解我们自己与开发新的模式识别和预测技术应用同样重要。Grossberg (1980) 将大脑快速稳定地学习而不会灾难性地忘记过去知识的问题称为稳定性-可塑性困境。每个大脑系统都必须解决稳定性-可塑性的困境，这些系统需要对大量信号做出快速和适应性的响应，这些信号甚至可以支持最普通的体验。如果大脑的德

符号是简约的，那么类似的设计原则应该在所有大脑系统中运作，这些系统可以稳定地学习积累的知识库，以应对一生中不断变化的条件。这些原则的发现应该阐明大脑如何将不同的信息来源统一为有意识的连贯时刻。ART 试图阐明这些原则和实现它们的神经机制。接下来的部分总结了建议如何发生的各个方面。

1.3. 连接意识、学习、期望、注意力、共鸣和同步

ART 阐明了产生意识体验的关键大脑过程。它预测了意识、学习、期望、注意力、共鸣和同步（CLEARS 过程）过程之间的功能联系。ART 预测，所有解决稳定性-可塑性困境的大脑表征都使用 CLEARS 机制的变化（Grossberg,

1978a, 1980, 2007a)。特别是，预计在多个皮质和皮质下区域之间会发生同步共振。各种数据支持这一预测；例如，参见 Buschman 和 Miller (2007)、Engel、Fries 和 Singer (2001)、Grossberg (2009b) 和 Pollen (1999)。

通过这些 CLEARS 连接，ART 阐明了为什么许多动物是有意关注显着对象的存在，为什么“所有有意识状态都是共振状态”，以及大脑如何学习多对一映射（许多对象视图的表示）、位置和大小都激活相同的不变对象类别）和一对多映射（表示使我们能够熟练地了解有关单个对象和事件的许多事情）。

ART 通过提出自上而下的期望如何将注意力集中在线索的显着组合上来实现这些特性，并描述了注意力如何通过一种自我规范化的“有偏见的竞争”形式来运作 (Desimone, 1998)。ART 解释了这种自上而下的注意力匹配如何有助于解决稳定性-可塑性困境。特别是，当出现足够好的匹配时，会出现同步共振状态，体现注意力集中，能够推动自下而上的识别类别和自上而下的期望的快速学习；因此得名自适应共振。

自从 ART 在 Grossberg (1976a, 1976b) 中引入以来，所有主要的 ART 预测都得到了越来越多的心理和神经生物学数据的支持。ART 经历了不断的发展，以解释和预测越来越大的行为和神经生物学数据库，从人类和动物感知和认知的正常和异常方面，到多个层次结构层状丘脑皮质网络的尖峰和振荡动力学。事实上，一些 ART 模型可以解释和预测行为、解剖、神经生理、生物物理甚至生化数据。从这个意义上说，它们提供了越来越多的示例，能够部分解决经典的身心问题。作者的所有主要文章，包括那些发展 ART 的文章，都可以从 <http://cns.bu.edu/~steve> 下载。

1.4.短期记忆、中期记忆和长期记忆的方程式

ART 如何在所有神经模型的语料库中占据一席之地？特别是，大脑是不是像一些作者提出的那样（例如，Ramachandran (1990)）的一袋把戏？本文基于作者在开发心智模型 55 年后的观点，阐述了相反的观点 (Grossberg, 1988, <http://cns.bu.edu/Profiles/Grossberg/GrossbergNNeditorial2010.pdf>)。在此期间，我领导发现和开发了少量方程（例如，短期记忆方程，或 STM；中期记忆，或 MTM；和长期记忆，或 LTM）和稍大一些的方程。已经专门化和组装的模块或微电路的数量（例如，分流中心外环绕网络、门控偶极子处理网络、关联学习网络、强化学习网络、频谱定时网络等）进入模态架构，其中术语“模态”代表模态（例如，视觉、听觉、认知、认知-情感交互、感觉-运动控制等的架构）。对于通用计算，模态架构不如图灵或冯诺依曼架构通用，但比传统 AI 算法通用得多。它们被设计为能够对生物智能的特定模式进行通用自组织处理，并且它们的基本方程和模块的特定专业化已经在进化压力下被选择了数千年。

ART 网络构成此类模态架构的一部分。反过来，模态架构体现了大脑计算的新范式，我称之为互补计算 (Grossberg, 2000b) 和层流计算 (Grossberg, 1999)。互补计算描述了全球大脑如何组织成互补的并行处理流，其相互作用产生生物智能行为。层流计算描述了大脑皮层如何组织成分层电路，其专业化可以支持所有形式的高阶生物智能。ART 网络表现出许多互补的特性，并体现在用于视觉和视觉对象识别的层状皮层电路中；试听、演讲和语言；和认知信息处理。

格罗斯伯格 (1968a, 1968b, 1968c, 1969a, 1969b, 1969c, 1972b) 介绍了许多当代神经模型 (包括 ART 架构) 中使用的 STM、MTM 和 LTM 定律，并从数学上证明了它们的各种基本属性。这些定律专门用于应对体现在不同模态架构中的进化压力。这些等式的一种变体是：

STM: 快激活动力学

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} = & -Ax_i + (B - Cx_i) \left[I_i + \sum_{k=1}^n f_k(x_k)y_k D_{ki} Z_{ki} \right] \\ & - (E + Fx_i) \left[J_i + \sum_{k=1}^n g_k(x_k)Y_k G_{ki} Z_{ki} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

MTM: 习惯性递质门和抑制突触

$$\frac{dy_i}{dt} = H(K - y_i) - Lf_k(x_k)y_k. \quad (2)$$

LTM: 门控最速下降学习

$$\frac{dz_{ij}}{dt} = Mf_i(x_i) [h_j(x_j) - z_{ij}] \quad (3)$$

$$\frac{dz_{ij}}{dt} = Mf_j(x_j) [h_i(x_i) - z_{ij}]. \quad (4)$$

Grossberg (1976a) 使用 Instars 和 outstars 来展示如何学习从 m 维到 n 维向量的任意映射，instars 首先在类别单元压缩 m 维输入向量，然后类别单元采样和学习 n 维输出向量。通过展示如何动态自稳定 instar learning, ART 还展示了如何学习自稳定图。Hecht-Nielsen (1987) 将这种类型的 instar-outstar 地图学习方案称为反传播。这些门控最速下降方程有许多变体 (例如，双门控学习、尖峰时序相关学习等)。还应注意，并非所有连接都是自适应的。

1.5. ART 在工程和技术中的应用

尽管 ART 模型是通过非线性神经网络在数学上实现的，但本综述侧重于启发式地将 ART 概括为一种认知和神经理论。ART 数学发展的一部分是开发算

法，这些算法在计算上体现了有用的 ART 设计原则的特定组合。算法形式用于使模型在计算机上运行得更快。这些算法通常包含对 ART 系统完整动态的奇异近似。例如，快速动力学，如 STM 激活（见等式 (1)），通常在这些算法中在平衡时求解。通过简化计算，这些算法为认知和神经理论的数学发展做出了贡献，并广泛应用于大规模的工程和技术应用，如医学数据库预测、遥感、飞机设计和自主控制。自适应机器人。

应用程序的标准 ART 算法称为默认 ARTMAP（Amis & Carpenter, 2007 年；Carpenter, 2003 年）。早期重要的应用 ART 算法包括 ART 1、ART 2、ARTMAP、模糊 ART 和模糊 ARTMAP（Carpenter & Grossberg, 1987；Carpenter、Grossberg、Markuzon、Reynolds 和 Rosen, 1992；Carpenter、Grossberg 和 Reynolds, 1991；卡彭特、格罗斯伯格和罗森, 1991 年）。来自 Gail Carpenter 和她的学生的最新算法包括分布式 ARTMAP，它将分布式编码与快速、稳定、增量学习相结合（Carpenter, 1997 年；Carpenter、Milenova 和 Noeske, 1998 年）；ARTMAP 信息融合，它可以逐步学习规则的认知层次，以响应多个观察者收集的的概率、不完整甚至矛盾的数据（Carpenter, Martens, & Ogas, 2005；Carpenter & Ravindran, 2008；Parsons & Carpenter, 2003）；自监督 ART，展示了“在学校”的一些监督学习如何通过“在现实世界中”的无监督学习获得有效的知识（Amis & Carpenter, 2009）；和 Biased ART，它展示了如何选择性地将注意力从导致预测错误的特征转移（Carpenter & Gaddam, 2010）。可以在 <http://techlab.bu.edu/resources/software/C51> 上找到用于运行波士顿大学发现和开发的各种 ART 算法和相关神经模型的计算机代码。

ART 的许多变体已被世界各地的作者开发并应用于大规模工程和技术应用（例如，Akhbardeh、Junnila、Koivistoinen 和 Varri（2007）、Anagnostopoulos 和 Georgiopoulos（2000）、Anton-Rodriguez 等。（2009）、Brannon、Seiffert、Draeos、and Wunsch（2009）、Cai、Wang、Tang、and Yang（2011）、Caudell（1992）、Caudell、Smith、Johnson、Wunsch、and Escobedo（1991）、Cano-Izquierdo、Almonacid、Pinzolas 和 Ibarrola（2009 年）、Chao、Hsiao、Su、Hsu 和 Wu（2011 年）、Cherng、Fang、Chen 和 Chen（2009 年）、Demetgul、Tansel 和 Taskin（2009 年）、Dunbar（2012 年）、He、Caudell、Menicucci、and Mammoli（2012）；He、Tan、and Tan（2000）、Healy、Caudell、and Smith（1993）、Ho、Liou、Georgiopoulos、Heileman、and Christodoulou（1994）、Hsieh（2008）、Hsieh and Yang（2008）、Hsu and Chien（2007）、Kawamura、Takahashi、and Honda（2008）、Kaylani、Georgiopoulos、Mollaghasemi、and Anagnostopoulos（2009）、Keskin and Ozkan（2009）、Liu（2009）；Liu、Pang 和 Lloyd（2008）、Lopes、Minussi 和 Lotufo（2005）、Marchiori、

da Silveira、Lotufo、Minussi 和 Lopes (2011)、Martin-Guerrero、Lisboa、Soria-Olivas、Palomares 和 Balaguer (2007)、Massey (2009)、Mulder and Wunsch (2003)、Owega, Khan, Evans, Jervis, and Fila (2006)、Prasad and Gupta (2008)、Shieh, Yan, and Chen (2008)、Sudhakara Pandian and Mahapatra (2009)、Takahashi, Murase, Kobayashi, and Honda (2007)、Tan (1997)、Tan and Teo (1998)、Tan, Quek, Ng, and Razvi (2008)、Wienke and Buydens (1995)、Wunsch, Caudell, Capps, Marks, and Falk (1993)、Xu (2009) 和 Zhang 和 Kezunovic (2007))。一些应用程序的存储库位于 <http://techlab.bu.edu/resources/articles/C5>。

2. 学习算法的种类

许多当前的学习算法无法模拟人类和其他动物的学习方式。人类和动物学习的力量为发现计算原理提供了很大的动力，机器可以通过这些原理进行学习。人类和动物可以即时体验世界，并实时对剧集序列进行增量学习。这种学习通常是无人监督的，世界本身就是老师。学习还可以进行不可预测的无监督和监督学习试验的混合。这种学习在一个不稳定的世界中成功进行；也就是说，谁的规则会随着时间的推移而不可预测地改变。此外，人类和动物可以快速学习，即使在新的学习时，他们的记忆也可以持续很长时间。ART 对这种稳定性-可塑性困境的解决方案 (Grossberg, 1980) 预测了大脑如何快速学习，而不会强迫灾难性地忘记已经学习过且仍然成功的记忆。

因此，ART 在无监督和有监督的学习条件下自主执行快速、稳定、增量学习，以应对复杂的非平稳世界。相比之下，许多当前的学习算法使用批量学习，其中关于要学习的世界的所有信息一次可用，例如支持向量机。除非所有学习试验都受到监督，否则不会定义其他算法，例如反向传播。大多数学习算法在非平稳世界中变得不稳定，或者无法学习重要的罕见情况，或者如果学习速度很快就会变得不稳定；也就是说，如果一个事件可以在一次学习试验中完全学习。ART 克服了这些问题。

一些机器学习算法是前馈聚类算法，它们在非平稳世界中经历了灾难性的遗忘。这些包括竞争性学习、自组织地图、新认知机和反向传播。稳定性-可塑性困境的 ART 解决方案取决于反馈或自上而下的学习期望，这些期望与自下而上的数据模式相匹配，从而将注意力集中在那些在该上下文中具有预测性的特征组合上。与关键特征模式足够好的匹配会导致同步共振和快速学习。足够大的不匹配导致假设检验或记忆搜索，它发现、选择和学习更具预测性的类别。因此，ART 是一个自组织的专家系统，它避免了传统专家系统的脆弱性。

世界充满了不确定性，因此概率概念似乎与理解大脑如何了解不确定数据有关。这一事实导致一些机器学习从业者假设大脑遵循贝叶斯定律（例如 Knill 和 Pouget（2004）和 Doya 等（2007））。然而，贝叶斯规则是如此通用，以至于它可以适应自然界中的任何系统。这种普遍性使贝叶斯成为一种非常有用的统计方法。然而，为了让贝叶斯概念成为物理理论的一部分，需要额外的计算原理和机制来增强贝叶斯规则，以将大脑与氢原子或飓风区分开来。由于贝叶斯规则的普遍性，它本身并没有提供启发式方法来发现这些不同的物理原理可能是什么。

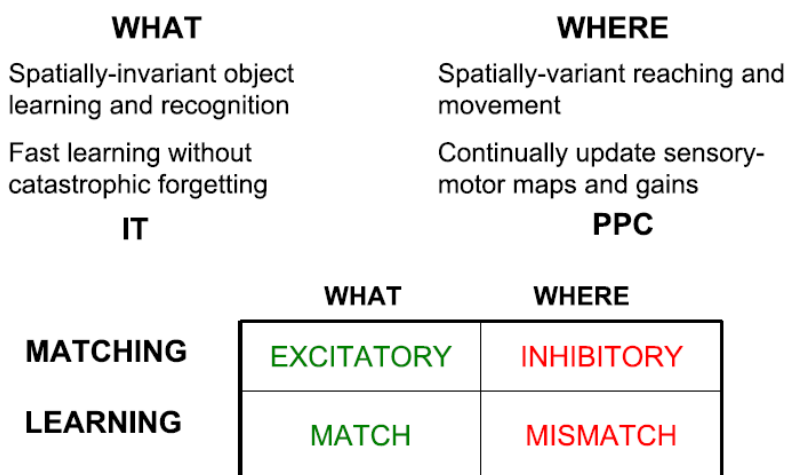


图 1. 分别用于空间不变对象识别和空间变化空间表示和动作的补充什么和哪里皮质处理流。感知和识别学习使用自上而下的兴奋性匹配和基于匹配的学习，可实现快速学习而不会出现灾难性遗忘。空间和运动学习使用抑制匹配和基于错配的学习，可以快速适应不断变化的身体参数。IT = 颞下皮层，PPC = 后顶叶皮层。详情见正文。来源：经 Grossberg（2009b）许可转载。

贝叶斯形式主义是否会成为最成功的物理理论的一部分是一个经验问题。这在物理科学中并非如此。在当前文章评论的自适应共振理论模型中也不是这样。尽管这些模型可能表现出贝叶斯特性，但这些特性源自不调用贝叶斯思想的组织原则和机制。

贝叶斯统计等概率模型通常使用非局部计算，这是计算整个概率分布所需的，并且在处理静态数据时效果最好。ART 仅使用局部计算来模拟大脑如何体现一种新型的实时概率论、假设检验、预测和决策，其局部计算能够快速自主地适应其规则的非平稳世界可以随着时间以意想不到的方式改变。这些 ART 原理和机制超越了贝叶斯分析，并且在大脑皮层的层流电路中得到了简约的体现。事实上，大脑皮层体现了一种层流计算，它体现了前馈和反馈处理、数字和模拟处理、数据驱动的自下而上处理和假设驱动的自上而下处理的最佳特性的革命性计算综合。Grossberg, 2003a, 2007a, 见第 30 节）。

3. 预测性大脑：通过补充皮层流进行学习和预测以进行识别和行动

生物学习包括知觉/认知和空间/运动过程。越来越多的实验和理论证据表明，感知/认知和空间/运动过程都需要预测机制来控制学习。因此，大脑中的学习和预测动态之间存在密切的联系。然而，这些过程的神经模型已经提出并且许多实验都支持这样的假设，即感知/认知和空间/运动过程使用不同类型的预测机制来调节它们执行的学习。

3.1. 兴奋匹配和匹配学习 vs. 抑制匹配和错配学习

通过积累理论和经验证据来阐明对不同预测机制的需求，这些证据表明大脑专业化由体现不同预测和学习机制的计算互补皮层处理流控制（Grossberg, 2000b）。如图 1 所示，腹侧皮质处理流中的感知/认知过程通常使用兴奋性匹配和基于匹配的学习来创建世界上物体和事件的预测表示。基于匹配的学习解决了稳定性-可塑性的困境，是 ART 中使用的学习类型。这种学习可以快速发生而不会导致灾难性的遗忘，就像我们快速学习新面孔而不会强迫快速和无选择地忘记熟悉的面孔一样。然而，匹配学习，以及延伸的 ART，并没有描述大脑完成对不断变化的世界的自主适应所需的唯一一种学习。如果仅仅因为这个原因，ART 就不是关于“一切”的理论。

3.2. 学习在不断变化的身体中成为专家

背侧皮层处理流中的空间/运动过程同样重要但互补，这些过程通常使用抑制匹配和基于错配的学习来随着我们的身体参数随时间变化而不断更新空间图和感觉-运动增益（Bullock, Cisek, & Grossberg, 1998; Bullock & Grossberg, 1988; Gaudiano & Grossberg, 1991; Georgopoulos, Kalaska, Caminiti, & Massey, 1982; Georgopoulos, Schwartz, & Kettner, 1986）。事实上，解决稳定性-可塑性困境的空间和运动学习过程对我们不利，因为我们不希望在长大和使用时记住适合控制婴儿身体的空间表征和运动增益控制我们成年人的身体。从这个意义上说，灾难性遗忘是空间和运动学习过程中的一个很好的特性。

作为抑制空间匹配的一个例子，考虑我们如何进行手臂运动。为了进行这样的运动，从我们希望手臂移动位置的表示（其目标位置向量）中减去手臂现在所在位置的表示（其当前位置向量），从而计算出表示方向和达到目标所需的移动距离。移动到目标后，目标和当前位置一致，所以差分向量为零。换句话说，这种匹配是抑制性的（Bullock & Grossberg, 1988）。

两种类型的匹配和学习都不足以设计自适应自主代理，但每一种都是必要的。通过将这两种类型的过程结合在一起，我们的大脑可以逐步学习并稳定地记住不断变化的世界的感知和认知表征，从而形成一个自我稳定的前端，解决稳定性-可塑性的困境，并使我们成为理解方面的专家世界和预测世界的结果。同时，我们的大脑可以自适应地更新它们对物体所在位置以及如何使用因发育、锻炼、疾病和衰老而随时间不断变化的参数的身体的表示。

3.3.为什么程序性记忆不是有意识的

使用抑制匹配和错配学习的大脑系统不能产生兴奋性共振。因此，如果“所有有意识状态都是共振状态”，那么空间和运动表征就不是有意识的。这种思维方式提供了一个机械原因，为什么陈述性记忆（或“学习那个”）是通过 ART 学习的那种记忆，可能是有意识的，而程序性记忆（或“学习如何”）是有意识的控制空间定向和行动的那种记忆是没有意识的（Cohen & Squire, 1980）。

3.4.空间不变识别与空间局部动作

这些互补的 What 和 Where 流程需要协同工作还有另一个基本原因。What 流尝试学习空间不变的对象类别，因此不会发生组合爆炸，其中每个位置和距离的每个对象的每个视图都需要由不同的类别表示。

事实上，在什么皮层流中学习会导致识别类别越来越独立于更高皮层级别的对象大小和位置。前颞下皮质表现出这种不变性（Bar 等，2001；Sigala 和 Logothetis, 2002；Tanaka、Saito、Fukada 和 Moriya, 1991）。尽管这是如何发生的需要仔细讨论（例如，Zoccolan、Kouh、Poggio 和 DiCarlo (2007)），但这种对象不变性防止了对象表示的组合爆炸，否则这种爆炸可能发生在每个感知的大小和位置。Cao、Grossberg 和 Markowitz (2011) 和 Grossberg、Markowitz 和 Cao (2011) 使用 ART 模拟了最近的神经生理学数据，这些数据涉及下颞叶皮层中不变类别学习和识别的神经生理学观察特性。

在变得空间不变时，识别类别会丢失有关如何将动作指向空间中可能找到所需对象的位置的信息。相比之下，Where 流学习空间地图，使我们能够定位这些所需的对象，以及使我们能够准确地对它们采取行动的运动增益。另一方面，Where 流空间处理放弃了有关哪些对象位于这些空间位置的信息。What 和 Where 流之间的交互（“What-Where 融合”）克服了这些互补的缺陷，使空间不变的对象表示能够控制实现空间所需目标的动作（例如，Brown、Bullock 和 Grossberg (2004)、Fazl、Grossberg 和 Mingolla (2009)、Grossberg (2009b) 和 Grossberg 和 Vladusich (2011)）。

总之，由于它们的匹配和学习类型不同，感知和认知学习提供了一个自我稳定的前端来控制更不稳定的空间和运动学习，使不断变化的身体能够有效地作用于世界上已识别的物体。本文总结了这可能是如何发生的。

4. 学习、期望、注意力和意图

人类是有意识的人，他们了解对世界的期望，并对即将发生的事情做出预测。人类也是注意力集中的生物，他们随时将处理资源集中在有限数量的传入信息上。为什么我们既是有意的又是注意力的存在，这两种类型的过程是否相关？稳定性-塑性困境及其使用共振态的解决方案为理解这些问题提供了统一的框架。

4.1. 自上而下的注意力启动

为了阐明感官或认知预期的作用，以及如何激活共振状态，假设您被要求“尽快找到黄色球，您将赢得 100,000 美元的奖金”。激活对“黄球”的预期可以使其更快速地检测到，并具有更活跃的神​​经反应。感官和认知自上而下的期望由此导致与一致的自下而上数据的兴奋匹配。自上而下期望和自下而上数据之间的不匹配可以抑制自下而上数据的不匹配部分，而注意力集中在自下而上数据的匹配或预期部分。

4.2. 学习参与的关键特征模式

使用自上而下的期望对自下而上的数据进行兴奋匹配和注意力集中会产生共振的大脑状态：当两个或更多级别的处理之间的自下而上和自上而下的信号模式之间存在足够好的匹配时，它们的正反馈信号会放大，同步并延长它们的相互激活，导致共振状态，将注意力集中在特征组合（“关键特征模式”）上，这些特征是在下一个处理级别及更高级别正确分类输入模式所需的。活动的放大、同步和延长以更缓慢变化的自适应权重触发学习，这些权重控制信号沿着参与特征和它们产生共鸣的识别类别之间的路径流动。共振在此提供了一个全局上下文敏感的指标，表明系统正在处理值得学习的数据，因此命名为自适应共振理论。

总之，ART 预测了使我们能够快速、稳定地了解不断变化的世界的机制与使我们能够了解对这样一个世界的期望、检验关于它的假设以及将注意力集中在可能预测的信息上的机制之间的联系。想要的结果。ART 通过断言澄清这一联系，为了解决稳定性-可塑性困境，只有共振状态才能推动快速的新学习。

5. 将大脑与行为联系起来：所有的意识状态都是共振状态

距离这里仅一步之遥，提出那些在学习后能够吸引我们注意力并指导我们未来生活的经验也属于有意识的经验。许多建模研究支持共振和意识之间的预测联

系，其中大脑共振的参数特性映射到模拟实验中意识行为体验的参数特性。事实上，如果没有大脑机制和行为功能之间的这种联系假设，就无法完全检验意识理论。

虽然预言了“所有的意识状态都是共振状态”，但并没有预测到“所有的共振状态都是有意识的状态”。事实上，一些共振状态，例如在排练发生之前在工作记忆中存储一系列事件（见第 50-52 节），或内嗅 - 海马共振，可以动态地稳定内嗅网格细胞和海马位置细胞的学习。见第 40 节），意识无法访问。

6. ART 匹配规则和偏向竞争：调制中心外网络

6.1. 注意遵守 ART 匹配规则

什么流自上而下的期望是如何计算的？他们如何将注意力集中在预期的特征组合上？Carpenter 和 Grossberg (1987) 在数学上证明了解决稳定性-可塑性困境的最简单的注意力回路是自上而下的、可调节的中心外网络，它为中心的关键特征提供兴奋性启动，并且驱动抑制外环绕声中的无关特征。等式(1) 描述了当兴奋性连接在空间上比抑制性连接更局部化时的中心外环绕网络。调节中心来自自上而下的激发和抑制之间的平衡。网络中的神经元服从神经生理学的膜方程。据说整个注意力回路满足 ART 匹配规则。

6.2. 通过分流中心外环绕网络解决噪声饱和困境

Grossberg (1973) 首次证明，中心外环绕网络（方程（1））中膜方程神经元的分流或增益控制特性使它们能够自我归一化其活动，从而解决一个与稳定性-可塑性困境一样基本的设计问题。这个设计问题被称为噪声饱和困境。如果神经元之间没有适当的相互作用，它们的输入如果太小就会在细胞噪声中丢失，或者如果它们太大则会使细胞活动饱和到最大值。此外，输入幅度会随时间发生很大变化。什么样的网络交互使神经元能够保持对整个网络输入的相对大小的敏感性，即使这些输入的大小可能随时间变化几个数量级？答案是：一个中心外环绕网络，其小区表现出分流特性。

建模研究阐明了自上而下的、可调节的中心外环绕网络如何参与许多不同类型的大脑过程（例如，Dranias、Grossberg 和 Bullock (2008)、Gove、Grossberg 和 Mingolla (1995)，Grossberg、Govindarajan、Wyse 和 Cohen (2004 年)、Grossberg 和 Kazerounian (2011 年)）。大脑皮层如何在其分层电路中体现注意力的模型已经发现，识别出的细胞类型和连接具有实现 ART 匹配规则的必要性（Grossberg, 1999; Grossberg & Pearson, 2008; Grossberg & Versace, 2008; Raizada & Grossberg, 2003）。

6.3. ART 匹配规则的数据支持

许多解剖学和神经生理学实验为注意力如何工作的 ART 预测提供了支持，包括关于调节中心、离场相互作用的数据；中心特征的兴奋性启动；抑制非环绕声的特征；并获得匹配数据的放大（例如，Bullier、Hupé、James 和 Girard（1996）、Caputo 和 Guerra（1998）、Downing（1988）、Hupé、James、Girard 和 Bullier（1997）、Mounts（2000）、Reynolds、Chelazzi 和 Desimone（1999）、Sillito、Jones、Gerstein 和 West（1994）、Somers、Dale、Seiffert 和 Tootell（1999）、Steinman、Steinman 和 Lehmkuhle（1995）以及 Vanduffel、Tootell 和 Orban（2000））。ART 匹配规则通常被实验神经生理学家称为“有偏见的竞争”注意力模型（Desimone, 1998; Kastner & Ungerleider, 2001）。ART 匹配规则的特性，即自上而下的信号匹配时自下而上的感觉活动可能会增强，这与显示注意力反馈促进作用的大量神经生理学文献一致（Luck, Chelazzi, Hillyard, & Desimone, 1997; Roelfsema、Lamme 和 Spekreijse, 1998 年; Sillito 等人, 1994 年），但不适用于模型，例如贝叶斯“解释”模型，其中与自上而下的反馈匹配只会导致抑制（Mumford, 1992 年; Rao 和巴拉德, 1999 年）。

ART 匹配规则有助于解释在皮层处理的多个阶段存在自上而下的调节连接。例如，Zeki 和 Shipp（1988, p. 316）写道，“反向连接似乎不会激发较低区域的细胞，而是影响它们对刺激的反应方式”；也就是说，它们是可调节的。同样，Sillito 等人的数据。（1994, pp. 479 - 482）关于从皮层区域 V1 到外侧膝状核（LGN）的注意力反馈支持早期预测，即 ART 匹配规则也应该存在于这条通路中（Grossberg, 1976b）。在这方面，Sillito 等人。（1994）得出结论，“皮质丘脑输入仅足以对那些被视网膜输入另外极化的 dLGN 细胞产生影响，反馈电路搜索支持由特定模式表示的“假设”的相关性。皮质活动”。他们的实验证明了 ART 匹配规则的所有特性，因为他们还发现“皮质诱导的接力细胞活动相关性在那些具有接收场对齐的接力细胞组中产生连贯放电皮层的轮廓这增加了皮层检测到的与特征相关的事件的输入增益。换句话说，自上而下的启动本身并不能完全激活 LGN 细胞。它需要匹配的自下而上的视网膜输入才能这样做；那些自下而上的信号支持皮层活动的 LGN 细胞被这种反馈同步和放大。此外，解剖学研究表明，V1 到 LGN 通路实现了自上而下的中心外环绕网络（Dubin & Cleland, 1977; Sillito 等, 1994; Weber、Kalil 和 Behan, 1989）;参见下面的图 5(d)。Nobuo Suga 及其同事已经表明，从听觉皮层到内侧膝状核（MGN）和下丘（IC）的反馈也具有中心外环绕形式 Zhang、Suga 和 Yan（1997）以及 Temereanca 和 Simons（2001）已经为啮齿动物桶系统中的类似反馈架构提供了证据。

6.4. ART 匹配规则的数学形式

在如何数学上实例化 ART 匹配规则注意电路的模型之间也存在收敛性。例如，“注意力归一化模型”（Reynolds & Heeger, 2009 年）使用与分布式 ARTEXture (dARTEX) 模型（Bhatt、Carpenter, & Grossberg, 2007, Eq. (A5)) 用于模拟关于基于方向的纹理分割 (OBTS, (Ben-Shahar & Zucker, 2004)) 的人类心理物理数据。

7. 想象、计划和幻觉：没有行动的预测

自上而下的期望并不总是具有调节性的。自上而下期望的调节中心的兴奋/抑制平衡可以通过来自基底神经节的意志控制来修改。例如，如果意志信号抑制中心的抑制性中间神经元，那么从识别类别中读出自上而下的期望可以激发中心原型中的细胞，而不仅仅是调节它们。预计这种意志控制将控制心理意象以及在外部行动的情况下提前思考和计划的能力，这是人类和其他哺乳动物的一种重要的预测能力。如果这些意志信号变得过于活跃，那么自上而下的期望就会在没有明显意图的情况下激发，导致诸如精神分裂症幻觉之类的特性（Grossberg, 2000a）。总而言之，我们在没有灾难性遗忘的情况下快速学习的能力导致了可以自愿调节的电路，以实现想象力、内部思考和计划。这种调制给拥有它的人带来了巨大的进化优势，同时也带来了导致幻觉的风险。一个类似的调节回路，再次由基底神经节调节，预计将控制事件序列何时存储在前额叶皮层的短期工作记忆中（Grossberg & Pearson, 2008, 见第 50-52 节）和空间跨度顶叶和前额叶皮层的注意力（“有用的视野”）（Foley、Grossberg 和 Mingolla, 2012 年，参见第 17 节）。所有这些特性都建立在终身快速学习的基本能力之上，而不会发生灾难性的遗忘。

8. 补充注意力和定向系统：预期/意外、共鸣/重置

8.1. 共振与复位的循环

如上所述，ART 机械化的感官和认知领域内的学习类型是匹配学习：只有当自下而上的信息与学习的自上而下的期望之间发生足够好的匹配时，才会发生匹配学习。识别类别或代码。当这种近似匹配发生时，可以触发共振，从而可以通过学习来提炼先前的知识。数学上已经证明，ART 模型中的匹配学习会导致对以任何顺序呈现的任意事件的稳定记忆（例如，Carpenter 和 Grossberg (1987, 1991)）。

然而，匹配学习也有一个严重的潜在弱点：如果你只能在自下而上的数据和自上而下的学习期望之间有足够好的匹配时才能学习，那么你怎么会学到真正新颖的东西？ART 提出，这个问题是由大脑通过使用共振和重置的互补过程之间的相互作用来解决的，这些过程被预测分别控制注意力和记忆搜索的特性。这些互补的过程帮助我们的大脑在处理熟悉和陌生、预期和意外的互补需求之间取得平衡。

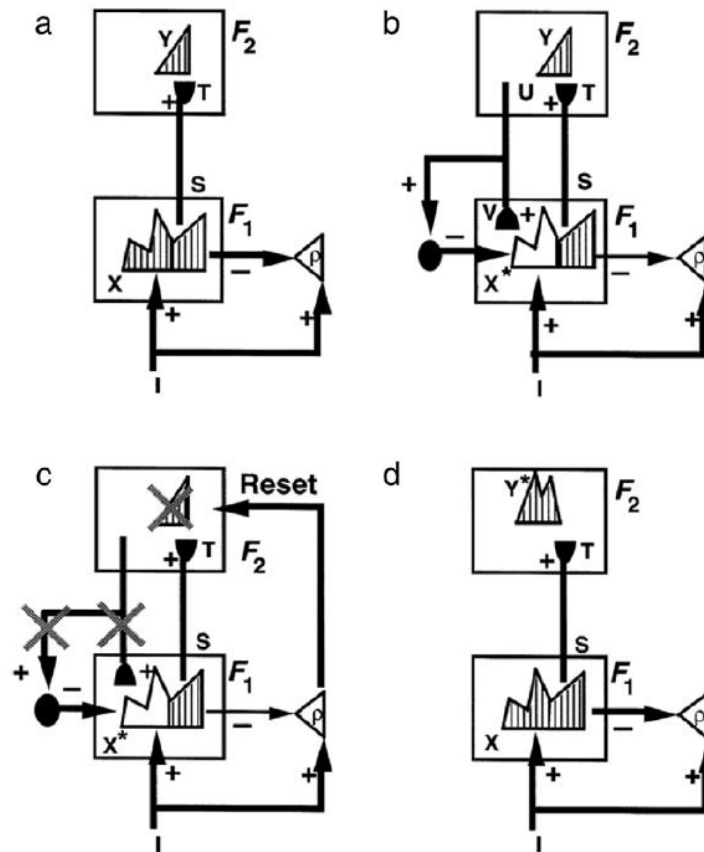


图 2. 在 ART 学习电路中搜索识别代码: (a) 输入模式 I 在 F_1 层的特征检测器中被设置为活动模式 X , 同时它以增益 ρ 非特异性地激活定向系统 A , 这称为警戒参数。来自活动模式 X 的输出信号抑制 A 并生成输出模式 S 。 S 乘以学习的自适应权重以形成输入模式 T 。 T 在 F_2 层激活类别单元格 Y 。(b) Y 生成自上而下的信号 U , 该信号乘以自适应权重并在 F_1 单元格处相加以形成原型 V , 该原型 V 对活动 F_2 类别的学习期望进行编码。如果 V 在 F_1 处与 I 不匹配, 则在 F_1 处选择新的 STM 活动模式 X^* (阴影模式)。 X^* 在由 V 确认的 I 个特征上有效。不匹配的特征 (白色区域) 被禁止。当 X 变为 X^* 时, 总抑制作用从 F_1 降低到 A 。(c) 如果抑制作用充分降低, 使得 X^* 引起的总抑制作用小于 I 引起的总激发作用乘以警戒参数 ρ , 则 A 是激活并向 F_2 释放非特异性唤醒爆发; 也就是说, “新事件正在引起人们的注意”。Arousal 通过抑制 Y 来重置 F_2 。(d) 在 Y 被抑制后, X 被恢复并且 Y 保持被抑制, 因为 X 激活了不同的活动模式 Y^* 。继续搜索更好的 F_2 类别, 直到选择了更好的匹配或新类别。当搜索结束时, 细心的共振会触发对参与数据的学习。资料来源: 经 Carpenter 和 Grossberg (1993) 许可改编。

这个问题提出了以下基本问题：大脑如何学会在预期和意外事件之间取得平衡？大脑如何学会将意外和不熟悉的事件合并到先前所学事件的语料库中，并且不会导致灾难性的遗忘？ART 提出，当新的输入无法匹配已知的识别类别、记忆搜索或假设检验时，过程就会被激活，使我们的大脑能够发现和学习最匹配新对象或事件的新识别类别。

预计将大脑组织成互补的过程是大脑设计的一般原则，而不仅仅是在 ART 中发现 (Grossberg, 2000b)。一个互补过程可以单独计算一些属性，但不能单独处理其他互补属性。在直观地思考互补属性时，人们可以想象拼图拼凑在一起。完成拼图需要这两块。然而，互补的大脑过程比任何这样的类比都更具动态性：成对的互补过程相互作用形成突现特性，克服它们的互补缺陷，以计算完整的信息来表示或控制智能行为的某些方面。

共振和重置的互补对中的共振过程预计发生在什么皮质流中，特别是在感觉、颞叶和前额叶皮质中。这里自上而下的期望与自下而上的输入相匹配。当自上而下的期望与自下而上的数据达到足够好的匹配时，此匹配过程将注意力集中在自下而上输入中预期的那些特征集群上。如果预期与输入模式足够接近，那么当注意力集中时就会出现共振状态，这通常通过同步共振神经元放电特性的振荡动力学来实现。这种共振打开了门控最速下降学习定律（方程（3）和（4））中的学习门。

然而，如上所述，积极的自上而下的期望和自下而上的输入之间的严重不匹配，比如因为输入代表一种不熟悉的体验类型，可以驱动记忆搜索。注意力系统内的这种不匹配被提议激活一个互补的定向系统，该系统对意外和不熟悉的事件敏感。ART 表明该定向系统包括非特异性丘脑和海马系统。请参阅 Carpenter 和 Grossberg (1993) 以及 Grossberg 和 Versace (2008)，了解支持该预测的数据摘要。来自定向系统的输出信号迅速重置识别类别，该类别一直在读出不匹配的自上而下的期望。从而消除了不匹配的原因，从而释放系统以激活不同的识别类别。通过这种方式，重置事件会触发记忆搜索或假设检验，这会自动导致选择可以更好地匹配输入的识别类别。

如果不存在这样的识别类别，请说是因为最底层 up 输入代表了一种真正新颖的体验，然后搜索过程会自动激活尚未提交的细胞群，通过它们来了解新信息。为了使自上而下的期望与激活新识别类别的特征相匹配，其自上而下的自适应权重最初具有较大的值，通过学习特定期望来修剪；见第 39 节。

8.2. ART 搜索周期

图 2 在两层网络中说明了这些 ART 思想。这里，自下而上的输入模式或向量 I 激活了跨第一级 F1 的特征检测器的活动模式 X 。例如，视觉场景可以

由包括其边界和表面表示的特征来表示（参见第 20 节）。该特征模式表示输入模式 I 中不同特征的相对重要性。在图 2 (a) 中，模式峰值代表更多激活的特征检测器单元，低谷代表较少激活的特征检测器。该特征模式通过自适应滤波器将信号 S 发送到第二级 $F2$ ，在第二级 $F2$ 处，响应于分布式输入 T 激活压缩表示 Y （也称为识别类别或符号）。输入 T 是通过将信号向量 S 乘以自适应权重矩阵或长期记忆轨迹来计算的，该矩阵可以通过学习来改变。表示 Y 被竞争性相互作用压缩 - 特别是分流循环侧抑制 - 跨越 $F2$ ，仅允许其最强烈激活的细胞的一小部分在响应 T 时保持活跃。这些活动单元格是代表跨级别 $F1$ 的分布式特征模式的识别类别。图中的模式 Y 表示少数类别单元格可能被不同程度地激活。

这些类别单元依次向 $F1$ 发送自上而下的信号 U 。通过与另一个自适应权重矩阵相乘，向量 U 被转换为自上而下的期望 V 。当 $F1$ 接收到 V 时，输入向量 I 和 V 之间会发生匹配过程，该过程会选择活动 $F2$ 类别 Y 所“预期”的 $F1$ 特征的子集 X^* 。这些选定特征的集合是新兴的“注意力集中”，自上而下的匹配放大了增益。

9. 有意识共振期间特征模式和类别的同步绑定

如果自上而下的期望与自下而上的输入模式足够接近，则参与特征的模式 X^* 重新激活类别 Y ，进而重新激活 X^* 。网络因此通过一个正反馈循环锁定到共振状态，该循环动态链接或绑定 X^* 上的参与特征与其类别或符号 Y 。

9.1. 互补类别和分布式特征模式的共振合成

共振过程本身体现了另一种类型的互补处理。事实上，皮质处理流内部和之间似乎存在互补过程（Grossberg, 2000b）。这种特殊的互补关系发生在分布式特征模式和压缩类别或符号之间，有选择地对它们进行编码：

$F1$ 的单个特征本身没有意义，就像图片中的像素——无意义一样。 $F2$ 中的类别或符号对这些特征的全局模式很敏感，并且可以选择性地响应这种模式。但它不能代表体验的“内容”，包括他们的有意识的感受质，因为类别是压缩的或“符号”的表示。人工智能的从业者声称神经模型可以处理分布式特征，但不能处理符号表示。当然，这在大脑中并非如此。在 ART 中也不是这样。

这两种类型的信息之间的共振将参与特征的模式转换为通过反馈与其类别相关联的连贯上下文敏感状态。参与特征与类别的相干绑定使它们具有作为上下文敏感的“事件”的含义，而不仅仅是孤立的像素。分布式特征和符号类别之间

的这种连贯状态通常被动态表达为跨绑定细胞的同步振荡激活，并且可以进入意识。

9.2. 保序极限环和同步振荡

最初的 ART 文章 (Grossberg, 1976b) 预测了这种同步振荡的存在，根据它们的数学特性将其描述为“保持顺序的极限周期”。“顺序保持”的特性意味着特征激活的相对大小和重要性不应在振荡期间反转，例如，在行波期间可能会发生这种情况。自从 Eckhorn 等人的原始验证性实验报告以来，已经进行了许多神经生理学实验，证实了同步振荡的存在。(1988) 和格雷和辛格 (1989)。参见 Raizada 和 Grossberg (2003) 以及 Grossberg 和 Versace (2008) 对已确认的 ART 预测的评论，包括关于同步振荡的预测。

10. 共振将有意和注意力的信息处理与学习联系起来

在 ART 中，共振状态，而不是单独的自下而上的激活，预计会推动快速学习。同步谐振状态持续足够长的时间，并在足够高的活动水平上，以激活自适应权重中较慢的学习过程，引导自下而上自适应滤波器和自上而下的 F1 和 F2 级之间的期望路径之间的信号流图 2。这个观点有助于解释通过先前学习改变的自适应权重如何调节大脑当前的信息处理，而不必了解它们当前正在处理的信号，除非整个网络可以启动共振状态。通过作为中介事件的共振，人们可以从更深层次的机械观点理解为什么人类是有意识的生物，他们不断预测接下来可能发生的事情，以及为什么我们倾向于了解我们关注的事件。

这种基于匹配的学习过程在激活识别类别的自下而上的自适应滤波器和与特征模式匹配的自上而下的期望中稳定了学习记忆。它体现了一种基本的预测形式，可以通过输入数据自下而上激活，也可以通过预期自上而下激活，该预期可以预测性地为未来发生的一类事件做好准备。只有当来自外部世界的输入与内部预期足够接近时，或者当全新的事情发生时，基于匹配的学习才允许记忆发生变化。

11. 共振 vs. 重置意味着 gamma vs. beta 振荡

同步匹配 ART (SMART) 模型 (Grossberg 和 Versace, 2008 年) 阐明了 ART 过程如何体现在经历尖峰动力学的层流丘脑皮质回路中。SMART 演示了自上而下的注意力匹配如何导致快速伽马振荡，促进尖峰定时相关可塑性 (STDP)，而失配和重置会导致更慢的 beta 振荡，有助于防止学习失配事件。这种匹配-不匹配 gamma-beta 的故事似乎发生在相当多的大脑系统中，最近在皮

质区域 V1、海马和额叶眼区中报告了支持 Grossberg-Versace 预测的数据示例（参见第 38 节）。

12. 无监督学习与监督学习的混合

ART 类别学习过程在无监督和有监督的条件下都能很好地工作。ARTMAP 架构的变体可以执行两种类型的学习（例如 Carpenter 等人（1992））。无监督学习意味着系统可以在没有任何外部反馈的情况下学习如何对新的输入模式进行分类。监督学习使用预测错误让系统知道它是否对信息进行了正确分类。

监督可以强制搜索可能由文化决定的新类别，而不仅仅是基于特征相似性。例如，将特征相似的字母 E 和 F 分成不同的识别类别是由文化决定的。这种基于错误的反馈使 E 和 F 的变体能够学习自己的类别和自上而下的期望或原型。专注学习和定向搜索的互补但相互作用的过程共同实现了一种通过假设检验的错误纠正，可以为不断变化的世界建立一个不断增长、自我完善的内部模型。

13. 错配激活的非特异性唤醒调节重置和搜索

13.1. 补充注意力和定向系统

ART 网络中的注意力和定向系统（图 2）也存在互补的信息缺陷。在发生预测错误的那一刻，系统不知道为什么当前活动的类别不足以预测正确的结果。特别是，当定向系统被注意力系统的不匹配激活时，定向系统无法知道注意力系统出了什么问题。因此，注意力系统有关于输入如何分类的信息，但没有分类是否正确信息，而定向系统有关于分类是否正确信息，但没有分类什么。那么，定向系统如何应对在注意力系统内重置和驱动记忆搜索的艰巨挑战，以在搜索结束后获得更好的结果。

13.2. 新奇敏感的非特异性唤醒：新事件正在唤醒！

因为定向系统不知道注意力系统中的哪些细胞导致了预测错误，它的激活需要平等地影响所有潜在的错误来源。因此，不匹配会触发非特异性唤醒的爆发，平等地激活注意力系统中的所有细胞。换句话说，新的事件正在引起人们的注意！用更哲学的方式说，对新奇敏感的非特定唤醒的爆发实现了充分理由原则。如图 2 所示，注意力系统的当前激活状态与这种唤醒爆发相互作用，以选择性地重置导致不匹配的细胞，从而推动搜索，从而获得更好的预测结果。

13.3. 中期记忆：非平稳假设检验中的习惯性传送门

搜索过程利用了一种作用于类别细胞的中期记忆,该记忆由依赖活动的习惯性传送门实现 (Carpenter & Grossberg, 1990; Grossberg, 1968c, 1972b, 1976b)。见方程式。(2).在 Abbott、Varela、Sen 和 Nelson (1997) 的工作之后,这种习惯性的传送门有时被称为抑制性突触,他们通过实验证实了视觉皮层中这种门的预测特性。习惯性传送门已被用于帮助解释有关除类别学习之外的过程的广泛数据,包括视觉感知的动态、认知 - 情绪交互和感觉 - 运动控制 (弗朗西斯和格罗斯伯格, 1996 年; 弗朗西斯、格罗斯伯格和 Mingolla, 1994; Gaudio & Grossberg, 1991, 1992; Grossberg, 1972b, 1980, 1984a, 1984b)。

由于习惯性门控,最近活跃的细胞比不活跃的细胞更习惯。依赖于活动的习惯与类别细胞之间的自我正常化竞争相互作用,以帮助抑制在收到唤醒爆发时最活跃的细胞。一旦在搜索周期中最大程度地激活的细胞被这种习惯化和竞争的组合所抑制,自标准化网络活动就可以使输入比原始获胜细胞少的其他细胞在下一个时间间隔内变得活跃.这种不匹配-唤醒-复位的循环一直持续到共振再次发生。

类别细胞网络对其总活动进行自归一化的能力使得这些类别的活动可以被解释为一种实时概率分布,而 ART 搜索周期可以被解释为一种概率假设检验和决策使其能够响应输入模式的非平稳时间序列。

14. 警觉调节意识体验的内容: 范例和原型

14.1. 警戒控制是学习具体类别还是一般类别

哪些特征或其他信息的组合绑定在一起成为有意识的对象或事件表示? 认知心理学中的一种流行观点是,范例或个人经历是可以学习的,因为人类可以拥有非常具体的记忆。例如,我们都可以识别朋友的面孔。另一方面,将每一个记忆中的经历存储为范例可能会导致记忆的组合爆炸,以及难以处理的记忆检索问题。人类可以学习代表环境一般属性的原型这一事实表明了一种可能的出路 (Posner & Keele, 1968)。例如,我们可以识别每个人都有一张脸。但是我们如何学习特定的情节记忆呢? ART 为这个问题提供了答案,克服了早期模型面临的问题。

ART 原型不仅仅是按类别分类的样本的平均值,正如在经典原型模型中经常假设的那样。相反,它们是主动选择的关键特征模式,类别的自上而下的期望将注意力集中在这些模式上。由这些关键特征模式编码的信息的一般性由称为警戒控制的增益控制过程控制,该过程可能受环境反馈或内部意志的影响 (Carpenter & Grossberg, 1987)。低警惕性允许学习具有抽象原型的一般类别。当样本与其激活的类别之间存在即使很小的不匹配时,高度警惕也会迫使对新类

别进行记忆搜索。因此，在高度警惕的限制下，类别原型可能会编码一个单独的样本。

15. 内存整合和规则的出现：直接访问全局最佳匹配

随着输入序列在学习试验中得到练习，搜索过程最终会收敛于稳定的类别。数学上已经证明（例如，Carpenter 和 Grossberg（1987））熟悉的输入直接访问其原型提供全局最佳匹配的类别，而无需进行任何搜索，而不熟悉的输入则参与定向子系统以触发记忆搜索以获得更好的结果。类别，直到他们变得熟悉。换句话说，ART 提供了一种局部最小问题的解决方案，而其他各种算法，如反向传播 (Baldi & Hornik, 1989; Gori & Tesi, 1992) 无法解决该问题。这个搜索和类别学习的过程一直持续到可以任意选择大的内存容量被充分利用。

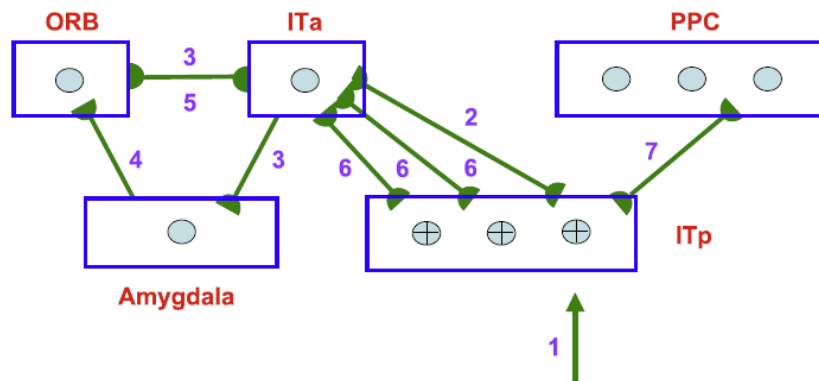


图 3. Where's Waldo: 可以通过链接 What 流识别和 Where 流动作来定位有价值目标在场景中的位置。皮层区域 ITp、ITa、杏仁核、眶额皮层 (ORB) 和后顶叶皮层 (PPC) 之间的相互作用可以在由动机注意力选择的位置不变的 ITa 对象类别和对象位置的顶叶皮层表示之间架起桥梁。数字表示通路激活的顺序。如果有两个数字，较大的数字代表反馈激活该途径的阶段。详情见正文。来源：经 Grossberg (2009b) 许可转载。

15.1. 记忆巩固和内侧面遗忘症

搜索自动脱离的过程是一种从网络交互中出现的记忆整合形式。ART 描述的第一个记忆巩固例子涉及皮质-海马相互作用，并提出海马消融如何导致内侧面遗忘症的症状 (Carpenter & Grossberg, 1993)。紧急巩固并不排除单个细胞的结构巩固，因为促进共振的放大和延长的活动可能会触发依赖学习的细胞过程，例如蛋白质合成、突触形成和递质产生。

15.2. 通过自组织生产系统学习模糊 IF-THEN 规则

已经证明，一些 ART 模型学习的自适应权重可以在学习的任何阶段转化为模糊的 IF-THEN 规则 (Carpenter 等, 1992)。因此，ART 模型是一个自组织的规则发现生产系统以及一个神经网络。这些例子表明，一些认知科学家和人工

智能从业者关于神经网络模型无法学习基于规则的行为的说法与神经模型无法学习符号的说法一样错误。

16. 沃尔多在哪里？位置不变的识别代码和位置精确的动作

ART 系统可以学习哪些类别？如何将这种学习融入作为许多哺乳动物行为特征的感知-认知-情感-动作循环？在识别目标对象、用于帮助将注意力引导到它们的当前感知值以及指定它们的空间位置之前，无法针对有价值的目标对象采取行动。如图 1 所示，What cortical 流学习越来越独立于对象位置和大小，而 Where cortical 流表示对象位置和如何移动。What 和 Where 流之间的交互克服了这些互补的信息缺陷，以针对当前有价值的已识别对象生成操作。

后颞下皮层 (ITp) 中的对象表示结合了特征和位置信息，而前颞下皮层 (ITa) 中的对象表示在位置上更具不变性。正如 ART 所描述的，这两种类型的表示通过相互学习的连接联系起来。ITp 表示还投射到后顶叶皮层 (PPC) 作为对象的目标位置。鉴于此背景，请考虑当场景中的多个对象都尝试激活其相应的 ITp 和 ITa 表示时会发生什么。假设在这种情况下，特定的 ITa 类别代表一个有价值的目标对象。如第 42 节所述，ITa 表示可以通过颞下-杏仁核-眶额共振放大。当这种情况发生时，放大的 ITa 表示可以更好地竞争对象注意力，并且可以向其 ITp 表示发送更大的自上而下的启动信号。对应于有价值对象的 ITp 表示从而被选择性地放大，并将放大的信号发送到顶叶皮层，在那里它的目标位置可以赢得下一个运动将去哪里的竞争。见图 3。这个方案可以帮助解决 Where's Waldo 问题，或者在杂乱场景中快速发现所需的目标对象。

17. ARTSCAN：使用注意力罩学习不变的对象类别

17.1. 在扫描场景时解决视图到对象绑定问题

这一行为循环的一个关键部分是大脑对视图不变和位置不变类别的学习。要了解这是如何发生的，需要回答几个基本问题：什么是对象？在相对于观察者的不同位置和距离上看到的物体的多个视图如何在足够高的处理级别激活不变的物体类别？大脑如何在无监督和监督学习条件下学习不变的对象属性？大脑如何学习将一个物体的多个视图绑定到一个视图不变和位置不变的物体类别，同时用眼球运动自由扫描场景？

要回答这些问题，还需要解决以下基本的 View-to-Object 绑定问题：当眼睛扫描一个场景时，两个连续的眼球运动可能会聚焦在同一对象的不同部分或不

同的对象上。即使在大脑知道物体是什么之前，大脑如何避免将不同物体的视图错误地分类在一起？不能说大脑通过知道某些视图属于一起而其他视图不属于一起来做到这一点，因为这甚至可能在大脑对对象是什么有了概念之前就发生了。实际上，这种扫描眼球运动可以首先用于学习对象概念。

17.2.在不变类别学习期间协调空间和原型注意力

ARTSCAN 模型（图 4）阐明了大脑如何使用扫描扫视眼球运动来学习视图不变的对象类别（Cao 等，2011；Fazl 等，2009；Foley 等，2012；Grossberg，2007b，2009b；格罗斯伯格等人，2011 年）。上面关于 ART 的讨论只考虑了 What cortical stream 中对象注意力的一种形式（Posner，1980），这种注意力集中在类别原型的关键特征模式上。ARTSCAN 解释了这种被称为原型注意力的对象注意力如何与皮层流中的空间注意力（Duncan，1984）相互作用，以指导探索物体表面的眼球运动。ARTSCAN 对空间注意力和对象注意力之间的关系做出了重大的新预测；即，空间注意力在自由观看条件下协调不变对象类别的学习。图 2 中图示的 ART 动态学习通过这种协调绑定在一起的特定于视图的类别，成为视图不变和位置不变的对象类别。

当学习到新对象的特定于视图的类别时，该过程开始，并在更高的皮层级别激活细胞，当多个视图类别与其相关联时，该细胞将成为视图不变的对象类别。事实上，当眼睛围绕物体表面移动时，会学习到物体的多个特定于视图的类别（例如，在 ITp 中；参见图 4）并与新兴的不变对象类别（例如，在 ITa 中；参见图 4）相关联。4）。大脑如何知道如何防止不变对象类别在与单个对象的多个特定于视图的类别相关联时被重置，必须重置每个类别才能激活和学习下一个特定于视图的类别？

17.3.注意罩在对象搜索期间禁止重置不变对象类别

ARTSCAN 预测，预先形成的表面表示会激活注意力罩（Tyler & Kontsevich，1995），或空间注意力的形状拟合分布，甚至在大脑可以将表面识别为代表特定对象之前。在对象的主动扫描期间，此护罩持续存在于 Where Stream 中。护罩可以保护视图不变的类别不被重置，即使在特定于视图的类别被重置时，当眼睛探索对象时也是如此。护罩通过抑制 ITa 重置机制来实现这一点（参见图 4 中从空间注意到类别重置的抑制）。

在主动扫描物体期间，护罩如何持续存在？由于表面表征（例如，在皮层区域 V4）和空间注意力（例如，在后顶叶皮层，或 PPC）之间的正反馈相互作用，产生了表面罩共振，并将空间注意力集中在要学习的对象上（图）.4).当护罩坍塌时，类别重置阶段被解除抑制，引起短暂的抑制爆发，重置活动的不变对象类

别。护罩的折叠还使眼睛能够移动到另一个表面，从而可以学习新的特定于视图和视图不变的对象类别。然后循环可以重复。

17.4.人类和猴子数据支持 shroud reset 属性

Chiu 和 Yantis (2009) 在人体中使用快速事件相关 MRI 为 ARTSCAN 预测提供证据，即 Where 流中的表面罩共振如何保护新兴的视图不变类别在 What 流中过早重置，当每个与其关联的特定于视图的类别被重置。这些作者发现，空间注意力的转移会在内侧顶叶小叶中唤起与分类规则转移相对应的瞬态信号。在 ARTSCAN 中，注意力罩的塌陷（空间注意力转移）会抑制顶叶重置机制（瞬态信号），这会导致先前的视图不变对象类别的塌陷和新对象类别的恢复（分类规则的转变）。

曹等人。(2011) 使用 ARTSCAN 模型的位置 ARTSCAN (pARTSCAN) 扩展来模拟 Li 和 DiCarlo (2008; 另见 Li 和 DiCarlo (2010)) 的神经生理数据，表明当猴子呈现一个对象，该对象在眼球运动期间与另一个对象交换以注视原始对象。为什么这种识别类别的合并不会一直发生，从而导致所学识别类别的灾难性遗忘？该模型通过显示交换程序如何通过动物转移其空间注意力之前启动交换来愚弄空间注意力重置机制来定量模拟交换数据。

除其他外，这一结果可用于开发新方法测试人类和动物如何在学习识别和预测的不变对象类别的同时学会注意重要目标。如上所述，Chiu 和 Yantis (2009) 在人类中使用快速事件相关 MRI 来支持该模型的预测，即重置是由顶叶皮层中的短暂激活爆发介导的，该激活由空间注意力的转移激活，也在顶叶皮质。一项新的人体实验是在人体中重复交换实验，并使用 MRI 来测试交换期间是否存在短暂的顶叶爆裂。预测是当第二个对象快速合并到类别中时不会出现爆发。随着初始目标和交换之间的延迟增加，当不再学习合并的类别时应该进行重置。

这些概念也可以解释许多其他矛盾的数据，包括空间注意力如何增加表面的感知亮度（Carrasco、Penpeci-Talgar 和 Eckstein, 2000 年；Reynolds 和 Desimone, 2003 年），眼睛位置的预测性重映射是如何发生的（Duhamel、Colby 和 Goldberg, 1992 年；Gottlieb、Kusunoki 和 Goldberg, 2005 年；Melcher, 2007 年），眼睛如何更喜欢在同一物体内部移动一段时间（Theeuwes、Mathot 和 Kingstone, 2010 年），以及什么可以学习某种类别不变性（Grossberg 等人, 2011 年；Zoccolan 等人, 2007 年）。

17.5.表面罩共振的有意识感知：将感知与识别联系起来

ARTSCAN 还提供了对基本问题的新见解，例如：我们有意识地看到了什么？视觉与识别有何关系，在知觉拥挤的情况下，个体物体的识别是如何失败的

(Green & Bavelier, 2007; He, Cavanagh 和 Intriligator, 1996; Intriligator & Cavanagh, 2001; Levi, 2008)? ARTSCAN 对第一个问题提供了一个看似简单的答案: ARTSCAN 预测我们有意识地看到表面罩共振;也就是说,当它们在表面罩共振中同步和放大时,我们会看到表面的视觉感受(见第 20 节)。这种共振可以自上而下传播到较低的皮层水平,例如 V1,在那里可以计算所见表示的更精细的特征,也可以自下而上传播到更高的皮层区域。ARTSCAN 还提供了一个关于拥挤的简单解释(Foley 等人,2012 年):皮质放大因子以及其他变量可以导致多个从周边观察的物体表面共享单个表面罩共振。由于表面罩共振在意识感知和识别之间建立了联系,因此无法单独识别共享单一共振的物体。

如果当该对象的表面罩类别处于活动状态时表面罩共振能够选择性地将其绑定到视图的类别,那么此时我们如何看到场景的其余部分?如果空间注意力集中在要学习的对象上,那么为什么除了共振中束缚的表面之外,所有东西都不会变暗?理解后一个问题需要分析顶叶和前额叶皮层内的空间和物体注意力如何与视觉表征相互作用。为了这个目标,Foley 等人。(2012) 改进了 ARTSCAN 以提出以下类型问题的答案:前额叶启动和顶叶空间机制如何相互作用以确定对象内注意转移、对象间注意转移以及可见对象和不可见对象之间的转移的反应时间成本暗中暗示地点?这种注意转移的时间和频率存在个体差异的原因是什么?短暂和持续的空间注意力机制如何工作和相互作用?通过基底神经节介导的意志如何通过改变注意力竞争的强度来影响空间注意力的跨度(见第 44 节)?

当这些额外的前额叶启动、瞬时注意和注意跨度的顶叶控制也被建模时,ARTSCAN 可以解释表面罩共振如何将注意力集中在一个要学习的物体上,但空间注意力还可以同时准备多个对象。该提议得到了关于需要多焦点注意的隐性注意启动和转换动态的心理数据模拟的支持。例如,持续的表面驱动和快速瞬态运动驱动的空间注意力的相对强度控制了双对象提示范式中无效提示的反应时间的个体差异(Brown & Denney, 2007; Egly, Driver, & Rafal, 1994; Roggeveen, Pilz, Bennett, & Sekuler, 2009),表面驱动注意力罩之间的竞争控制了有用视野任务中外围目标检测率的个体差异,例如视频游戏玩家(Green & Bavelier, 2003 年)。

18. 自下而上、水平和自上而下的层状皮质回路: 连接 ART 和 FACADE

正如 ARTSCAN 模型所说明的那样,自从 Grossberg (1976a, 1976b) 引入 ART 以来,它作为一种认知和神经理论经历了不断的发展。从 Grossberg (1999)

开始,另一个重大进展是展示了预测的 ART 机制如何体现在已知的大脑皮层层状微电路中。这种层流版本的 ART 称为 LAMINART(图 5)。LAMINART 嵌入不仅仅是对先前 ART 理论的重新标记。相反,它解决了一个长期存在的概念问题,并能够解释和预测更多的认知和大脑数据。这样做,它统一了两个主要的研究活动流。研究活动的两个流程是:

(1)ART 作为类别学习和预测的理论。在视觉识别类别的学习过程中,该流强调了高级皮层回路中自下而上和自上而下的交互,例如皮层区域 V4、颞下皮层和前额叶皮层;

(2) FACADE (Form-And-Color-And-Depth) 作为 3D 视觉和图形-地面感知的理论 (Cao & Grossberg, 2005; Fang & Grossberg, 2009; Grossberg, 1994, 1997; Grossberg, Bullock, & Dranias, 2008; Grossberg & McLoughlin, 1997; Grossberg & Swami-nathan, 2004; Grossberg & Yazdanbakhsh, 2005; Grossberg, Yazdanbakhsh, Cao, & Swaminathan, 2008)。该流强调自下而上和水平的交互,以在感知分组期间完成边界,并填充表面亮度和颜色。这些相互作用被提议发生在较低的皮质处理区域,如 V1、V2 和 V4。

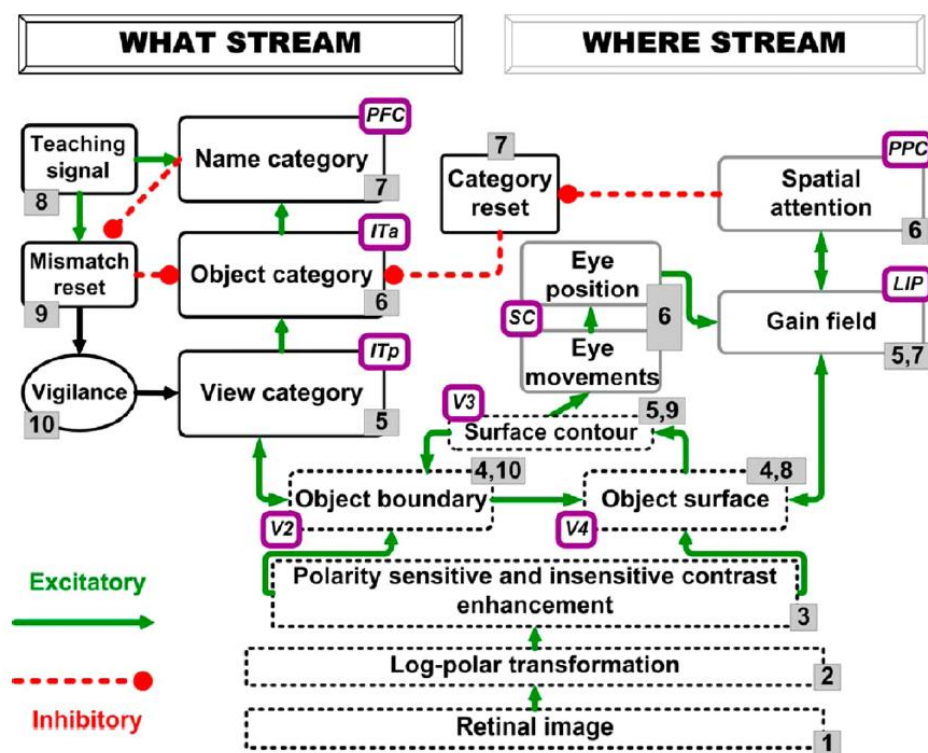


图 4. ARTSCAN 模型: PPC 中的主动注意力罩会抑制其他有张力的活跃类别重置抑制。这使得 ITa 中新兴的视图不变对象类别保持活动状态,而 ITp 中的特定视图类别在眼睛扫描场景时与其相关联。建议通过表面轮廓过程在对象边界和表面之间进行交互,以控制表面上的眼睛运动,该表面的护罩放大了相应的对象表面。来源:经 Fazl 等人许可转载。(2009)。

19. 层流视觉、语音和认知模型：LAMINART、 cARTWORD、LIST PARSE

LAMINART 中这两个研究流的统一提出了所有皮层区域如何结合自下而上、水平和自上而下的相互作用，从而开始在功能上阐明为什么所有颗粒状新皮层都具有具有六个主要细胞层的特征结构 (Felleman & Van Essen, 1991)，以及这些层流电路如何专门用于执行不同类型的生物智能。特别是，这种统一表明了如何使用共享层状皮层设计的变化来解释关于视觉、言语和认知的心理和神经生物学数据：

想象。 LAMINART 将 3D 边界形成和感知分组、表面填充和图形-背景分离的自下而上和水平过程与 V1、V2 和 V4 等皮质区域的自上而下的注意力匹配相结合 (Cao & Grossberg, 2005; Grossberg, 1999; Grossberg 和 Raizada, 2000; Grossberg 和 Swaminathan, 2004; Grossberg 和 Yazdanbakhsh, 2005; Raizada 和 Grossberg, 2001)。

演讲。 cARTWORD 模拟了层状皮层处理阶段层次结构内的自下而上、水平和自上而下的交互，由基底神经节调制，如何产生有意识的语音感知，该感知由发生在声学特征之间的激活共振波体现，声学项目块和列表块 (Grossberg & Kazerounian, 2011, 见第 55-56 节)。块介导的门控允许以正确的时间顺序听到语音，即使有意识地听到什么取决于使用未来的上下文来消除噪声遮挡声音的歧义，如在音素恢复期间发生的那样。

认识。 LIST PARSE 模拟了外侧前额叶皮层层流回路中自下而上、水平和自上而下的交互如何在第 6 层和第 4 层内执行事件序列的工作记忆存储，以及如何通过学习成列表块来将这些事件序列单元化发生在第 2/3 层内，以及如何在基底神经节自愿控制下以可变速率调用这些存储的序列 (Grossberg & Pearson, 2008, 见第 50-52 节)。特别是，该模型使用相同电路的变体来定量模拟关于即时连续回忆和自由回忆的人类认知数据，以及在连续感觉-运动模仿和计划表现期间从前额叶皮层获得的猴子神经生理数据。

这种关于共享层状新皮层设计的变化如何实现多种类型的生物智能的新兴统一理论在技术中也很有趣，在这种技术中，为多种类型的生物智能拥有统一的 VLSI 芯片组将彻底改变计算机科学，并且特别是自主自适应移动机器人的设计。 DARPA SyNAPSE 计划目前正在寻求这种可能性 (<http://en.wikipedia.org/wiki/SyNAPSE>)。

20. 隐形边界、有意识的可见性、表层共振和顶叶忽视

虽然在边界和表面的主题上，提及感知边界和表面的一些基本特性是有益的，这些特性与 ART 预测“所有意识状态都是共振状态”（第 1 节和第 5 节）相关。关于感知边界和表面的一个基本发现和预测是它们遵循互补的计算法则（Grossberg, 1994）：

边界在成对的方向相似和共线的细胞群之间向内完成（所谓的双极分组特性；参见第 28 节）。这种向内和定向的边界过程使边界能够跨越部分遮挡的对象特征。边界还汇集了来自相反对比极性的输入，因此对对比极性不敏感。这种池化过程使边界能够围绕在背景前面看到的对象形成，这些对象相对于对象的对比度极性在对象的周边周围反转。

相比之下，表面亮度和颜色以无方向的方式向外填充，直到它们到达对象边界或由于它们在空间中的扩散而消散（Grossberg & Todorovic, 1988）。这种填充过程对个别对比极性敏感。边界和表面的这些计算特性显然是互补的。

边界在皮层流内形成，穿过皮层区域 V1 中的 interblob 到 V2 中的浅色条纹，再到 V4。表面在皮层流内通过 V1 中的斑点形成到 V2 中的细条纹，再到 V4。

因为边界汇集了来自相反对比极性的输入，所以它们不携带可见的亮度或颜色信号。在边界皮层流内，所有边界都是不可见的或无模态的。可见性是表面的一种属性，它不会在对比极性上汇集。鉴于 ART 预测“所有有意识状态都是共振状态”，这个事实提出了一个问题：什么样的共振支持有意识的表面亮度或颜色感知？如上所述，我已经预测这种有意识的可见感知得到了视觉皮层区域和顶叶皮层之间的表面覆盖共振的支持，顶叶皮层预计将在学习不变对象类别中发挥作用（第 17 节）。这一预测说明了 ART 如何阐明意识、学习、期望、注意力、共鸣和同步等 CLEARS 过程之间的机械关系。

这一预测还阐明了例如顶叶忽视是如何发生的（Driver & Mattingley, 1998; Mesulam, 1999）；即顶叶病变如何导致患者有意识地忽略相应的空间区域。ART 认为发生这种情况是因为，尽管病变可能使视觉皮层完好无损，但相应的表面罩共振无法形成以支持物体表面的有意识感知。表面罩共振与用于搜索和学习物体表面的扫视眼球运动控制之间的预测联系与预期一致，即在顶叶忽视期间可能会发生扫视眼球运动的异常搜索。侯赛因等人。（2001）报告称，在右顶叶梗死后左侧忽视的患者中，未能记住已经通过扫视运动检查过哪些位置，导致重复重新固定位置。详细了解这些结果需要分析顶叶复位机制是否也受损，以及其他用于

积累眼球运动证据的顶叶相关机制是否也受到病变的影响（Huang & Grossberg, 2010, 第 54 节）。

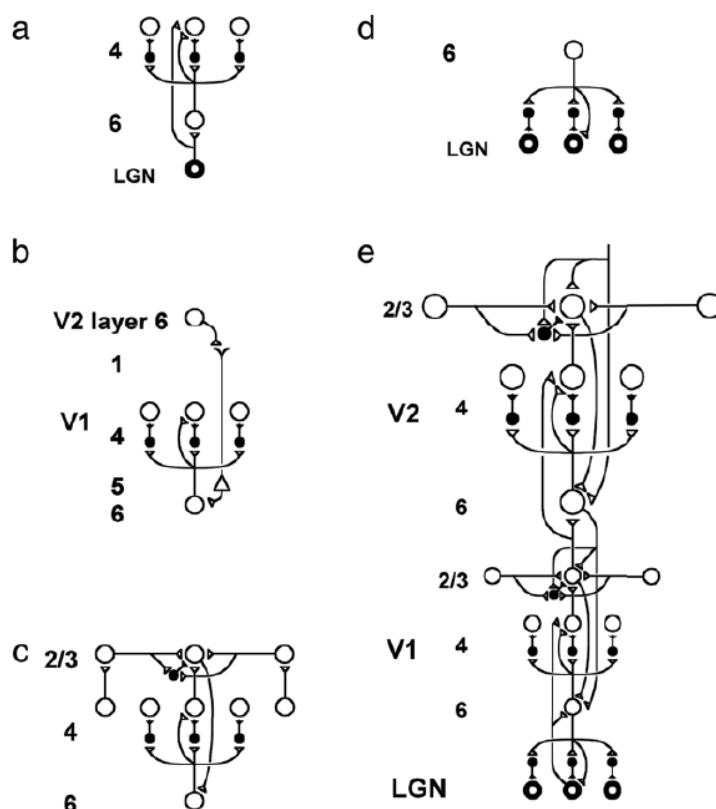


图 5. LAMINART 模型阐明了 V1 和 V2 间斑和淡条纹区域内和跨皮质层的自下而上、水平和自上而下的交互如何分别执行自下而上的自适应滤波、水平分组和顶部 - 下来注意。类似的相互作用似乎发生在所有六层皮质中。详情见正文。来源:经 Raizada 和 Grossberg (2001) 许可转载。

21. 层状皮质中的 ART 匹配规则：折叠反馈

图 5 总结了 ART 匹配规则是如何在视觉皮层的层流回路中实现的，并通过扩展在所有颗粒状新皮质回路中实现。如图 5 (b) 所示，皮质皮质反馈轴突倾向于优先起源于较高皮质区域（例如 V2）的第 6 层，并终止于较低皮质（例如 V1）的第 1 层（Pandya & Yeterian, 1985 年；萨林和布利尔, 1995 年）。该通路激活第 5 层细胞的第 1 层顶端树突，将它们中继到 V1 中的第 6 层细胞（Cauller & Connors, 1994; Rockland, 1994）。图 5(b) 中的三角形代表这样的第 5 层锥体细胞。存在反馈可以传递到 V1 第 6 层的其他几种途径（参见 Raizada 和 Grossberg (2001) 的评论）。到达第 6 层后，反馈通过前馈连接“折叠”回第 4 层，前馈连接形成从第 6 层到第 4 层的中心外环绕路径（Bullier 等, 1996）。预计该途径中的中心是调节性的。为了支持这一假设，Hupé 等人。(1997, p. 1031) 注意：“来自 V2 区域的反馈连接会调节但不会

在 V1 神经元中产生中心-环绕相互作用”。因此，预计来自 V2 的第 6 层的自上而下的反馈能够超临界地激活 V1 的第 6 层，但不能激活 V1 的第 4 层。这一假设与雪貂视觉皮层的神经生理学数据一致，表明第 6 到 4 层电路在功能上很弱（Wittmer、Dalva 和 Katz, 1997）。

总之，自上而下的注意力可以通过一个皮质间的、自上而下的、调节性的中心外环绕网络来实现，该网络从较高皮质区域的第 6 层投射到较低皮质区域的第 6 层，然后“通过从第 6 层到第 4 层的中心外环绕调制网络“折叠”回第 4 层。

22. Attention-Preattention Interface: 皮层更深层的决策网络

LAMINART 电路说明了自下而上、水平和自上而下的交互是如何与存在于皮质层 6 和 4 内部和之间的调制中心、离周围网络相互作用的。图 5 为前几个电路图解了这些电路视觉处理阶段：外侧膝状体核 (LGN) 和皮质区域 V1 和 V2。

22.1. 自下而上的对比度归一化

图 5(a) 显示 LGN 通过两条路线向第 4 层提供自下而上的激活。任何工程师或 VLSI 芯片设计人员都会立即问为什么需要两条路线。为什么要浪费“额外的电线”？LAMINART 提出以下答案：从 LGN 到第 4 层的一个连接是通过第 6 层，它通过调制中心外环绕网络激活第 4 层。这条路线不足以从 LGN 激活第 4 层，因为中心只是调制。因此，直接存在从 LGN 到第 4 层的驱动连接。总而言之，这些连接形成了一个驱动中心外环绕网络，该网络对第 4 层从 LGN 接收的输入进行对比标准化（Grossberg, 1973, 1980; Grossberg & Mingolla, 1985; Heeger, 1992）。

22.2. 自上而下的皮质间注意

如上所述和图 5(b)、(e) 所示，折叠反馈可以通过第 6 层到第 4 层的中心调节将注意力信号从较高皮质区域的第 6 层传送到较低皮质区域的第 4 层，off-surround 网络，从而实现 ART 匹配规则。图 5(d) 表明，从 V1 的第 6 层到 LGN，也存在自上而下的网络。在这里，中心反馈选择性地增强了与其引起的激活一致的 LGN 细胞（Sillito 等人, 1994），并且外环绕有助于长度敏感（终止）响应，促进垂直于线端的分组。

22.3. 水平层间反馈

如图 5(c) 所示, 第 2/3 层拥有远程水平连接, 用于轮廓、纹理和阴影的感知分组 (参见第 28 节)。这些第 2/3 层细胞被更深的皮质层激活, 特别是对相反对比极性敏感的同向第 4 层简单细胞在产生会聚到第 2/3 层的半波整流输出之前竞争 (未显示) 它们上方列中的复杂单元格。因为复杂细胞汇集相反对比极性的输入, 它们是最早的皮质阶段, 确保“边界是不可见的”(第 20 节)。就像来自高级皮层的注意力信号一样, 在第 2/3 层内形成的分组也将激活发送到折叠反馈路径中, 以通过中心的第 6 到第 4 层增强它们在其下方第 4 层中的位置, 并抑制通过第 6 层到第 4 层非环绕声输入到其他分组。在猕猴 V1 中存在从第 2/3 层到第 6 层的直接连接, 以及通过第 5 层的间接路由。

22.4. 分层设计: 启动的分层传播

图 5 (e) 显示 V2 重复了 V1 电路的层流模式, 但在更大的空间尺度上。特别是, 水平层 2/3 连接在 V2 中具有更长的范围, 允许在更宽间隔的诱导刺激之间形成高于阈值的感知分组 (Amir、Harel 和 Malach, 1993)。V1 第 2/3 层投射到 V2 第 6 和 4 层, 就像 LGN 投射到 V1 的第 6 和 4 层一样。较高的皮质区域将反馈发送到 V2, 最终到达第 6 层, 就像 V2 反馈作用于 V1 的第 6 层一样 (Sandell & Schiller, 1982)。从较高皮质区域直接进入 V1 (未显示) 的反馈路径可以补充和增强从 V2 到 V1 的反馈。到第 1 层的自上而下的注意信号也可以通过第 1 层兴奋性和抑制性 2/3 层细胞的顶端树突直接调节分组 (Lund & Wu, 1997; Rockland & Virga, 1989)。通过同时激活第 2/3 层中的兴奋性和抑制性细胞 (图 5 (e)), 抑制性细胞可以平衡兴奋性细胞的激活, 从而通过另一种调节性对第 2/3 层中的细胞分组产生调节性注意反应。中心外环绕注意力网络。Roelfsema 等。(1998) 和 Wanning、Stanisor 和 Roelfsema (2011) 已经证明了这种沿着感知分组的注意力传播 (见第 27 节)。

因为 ART 匹配规则是由一个带有调制中心的电路实现的, 自上而下的信号可以从较高皮层的第 6 层跳到较低皮层的第 6 层, 自上而下的信号可以从更高的皮质水平跳到第 6 层。皮质层 (例如前额叶皮质) 可以通过任务选择性处理约束来调节或启动其下方的所有皮质层 (例如 V4、V2、V1、LGN), 尽管程度可能不同 (图 5 (图 5) e))。然后, 整个层次结构“准备好”处理受质数中体现的处理偏差约束的传入输入。

23. 三种基于对象的注意力: 边界、原型和表面注意力

自上而下的注意力和前注意力的感知分组在皮层内的交互方式（图 5（e））使注意力能够集中在整个物体边界上，从而不仅影响哪些物体被选择性地注意，而且可以感知哪些分组。这是真的，因为相同的第 6 到第 4 层竞争或选择电路可能被第 2/3 层中的预注意分组细胞激活（图 5（c）），以及自上而下的注意通路（图 5（b））。层

然后 4 个细胞可以依次激活第 2/3 层细胞，其中感知分组被启动（图 5（c））。总而言之，自上而下的注意力素数可以增强关注特征的第 4 层细胞的激活；第 4 层细胞可以增强在它们上方开始形成的第 2/3 层中的分组；从第 2/3 层到第 6-then-4-then-2/3 层的反馈可以使这种注意力优势沿着整个分组传播。总而言之，当处理模糊和复杂的场景时，皮质内但层间折叠反馈使更强的分组开始在第 2/3 层形成以抑制较弱的分组，而来自自上而下注意的皮质间折叠反馈启用更高阶的处理约束偏向选择哪些分组。

刚刚总结的注意力类型可以称为边界注意力。ART 分类网络为学习到的关键特征模式做准备的注意力类型可以称为原型注意力。这两种注意力都倾向于在皮层 What 流中运作。还存在第三种注意力，即表面注意力，它阐明了大脑如何定向和注意物体的空间位置，作为表面罩共振的一部分。

该总结的一般结论是，使用“对象注意力”一词不足以区分边界、原型和表面注意力之间的功能和机制差异。ART 和 LAMINART 在这些不同类型的注意力之间提供了精确的功能区别，并展示了它们在感知和识别过程中如何相互作用。

24. 注意力和学习之间的联系

各种实验提供的数据支持 ART 预测，即自上而下的反馈可以调节可塑性。在心理物理学上，Ahissar 和 Hochstein (1993) 证明了注意力在知觉学习过程中控制成人可塑性的作用。Gao 和 Suga (1998) 报告了生理学证据表明，只有当 IC 收到来自听觉皮层的自上而下的反馈时，声刺激才会引起蝙蝠下丘 (IC) 的可塑性变化。这些作者还报告说，当听觉刺激与行为相关时，可塑性会增强，这与自上而下的反馈允许学习参与的、因此相关的刺激的 ART 提议一致，同时抑制无人参与的无关刺激。Krupa、Ghazanfar 和 Nicolelis (1999) 以及 Parker 和 Dostrovsky (1999) 报告了皮质反馈控制体感系统丘脑可塑性的证据。Kaas (1999) 审查了这些发现。

皮质内分组激活反馈和皮质间注意激活反馈模型表明，任何一种类型的反馈都可以快速同步较高和较低皮质区域的放电模式（Grossberg 和 Grunewald, 1997 年；Grossberg 和 Somers, 1991 年）。ART 通过暗示共振如何导致注意力同

步，从而将这一结果置于一个更大的视角，这反过来又可能通过提高“一起发射的细胞连接在一起”的概率来触发皮层学习。Engel 等人对自上而下的皮层反馈、同步性以及它们与 ART 模型的可能关系进行了很好的讨论。(2001)。

25. 如何在没有注意力的情况下发生早期发展和感性学习？

LAMINART 解决了早期非层流版本的 ART 无法处理的基本设计问题。这个问题被称为注意力-前注意力接口问题，因为它可以通过层流电路结合前注意力和注意力处理约束的方式来解决，如上所述 (Grossberg, 1999)。这个问题可以用几种方式表述。

一种方法是询问早期皮质发育如何随着时间的推移以稳定的方式发生。注意反馈对感觉皮层的可塑性产生控制影响的假设并不意味着永远无法学习无人注意的刺激。事实上，可塑性可以发生在早期发育过程中，在皮层区域之间自上而下的注意力回路可能已经形成之前。Grossberg (1999) 指出，如果这是不可能的，可能会造成无限倒退，因为像 V1 这样的较低皮质水平可能无法稳定发育，除非它得到 V2 的注意反馈，但 V2 本身不能发育，除非它从 V1 接收到可靠的自下而上的信号。视觉皮层的层流回路如何避免这种无限倒退，而不会引起大规模的不稳定，以响应环境中具有高度统计规律性的刺激（例如，格罗斯伯格和威廉姆森 (2001)）？即使在可能没有明确分配集中注意力的情况下，这个过程如何继续微调成年后的感官表征，并且可能在没有意识的情况下进行缓慢的知觉学习 (Pilly、Grossberg 和 Seitz, 2010 年; Seitz 和 Watanabe, 2003 年) ; Watanabe, Nanez, & Sasaki, 2001)？

26. 协调视觉边界完成与 ART 匹配规则

26.1. 注意-注意接口问题

陈述注意力-预注意力界面问题的另一种方式是注意，尽管 ART 匹配规则有实验和数学支持，关于视觉感知的基本数据，至少乍一看，似乎与其属性相冲突。ART 匹配规则特别指出，自上而下的注意力通常具有调节性的中心位置，因此需要对中心位置的单元格进行自下而上的输入以将它们激发到阈值以上。然而，如果 ART 匹配规则成立，那么如何在没有自下而上输入的位置上形成预注意分组，例如虚幻的轮廓？此外，这些虚幻的轮廓是通过视觉皮层中的水平连接形成的，这些连接通过包括视觉驱动学习的过程发展，因此需要解决稳定性-可塑性困境（参见 Grossberg 和 Williamson (2001) 的综述）。如果 ART 匹配

规则对于防止灾难性遗忘是必要的，那么我们如何在不破坏皮层发育和学习的情况下看到虚幻的轮廓？

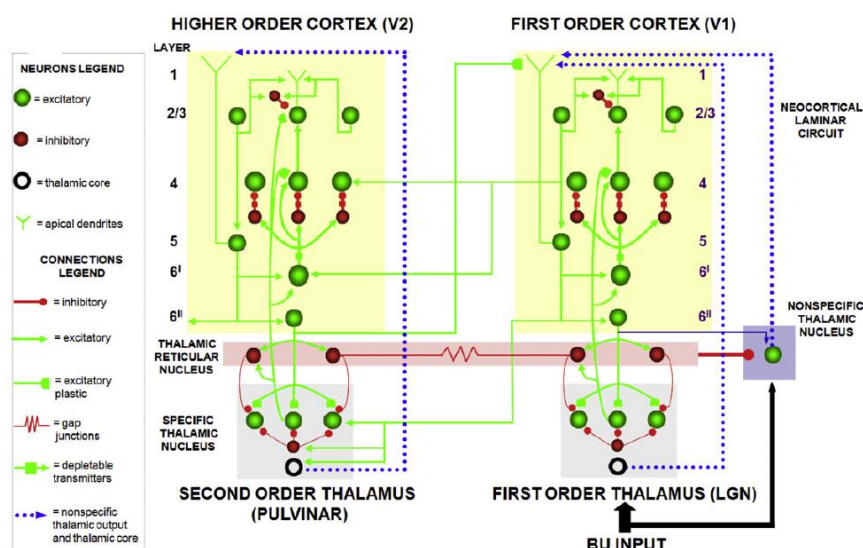


图 6. SMART 模型阐明了多个皮层区域的层状新皮层回路如何与特定和非特定丘脑核相互作用，以在多个组织层面调节学习，从尖峰到认知动态。丘脑分为特异的一级和二级核、非特异核和丘脑网状核 (TRN)。一级丘脑基质细胞 (显示为开环) 为响应自下而上的输入、启动第 5 层细胞并允许它们响应第 2/3 层输入的第 1 层提供非特异性兴奋性启动。这允许第 5 层关闭皮质内环并激活 pulvinar (PULV)。V1 第 4 层接收来自两个平行的自下而上的丘脑皮质通路的输入：一个直接的 LGN → 4 兴奋性输入，以及一个 6I → 4 调制的中心外环绕网络，通过循环 4 对第 4 层激活的模式进行对比标准化 → 2/3 → 5 → 6I → 4 回路。V1 激活从 V1 第 2/3 层到 V2 6I 和 4 层的自下而上的 V1 → V2 皮质通路，以及从 V1 第 5 层到 PULV 的自下而上的皮质丘脑皮质通路，该通路投射到 V2 第 6I 和 4 层。在 V2 中，与 V1 中一样，第 6I 层 → 第 4 层通路为 V2 第 4 层细胞提供分裂对比度归一化。来自 V2 第 6II 层的皮质皮质反馈到达 V1 第 1 层，在那里它激活第 5 层细胞的顶端树突。反过来，第 5 层细胞会激活 V1 中的调节性 6I → 4 通路，从而将 V1 自上而下的期望投射到 LGN。两个丘脑扇区的 TRN 细胞通过间隙连接连接，在处理自下而上的刺激时，间隙连接同步激活两个丘脑皮质扇区。非特异性丘脑核接收来自特定丘脑核的会聚自下而上的兴奋输入和来自 TRN 的抑制，并投射到层状皮层回路的第 1 层，在那里它调节皮层回路中的错配激活重置和假设检验。来自较高皮质区第 6II 层的皮质皮质反馈连接终止于较低皮质区的第 1 层，而来自第 6II 层的皮质丘脑反馈终止于其特定的丘脑和 TRN。这种皮质丘脑反馈与特定丘脑中自下而上的输入相匹配。来源：经 Grossberg 和 Versace 许可转载 (2008 年)。

这个问题非常重要，值得更详细地说明。ART 匹配规则有三个方面：第一，接收匹配的自上而下的兴奋性反馈的传入感觉信号得到增强；第二，不接受兴奋性反馈的非匹配输入被抑制；第三，自上而下的反馈本身就是调节性的；也就是说，在没有传入自下而上信号的情况下，无法在较低区域产生高于阈值的活动。概念上的挑战是：如果 ART 匹配需要稳定皮层发育和学习，并且如果 ART 匹配要求超阈值激活只能在有自下而上的输入时发生，那么虚幻轮廓的存在是否与

ART 相矛盾？匹配规则，既然这样的分组形成在没有自下而上输入的位置上，但似乎不会破坏皮层发育或学习的稳定性？如果大脑没有解决这个问题，任何人都可以在城市的街道上漫游，通过向他们展示 Kanizsa 广场的图像来破坏行人的视觉系统！这种可能性的荒谬性表明了这个问题的根本性质。

26.2. 当自上而下的信号驱动时：基底神经节的意志控制

在继续之前，还应该注意的，自上而下的信号可以在视觉图像或内部思考和计划的感知过程中驱动其目标细胞达到超阈值激活。此属性与 ART 匹配规则一致，因为来自基底神经节的意志信号可以改变调节中心内的兴奋和抑制之间的平衡，以有利于兴奋。Grossberg (2000a) 描述了这种情况如何发生；另见第 7 节和第 44 节。如第 7 节所述，已经预测了一种类似的基底神经节意志机制来确定事件序列何时存储在前额叶认知工作记忆中 (Grossberg & Pearson, 2008) 以及空间注意力的跨度如何可能会在视觉搜索任务期间有意识地改变 (Foley 等, 2012)。

27. 结论

27.1. ART 不是万能理论：互补计算和抑制匹配

本文提供了对 ART 作为一种认知和神经理论的各种贡献的启发式总结。摘要表明 ART 如何增强我们对感知、注意力、认知和认知 - 情绪动力学的许多过程的理解。ART 还阐明了此处未总结的大脑过程。例如，3D FORMOTION 模型使用 ART 自上而下的期望，假设发生在从皮质区域 MST 到皮质区域 MT，来选择物体的感知运动方向，从而解决孔径问题（例如，Berzhanskaya, Grossberg 和 Mingolla (2007) 以及 Grossberg、Mingolla 和 Viswanathan (2001)）。SACCART 模型阐明了上丘的更深层如何从听觉、视觉和计划运动信号中为扫视眼运动选择一个关注的目标位置 (Grossberg、Roberts、Aguilar 和 Bullock, 1997)。尽管应用程序多种多样，但 ART 并不是“万能理论”。如第 3 节和图 1 所述，What 流中基于 ART 的对象表示学习使用兴奋性匹配和基于匹配的学习来解决稳定性-可塑性困境。相比之下，流学习通常使用抑制匹配和基于错配的学习的计算互补过程。相应地，What 流学习力求成为位置不变的对象表示，而 Where 流表示使识别的对象能够被操纵的位置和动作。

抑制匹配经常发生在目标位置的大脑表征和运动效应器的当前位置之间。抑制匹配计算表示预期运动的距离和方向的差异向量。差分向量由基底神经节 GO 信号有意识地控制（见第 12 和 44 节），该信号决定运动何时发生以及运动发生的速度 (Bullock 等人, 1998 年；Bullock 和 Grossberg, 1988 年)。

在电机学习期间，当相同的目标位置和当前位置被编码但未正确校准时，差异向量也会产生误差信号。这些误差信号激活了一种失配学习形式，通过重新校准系统图和增益使其保持一致来消除时间上的失配。神经模型预测失配学习如何调节基底神经节、小脑、运动皮层、顶叶皮层和前额叶皮层的空间表征和适应性运动增益（Brown 等人，1999 年，2004 年；Fiala 等人，1996 年；Grossberg & Paine，2000 年；Guenther、Bullock、Greve 和 Grossberg，1994 年）。通过差分向量执行计算和学习的模型通常称为端点自适应向量集成 (aVITE) 或向量关联映射 (VAM) 模型 (Gaudiano & Grossberg, 1991, 1992)。

27.2.加入 ART 和 VAM：在不断变化的身体中自我稳定的专业知识

抑制匹配和错配学习表现出灾难性的遗忘。然而，灾难性遗忘是学习感觉 - 运动图和增益的良好特性。特别是，终生记住我们的大脑控制我们婴儿四肢的地图和收益将是不适应的。地图和增益的持续重新校准使我们能够有效地控制我们不断变化的身体。

“所有有意识状态都是共振状态”的提议阐明了为什么空间/运动过程（也称为程序性过程）是无意识的：支持空间和运动过程的抑制匹配过程不能导致共振。正如第 3 节所指出的，这种区别提供了一个简单的机械解释，解释了为什么程序性记忆不是有意识的，而陈述性记忆可以是有意识的。

总之，感知/认知过程通常使用类似 ART 的兴奋性匹配和基于匹配的学习来创建对象和事件的自稳定表示，使我们能够在了解世界时获得越来越多的专业知识。互补的空间/运动过程通常使用类似 VAM 的抑制匹配和基于错配的学习来不断更新空间图和感觉 - 运动增益，以补偿整个生命中的身体变化。这些互补的预测和学习机制共同创造了一个自我稳定的感知/认知前端，用于智能地操纵更不稳定的空间/运动过程，使我们不断变化的身体能够有效地应对不断变化的世界。

60.2. Joining ART and VAM: self-stabilizing expertise in evolving bodies

Inhibitory matching and mismatch learning exhibit catastrophic forgetting. However, catastrophic forgetting is a good property for learning sensory–motor maps and gains. In particular, it would be maladaptive to remember for life the maps and gains whereby our brains controlled our infant limbs. Continual recalibration of maps and gains enables us to efficiently control our changing bodies.

The proposal that “all conscious states are resonant states” clarifies why spatial/motor, also called procedural, processes are unconscious: the inhibitory matching process that supports spatial and motor processes cannot lead to resonance. This distinction provides a simple mechanistic explanation of why procedural memories are not conscious, whereas declarative memories can be conscious, as noted in Section 3.

In summary, perceptual/cognitive processes often use ART-like excitatory matching and match-based learning to create self-stabilizing representations of objects and events that enable us to gain increasing expertise as we learn about the world. Complementary spatial/motor processes often use VAM-like inhibitory matching and mismatch-based learning to continually update spatial maps and sensory–motor gains to compensate for bodily changes throughout life. Together these complementary predictive and learning mechanisms create a self-stabilizing perceptual/cognitive front end for intelligently manipulating the more labile spatial/motor processes which enable our changing bodies to act effectively upon a changing world.

Acknowledgment

This research was supported in part by the SyNAPSE program of DARPA (HR0011-09-C-0001).

References

- Abbott, L. F., Varela, K., Sen, K., & Nelson, S. B. (1997). Synaptic depression and cortical gain control. *Science*, *275*, 220–223.
- Agam, Y., Bullock, D., & Sekuler, R. (2005). Imitating unfamiliar sequences of connected linear motions. *Journal of Neurophysiology*, *94*, 2832–2843.
- Agam, Y., Galperin, H., Gold, B. J., & Sekuler, R. (2007). Learning to imitate novel motion sequences. *Journal of Vision*, *7*, <http://dx.doi.org/10.1167/7.5.1>.
- Aggleton, J. P. (1993). The contribution of the amygdala to normal and abnormal emotional states. *Trends in Neurosciences*, *16*, 328–333.
- Ahissar, M., & Hochstein, S. (1993). Attentional control of early perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, *90*, 5718–5722.
- Akhbardeh, A., Junnila, S., Koivistoinen, T., & Varri, A. (2007). An intelligent ballistocardiographic chair using a novel SF-ART neural network and biorthogonal wavelets. *Journal of Medical Systems*, *31*, 69–77.
- Ames, H., & Grossberg, S. (2008). Speaker normalization using cortical strip maps: a neural model for steady state vowel categorization. *Journal of the Acoustical Society of America*, *124*, 3918–3936.
- Amir, Y., Harel, M., & Malach, R. (1993). Cortical hierarchy reflected in the organization of intrinsic connections in macaque monkey visual cortex. *Journal of Comparative Neurology*, *334*, 19–46.
- Amis, G., & Carpenter, G. (2007). Default ARTMAP 2. In *Proceedings of the international joint conference on neural networks, IJCNN'07*. (pp. 777–782). Orlando, Florida: IEEE Press.
- Amis, G., & Carpenter, G. (2009). Self-supervised ARTMAP. *Neural Networks*, *23*, 265–282.
- Amis, G., Carpenter, G.A., Ersoy, B., & Grossberg, S. (2009). Cortical learning of recognition categories: a resolution of the exemplar vs. prototype debate (submitted for publication).
- Anagnostopoulos, G.C., & Georgopoulos, M. (2000). Hypersphere ART and ARTMAP for unsupervised and supervised incremental learning. In *Neural networks, proceedings of the IEEE-INNS-ENNS international joint conference on neural networks*, vol. 6 (pp. 59–64).
- Anton-Rodriguez, M., Diaz-Pernas, F. J., Diez-Higuera, J. F., Martinez-Zarzuela, M., Gonzalez-Ortega, D., & Boto-Giralda, D. (2009). Recognition of coloured and textured images through a multi-scale neural architecture with orientational filtering and chromatic diffusion. *Neurocomputing*, *72*, 3713–3725.
- Atri, A., Sherman, S., Norman, K. A., Kirchhoff, B. A., Nicolas, M. M., Greicius, M. D., Cramer, S. C., Breiter, H. C., Hasselmo, M. E., & Stern, C. E. (2004). Blockade of central cholinergic receptors impairs new learning and increases proactive interference in a word paired-associate memory task. *Behavioral Neuroscience*, *118*, 223–236.
- Auer, E. T., Jr., & Luce, P. A. (2008). Probabilistic phonotactics in spoken word recognition. In D. B. Pisoni, & R. E. Remez (Eds.), *The handbook of speech perception*. Wiley Online Library, <http://dx.doi.org/10.1002/9780470757024.ch25>.
- Averbeck, B. B., Chafee, M. V., Crowe, D. A., & Georgopoulos, A. P. (2002). Parallel processing of serial movements in prefrontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, *99*(20), 13172–13177.
- Averbeck, B. B., Crowe, D. A., Chafee, M. V., & Georgopoulos, A. P. (2003a). Neural activity in prefrontal cortex during copying geometrical shapes, I, single cells encode shape, sequence, and metric parameters. *Experimental Brain Research*, *150*, 127–141.
- Averbeck, B. B., Crowe, D. A., Chafee, M. V., & Georgopoulos, A. P. (2003b). Neural activity in prefrontal cortex during copying geometrical shapes, II, decoding shape segments from neural ensembles. *Experimental Brain Research*, *150*, 142–153.
- Baldi, P., & Hornik, K. (1989). Neural networks and principal component analysis: learning from examples and local minima. *Neural Networks*, *2*, 53–58.
- Bar, M., Tootell, R. B. H., Schacter, D. L., Greve, D. N., Fischl, B., Mendola, J. D., Rosen, B. R., & Dale, A. M. (2001). Cortical mechanisms specific to explicit object recognition. *Neuron*, *29*, 529–535.
- Barbas, H. (1995). Anatomic basis of cognitive–emotional interactions in the primate prefrontal cortex. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *19*, 499–510.
- Barbas, H. (2000). Connections underlying the synthesis of cognition, memory and emotion in primate prefrontal cortices. *Brain Research Bulletin*, *52*(5), 319–330.
- Bazhenov, M., Timofeev, I., Steriade, M., & Sejnowski, T. J. (1998). Computational models of thalamocortical augmenting responses. *Journal of Neuroscience*, *18*, 6444–6465.
- Baxter, M. G., Parker, A., Lindner, C. C., Izquierdo, A. D., & Murray, E. A. (2000). Control of response selection by reinforcer value requires interaction of amygdala and orbital prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, *20*, 4311–4319.
- Ben-Shahar, O., & Zuckerman, S. (2004). Sensitivity to curvatures in orientation-based texture segmentation. *Vision Research*, *44*, 257–277.
- Berger, T. W., Berry, S. D., & Thompson, R. F. (1986). Role of the hippocampus in classical conditioning of aversive and appetitive behaviors. In R. L. Isaacson, & K. H. Pribram (Eds.), *The hippocampus*, vol. 4 (pp. 203–239). New York: Plenum Press.
- Berke, J. D., Hettrick, V., Breck, J., & Green, R. W. (2008). Transient 23–30-Hz oscillations in mouse hippocampus during exploration of novel environments. *Hippocampus*, *18*, 519–529.
- Berzhanskaya, J., Grossberg, S., & Mingolla, E. (2007). Laminar cortical dynamics of visual form and motion interactions during coherent object motion perception. *Spatial Vision*, *20*, 337–395.
- Bhatt, R., Carpenter, G., & Grossberg, S. (2007). Texture segregation by visual cortex: perceptual grouping, attention, and learning. *Vision Research*, *47*, 3173–3211.
- Bi, G. Q., & Poo, M. M. (2001). Synaptic modification by correlated activity: Hebb's postulate revisited. *Annual Review of Neuroscience*, *24*, 139–166.
- Botly, L. C., & De Rosa, E. (2007). Cholinergic influences on feature binding. *Behavioral Neuroscience*, *121*, 264–276.
- Botly, L. C., & De Rosa, E. (2009). Cholinergic deafferentation of the neocortex using 192 igg-saporin impairs feature binding in rats. *The Journal of Neuroscience*, *29*, 4120–4130.
- Bradski, G., Carpenter, G. A., & Grossberg, S. (1992). Working memory networks for learning temporal order with application to 3-D visual object recognition. *Neural Computation*, *4*, 270–286.
- Bradski, G., Carpenter, G. A., & Grossberg, S. (1994). STORE working memory networks for storage and recall of arbitrary temporal sequences. *Biological Cybernetics*, *71*, 469–480.
- Brannon, N. G., Seiffert, J. E., Draelos, T. J., & Wunsch, D. C. II (2009). Coordinated machine learning and decision support for situation awareness. *Neural Networks*, *22*, 316–325.
- Bregman, A. S. (1990). *Auditory scene analysis: the perceptual organization of sound*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Brown, J., Bullock, D., & Grossberg, S. (1999). How the basal ganglia use parallel excitatory and inhibitory learning pathways to selectively respond to unexpected rewarding cues. *Journal of Neuroscience*, *19*, 10502–10511.
- Brown, J. W., Bullock, D., & Grossberg, S. (2004). How laminar frontal cortex and basal ganglia circuits interact to control planned and reactive saccades. *Neural Networks*, *17*, 471–510.
- Brown, J. M., & Denney, H. I. (2007). Shifting attention into and out of objects: evaluating the processes underlying the object advantage. *Perception & Psychophysics*, *69*, 606–618.
- Buchanan, F. M., & Bitterman, M. E. (1998). Learning in honeybees as a function of amount and frequency of reward. *Animal Learning and Behavior*, *16*, 247–255.
- Buffalo, E. A., Fries, P., Landman, R., Buschman, T. J., & Desimone, R. (2011). Laminar differences in gamma and alpha coherence in the ventral stream. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*, 11262–11267.
- Bullier, J., Hupé, J. M., James, A., & Girard, P. (1996). Functional interactions between areas V1 and V2 in the monkey. *Journal of Physiology (Paris)*, *90*, 217–220.
- Bullock, D., Cisek, P., & Grossberg, S. (1998). Cortical networks for control of voluntary arm movements under variable force conditions. *Cerebral Cortex*, *8*, 48–62.

- Bullock, D., & Grossberg, S. (1988). Neural dynamics of planned arm movements: emergent invariants and speed-accuracy properties during trajectory formation. *Psychological Review*, 95, 49–90.
- Bullock, D., Grossberg, S., & Guenther, F. H. (1993). A self-organizing neural model of motor equivalent reaching and tool use by a multijoint arm. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 408–435.
- Burgess, N. (1995). A solvable connectionist model of immediate recall of ordered lists. In G. Tesauró, D. S. Touretzky, & T. K. Leen (Eds.), *Advances in neural information processing systems*, vol. 7. Cambridge, MA: MIT Press.
- Burgess, N., & Hitch, G. J. (1992). Toward a network model of the articulatory loop. *Journal of Memory and Language*, 31, 429–460.
- Buschman, T. J., & Miller, E. K. (2007). Top-down versus bottom-up control of attention in the prefrontal and posterior parietal cortices. *Science*, 315, 1860–1862.
- Buschman, T. J., & Miller, E. K. (2009). Serial, covert shifts of attention during visual search are reflected by the frontal eye fields and correlated with population oscillations. *Neuron*, 63, 386–396.
- Cai, Y., Wang, J.-Z., Tang, Y., & Yang, Y.-C. (2011). An efficient approach for electric load forecasting using distributed ART (adaptive resonance theory) & HS-ARTMAP (Hyper-spherical ARTMAP network) neural network. *Energy*, 36, 1340–1350.
- Cano-Izquierdo, J.-M., Almonacid, M., Pinzolas, M., & Ibarrola, J. (2009). dFasArt: dynamic neural processing in FasArt model. *Neural Networks*, 22, 479–487.
- Cao, Y., & Grossberg, S. (2005). A laminar cortical model of stereopsis and 3D surface perception: closure and da Vinci stereopsis. *Spatial Vision*, 18, 515–578.
- Cao, Y., Grossberg, S., & Markowitz, J. (2011). How does the brain rapidly learn and reorganize view- and positionally-invariant object representations in inferior temporal cortex? *Neural Networks*, 24, 1050–1061.
- Caputo, G., & Guerra, S. (1998). Attentional selection by distractor suppression. *Vision Research*, 38, 669–689.
- Carpenter, G. A. (1997). Distributed learning, recognition, and prediction by ART and ARTMAP neural networks. *Neural Networks*, 10, 1473–1494.
- Carpenter, G. A. (2003). Default ARTMAP. In *Proceedings of the international joint conference on neural networks, IJCNN'03* (pp. 1396–1401).
- Carpenter, G. A., & Gaddam, S. C. (2010). Biased ART: a neural architecture that shifts attention toward previously disregarded features following an incorrect prediction. *Neural Networks*, 23, 435–451.
- Carpenter, G. A., & Grossberg, S. (1987). A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 37, 54–115.
- Carpenter, G. A., & Grossberg, S. (1990). ART 3: hierarchical search using chemical transmitters in self-organizing pattern recognition architectures. *Neural Networks*, 3, 129–152.
- Carpenter, G. A., & Grossberg, S. (1991). *Pattern recognition by self-organizing neural networks*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Carpenter, G. A., & Grossberg, S. (1993). Normal and amnesic learning, recognition, and memory by a neural model of cortico-hippocampal interactions. *Trends in Neurosciences*, 16, 131–137.
- Carpenter, G. A., Grossberg, S., Markuzon, N., Reynolds, J. H., & Rosen, D. B. (1992). Fuzzy ARTMAP: a neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 3, 698–713.
- Carpenter, G. A., Grossberg, S., & Reynolds, J. H. (1991). ARTMAP: supervised real-time learning and classification of nonstationary data by a self-organizing neural network. *Neural Networks*, 4, 565–588.
- Carpenter, G. A., Grossberg, S., & Rosen, D. B. (1991). Fuzzy ART: fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system. *Neural Networks*, 4, 759–771.
- Carpenter, G. A., Martens, S., & Ogas, O. J. (2005). Self-organizing information fusion and hierarchical knowledge discovery: a new framework using ARTMAP neural networks. *Neural Networks*, 18, 287–295.
- Carpenter, G. A., Milenova, B. L., & Noeske, B. W. (1998). Distributed ARTMAP: a neural network for fast distributed supervised learning. *Neural Networks*, 11, 793–813.
- Carpenter, G. A., & Ravindran, A. (2008). Unifying multiple knowledge domains using the ARTMAP information fusion system. In *Proceedings of the 11th international conference on information fusion*. Cologne, Germany, June 30–July 3.
- Carrasco, M., Penpeci-Talgar, C., & Eckstein, M. (2000). Spatial covert attention increases contrast sensitivity across the CSF: support for signal enhancement. *Vision Research*, 40, 1203–1215.
- Caudell, T. P. (1992). Hybrid optoelectronic adaptive resonance theory neural processor, ART 1. *Applied Optics*, 31, 6220–6229.
- Caudell, T. P., Smith, S. D. G., Johnson, G. C., Wunsch, D. C. II, & Escobedo, R. (1991). An industrial application to neural networks to reusable design. *Neural Networks, International Joint Conference on Neural Networks*, 2, 919.
- Cauler, L. J., & Connors, B. W. (1994). Synaptic physiology of horizontal afferents to layer I in slices of rat SI cortex. *Journal of Neuroscience*, 14, 751–762.
- Chao, H.-C., Hsiao, C.-M., Su, W.-S., Hsu, C.-C., & Wu, C.-Y. (2011). Modified adaptive resonance theory for alarm correlation based on distance hierarchy in mobile networks. *Network operations and management symposium, 2011 13th Asia-Pacific* (pp. 1–4).
- Cherng, S., Fang, C.-Y., Chen, C.-P., & Chen, S.-W. (2009). Critical motion detection of nearby moving vehicles in a vision-based driver-assistance system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10, 70–82.
- Chiba, A. A., Bucci, D. J., Holland, P. C., & Gallagher, M. (1995). Basal forebrain cholinergic lesions disrupt increments but not decrements in conditioned stimulus processing. *The Journal of Neuroscience*, 15, 7315–7322.
- Chiu, Y. C., & Yantis, S. (2009). A domain-independent source of cognitive control for task sets: shifting spatial attention and switching categorization rules. *Journal of Neuroscience*, 29, 3930–3938.
- Chun, M. M. (2000). Contextual cueing of visual attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 170–178.
- Chun, M. M., & Jiang, Y. (1998). Contextual cueing: implicit learning and memory of visual context guides spatial attention. *Cognitive Psychology*, 36, 28–71.
- Church, B. A., Krauss, M. S., Lopata, C., Toomey, J. A., Thomeer, M. L., Coutinho, M. V., Volker, M. A., & Mercado, E. (2010). Atypical categorization in children with high-functioning autism spectrum disorder. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17, 862–868.
- Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). The numerical attribute of stimuli. In H. L. Roitblat, T. G. Bever, & H. J. Terrace (Eds.), *Animal cognition*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Cohen, M. A., Grossberg, S., & Stork, D. G. (1988). Speech perception and production by a self-organizing neural network. In Y. C. Lee (Ed.), *Evolution, learning, cognition, and advanced architectures* (pp. 217–231). Hong Kong: World Scientific.
- Cohen, M. A., Grossberg, S., & Wyse, L. L. (1995). A spectral network model of pitch perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98, 862–879.
- Cohen, N. J., & Squire, L. R. (1980). Preserved learning and retention of a pattern-analyzing skill in amnesia: dissociation of knowing how and knowing that. *Science*, 210, 207–210.
- Colburn, H. S. (1973). Theory of binaural interaction based on auditory-nerve data, I, general strategy and preliminary results on interaural discrimination. *Journal of the Acoustical Society of America*, 54, 1458–1470.
- Colburn, H. S. (1977). Theory of binaural interaction based on auditory-nerve data, II, detection of tones in noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61, 525–533.
- Comon, P. (1994). Independent component analysis: a new concept? *Signal Processing*, 36, 287–314.
- Conway, C. M., & Christiansen, M. H. (2001). Sequential learning in non-human primates. *Trends in Cognitive Science*, 5(12), 539–546.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: a reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 87–185.
- Damasio, A. R. (1999). *The feeling of what happens: body and emotion in the making of consciousness*. Boston, MA: Houghton Mifflin Harcourt.
- Dehaene, S. (1997). *The number sense: how the mind creates mathematics*. New York: Oxford University Press.
- Demetgul, M., Tansel, I. N., & Taskin, S. (2009). Fault diagnosis of pneumatic systems with artificial neural network architectures. *Expert Systems with Applications*, 36, 10512–10519.
- Desimone, R. (1998). Visual attention mediated by biased competition in extrastriate visual cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 353, 1245–1255.
- Destexhe, A., Contreras, D., & Steriade, M. (1999). Cortically-induced coherence of a thalamic-generated oscillation. *Neuroscience*, 92, 427–443.
- Douglas, R. J., Koch, C., Mahowald, M., Martin, K. A. C., & Suarez, H. H. (1995). Recurrent excitation in neocortical circuits. *Science*, 269, 981–985.
- Downing, C. J. (1988). Expectancy and visual-spatial attention: effects on perceptual quality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 188–202.
- Doya, K., Ishii, S., Pouget, A., & Rao, R. P. N. (Eds.) (2007). *Bayesian brain: probabilistic approaches to neural coding*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Dranias, M., Grossberg, S., & Bullock, D. (2008). Dopaminergic and non-dopaminergic value systems in conditioning and outcome-specific reevaluation. *Brain Research*, 1238, 239–287.
- Driver, J., & Mattingley, J. B. (1998). Parietal neglect and visual awareness. *Nature Neuroscience*, 1, 17–22.
- Dubin, M. W., & Cleland, B. G. (1977). Organization of visual inputs to interneurons of lateral geniculate nucleus of the cat. *Journal of Neurophysiology*, 40, 410–427.
- Duhamel, J. R., Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1992). The updating of the representation of visual space in parietal cortex by intended eye movements. *Science*, 255, 90–92.
- Dunbar, G. (2012). Adaptive resonance theory as a model of polysemy and vagueness in the cognitive lexicon. *Cognitive Linguistics*, 23, 507–537.
- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology: General*, 113, 501–517.
- Eckhorn, R., Bauer, R., Jordan, W., Brosch, M., Kruse, W., Munk, M., & Reitbock, H. J. (1988). Coherent oscillations: a mechanism of feature linking in the visual cortex? *Biological Cybernetics*, 60, 121–130.
- Egley, R., Driver, J., & Rafal, R. D. (1994). Shifting visual attention between objects and locations: evidence from normal and parietal lesion subjects. *Journal of Experimental Psychology General*, 123, 161–177.
- Eichenbaum, H., & Lipton, P. A. (2008). Towards a functional organization of the medial temporal lobe memory system: role of the parahippocampal and medial entorhinal cortical areas. *Hippocampus*, 18, 1314–1324.
- Emmert, J., Lohmann, A., & Niemann, J. (1997). Pigeons' serial ordering of numerosity with visual arrays. *Animal Learning and Behavior*, 25, 234–244.
- Engel, A. K., Fries, P., & Singer, W. (2001). Dynamics predictions: oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 704–716.

- Fang, L., & Grossberg, S. (2009). From stereogram to surface: how the brain sees the world in depth. *Spatial Vision*, 22, 45–82.
- Farrell, S., & Lewandowsky, S. (2002). An endogenous distributed model of ordering in serial recall. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 59–79.
- Fazl, A., Grossberg, S., & Mingolla, E. (2009). View-invariant object category learning, recognition, and search: how spatial and object attention are coordinated using surface-based attentional shrouds. *Cognitive Psychology*, 58, 1–48.
- Felleman, D. J., & Van Essen, D. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 1, 1–47.
- Fiala, J. C., Grossberg, S., & Bullock, D. (1996). Metabotropic glutamate receptor activation in cerebellar Purkinje cells as substrate for adaptive timing of the classically conditioned eye blink response. *Journal of Neuroscience*, 16, 3760–3774.
- Finch, E. A., & Augustine, G. J. (1998). Local calcium signalling by inositol-1, 4, 5-triphosphate in Purkinje cell dendrites. *Nature*, 396, 753–756.
- Foley, N. C., Grossberg, S., & Mingolla, E. (2012). Neural dynamics of object-based multifocal visual spatial attention and priming: object cueing, useful-field-of-view, and crowding. *Cognitive Psychology*, 65, 77–117.
- Francis, G., & Grossberg, S. (1996). Cortical dynamics of boundary segmentation and reset: persistence, afterimages, and residual traces. *Perception*, 35, 543–567.
- Francis, G., Grossberg, S., & Mingolla, E. (1994). Cortical dynamics of feature binding and reset: control of visual persistence. *Vision Research*, 34, 1089–1104.
- Frank, L. M., Stanley, G. B., & Brown, E. N. (2004). Hippocampal plasticity across multiple days of exposure to novel environments. *Journal of Neuroscience*, 24, 7681–7689.
- Funahashi, S., Inoue, M., & Kubota, K. (1997). Delay-period activity in the primate prefrontal cortex encoding multiple spatial positions and their order of presentation. *Behavioral Brain Research*, 84, 203–223.
- Gaffan, D. (1974). Recognition impaired and association intact in the memory of monkeys after transection of the fornix. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 86, 1100–1109.
- Gao, E., & Suga, N. (1998). Experience-dependent corticofugal adjustment of midbrain frequency map in bat auditory system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95, 12663–12670.
- Gaudiano, P., & Grossberg, S. (1991). Vector associative maps: unsupervised real-time error-based learning and control of movement trajectories. *Neural Networks*, 4, 147–183.
- Gaudiano, P., & Grossberg, S. (1992). Adaptive vector integration to endpoint: self-organizing neural circuits for control of planned movement trajectories. *Human Movement Science*, 11, 141–155.
- Georgopoulos, A. P., Kalaska, J. F., Caminiti, R., & Massey, J. T. (1982). On the relations between the direction of two-dimensional arm movements and cell discharge in primate motor cortex. *Journal of Neuroscience*, 2, 1527–1537.
- Georgopoulos, A. P., Schwartz, A. B., & Kettner, R. E. (1986). Neuronal population coding of movement direction. *Science*, 233, 1416–1419.
- Goldinger, S. D., & Azuma, T. (2003). Puzzle-solving science: the quixotic quest for units in speech perception. *Journal of Phonetics*, 31, 305–320.
- Goldman-Rakic, P. S. (1987). Circuitry of primate prefrontal cortex and regulation of behavior by representational memory. In F. Plum, & V. Mountcastle (Eds.), *Handbook of physiology*, vol. 5 (pp. 373–417). Bethesda: American Physiological Society.
- Gorchetchnikov, A., & Grossberg, S. (2007). Space, time and learning in the hippocampus: how fine spatial and temporal scales are expanded into population codes for behavioral control. *Neural Networks*, 20, 182–193.
- Gori, M., & Tesi, A. (1992). On the problem of local minima in backpropagation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14, 76–86.
- Gottlieb, J., Kusunoki, M., & Goldberg, M. E. (2005). Simultaneous representation of saccade targets and visual onsets in monkey lateral intraparietal area. *Cerebral Cortex*, 15, 1198–1206.
- Gove, A., Grossberg, S., & Mingolla, E. (1995). Brightness perception, illusory contours, and corticogeniculate feedback. *Visual Neuroscience*, 12, 1027–1052.
- Gray, C. M., & Singer, W. (1989). Stimulus-specific neuronal oscillations in orientation columns of cat visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 86, 1698–1702.
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, 423, 534–537.
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2007). Action-video-game experience alters the spatial resolution of vision. *Psychological Science*, 18, 88–94.
- Grossberg, S. (1968a). A prediction theory for some nonlinear functional-differential equations, II: learning of patterns. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 22, 490–522.
- Grossberg, S. (1968b). Some nonlinear networks capable of learning a spatial pattern of arbitrary complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 59, 368–372.
- Grossberg, S. (1968c). Some physiological and biochemical consequences of psychological postulates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 60, 758–765.
- Grossberg, S. (1969a). On learning and energy-entropy dependence in recurrent and nonrecurrent signed networks. *Journal of Statistical Physics*, 1, 319–350.
- Grossberg, S. (1969b). On the production and release of chemical transmitters and related topics in cellular control. *Journal of Theoretical Biology*, 22, 325–364.
- Grossberg, S. (1969c). On the serial learning of lists. *Mathematical Biosciences*, 4, 201–253.
- Grossberg, S. (1971). On the dynamics of operant conditioning. *Journal of Theoretical Biology*, 33, 225–255.
- Grossberg, S. (1972a). A neural theory of punishment and avoidance, I: qualitative theory. *Mathematical Biosciences*, 15, 39–67.
- Grossberg, S. (1972b). A neural theory of punishment and avoidance, II: quantitative theory. *Mathematical Biosciences*, 15, 253–285.
- Grossberg, S. (1973). Contour enhancement, short-term memory, and constancies in reverberating neural networks. *Studies in Applied Mathematics*, 52, 213–257.
- Grossberg, S. (1974). Classical and instrumental learning by neural networks. In R. Rosen, & F. Snell (Eds.), *Progress in theoretical biology* (pp. 51–141). New York: Academic Press.
- Grossberg, S. (1975). A neural model of attention, reinforcement, and discrimination learning. *International Review of Neurobiology*, 18, 263–327.
- Grossberg, S. (1976a). Adaptive pattern classification and universal recoding, I: parallel development and coding of neural feature detectors. *Biological Cybernetics*, 23, 121–134.
- Grossberg, S. (1976b). Adaptive pattern classification and universal recoding, II: feedback, expectation, olfaction, and illusions. *Biological Cybernetics*, 23, 187–202.
- Grossberg, S. (1978a). A theory of human memory: self-organization and performance of sensory-motor codes, maps, and plans. In R. Rosen, & F. Snell (Eds.), *Progress in theoretical biology*, vol. 5 (pp. 233–374). New York: Academic Press.
- Grossberg, S. (1978b). Behavioral contrast in short-term memory: serial binary memory models or parallel continuous memory models? *Journal of Mathematical Psychology*, 3, 199–219.
- Grossberg, S. (1980). How does a brain build a cognitive code? *Psychological Review*, 87, 1–51.
- Grossberg, S. (1982). Processing of expected and unexpected events during conditioning and attention: a psychophysiological theory. *Psychological Review*, 89, 529–572.
- Grossberg, S. (1984a). Some normal and abnormal behavioral syndromes due to transmitter gating of opponent processes. *Biological Psychiatry*, 19, 1075–1118.
- Grossberg, S. (1984b). Some psychophysiological and pharmacological correlates of a developmental, cognitive, and motivational theory. In R. Karrer, J. Cohen, & P. Tueting (Eds.), *Brain and information: event related potentials* (pp. 58–142). New York: New York Academy of Sciences.
- Grossberg, S. (1986). The adaptive self-organization of serial order in behavior: speech, language, and motor control. In E. C. Schwab, & H. C. Nusbaum (Eds.), *Pattern recognition by humans and machines*, vol. 1: speech perception (pp. 187–294). New York: Academic Press.
- Grossberg, S. (1988). Nonlinear neural networks: principles, mechanisms, and architectures. *Neural Networks*, 1, 17–61.
- Grossberg, S. (1994). 3-D vision and figure-ground separation by visual cortex. *Perception and Psychophysics*, 55, 48–120.
- Grossberg, S. (1997). Cortical dynamics of three-dimensional figure-ground perception of two-dimensional figures. *Psychological Review*, 104, 618–658.
- Grossberg, S. (1999). How does the cerebral cortex work? learning, attention and grouping by the laminar circuits of visual cortex. *Spatial Vision*, 12, 163–186.
- Grossberg, S. (2000a). How hallucinations may arise from brain mechanisms of learning, attention, and volition. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 6, 579–588. Invited article for the.
- Grossberg, S. (2000b). The complementary brain: unifying brain dynamics and modularity. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 233–246.
- Grossberg, S. (2000c). The imbalanced brain: from normal behavior to schizophrenia. *Biological Psychiatry*, 48, 81–98.
- Grossberg, S. (2003a). How does the cerebral cortex work? development, learning, attention, and 3D vision by laminar circuits of visual cortex. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 2, 47–76.
- Grossberg, S. (2003b). Resonant neural dynamics of speech perception. *Journal of Phonetics*, 31, 423–445.
- Grossberg, S. (2007a). Consciousness CLEARs the mind. *Neural Networks*, 20, 1040–1053.
- Grossberg, S. (2007b). Towards a unified theory of neocortex: laminar cortical circuits for vision and cognition. *Progress in Brain Research*, 165, 79–104.
- Grossberg, S. (2009a). Beta oscillations and hippocampal place cell learning during exploration of novel environments. *Hippocampus*, 19, 881–885.
- Grossberg, S. (2009b). Cortical and subcortical predictive dynamics and learning during perception, cognition, emotion and action. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B Biological Sciences*, 364, 1223–1234.
- Grossberg, S., Bullock, D., & Dranias, M. (2008). Neural dynamics underlying impaired autonomic and conditioned responses following amygdala and orbitofrontal lesions. *Behavioral Neuroscience*, 122, 1100–1125.
- Grossberg, S., Govindarajan, K. K., Wyse, L. L., & Cohen, M. A. (2004). ARTSTREAM: a neural network model of auditory scene analysis and source segregation. *Neural Networks*, 17, 511–536.
- Grossberg, S., & Grunewald, A. (1997). Cortical synchronization and perceptual framing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 117–132.
- Grossberg, S., & Huang, T.-R. (2009). ARTSCENE: a neural system for natural scene classification. *Journal of Vision*, 9(6), 1–19. <http://dx.doi.org/10.1167/9.4.6>. <http://journalofvision.org/9/4/6/>.
- Grossberg, S., & Kazerounian, S. (2011). Laminar cortical dynamics of conscious speech perception: a neural model of phonemic restoration using subsequent context in noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130, 440–460.

- Grossberg, S., & Levine, D. S. (1987). Neural dynamics of attentionally modulated Pavlovian conditioning: blocking, inter-stimulus interval, and secondary reinforcement. *Applied Optics*, 26, 5015–5030.
- Grossberg, S., Markowitz, J., & Cao, Y. (2011). On the road to invariant recognition: explaining tradeoff and morph properties of cells in inferotemporal cortex using multiple-scale task-sensitive attentive learning. *Neural Networks*, 24, 1036–1049.
- Grossberg, S., & McLoughlin, N. (1997). Cortical dynamics of 3-D surface perception: binocular and half-occluded scenic images. *Neural Networks*, 10, 1583–1605.
- Grossberg, S., & Merrill, J. W. L. (1992). A neural network model of adaptively timed reinforcement learning and hippocampal dynamics. *Cognitive Brain Research*, 1, 3–38.
- Grossberg, S., & Merrill, J. W. L. (1996). The hippocampus and cerebellum in adaptively timed learning, recognition, and movement. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8, 257–277.
- Grossberg, S., & Mingolla, E. (1985). Neural dynamics of form perception: boundary completion, illusory figures, and neon color spreading. *Psychological Review*, 92, 173–211.
- Grossberg, S., Mingolla, E., & Ross, W. D. (1997). Visual brain and visual perception: how does the cortex do perceptual grouping? *Trends in Neurosciences*, 20, 106–111.
- Grossberg, S., Mingolla, E., & Viswanathan, L. (2001). Neural dynamics of motion integration and segmentation within and across apertures. *Vision Research*, 41, 2521–2553.
- Grossberg, S., & Myers, C. W. (2000). The resonant dynamics of speech perception: interword integration and duration-dependent backward effects. *Psychological Review*, 107, 735–767.
- Grossberg, S., & Paine, R. W. (2000). A neural model of corticocerebellar interactions during attentive imitation and predictive learning of sequential handwriting movements. *Neural Networks*, 13, 999–1046.
- Grossberg, S., & Pearson, L. (2008). Laminar cortical dynamics of cognitive and motor working memory, sequence learning and performance: toward a unified theory of how the cerebral cortex works. *Psychological Review*, 115, 677–732.
- Grossberg, S., & Pilly, P. (2012). How entorhinal grid cells may learn multiple spatial scales from a dorsoventral gradient of cell response rates in a self-organizing map. *PLoS Computational Biology* (in press).
- Grossberg, S., & Raizada, R. (2000). Contrast-sensitive perceptual grouping and object-based attention in the laminar circuits of primary visual cortex. *Vision Research*, 40, 1413–1432.
- Grossberg, S., & Repin, D. (2003). A neural model of how the brain represents and compares multi-digit numbers: spatial and categorical processes. *Neural Networks*, 16, 1107–1140.
- Grossberg, S., Roberts, K., Aguilar, M., & Bullock, D. (1997). A neural model of multimodal adaptive saccadic eye movement control by superior colliculus. *Journal of Neuroscience*, 17, 9706–9725.
- Grossberg, S., & Schmajuk, N. A. (1989). Neural dynamics of adaptive timing and temporal discrimination during associative learning. *Neural Networks*, 2, 79–102.
- Grossberg, S., & Seidman, D. (2006). Neural dynamics of autistic behaviors: cognitive, emotional, and timing substrates. *Psychological Review*, 113, 483–525.
- Grossberg, S., & Somers, D. (1991). Synchronized oscillations during cooperative feature linking in a cortical model of visual perception. *Neural Networks*, 4, 453–466.
- Grossberg, S., & Swaminathan, G. (2004). A laminar cortical model for 3D perception of slanted and curved surfaces and of 2D images: development, attention and bistability. *Vision Research*, 44, 1147–1187.
- Grossberg, S., & Todorovic, D. (1988). Neural dynamics of 1-D and 2-D brightness perception: a unified model of classical and recent phenomena. *Perception & Psychophysics*, 43, 241–277.
- Grossberg, S., & Versace, M. (2008). Spikes, synchrony, and attentive learning by laminar thalamocortical circuits. *Brain Research*, 1218, 278–312.
- Grossberg, S., & Vladusich, T. (2011). How do children learn to follow gaze, share joint attention, imitate their teachers, and use tools during social interactions? *Neural Networks*, 23, 940–965.
- Grossberg, S., & Williamson, J. R. (2001). A neural model of how horizontal and interlaminar connections of visual cortex develop into adult circuits that carry out perceptual groupings and learning. *Cerebral Cortex*, 11, 37–58.
- Grossberg, S., & Yazdanbakhsh, A. (2005). Laminar cortical dynamics of 3D surface perception: stratification, transparency, and neon color spreading. *Vision Research*, 45, 1725–1743.
- Grossberg, S., Yazdanbakhsh, A., Cao, Y., & Swaminathan, G. (2008). How does binocular rivalry emerge from cortical mechanisms of 3-D vision? *Vision Research*, 48, 2232–2250.
- Guenther, F. H. (1995). Speech sound acquisition, coarticulation, and rate effects in a neural network model of speech production. *Psychological Review*, 102, 594–621.
- Guenther, F. H., Bullock, D., Greve, D., & Grossberg, S. (1994). Neural representations for sensory-motor control, III: learning a body-centered representation of 3-D target position. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6, 341–358.
- Guenther, F. H., Ghosh, S. S., & Tourville, J. A. (2006). Neural modeling and imaging of the cortical interactions underlying syllable production. *Brain and Language*, 96, 280–301.
- Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M. B., & Moser, E. I. (2005). Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, 436, 801–806.
- Hata, T., Kumai, K., & Okaichi, H. (2007). Hippocampal acetylcholine efflux increases during negative patterning and elemental discrimination in rats. *Neuroscience Letters*, 418, 127–132.
- He, H., Caudell, T. P., Menicucci, D. F., & Mammoli, A. A. (2012). Application of adaptive resonance theory neural networks to monitor solar hot water systems and detect existing or developing faults. *Solar Energy*, 86, 2318–2333.
- He, S., Cavanagh, P., & Intriligator, J. (1996). Attentional resolution and the locus of visual awareness. *Nature*, 383, 334–337.
- He, J., Tan, A.-H., & Tan, C.-L. (2000). A comparative study on Chinese text categorization methods. In *Proceedings of PRICAI'2000*.
- Healy, M. J., Caudell, T. P., & Smith, S. D. G. (1993). A neural architecture for pattern sequence verification through inferencing. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 4, 9–20.
- Hecht-Nielsen, R. (1987). Counterpropagation networks. *Applied Optics*, 26, 4979–4983.
- Heeger, D. J. (1992). Normalization of cell responses in cat striate cortex. *Visual Neuroscience*, 9, 181–197.
- Henson, R. N. A. (1998). Short-term memory for serial order: the start-end model of serial recall. *Cognitive Psychology*, 36, 73–137.
- Histed, M. H., & Miller, E. K. (2006). Microstimulation of frontal cortex can reorder a remembered spatial sequence. *Public Library of Science: Biology*, 4(5), e134.
- Ho, C. S., Liou, J. J., Georgiopoulos, M., Heileman, G. L., & Christodoulou, C. (1994). Analogue circuit design and implementation of an adaptive resonance theory (ART) network architecture. *International Journal of Electronics*, 76, 271–291.
- Hollerman, J., & Schultz, W. (1998). Dopamine neurons report an error in the temporal prediction of reward during learning. *Nature Neuroscience*, 1, 304–309.
- Houghton, G. (1990). The problem of serial order: a neural network model of sequence learning and recall. In R. Dale, C. Mellish, & M. Zock (Eds.), *Current research in natural language generation* (pp. 287–319). London: Academic Press.
- Hsieh, K.-L. (2008). The application of clustering analysis for the critical areas on TFT-LCD panel. *Expert Systems with Applications*, 34, 952–957.
- Hsieh, K.-L., & Yang, I.-Ch. (2008). Incorporating PCA and fuzzy-ART techniques into achieve organism classification based on codon usage consideration. *Computers in Biology and Medicine*, 38, 886–893.
- Hsu, S.-C., & Chien, C.-F. (2007). Hybrid data mining approach for pattern extraction from wafer bin map to improve yield in semiconductor manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 107, 88–103.
- Huang, T.-R., & Grossberg, S. (2010). Cortical dynamics of contextually cued attentive visual learning and search: spatial and object evidence accumulation. *Psychological Review*, 117, 1080–1112.
- Hunt, R. R., & Lamb, C. A. (2001). What causes the isolation effect? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 27(6), 1359–1366.
- Hupé, J. M., James, A. C., Girard, D. C., & Bullier, J. (1997). Feedback connections from V2 modulate intrinsic connectivity within V1. *Society for Neuroscience Abstracts*, 406(15), 1031.
- Husain, M., Mannan, S., Hodgson, T., Wojcicuk, E., Driver, J., & Kennard, C. (2001). Impaired spatial working memory across saccades contributes to abnormal search in parietal neglect. *Brain*, 124, 941–952.
- Hyvärinen, A., & Oja, E. (2000). Independent component analysis: algorithms and application. *Neural Networks*, 13, 411–430.
- Ichise, T., Kano, M., Hashimoto, K., Yangihara, D., Nakao, K., Shigemoto, R., Katsuki, M., & Aiba, A. (2000). mGluR1 in cerebellar Purkinje cells essential for long-term depression, synapse elimination, and motor coordination. *Science*, 288, 1832–1835.
- Inoue, M., & Mikami, A. (2006). Prefrontal activity during serial probe reproduction task: encoding, mnemonic and retrieval processes. *Journal of Neurophysiology*, 95, 1008–1041.
- Intriligator, J., & Cavanagh, P. (2001). The spatial resolution of visual attention. *Cognitive Psychology*, 43, 171–216.
- Jones, D., Farrand, P., Stuart, G., & Morris, N. (1995). The functional equivalence of verbal and spatial memory in serial short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 21, 1008–1018.
- Kaas, J. H. (1999). Is most of neural plasticity in the thalamus cortical? *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 96, 7622–7623.
- Kamin, L. J. (1969). Predictability, surprise, attention and conditioning. In B. A. Campbell, & R. M. Church (Eds.), *Punishment and aversive behavior*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Kastner, S., & Ungerleider, L. G. (2001). The neural basis of biased competition in human visual cortex. *Neuropsychologia*, 39, 1263–1276.
- Kawamura, T., Takahashi, H., & Honda, H. (2008). Proposal of new gene filtering method, BagPART, for gene expression analysis with small sample. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 105, 81–84.
- Kaylani, A., Georgiopoulos, M., Mollaghasemi, M., & Anagnostopoulos, G. C. (2009). AG-ART: an adaptive approach to evolving ART architectures. *Neurocomputing*, 72, 2079–2092.
- Kazerounian, S., & Grossberg, S. (2012). Real-time learning of predictive recognition categories that chunk sequences of items stored in working memory (submitted for publication).
- Kemel, M. L., Desban, M., Gauchy, C., Glowinski, J., & Besson, M. J. (1988). Topographical organization of efferent projections from the cat substantia nigra pars reticulata. *Brain Research*, 455, 307–323.
- Kentros, C. G., Agnietri, N. T., Streater, S., Hawkins, R. D., & Kandel, E. R. (2004). Increased attention to spatial context increases both place field stability and spatial memory. *Neuron*, 42, 283–295.

- Kentros, C., Hargreaves, E., Hawkins, R. D., Kandel, E. R., Shapiro, M., & Muller, R. V. (1998). Abolition of long-term stability of new hippocampal place cell maps by NMDA receptor blockade. *Science*, 280, 2121–2126.
- Keskin, G. A., & Ozkan, C. (2009). An alternative evaluation of FMEA: fuzzy ART algorithm. *Quality and Reliability Engineering International*, 25, 647–661.
- Kilgard, M. P., & Merzenich, M. M. (1998). Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity. *Science*, 279, 1714–1718.
- Knill, D. C., & Pouget, A. (2004). The Bayesian brain: the role of uncertainty in neural coding and computation. *Trends in Neurosciences*, 12, 712–719.
- Knoedler, A. J., Hellwig, K. A., & Neath, I. (1999). The shift from recency to primacy with increasing delay. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 25, 474–487.
- Knowlton, B. J., & Squire, L. R. (1993). The learning of categories: parallel brain systems for item memory and category knowledge. *Science*, 262, 1747–1749.
- Kohonen, T. (1984). *Self-organization and associative memory*. New York: Springer-Verlag.
- Kraus, N., McGee, T., Littman, T., Nicol, T., & King, C. (1994). Nonprimary auditory thalamic representation of acoustic change. *Journal of Neurophysiology*, 72, 1270–1277.
- Krupa, D. J., Ghazanfar, A. A., & Nicolelis, M. A. (1999). Immediate thalamic sensory plasticity depends on corticothalamic feedback. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 96, 8200–8205.
- Langston, R. F., Ainge, J. A., Couey, J. J., Canto, C. B., Bjerknes, T. L., Witter, M. P., Moser, E. I., & Moser, M. B. (2010). Development of the spatial representation system in the rat. *Science*, 328, 1576–1580.
- LeDoux, J. E. (1993). Emotional memory systems in the brain. *Behavioral Brain Research*, 58, 69–79.
- Levi, D. M. (2008). Crowding—an essential bottleneck for object recognition: a mini-review. *Vision Research*, 48, 635–654.
- Levy, W. B., & Steward, O. (1983). Temporal contiguity requirements for long-term associative potentiation/depression in the hippocampus. *Neuroscience*, 8, 791–797.
- Li, N., & DiCarlo, J. J. (2008). Unsupervised natural experience rapidly alters invariant object representation in visual cortex. *Science*, 321, 1502–1507.
- Li, N., & DiCarlo, J. J. (2010). Unsupervised natural visual experience rapidly reshapes size invariant object represent in inferior temporal cortex. *Neuron*, 67, 1062–1075.
- Liu, L., Huang, L., Lai, M., & Ma, C. (2009). Projective ART with buffers for the high dimensional space clustering and an application to discover stock associations. *Neurocomputing*, 72, 1283–1295.
- Liu, D., Pang, Z., & Lloyd, S. R. (2008). A neural network method for detection of obstructive sleep apnea and narcolepsy based on pupil size and EEG. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 19, 308–318.
- Ljungberg, T., Apicella, P., & Schultz, W. (1992). Responses of monkey dopamine neurons during learning of behavioral reactions. *Journal of Neurophysiology*, 67, 145–163.
- Lopes, M. L. M., Minussi, C. R., & Lotufo, A. D. P. (2005). Electric load forecasting using a fuzzy ART & ARTMAP neural network. *Applied Soft Computing*, 5, 235–244.
- Luce, P. A., & McLennan, C. T. (2008). Spoken word recognition: the challenge of variation. In D. B. Pisoni, & R. E. Remez (Eds.), *The handbook of speech perception*. Wiley Online Library. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470757024.ch24>.
- Luck, S. J., Chelazzi, L., Hillyard, S. A., & Desimone, R. (1997). Neural mechanisms of spatial selective attention in areas V1, V2, and V4 of macaque visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, 77, 24–42.
- Lumer, E. D., Edelman, G. M., & Tononi, G. (1997). Neural dynamics in a model of the thalamocortical system I, layers, loops and the emergence of fast synchronous rhythms. *Cerebral Cortex*, 7, 207–227.
- Lund, J. S., & Wu, C. Q. (1997). Local circuit neurons of macaque monkey striate cortex: IV, neurons of laminae 1–3A. *Journal of Comparative Neurology*, 384, 109–126.
- Marchiori, S. C., da Silveira, M. do C., Lotufo, A. D. P., Minussi, C. R., & Lopes, M. L. M. (2011). Neural network based on adaptive resonance theory with continuous training for multi-configuration transient stability analysis of electric power systems. *Applied Soft Computing*, 11, 706–715.
- Markram, H., Lubke, J., Frotscher, M., & Sakmann, B. (1997). Regulation of synaptic efficacy by coincidence of postsynaptic APs and EPSPs. *Science*, 275, 213–215.
- Martin-Guerrero, J. D., Lisboa, P. J. G., Soria-Olivas, E., Palomares, A., & Balaguer, E. (2007). An approach based on the adaptive resonance theory for analyzing the viability of recommender systems in a citizen web portal. *Expert Systems with Applications*, 33, 743–753.
- Massey, L. (2009). Discovery of hierarchical thematic structure in text collections with adaptive resonance theory. *Neural Computation & Applications*, 18, 261–273.
- Maunsell, J. H. R., & Van Essen, D. C. (1983). Anatomical connections of the middle temporal visual area in the macaque monkey and their relationship to a hierarchy of cortical areas. *Journal of Neuroscience*, 3, 2563–2586.
- McLennan, C. T., Connor, T., & Luce, P. A. (2005). Examining the time course of indexical specificity effects in spoken word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31, 306–321.
- McLennan, C. T., Luce, P. A., & Charles-Luce, J. (2003). *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29, 539–553.
- Melcher, D. (2007). Predictive remapping of visual features precedes saccadic eye movements. *Nature Neuroscience*, 10, 903–907.
- Mesulam, M.-M. (1999). Spatial attention and neglect: parietal, frontal and cingulate contributions to the mental representation and attentional targeting of salient extraperceptual events. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 354, 1325–1346.
- Mhatre, H., Gorchetchnikov, A., & Grossberg, S. (2012). Grid cell hexagonal patterns formed by fast self-organized learning within entorhinal cortex. *Hippocampus*, 22, 320–334.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97.
- Miller, G. A., & Licklider, J. C. R. (1950). The intelligibility of interrupted speech. *Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 167–173.
- Mirenovic, J., & Schultz, W. (1994). Importance of unpredictability for reward responses in primate dopamine neurons. *Journal of Neurophysiology*, 72, 1024–1027.
- Mishkin, M., & Delacour, J. (1975). An analysis of short-term visual memory in the monkey. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 1, 326–334.
- Miyata, M., Finch, E. A., Khiroug, L., Hashimoto, K., Hayasaka, S., Oda, S. I., Inouye, M., Takagishi, Y., Augustine, G. J., & Kano, M. (2000). Local calcium release in dendritic spines required for long-term synaptic depression. *Neuron*, 28, 233–244.
- Morris, R. G. M., & Frey, U. (1997). Hippocampal synaptic plasticity: role in spatial learning or the automatic recording of attended experience? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 350, 1469–1503.
- Mounts, J. R. W. (2000). Evidence for suppressive mechanisms in attentional selection: feature singletons produce inhibitory surrounds. *Perception and Psychophysics*, 62, 969–983.
- Mulder, S. A., & Wunsch, D. C. (2003). Million city traveling salesman problem solution by divide and conquer clustering with adaptive resonance neural networks. *Neural Networks*, 16, 827–832.
- Muller, R. A. (1996). A quarter of a century of place cells. *Neuron*, 17, 813–822.
- Mumford, D. (1992). On the computational architecture of the neocortex, II, the role of corticocortical loops. *Biological Cybernetics*, 66, 241–251.
- Murdock, B. B. (1962). The serial position effect of free recall. *Journal of Experimental Psychology*, 64, 482–488.
- Nieder, A., & Miller, E. K. (2003). Coding of cognitive magnitude: compressed scaling of numerical information in the primate prefrontal cortex. *Neuron*, 37, 149–157.
- Nieder, A., & Miller, E. K. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101, 7457–7462.
- Owega, S., Khan, B.-U.-Z., Evans, G. J., Jervis, R. E., & Fila, M. (2006). Identification of long-range aerosol transport patterns to Toronto via classification of back trajectories by cluster analysis and neural network techniques. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 83, 26–33.
- Page, M. P. A., & Norris, D. (1998). The primacy model: a new model of immediate serial recall. *Psychological Review*, 105, 761–781.
- Palma, J., Grossberg, S., & Versace, M. (2012). Persistence and storage of activity patterns in spiking recurrent cortical networks: modulation of sigmoid signals by after-hyperpolarization currents and acetylcholine. *Frontiers in Computational Neuroscience* (in press).
- Pandya, D. N., & Yeterian, E. H. (1985). Architecture and connections of cortical association areas. In A. Peters, & E. G. Jones (Eds.), *Cerebral cortex 10*. New York: Plenum Press.
- Parker, J. L., & Dostrovsky, J. O. (1999). Cortical involvement in the induction, but not expression, of thalamic plasticity. *The Journal of Neuroscience*, 19, 8623–8629.
- Parsons, O., & Carpenter, G. A. (2003). ARTMAP neural networks for information fusion and data mining: map production and target recognition methodologies. *Neural Networks*, 16, 1075–1089.
- Pasupathy, A., & Miller, E. K. (2004). Different time courses of learning-related activity in the prefrontal cortex and striatum. *Nature*, 433, 873–876.
- Pavlov, I. P. (1927). *Conditioned reflexes*. Oxford University Press.
- Perret, S. P., Ruiz, B. P., & Mauk, M. D. (1993). Cerebellar cortex lesions disrupt learning-dependent timing of conditioned eyelid responses. *Journal of Neuroscience*, 13, 1708–1718.
- Perry, E. K., Lee, M. L. W., Martin-Ruiz, C. M., Court, J. A., Volsen, S. G., Merrit, J., Folly, E., Iversen, P. E., Bauman, M. L., Perry, R. H., & Wenk, G. L. (2001). Cholinergic activity in autism: abnormalities in the cerebral cortex and basal forebrain. *The American Journal of Psychiatry*, 158, 1058–1066.
- Peterson, G. E., & Barney, H. L. (1952). Control methods used in a study of the vowels. *Journal of the Acoustical Society of America*, 24, 175–184.
- Petrides, M. (2005). Lateral prefrontal cortex: architectonic and functional organization. *Philosophical Transactions of the Society of London B Biological Science*, 360, 781–795.
- Piaget, J. (1963). *The origins of intelligence in children*. New York: Norton.
- Pilly, P. K., & Grossberg, S. (2012). How do spatial learning and memory occur in the brain? Coordinated learning of entorhinal grid cells and hippocampal place cells. *Journal of Cognitive Neuroscience* (in press).
- Pilly, P., Grossberg, S., & Seitz, A. (2010). Low-level sensory plasticity during task-irrelevant perceptual learning: evidence from conventional and double training procedures. *Vision Research*, 50, 424–432. (Special Issue on Perceptual Learning).
- Pollen, D. A. (1999). On the neural correlates of visual perception. *Cerebral Cortex*, 9, 4–19.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3–25.

- Posner, M. I., & Keele, S. W. (1968). On the genesis of abstract ideas. *Journal of Experimental Psychology*, 77, 353–363.
- Prasad, V. S. S., & Gupta, S. D. (2008). Photometric clustering of regenerated plants of gladiolus by neural networks and its biological validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60, 8–17.
- Raizada, R., & Grossberg, S. (2001). Context-sensitive bindings by the laminar circuits of V1 and V2: a unified model of perceptual grouping, attention, and orientation contrast. *Visual Cognition*, 8, 431–466.
- Raizada, R., & Grossberg, S. (2003). Towards a theory of the laminar architecture of cerebral cortex: computational clues from the visual system. *Cerebral Cortex*, 13, 100–113.
- Ramachandran, V. S. (1990). Interactions between motion, depth, color and form: the utilitarian theory of perception. In C. Blakemore (Ed.), *Vision: coding and efficiency*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Ranganath, C., & D'Esposito, M. (2005). Directing the mind's eye: prefrontal, inferior and medial temporal mechanisms for visual working memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 15, 175–182.
- Rao, R. P. N., & Ballard, D. H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive field effects. *Nature Neuroscience*, 2, 79–87.
- Remez, R. E. (2003). Establishing and maintaining perceptual coherence: unimodal and multimodal evidence. *Journal of Phonetics*, 31, 293–304.
- Remez, R. E., Pardo, J. S., Piorkowski, R. L., & Rubin, P. E. (2001). On the bistability of sine wave analogues of speech. *Psychological Science*, 12, 24–29.
- Remez, R. E., Rubin, P. E., Berns, S. M., Pardo, J. S., & Lang, J. M. (1994). On the perceptual organization of speech. *Psychological Review*, 101, 129–156.
- Repp, B., Liberman, A., Eccardt, T., & Pesetsky, D. (1978). Perceptual integration of acoustic cues for stop, fricative, and affricate manner. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 621–637.
- Reynolds, J., Chelazzi, L., & Desimone, R. (1999). Competitive mechanisms subserve attention in macaque areas V2 and V4. *The Journal of Neuroscience*, 19, 1736–1753.
- Reynolds, J. H., & Desimone, R. (2003). Interacting roles of attention and visual salience in V4. *Neuron*, 37, 853–863.
- Reynolds, J. H., & Heeger, D. J. (2009). The normalization model of attention. *Neuron*, 61, 168–185.
- Rockland, K. S. (1994). The organization of feedback connections from area V1(18) to V1(17). In A. Peters, & K. S. Rockland (Eds.), *Cerebral cortex, vol. 4*. New York: Plenum Press.
- Rockland, K. S., Andresen, J., Cowie, R. J., & Robinson, D. L. (1999). Single axon analysis of pulvinocortical connections to several visual areas in the macaque. *Journal of Comparative Neurology*, 406, 221–250.
- Rockland, K. S., & Virga, A. (1989). Terminal arbors of individual 'feedback' axons projecting from area V2 to V1 in the macaque monkey: a study using immunohistochemistry of anterogradely transported phaseolus vulgaris-leucoagglutinin. *Journal of Comparative Neurology*, 285, 54–72.
- Roelfsema, P. R., Lamme, V. A. F., & Spekreijse, H. (1998). Object-based attention in the primary visual cortex of the macaque monkey. *Nature*, 395, 376–381.
- Roggeveen, A., Pilz, K., Bennett, P., & Sekuler, A. (2009). Individual differences in object based attention. *Journal of Vision*, 9, 143.
- Rouiller, E. M., & Welker, E. (2000). A comparative analysis of the morphology of corticothalamic projections in mammals. *Brain Research Bulletin*, 53, 727–741.
- Saar, D., Grossman, Y., & Barkai, E. (2001). Long-lasting cholinergic modulation underlies rule learning in rats. *Journal of Neuroscience*, 21, 1385–1392.
- Salin, P., & Bullier, J. (1995). Corticocortical connections in the visual system: structure and function. *Physiological Reviews*, 75, 107–154.
- Samuel, A. G. (1981). The role of bottom-up confirmation in the phonemic restoration illusion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 1124–1131.
- Sandell, J. H., & Schiller, P. H. (1982). Effect of cooling area 18 on striate cortex cells in the squirrel monkey. *Journal of Neurophysiology*, 48, 38–48.
- Schoenbaum, G., Setlow, B., Saddoris, M. P., & Gallagher, M. (2003). Encoding predicted outcome and acquired value in orbitofrontal cortex during cue sampling depends upon input from basolateral amygdala. *Neuron*, 39, 855–867.
- Schultz, W. (1998). Predictive reward signal of dopamine neurons. *Journal of Neurophysiology*, 80, 1–27.
- Schultz, W., Apicella, P., & Ljungberg, T. (1993). Responses of monkey dopamine neurons to reward and conditioned stimuli during successive steps of learning a delayed response task. *Journal of Neuroscience*, 13, 900–913.
- Schultz, W., Romo, R., Ljungberg, T., Mirenovic, J., Hollerman, J., & Dickinson, A. (1995). Reward-related signals carried by dopamine neurons. In J. Houk, J. Davis, & D. Beiser (Eds.), *Models of information processing in the Basal Ganglia* (pp. 11–27). Cambridge: MIT Press.
- Sears, L. L., Finn, P. R., & Steinmetz, J. E. (1994). Abnormal classical eye-blink conditioning in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 24, 737–751.
- Seitz, A., & Watanabe, T. (2003). Is subliminal learning really passive? *Nature*, 422, 6927.
- Shadlen, M. N., & Newsome, W. T. (1998). The variable discharge of cortical neurons: implications for connectivity, computation, and information coding. *The Journal of Neuroscience*, 18, 3870–3896.
- Sherman, S. M., & Guillery, R. (2001). *Exploring the thalamus*. San Diego: Academic Press.
- Sherman, S. M., & Guillery, R. W. (2002). The role of the thalamus in the flow of information to the cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, 357, 1695–1708.
- Shieh, M.-D., Yan, W., & Chen, C.-H. (2008). Soliciting customer requirements for product redesign based on picture sorts and ART2 neural network. *Expert Systems with Applications*, 34, 194–204.
- Shipp, S. (2003). The functional logic of cortico-pulvinar connections. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, 358, 1605–1624.
- Siegel, M., Kording, K. P., & König, P. (2000). Integrating top-down and bottom-up sensory processing by Somato-Dendritic interactions. *Journal of Computational Neuroscience*, 8, 161–173.
- Sigala, N., & Logothetis, N. K. (2002). Visual categorization shapes feature selectivity in the primate temporal cortex. *Nature*, 415, 318–320.
- Sillito, A. M., Jones, H. E., Gerstein, G. L., & West, D. C. (1994). Feature-linked synchronization of thalamic relay cell firing induced by feedback from the visual cortex. *Nature*, 369, 479–482.
- Silver, M. R., Grossberg, S., Bullock, D., Histed, M. H., & Miller, E. K. (2011). A neural model of sequential movement planning and control of eye movements: item-order-rank working memory and saccade selection by the supplementary eye fields. *Neural Networks*, 26, 29–58.
- Silver, M. A., Shenhav, A., & D'Esposito, M. (2008). Cholinergic enhancement reduces spatial spread of visual responses in human early visual cortex. *Neuron*, 60, 904–914.
- Smith, M. C. (1968). CS-US interval and US intensity in classical conditioning of the rabbit's nictitating membrane response. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 3, 679–687.
- Somers, D. C., Dale, A. M., Seiffert, A. E., & Tootell, R. B. (1999). Functional MRI reveals spatially specific attentional modulation in human primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 96, 1663–1668.
- Staddon, J. E. R. (1983). *Adaptive behavior and learning*. New York: Cambridge University Press.
- Starkey, P., Spelke, E. S., & Gelman, R. (1983). Detection of intermodal numerical correspondences by human infants. *Science*, 222, 179–181.
- Steinman, B. A., Steinman, S. B., & Lehmkuhle, S. (1995). Visual attention mechanisms show a center-surround organization. *Vision Research*, 35, 1859–1869.
- Sudhakar Pandian, R., & Mahapatra, S. S. (2009). Manufacturing cell formation with production data using neural networks. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 1340–1347.
- Takahashi, H., Murase, Y., Kobayashi, T., & Honda, H. (2007). New cancer diagnosis modeling using boosting and projective adaptive resonance theory with improved reliable index. *Biochemical Engineering Journal*, 33, 100–109.
- Takechi, H., Eilers, J., & Konnerth, A. (1998). A new class of synaptic response involving calcium release in dendritic spines. *Nature*, 396, 757–760.
- Tan, A.-H. (1997). Cascade ARTMAP: integrating neural computation and symbolic knowledge processing. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 8, 237–250.
- Tan, T. Z., Quek, C., Ng, G. S., & Razvi, K. (2008). Ovarian cancer diagnosis with complementary learning fuzzy neural network. *Artificial Intelligence in Medicine*, 43, 207–222.
- Tan, A.-H., & Teo, C. (1998). Learning user profiles for personalized information dissemination. *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 1, 183–188.
- Tanaka, K., Saito, H., Fukada, Y., & Moriya, M. (1991). Coding visual images of objects in the inferotemporal cortex of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 66, 170–189.
- Temereanca, S., & Simons, D. J. (2001). Topographic specificity in the functional effects of corticofugal feedback in the whisker/barrel system. *Society for Neuroscience Abstracts*, 393, 6.
- Theeuwes, J., Mathot, S., & Kingstone, A. (2010). Object-based eye movements: the eyes prefer to stay within the same object. *Attention, Perception & Psychophysics*, 72, 597–601.
- Thompson, L. T., & Best, P. J. (1990). Long-term stability of the place-field activity of single units recorded from the dorsal hippocampus of freely behaving rats. *Brain Research*, 509, 299–308.
- Thompson, R. F., Clark, G. A., Donegan, N. H., Lavond, G. A., Lincoln, D. G., Maddon, J., Mamounas, L. A., Mauk, M. D., & McCormick, D. A. (1987). Neuronal substrates of discrete, defensive conditioned reflexes, conditioned fear states, and their interactions in the rabbit. In I. Gormezano, W. F. Prokasy, & R. F. Thompson (Eds.), *Classical conditioning* (3rd ed.) (pp. 371–399). Hillsdale, NJ: Erlbaum Associates.
- Thorpe, S., Fize, D., & Marlot, C. (1996). Speed of processing in the human visual system. *Nature*, 381, 520–522.
- Traub, R. D., Spruston, N., Soltesz, I., Konnerth, A., Whittington, M. A., & Jefferys, G. R. (1998). Gamma-frequency oscillations: a neuronal population phenomenon, regulated by synaptic and intrinsic cellular processes, and inducing synaptic plasticity. *Progress in Neurobiology*, 55, 563–575.
- Tyler, C. W., & Kontsevich, L. L. (1995). Mechanisms of stereoscopic processing: stereoattention and surface perception in depth reconstruction. *Perception*, 24, 127–153.
- van Der Werf, Y. D., Witter, M. P., & Groenewegen, H. J. (2002). The intralaminar and midline nuclei of the thalamus, anatomical and functional evidence for participation in processes of arousal and awareness. *Brain Research*, 39, 107–140.
- Vanduffel, W., Tootell, R. B., & Orban, G. A. (2000). Attention-dependent suppression of meta-bolic activity in the early stages of the macaque visual system. *Cerebral Cortex*, 10, 109–126.

- van Vreeswijk, C., & Sompolinsky, H. (1998). Chaotic balanced state in a model of cortical circuits. *Neural Computation*, 10, 1321–1371.
- Vitevitch, M. S., & Luce, P. A. (1999). Probabilistic phonotactics and neighborhood activation in spoken word recognition. *Journal of Memory and Language*, 40, 374–408.
- Vladusich, T., Lafe, F., Kim, D.-S., Tager-Flusberg, H., & Grossberg, S. (2010). Prototypical category learning in high-functioning autism. *Autism Research*, 3, 226–236.
- Von Restorff, H. (1933). Über die Wirkung von Bereichsbildungen im Spurenfeld (the effects of field formation in the trace field). *Psychologie Forschung*, 18, 299–334.
- Wanning, A., Stanisor, L., & Roelfsema, P. R. (2011). Automatic spread of attentional response modulation along Gestalt criteria in primary visual cortex. *Nature Neuroscience*, 14, 1243–1244.
- Warren, R. (1970). Perceptual restoration of missing speech sounds. *Science*, 167, 392–393.
- Warren, R., & Obusek, C. (1971). Speech perception and phonemic restorations. *Perception & Psychophysics*, 9, 358–362.
- Warren, R., & Sherman, A. (1974). Phonemic restorations based on subsequent context. *Perception & Psychophysics*, 16, 150–156.
- Warren, R., & Warren, R. (1970). Auditory illusions and confusions. *Scientific American*, 223, 30–36.
- Washburn, D. A., & Rumbaugh, D. M. (1991). Ordinal judgments of numerical symbols by macaques (*Macaca mulatta*). *Psychological Science*, 2, 190–193.
- Watanabe, T., Nanez, J. E., & Sasaki, Y. (2001). Perceptual learning without perception. *Nature*, 413, 844–848.
- Weber, A. J., Kalil, R. E., & Behan, M. (1989). Synaptic connections between corticogeniculate axons and interneurons in the dorsal lateral geniculate nucleus of the cat. *Journal of Comparative Neurology*, 289, 156–164.
- Wespapat, V., Tennigkeit, F., & Singer, W. (2004). Phase sensitivity of synaptic modifications in oscillating cells of rat visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 24, 9067–9075.
- Wienke, D., & Buydens, L. (1995). Adaptive resonance theory based neural networks—the “ART” of real-time pattern recognition in chemical process monitoring. *Trends in Analytical Chemistry*, 14, 398–406.
- Wills, T. J., Cacucci, F., Burgess, N., & O’Keefe, J. (2010). Development of the hippocampal cognitive map in preweanling rats. *Science*, 328, 1573–1576.
- Wilson, M. A., & McNaughton, B. L. (1993). Dynamics of the hippocampal ensemble code for space. *Science*, 261, 1055–1058.
- Winters, B. D., Bartko, S. J., Saksida, L. M., & Bussey, T. J. (2007). Scopolamine infused into perirhinal cortex improves object recognition memory by blocking the acquisition of interfering object information. *Learning & Memory*, 14, 590–596.
- Wittmer, L. L., Dalva, M. B., & Katz, L. C. (1997). Reciprocal interactions between layers 4 and 6 cells in ferret visual cortex. *Society for Neuroscience Abstracts*, 651(5), 1668.
- Wunsch, D. C., Caudell, T. P., Capps, C. D., Marks, R. J. II, & Falk, R. A. (1993). An optoelectronic implementation of the adaptive resonance neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 4, 673–684.
- Xu, Z., Shi, X., Wang, L., Luo, J., Zhong, C.-J., & Lu, S. (2009). Pattern recognition for sensor array signals using fuzzy ARTMAP. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 141, 458–464.
- Yang, S., Heinen, S., & Missal, M. (2008). The effects of microstimulation of the dorsomedial frontal cortex on saccade latency. *Journal of Neurophysiology*, 99(4), 1857–1870.
- Yazdanbakhsh, A., & Grossberg, S. (2004). Fast synchronization of perceptual grouping in laminar visual cortical circuits. *Neural Networks*, 17, 707–718.
- Zaki, S. R., Nosofsky, R. M., Jessup, N. M., & Unversagt, F. W. (2003). Categorization and recognition performance of a memory impaired group: evidence for single-system models. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 9, 394–406.
- Zeki, S., & Shipp, S. (1988). The functional logic of cortical connections. *Nature*, 335, 311–317.
- Zhang, N., & Kezunovic, M. (2007). A real time fault analysis tool for monitoring operation of transmission line protective relay. *Electric Power Systems Research*, 77, 361–370.
- Zhang, Y., Suga, N., & Yan, J. (1997). Corticofugal modulation of frequency processing in bat auditory system. *Nature*, 387, 900–903.
- Zoccolan, D., Kouh, M., Poggio, T., & DiCarlo, J. J. (2007). Trade-off between object selectivity and tolerance in monkey inferotemporal cortex. *Journal of Neuroscience*, 27, 12292–12307.