

意识的 CLEARs 机制（意识、学习、期望、注意、共振和同步）

Consciousness CLEARs the Mind

Stephen Grossberg¹

Department of Cognitive and Neural Systems

Center for Adaptive Systems and

Center of Excellence for Learning in Education, Science, and Technology

Boston University 677 Beacon Street, Boston, MA 02215, USA

accepted : August 2007 by Neural Networks

(translated by zang jie)

摘要：对意识的全面理解要求我们确定意识体验产生的大脑过程。这些过程是什么，它们在支持成功的适应性行为方面的效用是什么？适应性共振理论 (ART) 预测了意识、学习、期望、注意、共振和同步 (CLEARs) 过程之间的功能联系，包括“所有意识状态都是共振状态”的预测。这种联系阐明了大脑动力学如何使行为个体能够实时自主地适应快速变化的世界。本文回顾了预测这些功能联系的理论考虑、它们如何工作，以及一些为这些预测提供支持的快速增长的行为和大脑数据体。该文章还总结了预测层状丘脑皮质回路中已识别细胞的功能作用的 ART 模型，包括六层新皮质回路及其与特定初级和高级特定丘脑核和非特异性核的相互作用。这些预测包括解释在没有意识的情况下知觉学习是如何缓慢发生的，以及为什么新皮层下层的振荡频率有时是较慢的 β 振荡，而不是更频繁地发生在表层皮层中的高频伽马振荡。ART 将这些特性追溯到皮质内反馈回路的存在，并重置丘脑皮质错误匹配使用回路的机制，例如从特定丘脑核到非特异性丘脑核，然后到第 4 层新皮质区域的回路。

1、引言

适应性共振理论 (ART) 提出，动物的意识与其在一生中快速了解不断变化的世界的的能力之间存在密切联系。特别是，ART 指出了“共振”状态在推动快速学习方面的关键作用；因此得名自适应共振。这些共振状态使用内部自上而下的反馈绑定在一起，成为世界的连贯表示。特别是，ART 提出了自下而上的学习类别和自上而下的期望如何相互作用以创建这些连贯的表示。学习到的自上而下的期望可以通过来自外部世界的自下而上的过程以数据驱动的方式激活，或者通过有意的自上而下的过程来激活大脑来预测可能发生或可能不会发生的事件。通过这种方式，ART 阐明了大脑进行预测计算的一种意义，但不是唯一一种意义。

当这种自上而下的学习期望被激活时，自上而下的期望与自下而上的数据发生匹配。如果自下而上和自上而下的模式差别不大，这样的匹配过程可以导致将注意力集中在预期的信息簇上，称为关键特征模式，同时抑制不匹配的信号。当自下而上的信号模式和积极的自上而下的期望在预期和外部世界之间达成共识时，通过持续反馈出现共振状态。

ART 预测大脑中的所有意识状态都是共振状态，并且这些共振状态可以触发感官和认知表征的快速学习，而不会导致灾难性的遗忘。这一预测阐明了为什么更容易快速了解人们关注的信息。ART 在此提出，高级动物之所以成为有意识和注意力的生物的一个原因是能够在整个生命中快速了解不断变化的世界。

支持 ART 的心理物理学和神经生物学数据已在视觉、视觉对象识别、听觉流、可变速率语音感知、体感感知和认知 - 情感交互等实验中得到报告。其中一些数据总结如下。其他人在 Carpenter 和 Grossberg (1991)、Grossberg (1999b、2003a、2003b、2003c) 和 Raizada 和 Grossberg (2003) 中进行了回顾。特别是，ART 机制似乎在视觉系统的各个层面都起作用，并且已经提出了这些机制如何通过视觉皮层的层流回路与特定和非特定丘脑核相互作用来实现 (Grossberg, 2003b; Grossberg 和 Versace, 2007; Raizada 和 Grossberg, 2003; Versace 和 Grossberg, 2005, 2006)。这些新皮质层流模型被称为 LAMINART 模型，因为新皮质层流解剖结构体现了 ART 预测的注意力回路类型 (Grossberg, 1999a)。最近，有人提出前额叶皮层中这些层状新皮质回路的变化如何在工作记忆中短期存储事件序列，学习对这些存储序列有选择性响应的类别，以及意志控制下的存储序列 (Grossberg and Pearson, 2006; Pearson and Grossberg, 2005, 2006)。这些来自视觉和认知的例子展示了空间和时间过程如何通过相同的新皮质设计的变化来进行，并为层状新皮质的一般理论指明了道路，该理论可以解释所有高阶智能行为的各个方面。

What vs. Where: 为什么程序性记忆没有意识

尽管 ART 式的学习和匹配过程似乎存在于许多感觉和认知过程中，但在空间和运动过程中发现了另一种类型的学习和匹配。大脑 Where 处理流中的空间和运动处理（Goodale 和 Milner, 1992）。遵守学习和匹配规律，这些规律通常与大脑的 What 处理流中用于感觉和认知处理的规律互补（Grossberg, 2000b）（Mishkin、Ungerleider 和 Macko, 1983 年；Ungerleider 和 Mishkin, 1982 年）。随着我们对世界的了解越来越多，感官和认知表征使用注意力匹配来保持其稳定性，而空间和运动表征能够忘记随着我们的身体从婴儿期到成年期的发展和成长而不再合适的学习地图和收获。

这些记忆差异可以追溯到相应匹配和学习过程中的互补差异。类似 ART 的感觉和认知学习发生在近似匹配状态，并且匹配是兴奋性的，这使它能够实现一种类型的兴奋性启动。空间和运动学习通常体现在不匹配状态下发生的矢量关联映射 (VAM) 电路（Gaudiano 和 Grossberg, 1991；Guenther、Bullock、Greve 和 Grossberg, 1994），匹配是通过抑制过程实现的。这些互补的差异阐明了为什么程序性记忆是无意识的；也就是说，支持空间和运动过程的抑制匹配过程不会导致共振。

一种新的计算方式：数字和二进制、前馈和反馈、模拟相干

LAMINART 模型（例如，图 1）不仅仅是先前 ART 想法在解剖学上更精确的版本。它们代表了计算领域的一项突破，它确定了体现具有革命性意义的新颖计算特性的新原理和过程。LAMINART 模型体现了前馈和反馈计算之间以及数字和模拟计算之间的新型混合（Grossberg, 2003b），用于处理分布式数据。这些属性超越了当今如此流行的贝叶斯模型类型。它们是快速但稳定的自组织的基础，这是皮层发育和终身学习的特征。

反馈和反馈处理的合成可以从下面的例子中理解：当处理一个明确的场景时，LAMINART 模型可以在一个快速前馈激活的快速前馈扫描中快速分组场景，直接通过第 4 层到 2/3 然后继续到后续皮质区域的第 4 至 2/3 层（图 2c 和 2e）。这个属性阐明了识别如何能如此快速地响应明确的场景；例如，Thorpe 等人。（1996）。另一方面，如果场景中有多个可能的分组，比如说响应复杂的纹理场景，那么由于第 4 层和第 2/3 层（图 2 中的黑细胞和突触）中的抑制性相互作用，这些可能性之间的竞争可以导致所有细胞活动变小。这是因为模型中的竞争电路是自归一化的；也就是说，它们倾向于节省电路的全部活动。这种自归一化特性与分流中心外环绕网络的能力有关，该网络实现了竞争电路在大动态

范围内处理输入对比度而没有饱和(Douglas 等人, 1995 年; Grossberg, 1973 年, 1980 年; 黑格尔, 1992 年)。

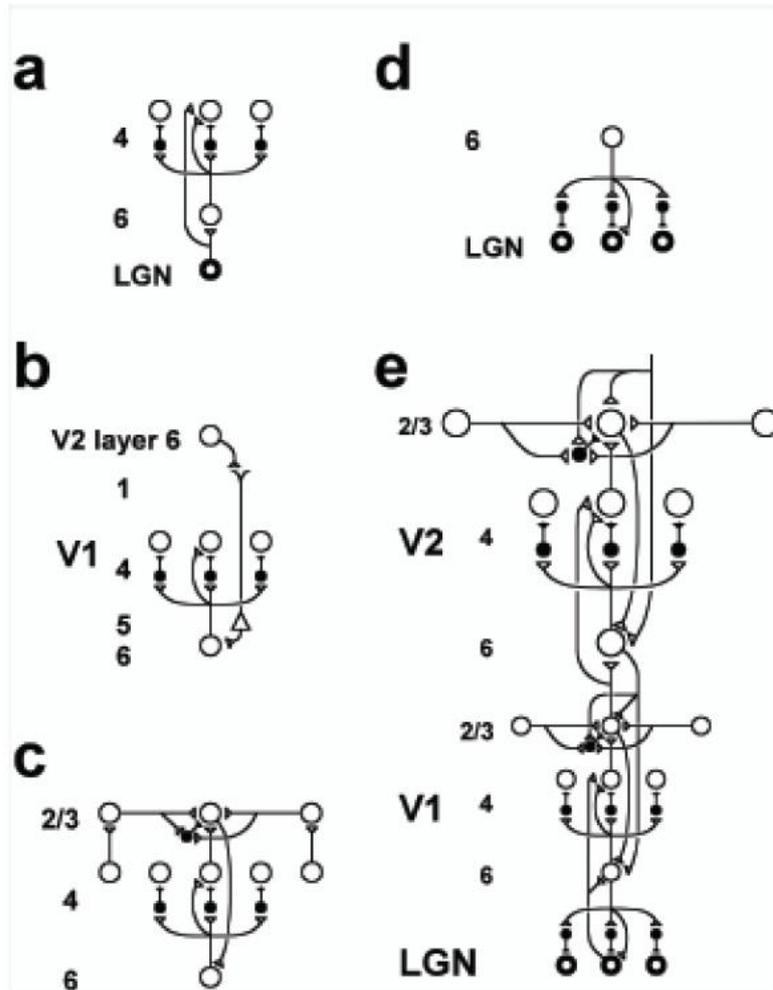


图 1. 已知的皮质连接如何连接第 6 层 4 和 2/3 层电路以形成整个 V1/V2 层流模型。抑制性中间神经元以黑色填充。(a) LGN 通过两条路线向第 4 层提供自下而上的激活。首先, 它直接与第 4 层建立牢固的连接。其次, LGN 轴突将侧支发送到第 6 层, 从而也通过 6-4 中心外环绕路径激活第 4 层。自下而上的 LGN 通路的综合效果是通过中心外环绕刺激第 4 层, 这提供了第 4 层细胞反应的分裂对比度归一化 (Grossberg, 1973, 1980; Heeger, 1992)。(b) 折叠反馈将注意力信号从较高皮质传送到 V1 的第 4 层, 通过调制 6-4 路径。皮质皮质反馈轴突倾向于优先起源于较高区域的第 6 层并终止于较低皮质的第 1 层 (Salin 和 Bullier, 1995, 第 110 页), 在那里它们可以激发第 5 层锥体细胞的顶端树突, 其轴突将络脉送入第 6 层。图中的三角形代表这样的第 5 层锥体细胞。反馈可以通过其他几种途径传递给 V1 层 6 (有关评论, 请参见 Raizada 和 Grossberg (2001))。到达第 6 层后, 反馈通过 6-4 中心外环绕路径被“折叠”回前馈流 (Bullier 等人, 1996 年)。(c) 将 6-4 on-center off-surround 连接到第 2/3 层分组电路: 具有相反对比极性的同向第 4 层简单单元竞争 (未显示), 然后产生会聚到层的半波整流输出它们上方列中的 2/3 复杂单元格。正如 (b) 中所示, 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的反馈路径中, 以通过中心的 6-4 增强它们在其下方的第 4 层中的位置, 并抑制通过 6-4 非环绕声输入到其他组的输入。在猕猴 V1 中存在直接的第 2/3 层 6 连接, 以及通过第 5 层的间接路由。(d) 从 V1 第 6 层到 LGN 自上而下的皮质原

反馈也具有中心外环绕解剖结构，类似于 6-4 路径。中心反馈选择性地增强与其引起的激活一致的 LGN 细胞 (Sillito 等人, 1994 年)，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。(e) 整个 V1/V2 电路: V2 重复 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，允许在更宽的间隔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。自上而下的注意力还可以通过激活该层中的锥体细胞和抑制性中间神经元来直接调节 2/3 层锥体细胞。抑制趋于平衡兴奋，导致调节作用。这些自上而下的注意力通路倾向于在第 1 层中形成突触，如图 2b 所示。为简单起见，未显示它们在第 1 层顶端树突上的突触。(经 Raizada 和 Grossberg (2001) 许可转载。)

换句话说，这些自归一化电路执行一种实时概率理论，其中细胞活动的幅度随网络对分组的选择或决定的确定性而变化。反过来，振幅被转化为细胞活动的处理速度和连贯性。低激活会减慢电路中的前馈处理速度，因为单元活动超过输出阈值并激活高于阈值的后续单元需要更长的时间。在模型中，网络的不确定性通过反馈解决：弱活跃的第 2/3 层分组单元将信号反馈到第 6-then-4-then-2/3 层以关闭皮质反馈回路，对比增强和放大获胜分组到反映该分组的统计证据数量的程度和比率。随着获胜者被选中，较弱的分组被抑制，其细胞变得更加活跃和同步，因此可以再次快速将皮层决策发送到后续处理阶段。

总而言之，LAMINART 电路就像一个实时概率决策电路，在给定证据的情况下尽可能快地运行。当不确定性很小时，它以快速前馈模式运行，当存在不确定性时，它会自动切换到较慢的反馈模式。反馈选择使电路再次加速的获胜决策，因为激活幅度、同步和处理速度都肯定会增加。

LAMINART 模型还体现了一种新型的混合计算，它同时实现了数字计算的稳定性和模拟计算的敏感性。这是真的，因为选择或确认获胜分组 (图 2c 和 2e) 的层 2/3-6-4-2/3 之间的反馈循环具有模拟相干性 (Grossberg, 1999a; Grossberg、Mingolla 和 Ross, 1997; Grossberg 和 Raizada, 2000); 即，该反馈回路可以同步选择和存储获胜分组，而不会失去对输入模式中幅度差异的模拟灵敏度。来自反馈回路中同步存储的相干性提供了数字计算的稳定性—反馈回路表现出滞后，可以保护存储的模式免受外部扰动—，同时保持模拟计算的灵敏度。

所有有意识状态都是共振状态，但不是相反：有偏见的竞争

LAMINART 电路中另一个值得注意的特性反映了这样一种说法，即在不失去稳定性的情况下在整个生命中快速学习的能力与意识有关：“所有有意识的状态都是共振状态”。然而，相反的说法：“所有的共振状态都是有意识的状态”并不能预测为真。现在将描述这种异常的示例。

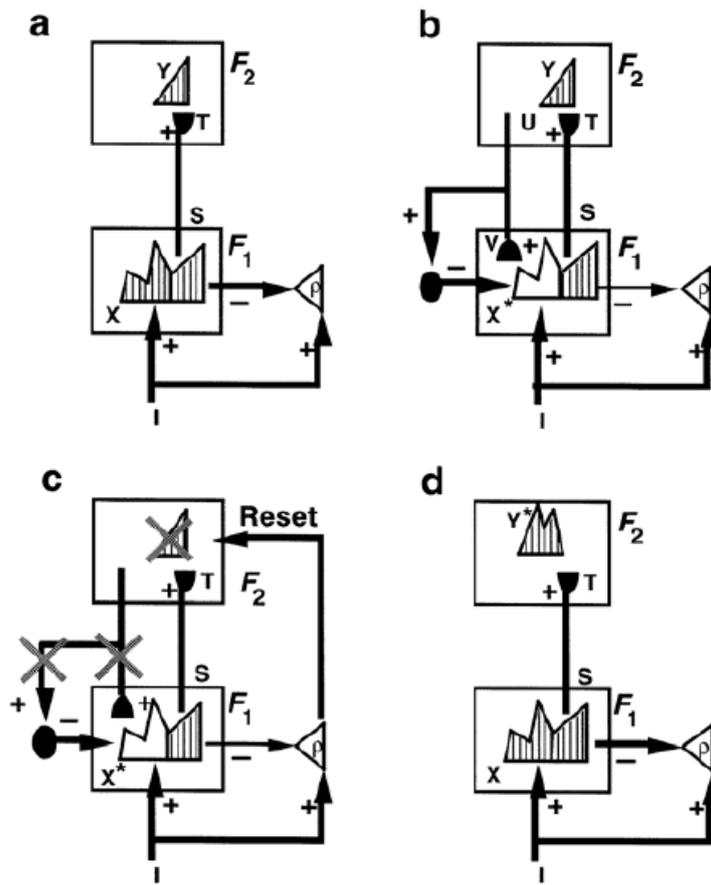


图 2. 在 ART 学习电路中搜索识别代码: (a) 输入模式 I 在 F1 层的特征检测器中被设置为短期记忆 (STM) 活动模式 X。输入 I 也非特异性地激活定向系统具有称为警惕性 (ρ) 的增益; 也就是说, 所有输入路径都以增益 ρ 收敛到定向系统并尝试激活它。STM 模式 X 由横跨 F1 的阴影模式表示。模式 X 既抑制定向系统又生成输出模式 S。模式 S 乘以学习的自适应权重, 也称为长期记忆 (LTM) 轨迹。这些 LTM 门控信号被添加到 F2 单元或节点, 以形成输入模式 T, 它激活跨 F2 级编码的识别类别的 STM 模式 Y。(b) 模式 Y 生成自上而下的输出模式 U, 将其乘以自上而下的 LTM 轨迹并添加到 F1 节点以形成原型模式 V, 该模式对活动 F2 节点的学习期望进行编码。这样的原型代表了所有能够激活 Y 的输入模式中一组共同共享的特征。如果 V 在 F1 处与 I 不匹配, 则在 F1 处选择新的 STM 活动模式 X*。X* 由阴影图案表示。它由由 V 确认的 I 的特征组成。不匹配的特征被禁止。对应于 X 的未确认特征的未激活节点是未孵化的。X 转化为 X* 时发生的总 STM 活性降低导致从 F1 到定向系统的总抑制降低。(c) 如果抑制充分减弱, 则定向系统向 F2 释放非特异性唤醒波; 即一波激活, 同样激活所有 F2 节点。这一波实例化了“新事件正在引起”的直觉。该唤醒波通过抑制 Y 使 STM 模式 Y 在 F2 处复位。(d) Y 被抑制后, 其自上而下的原型信号被消除, X 可以在 F1 处恢复。先前的重置事件在搜索周期期间保持对 Y 的抑制。结果, X 可以在 F2 处激活不同的 STM 模式 Y。如果由于这种新的 Y 模式导致的自顶向下原型在 F1 处也与 I 不匹配, 则继续搜索合适的 F2 代码, 直到选择了更合适的 F2 表示。这种搜索周期代表了一种非平稳假设检验。当搜索结束时, 会产生一种专注的共鸣, 并开始学习所参与的数据。[经 Carpenter 和 Grossberg (1993) 许可改编。]

LAMINART 电路可以使用 2/3-6-4-2/3 层之间的皮质内反馈回路来稳定发展和学习。这个反馈回路支持皮层内“共振”。这种对比度增强的反馈循环选择成人的获胜分组。它还被预测有助于稳定婴儿的发育和整个生命的学习，因为一起发射的细胞连接在一起（Grossberg, 1999a）。这种皮层内回路甚至在皮层间注意反馈形成之前就可以工作（图 2e）。LAMINART 模型阐明，这两种回路都可以稳定皮质发育和学习，而不仅仅是 ART 最初预测的自上而下的皮质间回路。新皮层不同层之间的皮层内反馈回路通过在自上而下的皮层间反馈发展并在稳定中发挥其自身作用之前稳定皮层发育和学习，从而防止发生无限倒退。

ART 的早期版本预测自上而下的注意力可以通过竞争匹配过程来调节和稳定学习过程（Grossberg, 1976, 1980）。后来的建模研究（例如 Carpenter 和 Grossberg, 1987）完善了这一预测，以断言这种匹配过程是通过自上而下的、可调节的中心外环绕网络实现的。积累了大量的知觉和大脑数据来支持这一假设。有关这些数据的评论，请参见 Grossberg (2003b) 以及 Raizada 和 Grossberg (2003)，包括该过程中流行的“有偏见的竞争”术语（Desimone, 1998）。

LAMINART 模型通过识别可以实现自上而下、调节性中心、非环绕反馈的皮质间和层间电路推进了这一预测（图 2b）。这个额外的步骤还阐明了预注意分组和自上而下的注意如何共享相同的从第 6 层到第 4 层的中心调节、外环绕决策电路，以及自动激活细胞响应的前馈通路到自下而上的输入（图 2a - 2c）。因为“前注意分组是它自己的注意力原素”，这些皮层内反馈循环还解决了另一个问题：ART 预测，为了防止不稳定的发展和学习，只有自下而上的输入才能超临界地激活大脑感觉和认知细胞能够学习，因为自上而下的注意力通常是调节性的（除非意志使自上而下的注意力能够产生视觉意象或思想；参见 Grossberg (2000a)）。那么，如何在不破坏大脑回路的情况下形成虚幻的轮廓呢？因为“预注意分组是它自己的注意力素数”，它可以使用第 6 到 4 层竞争决策电路来选择正确的分组单元进行学习，即使没有自上而下的注意力。

ART 预测的这种改进意味着，尽管需要自上而下的注意力才能快速稳定地学习有意识的体验，但如果预先注意的分组竞争性地选择了与之“产生共鸣”的正确细胞，学习也可能发生。从而使用其皮质内 2/3-6-4-2/3 反馈电路在足够长的时间内同步。这种学习可能很慢，而且意识无法进入。渡边等人。（2003 年）最近报道了关于无知觉的缓慢知觉学习的一致数据。需要做更多的实验来测试预测的皮质内但层间皮质机制是否有助于这种学习。

三种类型的注意力：边界、表面和原型注意力

同一决策电路的分组和注意力共享还使模型能够解释和模拟更多数据，包括关于注意力如何通过沿对象边界传播来选择性激活对象的数据（Roelfsema 等

人，1998 年）；参见 Grossberg 和 Raizada (2000)。关于边界注意的作用的其他示例已在 Necker 多维数据集（Grossberg 和 Swaminathan, 2004）和双稳态透明性（Grossberg 和 Yazdanbaksh, 2005）的模拟中进行了描述。

鉴于注意力在产生意识体验中的重要性，应该指出的是，视觉感知和识别的皮层模型研究已经区分了至少三种机械上不同的注意力类型：边界注意力，由此空间注意力可以沿着物体边界传播到选择整个对象进行检查；表面注意力，由此空间注意力可以选择性地填充物体的表面形状以形成“注意力罩”（Tyler 和 Kontsevich, 1995）；原型注意力，从而可以选择性地增强学习对象类别的关键特征模式。上面总结了边界注意。表面注意力有助于智能地搜索具有眼球运动的场景并学习视图不变的对象类别（Fazl、Grossberg 和 Mingolla, 2007）。原型注意力是通过 ART 自上而下的类别学习电路实现的注意力类型（Carpenter and Grossberg, 1987, 1991; Grossberg, 2003a）。所有三种类型的注意力都利用一种或另一种类型的共振反馈回路。

区分这三种注意力是很困难的，因为它们“在什么”和“哪里”皮质处理流内部和之间相互作用。例如，边界注意力似乎被激活，至少在 Roelfsema 等人的实验中是这样。（1998），当皮层流中的空间注意力映射，特别是顶叶皮层，投射到什么皮层流中的感知边界表示，特别是皮层区域 V2 的苍白条纹。当皮层流中的空间注意图（再次来自顶叶皮层）投射到知觉表面表征时，尤其是在皮层区域 V2 和 V4 的细条纹中，可以激活表面注意，并反过来形成表面罩共振。最后，原型注意力似乎完全在从前额叶皮层和颞下皮层的学习识别类别到 V2 和 V4 中的感知表征的什么皮层流中起作用。

皮层区域 V1 和 V2 的边界和表面表示之间会发生反馈交互，因此预测这三种机械上不同类型的注意力的特征会进一步复杂化，并且可以预测这些交互作用有助于将人物与背景深度分开，并控制眼跳的运动（Fang 和 Grossberg, 2007; Fazl, Grossberg 和 Mingolla, 2007; Grossberg, 1994, 1997）。由于这些流间反馈相互作用，因此可以预期通过空间注意力对边界或表面表示的调制对两种类型的表示都有影响。此外，众所周知，移动刺激可以激活 What 和 Where 流，并可以通过从 V1 和 MT 到 MST 和顶叶皮层的 Where 流路径自动吸引顶叶皮层中的空间注意。

平衡激励与抑制：通向同步之路

LAMINART 电路的动力学，无论是处于预注意还是注意激活模式，都取决于不同皮质层中平衡的兴奋和抑制信号的存在。特别是，在第 2/3 层中的双极细胞的感知分组电路中需要兴奋和抑制之间的平衡（图 2c 和 2e）。这种平衡有助于确保感知分组可以在成对或更多数量的诱导物之间向内形成，但不能从单

个诱导物向外形成。同样，从第 6 层到第 4 层的电路中心需要兴奋和抑制之间的平衡，它可以对第 4 层中的细胞活动提供兴奋性调节，但不能完全激发它们（图 2a-2c）。如上所述，后一种电路在注意力（图 2b）和响应复杂场景的正确感知分组的预先注意选择中起着重要作用（图 2c）。Grossberg 和 Williamson (2001) 提出，皮质以稳定的方式发展和学习需要这种平衡回路，并模拟了这种平衡连接如何在皮质发育过程中生长。事实上，如果抑制太弱，那么兴奋就会不受控制地传播，而如果它太强，细胞就不能得到充分的激活。

另一方面，平衡的兴奋性和抑制性连接也已被用来解释皮层神经元发出的尖峰的数量和时间分布的变化（Shadlen 和 Newsome, 1998; van Vreeswijk 和 Sompolinsky, 1998）。这些尖峰模式在激发皮层细胞方面效率很低。鉴于 LAMINART 模型提议，这种可变性可能反映了确保皮层电路稳定发育和学习所需的机制—即“稳定性意味着可变性”—皮层面临着如何克服可变尖峰低效的难题皮层神经元驱动反应的模式。LAMINART 模型展示了这些平衡的兴奋性和抑制性连接如何通过重新同步属于同一对象的去同步信号来克服间歇性尖峰的低效率，从而确保皮层有效地处理它们。换句话说，正是使皮层细胞能够选择性地响应输入模式的过程—，即平衡的激发和抑制—也确保了皮层细胞可以对那些通过皮层自下而上过滤选择的模式做出强烈而同步的反应，水平分组和自上而下的注意过程。

本文的其余部分总结了皮质回路的特性，这些特性使它们能够实现预测的 CLEARs 关系，以及支持这些预测回路的说明性数据。

稳定性-塑性难题：整个生命过程中的快速学习

学习的问题使得有意识的体验的统一性特别难以理解，这仅仅是因为我们能够一生中自己迅速地学习如此大量的新信息。我们如何将它们整合到统一的体验中，并凝聚成一种自我意识？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，我们可以快速学习新的事实，而不会被迫同样快速地忘记我们已经知道的东西。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，我们会突然忘记父母的面孔。这有时被称为灾难性遗忘问题。

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。从技术上讲，大脑解决了许多当前的技术方法尚未解决的具有挑战性的问题：它是一个自组织系统，能够快速、稳定、自主地从不断变化的环境中学习大量数据，这些数据可以充满了意想不到的事件。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。

我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-可塑性困境，这些系统需要对大量信号做出快速、自适应地响应，即使是最普通的体验也是如此。如果大脑的设计是简约的，那么我们应该期待在所有大脑系统中找到类似的设计原则，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 试图阐明其中一些原则，以及实现这些原则的神经机制。接下来的部分总结了建议如何发生的各个方面。

CLEARs 机制如何相互作用

人类是有意识的生物，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人，他们随时都将处理资源集中在有限量的传入信息上。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。

为了弄清感觉或认知期望的作用以及共振状态的激活方式，假设您被要求“尽快找到黄球，您将赢得 10,000 美元的奖金”。激活对“黄球”的预期可以使其更快速地检测到，并且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。自上而下预期与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，将注意力集中在自下而上数据的匹配或预期部分。

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：当两个或多个处理级别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并延长它们的相互激活，导致共振状态。活动的放大和延长以更缓慢变化的自适应权重触发学习，这些权重控制沿着从细胞到细胞的通路的信号流。共振在此提供了一个全局上下文敏感指标，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或 ART。

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我们发现的信息上的机制之间的联系。有趣的。ART 通过断言澄清这一联系，为了解决稳定性-塑性困境，只有共振状态才能驱动快速的新学习。

距离这里仅一步之遥，提出那些可以通过学习来吸引我们的注意力并指导我们未来生活的体验也是有意识的体验。对这一额外断言的支持来自许多建模研

究, 这些研究使用共振状态对行为和大脑数据的模拟映射到这些实验中意识体验的特性。

ART 机械化的感官和认知领域内的学习类型是匹配学习: 只有在自下而上的信息和由主动识别类别读出的自上而下的学习期望之间发生足够好的匹配时, 才会发生匹配学习, 或者代码。当发生这种近似匹配时, 可以提炼先前学到的知识。匹配学习引起了人们的担忧, 如果匹配不够好会发生什么? 这样的模型如何摆脱对已经学习过的表示的坚持?

如果新信息不能与先前学习的识别类别读出的期望形成足够好的匹配, 则触发记忆搜索或假设检验, 导致选择和学习新的识别类别, 而不是灾难性的遗忘一个旧的。图 2 说明了这是如何在 ART 模型中发生的; 下文将对其进行更详细的讨论。相比之下, 如上所述, 空间和运动过程中的学习被认为是不匹配学习, 它不断更新感觉-运动图或感觉-运动命令的增益。因此, 我们可以稳定地了解变化世界中正在发生的事情, 从而解决稳定性-可塑性困境, 同时使用参数随时间不断变化的物体自适应地更新我们对物体所在位置以及如何对它们采取行动的表示。

数学上已经证明, ART 模型中的匹配学习会导致稳定的记忆, 以响应要学习的任意事件列表 (Carpenter 和 Grossberg, 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, 那么你怎么会学到你不知道的东西? 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。

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, 大脑中的互补过程比任何此类类比都要动态得多: 成对的互补过程以这样一种方式相互作用, 即它们的突现特性克服了它们的互补缺陷, 以计算有关智能行为控制的某些方面的完整信息。

共振和复位的互补对中的共振过程预计将在 What 皮层流中发生, 特别是在颞下和前额叶皮层中。在这里, 自上而下的期望与自下而上的投入相匹配 (Desimone, 1998; Miller、Li 和 Desimone, 1991)。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。如果期望与输入模式足够接近, 那么随着注意力的集中, 就会出现共振状态。

图 2 在一个简单的两级示例中说明了这些 ART 想法。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。此特征模式表示输入模式 I 中不同特征的相对重要性。在图 2a 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，压缩表示 Y （也称为识别类别或符号）被激活以响应分布式输入 T 。输入 T 是通过将信号相乘来计算的向量 S 由可以通过学习改变的自适应权重矩阵组成。表示 Y 被 $F2$ 上的竞争性相互作用压缩，只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。图中的模式 Y 表明少数类别细胞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，在输入向量 I 和 V 之间进行匹配过程，该过程选择活动 $F2$ 类别 Y “预期”的 $F1$ 特征的子集 X^* 。“注意力集中”。

在意识共振期间绑定分布式特征模式和符号

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

共振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, 2000）。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，就像图片中的像素一无意义一样。 $F2$ 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“象征性的”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，大脑是人类已知的分布式特征和符号的最成熟的处理器。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。正是这种连贯的状态，将分布的特征和符号类别结合在一起，才能进入意识。这种共振结合过程将空间分布的特征连接到稳定平衡或同步振荡中。最初的 ART 文章 (Grossberg, 1976) 预测了这种同步振荡的存在，在那里，它们的数学特性被描述为“保持顺序的极限环”。自从第一个神经生理学实验报道了这种同步振荡 (Eckhorn 等, 1988; Gray 和 Singer, 1989; Gray 等, 1989) 以来，支持实验的数量迅速增长。Grossberg 和 Somers (1991)

以及 Grossberg 和 Grunewald (1997) 以及 Yazdanbakhsh 和 Grossberg (2004) 的层流皮层模型报告了快速同步 ART 和感知分组电路的模拟。神经回路快速同步的能力本身就是一个值得大量讨论的话题。

共振将有意和注意的信息处理与学习联系起来

在 ART 中, 预计共振状态而不是自下而上的激活将驱动学习过程。共振状态持续足够长的时间, 并处于足够高的活动水平, 以激活自适应权重中较慢的学习过程, 引导信号在图 2 中 F1 和 F2 级之间的自下而上和自上而下的路径之间流动。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, 除非它们能够启动共振状态, 否则无需了解它们当前正在处理的信号。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。

ART 的最新层流版本, 特别是同步匹配 ART (SMART) 模型 (Grossberg 和 Versace, 2007 年; Versace 和 Grossberg, 2005 年, 2006 年), 展示了匹配如何导致快速伽马振荡, 从而促进与尖峰时间相关的可塑性 (STDP), 而失配会导致较慢的 beta 振荡, 从而大大降低 STDP 学习定律可以学习失配事件的概率。在审查了更多基本概念之后, 将在下面总结这些新功能。

互补的注意力和定向系统控制共振与重置

主动的自上而下的期望和自下而上的输入之间的严重不匹配, 比如因为输入代表了一种不熟悉的体验类型, 可以推动记忆搜索。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, 这个定向系统包括海马系统, 海马系统长期以来一直被认为参与错配处理, 包括新事件的处理 (Deadwyler、West 和 Lynch, 1979 年; Deadwyler、West 和 Robinson, 1981 年; Otto 和 Eichenbaum, 1992 年; Sokolov, 1968 年, Vinogradova, 1975 年)。最近关于 SMART 的工作也涉及非特异性丘脑核。见下文。来自定向系统的输出信号快速重置识别类别, 该类别一直在读出匹配不良的自上而下的期望 (图 2b 和 2c)。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 (图 2d)。重置事件由此触发记忆搜索或假设检验, 这会自动导致选择能够更好地匹配输入的识别类别。各种数据支持这种预测的假设检验周期的存在。特别是 Banquet 和 Grossberg (1987) 总结了来自人类实验的证据, 该实验旨在通过测量事件相关电位 (ERP) 来测试这种 ART 预测。这项研究表明, P120 - N200 - P300 ERP 序列具有 ART 不匹配 - 唤醒 - 重置的特性, 预计会在假设检验周期中发生。随后的许多研究为预测编码提供了额外的证据; 例如, Ahissar

等人。(2002), Desimone 等。(1998), 恩格尔等人。(2001), 高等。(1998), 赫尔曼等人。(2004), 克鲁帕等。(1999) 和 Salin 和 Bullier (1995)。

如果不存在这样的识别类别, 比如说因为自下而上的输入代表了一种真正新颖的体验, 那么搜索过程会自动激活一个尚未提交的细胞群, 通过它来了解新信息。为了使自上而下的期望与新发现的识别类别相匹配, 其自上而下的自适应权重最初具有较大的值, 这些值会通过特定期望的学习进行修剪。

这种学习过程在无监督和有监督的条件下都能很好地工作 (Carpenter et al., 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是由文化决定的新类别, 而不是仅基于特征相似性。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, 可以建立一个不断增长、自我完善的不断变化的世界的内部模型。

控制意识体验的内容: 范例和原型

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? 一种观点认为, 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特定面孔。另一方面, 将每一个记忆中的经历存储为范例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 和 Keele, 1968 年)。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, 克服了早期模型所面临的问题。

首先要意识到的是, ART 原型不仅仅是按类别分类的样本的平均值, 正如经典原型模型中通常假设的那样。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。此外, 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 和 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。

警戒是在 ART 模型的定向系统内计算的 (图 2b-d)。在这里, 来自输入模式 I 中所有活动特征的自下而上的激励与来自 F1 的分布式特征表示中所有活动特征的抑制进行了比较。如果 F1 中活动特征 (即“匹配”特征) 的总活动

与 I 中所有特征引起的总活动之比小于警戒参数 ρ (图 2b), 则重置波被激活 (图 2c), 这可以推动搜索另一个类别来对样本进行分类。换言之, 警戒参数控制在开始搜索新类别之前匹配的糟糕程度。如果警戒性参数低, 那么许多示例都可以通过消除与所有示例都不相同的功能来影响共享原型的学习。如果警戒参数很高, 那么即使新样本和已知原型之间的微小差异 (例如, F 与 E) 也可以推动寻找代表 F 的新类别。

控制警惕的一种方法是通过匹配跟踪过程。这里出现预测错误 (例如, D 是响应 F 预测的), 警戒参数增加, 直到它刚好高于 F1 中的活动特征与 I 中的总特征的比率。换句话说, 警戒“跟踪”了输入样本和匹配原型之间的匹配。这是最低级别的警惕, 可以触发重置波, 从而对新类别进行记忆搜索。匹配跟踪实现了一个最小最大学习规则, 该规则在最小化预测误差的同时最大化了类别的通用性。换句话说, 匹配跟踪使用的内存资源最少, 可以防止发生错误。

由于警惕性可能因学习试验而异, 因此单个 ART 系统可以学习能够对广泛不同程度的概括或抽象进行编码的识别类别。低警惕导致广泛的概括和抽象的原型。高度警惕导致狭窄的概括, 并导致代表较少输入范例 (甚至是单个范例) 的原型。因此, 例如, 可以使用单个 ART 系统来学习用于识别面部和狗的抽象类别的抽象原型, 以及用于识别面部和狗的个人视图的“示例原型”。ART 模型在此尝试学习与数据一致的最一般类别。例如, 这种趋势会导致在幼儿中看到的过度概括类型, 直到进一步学习导致类别细化 (Chapman 等, 1986; Clark, 1973; Smith 等, 1985; Smith 和 Kemler, 1978; 沃德, 1983 年)。

如果警惕性控制对于正常学习很重要, 则可能会希望提高警惕性控制, 从而导致某些精神障碍。有人提出异常低警惕可能导致内侧颞部遗忘症 (Carpenter 和 Grossberg, 1993), 异常高度警惕可能导致自闭症 (Grossberg 和 Seidman, 2006)。这些建议指出将某些精神障碍归类为“警惕性疾病”的实用性。

与生物学相关的神经模型必须能够解释和预测比其竞争对手更多的行为和神经数据。这种模型成熟的另一个标志是它“有效”并且可以解决复杂的现实世界问题。ART 的许多基准研究表明它在许多大型工程和技术应用中很有用。有关一些说明性基准研究, 请参阅 <http://profusion.bu.edu/techlab>。特别是, 复杂数据库分类中的警惕性控制使学习的 ART 类别的数量能够随着输入数据的复杂性很好地扩展。

记忆巩固和规则的出现

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 (Carpenter and 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, 而陌生的输入则使用定向子系统来触发记忆搜索更好的

类别，直到它们变得熟悉为止。这个过程一直持续到可以任意选择大的内存容量被充分利用。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。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，例如蛋白质合成和递质产生。

还表明，一些 ART 模型学习的自适应权重可以在学习的任何阶段转换为 IF-THEN 规则（例如，Carpenter 等人，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。

从尖峰到认知：层流丘脑皮质回路中的伽玛振荡和 STDP

同步匹配自适应共振理论 (SMART) 模型以多种方式推进了 ART (Grossberg 和 Versace, 2007 年; Versace 和 Grossberg, 2005 年, 2006 年); 参见图 3。SMART 将注意力学习要求与层状新皮质回路如何与初级、高阶（例如，枕叶核; Sherman 和 Guillery, 2001; Shipp, 2003）和非特异性丘脑核（van Der Werf 等人，2002）。皮质丘脑皮质通路和皮质皮质通路并行工作 (Maunsell 和 van Essen, 1983 年; Salin 和 Bullier, 1995 年; Sherman 和 Guillery, 2002 年)。特定的一阶丘脑核（如外侧膝状核，LGN）将感觉信息传递给大脑皮层，而特定的二阶丘脑核则从低阶皮质区域（尤其是第 5 层）接收它们的主要输入，并将其传递给大脑皮层高阶皮质区域的信息 (Sherman 和 Guillery, 2002 年)。该模型阐明了皮质和丘脑输入在特定一阶和高阶水平上的匹配情况。特别是，假设在特定的丘脑核中，自下而上的输入模式和顶部的输入模式之间发生了足够好的匹配-从其相应皮质区域的第 6 层向下期望。这种匹配可以触发快速同步伽马振荡 (γ , 20-70Hz)，其短周期使同步尖峰能够通过依赖尖峰时间的可塑性来驱动学习 (STDP; Levy 和 Steward, 1983; Markram 等, 1997; Bi and Poo, 2001) 学习规则。特别是，当突触前和突触后细胞在彼此相距 10-20 毫秒内激发时，STDP 最大，因此有利于在同步快速振荡落入 STDP 时间限制的匹配状态中学习 (Traub 等人, 1998 年; Wespapatat 等人, 2004 年)。相比之下，不匹配的细胞经历较慢的 β 振荡 (β , 4-20Hz)。其峰值不在 STDP 学习窗口内。

SMART 在此将同步振荡频率和 STDP 的新特征带入讨论如何选择性调节学习中。来自哺乳动物多个丘脑和皮层水平的聚合和单细胞记录显示出与认知、知觉和行为任务相关的高频和低频有节奏的同步活动，并且已经提出大规模神经元群体模型来模拟振荡动力学 (Bazhenov 等, 1998; Lumer 等, 1997; Destexhe

等, 1999; Siegel 等, 2000)。然而, 这些模型并没有将大脑尖峰、振荡、STDP 和促进认知信息处理的大脑状态联系起来。

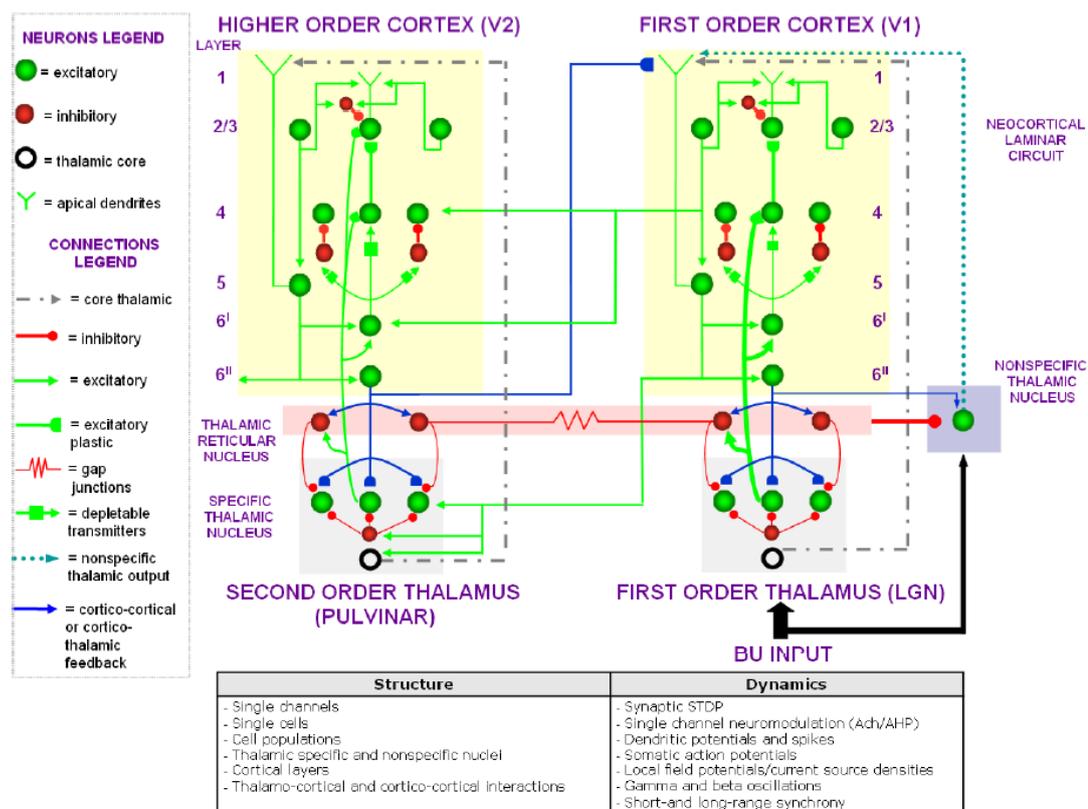


图 3. SMART 模型概述。一级和高级皮质区域通过皮质皮质和皮质丘脑皮质连接相连。丘脑分为特异的一级、二级、非特异和丘脑网状核 (TRN)。丘脑基质 (一个细胞群显示为开环) 为第 1 层提供启动, 第 5 层锥体细胞顶端树突终止。特定的丘脑通过塑料连接将感觉信息 (一级丘脑) 或低级皮质信息 (二级丘脑) 传递到各自的皮质区域。非特异性丘脑核接收来自 TRN 的会聚 BU 输入和抑制, 并投射到层状皮质回路的第 1 层, 在那里调节皮质回路中的重置和搜索 (见正文)。皮质皮质反馈连接将较高皮质区域的第 6II 层连接到较低皮质区域的第 1 层, 而丘脑皮质反馈起源于第 6II 层, 并在 TRN 上的突触后终止于特定的丘脑。第 6II 层皮质丘脑反馈与特定丘脑中的 BU 输入相匹配。V1 接收两个平行的 BU 丘脑皮质通路。LGN→V1 第 4 层通路和调节性 LGN→V1 第 6I→4 层通路提供第 4 层细胞反应的分裂对比度归一化 (Grossberg, 1980; Heeger, 1992)。皮质内循环 V1 层 4→2/3→5→6I→4 通路 (折叠反馈, Raizada 和 Grossberg, 2003) 通过中心的 6I→4 增强了在其自身位置赢得第 2/3 层细胞的活动, 并通过 6I→4 off-surround 抑制对其他 2/3 层单元的输入。V1 还激活 BU V1→V2 皮质皮质通路 (V1 第 2/3 层→V2 第 6I 和 4 层) 和 BU 皮质丘脑皮质通路 (V1 第 5 层→PULV→V2 第 6I 和 4 层), 其中 6I→4 层通路提供与 V1 类似的 V2 第 4 层细胞的分裂对比度归一化。来自 V2 层 6II→V1 层 5→6I→4 的皮质反馈也使用相同的调节 6I→4 通路。两个丘脑扇区的 TRN 细胞通过间隙连接连接, 在处理 BU 刺激时提供两个丘脑皮质扇区的同步。[经 Grossberg 和 Versace (2007) 许可转载。]

SMART 提出, 较高皮质水平的这种匹配或不匹配可能发生如下: 较低皮质区域 (例如, V1) 中的第 5 层细胞的激活产生对高阶特定丘脑区域 (例如, 丘脑) 的驱动输入; 参见 Rockland 等人。 (1999)。来自第 5 层的终止类似于 retinogeniculate RL 突触或驱动连接, 通常在树突的更近端部分中发现。这种连接模式似乎在物种之间是恒定的 (Rouiller 和 Welcher, 2000)。

来自相应皮质区域 (例如, V2) 的第 6II 层的自上而下的期望在该丘脑区域与第 5 层输出模式匹配, 类似于视网膜输入到外侧膝状核的方式通过自上而下匹配来自 V1 的第 6II 层的信号。如果发生足够好的匹配, 则可以在 pulvinar 和 V2 中触发同步伽马振荡, 从而学习作为匹配模式一部分的关键特征。

丘脑皮质不匹配。非特异性丘脑核和第 1 层介导的复位

如果匹配不够好, 则非特异性丘脑核被一种类似于图 2 中总结的机制激活, 但其在解剖学上更精确地表征在图 3 中。非特异性丘脑激活作为唤醒信号非特异性地广播到许多皮质区域通过第 1 层上的漫射输入。我们建议这种非特异性途径是定向系统的一部分, 该定向系统响应失配事件而触发重置。特别是, 第 5 层细胞的第 1 层中的顶端树突接收这种唤醒输入。如果这些第 5 层细胞中的一些在发生唤醒爆发时处于活动状态, 则它们的放电率会随着唤醒输入而增强。第 5 层细胞放电的这种增强通过以下方式触发皮质和丘脑细胞的选择性重置:

第 5 层单元格通过第 6 层投影到第 4 层 (图 3)。来自第 6 层到第 4 层的信号由习惯性发射器 (也称为抑制性突触) 控制。就在觉醒爆发之前, 这些电路中的激活模式使第 4 层细胞的习惯性网络产生偏差。有源电路可能是导致预测不匹配的电路。当唤醒爆发发生时, 这些先前处于活动状态的细胞相对于未处于活动状态的细胞处于不利地位。然后会发生重置事件, 在它选择新单元以更好地编码新输入时抑制先前活动的单元。

该模型的解释得到了关于单细胞生物物理学和神经生理学、层状神经解剖学、聚合细胞记录 (电流源密度、局部场电位) 以及 β 和 γ 频率的大规模振荡数据的定量模拟的支持, 该模型在功能上将它们联系起来对如何实现快速稳定的专注学习的要求。

关于为什么在较低的皮质层中振荡频率较慢的预测: 重置 如上所述, SMART 预测丘脑皮质不匹配可能会通过更深的皮质层 6 和 4 导致皮质重置。模型模拟还表明, 不匹配会导致较慢的 β 振荡。将这两个特性放在一起导致预测新皮质的更深层可能比表层更频繁地表达 β 振荡。最近已经通过实验报道了这种特性 (Buffalo 等, 2004)。仍有待测试观察到的实验属性是否与 SMART 重置预测相关。

在这方面可以注意到两个问题。一个是关于如何测试预测：一个可能的测试是对同一只动物进行一系列实验，其中该动物暴露于具有越来越多新事件的环境中。更多的新事件应该导致更多的皮质重置。每单位时间更多的皮质重置是否会导致较低皮质层中更多的 β 振荡？第二个问题指出，更深和更浅的皮质层中振荡频率之间的差异是随时间变化的平均值。意识到这一点至关重要，因为存在层间皮质内反馈回路，可以预期在比赛期间同步所有皮质层（Yazdanbakhsh 和 Grossberg, 2004）。事实上，这些是皮层内反馈回路，其中“前注意分组是它自己的注意素数”，从而使新皮层能够在不失去稳定性的情况下发展其回路，甚至在皮层间注意回路可以发展之前。

2、讨论

本文总结了自适应共振理论如何解释意识、学习、期望、注意力、共振和同步的 CLEARs 属性之间的机械关系。ART 提出，这些过程可以共同解决稳定性-可塑性难题，从而使包括人类在内的先进动物能够快速了解整个生命中不断变化的世界，而不会遭受灾难性的遗忘。有意识的事件被预测为共振事件的一个子集。反过来，共振通过将学习到的自上而下的期望纳入预测匹配过程来控制学习以避免灾难性遗忘，该过程将注意力集中在值得学习的关键特征模式以及意识上。ART 的最新发展，例如 LAMINART 模型和尖峰 SMART 模型，表明可以在层状皮质丘脑结构内对预测的 ART 机制进行详细的解剖学和神经生物学解释，这极大地扩展了 ART 的解释和预测能力。一个重要的研究主题是表征哪些共振事件不是意识事件。这个方向的一个开始是观察到皮质内共振可以在不支持有意识体验的情况下稳定学习，这似乎是 Watanabe 等人的感知学习实验中发生的事情。（2001）。

References

- Ahissar, M. & Hochstein, S. (2002). View from the Top: Hierarchies and Reverse Hierarchies in the Visual System. *Neuron*, 36, 791-804.
- Banquet, J.P. & Grossberg, S. (1987). Probing cognitive processes through the structure of event-related potentials during learning: An experimental and theoretical analysis. *Applied Optics*, 26, 4931-4946.
- Bazhenov, M., Timofeev, I., Steriade, M. & Sejnowski, T.J. (1998). Computational models of thalamocortical augmenting responses. *The Journal of Neuroscience*, 18, 6444-6465.
- Bi, G.Q. & Poo, M. (2001). Synaptic modification by correlated activity: Hebb's postulate revisited. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 139-166.
- Buffalo, E.A., Fries, P. & Desimone, R. (2004). Layer-specific attentional modulation in early visual areas. *Society for Neuroscience Abstract*, Project No. 717.6.
- 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. (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.
- Chapman, K.L., Leonard, L.B., & Mervis, C.G. (1986). The effect of feedback on young children's inappropriate word usage. *Journal of Child Language* 1, 101-107.
- Clark, E. V. (1973). Cognitive development and the acquisition of language. In T. E. Morre (Ed.), *What's in a word? On the child's acquisition of semantics in his first language* (p. 65-110). New York, NY: Academic Press.
- Deadwyler, S.A., West, M.O. & Lynch, G. (1979). Activity of dentate granule cells during learning: Differentiation of perforant path inputs. *Brain Research*, 169, 29-43.
- Deadwyler, S.A., West, M.O. & Robinson, J.H. (1981). Entorhinal and septal inputs differentially control sensory-evoked responses in the rat dentate gyrus. *Science*, 211, 1181-1183.
- Desimone, R. (1998). Visual attention mediated by biased competition in extrastriate visual cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*. 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.
- Eckhorn, R., Bauer, R., Jordan, W., Brosch, M., Kruse, W., Munk, M. & Reitboeck, H.J. (1988). Coherent oscillations: A mechanism of feature linking in the visual cortex? *Biological Cybernetics*, 60, 121-130.
- Engel, A.K., Fries, P. & Singer, W. (2001). Dynamic predictions: oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Review Neuroscience*, 2, 704-716.
- Fang, L. & Grossberg, S. (2007). From stereogram to surface: How the brain sees the world in depth. *Spatial Vision*, in press.

- Fazl, A., Grossberg, S. & Mingolla, E. (2007) View-invariant object category learning, recognition, and search: How spatial and object attention are coordinated using surface-based attentional shrouds. Technical Report CAS/CNS-2007-011, Boston University.
- Gao, E. & Suga, N. (1998). Experience-dependent corticofugal adjustment of midbrain frequency map in bat auditory system. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 95, 12663-12670.
- Gaudio, P. & Grossberg, S. (1991). Vector associative maps: Unsupervised real-time error-based learning and control of movement trajectories. *Neural Networks*, 4, 147-183.
- Goodale, M.A. & Milner, D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15, 20-25.
- Gray, C.M. & Singer, W. (1989). Stimulus-specific neuronal oscillations in orientation columns of cat visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 86, 1698-1702.
- Grossberg, S. (1973) Contour enhancement, short-term memory, and constancies in reverberating neural networks. *Studies in Applied Mathematics*, 52, 217-257.
- Grossberg, S. (1976). Adaptive pattern classification and universal recoding, II: Feedback, expectation, olfaction, and illusions. *Biological Cybernetics*, 23, 187-202.
- Grossberg, S. (1980). How does a brain build a cognitive code? *Psychological Review*. 87, 1-51.
- 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. (1999a). How does the cerebral cortex work? Learning, attention, and grouping by the laminar circuits of visual cortex. *Spatial Vision*, 12, 163-187.
- Grossberg, S. (1999b). The link between brain learning, attention, and consciousness. *Consciousness and Cognition*, 8, 1-44.
- Grossberg, S. (2000a). How hallucinations may arise from brain mechanisms of learning, attention, and volition. *Invited article for the Journal of the International Neuropsychological Society*, 6, 579-588.
- Grossberg, S. (2000b). The complementary brain: Unifying brain dynamics and modularity. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 233-246.
- Grossberg, S. (2003a). Adaptive resonance theory. *The encyclopedia of cognitive science*. London : Macmillan Reference Ltd.
- Grossberg, S. (2003b). 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. (2003c). Resonant neural dynamics of speech perception. *Journal of Phonetics*, 31, 423-445.
- Grossberg, S. and Grunewald, A. (1997). Cortical synchronization and perceptual framing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 117-132.
- 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. & Pearson, L.R. (2006). Laminar cortical dynamics of cognitive and motor working memory, sequence learning, and performance: Toward a unified theory of how the cerebral cortex works. Technical Report CAS/CNS TR-2006-002, Boston University. Submitted for publication.
- 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. & 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. & Versace, M. (2007). Spikes, synchrony, and attentive learning by laminar thalamocortical circuits. Submitted for publication.
- 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 grouping 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.
- 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.
- Heeger, D.J. (1992). Normalization of cell responses in cat striate cortex. *Visual Neuroscience*, *9*, 181-197.
- Herrmann C.S., Munk, M.H.J. & Engel, A. (2004). Cognitive functions of gamma-band activity: memory match and utilization. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*, 347-355.
- Krupa, D.J., Ghazanfar, A.A. & Nicolelis, M.A.L. (1999). Immediate thalamic sensory plasticity depends on corticothalamic feedback. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, *96*, 8200-8205.
- Levy, W.B. & Steward, O. (1983). Temporal contiguity requirements for long-term associative potentiation/depression in the hippocampus. *Neuroscience*, *8*, 791-797.
- 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.
- Mishkin, M., Ungerleider, L.G. & Macko, K.A. (1983). Object vision and spatial vision: Two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, *6*, 414-417.
- Markram, H. Lubke, J., Frotscher, M. & Sakmann, B. (1997). Regulation of synaptic efficacy by coincidence of postsynaptic APs and EPSPs. *Science*, *275*, 213-215.
- Maunsell, J.H.R., and 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. *The Journal of Neuroscience*, *3*, 2563-2586.
- Miller, E.K., Li, L. & Desimone, R. (1991). A neural mechanism for working and recognition memory in inferior temporal cortex. *Science*, *254*, 1377-1379.
- Otto, T. & Eichenbaum, H. (1992). Neuronal activity in the hippocampus during delayed non-match to sample performance in rats: Evidence for hippocampal processing in recognition memory. *Hippocampus*, *2*, 323-334.
- Pearson, L. R. & Grossberg, S. (2005). Neural dynamics of motor sequencing in lateral prefrontal cortex. *The Society of Neuroscience Abstract*, 194.11.
- Pearson, L.R. & Grossberg, S. (2006). Laminar cortical dynamics of cognitive and motor working memory. *The Society for Neuroscience Abstract*, Atlanta GA, October.
- Posner, M.I. & Keele, S.W. (1968). On the genesis of abstract ideas. *Journal of Experimental Psychology*, *77*, 353-363.

- 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.
- Raizada, R.D.S. & Grossberg, S. (2003). Towards a Theory of the Laminar Architecture of Cerebral Cortex: Computational Clues from the Visual System. *Cerebral Cortex*, 13, 100-113.
- 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. *The Journal of comparative neurology*, 406, 221-50.
- Roelfsema, P.R., Engel, A.K., König, P. & Singer, W. (1997). Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas. *Nature*, 385, 157-161.
- 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.
- Rouiller, E.M. & Welker, E. (2000). A comparative analysis of the morphology of corticothalamic projections in mammals. *Brain Research Bulletin*, 53, 727-41.
- Salin, P.A. & Bullier, J. (1995). Corticocortical connections in the visual system: structure and function. *Physiological reviews*, 75, 107-154.
- Seitz, A., & Watanabe, T. (2003). Is subliminal learning really passive? *Nature*, 422, 36.
- 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 of London B: Biological Sciences*, 357, 1695-708.
- Shipp, S. (2003). The functional logic of cortico-pulvinar connections. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 358, 1605-24.
- Siegel, M., Körding, K.P. & König, P. (2000). Integrating top-down and bottom-up sensory processing by somato-dendritic interactions. *Journal of Computational Neuroscience*, 8, 161-173.
- Smith, C., Carey, S. & Wiser, M. (1985). On differentiation: A case study of the development of the concept of size, weight, and density. *Cognition*, 21, 177-237.
- Smith, L.B. & Kemler, D.G. (1978). Levels of experienced dimensionality in children and adults. *Cognitive Psychology*, 10, 502-532.
- Solokov, E.N. (1968). *Mechanisms of Memory*. Moscow University Press.
- 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, 563-75.
- Tyler, C. W. & Kontsevich, L. L. (1995). Mechanisms of stereoscopic processing: stereo attention and surface perception in depth reconstruction. *Perception*, 24, 127-153.
- Ungerleider, L.G. & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems: Separation of appearance and location of objects. In D.L. Ingle, M.A. Goodale, and R.J.W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior* (p. 549-586). Cambridge, MA: MIT Press.
- 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 Brain research reviews*, 39, 107-40.

- van Vreeswijk, C. & Sompolinsky, H. (1998). Chaotic balanced state in a model of cortical circuits. *Neural Computation*, *10*, 1321–1371.
- Versace, M. & Grossberg, S. (2005). Temporal binding and resonance in thalamocortical assemblies: learning and cognitive information processing in a spiking neuron model. *Society for Neuroscience Abstract*, Washington, DC.
- Versace, M. & Grossberg, S. (2006). From spikes to interareal synchrony: how attentive matching and resonance control learning and information processing by laminar thalamocortical circuits. *Society for Neuroscience Abstract*, Atlanta, GA.
- Vinogradova, O.S. (1975). Functional organization of the limbic system in the process of registration of information: Facts and hypotheses. In R.L. Isaacson and K.H. Pribram (Eds.), *The hippocampus*, Vol. 2 (p. 3-69). Plenum Press.
- Ward, T.B. (1983). Response temp and separable-integral responding: Evidence for an integral-to-separable processing sequencing in visual perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *9*, 1029-1051.
- Watanabe, T., Náñez, J., & Sasaki, Y. (2001). Perceptual learning without perception, *Nature*, *413*, 844-848.
- Wespatat, V., Tennigkeit, F. & Singer, W. (2004). Phase sensitivity of synaptic modifications in oscillating cells of rat visual cortex. *The Journal of Neuroscience*. *24*, 9067–9075.
- Yazdanbakhsh, A. & Grossberg, S. (2004). Fast synchronization of perceptual grouping in laminar visual cortical circuits. *Neural Networks*, *17*, 707-718.