

基于网络的视觉皮层演化博弈研究

逯 鹏^{1,2}, 张 微¹, 李亚萍¹, 刘素杰¹

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 互联网医疗与健康服务 河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

摘 要: 从网络角度研究视觉是一种新思路. 视觉皮层网络存在传播效率和布线代价的矛盾. 从“经济性”原则入手, 通过对视觉皮层网络的模拟、演化, 研究有限能量限制下视觉皮层网络代价和效率的博弈演化规律. 以 V1 区脑沟 15 mm 构建空间视觉网络模型; 以异质性视觉皮层网络演化, 证实信息传播效率和布线代价存在矛盾; 以效率和代价两种混合动力学博弈策略产生合作簇, 验证布线代价和效率的博弈演化规律. 结果表明, 视觉皮层网络存在类复杂网络的动态博弈演化机制, 该结果为一般视觉信息处理研究提供了新途径和方法.

关键词: 视觉皮层网络; 传播效率; 布线代价; 演化; 博弈

中图分类号: TP2 **文献标志码:** A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.014

0 引言

传统视觉研究一般以感受野为主要切入点^[1], 即通过光刺激特定视野区域, 引起细胞产生动作电位, 获知视觉信息处理规律^[2]. 随着功能磁共振成像(fMRI)、脑磁图(MEG)、脑电图(EEG)等非侵入性脑影像技术的完善, 研究者发现通过构建视觉皮层网络研究视觉认知是一种新的途径.

人脑在多维的时间和空间尺度上都是复杂网络^[3], 视觉是一个特殊的脑网络. 因此, 采用脑网络的研究方法, 从宏观(脑区)到微观(单个神经元)各层次上刻画和挖掘视觉网络的连接规律是一个重要的研究方向.

文献[4]得到猴视皮层的有向结构连接网络; 文献[5]证实了视觉皮层具有小世界特性; 文献[6]采用计算模型方法研究猕猴皮层结构网络和功能网络的关系. 研究者从网络模拟、演化、进而分析视觉皮层网络内部组织模式, 采用复杂网络技术, 通过被量化的小世界网络揭示脑结构和脑功能的机制和特征^[7-8].

笔者着重从视觉网络博弈演化的两个问题深入研究: ①神经连接的建立和维持需要代谢消耗

且希望消耗尽可能少^[9], 即视觉网络中存在最小布线代价和信息传输效率的矛盾点; ②针对消耗和效率之间的折衷开展进一步研究.

视觉皮层的信息交换需要在低维空间中找到尽可能小的布线成本, 用博弈机制研究效率和代价之间的关系对理解视觉信息处理具有重要意义^[10]. 基于以上问题, 以脑区为节点, 神经元之间的突触为连边, 在严格空间限制下, 构建视觉脑网络模型, 发现并验证视觉皮层演化和博弈规律.

1 视觉皮层网络模拟

大脑是一个典型的空间网络^[11], 文献[12]提出的空间增长模型可以模拟和真实大脑系统相似的视觉脑网络. 与一般脑网络不同, 在进行视觉皮层网络模拟时需要考虑人脑的特殊性^[13]. 不同视觉皮层在大脑的不同区域, 分为两种情况.

(1) 节点在同一个区域内.

$$L(m,n) = d(m,n) = \sqrt{(x(m)-x(n))^2+(y(m)-y(n))^2+(z(m)-z(n))^2}.$$

(1)

(2) 节点在不同区域内.

$$L(m,n) = d(m,n) + deep(m) + deep(n).$$

(2)

式中: $d(m,n)$ 表示节点之间的线性路径长度;

收稿日期:2017-10-11; 修订日期:2017-12-01
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60841004、60971110、61172152); 郑州市科技攻关资助项目(112PPTGY219-8); 河南省青年骨干教师计划资助(2012GGJS-005)
作者简介:逯 鹏(1974—), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事复杂视觉图像信息处理、脑-机接口和医疗大数据方面的研究, E-mail: lupeng@zzu.edu.cn.

$deep(m)$ 表示节点 m 与最近脑沟底部之间的距离. 由于大脑皮层的复杂性,不同大脑的脑沟深度不同,可随机选取 $0 \sim 18 \text{ mm}$ 的数值^[13],为了统一计算,选取 15 mm 作为脑沟深度.

采用空间增长限制方法,通过 MNI (montreal neurological institute) 定位神经元坐标,对 V1 区 500 个节点模拟,设置网络参数范围遵循两条准则:①网络是无孤立节点的连通图;②网络密度 $\rho < 50\%$.

准则①保证网络的连通性,且要求比例因子不能太高. 准则②限制比例因子以适应视觉信息处理的高效率. 根据对视觉皮层网络的模拟,分析不同比例因子 V1 区对应的局部和整体网络小世界特性指数,如图 1 和图 2 所示.

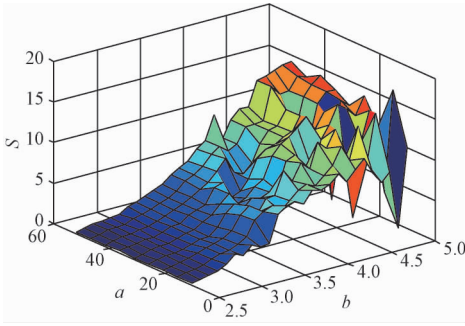


图 1 V1 区局部网络的小世界特性指数 S

Fig. 1 The small-worldness S of local network in V1

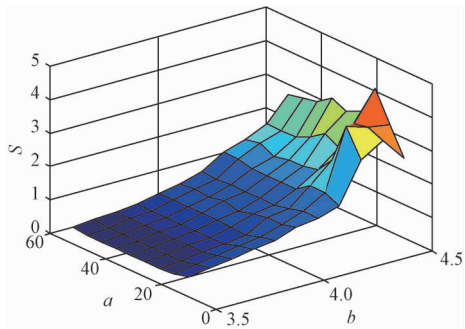


图 2 V1 区整体网络小世界特性指数 S

Fig. 2 The small-worldness S of global network in V1

图 1 中,在 $5 \leq a \leq 50, 3 \leq b \leq 5$ 范围内,V1 区对应的网络小世界特性指数 $S > 1$,表现出小世界拓扑特性. 图 2 中,在 $3.5 < b < 4.5$ 模拟视觉网络呈现小世界特性; $b < 3$ 为完全连通网络; $b > 4.5$ 时,网络被撕裂成独立的社团小网络.

采用 264 个 V1 区数据库信息,设置参数 $b = 4, a = 50$ 模拟得到可视化网络,如图 3 所示.

图 3(a) 表示部分节点连接图,图 3(b) 表示随机两点的平均路径长度. 计算得到其连边为 945,簇系数 $C = 0.282$,随机选取节点 3,其最短

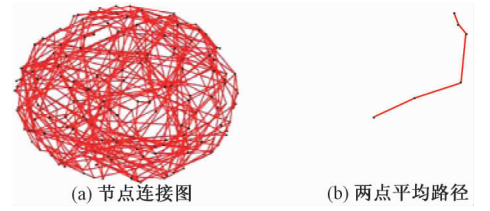


图 3 视觉皮层模拟网络图

Fig. 3 Simulate network graph of visual cortex

路径长度 L 为 5,由簇系数和路径长度可知,网络符合小世界特性.

2 视觉皮层网络演化

视觉系统是一个高耗能系统,视觉皮层应尽量降低这种消耗. 降低耗能的方法有两种:节点优先连接到距离最近的节点使布线代价最小化;采用长突触优先连接最小化处理步骤.

网络需要学习和优化来减少整个网络的能量消耗^[14]. 网络演化规则有随机性和自适应性,新节点可优先连接,与视觉皮层节点连接特性一致. 采用异质性视觉皮层网络演化,对节点、空间和优先连接条件限制,探究不同连接规则下的网络布线代价.

2.1 网络演化模型的构建

(1) 节点作用范围分布

$$p(r_i) = r_i^{-a} / \sum_j r_j^{-a}, \quad (3)$$

式中:比例因子 α 调整作用范围.

(2) 空间距离限制

$$r_{\min} \leq d(i, j) \leq r_{\max}. \quad (4)$$

式中: r_{\min} 和 r_{\max} 调整节点 i, j 间的空间距离.

(3) 优先选择条件

$$U(i, j) = R_v^\beta(j) / d^\gamma(i, j). \quad (5)$$

2.2 网络演化算法的生成

网络演化算法的生成主要是新节点和新边的生成,计算步骤如下.

(1) 设置初始值:初始节点,初始边;

(2) 生成新点:在每一个时间步 t ,随机选取一个旧节点按空间限制规则生成一个新点 m ;

(3) 生成新边:新点 m 与 m_1 个具有较大优先连接因子的空间邻居连接,新增加边数 m_1 ;若空间邻居数 $\omega > m_1$,与所有空间邻居相连,新增边数为 ω ;

(4) 在同一个时间步 t ,随机选择一个旧节点与尚未连接具有较大优先连接因子数的 m_2 个空间邻居连接,网络边数增加 m_2 条;若满足条件的空间邻居数 $h < m_2$,则与 h 个节点相连接;

- (5) 设置网络节点 $M = 1\,000$, 若 $M < 1\,000$, 继续网络演化, 若 $M = 1\,000$, 则停止演化;
- (6) 通过调整比例因子分析网络拓扑结构.

2.3 网络演化结果

设计 3 种不同优先连接方式的网络演化模型: ①长突触神经元优先连接 $\beta = 1, \gamma = 0$; ②混合态连接 $\beta = 1, \gamma = 1$; ③距离优先连接 $\beta = 0, \gamma = 1$. 3 种连接方式的小世界特性 S 和平均布线代价 ACW 随比例因子 α 的变化如图 4 和图 5. 其中: 比例因子 α 用来调节长短神经元数量比例, 当 α 增大时, 短突触神经元增多, 长突触神经元减少, 节点连接短突触神经元概率增加. 设置需符合视觉稀疏特性, 即 α 不能无限大, 节点数为 1 000, 网络规模为 30 000 m. u., 限制 α 的临界范围为 15 000 m. u. .

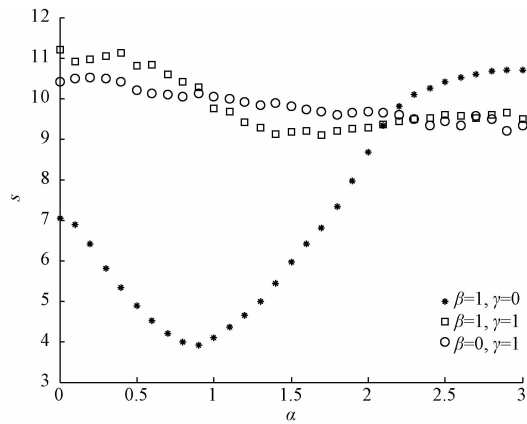


图 4 小世界特性变化曲线

Fig. 4 Curve of small-worldness characteristics

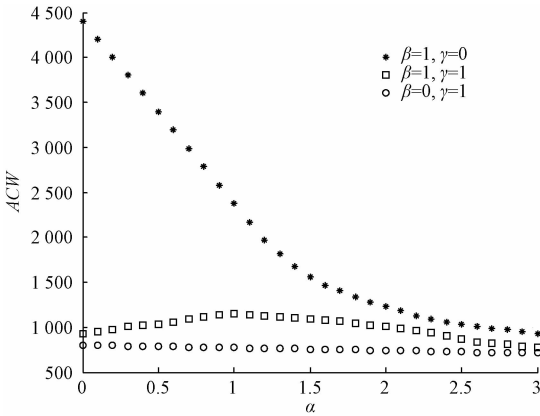


图 5 平均布线代价变化曲线

Fig. 5 Curve of average wiring cost

图 5 表明优先连接方式不同所表现的小世界特性 S 也有所不同. 在长突触优先连接时, 随着 α 的增加呈 U 字形变化; 在混合态连接时, 稳定在 10 左右上下波动状态; 在距离优先连接时, 呈缓慢下降状态. 3 种优先连接条件不同程度地影响

小世界最大化. 在长突触神经元连接状态下, 其平均路径长度 L 随 α 增大而减小, 簇系数 C 随 α 增大而增大, 具有较明显的小世界特性.

图 5 表明, 长突触神经元优先连接时, 布线代价随比例因子 α 的增加迅速下降; 在混合状态时, 平均布线代价先上升然后下降, 且幅度不明显; 在距离优先连接状态下, 平均布线代价 ACW 随 α 的增加逐渐减少, 处于比较经济状态. 以上 3 种连接中, 距离优先连接布线代价最经济, 长突触神经元优先连接机制具有较高的小世界特性. 试验证明, 视觉皮层处理信息存在传播效率和布线代价的矛盾, 二者如何协商权衡, 通过演化博弈进一步探究.

3 视觉皮层网络博弈演化

与传统博弈所有个体全部相互接触不同, 博弈演化中个体只与周围少数个体接触. 在博弈中引用网络拓扑, 网络中的节点表示博弈个体, 连边表示与邻居的博弈关系.

(1) 博弈个体: 视觉皮层网络中的节点.

(2) 策略集: 博弈个体根据周围邻居个体上一个时刻策略反思、采用反策略进行一次虚拟博弈, 得到虚拟的总收益, 比较两者收益的大小, 确定收益较大者为个体博弈最佳策略.

(3) 收益矩阵: 根据网络代价和效率判断收益. 当两个节点都合作时, 每个节点的收益为 b , 布线代价为 $c/2$; 当一个合作另一个背叛, 合作者和背叛者的收益均为 b , 合作者的布线代价为 c , 背叛者布线代价为 0; 当两个节点都背叛时, 收益均为 0, 布线代价为 0. 同时, 在网络博弈演化中若两者合作, 或者一方合作, 都会增加连接边.

(4) 策略更新: 每个个体在有限时间步进行更新策略.

3.1 网络博弈演化规则

将 N 个博弈个体置于网络节点上, 每一轮所有个体同时博弈, 个体的总收益为给定的收益矩阵与参加博弈个体博弈后的收益之和. 当一轮博弈完成后, 所有个体根据条件更新自己的策略库, 同时根据策略更新规则更新自身的策略, 进入下一轮的博弈. 重复上述步骤直到网络博弈合作密度稳定则停止博弈.

视觉皮层网络的效率定义为:

$$E_{\text{glob}} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{L_{i,j}}, \quad (6)$$

式中: N 表示网络规模; $L_{i,j}$ 表示节点 i 到节点 j 的最短路径长度;效率 E_{glob} 的范围在 $[0,1]$.

节点之间的连接需要消耗不同的布线代价,网络的布线代价定义为:

$$C_G = \frac{\sum_{i \neq j \in G} a_{ij} \gamma(L_{ij})}{\sum_{i \neq j \in G_{\text{id}}} \gamma L_{ij}}, \quad (7)$$

式中: a_{ij} 代表邻接矩阵; L_{ij} 代表最短路径; $\gamma(L_{ij})$ 计算给定长度节点之间连接所需的布线代价,范围 $[0,1]$.

网络博弈是以节点的布线代价和信息传输效率来定义收益函数. 收益函数定义为:

$$U = \max(E_{\text{glob}} - C_G), \quad (8)$$

式中:收益函数 U 的范围是 $[0,1]$.

个体的策略库更新和策略更新方案如下:上一时刻采用的策略进行反思,采用自己的反策略进行一次虚拟的博弈,得到虚拟的总收益;比较两者收益的大小,确定收益较大者为个体博弈所对应的最佳策略,并安排记忆最佳策略;个体根据本身有限时间步记忆更新策略.

3.2 博弈演化结果

演化开始,设置网络规模为 1 000 个节点,且合作者和背叛者各占规模的 50%;随机分配个体记忆最佳策略;个体随机选择博弈个体进行博弈;博弈开始一轮后,采用同步更新方式对每个个体进行策略更新;以 500 时间步为时间单位求 f_c 平均值,当 f_c 波动幅度在 0.02 以内,停止博弈;求最后 1 000 步合作密度平均值,并改变记忆长度,进行下一轮博弈;改变不同的记忆长度 M ,探究记忆性对合作密度 f_c 的影响.

不同记忆长度时,合作密度 f_c 随收益函数 U 的变化关系如图 6 所示.

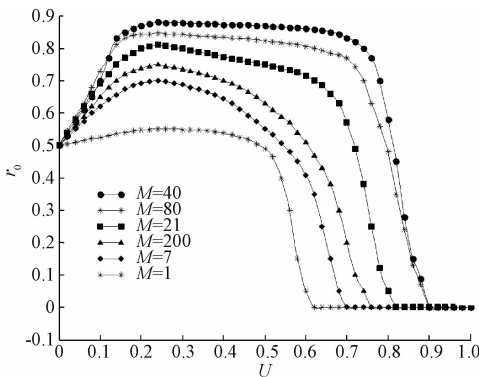


图 6 不同记忆长度合作密度变化曲线

Fig. 6 Curve of cooperative density changing under different memory lengths

网络博弈演化稳定后,当 $M = 1$ 时,节点没有记忆性,其合作密度没有明显的幅度变化. 当 $U = 0.5$ 时,合作密度急剧下降,其布线代价大于效率,节点表现出背叛性. M 值不断增大有利于合作涌现,但当 M 过大时,则不利于合作涌现.

随着博弈时间步的增加,网络合作簇形成的过程也在变化. 取 $M = 7, U = 0.3$, 如图 7 所示. 图 7 中灰色部分表示个体选择背叛策略,黑色部分表示个体选择合作策略. 当 $t = 0$ 时,网络还没开始博弈之前,合作个体和背叛个体均匀分布,没有合作簇;当 $t = 200$ 时,合作个体随着网络的博弈演化逐渐聚集到了一起,具有明显的聚类特性;当演化时间步达到 $t = 500$ 时,合作程度进一步增加,具有明显的簇系数.

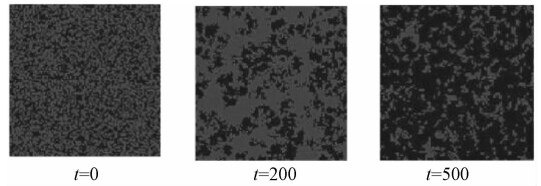


图 7 随着博弈时间步的增加合作簇的形成过程

Fig. 7 Process of collaboration cliques generated by game time steps

4 结论

视觉系统是典型的复杂网络. 通过视觉皮层网络的构建、模拟,得到了与真实视皮层相似的网络模型,证实了用复杂网络的方法进行研究具有一定的可行性;通过网络演化,验证了长突触神经元优先连接和距离优先连接存在矛盾点,与视觉神经生理一致;通过网络博弈演化规则,促进合作簇的生成,实现了布线代价与效率的折衷. 以网络的思想进行视觉皮层网络模拟、演化、博弈,为研究视觉信息处理提供了一种新的途径和方法.

参考文献:

- [1] 寿天德. 视觉信息处理的脑机制[M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [2] 陈科,尹娇娇,宋雪梅. 猫 V1 区不同外周整合细胞的经典感受野属性研究[J]. 生物化学与生物物理进展, 2015, 42(2): 182-188.
- [3] REINEBERG A E, BANICH M T. Functional connectivity at rest is sensitive to individual differences in executive function: a network analysis[J]. Human brain mapping, 2016, 37(8): 2959-2975.
- [4] HORVÁT S, G ÁM ÁUT R, ERCSEY-RAVASZ M, et al. Spatial embedding and wiring cost constrain the

functional layout of the cortical network of rodents and primates[J]. Plos biology, 2016, 14(7): 1-30.

[5] HILGETAG C C, MEDALLA M, BEUL S F, et al. The primate connectome in context: principles of connections of the cortical visual system[J]. Neuro image, 2016, 134: 685-702.

[6] MIŠIĆ B, BETZEL R F, DE REUS M A, et al. Network-level structure-function relationships in human neocortex[J]. Cerebral cortex, 2016, 26(7): 3285-3296.

[7] PARK H J, FRISTON K. Structural and functional brain networks: from connections to cognition[J]. Science, 2013, 342(6258): 579.

[8] 李亚萍. 视觉皮层网络演化模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学电气工程学院, 2015.

[9] VAN DEN HEUVEL M P, KAHN R S, GOÑI J, et al. High-cost, high-capacity backbone for global brain communication[J]. Proceedings of the national academy of science of the USA, 2012, 109(28): 11372-11377.

[10] 刘永奎. 复杂网络及网络上的演化博弈动力学研究[D]. 西安: 西安电子科技大学机电工程学院, 2010.

[11] HART M G, YPRMA R J, ROMERO-GARCIA R, et al. Graph theory analysis of complex brain networks: new concepts in brain mapping applied to neurosurgery[J]. Journal of neurosurgery, 2016, 124(6): 1665-1678.

[12] BULLMORE E, SPORNS O. The economy of brain network organization[J]. Nature reviews neuroscience, 2012, 13(5): 336-349.

[13] 赵庆柏. 小世界脑网络的模拟及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学神经信息学研究所, 2009.

[14] 阎新芳, 王晓晓, 冯岩, 等. 基于 Q 学习的无线传感网分簇拓扑控制算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(2): 85-88.

Research on Evolutionary Game of Visual Cortex Networks

LU Peng^{1,2}, ZHANG Wei¹, LI Yaping¹, LIU Sujie¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Collaborative Innovation Center of Internet Medical and Healthcare in Henan, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Research on vision from the perspective of network was a new direction. There was a contradiction between transmission efficiency and wiring cost in visual cortex network. Based on the principle of economy, the evolutionary game laws were proposed between the cost and efficiency under the limitation of energy by simulating the visual cortex network. The visual network model was built upon the sulci of 15mm in V1. The heterogeneous evolution of the visual cortex network confirmed the existence of contradiction between information transmission efficiency and wiring cost. The collaboration cliques generated by mixing the dynamic game strategies of efficiency and wiring cost validate the evolutionary game laws. The evolutionary game laws showed that there existed a dynamic evolutionary mechanism of class complex network in visual cortex network, and provided a new way for ordinary vision information management.

Key words: visual cortex network; transmission efficiency; wiring cost; evolution; game