

确定性小世界特性记忆网络的建模与算法

张兰华^{1,2}, 薛绍伟^{1,3}, 唐一源¹

(1 大连理工大学 神经信息学研究所, 辽宁 大连 116023; 2 泰山医学院 信息工程学院, 山东 泰安 271016;
3 杭州师范大学 教育科学学院, 浙江 杭州 310036)

摘 要: 为了形象直观的了解脑功能记忆小世界网络的形成及演化机制, 采用复杂网络确定性建模的方法对记忆过程进行模拟, 通过记忆节点及连边的抽取, 建立符合记忆解剖特征和逻辑意义的连边机制. 以集合为数据结构的建模算法仿真了小世界特性的记忆网络, 同时数据元素的检索算法符合记忆特征. 通过理论分析和数据仿真表明对脑功能记忆网络进行确定性建模是可行的.

关键词: 复杂脑功能记忆网络; 小世界网络; 确定性; 算法

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)10-0001-05

A Deterministic Small-world Model and Algorithm of Memory Network

ZHANG Lan-hua^{1,2}, XUE Shao-wei^{1,3}, TANG Yi-yuan¹

(1 Institute of Neuroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
2 College of Information and Engineering, Taishan Medical University, Taian 271016, China;
3 School of Education Science, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

Abstract: In order to gain a visual understanding on the shape and evolution of brain functional memory network, we present a simulation on memory process in deterministic way based on the complex network. The small-world memory network generated by construct algorithm where the data structure was set, the node and edge of memory was abstracted and the connection mechanism was selected according with the anatomical substrate and functional characters of memory. Moreover, the retrieval algorithm satisfied the memory characters. The theoretical analysis and the simulation results confirmed that the deterministic model is feasible to brain functional memory network.

Key words: complex brain functional memory network; small-world; deterministic; algorithm

1 引言

脑功能科学研究一直是人类自然科学研究的难题, 记忆作为一种高级神经认知活动, 是脑科学研究的重要课题之一, 如何全面了解脑功能记忆网络的形成机制与功能特性是人类认知脑记忆功能的重要课题, 进而为与记忆相关的神经科学、医学、生物学及病理学研究提供支持, 同时为研究人类认知和行为、治疗精神疾病和心理疾病都有积极的临床意义.

建模是先依照原型的主要特征, 建立一个相似的模型, 根据模型和原型之间的相似关系, 利用模型来间接研究原型的一种方法^[1-3].

脑功能网络结合图论和复杂网络成为近几年对脑科学研究的重要方向, 而通过网络建模认识脑功能特性已成为较成熟的研究模式. 确定性建模不仅可以形象直观的理解记忆认知形成过程, 还可以通过网络的拓扑特性对记忆功能进行定量分析^[1,3].

收稿日期: 2012-02-08; **修回日期:** 2012-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(60971096); 山东省高等学校科技计划项目(J10LC59); 泰山医学院科研计划课题(2010ZR100)

2 研究现状

传统对记忆的研究起源于心理学,是从心理认知或临床的角度开展研究,属于对临床记忆的反推验证研究,无法形象直观的理解记忆认知及功能特性,更无法通过数值计算等方式进行量化.随着脑科学的深入研究,记忆作为学科交叉的研究点从主观性研究转向客观性研究,而后随着信息科学、生命科学、控制科学和医学等领域的结合,记忆逐渐被认知和定量度量,特别是复杂网络在脑科学中取得的研究基础,为记忆的认知和度量提供了方法和思路,大量记忆网络的模型及算法被提出^[4-11].

在典型的记忆网络模型中,有两类建模方式被广泛应用,一是利用神经网络,从记忆特征出发,抛开解剖结构,通过抽象的神经网络模型,建立符合记忆联想功能的模式识别或智能控制类模型^[4,5].二是利用脑成像技术,通过结合视觉任务设计记忆认知功能,利用功能磁共振图像、脑电图及脑磁图等数据建立脑功能记忆网络^[6].在众多的模型中,无论侧重记忆功能特征抽象的研究,还是侧重物理结构与实验任务相结合的研究,在结论中均不同程度的呈现出记忆具有小世界网络特性^[4-11].

虽然众多的研究得到不同类型的记忆网络,也通过正推反推验证记忆的小世界特性,但是多数模型要么需要具体的实验环境,建立在一定的假设基础上,要么完全脱离记忆的解剖结构,只建立符合记忆特征的网络.因此,本文在以上研究的基础上,提出从解剖结构出发,抽取记忆的节点及连边,结合图论和复杂网络进行确定性的记忆网络建模,不仅形象直观的把抽象无序的记忆表象符号化成形象有序的科学理解,而且通过建模算法和检索算法解析记忆网络具有的小世界特性.

3 记忆网络确定性建模

记忆作为一种大脑的神经认知活动,从解剖学角度看,是通过神经元的连接与传递完成的,从整个大脑看,参与记忆功能的大量神经元组成的脑区相互连接形成了记忆网络.因此,结合脑的解剖结构和记忆的特性,定义两类节点,一是从实际的物理连接出发,定义脑区为外节点;二是从逻辑功能出发,定义神经元为内节点.同样针对记忆的物理组成和逻辑功能,定义两种连边,一是脑区与脑区之间的物理连接,即在解剖结构上如果两个脑区存在邻接关系,便生成一条边;二是神经元与神经元之间的逻辑连

接,由于神经元的庞大数量以及参与记忆的神经元的具体数量难以准确统计,定义参与记忆的神经元之间存在逻辑连边,即如果有神经元参与记忆,根据其参与记忆的先后顺序建立连边关系.同时由节点与连边形成记忆路径.

3.1 模型建立

基于以上定义,在记忆特征抽取的基础上,模型的生成算法如下:

(1) 初始化:给定一个新的或旧的记忆任务,等待记忆网络产生.

(2) 网络增长:

① 一个新的记忆任务到达,当记忆功能产生,如果是单个脑区参与记忆,则生成一个外接点,然后根据需要的记忆量产生相应一个或多个单节点,或一条或多条路径,其中每个节点均为内接点,单个内接点或路径直接与外接点建立连边;如果是多个脑区参与记忆,则外接点之间根据物理连接关系建立一条连边.

② 一个旧的记忆任务到达,即相同或相似的内容已经经过①形成记忆网络,此时记忆网络中的节点将被增强,连边关系将以检索算法的过程重新建立.

(3) 结束:记忆任务完成,记忆网络生成.

假设有 m 个脑区、 n 个神经元参与记忆活动,则根据模型的生成算法形成如图 1 所示的记忆网络模型.

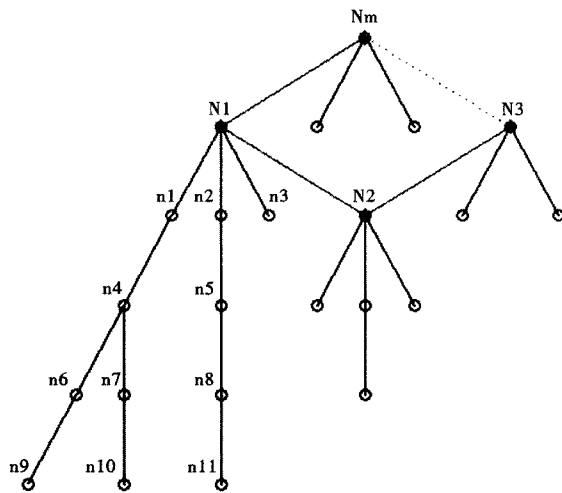


图 1 记忆网络模型生成算法图

3.2 检索算法

在对记忆特性的研究中,无论是 Hebb 规则,还是联想与遗忘,都建立在检索功能的基础上.记忆检索实际是网络数据搜索与比较的过程.根据记忆特

性的抽象,模型的模索算法如下:

(1) 初始化:给定检索任务与记忆网络.

(2) 检索过程:根据输入的检索数据与记忆网络中的数据进行比较,对外接点依次顺序搜索,对内接点采用广度优先或深度优先搜索.

① 结果为空. 如果依次搜索外接点均无数据存在,则没有记忆过此任务或遗忘. 同时将输入的检索数据按模型的生成算法新增到已存在的记忆网络中.

② 结果为子网络. 依次搜索外接点,对每一个由内接点形成的外接点子网络,如果内接点数据查询匹配,则直接将匹配的内接点先删除其父节点的连边,不改变其子节点的连边,直接将其连接到外接点上. 假设在图1中检索 $n7$ 、 $n8$ 节点,则检索结果如图2所示.

(3) 结果输出:经过新增或增强了的记忆网络.

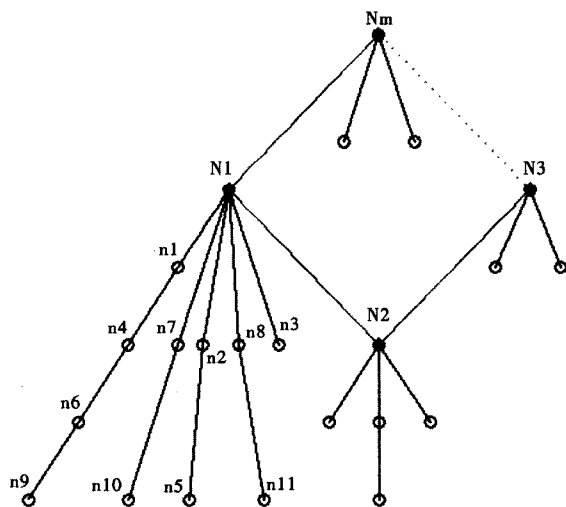


图2 记忆网络检索算法结果图

3.3 模型分析

(1) 小世界特性

对于复杂脑功能记忆网络所表现出来的特性,是通过图论中网络的拓扑特性分析得出的,其中聚类系数和平均路径长度是定量分析复杂网络的两个重要指标^[1,3]. 网络的聚类系数是指网络中所有节点聚类系数的平均值,节点的聚类系数是指与该节点相邻的所有节点之间连边的数目占这些相邻节点之间最大可能连边数目的比例. 平均路径长度是指网络中各个节点相连的最少边长度的平均数.

小世界特性是指网络具有较大的聚类系数,同时具有较小的平均路径长度,也可以通过与随机网络的比较得到^[1,3].

(2) 数据结构

在记忆网络模型生成与检索算法的程序实现上,通过图1和2可以看出,记忆网络是以图或树的形式存储,因此在存储结构上选用集合作为抽象数据类型,根据生成和检索算法的需要,对内接点采用树型结构表示集合,双亲表示法作为存储结构,参考划分等价类的算法,同时引入“路径压缩”功能;那么外接点可以看作集合的集合,由于表示物理连接关系,因此可以用顺序表或链表表示,同时作为存储结构^[12].

(3) 时间复杂度

时间复杂度可以较好的体现记忆网络的特性指标,整个模型的时间由两部分组成,外接点和内接点的检索. 内接点的检索依赖于网络的数据结构及算法,外接点可以看作数据的顺序检索,由于外接点个数远远小于内接点,因此整个网络的时间复杂度取决于内接点的时间复杂度.

(4) 记忆特性分析

根据数据结构和时间复杂度的分析,记忆的性能主要取决于检索操作,而检索主要由集合合并和数据查找操作,已经证明^[12]. 利用路径压缩功能实现的数据查找和集合,合并算法时间复杂度为 $O(n\alpha(n))$, n 为内接点个数, $\alpha(n)$ 为阿克曼函数的拟逆,是一个增长缓慢的函数,对于常见的正整数 n , $\alpha(n) \leq 4$. 因此,对于记忆的平均路径长度来讲,内接点的平均路径长度为 $\alpha(n)$,而参与记忆外接点的个数为记忆脑区的个数,因此,整个记忆网络的平均路径长度相对于神经元的个数来讲是较小的;从网络结构看,对于较大的检索次数,记忆网络最终演变为所有的内接点直接连接在各自的外接点上,但外接点之间的连接不变,因此整个网络变为由外接点形成的簇结构,即聚类系数为外接点的个数,研究发现^[4,7,9-11],每一个记忆任务都不是由单个脑区完成,而是由多个脑区共同完成,因此记忆网络具有较大的聚类系数. 所以经过本文的建模和检索算法生成的记忆具有典型的小世界特性.

对于记忆认知的其它特性,记忆容量可由 n 来度量;学习可以看是检索的过程,即记忆的增强过程,由算法可知,当经过多次学习之后,整个网络的内接点大部分直接连接到外接点,同样回忆也可以看作有条件的增强.

4 数据仿真

为了验证模型算法及检索算法的有效性,将参

考文献[3]中的 Abstract 作为记忆任务生成记忆网络. 假设以字母 a-g, h-n, o-t, u-z 开头的单词分别作为一个脑区, 则记忆网络的生成模型仿真结果如图 3 所示. 图 4 表示经过多次检索算法之后记忆网络的最终模型. 图 5 是本文算法与文献[12]中算法的平均查找路径长度比较结果.

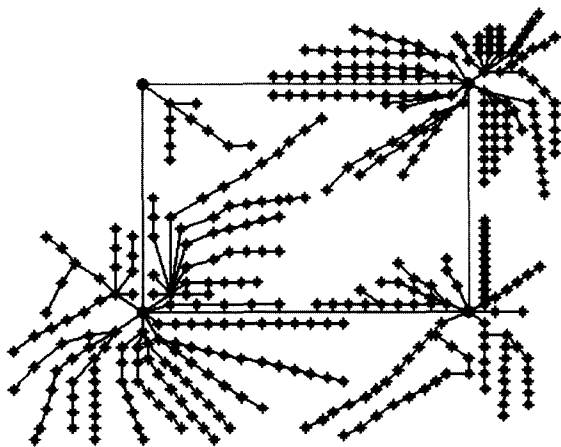


图 3 记忆网络仿真结果图

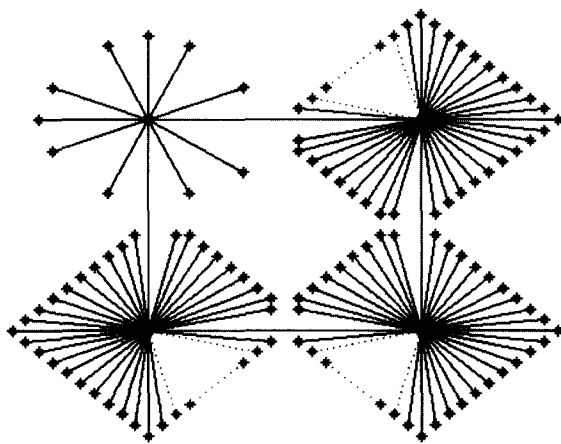


图 4 记忆网络检索结果图

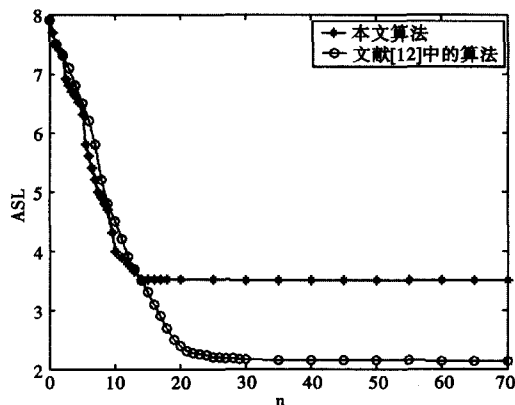


图 5 检索算法平均查找路径长度比较图

从图 4 可知, 经过多次检索之后, 记忆网络演化成以脑区为簇的复杂网络图, 也说明本文提出的记忆网络最终形成以参与记忆任务的脑区为簇的复杂脑功能网络. 由于脑区之间以物理连接为边, 因此, 脑区之间的连边在检索过程中没有变化, 同时也是图 5 中平均查找路径长度在后期比文献[12]中的算法高的原因.

5 结束语

本文结合图论和复杂网络在脑功能领域的研究基础, 提出了确定性的记忆网络建模算法, 并根据记忆的特性提出了相应的检索算法, 通过特性分析和数据模拟, 证明本文提出的记忆网络模型具有小世界特性, 同时符合记忆的特征.

本文建立的记忆网络模型只是众多记忆模型中的一类, 同时也存在不足之处需要改进, 如: Hebb 规则还不能通过模型完全解释, 更具有公共性和普适性的记忆模型需要考虑遗忘机制带来的距离增长, 同样阈值的设置会让模型量化更准确, 而且模型的验证还需要结合真正的临床实验数据, 如功能磁共振数据, 才能应用于实践甚至临床诊断与治疗中. 但是本文的研究为相关记忆网络的探讨提供了新的思路 and 参考.

参考文献:

- [1] 薛绍伟, 唐一源, 李健, 等. 一种基于 fMRI 数据的脑功能网络构建方法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(11): 4055-4057.
- [2] 张兰华, 孙岩, 薛绍伟, 等. 基于 BP 神经网络的社团分类研究[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(6): 197-200.
- [3] Bullmore Ed, Olaf Sporns. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems[J]. Nat Rev Neurosci, 2009(10): 186-198.
- [4] James A Bednar, Amol Kelkar, Risto Miikkulainen. Modeling large cortical networks with growing self-organizing maps[J]. Neurocomputing, 2002(44): 315-321.
- [5] Guoguang He, Luonan Chen, Kazuyuki Aihara. Associative memory with a controlled chaotic neural network[J]. Neurocomputing, 2008(71): 2794-2805.
- [6] Stam C J. Characterization of anatomical and functional connectivity in the brain: A complex networks perspective[J]. Int J Psychophysiol, 2010(77): 186-194.

- [7] Alfonso Renart, N' estor Parga, Edmund T Rolls. Associative memory properties of multiple cortical modules[J]. Network: Comput. Neural Syst, 1999(10): 237-255.
- [8] Bo Cartling. Dynamics control of semantic processes in a hierarchical associative memory[J]. Biol Cybern, 1996(74):63-71.
- [9] Hana Burianova, Anthony R McIntosh, Cheryl L Grady. A common functional brain network for autobiographical, episodic, and semantic memory retrieval[J]. NeuroImage, 2010(49):865-874.
- [10] Jason W Bohland, Ali A Minai. Efficient associative memory using small-world architecture[J]. Neurocomputing, 2001(38):489-496.
- [11] Anastasia Anishchenko, Alessandro Treves. Autoassociative memory retrieval and spontaneous activity bumps in small-world networks of integrate-and-fire neurons[J]. J Physiol Paris, 2006(100):225-236.
- [12] Aho A V, Hopcroft J E, Ulman J D. Data structures and algorithms[J]. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1983.

作者简介:



张兰华 男,(1979—),博士,讲师.研究方向为计算机应用技术和复杂网络建模算法与仿真.



薛绍伟 男,(1973—),博士.研究方向为复杂网络算法与应用.



唐一源 男,(1966—),博士生导师,教授.研究方向为神经信息学.