

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：13501
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2013～2015
課題番号：25330286
研究課題名(和文) 海馬と大脳皮質におけるエピソード記憶の形成モデル

研究課題名(英文) Hippocampal-neocortical episodic memory model

研究代表者
服部 元信 (HATTORI, Motonobu)
山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号：40293435
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、生理学、解剖学、神経心理学などの知見に基づき、エピソード記憶のための海馬-大脳皮質モデルを構築し、その特性を計算機シミュレーションによって調査した。その結果、海馬モデルの歯状回に導入した神経新生とCA3に導入したカオスニューロン、並びにCA3の学習則として導入した非対称スパイクタイミング依存性シナプス可塑性によって、一般的な時系列の記憶が可能になること、カオス想起によって海馬に記憶した時系列を抽出できること、破局的忘却を抑制しつつ長期記憶を形成できることなどを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have constructed a hippocampal-neocortical model for episodic memories based on physiological, anatomical and neuropsychological findings and examined its characteristics by computer simulation. As the results, we have shown that the proposed model can deal with general temporal sequences owing to the neurogenesis in DG, chaotic neurons in CA3, and the asymmetric spike timing dependent synaptic plasticity introduced to the learning of CA3. Moreover, we have revealed that the chaotic recall in the hippocampal network much contributes to extract stored sequences, reduce catastrophic forgetting in the neocortical network, and the consolidation of the long-term memory.

研究分野：情報学

キーワード：海馬 大脳皮質 エピソード記憶 破局的忘却 カオスニューロン 神経新生 スパイクタイミング依存性シナプス可塑性

1. 研究開始当初の背景

脳の機能において記憶はとりわけ重要であり、我々人間の知的な活動は記憶を抜きにしては語れない。記憶は、まず毎日の個人的な出来事の経験、すなわち、エピソード記憶として獲得され、そこから時間的文脈が除去された事実に関する記憶(意味記憶)が形成され、思考や推論といった高次な情報処理に利用されていると考えられている。したがって、エピソード記憶は我々の記憶の基盤であり、人間のように知的で柔軟な情報処理システムを構築するにあたっては、第一に、如何にしてエピソード記憶の形成過程を模倣するかが大変重要である。

エピソード記憶は、初めに海馬に蓄えられた後、徐々に大脳皮質へと転写されていくと考えられている。しかし、海馬にどのように蓄えられ、それがどのような仕組みで取り出され転写されるのか、大脳皮質に既に固定されている記憶を破壊することなく新しい情報をどのように追加するのか、エピソード記憶からどのように時間的文脈が除去されていくのか、などそのメカニズムの全容は未解明である。そのため、特に海馬に関する生理学的な研究が近年盛んに行われている。また、計算機科学の分野においても、海馬の計算モデルや工学モデルが近年いくつか提案されている。しかし、従来の研究では、海馬やその一部のみをモデル化の対象とすることがほとんどであった。それに対し本研究代表者らは、海馬のみならず、長期記憶の座である大脳皮質までを考慮し、記憶の形成過程を巨視的にシステムとして捉えた研究を行ってきた。そして、本研究を進めていく上での基礎となる以下の結果を得ている。

- (1) 解剖学並びに生理学的知見に基づいた海馬 CA3 のモデルを構築し、海馬が機能的に自己想起と相互想起の領域に分けられることを示し、これらがエピソード記憶の曖昧性解消に寄与する可能性があることを示した。
- (2) 海馬歯状回における神経新生を採り入れた海馬モデルを構築し、神経新生が互いに類似した情報の記憶を容易にするとともに、記憶容量の増加、追加学習能力の改善に寄与することを明らかにした。
- (3) カオスニューラルネットワークを導入した海馬 - 大脳皮質モデルを構築し、時間変化のない静的なパターンに対して、破局的忘却を抑制しつつ長期記憶の形成を可能にすることを示した。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者のこれまでの研究を発展させ、エピソード記憶を形成する海馬 - 大脳皮質モデルを構築する。研究期間内には以下のことを明らかにする。

- (1) エピソード記憶を可能とする海馬モデルとその特性

本研究では、エピソードを時間変化を伴う

一連のパターン群と捉え、これまでに構築している海馬モデルを時系列情報も記憶できるように改良する。その際、互いに共通部分を有するような複数の複雑な時系列群を記憶するためには、どのような仕組みが必要となるのかを明らかにする。また、構築したモデルの記憶容量や想起特性を主に計算機実験により明らかにする。

- (2) 入力情報の新規性を判定する仕組み

近年の生理学的な研究により、海馬周辺の領域である海馬傍回において、入力情報の新規性の判定が行われていることを示唆する知見が得られている。海馬傍回は海馬へ入力を与える領域であるため、海馬は新規性の判定結果を利用した効率の良い学習を行っている可能性がある。ここでは、生理学的な知見をヒントに、入力の新規性を判定するにはどのような構造や学習が必要となるのかを主に計算機実験により明らかにする。

- (3) 長期記憶への転写と破局的忘却抑制の仕組み

睡眠中の脳活動の研究によると、REM 睡眠時に脳幹の神経細胞がカオス的に発火し、それが皮質まで伝搬することや、徐波睡眠時に海馬で高頻度の特徴的な活動が見られることが分かっている。これらは長期記憶の固定に関与している可能性がある。ここでは、こうした知見を採り入れ、海馬モデルに蓄えられた時系列情報を自律的に想起し、長期記憶を担う大脳皮質モデルへ破局的忘却を抑制しつつ転写する仕組みを計算機実験により明らかにする。

- (4) 神経心理学的な妥当性と工学的な有用性

本研究で構築したエピソード記憶を形成する海馬 - 大脳皮質モデルの特性について、神経心理学的実験によって得られている人間の記憶特性との整合性について調べ、本モデルの妥当性を検証する。また、記憶容量、重複を含む複雑な時系列群に対する想起能力、耐雑音性などの工学的に重要な特性を主に計算機実験により明らかにする。

3. 研究の方法

本研究課題は以下のように実施した。

- (1) 海馬を中心としたエピソード記憶に関する生理学的並びに神経心理学的知見の調査

詳細な研究が多く行われているげっ歯目を中心に、主に海馬に関するエピソード記憶の生理学的研究成果、並びに、脳に損傷を受け、エピソード記憶に障害の生じた患者に関する神経心理学的知見の調査を行った。さらに、認知科学的視点からのエピソード記憶のモデルについても調査を行った。文献による調査を中心に、国内外の学会にも参加して、情報収集を行った。なお、このような調査、情報収集は終了年度まで継続的に行った。

- (2) 海馬モデルの改良

研究代表者らは、これまでに時間変化のない静的な情報に対する海馬 - 大脳皮質モデ

ルを構築してきたが、ここではまず、海馬の解剖学並びに生理学的知見に基づき、本モデルの改良を行った。

宣言的記憶が最初に蓄えられる海馬は、脳の内側側頭葉に位置し、嗅内皮質(EC)から入力を受け、海馬内の歯状回(DG), CA3, CA1等を経由して、再び EC へと出力を行っている。CA3 には、反回側枝と呼ばれる自己結合があり、この部位が特に記憶に好都合な構造となっている。そのため、研究代表者らは、海馬のモデルとして当初は CA3 のみに着目していた。ここでは、この点に改良を加え、DGを含めた図1のようなモデルの構築を行った。

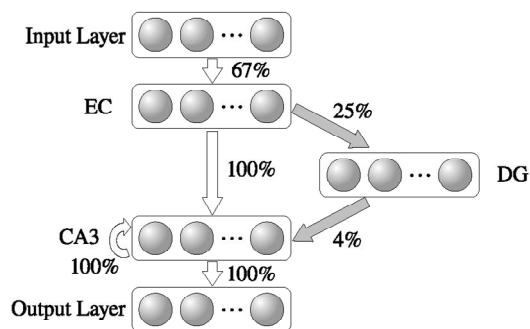


図1：海馬モデル

また、従来、脳の成熟後には新しい細胞は生まれないと考えられてきたが、近年の生理学的な研究により、海馬の DG において、顆粒細胞の神経新生現象が発見されている。すなわち、DG では神経細胞の新生と死滅、つまり神経細胞置換が起こっている。研究代表者らは、この現象を海馬モデルに採り入れることによって、類似した情報の記憶が容易になることや、記憶容量の増加、追加学習能力の改善が得られることを示している。今回構築した海馬 - 大脳皮質モデルでも、DG に神経細胞置換を導入したモデルを用いた。さらに、脳で観測されている神経細胞のカオス的発火をモデル化するため、海馬 CA3 にカオスニューロンを導入した。海馬に記憶された情報を大脳皮質へ転写するためには、海馬から記憶情報を取り出す必要があるが、一般に、ニューラルネットワークに記憶されている情報を抽出することは極めて困難である。しかし、自己結合を有する海馬 CA3 では、ネットワークの持つエネルギーの極小値に相当する状態に、個々の情報を記憶していると考えられるため、カオスニューロンを用いた想起を行うことで、ネットワークの状態がエネルギーの極小値を次々と変遷し、結果的に記憶された情報を網羅的に抽出することが可能になると考えられる。計算機シミュレーションにより、本海馬モデルの特性、並びに、海馬モデルからの記憶の抽出及び大脳皮質モデルへの記憶の転写の性能を調査した。

(3) エピソード記憶を可能とする海馬 - 大脳皮質モデルの構築

(2) で構築したモデルに改良を加え、エピソード記憶の獲得モデルを構築した。エピソード

の記憶を可能とするためには、時間変化のある動的なパターン、すなわち、時系列パターンを扱えるようにする必要がある。また、一般に、時系列パターンでは、1つの時系列内に同じパターンが繰り返し現れたり、複数の時系列間で同じパターンが共有されたりすることがありえる。このような状況では、時系列の文脈を考慮しなければ正しい記憶及び想起を行うことができない。そこで、既存の海馬モデルの入出力層に文脈情報を保持する部分を付加した。また、海馬に蓄えられた記憶を転写し、長期記憶として蓄える大脳皮質モデルにも、時系列情報の記憶を可能とするためのリカレント構造を導入した。計算機シミュレーションにより、本モデルの記憶特性について調査を行った。

(4) 海馬 - 大脳皮質モデルの改良

(3) で構築した海馬モデルでは、エピソードを構成する個々の時系列パターンに対して互いに異なるランダムなビットを付加して、文脈情報とし、一般的な時系列の記憶及び想起を可能としていた。ここでは(2)で得られた知見を元に、海馬モデルに、DG における神経新生、並びに、海馬における学習則であるスパイクタイミング依存性シナプス可塑(STDP)を導入し、より生理学的に妥当なモデルとなるように改良を加えた。また、同様に(2)で得られた知見を元に、海馬 CA3 にカオスニューロンを導入することで、海馬モデルが記憶した時系列を動的に取り出すことを試みた。さらに、抽出した時系列を、擬似パターンとともに大脳皮質モデルに学習させることで、既に大脳皮質モデルに蓄えられている記憶を破壊(破局的忘却)することなく、記憶の転写ができるかを計算機シミュレーションにより調査した。

(5) 大脳皮質モデルの学習法の検討

これまでの大脳皮質モデルは、階層型ネットワークを誤差逆伝搬法によって学習するものであったが、学習法に生理学的な妥当性が乏しかった。そこで、最終中間層と出力層のみで学習を行う誤差非逆伝搬学習を採用し、破局的忘却を抑制する方法について、計算機シミュレーションにより調査を行った。

4. 研究成果

(1) 静的情報に対する海馬 - 大脳皮質モデルの改良

生理学的知見を採り入れた海馬 - 大脳皮質モデルと、従来モデルとの比較を行った。図2は、100次元のパターンから100次元のパターンを相互連想するタスクをそれぞれのモデルに学習させたときの、海馬モデルにおけるパターンの抽出率(Extraction rate)、並びに海馬モデルから大脳皮質モデルへ記憶を転写した後に、どれだけ既存の記憶を破壊せずに保存できたかを表す指標、平均 goodness を表している。抽出率 100%は、海馬に記憶させたパターンのすべてをカオス

想起によって抽出できたことを示す。Goodness の値は 1 に近いほど、既存の記憶が正確に保存されていることを示す。ここでは、学習データセットの総数を 5 とし、各学習セットの中のパターン数を 2~5 まで変化させた。

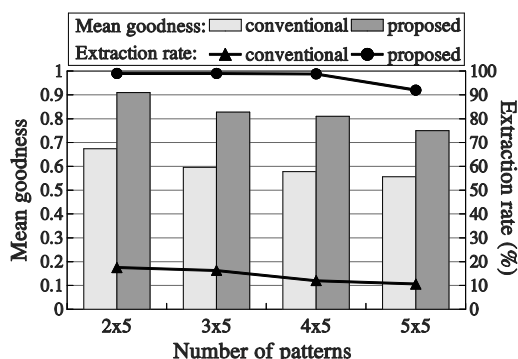


図 2: 海馬モデルの抽出率と大脳皮質モデルの平均 goodness

この図を見ると、改良を加えた海馬モデルでは、記憶パターンの抽出率が著しく改善されていることがわかる。カオス想起の結果を詳細に調べてみたところ、従来モデルでは、反転パターンや偽記憶パターンが多く抽出されていたのに対し、改良を加えた海馬モデルではそれらがほとんどなかった。後者では、海馬の各領域の発火率や結合率を生理学的知見に基づいて設定した。結果として CA3 の記憶パターンの表現が非常にスパースになったため、こうした優れた特性が得られたものと思われる。

図 3 は、1 つの学習データセットにおけるパターン数を 3 にしたときにおける、学習パターンの相関と抽出率, goodness の関係を示している。

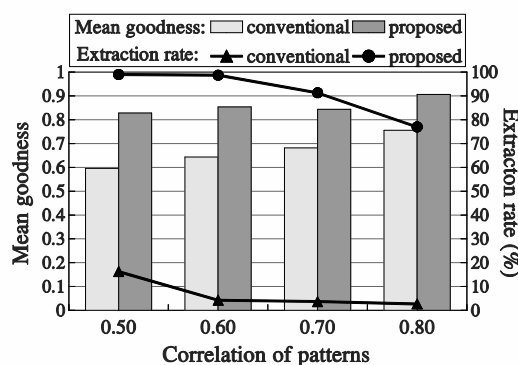


図 3: 学習パターンの相関に対する抽出率と goodness

この図から、生理学的知見を採り入れた海馬 - 大脳皮質モデルは、パターンの相関に依

らず優れたパターン抽出率を示すことがわかる。これは歯状回に導入した神経細胞置換が、類似した入力に対し異なる表現を与えるためである。結果として、大脳皮質モデルにおける破局的忘却の抑制も、従来モデルと比較して優れた結果となった。

(2) エピソード記憶の海馬 - 大脳皮質モデル

文脈情報を付加した海馬モデル

エピソード記憶を扱うために、これまでに構築した海馬モデルの入出力層に文脈部を設けた。この文脈部によって、時系列を構成するパターン毎に異なるランダムパターンが付加される。これにより、一般的な時系列の想起に必要な 1 対多の連想が可能になり、重複や繰り返しのある時系列の記憶ができるようになる。また、長期記憶を担う大脳皮質モデルには共鳴リカレントネットワーク (RSRN: Reverberating simple recurrent network) を採用した。モデルの構造を図 4 に示す。

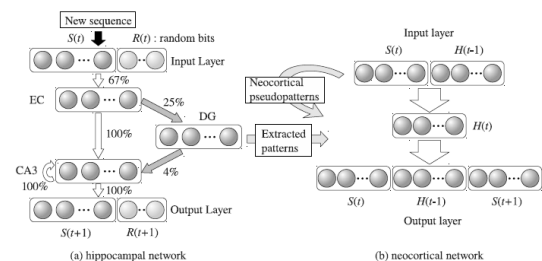


図 4: 文脈部を設けた海馬モデルと RSRN に基づく大脳皮質モデル。

このモデルでは、例えば次に示す SOC(second order conditional sequences) と呼ばれる時系列を記憶及び想起が可能である。

S_1 : A B C A D C D B A C B
D A
 S_2 : E F G E H G H F E G F
H E

SOC を構成する各パターンは、その直前のパターンのみからでは決定できない。すなわち、想起には時系列の文脈の考慮が不可欠である。

図 5 は、長さ 10 の 5 つの時系列を記憶させたときの大脳皮質モデルの goodness を示している。比較対象としては、Ans らが提案した破局的忘却を抑制するための dual-network を用いた (Ans, B. et al., Connection Science, 2004)。

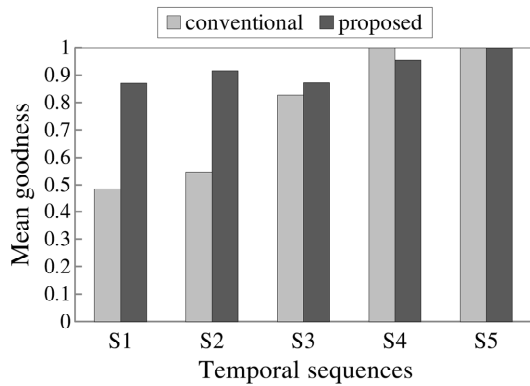


図 5：5 つの時系列に対する goodness

この図から、従来のモデルよりも、破局的忘却の抑制能力が優れていることがわかる。

これは、Ansらのモデルでは、2つのネットワークのそれぞれで擬似パターンを用いるのに対して、提案モデルでは、ランダム入力によって海馬モデルから記憶した時系列の抽出が可能であり、かつ、擬似パターンを大脳皮質モデルだけで用いればよいからである。

神経新生と非対称 STDP を導入した海馬モデル

ここでは、で構築したモデルにさらに改良を加えた。のモデルで設けた文脈部には、生理学的な妥当性はなく、また、どの程度のランダムビットを付加すべきかは試行錯誤によって決定しなくてはならない。そこで、文脈部を破棄し、代わりに、時系列パターンの文脈情報の学習が可能と思われる非対称なスパイクタイミング依存性シナプス可塑性(STDP)を海馬 CA3 の学習に導入した。これは、生体の海馬で発見された学習則である。また、(2)のモデルに導入しその有用性が確認できている、歯状回の神経細胞置換、並びに海馬 CA3 におけるカオスニューロンも導入を行った。

先述のように、一般的な時系列では、1つの時系列内に同じパターンが繰り返し現れたり、複数の時系列間で同じパターンが共有されたりする。そのため、時系列を扱うモデルでは、同じパターンが入力された場合でも、文脈を考慮して異なるパターンを想起する1対多の連想能力が必要となる。本モデルでは、これを歯状回における神経細胞置換と、CA3の反回則枝の学習に用いた非対称な STDP によって可能としている。歯状回の神経細胞置換は、同じ入力を与えられた場合でも、CA3に異なる表現を構成することに寄与する。また、非対称 STDP は、時間的に隣接関係のあるパターンの連想を強化するため、文脈情報の学習が可能である。

図 6 は、1つの時系列内に同じパターンが繰り返し現れ、かつ、複数の時系列間で同じパターンを共有する次の3つのパターンを学習させたときの、海馬モデルのカオスによる時系列の抽出例である。

$S_1: A B C D E D F$
 $S_2: G H C I J I K$
 $S_3: L M C N O N P$

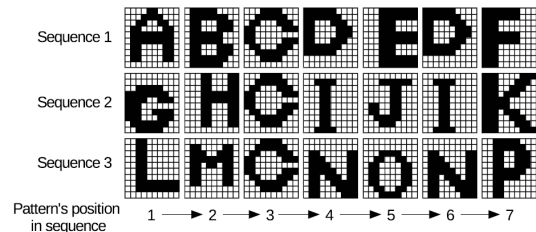


図 6：カオス想起による時系列パターンの抽出

この図から、カオス想起によって海馬に蓄えられた時系列の抽出が適切に行えることがわかる。

表 1 は、抽出された時系列を長期記憶を担う大脳皮質モデル(RSRN)に、擬似パターンとともに転写した際のパターン毎の goodness を示している。

表 1：大脳皮質モデルの破局的忘却の抑制

パターン番号	2	3	4
時系列 1	0.989 ± 0.112	0.992 ± 0.082	0.942 ± 0.140
時系列 2	1.000 ± 0.000	1.000 ± 0.000	0.971 ± 0.144
時系列 3	0.991 ± 0.088	1.000 ± 0.003	0.985 ± 0.136
パターン番号	5	6	7
時系列 1	0.904 ± 0.165	0.951 ± 0.153	0.897 ± 0.185
時系列 2	0.984 ± 0.007	0.977 ± 0.151	0.970 ± 0.151
時系列 3	0.992 ± 0.006	0.986 ± 0.136	0.978 ± 0.121

この表から、長期記憶における破局的忘却を抑制しつつ、海馬からの記憶の転写を行っていることがわかる。

この他に、Levy が提案した生体の海馬が有すると考えられる諸機能 (Levy, W.B., HIPPOCAMPUS, 1996) に基づいて、提案モデルの妥当性について検証を行った。

(3) 大脳皮質モデルの学習法の検討

これまでの大脳皮質モデルは、階層型ネットワークを誤差逆伝搬法(Back-prop)によって学習するものであったが、学習法に生理学的な妥当性が乏しかった。そこで、最終中間層と出力層のみで学習を行う誤差非逆伝搬法(No-prop)を採用し、このモデルに擬似パターンを適用した場合の破局的忘却の抑制の程度について調査を行った。その結果、No-prop を学習に用いたネットワークは、Back-prop を用いたものよりも破局的忘却の程度がやや強いことがわかった。しかし、ネットワークを多層にすることで、破局的忘却を抑制できる可能性があることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

Hattori, M. and Kobayashi, Y., A

Hippocampal Model for Episodic Memory using Neurogenesis and Asymmetric STDP, Proceedings of IEEE and INNS International Joint Conference on Neural Networks, 2016, 査読有 (採録決定)

Hattori, M. and Hosaka, T., Applying Pseudorehearsal to Multilayer Neural Networks Trained by No-Prop Algorithm, Advances in Computational Intelligence, 21-26, 2015, 査読有 <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2015/Rome/FSNN/FSNN-02.pdf>

Hattori, M., A biologically inspired dual-network memory model for reduction of catastrophic forgetting, Neurocomputing, 134, 262-268, 2014, 査読有,

DOI:10.1016/j.neucom.2013.08.044

Hattori, M. and Suzuki, R., Dual-Network Memory Model for Temporal Sequences, International Journal of Computer, Information Science and Engineering, 7, 73-77, 2013, 査読有 <http://waset.org/publications/9996986/dual-network-memory-model-for-temporal-sequences>

Hattori, M. and Suzuki, R., Dual-Network Memory Model for Temporal Sequences, International Conference on Artificial Intelligence and Neural Networks, 84, 1826-1830, 2013, 査読有

[学会発表](計2件)

小林良視, 服部元信, 神経新生と非対称 STDP を用いた海馬エピソード記憶モデル, 第25回日本神経回路学会全国大会, 2015年9月2日, 電気通信大学

齋藤成人, 服部元信, 擬似パターンを用いた知識転写によるニューラルネットワークの構造獲得, 電子情報通信学会総合大会, 2015年3月13日, 立命館大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

服部 元信 (HATTORI, Motonobu)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号: 40293435