

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：38005

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00322

研究課題名（和文）学習・記憶における時空間文脈の書き込みと読出しの情報処理機能の同定

研究課題名（英文）Identification of information processing of spatio-temporal context in learning and memory

研究代表者

塚田 啓道 (Tsukada, Hiromichi)

沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・研究員

研究者番号：40794087

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：生物の脳の記憶システムの優れた機能に基づいたHebb則（HEB）と時空間学習則（STLR）を基に単層ニューラルネットワークを構築し、生物の脳が持つ時空間文脈に対する柔軟な記憶情報処理原理を究明した。HEBはニューロンの発火に依存し、類似な入力系列パターンを同一出力パターンに引き込むパターン補完の能力がある。一方、STLRはニューロンの発火無しでも外界の情報構造に合わせた学習が可能であり、時空間文脈パターンの分離機能に優れている。これらの2つの学習則をフィードフォワード結合にSTLR、リカレント結合にHEBを用いて融合することで、ワンショットかつ教師なしの時空間文脈記憶の構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した時空間文脈を記憶する単層ニューラルネットワークは神経回路網の空間分割とダイナミクスに基づく新しい記憶情報処理原理を用いているため、現在のディープラーニングと異なりワンショットかつ教師なし学習で実現可能である。したがって、エネルギー消費や記憶の病因究明・治療の観点からも極めて有用であり、現在のAIの発展の中で有効に使うことができる。さらに、本研究で見出した生物の脳が持つ時空間文脈に対する柔軟な記憶情報処理原理は、現在のAI研究に新しいブレークスルーをもたらすばかりでなく、人間と共存できるAIの発展につながるものである。

研究成果の概要（英文）：We constructed a single layer neural network to investigate the principle of flexible memory information processing for spatio-temporal contexts in the biological brain using the Hebb rule (HEB) and the spatio-temporal learning rule (STLR), which are based on the superior functions of the biological brain's memory system. HEB relies on the firing of neurons and is characterized by pattern completion, which is the ability to complete similar input sequences into the same output pattern. On the other hand, STLR can learn to adapt to the information structure of the outside world even without firing neurons, and has excellent pattern discrimination ability for spatio-temporal contextual information. We have successfully constructed a spatio-temporal context memory with one-shot and unsupervised learning by integrating these two learning rules with STLR for feed-forward connections and HEB for recurrent connections.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：文脈学習 時空間学習則 記憶の階層構造 フラクタル 神経回路 時空間文脈情報処理 神経振動 時空間アトラクター

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 1. 研究開始当初の背景

動物と人間の脳の情報処理機能を比較したとき、動物は現在の状況や実際に見える世界に重点を置いて行動するのに対し、人間は現在の状況のみに依存するのではなく、過去の経験を生かし未知の新しい情報を獲得する情報統合機能に優れている。すなわち、過去に経験した時間や場所の記憶をまるでタイムトラベルをするかのように検索し (Tulving, 2002; Naya & Suzuki, 2011)、外界からの感覚入力と比較統合する機能をもっている。この機能は、人間の時空間文脈情報の“書き込み”と“読み出し”の記憶回路網の情報処理操作に基づいている。

時空間文脈情報の学習を実現するためには、文脈情報の違いを識別し、その識別した文脈情報を記憶として安定化させる記憶空間の状態制御が重要である。すなわち、安定状態にある記憶空間をその記憶情報を保持しながら不安定化し、新しい入力を既存の情報との類似関係によって学習する必要がある。

これまで海馬神経回路において、主に2つの学習則が提案されている。Bi & Poo (1998)らによる細胞発火の逆伝播によるスパイク・タイミング依存性のシナプス加重変化の学習則 (STDP) と入力同士のタイミングとその時間履歴に依存した時空間学習則 (STLR) である (Tsukada M et al., 1996, 2007)。STDP と STLR の違いは、前者は類似したパターンを一つのパターンに収斂させるアトラクター構造を作るのに適しているのに対し、後者は時空間パターンの分離能力が高いことである (Tsukada M & Pan X, 2005)。これらの2つの学習則は海馬の錐体細部では同一細胞に共存することが明らかになっており (Tsukada M et al., 2007)、両学習則を用いることによって、時空間文脈情報を識別し安定化する“時空間アトラクター”を神経回路網に形成することが可能になると考えられる。

本研究では時空間文脈パターンの書き込みと読み出しの機能を実際脳に存在する神経回路構造により実現し、生理実験データとの比較検証を行うことでその信頼性を確認する。

## 2. 研究の目的

脳の情報処理の特徴は、現在の状況のみに依存するのではなく、過去の経験を生かし未知の新しい情報を獲得する情報統合機能にある。すなわち、記憶の書き込みと読み出しにおいて、時空間文脈情報を操作する機能である。本研究はダイナミックな学習と記憶の情報表現に着目し、時空間文脈情報を時空間学習則 (STLR) と Hebb 則 (HEB) の両学習則によって人工神経回路網に埋め込むことで、時空間文脈情報の記憶・学習の神経メカニズムを明らかにするものである。将来的には、脳の記憶学習機能の情報表現解明、さらには人間と共生可能な人工知能・ロボットの研究に新しいブレークスルーをもたらすことを目指している。

## 3. 研究の方法

時空間文脈の学習・記憶モデルを人工神経回路網によって構築する。主にフィードフォワード結合に時空間学習則、リカレント結合にヘブ則を用いた1層のニューラルネットワークを構築し、文脈情報を持った時空間系列パターンを入力して学習したときの記憶構造について検討する。それぞれの学習則の学習率バランスを変化させることにより、文脈依存性記憶の獲得可能なパラメータ領域を評価する。さらに、書き込まれた時空間情報の力学構造を明らかにするために、アトラクター構造の空間分割とダイナミクスの関係を時系列解析によって評価する。また、学習により獲得した記憶の重み分布の解析を行うことで、学習の背後にある時空間文脈情報処理のメカニズムを明らかにする。

## 4. 研究成果

HEB は、ニューロンが発火したときにその時の外部の情報に合わせて自己を改変するが発火しなければ何も起こらない。特徴として類似な入力系列パターンを同一出力パターンに引き込む性質 (パターン補完、**pattern completion**) を持つことが知られている。一方、時空間学習則 (STLR) は、ニューロンの発火無しでも外界の情報構造に合わせた学習が可能であり、パターン分離機能に優れ、より柔軟な記憶構造が構築されるとの議論がある。

本研究ではこれらの2つの学習則を融合することで生物の脳の記憶システムの優れた機能に基づいた単層ニューラルネットワークシステムを確立し、時空間文脈情報の学習・記憶システムの構築に成功した。以下に具体的な研究成果を示す。

### ① 時空間文脈情報の学習・記憶モデル

フィードフォワード結合に時空間学習則、リカレント結合にヘブ則を用いた1層のニューラルネットワークを構築し、文脈情報を持った時空間系列パターンを入力した場合の書き込みについて評価した。まず STLR と HEB の学習能力の違いを評価するために、それぞれの学習則を独立に可動させてシミュレーションを行った。その結果、STLR は時空間文脈情報のパターン分離能力が高く、HEB は逆にパターン統合能力が高く出力パターンを安定化できることが分かった。次にこれらの相反する2つの学習則を同時に稼働させ、2つの学習則の学習率バランスを変化させた。結果として時空間文脈情報の入力系列に対してパターン分離能力を保持したままパターン統合及び出力の安定化ができるパラメータ領域が存在することが明らかになった。

この文脈依存性記憶の力学的構造を明らかにするために、時空間文脈学習による記憶構造のパラメータ領域同定および記憶の階層構造の解析を行った。時空間学習則 (STLR) と Hebb 学習

則 (HEB)の学習率のバランスを変化させて解析を行ったところ、時空間文脈入力に対するパターンの分離と統合のバランスが調整されることで主に2つのパラメータ領域で安定な文脈依存性記憶が構成できることが明らかになった。主成分分析による解析の結果、この2つの領域は「時空間文脈情報を極めて高い精度で分離する領域」と「自己相似的な記憶構造(フラクタル的構造)が構成される領域」に分かれていることが明らかになった(図1)。

また、興味深いことに時空間文脈記憶が構築可能な二つの学習則の結合強度バランス(フィードフォワードとフィードバックの割合)は、脳の解剖学データ(Seeman et al., 2018)と一致することが明らかになった。

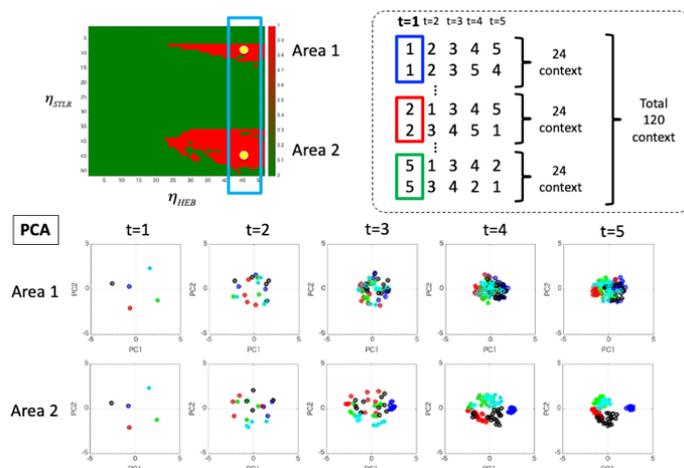


図1: 学習バランスと記憶の階層構造

## ② Hebb 則と時空間学習則に構築される重みベクトルの分布評価

HEB と STLR のパターン分離機能の違いがどのような自己組織化の原理に基づくものかを明らかにした。HEB では入力ベクトルと重みベクトルの内積が閾値を超える細胞群が発火し、この発火した細胞群の重みは増々強化される。このため学習するたびに入力ベクトルに最も似た重みを持つ細胞群が選ばれ強化されるため、互いに近い領域に含まれる入力ベクトルは同一の出力を出す。すなわち、パターン補完の特徴を持つ。一方、STLR は入力ベクトルの中の成分要素間の関係(一致性、同期性)を学習する。入力と重みベクトルの内積の大きさによって学習の効果が変化するような学習則になっており、学習後は入力ベクトルを中心とした単峰性の分布に変化する。現在の入力ベクトルと次の時間の入力ベクトルが同一の場合と異なる場合で学習後の重みベクトルの分布が異なることが明らかになった。前者の場合は、入力ベクトルと同軸方向に分布が急峻になるが、後者の場合は新しい軸上に新たに単峰性の分布を作るため結果として多峰性分布を生成する。これらの結果から、Hebb 学習の場合は重みベクトルの分布が重なった単峰性の分布になるためパターン分離ができないが、STLR はその分布の重なりを減らすように入力ベクトルの周りに鋭い多峰性分布を作っているため、時空間文脈入力の分離能力が高くなることが明らかとなった。このように Hebb 則と時空間学習則に構築される重みベクトルの分布の違いを明確にすることで、時空間文脈入力に対するパターン分離能力の本質的なメカニズムを明らかにした。

その他、力学系理論の専門家や海馬・大脳皮質の実験家を集めて「脳の記憶の時空間構造に関する研究会」を開催し、時空間文脈の学習・記憶のメカニズムについて議論した。本研究会では人間が持つ優れた機能である“ダイナミックな記憶情報表現”は神経回路網の空間分割とダイナミクスを用いた情報圧縮にあるとの結論が導き出され、理論と実験の融合による新たな共同研究と方向性を創出することができた。

また、本研究はデープラーニングと異なりワンショットかつ教師なし学習によって時空間文脈情報処理を実現しているため、エネルギー消費や実際の脳の構造と機能に基づく記憶の病因究明・治療、さらには人間と共存できる次世代 AI の発展につながるものと考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiromichi Tsukada, Minoru Tsukada	4. 巻 -
2. 論文標題 Context-Dependent Learning and Memory based on Spatio-Temporal Learning Rule	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Cognitive Neurodynamics (VII)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Minoru Tsukada, Hiromichi Tsukada	4. 巻 -
2. 論文標題 Fractal Structure in Hokusai's "Great Wave" and the Memory Neural Network - Brain, Art and AI -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Cognitive Neurodynamics (VII)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shigetoshi Nara, Hiroshi Fujii, Hiromichi Tsukada, Ichiro Tsuda	4. 巻 -
2. 論文標題 A Three-Modules Scenario in An Interpretation of Visual Hallucination in Dementia With Lewy Bodies and Preliminary Results of Computer Experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IJCNN.2019.8851916	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hiromichi Tsukada, Minoru Tsukada, Yoshikazu Isomura	4. 巻 -
2. 論文標題 A Structure and Function of Hippocampal Memory Networks in Consolidating Spatiotemporal Contexts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Cognitive Neurodynamics (VI)	6. 最初と最後の頁 103 ~ 108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-981-10-8854-4_13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 塚田 稔	4. 巻 25
2. 論文標題 美しい脳の神経回路網（脳と人工知能と芸術を議論する） 北斎の「大波」と脳の記憶神経回路網のフラクタル構造	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Brain & Neural Networks	6. 最初と最後の頁 47～50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.3902/jnns.25.47">https://doi.org/10.3902/jnns.25.47</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 塚田 稔, 酒井邦嘉, 河村満	4. 巻 70
2. 論文標題 創造性と脳	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 BRAIN and NERVE: 神経研究の進歩	6. 最初と最後の頁 577～585
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 塚田 稔
2. 発表標題 「芸術脳の科学」～北斎の「大波」と脳の記憶構造を中心に～
3. 学会等名 科学技術者フォーラム 2019 年 7 月度セミナー（第 205 回）（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚田 稔
2. 発表標題 脳とAIと絵画 北斎の「大波」と脳の記憶構造
3. 学会等名 第47回画像電子学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Tsukada, Hiromichi Tsukada
2. 発表標題 Fractal Structure in Hokusai's "Great Wave" and the Memory Neural Network -Brain, Art and AI-
3. 学会等名 The 7th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Tsukada, Minoru Tsukada
2. 発表標題 A Context-Dependent Attractor in the Simple Artificial Memory Network by unsupervised learning
3. 学会等名 The 7th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Tsukada, Minoru Tsukada
2. 発表標題 A Context-Dependent Attractor in the Simple Artificial Memory Network by Unsupervised Learning
3. 学会等名 HangZhou forum on Cognitive Neuroscience and Intelligent Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚田啓道
2. 発表標題 MRIデータ駆動型マーマセット全脳モデルと局所神経回路記憶モデル
3. 学会等名 生理研研究会「力学系の視点からの脳・神経回路の理解」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Tsukada, Lopez Ane, Junichi Hata, Hiroaki Hamada, Ken Nakae, Gutierrez Carlos, Skibbe Henrik, Woodward Alexander, Shin Ishii, Hideyuki Okano, Deco Gustavo, Kenji Doya
2. 発表標題 マモセットの構造的・機能的 MRI データを用いた全脳モデリングおよび動的解析
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigetoshi Nara, Hiroshi Fujii, Hiromichi Tsukada, Ichiro Tsuda
2. 発表標題 A three-module scenario in an interpretation of visual hallucination in dementia with Lewy bodies and pre-liminary results of computer experiments
3. 学会等名 International Joint Conference on Neural Networks 2019 (IJCNN2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Tsukada, Hiromichi Tsukada
2. 発表標題 Hokusai 's Grate Wave and Fractal Structure in the Memory Neural Network
3. 学会等名 The Fourth National Conference on Neurodynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Minoru Tsukada, Hiromichi Tsukada
2. 発表標題 A context dependent attractor in simple artificial neural network by unsupervised learning
3. 学会等名 Cognitive Neuroscience and Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Tsukada, Minoru Tsukada, Yoshikazu Isomura
2. 発表標題 A structure and function of hippocampal memory networks in consolidating spatiotemporal contexts
3. 学会等名 6th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 塚田稔
2. 発表標題 コミュニケーションと情報創生の脳内メカニズム
3. 学会等名 脳領域/個体/集団間のインタラクション創発原理の解明と適用キックオフシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 塚田稔	4. 発行年 2020年
2. 出版社 玉川大学出版、OROCO PLANNING(株)	5. 総ページ数 -
3. 書名 創造する脳とAI 塚田の時空間学習則	

1. 著者名 塚田稔	4. 発行年 2020年
2. 出版社 人工知能美学芸術研究会	5. 総ページ数 176
3. 書名 人工知能美学芸術展 記録集	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	塚田 稔  (Tsukada Minoru)  (80074392)	玉川大学・脳科学研究所・客員教授    (32639)	
研究 協力者	銅谷 賢治  (Doya Kenji)		