

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20359

研究課題名（和文）場の理論にもとづく動的均衡にあるレザボワ計算神経回路の設計

研究課題名（英文）Reservoir-computing based on the field theory of dynamically balanced neuronal networks

研究代表者

早川 隆（HAYAKAWA, Takashi）

日本大学・医学部・助教

研究者番号：30756789

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：研究代表者は世界に先駆けて動的な均衡にあるリカレント神経回路の統計力学理論を構築しており、これを用いてレザボワ計算とよばれる学習問題で性能を向上させることを目的とした。まずこの神経回路に入力を加えた際にどのような情報がどのような確率で読み出されるかを記述する、神経回路の応答理論を構築することに成功した。この理論を用いて神経回路が入力された情報をどのように保持するかは結合の詳細に依存して変わることを示し、さらに数値計算により学習に好ましい状態に神経回路を事前学習することで学習性能が向上することを示した。また理論から汎化誤差を抑える学習方法を導出し、汎化性能の向上を数値計算により示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工神経回路を用いたAIは一部の情報処理では動物脳を超えた性能を示すが、過去の情報を記憶して未来に活かす潜在能力を秘めたりカレント神経回路については未だ技術的なブレイクスルーや理論的な解明が待たれている段階である。研究代表者は神経回路の学習に関して近年一定の成功をおさめている統計力学的アプローチを用い、これまで調べられていなかった動物脳にみられる動的均衡という性質を持つリカレント神経回路の理論を世界に先駆けて樹立し、本研究課題を通してその学習における有用性を明らかにした。この研究結果により、リカレント神経回路による過去の記憶の読み出し性能を飛躍的に向上する手がかりが得られた可能性がある。

研究成果の概要（英文）：We previously constructed a novel statistical mechanical theory for critically balanced neural networks. In this research project, we aimed at improving performance in a machine learning problem called reservoir computing based on this theory. First, we succeeded in developing a response theory that describes the information the neural networks probabilistically read out in response to external inputs. Using this theory, we showed that the way neural networks retain information about the input largely depends on the details of their connectivity. Then, we numerically showed that the performance in reservoir computing can be improved by pretraining balanced neural networks so that the information-retaining properties of the networks become favourable to learning. Furthermore, we numerically demonstrated that generalisation performance of the networks is improved by using an algorithm derived from a learning theory for balanced neural networks.

研究分野：生物物理学

キーワード：ニューラルネットワーク レザボワ計算 機械学習 脳神経回路 統計力学 力学系

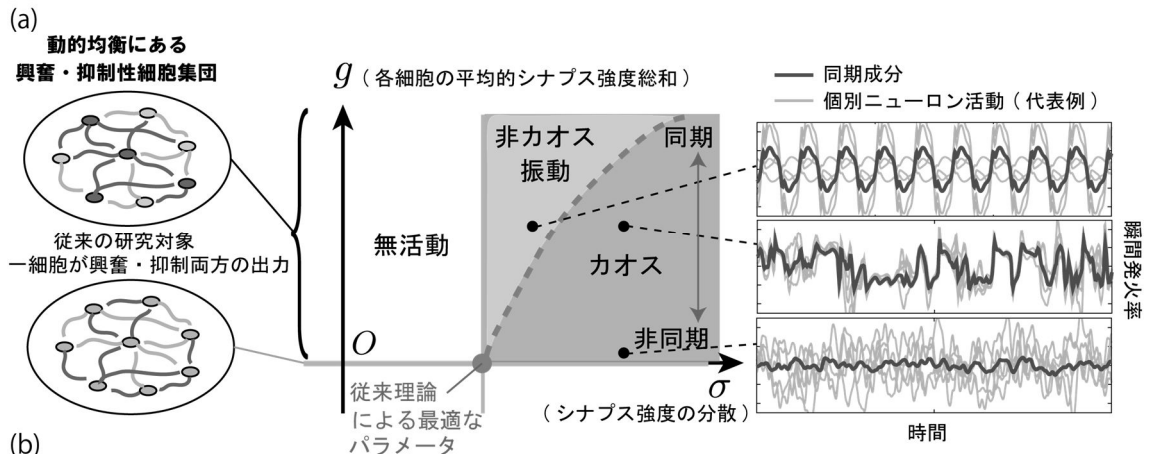
1. 研究開始当初の背景

人工的な神経回路を用いた情報処理技術が社会に大きな影響を与えており、特に入力層から出力層への処理の流れが明確に決まっているフィードフォワード回路は画像認識や言語処理などで高い性能を発揮しており、そのふるまいの理論的な解明も徐々に進んできていた。一方で、自身の出力が次の時刻での入力になるリカレント神経回路を用いると過去の情報を内部に記憶することができると考えられ、実応用で一定の成功例が知られていたが、依然として扱う際の技術的難易度が高いことが指摘されており、どのような条件であれば学習がうまくいくのか、理論的な解明が求められていた。

そのような中、ランダム結合を持つリカレント神経回路については統計力学理論を用いてそのふるまいを記述する方法が古くから知られていた。これらのランダム結合神経回路を実問題における学習に用いた場合もそこそこの性能を示すことが注目され、リカレント神経回路のふるまいを理解するためのモデルケースとしてさかんに研究されていた[1-3]。このようなランダム結合神経回路を実問題に用いる方法は「レザボワ計算」と呼ばれる。一方、統計力学理論が適用可能な神経回路と一般のリカレント神経回路には依然として隔たりがあり、その中間的なケースについても理論を構築したいという要請があった。

研究代表者は、本研究課題の開始当初、神経回路の結合が完全にランダムではなく構造を持っている場合についての新しいタイプの理論を世界に先駆けて構築したところであった。特に、哺乳類脳にみられるような正の結合を作るニューロン集団と負の結合を作るニューロン集団が分離しているようなケースで、回路全体の正の入力と負の入力が動的に均衡を保つような特定の条件を満たすと、個々のニューロンの活動と回路全体の集団活動が相互作用しながら、パターンを形成することが示された[図 1(a)]。とりわけコヒーレント状態・カオスの振動・非自明な静止状態など完全にランダム結合の神経回路では見られないような多様な挙動を示すようになり、その様子が拡張された統計力学理論を用いて記述できることを示していた[図 1(b)]。そこで、この研究代表者自身の理論を用いてレザボワ計算の枠組みを拡張することを着想した。

図 1



2. 研究の目的

「研究の背景」で述べたように、研究代表者は神経回路の動的均衡という性質を利用することでリカレント神経回路のフィッティング能力・汎化能力・学習安定性をいかに向上させられるか、自身が世界に先駆けて構築した新しい理論とレザボワ計算の枠組みを通して明らかにすることを目的とした。

(1) 新しいダイナミクス相の学習への利用

古典的な理論に基づくレザボワ計算ではランダム結合神経回路のカオス・非カオス相の境界で高い性能を発揮する[図 1(a)]。というのも、カオス相ではニューロン達が多様な活動パターンをとるためその重ね合わせで様々な出力パターンを表現できる一方、ニューロン達の活動が予測不能となるため学習が難しくなり、非カオス相ではニューロン達の活動が予想可能であるも

の、外部からの入力がないと静止状態に収束してしまうためである。そしてこの境界状態には初期条件への強い依存性などの必ずしも学習にとって望ましくない性質もあった。動的均衡にある神経回路のレザボワ計算では、カオス性を抑えつつ多様な活動パターンも存在するような古典的には存在しなかった相を学習に利用可能である[図 1(a)]。このことを利用して学習を向上させようとした。

(2) 動的均衡の統計力学理論の学習理論への拡張

古典的な理論をもとにしたレザボワ計算の学習理論は幾つかの先駆的な研究が知られていた[4]。これらを参考に動的均衡のある場合の学習の理論を得ることも本研究の目的であった。研究代表者の理論を拡張することで、外部の入力に対して神経回路がどのように応答し、そこからどのようなパターンが取り出せるかが解析できると予想された。また、研究代表者の理論ではニューロン達の活動をガウス過程を非線形変換したものとして表すことができ、既存のガウス過程に関する学習理論[5]と関係付けられると予想された。

3. 研究の方法

(1) 動的均衡にある神経回路を用いたレザボワ計算の数値シミュレーション

レザボワ計算の性能を評価する目的で先行研究において用いられた時系列学習の課題や強化学習課題を数値計算プログラムとして実装した。これらの課題をベンチマークとして用いて、学習性能がなるべく高まるような回路デザインや学習アルゴリズムを模索した。単純に二乗誤差や報酬量を最大化するだけでなく、リカレント神経回路の記憶効果を高めるための前処理も設計した。これらのシミュレーションと理論から予想される振る舞いを総合的に理解するために、シミュレーションにおいてリアプノフ指数などの記憶効果に関係する量を計算し、理論的に予想される値と合うかどうか確かめた。

(2) 学習のふるまいを記述する統計力学理論の構築

研究代表者の事前の研究で、動的均衡にある神経回路の集団活動と個別活動を記述する統計力学理論が完成していた。この理論を神経回路が学習する場合に適用するためには、外部からの入力に加わった場合に神経回路がどのように応答するのかについて理論を拡張する必要があり、研究代表者の統計力学理論の摂動論を構築することによりこれを行った。また、学習によって神経回路のパラメータが変化する場合についてもこの方法で取り扱った。そして、ガウス過程の学習理論を応用し、動的均衡にある神経回路の学習理論の構築を試みた。

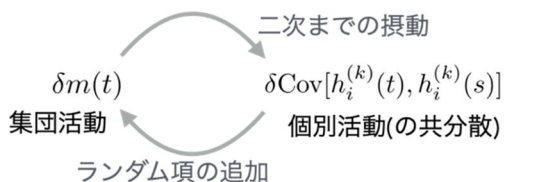
4. 研究成果

(1) 動的均衡にある神経回路の統計力学的摂動論の構築

研究代表者自身がそれまでに完成していた新しい統計力学理論の摂動論を構築することに成功した[図 2]。動的均衡のある場合の統計力学理論では、ニューロン数無限大の極限においても集団活動が個別活動からのランダム駆動力を受け、それによって変化した集団活動が個別活動にも影響を与えるという、ミクロ・マクロの強い相互作用が見られる。この場合は通常の摂動論の手法が適用できないが、研究代表者は新しい摂動論の技術の開発に成功し、この場合ミクロな個別活動の共分散作用素の平方根と無限個のガウス変数を含んだ自己無撞着方程式を解くことで、集団活動の時間変化と個別活動の統計量が決定されることを明らかにした[図 2 左]。これによって、動的均衡にある神経回路が、同じパラメータ値に対しても結合の強さの実現値によって

図 2

・ 確率変数を含んだ摂動論の構築とその応用

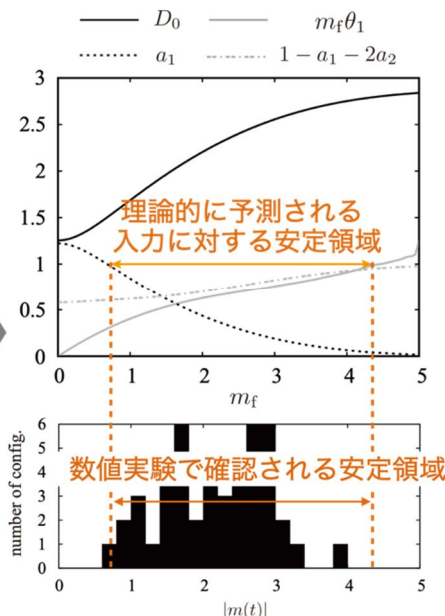


自己無撞着方程式の導出

$$\delta m(t) = (1 + \partial_t)^{-1} p_0(t) + m_f d_1 [\delta m](t) + \frac{g_0}{\sigma_0} \left\{ \sum_{j, 1 \leq \ell < \infty} \xi_{j\ell} d_{2,j\ell} [\delta m](t) + \sum_{j, 1 \leq \ell < \infty} \xi'_{j\ell} d_{3,j\ell} [p](t) \right\} + O(|p|^2)$$

$\xi_{j\ell}, \xi'_{j\ell}$: ガウス確率変数

T.Hayakawa & T.Fukai, Phys.Rev.Res.(2020)



規則・不規則的な振動を示したり、安定な静止状態を示したりする確率が見積もれるようになり、このことを論文で発表した[図 2 右, T.Hayakawa & T.Fukai, Phys.Rev.Res., 2020]。さらに、この理

論は学習を行う場合にも用いることができ、上記で述べたガウス変数が学習によって変化する状況を考え、集団活動とマイクロ活動からどのようなパターンがどの程度の確率で読み出されるかを解析できた。実際には、学習によってこれらの確率変数が変化する場合、陽に解くことは困難であったが、摂動論に基づく理論解析や数値解析を通して学習結果を理論的に予測した。

(2) 動的均衡にある神経回路のレザボワ計算の設計

従来のランダム結合神経回路に内在する問題点である初期値依存性や時間的な記憶減衰の問題に取り組んだ。マイクロな個別ニューロン活動のレベルではカオス的であるにも関わらずマクロな集団活動のレベルでは非カオスとみなせる場合があるという観察を得て、このマクロな安定性を利用することで従来の神経回路に比べて初期値依存性を減らせることが数値計算によって確認された。具体的には、この安定性は結合のランダム部分の配置に依存して変化するため、数値的に見積もった集団活動の有限時間リアプノフ指数の低いものを取り出して、入力に対して望みの時系列を発生するよう学習させたところ、初期値のファインチューニングなしでも性能が平均的に高かった。この数値シミュレーションは非常に計算量を要するため、GPU アクセラレーターを用いた計算プログラムを開発して計算の高速化に成功することで可能となった。また、入力が時間的にスパースにしか与えられず、離れた時間の間に関連を学習する課題にも取り組んだ。この場合、動的な均衡にある神経回路は、前述の集団活動の有限時間リアプノフ指数がほぼゼロになるように回路結合をあらかじめ事前学習すると性能が向上することを見出した。一方、個々のニューロン活動も集団活動に影響されカオス的な状態から非カオス的な状態に容易に遷移し、学習に寄与することも観察された。このように、動的均衡により様々なタイプの集団活動と個別活動が生成されることが、学習に貢献することが確かめられた。

(3) 学習理論の構築

古典的なランダム神経回路はガウス過程として表され、動的均衡にある神経回路のダイナミクスはガウス過程が非線形変換されたものとみなせる。ガウス過程の学習理論ではガウス過程のカーネル関数の積分作用素としての固有値と正則化パラメータを用いて、漸近的な汎化誤差が抑えられる。この事実に基づいて、動的均衡にある神経回路学習の汎化誤差をうまく抑えるために、正則化項を含んだ確率的勾配法を設計した。これによって、ノイズ下での学習で有限回の試行から統計的に学習をしなければならない場合に、学習の性能が向上することが数値計算によって確かめられた。

引用文献

- [1] W.Maass *et al.*, *Neural Computation*, 2002
- [2] H.Jaeger & H.Haas, *Science*, 2004
- [3] M.Lukosevicius *et al.*, *KI-Künstliche Intelligenz*, 2012
- [4] L.Gonon *et al.*, *Journal of Machine Learning Research*, 2020
- [5] L.L.Gratiet & J.Garnier, *Machine Learning*, 2015

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Takashi Hayakawa, Tomoki Fukai	4. 巻 2
2. 論文標題 Spontaneous and stimulus-induced coherent states of critically balanced neuronal networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013253-1, 39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.013253	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 早川 隆
2. 発表標題 動的均衡にあるランダム結合神経回路の場の理論的解析
3. 学会等名 RIMS 共同研究 力学系 -新たな理論と応用に向けて-
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------