

令和元年6月14日現在

機関番号：14201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16123

研究課題名(和文)出現確率の高い回路による単純で人間的な内的表現

研究課題名(英文)Neural representation by the simplest and most probable circuit

研究代表者

田中 琢真(Tanaka, Takuma)

滋賀大学・データサイエンス学部・准教授

研究者番号：40526224

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文):皮質運動の神経細胞集団の活動を回路の単純性の観点から説明するモデルを構築した。皮質に課題を実行するための回路が構成されると仮定する。このとき、課題を実行できるあらゆる回路の中でランダムに一つの回路を選ぶと、アルゴリズム情報理論的な議論が可能で、もっとも単純な回路が出現する可能性が高い。そこで、ある課題を実行できる回路の中でもっとも単純な回路を、リカレントニューラルネットワークのカーネル法による表現を用いて、神経細胞が無限個存在する条件で結合強度ではなく発火活動の相関についての最適化問題を解くことで求めた。すると、実際の皮質神経回路で観察されるような持続発火活動や漸増活動が出現することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、大脳皮質の神経回路にどのような発火活動が出現するかは、学習がどのように生ずるかによって説明されたり、ダイナミクスの観点から説明されたりしてきた。本研究の新規な点は、アルゴリズム情報理論の考え方を援用して、課題を実行するあらゆる回路の中でもっとも単純な回路が出現するという仮説から、出現する発火活動を説明することである。神経細胞が非常に多数ある状況でもっとも単純な回路を探索し、実際に大脳皮質で出現するような持続的な神経細胞の活動や、徐々に発火率が増加したり減少したりする活動が見られることがわかった。本研究は大脳皮質神経細胞の活動の新しい理解方法を与えるものである。

研究成果の概要(英文): I developed a model to explain neural activity from the viewpoint of the simplicity of neural circuits. Assuming that a circuit capable of performing a task is formed in the cerebral cortex, the algorithmic information theory enables us to regard the circuit as the simplest circuit capable of performing the task. Here the simplicity of a circuit or probability of a circuit in a population of randomly generated circuits was measured by the L2-norm of the connection weight matrix of the neurons. I obtained the simplest circuits capable of performing several tasks to formulate the problem as an optimization problem of the correlation matrix of firing activity by using the kernel representation of recurrent neural networks with infinite neurons. I found that the simplest circuit exhibited sustained and ramping activities, which are observed in motor areas of the cerebral cortex.

研究分野：理論神経科学

キーワード：大脳皮質 情報理論 ダイナミクス

## 1. 研究開始当初の背景

大脳皮質の運動関連領野、特に前頭前皮質の細胞の発火活動には目立った特徴がある。それは、何らかの運動あるいは課題を実行する前に持続的に発火する細胞や、課題の実行中に持続的に発火する細胞があることである。このような細胞のうちあるものは、課題の中のある特定の行動を実行する数百ミリ秒前から発火率を徐々に高め、課題を実行し始めると発火率を急激に下げる。逆に課題の実行前に発火率が徐々に下がるものもある。重要なのは、この行動を実行し始める前の数百ミリ秒の間、特に（視覚あるいは聴覚などの）刺激には変化がなかったとしても、徐々に発火率が上昇もしくは下降するような変化が生ずることである。このような、刺激の直接の影響によらずに大きな発火率の変動を生ずる挙動は運動関連皮質の細胞ではよく見られる。一方で、同じ大脳皮質でも感覚野ではこのような発火活動の変動はあまり見られない。感覚野では発火活動は外界からの刺激に応じて生じ、刺激が変化しない場合には発火活動は大きく変動しない傾向がある。この点で、運動関連領野の細胞の活動は感覚野の細胞とは区別される。このような運動関連領野の発火活動のダイナミクスは細胞集団の相互作用によって生ずると考えられている。

また、このダイナミクスで注目すべき点は、「行動の発生前に発火率が上昇する・下降する」などのように比較的単純な描写が可能なところである。これが注目すべきことなのは、同様の課題を実行するロボットのCPUの動作と比較してみればわかる。実際、ロボットのCPUの内部状態についてはこのような単純な描写ができない可能性が高い（課題の実行前にはCPU内の一部の記憶素子の状態がもっと複雑な変化を示すことが予想される）。つまり、単純性は神経回路ダイナミクスの特徴だと言える。また、類似した持続発火活動を示す細胞が多数あること（冗長性）もロボットのCPUとは異なる特徴である。

このような刺激の変化によらない持続的な発火活動やその変化、およびそれが単純で冗長であることがどのようなメカニズムや神経回路によって生ずるかについては様々な研究がされてきた。過去の研究の一つの方向として、神経回路のダイナミクスの安定性に注目するものがある。神経回路のダイナミクスは試行ごとに大きく変動するが、出力は比較的安定していることが知られている。これは、神経回路のダイナミクスの再現性がある程度高くなっていることを示唆する。ダイナミクスの再現性を高くするメカニズムを導入したり、ダイナミクスが安定化するような制約条件を神経回路モデルに導入したりする研究が行われてきた。このような神経回路モデルをシミュレートすると、持続的で比較的ゆっくりしたダイナミクスが生じ、運動関連領野の細胞の活動が再現できる場合があることが知られている。

## 2. 研究の目的

これまでの研究では、大脳皮質の神経回路の発火活動は主としてダイナミクスの観点から説明されてきた。本研究では、ダイナミクス（および結合荷重行列から生ずる力学系の特性）に特別な仮定を置かず、持続発火活動や徐々に発火率が変化するような緩やかな活動および高い冗長性が生ずる理由を説明することを目的とする。そのために、アルゴリズム情報理論の考え方を援用し、課題を実行するあらゆる回路の中でもっとも単純な回路が出現するという仮説から、出現する発火活動を説明することを試みる。このアプローチの利点は、神経細胞の活動について特別な仮定を置くことなしに、神経細胞のような単純な素子の組み合わせで情報を処理する場合にどのような内的表現が発生するはずかを一般的に議論できることである。この考え方は（神経細胞の回路特有の性質を前提にしていないので）、近年、応用が急速に広がっているニューラルネットワークの構築についても示唆を与えうる（あるいはこれまで知られているのとは全く異なる計算・情報処理方式についても、単純な素子が非常に多数組み合わせられて情報を処理しているのなら同様の議論が成立しうる）、学習則について仮定を置かないのもこの考え方の利点である。

## 3. 研究の方法

神経回路は何らかの学習則に基づいて課題を実行できる回路を獲得する。ここでは、どのような学習則が使われているのかはわからないとする（すなわち、神経回路の学習則についてはまだわかっていないことが多いので、特別な仮定を置かない）。学習則がわからなくとも、出現しやすい回路がどのようなものであるかは次の考察からわかる。神経細胞同士が相互に結合しているとする。細胞同士の結合荷重はすべて自由だとすると、回路にはきわめて大きな自由度がある。一つの結合の結合荷重が正規分布に従うとすると、回路全体の結合荷重行列の全成分は多変量の正規分布に従うことになる（結合荷重は互いに独立で、共分散行列の対角成分は0だとする）。このとき、ランダムに回路を生成した場合の回路の出現頻度は回路の中の結合荷重の2乗の総和で決まる。本研究では結合荷重は連続的な値をとり、神経細胞モデルはシグモイド型の活性化関数を持つ素子とした。しかし、以上の考え方は、一つ一つの結合が離散的な値をとり、確率的に0か1の値のいずれかをとる神経細胞の集団の発火率を考える場合にも成り立つ。

神経回路が何らかの学習で課題を実行できるようになったとする。学習則については何も仮

定していないので、この回路がどのような回路であるかはわからない。このようなときには、この回路はランダムに生成された回路のうちのどれか一つであると考えるのが適切だろう。学習の結果として成立する回路は一意ではなく、初期状態や学習の過程で与えられた入力の時系列によって変化しうる。ここでは学習については何も仮定していないので、学習は多数の回路の中から課題を実行できるという条件を満たすもの一つを選ぶ作業とみなすことにする。すると、学習後に典型的にはどのような回路が形成されるかは、ランダムに生成された回路の中から課題を実行できる回路を選び出したときに典型的にはどのような回路が選ばれるかを見ればわかることになる。

回路が非常に高い自由度を持っているとする。ユニバーサル確率の考え方からすれば、課題を実行できるという制約条件を満たす回路はほとんどすべてがこの制約条件を満たす回路の中で出現確率が最も高い回路に非常に近い回路になることがわかる。上の議論から、出現確率の高い回路は結合荷重の2乗和が小さい回路であることがわかる。結合荷重が小さいため複雑なダイナミクスは出現しにくいので、このような回路ではダイナミクスも単純になることが期待できる。さらに、弱い結合荷重で課題を実行するために、多数の細胞が相互に結合して同じ発火パターンを示すようになる（冗長性を示す）ことも期待される。

以上の発想を次のようにモデル化した。細胞が相互結合している回路を考え、回路に含まれる細胞が無限に多いとする。このとき、時刻1からTまでの発火活動を考え、その相互相関をとると、 $T \times T$ の相関行列が作れる。この相関行列がどのような形をとるかを考えれば、有限個の数値を扱うだけで細胞が無限大の場合を扱える。この相関行列を使って、リカレントニューラルネットワークのカーネル表現で回路のダイナミクスを表せる。課題を実行できることは、たとえばある時刻に入力が入ったときに、別の時刻にその入力に応じた出力が出ることなので、相関行列に関する制約条件として入れられる。回路の出現確率（の対数）は結合荷重の2乗の和として表されるが、これもカーネル表現によって相関行列から算出できる。すなわちこの問題は、結合荷重の2乗の和を最小化しつつ、制約条件を満たす相関行列を求める制約付き最適化問題として定式化できる。

#### 4. 研究成果

以上の定式化に基づいて、複数の課題について最適化問題を数値的に解き、どのようなダイナミクスが発生するかを調べた。課題は、1. 複数種類の刺激が与えられたとき、それを記憶して同一にキューに対して刺激ごとに異なる応答をする課題、2. 複数の刺激の特定の組み合わせのみに応答する課題、3. 刺激に応じて複数の運動パターンの一つを出力する課題、を使った。これらの課題のすべてについて、持続発火活動や漸増・漸減活動が見られることがわかった。ダイナミクスは比較的緩やかなものが出現した。これは結合強度の2乗和が小さくなっているため、変動の大きいダイナミクスが出現しにくいからだと考えられる。

また、発火活動の相関行列を主成分分析で調べると、発火活動は低次元空間に拘束されていることがわかった。これは神経回路のダイナミクスが単純化していることを示している。特に、複数の刺激を記憶して特定の出力を出す回路においては、ダイナミクスはそれらの刺激を記憶できる最低限の次元しか持たないことがわかった。ダイナミクスの単純化は過去の研究からも示唆されていたが、本研究は単純なダイナミクスを作るように回路を作り込まなくても、ランダムな回路の中から課題を実行できるという制約条件で回路を選び出せば単純なダイナミクスを持つ回路が自然に出てくることを示した。神経回路の学習がどのようなものであったとしても、学習が可能な回路のうち課題を実行できる一つを選び出しているのだとすれば、単純なダイナミクスが自動的に出てくることになる。さらに、ダイナミクスが低次元であることは細胞の発火活動のパターンが少数のパターンの重ね合わせであることを意味する。これは神経回路の情報表現に冗長性があることを示している。このような挙動は神経細胞以外でも、多数の素子が情報処理を行っているならば出現しうると予想される。

最後に、本研究の応用可能性について述べる。最適化問題として定式化しているため、答えを得るためには時間がかかる。そのため、現代のニューラルネットワーク技術の代替にはならない。ただし、神経回路やニューラルネットワークの中で生じていることを理解するための道具となりうる。また、非常に複雑な課題については最適化問題が解きにくいので、はっきりした結論を得にくい。この点についての改良が今後必要になると考えられる。本研究は皮質の細胞の持続発火活動を回路ダイナミクスの背後にある何種類かの活動パターンの重ね合わせとして捉える可能性を示唆する。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Takuma Tanaka. "The most probable neural circuit exhibits low-dimensional sustained activity." (投稿中)

Ken-ichi Shibata, Takuma Tanaka, Hiroyuki Hioki, and Takahiro Furuta. "Projection patterns of corticofugal neurons associated with vibrissa movement." eNeuro ENEURO.0190-18.2018, (2018).

Takuma Tanaka. "Information Maximization in a Feedforward Network Replicates the

Stimulus Preference of the Medial Geniculate and the Auditory Cortex.” 23rd International Conference, ICONIP 2016, Kyoto, Japan, October 16-21, 2016, Proceedings, Part IV, LNCS 9950, 183-190 (2016).

〔学会発表〕(計4件)

田中琢真, ニューラルネットワークによるニューラルネットワークの近似性能, 日本物理学会 2019 年年次大会, 2019 年 3 月 16 日, 九州大学 (福岡県福岡市).

岩出尚・中嶋浩平・田中琢真・青柳富誌生, 再帰型相互情報量最大化によって最適化した再帰型ニューラルネットワークの情報処理特性, CCS/NLP, 2018 年 6 月 10 日, 京都テルサ (京都府京都市).

Takuma Tanaka, Sustained firing activity emerging through the learning of stochastic model neuronal network (確率的神経細胞ネットワークモデルの学習によって生ずる持続発火活動), 第 40 回日本神経科学大会, 2017 年 7 月 22 日, 幕張メッセ (千葉市).

岩出尚・中嶋浩平・田中琢真・青柳富誌生, 再帰型相互情報量最大化によって最適化した再帰型ニューラルネットワークの情報処理特性, 日本物理学会 2017 年春季大会 2017 年 3 月 18 日, 大阪大学 (大阪府豊中市).

〔その他〕

<https://www.ds.shiga-u.ac.jp/ttakuma/>

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

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。