

脳は情報とエネルギーの最適バランスを実現 —脳の情報処理が予想以上に頑健なことを発見—

概要

私たちの脳は約百億個もの神経細胞が複雑に結びついたネットワークによって、視覚や聴覚などの感覚情報を処理しています。しかし、ノイズ（雑音）に満ちた現実世界の中で、脳がどのように安定的かつ正確に情報を表現しているかは、神経科学における最大の謎のひとつでした。

これまで、情報表現をノイズに対して強くするために、脳は「フラクタル状態^{※1}」と呼ばれる、入力に過敏な状態を避ける必要があると考えられてきました。しかし、京都大学大学院情報学研究科 寺前順之介 准教授と立川剛至 同博士課程学生の研究グループは、「Fisher 情報量^{※2}」と呼ばれる数的手法を用いることで、神経ネットワークは従来の予想以上にノイズに対して頑健であり、フラクタル状態でも、安定して情報を表現できることを発見しました。さらにこの結果を用いて、最近実験的に発見された「臨界べき乗則^{※3}」と呼ばれる脳の性質が、感覚情報表現とエネルギー消費の最適なバランスを達成していることも発見しました。この成果によって、エネルギー効率と情報処理精度を巧みにバランスする新しい人工知能の開発など、多様な応用が期待されます。

本研究成果は、2025年5月23日に国際学術誌「*Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS、米国科学アカデミー紀要)」にオンライン掲載されました。



私たちの脳の神経ネットワークは、エネルギー効率と情報の正確さの最適なバランスを巧みに達成して、目に映る風景など外界からの感覚刺激を表現している。

1. 背景

私たちの脳は、目に映る風景や音など外界からの感覚刺激を、多数の神経細胞による活動のパターンとして表現しています。では、この神経細胞集団の活動は、具体的にはどのように感覚情報を表現しているのでしょうか？これは神経科学だけでなく、人工知能など機械的に情報を表現する研究においても長年に注目されてきた大きな謎でした。

この脳の情報表現については、「情報をできるだけばらばらに高次元に表現すれば、無駄な重複を避けられ効率的で良い」という「効率的符号化仮説」と呼ばれる仮説と、「情報をできるだけ少ない要素で、単純なかたちで低次元に表現した方が、ノイズの影響を受けにくく良い」とする「低次元多様体仮説」と呼ばれる仮説がこれまで提案されてきました。ほぼ正反対の方向を主張するこれらの仮説ですが、最近の技術の進歩により、実際の脳の神経活動はちょうどこの中間にあるのではないかということが分かってきました。

たとえば、マウスの視覚野と呼ばれる視覚情報を表現する脳の部分で、多数の神経細胞の活動を同時に記録した研究では、その活動のばらつき（分散）のパターンが「べき乗則（power law）」と呼ばれる数式に従っていることが明らかになりました。このべき乗則では、神経活動の各次元（情報の要素）におけるばらつきが、情報の「細かさ」が増すごとに、入力複雑さ（次元数）で決まる一定の割合（「指数」）で減っていきます。この観測結果は、実際の脳の情報表現が、効率性を重視する考えと、単純さを重視する考えのちょうど中間の状態であることを示しています。

このべき乗則に従うパターンでは、減り方を特徴づける指数が、入力信号の複雑さ（次元数）によって決まるある値（臨界値）を境として、神経細胞による情報表現のなめらかさが変化することも知られていました。神経細胞の反応がなめらかであれば、似たような入力には似たような反応が返ってきます。しかし、この指数が小さくなると、わずかに違う入力にも、大きく異なる神経反応が引き起こされるようになります。これは、神経の情報表現が「フラクタル」と呼ばれるいたるところギザギザな図形のように、複雑になりすぎて過敏な状態になっていることを意味します。そのため、脳はちょうどいい「なめらかさ」と「感度」のバランスをとるために、「臨界状態（ギリギリの境目の状態）」を選んでいるのではないかと考えられてきました。

しかし、このべき乗則に従う神経活動が、実際にはどれほど優れた情報の表し方なのかを、きちんと評価するのはこれまで困難でした。その理由のひとつは、べき乗則に従う脳の情報表現がどのように入力をうまく伝えているのかを理論的に説明する枠組みがこれまで存在していなかったからです。たとえば、神経の情報表現がなめらかでなくなったとき、情報表現がどれほどノイズに対して脆弱になってしまうのか、あるいは本当は問題ないのかなど、明確なことは何もわかっていませんでした。また、なぜ脳がわざわざそうしたギリギリの「臨界状態」を使っているのかも、大きな謎として残っていました。

2. 研究手法・成果

この疑問に答えるために、私たちは「統計的推定理論^{*4}」という数学的な考え方を、神経細胞集団による情報表現に利用しました。これは、外界や神経細胞の活動に含まれ得る様々なノイズの影響をきちんと考慮したうえで、神経の活動パターンから元の映像や音などの情報がどれくらい正確に読み取れるかを分析する方法です。この理論では、最も良い情報表現とは、入力の情報をできるだけ誤差なく再現できるものだと定義され、その性能を数値として表すのが「Fisher 情報量」と呼ばれる指標です。この指標は、ノイズを含んだ情報表現が、もとの入力の変化によってどれだけ変化するかを表す指標で、この値が大きいほど、誤差が少なく正確に入力を再現できる、つまり「良い情報表現」だと判断できることが「クラメール・ラオの定理^{*5}」という定理によって数学的に厳密に証明されているため、神経細胞集団による情報表現が、与えられた入力の情報をどれだけ

精密に伝えているかを数値的に表すことができます。

私たちは、感覚情報を受けて活動する神経細胞集団の活動パターンを数理モデルとして表現することで、Fisher 情報量を表す数式の導出し、以下の3つを明らかにすることに世界で初めて成功しました。

1つ目は、Fisher 情報量で表される情報表現の性能が、臨界状態で確かに急激に変化することです。これは以前実験によって報告されていたべき乗則の指数が、本当に脳の情報表現の性質を分ける「境界」になっていたことを意味しています。

しかし意外なことに、2つ目の点として、指数が臨界値よりも小さく、神経の反応が感覚入力に過敏に依存する滑らかでない「フラクタル」状態になっても、読み出せる情報の正確さは下がらないことが分かりました。つまり、臨界状態が常に最適とは限らなかったのです。これは、今までの「なめらかさが必要」という直感的な考えに反する結果です。このような直感に反する結果が生じた背景には、脳が膨大な数の神経細胞から成り立っていることが重要であることも分かりました。これらの結果は、私たち生物の脳の情報表現が、従来の想定以上にノイズに対して頑健だったことを示しています。

ところが驚くべきことに、3つ目の結果として、脳で使われる「エネルギー消費」まで考慮すると、ちょうど臨界状態こそが、情報の正確さとエネルギー効率の両方を最適に保つバランスの取れた状態であることがわかりました。つまり、脳は省エネと高性能の両立のために、あえて「ギリギリの状態」を選んでいたことが数理的な解析から明らかにされました。

3. 波及効果、今後の予定

今回得られた研究成果は、私たち動物の脳に限られた資源の中でできるだけ高性能な情報表現を実現するという最善の戦略を選んでいることを意味しており、そこでは情報表現の入力への反応のしやすさ（感度）やばらつき（分散）が非常に重要な役割を果たしていることが明らかになりました。情報表現の感度や臨界性は、脳だけではなく、機械学習など人工知能の分野でも重要なテーマです。特に近年の人工知能の研究では、学習や推論など情報をうまく扱うことと、そのために必要とされる膨大なエネルギー消費のあいだで、どのように折り合いを着けるかが重要な課題であり、脳が神経細胞集団による感覚情報の表現とエネルギー消費の最適なバランスを巧みに達成していることを明らかにした今回の研究は、生物に限られた資源の中で、どのように正確かつ効率的に世界を感じ取っているのかを理解する大きな手がかりとなるだけでなく、エネルギーを有効に利用できる新たな人工知能開発にもつながっていくことが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2110、日本学術振興会科学研究費助成事業 JP24K15104 および JP21H02597、日本医療研究開発機構革新的先端研究開発支援事業 JP24gm1510005s0204 の支援を受けて実施されました。

<用語解説>

※1 フラクタル

どの部分をどれだけ拡大しても細かい構造をもち、どこをみても滑らかに曲線が描けない図形。自然界では雪の結晶や複雑な海岸線などに見られる。

※2 Fisher 情報量

入力のわずかな変化で情報表現がどれだけ鋭敏に変化するかを測る指標。変化が大きければ多くの情報が得られ、もとの入力を精度良く再構成できるので、データからどれだけ正確に情報を読み取れるかを測る指標でもある。

※3 べき乗則

変数 y が他の変数 x のべき乗に比例する $y=ax^b$ という関係のこと。この時のべき乗の値 b をべき乗則の「指数」と呼ぶ。

※4 統計的推定理論

限られたサンプルからデータの平均などを推定し、その推定値の正確さや性質を扱う理論。

※5 クラメール・ラオの定理

推定値の誤差はフィッシャー情報の逆数以上に小さくできないという定理。

<研究者のコメント>

「臨界的な指数付近で情報表現の性能が高いと思っていましたが、解析的に Fisher 情報量を求めると、意外にも臨界以下の指数で最適なが明らかになり、理論研究の面白さを実感しました。」(立川剛至)

「脳の数理モデルの計算から予想以上に美しい数式が現れた時は感動しました。私たち生物の背後にこのような予想を超える数学が潜んでいたのかと驚き、研究の楽しさと奥深さを再発見することが出来ました。」(寺前順之介)

<論文タイトルと著者>

タイトル：The cortical critical power law balances energy and information in an optimal fashion
(皮質臨界べき乗則はエネルギーと情報を最適な方法でバランスする)

著者：Tsuyoshi Tatsukawa and Jun-nosuke Teramae

掲載誌：Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America

DOI：10.1073/pnas.2418218122