

研究課題別評価

1. 研究課題名:

神経活動のスパイク揺らぎと機能的アーキテクチャー

2. 研究者氏名: 岡田 真人

研究員: 井上 真郷 (研究期間 H.15.04~H.15.09)

研究員: 松本 有央 (研究期間 H.15.04~H.16.03)

研究員: 宮脇 陽一 (研究期間 H.16.04~H.17.03)

研究員: 大森 敏明 (研究期間 H.16.04~H.18.03)

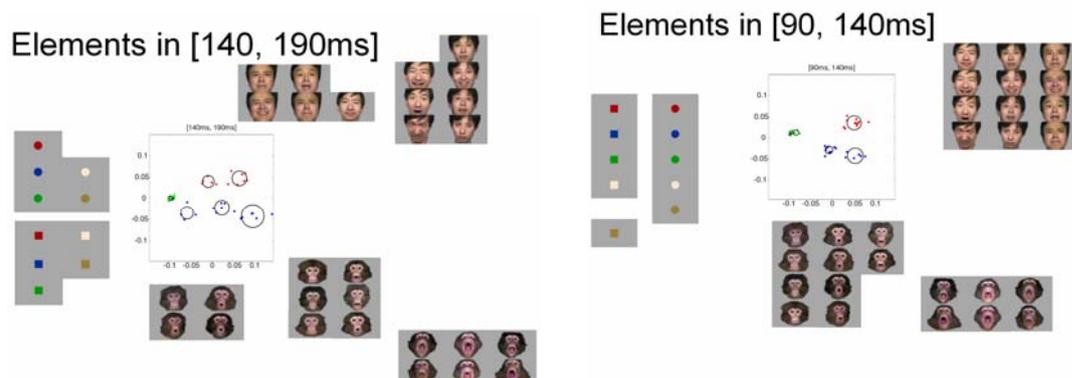
3. 研究の狙い:

脳の中にある多数の神経細胞がスパイクと呼ばれる活動電位で情報交換することで、我々は認識、記憶、思考などの高度な情報処理をおこなうことができる。しかしながら、個々の神経活動だけを観測しても脳の情報処理の仕組みはわからない。脳の機能が宿るアーキテクチャーを探るためには、神経細胞が構成する回路の働きを知る必要がある。本研究では、神経回路の動力学的過程を (1)入力の過渡応答、(2)定常状態、(3)摂動への過渡応答の三つに分類し、その三つの観点を張り合わせることで複雑な神経系の挙動を理解し、さらには脳の機能のメカニズムを理解することを目的とする。

4. 研究成果:

4.1 入力への過渡応答

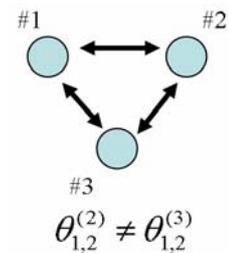
Sugase らが測定したスパイクのデータを新しい手法で解析した。Sugase らは 38 枚の画像に対し 45 個の側頭葉のニューロンの瞬時発火率を測定した。つまり一つの画像は、各ニューロンの瞬時発火率を要素とする 45 次元空間の上での軌跡としてあらわされる。画像は 38 枚あるので、我々は 45 次元空間上の 38 個の軌跡をデータとして持っている。この高次元空間上での軌跡を可視化するために、主成分分析とガウス混合分布解析を併用して、ニューロン集団の過渡応答を可視化し、解析する方法を提案した。その結果、ニューロン応答の初期(90-140msec)では、サル顔、ヒト顔、単純図形のクラスターが形成され、それにつづく遅いダイナミクスで、ヒト顔のクラスターは個々のヒトのサブクラスターに分離することがわかった。この結果は画像セットに含まれ



る階層性が、脳の中では神経系の動力的性質を使って時間的に分離して表現されていることを意味する。さらにこの時間を使った階層的情報表現のメカニズムを探るために、階層的構造を持つ記憶パターンを憶えた連想記憶モデルを提案した。その結果、モデルの挙動は実験の結果をよく説明した。この結果は機能的アーキテクチャーとしてアトラクターが用いられていることを強く示唆する。

4.2 定常状態

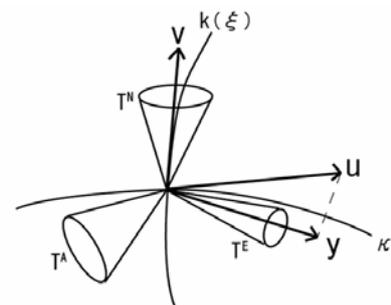
スパイクを統計的に取り扱うためには、時間窓中にスパイクが高々一個しかない程度に時間を量子化する。その結果、スパイクの生成確率はスパイクがあるかないかの二値に対応させた二値の同時確率分布で記述される。近年、二値の同時確率分布を対数線型モデルに書き直して、その情報幾何的性質を使い、スパイクの高次統計量を抽出する試みが提案されているが、まだまだそれが電気生理学実験に適用できない。その理由の一つを右図に示す。系は三個のニューロンから構成されているとしよう。図の θ がニューロン間の高次統計量をあらわす。ここで観測者は三つのうち#1と#2しか観測していなかったとする。その場合に推定した θ と三つとも観測した後に計算した#1と#2の θ は実は食い違ってしまふ。これは実験の解析手法としては問題がある。なぜなら実際に情報処理に使われているニューロンを全部調べることはできないから、観測したニューロンの個数によって出てくる結果が異なるのは困るからである。そこで我々は、個数によらない統計量 η と優位性を検定したい高次統計量 θ にわけ、低次から高次に階層的に検定する新しい手法を提案した。



またスパイクの発火確率が小さくなると、時間窓はほとんどスパイクがない状態になってしまう。このような状況では、精度よく統計量を決められないので、上述の対数線型モデルは用いられない。その場合は、スパイク間隔(ISI)から統計量を抽出する。これまではどのような統計量を抽出するか場当たりに決めていたが、我々は二次の統計量に関して一般系を提案し、ISIの分布に応じて最適な二次統計量を見つける方法を提案した。

さらにISI分布に関するセミパラメトリック推定の新しい枠組みを提案した。神経細胞の発火率は、定常状態であると考えられる自発発火や持続性発火において、必ずしも一定値を取らず、ある確率分布に従い揺らいでいる。この発火率の確率分布を $k(\xi)$ としよう。 $k(\xi)$ の推定は、無限自由度を持つ関数の推定に対応する。このような状況に対して、情報幾何の推定関数の方法を適用し、発火率の影響を消去し、細胞固有であると考えられているISIの規則性を表すパラメータ κ のみを抽出するセミパラメトリックな方法を提案した。

図は推定関数の方法を定性的に説明する概略図である。図の曲がった縦軸は関数 $k(\xi)$ をあらわす。無限自由度を定性的にあらわすために、円錐を導入している。一方横軸は、一次元自由度を持ち、ニューロンの発火の規則性をあらわすパラメータ κ に対応する。これらの軸は情報幾何的観点で直交していない。推定関数の方法では、関数空間上の直交化を



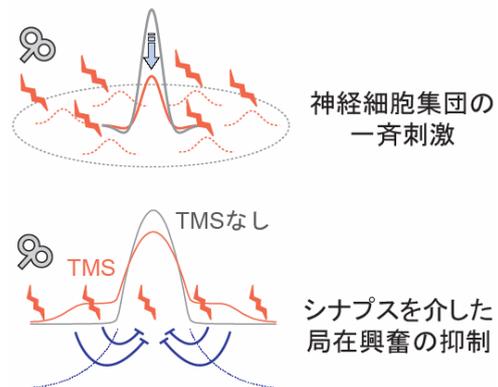
用いて、スパイクの特徴量 κ を、円錐であらわされる無限自由度をもつ関数 $\kappa(\xi)$ の影響がない状態で推定できる。

つぎに我々はスパイクの高次統計量がより詳細に神経回路モデルを同定できる可能性を指摘した。側頭葉のモデルとして、相関アトラクターと呼ばれるモデルが提案されている。相関アトラクターは Line attractor の一種である。我々は相関アトラクターが安定であるパラメータにおいても、点アトラクターが安定に存在することを示した。これは現実の側頭葉において、二つの種類のアトラクターに対応して、同じニューロンが二つの異なったモードで動くことを示唆する。実際に側頭葉のニューロンは鋭い図形選択性を持つという報告と、弱い選択性しか持たないという報告があり、互いに矛盾しているように見える。我々の発見したアトラクターモデルの双安定性では、この二つの知見を矛盾なく説明できる。このモデルでは、側頭葉のニューロンの相関関数の時定数の分布関数は二山になる。実験結果は我々の仮説を支持する。

4.3 摂動への過渡応答

神経系への摂動としては古くから電気刺激が用いられているが、これはヒトには適用できない。ヒトに適用できる非侵襲的な方法として経頭蓋磁気刺激(TMS)が存在する。TMS はコイルに瞬時電流を流し、その結果生じる磁場を脳に印加することにより、脳内に過渡的に電流を生じさせるものである。視覚一次野に TMS を印加すると、実際には一様な図形を見せているにもかかわらず、その一部が抜け落ちてしまう。これは TMS が知覚に与える摂動の効果である。非侵襲でしかも知覚に強い影響与

TMSによる機能干渉の仕組み



える TMS であるが、驚くべきことにその神経メカニズムはわかっていなかった。提案されている仮説は二つある。一つは TMS により、ニューロンが活動できなくなるというもの(ニューロン仮説)と、TMS は、神経細胞集団全体を刺激し、その影響がニューロン間相互作用を経て、機能的アーキテクチャーである神経回路がうまく働かなくなるというもの(ネットワーク仮説)である。もし TMS のメカニズムが後者であったらなら、TMS は神経系に対して摂動を与え、さらにヒトに用いることができる有効なツールとなりえる。そこでまず TMS の神経メカニズムを探った。先ほど単発の TMS の影響に関するヒトの実験結果は両方の仮説で定量的に説明できることを示した。実は二つの仮説を分離する点は、TMS の履歴効果である。ネットワーク仮説では、TMS 効果が神経回路全体に伝わるので、たとえ知覚に効果が出なくても、TMS の影響は 100msec 程度まで神経回路に残る。一方、ニューロン仮説では知覚に効果が出ない場合、TMS の影響は 10msec 程度しかないことを示した。つぎに我々はネットワーク仮説にもとづきモデルを構築し、提案モデルでも約 100msec まで二発目の TMS の閾値が下がることを確認しました。さらにこの結果は、実験結果を定量的に説明できることを示した。

5. 自己評価:

この研究課題では、当初の予想を超えた成果を得ることに成功した。今回の研究課題では、脳のハードウェアである神経回路を探る系統的な手法を提案できた。脳の研究において、ハードウェアの理論を、計算理論・アルゴリズムのレベルと対応付けることが重要である。本研究課題の成果は、そのためのさきがけとなるものである。

脳科学のような融合領域では、個人の技術だけで研究分野をカバーするのは難しい。そのような観点で、他の技術を持つポストドクを雇用できたことが、このプロジェクトの成功の要因の一つであることは言うまでもない。

6. 研究総括の見解:

脳内神経回路網の活動情報は高次元であるが、主成分分析とガウス混合分析を用いてその主要成分を抽出することにより、脳内処理過程を可視化する手法を追及、サルの顔認識過程における側頭葉 45 個のニューロンのデータに 응용して脳内協調処理過程はその初期 (90–140msec) において階層的に行われていることを初めて実証した。また、経頭蓋磁気刺激 (TMS) が脳神経活動に及ぼす影響を定量的に明らかにして、TMS の今後の応用に有用な基礎研究を行うなど脳研究の実験と理論を結びつける顕著な業績を挙げた。

7. 主な論文等:

1. Yoichi Miyawaki and Masato Okada, “A network model of perceptual suppression induced by transcranial magnetic stimulation”, *Neural Computation*, **16**, 309–331, 2004.
2. Masami Tatsuno and Masato Okada, “Investigation on possible neural mechanisms underlying information geometric measures”, *Neural Computation*, **16**, 737–765, 2004.
3. Tatsuya Uezu, Aya Hirano and Masato Okada, “Retrieval properties of Hopfield and correlated attractors in an associative memory model”, *Journal of Physical Society of Japan*, **73**, 867–874, 2004.
4. Koji Wada, Koji Kurata and Masato Okada, “Self-organization of globally continuous and locally distributed information representation”, *Neural Networks*, **17**, 1039–1049, 2004, (Invited paper).
5. Narihisa Matsumoto, Masato Okada, Yasuko Sugase-Miyamoto, Shigeru Yamane and Kenji Kawano, “Population dynamics of face-responsive neurons in the inferior temporal cortex”, *Cerebral Cortex*, **15**, 1103–1112, 2005
6. Narihisa Matsumoto, Masato Okada, Yasuko Sugase-Miyamoto and Shigeru Yamane, “Neuronal mechanisms encoding global-to-fine information in inferior-temporal cortex”, *Journal of Computational Neuroscience*, **18**, 85–103, 2005

他に論文 24, 口頭発表 92.

招待講演

1. 岡田真人: 視覚の計算理論とニューロンシミュレータ, 日本神経回路学会平成 17 年度時限研究会, 東京工業大学,(2005, 9 月 29 日)
2. 岡田真人: 脳科学, 情報科学と物理学, FIT2005, 中央大学, (2005, 9 月 8 日)
3. 岡田真人: プラットフォームシミュレータの意義, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 玉川大学. (2005, 3 月 29 日)
4. Masato Okada, Narihisa Matsumoto, Kaname Toya, Yasuko Sugase-miyamoto, Shigeru Yamane : Hierarchical encoding of faces and its neuronal mechanism in the inferior-temporal cortex, NOLTA2004, ACROS Fukuoka, Fukuoka, Japan,(2004, 11 月 30 日)
5. 岡田真人, Hyeyoung Park, 井上真郷: Plateau and quasi-Plateau due to singularity in multilayer perceptrons -Standard gradient vs. natural gradient-, 日本神経回路学会平成 16 年度時限研究会,(2004, 11 月 1 日)
6. 岡田真人: [特別講演] 可解神経回路モデルと複雑なニューロンモデル, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 東京工業大学,(2004, 7 月 27 日)
7. 岡田 真人: 統計力学による信号処理システムの解析,- CDMA マルチユーザー復調器の場合, 第 48 回システム制御情報学会研究発表講演会,(2004, 5 月 29 日)
8. 岡田真人: 側頭葉での動的な階層的情報表現とアトラクターネットワーク, 産業技術総合研究所 脳神経情報研究部門, 知能システム研究部門, 人間福祉医工学研究部門主催「脳に学んだ情報処理手法の開発に向けて」, 早稲田大学,(2003, 12 月 20 日)
9. 岡田 真人: [チュートリアル講演] アンサンブル学習, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 東京工業大学.(2003, 7 月 29 日)
10. Masato Okada: Density evolution and statistical neurodynamics for multiuser detection of code-division multiple-access systems., Hayashibara Forum 2003 - Physics and Information -, Okayama, Japan ,(2003, 7 月 12 日)