

研究報告書

「ベイジアンネットに基づく視覚皮質モデルと高次視覚野からの認知的情報の解読」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成22年10月～平成28年3月

研究者: 細谷 晴夫

1. 研究のねらい

近年の脳の視覚生理学の研究の発展により、視覚系のメカニズムの全体像が明らかになってきた。その知見を利用して、初期視覚野の活動を解読することに成功した、という目覚ましい研究結果も出てきた。もし、さらに一歩進んで、高次視覚野の活動から、視覚対象物に関する認知的な情報を解読することができれば、有用な BMI の応用が期待できる。例えば、ALS(筋萎縮性側索硬化症)のような全身に障害のある患者は、自ら意思を伝えるということが困難であるが、そういう人の高次視覚野の活動から、欲しいものは何かという情報を認知的レベルで読み出すことができれば、社会生活の質向上にも繋がるだろう。しかしながら、現段階では、高次視覚野の性質には不明な点が多いために、その活動を十分な精度で解読することは困難である。

高次視覚野の理解を加速させるためには、抽象的で予想しづらい高次視覚野の性質を、システムティックに予測できるような数理モデルが必要不可欠と考えられる。本研究では、視覚系が、自然画像の統計的性質を学習し、階層的なネットワーク状に表現しているとともに、そのように獲得した知識を活用した確率的な推論過程によって、様々な情報処理を行っているという仮説をおく。そのような仮説に基づいた具体的な理論として、機械学習の枠組みの一つである「ベイジアンネット」に基づいた視覚モデルを構築する。本研究では、視覚系に構築したモデルを計算機上で実現し、シミュレーションによって、実験的に知られる視覚系の性質を再現し、それを利用した高次視覚皮質の活動の解読手法へと繋げて行くことが目的である。

2. 研究成果

(1)概要

本研究の主な研究内容は、視覚系の理論の構築と実験事実の再現である。本研究では、「ベイジアンネット」と呼ばれる理論を用いてモデル構築を行った。特に、通常の理論では連続変数を使うことが多いが、将来的な大規模化を念頭に、離散変数を使うことによって効率化を図った。尤度最大化に基づいた学習アルゴリズムを構築し、2層ないし4層からなるネットワークを自然画像によって訓練を行った。過去の神経生理学で行われた実験をシミュレートし、定性的・定量的比較を行ったところ、V1(一次視覚野)の方位・周波数・位相の選択性、および盲点充填現象、V2(二次視覚野)の方位統合・角度選択性、V4(四次視覚野)の曲率選択性を再現した(論文[1,3]と会議発表[2])。

しかしこのモデルでは、離散化による副作用として、いくつかの生理学的性質の再現が困難で、モデルが複雑で理解しにくいという難点があった。そのため、改めて連続変数を使ったより単純な「スパース符号化」理論を用いて階層的モデルを再構築した。その結果、上述の生理学的性質の他に、V2の抑制性の性質、V4の局所曲率選択性も再現できた。また詳細にモデ

ルを解析したところ、自然画像に現れる「輪郭」を表現するモデル細胞だけでなく、「角」を表現するものも多数存在し、これらが生理学的特性の再現に大きく寄与していたこともわかった(論文[5]、プレスリリース[3]、会議発表[4])。自然画像の教師なし学習で、3つの V2 の性質、2つの V4 の性質を同時に再現したのは、本研究が最初となる。

上記のモデル研究の過程で、V2 の生理学的性質の再現のためには、「強い次元削減」という操作がモデルに含まれる必要であるということを見出した。そのため、この操作に焦点を当て、その理論的な性質を解析した研究も行った(会議発表[5])。また、モデル研究の結果を検証するため、サルの V2 の神経活動データを、2次モデルを用いたベイズ推定によって解析する研究も行った。その結果、V2 細胞の表現する特徴は、似た方位の統合がほとんどで、本研究のモデルから予測されたものとも適合していた。一方、古典的な位置や回転に関する恒常性は限定的な結果となり、この知見はモデル設計への重要なフィードバックとなった(会議発表[1])。

(2) 詳細

本研究ではまず、離散多値ベイジアンネットという枠組みを、視覚系モデルとして用いた。これは、ユニット(ニューロン、もしくはコラムのようなニューロン群を想定)の状態を on/off に単純化するとともに、多数のユニットをグループ化し、同時に1つのみ on になれるスパース制約を課していると見ることができる(スパース性は実際の神経系に広く見られる)。このような単純化により、通常の変数連続ネットワークモデルよりも効率を上げ、大規模化を目指すことができると考えられる。このようなモデルのために、尤度最大化に基づいた教師なし学習アルゴリズムを設計した。そして、自然画像入力に適用することによって、視覚皮質の V1 単純型細胞、および V2 細胞の古典的な受容野特性が定性的・定量的に再現できることを示した。定量的な神経科学データとしては、De Valois らの V1 の方位・周波数選択性や、Anzai らの V2 の方位統合の性質、Ito と Komatsu の V2 の角度選択性と比較した。さらに、本モデルは、ベイズ推論によって、入力から内部状態を推論するボトムアップの計算だけでなく、内部状態から入力の一部を推論するトップダウンの計算も実現できる。これを利用して、Matsumoto らが V1 に発見した盲点充填の現象を再現した。(論文[1,3])。さらに、このモデルを拡張し、自然画像で学習した4層のネットワークで、Pasupathy と Conner が発見した V4 の曲率選択性も再現できることも分かった(会議発表[2])。

しかし、上記のモデルでは、離散変数を用いることの副作用として、自然画像の詳細な特徴を反映できず、いくつかの生理学的性質の再現が困難であることもわかった。また、モデルが複雑で理解しにくいという欠点も発表する過程で実感した。そこで、改めて連続状態を用いたより単純な「スパース符号化」理論に基づいて、階層的モデルを構築し直した。(スパース符号化理論はベイジアンネットの一種として定式化可能である。)このモデルをやはり自然画像で学習させたところ、前述の V2 と V4 の性質の他に、Schmid らの V2 の抑制反応特性と、Nandy らの局所曲率選択性の性質も再現させることができた。さらに、このモデルでは学習後のネットワークの内部表現が明確に可視化できることから、より詳細に解析したところ、自然画像に現れる「輪郭」を表現するモデル細胞とともに、「角」を表現するモデル細胞も多数存在し、これらが生理学的特性の再現に大きく寄与していたこともわかった(論文[5]、プレスリリース

[3]、会議発表[4])。本研究のモデル研究から、自然画像の統計的性質を教師なしで学習することで、初期視覚野から中間視覚野にかけての多くの性質が再現できることが示された。特に、一つのモデルで、3つのV2の性質、2つのV4の性質を同時に再現したのは、世界に先駆けて本研究が最初となる。

上記のモデル研究の過程で、モデルに「強い次元削減」という操作が含まれていることが必要であることを発見した。これは、入力信号に含まれる詳細な構造を除去するような操作であり、これを行わないと生理学的性質の再現ができなかった。この操作をより深く理解するため、この操作に焦点を当てた理論研究も行った。この中では、強い次元削減が、似た性質を持つ神経細胞を統合する「プーリング」と呼ばれる計算に相当すること、強い次元削減の一般化、ノイズ除去理論との関係などについて調べた(会議発表[5])。

一方、本モデルで自然画像から学習したV2に相当する表現が、どの程度実際のV2と近いかを検証するため、サルのV2の神経活動データを解析した。具体的には、神経科学データ共有サイトで公開されているGallantラボのV2データを用い、ParkとPillowによって提案されたBayesian spike-triggered covariance analysisをV2用に改変した解析手法を適用することで、V2細胞の受容野を再構成した。この方法は、刺激とそれに対する反応のデータから、ニューロンの反応を予測する2次のモデルをベイズ推定することができ、これから選択性と恒常性を同定することができる。この解析の結果によれば、V2の表現は似た方位の線分を統合したものがほとんどを占めており、モデルから予測したものとよく似ていた。一方、位置や角度に関する恒常性は限定的という結果も出ており、当初設計したモデルで予測したものとは異なっており、モデル設計に対する重要なフィードバックになった(会議発表[1])。

3. 今後の展開

本研究では、初期視覚野から中間視覚野までの様々な性質を再現できるような、階層的な視覚系モデルが実現できた。また、本モデル研究に密接に関連する理論研究やデータ解析を行い、これらの視覚領野に関して理解を深めることができた。今後はさらにこれを発展させ、高次視覚野のモデルを構築して行く。特に、高次視覚野には様々なカテゴリに分化した情報表現がされており、本研究で得られた知見に基づき、高次視覚野のモデルの実現を行い、最終的には高次視覚野からの脳情報の高性能な解読技術へ繋げて行きたいと考えている。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

本研究期間で構築した視覚系モデルは、初期視覚野から中間視覚野までの様々な性質を再現できる。特に、一つのモデルでV2とV4の実験事実を合計5つ説明できるようなものは、世界で始めてである。この研究を通じて得られた知見は、高次視覚野の性質の再現の重要な足がかりになり、高次視覚野の脳情報解読への一定の道筋をつけることができたと考えている。研究の実施にあたっては、視覚系のモデル研究で第一人者であるHyvärinenの研究協力を得ることができ、本研究を国際的な認知度の高い論文誌に掲載することができた。また本研

究は、シミュレーションや解析に必要な計算規模が大きいため、研究費の大部分を高性能な計算機の購入に充てて、本研究をスムーズに遂行することができた。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

本研究では視覚情報処理の理論モデルを構築し、それをを用いたシミュレーションにより既知の実験事実を再現することによって、当該モデルの正当性を確認した。本研究は2段階で行われ、いずれも成功を収めたが、第二段階の連続変数モデルが将来的に有望であると考えられる。

本研究の目的は達成され、その成果を高く評価したい。また、「さきがけ研究」領域内外の研究者、特に実験的研究者との共同研究に努めたことも評価に値する。

研究では、第一に、「ベイジアンネット」を用い、離散変数を使うことにより効率的なモデル構築を行った。尤度最大化に基づいた学習アルゴリズムを構築、2層ないし4層からなるネットワークを自然画像によって訓練した。既知の実験をシミュレートし、定性的・定量的比較を行ったところ、方位・周波数・位相選択性、および盲点充填現象(一次視覚野)、方位統合・角度選択性(二次視覚野)、曲率選択性(四次視覚野)などの性質について既知の実験結果を再現できた。次の段階として、連続変数を使った「スパース符号化」理論を用いて階層的モデルを再構築し、上述の生理学的性質の他に、さらにV2の抑制性の性質、V4の局所曲率選択性も再現できた。詳細なモデル解析を行ったところ、「自然画像に現れる輪郭」を表現するモデル細胞だけでなく、「角」を表現する細胞も多数存在し、これらが生理学的特性の再現に大きく寄与したと考えられた。自然画像の教師なし学習により、3つのV2の性質、2つのV4の性質を同時に再現できた研究は、本研究が最初である。なお、上記モデル研究の過程で、V2の生理学的性質再現のためには、「強い次元削減」という操作がモデルに含まれる必要があることを見出し、この操作に焦点を当て、その理論的性質を解析した。さらにモデル研究の結果を検証するため、サルV2神経活動データを、2次モデルを用いたベイズ推定によって解析したところ、V2細胞の表現する特徴は、似た方位の統合がほとんどであり、本研究のモデルからの予測と適合した。一方、古典的な位置・回転に関する恒常性は限定的で、この知見はモデル設計への重要なフィードバックとなった。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Haruo Hosoya. Modeling V1 and V2 by multinomial multilayer belief net, NIPS 2010 workshop on Deep Learning and Unsupervised Feature Learning, 2010.
2. Atushi Hashimoto, Haruo Hosoya. Abstract Category Learning. European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning (ESANN), 2011.
3. Haruo Hosoya. Multinomial Bayesian learning for modeling classical and non-classical receptive field properties. Neural Computation, 24(8):2119–2150, 2012.
4. Hiroki Terashima, Haruo Hosoya, Toshiki Tani, Noritaka Ichinohe, Masato Okada. Sparse coding of harmonic vocalization in monkey auditory cortex. Neurocomputing Volume 103,

14-21, 2013.

5. Hosoya H, Hyvärinen A. A Hierarchical Statistical Model of Natural Images Explains Tuning Properties in V2. *Journal of Neuroscience*, 35:10412-10428, 2015.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件

(2)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 【会議発表】 Haruo Hosoya, Kota Sasaki, and Izumi Ohzawa. V2 receptive field structure revealed by Bayesian spike-triggered analysis. Society for Neuroscience, October, 2012. Oral presentation.
2. 【会議発表】 H. Hosoya and A. Hyvärinen. Four-layer sparse coding model of natural images that reproduces tuning properties in V2 and V4, in *Computation and Systems Neuroscience (Cosyne)*, Feb. 2014. Poster presentation.
3. 【プレスリリース】「霊長類の二次視覚野の情報処理を理論的に解明」科学技術振興機構(JST)・株式会社国際電気通信基礎技術研究所(ATR)共同発表. 2015年7月22日
4. 【会議発表】 H. Hosoya and A. Hyvärinen. Hierarchical sparse coding model and shape representation in V4. Society for Neuroscience, October, 2015. Poster presentation.
5. 【会議発表】 H. Hosoya and A. Hyvärinen. Denoising theory of neural pooling. Japan Neuroscience Society Meeting, July, 2015. Oral presentation.