

Title	A study of computational neural network models on spatio-chromatic properties of the early visual system(Abstract_要旨)
Author(s)	Doi, Eizaburo
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2003-03-24
URL	http://hdl.handle.net/2433/148775
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	none

氏名	と い えいざぶろう 土 肥 英三郎
学位(専攻分野)	博 士 (情 報 学)
学位記番号	情 博 第 65 号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	情報学研究科知能情報学専攻
学位論文題目	A study of computational neural network models on spatio-chromatic properties of the early visual system (初期視覚の空間分光特性に関する計算論的神経回路網モデルの研究)
論文調査委員	(主 査) 教授 乾 敏 郎 教授 松 山 隆 司 教授 奥 乃 博

論 文 内 容 の 要 旨

視覚処理の初期段階（初期視覚系）に関する計算理論の仮説として、Barlow の冗長度削減原理がある。これによると、視覚データに存在する高い冗長性はデータの生成過程によって生じるもので、データを生成する要因そのものは確率的に独立である。そしてこのデータ生成の逆過程、つまり観測されたデータからそれを引き起こした独立要因を推定する過程（冗長度削減過程）が、初期視覚系の計算であると考えられる。本研究はこの仮説を空間分光次元に関して検討したものである。

冗長度削減過程は与えるデータに最適化するものである。したがって、使用する視覚入力データの正確さ、すなわちヒトやマカクザルの視覚入力を正確にシミュレートしたデータの作成がひとつの鍵となる。本研究では0.5%以下という小さな誤差で錐体光受容細胞の応答データを作成した。同時に、錐体光受容細胞のモザイク配列（錐体モザイク）によるサンプリングを考慮した。

冗長度削減過程は2段階の処理過程から構成されると仮定した。すなわち、第一段階では入力データが無相関化され、第二段階で確率的に独立な成分に分解される。これは階層的な神経回路網モデルに対して教師無し学習アルゴリズムを逐次適用することで実現された。第二段階には近年開発された独立成分分析（ICA）アルゴリズムを用いた。学習後のモデルの分析は電気生理学等の実験方法に基づいて行った。

その結果、第一段階の無相関化の処理過程は外側膝状体（LGN）の p 経路と k 経路（p/kLGN）に対応することが明らかにされた。すなわち、p/kLGN で見出された3種類の細胞の受容野構造と色選択性が我々のモデルによってほぼ完全に再現された。第二段階のICAを行う層のユニットは、色に対する選択性によって2種類に大別された。色に非選択的なユニットは全体の9割以上を占め、第一次視覚野（V1）の単純型細胞の特性、すなわちガボール関数で近似される受容野構造と比視感度の分光選択性を示した。対応する基底関数は錐体の種類に依存しないエッジ状のパターンを示しており、細胞の応答が色に無関係なエッジパターンの生起を表現していることを意味している。一方、残り1割弱の色選択的なユニットは方位選択的な二重反対色型受容野を持ち、赤・緑もしくは黄・青軸の色選択性を示していた。対応する基底関数は錐体特異的なパターンを示しており、このタイプの細胞応答が色パターンの生起を符号化していることを意味している。この形と色の自己組織的形成は、知覚の独立モジュールの物理的実体が視覚入力の統計的構造に他ならないことを強く示唆しており、またこれらのプロセスが個体発生の段階で視覚入力に依存して獲得される可能性を示している。

ICA の層に関する更なる検討の結果、色非選択的なユニットも赤-緑の刺激変調に対して比較的強く応答すること、その応答様式が fMRI によって測定された V1 の活動と良く一致すること、また赤-緑変調刺激によってマップされた受容野が同心円状の二重反対色型受容野を持つことが明らかになった。これは V1 において色選択的細胞が低頻度である一方で V1 が輝度変調よりも色変調に強く応答することの矛盾を解決すると共に、その応答性が自然な視覚入力に対する V1 の最適符号化によって説明できることを示している。また同心円状の二重反対色型受容野の自己組織的形成は本研究で初めて示されたものである。

以上のように我々のモデルは初期視覚系の多くの特性を包括的に再現することが明らかになった。本研究は初期視覚系の計算理論としての冗長度削減原理の妥当性を示すと同時に、現在でも一致した見解の得られていないV1の色表現に関して理論的予測を与えるものとなっている。

論文審査の結果の要旨

本論文は冗長度削減が初期視覚の計算理論として妥当であることを、空間分光次元に関して初めて示した研究である。主要な成果は次のとおりである。

- (1) 従来のモデルと解剖学的知見に基づいて、冗長度削減を二段階で実現する階層的な神経回路網モデルが提案された。その結果、視覚処理の第一段階に相当する外側膝状体(LGN)の空間分光特性が冗長度削減の第一段階として仮定された無相関化によってほぼ完全に説明されることが明らかにされた。
- (2) 同時に、冗長度削減の第二(最終)段階である確率的独立化(独立成分分析, ICA)のプロセスが、視覚系の第二段階に相当する第一次視覚皮質(V1)の多くの特性に対応することが明らかにされた。具体的には、単純型細胞と二重反対色型細胞の空間分光特性や、V1には色選択的な細胞の比率が少ない一方でV1全体としては輝度変調よりも色変調に強く応答するという一見矛盾するデータなどが再現された。V1における色表現に関しては現在でも一致した知見が得られていないが、多くの知見を包括的に説明できる本論文のモデルはこの未解決な問題に対してモデルからの予測を与えるものとなっている。
- (3) 初期視覚系の処理過程が視覚入力 of 統計的構造によって規定されるものであることが強く示唆された。このことは同時に、初期視覚系の特性が個体発生段階で視覚経験に依存して学習によって獲得される可能性を示すものとなっている。
- (4) 仮説の妥当性が適切な枠組みで検討されている。すなわち、本論文での議論は正確に再現された視覚入力データすなわち錐体モザイクの自然光景に対する応答データに基づいており、本研究で導かれた結論に強い論拠を与えている。特に三色性の錐体モザイクの導入は、問題の基本であるにも関わらずこれまでほとんど無視されていたもので、本研究によって初めて十分な考察が行われた。さらに、電気生理学や心理物理学の実験方法に忠実に従ったモデルの分析は、視覚系とモデルとの比較を正確なものにしている。

以上のように、本論文で与えられた結果は視覚の初期段階における空間分光特性が段階的な冗長度削減によって説明できることを強く示唆するものであり、また同時に理論的な予測を与えるものである。本論文は初期視覚の計算理論的研究の1つの重要な成果であり、また電気生理学的にも初期視覚の色表現に関してモデル的予測を与えるものとして重要な意味を持つと考えられる。さらに、この研究は今後時間特性を含めることでより現実的かつ定量的な視覚系のモデルへと発展することが大いに期待される。

以上のことから、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認めた。

平成15年1月20日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認める。