

論文審査の結果の要旨

氏名 磯村 拓哉

本論文は 5 章構成である。

第 1 章では、研究背景並びに関連分野の動向に関する考察に基づき、研究目的と具体的な検討課題が提示される。人間が周囲環境を認識するとき、感覚器からの信号が入力となるが、入力信号と脳での知覚が単純には対応しないことは錯覚などの事例が示すとおりである。脳は内部に感覚入力を生成する外界のモデルを構築して無意識的に推論を行い、背後にある隠れた原因を推定し未来の入力を予測しているという考え方(内部モデル仮説)が有力であるが、実際に脳内で起こっている現象、作用する学習メカニズムは解明されていない。最近、入力の予測不可能性を定量化する指標として自由エネルギーをとり、これを最小化する最適化プロセスが学習であるとする「自由エネルギー原理」が提唱された。本研究は、自由エネルギー原理の妥当性・有用性を実験、理論の両面から実証することを目的として (1) 入力情報の背後にある生成モデルを学習により獲得する過程の培養神経回路網での観測、(2) 自由エネルギー原理に基づく学習過程数理モデルの構築、(3) 構築した学習モデルの適用範囲拡張による有用性の検証を試みた結果をまとめたものである。

第 2 章では、神経回路網における内部モデルの獲得過程を観察する電気生理実験が記述されている。実験動物から採取した大脳皮質神経細胞を 64 個の微小電極を集積化した基板上で分散培養し、電気刺激を印加して誘発応答記録が行なわれた。2 つの独立した信号源から生成した信号を確率的に混合したものを刺激として 32 電極から入力し、それに対する誘発応答の経時変化を 14 時間追跡して、2 つの信号源のうち一方のみに応答する特性(応答特異性)を指標として学習過程を定量評価した。時間経過とともに応答特異性が増加し、誘発応答からの信号源推定が可能になることが示された(blind source separation; BSS)。また、4 種類のランダムドットパターン、7 種類の数字パターンを 100 ms 間隔で連続的に印加する訓練を行なった場合は、刺激シーケンス内の近接する前後のパターンに対する応答が増加するという結果になり、これは入力の順序を予測する機能(predictive coding; PC)が獲得されていることを示唆するものであ

る。さらに薬理実験により、この学習過程に NMDA 受容体を介する興奮性シナプスの可塑性と、GABA を伝達物質とする抑制性シナプスによるその修飾が関与していることを明らかにした。

第 3 章では、上記実験結果が示唆する「抑制性入力により修飾されるシナプス可塑性」をモデル化した学習則 (Error-Gated Hebbian Rule; EGHR) を提案、数理モデル解析によりその妥当性を検証した結果につき記述している。構築したモデル系における解の安定性・信頼性を確認した後、EGHR が BSS と PC を同時に実行、内部モデルを獲得できることが示されている。自然画像 (手書き数字や顔画像) を入力すると、入力情報の背後にある階層構造を抽出し、ラベルなしにクラスタリングを行うことができる、楽曲を入力した場合には、背後にある因果関係を学習し、記憶・想起が可能であることも示され、その有用性が確認できた。以上の結果に基づいて EGHR と自由エネルギー原理の関係につき議論し、無意識的推論の数理モデルとなり得ることを述べている。

第 4 章では工学分野への応用の視点から、自由エネルギー原理適用領域の拡大を試みている。最初に、コスト関数が定義される最適化問題における大域解探索の計算コストにつき検討した。基本的には勾配学習であるが、その計算コストは従来の手法に比べて小さいこと、また、複数の内部モデルを用意してこれに遺伝的アルゴリズムを適用して最適化することにより、さらに効率的な探索が可能になることが示されている。さらに、複数の内部モデルを用いることにより複数の推論を並列に実行する可能性につき検討し、「鳥の歌の生成モデル」に適用してその有効性を検証している。

以上、設定した研究目的、課題に対して得られた研究結果に基づき、第 5 章では結論と今後の展望について総括し、学術的意義と工学分野における応用の可能性を議論している。実際の神経回路網が自由エネルギー原理に従って BSS, PC を実行可能であることを実験で示し、新たな学習則として EGHR を提案、無意識的推論の数理モデルとしての有効性を検証したことが本研究の意義である。なお、本論文第 2 章、第 3 章、第 4 章、の一部は、酒井洸児、榛葉健太、小川雄太郎、武内彬正、高山祐三、豊泉太郎、小谷潔、神保泰彦との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験及び解析を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。従って、博士 (科学) の学位を授与できると認める。