

論文審査の結果の要旨

氏名 大泉 匡史

本論文は5章からなり、第1章は論文全体の導入、第2章は脳内において効率的な情報符号化を実現する神経基盤を解明する理論的枠組み、及び一次視覚野のネットワークモデルの解析、第3章は脳内でどこまで情報復号化が簡略化され得るかを調べる理論的枠組み、及び網膜の実データ解析、第4章は論文全体のまとめと議論について述べられている。第5章は計算の詳細を記した付録である。本論文は脳内情報符号化と復号化の双方の観点から脳内の情報処理機構の理解を目指した研究である。

まず、第2章の内容について述べる。情報符号化の観点から重要な概念は、脳は刺激情報を最大限保持するように符号化しているという原理である。これは情報量最大化原理と呼ばれる。論文提出者はまず、スパイクレスポンスモデル又は一般化線形モデルと呼ばれる確率的な神経細胞モデルにおいて、解析的に Fisher 情報量を計算する理論的枠組みを構築した。この理論的枠組みによって、ネットワークパラメータの網羅的な探索が可能となり、一体どのような神経ネットワークによって情報符号化効率の最大化が行われているのかを調べることが可能となった。

論文提出者は上記の理論的枠組みを用いて一次視覚野における再帰型の側方向結合が効率的な符号化にどのような影響を与えるのかを調べた。一次視覚野では、神経細胞の最適方位が近い細胞同士は興奮させ合い、最適方位が遠い細胞同士は抑制し合うという、いわゆるメキシカンハット型結合が存在すると言われている。論文提出者はこのような興奮性結合と抑制性結合の結合強度パラメータを変化させた時に、Fisher 情報量がどのように変化するかを解析計算によって調べた。結果、興奮性結合強度が抑制性結合強度より十分強い領域において Fisher 情報量が増大することが分かった。この時神経細胞のチューニングカーブの幅(線分の方位に対する反応選択性の幅)は鋭くなる。

先行研究においては、側方向の結合によってチューニングカーブを鋭くすることは、必ず Fisher 情報量を減少させてしまうということが報告されていた。論文提出者の研究においても、先行研究で報告されているようなパラメータ領域は存在する。しかしながら、論文提出者はチューニングカーブを鋭くすることによる Fisher 情報量の減少は常に起こるわけではなく、Fisher 情報量が増加するパラメータ領域が存在するというを示した。

次に、第3章の内容について述べる。情報復号化の観点から重要な概念は、脳はなるべく単純な復号化を好むであろうということである。特に重要な問題は、神経相関が復号化によって無視され得るのか否かという問題である。論文提出者はこの問題を網膜神経節細胞のスパイクデータを解析することで議論した。視覚刺激としては自然風景の動画を用いた。スパイク列が刺激の情報をどれだけ持つかは相互情報量 I を用いて定量化した。相互情報量はいわば脳が最適な復号化をしていると仮定した際の情報量と言える。次に、脳が簡略化した復号化、例えば相関を無視した復号化をしていると仮定した際の情報量を Merhav らが導出した情報量 I^* を用いて定量化した。 I^* が I に比べて十分大きければ、脳内において簡略化された復号化が行われている可能性があると言えるし、小さければそのような復号化が脳内において行われている可能性が低くなると言える。

論文提出者はまず、網膜神経節細胞集団活動が強い相関を持つことを示した。この結果だけを考えると、神経相関が刺激に関する重要な情報を運ぶのではないかと推測するのは自然である。しかしながら、実際に I^* 及び I を計算してみると、相関を無視した復号化を行ったとしても視覚刺激に関する90%以上の情報が読み出せることが分かった。この結果が意味することは、強い神経相関の存在が必ずしも脳内の情報処理における相関の重要性を意味しないということである。

本論文で構築された神経ネットワークモデルにおいて情報符号化効率を計算する枠組み、及び簡略化された情報復号化が行われた際の情報量損失を計算する枠組みは一般的な枠組みであり、一次視覚野や網膜に限らず様々な領野に適用することが可能である。これらの理論的枠組みを様々な領野に適用することで、感覚系の違いによる情報符号化及び情報復号化の相違点や共通点が議論され、脳の情報処理機構の原理が明らかにされていくことが期待される。本論文はその先駆的研究として重要な研究と考えられる。

なお、本論文第2章は、三浦佳二、岡田真人との共同研究であり、本論文第3章は、石井俊行、石橋和也、細谷俊彦、岡田真人との共同研究であるが、双方とも、論文提出者が主体となって研究計画、解析、論文の執筆を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。