

論文審査の結果の要旨

氏名 坪下 幸寛

ヒステリシスを有するニューロンで構成されたニューラルネットワーク(Hysteretic Neuron Network, HNN)は、神経生理学的発見である漸次的持続活性(Graded Persistent Activity, GPA)を説明する神経回路モデルとして近年注目を集めている。本論文では、初期状態の特徴を残し、ネットワークに蓄積された情報を反映させる手法として、入力履歴効果を持つGPAを連想記憶に導入することが提案されている。本論文の目的は、次の二点である。すなわち、1) HNNを情報検索に適用した場合の工学的な有用性を検証する。2) HNNの抽出する情報の性質を理論的に解析する。本論文の二章、三章では、HNNの情報検索への適用について述べられている。四章、五章では、HNNに対する統計力学的な手法による理論解析について述べられている。さらに、六章では、HNNの行う情報抽出とベイズ推定との関係が議論されている。

本論文の導入では、まず、情報検索における自動キーワード抽出の課題について述べられている。情報検索では、しばしば文書の内容を単語の集合で近似する。この文書の内容を特徴づける単語のことをキーワードと呼ぶ。従来の自動キーワード抽出では、文書内に現れる単語を"重要度"により定量化し、その重要度の順にキーワードとする。しかし、個々の文書には、著者それぞれの癖や考え方、単純なミスにより、バイアスやノイズが含まれる。単純に個々の文書に着目した重要度では、そのようなノイズやバイアスを取り除くことはできない。本論文では、この問題を解決するため、個々の単語をニューロンに対応させたニューラルネットワークの非線形力学に着目している。ニューロン間の結合は、様々な分野の文書テンプレートがそれぞれアトラクタとなるように設定される。初期状態の活性パターンとして、入力文書を設定し、単純に従来のHopfield型連想記憶を適用すると、初期状態依存性がないために、文書テンプレートそのものが読みだされる。初期状態の文書の特徴を残し、ネットワークに蓄積された情報を反映させる手法として、本論文では、入力履歴効果を持つGPAを連想記憶に導入することが提案されている。さらに、本論文では、GPAを再現する神経機構モデルとして、HNNに着目している。

本論文の第二章、第三章では、情報検索における研究課題の一つである文書からのキーワード抽出にHNNを適用した事例について述べられている。まず、HNNが初期入力を反映した情報抽出を実現していることを確認するため、共起性に基づく単語のネットワークに双安定ニューロンモデルを適用した事例について述べられている。GPAとして読み出された単語群は、初期状態として表現された文書の意味内容を適切に表すキーワード群となっていることが確認されている。さらに、2値の出力しか表現できない双安定ニューロンモデルの欠点を解消するため、GPAが単一細胞レベルで生成されるという報告に関連して提案された多安定ヒステリシスニューロンモデルをHNNに適用している。さらに、既存の文書検索テストコレクションを用いて、Personalized PageRankなどの線形的な活性伝播を用いた従来技術との定量的な比較実験が行われている。多安定ヒステリシスニューロンモデルを用いた場合が、Personalized PageRank、および双安定ニューロンモデルを用いた場合と比較

して、高い性能を示すことが確認されている。この結果は、多安定ヒステリシスニューロンを用いたHNNがキーワード抽出のような、初期入力を反映した情報抽出に有効であることを例証する。脳科学から得られたニューロンモデルをこのように工学的に応用して実用性を示した研究は他に例がない。

本論文の第四章、第五章では、HNNの生成するGPAの物理的な状態を明確化し、系のアトラクタに与える影響を定量的に把握するために、HNNのダイナミクスの統計力学的解析が行われている。HNNはボルツマン分布に従わないため、系はエネルギー関数を持たない。そのため、通常の平衡統計力学を適用することができない。本論文では、マスター方程式を出発点とする動力学的な解析が行われている。まず、HNNが生成するGPAの物理的な状態を明確にするため、Hushimi-Temperlyモデルにおいて解析が行われている。ヒステリシス特性によって、系は強い強磁性的傾向を見せ、緩和時間が非常に遅い連続領域が形成されることが理論的に示されている。この知見に基づき、本論文では、HNNが生成するGPAとは、この連続領域内で状態変化が非常に遅いため、有限時間内で、連続不動点として観測される現象であると考察がなされている。次に、代表的な離散アトラクタモデルとしてHopfield連想記憶モデルを取り上げ、HNNのアトラクタに与える影響が調査されている。記憶パターン数がニューロン数に対して $O(1)$ の場合の巨視的状态方程式が求められ、相関パターンを記憶した場合の、混合状態、および、記憶パターンの安定性が議論されている。その結果、ヒステリシス特性は、系の全てのアトラクタの熱ノイズに対する安定性を向上させるが、相図の定性的構造には影響を与えないという知見が得られている。また、連想記憶の記憶容量がヒステリシス特性によって変化しないことが計算機実験によって示されている。これは、ヒステリシス特性によって系の記憶容量が増加するという従来の報告を覆す発見である。

本論文の第六章では、HNNによる情報抽出と、ベイズ推定との関連性が議論されている。ネットワークのリンク情報を事前知識、そして、推定すべきキーワードの劣化情報を入力と定義し、事後分布としてキーワードを推定する問題として定式化が行われている。さらに、抽出すべき理想のキーワード群が、ネットワークリンクを相互作用とした強磁性的Ising 模型のBoltzmann因子に従って生成されるものと仮定した場合の平均性能が、統計力学的手法の一つであるレプリカ法を用いて理論的に導出されている。さらに、平均性能は、入力とアトラクタとの中間状態で最大となることが示されている。この結果から本論文では、HNNによって生成されるGPAのような中間状態が、情報科学的に有用な状態であることが示唆されている。

以上のように、本論文は、HNN に対する応用的な側面、理論的な側面から多くの新たな知見を獲得することに成功している。これらの研究は、HNN を用いた情報抽出の工学的な実用性を示唆しており、様々な情報検索課題への適用性を考察する上での足掛かりとなることが期待される。

なお、本論文第二章、第三章は岡本洋と、第四章、第五章、第六章は、岡田真人との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析、実験及び検証を行ったもので、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。