

氏名 コー ヤンウェイ パトリック

序

1943年, McCulloch と Pitts は神経細胞の二値表現とその繋がり及び発火の機能的モデルを提唱した. その後 Hopfield によって, この二値表現がイジングスピン系のエネルギー安定性の問題に翻案され, スピン系の状態空間に生成されるアトラクターを記憶内容と同一視する「記憶」モデルが確立された. その後, この基本モデル (Hopfield 模型) は, 本来の神経生理学の枠を超えて様々な形で発展的に研究されてきた. たとえば, 図形情報等の記憶の蓄積と回復の工学的応用, ニューロコンピュータの構築, 情報統計力学, 多極小値を持つ場における検索の問題, アトラクターの生成とカオスのダイナミクスの関連の研究, 個別の分野における具体的応用等, 広義の情報科学や非線形科学などの物理科学でも盛んに研究が続けられている. 現在までに, Hopfield 模型は様々な改良や新しい考え方が導入され, 高次の「ニューラルネットワーク」が設計されている. しかし, そもそも比較的素朴な (基本的な) レベルにおいて, Hopfield 模型では記憶容量が小さく, 偽のアトラクターを多数生成することから, 十分な記憶機能を持たないことが知られていた. Koh Yang Wei Patrick 氏による本学位論文は, イジングスピン系の枠組みの中で, 記憶容量を飛躍的に増大すると同時に, 偽のアトラクターを消滅させていく原理と方法を提案し, その数値的検証を行ったものである.

研究の背景と目的

スピン系のメモリー容量を増やすために, 2体のスピン間の相互作用だけに基いてハイゼンベルグハミルトニアンを考える Hopfield 模型を改良して, 3体以上の相互作用を考える多重スピンモデルが提案されている. 確かに組み合わせが増え, メモリー容量は増加するが, 基本的な考え方は Hopfield 模型と変わることはなく, 偽アトラクターもその分多く発生し, 計算の手数を考えると, 多重スピン相互作用は大きな改善には繋がらない. Koh Yang Wei 氏も数値的にその事実を確認してから, 以下に要約する新しい考え方を提案している.

論文の内容と意義

本学位論文は7章と一つのappendixからなる. 第一章と二章は, 序論とイジングスピン模型によるニューラルネットワークの概論に当てられ, 第7章は締めくくりの結論に当てられているので, 内容としては事実上4章構成 (第3章-第6章) になっている.

第3章が本論文のハイライトであり, Koh Yang Wei氏は, ここで基本骨格となるアイデアを提示している. Hopfield模型においては, 各スピンはそれぞれが個別のベクトル量として二体間の直接相互作用 (内積相互作用) をしている. 一方, Koh氏のモデルでは, 各スピンは他の $k-1$ 個のスピンを要素として, 一つの k -ベクトルを構成し, 更に, 全てのスピンの組み合わせによる k -ベクトルの集合を一つの超ベクトルとして表す. このようにして, 1個のスピンが他のスピンと共同して, 大幅に拡大されたベクトル空間の成分と

して埋め込まれることになる。 $k = 1$ の場合がHopfield模型に当たる。記憶内容も、この超ベクトル空間に書き込まれるものとし、記憶の回復は、スピンの超ベクトル状態と記憶された超ベクトルの内積を使って呼び戻される。ここでは超ベクトルの各成分であるベクトルの中に、情報が「位相」として格納され、この位相が正しく復元されることが、記憶の回復に対応するように設計されている。この理由で、集団的コヒーレント相互作用によるニューラルネットワークと名付けられた。

記憶の呼び戻しの過程はHopfield模型と同様に行われる。この過程で、大きな数の二項係数を含む量が現れるが、数値的にオーバーフローしない方法論を開発することにより (Appendixに記載)、本モデルを実効的に計算可能たらしめている。

第4章において、提案されたモデルの数値的検討がなされている。そこでは、与えられたスピン数に対して、次数 k を増加させることによって、記憶容量が飛躍的に増加するとともに、偽アトラクターが急激に減少し、ついには消滅すること様子が示されている。また、アトラクターの口径が大きくなるとともに、アトラクターを縁取りするように擬セパトラトリクスが発達し、格納されている記憶に結びつかない初期値を投入すると、誤った記憶アトラクターに落ち込むことなく（もちろん偽アトラクターも存在していない）、この擬セパトラトリクスに閉じ込められたカオスの徘徊運動を続ける（いわゆる検索を続ける）ということも明らかにされている。

第5章では、次数 k を上げることで提案されたニューラルネットワークの性能が上がる様子が、相転移とのアナロジーで解析されている。

第6章では、本ニューラルネットワークの発火プロセスにおいて、ノイズを負荷したときの性能の変化が検討され、数値計算結果が示されている。それによると、揺らぎが小さい時は記憶の呼び戻しに対して、正の効果が現れ、逆に大きすぎると、ニューラルネットワークとしての機能が弱まることが示されている。この結果は、直観的にも理解しやすい。ただし、ここで見いだされたノイズの正の効果は、多極小値ポテンシャル場における偽アトラクターからの脱出の方法としてノイズを負荷することとは全く異なるものであることは注意してよいだろう。

以上のように、Koh Yang Wei Patrick氏の学位論文は、ニューラルネットワークの基礎研究として独創的であり、その結果は重要かつ興味深い。本学位論文は、高塚和夫教授との共同研究であるが、ほとんどすべての部分において、論文の提出者が主体となって理論の提案と解析を行ったものである。よって本論文は博士（学術）の学位請求論文として合格と認められる。