

論文の内容の要旨

論文題目 : Neural Networks with Coherent Collective Firing

(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)

氏名 : コー ヤンウェイ パトリック

本研究のテーマはニューロン集団はどうやって記憶を呼び出すかである。1982年、J.J. Hopfield は統計力学にある自由エネルギーの最小化の概念を記憶研究に導入した。この概念によると、記憶はある表面上の最小状態であり、ニューラルネットワークが記憶を思い出すとき、あるエネルギーを最小化する、つまり、表面に沿って下に向いて移動することで実現される。この簡単な概念は、記憶の働きのメカニズムの理解にとって、とても役に立った。だが、問題が二つある。一つ目はエネルギー面上には保存された記憶だけではなく、他の **local minimum** も存在している。これらの **local minimum** は記憶を思い出すダイナミクスを妨げるので、それらをエネルギー面上から消す仕組みが必要である。

そして、普通のニューラルネットワークモデルは二体相互作用を使っている。しかし、記憶が働く神経経路には多体相互作用がしばしば見られることが実験から分かってきた。さらに、一般のニューラルネットワークモデルでは、一つのニューロンが受けた刺激を細胞体について線形的に足す。実際のニューロンは複雑なデンドライトをもっていて、一つのニューロンでも、デンドライトにより、複雑な計算をすることができる。デンドライトにより、実は、ニューラルネットワークの作用と機能に大きな違いがあるのが最近の研究によってわかってきて、いまではモデルを立てる人々に注目されている。デンドライト上の多体ニューロンの信号がデンドライトの構造により複雑に結合したりして、これは一般的な線形的に入力を足すニューロンモデルでは表すこ

とができない。従って、二体模型を超える模型が必要である。

本研究では相互作用は記憶のエネルギー表面にどのような影響があるかを考える。

第1章ではまず、スピニューロン模型と Hopfield 模型を紹介する。その後、multi-spin という模型とその模型を用いてニューラルネットワークを表現する問題を説明する。最後は、研究のアイデアを紹介する。

第2章は Hopfield 模型を簡単に検討する。まず神経細胞の解剖学と機能を説明し、そして、McCulloch-Pitts ニューロン模型を紹介する。McCulloch-Pitts ニューラルネットワークと Ising スピン模型の関係を説明する。その後、Hopfield 網を紹介し、その相空間を用いて、local minimum の問題を説明する。最後は local minimum をどうやって理解するかの研究を少し紹介する。

第3章では Coherent Spin-Interaction (CSI) 模型を提案する。まずデンドライトの非線形性を紹介し、multi-spin 模型の限界を説明する。それに対して、デンドライト上の多体ニューロン相互作用を考慮し、多体的ニューロン相互作用を表すため、集団的コヒーレント相互作用(coherent collective firing)のアイデアを提案する。この相互作用を持つように Hopfield 模型を拡張し、CSI モデルを構築する。その後、CSI 模型のエネルギー表面の構造を解析する。

第4章から6章までは、数値計算で CSI 模型の研究を行う。

第4章は小さいネットワークを用いて、CSI 模型の状態空間の構造を調べる。この章の前半は random 記憶を調べ、後半は correlated 記憶を調べる。前半の部分で、状態空間上のアトラクターの数 (図1)、種類、安定性、盆地のサイズを計算した。コヒーレント集団のサイズが上がると、spurious states が消えて、メモリ状態が安定化することがわかる。そして、コヒーレント集団のサイズが上がると状態空間が安定と不安定領域の二つに分かれることも分かった。記憶状態の分布を調べるため、Shannon エントロピーを計算した。最後はコヒーレント集団のサイズが上がると、状態空間の repeller の数が増えることを発見した。後半 correlated pattern の部分は、まず pseudo-inverse 法を紹介し、この網の限界を説明する。その後、前半の部分と同じような計算を correlated 記憶を用いて行い、pseudo-inverse と CSI 模型を比較した。第4章の結論は、CSI 模型の保存量は Hopfield と pseudo-inverse 網より大きいことである。

第5章は秩序パラメーターを紹介し、無雑音の CSI モデルの相転移を調べる。まず、スピン模型に伝統的な秩序パラメーター磁化 m を紹介し、 m の問題を説明する。そして、5章と6章に使う秩序パラメーター $\langle M \rangle$ と C_M を導入する。その後は、状態空間でのサンプリング軌道でこれらの秩序パラメーターを計算し、 $k-p$ の位相図を描いた。 C_M の位相図上では、メモリの部分が空白の形で表されることがこの章のメインの結果である。

第6章はシナプス雑音を CSI モデルに取り込んで、雑音はどのような効果を記憶に与えるかを調べる。まず、Glauber ダイナミクスを紹介する。そして、シナプス伝達のメカニズムを説明する。その後、Glauber ダイナミクスとシナプス伝達の間接関係を示す。CSI 模型ではなぜ

Glauber ダイナミクスは良くないのかを説明する。そして、雑音を取り込んだ CSI 模型の運動方程式を導入し、5章の秩序パラメーターで CSI 模型の $k-p-T$ 空間上の相転移を調べた。

第7章は本研究をまとめ、結論をする。本研究から分かったのは、CSI 模型のエネルギー表面はコヒーレント相互作用の集団サイズで変化することである。集団サイズを大きくすると、エネルギー表面が滑らかになり、local minimum が消えて、記憶の保存にいい形になる。しかし、大きい集団は雑音に弱く、大きすぎると、CSI 模型の記憶の性能は逆に悪くなる。従って、一番いい集団サイズは中間領域のサイズである。

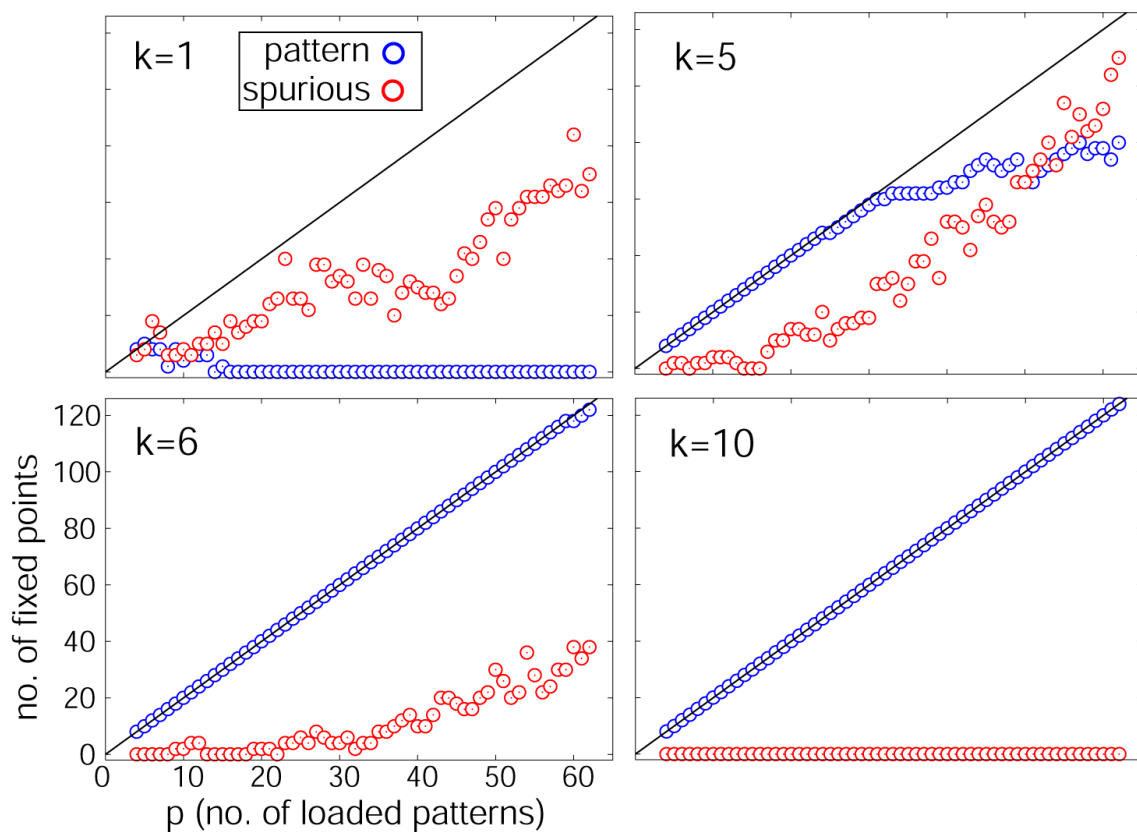


図1：集団的コヒーレント相互作用サイズ k を変えた場合のメモリ状態の数(青丸)と local minimum の数 (赤丸)。