

氏名	田 森 佳 秀		
授与学位	工 学 博 士		
学位授与年月日	平成 3 年 3 月 28 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 応用物理学専攻		
学位論文題目	側抑制のある神経回路網の自己組織化		
指導教官	東北大学教授 猪苗代 盛		
論文審査委員	東北大学教授 猪苗代 盛	東北大学教授 渡邊 剛	
	東北大学教授 滝本 昇	東北大学教授 山本 光璋	
	東北大学助教授 松原 史卓		

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

本章では、本研究の背景と目的を述べている。

神経系の可塑性を最初にはっきりと示したのは、Hubel and Wiesel (1969) による視覚奪取の研究からである。彼らは、ネコの視覚野の方向選択ニューロンの存在も実験的に示しており、この方向選択ニューロンの適方向は、皮質上のニューロンの位置がずれていくにつれて連続的に変化する。理論的アプローチとしては、Malsburg (1973) の視覚野におけるシミュレーションや、Takeuchi and Amari (1979) らのニューロン層の活動を連続的な神経場として取り扱った研究がある。その他、大脳を取り扱った理論的研究は多いが、これらの理論では、側抑制結合が重要な役割を果たしている。

本研究では、特に方向選択性の自己組織化が、提出される神経回路網モデルで起きることを示す事を目的としている。系統的なシミュレーションを行なうために、モデルに含まれる数多くのパラメータ間の関係を解析的な方法を用いて導く。

第 2 章 側抑制のある神経回路網の 2 層モデル

本章では、本研究を通して取り扱う側抑制を持つ神経回路網モデルを提出している。(図 1)。

方向選択性を獲得していない部位として第 1 層 (サイズ L) を考え、方向選択性を獲得する部位として第 2 層 (サイズ N) を考える。第 1 層のニューロン k から第 2 層のニューロン i への層間結

合強度 $\langle s_{ik} \rangle$ は、神経興奮の時定数に比べてゆっくりに変化する。この時定数の違いを考え、本研究では方程式系をサイズ M の入力アンサンブルで平均し、断熱近似を施す。第2層内にはメキシカンハット型の側抑制結合 w_{ij} が存在する。本研究ではこの側抑制結合を非可塑的であるとして、層間結合 $\langle s_{ik} \rangle$ の自己組織化を調べる。シミュレーションで用いた *Hebb* 規則による学習方程式は、

$$\tau' \langle \dot{s}_{ik} \rangle = -\langle s_{ik} \rangle + c \sum_{\nu=1}^M p_{\nu} z_i^{\nu} x_k^{\nu} \quad (1)$$

と書ける。 c は学習強度である。平衡状態を調べるときは、平衡状態のパルス頻度 $\overline{z_i^{\mu}}$ (平衡全受容野) の方程式、

$$\overline{z_i^{\mu}} = f \left[\sum_{j=1}^N w_{ij} \overline{z_j^{\mu}} + c \sum_{\nu=1}^M p_{\nu} u_{\mu\nu}^{(i)} \overline{z_i^{\nu}} - h \right] \quad (2)$$

を用いる。但し、 h は閾値、 f は出力関数、 $u_{\mu\nu}^{(i)}$ はパターン間相関である。平衡状態の結合強度 $\langle s_{ik} \rangle$ は、 $\overline{z_i^{\mu}}$ から求めることができる。(2)式を解いて得られる $\overline{z_i^{\mu}}$ の安定性を学習方程式(1)で確かめた。

第3章 出力層が1次元のモデル

本章は、第2層が1次元のモデルについて調べた結果を報告する章である。

1次元パターンを入力

1次元的にニューロンが配置されている第1層に、単峰の興奮を持つパターンが、色々な位置に提示されるモデルを考える。第2層のニューロンの興奮状態を信号空間(アンサンブル空間)で表示したものを受容野と呼ぶ。全てのニューロンの受容野(全受容野)を表示することは $\overline{z_i^{\mu}}$ を表示することと等価である。

3つの仮定([1] 興奮クラスター存在, [2] 無入力無興奮, 及び [3] 初期膜電位を静止電位とする)により、未知パラメータ間の関係式が解析的に求められた。これにより許されるパラメータを用いてシミュレーション及び数値計算を行い、平衡状態において連続解とブロック解が存在することを示した。しかしブロック解は方程式(1)の解になっているものの、正常な初期条件及び外的環境のもとでは得られないことが判明した。また、あるパターンを高頻度で与えたときその入力に反応するニューロンの受容野が他のニューロンのものよりも大きくなった。これは、Blakemore and Cooper (1970) の実験結果と定性的に対応している。

2次元パターンを入力

傾きの異なる2次元の棒パターンを入力して(2)式の数値計算を行い、第2層のニューロンの位置

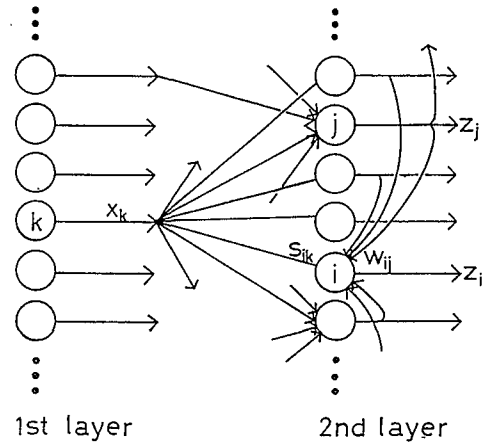


図1 2層モデル

の移動に応じて、応答する棒の傾き θ も連続的にずれていく Hubel and Wiesel (1977) の実験と定性的に対応する全受容野が得られた (図2)。

第4章 2次元2層モデル

本章では、両層ともサイズ 20×20 の2次元2層モデルを取り扱い、方向選択性及びレチノトピーの問題を調べた結果を述べている。

2次元モデルで生じてくる困難を乗り越えるために、[1] 色々な傾きを持つ縞模様を入力、[2] ニューロンの結合範囲の制限、[3] 方程式(2)を解くための初期値を、シナプス結合強度の初期値を基準に決定、及び [4] 実際の出力関数に近いロジスティック関数

$$f(x) = [1 + \exp(-2x/T)]^{-1} \quad (3)$$

を採用するなどの変更を加えた。また、1次元モデルと同様なパラメータ間の条件を解析的に求め、これに基づいて数値計算を行った結果を、受容野 (図3) (スポットパターン入力に対する第2層のあるニューロン i の出力を、それぞれの第1層上のスポットパターンの中心に表示したもの)、最大応答野 (図4) (第2層のニューロン i が最も強く反応した縞模様パターンの傾きを、そのニューロン i の位置に線分で表示したもの)、影響野 (図5) (あるパターン入力に対する、第2層の出力パルス頻度の分布)、として表示した、次章のスピソ系アナロジーの温度に対応する T (出力関数の傾きを決める) を小さくしたり、閾値を大きくすると、或一つの方向 (横方向) を好むニューロンが多くなる。これは、低温や外場中でフェロスピソクラスターが発達し易い現象に対応している。温度が高い ($T=1.8$) とき、影響野はパターンの傾きに依らない応答を示した (パラ状態)。これらの結果より出力関数には望ましい傾きがあると考えられる。

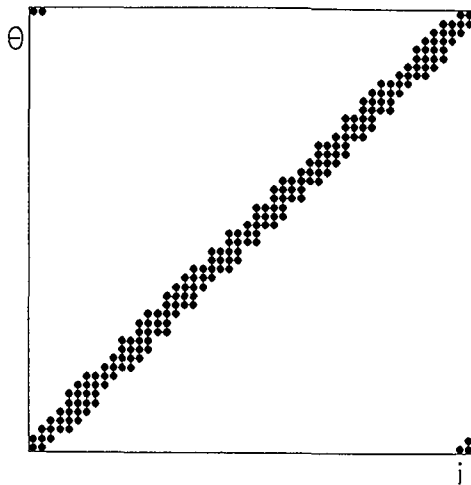


図2 連続的な topography

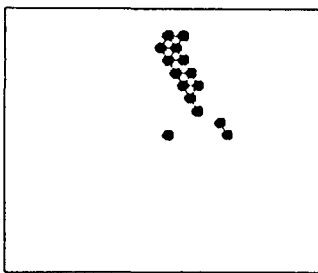


図3 棒状の受容野

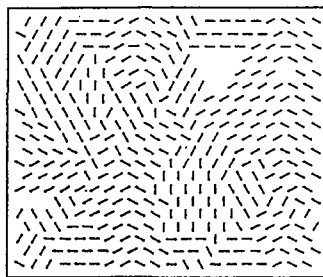


図4 方向毎の棲み分けが
一様な最大応答野

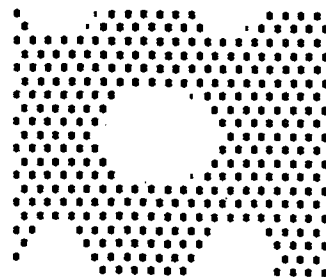


図5 $\theta = \pi/6$ の縞パターン
入力に対する影響野
(cf. Blasdel and Salama, 1986)

最大応答野の結果は、レチノトピーと方位選択性の連続性の混在状態を示している。各ニューロンの最大応答角は、(Hubel and Wiesel, 1977) の生理学実験に定性的に対応している。また、隣り合うニューロンの受容野は近い位置にありレチノトクピーが成立している。

第5章 物理系とのアナロジー

この章では、このモデルの全受容野が、特定の条件下で物性物理学におけるスピン系のサイト磁化として解釈できることを示す。

出力関数 f として、4章で用いた(3)式を用い、 $\overline{z_i^\mu} = (m_i^\mu + 1)/2$ という変数変化を行った。入力パターンが等確率で提示される場合に、この神経系の平衡状態の方程式(2)は、2次元 Ising スピン系の平均場方程式

$$m_i^\mu = \tanh \left[\frac{1}{T} \left(\frac{c}{2M} \sum_{\nu=1}^M v_{\mu\nu}^{(i)} (1 + m_i^\nu) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N w_{ij} (1 + m_j^\mu) - h \right) \right] \quad (4)$$

に書き換えることができ、第3章のシミュレーションの結果を、このスピン系の振舞いとして理解できる。(4)式に含まれる自己場と呼ばれる有効場 ($\mu = \nu$ の項) の効果によって外界と初期結合に大きく依存する生物系特有の性質を理解することが可能である。

第6章 総括と結論

本章は本研究の結果と結論の総括と今後の展望について述べている。本研究の結論を要約すると、以下ようになる。

側抑制を持つ2次元の神経回路網で、方向選択性の自己組織化が起こることを示すことができた。

側抑制を持つ神経回路網の基本的性質を、解析的方法及びシミュレーションで明らかにすることができた。

審査結果の要旨

生後間もない猫や猿の大脳皮質の視覚野において、眼からの視覚刺激によって方向選択性などの神経細胞の組織化が起こる。この様な大脳皮質の自己組織化の問題を神経回路網のモデルで研究することは、脳における情報処理の研究という観点から非常に興味ある問題である。この問題に関して、連続神経場の一次元二層モデルの解析および短時間のシミュレーション研究はあるが、より現実的な離散的な神経回路網で、しかも二次元二層モデルでかつ平衡状態の極限で、自己組織化が起こるかどうかはまだ明らかにではない。本論文は、側抑制のある離散的な神経回路網モデルで、一次元から二次元へと段階的にモデルの基礎的な性質を明らかにし、二次元のアンサンブル入力により、平衡状態において二次元二層モデルに方向選択性の自己組織化が起こることを示したもので、全編六章よりなる。

第一章は序論である。

第二章では神経回路網モデルを説明し、入力層からのパターン入力によるシナプス結合強度の変化を、Hebbの学習則をとりいれた基礎方程式で記述している。

第三章では一次元のモデルの基礎的な性質として、パラメータの間の4個の不等式を導き、これらをパラメータ値の選択上の参考基準とした。更に様な入力アンサンブルの場合には、平衡状態の受容野に対する方程式を導き、連続解とブロック解が得られることを示している。この連続解が連続的な方向選択性に対応する結果である。また、二次元の入力で一次元の出力のときも同じ様に扱えることを示している。

第四章では、二次元のパターンのアンサンブル入力によって二次元の出力層に方向選択性の自己組織化が行なわれることを示している。スポット入力に対する受容野、出力層のニューロンの最適応答性を示す最大応答野、各入力パターンに対する影響野なども具体的に図示している。

第五章では、受容野の方程式はある条件の下で物性理論のスピン系の平均場理論の式と同様な形をとることを示し、自己組織化を物理学的な観点から議論している。

第六章は総括と結論である。

以上要するに本論文は、側抑制のある神経回路網の基礎的な性質を明らかにするとともに、二次元二層モデルに方向選択性の自己組織化が生ずることを示したもので、応用物理学の進歩に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。