

|         |   |
|---------|---|
| 氏名(本籍)  | やまな ともひろ<br>山名 智尋(長崎県)                                      |
| 学位の種類   | 博士(情報科学)  |
| 学位記番号   | 情博第152号   |
| 学位授与年月日 | 平成12年3月23日  |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当  |
| 研究科, 専攻 | 東北大学大学院情報科学研究科(博士課程) システム情報科学専攻                             |
| 学位論文題目  | リミットサイクルをアトラクタとするニューラルネットワークの基礎的性質とその実装の研究                  |
| 論文審査委員  | (主査)<br>東北大学教授 沢田 康次 東北大学教授 中島 康治<br>東北大学教授 星宮 望<br>(工学研究科) |

## 論文内容要旨

### 1 序論

従来ニューラルネットワークの研究分野では人間が行う情報の記憶や想起のメカニズムをネットワークが持つ安定固定点に対応させ、主に静的な記憶についてエネルギー関数や記憶容量などの議論が交わされて研究が進められてきた。ところが生物や人間の認識や行動は、単に現在の感覚入力に関数として決まっているものではなく、その内部の心理的状態や複雑な思考過程に依存した動的なものである。このような脳、神経系のダイナミカルな情報処理の機構を、ニューラルネットモデルにより、解析するためにはそのトポロジーを対称結合や一方結合に拘束せず、非対称で相互結合を有しているネットワークの性質と、そこにある学習の原理を探っていくことが重要である。

また最近では時系列情報処理などの動的な情報処理に対して、様々な研究が進められていて、それらの話題の1つに非対称シナプス結合を持つニューラルネットワークからカオスやリミットサイクル等が現れるということがある。ネットワークの持つ安定固定点が議論されていた頃には、これらの現象は静的な記憶を不安定にするものとして扱われていたが、最近カオスやリミットサイクルなどの現象は脳の情報処理において重要な役割を果たしていることも指摘されている。

我々はネットワークが持つリミットサイクルを動的な記憶としてとらえ、それを時系列情報処理などに積極的に応用していこうというのが基本的な立場である。そのような立場に立った場合、1つの興味としてどのような結合を持つニューラルネットワークからどのようなタイプのリミットサイクルが生成されるかといった問題がある。1次元で周期的な結合のニューラルネットワークが持つリミットサイクルと平衡点の性質、および素子数や結合に対するその数の変化が Park らによって報告されている。

本研究ではニューラルネットワークを動的メモリとして応用することを目的としている。そしてこの目的を実現する上で存在する様々な問題を解決するために考察をおこなった。まずリミットサイクルや平衡点などのアトラクタとその流域構造がどのように形成されるのかを明らかにするためにツリーを応用したデータ構造を考え、そのデータ構造をアトラクタと流域構造として保存するためのアルゴリズムを提案した。また工学的に応用として、ニューラルネットワークをハードウェアとして実装することを考え、ニューロンの基本素子として多数決回路を用い、そのシナプス実現方法を提案して9素子の全結合型集積化人工神経回路網を設計し、SPICE シミュレーションによりその動作を確認した。

### 2 循環結合型人工神経回路網

図1に循環結合型ニューラルネットワークの結合トポロジーを示す。中央に番号が振られた丸がニューロンを表し、片側だけの矢印が一方結合を表し、両側の矢印が双方結合を表す。この図では隣接結合が2の場合を示している。

また人工神経回路網の力学は次のような離散時間の方程式により表される。

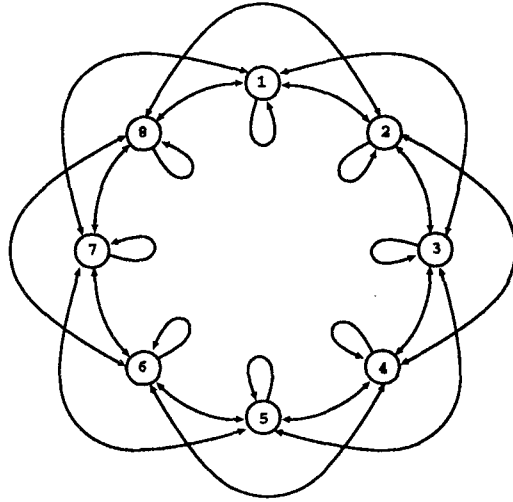


図 1: 循環結合型ニューラルネットワーク

$$\begin{aligned}
 u_i(t+1) &= \sum_{j=1}^N W_{ij} V_j(t) \\
 V_j(t) &= f(u_j(t))
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで  $N$  はニューロン数,  $u_i$  はニューロンの膜電位,  $V_j$  はニューロンの出力,  $W_{ij}$  はニューロン  $j$  からニューロン  $i$  への結合の強さである. また関数  $f$  は次のように表される.

$$f = \begin{cases} 1, & \text{for } u \geq 0 \\ -1, & \text{for } u < 0 \end{cases} \tag{2}$$

またこの神経回路網は, 結合が非対称である. 素子数が 6 個の場合の結合のマトリクスは次のように表される.

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} \alpha & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & \alpha & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \alpha & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \alpha & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha \end{pmatrix} \tag{3}$$

ここで  $\alpha$  は自己結合定数であり,  $0 < \alpha < 2$  である. このマトリクスに示すように 1 つ前のニューロンから興奮性の結合, 1 つ後ろのニューロンから抑制性の結合を持ち, 自分自身からもフィードバック結合がある状態では, 神経回路網全体において平衡点やリミットサイクルあるいはそれらへの引き込み等のダイナミクスが現れる. Park の研究により循環結合型人工神経回路網の素子数に対するリミットサイクルの数や周期が明らかになっている.

### 3 循環結合型人工神経回路網のアトラクタとその流域構造の新しい解析方法

本章はニューラルネットワークの状態遷移図の詳細な構造を解析するために, 離散力学系におけるアトラクタをツリーを持つデータとして保存するためのデータ構造の構成とアルゴリズムを提案し, ニューラルネットワーク離散時間モデルのアトラクタとその流域構造を調べた. 平衡点を静的な記憶, リミットサイクルを

動的な記憶と考えたときにネットワークが平衡点を多く持つかリミットサイクルを多く持つかで静的な記憶を保持するのに適しているか、動的な記憶を保持するのに適しているかを示すことができると考える。この考え方に基づいて、自己結合 3 種類、隣接結合の型 3 種類の合計 9 種類のネットワークに対して 隣接結合の数  $k$  を変化させながら、平衡点の数やリミットサイクルの数を調べ、さらにそのアトラクターの流域構造を調べた。

- 計算機科学の分野で用いられているツリーというデータ構造を応用して独立したデータとして保存する方法を提案し、自己結合 3 種類、隣接結合 3 種類の合計 9 種類のネットワークについてアトラクターの数やその流域の性質を調べた。
- 本研究で提案したデータ構造とアルゴリズムを用いると離散力学系の方程式であれば、素子数  $N = 20$  くらいまでの全てのネットワークを解析する事ができる。
- ネットワークの結合トポロジーによって静的な記憶を多くもつネットワークとして有効であったり、動的記憶を多く持つネットワークとして有効であったりすることを明らかにした。また流域の性質も結合により変化することが分かった。
- 状態遷移図をアトラクタとその流域という独立したデータとして保存してそれをもちいて流域の大まかな性質を調べることができたが、ニューラルネットワークの状態遷移の構造を詳細に議論するにはグラフ描画アルゴリズムなどを提案して視覚的に観察することも重要である。

全体の結果としてネットワークのアトラクターの流域構造の形成のされ方を平衡点とその流域の状態数が全空間に占める割合が大きいのかリミットサイクルとその流域のほうが大きいかで判断した場合、ほとんどのネットワークは自己結合と隣接結合の型によってその支配的なアトラクターが決定され、それは  $k$  にほとんど依存しないが、9 種類のネットワークの内 2 種類のネットワークは隣接結合の数  $k$  によって平衡点とその流域が全空間に占める割合とリミットサイクルとその流域が全空間に占める割合が変化することを明らかにすることができた。

## 4 神経回路網のハードウェア実装

本章では 2 章 3 章で論じた神経回路網をハードウェアとして実現するために、CMOS インバーターの出力を多段接続した多数決回路をニューロンの基本素子とする。多数決回路は回路の入力数を  $N$  とし、入力電圧の High レベルを 1 とし、low レベルを 0 とした場合、1 の入力数が  $(N + 1)/2$  より大きければ、1 を出力し、それよりも小さければ、0 を出力する回路である。このような動作はまさに 2 章で説明したニューロンの方程式の出力関数と同じ閾値素子と同じである。2 章および 3 章で考察したネットワークはそのシナプス荷重値が  $-1, 0, 1$  と限定されたものであった。しかしその 3 値の荷重値でもその結合の組合せによって全体としての振舞いに明確な違いが出てくる。本研究ではその可変シナプスの実現方法を提案し、集積化人工神経回路網を最小線幅  $0.6\mu\text{m}$ 、 $4.5\text{mm}$  角のプロセッサーで設計した。さらに SPICE シミュレーションで回路の動作の検討をおこない、リミットサイクルや平衡点などが回路の動作に現われることを確認した。集積化したチップは現在 VDEC に提出中であり、今後回路の動作確認をおこなっていく予定である。

## 5 結言

本研究はニューラルネットワークを動的メモリとして応用することを目的として、それを実現する際に生じる様々な基礎的な問題を解決するためにおこなわれた。離散力学系における状態遷移図を保存するためのアルゴリズムの提案、およびそのアルゴリズムを用いて循環結合型ニューラルネットワークのアトラクタとその流域の性質を解明することを試みた。またニューラルネットワークのハードウェア実装として、また多数決回路を用いた集積化人工神経回路網の設計とその評価をおこなった。以下に本論文の特色を示す。

従来人工神経回路網の研究分野では回路網の状態遷移図は一般に極めて複雑な構造をしていてほとんど解析がすすんでいない。本研究で提案したアルゴリズムによってアトラクターとその流域の詳細な構造をそのままオブジェクト指向に基づいたデータとして保存できるので、個々のアトラクターの流域の大きさやその全体としてのクラスター構造を詳細に解析できるという特徴がある。本手法によって神経回路網の状態遷移図の構造をより明確にできるという点で、この研究分野に貢献をしたと考える。

また動的メモリ状態を必要とする様々な応用が期待される集積化チップを実現し、情報工学の発展に寄与するところが少なくないと考える。

## 論文審査の結果の要旨

従来の人工神経回路網は主として素子間の結合が対称的なものに限られていたため、アトラクタが不動点に対応していて、それに対応すると考えられている記憶状態は静的なものであった。最近Park等は非対称結合の中で一番単純な隣接結合のみを持つ循環型ネットワークが持つ動的メモリとしてのリミットサイクルの研究を行ったが、アトラクタの流域構造については未知のままに残されていた。

著者は、計算機科学の分野で用いられているデータ構造とその解析アルゴリズムをアトラクタの流域構造の研究手法に応用して、非対称神経回路網のダイナミックなメモリ構造を研究し、さらに動的なメモリの応用が期待されている半導体集積化チップの設計を行った。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全文5章からなる。

第1章は序論で本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、本論文で研究対象とした一般化循環型人工神経回路網が隣接結合が正で対称的なもの、負で対称なもの及び反対称なもの3種類、自己結合が正、負、零の3種類、更に隣接結合数( $k$ )の組合せによって分類されることを述べている。

第3章では、ツリー、リスト等を用いたデータ構造の整理法とその解析法を含むアルゴリズムを提案し、流域を持つ不動点やリミットサイクルが多数存在する神経回路網の研究に応用する方法について述べている。反対称結合の場合はリミットサイクルの数は $k=1$ の場合だけは神経素子の数( $N$ )と共に急激に増大するが、 $k>1$ の場合は $N$ と共にほとんど増大しないこと、しかし、 $k$ の値に関わらずリミットサイクルと流域状態の合計は $N>6$ で95%以上に達することを明らかにするなど、このアルゴリズムを用いて前章で分類した神経回路網のアトラクタと流域構造を調べている。この新しいアルゴリズムの提案は極めて有用であり評価できる。

第4章では、静的メモリと動的メモリの切り換えが可能な集積化チップとしてCMOSインバータを多数接続した多数決回路を基本神経素子とする9神経素子、81シナプス及び約7000のトランジスタを含む循環型神経回路網の集積化チップを設計し、スパイスシミュレーションによってこのチップの動作が第3章のシミュレーションと一致することを明らかにし、動的メモリとして有用であることを実証した。このことは高く評価できる。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、反対称結合回路を含む循環型神経回路網のアトラクタと流域構造を新しく提案したアルゴリズムによって明らかにし、動的メモリ状態を必要とする様々の応用が期待される集積化チップを実現したものでシステム情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。