

|           |                                                                            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名       | セルヴァトナム クカン<br><b>SELVARATNAM Kukan</b>                                    |
| 学位(専攻分野)  | 博 士 (学 術)                                                                  |
| 学 位 記 番 号 | 博 甲 第 226 号                                                                |
| 学位授与の日付   | 平成12年 3 月 24 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    | 工芸科学研究科 情報・生産科学専攻                                                          |
| 学位論文題目    | <b>Learning and Synthesis Methods of Recurrent Spiking Neural Networks</b> |
| 審 査 委 員   | (主査)<br>教授 森 武 宏<br>教授 三宮 信夫      教授 吉田 靖夫      助教授 黒江 康 明                 |

## 論 文 内 容 の 要 旨

近年、生物の脳の情報処理能力を模倣した人工ニューラルネットワークの研究が盛んに行われている。これらの多くの研究におけるニューラルネットワークを構成するニューロンのモデルは、信号の重み付き加算和と出力関数としてのしきい値関数あるいはシグモイド関数からなるもので、情報は信号の平均的な大きさにエンコードされ処理されるとするものである。ところが、実際の生物のニューラルネットワークにおいて情報は、構成されるニューロンが発生するパルス列の時間間隔にエンコードされ情報処理が行われることが知られており、これを裏付ける生理学的知見も多くある。このことを反映したニューロンおよびニューラルネットワークのモデル自体は古くニューラルネットワークの研究が始まった頃から提案されていたが、最近スパイクニューロン (Spiking Neuron) あるいはスパイクニューラルネットワーク (Spiking Neural Network) として、より生体に近いモデルとして再びこのモデルを対象とした研究が活発となり、その情報処理能力の解析を中心として盛んに研究されるようになってきている。本論文はこのようなスパイクニューラルネットワークを対象として、情報処理における基本的な問題である学習法およびネットワークの設計法について研究したもので、以下に示す5章から構成されている。

第1章は序論で、本研究の動機と意義、歴史的背景および本論文の構成が述べられている。

第2章では、本論文で対象とするスパイクニューラルネットワークの数学モデルを示している。まず、対象とするintegrate - and - fire type のスパイクニューロンの機構および数学モデルが示され、さらにそれらが任意に結合したニューラルネットワークの数学モデルが示されている。本論文で対象としているのは、このように構成されるリカレントスパイクニューラルネットワークで、このモデルは階層型ネットワークなどこれまで提案されているモデルのアーキテクチャーのほとんどを含む一般的なモデルとなっている。

第3章では、リカレントスパイクニューラルネットワークの学習法について議論している。ここで学習問題をどのように考えるかが問題となるが、生物の実際のニューラルネットワークにおいてはニューロンが発生するパルス列の時間間隔に情報が埋め込まれて処理されていることに着目し、対象とするリカレントスパイクニューラルネットワークの各ニューロンの出力が任意の時間間隔を持つ任意の個数のパルス列を発生させるようネットワークを構成する問題として定式化している。すなわちネットワークに発生させたいパルスの時刻列を教師信号とし、これとネットワークが実際に発生するパルスの時刻列との自乗誤差を評価関数とし、これを最小とするネットワークの結合重みを決める学習問題として定式化している。この問題は最急降下法など勾配法に基づく方法で解くことができるが、その際問題となるのが評

評価関数の結合重みに関する勾配をどのように導くかである。この方法として、ネットワークがパルスが発生する時刻が結合荷重に関する陰形式の非線形関数として表されることを考慮し、ネットワークの感度方程式モデルを導出することにより計算する方法を提案している。またこの計算のための効率の良いアルゴリズムも導いている。さらに、ネットワークの結合荷重の値が変化するとネットワークが発生するパルスの個数が変化し、このことも学習において非常に問題となる。この問題に対しては、学習における評価関数にパルスの個数の変化をペナルティとするような項を新たに付け加え学習することにより解決している。

第4章では、スパイクニューラルネットワークによるニューラルオシレータの設計法について議論している。生物においては、歩行、咀嚼、心臓の鼓動、呼吸など周期的な運動が多く見られ、これら周期的な運動のパターンの発生はある神経系が司る、すなわち生体にニューラルオシレータなるものが存在しこれが司っていると考えられている。そこで本章では、リカレントスパイクニューラルネットワークを対象として、任意の個数の任意の時間間隔の周期的なパルス列を発生するニューラルオシレータをネットワークの結合荷重の学習により構成する方法を提案している。この学習問題においては定常状態の振動を扱うため、一般に、対象とするネットワークの定常状態を求める必要があり、学習効率が特に問題となる。この問題に対し本論文では、学習における評価関数に定常状態が満たすべき条件を境界条件として付加し、結合荷重に加えネットワークの状態も学習パラメータとするよう学習問題を設定し、学習アルゴリズムを導出している。その結果非常に効率の良い学習アルゴリズムが導びけることになる。

第5章は結論で、本論文をまとめている。

#### 論文審査の結果の要旨

ニューラルネットワークの研究は、情報処理における新しいパラダイムとして、また従来の情報処理技術のブレイクスルーになりうるものとして、近年非常に注目されている。中でも学習の問題はニューラルネットワークの研究の中心的な課題で盛んに研究されてきた。シグモイド型の階層型ニューラルネットワークに対しバックプロパゲーション法と呼ばれる学習法が提案され、これが1980年代中頃からのニューラルネットワークの研究の爆発的なブームの火付け役の一つとなったことは記憶に新しく、またこの学習法を用いてパターン認識をはじめ制御、信号処理など多くの工学分野への応用の研究が盛んに行われた。本論文もこのような学習問題を扱っているが、i) より生体に近いニューラルネットワークのモデルであるスパイクニューラルネットワークを対象としている、ii) 任意のアーキテクチャのネットワークが扱える、iii) 生体のニューロンの情報処理が発生パルスの時刻列に情報が埋め込まれ処理される、などの事実に着目し、学習問題を任意のパルス列を学習する問題として定式化していることが特徴であり独創的な点である。また、スパイクニューラルネットワークのダイナミクスは不連続性を含む非線形特性で、その取り扱い従来からのシグモイド型ニューラルネットワークに比べはるかに困難となる。本論文では、このような困難さを持つモデルを数理的に厳密に扱い学習アルゴリズムを導いており、導かれた学習アルゴリズムの有用性はもとより、このような不連続性を含むモデルを数理的に厳密に扱う上での大きな示唆をも与えており、その価値は非常に高い。また、提案されている学習法も先に述べたバックプロパゲーション法と同様種々の工学的な応用が考えられ、この意味でも価値が高いと考えられる。また、4章で提案されているニューラルスパイクニューラルオシレータの設計法は、3章で提案された学習法の実問題への拡張となっており、生体内の様々なリズムの発生機構を考察する上でも重要であり、また繰り返しを伴うロボットなどのパルスによる運動制御への応用などの工学的応用も考えられ、非常に有用である。

以上のように本論文は、ニューラルネットワークによる情報処理の新しいパラダイムを築く上での果たす役割は大きいと考えられ、学位論文として十分価値あるものと判断できる。なお本論文の内容は下記の、レフリー制度のある学術論文誌および国際会議録に筆頭著者として、掲載済みとなっている。

1. Kukan Selvaratnam, Yasuaki Kuroe and Takehiro Mori, "Learning Methods of Recurrent Spiking Neural Networks - Transient and Oscillatory Spike Trains", Transactions of the Institute of Systems Control and Information Engineering, Vol. 44, No. 3, pp. 95-104, 2000
2. Kukan Selvaratnam, Yasuaki Kuroe and Takehiro Mori, "Synthesis of Spiking Neural Oscillators", Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 1, pp. 490-495, Oct. 1999