

## 論文の内容の要旨

氏名：佐々木 芳 樹

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：VLSI 実装を考慮したパルス形ハードウェアカオスニューロンモデルとニューラルネットワークへの応用に関する研究

近年、ソフトウェアを用いた人工知能技術が発達しており、運転操作など従来人間が行っていた高度な処理を自動で行うことが可能になりつつある。しかし、ソフトウェアを用いた人工知能技術により高度な処理を行うためには、膨大な電力や、広大な実装空間を必要とするなど、一般への普及には多くの課題が残る。

一方、生体の脳は 20 ワットの低消費電力かつマイクロメートルの低実装サイズで高度な処理を実現している。生体の脳における学習を含めた高度な処理能力の動作原理は完全には解明されていないものの、生体の脳が行うアナログの性質を持つパルス波形を含めた特性を細胞ごとにハードウェアで再現し、人工ニューラルネットワーク（以下、ANN）を構築し、VLSI 実装することで生体の高度な処理能力を低消費電力かつ低実装サイズで実現することが可能である。パルスを用いるハードウェアニューロンモデルの研究は、大別するとデジタルパルスを用いるモデルと、アナログパルスを用いるモデルがある。前者は論理回路を用いるため VLSI 実装を行うことは比較的容易であるが、デジタルパルスを信号伝達に用いるため、生体の脳で見られるカオス現象を再現するのは困難である。一方、後者はアナログ回路を用いるため半導体特性のばらつきによる影響があるものの、アナログパルスを情報伝達に用いる生体の脳を再現することには適している。以上より、生体の高度な処理能力を低消費電力かつ低実装サイズで実現するためには、VLSI 化可能なアナログパルスを情報伝達に用いるモデルを用いることが重要である。このモデルの代表例として、パルス形ハードウェアカオスニューロンモデル（以下、P-HCNM）があり、多くの ANN が提案されている。しかし、大規模 ANN を構築した場合、個々のニューロンモデルにおいて特性のばらつきが生じ、外部刺激により動作する他励振モデルや、自発的に動作する自励振モデルなどの励振状態が、VLSI 化した際に正常動作させることが難しい。また、P-HCNM には外部刺激として入力可能な電流値に上限が存在するが、ホップフィールドネットワークなどの ANN を構築する場合、1 つの P-HCNM に入力される電流値は ANN の規模に応じて増大する。したがって、大規模な ANN を構築した場合、P-HCNM に入力可能な電流上限を超えることから正常な動作を得ることは難しい。そこで、ANN の大規模化のためには、P-HCNM の励振状態を補償する技術および入力可能な信号許容範囲の改善手法について検討を行う必要がある。

本論文では P-HCNM の励振状態を補償する技術および入力許容範囲の改善を行い、ホップフィールドネットワークの ANN を構築することを目的とする。まず、P-HCNM のバイアス回路に起因する電源逆流電流および信号振幅の補償手法、および出力回路に起因する励振状態のばらつき、および入力許容範囲の補償手法をそれぞれ提案し、VLSI 化した P-HCNM にて実験を行うことで有効性を検証した。また、改善を行った P-HCNM が ANN に対し有効であることを確認するため、ホップフィールドネットワークを構築し、連想想起動作をシミュレーションにより解析した。本論文の成果は、MOSFET のばらつきによる静特性形状の変化に関わらず、負荷電流値を自動補正する回路により励振状態をロバストに補償することを実測により明らかにしたことである。また負性抵抗特性制御回路により入力許容電流の上限をなくすことが可能であることを実測により明らかにしたことである。さらに、改良した P-HCNM によりホップフィールドネットワークの連想想起機能が正常に動作可能であることをシミュレーションにより明らかにしたことである。本論文は、6 つの章から構成する。以下に概要を示す。

第 1 章では、本論文の背景として人工知能デバイスの現状について述べ、パルス波形のアナログ性やカオス性などを忠実に再現可能なニューロンモデルを研究することの必要性について述べた。また、本論文で対象とする生体の細胞体について述べ、さらにハードウェアとして構築する ANN としてホップフィールドネットワークについて述べた。その後、P-HCNM の VLSI 実装を行う本論文の目的について述べ、最後に本論文の構成について述べた。

第2章では、制御対象となる特性の単純化を実現するため、P-HCNMを $\Delta$ 形負性抵抗により構成した多安定回路とバイアス回路とみなし解析を行った。P-HCNMを多安定回路とみなすことにより、MOSFETの静特性形状の変化に関わらず、P-HCNMの発火原理を出力端子電圧が0Vにおける出力端子への流入電流と流出電流の大きさのみで考えることが可能となる。本章では、 $\Delta$ 形負性抵抗素子および多安定回路の静特性について述べた後、P-HCNMを多安定回路とみなした際の動作原理、課題点について述べた。

第3章では、P-HCNMのバイアス回路部に起因する課題の解決手法について述べた。従来のP-HCNMでは、バイアス電圧を生成するキャパシタの放電経路として、MOSFETの基板を通じた電源へ逆流する経路を持つ。MOSFETの基板を通じて電源に逆流することにより、電源電位に多大なノイズを与え、さらにP-HCNMの出力振幅の低減を招いていた。電源電位の安定性はP-HCNMの励振状態を安定化させるために必要な要素であり、また振幅余裕はホップフィールドネットワークの信号処理における正確な情報伝達のために必要となる。本章では、バイアス回路の放電経路を新たに追加する構成を提案した。解析により、従来構成に比べ電源逆流電流を100万分の1以下に抑制可能であり、また電源電圧に対する振幅電圧を従来の73.8%から94.4%へと改善することが可能であることを明らかにした。

第4章では、P-HCNMの出力回路部に起因する課題の解決手法について述べた。第2章により、P-HCNMが発振動作を行うためには、多安定回路の出力電圧を0Vとしたときの $\Delta$ 形負性抵抗の出力電流値 $I_{\Delta 0}$ が、負荷電流値を上回ればよい。したがって、 $I_{\Delta 0}$ を制御することにより発火を制御することが可能であると考え、新たな制御手法を提案した。 $I_{\Delta 0}$ には最大値が存在するため、制御を行うためには $I_{\Delta 0}$ が負荷電流値を上回ることが可能であることを保証する必要がある。したがって、 $I_{\Delta 0}$ の最大値を推定し、負荷電流値が $I_{\Delta 0}$ の最大値以下となるよう自動的に補正する機構を提案した。解析により、自動補正機構及び $I_{\Delta 0}$ の制御回路を用いることで、素子ばらつきにより生じた静特性形状の変化に関わらず、発火制御を行うことが可能であることを明らかにした。また、入力可能な電流値の上限をなくすことが可能であることを明らかにした。さらに、作製したVLSIサンプルの測定を行った結果、すべてのサンプルにおいて正常な動作を得ることが可能であることを明らかにした。

第5章では、P-HCNMを用いたホップフィールドネットワークの連想想起について検討した。従来のP-HCNMは、入力許容電流に上限があるため、P-HCNMに入力された電流の合計値がしきい値以上であれば、入力電流に上限をつけず動作することが求められる大規模なホップフィールドネットワークを正常に動作させることが困難である。本章では、P-HCNMを第3章および第4章により改善したモデルを用いてホップフィールドネットワークを構築し、連想想起機能について検討を行った。解析の結果、改良を行ったP-HCNMを用いることで、ホップフィールドネットワークの連想想起機能である画像補修および時系列パターンの想起を行うことが可能であることを明らかにした。

第6章では、結論として本論文の成果と今後の課題について述べた。本論文では、P-HCNMのバイアス回路および出力回路に起因する課題を補償可能な回路を提案し、ホップフィールドネットワークを構成した。本論文の成果は、VLSIの製造ばらつきなどに起因するMOSFETの特性ばらつきに関わらず、自動補正機構により励振状態をロバストに補償することを実測により明らかにしたことである。また負性抵抗特性制御回路により入力許容電流の上限をなくすことが可能であることを実測により明らかにしたことである。さらに、上記の改良P-HCNMによりホップフィールドネットワークの連想想起機能が正常に動作可能であることをシミュレーションにより明らかにしたことである。この成果は、生体を再現した低消費電力かつ低実装サイズな人工知能のための要素技術としての貢献が期待できる。