

## 審査の結果の要旨

Digital silicon neuronal network and its application to associative memory  
(デジタルシリコン神経ネットワークとその連想記憶メモリへの応用)

氏名 李菁

本論文は、デジタル演算回路によるシリコン神経ネットワークの、ユーザによるプログラムが可能な論理演算デバイスであるFPGA上での実装と、連想記憶への応用について述べている。近年、半導体プロセスの微細化速度の低下や製造コストの増大などによって、マイクロプロセッサによるデジタルコンピュータの性能向上が難しくなっている。これに対して、神経系を模倣した新しい計算原理で動作するシステムにより、自律的でロバストな計算システムを目指すニューロモルフィックシステムの研究が行われており、シリコン神経ネットワークはその一つである。神経ネットワークの模倣電子回路であるシリコン神経ネットワークの設計と構築、その応用について、本論文で以下の通り述べている。

第一章は、シリコン神経ネットワークの基盤となる神経モデル、シナプスモデルについて述べると共に、先行研究をレビューしている。

第二章は、本論文のシリコン神経ネットワークのモデルについて、シリコンニューロン、シリコンシナプス、及び、シナプス荷重のモデルについて述べている。シリコンニューロンモデルは、先行研究で開発された、非線形動力学の視点からFPGAでの実装に最適化されたモデル(DSSNモデル)を採用し、シリコンシナプスについては、化学シナプスのキネティックモデルをFPGA実装を念頭に簡略化したモデルを開発している。本シリコンシナプスが、ホジキン分類クラス2の神経細胞に特有のグレーデッドレスポンス(入力強度や内部状態に依存して発火波形が変動する)の情報を後シナプスシリコンニューロンに伝達できることを示している。また、DSSNモデルのFPGAによる実装時に回路が簡略化できるパラメータ設定をクラス1、2の両方について見付けている。

第三章は、第二章で示したシリコン神経ネットワークモデルをFPGA上に実装するための回路構成について論じている。FPGAチップの動作クロックと消費リソースのトレードオフを念頭に、パイプライン化された演算ブロックを並列配置することで、単体FPGAチップ上に、スパイクタイミング依存性学習機能のついた256ニューロンの全結合ネットワークを構築し、このネッ

トワークが神経系と同等の速度を約2.7MHzのシステムクロックで実現でき、100MHz以上の動作が可能であることを示している。

第四章では、第三章までに述べたシリコン神経ネットワークのスパイクタイミング依存性学習機能を用いず、相関学習によって自己連想記憶を行った場合の性能を評価している。自己連想記憶の想起性能を、オーバーラップとPSIの二つの指標を用いて評価し、ノイズの混入した入力パターンから記録パターンの想起に成功した場合には、シリコンニューロン間の同期度が高くなりPSIがほぼ1となることを示している。さらに、シリコンニューロンがクラス1の場合に比べ、クラス2の場合の方がより多くのノイズの混入したパターンから記録パターンを想起できることを示している。

第五章では、スパイクタイミング依存性学習機能を有効化し、入力パターンからヘブ学習則及び非対称性STDP学習則により自己連想記憶及び時空間パターンの記憶を行い、シリコンニューロンがクラス1の場合について性能を評価している。スパイクタイミングに依存したヘブ学習に対して境界条件を組み込んだ5つのモデルについてシミュレーションを行い、シナプス抑制を考慮したモデルが、相関学習に比べて、より多くのノイズの混入したパターンから記録パターンを想起できることを示している。また、非対称性STDP学習において、ノイズ入力に対して、学習時に提示した順序で記録パターンを想起できることを示し、時空間パターン記憶の可能性を示している。

以上要するに本論文は、DSSNモデルと新たに開発したシリコンシナプスモデルとを組み合わせることにより、先行研究では不可能であった、クラス2ニューロンのグレーデッドレスポンスの情報をシナプス後ニューロンへ伝達できる全結合シリコン神経ネットワークモデルを構築、安価で入手性のよいデバイスを用いて回路化すると共に、ニューロンクラスが相関学習による自己連想記憶の性能に影響すること、ニューロン間の同期度に想起の成功率が反映されること、ヘブ学習による自己連想記憶の性能、非対称性STDP学習による時空間パターン学習の可能性を示し、シリコン神経ネットワークの構築、応用に有用な知見を与えたもので、ニューロモルフィックシステムおよび電子工学へ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（工学）の学位請求論文として合格と認められる。