

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 15 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500290

研究課題名(和文)同時摂動学習則を用いた高次元ニューラルネットワークの提案とハードウェア化

研究課題名(英文)High dimensional neural networks using simulations perturbation learning rule and their hardware implementation

研究代表者

前田 裕 (MAEDA, Yutaka)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：60209393

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次の点について研究を行った。1)同時摂動を用いた複素、四元数および八元数ニューラルネットワークの提案を行い、通常のバックプロパゲーション法と同等の性能を有していることが分かった。2)学習機能を持つ複素ニューラルネットワークをパルス密度による数値表現を用いてFPGAシステムとして実現した。3)複素、四元数ニューラルネットワークに、ロボットの逆キネマティクスを学習させることができ、学習したニューラルネットワークが汎化性を持ち、制御器として機能することを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we handled the following points. 1) We proposed learning schemes for high dimensional neural networks based on the simulations perturbation optimization method. We confirmed that the proposed schemes have good performance equal to the ordinary back-propagation method. 2) We considered hardware pulse density complex-valued neural network with the simulations perturbation learning rule based on FPGA system. We made the system experimentally. The system learnt some basic benchmark problems properly. 3) As an application of the proposed high dimensional neural networks, we handled control problems for robot systems. The neural networks learnt inverse kinematics of objective robots and have generalization capability.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：ニューラルネットワーク 同時摂動 クリフォード代数 ハードウェア FPGA 制御

## 1. 研究開始当初の背景

ニューラルネットワークは、学習により、そのシステムの機能と特性を柔軟に変化できる。したがって、学習機能を有する各種ニューラルネットワークの設計手法を確立することにより、学習するデジタル回路システムあるいは学習するアナログ回路システムを作ることとも可能であると考えられる。さらに、学習する、進化するハードウェアシステムの構築は喫緊の課題でもある。

近年、複素ニューラルネットワークに代表される高次元ニューラルネットワークが、その信号処理や図形処理能力、豊富な表現能力から注目を浴びている。その学習はバックプロパゲーションが基本である。より高速な動作が実現できる、学習機能を持ったハードウェア化を考えると、適した学習則の開発が望まれる。この研究では、同時摂動法の高次元ニューラルネットワークへの適用とその性能検証を行った。

学習機能も含めたニューラルネットワークのハードウェア実現は、その学習にはバックプロパゲーション型の手法を用いるため回路構成が複雑になる困難性を伴っており、研究事例が少ない。これに対し、研究代表者らは、同時摂動を用いたニューラルネットワークの学習則を提案し、個別部品を用いたハードウェア化、FPGAを用いたハードウェア化、FPGAを用いたハードウェア化など、各種ニューラルネットワークのハードウェア化を実現している。この研究では、高次元ニューラルネットワークのための同時摂動則の提案、学習機能を有する高次元ニューラルネットワークのハードウェア化と応用事例に関して研究を行った。

## 2. 研究の目的

ニューラルネットワークの学習を考える場合、アルゴリズムの容易さは、ハードウェア化の観点からも重要である。ニューラルネットワークの学習として従来よく用いられているバックプロパゲーション型の手法は、誤差関数のニューラルネットワークに含まれるすべての荷重に関する偏微分をもとに学習を行う。この手法を用いた学習機能の回路実現では、誤差関数の偏微分値を解析的に求める回路の実現で困難を伴う。特に、ニューラルネットワークの規模が大きくなると荷重の数も増えるため、誤差のすべての荷重に関する偏微分を求める回路を実現するのは、回路構成上や配線上の問題があり、事実上困難である。この問題はデジタル回路での実現のみならず、アナログ回路への学習機能の実装をきわめて困難にしている要因の一つである。このため、学習機能を有したニューラルネットワークのハードウェア化の事例は少なく、特に、アナログ回路での実現では報告事例は極めて乏しい。

これに対し、同時摂動を用いたニューラルネットワークの学習則は、研究代表者らによ

って提案された手法で、誤差関数の微分値を、摂動がある場合とない場合の誤差関数の二つの値の差分から直接推定することができる。このため、各荷重の修正量は、共通に計算された、評価関数の差分量を、各荷重での摂動量で除算することにより得られる。したがって、学習回路の共通化が広範囲に行え、荷重修正のための各種回路の簡素化が可能となり、配線の輻輳も防ぐことができる。学習回路の共通化により、ネットワークの規模が大きくなっても回路構成が複雑にならない。このため、実用的な大規模なニューラルネットワークのハードウェア化において有用である。

さらに、リカレント型のニューラルネットワークの学習はきわめて複雑で、特に、バックプロパゲーション型の学習則では、これをそのままハードウェア化することは不可能である。これに対し、同時摂動型学習則はリカレントニューラルネットワークにも容易に適用でき、ハードウェア化もきわめて簡単に実現することができる。

最近ではアナログ電子回路の設計の分野においても、FPGAを用いた回路実現が可能となってきた。しかし、FPGA素子の使用数に制限があるため、大規模な回路の実現は困難である。研究代表者は、このようなFPGAを素子毎に設計し、組み合わせることで大規模なFPGAシステムの構成が行える手法を試みており、同時摂動学習則と組み合わせることで、各種のアナログ型のニューラルシステムを柔軟に作成することができる。

本研究では、同時摂動学習則を用いた高次元ニューラルネットワークのFPGAやFPGAでの実現を中心に、学習するハードウェアシステムの実現について、その設計スキームと性能を評価する。また、このシステムを用いた具体的な応用事例についても検討する。

## 3. 研究の方法

本研究では、つぎのような項目について、並行して、検討を行った。

- 1) 同時摂動を用いた高次元ニューラルネットワークの学習則の提案とその性能について検証する。
- 2) 学習機能を持つ複素ニューラルネットワークのハードウェア化のための設計を行う。
- 3) 高次元ニューラルネットワークの具体的な応用事例への適用について検討する。

1) についてはC言語、MatLabによるシミュレーションと理論解析が中心となった。2) については、FPGAおよび個別素子を用いたハードウェア化を想定して、VHDLやアナログ回路シミュレータを用いた回路設計を行った。3) に対しては、SCARAロボットや3次元ロボットの制御への応用などを中心に、具体的な想定で応用事例につい

て検証した。

同時摂動法による高次元ニューラルネットワークの提案と解析に関して、同時摂動を用いた複素ニューラルネットワーク、四元数ニューラルネットワークおよび八元数ニューラルネットワークの学習則を提案した。

提案した同時摂動型の学習法の有効性やその性能を検証するために、アフィン変換などのベンチマーク的例題を対象に MatLab を用いて高次元ニューラルネットワークのプログラムを作成した。

その結果、同時摂動を用いた高次元ニューラルネットワークが縮小や回転などの問題において学習を行うことができることが確認できた。さらに、提案学習則の収束性および収束速度についても検証を行った。

FPGAによる複素ニューラルネットワークの実現に関して、パルス密度による数値表現を用いることによりアナログ量をデジタル回路で実現でき、設計の容易性などの点で大きな利点があることを確認した。さらに、同時摂動学習則を用いることで、学習機能が容易に実現できることを確認した。

これらの事前調査を踏まえて、ハードウェア記述言語による高次元ニューラルネットワークの基本設計を行った。大容量FPGAへの実装を前提に、VHDLとよばれるハードウェア記述言語により、複素ニューラルネットワーク各部分の基本設計を行った。

基本設計された各部の回路の論理合成プログラムを実行することで、上記設計の論理合成を行い、設計上の誤りや計算精度に関する知見を得た。

並行して、複素ニューラルネットワークシステムを実装したFPGAを動作させるための周辺記憶装置とコンピュータとのインターフェイスプログラムを作成した。特に、FPGAシステムの出力をコンピュータに取り込むためのプログラムの作成とその設定などを行った。

その後、配置配線を行い、学習機能をもつ複素ニューラルネットワークシステムのFPGAへの実装を行った。

Matlabでの実現の場合と同様に、縮小および回転などのベンチマーク的問題を扱い、ハードウェアシステム全体を完成し、その動作を確認した。特に、学習動作や学習時間などの性能について、詳細に評価した。

アナログ回路による複素ニューラルネットワークの実現を目指して、アナログ回路シミュレータでの基本設計と仕様決定を行った。

ニューラルネットワークをアナログ回路で実現することは、特に、学習機能を含めると、その実現は困難を伴う。この研究では、実現の可能性を検証するために、基本的仕様決定と各部の回路構成について詳細に検討

した。

LTSpice アナログ回路シミュレータ上で、各部の動作検証を行った。

この中で、加算回路、乗算回路、電圧制御型移相回路などの基本設計と動作確認、ニューラルネットワークシステムとしての性能評価を行った。

提案する高次元ニューラルネットワークシステムの応用事例の検討に重点を置いて研究を展開した。

提案した学習則を用いた複素ニューラルネットワークおよび四元数ニューラルネットワークによるSCARAロボットおよび3次元ロボットの制御について検証した。

制御対象としてのSCARAロボットおよび3次元ロボットの逆キネマティクスを、同時摂動学習則を用いて高次元ニューラルネットワークに学習させることにより、これらのニューラルネットワークを制御器として用いる制御手法について検討した。

制御対象に関する情報を用いることなく、提案した手法により、制御対象の逆システムを学習することが可能で、学習したニューラルネットワークは制御器として用いることができることを検証した。

動物の周期動作を司るニューラルネットワークとしてのCPG(Central Pattern Generator)は、様々なモデルが提案されているが、その軌道の学習については確立した手法がなかった。そこで、同時摂動最適化法を援用したCPGの軌道学習のための手法を提案した。

この手法の有効性を確認するために、ヒューマノイドロボットの歩行パターンの学習について検討した。2つの神経振動子からなるCPGを想定した。これらに含まれる複数の定数を適切に変化させることで、CPGは異なった軌道を生成するかを検証した。

C言語による学習機能を含めたシミュレーションプログラムを作成し、検証した。また、学習後のパラメータを用いたCPGが実際のヒューマノイドロボットの歩行パターンを生成についても検証した。

さらに、複素数を変数にもつ複素CPGに対しても同様の検証を、C言語を用いたプログラムを用いて検証した。

#### 4. 研究成果

同時摂動を用いた高次元ニューラルネットワークの学習則について提案し、その性能について検証を行った結果、複素、四元数および八元数ニューラルネットワークにおいて、提案手法により学習を行うことができることが確認できた。また、収束速度や収束性についても、通常のバックプロパゲーション法と同等の性能を有していることが分かった。バックプロパゲーション法が誤差の逆伝搬を計算しなければならないことを考えると、誤差の値のみからすべての荷重の修正量

を求めることができる同時摂動学習則の簡便性は優位性をもつ。

学習機能を持つ複素ニューラルネットワークをパルス密度による数値表現を用いてFPGAシステムとして実現した。パルス密度表現と同時摂動最適化法の併用により、デジタル回路を用いて、学習機能を有するアナログの複素ニューラルネットワークシステムが実現できることが実証できた。

8つの学習点を学習させる縮小問題を提案システムで実行した。20000回の学習に80MHzのクロックで約346秒を要した。図1に、FPGAシステムでの誤差関数の変化について示す。学習が進むにしたがって誤差の値が減少している様子が分かる。

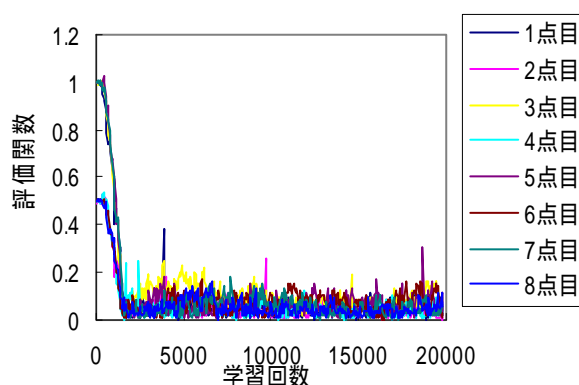


図1 FPGAシステムでの評価関数の推移

さらに、ソフトウェアによる実現と比較して、高速の学習が実現できることが検証できた。また、FPGAの集積技術の向上を受け、比較的大きな複素ニューラルネットワークのFPGA実現が可能であることが分かった。

高次元ニューラルネットワークの制御問題への応用について検証した。複素、四元数ニューラルネットワークに、ロボットの逆キネマティクスを学習させることができることが分かった。

また、学習したニューラルネットワークの汎化性についても確認し、これらのニューラルネットワークが制御器として機能することを確認した。

さらに、学習に際して、同時摂動学習則は制御対象の情報を必要としないことが確認できた。従来のバックプロパゲーション法を用いた場合、制御対象の幾何学的情報を必要とする。この点から、提案する高次元ニューラルネットワークの優位性が明らかになった。

CPGの出力軌道の学習に関して、同時摂動最適化法を用いた学習法を提案し、その有効性を確認した。CPGに含まれるパラメータが、軌道に関する情報のみから学習することができることが分かった。

CPGは、ある種のリカレント型ニューラルネットワークである。一般に、リカレント型ニューラルネットワークの学習は、誤差を時間に関して遡らせる計算が必要で煩雑になる。それに対して、同時摂動を用いることで簡便に学習則が構成できることを実証した。

さらに、複数の軌道を同一のCPGに学習させることができた。この場合、異なる入力を与えることで同一のCPGが異なる軌道を生成できることが分かった。この機能を用いることで、ヒューマノイドロボットの異なった歩行パターンを生成することができた。また、これらの結果を実際のヒューマノイドロボットに適用し、歩行が行えることを確認した。

実数型のCPGに対するこの手法は複素CPGに適用することも可能であることを確認した。複素平面上の2つの異なったパターンを、同一の複素CPGに学習させることができることが分かった。

また、学習した複素CPGを用いると、複数の軌道パターンが再現できることを確認した。

CPGの軌道の学習のための提案手法の有効性が確認できたことから、CPGの新たな活用が期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計28件)

横田崇博, 伊藤秀隆, 前田裕, カメラ動作を備えたキャリブレーションフリーロボットシステム、第14回自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、1483-1486、2013.12.19、神戸国際会議場

T. Fujiwara, Y. Maeda, H. Ito, Learning of Inverse-Kinematics for Robot Using High Dimensional Neural Networks、SICE Annual Conference 2013、2743-2748、2013.9.17、Nagoya University

K. Terada, Y. Maeda, Data Embedding for Digital Audio Data Using Known Information、8th International symposium in Science and Technology、330、2013.8.22、Kansai University

H. Fujiwara, Y. Maeda, Learning of Inverse-Kinematics for Robot Using Quaternion Neural Network、8th International Symposium in Science and Technology、329、2013.8.22、Kansai University

安藤充弥, 前田裕, 伊藤秀隆、複素ニューラルネットワークのFPGA実現、第57回システム制御情報学会研究発表講演会、344-345、2013.5.17、兵庫県民会館

Y. Maeda, H. Ito, Robot Control Using 2D Visual Information Via Database, The Second International Conference on Intelligent Systems and Applications, 83-88, 2013.4.23, Venice, Italy

石橋直之, 伊藤秀隆, 前田裕, 同時摂動を用いたリカレント型ニューラルネットワークによる SCARA ロボットの軌道制御, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 936-939, 2012.12.18, 福岡国際会議場  
横田崇博, 前田裕, 伊藤秀隆, カメラ動作を備えた Hand-eye system, 平成 24 年電気関係学会関西連合大会, 2012.12.9, 関西大学

前田裕, 安藤充弥, 伊藤秀隆, 複素ニューラルネットワークのハードウェア化, 第 2 回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会, 87-90, 2012.9.28, 岡山大学

Y. MAEDA, T. SUZUKI, H. ITO, Simultaneous Perturbation Optimization method for Adaptive Control, 14th WSEAS International Conference on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering, 151-156, 2012.9.7, Malta  
K. Wada, Y. Maeda, Data Embedding for Digital Images Using Known Information, 7th International Symposium in Science and Technology, 271-272, 2012.8.30, Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, Malaysia

N. Ishibashi, Y. Maeda, Control for SCARA Robot by a Neural Network Learning Inverse-Dynamics, 7th International Symposium in Science and Technology, 274-275, 2012.8.30, Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, Malaysia

M. Ando, Y. Maeda, FPGA Implementation of Pulse Density Complex-valued Neural Network Via Simultaneous Perturbation Learning, 7th International Symposium in Science and Technology, 272-273, 2012.8.30, Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, Malaysia

T. Yokota, Y. Maeda, Visual Feedback Robot System with Camera Control, 7th International Symposium in Science and Technology, 275-276, 2012.8.30, Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, Malaysia

Y. Maeda, K. Sakai, Calibration Free Hand-eye System with Parallel Cameras, SICE Annual Conference 2012, 486-489, 2012.8.21, Akita

Y. Maeda, A. Ito, H. Ito, Central

Pattern Generator and Its Learning Via Simultaneous Perturbation Method, 2012 International Joint Conference on Neural Networks, 3152-3157, 2012.6.15, Brisbane

安藤充弥, 前田裕, 学習機能を持つ複素ニューラルネットワークの FPGA 実現, 第 56 回システム制御情報学会研究発表講演会, 431-432, 2012.5.23, 京都テルサ

伊藤彰浩, 前田裕, 複素 CPG による同時摂動による複素波形の生成, 平成 24 年電気学会全国大会, 103-104, 2012.3.23, 広島工業大学

関口祐樹, 前田裕, 同時摂動最適化法を用いた SVM アルゴリズム, 平成 24 年電気学会全国大会, 39-40, 2012.3.23, 広島工業大学

酒井喬平, 前田裕, ファジィ理論を用いた平行ステレオによるキャリブレーションフリーシステム, 平成 24 年電気学会全国大会, 138-139, 2012.3.23, 広島工業大学

21 松野利弘, 前田裕, アナログ信号へのデータ埋め込み, 平成 24 年電気学会全国大会, 43-44, 2012.3.23, 広島工業大学

22 和田憲兒, 前田裕, 既知情報による画像へのデータ埋め込み, 平成 24 年電気学会全国大会, 86-87, 2012.3.22, 広島工業大学

23 鈴木徹, 前田裕, 同時摂動最適化法を用いた適応制御によるフレキシブルアームの制御, 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 376-379, 2011.12.23, 京都大学

24 山田貴博, 前田裕, 同時摂動を用いた高次元ニューラルネットワークの学習, 第 1 回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会, 1-4, 2011.9.30, 京都工芸繊維大学

25 N. Ishibashi, Y. Maeda, Learning of Inverse-Dynamics for SCARA Robot, SICE Annual Conference 2011, 1300-1303, 2011.9.15, Waseda University

26 酒井喬平, 前田裕, ビジュアルフィードバックロボットによるボールの打ち上げ動作の制御, 第 21 回インテリジェント・システム・シンポジウム, 1A1, 2011.9.1, 神戸大学

27 Y. Maeda, T. Yamada, S. Miyoshi, H. Hikawa, Learning Scheme for Complex Neural Networks Using Simultaneous Perturbation, International Conference on Artificial Neural Networks, 2, 462-469, 2011.6.15, Espoo, Finland

28 鈴木徹, 前田裕, 2 リンクフレキシブルアームの同時摂動最適化法を用いた適応制御, 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演会, 215-216, 2011.5.17,

大阪大学

〔図書〕(計1件)

Y.Maeda、 Neuro-Controller Using  
Simultaneous Perturbation、 WSEAS  
Press、 RECENT ADVANCES in COMPUTER  
SCIENCE and APPLICATIONS、 2013、 19

6 . 研究組織

(1)研究代表者

前田 裕 (MAEDA, Yutaka)

関西大学・システム工学部・教授

研究者番号：60209393