

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00344

研究課題名（和文）脳を模倣したパルス駆動ハードウェア自己組織化マップ

研究課題名（英文）Pulse driven hardware self-organizing map that mimics biological brain

研究代表者

肥川 宏臣（Hikawa, Hiroomi）

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：10244154

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、脳を模倣した自己組織化マップ（SOM）の開発を行った。脳内ではニューロン間でパルス信号の情報をやり取りすることで情報を伝達を行う。また、好奇心により様々な知識を身につけようとする性質がある。上記、2点に着目してを模倣したSOMの研究を行った。前者については、パルス信号によりニューロン間の情報伝達を行い、必要な計算もパルス信号で行うSOM専用のハードウェア（電子回路）の開発を行った。後者については、良く知らない情報が入力された場合には強い学習を行い、知っている情報の入力に対しては弱い学習を行う機能を導入することで、新しい情報を積極的に取り込む機能を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自己組織化マップは、画像圧縮や大量のデータの分析などに使われるニューラルネットワークの一種である。専用ハードウェアを開発することで、高性能なコンピュータを使わずに高速なデータ処理が可能となる。また、パルス駆動のハードウェア開発を通して、従来通信関係の回路で使われてきた回路（周波数同期ループ）をニューロンの演算に使用するという、学術的に意義のある研究となった。そして、人間の脳を模倣することでより高性能な処理ができるようになった。今後、脳を模倣するSOMの動作を観察することで人間の脳の働きを解明するツールとしての可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this research, a self-organizing map (SOM) that mimics the brain was studied. In the biological brain, information is transmitted by exchanging pulse signals between neurons. It also has the property of trying to acquire various knowledge owing to its curiosity. Focusing on the above two points, hardware SOM that imitates the brain, and a new learning algorithm were developed. In order to provide the pulse-based operation, the SOM-dedicated hardware (electronic circuit) that transmits information between neurons by pulse signals and performs necessary calculations with pulse signals, was developed. Regarding the latter, the learning algorithm was modified for the SOM to perform powerful learning when it encounters unfamiliar information and to actively acquire new information.

研究分野：情報工学

キーワード：自己組織化マップ ハードウェア パルス信号 機械学習 ベクトル量子化 ニューラルネットワーク

1. 研究開始当初の背景

ニューラルネットワークは一般的に生物学的な脳の構造をモデル化したものとして知られている。自己組織化マップ (Self-organizing map; SOM) は、大脳皮質の視覚野をモデル化したニューラルネットワークの一種で、大量データのクラスタリング、可視化などの分野に応用されてきた。しかし、モデル化の基となった脳と SOM との関連に関する研究は余り行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、動物の脳を模倣した SOM の開発を行い、その性能向上を目指す。脳の動作原理、機能である次の 2 点を模倣した SOM の研究を行った。

(1) 脳内ではニューロン間でパルス信号の情報をやり取りすることで情報を伝達を行う。

(2) 好奇心により様々な知識を積極的に身につけようとする。

(1) については、パルス信号によりニューロン間の情報伝達を行い、必要な計算もパルス信号で行う SOM システムの開発を行った。(2) については、人間の「未知の事象を知りたい」という欲求である拡散的好奇心と呼ばれる機能を模倣した学習方法を SOM の学習アルゴリズムに組込んだ。

3. 研究の方法

通常、SOM はコンピュータを用いて実装が行われる。コンピュータは数値演算しかできず、物理的なパルス信号を用いたシステムの実装はできない。本研究では、パルス信号で動作する脳を模倣するために、物理的な電気信号パルスにより動作する SOM 専用の電子回路 (ハードウェア) の開発を行った。

SOM の学習は近傍関数と呼ばれる関数で学習の強さを調整することができる。そこで、既に学習済みの情報については弱い学習を行い、未知の情報については強い学習するように近傍関数の改良を行った。これにより、良く知らない情報に対して積極的に学習を行わせる機能が実現でき、人間が未知の内容に強い興味を示す点において、同様の学習を行うことができる。

4. 研究成果

(1) パルス信号により駆動されるハードウェア SOM

まず、パルス信号による脳を模倣したハードウェア SOM の成果について述べる。SOM は多数のニューロンにより構成され、各ニューロンは重みベクトルと呼ばれる内部ベクトルを含む。最初に学習により、これらの重みベクトルの値を決める。学習においては、まず学習ベクトルを入力する。そして、最も入力ベクトルに近い重みベクトルを持つニューロンが勝者として選ばれる。この勝者ニューロンとその近傍にあるニューロンの重みベクトルが入力ベクトルに近づくようにベクトルの更新が行われる。勝者ニューロンの近傍の範囲は近傍関数と呼ばれる関数で決定される。

開発したハードウェア SOM は、信号の強度により周波数変調されたパルスによりニューロン間の信号伝達を行う。ニューロンのベクトル演算もすべてパルス信号を用いて行う。特に、重みベクトルを入力ベクトルに近づけるという処理についても数値演算を用いず、パルス信号とデジタル周波数同期ループ (digital frequency-locked loop; DFLL) により行う。DFLL は入力パルスの周波数に内部信号の周波数を近づける動作を行う回路で主に通信システムに使用される回路であるが、本研究ではニューロンの計算に用いる。勝者ニューロンの近傍を決める近傍関数は勝者ニューロンが隣接するニューロンに更新信号を送ることで実現している。この更新信号もパルス信号で、そのパルス幅を変えることで更新量を変化させている。

提案するハードウェア SOM をプログラム可能な集積回路である FPGA に、3次元ベクトルを扱う 256 個のニューロンを含む SOM を実装し、実験により動作確認を行った。図 1 に FPGA (Xilinx Virtex-6 / XC6VSX315TFF1759-2) に実装した SOM の構成を示す。SOM の他に学習データを格納するメモリ、学習の制御を行う制御回路等も含まれており、これを用いて実験を行った。

学習実験には、Triangle 学習データと 16x16mesh データを用いた。いずれも 4096 個のベクトルで構成され、前者のベクトル分布は三角形で、後者の分布は 256 個の小さな塊 (クラスタ) となっている。図 2 に実験結果を示す。図中の赤い点が 3次元の入力ベクトルで、青い点が 256 個のニューロンに属する重みベクトルで隣接するニューロンの重みベクトル同士が線で接続されている。この図では SOM の学習により重みベクトルが更新され、次第に入力ベクトルの分布をカバーするように広がっている様子が示されている。特に、16x16mesh データに対しては、256 個のニューロンの重みベクトルがそれぞれ 256 個のクラスタの一つの中心にそれぞれ配置され、きれいに学習ができていくことがわかる。1 個のクラスタは 8 個のベクトルでできているが、各重みベクトルをクラスタの代表値として用いることでデータの量子化が可能となる。また、学習後も隣接するニューロン同士の関係が保たれている。この性質はトポロジー保存写像と呼ばれる SOM の重要な特徴の一つで、これも提案する SOM で実現できていることが示されている。

動作速度については、回路が動作可能なクロック周波数は、67 MHz で、スループットは約 15 Million connections per second (MCUPS) となった。これは 1 秒間に 1500 万個のベクトル要素の更新が可能であることを意味する。しかし、数値演算を用いた通常のハードウェア SOM に比べると見劣りする速度となった。この理由は、周波数変調パルスでベクトルの値を表すために多数のパルスを必要とする上に周波数変調パルスの生成に多数のクロックを必要とするため、動作クロック周波数が高くてスループットは高くない。しかし、本研究の目的は脳の模倣であるパルス動作による

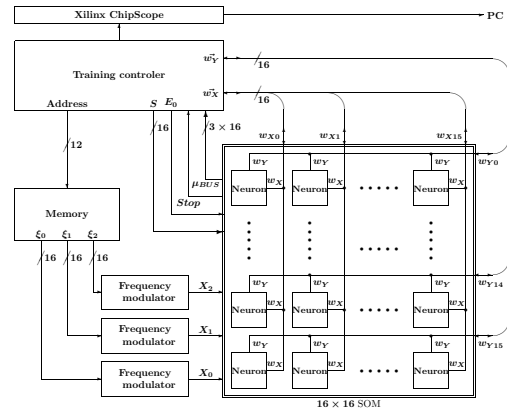


図 1: FPGA に実装したハードウェア SOM

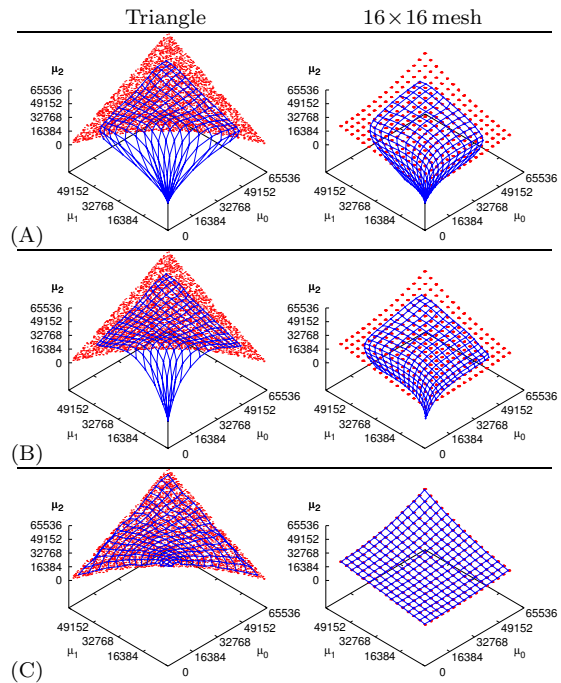


図 2: FPGA 上に実装したパルス SOM の学習過程。(A) 1 回学習, (B) 2 回学習, (C) 256 回学習後の重みベクトルの遷移

SOMの実現であるため、動作速度については重視しない。

以上のように、ニューロン間でパルス信号をやり取りすることで、自ら教師無し学習を行い、ベクトル量子化機能を提供するSOMを実現することができた。パルス駆動という動作原理の観点から脳を模倣するSOMを実現することができた。

(2) 疑似好奇心機能を用いたSOM

SOMの学習においては、前述した近傍関数が大きな役割を果たす。勝者ニューロンの近傍にあるニューロンの重みベクトルを入力ベクトルに近づくように更新することで学習を行う。近傍関数によりどれくらい勝者から離れたニューロンを近傍の範囲とするか、ニューロンごとの重み更新係数の大きさが決められる。この重み更新係数が大きいほど学習の強さが強くなる。従来のSOMでは、近傍の範囲、更新係数の両方を学習の進行に伴い単調減少させる。そして、あらかじめ決められた学習回数を行うと近傍範囲と更新係数は0となり、その後学習はできなくなる。また、ある程度学習が進み近傍範囲、係数ともかなり小さくなった場合でも正しい学習ができなくなる、という問題がある。

人間は見知らぬ情報に関して強い好奇心を示し、その時に得られた情報に関しては印象に残り記憶され、強い学習が行われる。これを模倣するために、近傍関数を時間の関数ではなく、良く知っている情報か、そうでないかにより学習の強さを変えるような近傍関数を提案した。具体的には、勝者ニューロンの重みベクトルと入力ベクトルとの距離が良く知っている情報かどうかの尺度となるので、このベクトル距離で更新係数の大きさと近傍の大きさを変える適応型近傍関数を導入した。

提案するSOMモデルの動作をシミュレーションにより検証した。6種類の学習データ（データ1～データ6）を順番に学習させた場合の重みベクトルの遷移を観測することで学習の成否を調べた。図3(A)に従来型SOMの重みベクトルの変化を示す。この近傍関数の近傍範囲と更新係数は、全データの入力後に0となるようにしている。データ3ぐらいまでは、どちらの

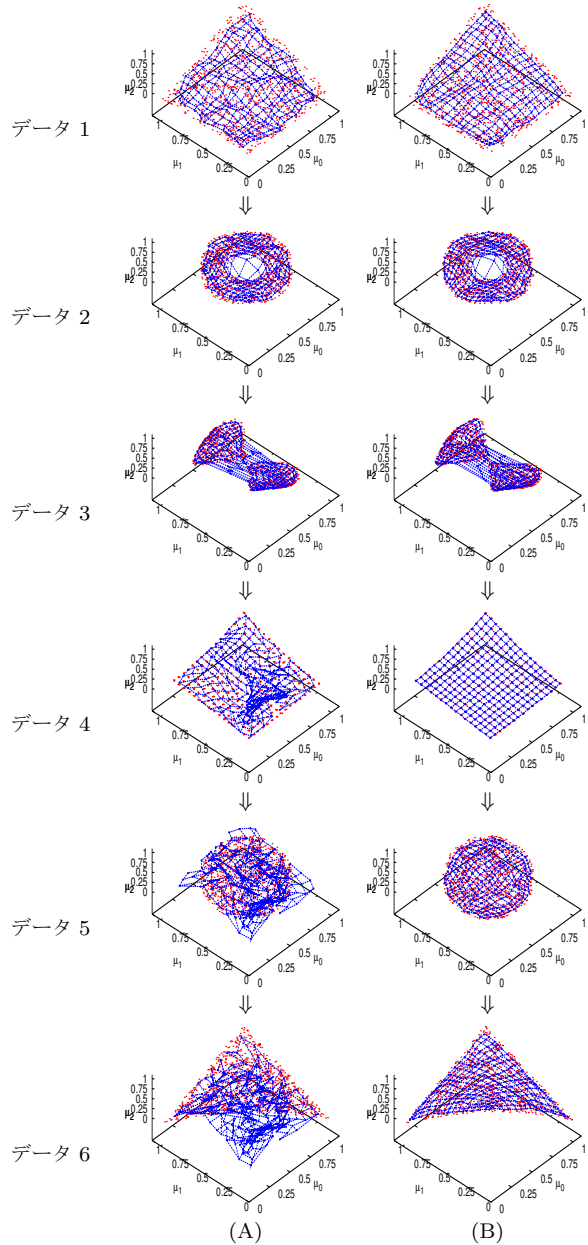


図3: 変化する入力ベクトルに対する学習, (A) 従来型SOM, (B) 適応型近傍関数を用いたSOM.

値もある程度大きいため学習はうまくいっているが、それ以降は学習がデータの変化に追いつけず、学習に失敗している。

図 3 (B) に適応型近傍関数による学習を行う SOM の重みベクトルの変化を示す。入力データは図 3 (A) と全く同じものを用いているが、全てのデータに対して学習に成功していることが示されている。一定の時間間隔で学習データが切り替えられるが、図に示されるように、その時間内で重みベクトルの更新が収束し学習が終わっている。したがって、学習後の重みベクトルの分布とはかけ離れたデータが入力されることになり、新データに対する勝者ニューロンのベクトル距離が大きくなる。ベクトル距離が大きいため、この新データは良く知らない情報だということがわかるので近傍の大きさと更新係数を大きくして強い学習を行う。その結果、入力データの分布が図 3 のように大きく変化しても、変化に合わせた学習を行うため、全てのデータに対して学習に成功している。この学習メカニズムは、人間が好奇心に基づき学習の強さを変える学習に近いと思われる。

(3) まとめ

(1) と (2) で述べたように、パルス信号で動作するハードウェア SOM、疑似好奇心機能といった 2 点について脳を模倣する SOM の開発を行った。どちらも実験により動作確認を行った。

この 2 つの機能を合わせた SOM の開発が今後の課題である。そのためには、現在パルスモード SOM で用いている近傍関数を適応型にする必要がある。パルス SOM では、ハードウェア化が容易な三角型近傍関数を用いている。適応型近傍関数ではかなり複雑な計算を行っているため、いかにハードウェア化に適するように改良し、三角型近傍関数に組込むかが重要なポイントとなる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Kurosaki, M. Ohta, H. Ito, H. Hikawa	4. 巻 E101-D
2. 論文標題 SOM-Based Vector Recognition with Pre-Grouping Functionality	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Trans. INF. & SYST.	6. 最初と最後の頁 1657-1665
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 N. Inaba, H. Ito, K. Shimizu, H. Hikawa	4. 巻 Volume 2018, Issue 6
2. 論文標題 Complete mixed-mode oscillation synchronization in weakly coupled nonautonomous Bonhoeffer-vander Pol oscillators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP)	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/pty065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 H. Ito, H. Hikawa, Y. Maeda	4. 巻 E101-A
2. 論文標題 A Subspace Newton-Type Method for Approximating Transversely Repelling Chaotic Saddles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Trans. FUNDAMENTALS	6. 最初と最後の頁 1127-1131
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.E101.A.1127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Hikawa, M. Tamaki, H. Ito	4. 巻 E101-A
2. 論文標題 Off-Chip Training with Additive Perturbation for FPGA-Based Hand-Sign Recognition System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Fundamentals	6. 最初と最後の頁 499-506
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 H. Hikawa, H. Ito, Y. Maeda
2. 発表標題 Hardware Self-Organizing Map Based on Frequency-Modulated Signal and Digital Frequency-Locked Loop
3. 学会等名 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Hikawa, H. Ito, Y. Maeda
2. 発表標題 A New Self-Organizing Map with Continuous Learning Capability
3. 学会等名 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Hikawa, H. Ito, Y. Maeda
2. 発表標題 A New Hardware Self-Organizing Map Architecture with High Expandability
3. 学会等名 Third IEEE International Conference on Image Processing, Applications and Systems (IPAS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 肥川宏臣
2. 発表標題 周波数同期ループを用いたハードウェアSOM
3. 学会等名 電子情報通信学会 機能情報集積システム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 肥川宏臣
2. 発表標題 拡張性が高いハードウェア自己組織化マップ
3. 学会等名 電子情報通信学会 機能情報集積システム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Yoshimi, H. Ito, H. Hikawa
2. 発表標題 Continuous Learning of the SOM with an Adaptive Neighborhood Function
3. 学会等名 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Hanada, S. Ueda, H. Ito, H. Hikawa
2. 発表標題 Winner-Take-All Neural Network with Distributed Winner Search Circuit
3. 学会等名 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Ito, H. Hikawa, Y. Maeda
2. 発表標題 A Numerical Method for Designing Periodic Orbits Embedded in Chaotic Attractors
3. 学会等名 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 市川 雄太, 伊藤 秀隆, 肥川 宏臣
2. 発表標題 自己組織化マップを利用したリアルタイムジェスチャ認識システム
3. 学会等名 電子情報通信学会 機能情報システム研究会, FIIS-17-466
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉見 光, 伊藤秀隆, 肥川宏臣
2. 発表標題 適応型近傍関数を用いた自己組織化マップの学習特性
3. 学会等名 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, NC2017-23
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 肥川宏臣, 伊藤秀隆
2. 発表標題 周波数変調パルスを用いたハードウェア自己組織化マップ
3. 学会等名 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, NC2017-64
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Tamaki, H. Hikawa
2. 発表標題 Off-chip learning for hardware hand-sign recognition system
3. 学会等名 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (IEEE ISCAS 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1 . 発表者名 Y. Ichikawa, S. Tashiro, H. Ito, H. Hikawa
2 . 発表標題 Gesture Spotting by Using Vector Distance of Self-Organizing Map
3 . 学会等名 International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Y. Ichikawa, S. Tashiro, H. Ito, H. Hikawa
2 . 発表標題 Real Time Gesture Recognition System with Gesture Spotting Function
3 . 学会等名 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Ohta, Y. Kurosaki, H. Ito, H. Hikawa
2 . 発表標題 Effect of Grouping in Vector Recognition System Based on SOM
3 . 学会等名 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 H. Hikawa
2 . 発表標題 Improved Winner-Take-All Circuit for Neural Network Based on Frequency-Modulated Signals
3 . 学会等名 23rd IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2016) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----