

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20700207

研究課題名 (和文) 自己組織化脳型デバイスの実現とその自律移動ロボットへの応用

研究課題名 (英文) Realization of Self-Organizing Brain Device and its Application to Autonomous Mobile Robot

研究代表者

田向 権 (TAMUKOH HAKARU)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：90432955

研究成果の概要 (和文)：自律ロボットの脳機能実現のために、SOM<sup>2</sup>や適応型自己組織化マップをハードウェア化に適したアルゴリズムへと改良し FPGA を用いて実装することで、自己組織化脳型デバイスのプロトタイプを実現した。適応型自己組織化マップハードウェアは、自律ロボットの視覚処理へと応用し、マイコン比で約 10,000 倍の高速化を達成した。これらデバイスをソフトウェアから簡便に利用するために、ハードウェア/ソフトウェア複合体の技術を用いた自己組織化ニューラルネットワークのための動的再構成プラットフォームを開発した。

研究成果の概要 (英文)：In order to realize an artificial brain function of autonomous robots, we developed FPGA implementations of Self-Organizing Neural Networks, SOM of SOMs, Rough-Winner-Take-All Neural Networks and Adaptive Self-Organizing Maps. We proposed modified algorithms for this effective hardware implementation. The Adaptive Self-organizing Maps hardware was applied to a visual processing of autonomous robot, and achieved 10,000 times faster than a micro-processor implementation. Furthermore, we developed a dynamically reconfigurable platform for self-organizing neural networks based on hardware/software complex system to use the developed device conveniently.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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、自己組織化マップ、FPGA、脳型計算機

## 1. 研究開始当初の背景

自律ロボットの脳を実現するアプローチとして、自らの機能を学習により獲得する脳型計算機の研究が国内外で幅広く行われて

いる。申請者らは、自己組織化マップ (Self-Organizing Map; SOM) を有力な脳型計算機モデルと考え、理論、ハードウェア、応用の側面から研究を行ってきた。SOM は、

多次元ベクトルで表現されたデータを低次元空間に写像するという特長を持ち、パターン分類などへ広く応用されている。しかしながら SOM は、ベクトルで表現可能な単純な情報しか取り扱えない。自律ロボットの脳を実現するには、外界認識や行動発現などを行うシステム(系)を自己組織的に獲得する必要がある。これを実現した試みとして RNN-SOM や mnSOM がある。

RNN-SOM はソニーの人型ロボット QRIO の脳として提案された。14×14=196 個の Recurrent Neural Network (RNN) をモジュールとした 2 次元 SOM を 300 台の PC クラスタで演算し、様々な遊び行動の獲得・生成に成功した。

mnSOM は、RNN に加え、SOM や Neural Gas (NG), Radial Basis Function Network (RBFN), Self-Organizing Relationship Network (SORN) などをモジュールとして SOM へ入力可能にしたものである。モジュールが表現する系でのマップ生成が可能であるので、認識系(SOM×SOM, NG×SOM を適用)や行動系(SORN×SOM, RBFN×SOM を適用)を自己組織的に獲得可能であると考えられ、自律ロボットの脳型知性として有効である。

しかしながら、RNN-SOM や mnSOM は、複数のモジュールが高階に接続されているため、演算量が膨大であるという問題を持つ。したがって、演算の高速化と特に自律移動型ロボットへの応用のためには低消費電力化が必須であり、これらの解決のためには、自己組織化学習機械のためのハードウェアが必要である。また、これらハードウェアは専用設計されることが多く、様々な用途に用いるためには柔軟性に欠ける。ハードウェアの高速性を持ちつつ柔軟性を如何に実現するかも重要である。

## 2. 研究の目的

自己組織化脳型デバイスの実現のために、脳型計算機のモデルとして自己組織化マップをベースとした学習アルゴリズムを対象とする。演算量の問題を解決するために、(1) ハードウェア化に適したアルゴリズムの開発、(2) 専用ハードウェアの開発を行う。

(1) では、自己組織化マップが元来備えている並列演算性や粗い演算への許容能力等を生かしたアルゴリズムを開発する。

(2) では、ユーザが内部の論理機能を自由に書き換えることが可能な LSI である、FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いて、(1) で開発したアルゴリズムをハードウェア化する。

また、上記の二つの目的とは別途に、FPGA をソフトウェアと組合せて用いるためのプ

ラットフォームとして、(3) ハードウェアとソフトウェアが密結合して動作するハードウェア/ソフトウェア (hw/sw) 複合体の環境整備を行い、これを用いたデモンストレーションシステム開発を行う。また、この環境をベースに、自己組織化ニューラルネットワークのための動的再構成プラットフォームを整備する。

これらの開発の後、最終的に、(1) ~ (3) の成果を融合する。

## 3. 研究の方法

(1) SOM×SOM ハードウェアの基本アーキテクチャの開発。SOM×SOM は、SOM のモジュールに SOM を持つ高階の自己組織化マップのアルゴリズムである。mnSOM の最も基本となる構造といえる。高精度な手書き文字認識や、自律移動ロボットの自己位置と方位の同時推定などに応用されており、非常に強力な認識系を構築することが出来る。本研究では、1 つの FPGA に入る規模の SOM×SOM ハードウェアを確立する。アルゴリズムをハードウェア化に適した形へと改良、粗い勝者決定等の効率化アルゴリズムを導入し、FPGA ボードへ実装する。ベンチマーク関数を用いてハードウェア化に適したアルゴリズムとオリジナルアルゴリズムの学習能力の差異を検討する。

(2) 適応型自己組織化マップのハードウェア開発。通常の自己組織化マップは、学習するデータが事前に用意されていなければならない。自律移動ロボットの視覚情報処理を考えた場合、時々刻々と入力されるデータに適応的に学習が行われる方法が好ましい。そこで、パラメタレス SOM をベースとした適応型の自己組織化マップハードウェアの開発を行う。

(3) hw/sw 複合体によるプログラミング性の向上。mnSOM ハードウェアは、問題毎に適切なモジュールを FPGA へ書き込むことで幅広い用途へ応用可能になると考えられる。しかしながら、ハードウェア記述言語は抽象度が低いため、柔軟な取り扱いが困難である。そこで、hw/sw 複合体の概念を導入し、SOM や NG などのモジュールをオブジェクト化、C++ 等のソフトウェア上から FPGA 上の仮想回路である SOM, NG オブジェクトを動的に生成・実行・削除できるインタフェースを開発する。この実現のために、hw/sw 複合体の環境整備を行い、動画像処理と簡単な自己組織化ニューラルネットワークを対象とした基礎検討を行う。

#### 4. 研究成果

(1) バッチ学習型 SOM×SOM を FPGA 実装した (図 1). ハードウェア化に際し, ユークリッド距離をマンハッタン距離に変更, 近傍関数をガウス関数から矩形関数に変更した. Altera 社製 FPGA Stratix EP1S25-F1020C7 へ実装し, 23,581Logic Element の回路規模で, 9 個の子 SOM モジュール, 各モジュール 9 個の参照ベクトル (全体で 81 参照ベクトル), 各参照ベクトル 8 ビット精度 4 次元を達成した. 螺旋型, アーチ型的人工データ集合へと適用し, オリジナルアルゴリズムと同等の学習性能を持つことを確認した. また, 3.6GHz 動作の CPU に比べ, 約 3 倍程度の演算速度を達成した. 本ハードウェアは超並列構造を採用しているため, 最新の FPGA へ換装すれば, 簡単なアーキテクチャの拡張で, 更なる演算速度の達成が可能であると考えられる.

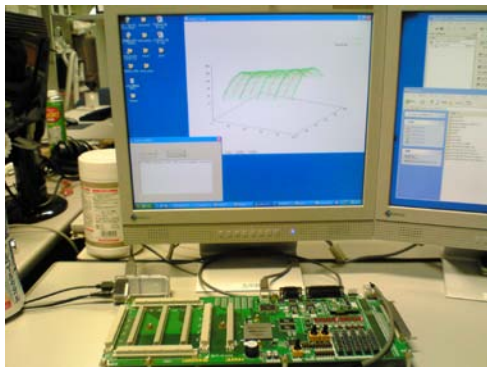


図 1 : SOM×SOM ハードウェアの FPGA 実装の様子. この例では, アーチ型的人工データを FPGA で学習している.

(2) 学習率及び近傍半径を動的に決定する更新則を導入した適応型自己組織化マップを FPGA 実装した. 81 個のローカルユニットを持つ超並列構造を採用し, Xilinx 社製 FPGA xc3s1600E へ実装した. 更に, Hebb 則を出力系として統合, 情動発現を実現する扁桃体型ニューラルネットワークハードウェアとして構築, 自律ロボットへと応用した. 自律ロボットの制御に一般的に用いられるマイコン (ルネサス社製 SH-2, 50MHz) と比べ約 10,000 倍, 自律ロボットに搭載可能な大きさの Portable PC (CPU 1.1GHz) と比べ約 25 倍の速度を達成し, 低消費電力と高速演算を達成した (図 2).

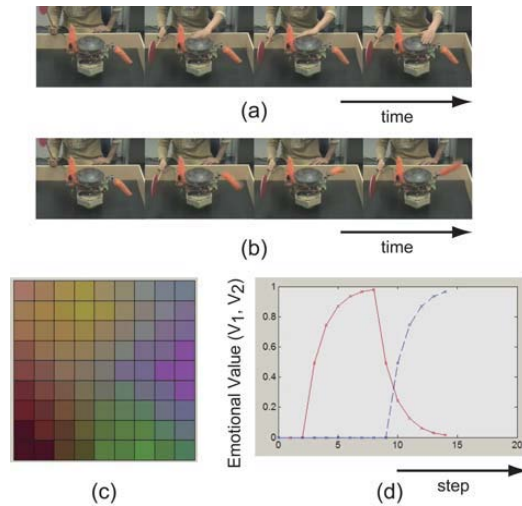


図 2 : 適応型自己組織化マップハードウェアの自律ロボットへの応用. (a), (b) : ロボットへ視覚刺激と感覚刺激を与えている様子. (c) 適応型自己組織化マップハードウェアが視覚情報から獲得した色マップ. (d) 感覚刺激より Hebb 則を通じて生成された自律ロボットの情動反応.

(3) FPGA に実装された専用ハードウェアをより簡便にソフトウェアと融合して用いるために, hw/sw 複合体の整備を行った. 特に, ネットワーク拡張を重点的に行うことで, FPGA へ書き込んで用いる仮想回路を, サーバから動的にダウンロードして, 手元の FPGA へと実装する技術を開発した. また, ソフトウェアとの強固な結びつきを実現するために, WEB ブラウザ上から仮想回路の遠隔操作を可能にする技術を開発した. デモンストレーションとして, 仮想回路を用いた動画像の実時間圧縮・転送・伸張を行った.

次に, これらの基本技術を基に, 簡単な自己組織化ニューラルネットワークのための動的再構成プラットフォームを開発した. 自己組織化マップと粗い勝者決定を用いたベクトル量子化機械をベースとする 4 種類の自己組織化ニューラルネットワークを実装し, 柔軟性を兼ね備えつつソフトウェア比で約 100 倍の高速化が可能であることを示した. 今後, この成果と (1), (2) の成果を融合する予定である. これにより, ソフトウェアの汎用性, ハードウェアの高速性, ならびに, 自己組織化脳型デバイスが持つ適応性を兼ね備えた, 新しい計算機システムの実現が可能になると考えている.

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)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Hakaru Tamukoh, Keiichi Horio, Takeshi Yamakawa and Masatoshi Sekine, “Rough-winner-take-all for Hardware Oriented Vector Quantization Alogrithm,” IEICE Electronics Express, 査読有, vol.8, no.11, pp.773-779, 2011.
- ② Hakaru Tamukoh and Masatoshi Sekine, “A Dynamically Reconfigurable Platform for Self-Organizing Neural Network Hardware,” Lecture Note in Computer Science, 査読有, vol.6444, pp.439-446, 2010.
- ③ 田向 権, 黒木 良介, 華井 健太郎, 渡辺 雅史, 松下 宗一郎, 小林 祐一, 関根 優年, “インターネットブースター: ネットワーク配信可能なhw/sw複合体を用いたWEBアプリケーション,” 電子情報通信学会論文誌, 査読有, vol. J93-D, no.10, pp.2139-2147, Oct. 2010.
- ④ Satoshi Sonoh, Shuji Aou, Keiichi Horo, Hakaru Tamukoh, Takanori Koga, and Takeshi Yamakawa, “A Human Robot Interaction by a Model of the Emotional Learning in the Brain,” Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 査読有, vol.4, no.2, pp.48-54, 2010.
- ⑤ 金子宗司, 田向権, 徳永憲洋, 古川徹生, “高階自己組織化マップのハードウェア化～知識表現を自己組織化するハードウェアの開発～,” 知能と情報(日本知能情報フuzzy学会誌), 査読有, vol,21, no.5, pp.870-883, 2009.
- ⑥ Naoki Shimo, Shaoning Pang, Keiichi Horio, Nikola Kasabov, Hakaru Tamukoh, Takanori Koga, Satoshi Sonoh, Hirohisa Isogai and Takeshi Yamakawa, “Effective and Adaptive Learning Based on Diverse/Specific Curiosity,” Brain-Inspired Information Technology Studies in Computational Intelligence, 査読有, vol.266, pp.171-175, 2009.
- ⑦ Satoshi Sonoh, Shuji Aou, Keiichi Horio, Hakaru Tamukoh, Takanori Koga,

Naoki Shimo and Takeshi Yamakawa, “Emotional Behavior and Expression Based on a Neural Network Model of Amygdala,” Brain-Inspired Information Technology. Studies in Computational Intelligence, 査読有, vol.266, pp.165-170, 2009.

- ⑧ 佐藤 季花, 工藤 健慈, 田向 権, 関根 優年, “hw/sw 複合による対象物追跡アプリケーションの実装,” 画像ラボ, 査読無(商業誌, 解説論文), vol.19, no.5, pp.25-32, 2008.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 田向 権, 関根 優年, “自己組織化ニューラルネットワークのための動的再構成プラットフォーム,” 電子情報通信学会技術研究報告 スマートインフォメディアシステム研究会 (SIS), SIS2010-55, pp.13-17, 2011年3月3日, 東京都市大学.
- ② 齋藤 秀太, 有泉 政博, 田向 権, 関根 優年, “階層化された特徴の自己組織化マップによる実現法,” 電子情報通信学会技術研究報告 ニューロコンピューティング研究会 (NC), vol.110, no.355, NC2010-83, pp.97-102, 2010年12月19日, 名古屋大学.
- ③ 有泉 政博, 齋藤 秀太, 田向 権, 関根 優年, “木構造型 SOM による特徴学習機能を有する画像認識システム,” 電子情報通信学会技術研究報告 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU), vol.110, no.330, PRMU2010-143, pp.97-102, 2010年12月10日, 山口大学.
- ④ 田向 権, 有泉 政博, ベルグシュタイン ナダヴ, 関根 優年, “ネットワーク化されたhw/sw複合体と仮想回路動画像コーデック,” 電子情報通信学会技術研究報告 スマートインフォメディアシステム研究会 (SIS), vol.110, no.322, SIS2010-49, pp.83-88, 2010年12月3日, 奈良県文化会館.
- ⑤ 田向 権, 有泉 政博, ベルグシュタイン ナダヴ, ロブリア ジョナタン, 関根 優年, “Hardware Object モデルに基づくネットワーク環境下におけるhw/sw複合体システムの設計例,” 電子情報通信学会技術研究報告 ディペンダブルコンピューティング研究会 (DC), vol.110, no.229, DC2010-18, pp.1-6, 2010年10月14日, 東京, 機械振興会館.

- ⑥ Hakaru Tamukoh, Kentaro Hanai, Ryosuke Kurogi, Souichirou Matsushita, Masatoshi Watanabe, Yuichi Kobayashi, Masatoshi Sekine, “Internet Booster: A Networked hw/sw Complex System and Its Application to Hi-Performance WEB Application,” Proc. of 7th International Forum on Multimedia and Image Processing, 2010年9月20日, 神戸カンファレンスセンター.
- ⑦ 華井健太郎, 黒木良介, 田向権, 関根優年, “ネットワーク経由での仮想回路の書き込みと動画像転送への適応,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.398, pp.59-64, 2010年1月29日, 福岡システムLSI研究センター.
- ⑧ 齋藤秀太, 田向権, 小林祐一, 関根優年, “hw/sw 複合体を用いた木構造型 SOM ハードウェア,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.396, pp.13-18, 2010年1月28日, 京都大学.
- ⑨ 黒木良介, 華井健太郎, 田向権, 関根優年, “ネットワーク配信可能な hw/sw 複合体, 動画像コーデック,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, No.395, pp.25-30, 2010年1月26日, 慶応大学.
- ⑩ 田向権, 黒木良介, 華井健太郎, 佐藤季花, 工藤健慈, 関根優年, “インターネットブラスター ~仮想回路を用いた新しいWEB アプリ~, ” 第11回DSPS教育者会議予稿集, pp.83-84, 2009年9月10日, 東京工業大学.
- ⑪ 黒木良介, 華井健太郎, 小瀧浩, 佐藤一輝, 佐藤季花, 工藤健慈, 松下宗一郎, 渡辺雅史, 田向権, 関根優年, “FPGAを用いた動画像符号化システム,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.108, No.334, pp.103-108, 2008年12月5日, 関西大学.
- ⑫ 華井健太郎, 黒木良介, 小瀧浩, 佐藤一輝, 佐藤季花, 工藤健慈, 松下宗一郎, 渡辺雅史, 田向権, 関根優年, “FPGAを用いた動画像転送コア,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.108, No.334, pp.97-102, 2008年12月5日, 関西大学.
- ⑬ Satoshi Sonoh, Keiichi Horo, Hakaru Tamukoh, Takanori Koga, Naoki Shimo, and Takeshi Yamakawa, “An implementation of intrinsic emotions on an autonomous robot with the

emotional expression model of amygdala,” Proc. of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 8th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2008), pp.1894-1899, 2008年9月21日, 名古屋大学.

- ⑭ Keiichi Horio, Naoki Shimo, Hakaru Tamukoh, Takanori Koga, Satoshi Sonoh and Takeshi Yamakawa, “Diversive and Specific Curiosities for Effective Learning,” Proc. of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 8th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2008), pp.1912-1915, 2008年9月21日, 名古屋大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田向 権 (TAMUKOH HAKARU)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：90432955