法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-06

スパースバイナリーニューラルネットの精密解析と進化的合成に関する研究

斉藤, 利通 / SAITO, Toshimichi

(雑誌名 / Journal or Publication Title)
科学研究費助成事業 研究成果報告書
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
7
(発行年 / Year)
2021-05-19

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　３ 年　５ 月 １９ 日現在

機関番号：３２６７５
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：１８Ｋ１１４８０

研究課題名（和文）スパースバイナリーニューラルネットの精密解析と進化的合成に関する研究

研究課題名（英文）recise analysis and evolutionary synthesis of sparse binary neural networks

研究代表者
斉藤　利通（Saito, Toshimichi）

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：３０１７８４９６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,100,000円

研究成果の概要（和文）：3値結合とシグナム活性化関数で特徴づけられる動的バイナリーニューラルネットの解析と合成に関する基礎研究を行った。まず、3入力1出力ニューロンからなるスパースネットワークについて、回転タイプの周期軌道の安定性を解析した。そして、周期軌道の銘記と局所安定性を保証する合成法を構築した。次に、3層のネットワークについて、所望の周期軌道の銘記と、その安定性に関する理論を構築した。その理論に基づいて、任意の周期軌道の銘記と、その大域安定性を保証する合成法を構築した。さらに、ネットワークをFPGA上にハードウエア実装し、周期軌道を実現し、6足ロボットの歩行パターンの制御に応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
人工ニューラルネットは、科学技術の発展に大きく貢献しているAIの基礎となるシステムである。AIに関する諸分野では、写像型のニューラルネットは盛んに研究されているが、再帰型のニューラルネットワークはそれほど研究されていない。生成する現象の複雑さと、解析の困難さがその理由である。動的バイナリーニューラルネットは、動作解析とハードウエア実装に有利な、簡素な再帰型ニューラルネットワークである。その解析と合成に関する基礎研究の成果は、AI技術のさらなる発展への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have studied analysis and synthesis of dynamic binary neural networks characterized by ternary connection parameters and the signum activation function. First, in simple sparse networks (consisting of neurons from three inputs to one output), we have analyzed stability of rotation-type periodic orbits. Based on the analysis results, we have constructed a synthesis method that guarantees storage and local stability of the rotation-type periodic orbits. Second, in three-layer networks, we have given a basic theoretical result on storage and stability of desired periodic orbits. Based on the theory, we have constructed a synthesis method that guarantees storage and global stability of any desired periodic orbits. Third, implementing the networks on FPGA board, periodic orbits have been confirmed experimentally. The FPGA based hardware has applied to control of walking patterns in hexapod robots.

研究分野：ソフトコンピューティングと情報通信工学

キーワード：ニューラルネットワーク　周期軌道　安定性

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

(1) Amari-Hopfield ネットワーク［Amari, Biol. Cybern. 1977; Hopfield et al., Proc. Nat. Acad. Sci. 1982］は、代表的な再帰型ニューラルネットワークであり、簡素なニューロンモデルを相互結合して構成される。その結合状態は、多くの実数値パラメータによって決まる。
基礎研究では、記憶容量や安定性が解析され、応用研究では、連想記憶や組合せ最適化問題が検討されてきた。時系列予測への応用などで注目を集めているリザーバコンピューティング［Jaeger et al., Science, 2004］の内部系としても研究されている。しかし、パラメータに依存してネットワークの動作は非常に複雑となり、その精密な解析や、ハードウエア実装は簡単ではない。このような再帰型ネットワークの結合を 3 値とし、活性化関数とシグナムに限定して簡略化したものが、本研究で扱う 2 層の動的バイナリーニューラルネットワーク(DBNN)である。DBNN は、精密な解析と、ハードウエア実装に適している。
(2) AI の核心技術である深層学習［麻生他、近代科学社、2015］は、画像認識をはじめとする多くの応用で優れた性能を示している。結合と活性化関数を 2 値化しても比較的性能の良いニューラルネットを作れることも注目されている［Bengio et al., arxiv, 2016］。また、結合を適切にスパース化すると、特徴選択機能や計算コスト性能が向上することも注目されている［冨岡, 講談社, 2015 にスパース化学習の解説］。しかし、AI では写像型のネットワークが主たる対象とされており、再帰型ネットワークはあまり扱われていない。その写像型ネットワークに帰還をかけて再帰型とし、結合を 3 値としたものが多層の DBNN である。

２．研究の目的

簡素な再帰型ニューラルネットである DBNN について、その動作を精密に解析し、所望の動作を実現する合成法を構築し、その工学的応用の基礎を固めることが研究の目的である。(1) DBNN の生成する周期軌道を分類し、その安定性を定義し、結合パラメータが周期軌道の生成と安定性にどのように影響するかを解析する。特に、結合のスパース性の影響、例えば、どのような周期軌道がどのように安定なのか、を明らかにする。
(2) 所望の周期軌道を銘記し、銘記した周期軌道を安定とする合成法を構築する。合成する DBNN は、2 層と 3 層のものを対象とする。
(3) DBNN のハードウエアを設計し、FPGA を用いて実装する。所望の周期軌道の生成を実験的に確認し、6 足ロボットの歩行パターン制御などへの応用の基礎を固める。

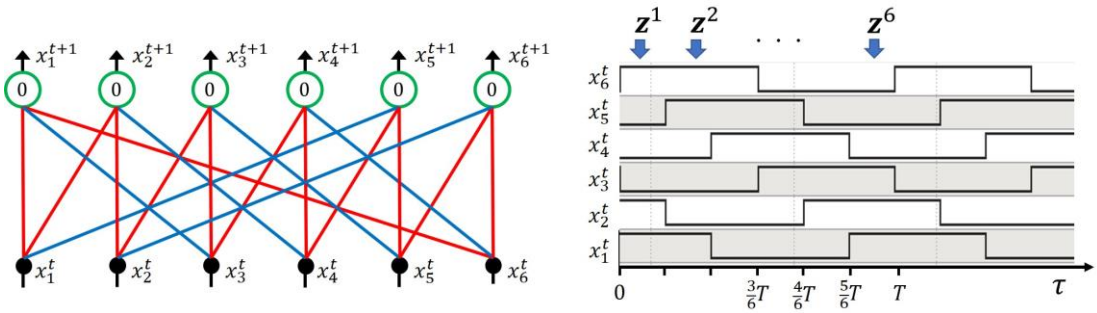
３．研究の方法

(1) DBNN の解析については、まず、周期軌道の種類を、その要素間のハミング距離等を用いて定義する。安定性についは、過渡現象に基づいて、局所安定性や大域安定性を定義する。そして、2 層と 3 層の場合について、銘記できる周期軌道の条件を明らかにする。パラメータと安定性の関係は、精密な数値実験と、理論解析によって明らかにする。
(2) 解析結果に基づいて、所望の動作をする DBNN のパラメータを設定する合成法を構築する。その際、ネットワークのスパース性と、周期軌道の安定性の関係に注意する。
(3) 工学的応用のために、汎用ソフトウエアを用いて DBNN のハードウエアを設計し、FPGA 上に実装する。ネットワーク構造や消費電力の観点からハードウエア化に適した形状の DBNN を対象とする。様々な周期軌道の生成とその安定性を確認する。6 足ロボットの歩行パターンに対応する周期軌道を制御信号に変換し、様々な歩行パターンを実現する。

４．研究成果

(1) 3 入力 1 出力ニューロンによって構成される 2 層のスパースバイナリーニューラルネット(SBNN)について、回転タイプの周期軌道の生成と、その局所安定性を保証できる合成法を構築した。同合成法では、結合パラメータは、一般次元の場合について、陽に与えられる。また、符号誤り訂正に対応する局所安定性は、厳密に保証される。この理論は、6 次元の例題(スイッチング電源の制御信号と対応する周期軌道を呈する DBNN)について、結合のスパース性と周期軌道の安定性を詳細に調べた数値解析結果からヒントを得たものである。

合成された SBNN のハードウエアを、汎用ソフトウエア VIVADO を用いて設計し、FPGA 上に実装し、周期軌道を実験的に確認した。下図に SBNN と周期軌道の例を示す。



(2) 2 層の DBNN と関係の深い基本セルオートマトン(ECA)について、その動作解析と応用に関する基礎研究を行った。ECA は、時間、空間、状態が離散的なデジタル力学系であり、局所スパース結合の DBNN と対応する。解析では、生成する周期軌道の複雑さと、その安定性に関する特徴量を導入し、典型的な例に的を絞って、詳細に動作を調べた。また、工学的応用のために、複数のルールを切り替える ECA を構成し、その情報表現能力を評価した。そして、表現能力の高い ECA を、音声データの記述/圧縮に応用するための基礎実験を行った。その ECA の生成するパターンの誤り訂正能力も詳細に評価した。

(3) SBNN と ECA に関する研究成果を参考に、3 層の DBNN を構成し、その解析と合成に関する基礎研究を行った。解析では、まず、周期軌道の形状と、その局所安定性の関係を明らかにした。この結果に基づき、所望の周期軌道の銘記と、銘記した周期軌道の局所安定性を保証する合成法を構築した。この DBNN の中間層は、入力と銘記された周期軌道の距離によって出力を選択し、周期軌道を局所安定にする役割を担っている。

次に、中間層のニューロンの一つを削除すると、銘記した周期軌道を大域安定にできることを明らかにした。これは、本研究で最も重要な成果である。この性質を用いて、任意の周期軌道の銘記と、その大域安定性を理論的に保証できる合成法を構築した。この中間ニューロンの削除は、一種のスパース化であることに注意する。2 層の DBNN に比べて、この 3 層の DBNN が生成できる周期軌道の種類は遥かに多く、その安定性は遥かに強い。一方、ハードウエア化のためのネットワーク構造は複雑ではない。この 3 層の DBNN を FPGA 上に実装するアルゴリズムを構築し、ハードウエアを作成し、周期軌道を実験的に確認した。言うまでもなく、6 足ロボットの様々な歩行パターンと対応する周期軌道も生成できる。現在、その周期軌道をロボットの制御信号に変換する作業が進行中である。一部の歩行パターンは、SBNN のハードウエアを用いたロボットの実機で実現できている。3 層の DBNN を用いれば、架空のものも含む遥かに多彩な歩行パターンを実現できる。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計9件（うち査読付論文　9件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 Uchida Hiroaki、Oishi Yuya、Saito Toshimichi	４．巻 14
２．論文標題 A simple digital spiking neural network: Synchronization and spike-train approximation	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Discrete & Continuous Dynamical Systems - S	６．最初と最後の頁 1479～1494
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3934/dcdss.2020374	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 Koyama Seitaro、Saito Toshimichi	４．巻 416
２．論文標題 Guaranteed storage and stabilization of desired binary periodic orbits in three-layer dynamic binary neural networks	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Neurocomputing	６．最初と最後の頁 12～18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neucom.2020.01.105	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 Aoki Shunsuke、Koyama Seitaro、Saito Toshimichi	４．巻 341
２．論文標題 Theoretical analysis of dynamic binary neural networks with simple sparse connection	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Neurocomputing	６．最初と最後の頁 149～155
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neucom.2019.03.015	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 Ozawa Takahiro、Saito Toshimichi	４．巻 10
２．論文標題 Analysis of cellular automata governed by simple time-variant rules	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	６．最初と最後の頁 357～365
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.10.357	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 Arai Hayate、Saito Toshimichi	4．巻 10
2．論文標題 A simple multiobjective evolutionary algorithm for design of digital maps	5．発行年 2019年
3．雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6．最初と最後の頁 280～288
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.10.280	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 Uchida Hiroaki、Saito Toshimichi	4．巻 E102.A
2．論文標題 Multi-Phase Synchronization Phenomena in a Ring-Coupled System of Digital Spiking Neurons	5．発行年 2019年
3．雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6．最初と最後の頁 235～241
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.E102.A.235	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 Togawa Tomoyuki、Saito Toshimichi	4．巻 1
2．論文標題 Connection Sparsification and Orbit Stabilization of Dynamic Binary Neural Networks based on Multiobjective Evolutionary Algorithms	5．発行年 2020年
3．雑誌名 Proc. IEEE/WCCI	6．最初と最後の頁 N-20741
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IJCNN48605.2020.9206599	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 Anzai Shota、Koyama Seitaro、Aoki Shunsuke、Saito Toshimichi	4．巻 11954
2．論文標題 Sparse Dynamic Binary Neural Networks for Storage and Switching of Binary Periodic Orbits	5．発行年 2019年
3．雑誌名 LNCS, Springer	6．最初と最後の頁 536～542
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-36711-4_45	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 Aoki Shunsuke, Koyama Seitaro, Saito Toshimichi	４．巻 11307
２．論文標題 FPGA based hardware implementation of simple dynamic binary neural networks	５．発行年 2018年
３．雑誌名 LNCS, Springer	６．最初と最後の頁 647～655
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-04239-4_58	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4件（うち招待講演　0件／うち国際学会　4件）

１．発表者名 Saka Kento, Togawa Tomoyuki, Saito Toshimichi
２．発表標題 MOEA/D based synthesis of simple binary neural networks with clustering function
３．学会等名 NCSP（国際学会）
４．発表年 2021年

１．発表者名 Udagawa Hotaka, Kijima Yuken, Saito Toshimichi
２．発表標題 Analysis of simple digital dynamical systems and its application
３．学会等名 NCSP（国際学会）
４．発表年 2021年

１．発表者名 Anzai Shota, Suzuki Takumi, Saito Toshimichi
２．発表標題 Switching of periodic orbits in dynamic binary neural networks
３．学会等名 NOLTA（国際学会）
４．発表年 2020年

１．発表者名 Suzuki Takumi, Anzai Shota, Koyama Seitaro, Saito Toshimichi
２．発表標題 Dynamic binary neural networks for central pattern generators
３．学会等名 KJCCS（国際学会）
４．発表年 2020年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

法政大学学術研究データベース http://kenkyu-web.i.hosei.ac.jp/Profiles/14/0001303/profile.html

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

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関