

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00350

研究課題名(和文) デジタルマップの多彩な定常状態と過渡現象の解析：理論構築と工学的応用の基礎固め

研究課題名(英文) Analysis of various steady states and transient phenomena in digital maps:  
foundation for theory construction and engineering applications

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：デジタルマップ(Dmap)の解析と実装に関して以下のような成果を得た。まず、周期軌道の豊富さと安定性に関する特徴量を用いた解析法を考案し、典型例を解析し、現象の基本的な分類を行った。次に、簡素な進化計算によって所望のDmapを合成するアルゴリズムを考案した。アルゴリズムの個体はDmapに対応し、個体数は柔軟に変化する。典型的な例題によってアルゴリズムの妥当性を確認した。さらに、Dmapをデジタルスパイクニューロン(DSN)によって実現する方法を構築した。DSNは2つのシフトレジスタと配線回路で構成され、様々なスパイク列を生成する。FPGAによる簡素な試作回路を構成し、動作を確認した。

研究成果の概要(英文)：We have studied analysis and implementation of digital maps (Dmaps). The major results are as the following. First, we have developed an analysis method based on two feature quantities. The first quantity characterizes plentifulness of periodic orbits and the second quantity characterizes stability of the periodic orbits. Applying the method, typical Dmap examples are analyzed and basic phenomena are classified. Second, we have developed a simple evolutionary algorithm to realize a desired Dmap. The algorithm uses individuals each of which corresponds to one Dmap and the number of individuals can vary flexibly. Using typical example problems, the algorithm efficiency is confirmed. Third, we have developed a realization method of Dmaps by means of digital spiking neurons (DSNs). The DSN consists of two shift registers connected by a wiring circuit and can generate various periodic spike-trains. Presenting a FPGA based simple test circuit, the DSN dynamics is confirmed.

研究分野：情報工学

キーワード：ソフトコンピューティング スパイクニューロン 進化計算

### 1. 研究開始当初の背景

ロジスティックマップ[May, Nature 1976]は、複雑な現象を呈する簡素な数理モデルとしてあまりにも有名である。この区間上で定義された2次特性を有する差分方程式は、カオス現象を呈し、パラメータを変化させると周期倍分岐現象を呈する。ロジスティックマップのようなアナログ1次元マップ(Amap)は、非線形現象の解析という基本問題において重要なばかりでなく、乱数発生器やA/Dコンバータなどの工学系の簡素な数理モデルとしても重要であり、自然科学の広い分野で盛んに研究されている。

デジタルロジスティックマップ[Matoba, Horimoto, Saito, IEICE Trans. Fund. 2013]は、ロジスティックマップを点の集合上で離散化して得られる(図1参照)。点の数が有限であるので、その定常状態は周期解となる。複数の周期解が共存でき、初期値に依存してそのいずれかを呈する。ロジスティックマップの定常状態は1つであるが、デジタルロジスティックマップには複数の定常状態が共存でき、過渡現象も様々である。

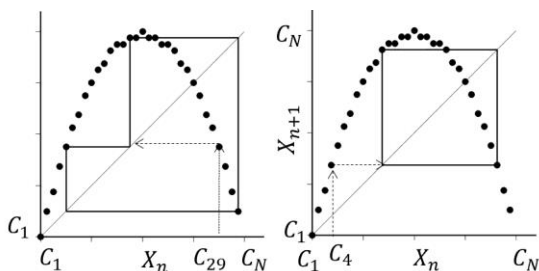


図1: デジタルロジスティックマップ。  
3周期軌道(左)と2周期軌道(右)が共存。

デジタルマップ(Dmap)は、点の集合上で定義される差分方程式であり、デジタルロジスティックマップを一般化したものである[Horimoto, Saito, NOLTA, IEICE 2012]。Dmapは、パラメータに依存して、多彩な定常状態をもつことができ、それに至る過渡現象も多彩である。また、Dmapは、セルオートマトン、人工神経回路網、論理/順序回路、などの様々な系と関連する。Dmapの動作を解析することは、基礎研究として重要であるとともに、その工学的応用を検討するためにも重要である。しかし、現象の複雑さのため、あまり研究は行われていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、Dmapの定常状態と過渡現象の解析法を構築し、Dmapとその関連系の動作解析のための理論を整備することである。その工学的応用についても検討する。DmapをAmapの近似とはみなさず、定義域の点の数を有限として考察する。あるAmapを離散化すればDmapとなるが、あるDmapを補間すればAmapとなり、両者の間には主従関係はない。なお、「デジタルマップ」と命名した理由は、点の集合が2値符号集合と

同値となるためである。

Dmapの定常状態に関する特徴量と、過渡現象に関する特徴量を導入し、これらを用いて特徴量平面を構成する。あるDmapの動作は同平面の1点に対応する。Dmapがどのような現象を呈しうるかを解析し、特徴量平面上の位置に基づいて、その動作の分類を行う。動作解析の一般論をいきなり構築することは困難であるので、重要な例題を用いて、その動作を解析する。Amapについては、周知のように、ロジスティックマップという重要な例題の詳細な解析が、優れた一般論の構築に大きく貢献した[Ott, Cambridge, 1993]。

動的バイナリニューラルネットワーク(DBNN)は3値結合パラメータとシグナム活性化関数で特徴づけられ、初期値とパラメータに依存して様々な周期系列を生成する[Kouzuki, Saito, IEICE Trans. Fund. 2013]。スイッチング回路の制御信号などへの応用も検討されている。DBNNの2値入力集合を点集合と対応づければ、DBNNの動作はDmapに集約され視覚化できる。このDBNNに所望の周期系列を銘記させた場合に、その周期系列を安定化する問題を、Dmapを用いて考察し、数理モデルやハードウェアとしての利点/欠点を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) Dmapは初期値とパラメータに依存して、様々な周期軌道を生じ、それに至る過渡現象も多種多様である。このDmapの動作を解析する方法を構築し、代表的なDmapの例を解析する。特に、Dmapの呈する現象を定量化する簡素な特徴量の導入がポイントである。

(2) 所望の周期軌道を生じさせるDmapを合成する場合、Dmapの定義域の点の数に対して探索空間は指数関数的に増大するので、直接探索は不可能である。複数の個体の相互参照によって探索を行う進化計算を参考とした合成法を検討する。

(3) Dmapを回路実装する方法としては、幾つかの系が考えられるが、デジタルスパイキングニューロン(DSN)[Torikai, Funew, Saito, Neural Networks 2008]による実現と、そのFPGAによる実装を検討する。結合パラメータと周期系列の安定性の関係をDmapを用いて考察し、所望の周期解の安定化を試みる。

### 4. 研究成果

(1) 周期軌道の豊富さと、各周期軌道の安定性に関する特徴量を考察し、これによってDmapの動作を把握する方法を構築した[Yamaoka, Saito, IEICE Trans. Fund. 2016]。スパイキングニューロンモデルの動作を記述するAmapを離散化して得られるDmapの典型例を解析し、パラメータに依存して、周期解の豊富さと安定性が様々に変化することを明らかにした。基本的な現象分類も行った。

(2) Dmap を整数値の特徴ベクトルで記述し、簡素な進化計算を用いて所望の現象を呈する Dmap を合成するアルゴリズムを考案した。同手法は、複数の個体を評価関数に依存して進化させるものであり、各個体は Dmap に対応し、個体数は柔軟に変化できる。通信符号等の基礎となる自己相関関数が小さい系列を生成する例題に適用し、アルゴリズムの有効性を確認した [Saito, Yamaoka, Hamaguchi, NOLTA, IEICE 2017]。

(3) DSN は図 2 に示したように、2 つのシフトレジスタと配線回路で構成される。シフトレジスタの状態が上にシフトしていき、しきい値に達すると発火してスパイク列を生成する。このスパイク列の位相は Dmap によって記述される。

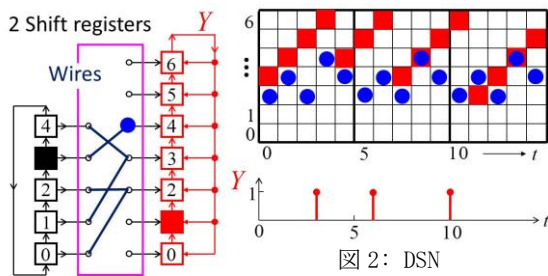


図 2: DSN

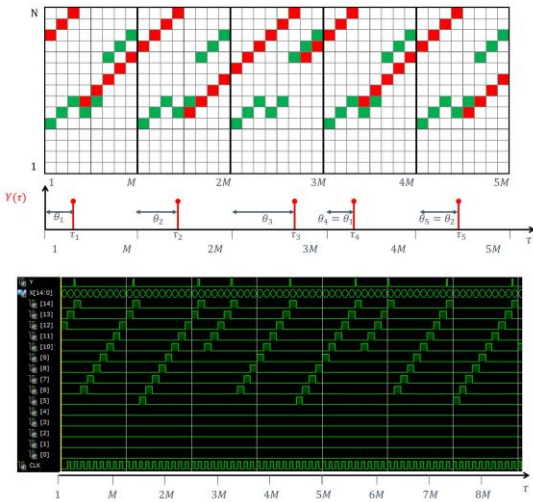


図 3: DSN の Verilog シミュレーション

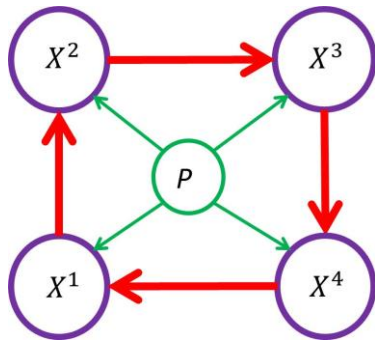


図 4: リング結合 DSN

Dmap の特徴ベクトルと DSN の配線回路の関係性を明らかにし、所望の Dmap を DSN で実現する方法を構築した。また、DSN が所望の周期軌道を生成した場合に、それを安定化する方法も考案した。典型的な Dmap を DSN で実現し、Verilog によって回路を設計し、FPGA で実装して DSN の動作を確認した。図 3 は Verilog シミュレーションによる波形例である。また、図 4 に示したような DSN のリング結合系を提案し、様々な周期軌道の多位同期現象を呈することを明らかにした [Uchida, Saito, Proc. ICONIP, 2017]。

(4) DBNN に所望の周期系列を銘記した場合、その周期系列を安定化する方法を構築した [Sato, Saito, Neurocomputing 2017]。まず、DBNN の結合をスパース化すると、周期系列の安定性が強化される場合のあることを明らかにした。この結果に基づいて、簡素な進化計算を用いて結合をスパース化して周期解を安定化するアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムの目的関数は、周期系列の安定性を評価するものである。アルゴリズムの有効性は、いくつかの例題によって確認した。図 5 は安定性が強化された周期系列を呈するスパース結合 DBNN と対応する Dmap の例である。この周期系列はスイッチング電源のロバスタな制御信号に応用できる。この結果を、大規模系や様々な応用に発展させるべく、現在研究を継続している。

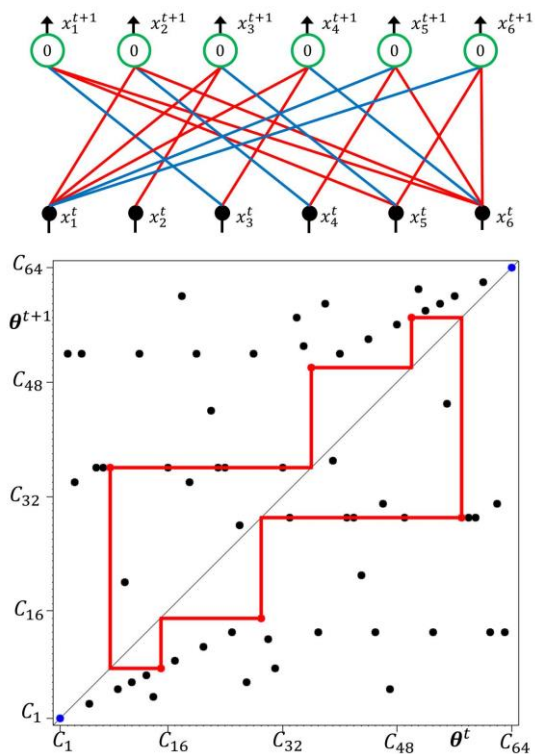


図 5: DBNN とその動作を視覚化した Dmap の例。DBNN の赤枝は正結合 (+1)、青枝は負結合 (-1)、緑丸はしきい値を示す。Dmap の赤軌道は所望周期系列であり、これに 96% 以上の初期値が落ち込む。

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 N. Tada and T. Saito, Basic feature quantities for analysis of periodic orbits in digital return maps, NOLTA, IEICE, 査読有, E9-N, 1, 2018, pp. 2-10, DOI:10.1587/nolta.9.2
  - ② R. Takahashi and T. Saito, A simple integrate-and-fire system and various super-stable periodic orbits, NOLTA, IEICE, 査読有, E9-N, 1, 2018, pp. 11-23, DOI:10.1587/nolta.9.11
  - ③ T. Saito, K. Yamaoka, and T. Hamaguchi, Realization of desired digital spike-trains by a simple evolutionary algorithm, NOLTA, IEICE, 査読有, E8-N, 4, 2017, pp. 267-278, DOI:10.1587/nolta.8.267
  - ④ R. Sato and T. Saito, Stabilization of desired periodic orbits in dynamic binary neural networks, Neurocomputing, 査読有, 248, 2017, pp. 19-27, DOI:10.1016/j.neucom.2016.10.084
  - ⑤ 田中嶋孝祐, 齋藤利通, 粒子群最適化の動的な最大電力点追従への応用, 進化計算学会論文誌, 査読有, 7, 2, 2016, pp. 24-31, DOI: 10.11394/tjpnsec.7.24.
  - ⑥ H. Yamaoka and T. Saito, Steady-versus-transient plot for analysis of digital maps, IEICE Trans. Fund., 査読有, E99-A, 10, 2016, pp. 1806-1812, DOI: 10.1587/transfun.E99.A.1806
  - ⑦ T. Ohata and T. Saito, Stability analysis of multi-phase synchronization in paralleled buck converters with winner-take-all and loser-take-all switching rules, IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst., 査読有, 5, 3, 2015, pp. 345-353, DOI: 10.1109/JETCAS.2015.2462191
  - ⑧ J. Moriyasu and T. Saito, A cascade system of dynamic binary neural networks and learning of periodic orbit, IEICE Trans. Inf. & Syst., 査読有, E98-D, 9, 2015, pp. 1622-1629, DOI: 10.1587/transinf.2014OPP0011
- [学会発表] (計 12 件)
- ① S. Aoki, S. Koyama and T. Saito, Analysis and implementation of simple dynamic binary neural networks, Proc. IEEE/WCCI, 2018.
  - ② H. Uchida and T. Saito, Implementation of desired digital spike maps in the digital spiking neurons, D. Liu et al. (Eds.): ICONIP 2017, Part VI, LNCS 10639, 2017, pp. 804-811, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70136-3\\_85](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70136-3_85)
  - ③ S. Aoki and T. Saito, Stability of periodic orbits and fault tolerance in dynamic binary neural network, D. Liu et al. (Eds.): ICONIP 2017, Part III, LNCS 10636, 2017, pp.770-778, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70090-8\\_78](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70090-8_78)
  - ④ K. Makita, T. Ozawa, and T. Saito, Basic analysis of cellular dynamic binary neural networks, D. Liu et al. (Eds.): ICONIP 2017, Part III, LNCS 10636, 2017, pp. 779-786, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70090-8\\_79](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70090-8_79)
  - ⑤ R. Sato, S. Aoki, and T. Saito, Connection sparsity versus orbit stability in dynamic binary neural networks, Proc. IJCNN, pp. 4482-4487, 2017, DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966424.
  - ⑥ T. Hamaguchi, K. Yamaoka and T. Saito, Stability analysis of periodic orbits in digital spiking neurons, (A. Hirose et al. (Eds.): ICONIP 2016, Part II), LNCS 9948, 2016, pp. 334-341, DOI: 10.1007/978-3-319-46672-9\_38
  - ⑦ K. Makita, R. Sato, and T. Saito, Stability of periodic orbits in dynamic binary neural networks with ternary connection, (A. Hirose et al. (Eds.): ICONIP 2016, Part I), LNCS 9947, 2016, pp. 421-429, DOI: 10.1007/978-3-319-46687-3\_47
  - ⑧ K. Yamaoka and T. Saito, Realization of desired super-stable spike-trains based on digital spiking neurons, Proc. IJCNN, pp. 198-205, 2016, DOI: 10.1109/IJCNN.2016.7727199.
  - ⑨ R. Sato, K. Makita and T. Saito, Analysis of various periodic orbits in simple dynamic binary neural networks, Proc. IJCNN, pp. 2031-2038, 2016, DOI: 10.1109/IJCNN.2016.7727449.
  - ⑩ K. Yamaoka and T. Saito, Growing greedy search and its application to hysteresis neural networks, (S. Arik et al. (Eds.): ICONIP 2015, Part III), LNCS 9491, 2015, pp. 315-322, DOI: 10.1007/978-3-319-26555-1\_36
  - ⑪ R. Sato and T. Saito, Simple feature quantities for learning of dynamic binary neural networks, (S. Arik et al. (Eds.): ICONIP 2015, Part I), LNCS 9489, 2015, pp. 226-233, DOI: 10.1007/978-3-319-26532-2\_25
  - ⑫ N. Tada and T. Saito, Analysis of mixed-rule cellular automata based on simple feature quantities, (S. Arik et al. (Eds.): ICONIP 2015, Part II, LNCS 9490, 2015, pp. 484-491, DOI: 10.1007/978-3-319-26535-3\_55

[図書] (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ URL

<http://www.nonlinear.k.hosei.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齊藤 利通 (SAITO, Toshimichi)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：30178496