

平成 30 年 5 月 9 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21471

研究課題名(和文)小脳型スパイクニューラルネットワークによる革新的機械学習機構の構築

研究課題名(英文) Establishing Innovative Machine Learning Mechanism by Cerebellar Spiking Neural Networks

研究代表者

信川 創 (Nobukawa, Sou)

千葉工業大学・情報科学部・准教授

研究者番号：70724558

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：動的に変化する対象に対しては、古典制御や従来のニューラルネットワーク、ファジィといった機械学習法は、十分に対応できないことが知られている。それに対して本研究では、小脳型スパイクニューラルネットワークにより、動的に変化する制御対象にも有効な新たな機械学習機構の構築を目指し研究を実施した。得られた成果として、小脳運動学習機構を構築するための各種ニューロンモデルとニューラルネットワークを構築した。そして、構築したスパイクニューラルネットワーク上で、学習性能を最大化するカオス共鳴の誘起を実現した。

研究成果の概要(英文)：It is well known that conventional machine learning methods cannot be adopted against dynamically changing systems, adequately. While, we have attempted to establish innovative machine learning mechanism, which can be adopted to such systems, by cerebellar spiking neural networks. As the results, we have constructed the spiking neuron models and their networks corresponding to physiological cerebellar learning system. This cerebellar spiking neural network induces the chaotic resonance that enhances the learning ability.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：スパイクニューラルネットワーク カオス カオス共鳴 小脳 下オリーブ核

### 1. 研究開始当初の背景

動的に変化する対象に対しては、古典制御や従来のニューラルネットワーク、ファジーといった機械学習法は、十分に対応できないことが知られている。一方、脳において運動制御を司る小脳では、下オリーブ核細胞 (Inferior Olive (IO) Neuron) において、運動学習における初期の周期的同期発火と後期のカオス的非同期発火という発火モードが動的に遷移するメカニズムが存在する。そして、このメカニズムによって制御信号を乱さない程度の低頻度な発火での精巧な学習と制御が同時に進行する。このような発火モードの遷移は、初期の学習段階においては、IO ニューロンから一斉に送られる同一の誤差情報に基づき、目標とする運動軌道の概形を効率的に学習し、そしてその後、カオス的な非同期発火によって、豊富な誤差情報に基づいて詳細な軌道を内部モデルとして獲得していく機構であると考えられている。これは、学習と運動制御の段階を分ける必要があった従来型の機械学習と比較して、特に動的に変化する制御対象に対して有効な学習・制御のメカニズムであると考えられる。また、後期の学習段階で観察されるカオスを利用した情報伝達の促進は、これまでに研究されてきたカオスによる信号応答性の増強のニューロン系での実現を示唆しており、従来のノイズによる確率共鳴 (SR: Stochastic Resonance) (F. Moss *et al.*, Scientific American, 1995) と区別してカオス共鳴 (CR: Chaotic Resonance) (H. Nishimura *et al.*, Neural Processing Letters, 2000) と呼び得るものである。

これまでの研究は、IO ニューロンのカオス的非同期発火状態における信号伝達性 (N. Schweighofer *et al.*, PNAS, 2004; I.T. Tokuda *et al.*, Neural Networks, 2010; 信川ら, 電子情報通信学会論文誌 A, 2013; S. Nobukawa *et al.*, Proc. SICE Annual Conference, 2013) や発火モードの遷移による学習効率の向上 (M. Kawato *et al.*, Current Opinion in Neurobiology, 2011) に関するものである。しかし、いずれも数十個のニューロンで構成されるニューラルネットワークを用いたものであり、ヒューマンロボティクス等の工学領域への応用には、複雑な運動軌道の記憶や実時間での制御を達成するために、ニューロン規模を拡大していくことが必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、計算効率の優れたスパイクングニューロンモデルを駆使し、小脳の運動学習機構を実現する大規模ニューラルネットワークを構築する。そして、その性能を評価し、従来型の機械学習法との比較・検討を行うことで、動的に変化する制御対象にも有効な新たな機械学習機構の構築を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 小脳運動学習機構の構築

本研究で構築する小脳運動学習機構については小脳皮質と小脳核、IO 核によって構成される (図 1 参照)。

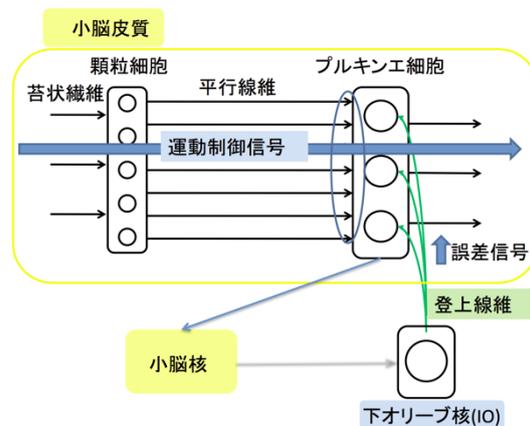


図 1. 小脳における運動学習機構。

IO 核については、代表者がこれまでに構築した Velarde-Llinas IO ニューロンモデルを用いる。本モデルは、Hodgkin-Huxley モデルのように生理学的な構造に着目するのではなく、膜電位における閾値下振動や低閾値、高閾値といった特性を図 2 のように個別のシステム (VP: Van der Pol サブシステム, FN I: 低閾値 FitzHugh-Nagumo サブシステム, FN II: 高閾値 FitzHugh-Nagumo サブシステム) に担わせ、それらを結合することで、少ない計算量で IO ニューロンの膜電位の振舞いを再現できるモデルである (M.G. Velarde *et al.*, Neural Networks, 2002)。

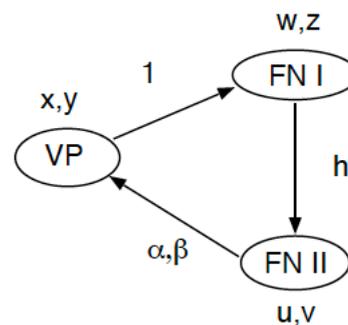


図 2. Velarde-Llinas IO ニューロンモデルの概略図。

更に、小脳皮質と小脳核については、プルキンエ細胞をはじめとする種々のニューロンの挙動を再現できるように、Izhikevich ニューロンモデル (E.M. Izhikevich, IEEE Transactions on neural networks, 2003) のパラメータ・関数系を調整し、ニューラルネットワークを構築する。Izhikevich ニューロンモデルは連続的なシステム挙動のダイナミクスと発火後のリセット動作による非連続な状態跳躍を利用した少ない計算量で、多様な発

火パターンを再現できるモデルである。このモデルは主に、大脳皮質のニューロンの発火パターンを再現するモデルとして提案されたが、常微分方程式中の関数系を変更することで、他の部位におけるニューロンで観測されている膜電位の挙動の再現にも適用できることが報告されている(M.V. Courbage *et al.*, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2007).

#### (2) 小脳運動学習機構の性能評価

構築した小脳のニューラルネットワークの学習性能を評価するために、制御系の性能試験でよく用いられる多関節アーム(M. Katayama *et al.*, *Biological Cybernetics*, 1993; I.T. Tokuda *et al.*, *Neural Networks*, 2010)に対してフィードバック誤差学習を実施する。小脳皮質への入力(図1の苔状繊維部)は、shoulderとelbowの角度及び、それらの1階微分、2階微分の計6入力となる。そして、従来の機械学習であるパーセプトロンやバックプロパゲーション法と学習の精度と効率について比較を行う。更に、外乱や制御システムの動的に変化(arm長等)に対する学習性能のロバスト性についても評価を行う。

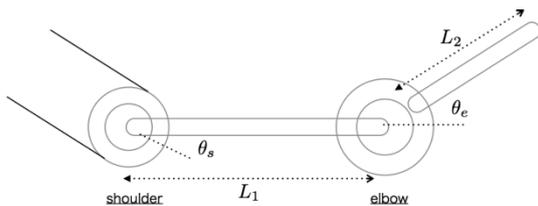


図3. 性能評価用の多関節アーム.

### 4. 研究成果

#### (1) 小脳運動学習機構の構築

本研究で構築する小脳運動学習機構は小脳皮質と小脳核、下オリーブ核によって構成される。小脳運動学習機構を実現するスパイクニューラルネットワークの構築を以下の項目に関して実施した。

①Velarde-Llinas スパイクニューロンモデルを用いて、小脳運動学習機構を実現する下オリーブ核のニューラルネットワークを構築した。運動学習時の誤差情報の入力に対して、カオス共鳴的応答により情報伝播が促進されることを確認した。また、このカオス的なスパイク活動については、実際の下オリーブ核において観測されるスパイク活動と同期特性・基準振動・スパイク頻度といった生理学的な特性に関して一致していることも確認した(図4参照)。IO核の規模としては、最大で数万個の下オリーブ(IO)ニューロンで構成されるニューラルネットワークの発火活動がシミュレートできることを確認した(雑誌論文: ⑤)。

更に、より一般化したスパイクニューロンモデルにおけるCR特性を評価し、CRの応答性能は適度な軌道不安定性の元で最大化す

ることを図5のように確認した(雑誌論文: ④⑦⑧, 学会発表: ①③, 図書: ①)。

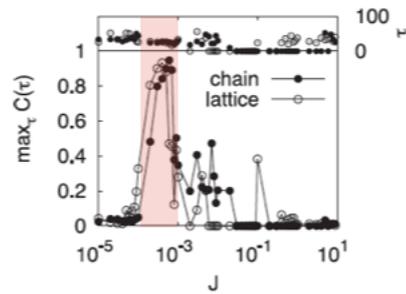


図4. 低頻度なカオスのスパイク領域(赤塗りつぶし部分)における信号応答性の増強(カオス共鳴)。

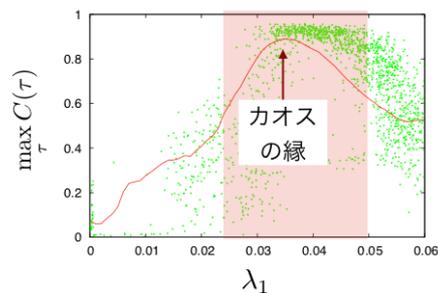


図5. 適度な軌道不安定性(最大リアプノフ指数  $\lambda_1$ )による信号応答性の最大化。

②皮質系のスパイクパターンを生成する状態跳躍を含んだスパイクニューロンモデルの分岐解析を実施した。状態跳躍の導入により、アトラクター構造に非線形性を有した折畳み構造が追加され(図6参照)、その効果によって、跳躍パラメータの調整により、従来の連続的なスパイクニューロンモデルでは現れなかった多様な分岐と発火パターンが生成されることを確認した。このように構築したスパイクニューロンモデルは、小脳運動学習機構を実現するスパイクニューラルネットワークにおける小脳核や小脳皮質系のニューロンに利用できるものである(雑誌論文: ②③⑥, 学会発表: ②, 図書: ①)。

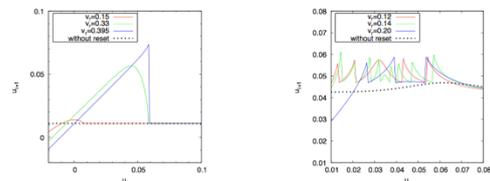


図6. 状態跳躍(reset動作)の導入によってアトラクタに付加される非線形構造。

#### (2) 小脳運動学習機構の性能評価

当初の研究計画では、小脳運動学習機構のスパイクニューラルネットワークの学習性能を評価するために、多関節アームのフィードバック誤差学習を実施する予定であった(2節参照)。しかし、スパイクニューラルネ

ネットワークのカオス性をカオス共鳴に最適な状態に遷移させるためには内部パラメータのみの調整では難しいことが判明した。そのため、非線形写像の構造を外部信号により制御する手法の考案が新たに必要となった。そこで、その手法の構築のために、スパイクングニューラルネットワークよりも比較的単純な cubic 離散写像に対して、外部フィードバック信号によってカオス共鳴に最適な状態へとダイナミクスを遷移する手法を考案し、図 7 に示される通り、信号応答性の評価を行った(雑誌論文: ①)。

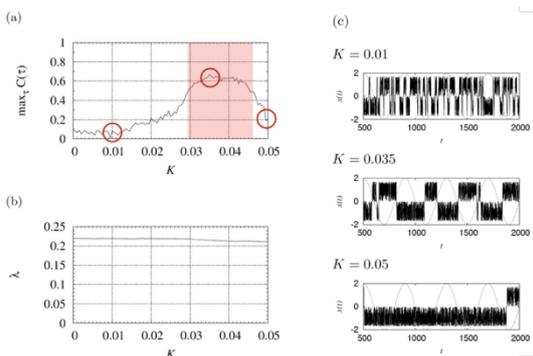


図 7. 外部フィードバック信号(信号強度  $K$ )によって誘起されるカオス共鳴。

今後の研究の進展としては、この新たなカオス制御手法に基づき、当初、実施予定であった小脳運動学習機構のスパイクングニューラルネットワークの学習性能を評価するために、多関節アームに対してフィードバック誤差学習を実施し、実際的小脳のような制御と精巧な運動学習が同時に進行出来る画期的な運動学習機能を実現することが期待される。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Sou Nobukawa, Haruhiko Nishimura, Teruya Yamanishi, Hirotaka Doho, Induced Synchronization of Chaos-Chaos Intermittency in Coupled Cubic Maps by External Feedback Signals, Proceedings of 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, 査読有, IEEE (to be published).
- ② Sou Nobukawa, Haruhiko Nishimura, Teruya Yamanishi, Routes to Chaos Induced by a Discontinuous Resetting Process in a Hybrid Spiking Neuron Model, Scientific Reports, 査読有, 8(379),pp.1-11, Springer Nature, 2018. doi:10.1038/s41598-017-18783-z
- ③ 信川創, 西村治彦, 山西輝也, ハイブリット化された FitzHugh-Nagumo ニューロンモデルにおけるカオスルートの解析, システム制御情報学会論文誌, 30(6),pp.167-174, 査読有, 2017年.

doi:10.5687/iscie.30.167

- ④ Sou Nobukawa, Haruhiko Nishimura, Teruya Yamanishi, Chaotic Resonance in Typical Routes to Chaos in the Izhikevich Neuron Model, Scientific Reports, 7(1331),pp.1-9, 査読有, Springer Nature, 2017. doi:10.1038/s41598-017-01511-y
- ⑤ Sou Nobukawa, Haruhiko Nishimura, Chaotic Resonance in Coupled Inferior Olive Neurons with the Llinás Approach Neuron Model, Neural Computation, 28(11),pp.2505-2532, 査読有, MIT press, 2016. doi:10.1162/NECO\_a\_00894
- ⑥ 信川創, 西村治彦, 山西輝也, 劉健勤, 状態跳躍を伴うスパイクングニューラルシステムにおけるカオス評価法の検討, システム制御情報学会論文誌, 29(5),pp.210-215, 査読有, 2016年. doi:10.5687/iscie.29.210
- ⑦ Sou Nobukawa, Haruhiko Nishimura, Enhancement of Spike-Timing-Dependent Plasticity in Spiking Neural Systems with Noise, International Journal of Neural Systems, 26(05), pp.1-11, 査読有, World Scientific, 2015. doi:10.1142/S0129065715500409
- ⑧ Sou Nobukawa, Haruhiko Nishimura, Teruya Yamanishi, Jian-Qin Liu, Analysis of chaotic resonance in Izhikevich neuron model, PloS one, 10(9): e0138919, pp.1-22, 査読有, 2015. doi:10.1371/journal.pone.0138919

[学会発表] (計 3 件)

- ① 信川創, 西村治彦, 山西輝也, スパイクングニューロンモデルのカオス共鳴におけるアーノルドの舌の検討, SCF17, システム制御情報学会, 2017年.
- ② 信川創, 西村治彦, 山西輝也, ハイブリットなスパイクングニューロンモデルにおけるカオスルートの検討, SCF16, システム制御情報学会, 2016年.
- ③ 信川創, 西村治彦, 山西輝也, 劉健勤カオス状態におけるスパイクングニューロン系の信号応答特性, システム制御情報学会, 2015年.

[図書] (計 2 件)

- ① Sou Nobukawa, Haruhiko Nishimura, Toshiki Maruo (Edited by Quoc Nam Tran, Hamid R. Arabnia), Spontaneous Activity Characterization in Spiking Neural Systems with Log-Normal Synaptic Weight Distribution, Emerging Trends in Applications and Infrastructures for Computational Biology, Bioinformatics, and Systems Biology (Chapter 4), 査読有, Morgan

Kaufmann Publishers, Elsevier, 2016.  
<https://www.elsevier.com/books/emerging-trends-in-applications-and-infrastructures-for-computational-biology-bioinformatics-and-systems-biology/arabnia/978-0-12-804203-8>

- ② Sou Nobukawa, Haruhiko Nishimura, Teruya Yamanishi, Jian-Qin Liu (Edited by Quoc Nam Tran, Hamid Arabnia), Chaotic Dynamical States in the Izhikevich Neuron Model, Emerging Trends in Computational Biology, Bioinformatics, and Systems Biology (Chapter 19), 査読有, Morgan Kaufmann Publishers, Elsevier, 2015.  
<https://www.elsevier.com/books/emerging-trends-in-computational-biology-bioinformatics-and-systems-biology/arabnia/978-0-12-802508-6>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

信川 創 (Nobukawa, Sou)

千葉工業大学・情報科学部・情報工学科・准教授

研究者番号：70724558

### (2)研究協力者

西村 治彦 (Nishimura, Haruhiko)

兵庫県立大学大学院・応用情報科学研究科・教授

山西 輝也 (Yamanishi, Teruya)

福井工業大学・環境情報科学部・経営情報学科・教授