

デジタルスパイキングニューラルネットワークの同期現象と時系列近似

著者	内田 厚研
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-5
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022816

デジタルスパイクングニューラルネットワークの同期現象と時系列近似

SYNCHRONIZATION AND TIME-SERIES APPROXIMATION IN DIGITAL SPIKING NEURAL NETWORKS

内田厚研

Hiroaki UCHIDA

指導教員 斎藤利通

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

This paper considers a ring-coupled digital spiking neural network and its hardware implementation. Depending on parameters, the network can realize multi-phase synchronization of periodic spike-trains. Applying a time dependent selection switching, the network outputs a variety of periodic spike-trains. Applying a dynamic WTA switching rule, a target spike-train can be approximated automatically. The network is a digital dynamical system and is suitable for FPGA based hardware implementation. A test circuit is implemented in a FPGA board by the Verilog and typical multi-phase synchronization phenomena are confirmed experimentally.

Key Words : spiking neural network, synchronization, spike-train approximation

1. はじめに

スパイクングニューラルネットワークはアナログダイナミカルシステムの1つで、積分と発火の動作を繰り返し、様々なスパイク列を生成することができる[1] [2]。スパイク列は通信システムや画像領域分割、セントラルパターンジェネレータなど様々な工学的応用において重要な役割を担っている[3]-[6]。スパイクングニューラルネットワークの解析及び合成は、非線形現象を理解するうえで重要であり、工学的応用の基礎としても重要である。

本論文ではデジタルスパイクングニューロン(DSN)のリング結合系(RDSN)について考察する。DSNは時間と状態が離散的なデジタルダイナミカルシステムであり、積分と発火の動作を繰り返し様々な周期スパイク列(PST)を出力することができる[7]-[11]。RDSNは、DSNに遅延結合を適用し、リング型に結合することによって構成され、PSTsの多相同期現象を実現することができる。同期状態は局所安定にすることができる[12]。RDSNに動的選択スイッチを適用し、適当なDSNを動的に選択するシステムを提案する。このシステムでは、単体のDSNでは実現できない様々なPSTsを実現することができる。RDSNが出力するPSTsはスパイクベースの時系列近似/予測に適しており、デジタルリザーバーコンピューティング系に発展するかもしれない。アナログリザーバーコンピューティングは時系列予測等で成果を上げている[13][14]。

DSNは二つのシフトレジスタと配線によって構成され、FPGAを用いてハード実装できる。FPGAは論理回路を自在に再構成できる集積回路であり、消費電力が低く、演

算を電子回路で並列化して、処理を高速化できるという利点がある。Verilogを用いてRDSNをFPGAに実装し、周期スパイク列の多相同期現象を確認する。応用のために基礎として、ターゲットスパイク列を指数分布で生成し、WTAスイッチングルール[15]を用いて動的選択スイッチルールを適用し、RDSN内で使用するDSNの数と近似誤差を検討する。本論文の結果は、デジタル力学系が呈する非線形現象の解析と、時系列近似/予測といった応用の基礎となる。

2. デジタルスパイクングニューロン

まず、RDSNを構成するDSN[9][10]を紹介する。 $x(\tau)$ は離散時間 τ における離散状態変数である。DSNは、周期 N_p のベース信号と一定のしきい値の間で積分と発火の動作を繰り返し、スパイク列を出力する。

積分

$$\begin{cases} x(\tau+1) = x(\tau) + 1 & \text{if } x(\tau) < N_x \\ y(\tau) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

自己発火

$$\begin{cases} x(\tau+1) = b(\tau) + 1 & \text{if } x(\tau) = N_x \\ y(\tau) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $b(\tau)$ は周期 N_p の周期的なベール信号を、 N_x はしきい値を示す。以後、ベース信号の周期 N_p を基本周期と呼ぶ。

$$x(\tau) \in \{0, 1, \dots, N_x\}, N_x \leq N_p - 1$$

簡単のため、ベース信号に次の条件を与える。

$$\tau - 2N_p + 1 \leq b(\tau) - N_x \leq \tau - N_p \quad (3)$$

この時、1つの基本周期に1本のスパイクがたつ。スパイク列は以下のように表せる。

$$y(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{for } \tau = \tau_n \\ 0 & \text{for } \tau = \tau_n \end{cases} \quad \tau_n \in [(n-1)N_p + 1, nN_p] \quad (4)$$

ここで、 τ_n は n 番目のスパイク位置を示し、 θ_n は n 番目のスパイク位相を示す。スパイク列 $y(\tau)$ はデジタルスパイクマップ(Dmap)によって支配される。

$$\theta_{n+1} = F(\theta_n) = \theta_n - b(\theta_n - 1) + (N_x - N_p), \quad \theta_n \in \{a, \dots, N_p\} \quad (5)$$

Dmapで記述されるスパイク列はすべてDSNで実装することができる。

3. デジタルスパキングニューラルネット

図1はRDSNと動的選択スイッチを示している。M個のDSNはリング型に結合され、それぞれのDSNは共通のベース信号を有し、共通のPSTを出力する。RDSNのダイナミクスは以下の式で示される。

積分

$$\begin{cases} x_i(\tau + 1) = x_i(\tau) + 1 \\ y_i(\tau) = 0 \end{cases} \quad \text{if } x_i(\tau) < N_x \quad (6)$$

自己発火

$$\begin{cases} x_i(\tau + 1) = b(\tau) \\ y_i(\tau) = 1 \end{cases} \quad \text{if } x_i(\tau) = N_x \quad (7)$$

誘導発火

$$\begin{cases} x_{i+1}(\tau + 1) = N_x - N_p - 1 \\ z_i(\tau) = 1 \end{cases} \quad \text{if } x_i(\tau) = N_x \text{ and } x_{i+1}(\tau) \leq N_x - N_p \quad (8)$$

ここで、 $i \in \{1, \dots, M\}, x_{M+1} = x_1, M \geq 2$ である。

積分と自己発火は単体のDSNと同じであるが、誘導発火は積分よりも優先的に発動する。誘導発火はM個のDSNをリング型に結合する。 y_i はi番目のスパイク列を、 z_i はi番目の結合信号を示している。

$$z_i(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i(\tau) = N_x \text{ and } x_{i+1}(\tau) \leq N_x - N_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

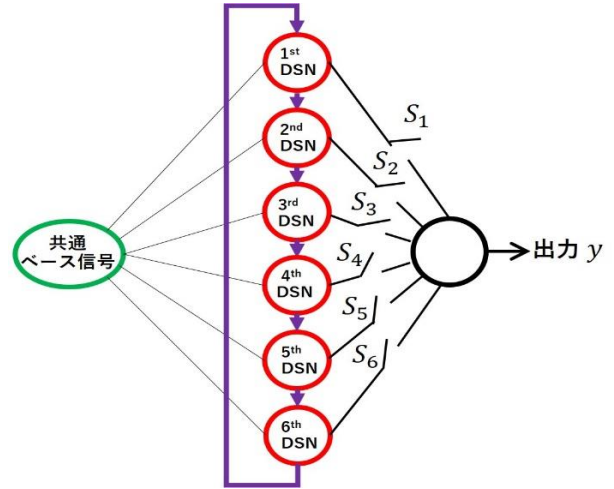


図1 RDSNと動的選択スイッチ

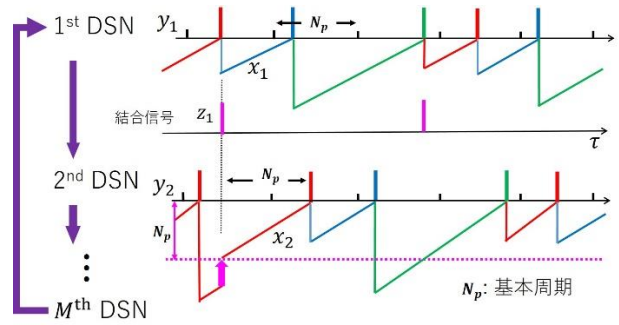


図2 結合信号と誘導発火

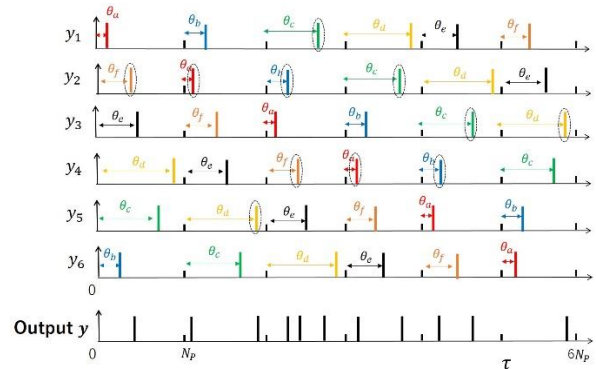


図3 PSTのM相同期とRDSNの出力PST(M=6)

図2は結合信号と誘導発火を示している。それぞれのDSNは周期 MN_p のPSTを出力し、誘導発火によって1周期遅れを作る。これによりRDSNはPSTのM相同期現象を実現することができる。

$$\begin{aligned} x_i(\tau) &= x_i(\tau + MN_p), y_i(\tau) = y_i(\tau + MN_p), i \in \{1, \dots, M\} \\ x_j(\tau) &= x_{j+1}(\tau + N_p), y_j(\tau) = y_{j+1}(\tau + N_p), j \in \{1, \dots, M-1\} \\ z_i(\tau) &= 1 \text{ for some } \tau \in \{a, \dots, MN_p\} \end{aligned} \quad (10)$$

結合信号が同期状態の存在を示しており、結合信号が全ての離散時間で発生しない場合、それぞれのDSNは孤

立して動作しており，結合されていないこととなる。

ここで，図1に示す動的選択スイッチを適用することで，RDSNはあらゆるスパイク位相の組み合わせを実現することができる。時間間隔(0,MN_p)をM個のスロット I₁ to I_Mに分割する

$$I_1 = [0, N_p), I_2 = (N_p, 2N_p), \dots, I_M = [(M-1)N_p, MN_p).$$

i 番目のスイッチは，それぞれのダイムスロットでいづれかのDSNを選択する。

$$y(\tau) = \sum_{i=1}^M w_{ij} y_i(\tau) \text{ for } \tau \in I_j, j \in \{1, \dots, M\} \quad (11)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } y_i \text{ is selected for } \tau \bmod MN_p \in I_j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

出力は選択行列W = (w_{ij})によって特徴づけられる。図3につぎの選択行列で与えられるRDSNの出力PSTと6相同期現象を示す。

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

出力PSTは6つのスパイク位相によって特徴づけられる。選択行列を調整することで，RDSNは6つのスパイク位相のあらゆる組み合わせから成る様々なPSTを実現することができる。このようなスパイク列は単体のDSNでは実現できない。

4. スパイク列近似

RDSN をスパイク列近似に応用する。まずターゲット PST を定義する。

$$y_t(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{for } \tau = \tau_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k \in \{1, \dots, Q\} \quad (13)$$

ここで，τ_nはn番目のスパイク位置を示しており，y_t(τ+T) = y_t(τ)である。ターゲット PST は1周期TにQ本のスパイクから成る。簡単のため，ターゲット PST はインタースパイクインターバル(ISI)で表現されることとする。

$$D = (d_1, d_2, \dots, d_{Q-1}), d_l = \tau_{l+1} - \tau_l, l \in \{1, \dots, Q-1\} \quad (14)$$

ここで，d_lは1番目のISIを，Dはターゲット PSTのISIシーケンスを能わしている。

近似を実現するため，選択行列を適切に設定する必要がある。そこで，図4に示すWTAスイッチングを提案する。

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } y_t(\tau) = 1 \text{ and } x_i(\tau) \text{ is the maximum} \\ & \text{at time } \tau(x_i(\tau) > x_k(\tau), k \neq j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

WTA スイッチングルールはターゲット PST が入力された際に，最も発火する可能性の高い DSN を選択する。これにより，ターゲット PST はRDSNによって自動的に近似される。図5にスパイク列近似の Verilog シミュレーションを示す。ターゲット PST はD = (21,11,9,7,7,6,6,7,6,9)であらわされており，RDSN が出力するスパイク列で近似される。

選択行列は以下の式で与えられる。

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

ここで，近似精度を測定するため，2つの指標を定義する。ISI エラーε_pとスパイク欠落率SMRである。

ISI エラー

$$\epsilon_p = \frac{1}{Q-1} \sum_{i=1}^{Q-1} |d_i - d'_i| \quad (17)$$

スパイク欠落率

$$SMR = \frac{\#MS}{Q} \times 100[\%] \quad (18)$$

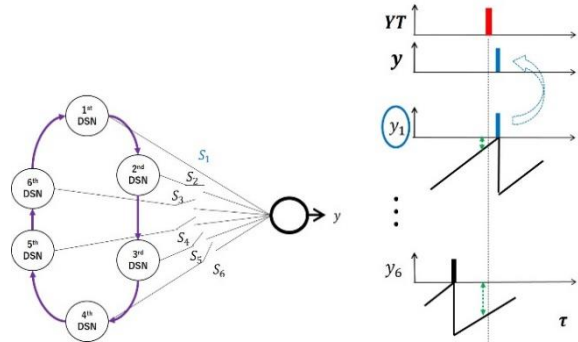


図4 WTA スイッチングルール

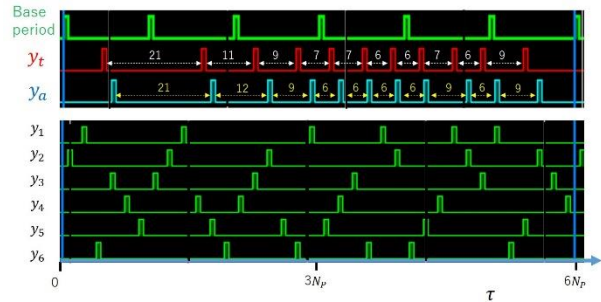


図5 ターゲット PST と近似スパイク列の Verilog シミュレーション

ここで、 $\#MS$ は欠落スパイク数を示している。もし、WTAがターゲットスパイクを取り損ねた場合、ISIエラーは欠落スパイクを取り除いて考える。図5のVerilogシミュレーションでは、 $\epsilon_p = 0.5$ 、 $SMR = 0$ である。

ターゲット PST は図6に示す離散指数分布 $f(d)$ で与えられる。dはISIに対応するランダム変数であり、 d_{min} は調整のためのパラメータである。

$$f(d) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda(d-d_{min})} & d \geq d_{min} \\ 0 & d < d_{min} \end{cases} \quad (19)$$

もし、サブインターバルにおいて、スパイクの発火頻度がポアソン分布に従う時、発火間隔は指数分布に従うとされる。1つのサブインターバルで0から3本のスパイクが現れるようパラメータを調整し、 $d_{min} = 6$ 、 $\lambda = 0.25$ とした。

近似精度とネットワーク効率化のために、近似精度使用するDSNの数の関係を調べる2つの実験を行う。

Case 1 サブインターバルで最も活性化頻度の少ないDSNから順番にへらす。

Case 2 ランダムにDSNの数を減らす。

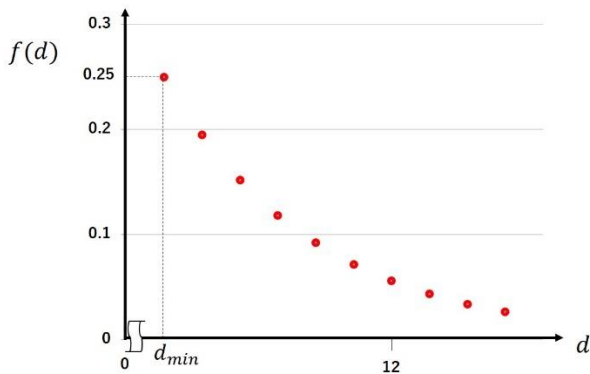


図6 離散指数分布 ($d_{min} = 6$ 、 $\lambda = 0.25$)

表1 Case 1の数値実験結果

#DSN	AVG of ϵ_p	SD of ϵ_p	SMR
6	0.96	0.18	0.00
5	1.08	0.22	0.00
4	1.20	0.28	0.94
3	1.99	0.69	0.94

表2 Case 2の数値実験結果

#DSN	AVG of ϵ_p	SD of ϵ_p	SMR
6	0.96	0.18	0.00
5	2.01	0.79	0.00
4	2.21	0.60	7.55
3	2.88	0.78	11.3

10回平均をとり、ISIエラーの平均値、標準偏差、スパ

イク欠落率を測定した。実験結果から、DSNの数が6の時、近似精度は土地にも変わらないが、DSNの数が減少するにつれて、Case 1の方がCase 2より良い近似精度であることがわかる。特にDSNの数が3の時、その差が顕著に表れている。このことから、近似するために効率的でできせつな組み合わせのDSNが存在することがわかり、WTAは選択行列を決定するうえで効果的であることがわかる。

5. むすび

DSNをリング型に結合したRDSNが実現する周期スパイク列の多相同期現象と、スパイク列近似について考察した。動的選択スイッチを適用することで、RDSNはあらゆるスパイク位相の組み合わせを実現することができ、様々な所望の周期スパイク列を生成することができる。また、WTAスイッチングルールに基づいて動的選択スイッチを決定することで、自動的にスパイク列を近似することができる。使用するDSNの数を減らし近似誤差を測定することで、近似するために適切なDSNを選択することができ、次元圧縮につなげることができると考えられる。Verilogシミュレーションにより典型的な同期現象とスパイク列近似を確認した。

周期スパイク列の多相同期現象の詳細な安定性解析、目標のスパイク列に対する最適なニューロンの探索、選択行列の効率的な学習方法、スパイク列予測へ向けた応用などが今後の課題として考えられる。

参考文献

- 1) E. M. Izhikevich, Dynamical systems in neuroscience, MIT Press, 2006.
- 2) E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons, IEEE Trans. Neural Networks, 14, 6, pp. 1569-1572, 2003.
- 3) S. R. Campbell, D. Wang, and C. Jayaprakash, Synchrony and desynchrony in integrate-and-fire oscillators, Neural Comput., 11, pp. 1595-1619, 1999.
- 4) N. F. Rulkov, M. M. Sushchik, L. S. Tsimring, and A. R. Volkovskii, Digital communication using chaotic-pulseposition modulation, IEEE Trans. CAS-I, 48, 12, pp. 1436-1444, 2001.
- 5) T. Iguchi, A. Hirata, and H. Torikai, Theoretical and heuristic synthesis of digital spiking neurons for spike-pattern division multiplexing, IEICE Trans. Fundamentals, E93-A, 8, pp. 1486-1496, 2010.
- 6) A. Lozano, M. Rodriguez, R. Roberto Barrio, Control strategies of 3-cell Central Pattern Generator via global stimuli, Sci. Rep. 6, 23622; doi: 10.1038/srep23622, 2016.
- 7) H. Torikai, H. Hamanaka and T. Saito, Reconfigurable spiking neuron and its pulse-coupled networks: basic characteristics and potential

- applications, *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, 53, 8, pp. 734-738, 2006.
- 8) H. Torikai, T. Saito and W. Schwarz, Synchronization via multiplex pulse-train, *IEEE Trans. Circuit Syst. I*, 46, 9, pp. 1072-1085, 1999
 - 9) H. Torikai, A. Funew, and T. Saito, Digital spiking neuron and its learning for approximation of various spike-trains, *Neural Networks*, 21, pp. 140-149, 2008.
 - 10) T. Saito, K. Yamaoka, and T. Hamaguchi, Realization of desired digital spike-trains by a simple evolutionary algorithm, *NOLTA, IEICE, E8-N*, 4, pp. 267-278, 2017.
 - 11) 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*, pp. 804-811, 2017.
 - 12) H. Uchida and T. Saito, Multi-phase synchronization phenomena in a ring-coupled system of digital spiking neurons, *IEICE Tran. Fundamentals*, E102-A, 1(2019), 235-241.
 - 13) L. Appeltant, M. C. Soriano, G. Van der Sande, J. Danckaert, S. Massar, J. Dambre, B. Schrauwen, C. R. Mirasso, I. Fischer, Information processing using a single dynamical node as complex system, *Nat. Commun.*, 2:468; doi: 10.1038/ncomms1476, 2011.
 - 14) P. Antonik, M. Hermans, M. Haeltermann, S. Massar, Photonic reservoir computer with output feedback for chaotic time series prediction, In *Proc. IJCNN*, pp. 2407-2413, 2017.
 - 15) T. Kabe, H. Torikai and T. Saito, Synchronization via multiplex spike-trains in digital pulse-coupled networks, *Lecture Note on Computational Science*, 4234, Springer, *Neural Information Processing, III*, pp. 1141-1149, 2006.