

## スパイク位相マップを用いたデジタルスパイクニューロンの動作解析

YANASE, Yusaku / 柳瀬, 勇作

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

3

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00013080>

# スパイク位相マップを用いた デジタルスパイクニューロンの動作解析

ANALYSIS OF THE DIGITAL SPIKING NEURONS WITH SPIKE PHASE MAP

柳瀬 勇作

Yusaku YANASE

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 studies the transient phenomena and steady state of the digital spiking neurons. This is switched dynamical systems that can generate various spike-trains. The neurons can have co-existing periodic spike-trains and exhibit one of them depending on the wiring pattern and the initial value. We demonstrate several typical phenomena. Using the mapping produce, such phenomena are analyzed precisely.

**Key Words :** *spiking neuron, digital spike-train, digital dynamical systems*

## 1. Introduction

様々なスパイクニューロンモデルが、スイッチ力学系の典型例として、基礎応用両面から研究されている。[1]~[3] 積分発火スイッチは、スパイク列生成の基本であり、その動作は「電位があるしきい値に達すると、発火してスパイクを出力し、電位が低いレベルにリセットされる」と要約できる。このスパイク列の動作解析は、情報処理や信号処理を考察するため基礎研究として重要であり、様々なスパイク列を呈するニューロンモデルも提案されている。また、スパイクニューロンを用いた情報処理 [4]、スパイク位相変調を用いた UWB 通信 [5]、人工内耳 [6] などの工学的応用の基礎としても重要である。我々はこれまでアナログスパイクニューロン (ASN) について、ベース信号の足し合わせによる分岐現象やスパイク列の安定化などの動作解析や、信号処理などへの応用も検討してきた。本論文では、複数のシフトレジスタの結合を基本とするデジタルスパイクニューロン (DSN) [7], [8] を取り上げ、デジタルスパイク位相マップを用いて動作解析を行う。DSN のデジタルスパイク列の解析は、UWB 通信やデジタル力学系の基礎として重要である。また現在、成長貪欲探索法 (GGS) [9] を用いた所望のスパイク列の生成への応用も検討されている。本論文では、DSN 回路の結線パターンとシフトレジスタの数 (セル数) に対するデジタルスパイク列の過渡現象及び定常状態について考察する。FPGA による回路実験の基礎として、本論文では、VHDL の RTL 記述によるシミュレーションを示す。同時にデジタル位相マップによる数値実験も行う。過渡現象が存在する場合と存在しない場合の結果を示す。過渡現象が存在する場合には、定常状態は 1 つでありスパイク列は 1 つしか存在しない。過渡現象が存在しない場合には、定常状態が複数共存しているため、スパイク列もいくつか存在している。このように、結線パターンやセル数の変化により様々なスパイク列の生成が可能であるため、様々な条件で検討をしていく。

## 2. デジタルスパイクニューロン

図 1, 2 にデジタルスパイクニューロンの動作を示す。p-cells は M 個のセルから構成されており、図 2 においてベース信号の周期に対応している。また、それぞれの p-cells の状態は離散化されており、 $p_i^{(k)}(t) \in \{0, 1\}$  ただし、 $i \in \{0, 1, \dots, M-1\}$  である。時間もまた離散化されており、 $t = 0, 1, 2, \dots$  となっている。本論文では、1 つのセルの状態が"1"であるとき、その他のセルの状態は"0"であると仮定する。そのため、p-cells の状態変数  $P^{(k)}(t) \in \{0, 1, \dots, M-1\}$  は以下のように定義される:

$$P^{(k)}(t) = i \quad \text{if} \quad p_i^{(k)}(t) = 1$$

図 1 より、p-cells はリング状に繋がっているため、最上位セルの状態が"1"の時、次に状態が"1"になるのは"0"番目にセルである。:

$$P^{(k)}(t+1) = P^{(k)}(t) + 1 \pmod{M} \quad (1)$$

本論文では、p-cells の初期値を  $P^{(k)}(0) = 0$  とし、 $P^{(k)}(t)$  は以下のような時間  $t$  の関数である。:

$$P^{(k)}(t) = t \pmod{M} \quad (2)$$

ここで、各々の p-cells は x-cells に結線されている。ただし、1 つの p-cells は 1 つの x-cells が繋がっているとす。そのため、結線パターンは以下のように示すことができる。 $A^{(k)}: \{0, 1, \dots, M-1\} \rightarrow \{0, 1, \dots, N-1\}$

$$A^{(k)}(i) = j$$

ただし、 $i$  番目の p-cell に  $j$  番目の x-cell が結線されているとき、関数  $A^{(k)}$  は結線パターンとして定義できる:

$$A^{(k)} \equiv (A^{(k)}(0), A^{(k)}(1), \dots, A^{(k)}(M-1))$$

図 1 では、セル数  $(M, N) = (5, 9)$

$$A^{(k)} = (2, 2, 6, 7, 8). \quad (3)$$

であることが、確認できる。図1の結線により、ベース信号  $B^{(k)}(t) \in \{0, 1, \dots, N-1\}$  が出力され、以下のように示すことができる。

$$B^{(k)}(t) = j \quad \text{if} \quad b_j^{(k)}(t) = 1$$

$$B^{(k)}(t) = A^{(k)}(P^{(k)}(t)). \quad (4)$$

同様に、x-cells の状態は  $x_j^{(k)} \in \{0, 1\}$  ただし、 $j \in \{0, 1, \dots, N-1\}$  である。ここで、1つのセルの状態が"1"であるとき、その他のセルの状態は"0"であると仮定する。そのため、x-cells の状態変数  $X^{(k)}(t) \in \{0, 1, \dots, N-1\}$  は以下のように定義される：

$$X^{(k)}(t) = j \quad \text{if} \quad x_j^{(k)}(t) = 1$$

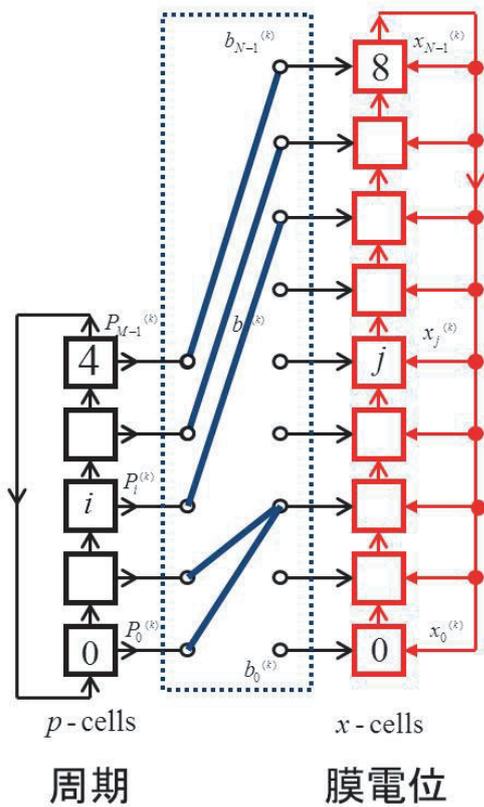


図1 回路モデル. 各セル数:  $(M, N) = (5, 9)$ . 結線パターン  $A = (2, 2, 6, 7, 8)$ .

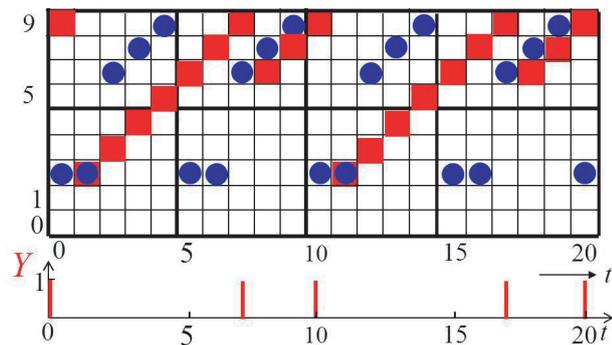


図2 時間波形. ベース信号:  $B^{(k)}(t)$ , 膜電位:  $X^{(k)}(t)$

$X^{(k)}$  はスパイクングニューロンモデルの積分発火現象の膜電位に対応しており動作は、

$$X^{(k)}(t+1) = \begin{cases} X^{(k)}(t) + 1 & \text{if } X^{(k)}(t) < N-1 \\ B^{(k)}(t) & \text{if } X^{(k)}(t) = N-1 \end{cases} \quad (5)$$

膜電位  $X^{(k)}$  が、 $N-1$  以下の時、セルの状態が上昇し、膜電位がしきい値  $N-1$  に達した時は発火する。それと同時に、スパイク  $Y^{(k)}$  を出力する。そして、次の離散時間  $t$  で、膜電位はスパイク発生時のベース信号  $B^{(t)}$  にリセットされる。これによって出力されるスパイク列は以下のように示される：

$$Y^{(k)}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } X^{(k)}(t) < N-1 \\ 1 & \text{if } X^{(k)}(t) = N-1 \end{cases} \quad (6)$$

### 3. デジタル位相マップ

デジタル位相マップ (Dmap) を定義する。Dmap は  $M$  個の格子点から構成されており、その格子点を反復することで様々な周期軌道を生成する。

$$\theta(n) = f(\theta(n)), \theta(n) \in L_N \equiv \{l_1, \dots, l_N\} \quad (7)$$

ただし、 $L_N$  は格子点  $l_i \equiv (m-1)/M, m = 1 \sim M$  であり、 $M$  は格子点の数とする。 $\theta_n$  は離散時間  $t$  における  $L$  の状態変数である。また、図2のデジタルスパイク列の位相に対応している。ここで、図3において安定な2周期軌道を呈している。よって、図2におけるデジタルスパイク列も2周期となっていることが確認できる。

Dmap の現象を解析するための基本的な定義を与える。 $f^p(\theta_p) = \theta_p$  かつ  $f^q(\theta_p) \neq \theta_p$  for  $0 < q < p$  ( $p, q$  は自然数) であるとき、 $\theta_p$  を  $p$  周期点 (PEP, Periodic Point) と呼ぶ。ただし、 $f^p$  は  $f$  の  $p$  回合成写像である。PEP の系列  $\{f(\theta_p), \dots, f^p(\theta_p)\}$  を  $p$  周期の周期軌道 (PEO, Periodic Orbit) と呼ぶ。つまり、PEO の出力は定常状態を表す。また、1周期のPEOを固定点と呼ぶ。次にある格子点  $\theta_e$  が PEP でなく、 $f^r(\theta_e)$  ( $r$  は整数) が PEP となると、 $\theta_e$  を Eventually Periodic Point (EPP) と呼ぶ。つまり、EPP の出力は過渡現象を表す。

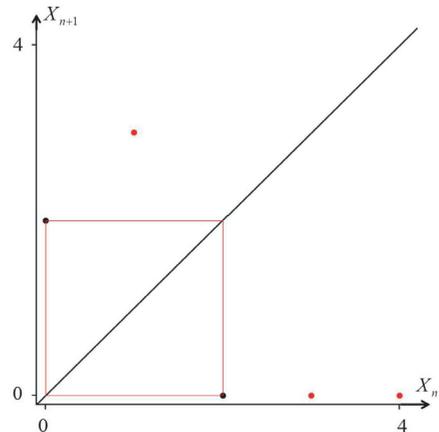


図3 デジタル位相マップの例. 各セル数:  $(M, N) = (5, 9)$ . 結線パターン  $A = (2, 2, 6, 7, 8)$ .

#### 4. 実験

FPGA による回路実験を検討しているが本論文では、動作前の VHDL の RTL 記述によるシミュレーション結果と対応する Dmap を示す。ここで、ベース信号 1 周期以内に 1 本スパイクが立つ条件は、

$$N = 2M - 1, \\ 0 \leq A^{(k)}(i) - i \leq M - 1, i = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (8)$$

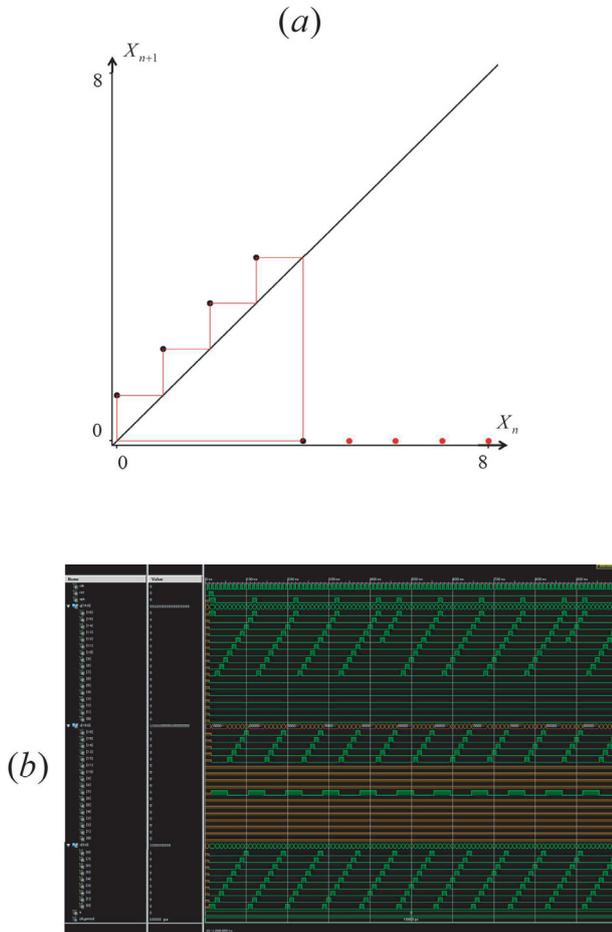


図 4 デジタル位相マップとシミュレーション結果の例。セル数:  $(M, N) = (9, 17)$ 。結線パターン  $A = (7, 7, 7, 7, 12, 13, 14, 15, 16)$ 。

#### 5. むすび

本論文では、デジタルスパイクニューロンの動作解析をした。スパイク列の位相に対する Dmap を定義した。また、シミュレーション結果と Dmap を用いてデジタルスパイク列の過渡現象と定常状態を解析した。結線パターンとセル数はスパイク列の出力に深く関係があると考えられる。

今後の課題として、成長貪欲探索法 (GGs) を用いた所望のスパイク列の生成や FPGA を用いたデジタルスパイクニューロンの動作実験があげられる。

#### 参考文献

- 1) E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons, IEEE Trans. Neural Networks, 14, 6, pp. 1569-1572, 2003.
- 2) R. Perez and L. Glass, Bistability, period doubling bifurcations and chaos in a periodically forced oscillator. Phys. Lett., 90A, 9, pp. 441-443, 1982.
- 3) Y. Kon'no, T. Saito, and H. Torikai, Rich dynamics of pulse-coupled spiking neurons with a triangular base signal, Neural Networks, 18, pp. 523-531, 2005.
- 4) S. R. Campbell, D. Wang, and C. Jayaprakash, Synchrony and desynchrony in integrate-and-fire oscillators, Neural computation, 11, pp. 1595-1619, 1999.
- 5) N. F. Rulkov, M. M. Sushchik, L. S. Tsimring, and A. R. Volkovskii, Digital communication using chaotic-pulse-position modulation, IEEE Trans. Circuits Syst., I, 48, 12, pp. 1436-1444. (2001)
- 6) H. Torikai and T. Nishigami : An artificial chaotic spiking neuron inspired by spiral ganglion cell: parallel spike encoding, theoretical analysis, and electronic circuit implementation, Neural Networks, 22, pp. 664-673, 2009
- 7) 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.
- 8) T. Iguchi, A. Hirata, and H. Torikai, Theoretical and heuristic synthesis of digital spiking neurons for spike-train-division multiplexing, IEICE Trans. Fund., E93-A, 8, pp. 1486-1496, 2010.
- 9) K. Yamaoka and T. Saito, Growing greedy search and its application to hysteresis neural networks, Proc. ICONIP, 2015, in press.