

デジタルスパイクニューロン結合系が呈する基本的な同期現象の解析

学籍番号：90158017 潮 研究室 伊地智 洋文

1 緒論

本研究では神経細胞の小規模結合系の回路モデルとして離散状態力学系のデジタルスパイクニューロン結合系 (以下, CDSN) を提案し, 同系が呈する基本的な同期現象を解析する.

2 CDSN モデル

(図 1) に CDSN モデルを示す. 本モデルでは結線 $B^{(i)}(j)$, 外部入力 $S^{(i)}(t)$, 結合荷重 ϵ , ベース信号 ([1], [2]) 直流分 T_i のパラメータを変更することで $X^{(i)}$ セルの状態が変化し, 様々な同期現象を呈する. 提案した CDSN モデルの DSN1 と DSN2 の振る舞いは次式で記述される.

$$B^{(i)}(j) = \text{Int}\left(\frac{11}{32}k_i M^{(i)} \sin\left(\frac{2}{M^{(i)}}j\right) + N^{(i)} - T_i\right)$$

$$P^{(i)}(t+1) = \begin{cases} P^{(i)}(t) + 1 & \text{if } P^{(i)}(t) \neq M^{(i)} - 1 \\ 0 & \text{if } P^{(i)}(t) = M^{(i)} - 1 \end{cases}$$

$$X^{(i)}(t+d) = \begin{cases} B^{(i)}(t+d \pmod{M^{(i)}}) & \text{if } X^{(i)}(t) = N^{(i)} - 1 \\ X^{(i)}(t) + S^{(i)}(t+d) & \text{if } X^{(i)}(t) \neq N^{(i)} - 1 \end{cases}$$

$$S^{(2)}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \in \{0, d, 2d, \dots\} \text{ and } Y^{(1)}(t) = 0 \\ \epsilon & \text{if } t \in \{0, d, 2d, \dots\} \text{ and } Y^{(1)}(t) = 1 \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$Y^{(2)}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } X^{(2)}(t) = N^{(2)} - 1 \\ 0 & \text{if } X^{(2)}(t) \neq N^{(2)} - 1 \end{cases}$$

0 k_i 1, 0 T_i $N^{(i)}$ とし, 今回は $X^{(1)}(0) = X^{(2)}(0) = 64$, $k_1 = k_2 = 0.55$, $d = 0.99$, $M^{(i)} = N^{(i)} = 128$ のもとで CDSN モデルの同期現象の解析を行うものとする.

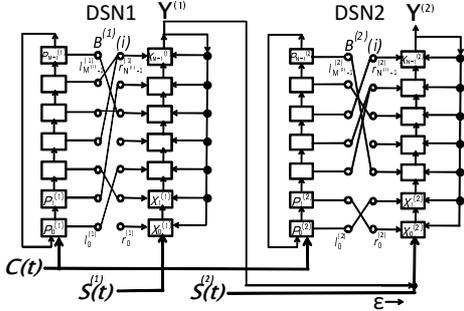


図 1 CDSN モデル

3 CDSN の同期現象

CDSN モデルの同期率 R_{syn} と発火比 N_{syn} を定義する. DSN1 と DSN2 の各発火時間 $t^{(i)}(n)$ における同期発火の有無を排他的論理和を用いて C_{CDSN} で表し, DSN1 の発火回数 N_{DSN1} , DSN2 の発火回数 N_{DSN2} とすると, 以下のようになる.

$$C_{CDSN} = \sum_{t=0}^{50M^{(2)}} Y^{(1)}(t) \oplus Y^{(2)}(t)$$

として C_{CDSN} を定義すると, 同期率 R_{syn} は C_{CDSN} を用いて

$$R_{syn} = \frac{N_{DSN1} + N_{DSN2} - C_{CDSN}}{N_{DSN1} + N_{DSN2}}$$

$$N_{syn} = \frac{N_{DSN2}}{N_{DSN1}}$$

と定義する.(図 2) ~ (図 5) は T_1, T_2 を変化させた場合の CDSN の発火比と同期率の変化を表す. (図 6), (図 7) は $T_2 = 64$ に固定したときの発火比と同期率の変化を表し, 特に N_{syn} に関しては

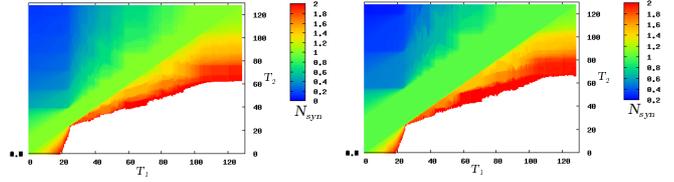


図 2 $N_{syn}(\epsilon = 16)$

図 3 $N_{syn}(\epsilon = 32)$

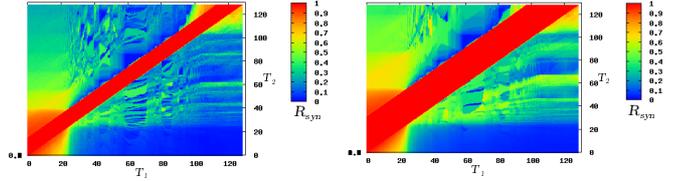


図 4 $R_{syn}(\epsilon = 16)$

図 5 $R_{syn}(\epsilon = 32)$

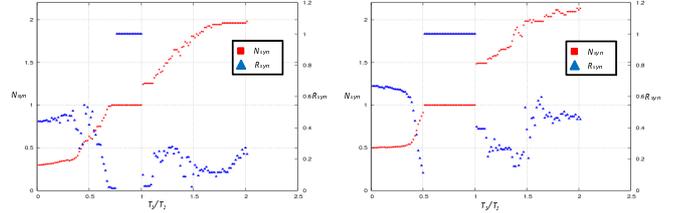


図 6 $N_{syn}, R_{syn}(\epsilon = 16)$

図 7 $N_{syn}, R_{syn}(\epsilon = 32)$

「悪魔の階段」と呼ばれている. 結合荷重 ϵ の変化とともに $X^{(2)}$ セルのシフト量が変わり発火回数も変化するため, $\epsilon = 16$ と $\epsilon = 32$ の場合では発火比, 同期率ともに大きく異なる. DSN1 が ある時間 $t = t^{(1)}(n)$ で発火するとき, その時間において CDSN が同期発火現象を呈するための十分条件は以下である.

$$N^{(2)} - \epsilon - 1 \leq X^{(2)}(t-d) \leq N^{(2)} - 2 \quad \text{if } X^{(2)}(t-d) \neq N^{(2)} - 1$$

$$B^{(2)}(t \pmod{M^{(2)}}) = N^{(2)} - 1 \quad \text{if } X^{(2)}(t-d) = N^{(2)} - 1$$

DSN2 が上記の十分条件を満たすときは同期現象を呈し, それ以外では非同期現象を呈する. CDSN が $N_{syn} = R_{syn} = 1$ を満たす 1 対 1 同期発火現象を呈するための十分条件は以下である.

$$0 \leq (X^{(1)}(0) - N^{(1)}) - (X^{(2)}(0) - N^{(2)}) \leq \epsilon - 1$$

$$0 \leq (B^{(1)}(j) - N^{(1)}) - (B^{(2)}(j) - N^{(2)}) \leq \epsilon - 1$$

$$\text{for all } j \in \{0, 1, 2, \dots, M^{(1)} - 1\}$$

4 結論

本研究では CDSN モデルを提案し, 神経細胞微分方程式モデルの典型的な例である「悪魔の階段」の応答を示し, 同系が呈する基本的な同期現象の解析ができた. 今後の課題として, ニューロン間での伝達遅延の考慮や可変パラメータの追加, FPGA を用いたハードウェア上での実装などが挙げられる.

参考文献

- [1] S. Hashimoto and H. Torikai, A novel hybrid spiking neuron:bifurcations, responses, and on-chip learning, IEEE Trans. CAS-I (accepted).
- [2] H. Torikai, M. Shimazaki and T. Saito, Master-Slave Synchronization of Pulse-Coupled Bifurcating Neurons, IEICE Trans. Fund., VOL.E87-A, NO.3, pp.740-747, 2004.