

絶対不応期のある IPFM による準周期パルス列およびカオスパルス列

Quasi Periodic Pulse Train and Chaotic Pulse Train by use of IPFM with Absolute Refractory Period

H-10

山本 聡†
Satoshi Yamamoto松岡 孝栄†
Takahide Matsuoka

1. はじめに

多くの神経細胞は不応期のある積分パルス周波数変調 (Integral Pulse Frequency Modulation: IPFM) を行っていることが知られている^[1]。神経細胞の重要な性質である、入力信号に対する時間加算性、不応性、および閾値性を取り上げた不応期のある IPFM システムを作り、機能および性質について調べてきた。正弦波入力に対し、絶対不応期のある IPFM システムによって 1 for n 同期現象が起こるメカニズムおよびパラメータ空間における 1 for n 同期現象の起こる領域を数式で示し、報告している^[2]。また、絶対不応期のある IPFM システムで準周期パルス列およびカオスパルス列が出でることを実験的に示し、報告している^{[3][4]}。本報告では、式 (1) の信号を入力したとき、絶対不応期のある IPFM システムが周期パルス列を作り出すメカニズム、準周期パルス列を出力する場合のパルス発生位相のリターンマップ (単調増加で一つの不連続点を持つ一価関数となる)、およびカオスパルス列を出力する場合のパルス発生位相のリターンマップ (多価関数となる) について述べる。

$$\text{input}(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi ft) + B & \text{for } A \sin(2\pi ft) + B > 0 \\ 0 & \text{for otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

表 1 計算機実験の結果

Case No.	出力関数	計算機実験の結果
I	ステップ	周期パルス列 ($A > B$) 準周期パルス列 ($A \leq B$)
II	連続	周期パルス列 ($A > B$) カオスパルス列 ($A \leq B$)

2. 1 for n 同期現象発生のメカニズム

(表 1 Case I および Case II の周期パルス列)

式 (1) の信号を入力したとき、絶対不応期のある IPFM システムが 1 for n 同期パルス列を出力することを森田ら^[2]の手法を用いて示した。

3. パルス列のリターンマップが単調増加で一つの不連続点を持つ一価関数となる場合

(表 1 Case I, $A \leq B$)

式 (2) の信号を入力し、絶対不応期のある IPFM システムが式 (3) を満足するパルス列を出力したとき (式 (3) を満足しないときは第 2 節で述べた周期パルス列となる)、そのパルス列はパルス発生位相のリターンマップが単調増加で一つの不連続点を持つ一価関数となり準周期パルス列となることを以下に述べる。

$$\text{input}(t) = A \sin(2\pi ft) + B \quad (A \leq B) \quad (2)$$

$$\theta_i \neq \theta_{i+j} \quad (j = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (3)$$

θ_i は i 番目のパルス発生位相 ($\text{mod } 2\pi$) である。

図 1 は絶対不応期のある IPFM システムの入出力例である。 t_i は i 番目に積分器がリセットされる時刻、 θ_i は i 番目のパルス発生位相である。 γ はパルス発生の為の閾値である。図 2 の曲線は式 (4) で θ_{i-1} を $2k\pi$ から $2(k+1)\pi$ まで変化させ θ_i の値をプロットしたものである。一つの θ_{i-1} に対し、一つ θ_i が定まるので一価関数になる。

$$\int_{\theta_{i-1} + \text{arp}}^{\theta_i} \text{input}(\theta) d\theta = \gamma \quad (4)$$

パルス t_{p-1} 、 t_p 、 $t_{p-1+\Delta t}$ 、 t_x は式 (5) および式 (6) を満たす。式 (5) の t_p および式 (6) の t_x について考える。 $t_{p-1+\Delta t} > t_{p-1}$ ならば $t_x > t_p$ となる。なぜならば、もし $t_x < t_p$ ならば、式 (6) を満たさない (積分値が γ より小さい) ので $t_x < t_p$ なる t_x でパルスが出ることはあり得ない。すなわち θ_i の軌跡は単調増加となる。また、 θ_i を 2π を法とする位相 ($\text{mod } 2\pi$) に書き換えたとき一つの不連続点が生じる。

$$\int_{p-1+\text{arp}}^p \text{input}(t) dt = \gamma \quad (5)$$

$$\int_{p-1+\Delta t+\text{arp}}^{t_x} \text{input}(t) dt = \gamma \quad (6)$$

このようにパルス発生位相のリターンマップが単調増加で一つの不連続点を持つ一価関数となると、そのパルス列は準周期パルス列である。

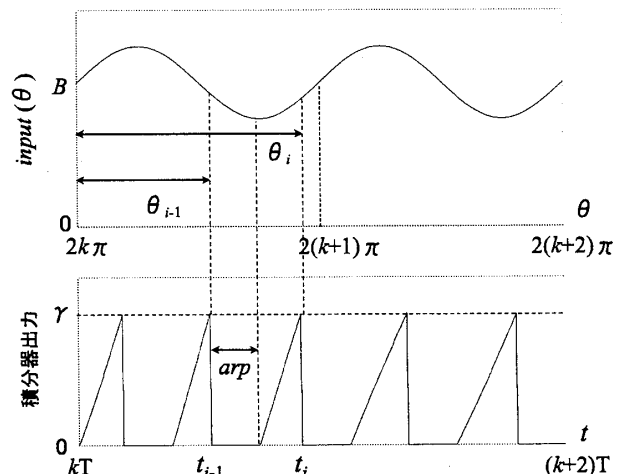
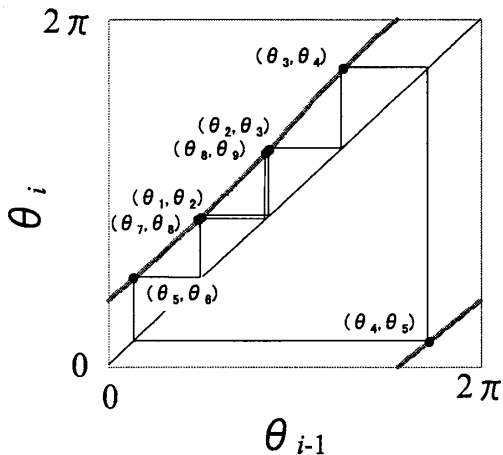


図 1 絶対不応期のある IPFM システムの入出力例

† 宇都宮大学, Utsunomiya University

図2 パルス列 (表1 Case I, $A \leq B$) のリターンマップ

4. パルス列のリターンマップが多価関数となる場合 (表1 Case II, $A \leq B$)

式 (2) の信号を入力し、連続な出力関数を持つ IPFM システムが式 (3) を満足するパルス列を出力したとき (式 (3) を満足しないときは第 2 節で述べた周期パルス列となる)、そのパルス列は多価関数となることを以下に述べる。図 3 は連続な出力関数である。積分値 y が $y \geq \gamma_2$ になったとき、システムは積分値をリセットしパルスを発生する。積分値 y が $\gamma_1 \leq y < \gamma_2$ になったとき、システムは積分値をリセットするがパルスは発生しない (神経細胞の軸索小丘部で生成されたパルスが軸索伝播中に消滅する場合にあたる)。図 4 は連続な出力関数を持つ IPFM システムにより作り出されたパルス列のリターンマップの例である。図 2 とは違い曲線上に点がプロットされない case が存在し、単調増加で一つの不連続点を持つ一価関数とはならない。 θ_{i-1} 、 θ_i と連続でパルスが出た場合 ($y_{i-1}, y_i \geq \gamma_2$ となった場合)、リターンマップは図 5 の θ_i 印の曲線上にプロットされる。 θ_{i-1} 、 θ_{i+1} とパルスが出た場合 ($y_{i-1} \geq \gamma_2$ 、 $\gamma_1 \leq y_i < \gamma_2$ 、 $y_{i+1} \geq \gamma_2$ となった場合、すなわち θ_i をスキップした場合)、リターンマップは図 5 の θ_{i+1} 印の曲線上にプロットされる。 θ_{i-1} 、 θ_{i+2} とパルスが出た場合 ($y_{i-1} \geq \gamma_2$ 、 $\gamma_1 \leq y_i$ 、 $y_{i+1} < \gamma_2$ 、 $y_{i+2} \geq \gamma_2$ となった場合、すなわち θ_i および θ_{i+1} をスキップした場合)、リターンマップは図 5 の θ_{i+2} 印の曲線上にプロットされる。以後同様である。このようにパルス列のパルス発生位相のリターンマップが多価関数となると、そのパルス列はカオスパルス列である。

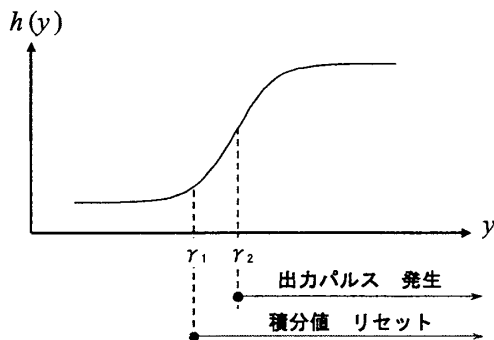


図3 連続な出力関数

5. おわりに

絶対不応期のある IPFM システムが周期パルス列を作り出すメカニズム、準周期パルス列を出力する場合のパルス発生位相のリターンマップが単調増加で一つの不連続点を持つ一価関数となるメカニズム、およびカオスパルス列を出力する場合のパルス発生位相のリターンマップが多価関数となるメカニズムを示した。今後は、準周期パルス列およびカオスパルス列が生体においてどのような役割をしているかを調べる予定である。

文献

- [1] 樋渡: “生体情報工学”, コロナ社, pp.28-30(1980)
- [2] 松岡, 森田: “絶対不応期のある IPFM による 1 対 n 同期パルス列の発生”, 電子情報通信学会論文誌, '89/6, j72-D-II, No.6, pp.974-977(1989)
- [3] 嶋田, 松岡: “連続な出力関数を持つリークと絶対不応期のある IPFM”, 電子情報通信学会総合大会, D-7-2, p.77(2001)
- [4] 佐野, 松岡: “絶対不応期のある IPFM システムのカオス応答”, 電子情報通信学会技術研究報告, MBE99-153, pp.49-54(2000)

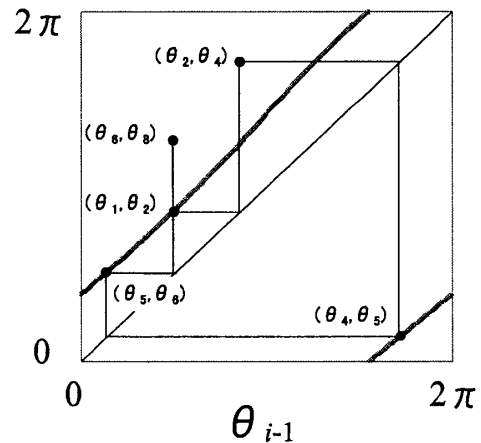
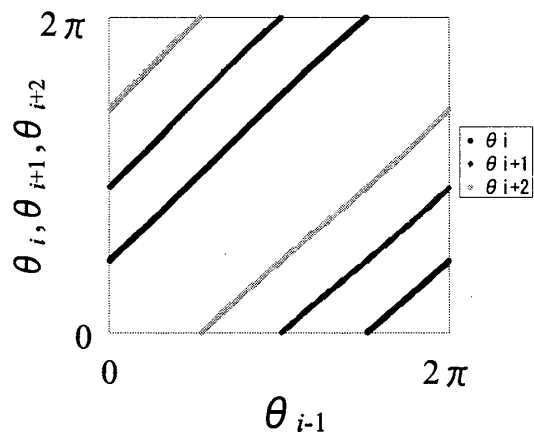
図4 パルス列 (表1 Case II, $A \leq B$) のリターンマップ

図5 絶対不応期のある IPFM システムが作り出すカオスパルス列のリターンマップ