

スパイクングニューロンモデルの発火時間間隔と位相ダイナミクスのリターンマップ構造に着目したカオスのバースト発火挙動の解析

丸山 一哉[†] 川手 悠生[†] 信川 創[†]千葉工業大学[†]

1. はじめに

脳におけるニューロンの発火活動を発火時の細胞内の Ca^{2+} 濃度上昇の原理を利用した、ニューロイメージング手法が提案されている[1]. この手法は、脳の細胞に直接電極プラグを刺すニューロイメージング手法のパッチクランプ法に比べ比較的侵襲度が低い発火計測のイメージング手法である. このカルシウムセンサの開発により、発火時間の測定が容易に行えるようになった. しかし、外部状態のみでは内部の状態を把握するには不十分なため、脳の内部の状態について分かる範囲が限られてしまう. 哺乳類の脳におけるニューロダイナミクスを捉えることで、発火活動をより広く、深い把握を可能にする. 脳・神経系における発火パターンの一つであるカオスの発火活動は、学習や記憶など脳の柔軟な情報処理を支えていると考えられている[2]. もし外部情報である発火時間を用いた発火時間間隔から内部情報であるニューロダイナミクスの推定が可能であることが示されれば、カオスの機能性の研究に用いることが出来るようになる. そこで、本研究では、膜電位の活動を再現することで発火のタイミングを記述できるスパイクングニューロンモデルを用いて発火時間間隔から内部の状態を推定することが可能であるか検討する. また、求めた神経ダイナミクスを反映した活動量から位相を定義し、発火時間間隔との関係を特定する.

2. モデルと方法

2.1 Izhikevich ニューロンモデル

本研究では、Izhikevich ニューロンモデルを使用する. Izhikevich ニューロンモデルは、多くの種類の分岐を誘発でき、パラメータを調整する

ことによって、実際の神経系で観察されるほぼすべてのスパイク活動を再現できる[2].

また、Izhikevich ニューロンモデルは、他のスパイクングニューロンモデルと比較して、スパイクパターンが他のスパイクニューロンモデルと比較して多様性が高い[3]. Izhikevich ニューロンモデルの式は(1), (2)で示す.

$$\frac{dv}{dt} = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I \quad (1)$$

$$\frac{du}{dt} = a(bv - u) \quad (2)$$

(1) 式の値が30[mV]を超えた場合、(3)式に示すリセット動作を行う.

$$\text{if } v \geq 30\text{mV, then } \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 v と u は無次元変数、 a , b , c , d は無次元パラメータである. パラメータ v は膜電位を表し、 u は膜回復変数を表している. パラメータ a は、膜回復変数 u のスケールを記述するものである. 値は小さくなるほど、回復が遅くなる. パラメータ b は、膜電位 v のしきい値の変動に対する膜回復変数 u の感度を表している. 値は大きくなるほど、 v と u がより強く結合する. パラメータ c は、膜電位 v のスパイク後のリセット値である. パラメータ d は、回復変数 u のスパイクリセットから元の内部状態に戻る時間を調整する変数である. ポアンカレ写像は、すべての初期値と1周期分の軌道がわかっている場合、2周期以降の軌道を推定することができる理論である. 本研究では、Izhikevich モデルを利用するにあたり状態依存飛躍を使用してシステム内で分岐解析を行うために、ポアンカレ断面として $v=30$ [mV]で設定した. 本研究では(1), (2)式にあるパラメータを $I = 10$ [mV], $a = 0.02$, $b = 0.2$, $c = -55$ [mV], $d = 2$ に設定し、チャタリングにおけるカオス挙動を再現する. 先行研究で $d = 0.910 \sim 0.920$ の範囲でカオス挙動を取ることがわかっている[4]. そのため、 $d = 0.905 \sim 0.920$ の範囲を0.01区切りで値を変えて測定し、より詳細なカオス挙動を取る d の値を決定する.

Analysis of Chaotic Burst Firing in Spiking Neuron Model by Return Map Between Inter Spike Interval and Phase Dynamics

[†] Kazuya Maruyama · Yuki Kawate · Sou Nobukawa · Chiba Institute of Technology

2.2 発火時間間隔の導出方法

本研究では、外部情報から内部状態を推定するために発火時間間隔(Inter-spike-interval:ISI)を用いる、ISIの導出は(4)式で求められる。

$$ISI = t_{i+1} - t_i \quad (4)$$

i は何回目の発火かを表しており、任意の整数である($i = 1, 2, 3 \dots$)。ここで、 t は発火発生時の時間を表している。

2.3 位相の導出

内部変数の特定方法を膜回復変数から位相を定義し推定が可能であるか検討を行う。位相を定義し、弧度法を利用した $\theta[\text{rad}]$ を用いて推定を行う。本研究では、(1)式の v がリセット値である $-55[\text{mV}]$ 、その時の u の値である -4 の座標と各膜電位(v)、各膜回復変数(u)の座標で内積を求める。2つ座標にそれぞれ $v - \text{nullcline}$ の頂点を差し引く。 $v - \text{nullcline}$ の頂点は(1)式を1階微分することで、 v と u の値を導出した。 nullcline とは、微分方程式による非線形を解析するために最も有効な方法の一つである。(1)、(2)式に対して、微分した値が0になるときの点の集合である。本研究では内積の公式を変形させ、位相 θ を求めた。変形した式を(5)式に示す。

$$\theta = \cos^{-1} \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2}{\sqrt{a_1^2 a_2^2} \sqrt{b_1^2 b_2^2}} \quad (5)$$

本研究では膜電位を a_1 、発火時の膜回復変数を a_2 、リセット値の $-55[\text{mV}]$ を b_1 、その時の膜回復変数の値 -4 を b_2 と置く。ベクトルから内積を導出するため、 a_1 、 b_1 からそれぞれ -62.5 を a_2 、 b_2 からそれぞれ -6.25 を差し引いた値で計算を行う。

3. 結果

本研究では、最もカオスが現れた $d = 0.914$ を用いる。図1左図は、ISIと蜘蛛の巣の関係を表す。図1右図は、 i 番目の発火時間間隔(ISI_i)と i 番目の発火後の回復変数(u_i)の関係を表す。図1左図より、ISIの軌道がカオス挙動を示しているためISIの軌跡が非線形になっている。図1右図より、 ISI_i の1つの値に対し u_i が一意に決まる関数関係になっている。よって、 ISI_i から u_i が推定できる。

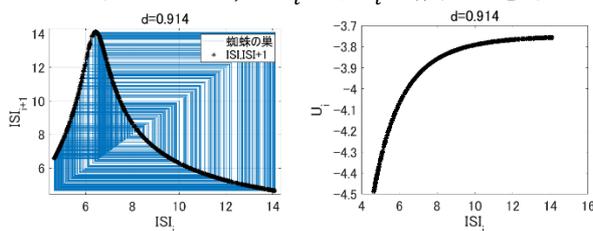


図1 ISI_i と ISI_{i+1} の軌道図(左)、 ISI_i と u_i の図(右)

図2は ISI と発火時の膜回復変数(u)の位相(θ)の関係を表す。図2より、 ISI と θ の関係は、 ISI_i の1つの値に対し θ_i が一意に決まる関数関係になっている。よって、 ISI から θ の推定が可能である。

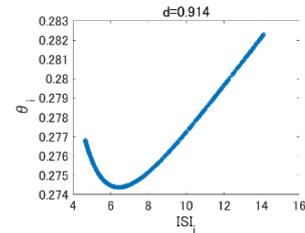


図2 ISI_i と θ_i の関係図

4. おわりに

本論文では、発火時間間隔から回復変数を推定する手法についての検討を行った。さらに、回復変数から位相の定義が可能であるか検討を行った。結果より、 ISI の1つの値に対し u の値が一意に決まる関数関係から、 ISI から u が推定できることが分かった。また、 ISI から位相(θ)を定義することは可能であることがわかった。Izhikevichモデルにおいて位相の定義が可能であることが判明したため、今後はアイソクロンの定義を利用した推定が可能であるかの検討する。

参考文献

- [1]Inoue, Masatoshi and Takeuchi and others: Rational design of a high-affinity, fast, red calcium indicator R-CaMP2; Nature methods, Vol.12, No.1, pp.64--70(2015).
- [2]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, Vol.29, No.5, pp.210--215(2016)
- [3]Izhikevich, Eugene M: Which model to use for cortical spiking neurons?; IEEE transactions on neural networks Vol.15 No.5, pp1063--1070(2003)
- [4]Izhikevich, Eugene M: Which model to use for cortical spiking neurons?; IEEE transactions on neural networks Vol.15 No.5, pp1063--1070(2004).
- [5]Nobukawa Sou and Nishimura, Haruhiko and Yamanishi, Teruya: Chaotic resonance in typical routes to chaos in the Izhikevich neuron model; Scientific reports Vol.7 No.1, pp1--9(2017).