

マルコフ連鎖を用いた神経発火タイミングの近似モデル

情報科学科 野上 大希

指導教員：作村 諭一

1 はじめに

脳は膨大な数の神経細胞が複雑な神経回路網を構成することで機能する。脳の情報処理を理論的に扱うには、個々の神経細胞やその集団の振舞いを、数学的にモデル化することが不可欠である。近年の技術的進歩により、高性能計算が可能になったが、多くの神経細胞から構成されている複雑な神経回路網をシミュレートすることは今もなお困難である。神経細胞が生来的に確率的な応答をすることから、複雑でリアルな神経細胞に対し、応答統制が統計的に似ている確率的な神経細胞モデルを提案することが可能であれば、計算量が大幅に削減ができ、全能レベルの巨大ネットワークの可能性も見えてくる。本研究では、2状態のマルコフ連鎖モデル(以下MCモデル)[1]を用いて、100個以上のコンパートメントモデルで表現される神経モデルを近似することを目的とする。これにより、複雑な神経モデルの応答が統計的に似ている確率モデルが作成可能であることを示す。

2 神経細胞モデル

神経細胞モデルは膜電位や神経細胞の形態において単純なモデルから複雑性を持つモデルまで様々な種類がある。

2.1 Hodgkin-Huxley モデル

細胞内と細胞外を仕切る細胞膜をコンデンサ、膜中のイオンチャネルをコンダクタンスとしてモデル化し、パラメータを実験的に決定したモデルが Hodgkin-Huxley モデルである(以下HHモデル)[2]。HHモデルを計算機にて解くと、非常にリアルなスパイクタイミングの発火系列を得ることが可能である(図1)。

2.2 コンパートメントモデル

HHモデルでは細胞膜のある1点での電流を想定していた。これを空間的な神経細胞の応答特性を知るために、細胞を複数のコンパートメントの集合体としてモデル化したものがコンパートメントモデルである[3]。本研究においては、大脳皮質第6層の錐体細胞を164個のコンパートメントで表現したモデルを対象とする(図2)。

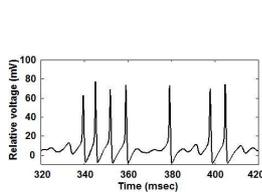


図1 HHモデルの膜電位時系列

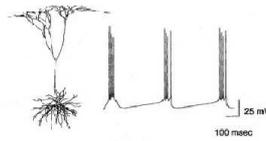


図2 164個のコンパートメントによる大脳皮質第6層錐体細胞(左)とその膜電位時系列(右)[3]

3 マルコフ連鎖を用いた近似モデル

6層錐体細胞の特徴はスパイクが連続的に発生した後、しばらく発火しない時間が継続することである(図2)。これはランダムに発火するHHモデルとは異なる。したがって、2状態MCモデルの遷移確率 p, q はダイナミックと考え、それぞれ時間を変数としたシグモイド関数で表現する。

$$p = \frac{1}{1 + \exp((t_{x1} - t)\alpha_1)} \quad (1)$$

$$q = \frac{1}{1 + \exp((t_{x2} - t)\alpha_2)} \quad (2)$$

t_{x1}, t_{x2} は連続発火の時間窓の長さのパラメータ、 α_1, α_2 は連続発火の時間窓の幅の分散度のパラメータを示す。パラメータは、データから発火頻度の平均と標準偏差を求めることで推定する。

4 パラメータ推定結果

2状態マルコフモデルでパラメータを決め、6層錐体細胞を真似たスパイク系列を作り、数値計算によりパラメータ推定したものが図3,4である。6層錐体細胞を真似たスパイク系列を作成するために用いたパラメータと、上記手法で推定したパラメータの比較を表1に示す。また、各シナプス入力に対するHHモデル及びMCモデルの処理時間を示す(表2)。表2の結果から、どのシナプス入力に対しても約10倍以上高速化が見られる。6層錐体細胞を近似したMCモデルは、HHモデルを近似したMCモデルとほとんど計算時間が変わらない。164コンパートメントモデルが仮りにHHモデルの10倍の計算時間がかかるとすると、MCモデルは相当な計算時間の削減が可能となることが分かる。

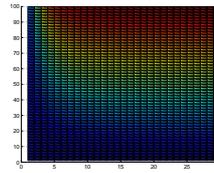


図3 パラメータ推定に必要な発火頻度の平均を示すカラスケール

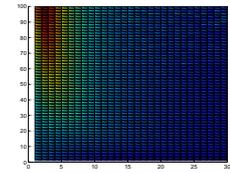


図4 パラメータ推定に必要な発火頻度の標準偏差を示すカラスケール

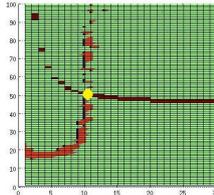
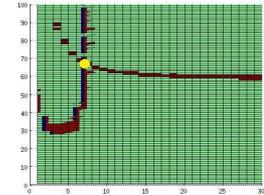
図5 t_{x1}, α_1 のパラメータ推定図6 t_{x2}, α_2 のパラメータ推定

表1 164コンパートメントモデルとマルコフモデルの近似度

	データ生成時のパラメータ	推定結果
t_{x1}	10.11	10
α_1	1.03	1.1
t_{x2}	13.34	13.2
α_2	0.702	0.8

表2 各モデルの処理時間の比較

シナプス入力 (Hz)	3000	6000	9000
HHモデル (sec)	57.2989	91.6005	149.0689
MCモデル (sec)	3.2356	3.3086	3.2534

今後の課題としては、実際に164コンパートメントモデルで計算した時系列を用いること、各近似モデルの精度向上、他の神経細胞モデルに対するマルコフ連鎖の近似等が挙げられる。

参考文献

- [1] Sakumura Y, Konno N, and Aihara K, Markov Chain Model Approximating the Hodgkin-Huxley Neuron, Artificial Neural Networks, Lecture Notes in Computer Science, 2130, pp.1153-1160, 2001.
- [2] Hodgkin AL and Huxley AF, A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, J Physiol. 117(4), 1952.
- [3] Mainen ZF and Sejnowski TJ, Influence of dendritic structure on firing pattern in model neocortical neurons, Nature, 382, 1996.