順方向性神経回路網を安定に伝搬する多様なスパイク相関

Spike correlations in feed-forward neural networks

酒井 裕 (PY)
Yutaka Sakai

中原 裕之
Hiroyuki Nakahara

甘利 俊一
Shun-ichi Amari

埼玉大学工学部 情報システム工学科
Faculty of Engineering, Saitama Univ.
sakai@bios.ics.saitama-u.ac.jp

理化学研究所 脳科学総合研究センター
RIKEN Brain Science Institute

Abstract

It is known that stable propagation of synchronous firing can be observed in a feed-forward chain of model neurons connected completely (synfire chain)[1][2]. In the steady state, almost all of the neurons in each layer fire synchronously. On the other hand, such a strong spike correlation has been scarcely observed in biological cortices. In general, cortical neurons emit spikes independently. In this paper, we show that various types of spike correlations including independent cases can be stably propagated in a incompletely connected feedforward neural network.

順方向性に全結合した神経素子集団の連鎖において、同期的な発火が安定に保たれる現象 (Synfire chain) **が知られている** [1][2]. **これまで報告されている安定な伝搬状態は、外部雑音によって発火しなかった素子を除いたほとんど全ての素子が同期的に発火する状態に限られている．もし生物の脳でこのような強いスパイク相関が生じているとすれば、頻繁に精度の高いスパイク相関が観測されるはずである．実際、数** 100 **ミリ秒程度の遅れを伴いながら数ミリ秒の精度でタイミングが一致するスパイク相関を示す神経細胞が報告されている** [3]. **しかしこのようなスパイク相関が観測されることは極めて稀であり、ほとんどの場合、神経細胞は独立なタイミングでスパイクを発生させている．生物の脳との対応を論じるならば、独立な場合や弱い相関を含めた様々なスパイク相関の伝搬を議論すべきである．また、全結合した神経細胞集団の連鎖を想定するのも非現実的である．そこで本論文では、一定の結合率でまばらに結合した神経素子集団の連鎖を考え、その連鎖に沿って様々な形態のスパイク相関が安定に伝搬することを示す.**

Keywords: **スパイク相関**, synfire chain, **関数写像**, **興奮抑制バランス**, **情報表現**

モデル　**単純化のため、時間的に独立な** (**入力の履歴に依存しない**) **スパイク発生機構を仮定し** [4]、**独立とみなせる範囲で十分に短い時間幅で時間を離散化する．これにより顕に時間を含まない** 2 **値素子** (McCulloch-Pitts) **の回路モデルに置き換えられる．ただしスパイク発生現象と対応させるためには、各素子の平均発火確率が十分に小さい必要がある．以下、一定の結合率で順方向性に結合した** 2 **値素子からなる一様な層状順方向性回路モデルを考える．** ℓ **層の素子** i **に対する正味の入力** u_i^ℓ **とするとき、その出力** $x_i^\ell = \Theta\left(u_i^\ell - 1\right)$ **とする．ここで** $\Theta\left(\cdot\right)$ **は、単位階段関数** (**ヘビサイド関数**) **である.**

[仮定 1] 結合荷重 w_{ik} **に対し、以下の大域的な量を一定とする.**

$$\sum_k w_{ik} = a\,,\quad \sum_k w_{ik}^2 = b,\quad \sum_k w_{ik} w_{jk} = bc$$

定数 c **は結合率に比例する量となる.**

[仮定 2] 前層の素子が独立である場合、入力はガウス近似可能とする.

$$\begin{aligned} u_i^\ell &= \sum_k w_{ik} x_k^{\ell-1} \\ &\simeq a\lambda + \sqrt{b\lambda(1-\lambda)}\left(\sqrt{c}\,\eta + \sqrt{1-c}\,\xi_i\right)\,. \end{aligned}$$

ここで、λ は $\ell-1$ 層での発火確率を表し、η, ξ_i はそれぞれ独立に正規分布に従う確率変数である．ただし η は層内で共通なゆらぎ成分を表している．

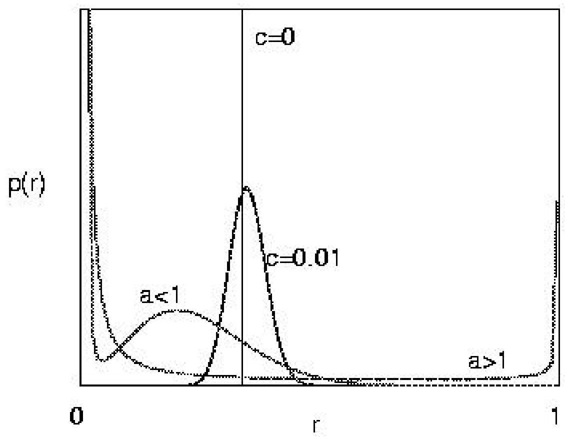
以上の仮定を満たすためには興奮性入力と抑制性入力のバランスがとれている必要があることが容易に導かれる．したがってここでは興奮性素子と抑制性素子がバランスを保って一定の割合で存在していることを想定している．

解析　素子に関する対称性から、系の状態は各層での発火割合 $r^\ell \equiv \frac{1}{n}\sum_i^n x_i^\ell$ の確率分布 $p^\ell(r)$ で記述可能である．順方向性回路を仮定しているため、発火パターンと次の層への結合荷重との相関を考慮する必要がない．したがって ℓ 層の確率分布 $p^\ell(r)$ のみから $\ell+1$ 層の確率分布 $p^{\ell+1}(r)$ が決定する．すなわちマルコフ性が成り立つ．この分布関数の写像 $p^\ell(r) \mapsto p^{\ell+1}(r)$ を計算すると以下のように積分核を用いて表される．

$$p^{\ell+1}(r) = \int_0^1 dr' K(r,r')\ p^\ell(r')$$

積分核 $K(r,r')$ の固有値の大きさは、1 以下であることが示される．したがって定常分布、すなわち、固有値 1 の固有関数は安定であると言える．自明な定常分布 $\delta(r)$ や $\delta(r-1)$ が存在するので、定常分布は唯一ではないが、数値計算を行った範囲では、非自明な定常分布は高々一つであった．自明な定常分布 $\delta(r)$ や $\delta(r-1)$ に収束する確率分布は $\delta(r), \delta(r-1)$ 以外にないことを示せるので、実際上定常分布は唯一であると考えてよい．

結果　様々なパラメータにおいて数値計算により求めた定常分布を図に示す．結合率に比例するパラメータ c が素子数無限大に対して 0 となるとき、すなわちスパース結合の場合、定常分布はデルタ関数 $\delta(r-r_0)$ となり、発火確率 r_0 で独立に発火している状態が安定に伝搬することがわかる．c を徐々に大きくしていくと、r_0 のまわりに少し広がった定常分布が得られる．これは独立に近く、弱い相関を持っている状態が安定に伝搬することを示している．また興奮・抑制バランスを表すパラメータ a が興奮性側に偏り $a \geq 1$ を満たす場合、c が大きくなるにつれ、分布が $r=0$ と $r=1$ 付近のみ偏るようになる．これは、第 1 層の素子が独立でランダムに発火していたとしても、層を介していくうちにほとんど全ての素子が同期して発火するようになることを示している．したがってこの状態は synfire chain に対応する．パラメータ a がそれほど興奮性側に偏っておらず $a<1$ を満たす場合、$r=0$ 付近と有限の極大値をもった二つ山の定常分布が得られる．発火するときには同期して発火するが全て発火するわけではなく、有限の割合の素子が同期して発火するという状態が安定に伝搬することを示している．



参考文献

[1] M. Abeles, *Corticonics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.

[2] M. Diesmann, M-O. Gewaltig, & A. Aertsen, *Nature 402*: 529-533, 1999.

[3] M. Abeles, H. Bergman, E. Margalit & E. Vaadia, *J. Neurophysiol. 70*: 1629-1639, 1993.

[4] Y. Sakai, *to be published in: Neural Networks* 2001.