

興奮性神経ネットワークモデルを用いた確率共鳴現象による触覚知覚感度向上効果の考察

Investigation of the improvement in tactile sensitivity by stochastic resonance effect
with a summing network of excitable neurons

栗田雄一（広島大学）

Yuichi KURITA, Hiroshima University

Abstract: A short-time exposure of tactile receptors to sub-sensory white-noise vibration is known to improve perception ability. This phenomenon, called stochastic resonance (SR) in the somatosensory system, is expected to enhance the sense of touch when the weak vibration is applied, and thereby improve associated motor skills. To investigate the effect of the noise intensity, a summing network of FitzHugh-Nagumo model neurons was built. The simulation results showed that appropriate noise intensity improves the coherence between the input stimuli and the network response.

Key Words: Stochastic resonance, Tactile sensitivity, Excitable neuron model

1. はじめに

確率共鳴 (Stochastic resonance) 現象とは非線形のシステムにおいて、ノイズにより微弱な信号の検知能力が向上する現象であり、人の足、手、指における触覚知覚感度が、確率共鳴現象を利用することにより向上することが確認されている^(1, 2, 3)。これまでに我々の研究グループは、確率共鳴による知覚感度向上を指先で生成させるためのウェアラブルデバイス Sensorimotor Enhancer を提案している (Fig.1 参照)⁽⁴⁾。指先の触覚において振動強度が変化した場合の知覚向上効果のメカニズムは必ずしも解明されていないが、触覚受容器を興奮性神経とみなした場合、振動強度が変化したときの知覚向上効果は、加算ネットワークモデルを用いたシミュレーションで評価できる。そこで我々は、Collins らが提案した加算ネットワークモデルを用いた解析⁽⁵⁾を応用し、手指内部の触覚受容器に対する振動強度と触覚知覚感度向上効果について考察した。また、確率共鳴を利用した低侵襲手術用把持鉗子型の触覚向上デバイスを提案し、その効果を確認している⁽⁶⁾。

ここで、これまでシミュレーションに使われていた神経ネットワークは、単一の発火パラメータを持つニューロンから構成されていた。しかし人の触覚受容器は、大きくわけて Merkel, Pacini, Meissner, Ruffini の4種類の受容器が存在し、それぞれが外部刺激に対して異なる発火特性をもつことが知られている。そこで本稿では、4種の触覚受容器の発火特性ならびに単位面積あたりの分布数を反映した神経ネットワークモデルを構築し、外部振動強度の変化に対する確率共鳴現象の効果の違いについて考察する。

2. 興奮性神経モデルを利用した解析

神経発火モデルとして、FitzHugh-Nagumo モデルを利用して神経ネットワークモデルを構築した。

$$\epsilon \dot{V} = V(V - a)(1 - a) - W + S(t) + x(t) \quad (1)$$

$$\dot{W} = V - W - b \quad (2)$$

ここで V は細胞膜電位、 W は不活性化係数、 x は外部ノイズ刺激、 S は入力刺激、 a, b, ϵ は係数である。従来研究⁽⁷⁾で報告されている指先内に存在する触覚受容器の数を参考に、本モデルでは、Merkel の数が 8、Pacini の数が 10、Meissner の数が 25、Ruffini の数が 16 (合計 59) から構成される、Fig. 2 に示されるような興奮性発火神経ネットワークモデルを利用した。神経モデ

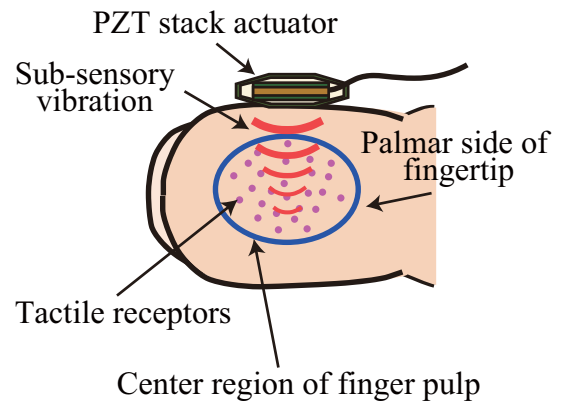


Fig.1 Concept of the sensorimotor enhancer⁽⁴⁾

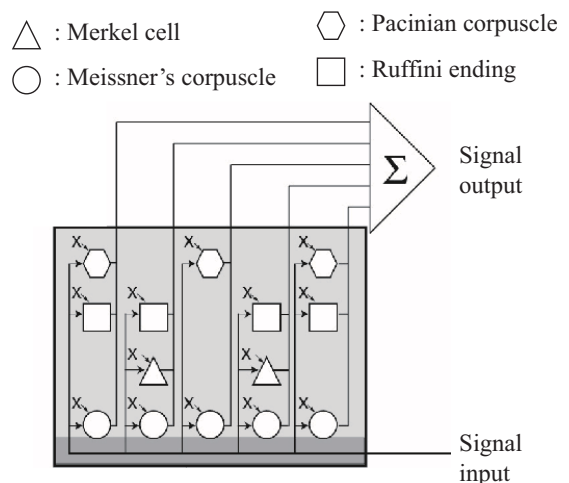


Fig.2 A summing network of excitable neurons with four tactile receptors

ルの発火閾値は、それぞれの受容器の特性に合うようにパラメータを設定した。外部ノイズ振動は Box-Muller 法によるホワイトノイズを、入力刺激は正弦波を与えた。計算の結果得られた膜電位 V は、各ユニットの発火の有無を示す 2 値時系列であるスパイク列に変換し、さらにハニング窓関数をかけることで単位時間あたりのスパイク発生率 (平均発火率) に変換する。すべてのユニットの平均発火率を加算したものがネットワーク出力となる。

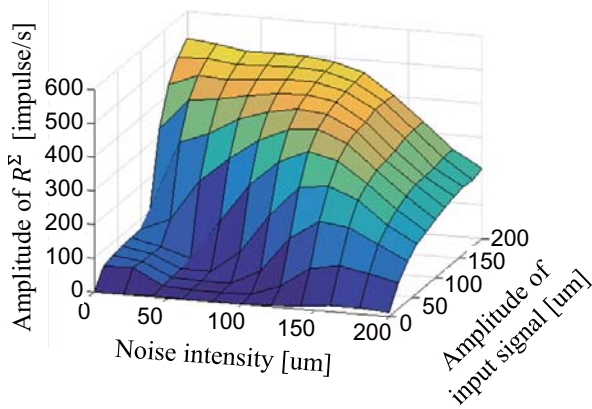


Fig.3 Amplitude of output signals versus noise intensity and the input signal amplitude

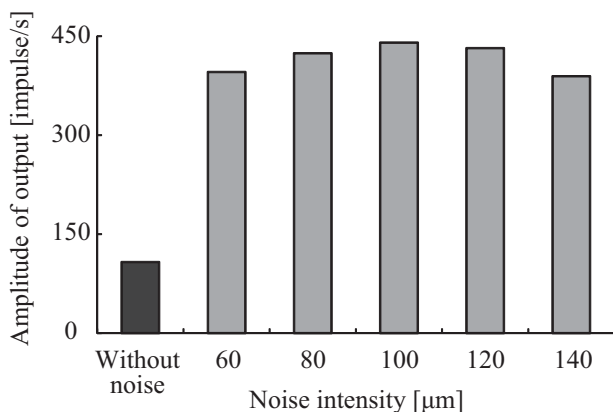


Fig.4 Amplitude of R_{Σ} when the amplitude of S is $120\mu\text{m}$

振動強度と入力信号の強さを変えたときに、出力信号の強度がどう変わるかをプロットした結果を Fig. 3 に示す。この結果から、入力の強さに応じて、出力の強さを最大化する振動強度が異なることが確認できる。Fig. 4 は、入力信号の振幅が $120\mu\text{m}$ のときの結果を抜き出したものである。振動強度 $100\mu\text{m}$ のとき出力信号は最も強くなるが、周辺の振動強度でも振動無付と時と比べると出力信号が強くなっていることが確認できる。このことは、確率共鳴による知覚感度向上では、効果を最大にする最適外部振動が存在する可能性を示すものの、厳密なチューニングをしなくても、振動付与により知覚感度向上が起こることを示唆している。これは皮膚が 4 種類の触受容器を有していることの貢献も大きいと考えられる。

3. 実験結果との比較による考察

我々はこれまでに、低侵襲外科手術用把持鉗子のグリップ部に振動子を取り付けることで、鉗子先端部に対する外部負荷の知覚閾値に変化が生じるかを調べている⁽⁶⁾。実験では、鉗子グリップ部を被験者が把持した状態で、鉗子先端部の触知覚閾値を調べるタッチテストにおこなった。付与振動強度と負荷の知覚閾値の関係を Fig. 5 に示す。縦軸は知覚閾値であり、値が低いほど鋭敏であるといえる。この結果からは、皮膚の振動に対する知覚閾値の強度である $1.0T$ 、またはその 75% 強度 ($0.75T$) の振動を付与したときに、統計的に有意な差で振動無付与時よりも触知覚感度が向上することが示されている。分散の大きさから統計的有意差が検出される振動強度について限りがあるものの、幅広い振動強度に対して無振動条件よりも触知覚感度が向上している。この結果は、Fig. 4 に示したシミュレーション結果と矛盾しない。

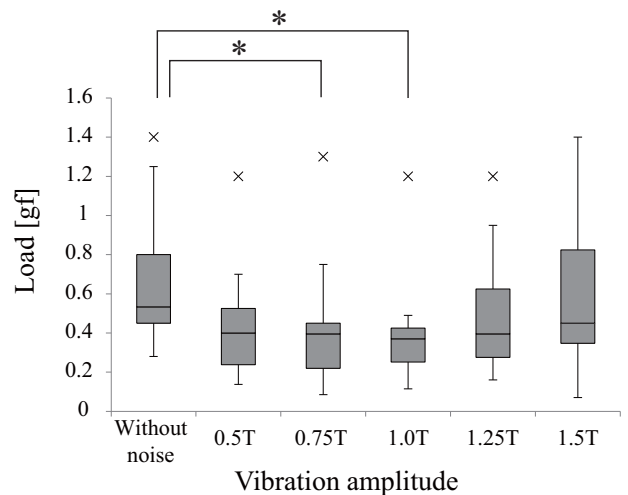


Fig.5 Experimental results of the touch test (* : $p < 0.05$)⁽⁶⁾

すなわち、知覚感度を最も向上させる最適な振動強度が存在する一方、知覚感度向上の起こる振動強度自体はある程度の幅を持っている。このことは必ずしも振動強度の設定を厳密に行わなくても、触覚知覚感度向上効果が得られることを意味しており、実用面から考えると歓迎すべき結果である。

4. おわりに

本稿では、確率共鳴を利用した触知覚感度向上効果について、興奮性神経ネットワークモデルを構築し、人に与えるべき振動強度について考察した。考察の結果、振動強度を厳密に調整しなくても、触知覚感度を向上させられる可能性が示唆された。今後は、外部刺激の特性に応じた振動強度の設計手法の開発に取り組む。

なお、本研究は科研費 24590612, 25282156 の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) N. T. Dhruv, J. B. Niemi, J. D. Harry, L. A. Lipsitz, and J. J. Collins. Enhancing tactile sensation in older adults with electrical noise stimulation. *Neuroreport*, 13(5):597–600, 2002.
- (2) N. Harada and M. J. Griffin. Factors influencing vibration sense thresholds used to assess occupational exposures to hand transmitted vibration. *British Journal of Industrial Medicine*, 48:185–192, 1991.
- (3) G. A. Gescheider, S. J. Bolanowski, J. V. Pope, and R. T. Verrillo. A four-channel analysis of the tactile sensitivity of the fingertip: frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation. *Somatosensory & Motor Research*, 19(2):114–124, 2002.
- (4) Y. Kurita, M. Shinohara, and J. Ueda. Wearable sensorimotor enhancer for fingertip using stochastic resonance effect. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 43(3):333–337, 2013.
- (5) J. J. Collins, C. C. Chow, and T. T. Imhoff. Stochastic resonance without tuning. *Nature*, 376:236–238, 1995.
- (6) 末田大和, 服部稔, 澤田紘幸, 恵木浩之, 大段秀樹, 上田淳, 辻敏夫, 栗田雄一. 確率共鳴を利用した触知覚感度向上効果を有する低侵襲手術用把持鉗子. *日本ロボット学会誌*, 32(6):76.
- (7) R. S. Johanson and A. B. Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neurosciences*, 6:27–32, 1983.