

パルス形ハードウェアニューロンモデルを用いた樹状突起の双方向伝搬特性に対する検討 A Study on Bi-directionally Propagation Characteristics of a Dendrite by Using Pulse-type Hardware Neuron Model

○大和田賢¹, 佐伯勝敏², 関根好文³*Ken Ohwada¹, Katsutoshi Saeki², Yoshifumi Sekine³

Abstract: The purpose of our research is construction of the hardware learning model with STDP-like learning rules. We have reported the Pulse-type Hardware Neuron Model (hereafter P-HNM) which has STDP characteristics. However, it's necessary to study on change in potential of forward propagation of dendrites have an effect on backpropagation highly related to STDP. In this paper, we study on change in potential of forward propagation of dendrites have an effect on backpropagation using a neural network based on P-HNMs. As a result, we show clearly that change in dendritic action potential subject to influence with change in potential of forward propagation using a neural network based on P-HNMs.

1. まえがき

生体の脳における学習・記憶機能は、シナプス可塑性による伝達効率の変化、STDP(Spike Timing Dependent synaptic Plasticity)学習則が重要な役割を果たしている^[1].

我々はニューラルネットワークの学習則に、STDP学習則を取り入れた非同期型のハードウェアの学習モデルの構成を目的に研究を行っている。先に、シナプス可塑性に強く関与している樹状突起に着目し、前ニューロンからの信号と後ニューロンの発火のタイミングにより STDP を誘発可能であることを、パルス形ハードウェアニューロンモデル (Pulse-type Hardware Neuron Model, 以下 P-HNM) を構築し、明らかにした^[2].

また、生理学において、能動的樹状突起を逆伝搬するパルスが細胞体から一定の距離まで伝搬が能動的であることが報告されている^[3].

今回、我々は樹状突起のパルス伝搬に着目した STDP

を誘発可能なニューラルネットワークを構成し、樹状突起の双方向伝搬特性について検討を行い、能動的樹状突起特性を有することを明らかにしたので、報告する。

2. 樹状突起のパルス伝搬に着目したニューラルネットワーク

図 1 に今回検討に用いた P-HNM で構成したニューラルネットワークの概略図を示す。同図は、P-HNM の 4 要素構成要素 (細胞体, シナプス, 軸索, 樹状突起) を組み合わせて構成したネットワークで、2 つのニューロン間の結合についてモデル化したものである。図中、 CP_{AM} は軸索コンパートメントモデルで縦続接続することで軸索モデル (Axon Model, 以下 AM) を構成し、 CP_{DM} は樹状突起コンパートメントモデルで、縦続接続して構成した 1 本の樹状突起モデル (Dendrite Model, 以下 DM) を後ニューロン細胞体モデル (以下 CM_{post}) に

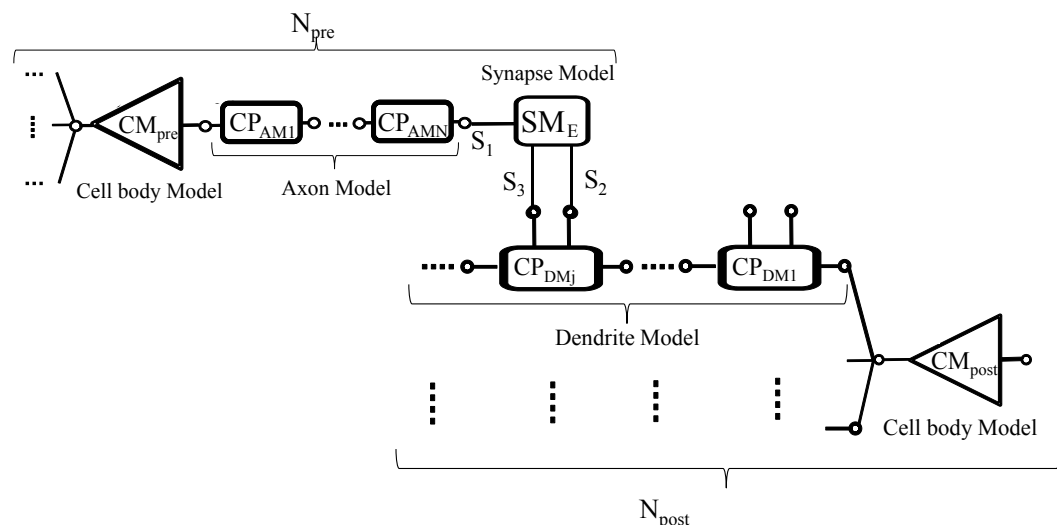


Fig. 1. Schematic diagram of neural network based on P-HNMs.

複数本, 並列接続して構成した. また, N_{pre} はシナプス前ニューロンモデルで, SM_E (興奮性シナプスモデル), 前ニューロン細胞体モデル (以下 CM_{pre}) と AM で構成した. N_{post} はシナプス後ニューロンモデルで, DM と CM_{post} で構成した.

3. 結果

まず, 双方向伝搬特性について検討を行った.

今, 図 1 中の CM_{pre} がパルスが発生すると AM 上を遅延・波形成形しながら SM_E に伝達する. SM_E を通して N_{post} の DM に伝える. 本モデルは N_{post} の DM を構成する CP_{DMj} (CM_{post} から j 番目の CP_{DM}) に SM_E から入力があった場合, DM を通して CM_{post} へ電流を伝搬するが, DM 上では活動電位が上昇するが発火に至らず, 先に CM_{post} が発火しパルス電圧を発生し, DM 末端方向へパルス電圧を逆伝搬する.

図 2 に図 1 の SM_E から CP_{DM8} へ入力した場合の双方向伝搬特性の一例を示す. 同図は, CP_{DM8} , CP_{DM6} , CP_{DM4} , CP_{DM2} , CP_{DM1} 及び CM_{post} の活動電位を示したもので, DM 上では活動電位が 0.3V 程度まで上昇するが CP_{DM} の閾値 (0.38V) を超えず, CM_{post} まで発火せずに順方向伝搬することを示している. CM_{post} が発火した後は, 逆伝搬する活動電位の振幅は減衰することを示している. このことは, 順方向伝搬による電位変化が逆伝搬する活動電位に影響を与えることを示している.

次に能動的樹状突起特性を明らかにするために DM から CM_{post} まで順方向伝搬する距離に対する逆伝搬特性への影響について検討を行った.

図 3 に図 1 の N_{pre} から CP_{DMj} ($j=1\sim 8$) への入力位置によって CM_{post} までの伝搬時間を変化させた場合の活動電位の振幅の変化を示す. 同図は, 入力位置が $CP_{DM1}\sim CP_{DM4}$ の場合, 振幅が減衰せずに逆伝搬するが, $CP_{DM5}\sim CP_{DM8}$ の場合 $j=1\sim 6$ の範囲では活動電位の変化が上に凸の能動的特性を示し, $j=7$ 以上で指数関数的に減少し受動的特性になることを示している. 以上のことより本ニューラルネットワークが生理学と同様に, 逆伝搬したパルスが CM から一定距離まで伝搬が能動的であり, その後伝搬が受動的になることを明らかにした.

4. まとめ

今回, 樹状突起のパルス伝搬に着目した STDP を誘発可能なニューラルネットワークを構成し, その順方向伝搬時の電位変化が逆伝搬するパルスに与える影響について検討を行った.

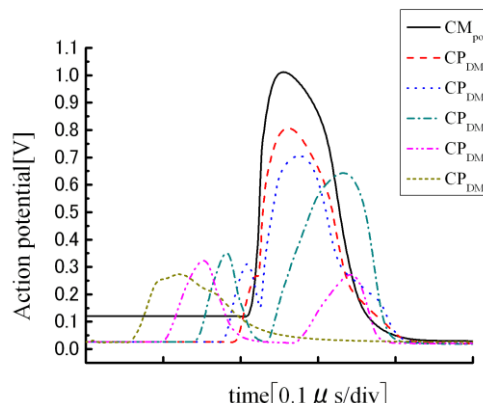


Fig. 2. An example of the action potential of DM and CM_{post} .

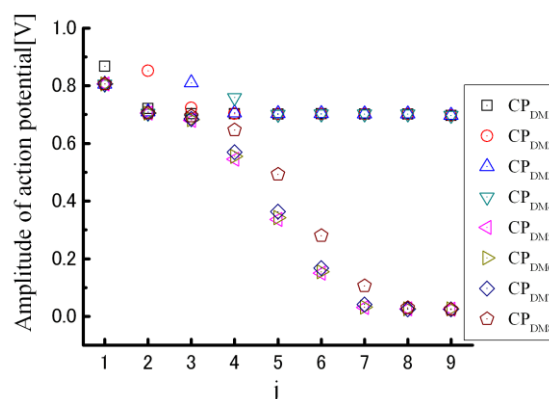


Fig. 3. Characteristics of action potential vs input position of CP_{DM} .

その結果, 本ニューラルネットワークの双方向伝搬時の電位変化による DM の内部電位の変化を明らかにすると共に, 本モデルが生理学と同様に CM から一定の距離までパルスの伝搬が能動的であり, その後パルスの伝搬が受動的になることを明らかにした.

今後は, 樹状突起の双方向伝搬特性を取り入れた学習モデルを構築する予定である.

5. 参考文献

[1] Nishiyama.M, Hong K, Mikoshiba K, Poo M-m, and Kato K: "Calcium stores regulate the polarity and input specificity of synaptic modification", nature, vol48, 584-588 (2000).

[2] 山田郁・清水昭宏・関根好文: 「STDP を誘発可能な能動的樹状突起ハードウェアモデル」, 電学論, C 部門誌, Vol.130, No.11 pp.1938-1944 (2010).

[3] B. Doiron, A. Longtin, R. W. Turner, L. Maler, "Model of Gamma Frequency Burst Discharge Generated by Conditional Backpropagation." J Neurophysiol., Vol.86, pp.1523-1545(2001).