

発振タイミングと発振周波数に依存した TSTDP シナプスデルに対する一検討 A Study on TSTDP Synapse Hardware Model Dependent on Oscillating Frequency and Timing

○唐鎌侑馬¹, 佐伯勝敏², 佐々木芳樹²Yuma Karakama¹, Katsutoshi Saeki², Yoshiki Sasaki²

Abstract: A synaptic plasticity is important for information processing of a human brain. A triplet spike timing dependent synaptic plasticity (TSTDP) dependent on oscillating rate of continuous spikes is occupied attention of the scientists. Previously, we proposed a TSTDP model which is depending on oscillating frequency of a neuron in only long-term potentiation (LTP).

In this paper, we propose a TSTDP hardware model that contains property of oscillating frequency and timing in long-term depression (LTD) and LTP.

1. まえがき

現在, 学習などの情報処理を工学的に応用するために, 脳を構成しているニューラルネットワークをモデル化する研究が盛んに行われている^[1]. 特に, シナプスの前段に結合している細胞体(以下, PRE)と後段に結合している細胞体(以下, POST)の発振タイミング, 発振順序と発振周波数に依存して, 学習効率を変化させる, Triplet-STDP(以下, TSTDP)が注目されている^[2].

先に, 我々は生理学データを基に報告された数理モデル TSTDP 特性を再現可能な電子回路モデルを提案した^[3]. しかしこのモデルでは $T_{post} - T_{pre}$ が正の場合のみでしか周波数依存性を持たない.

今回, $T_{post} - T_{pre}$ が負の場合においても周波数依存性を持つシナプスモデルについての検討を行った.

2. 本論

図 1 に生理学データを基に報告された数理モデルの特性を示す. 同図の縦軸はシナプスの結合強度の変化量 ΔW を示し, 横軸は POST と PRE の発振時間差 $T_{post} - T_{pre}$ を示す. POST の発振時間を T_{post} と PRE の発振時間を T_{pre} とする. 図中において, 発振周波数 f が低く, $T_{post} - T_{pre}$ が正の場合, ΔW は正となり, $T_{post} - T_{pre}$ が負の場合, ΔW は負となる. また, 発振周波数 f が増加するに伴って, ΔW も増加する. また, $T_{post} - T_{pre}$ が負の場合においては, 周波数が 50Hz のときを除いて, 周波数依存性を持たない.

図 2 に今回作成した TSTDP シナプス荷重制御回路に示す. またこの回路の動作を, PRE が先に発振する $T_{post} - T_{pre} > 0$ と, POST が先に発振する $T_{post} - T_{pre} < 0$ の二通りに場合分けして以下に示す.

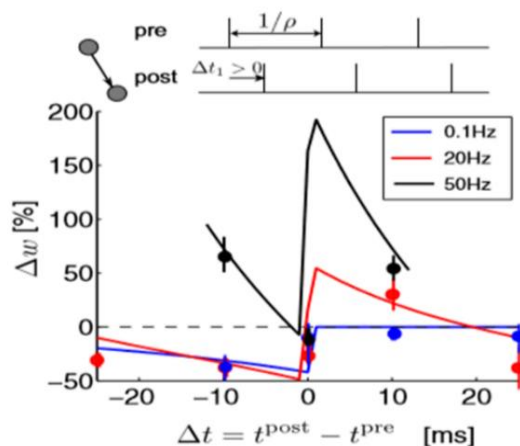


図 1 生理学データを基に報告された数理モデルの特性^[2]

2-1) $T_{post} - T_{pre} > 0$

V_{pre} が入力されると, M_3 が ON になり, C_1 にたまっていた電荷が引き抜かれ, M_7 が ON になり, V_{dd} から電流が流れる. ここで INV_1, INV_2 は $T_{post} - T_{pre} > 0$ のときに M_8 が ON にならないようにするために接続されている. 次に V_{post} が入力されると, M_{13} が ON になり電流が流れる. このときに流れる電流量は M_7 のゲート電圧によって変わるため, $T_{post} - T_{pre} > 0$ の値に依存する. また, V_{post} と V_{pre} の周波数によって, M_{12} が ON になる回数が増え, M_{15} のゲート電圧が変わる. この動作により, 周波数依存性をもつ.

2-2) $T_{post} - T_{pre} < 0$

V_{post} が入力されると, M_6 が ON になり, C_2 にたまっていた電荷が引き抜かれ, M_8 が ON になり, V_{dd} から電流が流れる. ここで, INV_3, INV_4 は $T_{pre} - T_{post} > 0$ のときに M_7 が ON にならないようにするために接続されている. 次に, V_{pre} が入力されると, M_{14} が ON になり電流が流れる. このときに流れる電流量は M_8 のゲート電圧によって変わるため, $T_{pre} - T_{post}$ の値に依存す

る. また, V_{post} と V_{pre} の周波数によって, M_{18} が ON になる回数が変化し, M_{16} のゲート電圧が変わる. この動作により, 周波数依存性をもつ.

これにより, V_{pre} と V_{post} の発火タイミングに依存した電荷を M_{11} が C_4 から引き抜く.

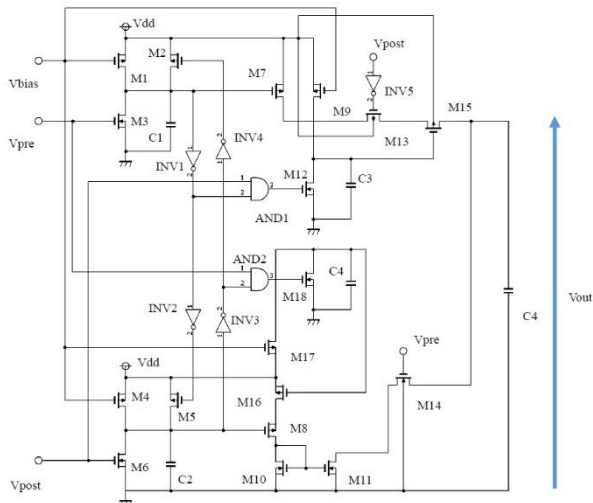


図 2 TSTDTP シナプス荷重制御回路

図 3 に TSTDTP シナプス荷重制御回路の $T_{post} - T_{pre}$ に対する V_{out} の変化量 ΔV_{out} を示す. 図中, PRE と POST のパラメータとして発振周波数 f は 10kHz, 16.7kHz, 20kHz, 40kHz としている. 同図において, $T_{post} - T_{pre} > 0$ の場合, ΔV_{out} は正となり, $T_{post} - T_{pre}$ の増加に伴って, ΔV_{out} は減少する. また発振周波数が高いほど ΔV_{out} の値は増加している. それに対して, $T_{post} - T_{pre} < 0$ の場合, ΔV_{out} は負となり, $T_{post} - T_{pre}$ の減少に伴って, ΔV_{out} は増加している. また発振周波数が高いほど ΔV_{out} の値は減少している. これにより, $T_{post} - T_{pre}$ が正の場合に加えて, $T_{post} - T_{pre}$ が負の場合においても周波数依存性を持つモデルであることを示している.

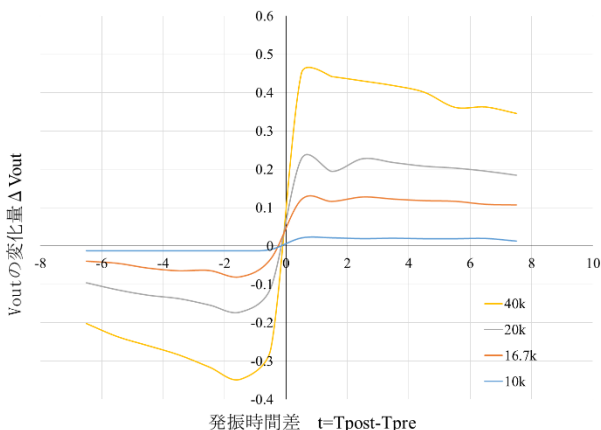


図 3 $T_{post} - T_{pre}$ に対する V_{out} の変化量 ΔV_{out}

図 4 に, TSTDTP 回路の電源電圧, 温度, MOSFET のパラメータを変化させた時の特性を示す. 入力には 40[kHz] のパルス波を用い, 電源電圧を 1.7, 1.8, 1.9[V], 温度を $-40, 20, 60[^\circ\text{C}]$, MOSFET のパラメータを電流を流しやすい順に, Fast(F), Typical(T), Slow(S) と変化させ, コーナー解析を行った. 同図において, 基準値である 1.8[V], $20[^\circ\text{C}]$, T を中心に, 電源電圧, 温度, MOSFET のパラメータに依存した特性が得られることを示している

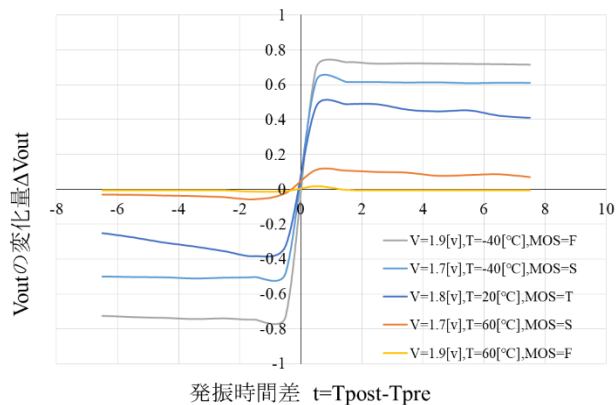


図 4 TSTDTP 回路の電源電圧, 温度, MOSFET のパラメータ特性

3. まとめ

今回, $T_{post} - T_{pre}$ が負の場合においても周波数依存性を持つシナプスモデルについての検討を行った. **その結果, AND 回路を用いて電流調節をすることで PRE, POST の発振時間差によって周波数依存性を持たせることができることを明らかにした.**

今後は, 今回作成した TSTDTP 回路を, 画像のパターン認識等, 工学的に応用する予定である.

4. 参考文献

[1] Cassidy, A.S. , Georgiou, J. ,& Andreou, A.. G. “Design of silicon brains in the nano-CMOS era: Spiking neurons, learning synapses and neural architecture optimization”, Neural Networks, 45, pp.4-26, 2013.

[2] Gjorgjieva, J., Clopath, C. , Audet, J. , & Pfister, J. “A triplet spike-timing-dependent plasticity model generalizes the bienenstock – cooper – munro rule to higher-order spatiotemporal correlation” Proceedings of the National Academy of Sciences, 108, pp. 19383-19388, 2011.

[3] 杉戸俊樹, 山下大地, 佐伯勝敏, 関根好文, 「発振タイミングと発振周波数に依存した可塑シナプスモデルの構築に対する一検討」, 日本大学理工学部学術講演会予稿集, E-4, pp. 1017-1018, 2015.