

抑制性入力により STDP 特性を切替可能な
シナプス結合荷重値制御回路に対する一検討

A Study on Synaptic Weight Control Circuit

Possible to Switch the STDP Characteristics by Inhibitory Inputs

○戸泉孝太¹, 佐伯勝敏², 佐々木芳樹²

○Takahiro Toizumi¹, Katsutoshi Saeki², Yoshiki Sasaki²

Abstract: Since neural networks have superior information processing function, many investigators attempt to model biological neurons and their networks. Furthermore, a number of studies of neural networks have recently been undertaken with the purpose of applying engineering to the brain.

In this paper, we propose a control circuit of the synaptic weight that can switch STDP characteristics by inhibitory inputs. As a result, it is clearly shown that the control circuit can change the asymmetric type STDP characteristics to the symmetric type STDP characteristics by inhibitory inputs.

1. まえがき

近年, 生体の情報処理機構をモデル化し, 工学的に応用する研究が行われている. それらの研究は, 生体の情報処理機構を実現するだけでなく, 脳の計算原理を解明する手段として有効である^[1]. 生体の脳の中で記憶を司る海馬において, 記憶はニューロン間のシナプス結合荷重値によって保持されている. シナプス結合荷重値を更新する性質として Spike timing Dependent Synaptic Plasticity(以下, STDP)が報告されている^[2]. STDP には 2 種類の性質があり, pre が先に発火した場合はシナプス結合荷重値の増強を起し, post が先に発火した場合は減弱がおこる非対称型の STDP 特性, pre・post の発振順序にかかわらず対称的な結合荷重値変化を起す対称型 STDP 特性である. Cutsuridis は STDP の対称性と抑制性入力の関係を調べ, 抑制性入力により STDP が非対称型から対称型へ切り替わることを示した^[2].

本稿では, 抑制性入力により対称型, 非対称型の STDP 特性を切替可能なシナプス結合荷重値制御回路の構築について検討を行った.

2. 本論

図 1 に今回提案する抑制性入力により対称型・非対称型の STDP 特性を切替可能なシナプス結合荷重値制御回路の回路図を示す. 同図において V_{pre} は前ニューロンの出力電圧, V_{post} は後ニューロンの出力電圧を示し, V_y は抑制性入力を示す. また, 以下に同図における回路パラメータを示す. $V_{dd} = 1.8[V]$, $V_{bias} = 1.35[V]$, $M_1 = 3$, $M_2 = 12.2$, $M_3 = 3.4$, $M_4 = 3$, $M_5 = 12.2$, $M_6 = 3$,

$M_7 = 0.1$, $M_8 = 12.2$, $M_9 = 10$, $M_{10} = 0.1$, $M_{11} = 0.1$, $M_{12} = 15$, $M_{k1} = 0.1$, $M_{k2} = 0.1$, $M_{k3} = 4$, $M_{k4} = 4$, $M_{k5} = 0.33$, $M_{k6} = 2$, $M_{k7} = 0.33$, $M_{k8} = 1.2$, $M_{k9} = 0.2$, $M_{k10} = 4$, $M_{k11} = 0.33$, $M_{k12} = 0.33$, $M_{o1} = 1$, $M_{o2} = 1$, $M_{o3} = 4$, $M_{o4} = 0.16$, $M_{o5} = 0.3$, $M_{o6} = 0.3$, $C_1 = 60[fF]$, $C_2 = 60[fF]$, $C_3 = 3[pF]$, $C_4 = 60[fF]$, $C_w = 5[pF]$.

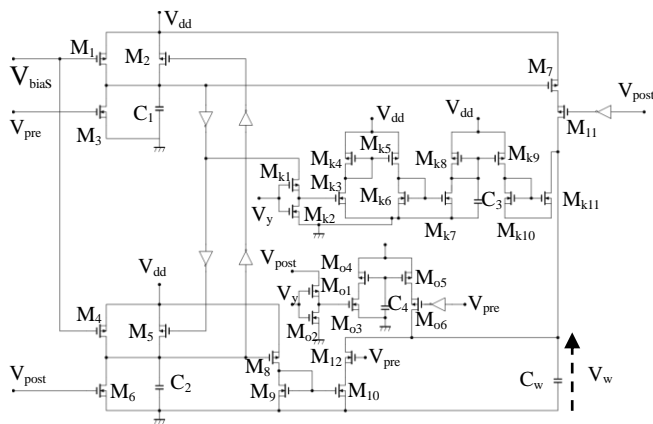


図 1 抑制性入力により STDP 特性を切り替え可能なシナプス結合荷重値制御回路

今回提案するシナプス結合荷重値制御回路の動作原理を以下に示す. まず $V_y = 1.8[V]$ を入力した場合, インバーターの出力は M_{k1} , M_{o1} のソース電位にかかわらず常に $0[V]$ となる. よって後段に接続されているカレントミラーは動作しない. その状態で, pre が先に発火した場合, C_1 から電荷を引き抜くことにより, M_7 が ON となる. このとき, M_5 のゲート電位は C_1 から電荷が引き抜かれたことにより Low となり, M_5 が ON となる. すると C_2 に急速に電荷が供給され post が発火して

1: 日大理工・院(前)・電子, 2: 日大理工・教員・電子

も、 C_2 から引き抜かれる電荷より、 M_5 によって供給される電荷が多くなり、下段のカレント・ミラーは M_5 のゲート電位が Low の間は常に OFF となる。そして、その状態で post が発火すると M_{11} が ON となり、結合荷重値 V_w が上昇する。post が先に発火した場合は、 C_w から電荷を引き抜くことで、結合荷重値 V_w が減少し、非対称型の STDP 特性を得ることができる。 $V_y = 0[V]$ を入力した場合、インバータの出力は、 M_{k1} 、 M_{o1} のソース電位によって変化する。その状態で pre が先に発火すると、 C_1 から電荷が引き抜かれ、インバータの出力が 1 となる。しかし、このインバータの出力は、 C_1 に依存しているため、後段のカレントミラーの動作は、 M_7 の動作より遅くなる。すると Δt が小さい間は M_7 による増強が得られ、 Δt が大きくなると M_{k8} による減弱が得られる。逆に post が先に入力された場合、 M_{o6} の動作のほうが速くなり、 Δt が小さい間は増強が得られ、 Δt が大きくなると減弱が得られ、対称的な STDP 特性が得られる。

図 2 に抑制性入力なしの場合の STDP 特性を示す。同図において横軸 Δt は pre が発火してから post が発火するまでの発火時間差を示し、縦軸 ΔV_w は V_w の変化幅を示す。同図から、 $\Delta t > 0$ の領域において増強が得られ、 $\Delta t < 0$ の領域において減弱が得られていることがわかる。このことから、 $V_y = 1.8[V]$ の場合、非対称型の STDP 特性が得られることがわかる。図 3 に抑制性入力ありの場合の STDP 特性を示す。同図から、 Δt が小さい間において増強が得られ、 Δt が大きくなると減弱が得られていることがわかる。このことから $V_y = 0[V]$ の場合、対称型の STDP 特性が得られていることがわかる。

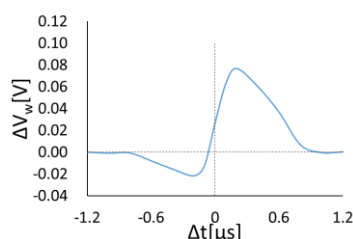


図 2 抑制性入力なしの場合

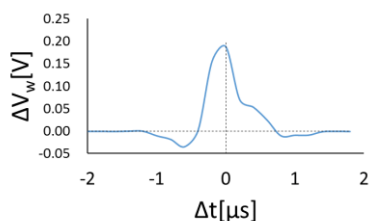


図 3 抑制入力ありの場合

図 4, 5 に Δt を変化させた場合の V_w の時間変化を示す。図 4 は非対称型の場合の V_w の時間変化を示し、図 5 は対称型における V_w の時間変化を示す。図 4 から非対称型の場合は $\Delta t > 0$ の場合は増強が、 $\Delta t < 0$ の場合、減弱が得られていることがわかる。また図 5 の場合は、 $\Delta t < 0$ の範囲でも増強が得られていることがわかる。

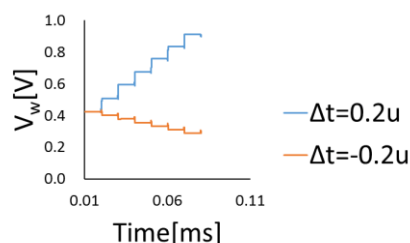


図 4 V_w の時間変化(非対称型)

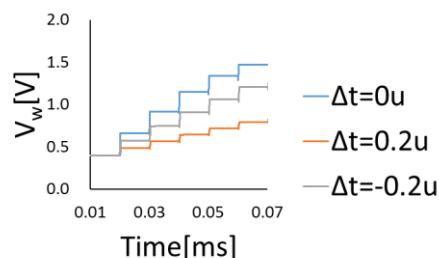


図 5 V_w の時間変化(対称型)

3. まとめ

今回、抑制性入力の有無により対称型・非対称型の STDP 特性を切替可能なシナプス結合荷重値制御回路の構築について検討を行った。その結果、抑制性入力により、STDP 特性を非対称型から対称型へ切替可能であることを明らかにした。

今後は、今回提案を行ったシナプス結合荷重値制御回路のレイアウト設計を行い、VDEC を通して IC 化を行う予定である。また、この回路を用いて、ニューロダイナミクスの解析を行う予定である。

4. 参考文献

- [1] 伊藤真, 黒岩丈介, 三宅章吾: 「海馬を用いた記憶システムの神経回路網モデル」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-D-II, No.2, pp.276-286, 1999.
- [2] V. Cutsuridis: “GABA inhibition modulates NMDA-R mediated spike timing dependent plasticity in a biophysical model”, Neural Netw., Vol.24, No.1, pp.29-42, 2011.