

単一ニューロンの情報処理におけるドーパミンの影響

Leaky Integrate-and-Fire モデルによる分析と評価

東京都立新宿山吹高等学校2年 答島 綾香

研究目的

本研究では、脳を構成する最も基本的な単位である単一ニューロンにフォーカスし、情報処理におけるドーパミンの働きを数理的に調べた。ドーパミンを放出するタイミングを工夫することで、整調型可塑性を導入せず、STDP の切り替えのみでスパイクパターンの学習を実現し、ドーパミンの純粋な影響を分析することを目指した。

研究手法

ニューロンモデルにおいて、任意のタイミングでドーパミンを放出し、ドーパミン入力を受け取ったときに STDP を平常時のものからドーパミン存在下のものに切り替えてスパイクパターンを学習することで、ドーパミンがどのような影響を及ぼすのか調べた。

1. ニューロンモデル

ニューロンモデルは、Masquelier らによる、Leaky Integrate-and-Fire モデル (LIF モデル) を用いた単一ニューロンでのスパイクパターン検出モデル [1] を用いた。本モデルは生物学的に知られている STDP のみを用いてスパイクパターンを学習しており、妥当性が高いと考えられている。

2. STDP

STDP はプレシナプスニューロンとポストシナプスニューロンの発火時刻の差によってシナプス重みの更新量が決まるという仕組みで、Zhang らはこの STDP がドーパミンによりどのように変化するかを実験的に示した (図 1) [2]。これを基に、平常時及びドーパミン存在下の STDP 曲線をモデル化した (図 2)。

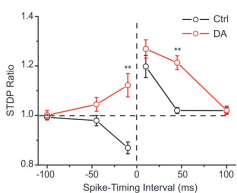


図 1. 平常時とドーパミン存在下の STDP

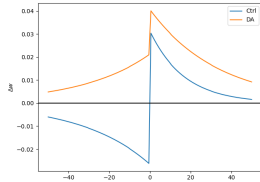


図 2. 平常時とドーパミン存在下の STDP モデル

3. スパイク列

入力は、0~90Hz の発火率を持つポアソン過程に従うスパイク列に、検出対象である 50ms のスパイクパターンを繰り返し埋め込んで作成した。この際に、平均 0、標準偏差 1~5ms のガウス分布に基づく jitter ノイズを加えた。

4. シミュレーション

LIF モデル上でドーパミンを受け取るシナプスを作成し、ドーパミン入力の有無により STDP を切り替えた。Brian2 を用いて実装し、シミュレーションは Euler 法を用いた。ドーパミンはスパイクパターンが埋め込まれた場所に確率的に放出した。50ms のスパイクパターンを 10ms の 5 つの区画 (スロット 1~5) に分割し、特定の区画に対して 10~100% の確率でドーパミンを放出した。重みの初期値 (0.30, 0.35, 0.40) やシミュレーション時間 (50, 100, 200 秒) の影響も評価した。それぞれの条件下で jitter が 1~5ms のスパイク列各 50 個に対してシミュレーションを行い、最後の 20 秒間におけるスパイクパターンの検出率が 96% 以上かつ false alarm がないケースを成功と定義し、成功率を算出した。

結果・考察

図 3 に重みの初期値 0.30 でスロット 3 にドーパミンを放出する 100 秒のシミュレーション (ベースの条件) を示す。ドーパミンがないときに比べて 20~40% のドーパミン放出で成功率が向上し、60~100% では低下した。また、放出確率が高くなるほど false alarm が出やすくなり、成功率が下がった。

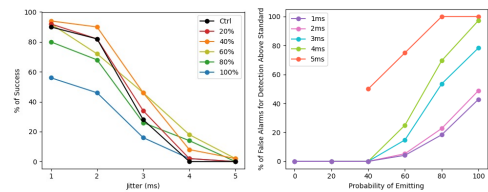


図 3. ベース (重みの初期値 0.30 / スロット 3 / 100 秒) のシミュレーション (左): jitter を変化させたときの成功率の変化 (右): ドーパミンの放出確率を変化させたときの false alarm の出やすさ

1. 学習時間への依存性

学習時間への依存性を示すため、jitter が 2ms と 4ms のデータについてまとめた。図 4 にドーパミンの放出確率に対する成功率の変化を学習時間ごとプロットした (学習時間以外はベースの条件)。ドーパミンが適度に放出されることにより短時間で効果的な学習が可能になるが、学習を長時間続けるとドーパミンの有無による学習性能の差異が縮小することが分かる。図 5 に横軸をドーパミンを放出するスロット、縦軸を学習時間とし、false alarm の出やすさを示す (学習時間以外はベースの条件、放出確率は 60%)。スロット 1 でドーパミンが出たときに false alarm が多く出て成功率が下がっている。これは、スロット 1 の前のデータはランダムであり、本来は LTD が起こる領域であるが、ドーパミンが存在するとこのランダムな入力に対しても LTP が誘発されるため、無関係なパターンが強化されたためであると考えられる。

すさを示す (学習時間以外はベースの条件、放出確率は 60%)。スロット 1 でドーパミンが出たときに false alarm が多く出て成功率が下がっている。これは、スロット 1 の前のデータはランダムであり、本来は LTD が起こる領域であるが、ドーパミンが存在するとこのランダムな入力に対しても LTP が誘発されるため、無関係なパターンが強化されたためであると考えられる。

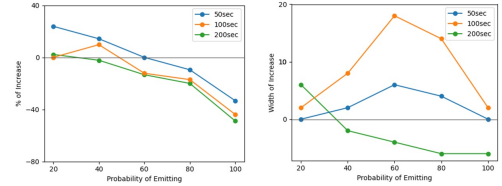


図 4. 学習時間に対する成功率の変化 (左): jitter が 2ms のときのドーパミンの放出確率ごとの成功率の増減率 (右): jitter が 4ms のときのドーパミンの放出確率ごとの成功率の増減率

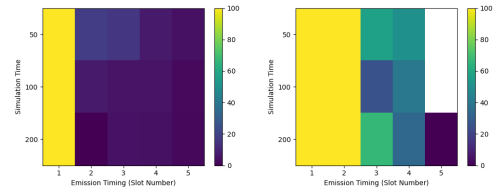


図 5. 学習時間に対する false alarm の変化 (左): jitter が 2ms のときの放出するスロットごとの false alarm の出やすさ (右): jitter が 4ms のときの放出するスロットごとの false alarm の出やすさ

2. 重みの初期値への依存性

重みの初期値についても学習時間と同様にまとめた (図 6, 7)。シナプス重みの初期値が高い (ニューロンがもともと興奮しやすい) ほど false alarm が出やすくなり、ドーパミンの追加的な効果が減少した。

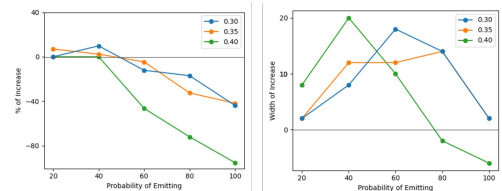


図 6. 重みの初期値に対する成功率の変化 (左): jitter が 2ms のときのドーパミンの放出確率ごとの成功率の増加率 (右): jitter が 4ms のときのドーパミンの放出確率ごとの成功率の増減率

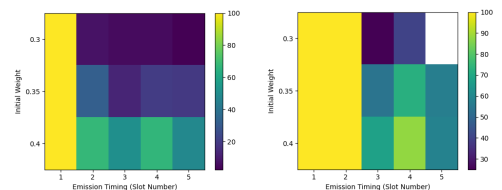


図 7. 重みの初期値に対する false alarm の変化 (左): jitter が 2ms のときの放出するスロットごとの false alarm の出やすさ (右): jitter が 4ms のときの放出するスロットごとの false alarm の出やすさ

結論

ドーパミンにより短時間で学習が可能になり、整調型可塑性を用いなくてもドーパミンによるシナプス可塑性の調節のみで情報検出能力を高めることができた。元々興奮しにくい状態にあるニューロンほどドーパミンの効果が高いことが理論的に示された。ドーパミンの放出タイミングが学習効率に大きく影響することが明らかになり、STDP における LTD 相の重要性が強く示唆された。

謝辞

本研究にあたり、懇切丁寧なご指導をいただきました。東京大学 河野崇教授、古市隼大氏に深く御礼申し上げます。また、本研究の機会をくださいました、UTokyoGSC-Next に心より感謝申し上げます。

参考文献

[1] Timothée Masquelier, Rudy Guyonnet, Simon J Thorpe. Spike timing dependent plasticity finds the start of repeating patterns in continuous spike trains. PLoS ONE, Public Library of Science, 2008, 3(1), pp.e1377.
[2] Ji-Chuan Zhang, Pak-Ming Lau, Guo-Qiang Bi. Gain in sensitivity and loss in temporal contrast of STDP by dopaminergic modulation at hippocampal synapses. PNAS, 2009, 106(31), 13028-13033.