

BG：大脳基底核(basal ganglia)

CIN：大脳皮質の運動野における抑制性介在ニューロン(cortico interneurons)

D1：D1受容体を発現するニューロン

D2：D2受容体を発現するニューロン

FSI：線条体内の高速でスパイクする抑制性介在ニューロン(fast-spiking interneurons)

GPe：淡蒼球外節(external globus pallidus)

GPi：淡蒼球内節(internal globus pallidus)

MC：大脳皮質の運動野(motor cortex)

MSN：中型の有棘細胞(medium spiny neurons)

SC：大脳皮質の感覚野(sensory cortex)

SNc：黒質緻密部(substantia nigra pars compacta)

STN：視床下核(subthalamic nucleus)

Th：視床(thalamus)

上図において線が3つに分かれているのと一つにのみもの出力先がすべての神経細胞であるか出力先が特定の一部の神経細胞かの違いです(実際の結合の有無は実験的データをもとにした確率でランダム)。さらに、線の両端に模様がついているのは総合に投射することを表します

上図のようなネットワーク構造の神経回路をシミュレーションするプログラムです。

このネットワーク構造での1000msの活動についてシミュレーションしており、1000msの前にFreeRunとして結果をファイル出力しない時間100msを含んでおります。

さらに、1000msの中で400ms~600msの間に外部入力であるSCから行動選択における選択肢の選択性の定時を行っております。

このシミュレーションではそれぞれのニューロンの1000ms間での発火活動とニューロンの種類毎の平均発火率を結果として出力します。

更に標準出力でシミュレーションの計算時間についても出力しています。

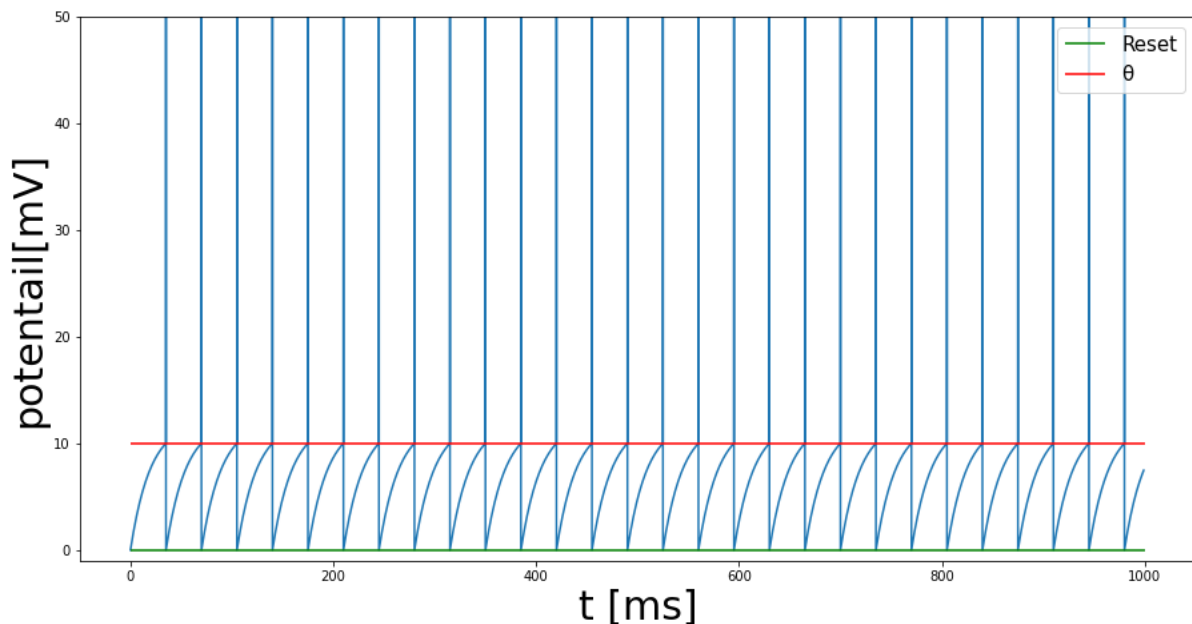
ニューロンは積分発火型モデルで再現されており、これは、膜電位の変化を

$$\tau_m \frac{dV}{dt} = E_r - V + R_m I_{in}$$

$$V > \theta \Rightarrow V = V_{Reset}$$

のような式で再現します。この式での変数は

$\tau_m$ ：膜時定数， $V$ ：膜電位， $R_m$ ：膜抵抗， $I_{in}$ ：入力電位， $E_r$ ：安静時の膜電位， $\theta$ ：発火しきい値， $V_{Reset}$ ：リセット電位を表しています。この式によって膜電位は下図のように変化していきます。



この図では縦軸が膜電位、横軸は時間を表しており膜電位の時間変化を表しています。そして赤線が発火しきい値となる膜電位、緑がリセット電位です。ここでは発火したときがわかりやすい様に発火したタイミングで縦線を入れております。

ここで今回のシミュレーションは入力をすべて電圧であると仮定しており  $R_m I_{in} = V_{in}$  とし、安静時の膜電位も0としているので  $E_r = 0$  となり、式は

$$\tau_m \frac{dV}{dt} = (-V) + V_{in}$$

$$V > \theta \Rightarrow V = V_{Reset}$$

と表すことができます。

更に今回のシミュレーションではシミュレーションのネットワークの構造で考慮されていない入力を定数入力  $V_c$  としており、シナプス後電位を  $ig$ 、シナプスの冗長性を  $\rho$  とすると、式

は

$$\tau_m \frac{dV}{dt} = (-V) + V_c + \rho(ig)$$

$$V > \theta \Rightarrow V = V_{Reset}$$

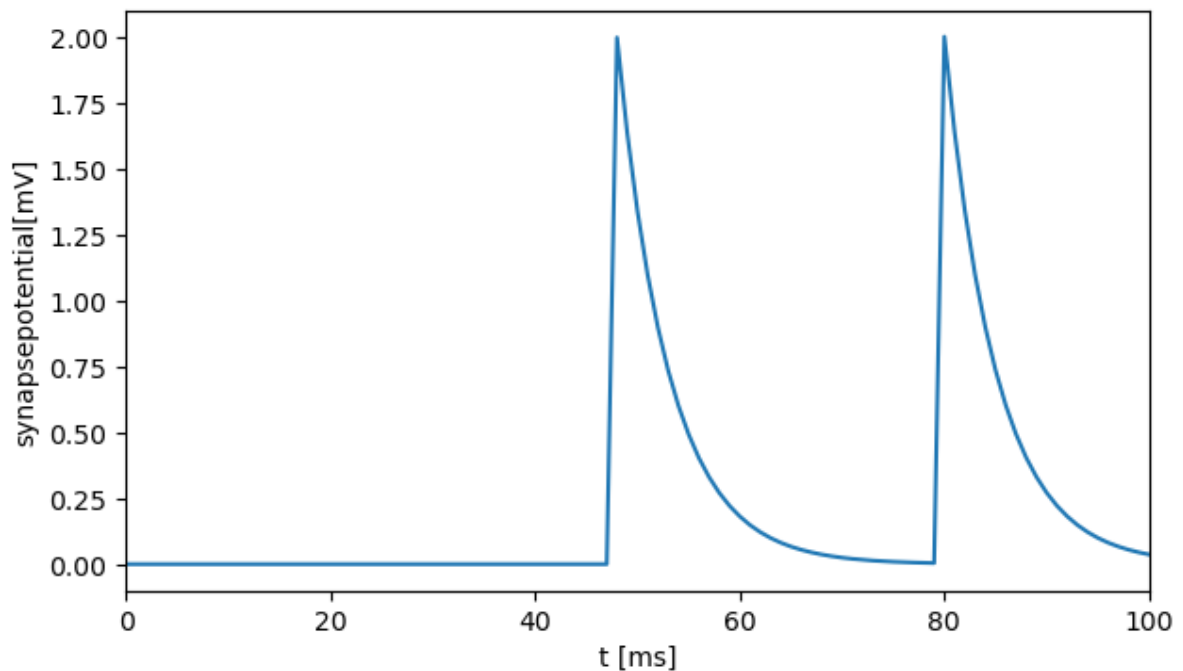
と表され、この式を計算することでニューロンの膜電位の活動を再現しております。

次に、シナプスは指数関数型シナプスモデルで挙動を再現しており、シナプス後電位の変化は

$$ig = (ig) \exp\left(-\frac{dt}{\tau_{syn}}\right) + Ws(t)$$

のような式で再現します。この式での変数は $ig$ は上述したとおりで

$\tau_{syn}$  : シナプスの時定数,  $W$  : シナプス荷重,  $s(t)$  : 時刻 $t$ における発火の有無を表しています。この式によって膜電位は下図のように変化していきます。



この図では縦軸がシナプス後電位、横軸は時間を表しておりシナプス後電位の時間変化を表しています。信号を与えるニューロンが発火しその信号が伝わったタイミングでシナプス後電位が急激に上がり、その後指数関数的に減少していくことがわかります。

baseline, actionselectionではrasterplot.ipynbというJupyter Notebookファイルでは発火活動についてグラフにプロットし、表示します。

グラフは縦軸にニューロン番号、横軸にシミュレーション内での時間を表しています。このグラフではシミュレーション内での時間に発火があった場合に点を打つ様にプロットすることで発火活動をグラフに出力しています。

大脳基底核の行動選択は大脳基底核の出力部であるGPiの一部の活動が優位的に減っていることでGPiから脳幹や脊髄への抑制が消え、その一部に対応する行動が行われるので、400ms~600msの間の前後でGPiの一部の活動が抑制されていれば選択していると言えます。

map\_actionselectionでは上記のシミュレーションの入力(sensory cortex)の発火率を変化させたときの行動選択についてです。

そのままだと入力であるsensory cortexの2つのchannel(選択肢)の発火率を20段階で変化させ、各入力パターンについて1s(1000ms)のシミュレーション(入力を変化させたのは400ms~600msの間のみ)を行われます。(シミュレーション回数400回)

actionselection.ipynbというJupyter Notebookファイルではそれぞれの入力でのシミュレーション結果についてヒートマップで表示します。

グラフは縦軸にchannel2(選択肢2)の入力の強さ、横軸にchannel1(選択肢1)の入力の強さを表しており、大脳基底核の出力核である淡蒼球内節(GPi)の2つのchannel(channel1(選択肢1),

channel2(選択肢2))の発火率について式(1)の $e$ を求め、その2つの $e$ の差が0.01より大きい場合は黄、-0.01より小さい場合は紫、どちらでもない場合は緑になるようにプロットします。

このグラフでは黄色の場合はchannel1(選択肢1)、紫の場合はchannel2(選択肢2)、緑色の場合は選択できなかったことを表しており、このマップが斜めにきれいに黄色と紫に分割出来ていると行動選択がうまく出来ていることを表します。

緑は両選択が同じくらいの選択性の場合に存在しやすいと考えられるので斜めの黄色と紫の境界線付近に存在しやすいと考えられます。