

確率時限ペトリネットに基づく神経伝達速度の性能評価 Performance Evaluation of Nerve Conduction Velocity using Stochastic Timed Petri Nets

江野口 裕希¹⁾ 近藤 真史¹⁾ 横川 智教²⁾ 佐藤 洋一郎²⁾
Hiroki ENOKUCHI Masafumi KONDO Tomoyuki YOKOGAWA Yoichiro SATO

1 まえがき

近年、数理モデル化された神経細胞に対する計算機シミュレーションの発展に伴って、神経細胞の特性の多くが明らかになりつつある [1]。しかし、神経細胞の確率的な挙動を考慮した時間的特性は十分に検討されていない。そこで筆者らは、神経細胞と同様に非同期的な電気信号のやり取りを行う系である非同期式回路に着目し、その性能評価法を神経細胞に応用する試みに着手している [2]。本研究はその次段階として、多数の細胞が密に連結した場合の評価を実現することを目的に、神経細胞単体のモデルを一般化し、それをモジュールとして多数組み合わせ合わせた際の性能評価結果について報告する。

2 確率時限ペトリネットに基づく性能評価法

クロックに律速されない非同期式回路の性能評価として、各構成要素の動作を確率時限ペトリネット (STPN) でモデル化し、モンテカルロシミュレーションにより速度性能の上界を高速に算出する手法が提案されている。

ペトリネットは、イベント (事象) を表すトランジション t 、イベントの生起条件を表すプレース p 、これらの接続を表すアークにより構成される。さらに STPN では、各プレースには任意の遅延分布を、複数のアークが分岐出力するプレースには選択確率をそれぞれ割り当て可能であり、これによりシステムの時間的・確率的な挙動を表現できる。プレースに対応する条件が満たされるとトークンが置かれ、遅延分布に従ったランダムな遅延時間を経過した後有効となる。そして、入力プレースのトークンが全て有効となったトランジションは発火し、トークンが出力プレースに移動する。これを繰り返すことによりシステムの状態遷移を模擬することが可能であり、システムの時間的・確率的な動作は、プレースの遅延とトランジションの発火時刻を時系列的に接続したイベントグラフ (時限実行という) により解析できる。

STPN とその時限実行の例を図 1 に示す。プレースに置かれたトークンの集合をマーキングといい、STPN ではいずれのマーキングの状態からでも初期マーキングへ到達可能 (可達) である。図 1 右は、同図左の STPN において無限に続く時限実行を初期マーキング $\xi (p_1, p_2, p_3)$ で分割したものであり、この部分的な時限実行をセグメントという。このとき、任意の動作に要する時間の上界は、動作の始点と終点を表すトランジションペア u, v の発火時刻の最大差として定義され、これを TSE という。各セグメントにおける TSE の上界は、 ξ を基点として u および v それぞれに至る最大遅延より算出できる。ここで重要な点は、任意のセグメントにおける TSE はそれ以前のセグメントの遅延に依存しないことである。したがって、モンテカルロシミュレーションに基づいてセグメントごとに TSE を算出し、その算術平均をとることにより時間的特性の平均の上界を求めることができる。

- 1) 岡山理科大学, Okayama University of Science
- 2) 岡山県立大学, Okayama Prefectural University

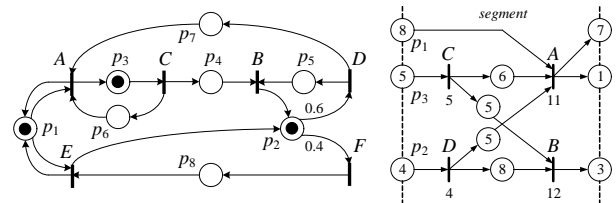


図 1 STPN とその時限実行

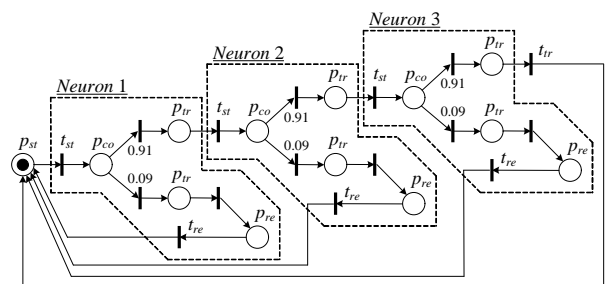


図 2 神経細胞の STPN モデル (3 連結の場合)

3 STPN による神経細胞のモデル化

STPN を用いた性能評価法を神経細胞に応用するためには、神経細胞の時間的・確率的特性に関連する動作を抽出し、STPN でモデル化する必要がある。

神経細胞の時間的特性に係る動作は、外部からの刺激を電気信号として神経細胞内で伝える「伝導」、他の神経細胞に刺激を伝えるために神経細胞間でやり取りを行う「伝達」に大別することができる。特に後者の伝達において、刺激となる活動電位が十分に満たされても実際に神経細胞が発火するか否かは確率的に決まり、その発火確率は凡そ 91% と定性的に決まる [3]。また、一度活動電位が発生すると、次の刺激において発火が抑制される、いわゆる不応期が生じることとなる。

上述の時間的・確率的特性を考慮した神経細胞の STPN モデルを図 2 に示し、その動作を以下に記す。

まず、外部からの刺激を受けると、基点となるプレース p_{st} に置かれたトークンが神経細胞内の伝導を表すプレース p_{co} に移動し、神経細胞の長さや神経伝達速度から得られる伝導時間を経てトークンは有効となる。その後の遷移、すなわち伝達により隣接する神経細胞が発火するか否かは、 p_{co} の選択確率に基づいて決定され、上述の通り 91% の確率で伝達を表すプレース p_{tr} にトークンが移動する。そして、伝達時間に応じた遅延を経てトークンが有効になった後、隣接する神経細胞に対する新たな刺激としてトークンが移動する。これを繰り返して末尾の神経細胞まで刺激が伝わるとトランジション t_{tr} が発火して p_{st} にトークンが戻り、次の刺激に備えることとなる。一方、各神経細胞において隣接する細胞が発火しない場合は、伝達の成否に関わらず p_{tr} の遅延を経た後、不応期を表すプレース p_{re} を経由して次の刺激に備えることになる。

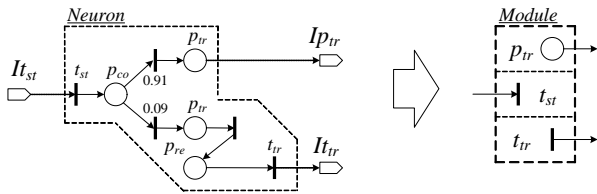


図3 神経細胞モデルのモジュール化

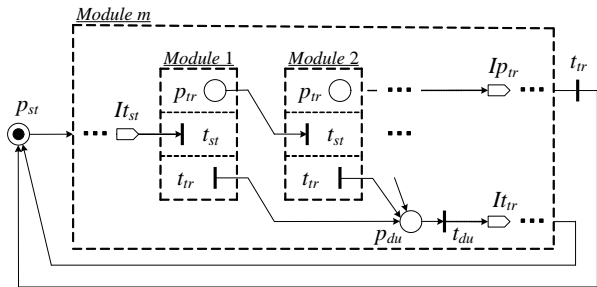


図4 神経細胞モジュールの階層化

4 神経細胞に対する STPN モデルの一般化

神経細胞シミュレーションでは、大規模なモデルでは数千～数万個の神経細胞を扱うことがある [1]。しかし、本研究の性能評価法では、連結される神経細胞の数に応じて STPN モデルをそれぞれ生成する必要があるため、STPN の入力に多大な時間と労力を要することとなる。そこで本研究では、神経細胞の STPN モデルを一般化し、それをモジュールとした階層的かつ大規模な STPN モデルの構成法を検討する。

まず、3つの神経細胞が連結された図2の STPN モデルに着目すると、図中破線内の STPN の構造は全ての神経細胞で共通となる。したがって、これを単位としたモジュール化が可能であることは明らかであり、以降これを神経細胞モジュールという。神経細胞モデルとモジュールの対応関係を図3に示す。破線のアークはモジュール内外との接続を表し、その接続先は対象となるプレイスまたはトランジションのラベルの先頭に I を付して表す。ここでは p_{rr} 、 t_{st} および t_{tr} が該当し、これらは他の神経細胞モデルと相互に接続されることになる。

次に、神経細胞モジュールの階層化、つまり複数のモジュールをさらにモジュール化することを考える。これは図3の例からも明らかな通り、直列に連結された神経細胞であれば、単に隣接する神経細胞モデル間の p_{rr} と t_{st} を接続して伝達に係る動作を表現すればよい。一方、不応期に係る動作を表す t_{tr} は各モジュールごとに設けられているため、複数のモジュールで構成されるモデルをさらにモジュール化すると、それに合わせて t_{tr} に対する外部との接続を設ける必要があり、その接続は最上位階層まで伝搬する。結果、膨大な数の t_{tr} に対するアークの接続作業が生じるため、モジュール化の効果を阻害することになる。そこで本研究では、モジュール化を行うごとに t_{tr} のアークを統合する方針を採り、そのモジュール構成を図4に示す。各モジュールの t_{tr} からのアークは、ダミーのプレイス p_{du} とトランジション t_{du} により同期化され、モジュール化の際には t_{du} が外部との接続を担うことになる(モジュールのラベルを統一するため、破線アークの接続先は便宜的に I_{tr} と表記

する)。特に各モジュールにおける t_{tr} が発火するのはいずれか一つに限られるため、 p_{du} が二重トークンになることはなく、モデルの整合性を保ったまま図3と同様の入出力を備えたモジュールを構成できる。これによれば、モジュールを階層化しても t_{tr} の接続が上位階層に伝搬することなく、容易に多数の神経細胞からなるモデルやモジュールを生成することができる。

5 神経細胞の性能評価

神経細胞モジュールを単位として、複数の連結した神経細胞を模したモデルの性能評価を行った結果を表1に示す。対象とする神経細胞は正中神経を仮定し、各プレイスに割り当てる遅延分布は文献 [4] を参考に、伝達に係るプレイス p_{co} には細胞長 5cm と伝導速度 48~60m/s より算出される $83\mu\text{s}$ ~ $102\mu\text{s}$ の正規分布遅延、伝達に係るプレイス p_{rr} には伝達時間 $20\mu\text{s}$ の固定遅延、不応期に係るプレイス p_{re} には $1\mu\text{s}$ の固定遅延をそれぞれ割り当てた。なお、刺激の基点となるプレイス p_{st} には遅延を割り当てることなく即時有効とする。また、実際の STPN モデルの作成にあたっては、2のべき乗を単位とする階層的な神経細胞モジュールとして構成している。評価対象 (TSE) は、刺激を与えてから (t_{st}) 末尾の神経細胞にそれが伝わり終えるまで (t_{tr}) の神経伝達時間であり、比較のための理論値として、神経分布の中央値と伝達時間・不応期の遅延分布から算出した値を表1に併記している。これらの値を比較すると凡そ近い値を示しており、一般化した STPN モデルとそれを用いた神経細胞の性能評価の妥当性を確認できる。

表1 神経伝達速度の性能評価結果

神経細胞数	2	8	32	64
TSE [μs]	1871.6	7490.3	30044.0	60306.9
理論値 [μs]	1870.0	7560.0	30240.0	60480.0
プレイス数	10	40	160	320
トランジション数	12	48	192	384
評価回数	1058	281	62	37
評価時間 [s]	0.001	0.005	0.094	2.277

6 あとがき

本研究では、単一の神経細胞の STPN モデルを一般化し、それをモジュールとして階層的に大規模な STPN モデルを生成可能な手法を提案した。それに基づいて多数の神経細胞からなるモデルを生成し、モデル化と性能評価結果の妥当性を確認した。今後の課題としては、複数の隣接する神経細胞への分岐を含むモデルのモジュール化の検討、そしてより複雑かつ大規模なモデルの性能評価を通じて、モデル規模と評価時間の観点から提案手法を適用できる限界を明らかにすることが急務である。

参考文献

- [1] 北野 勝則, “脳のシミュレーションを始めるために,” 人工知能, Vol.30, No.5, pp.607-612 (Sept. 2015)
- [2] 江野口 裕希, 近藤 真史, 他, “確率時限ベトリネットを用いた神経細胞のモデル化と性能評価,” 2020 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, R20-14-01-01 (Oct. 2020)
- [3] 宮川 博義, 井上 雅司, “ニューロンの生物物理 第2版,” 丸善出版 (Sept. 2013)
- [4] F.S.Robert, “神経生理学 第2版,” 金芳堂 (1992)