

令和6年度 南北海道学術振興財団 成果報告書

事業名称： 神経細胞を模した電子回路の協調・連携動作誘発に関する研究

研究代表者： 函館工業高等専門学校 生産システム工学科 高田 明雄

1. 研究の目的

本研究の目的は、神経細胞モデルに見られる発火特性（入力電圧レベルが時間積分され、閾値に達するとパルス状に出力される）を電子回路で模倣し、さらに複数の回路を連結したネットワーク構成における同期現象や信号伝達プロセスの理解を深めることである。これまでの研究は主に2回路間の同期現象に限られていたが、本研究では3回路以上の複雑な構成を対象とすることに取り組んだ。ネットワーク構成の回路製作および、発火・伝搬現象の同時観測が可能な計測システムの構築を進め、実験的な検討を行った。また、ノイズを導入した際の同期性や信号伝達特性への影響について、系統的な評価を行うための枠組みを整え、初期的なデータ取得を試みた。さらに、区分発振型の電子回路を用いることにより、省エネルギー性や神経細胞特有の情報処理特性を電子回路レベルで探求するための知見の蓄積を図った。これらを通じて、生物模倣型情報処理の基盤形成に向けた一助とすることを目指している。

2. 研究結果

(1)ニューロンの特徴を有した電子回路の製作（文献[1]）

神経細胞モデルの発火（入力電圧レベルが時間積分され、ある一定値に達すると放電する）現象について、これまでの回路開発の中で未実装であった技術、すなわち①シナプス結合を模倣した複数の入力、②入力値の合算機能、ならびに③入力パルス信号の一時記憶保持機能を追加導入し、人工的な神経回路網（ニューラルネットワーク）の基本回路を製作し、動作を確認した。複数入力については2入力構成を実現しており、3入力以上への拡張が容易な構成とした。また、パルスの保持時間は抵抗値と静電容量値により任意に設定可能な設計とした。さらに、ネットワーク内の複数の電子回路の入力と応答を同時にモニタリング可能な実験回路および計測システムを構築した。すなわち、従来報告されてきた研究と比較して大きく異なっていた点として、以下の2点を同時に実現することができた：

- ① 従来型の回路に神経細胞の特徴を追加した。
- ② 複数個の回路を連結し、複数個所の信号のやり取りを同時に観測・評価可能なシステムを構築した。

また、これまで報告されてきた回路間の同期（協調動作）に関する実験は主に2つの回路間に限定されていたが、本研究では3回路（3つのニューロン回路）を連結し、入力パルスに対する各回路の応答を確認した。

続いて、ネットワーク内に組み込んだ電子回路の発火特性および信号伝達プロセスの関係について、さらにノイズ介在時の影響も含めて検討を進めた。ノイズを意図的に信号に加算した場合のパルス伝達実験も行ったが、現段階では明確なノイズの効果は観察されておらず、ノイズの加え方（発火閾値への加算、入力パルスへの加算等）に関しては今後の検討課

題として残っている。

(2)互いに結合されていない従来型のニューロンモデル回路の同時発火（文献[3]）

従来型の神経細胞モデルに近く、互いに結合されていない積分発火型回路にホワイトノイズを印加した場合の同時発火率を調べた。すなわち、外部から印加、もしくは周辺に存在するノイズが二つの積分発火回路の協調動作すなわち同時発火確率にどの程度影響するものかについて踏み込んだ考察を行った。すなわち、確率的な取り扱いが複雑である問題に対して、回路パラメータのミスマッチがもたらす同時発火率について近似モデルに基づいた考察を行うことで比較的容易にノイズが誘発する同時発火確率を予測することができることを明らかにし、実験および数値シミュレーションの両方によりその正当性を確認した。

(3)区分定数発振回路の研究（文献[2]）

神経細胞を模した電子回路とは異なり、人的にその回路動作を簡略化した構成として電気信号を発生させる区分定数発振器を用いた。この発振器の製作にあたっては、回路をヒステリシス素子で連結可能なプリント基板を製作し、実装まで完了しているが、現段階では回路間の協調動作の確認には至っておらず、今後の継続課題とする予定である。また、理論的な動作を実験的に高精度で再現するために、回路パラメータの設定精度向上を目指し、プリント基板上にパラメータ微調整機能を追加することにも成功した。ただし、その結果として回路の調整箇所が従来に比較して倍増してしまう問題に直面している。今後は微調整不要な半導体部品の採用を積極的に進め、引き続き回路構成の最適化と研究の推進を進めていく予定である。

本成果は将来的な超低消費電力型ニューラル回路への応用にも貢献することが期待される。

3. 本事業に関する研究発表

- [1] 下山 宇宙, 高田 明雄, 坪根 正, “OP アンプを用いた積分発火型ニューロン回路の試作”, 令和 6 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演論文集, pp.248-249, 2024 年 11 月
- [2] 工藤 海久斗, 高田 明雄, 坪根 正, “区分定数回路における実験パラメータの精密評価と発振”, 令和 6 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演論文集, pp. 250-251, 2024 年 11 月
- [3] Akio Takada, Tadashi Tsubone, “Noise-Induced Simultaneous Firing in Uncoupled Leaky Integrate-and-Fire Circuits”, 2025 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, London, 掲載予定、2025 年 5 月 26 日