

M-4

弱く結合したニューロモルフィック回路の同期現象に対する検討  
 A Study on Synchronization Phenomena of Weakly Coupled Neuromorphic Circuits

○崔峻豪<sup>1</sup>, 中山渉<sup>1</sup>, 陳普澤<sup>2</sup>, LYU SHUXIN<sup>3</sup>, 齊藤健<sup>4</sup>

\*Junhao Cui<sup>1</sup>, Wataru Nakayama<sup>1</sup>, Puze Chen<sup>2</sup>, Shuxin Lyu<sup>3</sup>, Ken Saito<sup>4</sup>

Abstract: The authors mimic the biological nervous system using analog circuits to implement in robots. Previously, we developed a quadruped robot generating animal-like gaits with single neuromorphic circuits implemented into a single leg. However, gaits were not sustainable due to external disturbances. In this paper, we connected neuromorphic circuits with weak coupling to study the synchronization phenomena. The authors used discrete circuits to construct neuromorphic circuits. We achieved a certain level of synchronization in the circuits by coupling the neuromorphic circuits with weak coupling.

1. はじめに

近年、ロボットの活用がさまざまな分野で進み、研究者たちが多くの取り組みを行っている。そのうち、脚式ロボットは、複雑な地形や階段を難なく移動できる利点があり、物資の運搬や地形の探査において、人間の代わりに役立つ可能性がある。一例として、ボストン・ダイナミクス社の四足歩行ロボット「Spot」が挙げられる。Spotは、頭部に搭載された画像認識カメラ、センサ、モジュールなどを使用して、坂道や階段、平地などさまざまな環境を把握し、ディープラーニングを用いて画像認識することで安定した歩行を実現できる<sup>(1)</sup>。しかし、Spotはデータ処理の負荷が高く、バッテリー駆動時間が90分であり、充電には120分必要である課題がある。また、新しい環境に対して継続的に学習を行っているものの、生物と比較すると柔軟な適応力に欠けている。

前述の課題を解決するため、Figure 1に示すように、我々は生物の自律歩行を模倣した四足歩行ロボットの開発を目指し、神経細胞を模したアナログ電子回路で構成したニューロモルフィック回路を四足ロボットに実装する研究を行っている。すでに、ニューロモルフィック回路を各脚に対応させて搭載し、コンピュータプログラムを必要としない自然な歩容を実現する成果を得ている<sup>(2)</sup>。しかし、四足ロボットの各脚に搭載したニューロモルフィック回路が独立して脚を駆動するため、外乱によって歩容が乱れ、長時間安定した動作を維持できなかった。

本研究では、四足歩行ロボットが歩行中に外乱による歩容崩れに対し、脚間の位相差を保った歩行パターンを維持する事を目的として検討を進める。具体的には、ニューロモルフィック回路を互いに弱く結合することで、外乱による多少の歩容乱れが発生しても元の

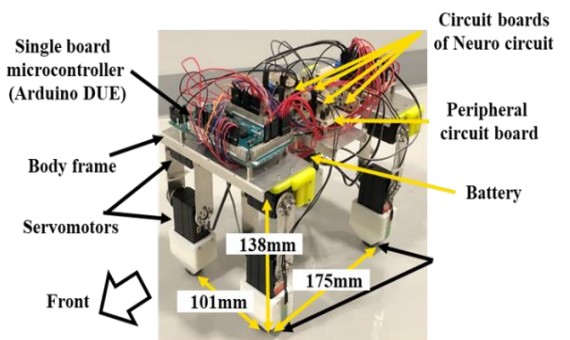


Figure 1. Quadruped robot with neuromorphic circuits

歩容を保持できるか検討する。

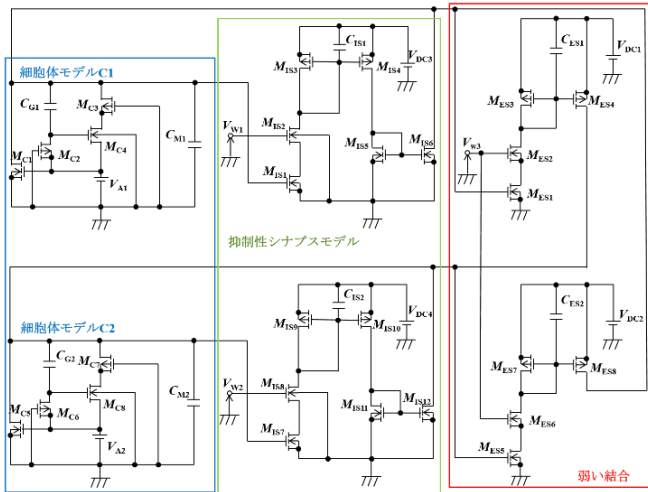
本論文では、ニューロモルフィック回路をディスクリート回路で作製し、2つのニューロモルフィック回路を弱く結合して同期現象について検討したので報告する。

2. 弱く結合したニューロモルフィック回路

動物の歩行パターンは、CPG(中枢パターン生成器)と呼ばれるメカニズムによって生成されると考えられているため、今回の研究ではCPGモデルの結合振動子の概念を参考にする。単純な振動子同士が結合することで、全体として同期現象などの多様な動作を示すことが知られている<sup>(3)</sup>。しかし、歩行パターンを振動子の結合強度に依存させるのではなく、ニューロモルフィック回路とロボットの機械的な相互作用によってパターンを生成し、弱い結合によって安定させることを考える。そこで、2つのニューロモルフィック回路を弱い結合で相互に接続した回路ディスクリート回路で作製して検討する。

Figure 2に2つの細胞体モデルと抑制性モデルで構成した自己回帰モデルを弱い結合で相互結合した回路を示す。回路定数は、以下の通り同一とした。 $R_1 =$

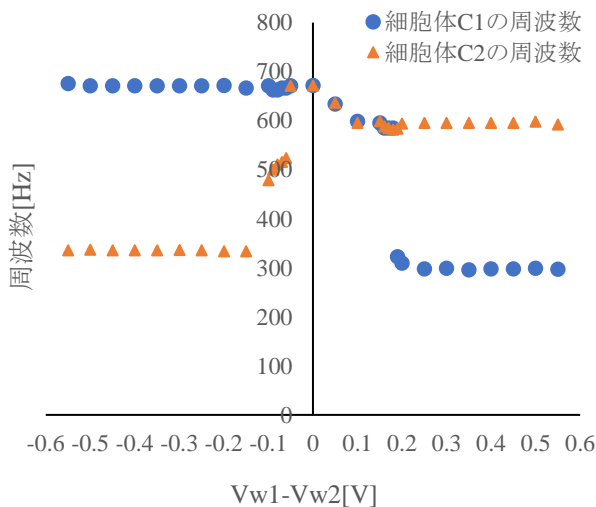
1:日大理工・院(前)・精機 2:日大理工・学部・精機 3:日大理工・院(後)・精機 4:日大理工・教員・精機



**Figure 2.** Circuit diagram of the neuromorphic circuit connected by weak coupling

$20\text{k}\Omega, R_2 = 15\text{k}\Omega, R_G = 8.2\text{M}\Omega, R_L = 10\text{k}\Omega, C_G = 47\text{pF}, C_M = 10\text{pF}, C_1 = 3.3\mu\text{F}, M_{11}, M_{15}, M_{16}, M_{17}, M_{18}$  は SSM3K17fu,  $M_{12}, M_{13}, M_{14}$  は BSH203 である. また, 興奮性シナプスモデルで構成した弱い結合の回路定数は以下の通りである.  $C_E = 1\text{nF}, M_{E1}, M_{E5}, M_{E6}$  は SSK17fu,  $M_{E2}, M_{E3}, M_{E4}$  は BSH203 である.

弱い結合を構成した興奮性シナプスモデルの荷重電圧  $V_{W3}$  のパラメータを微調整し, 自己回帰モデルが受けた抑制性シナプスモデルの荷重電圧にずれがあっても, 弱い結合の相互影響により二つの自己回帰モデルは同期する. 従って, 四足歩行ロボットの足先の圧力センサが歩行中に受けた外乱により発生するずれは, 弱い結合を構成した興奮性シナプスモデルで補正されると考えた.



**Figure 3.** Synchronization phenomena in neuromorphic circuit due to weak coupling

### 3. 実測結果

Figure 3 は Figure 2 の弱く結合した自己回帰モデルのディスクリート回路の実測結果である. 抑制性シナプスモデルの  $V_{w1}$  と  $V_{w2}$  を  $1.45\text{V}$  である抑制性シナプスモデルを機能する閾値から荷重電圧を変化し, 興奮性シナプスモデルの荷重電圧  $V_{w3}$  を  $1.2\text{V}$  に設定した場合の電圧-周波数特性を示している. 同図より,  $-0.05\text{V} \sim +0.18\text{V}$  の区間にある細胞体モデル  $C_1$  が発振した出力信号の周波数と,  $C_2$  が発振した出力信号の周波数が同期している.  $+0.18\text{V}$  の範囲を超えた場合,  $C_1$  の周波数は急激に下がり, 交合に  $1:2$  の比例関係の周波数となる事を明らかにした.

### 謝辞

本研究の一部は, 令和2年度日本大学学術研究助成金総合研究, および令和4年度日本大学特別研究の助成を受けたものである.

### 4. 参考文献

- [1] P. Biswal and P. K. Mohanty: “Development of quadruped walking robots: A review,” Ain Shams Engineering Journal, vol. 12, no. 2, pp. 2017–2031, (2021-11).
- [2] Y. Takei, K. Morishita, R. Tazawa, K. Katsuya, and K. Saito: “Non-programmed gait generation of quadruped robot using pulse-type hardware neuron models”, Artificial Life Robotics, vol. 26, pp. 109-115, 2021.
- [3] 鈴木貴, 久保田浩行: 「生命科学で使える はじめての数理モデルとシミュレーション」, 実験医学増刊, vol. 35, no.5, 羊土社(2017).