

## 興奮性シナプスモデルで弱く結合したニューロモルフィック回路の測定 Measurement of Neuromorphic Circuits with Weakly Coupled Excitatory Synaptic Model

○浅沼唯斗<sup>1</sup>, 陳普澤<sup>2</sup>, 崔峻豪<sup>2</sup>, LYU SHUXIN<sup>3</sup>, 齊藤健<sup>4</sup>  
\*Yuito Asanuma<sup>1</sup>, Puze Chen<sup>2</sup>, Junhao Cui<sup>2</sup>, Shuxin Lyu<sup>3</sup>, Ken Saito<sup>4</sup>

**Abstract :** We are researching to mimic biological nervous systems using analog circuits and implement them in robots. Previously, we developed a quadrupedal robot capable of generating biological gait patterns using a single neuromorphic circuit implemented in one leg. However, disturbances disrupted the gait, preventing stable operation. In this paper, we conducted measurements of weakly interconnected neuromorphic circuits using discrete circuits. Within a specific voltage range, the convergence of three frequencies demonstrated the potential to realize a walking gait.

### 1. はじめに

近年、ロボットは様々な分野での活用が促進されており、多くの研究者が取り組みを行っている。ロボットの中でも脚式ロボットは、不整地や階段を容易に移動できる利点があり、物資運搬や複雑な地形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、ポストン・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や光センサ、モジュールなどを使用して、平地や坂道、階段などの様々な周辺環境を把握する。また、把握した情報を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している<sup>[1]</sup>。しかし、Spotは常に大量のデータを処理する必要があり、バッテリーの駆動時間が90分であるのに対し、充電には60分を要することが課題としてある。また、新たな周辺環境に対して継続的に学習を行っているが、生物と比較すると柔軟な適応力が不足している。

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、生物の神経細胞をアナログ電子回路で模倣したニューロモルフィック回路を四足歩行ロボットに実装する研究を行っている。Figure1にニューロモルフィック回路を実装した四足歩行ロボットを示す。先に我々は、四足歩行ロボットにニューロモルフィック回路を各脚に対応させて実装し、コンピュータプログラムを必要とせず、生物の歩容に似た動作を実現している<sup>[2]</sup>。しかし、各脚に対応させた4つのニューロモルフィック回路は電気的に接続していません、独立して脚を駆動させている。そのため、外乱の影響により歩容が乱れ、長時間安定した動作を保持できなかった。

本論文では、四足歩行ロボットの脚間の位相差を保持した歩行パターンを保持することを目的として、ニューロモルフィック回路を相互に弱く結合することで、

外乱による歩容の乱れが発生しても元の歩容を保持できるか検討する。弱く結合した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、実測を行った結果を報告する。

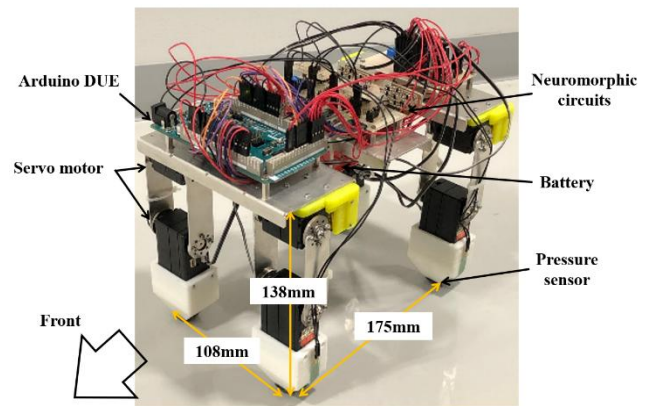


Figure 1. Quadrupedal robot with neuromorphic circuits

### 2. 弱い結合によるニューロモルフィック回路

生物の歩行は Central Pattern Generator (CPG) と呼ばれる、神経回路で脳からの指令なしに周期的な運動パターンを生成する仕組みによって行われると考えられているため、本研究では 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、四足歩行ロボットの歩行パターンを振動子の結合強度に依存させず、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、弱く結合することにより安定させることを考える。

Figure2に2組の細胞体モデルと抑制性シナプスモデルと弱く結合した3つの興奮性シナプスモデルの回路図、Figure3にニューロモルフィック回路のディスクリート回路の実物を示す。回路定数は以下の通りとした。

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

$R_1 = 8.2\text{M}\Omega$ ,  $R_2 = 20\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_4 = 15\text{k}\Omega$ ,  
 $C_1 = 47\text{pF}$ ,  $C_2 = 10\text{pF}$ ,  $C_3 = 3.3\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_4 = 1\text{ nF}$ ,  
 $M_1, M_3, M_6, M_9, M_{12}$ は BSH203,  $M_2, M_4, M_5, M_7, M_8, M_{10}, M_{11}$   
 は SSM3K17FU である.

弱い結合で構成した興奮性シナプスモデルの荷重電圧 $V_5$ の値を微調整し, 抑制性シナプスモデルの荷重電圧 $V_2$ にずれがあっても, 弱い結合の相互作用により同期する. よって, 四足歩行ロボットが歩行中に受けた外乱によるずれは, 弱い結合で構成した興奮性シナプスモデルで補正されると考えた.

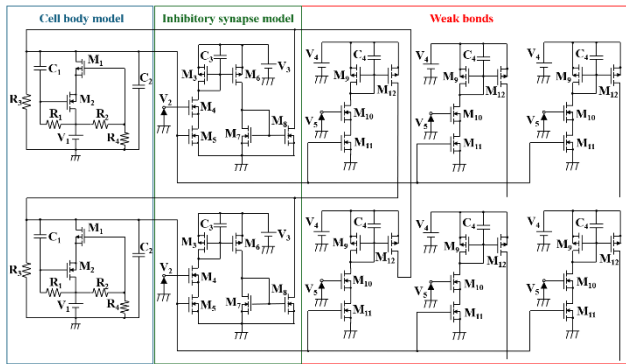


Figure 2. Circuit diagram of the weakly coupled neuromorphic circuits(half of the circuit diagram)

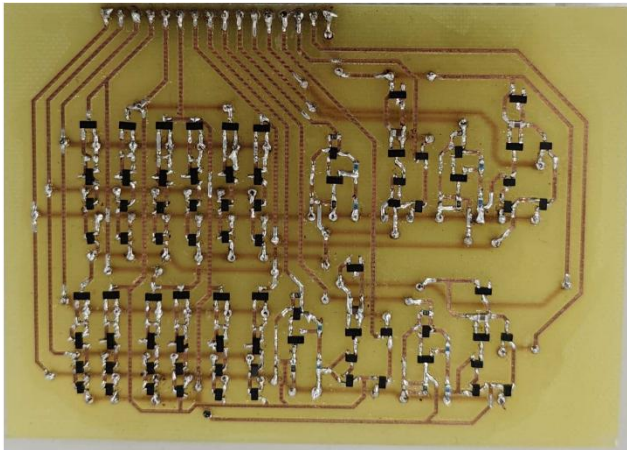


Figure 3. Discrete neuromorphic circuits

### 3. 実測結果

Figure4 に興奮性シナプスモデルと周波数の関係のグラフを示す. 興奮性シナプスモデルで構成した弱い結合によるニューロモルフィック回路の実測を行った結果, 興奮性シナプスモデルの荷重電圧 $V_5$ の値が1.39~1.50V の範囲では, 3つの周波数が近づくことが確認できる.

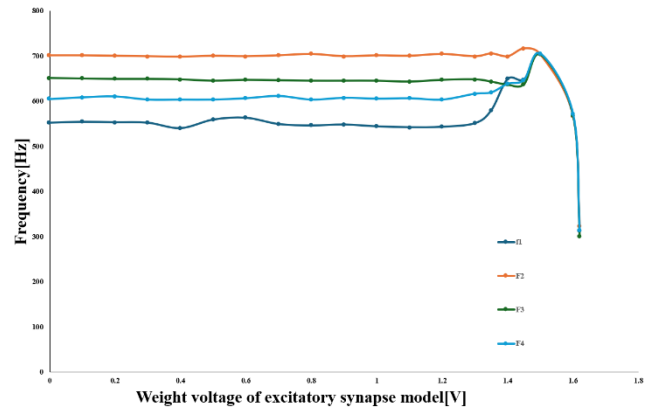


Figure 4. Weight voltage and frequency characteristic

### 4. まとめ

本論文では, 四足歩行ロボットの脚間の位相差を保持した歩行パターンを保持するために, 弱く結合したニューロモルフィック回路のディスクリート回路を実測した. その結果, 特定の電圧範囲内で3つの周波数が近づくことが確認できた. 従って, 四足歩行ロボットのウォーク歩容が実現できると考えられる. 今後は弱く結合したニューロモルフィック回路を四足歩行ロボットに実装し, 長時間安定した歩行を保持できるか検討する予定である.

### 謝辞

本研究は, 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.

### 5. 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, 2021-6
- [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(2017): 「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