

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

○崔峻豪¹, 陳普澤¹, 浅沼唯斗², LYU SHUXIN³, 齊藤健⁴

*Junhao Cui¹, Puze Chen¹, Yuito Asanuma², Shuxin Lyu³, Ken Saito⁴

Abstract: To achieve quadruped robot locomotion, we first designed neuromorphic circuits in which four self-feedback models controlled the robot's four legs using feedback from pressure sensors mounted on the feet. However, this circuit exhibited limited stability, as the limb coordination could only be maintained for a few seconds due to external disturbances encountered during locomotion. To address this limitation, we developed a weakly coupled neuromorphic integrated circuit, enabling the self-feedback models to counteract external disturbances. Experimental evaluation of the proposed circuit confirmed its effectiveness in sustaining coordinated gait generation.

1. はじめに

近年、脚式ロボットは不整地での適応能力により、将来的に地形探査、災害救助などの多様な分野での応用が期待され、多くの研究者たちの注目が集めている^[1]。脚式ロボットの中でも、四足歩行ロボットは比較的歩行の安定性と歩行環境への適応能力が優れており、四足動物のような歩容が生成できる。先に我々は、四足歩行ロボットを四足動物のような歩容を完全に自律化するため、動物のニューロンを模倣したアナログ電子回路であるニューロモルフィック回路を作製した。四足歩行ロボットが四つのニューロモルフィック回路でそれぞれ独立に制御し、四足歩行の歩容を生成した。しかし、ロボットが歩行中に外部環境からの外乱に対して影響されやすいため、四足歩行の歩容を保持できず、長時間の歩容を安定的に維持することができなかった。

前述の課題を解決するため、四足歩行ロボットに外乱に対する耐性を付与することを目的として、興奮性シナプスモデルにより独立に制御するニューロモルフィック回路を弱く結合させた。興奮性シナプスモデルに介して、四つの細胞体モデルに相互に影響し合うことで、細胞体モデルの発振周波数が一定範囲に抑え、外乱による異常の発振を防止する。

本論文では、弱く結合したニューロモルフィック回路を集積回路で作製し、4つのニューロモルフィック回路を弱く結合し、その同期現象について検討したので報告する。

2. 集積化した弱結合ニューロモルフィック回路

生体の基本的な移動運動は中枢神経における Central pattern generator (CPG)により生成制御されていることが知られている、今回の研究では CPG モデルの結

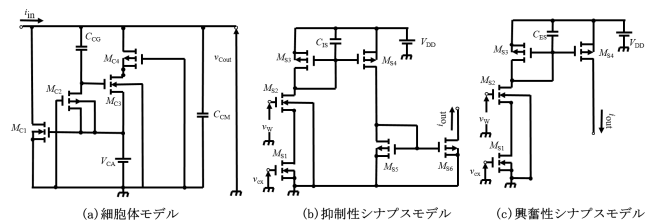


Figure 1. Diagram of Neuro Model

合振動子の概念を参考に^[2]。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。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と考える。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ット回路で作製して検討する。

Figure 1 に今回開発した弱く結合したニューロモルフィック集積回路の構成要素であるニューロンモデルの回路を示す。モデルと異なりアナログ電子回路モデルである。Figure 1(a)の細胞体モデルは、生物における神経細胞の閾値や不応期などの特性を模倣したパルス波形を出力する。Figure 1(b)の抑制性シナプスモデルは、出力先の細胞体モデルの発振を抑制し、結合強度電圧 v_w が大きいほど強く抑制する機能を持つ。Figure 1(c)の興奮性シナプスモデルは、出力先の細胞体モデルの発振を促進し、結合強度電圧 v_w が大きいほど強く発振を促進する。

Figure 2 に各モデルの構成要素を結合した弱く結合したニューロモルフィック回路を示す。四足歩行ロボットに回路を実装し、細胞体モデルの発振周波数がロボット足の関節にあるサーボモータがマイクロコントローラ Arduino に介して信号を読み取り、

1 : 日大理工・院 (前) 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

サーボモータが回転する。脚先の圧力センサーが最初から地面に触れて、圧力センサーが地面と接触して生じる圧力によって、抑制性シナプスモデル回路の荷重電圧が増減し、一対一でそれぞれの細胞体の発振を制御する。四足を左前足に基準として、位相差を作って四足歩行を生成した。四足歩行ロボットが歩行中の外乱により圧力センサーのフィードバックが異常の信号を伝達することがあり、脚間の位相差が乱れて歩容が維持できなかった。従って、我々は興奮性シナプスモデルで各独立の細胞体を弱く結合し、歩行を乱れにしまう信号を興奮性シナプスモデルで同期し、脚間の協調を保持する。

3. 実験方法

Figure3, 4に弱く結合したニューロモルフィック集積回路のチップ作製のレイアウト及び実測結果を示す。細胞体モデルの電源電圧は $V_{a1}=2.79V$, $V_{a2}=2.67V$, $V_{a3}=2.70V$, $V_{a4}=2.53V$, 抑制性及び興奮性シナプスモデルの電源電圧 $V_{dd}=5.00V$, 抑制性シナプスモデル荷重電圧 $V_{iw}=1.60V$ に設定し、実測した結果、細胞体モデルの初期発振が 600Hz, 700Hz, 800Hz, 900Hz 前後から興奮性シナプスモデルの荷重電圧の増加することにより、 $V_{ew}=1.10V$ の時に周波数 f_1 と f_3 及び f_2 と f_4 がほぼ一致し、 $V_{ew}=1.25V$ の時に全部の周波数が一致しているが分かった。四足歩行ロボットが歩行中の外乱によって、四つの細胞体の発振が異なる周波数になるが、結果から $V_{ew}=1.10\sim 1.20V$ の間に弱く結合したことによって、二つの細胞体の発振が引き込み現象によって周波数が一致することになった。四足ロボットの二足の圧力センサーが地面に接触して関節のサーボモータが同じ回転速度で動くことになると考える。よって、四足ロボットのトロット歩容がより安定的に生成できると考える。

謝辞

本論文の研究は、令和2年度日本大学学術研究助成金総合研究の助成を受けたものである。また、本研究の一部は令和4年度日本大学特別研究の助成を受けたものである。また、本研究は、東京大学 dlab(旧 VDEC) 活動を通して、(株) JS ファンダリ、凸版印刷(株)日本シノプシス合同会社、日本ケイデンス・デザイン・システム社、メンターグラフィック・ジャパン株式会社の協力で行われたものである。

4. 参考文献

- [1] Majithia, A., Shah, D., Dave, J., Kumar, A., Rathee, S., Dogra, N., Vishwanatha, H. M., Chiniwar, D. S., Hiremath, S.: Design, motions, capabilities, and applications of quadruped robots: a comprehensive review, *Frontiers in Mechanical Engineering*, Vol. 10, Article 1448681, 2024.
- [2] Shindo, T., Saeki, K., & Sekine, Y. (2010). A Study on Transition of Quadruped Locomotion by CPG Model Considering Frequency Entrainment Phenomena. *日本大学理工学部学術講演会講演論文集*, 1077-1078.

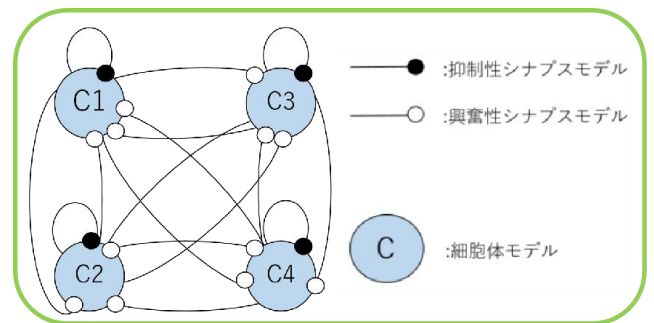


Figure2. Neuromorphic Circuit with Weak Coupling

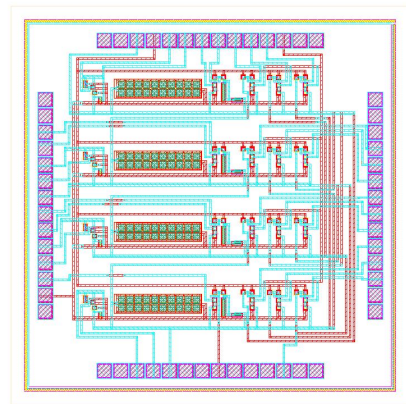


Figure3. Layout of Weakly Coupled Neuromorphic Circuit

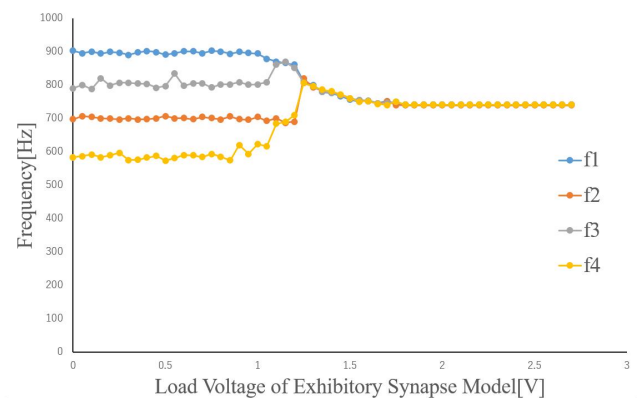


Figure4. Experimental Results of the IC Chip