

脳オルガノイドを刺激する中枢パターン生成器回路の設計 Design of Central Pattern Generator Circuit to Stimulate Brain Organoids

○永野峻平¹, LYUSHUXIN², 齊藤健³*Shumpei Nagano¹, Shuxin Lyu², Ken Saito³

Abstract : We investigate hardware neuron models for robotic control to understand biological information processing mechanisms. Previous research has shown that a quadruped robot controlled by neuromorphic circuits spontaneously generates gaits. However, electronic circuit-based models cannot sufficiently represent biological neural networks, motivating the use of brain organoids as alternative controllers. Existing circuits operate at frequencies that may exceed organoid response capabilities for locomotion teaching signals. In this paper, we propose a central pattern generator circuit that generates quadrupedal gait patterns at organoid-responsive frequencies. Simulation results demonstrate that the model generates gaits in which each leg oscillates at 1 Hz, triggered by external single-pulse inputs.

1. はじめに

近年の人工知能技術の発展により、自律型ロボットシステムは様々な分野での実用化が期待されている。しかし、現在のロボットに搭載されている人工知能の主流は、ノイマン型のコンピューティングシステム上に実装されており、生物の脳の情報処理機構とは異なる進化を遂げている。一方で、生物がどのようにして複雑で適応的な運動制御を実現しているかの根本的なメカニズムは、未だ解明されていない。

我々は、アナログ電子回路で生物の神経系の機能を模倣したハードウェアニューロンモデルを用いて、ロボットシステムに搭載する研究を行っている。先に我々は、ハードウェアニューロンモデルで構成されるニューロモルフィック回路を搭載した四足歩行ロボットを開発した^[1]。開発した四足歩行ロボットは、各足をそれぞれ独立で制御し、足裏の圧力で各脚の速度が変化する単純な制御により、移動速度に応じた歩容を自発的に生成した。そこで我々は、二次元的なアナログ電子回路によるモデルでは生物の脳を理解するのに不十分と考え、ヒト iPS 細胞などの多能性幹細胞から作製される三次元形状の脳オルガノイドを用いた四足歩行ロボットシステムの開発を検討している。ヒトの脳を再現した組織である脳オルガノイドに、ニューロモルフィック回路を用いて教師信号を与えることで、脳オルガノイドの電気的活動によるロボットの制御と、歩容の自己組織的な学習を目指している。

しかし、先に開発したニューロモルフィック回路は 900~350 Hz 程度の周波数範囲で動作していたため^[2]、発達段階にある脳オルガノイドは適切に応答しない可能性があった。そこで、我々はハードウェアニューロ

ンモデルで構成した中枢パターン生成器 (Central Pattern Generator: CPG) 回路の活用を検討した。CPG 回路を用いることで、脳オルガノイドが応答する可能性のある低周波数で、各脚間の位相差を維持した歩行パターンを生成することが可能となる。

本論文では、脳オルガノイドを刺激する低周波数の教師信号を生成する CPG 回路の設計を行い、動作を回路シミュレーションにより確認したので報告する。

2. CPG 回路

Figure 1 に CPG 回路の構成要素であるハードウェアニューロンモデルを示す。

Figure 2 に脳オルガノイドに教師信号を与える CPG 回路の概略図を示す。本回路は、8 個の受容細胞モデル^[3]、4 個の興奮性シナプスモデル、および 16 個の抑制性シナプスモデルで構成した。受容細胞モデルは、生物の神経細胞の特性を模倣した周期的なパルス波形

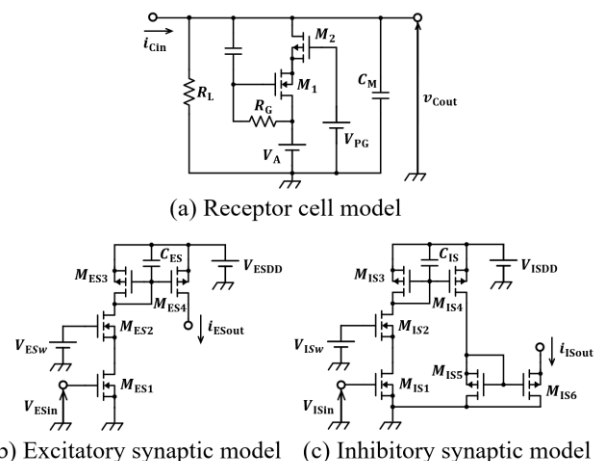


Figure 1. Circuit diagram of the hardware neuron models

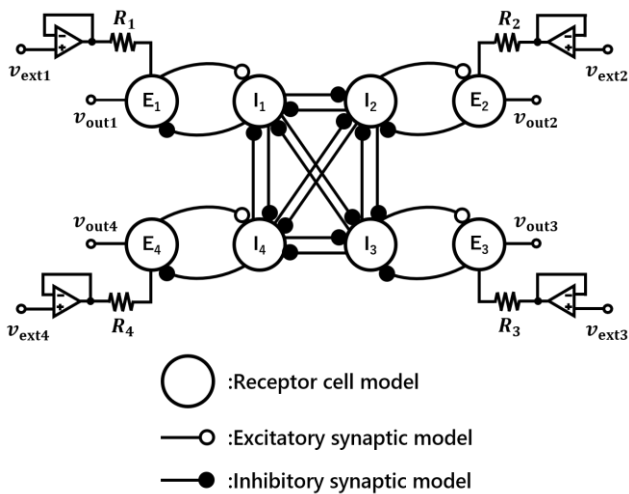


Figure 2. Schematic diagram of the CPG circuit

を出力する発振回路であり，入力電圧 V_{PG} の大きさによって発振周波数が変化する．興奮性シナプスモデルは，接続先の受容細胞モデルの発振を促進し，同位相同期を引き起こす．一方，抑制性シナプスモデルは，接続先の受容細胞モデルの発振を抑制し，逆位相同期を引き起こす．各受容細胞モデル E_1, E_2, E_3, E_4 の出力 $v_{out1}, v_{out2}, v_{out3}, v_{out4}$ はそれぞれ，四足歩行ロボットの左前肢 (LF)，右前肢 (RF)，右後肢 (RH)，左後肢 (LH) の歩行パターンに対応している．また，各外部入力電圧 $v_{ext1}, v_{ext2}, v_{ext3}, v_{ext4}$ として，単一のトリガパルス波形を入力することによって，設定した歩容に移行するように設計した．

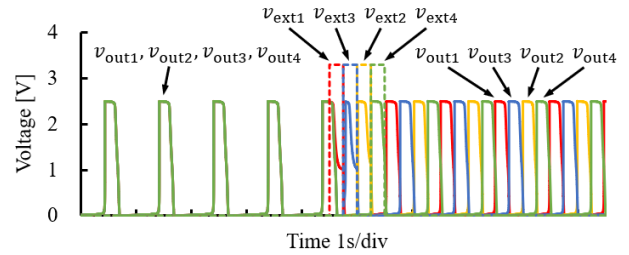
3. シミュレーション結果

シミュレーションには，Cadence Design System 社の PSpice を使用した．

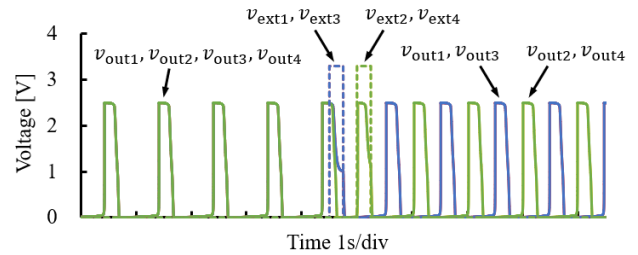
Figure 3 にシミュレーションによる設計した CPG 回路の出力パターンの例を示す．Figure 3 (a) は walk，(b) は trot 歩容のトリガパルス波形を入力した場合の $v_{out1}, v_{out2}, v_{out3}, v_{out4}$ の波形である．同図より $v_{ext1}, v_{ext2}, v_{ext3}, v_{ext4}$ を入力した後，各歩容を生成していることを確認した．また，同図より受容細胞モデルの発振周波数がおおよそ 1 Hz であることを確認した．

4. まとめ

本論文では，脳オルガノイドを用いた四足歩行ロボットシステムの実現に向け，CPG 回路の設計とシミュレーションをおこなった．シミュレーションの結果，各脚に対応する受容細胞モデルが 1 Hz で発振し，外部入力のパルス波形により walk および trot 歩容を生成することを確認した．



(a) Walk gait



(b) Trot gait

Figure 3. Example of output waveform when the external trigger pulse generates gaits in the CPG circuit

今後は CPG 回路を作製してロボットシステムに搭載し，CPG 回路から脳オルガノイドに刺激を与えることで，脳オルガノイドの応答特性について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] Yuki Takei, Katsuyuki Morishita, Riku Tazawa, Ken Saito : “Active Gaits Generation of Quadruped Robot Using Pulse-Type Hardware Neuron Models”, IntechOpen, 2021.
 [2] J. Yamasaki, A. Ishida, K. Morishita, S. Lyu, and K. Saito : “Development of Integrated Neuromorphic Circuits for Camel-Type Quadruped Robot”, Proc. of the 2023 Annual Conference of Electronics, Information and Systems Society, IEE of Japan, pp. 649- 652, 2023.
 [3] 森下克幸, 加藤真也, 武井裕樹, 齊藤健 : 「センサへの入力強度に応じて発振周波数が変化する受容細胞モデルの開発」, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.142, No.1, pp.33-39, 2022.