

四足歩行ロボットに実装するニューロモーフィック回路の集積化に向けた検討

Study on Integration of Neuromorphic Circuit for Utilizing to Quadruped-Robot

○加藤真也¹, 宇佐見雄¹, 榎亜理沙¹, 黒澤実花², 佐々木拓郎², 小原正也², 武井裕樹³, 齊藤健⁴
 *Shinya Kato¹, Yu Usami¹, Arisa Sakaki¹, Mika Kurosawa², Takuro Sasaki², Masaya Ohara², Yuki Takei³, Ken Saito⁴

Abstract: The authors are studying a circuit which generates active gait by using artificial neural networks. In previous research, the quadruped robot we developed was able to actively generate gait pattern using independent neuromorphic circuits. However, the element variation is large in the discrete circuits. Characteristics of neuromorphic circuits could not obtain accurately. In this paper, the authors investigated integration of neuromorphic circuits. Integration of neuromorphic circuits realizes the integration of four discrete circuits. Besides, integration is expected to reduce device variations. As a result of simulation (Hspice), integrated circuit obtained the same characteristics as a conventional neuromorphic circuit.

1. 序論

自律型四足歩行ロボットは災害時における探索、物資の運搬の分野における活躍が期待されている。自律型四足歩行ロボットの先行研究には、不整地においても歩行を実現させ、人に蹴られても転倒を回避することができる BigDog^[1]がある。現在開発されている自律型四足歩行ロボットの多くはソフトウェア制御により受動的に歩行している。自律行動を可能にするためには、カメラやセンサから得た多くの情報をもとに膨大な量の計算を行う必要がある。情報量の多い現在のロボット制御では、実際の動物のように能動的に歩行させることが困難である。

我々は生物のニューラルネットワークを人工的に模倣した人工ニューラルネットワークの研究を行っている^[2]。人工ニューラルネットワークを用いた回路をニューロモーフィック回路と呼んでいる。動物のニューラルネットワークを模倣することで、従来の制御とは異なり、より動物に近い歩容生成の可能性がある。

これまでの研究で、ニューロモーフィック回路を用いて実機で歩容を能動的に生成することを明らかにした。^[3]ニューロモーフィック回路はディスクリット素子を用いて作製していた。本論文ではニューロモーフィック回路の集積化の検討をおこなった。集積化することで素子の誤差の減少、回路の縮小、軽量化、それに伴う重心の安定、低消費電力化が期待できる。

2. 自己抑制ニューロンモデル

Figure 1 左部に従来の自己抑制ニューロンモデルの回路図を示す。Figure 1 右部に集積化した自己抑制ニューロンモデルの回路を示す。自己抑制ニューロンモデルは、生物のニューロン機能を限定的に模倣した細胞

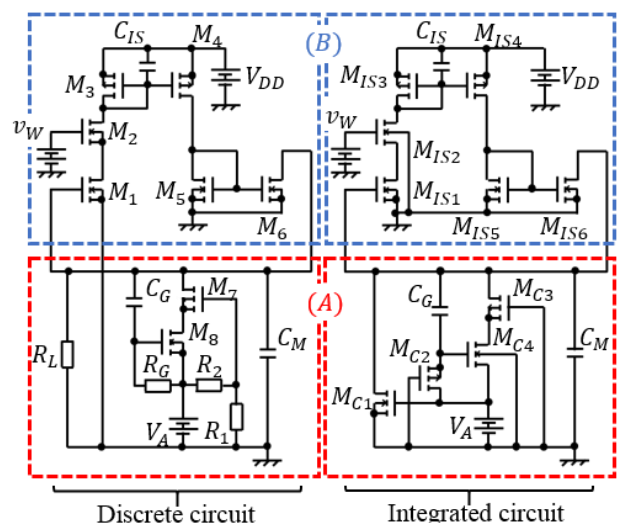


Figure 1. Self-inhibitory neuron model (A) Cell body model (B) Inhibitory synaptic model

体モデルと抑制性シナプスモデルから構築した。これまでは四足歩行ロボットの各脚に 31mm×48mm の自己抑制ニューロンモデルを 1 つずつ搭載していた。細胞体モデル(Figure 1 (A)部)から周期的に出力されるパルス状の発火を、抑制性シナプスモデル(Figure 1 (B)部)がシナプス荷重コントロール電圧 v_w に応じて抑制する。実機ではロボットの足先に取り付けた圧力センサの出力に応じた電圧を v_w として自己抑制ニューロンモデルに印加する。

集積化したニューロモーフィック回路は、少ない面積で従来のニューロモーフィック回路と同様に自己抑制ニューロンモデルの発振周波数の変更が可能である。また、ディスクリット素子を使用しないことで細かな時定数の調整が可能となる。

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

3. シミュレーション結果

Figure 2 (a)に集積化ニューロモーフィック回路のシミュレーション(Hspice)における出力波形の一例を示す。各回路定数はMOSFET : W/L 比はそれぞれ $M_{IS1} = 10/10$, $M_{IS2} = 40/2$, $M_{IS3} = 10/100$, $M_{IS4} = 20/2$, $M_{IS5} = 10/100$, $M_{IS6} = 40/2$, キャパシタ : $C_{IS1} = 100$ [pF], $C_G = 10$ [nF], $C_M = 20$ [pF], 電圧源 : $V_{DD} = 3.3$ [V], $V_A = 2.8$ [V] である。Figure 2 (a)はシナプス荷重コントロール電圧 v_w が印加されると発振周期が変化することを示している。シナプス荷重コントロール電圧が大きい程、発振周期が長くなることを示している。Figure 2 (b)に v_w に対する v_{out} の周波数特性を示す。Figure 2 (b)は v_w が大きい程発振の周波数は小さくなることを示している。 v_w を 1.0 [V] とすることで、出力されるパルスの周波数は 0 [V] とした際の半分程度になる。

抑制性シナプスモデルのコンデンサ C_{IS} と MOSFET : M_{IS3} は発振の時定数を伸ばす役割を担っている。Figure 3 に M_{IS3} における W/L 比と時定数の関係を示す。Figure 3 は M_{IS3} の W/L 比が小さいほど時定数が大きくなることを示している。

Figure 4 に M_{IS1} の W/L 比と周波数の関係を示す。W/L 比を変化させることで出力する発振周波数が変化する。 M_{IS1} の W/L 比を 10/1 にすることで発振周波数が $v_w = 0$ [V] の時の 1/3 倍になることを示している。

4. 結論

本論文では自律型四足歩行ロボットに搭載する集積化したニューロモーフィック回路の検討をおこなった。また、Hspice を用いたシミュレーションで設計したニューロモーフィック回路の出力特性を調べた。

結果として集積化したニューロモーフィック回路の発振を目標値である 1/2 倍に変化させる出力を得た。集積化したニューロモーフィック回路をは 1 チップ内に 4 つ組み込むことができ、大幅に回路の小規模化が期待できる。また、MOSFET は回路定数の変更ができるため、回路動作の細かい調整も可能となる。

今後は作製したニューロモーフィック回路をチップ内に 4 つ収まるようにレイアウトを進め、四足ロボットに搭載し動作確認をおこなう予定である。

5. 参考文献

[1] Raibert, M. Blamlespoor, K. Nelson, G. Playter, R. "BigDog the Rough-Terrain Quadruped Robot," IFAC Proceedings Volumes, Volume 41, pp.10822-10825, 2008.

[2] M. Ohara, M Kurosawa, T Sasaki et al., "Development of Hardware Neural Networks IC with Switchable Gait Pattern for Insect-Type Microrobot," 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Paris, France, pp.663-668, 2019.

[3] Y. Takei, K. Morishita, R. Tazawa, "Development of Quadruped Robot Generating Animal-like Gaits Utilizing Independent Neuro-Circuits", The 32nd Workshop on Circuits and Systems, Kitasenju, pp.222-227, 2019

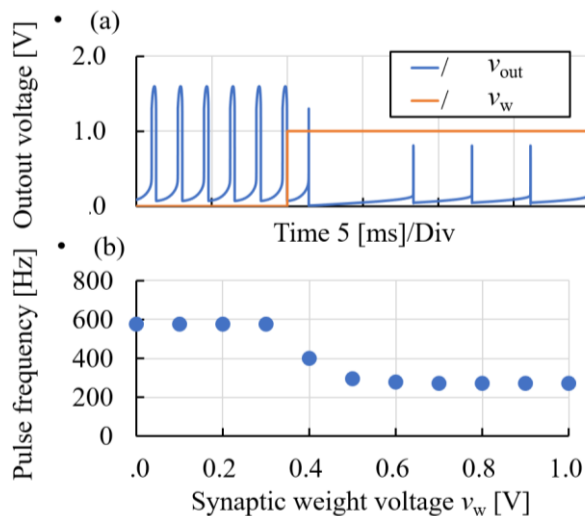


Figure 2. (a) Simulation result, (b) Relationship between synaptic weight voltage and pulse frequency

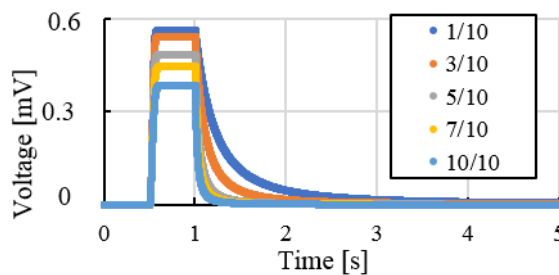


Figure 3. Relationship between W/L ratio and time constant (M_{IS3})

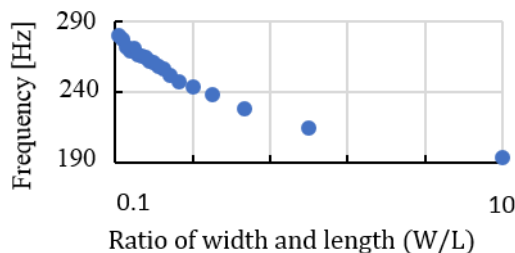


Figure 4. Relationship between frequency and W/L ratio