

## 四足歩行ロボット用の低頻度で発火するニューロモルフィック回路の設計

### Design on Low-Frequency Firing Neuromorphic Circuits for Quadruped Robot

○永野峻平<sup>1</sup>, 山崎順平<sup>2</sup>, 瞿著文<sup>2</sup>, LYU SHUXIN<sup>3</sup>, 齊藤健<sup>4</sup>

\*Shumpei Nagano<sup>1</sup>, Jumpei Yamasaki<sup>2</sup>, Zhuwen Qu<sup>2</sup>, Shuxin Lyu<sup>3</sup>, Ken Saito<sup>4</sup>

Abstract: The authors are studying the neuromorphic circuits to robot control, which mimics biological nervous systems' functions using analog electronic circuits. Previously, we conducted experiments using a quadruped robot controlled by neuromorphic circuits, and we showed that the robot generates gaits. The neuromorphic circuits output the spike firing, and the output pulse frequency decreases as the input voltage increases. This paper proposes a new neuromorphic circuit in which the output pulse frequency increases with the input voltage while still firing at much lower frequencies. Simulation results confirm that the proposed circuit fires at a low-frequency range of 1 - 7 Hz, with the frequency increasing as the input voltage increases.

#### 1. はじめに

自律型四足歩行ロボットは災害現場での救助活動や宇宙探査など、人間が直接アクセスすることが困難な環境での活躍が期待され、高性能な自律型四足歩行ロボットが求められている。高性能ロボットの実現には、複雑な計算や高速な情報処理を可能にする高性能コンピュータが不可欠である。しかし、コンピュータの高性能化は、消費電力の増加や機体の大型化などの問題を生じる。一方で、自律的に歩行する生物は、神経系による制御により、低消費エネルギーで効率的な情報処理を実現している。したがって、生物の神経系を模倣し、ロボット制御に応用する研究が多くおこなわれている<sup>[1]-[2]</sup>。

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、ニューロモルフィック回路を用いたロボット制御の研究をおこなっている。先に我々は、各足をそれぞれ独立したニューロモルフィック回路で制御する四足歩行ロボットが、自発的に歩容を生成することを明らかにした<sup>[3]</sup>。ニューロモルフィック回路は、神経細胞と同様に、スパイク発火（活動電位）を出力する。さらに、入力電圧によってスパイクの発火頻度を変えられ、入力電圧を高くするにつれて、発火頻度が低下する。しかし、実際の生物の神経細胞は、外部からの電気刺激の強度が増大することによって、発火頻度を高める<sup>[4]</sup>。また、スパイク発火にはエネルギーが消費されるため、より低頻度で発火するニューロンモデルが重要となる。先に開発した四足歩行ロボットに搭載するニューロモルフィック回路は、900~350 Hz 程度で動作していた<sup>[5]</sup>。

本論文では、入力電圧が高くなるとスパイク発火の周波数を高め、1 Hz から 10 Hz の範囲の低頻度でス

イクを出力できるニューロモルフィック回路の設計をおこなった。回路シミュレーションにおいて、設計したニューロモルフィック回路の特性の測定をおこなったので、結果を報告する。

#### 2. ニューロモルフィック回路

Figure 1 に本研究でシミュレーションをおこなったニューロモルフィック回路を示す。本回路は、細胞体モデルと興奮性シナプスモデル、抑制性シナプスモデルで構成した。細胞体モデルは、生物の神経細胞が持つ発火、閾値、不応期などの特性を模倣した発振回路であり、図中の  $v_{out}$  からパルス波形の電圧を出力する。

シナプスモデルは、生物のシナプスの機能を模倣したモデルで、入力電圧が印加されると電流を出力する。興奮性シナプスモデルは、興奮性シナプス荷重コントロール電圧  $v_{Ew}$  が印加されると正の電流を出力し、細胞体モデルの発振を促進する。抑制性シナプスモデルは、抑制性シナプス荷重コントロール電圧  $v_{Iw}$  が印加されると負の電流を出力し、細胞体モデルの発振を抑

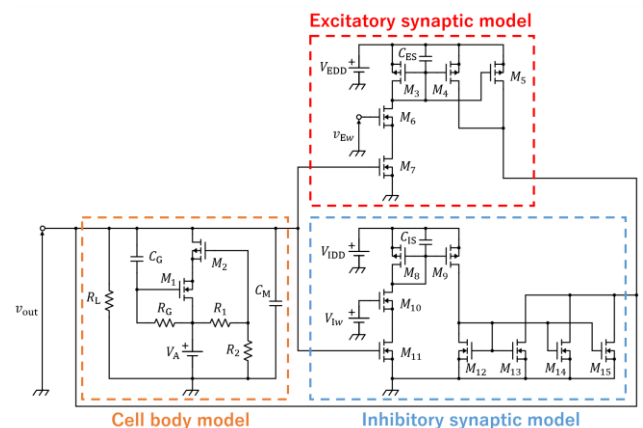


Figure 1. Schematic diagram of neuromorphic circuit

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

制する。興奮性シナプスモデル、抑制性シナプスモデルともに  $v_{Ew}$ ,  $V_{Iw}$  の大きさを変更することによって、出力される電流の大きさを変化させることができる。本研究では、入力電圧を大きくした場合に、細胞体モデルの発振を促進させるために、 $V_{Iw}$  は定数とし、 $v_{Ew}$  を入力電圧とした。

### 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。回路定数はそれぞれ  $C_G = 22 \text{ nF}$ ,  $C_M = 1 \text{ nF}$ ,  $C_{ES, IS} = 47 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $R_1 = 18 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 27 \text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 330 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 51 \text{ k}\Omega$ ,  $M_{1,6,7,10,11,12,13,14,15} : \text{SSM3K17FU}$ ,  $M_2 : \text{BSH203}$ ,  $M_{3,4,5,8,9} : \text{SSM3J15FU}$ ,  $V_{A, EDD, IDD} = 3.6 \text{ V}$ ,  $V_{Iw} = 2.5 \text{ V}$  である。

Figure 2 にシミュレーションによる設計したニューロモルフィック回路の発振の例を示す。Figure 2 (a) は  $v_{Ew} = 1.5 \text{ V}$  の場合、(b) は  $v_{Ew} = 2.5 \text{ V}$  の場合の  $v_{out}$  の波形である。Figure 2 (a), (b) より  $v_{Ew}$  が変化することで発振周波数が変化することが確認できる。

Figure 3 に  $v_{Ew}$  に対する  $v_{out}$  の発振周波数特性を示す。同図より、設計したニューロモルフィック回路は  $v_{Ew}$  が  $1.5 \text{ V}$  から  $2.5 \text{ V}$  の範囲で、発振周波数はおよそ  $1 \text{ Hz}$  から  $7 \text{ Hz}$  まで変化する。また、 $v_{Ew}$  を大きくすることで発振周波数が高くなることが確認できる。

### 4. まとめ

本論文では、興奮性シナプスモデルと抑制性シナプスモデルを持つニューロモルフィック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、 $v_{Ew}$  を大きくした場合、 $v_{out}$  の発振周波数が高くなり、 $1 \text{ Hz}$  から  $7 \text{ Hz}$  の範囲で変化することを確認した。

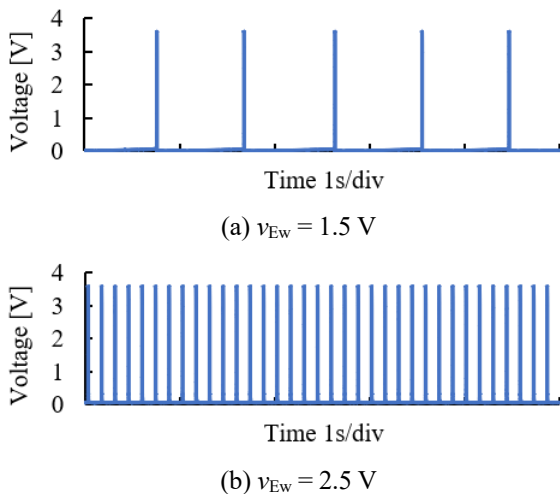


Figure 2. Example of output waveform of  $v_{out}$  in neuromorphic circuit

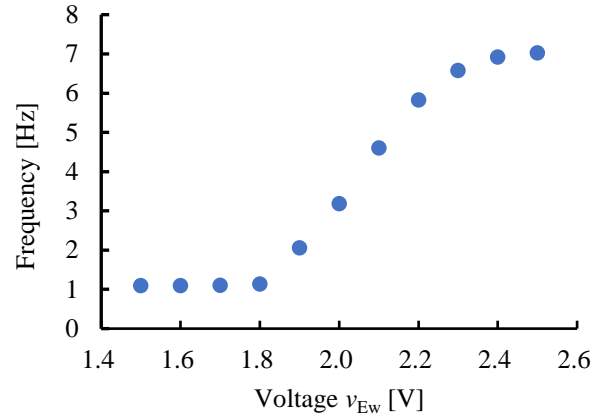


Figure 3. Characteristic of output frequency of  $v_{out}$  by varying  $v_{Ew}$  in neuromorphic circuit

今後は回路を作製し、測定をおこなう予定である。

### 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。

### 5. 参考文献

- [1] Y. Fukuoka and H. Kimura : “Dynamic locomotion of a biomorphic quadruped ‘Tekken’ robot using various gaits: walk, trot, free-gait and bound”, Applied Bionics and Biomechanics, Vol. 6, No. 1, pp. 63–71, 2009.
- [2] Ludovico Minati, Mattia Frasca, Natsue Yoshimura, and Yasuharu Koike : “Versatile Locomotion Control of a Hexapod Robot Using a Hierarchical Network of Nonlinear Oscillator Circuits”, IEEE Access, Vol.6, pp.8042-8065, 2018.
- [3] Yuki Takei, Katsuyuki Morishita, Riku Tazawa, Ken Saito : “Active Gaits Generation of Quadruped Robot Using Pulse-Type Hardware Neuron Models”, IntechOpen, 2021.
- [4] Lionel G. Nowak, Rony Azouz, Maria V. Sanchez-Vives, Charles M. Gray, and David A. McCormick, David A McCormick : “Electrophysiological Classes of Cat Primary Visual Cortical Neurons In Vivo as Revealed by Quantitative Analyses”, Journal of Neurophysiology, Vol.89, No.3, pp1541-1566, 2003.
- [5] 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.