

M-22

## 四足歩行ロボットに実装するセンサ入力可能なニューロモーフィック回路の集積化に向けた検討 Study on Integrating of Sensor-Input Capable Neuromorphic Circuits for Quadruped Robots

○中山 渉<sup>1</sup>, 関山晃生<sup>1</sup>, LYU SHUXIN<sup>2</sup>, 森下克幸<sup>2</sup>, 齊藤 健<sup>3</sup>

\*Wataru Nakayama<sup>1</sup>, Kosei Sekiyama<sup>1</sup>, Shuxin Lyu<sup>2</sup>, Katsuyuki Morishita<sup>2</sup>, Ken Saito<sup>3</sup>

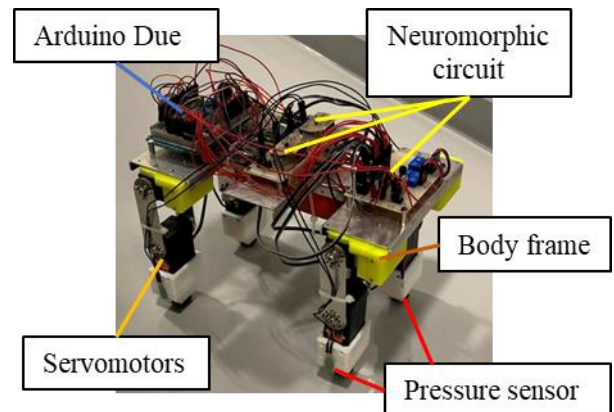
**Abstract:** We have been studying analog electronic circuit models that mimic the nervous system. Earlier we developed a quadruped robot that actively generates a gait using neuromorphic circuits that mimic biological functions. In this study, we investigated neuromorphic integration that processes sensor signals to generate a gait. Integrating this neuromorphic circuit into a quadruped robot has the potential to reduce the control area by Arduino. This paper reports simulation results of the integrated neuromorphic circuit.

### 1. はじめに

生物は歩容と呼ばれる歩行パターンを脊髄より生成し、移動速度に応じて歩容を変更することでエネルギー効率の良い歩行を可能にしている。しかし、歩容生成のメカニズムは未だ明らかになっていない。

我々は、生物の神経系をアナログ電子回路で模倣し、ロボットへ搭載する研究を行っている。ロボットの制御に生物の神経細胞のメカニズムを応用すれば、複雑な条件下で順応性に富む対応が期待できる。先に我々は、歩容を生成する四足歩行ロボットを開発した。生物の神経系を模倣したニューロモーフィック回路を搭載し、足先の圧力センサの情報をを用いて移動速度に応じた歩容の生成を確認した<sup>[2]</sup>。しかし、従来のニューロモーフィック回路はセンサの情報を直接入力できず、センサからの入力信号を Arduino を介して伝達する必要があった。生物の感覚受容器には受容体細胞と呼ばれる神経細胞が存在し、外部刺激を受けて刺激の強度を電気信号に変換し、神経系に伝達する特性がある。我々は、受容体細胞が持つ特性をアナログ電子回路でモデル化し模倣することで、センサの信号をパルス波形に変換する受容体細胞モデルを開発した<sup>[3]</sup>。また、我々は従来のニューロモーフィック回路に受容体細胞モデルを組み込むことで、センサからの信号情報を Arduino を介さずに読み取ることができるセンサ入力可能なニューロモーフィック回路を設計した。これまでセンサ入力可能なニューロモーフィック回路は PSPICE でシミュレーションを行い、ディスクリート素子で作製した。本稿ではセンサ入力可能なニューロモーフィック回路の集積回路化を行うため HSPICE にてシミュレーションを行ったので報告する。

### 2. 歩容を生成する四足歩行ロボット



**Figure 1.** Quadruped Robot

Figure1.に我々が開発した四足歩行ロボットを示す。ロボットは、ニューロモーフィック回路、圧力センサ、サーボモータ、Arduino が搭載されている。ロボットの動作として、足先に取り付けた圧力センサの抵抗値を変化させることでロボットの足を一定角度ずつ駆動させる。ロボットの足を駆動させるサーボモータは Arduino のプログラムにより、ニューロモーフィック回路から出力された発振パルスによって角度を変える。また、パルス頻度に依存したロボットの駆動であるため、ロボットの足が地面についていれば遅く動き、地面から離れれば速く動く。

### 3. センサ入力可能なニューロモーフィック回路

Figure2.に集積化したセンサ入力可能なニューロモーフィック回路を示す。本回路は、細胞体モデルと抑制性シナプスモデル、受容体細胞モデルで構成した。受容体細胞モデルの発振パルス  $v_{ROUT}$  が出力されることで細胞体モデルの発振パルス  $v_{COUT}$  の発振周波数を変化させることが可能である。細胞体モデルの発振周波数は受容体細胞モデルの発振周波数に依存し、 $v_{ROUT}$  の発振周波数が低くなるにつれて  $v_{COUT}$  の発振周波数

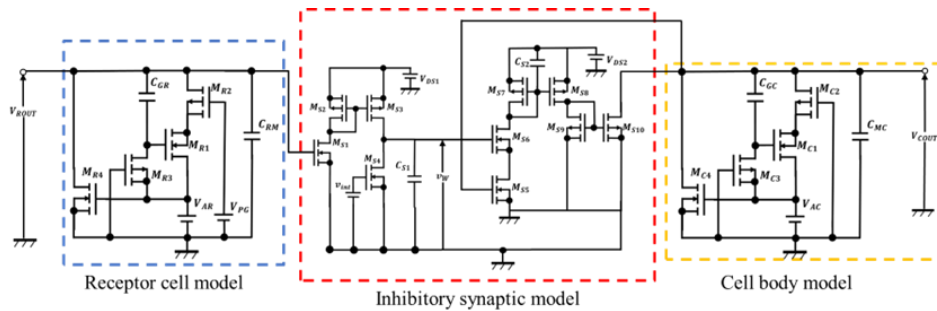


Figure 2. Neuromorphic circuit with integrated circuit Receptor cell model

は高くなる。本回路に搭載された受容体細胞モデルは生物の感覚受容器の機能をアナログ電子回路で模倣したモデルである。センサ入力によって決まる電圧  $v_{PG}$  の変化によって受容体棒モデルの発振周波数が定まり、 $v_{ROUT}$  として出力される。出力された  $v_{ROUT}$  は RC 積分回路に入力され、発振を積分電圧として出力する。出力された電圧は抑制性シナプスモデルにシナプス結合加重  $v_w$  として入力され、細胞体モデルの発振周波数を抑制する。

#### 4. シミュレーション結果

HSPICE によるシミュレーション結果を Figure3. に示す。各回路定数を  $M_{R1,C1,C2} = W [\mu m] / L [\mu m] = 10/1.2$ ,  $M_{R2} = 27/1$ ,  $M_{R3,C3} = 1.2/10$ ,  $M_{R4,C4} = 3/10$ ,  $M_{S1,S2,S3,S5,S6,S7,S8} = 10/10$ ,  $M_{S4} = 15/1.2$ ,  $M_{S9} = 10/100$ ,  $M_{S10} = 15/2$ ,  $C_{MR,S1} = 10$  [pF],  $C_{GR} = 47$  [pF],  $C_{MC} = 20$  [pF],  $C_{GC} = 4.7$  [nF],  $CS2 = 1$  [ $\mu F$ ] とした。電源電圧は  $V_{RA} = 3.0$  [V],  $V_{CA} = 2.55$  [V],  $V_{DS1} = 2.0$  [V],  $V_{DS2} = 3.3$  [V],  $V_{int} = 0.7$  [V] である。  $C_{RG}$ ,  $C_{CG}$ ,  $C_{S2}$  は静電容量値が大きいためチップ外に接続する構成とした。また電圧  $V_{PG}$  は  $0.2$ [V] から  $0.65$ [V] の範囲でシミュレーションを行った。結果として受容体細胞モデルの発振周波数の変化における細胞体モデルの発振周波数の変化を確認した。受容体細胞モデルの発振周波数が  $44.64$ [Hz] から  $90.03$ [Hz] の周波数変化によって、細胞体モデルの発振周波数が  $117.4$ [Hz] から  $69.23$ [Hz] まで変化を確認し、細胞体モデルの周波数は  $2.56$  倍変化する。以上より集積化したセンサ入力可能なニューロモーフィック回路は四足歩行ロボットの歩容生成に利用できると考えられる。

#### 5. まとめ

本稿ではセンサ入力可能なニューロモーフィック回路の集積化の検討を行った。シミュレーションの結果受容体細胞モデルの発振周波数に応じた細胞体モデルの発振周波数変化を確認した。また、細胞体モデルの発振周波数は  $2.56$  倍変化するを得られた。今後は

本稿の回路のレイアウトを作製し、集積化した回路の測定を行う予定である。

#### 6. 謝辞

本研究は、令和2年度日本大学学術研究助成金 総合研究の助成を受けたものです。また、本研究の一部は

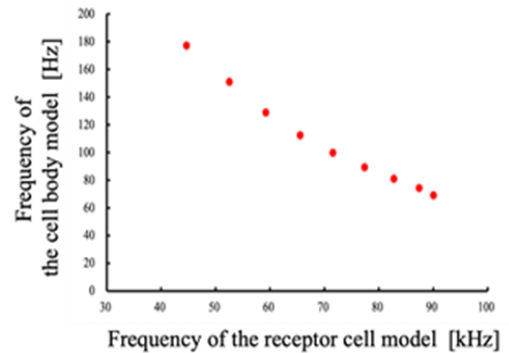


Figure3. Simulation Results of

#### Neuromorphic Circuit with Receptor Cell

令和4年度日本大学特別研究の助成を受けたものです。また、本研究は、東京大学 d.Lab(旧 VDEC)活動を通して、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、本チップ試作はオンセミコンダクター新潟(株)、凸版印刷(株)の協力で行われたものである。

#### 7. 参考文献

- [1] Takei, Y., Morishita, K., & Saito, K., "Quadruped Robots With Bio-Inspired Gait Generation Methods Using Sole Pressure Sensory Feedback," In Handbook of Research on New Investigations in Artificial Life, AI, and Machine Learning, IGI Global, pp.18-42, 2022
- [2] 森下克之, 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), 2022 年 142 巻 1 号, p.33-39