

集積回路による外部刺激にตอบสนองする受容細胞モデルに対する検討

Study on Receptor Cell Models That Respond to External Stimuli by Integrated Circuits

○加藤真也¹, 宇佐見雄¹, 榎亜理沙¹, 佐々木拓郎¹, 森下克幸¹, 武井裕樹², 齊藤健³*Shinya Kato¹, Yu Usami¹, Arisa Sakaki¹, Takuro Sasaki¹, Katsuyuki Morishita¹, Yuki Takei², Ken Saito³

Abstract: Living organisms have excellent sensory organs that respond to external stimuli such as light, sound, and pressure. We are attempting to develop a receptor cell model mimics receptor cells that sense and directly receive external stimuli in the sensory organs. In this paper, we simulated and investigated the integration of receptor cell model's integration for application to microrobots. In the simulation, we applied a voltage to the receptor cell model to assume the sensor's input. The result also shows the characteristics of the integrated receptor cell model.

1. はじめに

我々は、生物のニューラルネットワークをアナログ電子回路を用いて人工的に模倣し、ロボットの駆動回路として応用する研究をおこなっている^[1, 2]。我々はこれまでに中枢パターン生成器を模倣したモデルを開発し、アクチュエータの駆動回路としてマイクロロボットに搭載した。しかし、既存のモデルはセンサを持っておらず、外部環境に合わせた行動の変更は不可能であった。我々が四足歩行ロボットなどの機体が大いロボットでセンサを使用する場合、センサからの信号はマイコンなどを用いてパルス信号に変更し制御している。しかし、ミリメートルサイズのマイクロロボットにセンサとマイコンを同時に搭載するスペースは存在しない。そこで、マイコンなどを介さずにセンサからの入力を直接パルス信号へ変換可能な集積回路モデルの開発が必要であった。

生物の感覚器は、外部からの刺激を感受し、神経系へとその情報を伝達する役割がある。我々は生物の優れた感覚器に着目し、従来のモデルと組み合わせることで外部環境に合わせて行動を変更する機能の獲得を目指した。今回我々は、感覚器における外部刺激を直接受け取る細胞である、受容細胞のモデル化をおこなった。受容細胞モデルはセンサ入力に対しパルスを発振するアナログ回路である。受容細胞モデルをこれまでに開発した中枢パターン生成器モデルに接続することで、方向転換や歩行動作の停止などの機能を獲得させる。受容細胞モデルをマイクロロボットの駆動回路であるニューラルネットワーク集積回路や、開発中の小型センサに実装することを目的に集積化に対する検討をおこなった。本稿では HSPICE を用いたシミュレーションにおける集積化した受容細胞モデルの特性について報告する。

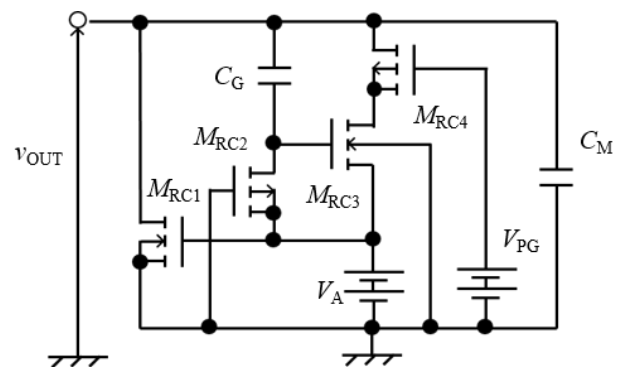


Figure 1. Circuit diagram of the integrated receptor cell model

2. 受容細胞モデル

Figure 1. に集積化した受容細胞モデルの回路図を示す。受容細胞モデルはセンサからの入力があったときのみ、パルスを出力する機能を持つ。センサ入力は回路内の P 型 MOSFET M_{RC4} のゲート電圧 V_{PG} として受容細胞モデルに入力する。受容細胞モデルは、図中の v_{out} からパルスを出力する。入力部のセンサには、圧力センサや、CDS セルなどの素子を想定している。これらのセンサを用いて圧力や光などの外部刺激を電圧変換し、受容細胞モデルの M_{RC4} に入力 V_{PG} として与える。

3. シミュレーション結果

受容細胞モデルの集積化に向けて、回路定数を調整するために HSPICE を用いてシミュレーションをおこなった。シミュレーションにおける各回路定数は、MOSFET : $M_{RC1} = W/L = 3 [\mu\text{m}] / 10 [\mu\text{m}]$, $M_{RC2} = 1.2/10$, $M_{RC3} = 10/1.2$, $M_{RC4} = 14/1.0$, キャパシタ : $C_G = 4.7 [\mu\text{F}]$, $C_M = 1 [\mu\text{F}]$, 電源 : $V_A = 2.9 [\text{V}]$ とした。

Figure 2. に、 V_A を一定とし、 V_{PG} を変更したときの周波数特性を示す。Figure 2. より、センサからの入力電圧 V_{PG} が $0.02 \sim 0.46 [\text{V}]$ の範囲で受容細胞モデルがパルス

を出力することがわかる。Figure 3.に受容細胞モデルの発振の下限電圧である $V_{PG} = 0.02$ [V] (Figure 3. (a))と上限電圧である $V_{PG} = 0.46$ [V] (Figure 3. (b))の出力パルスを示す。それぞれの周波数は $V_{PG} = 0.02$ [V]の際に 1.00 [Hz], $V_{PG} = 0.46$ [V]の際は 0.44 [Hz]である。シミュレーションの結果より、本モデルは、センサからの入力電圧 V_{PG} を変更することで発振周波数が変化可能であることを確認した。

4. レイアウト

Figure 4.に設計した受容細胞モデルのレイアウト図を示す。今後、細胞体モデルと合わせて使用することを踏まえ、受容細胞モデルと細胞体モデルを興奮性シナプスモデルで接続した回路を四つ含んだレイアウトとした。Figure 4.における①～④の番号に対応する点線で囲われた範囲で一つの回路を表している。受容細胞モデル、細胞体モデルのコンデンサ C_G はそれぞれ 4.7 [μ F]と大きいため、外接用の端子を設けた。コンデンサ C_G を外接とすることによって周波数調整が可能である。また、四つの回路における受容細胞モデルのセンサ入力部分である M_{RC4} の W/L 比をそれぞれ①～④の順で、15/1.0, 21/1.0, 28/1.0, 30/1.0とした。W/L 比を大きくすることで、 V_{PG} に電圧を入力した際の受容細胞モデルが発振する下限電圧をプラス方向に伸ばすことが可能である。

5. まとめ

本稿ではマイクロロボットや、開発中の小型センサで使用することを目的とした受容細胞モデルの集積化について検討した。HSPICE を用いたシミュレーションにより、集積化したモデルの各回路定数を決定した。シミュレーションの結果、センサからの入力電圧 V_{PG} が一定の高さを越えた際にパルスを出力することを確認した。また、受容細胞モデルが出力するパルスの周波数特性を示した。今後は設計した受容細胞モデルを作製し、測定をおこなうとともに、受容細胞モデルを搭載した新たなニューラルネットワークの構築についても検討する予定である。

6. 参考文献

[1] Ken Saito, Yuki Ikeda, Minami Takato, Yoshifumi Sekine, Fumio Uchikoba, "Development of quadruped robot with locomotion rhythm generator using pulse-type hardware neural networks", *Artificial Life and Robotics*, Vol.20, No.4, pp.366-371, 2015.

[2] Masaya Ohara, Mika Kurosawa, Takuro Sasaki, Taisuke Tanaka, Satoshi Kawamura, Yuichiro Hayakawa, Daisuke Noguchi, Minami Kaneko, Fumio Uchikoba and Ken Saito, "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.

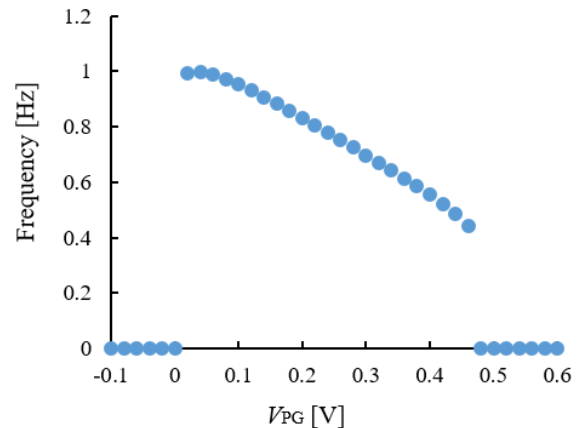


Figure 2. Output-frequency characteristic of receptor cell model (varying V_{PG})

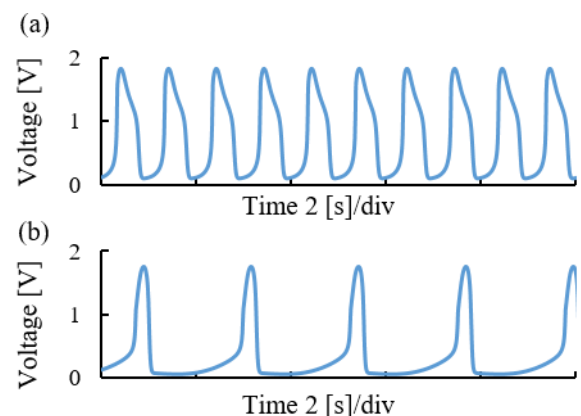


Figure 3. Example of output pulse waveform (a) $V_{PG} = 0.02$ [V] (b) $V_{PG} = 0.46$ [V]

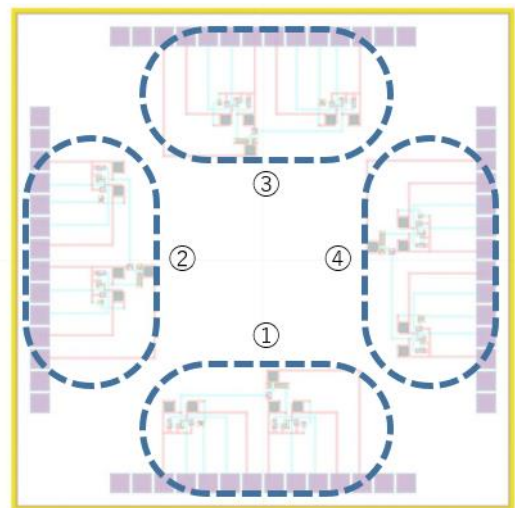


Figure 4. Layout diagram of the integrated receptor cell model