

M-21

光刺激によるマイクロロボット用の動体検知可能なニューロモルフィック回路の検討

Investigation of a Motion Detectable Neuromorphic Circuit for Microrobots Using Light Stimulation

○祁一銘¹, 村本大和¹, LYU SHUXIN², 齊藤健³

*Yiming Qi¹, Yamato Muramoto¹, Shuxin Lyu², Ken Saito³

Abstract: The authors study a neuromorphic chip that mimics the nervous system of living organisms to control millimeter-sized microrobots. Until now, microrobots equipped with neuromorphic chips have not been able to perform actions in response to the external environment. Therefore, we combined cell body model, receptor cell model, axon model with delayed output, and an excitatory synapse model. In this paper, we report that we simulated a neuromorphic circuit capable of detecting moving objects in response to light stimulation.

1. はじめに

近年、マイクロロボットはさまざまな分野での活躍が期待されており、高性能かつ小型化を実現する手段として、昆虫の構造や機能を模倣する手法が代表的である。我々は、生物の神経系の機能を模倣し、集積回路化したニューロモルフィックチップをマイクロロボットの動作制御に応用する研究を行っている。

先に我々は、マイクロロボットにニューロモルフィックチップを実装し、コンピュータプログラムを用いずに単一の歩容パターンでの歩行に成功した。しかし、昆虫型マイクロロボットはセンサを搭載しておらず、環境に応じた行動ができなかった。そこで、我々は昆虫型マイクロロボットで生物の視覚情報による行動の変化を模倣したいと考えており、生体の感覚器官に存在する受容細胞をアナログ電子回路で模倣した受容細胞モデルを開発した^[1]。先に開発した Photovoltaic Cell(PV)セルを光センサとして光刺激の入力を可能とし、受容細胞モデルを制御する。

本論文では、細胞体モデル、生物の受容細胞の機能を模倣した受容細胞モデル、信号を遅延させる軸索モデルと興奮性シナプスモデルを組み合わせて、光刺激に応じて動体検知可能なニューロモルフィック回路をHSPICEによるシミュレーションを行ったので報告する。

2. 相関係運動検出器

相関係運動検出器は、昆虫の視覚系に着想を得た動体検知モデルであり、特定の移動方向に対する検出能力を有すると考えられている。図1に示すように、本モデルは二つの光センサ、遅延素子、および乗算素子から構成されている。光刺激が左から右へ移動する場合、まず光センサAが刺激を受け、その信号は遅延

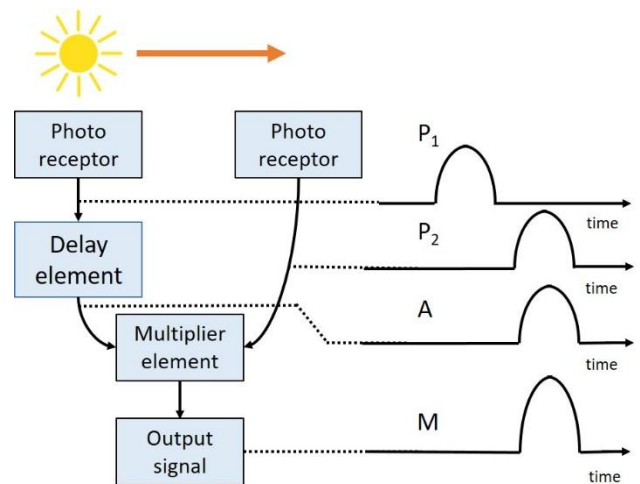


Figure.1 Model diagram of correlated motion detector.

素子によって一定時間遅延される。次に光センサBがパルス信号を検出し、二つの信号が乗算素子に入力される。この際、遅延時間と次のセンサに光が届くまでの時間が一致すると信号が同期し、強い発信が得られると考えられる。一方で、刺激が逆方向に移動する場合には同期が成立せず、出力しない。

3. 動体検知可能なニューロモルフィック回路

本研究で設計した動体検知可能なニューロモルフィック回路の概略図を Figure.2 に示す。本回路は、光センサ、受容細胞モデル、軸索モデル、興奮性シナプスモデル、および細胞体モデルから構成されている。光センサは光刺激を受けて信号を生成する。受容細胞モデルは光センサからの信号を処理し、軸索モデルおよび興奮性シナプスモデルへと伝達する役割を担う。軸索モデルは受容細胞モデルからの信号に遅延を付与し、隣接する受容細胞モデルからの信号と同期させるよう調整されている。興奮性シナプスモデルは、遅延信号と非遅延信号の両方を入力として受け取り、これらを

1:日大理工・院(前)・精機 2:日大理工・院(後)・精機 3:日大理工・教員・精機

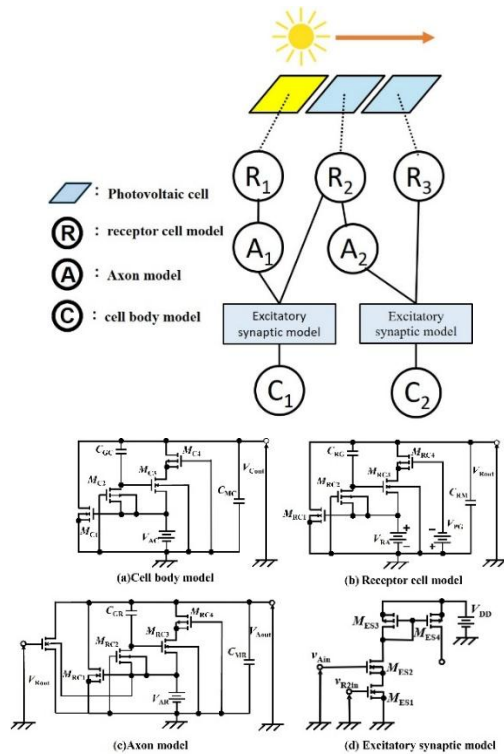


Figure.2 Schematic diagram and components of a motion detection circuit

統合する機能を有する。統合された信号は細胞体モデルに送られ、細胞体モデルが所定の条件を満たすと発火として出力される。このように、各構成要素が相互に連結されることで、動体検知を実現するニューロモルフィック回路が形成される。

4. シミュレーション結果

HSPICE を用いて受容細胞モデルを用いた動体検知回路のシミュレーションを行った。回路定数を以下に示す。

細胞体モデル： $M_{C1} = W/L = 3.0\mu\text{m}/10\mu\text{m}$, $M_{C2} = 1.2\mu\text{m}/10\mu\text{m}$, $M_{C3} = M_{C4} = 10\mu\text{m}/1.2\mu\text{m}$, $C_{GC} = 3.0\mu\text{F}$, $C_{MC} = 10\text{nF}$, $V_{AC} = 2.2\text{V}$ とした。受容細胞モデル： $M_{RC1} = W/L = 3\mu\text{m}/10\mu\text{m}$, $M_{RC2} = 1.2\mu\text{m}/10\mu\text{m}$, $M_{RC3} = 10\mu\text{m}/1.2\mu\text{m}$, $M_{RC4} = 27\mu\text{m}/11\mu\text{m}$, $C_{GR} = 3.0\text{nF}$, $C_{MR} = 10\text{nF}$, $V_{AR} = 3.0\text{V}$ とした。軸索モデル： $M_{C1} = W/L = 10\mu\text{m}/10\mu\text{m}$, $M_{C2} = 3.0\mu\text{m}/10\mu\text{m}$, $M_{C3} = 1.2\mu\text{m}/10\mu\text{m}$, $M_{C4} = M_{C5} = 10\mu\text{m}/1.2\mu\text{m}$, $C_{GC} = 3.0\mu\text{F}$, $C_{MC} = 10\text{nF}$, $V_{AC} = 2.3\text{V}$ とした。興奮性シナプスモデル： $M_{ES1} = M_{ES2} = M_{ES3} = M_{ES4} = W/L = 15\mu\text{m}/10\mu\text{m}$, $V_{DD} = 3.0\text{V}$ とした。

Figure.3 に受容細胞モデルおよび各軸索モデルの出力波形を示す。Figure.4 に細胞体モデルの出力波形を示す。シミュレーション結果より、受容細胞モデルの信号が軸索モデルを介して遅延され、隣接する信号との同期が確認された。さらに、細胞体モデルにおいては、

光刺激の移動方向に応じて発火応答が生じることが確認された。これにより、本回路が動体の運動方向を検知できることを確認した。

5. まとめ

本研究では、動体検知可能なニューロモルフィック回路を設計し、シミュレーションを行った。結果として、動体の移動方向に依存した細胞体モデルの出力が得られ、本回路が動体検知を実現できることを明らかにした。

今後は、提案した光刺激によるマイクロロボット用の動体検知可能なニューロモルフィック回路の集積回路化を行い、駆動実験を行う予定である。

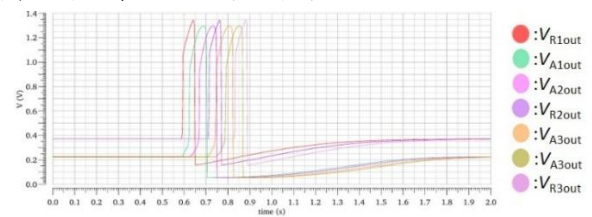


Figure.3 Output waveforms for Receptor cell model and each axon model

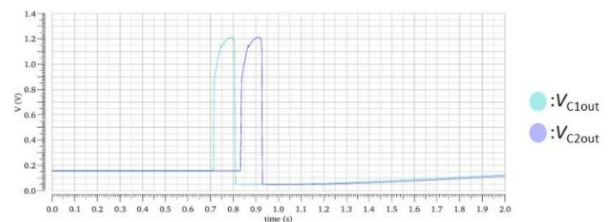


Figure.4 Output waveforms for cell body model.

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、本研究の一部は令和4年度日本大学特別研究の助成を受けたものです。

本研究は d.lab (旧 VDEC) を通じて、日本シノプシス合同会社、日本ケイデンス・デザイン・システム社シーメンズ EAD ジャパン株式会社の合同でおこなわれました。本チップ試作は東京大学 VDEC 活動を通し (株) JS ファンダリ、凸版印刷(株) の協力で行われたものである。

7. 参考文献

[1] K. Morishita, S. Kato, Y. Takei, K. Saito, "Development of Receptor Cell Model with Oscillation Frequency-Dependent on Sensor Input Intensity", The papers of technical meeting on electronic circuits, IEEE Japan, vol 142, no.1, pp.33-39, 2022.