

M-8

四足歩行ロボットに搭載する自己回帰を持つニューロモーフィック集積化回路の開発

Development of Integrated Neuromorphic Circuits with Self-Feedback for Quadruped Robots

○高柳拓生¹, 田邊魁晟², 宇佐見雄¹, 加藤真也¹, 榊理沙¹, 森下克幸³, 武井裕樹³, 齊藤健⁴

*Hiroki Takayanagi¹, Kaisei Tanabe², Yu Usami¹, Shinya Kato¹, Arisa Sakaki¹, Katsuyuki Morishita³, Yuki Takei³, Ken Saito⁴

Abstract: We are studying artificial neural networks that mimic the neural networks of living organisms. We have previously developed a quadruped robot that can actively generate gait by using neuromorphic circuits. The neuromorphic circuit was implemented on a circuit board using discrete elements. However, adjustment using variable resistors was necessary due to variations in characteristics. This paper investigates the integration of the neuromorphic circuit to reduce the variations in characteristics. As a result of actual measurements, the necessary output for the robot was obtained.

1. はじめに

自律型四足歩行ロボットは、生活支援や警備などの様々な分野での利用が期待されている。自律型四足歩行ロボットの先行研究として、不安定な足場での歩行や大きな外乱を受けた際の転倒の回避が可能なBigDog^[1]がよく知られている。現在開発されている四足歩行ロボットの多くはソフトウェア制御であり、周囲の環境や自分自身の環境からどのように歩行すべきか計算することで歩行を可能にしている。一方で、生物は脳では複雑な制御や計算はおこなわず、脊髄において歩容と呼ばれる基本的な歩行パターンを生成していると考えられている。そのため我々は生物の神経系の機能をアナログ電子回路モデルで模倣する研究をおこなっている^[2]。これらをロボットシステムに用いることで従来の制御とは異なり、実在する生物に近い歩容が生成できる可能性がある。

先に我々は、生物の神経系を模倣したニューロモーフィック回路をロボットに搭載することで、能動的に歩容を生成する四足歩行ロボットを開発した。ニューロモーフィック回路はディスクリート素子を用いて回路基盤に半田付けし作製していた。また、ニューロモーフィック回路は各足に1個ずつ独立して実装したため、素子のばらつきや回路ごとに異なる温度特性が存在し、異なる出力特性を示していた。この異なる出力特性は、実際にロボットを駆動する際に可変抵抗などを用いて手動で調整をおこなう必要があった^[2]。

本論文では4つの回路の出力の安定化のために、ニューロモーフィック回路の集積化をおこなった。測定の結果、四足歩行ロボットシステムに実装可能な安定した出力特性を得られたので報告する。

2. 歩容を能動的に生成する四足歩行ロボットシステム

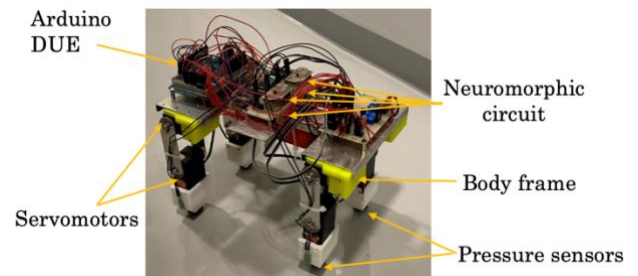


Figure 1. Quadruped Robots

Figure 1 に歩容を能動的に生成する四足歩行ロボットを示す。本体に Arduino DUE, ニューロモーフィック回路, 圧力センサ, サーボモータを搭載している。本ロボットシステムについて以下に説明する。各足先に取り付けた圧力センサの抵抗値に応じて Arduino DUE に入力される電圧が変化する。Arduino DUE が入力された電圧の大きさに応じて PWM 波形を出力し、DA 変換回路を通しニューロモーフィック回路に入力される。ニューロモーフィック回路がパルス状の波形を出力し、Arduino DUE が出力されるパルス毎に一定角度ずつサーボモータを駆動する。

3. 集積化したニューロモーフィック回路

ニューロモーフィック回路は生物のニューロンの機能をアナログ回路で模倣した回路であり、細胞体モデルと抑制性シナプスモデルで構成した。細胞体モデルは周期的にパルス状の電圧を出力する発振回路であり、抑制性シナプスモデルはシナプス荷重コントロール電圧 v_w に応じて細胞体モデルの発振周期を調整する回路である。すなわち、本回路ではシナプス荷重コントロール電圧 v_w に応じて、パルスの発振周期を調整する

1 : 日大理工・院(前)・精機 2 : 日大理工・学部・精機 3 : 日大理工・院(後)・精機 4 : 日大理工・教員・精機

ことが可能である。この細胞体モデルと抑制性シナプスによる接続を自己回帰と表現した。

ディスクリート素子を使用した回路では困難な安定した出力特性を得るために、ニューロモーフィック回路の集積化について検討をおこなった。一貫した製造プロセスを用いることで素子間のばらつきを軽減し、4つの回路を一枚のチップに実装することで温度特性の均一化を試みた。

Figure 2 に集積化したニューロモーフィック回路の回路図を示す。各回路定数はそれぞれ $V_A = 2.55$ [V], $V_{DD} = 3.3$ [V], $C_S = 3.3$ [nF], $C_G = 4.7$ [nF], $C_M = 20$ [pF], $M_{S1} = W[\mu\text{m}]/L[\mu\text{m}] = 10/10$, $M_{S2} = 10/10$, $M_{S3} = 10/10$, $M_{S4} = 10/10$, $M_{S5} = 10/100$, $M_{S6} = 40/2$ である。HSPICE によるシミュレーション結果を Figure 3 に示す。同図はシナプス荷重コントロール電圧 v_w に対する発振周期 T の出力特性を示している。スレッシュホールド電圧以降の線形領域で回路の特性が変化していることが確認できる。

シミュレーションの結果を元にニューロモーフィック回路の作成をおこなった。1つのチップに4つのニューロモーフィック回路を搭載した。細胞体モデルのコンデンサ C_G は大きいため外部接続用の端子を設けてチップ外に接続する構成とした。回路定数はシミュレーションと同様の値である。Figure 4 に同チップ内の4つのニューロモーフィック回路の v_w に対する発振周期 T の出力特性を示す。同図より、2~4のニューロモーフィック回路において、 v_w に対する同様の周期の変化特性が得られた。しかし、1のニューロモーフィック回路において、チップ内の他の回路と異なる特性が得られた。その原因として外接したコンデンサの容量の誤差の影響が考えられる。各コンデンサ C_G の容量を測定した結果、1から4の順に $C_{G1} = 3.44$ [nF], $C_{G2} = 3.39$ [nF], $C_{G3} = 3.41$ [nF], $C_{G4} = 3.41$ [nF] であり、1のニューロモーフィック回路 C_G のは、他の C_G と比べ大きかった。 C_G を揃えることでニューロモーフィック回路の特性のばらつきを小さくすることが出来ると考えられる。

4. まとめ

本論文では、ニューロモーフィック回路の集積回路化及び試作チップの測定をおこなった。測定の結果、四足歩行ロボットシステムに実装可能な特性を得られた。今後、4つのニューロモーフィック回路の出力特性を揃え、四足歩行ロボットに実装する予定である。

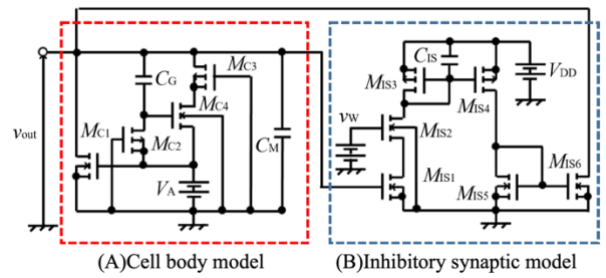


Figure 2. Integrated circuit

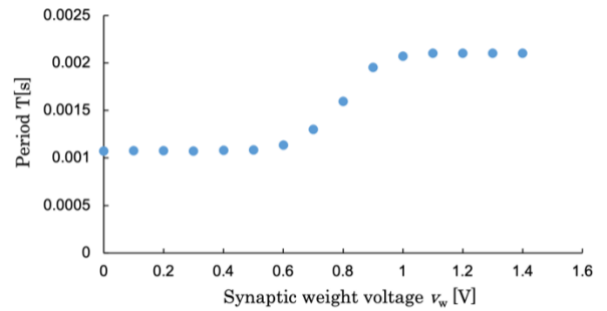


Figure 3. HSPICE simulation results

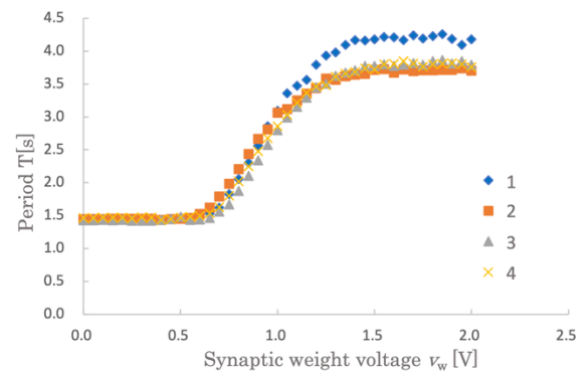


Figure 4. Measurement results

謝辞

本研究は d.lab を通し、シノプシス株式会社、日本ケイデンス株式会社、メンター株式会社の協力で行われたものである。本チップ試作は d.lab を通し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。

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] Yuki Takei, Katsuyuki Morishita, Riku Tazawa and, Ken Saito : "Active Gaits Generation of Quadruped Robot Using Pulse-Type Hardware Neuron Models", Biomimetics, Chapter 2 Active Gaits Generation of Quadruped Robot Using Pulse-Type Hardware Neuron Models, 2021