

M-9

## 四足歩行ロボット用の動物に似た歩容を生成するニューロモーフィック回路の開発 Development of Neuromorphic Circuit with Animal-Like Gait Generation for Quadruped Robot

○小原正也<sup>1</sup>, 佐々木拓郎<sup>1</sup>, 黒澤実花<sup>1</sup>, 宇佐見雄<sup>2</sup>, 加藤真也<sup>2</sup>, 榎亜理沙<sup>2</sup>, 武井裕樹<sup>3</sup>, 齊藤健<sup>4</sup>  
\*Masaya Ohara<sup>1</sup>, Takuro Sasaki<sup>1</sup>, Mika Kurosawa<sup>1</sup>, Yu Usami<sup>2</sup>, Shinya Kato<sup>2</sup>, Arisa Sakaki<sup>2</sup>, Yuki Takei<sup>3</sup>, Ken Saito<sup>4</sup>

Abstract: The authors are studying a quadruped robot system equipped with a neuromorphic circuit. In previous research, the quadruped robot with four independent neuromorphic circuit was expressed the gait patterns of living organisms. The robot expressed the gait pattern only by feedback from the sensor of the foot without external control. In this paper, the authors developed the integrated neuromorphic circuit. As a result, the integrated neuromorphic circuit generated a similar output to the conventional neuromorphic circuit output. Integrated neuromorphic circuit have a smaller circuit scale and less variation in circuit elements than conventional neuromorphic circuit.

### 1. 序論

動物は外部環境に応じ、効率の良い歩容を選択して歩行をおこなう。こうした動物の神経回路網の優れた機能を解明するための研究として人工ニューラルネットワークがある。しかしながら、生物がどのように歩容を発現しているか解明されていない。

我々は動物のニューロンの機能を電子回路で模倣した、ニューロモーフィック回路の研究をおこなっている<sup>[1]</sup>。これまでに単純な制御系を四足歩行ロボットに実装し、能動的に歩容を生成することを明らかにした<sup>[2]</sup>。四足歩行ロボットは本体フレーム、四本の脚パーツ、ニューロモーフィック回路基板及び周辺回路、バッテリーから構成される。脚長は 138 mm, 前後脚部間距離は 170 mm, 左右脚部間距離は 101 mm である。制御回路にはニューロモーフィック回路を搭載し、足裏の圧力センサからのフィードバックにより脚の駆動速度を変化させる。

従来の研究で用いていたニューロモーフィック回路にはディスクリート素子を用いており、回路定数の変更は困難だった。更にディスクリート素子は素子ごとのばらつきが大きく、多くのキャリブレーションをおこなう必要があった。本論文では集積回路技術を用いた、ニューロモーフィック回路の小型化、高性能化を目的とした。集積回路技術を用いることでこれまであった素子ごとのばらつきを抑えることが期待できる。また、使用しているニューロモーフィック回路は単純な構成であるため、制御回路の小型化も期待できる。

### 2. 歩容を発現するロボットシステムに搭載するニューロモーフィック回路

図 1(a)に四足歩行ロボットを、図 1(b)にニューロモ

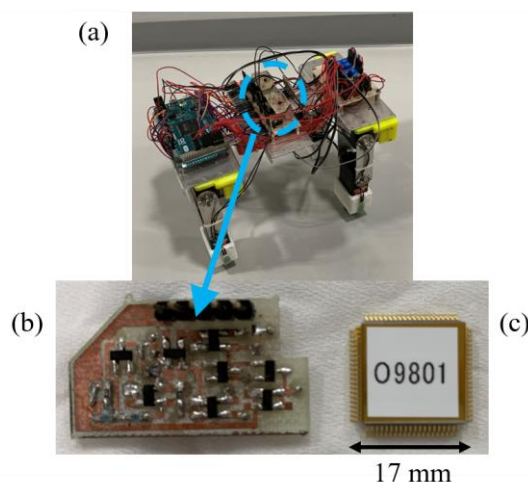


Figure 1. (a) Quadruped robot generating animal gait, (b) Conventional neuromorphic circuit, (c) Integrated neuromorphic circuit

ーフィック回路単体を示す。回路は脚 1 つに対し縦 31 mm, 横 48 mm である。本ロボットシステムでは、四つの足にそれぞれ独立した回路を使用している。

図 1(c)に作製した集積化ニューロモーフィック回路を示す。本回路は従来の回路に対し素子数を削減し、回路定数を変更している。本回路の大きさは縦 17 mm, 横 17 mm である。レイアウト次第で 4 つすべてのニューロモーフィック回路を 1 つの IC チップに搭載可能であり、従来の回路より大幅に規模を縮小している。

図 2 に本回路の回路図を示す。本回路は発振回路である細胞体モデル部 (図 2 中 X), 発振を遅延させる抑制性シナプスモデル部 (図 2 中 Y) で構成される。シナプスモデル部のシナプス荷重コントロール電圧  $v_w$  を変更することで、細胞体モデル部の発振周波数を変更できる。本モデルを脚の駆動に利用する際、細胞体モデルがパルスを出力するたびに一定角度ずつ脚部の角度

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

を変更する制御方法とする。従って、細胞体モデルの発振が速い程、脚の駆動速度は速くなる。

### 3. 集積化ニューロモーフィック回路の出力

図3に  $v_w$  を変化させたときの従来の回路の出力の一例を示す。 $v_w$  が変化した場合に、パルスの発振周期が長くなるのがわかる。 $v_w$  変化により、足裏センサからの入力大きい程、発振周波数は低くなる。

図4に集積化ニューロモーフィック回路の測定結果を示す。各回路定数は MOSFET : W/L 比はそれぞれ  $M_{IS1} = 10/10$ ,  $M_{IS2} = 40/2$ ,  $M_{IS3} = 10/100$ ,  $M_{IS4} = 20/2$ ,  $M_{IS5} = 10/100$ ,  $M_{IS6} = 40/2$ , キャパシタ :  $C_{IS1} = 1$  [nF],  $C_G = 10$  [nF],  $C_M = 1$  [pF], 電圧源 :  $V_{DD} = 0.95$  [V],  $V_A = 2.6$  [V]である。 $C_{IS1}$ ,  $C_G$ はキャパシタを外接している。図4は  $v_w$  に応じて回路の出力周波数が変化することを示している。 $v_w = 0$  [V]の時の周波数は330 [Hz],  $v_w = 1.0$  [V]の時の周波数は170 [Hz]である。これらから従来のニューロモーフィック回路同様に、センサからの入力に応じて脚の駆動速度の変化が可能であることを示している。図5に結合  $v_w$  シナプス荷重コントロール電圧  $v_w$  と発振周波数の関係を示す。図5は結合強度が強い程、発振周波数が低くなることを示している。

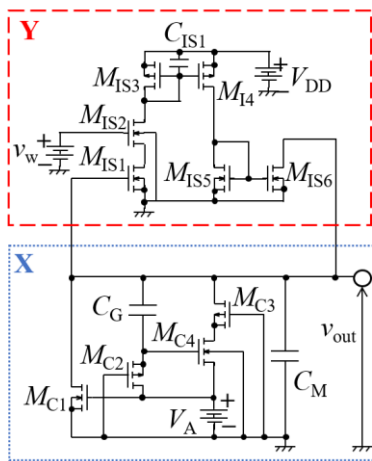


Figure 2. Circuit diagram of neuromorphic circuit

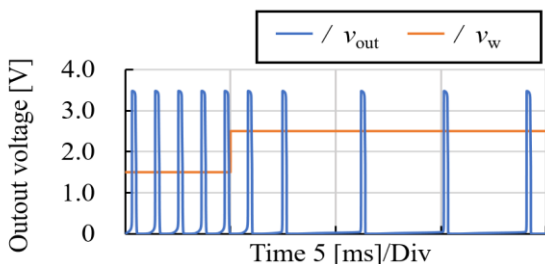


Figure 3. Relationship between synaptic weight voltage and output waveform (Conventional neuromorphic circuit)

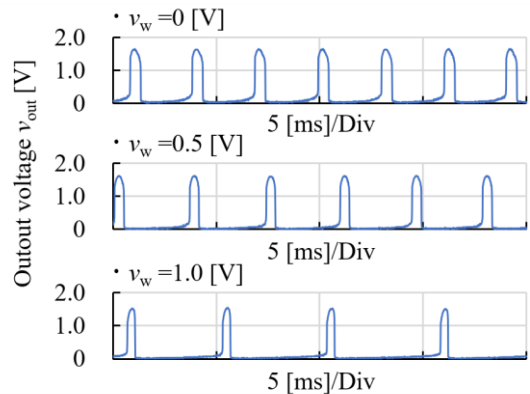


Figure 4. Relationship between synaptic weight voltage and output waveforms

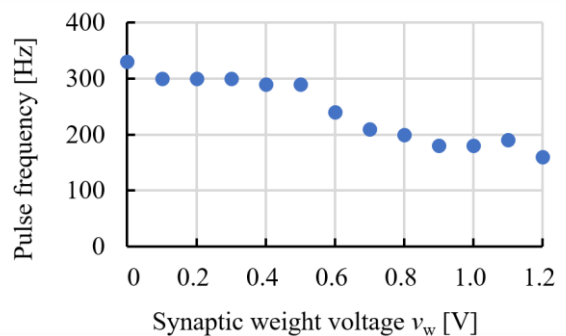


Figure 5. Relationship between synaptic weight voltage and pulse frequency

### 4. 結論

本論文では歩容を発現する四足歩行ロボットに搭載されている集積化したニューロモーフィック回路の開発をおこなった。本回路は従来の回路に対し以下の利点を有する。

- (1) ディスクリート回路に対し素子のばらつきを抑えられるため、回路特性の改善及び歩留まりの向上
- (2) 集積化による回路の小規模化、細かな調整が可能

今後は回路定数の調整及び更なる回路規模の小型化を検討する予定である。また、四足歩行ロボットの歩行実験をおこなう予定である。

### 5. 参考文献

[1] M. Ohara, M Kurosawa, T Sasaki et al., "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.

[2] Y. Takei, K. Morishita, R. Tazawa, "Development of Quadruped Robot Generating Animal-like Gaits Utilizing Independent Neuro-Circuits", The 32nd Workshop on Circuits and Systems, Kitasenju, pp. 222-227, 2019