

集積回路で実現したニューロモーフィック回路を搭載する四足歩行ロボットシステムの検討 Study on a Quadruped Walking Robot System Equipped with Neuromorphic Circuits Realized by Integrated Circuits

○勝谷孝一¹, 加藤真也¹, 田澤陸¹, 森下克幸¹, 武井裕樹², 齊藤健³

*Koichi Katsuya¹, Shinya Kato¹, Riku Tazawa¹, Katsuyuki Morishita¹, Yuki Takei², Ken Saito³

Abstract: We have implemented neuromorphic circuits that mimic the neurons of living organisms to elucidate the gait mechanism in animals. Earlier, we constructed a robotic system that mimics a quadrupedal walker and reproduces a horse-like gait by varying the speed at which the legs are driven in response to pressure changes in the sole. In this paper, we report on the miniaturization of neuromorphic circuits using integrated circuit technology and investigate their application to a quadruped robot system.

1. はじめに

四足歩行動物は自身の移動する速度に応じて、歩容を切り替えている。歩容の生成は、脳ではなく脊髄に内在する神経回路網、中枢パターン生成器によっておこなわれていることが確認されている。しかし、生物がどのように情報処理をおこない、歩容を生成しているか、詳しくは解明されていない。こうした動物の歩容メカニズムを解明するための研究が多くおこなわれている。石黒らはソフトウェアで構築した振動子モデルを用いて各脚を独立して制御する、四足歩行ロボットの制御モデルを提案した。制御モデルを搭載した四足歩行ロボットは、移動速度に応じて能動的に歩容を生成することを示した^[1]。

我々は生物の神経細胞をアナログ電子回路で模倣した、ニューロモーフィック回路をロボットに実装し、動物の歩容メカニズムを解明する研究をおこなっている。先に我々は、自己抑制を持つニューロモーフィック回路を4つ搭載した、四足歩行ロボットシステムを開発した。開発したシステムを実装したロボットは能動的に歩容を生成した^[2]。

本論文では、集積回路技術によって小型化したニューロモーフィック回路を搭載する四足歩行ロボットシステムを検討した。集積回路を搭載することで制御システムの縮小や軽量化、低消費電力化が可能であり、将来的にはロボットの高機能化が期待できる。

2. 集積回路技術で小型化したニューロモーフィック回路

集積回路技術によってニューロモーフィック回路を小型化することで、制御システムの小型化が期待できる。図1に搭載を検討した集積回路の回路図を示す。本回路は自己抑制を持つニューロンモデルであり、発振回路の細胞体モデルと発振を遅延させる抑制性シナ

プスモデルで構成している。シナプス荷重コントロール電圧 v_w を変更することで、細胞体モデルの発振周期を変更できる。1つのペアチップに自己抑制ニューロンモデルを4つ搭載し、縦17 [mm]、横17 [mm]の大きさにパッケージングしている^[3]。従来のシステムが縦31 [mm]、横48 [mm]の大きさの回路を4つ搭載していたことに比べ、大幅に回路面積が縮小可能である。

図2に本回路の測定結果を示す。図2は四つの自己抑制ニューロンモデルを同時に測定し平均をとっている。同図からシナプス荷重コントロール電圧 v_w が0~1 [V]の範囲で変化すると、細胞体モデルの周期が変化す

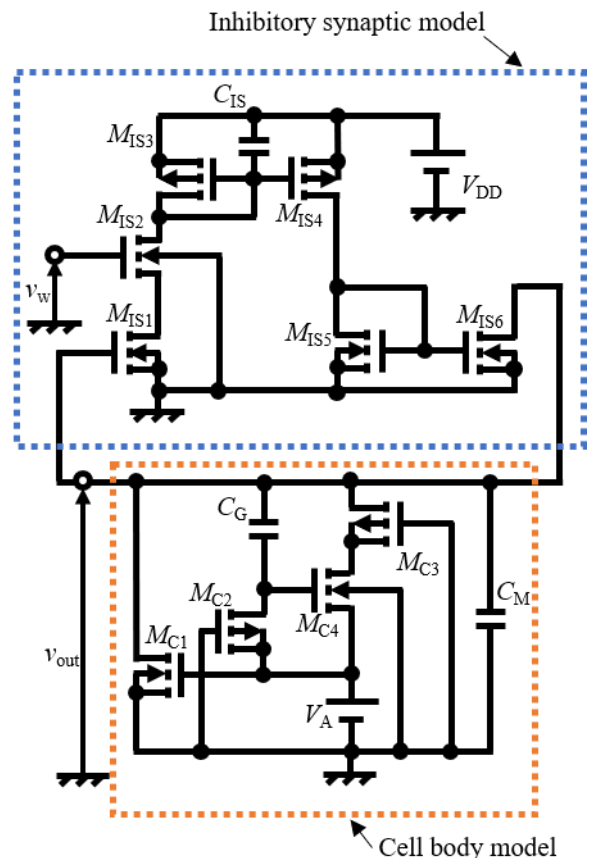


Figure 1. Integrated circuit

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

ることが分かる. 各回路定数はMOSFET : $M_{IS1} = 10/10$, $M_{IS2} = 40/2$, $M_{IS3} = 10/100$, $M_{IS4} = 20/2$, $M_{IS5} = 10/100$, $M_{IS6} = 40/2$, キャパシタ : $C_{IS} = 100$ [pF], $C_G = 4.7$ [nF], $C_M = 20$ [pF], 電圧源 : $V_{DD} = 3.3$ [V], $V_A = 2.8$ [V]である. キャパシタ C_G は外部に設けた.

3. 検討した四足歩行ロボットシステム

従来の四足歩行システムの機体の上部にはニューロモーフィック回路, 周辺回路, マイクロコントローラの Arduino DUE を搭載していた. Arduino DUE はサーボモータの制御や, 脚先に設置している圧力センサの出力に応じた, ニューロモーフィック回路の入力電圧 v_w の制御をおこなう. ニューロモーフィック回路は各脚につき搭載されていて, 入力電圧 v_w に対して出力する電圧 v_{out} の周期が変化する. その後, v_{out} は Arduino DUE に入力され, 読み込んだ電圧の周期が立ち上がった分だけサーボモータを微小角度動かす. サーボモータの軌跡はあらかじめ, プログラムされている. つまり, 脚先が地面に着いている場合は脚部の動作は遅く, 逆に着いていない場合は動作が速くなる.

今回, 検討した四足歩行ロボットシステムの概略図を図3に示す. ロボットの機体の変更はせず, ニューロモーフィック回路を集積回路に代替した. 従来は4個のニューロモーフィック回路を搭載していたのに対し, 図3に示したように集積回路1個で4脚部を制御するシステムを検討した. 集積回路の搭載によって大幅な回路面積の削減が期待される. 従来のニューロモーフィック回路はシナプス荷重コントロール電圧 v_w が $0.9 \sim 1.2$ [V]に変化するとき, 出力 v_{out} の周期が $0.7 \sim 1.4$ [ms]の範囲で変化する. 集積回路はシナプス荷重コントロール電圧 v_w が $0.3 \sim 0.6$ [V]の範囲で出力 v_{out} の周期が $1 \sim 2$ [ms]の範囲で変化した. さらに, 計算からローパスフィルタを用いて低電圧のPWM信号からアナログ信号を得られることを確認した. つまり, 周辺回路は従来と同様に使用可能であると考えられる. 以上から, 集積回路を用いて従来のシステムと同様に脚部を制御可能であると考えた.

4. まとめ

本論文では集積回路技術で小型化したニューロモーフィック回路を搭載する四足歩行ロボットシステムを検討した. 検討した四足歩行ロボットシステムが従来のシステムに比べて回路面積を削減しつつ運用可能であることを示した. 今後は検討したシステムの動作確認や作製, 機体の作製をおこなう予定である.

5. 参考文献

- [1] Dai Owaki, Akio Ishiguro : “A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions from Walking to Trotting to Galloping”, Scientific Reports, Vol.7, No.277, 2017.
- [2] Yuki Takei, Katsuyuki Morishita, Riku Tazawa, Koichi Katsuya, Ken Saito : “Non-programmed gait generation of quadruped robot using pulse-type hardware neuron models”, Artificial Life and Robotics, 2020.
- [3] 加藤真也 宇佐見雄 榑亜里沙 黒澤実花 佐々木拓郎 小原正也 武井裕樹 齊藤健 : 「四足歩行ロボットに実装するニューロモーフィック回路の集積化に対する検討」, 電子回路研究会資料. ECT, Vol.2019, No.80-100, pp.11-14, 2019年.

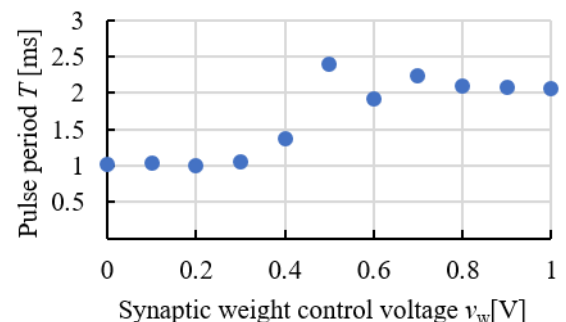


Figure 2. Relationship between synaptic weight control voltage and frequency

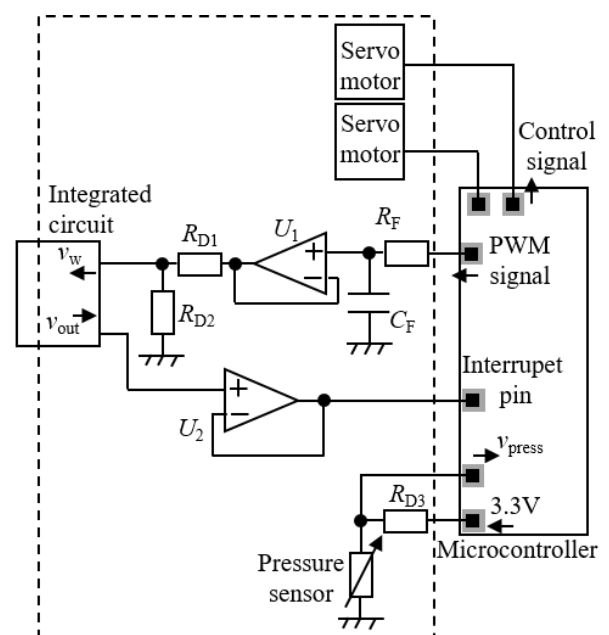


Figure3. Schematic diagram of the single-leg control system considered