

## E-5

## 馬の歩容を生成するニューロモーフィック回路を実装した四足歩行ロボットの開発

## Development of Quadruped Robot Implementing Neuromorphic Circuit for Generating Horse Gait

○武井裕樹<sup>1</sup>, 森下克幸<sup>2</sup>, 金子美泉<sup>3</sup>, 内木場文男<sup>3</sup>, 齊藤健<sup>3</sup>\*Yuki Takei<sup>1</sup>, Morishita Katsuyuki<sup>2</sup>, Minami Kaneko<sup>3</sup>, Fumio Uchikoba<sup>3</sup>, Ken Saito<sup>3</sup>

Abstract: In this paper, we installed a gait generation system utilizing non-networked neuromorphic circuits on a quadruped walking robot. Neuromorphic circuits are analog electronic circuit models that output pulse waveforms like biological neurons. We changed the output pulse period of the neuromorphic circuit by regressing the pressure at the tip of the robot. And we programmed the microcontroller to change the angle of the leg joints by a constant angle each time the neuromorphic circuit outputs a pulse. As a result, we confirmed our robot system actively generates horse gait.

## 1. はじめに

動物は定型的な運動をパターン化することにより、上位中枢が逐一制御しなくとも簡単な歩行などの運動が可能である。歩行運動におけるパターンを特に歩容と呼び、脊髄の中枢パターン生成器を核として生成していると考えられている<sup>[1]</sup>。しかし、中枢パターン生成器の構造や、歩容の生成メカニズムは未だ明らかになっておらず、ロボットを利用した工学的なアプローチがとられている。

歩容の生成に関する新たな試みとして、歩行型ロボットの脚間に生じる、物理的な相互作用を利用したシステムが提案された。このシステムは、結合していない4つの非線形振動子と、足先の圧力を利用することで、四足歩行ロボットに能動的に動物の歩容を生成させることが可能であった<sup>[2]</sup>。このシステムでは、数理モデルの振動子を利用しているが、中枢パターン生成器を構成するニューロンはアナログ処理である。従って、動物の歩容の生成メカニズムについて新たな知見を得るためには、アナログ処理のニューロンモデルを利用した歩容の生成システムをロボットに実装することが重要であるといえる。これまでに我々は、ニューロンのアナログ電子回路モデルを複数結合した中枢パターン生成器モデルを開発した。さらに、これを四足歩行ロボットに実装することで動物の歩容で歩行する四足歩行ロボットシステムを実現した<sup>[3]</sup>。しかし、歩容の生成は受動的であったため、ニューロンのアナログ電子回路モデルと足先の圧力を利用したシステムが能動的に歩容を生成することが可能か実験によって検証した。

本論文では、ネットワーク化していないニューロモーフィック回路を利用した歩容生成システムを四足歩行ロボットに実装した。実験の結果、四足歩行ロボッ

トシステムが能動的に四足歩行動物の歩容を生成することを明らかにしたので報告する。

## 2. 自己抑制ニューロンモデル

四足歩行ロボットシステムにはニューロモーフィック回路である、自己抑制ニューロンモデルを搭載した。自己抑制ニューロンモデルは、ニューロンの機能を限定的に模倣した細胞体モデルと抑制性シナプスモデルから構築した。Figure1に自己抑制ニューロンモデルの回路図と出力波形の一例を示す。このモデルは、周期的にパルス状の電圧を出力する細胞体モデルの出力を、パルスの生成を抑制する抑制性シナプスモデルで自己回帰する構造としている。細胞体モデルがパルスを出力した際に、抑制性シナプスモデルが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パルス生成を抑制する。つまり、 $v_w$ を変化させることで、Figure1(b)に示すようにパルスを出力する周期 $T$ を変化させることが可能である。

## 3. 歩容の生成メカニズム

開発した四足歩行ロボットシステムは、ニューロモーフィック回路を利用した4つの脚部システムを、本体フレームによって接続することによって構築した。制御対象とした機体の脚長は138 mm、前後脚間距離は170 mm、左右脚間距離は101 mmである。機体のもつ自由度は各脚部に2箇所設けたサーボモータを使用した関節のみとし、脚の先端には圧力センサを取り付けた。

四足歩行ロボットには、各脚の先端の圧力に応じてリアルタイムに各脚を振る速度を変化させることが可能なシステムを実装し歩容を生成させた。Figure2に単体の脚部システムの概略を示す。

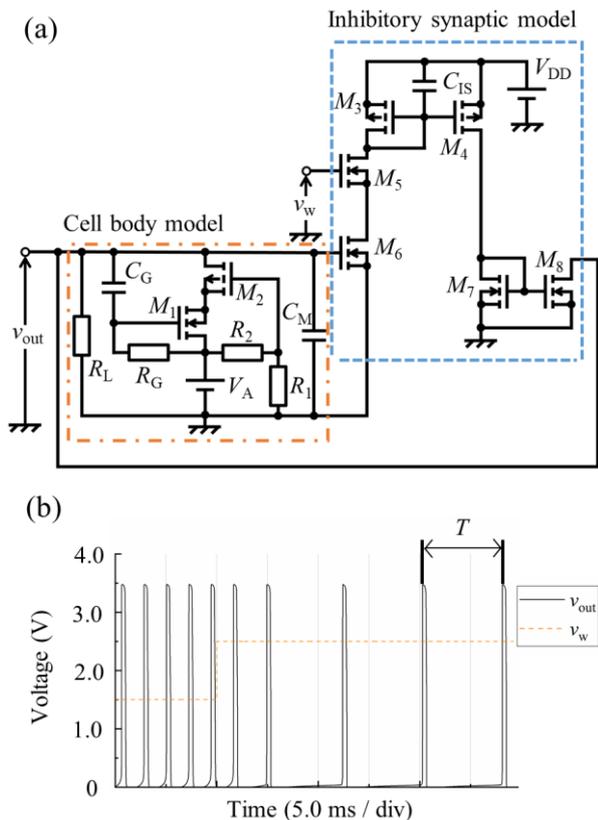


Figure 1. Self-inhibitory neuron model (a) Circuit diagram (b) Example of output pulse waveform

マイクロコントローラには、自己抑制ニューロンモデルがパルスを出力するたびに、一定角度 $\theta$ だけ関節の角度を変更させた。さらに、圧力センサの出力 $v_{press}$ に応じた電圧を $v_w$ として自己抑制ニューロンモデルに印加させた。 $\theta$ を1周期の脚の動作に対して非常に小さな値に設定することで、パルス周期に応じてリアルタイムで脚を振る速度が変化する。つまり、脚は、パルス周期が短いと高速、長いと低速で動作する。このシステムにより各脚を個別に制御し、一定の軌道で脚を動作させた。

四足歩行ロボットの $i$ 個目の脚における、シナプス荷重コントロール電圧 $v_w$ 、パルス周期 $T_i$ 、脚を振る速度 $v_i$ の関係を式(1)から式(3)に示す。ここで、 $\sigma$ は圧力の影響の大きさを表す定数、 $f_n$ は $v_w$ に対して増加するパルス周期の大きさ、 $T_0$ は $v_w = 0$  (V) としたときのパルス周期を表す。

$$v_{wi} = \sigma v_{pressi} \quad (1)$$

$$T_i = v_{wi} f_n + T_0 \quad (2)$$

$$v_i = \theta T_i^{-1} \quad (3)$$

#### 4. 歩容生成実験

開発した四足歩行ロボットシステムが能動的な歩容を生成可能か検証するために、平坦な床で歩行実験をおこなった。初期条件は、各脚間の位相差がない直立の状態とし、全ての脚を同時に動作させ始めた。この実験により生成された歩容の例を Figure 4 に示す。この歩容は馬が歩行時に示す、左前脚と右後脚、左後脚と右前脚の順で2本の脚を同時に振る trot の歩容と同様である。

#### 5. まとめ

本論文では、ニューロモーフィック回路を実装した四足歩行ロボットシステムを開発した。さらに、実験によって、開発したシステムが能動的に馬の歩容を生成することが可能であることを明らかにした。

#### 6. 参考文献

- [1] S Grillner : “Neurobiological Bases of Rhythmic Motor Acts in Vertebrates”, Science, Vol.228, pp143-149, 1985.
- [2] Dai Owaki, Akio Ishiguro : “A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions from Walking to Trotting to Galloping”, Scientific Reports 7, 277, 2017.
- [3] Ken Saito, Yuki Ikeda, Minami Takato, Fumio Uchikoba : “Development of quadruped robot with locomotion rhythm generator using pulse-type hardware neural networks”, Artificial Life and Robotics, Vol.20, Issue 4, pp366-371, 2015.

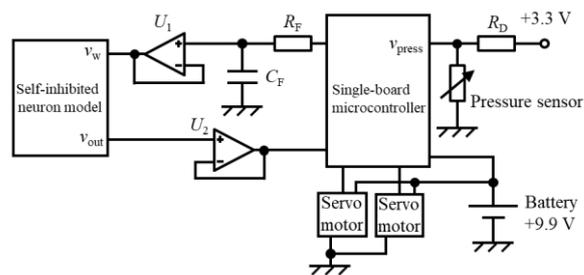


Figure 2. Single leg controlling system

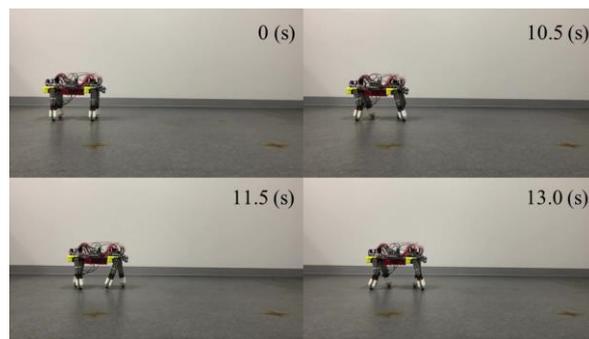


Figure 3. Example of generated gait (trot)