

## K-9

## ニューロモルフィック集積回路を搭載した四足歩行ロボットの移動コストと移動速度の解析 Analysis of Cost of Transport and Movement Speed of Quadruped Robot with Neuromorphic Integrated Circuit

○瞿著文<sup>1</sup>, 永野竣平<sup>2</sup>, 山崎順平<sup>1</sup>, LYU SHUXIN<sup>3</sup>, 齊藤健<sup>4</sup>  
\*Zhuwen Qu<sup>1</sup>, Shumpei Nagano<sup>2</sup>, Jumpei Yamasaki<sup>1</sup>, Shuxin Lyu<sup>3</sup>, Ken Saito<sup>4</sup>

**Abstract:** The authors are working on controlling a quadruped robot using neuromorphic circuits that mimic biological neurons in analog circuits. We previously confirmed that a normal quadruped robot implementing the circuit generates walk and trot gait. In addition, to investigate the effect of robot structure on gait generation, we developed a camel-type quadruped robot. We confirmed that it generates a pace gait and a trot gait. In this study, we focused on the movement cost of the trot gait generated by both types of robots and investigated how the movement cost varies with the structure, even for the same gait.

### 1. はじめに

自律型の四足歩行ロボットは、災害時の探索や建物内での物資運搬など、人間の代替労働力として期待されている分野が数多くある。代表的な自律型歩行ロボットとしては、Boston Dynamicsの「Spot」が挙げられる。Spotはカメラや各種センサから得た周囲の情報をプログラムによって処理し、階段や障害物のある道でも、バランスを保ちながら歩行することができる。Spotのように高度な制御を実現するには、ロボットの周囲の状況が時々刻々と変化するため、多数のセンサを使って環境情報を収集し、そのデータをデジタル処理で解析する必要がある、膨大な計算リソースが求められる。

我々は、生物の神経細胞を模倣したアナログ電子回路であるニューロモルフィック回路を活用し、四足歩行ロボットの歩行制御に応用する研究を進めている。これまでの研究でニューロモルフィック集積回路を搭載した四足歩行ロボットの歩行実験から、ロボットがウォーク歩容、トロット歩容を生成することを明らかにした。さらに、ロボットの体の構造が歩行パターンに及ぼす影響を調査するために、ラクダ型四足歩行ロボットを開発し、歩行実験からペース歩容とトロット歩容を生成することを確認した。

本論文では、ノーマル型四足歩行ロボットとラクダ型四足歩行ロボットの脚部の動作速度を変化して歩行実験を行い、移動速度に応じたトロット歩容の移動コストの比較を行ったので報告する。

### 2. ニューロモルフィック集積回路

四足歩行ロボットのニューロモルフィック集積回路は、細胞体モデルと抑制性シナプスモデルで構成した。細胞体モデルは発振回路で、パルス電圧を出力する役

割を果たす。一方、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を抑制し、その結果、細胞体モデルの発振周期を延長する機能を持っている。

### 3. 四足歩行ロボット

Figure 1にノーマル型四足歩行ロボットを示す。ニューロモルフィック集積回路は4つのニューロモルフィック回路を集積化したものであり、1つのニューロモルフィック回路が1つの脚に対応する。各脚はそれぞれ独立して動作し、集積回路から出力されるパルス電圧が入力されるたびに、指定された軌道を足先が辿るように、一定角度をサーボモータが動くように設定した。また、各脚の先端には圧力センサを設置し、センサで計測した圧力に応じて、ニューロモルフィック回路に入力する $v_w$ の値が変化する構造になっている。すなわち、圧力が加わると脚が低速で動作し、脚が宙に浮いている時は高速で動作する。

Figure 2に、ラクダ型四足歩行ロボットを示す。このロボットは、ラクダの骨格を参考にして3Dプリンタを用いて筐体の部品を製作した。

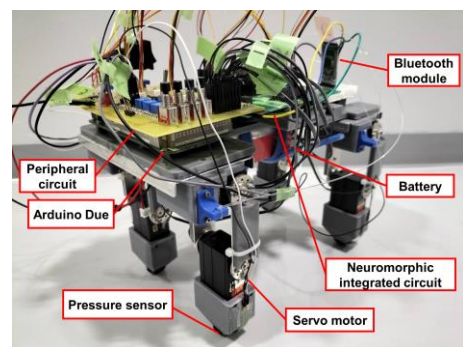


Figure 1. Normal-type quadruped robot

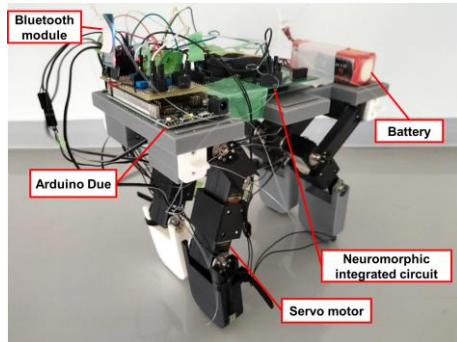


Figure 2. Camel-type quadruped robot

#### 4. 歩行実験

本研究では、二種類のロボットの速度と移動コストの解析を行った。ロボットを異なる速度で歩行させるために、集積回路から出力されるパルス電圧ごとの動作角度を変化し、脚部を構成するサーボモータの速度を変化させた。また、四足歩行ロボットは重心が高く、転倒するため、アルファフレームで作られた囲いにナイロンテグスで固定して歩行実験を実施した。実験では、バッテリー電圧、平均電流、移動距離、および歩容データを計測した。歩容データはサーボモータの時間変化を記録したもので、これを基に各脚の位相差を確認し、生成した歩容の分類を行った。

#### 5. 解析

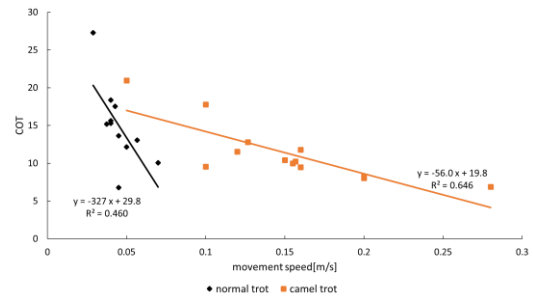
歩行実験で得られたデータを基に解析を行った。移動コストの解析には、指標である  $COT$  (Cost of transport) を用いた。 $COT$  は、移動システムが特定の距離を移動する際に消費するエネルギー量を示す無次元値であり、 $COT$  の値が小さいほど省エネルギーで移動できることを示している。 $COT$  は式(1)より導出する。

$$COT = \frac{E}{mgd} = \frac{VIt}{mgd} \quad (1)$$

ただし、 $V$  はバッテリー電圧、 $I$  はバッテリー平均電流、 $t$  は歩容を生成した期間、 $m$  はロボット総重量、 $d$  は  $t$  の間に移動した距離である。

2種類のロボットによる移動速度と  $COT$  の関係を Figure 3 に示す。近似曲線は最小二乗法を用いて作成した。2種類のロボットを比較すると、歩容が生成しやすい範囲が違うことが分かる。

ノーマル型ロボットは  $0.03 \sim 0.07$  [m/s] で、ラクダ型ロボットは  $0.05 \sim 0.28$  [m/s] で歩容を生成している。また、同じ移動速度では、ノーマル型ロボットの方が  $COT$  が小さいことが確認できる。

Figure 3. change of  $COT$  relative to movement speed

#### 6. まとめ

本論文では、ノーマル型四足歩行ロボットとラクダ型四足歩行ロボットのトロット歩容における移動速度と移動コストを解析した。その結果、ラクダ型四足歩行ロボットのトロット歩容はノーマル型四足ロボットより生成しやすい範囲が広いが、同じ移動速度で比較した場合、ノーマル型四足歩行ロボットのほうが移動コストが小さいことが確認できた。今後はノーマル型四足歩行ロボットのウォーク歩容とトロット歩容の移動コストについて、歩行実験と解析を行う予定である。

#### 7. 謝辞

本研究の一部は、令和2年度日本大学学術研究助成金総合研究、および令和4年度日本大学特別研究の助成を受けたものである。また、本研究は、東京大学 d.LAB(旧 VDEC)活動を通して、日本シノプシス合同会社、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社、メンター・グラフィックス・ジャパン株式会社の協力で行われたものである。また、本チップ試作は東京大学 d.LAB(旧 VDEC)活動を通して、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。

#### 8. 参考文献

- [1] Fankhauser, P., Bjelonic, M., Bellicoso, C.D., Miki, T., & Hutter, M., "Robust rough-terrain locomotion with a quadruped robot," 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, QLD, Australia, 2018, pp.5761-5768
- [2] 日本機械学会, "ロボティクス -Robotics," 丸善出版, 2011.
- [3] Y. Takei, K. Morishita, R. Tazawa, K. Katsuya, and K. Saito: "Non-programmed gait generation of quadruped robot using pulse-type hardware neuron models", Artificial Life Robotics, vol. 26, pp. 109-115, 2021.
- [4] J Yamasaki, A Ishida, K Morishita, et al : "Development of Integrated Neuromorphic Circuits for Camel-Type Quadruped Robot (in Japanese)". Proc. of the 2023 Annual Conference of Electronics, Information and Systems Society, IEE of Japan. pp. 649-652, 2023.