

K-10

## ニューロモルフィック集積回路を搭載したラクダ型四足歩行の歩容による 移動速度と移動コストの解析

### Analysis of Cost of Transport and Movement Speed by Gait of Camel-Type Quadruped Robot Equipped with Neuromorphic Integrated Circuits.

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

Abstract: The authors are studying the application of neuromorphic circuits, which mimic biological neurons with analog electronic circuits, to the gait control of a quadruped robot. Our previous study confirmed that the gait generated by a quadruped robot equipped with neuromorphic circuits can change by its structure. In this paper, we focused on the movement cost of the pace gait, which is newly generated by changing the structure, and the trot gait, which is an existing gait, and analyzed which gait has a lower travel cost. The analysis showed that the pace gait had a slightly lower travel cost.

#### 1. はじめに

四足歩行ロボットは近年、人間に代わる労働力として災害汚染地域や建物内部での物資の運搬、探査などの分野において活躍することが期待されている。

これらのロボットは大量のセンサを用いて周辺状況を常に把握する必要があり、高機能なプロセッサを用いることが必要不可欠である。これには消費電力や製造コストの増加等の問題がある。また、プログラムによってあらかじめ動作を設定する必要があり、柔軟性に欠ける。

一方で、動物は歩行などの定型的な動作は Central Pattern Generator (CPG) と呼ばれる神経細胞によって無意識下で生成されることが報告されている<sup>[1]</sup>。歩行の際の各脚の動きの位相差によって分類される形態を歩容と呼び、動物は歩容を移動速度に応じて適切に切り替え効率的に移動することが知られている<sup>[2]</sup>。

CPG をモデル化しハードウェア、ソフトウェアで再現して、ロボットの歩容生成に応用する研究が様々行われている<sup>[3-4]</sup>。

我々は神経細胞をアナログ電子回路で模倣したニューロモルフィック回路を用いて四足歩行ロボットの歩容生成に応用する研究を行っている。これまでに、同回路を実装した四足歩行ロボットがウォーク歩容とトロット歩容を生成することを確認した<sup>[5]</sup>。また、ロボットの身体構造が歩容に与える影響を調べるために、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<sup>[6]</sup>。

本論文では、新たに生成されたペース歩容が省エネルギーの歩容であるかを調査するために、ペース歩容

とトロット歩容の移動速度と移動コストについて解析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

ラクダ型四足歩行ロボットの歩行制御に使用するニューロモルフィック集積回路について説明する。同回路はパルス波形の電圧を出力する細胞体モデルと、細胞体モデルの発振周波数を抑制する抑制性シナプスモデルから構成される。シナプス荷重コントロール電圧  $v_w$  の値が大きくなるにつれて発振周波数が小さくなる。

#### 3. ラクダ型四足歩行ロボット

ラクダ型四足歩行ロボットの外観を Figure 1 に示す。同ロボットはラクダの骨格を参考に 3D プリンタで筐体を作製した。ロボットの歩行動作は、4つのニューロモルフィック回路を集積化したニューロモルフィック集積回路によって制御する。1つの脚が1つの回路に対応している。同回路から出力されるパルス波形電圧のスパイクがロボットに入力されるたびに、脚を構成するサーボモータは足先が設定された軌道を辿るように一定角度動作する。また、ロボットの脚先の圧力センサに圧力が加わるとその足に対応する回路に  $v_w$  が入力される。これによって細胞体モデルの発振周波数が低くなり、ロボットにスパイクが入力される頻度が少なくなる。すなわち、脚先に圧力が加わっている間は脚は低速で動作し、脚が宙に浮いている時は高速で動作する。

#### 4. 歩行実験

本研究では速度と移動コストの解析を行う。ロボットに様々な速度で歩行させるため、ロボットの脚部を

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

構成するサーボモータのスパイク当たりの動作角度量を様々設定して歩行させた。また、ラクダ型四足歩行ロボットは重心が高く、自立して歩行させると転倒する。そこで、アルファフレームで作製した囲いにナイロンテグスを用いて固定して歩行実験を行った。

歩行実験では解析に使用するバッテリー電圧、平均電流、ロボットの移動距離や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的な変化を記録したもので、このデータを基に各脚の位相差を計測してロボットが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 Cost of Transport (COT) と呼ばれる指標を用いた。COT はある移動システムが一定の距離を移動するのに必要とするエネルギー量を示す無次元量であり、値が小さいほど省エネルギーで移動できることを示す。式 (1) より導出できる。

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

$V$  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 1.585[kg]。  $d$  は  $t$  の間に移動した距離である。

2 種類の歩容による移動速度と COT のグラフを Figure 2 に示す。近似曲線は最小二乗法を用いて作成した。2 種の歩容を比較すると、トロット歩容の方が広い速度の範囲で歩容を生成したことが分かる。

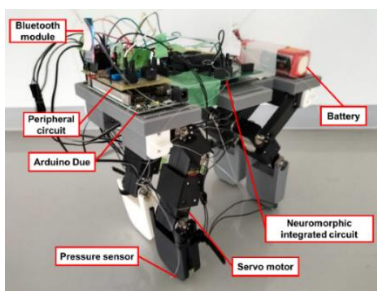


Figure 1. Camel-type quadruped robot

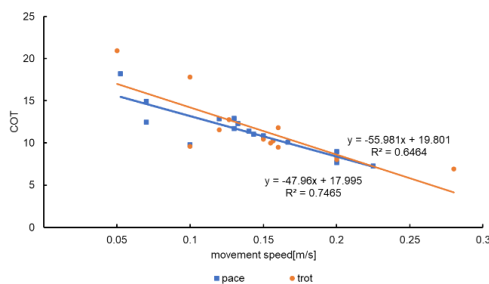


Figure 2. Change of COT relative to movement speed

トロット歩容: 0.05~0.28[m/s], ペース歩容: 0.0525~0.225[m/s]で歩容を生成している。また、ペース歩容が生成された速度域では、トロット歩容よりも COT が僅かに小さいことが近似曲線から確認できる。よって、この範囲においてペース歩容は移動コストの小さい歩容であると言える。

### 6. まとめ

本論文では、ラクダ型四足歩行ロボットのペース歩容と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、トロット歩容の方がペース歩容よりも広い速度の範囲で生成されるが、ペース歩容が生成された速度の範囲ではトロット歩容よりも移動コストが僅かに小さいことが確認できた。

今後の課題として、データ不足で比較が出来なかった高速域での両歩容の移動コストについて検討するために、歩行実験と解析を続けていく予定である。

### 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。

### 7. 参考文献

- [1] S. Grillner and A. Kozlov: "The CPGs for limbed locomotion-facts and fiction", Molecular Sciences, vol. 22, issue 11, 2021.
- [2] D. F. Hoyt and C. R. Taylor: "Gait and the energetics of locomotion in horses", Nature, vol. 292, pp. 239-240, 1981.
- [3] Y. Habu, Y. Yamada, S. Fukui, et al., A simple rule for quadrupedal gait transition proposed by a simulated muscle-driven quadruped model with two-level CPGs. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 2075-2081, 2018.
- [4] Owaki, D., Ishiguro, A. A quadruped robot exhibiting spontaneous gait transitions from walking to trotting to galloping. Sci Rep 7, 277, 2017.
- [5] 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.
- [6] 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.