

K-46

## 集積化したニューロモーフィック回路を搭載したラクダ型四足歩行ロボットの開発

## Development of Camel-Type Quadruped Robot with Integrated Neuromorphic Circuits

○山崎順平<sup>1</sup>, 石田暁久<sup>1</sup>, 森下克幸<sup>2</sup>, Lyu Shuxin<sup>2</sup>, 齊藤健<sup>3</sup>\*Jumpei Yamasaki<sup>1</sup>, Akihisa Ishida<sup>1</sup>, Katsuyuki Morishita<sup>2</sup>, Shuxin Lyu<sup>2</sup>, Ken Saito<sup>3</sup>

Abstract: The authors are working on controlling quadruped robots with neuromorphic circuits that mimic biological neurons with analog circuits. We have previously developed a horse-type quadruped robot that can generate walk and trot. In this paper, to clarify the relationship between the body structure of a quadruped robot controlled by neuromorphic circuits and the generation of its gait, we developed a camel-type quadruped robot that mimics a camel skeleton, whose characteristic gait, pace, has been confirmed. We also report the results of walking experiments using a treadmill, which confirmed that the robot generates pace.

## 1. はじめに

四足歩行ロボットは物資の運搬や災害地域での探索などにおいて、人間に変わる労働力として期待されている。四足歩行ロボットシステムの例に、Boston Dynamics社のBigDogがある<sup>[1]</sup>。BigDogは不整地でもバランスを保ちながらスムーズに移動することが可能である。しかし、動物のように自律的に行動する能力を持った歩行ロボットは未だ開発されておらず、その実現には従来の方法にとらわれない制御方法を開発する必要がある。動物は歩行などの定型的な運動は無意識化で行い、脊椎のCentral Pattern Generator (CPG)や小脳が制御すると報告されている<sup>[2]</sup>。また、運動時に周辺の状況に応じて歩容と呼ばれる足並みを変化させることで効率的に移動することが明らかにされている<sup>[3]</sup>。そこで、動物のCPGをソフトウェアやハードウェアで模倣しロボットの歩容生成に利用する研究が報告されている<sup>[4]</sup>。

我々は、動物の神経細胞をアナログ回路で模倣したニューロモーフィック回路を用いて、四足歩行ロボットの歩行制御を行う研究を行っている。先に我々は、ニューロモーフィック回路を搭載した馬型四足歩行ロボットを開発し、歩行実験の結果、同ロボットが歩行速度に応じてウォーク歩容とトロット歩容を生成することを明らかにした<sup>[5]</sup>。しかし、他の歩容を確認できなかったため、四足歩行ロボットの機械的な構造による影響と推察した。馬は主にウォーク歩容、トロット歩容、ギャロップ歩容を行うが、ラクダはペース歩容を行う。四足歩行動物は身体的な構造によって生成する歩容が異なることが知られている<sup>[6]</sup>。従って、四足歩行ロボットの機械的な構造を変化させることでウォーク歩容、トロット歩容以外の歩容を生成できる可能性がある。

本論文では、四足歩行ロボットの構造と歩容生成の関連性を検討するために、ペース歩容が確認されているラクダの身体構造を模倣したラクダ型四足歩行ロボットを作製した。また、同ロボットの歩行実験を行ったので報告する。

## 2. ラクダ型四足歩行ロボットの作製

Figure 1にラクダ型四足歩行ロボットを示す。同ロボットはラクダの身体の構造を参考に3Dプリンタで作製したPLA, ABS製のパーツと、骨格の駆動部を参考に配置したサーボモーターで構成した。同ロボットにはニューロモーフィックIC, Arduino Due, 周辺回路, バッテリー, Bluetoothモジュールを搭載した。また、各脚の先端に圧力センサを取り付けた。

次に同ロボットの歩行システムについて説明する。ロボットの脚部は、7つの目標点を辿るように動作する。ロボットの関節部分に取り付けたサーボモーターは、ニューロモーフィック回路(Figure 2)からのパルス電圧が加わるごとに一定角度ずつ駆動し、次の目標点まで移動する。各脚先に取り付けた圧力センサに加わる圧力をArduino Dueによって検出し、圧力に応

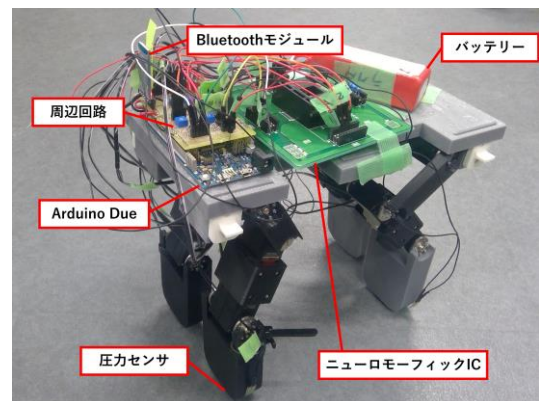


Figure 1. Camel-type quadruped robot

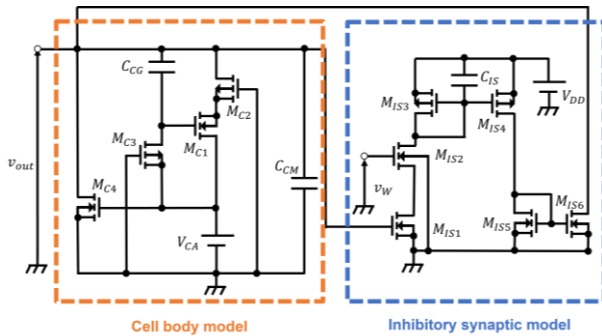


Figure 2. Schematic diagram of neuromorphic circuit

じてニューロモーフィック回路の抑制性シナプスモデルにシナプス荷重コントロール電圧  $v_w$  を入力する。  $v_w$  の入力により、抑制性シナプスモデルが細胞体モデルから電流を引き抜き、パルス電圧の発振周期  $T$  が長くなり、サーボモーターの角度変化が遅くなる。ロボットに搭載したニューロモーフィック IC はニューロモーフィック回路を集積化して4つ実装したもので、4つがそれぞれの脚に対応している。従って、ロボットはバランスによって生じた圧力変化に応じて歩容を自発的に生成する。

### 3. ラクダ型四足歩行ロボットの歩行実験

作製したラクダ型四足歩行ロボットをトレッドミルに乗せて歩行実験を行った。ロボットは重心が高いため、安定させるとともに外乱を低減させるために、アルファフレームで作製した囲いにナイロンテグスで4方向から固定した。

歩行実験は以下の手順で行った。

- (1) ラクダ型四足歩行ロボットをトレッドミルに乗せ、電源を入れる。
- (2) トレッドミルを起動させる。
- (3) 3分間ラクダ型四足歩行ロボットの挙動を観察したのち、ラクダ型四足歩行ロボット、トレッドミルの電源を切る。

歩行実験の結果の一部を示す (Figure 3)。図は各脚の脚部動作の1周を  $2\pi$  とし、時間的に各脚の位相差、すなわち歩容がどのように変化するかを表している。

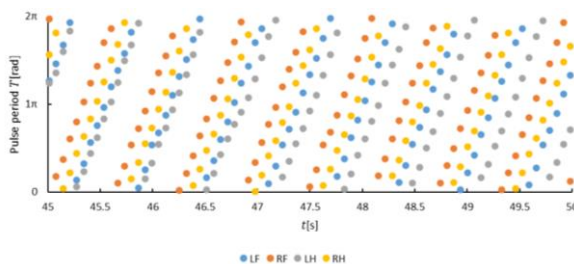


Figure 3. Gait change of camel-type quadruped robot

図よりラクダ型四足歩行ロボットは右前脚(RF)、右後脚(RH)、左前脚(LF)、左後脚(LH)の順番で脚を動かしていることが確認でき、これはペース歩容に分類される脚運びである。但し、3分間の歩行実験中、ロボットがペース歩容を生成する事を断続的に確認できたが、長時間安定してペース歩容を生成はできなかった。

### 4. まとめ

本論文ではラクダ型四足歩行ロボットの開発と歩行実験を行った。実験結果より、同ロボットが断続的にペース歩容を生成するのを確認した。しかし、長時間安定した歩容の生成はできなかった。原因として、同ロボットの脚を構成する部品の機械的な誤差などが挙げられる。今後はこれらの外乱に耐えうるシステムを構築することで、歩容の安定化を目指す予定である。

### 5. 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。

### 6. 参考文献

- [1] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter et al.: “BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot”, IFAC Proceedings, pp. 10822-10825 (2008).
- [2] S. Grillner and A. Kozlov: “The CPGs for limbed locomotion-facts and fiction”, Molecular Sciences, vol. 22, issue 11 (2021).
- [3] D. F. Hoyt and C. R. Taylor: “Gait and the energetics of locomotion in horses”, Nature, vol. 292, pp. 239-240 (1981).
- [4] N. Sasagawa, K. Tani, T. Imamura, and Y. Maeda: “Quadruped locomotion patterns generated by desymmetrization of symmetric central pattern generator hardware network”, IEICE Trans., Fundamentals, vol. E101-A, no. 10, pp. 1658-1667 (2018).
- [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] K. Nakatani, Y. Sugimoto, and K. Otsuka: “Demonstration and Analysis of Quadrupedal Passive Dynamic Walking”, Advanced Robotics, Vol.23, p.483-501 (2009).