

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11489

研究課題名(和文) 4足動物の歩行パターンが姿勢に応じて変化するという仮説のロボットを用いた検証

研究課題名(英文) Verification of a hypothesis that quadrupedal gait patterns vary according to the posture

研究代表者

福岡 泰宏 (Fukuoka, Yasuhiro)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授

研究者番号：40418679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本申請研究の目的は、これまでの研究成果から導いた仮説「速度に応じて変化する異なる姿勢(胴体振動)が異なる歩行パターンを誘発する」をこれまでより動物に近い神経モデル・機構を持つ4脚ロボットによる歩行パターン生成の実現に基づいて信頼性の高いものにするのであった。そのため、より現実的な神経系モデルの有効性を4脚シミュレーションモデルによってまず示した。そして、それを人工筋肉アクチュエータで駆動する猫をモデルとしたより現実的な機構を持つ4脚ロボットに用いて、実際に動物が行うwalk, trot, gallopの歩容遷移を実現することに成功した。これにより、仮説の信ぴょう性が高まったと考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

4足動物は速度に応じて異なる複数の歩行パターン(4脚の動かし方)を使い分けている。その結果エネルギー効率が最良になることはNature, Scienceを筆頭に多く報告されてきたが、各パターンの発生原理については多分野での多くの試みにも関わらず未だに不明である。我々は4脚ロボットを用いて、walk-trot-gallopの歩行パターン遷移を実現し、その結果に基づいて、我々は、速度に応じて変わる胴体振動に対して歩行パターンを安定に保つためにそれらのパターンを変化させていると仮説を立てている。これは一般の生物学で言われる知見とは異なるものであり、新しい主張して価値があると考えている。

研究成果の概要(英文)：Our aim is to make our hypothesis strong that walking and running gait patterns are triggered by the body posture (body oscillation) that changes according to the speed. To do this, we use our new quadruped robot with more realistic mechanisms and neural system models, similar to an animal and allow the robot to generate walking and running gait patterns. We first demonstrated the effectiveness of our proposed realistic nervous system by using a quadruped simulation model. Next, we applied the nervous system to a cat-like quadruped robot with more realistic mechanism driven by artificial muscle actuators and succeeded in demonstrating gait generation between walking, trotting, and galloping on the robot, which are observed on an animal. These results should boost our hypothesis.

研究分野：ロボット工学

キーワード：歩行ロボット

1. 研究開始当初の背景

4足動物の歩行走行パターンとは、4脚が一定の脚間位相差を持って歩行走行する時の定常パターンのことを言い、図1の例のように、動物は移動速度に合わせて数種の歩行走行パターンを切替えている。この不可思議な原理解明を目指して、長年、生物学、神経生理学、数学、力学など複数分野において極めて多くの研究が実施されてきた。従って、歩行走行パターンの生成原理が解明できれば、複数分野に極めて大きい学術的波及効果をもたらす。従来の報告では、動物は各速度においてエネルギーが最小となるように walk, trot, gallop などのパターン(図1)を切り替えているという指摘が主説となっている。しかし、エネルギー最良になったのは各パターンを切替えた結果に過ぎず、個々のパターンがどのように生成されるのか、なぜその様なパターンで各脚を振るのか、まではどの研究でも言及されていない。そこで、我々は4足動物のシミュレーションモデルやロボットを用いてこの歩容生成原理を解明することを目指している。

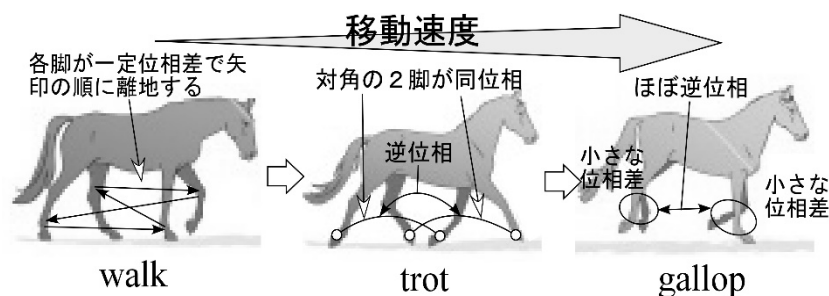


図1. 動物の歩行走行パターン生成例

2. 研究の目的

本申請研究の目的は、これまでの研究成果[1][2][3]から申請者が導いた仮説「速度に応じて変化する異なる姿勢(胴体振動)が異なる歩行走行パターンを誘発する」をこれまでより動物に近い神経モデル・機構を持つ4足ロボットによる歩行走行パターン生成の実現に基づいて信頼性の高いものにする事である。

3. 研究の方法

これまでに報告したシミュレーションモデルやロボット[1][2][3]に用いられた歩行走行運動を生成する制御系の神経系モデルは Central pattern generator (CPG)と呼ばれるシステムである。動物は歩行走行の基本的な振動リズムを、脊椎に存在するその CPG によって生み出していると言われてている。これまでのシミュレーションモデルとロボットに用いた CPG は図2(a)に示すように、非常に少ないニューロンモデルから構築されたシンプルなモデルであり、これにより各脚を駆動していた。本研究で用いる CPG モデルは図2(b)に示すような、2階層 CPG と呼ばれるモデルである。これは、Rybak[4]らによって提案された、一脚一関節駆動のための CPG モデルを一脚3関節を6つの筋肉で駆動できるように拡張したモデルである。各ニューロンモデルは Rybak によって提案されたモデルを用いている。これを、我々はロボットに用いることにしたが、本 CPG が求められる動作を実現可能かどうかを検証するために、まずは猫に近いより現実的なシミュレーションモデル(図3(a))にその CPG を用いて、歩行、および歩容遷移が可能かどうかを検証することにした。

また、そのシミュレーション実施と同時進行で、図2(a)に示すようなシンプルな脚機構を持つロボットではなく、より関節数が多く、さらに人工筋肉アクチュエータで動く、より現実的な脚機構を持つ新4脚ロボット(図3(b))を制作し、実験することにした。

4. 研究成果

(1) 4脚シミュレーションモデルによる2階層 CPG の有効性検証

図3(a)に示す猫をモデルとしたシミュレーションモデルの筋肉モデルは、以下の(1)式に表される。

$$F = F_{\max} \cdot (\lambda \cdot f(V) \cdot F_l \cdot F_v + F_p) \quad [N] \tag{1}$$

$F_l$ と $F_v$ は筋肉長さと筋肉長変化速度、 $F_p$ は受動要素である。 $F_{\max}$ はその筋肉が出せる最大張力である。 $f(V)$ に図2(b)の2階層 CPG の下にあるモータニューロンからの出力が入力される。

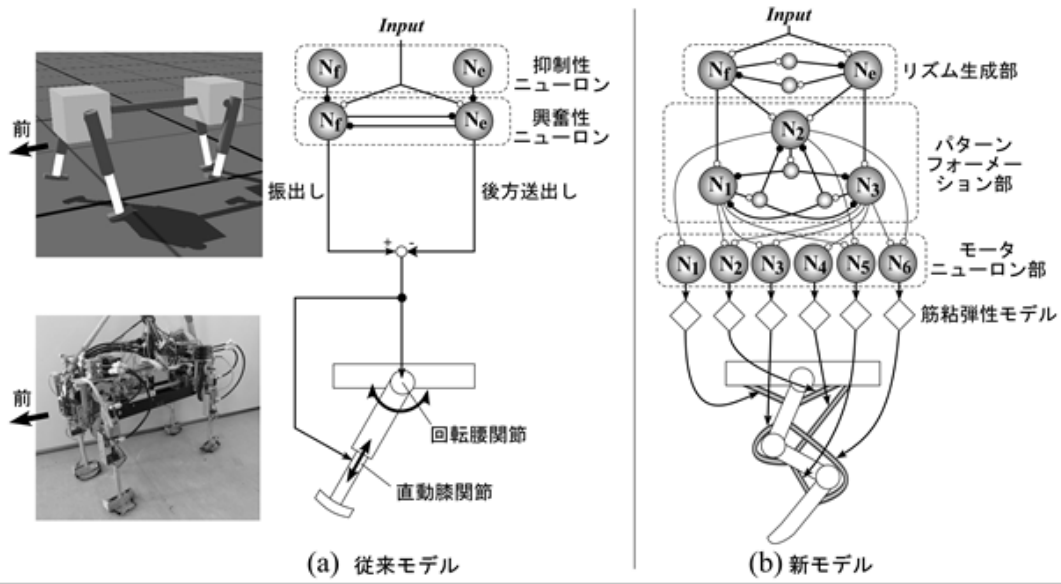


図 2. 従来モデルと改良モデルの 1 脚

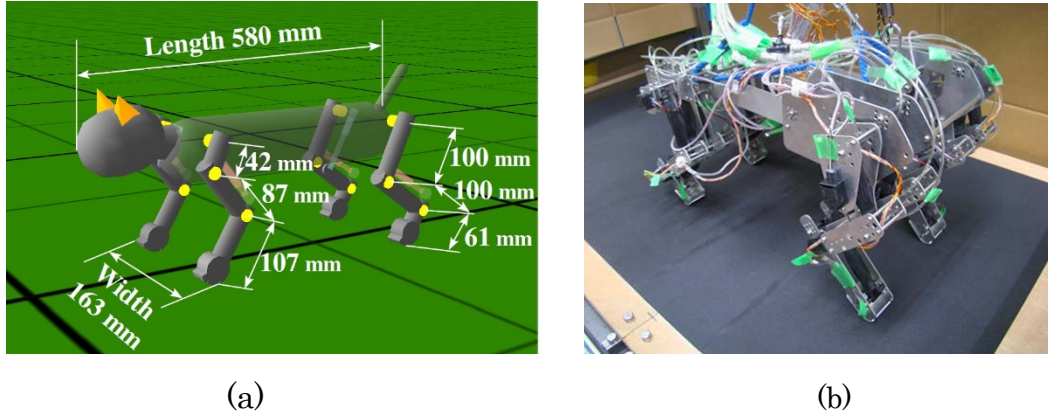


図 3. 従来モデルと改良モデルの 1 脚

シミュレーションモデルに用いた 2 階層 CPG のモデルは式(2)~(4)で表される。

$$C \cdot \frac{dV}{dt} = -I_{NaP} - I_K - I_{Leak} - I_{SynE} - I_{SynI}, \quad (2)$$

$$C \cdot \frac{dV}{dt} = -I_{Leak} - I_{SynE} - I_{SynI}. \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_{NaP} &= \bar{g}_{NaP} \cdot m_{NaP} \cdot h_{NaP} \cdot (V - E_{Na}), \\ I_K &= \bar{g}_K \cdot m_K^4 \cdot (V - E_K), \\ I_{Leak} &= \bar{g}_{Leak} \cdot (V - E_{Leak}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_{SynE,i} &= \bar{g}_{SynE} \cdot (V_i - E_{SynE}) \\ &\quad \cdot (\sum_j a_{ji} \cdot f(V_j) + c_i \cdot d + w_{1,i} \cdot feedback_1), \\ I_{SynI,i} &= \bar{g}_{SynI} \cdot (V_i - E_{SynI}) \\ &\quad \cdot (\sum_j b_{ji} \cdot f(V_j) + w_{2,i} \cdot feedback_2 + \sum_k \alpha_{ki} \cdot f(V_k) + \sum_k \beta_{mi} \cdot f(V_m)), \end{aligned}$$

この式の詳細については文献[5]を参照していただきたい。上記式から出力されるニューロンの

平均膜電位 $V$ から以下の式(5)を通して式(1)に入力される $f(V)$ が計算される.

$$f(V) = \begin{cases} 1/(1 + \exp(-(V - V_{1/2})/k)) & (\text{if } V \geq V_{th}) \\ 0 & (\text{otherwise}), \end{cases} \quad (5)$$

以上の方法で各脚を駆動する6つの筋肉モデルが駆動され,歩行走行が可能になる.結果として,シミュレーションモデルは,安定したwalk歩容による歩行,およびtrot歩容による歩行を実現し,両者の間の歩容遷移も可能であることを示した.この結果は文献[5]において報告した.

(2) 人工筋肉アクチュエータにより駆動する現実的な4脚ロボットのwalk, trot, gallopでの歩行走行実現

(1)のシミュレーションモデルに用いた2階層CPGモデルを図3(b)の人工筋肉で駆動する4脚ロボットに用いて,walk, trot, gallopでの歩行走行を実現することを目指した.結果として,すべての歩容で歩行走行させることに成功した.図4にgallopしている様子を示す.



図4. Gallop 走行

また,図5, 6, 7にそれぞれ, trot から gallop に自律遷移するときのCPG内のRG-Eニューロン活性度,足の接地状態,胴体傾斜のデータを示す.

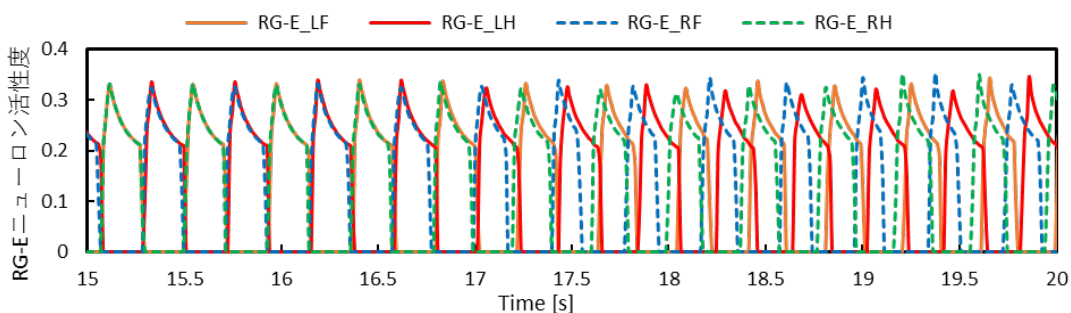


図5. Trot-gallop 遷移時のRG-Eニューロン活性度

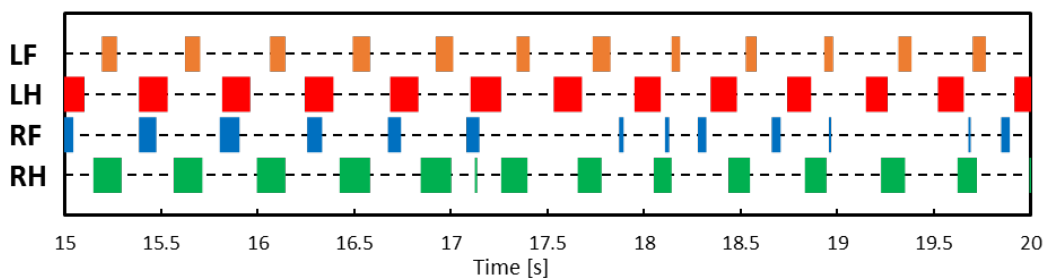


図6. Trot-gallop 遷移時の脚接地情報

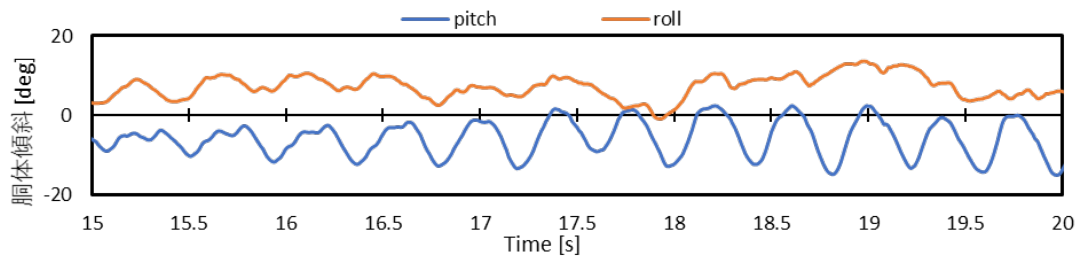


図 7. Trot-gallop 遷移時の胴体傾斜

図 5, 6 の 17.5 秒あたりから, 脚の位相状態が変わり, 歩容が **trot** から **gallop** に遷移していることが確認できる. また, 図 7 で, **gallop** の時は **trot** よりも胴体傾斜が大きくなっていることがわかる. これは, 従来我々が主張してきた, 胴体傾斜に応じて歩容が遷移するという主張を示した結果と合致する. **walk-trot** の遷移についても似たような結果が出ている.

これらの結果により, 従来やってきたシンプルな 4 脚シミュレーションモデルやロボットと同様の結果が, より現実的な CPG モデル, および人工筋肉で駆動する 4 脚ロボットにおいても得られたことから, 我々が主張してきた歩容遷移原理の仮説の信ぴょう性がより高くなったと考えられる.

#### 参考文献

- [1] Y. Fukuoka, K. Fukino, Y. Habu and Y. Mori, Energy evaluation of a bio-inspired gait modulation method for quadrupedal locomotion, *Bioinspiration & Biomimetics*, vol.10, No. 4, 046017, 2015.
- [2] Y. Fukuoka, Y. Habu and T. Fukui, A simple rule for quadrupedal gait generation determined by leg loading feedback: a modeling study, *Scientific Reports (Impact Factor: 4.3)*, Vol.5, No.8169; DOI:10.1038/srep08169, 2015.
- [3] Analysis of the gait generation principle by a simulated quadruped model with a CPG incorporating vestibular modulation, Y. Fukuoka, Y. Habu, T. Fukui, *Biological Cybernetics*, Vol.107, No. 6, pp.695-710, 2013.
- [4] Rybak IA, Shevtsova NA, Lafreniere-Roula M, et al. Modelling spinal circuitry involved in locomotor pattern generation: insights from deletions during fictive locomotion. *J Physiol*, 577(2): 617-639, 2006.
- [5] Habu Y, Uta K, Fukuoka Y., Three-dimensional walking of a simulated muscle-driven quadruped robot with neuromorphic two-level central pattern generators. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(6), 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yasushi Habu, Keiichiro Uta, Yasuhiro Fukuoka	4. 巻 16
2. 論文標題 Three-dimensional walking of a simulated muscle-driven quadruped robot with neuromorphic two-level central pattern generators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Robotic Systems	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1729881419885288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Fukui, H. Fujisawa, K. Otaka, Y. Fukuoka	4. 巻 111
2. 論文標題 Autonomous gait transition and galloping over unperceived obstacles of a quadruped robot with CPG modulated by vestibular feedback	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.robot.2018.10.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福井貴大, 松川宗一郎, 福岡泰宏	4. 巻 85
2. 論文標題 Pace を基本歩容とする4脚ロボットののための自律歩容遷移手法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会誌C編	6. 最初と最後の頁 18-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00360	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 羽部 安史, 石原 淳也, 井上 晃汰, 小倉 聡司, 福岡 泰宏	4. 巻 86
2. 論文標題 脊髄神経系に基づくネコの後脚シミュレーションモデルによる自律歩様調節	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takahiro Fukui, Keigo Nakamura, Yasushi Habu, Yasuhiro Fukuoka
2. 発表標題 Animal-like Gait Adaptation by a Simulated Quadruped Model with Central Pattern Generators
3. 学会等名 2018 International Conference on Engineering and Natural Science-Summer Session (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Fukui, Keigo Nakamura, Yasushi Habu, Yasuhiro Fukuoka
2. 発表標題 Animal-like Walking and Running by a Simulated Quadruped Model
3. 学会等名 The 14th International Student Conference in Ibaraki (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasushi Habu, Yuuta Yamada, Satoshi Fukui and Yasuhiro Fukuoka
2. 発表標題 A Simple Rule for Quadrupedal Gait Transition Proposed by a Simulated Muscle-driven Quadruped Model with Two-level CPGs
3. 学会等名 ROBIO2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------