

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709033

研究課題名(和文) 網羅的視野から解き明かす四脚動物の多様な歩容の発現機序

研究課題名(英文) Understanding Mechanism of Quadruped Locomotion from Unified Viewpoint

研究代表者

大脇 大(Owaki, Dai)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40551908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、四脚步容の発現機序解明のため、四脚動物の多様な歩容に対して網羅的な視野から発現機序の体系的理解を試みた。具体的には、あらゆる歩容を再現可能なロボットを構築することを通して、四脚ロボットの身体構造および制御系の設計論を構築することを目指した。

四脚ロボットを用いて、低速歩行から高速走行への歩容を、各脚のコントローラ間の神経的結合を用いることなく移動速度に応じて自発的に遷移させることに世界で初めて成功した。さらに、歩容遷移過程における力学構造の変容を、3次元動作解析データに基づき解明することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to understand the mechanism underlying quadruped locomotion from a unified viewpoint. To this end, we aimed to establish a design principle for both controller and morphology of quadruped robot via reproduction of various gait patterns observed in actual quadrupeds.

As a result, we demonstrated that spontaneous quadruped gait transition from walk, trot, to gallop could be achieved with the use of load sensing only, without any preprogrammed gait patterns. Furthermore, we confirmed the modification of dynamical structure in gait transition by using 3 dimensional data from motion capture system.

研究分野：ロボティクス

キーワード：四脚動物 歩容 CPG 身体特性

1. 研究開始当初の背景

四脚動物は、移動速度、環境、種に応じて、ウォーク、トロット、ペース、バウンドといった多様な運動パターン（歩容）を発現する（引用文献[1]）。したがって、生物が示す多様な振る舞いの発現機序を解明する上で適切なモデル生物である。四脚動物の歩容は、それぞれの脚の運動を協調させること（脚間協調）によって発現する。しかしながら、多様な歩容の発現に寄与する脚間協調のメカニズムは解明されていない。したがって、この原理を解明することは、多様な歩容の発現機序の解明のみならず、生物の多様な振る舞い生成の機序解明、さらには生物の運動能力に比肩するロボットの設計論構築にもつながるため、ロボティクスにおいても重要な研究課題である。

四脚動物の脚間協調メカニズムを解明するために、神経系の解析に主眼をおいた研究がなされてきた。除脳ネコ（間脳部分を切断し大脳皮質と皮質下の連絡を絶ったネコ）を用いた実験から、脊髄に内在する神経回路網（CPG: Central Pattern Generator）が中核的な役割を担い、各脚の運動を自律分散的に協調させることで状況依存的に歩容を生成していると考えられてきた（引用文献[2]）。

このような生物学的知見に基づき、湯浅（当時、名古屋大）、Golubitsky（Ohio State 大）、木村（京都工芸繊維大）、辻田（大阪工業大）、Ijspeert（EPFL）らによって様々な CPG モデルが提案されてきた。しかしながら、提案されてきたモデルは、主として CPG 内の神経的な結合パターンに歩容生成の役割を担わせていたため、単一の歩容や限られた歩容間の遷移のみを採り上げた議論に終始し、結果として状況依存的に多様な歩容を生成可能なモデルの構築には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、四脚步容の発現機序解明のため、既存の研究とは全く逆方向のアプローチを採る。すなわち、四脚動物の多様な歩容に対して網羅的な視野から発現機序の体系的な理解を試み、具体的には、あらゆる歩容を再現可能なロボットを構築することを通して、四脚ロボットの身体構造および制御系の設計論を構築する。

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者が提案した制御モデル（引用文献[3]）を起点とし、(1)動物解剖学データに基づくあらゆる歩容を実現する身体構造の考察、(2)単一の歩容のみならず歩容遷移に内在する力学構造の解析と機序解明、(3)多様な歩容の発現機序の体系

的理解、という手順を踏むことによって、あらゆる歩容を再現する四脚ロボットを具現化することを目指した。

4. 研究成果

4.1 H25 年度の成果

H25 年度は、目標である「あらゆる歩容の再現」のために、身体構造に着目した。制御則は、研究代表者らが提案した身体特性に応じて歩容生成可能な CPG モデル（引用文献[3]）を用いた。具体的な身体構造として、高速移動に必要な跳躍運動を生み出すための脚構造の開発をおこなった。さまざまな身体パラメータを改変し実験するため、脚長、質量分布、弾性特性などを容易に変更可能な使用のロボットを製作した（図 1、学会発表 21）。

実験の結果、低速の walk から、中速の trot、さらに高速の bound へと、神経的結合パターンを用いなくても移動速度に応じた歩容遷移を再現した。さらに興味深いことに、実際のウマなどにおいて、中速の trot から高速の bound への歩容遷移にみられる canter という非対称な 3 拍子の歩容も再現されている事実が確認された（学会発表 18, 19）。

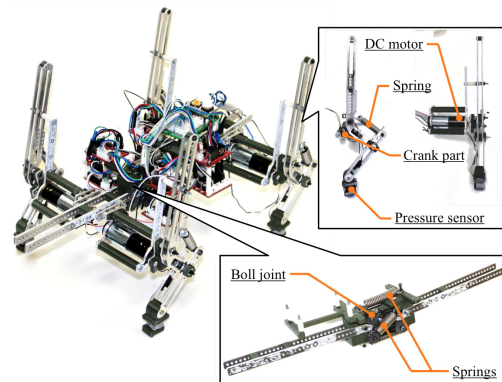


図 1. 開発した四脚ロボット

4.2 H26 年度の成果

H26 年度は、前年度に再現性の低かった歩容を中心に、前後の脚構造の非対称性などを考慮した機構系の再設計を行った。さらに、単一の歩容の再現のみならず、歩容遷移過程における力学構造の検証を行った。

3D モーションキャプチャシステムによる 3 次元動作解析装置を用い、歩容遷移過程の実時間データを計測し解析を行った。特異値分解（SVD）を用いた解析の結果、歩容遷移過程には 4 つの基本モード（trot, pronk, bound, pace）が内在し、その寄与度に応じて歩容遷移（walk trot canter gallop）が発現していることが分かった。

また、H26 年度には、多脚動物を定量的に解析する新規な指標を提案した（雑誌論文 2）。さらに、四脚動物の歩容再現に用いた

制御則を発展させ、二脚歩行制御へと拡張した(図2, 学会発表 14, 17, 20). 安定な二足歩行も生成可能であることを確認し, 同制御則の系統的な進化過程に照らしあわせた妥当性が示唆された.

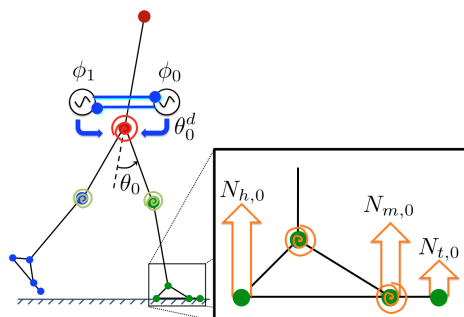


図2. 二脚ロボットの歩行制御則へ拡張

4.3 H27年度の成果

H27年度は, 運動学データのみならず動力学データも併せて計測し, 提案した制御則と再現された歩容および歩容遷移に内在する力学構造について解析することを通して, 歩容発現機序の体系的な理解を試みた.

具体的には, (1)さまざまな初期値に対する歩容の収束性, (2)リターンマップに基づくポテンシャル関数を用いた安定性解析, (3)歩容遷移の再現性およびヒステリシス, について解析を行った. (1)の結果, の大きさに応じて, walk, trot, half-bound, canter, gallopへと歩容が収束していることが確認された. さらに, trot と half-bound の2つの歩容の中間の速度領域においては, 2つの収束する歩容を有する双安定なパラメータが存在することが確認された. (2)では, (1)のデータに基づき各歩容に対する安定性解析として, リターンマップを用いた解析を行った. さらに, 得られたリターンマップの近似曲線から, 収束する歩容近傍のポテンシャル関数を導出した. 得られたポテンシャル関数の構造から, 上記の2つの収束する歩容が存在するパラメータでは, ポテンシャル構造が2峰性であることが明らかとなった. (3)では, の変化パターンに応じた歩容遷移実験の特性を検証した. 具体的には, の増加および減少の条件での歩容遷移について検証した. その結果, の変化の方向(増加あるいは減少)によってヒステリシスに相当する現象が確認された. そのヒステリシス現象の背後には, (2)で得られたポテンシャル構造の変容に基づく力学構造に応じた歩容遷移が発現していることが確認された.

さらに最終年度には, 頭部運動の影響を考慮したシミュレーションモデル(学会発表1,3)や, 「手応え」というあらたな概念に基づく脚間協調制御則の考案(学会発表2, 4, 5)など, 本研究成果をさらに発展させた研究による成果も得つつある.

<引用文献>

1. Muybridge R. 1888 Animal locomotion: the Muybridge work at the university of pennsylvania. Ann Arbor, MI: University of Michigan Library.
2. Shik ML, Severin FV, Orlovskii GN. 1966 Control of walking and running by means of electrical stimulation of the midbrain. Biophysics 11, 756 - 765.
3. D. Owaki et al., Simple robot suggests physical interlimb communication is essential for quadruped walking, Journal of the Royal Society Interface, Vol. 10, DOI: 10.1098/rsif.2012.0669, 2012.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

1. 大脇大, 石黒章夫, ミニマルなCPGモデルから探る四脚動物の脚間協調メカニズム, 計測と制御, Vol. 54, 2015, 272-277, DOI: 10.11499/sicej1.54.272, 査読有
2. Takeshi Kano, Dai Owaki, and Akio Ishiguro, A Simple Measure for Evaluating Gait Patterns during Multi-Legged Locomotion, The SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 7, 2014, 214-218, DOI: 10.9746/jcmsi.7.214, 査読有
3. Dai Owaki, Koichi Osuka, and Akio Ishiguro, Stabilization Mechanism underlying Passive Dynamic Running, Advanced Robotics, Vol.27, 2013, 1399-1407, DOI:10.1080/01691864.2013.839087, 査読有

[学会発表](計 22 件)

1. S. Suzuki, D.Owaki et al. Quadruped Gait Transition From Walk to Trot to Rotary Gallop by Exploiting Head Movements, Living Machine 2016, July 2016, Edinburgh, Scotland, *accepted*.
2. D. Owaki et al. TEGOTAE-based Control of Bipedal Walking, Living Machine 2016, July 2016, Edinburgh, Scotland, *accepted*.
3. 鈴木朱羅, 大脇大, 石黒章夫, 頭部運動の活用による四脚ロボットの歩容遷移, 第28回自律分散システムシンポジウム, 2016.1.21, 広島大学(広島)

- 県東広島市).
4. 堀切舜哉 大脇大 他, 「手応え関数」に基づく適応的二足歩行性魚, 第 28 回自律分散システムシンポジウム, 2016.1.21, 広島大学(広島県東広島市).
 5. 堀切舜哉 大脇大 他, 足底感覚情報を用いた二足歩行制御の環境適応性に関する検証, SI2015, 2015.12.14, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).
 6. 鈴木朱羅, 大脇大, 石黒章夫, 環境を友とする四脚ロボット, 第 21 回創発システムシンポジウム, 2015.8.30, 諏訪東京理科大学(長野県).
 7. D. Owaki et al. TEGOTAE-based CPG for Quadruped Locomotion, AMAM2015, 2015. 6. 22. Boston, USA.
 8. D. Owaki et al. Experimental Verification of Bipedal Walking Control Exploiting Plantar Sensory Feedback, AMAM2015, 2015. 6. 22. Boston, USA.
 9. D. Owaki et al. Implicit Stiffness Control Embedded in Nonlinear Spring Enables Stable and Robust Running, AMAM2015, 2015. 6. 22. Boston, USA.
 10. D. Owaki, Minimal CPG Model for Interlimb Coordination in Quadruped Locomotion, ICRA2015 CPG Workshop, 2015. 5. 30, Seattle, USA (Invited Talk).
 11. D. Owaki et al, Load-dependent Interlimb Coordination in Bipedal Walking, ICRA2015 CPG Workshop, 2015. 5. 30, Seattle, USA.
 12. 堀切舜哉, 大脇大 他, 足底感覚を活用した二足歩行制御の実験的検証, ロボティクスメカトロニクス講演会(ROBOMECH2015), 2015.5.19, みやこめっせ(京都府京都市).
 13. 鈴木朱羅, 大脇大, 石黒章夫, 環境からの手応えを活用する四脚ロボットの CPG 制御, ロボティクスメカトロニクス講演会(ROBOMECH2015), 2015.5.19, みやこめっせ(京都府京都市).
 14. 堀切舜哉 大脇大 他, 足底感覚から生み出される「足応え」を活用した適応的二足歩行制御, 第 21 回創発システムシンポジウム, 2014.8.31, 諏訪東京理科大学(長野県).
 15. 石黒章夫, 大脇大, 多脚動物の脚間協調現象に内在する制御原理を探る, Motor Control 研究会, 2014.8.8, 筑波大学(茨城県つくば市), 招待講演.
 16. D. Owaki, Load-dependent Interlimb Coordination, Living machine 2016 Workshop, 2014. 7. 29, Milano, Italy, Invited Talk.
 17. D. Owaki et al. CPG-based Control of Bipedal Walking by Exploiting Plantar Sensation, CRAWAR2014, 2014. 7. 21, Poznan, Poland.
 18. D. Owaki et al., Mechanism of Quadruped Gait Transition, Dynamic Walking 2014, 2014.6.12, Zurich, Switzerland.
 19. 大脇大 他, 不思議な歩容 Canter の発現メカニズム, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会(ROBOMECH2014), 2014. 5. 26, 富山市国際会議場(富山県富山市).
 20. 大脇大 他, 柔軟な足部から生み出される足底感覚情報を活用した適応的動歩行制御, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会(ROBOMECH2014), 2014. 5. 26, 富山市国際会議場(富山県富山市).
 21. 森川玲於奈, 大脇大, 石黒章夫, 自発的歩容遷移を可能とする四脚ロボットの CPG 制御, 第 26 回自律分散システムシンポジウム, 2014.1.23, 東京大学(東京都文京区).
 22. D. Owaki et al. Why do quadrupeds exhibits exclusively either trot or pace gaits?, Dynamic Walking 2013, 2013. 5. 11, Pittsburgh, USA
- 〔図書〕(計 1 件)
1. 大脇大, 石黒章夫, 近代科学社, ロボット制御学ハンドブック, 2016, “17 章 二足歩行ロボット 17.3.4 受動走行”, ページ未定.
- 〔その他〕
- ホームページ等
 東北大学電気通信研究所石黒研究室
www.cmplx.riec.tohoku.ac.jp
- 受賞
1. 鈴木朱羅, 優秀講演賞, 第 22 回創発システムシンポジウム. 2015.8.30
 2. 大脇大 他, リスーピア賞, サイエンスアゴラ, 2014. 12. 24.
 3. D.Owaki et al. CLAWAR Association Best Technical Paper Award, Highly Commended paper award, CLAWAR2014 2014.7.22.
 4. 大脇大, トーキン財団奨励賞 2014.3.4
6. 研究組織
 (1) 研究代表者
 大脇 大 (OWAKI DAI)
 東北大学・電気通信研究所・助教
 研究者番号: 40551908