

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13903

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22392

研究課題名（和文）四足動物の2種類のギャロップ歩容を形成する力学原理の数理的解明

研究課題名（英文）Dynamical analysis of the mechanism under two types of quadrupedal galloping

研究代表者

上村 知也（Kamimura, Tomoya）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：80881789

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：四足動物は高速域でギャロップと呼ばれる歩容を用いる。本研究課題では、ギャロップにおいて体幹の曲げ伸ばし運動が重要な役割をもつことに着目し、その影響とメカニズムを数理的に解明した。まず、体幹柔軟性を持つシンプルなモデルのシミュレーションによって、体幹運動が地面から受ける反力を低減し、効率よく高速走行を達成させるメカニズムを説明した。また、シンプルな解析モデルを用いて、チーターのように体幹を曲げ伸ばしするための力学条件を求めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
動物の計測データに基づいて体幹運動が走行に与える効果は多く報告されているが、その力学原理は明らかではなかった。本研究の結果から、体幹運動がもたらす効果が力学的に明確になり、また体幹運動を達成するための条件が明らかになった。これらの成果によって動物の運動原理の理解を深められたほか、今後4脚ロボットを開発するにあたって設計指針も得られたことになる。

研究成果の概要（英文）：Quadruped animals use galloping in their highest speed range. In this study, we aimed to clarify the mechanism under which the spine movement contributes to galloping performance.

First, a simulation of a simple model with body flexibility was conducted to elucidate the mechanism under which the spine movement reduces the ground reaction force and achieves efficient high-speed running. The simple analytical model was also used to obtain the mechanical conditions for the cheetah-like body flexion and extension.

研究分野：ロボティクス

キーワード：4脚ロボット ギャロップ 体幹柔軟性

### 1. 研究開始当初の背景

四足動物は、高速走行時にギャロップと呼ばれる歩容を用いる。この歩容は、チーターのように体幹を曲げ伸ばしする2種類の飛翔期を持つロータリーと、ウマのように体幹を曲げる飛翔期のみを持つトランスバースに分類される(図1)。しかし、なぜこのような2種類の歩容が存在し、生物がこれらを選択的に用いるのか、その原理は未だに明らかではない。

生物の運動の支配原理は力学的に説明できると考えられる。学振特別研究員 DC2 (H30-R1 年度)において、前後対称な体幹とそれらを結ぶ内部回転自由度から構成されるシンプルな力学モデルを用い、2種類の飛翔期を持つ条件は、床反力を撃力で近似したときの作用点 $d$ が、慣性半径という慣性モーメントに関する量 $d_0$ を用いて $0 < d < d_0$ となることだと解析解の導出を介して明らかにした。また、チーターの計測結果もその条件を満たすことを示した(図2)。この成果は論文にまとめ、2021年4月に学術雑誌 Scientific Reports に採録された[Kamimura et al., 2021]。

チーターが2種類の飛翔期を持つ力学原理が説明できた一方で、体幹を曲げる飛翔期のみを持つ条件は $d < 0$ となった。しかし、ウマの計測データでは $d > 0$ となり、正しく説明できなかった。これらを統一的なモデルで適切に説明できれば、生物が2種類の歩容を選択的に用いる力学原理が明らかになるが、現在のモデルには限界があり、改良する必要があった。

### 2. 研究の目的

前後2つの剛体が連結されたモデルは、全体の回転と内部の相対回転の2つの回転自由度を持つ(図3a)。チーターのロータリーは体幹の上下動と体幹の相対回転によって構成され、体幹全体の回転はほとんど見られない(図3b)。これに対しウマのトランスバースは、体幹の上下動と全体の回転が大きく、相対回転は小さい(図3c)。しかし、これまでのモデルでは運動の前後対称性を仮定していたため、体幹全体の回転を表す自由度は含まれていなかった。この自由度をモデルに導入することで、チーターだけでなくウマも説明できるようになる。この改良したモデルを用いてそれぞれの歩容が形成される力学条件を解析的に求め、2種類の歩容が存在し、生物が選択的に用いるメカニズムを数理的に明らかにすることを目的としていた。

### 3. 研究の方法

#### 2種類の回転運動が及ぼす影響とそのメカニズム

まず、数値シミュレーションによって、2種類の回転運動が走行に与える影響の定性的な理解を行うことにした。図4に示すような、脚の運動を線形の直動バネで近似する平面2脚モデルを構築し、その周期解を数値計算によって探索した。得られた周期解のそれぞれに対して、移動速度・必要となるエネルギー・安定性を算出し、比較を行うことで、チーターのような体幹運動が高速走行にどのような影響を与えるかを調べた。

#### チーターのように2種類の飛翔期を持つ周期解が得られる条件の導出

上記の研究においては、チーターの特徴を持つ解とそうでない解が数値計算の結果として得られた。しかし、なぜこのように複数種類の解が存在するのか、また他にも解が存在し得るのか、どのような条件下で解が達成されるのかについては未解明なままであった。また、以前の研究[Kamimura et al., 2021]においては前後脚が同時に接地するという強い仮定を用いていたため、チーターのように前後脚の接地タイミングについて解析解を用いて言及することができなかつ

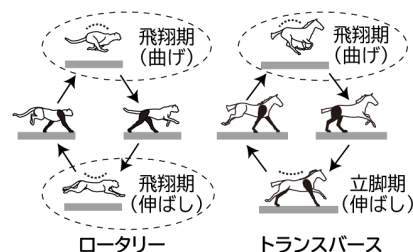


図1 2種類のギャロップ歩容

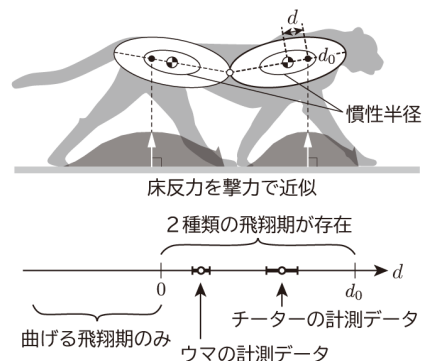


図2 シンプルモデルを用いて異なる飛翔期が得られる条件を解析

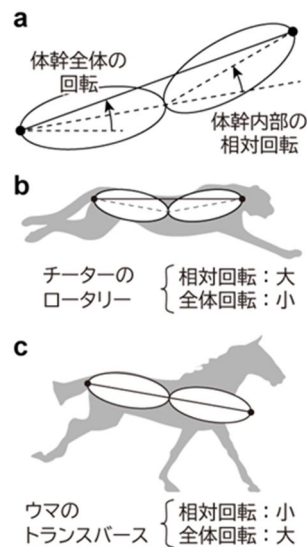


図3 2種類の回転自由度

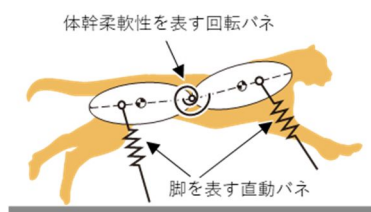


図4 2種類の回転自由度を持ち、脚をバネで近似したシンプルモデル

た。これらの問題に対して、図 4 のモデルにおいて非線形なダイナミクスを持つ脚の接地期を衝突モデルに置き換えて線形化することを考え、さらにシンプル化したモデルを構築した。

このモデルにおいて周期解を解析的に導出し、チーターのように体幹を曲げる飛翔期と伸ばす飛翔期を交互に繰り返す走行を実現する力学的な条件を求めた。

#### シンプルモデルに基づく前後 2 足ロボットの構築

これまでの研究で扱ってきたシンプルなモデルは、脚先と地面との衝突や、アクチュエータによる脚の駆動などの影響は無視してきた。しかし、実際の動物やロボットの運動ではこれらの効果は無視できない。そこで、シンプルモデルに基づいて実際にロボットを構築して実験を行い、モデルから得られた知見がどれほど実際の現象を捉えているか検証することを考えた。

現在所属している研究室には、軽量・高剛性の造形が可能な積層型 3D プリント(Markforged 社, MarkTwo)など、ラピッドプロトタイピングを可能にする機器が揃っており、これらを用いて図 5 に示すような前後 2 足ロボットを構築した。

このロボットに対して、足が接地している間は脚を後ろに動かし、足が離れている間は脚を前に動かすという単純な制御を施し、走行実験を行った。これによって、シンプルなモデルを模したロボットが実際に周期的な走行を可能にするかを検証した。

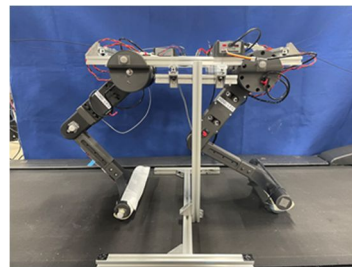


図5 シンプルモデルに基づいて設計開発した前後2足ロボット

## 4. 研究成果

### 【研究の主な成果】

#### 2 種類の回転運動が及ぼす影響とそのメカニズム

受動的なモデルの周期解を探索した結果、1. 体幹を大きく曲げ伸ばしする、2. 質量中心の上下動が小さい、3. 高速というチーターの走行に見られる 3 つの特徴を持つ解と、そうでない解の 2 種類が発見された。チーターの特徴を持つ解はさらに、走行に必要なエネルギーが小さく、安定性も高いことが明らかになった。

チーターの特徴を持つ解では、図 2 のように脚が接地したときに体幹バネが床反力を低減させるように運動している。このため脚にかかる負担が削減されるほか、体幹バネの運動が促進される一方で、身体全体の回転と上下動が抑制される。加えて、脚から受ける床反力による減速の効果が小さくなり、平均進行速度が大きくなる。すなわち、体幹柔軟性の適切な運用によって、効率良い高速走行が実現される。

この結果については 2020 年 12 月に開催された国内学会 SI2020 (優秀講演賞受賞) と 2021 年 6 月に開催された国際学会 SWARM2021 において講演を行った。

また、数理的なモデル解析の結果としてだけでなく、生物学の観点においても重要な示唆を与えることを主な貢献として、京都大学 松野教授(ロボット工学)や山口大学 和田教授(獣医学)らとの分野を横断した共同研究の成果として原著論文としてまとめ、2022 年 4 月に学術雑誌 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology に採録・出版された。

#### チーターのように 2 種類の飛翔期を持つ周期解が得られる条件の導出

接地期を衝突として近似したモデルにおいて周期解を解析的に導出した結果、チーターのように 2 種類の飛翔期を交互に繰り返すような解を実現する条件が、体幹における床反力の作用点と、その向きによって表されることが明らかになった。さらに、このような解の中でも、チーターのように前肢接地のあとに曲げる飛翔期を持ち、後肢接地のあとに伸ばす飛翔期を持つための条件もこれらの変数によって表されることが明らかになった。

以上の成果は、2021 年 9 月に開催された国内学会第 39 回日本ロボット学会学術講演会と、2022 年 5 月に開催された国際学会 ASCC2022 で報告を行った。

#### シンプルモデルに基づく前後 2 足ロボットの構築

脚はシンプルモデルと同様に弾性的に振る舞い、さらに脚先の接地状態に応じて前後に動かすように制御を施したところ、シンプルモデルのシミュレーション結果と似た数歩の走行が実現された。モデルの力学が持つ受動的な性質がこのような運動を実現させたと考えられる。

この結果は 2022 年 6 月に開催される国内学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022 で報告を行った。

### 【得られた成果の国内外に於ける位置づけとインパクト】

近年は、Boston Dynamics 社の SPOT や MIT Cheetah シリーズに代表されるように、四足

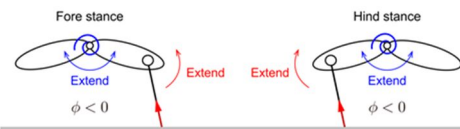


図6 体幹バネが床反力を受け流すことで、脚への負担が低減され、チーターの走行の 3 つの特徴が実現される

ロボットの研究開発が海外を中心に積極的に進められている。しかしこれらの多くは、動物の巧みな運動を十分に再現できていない。これに対して動物の運動は、身体が持つ力学によって規定され、これが運動の巧みさや効率の良さを生み出すと予想される。

このような動物の身体が持つ力学をシンプルなモデルを用いて明らかにしようとする研究が多く行われてきた。走行において脚は線形の直動バネでよく近似できるという観測結果から、身体を剛体とバネで近似したモデルを用いて四足走行が広く調べられてきた[Poulakakis et al., 2006; Gan et al., 2016; Polet, 2021 など]。さらに、四足動物の体幹運動に着目した研究も行われ、体幹運動がエネルギー効率や安定性を改善するメカニズムが明らかにされてきた[Cao & Poulakakis, 2013; Pouya et al., 2017; Yesilevskiy et al., 2018 など]が、どのようにすればチーターのような体幹曲げが実現されるかについては未解明なままであった。

本研究課題における成果は、四足動物、特にチーターの運動を理解し生物学的な知見を広げるのみならず、工学的にも生物学的にも重要なインパクトを及ぼし、国内外における脚ロボットの研究開発に重要な役割を果たすと考えている。

## 【今後の展望】

### チーターのように2種類の飛翔期を持つ周期解が得られる条件

接地期を衝突として近似したモデルにおいて、チーターのように前肢接地のあとに曲げる飛翔期を持ち、後肢接地のあとに伸ばす飛翔期を持つための条件が、実際にチーターの計測データにおいても満たされているかを確認する必要がある。なお、チーターの走行データは和田直己教授（山口大学、獣医学）との共同研究によって既に得られている。

### チーターとウマの高速走行の力学的共通点と差異

当初の目的の一つとして位置づけていた、チーターのロータリーギャロップとウマのトランスバースギャロップの比較については、現在用いているモデルではまだ言及できていない。今後の研究においてこれらの比較を進めていく必要がある。

本研究課題を進める中で、ロータリーとトランスバースの走行の本質的な違いは、体幹のピッチ方向の曲げだけでなく、体幹をねじる方向の柔軟性にもあると考えるに至った。今後の研究においては、これまで着目していた矢状面上の運動だけでなく、横断面上の運動に着目し、ウマとチーターの走行における脚の接地順がもたらす効果を明らかにしていくことで、これらの走行の力学的な差異が明らかになると考えている。

### ロボット実機を用いた実験

本研究課題で用いているシンプルモデルは、動物の運動の中で力学的に重要と予想される要素のみを抜き出し、チーターの実測データとの比較を行ってきた。しかし、今回用いたモデルはエネルギーの散逸やアクチュエータを含まないため、動物の運動において重要な役割を果たすと考えられる筋肉によるエネルギーの注入や神経による運動制御について議論できない。

今後の研究においては、シンプルな数理モデルだけでなく、体幹ジョイントを持つ前後2足ロボットを構築し、能動的な要素が走行に及ぼす影響を明らかにしていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kamimura Tomoya, Aoi Shinya, Higurashi Yasuo, Wada Naomi, Tsuchiya Kazuo, Matsuno Fumitoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Dynamical determinants enabling two different types of flight in cheetah gallop to enhance speed through spine movement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9631
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-88879-0	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 Kamimura Tomoya, Sato Kaho, Aoi Shinya, Higurashi Yasuo, Wada Naomi, Tsuchiya Kazuo, Sano Akihito, Matsuno Fumitoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Three Characteristics of Cheetah Galloping Improve Running Performance Through Spinal Movement: A Modeling Study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 825638
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fbioe.2022.825638	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6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐藤花保, 上村知也, 青井伸也, 日暮泰男, 和田直己, 土屋和雄, 佐野明人, 松野文俊
2. 発表標題 チーターの体幹曲げ運動が高速走行に与える影響のシンプルモデルを用いた動力学解析
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaho Sato, Tomoya Kamimura, Shinya Aoi, Yasuo Higurashi, Naomi Wada, Kazuo Tsuchiya, Akihito Sano, Fumitoshi Matsuno
2. 発表標題 Simple Model Analysis on Effects of Spine Movement on Quadrupedal Bounding
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上村知也
2. 発表標題 チーターが体幹の柔らかさを用いて高速走行するメカニズムの数理的解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021シンポジウム『“いいかげん”を科学して未来を創るソフトロボット学2』（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上村知也, 青井伸也, 日暮泰男, 和田直己, 土屋和雄, 松野文俊
2. 発表標題 接地期を衝突で近似したシンプルモデルを用いたチーターの高速走行の動力学解析
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya Kamimura, Shinya Aoi, Yasuo Higurashi, Naomi Wada, Kazuo Tsuchiya, Fumitoshi Matsuno
2. 発表標題 Dynamical condition to involve two types of flights in cheetah galloping using a simple model
3. 学会等名 The 13th Asian Control Conference (ASCC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村優真, 上村知也, 佐野明人, 松野文俊
2. 発表標題 4足走行シンプルモデルの受動的な性質に基づく前後2脚ロボットの走行実験
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022 (ROBOMECH2022)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

【プレスリリース】 チーターはなぜ地上で最も速く走れるのか？ <a href="https://www.nitech.ac.jp/news/press/2021/8979.html">https://www.nitech.ac.jp/news/press/2021/8979.html</a>  RESEARCH NEWS - A Speedy Trial: What It Takes to Be the Fastest Land Predator <a href="https://www.nitech.ac.jp/eng/news/2021/8995.html">https://www.nitech.ac.jp/eng/news/2021/8995.html</a>
--

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
---------	---------