

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14104

研究課題名（和文）四足動物の2種類のギャロップ歩容の異なる力学構造を生み出す原理の解明

研究課題名（英文）Dynamical difference between 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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：四足動物が高速域で用いるギャロップは、左右の足の運びが逆位相から外れるのが特徴で、脚が地面につく順番によってチーターなどが行うロータリーと、ウマなどが行うトランスバースに分類される。この差異を生み出す力学的要因として、体幹部のロール方向の回転自由度が重要な役割を果たすと予想している。そこで、ロール方向の体幹ねじれ自由度を持つシンプルなモデルを構築し、数値計算によって周期解を探索した結果、ロータリーとトランスバースに相当する接地順を持つ解が得られ、それぞれの解の力学的特性が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、生物学でも古くから議論されていたチーターとウマが用いる2種類のギャロップの差異について、動力学の立場から原理を説明する。また、ギャロップのパラメータ依存性が明らかになったことから、今後4脚ロボットを開発するにあたって、どのような歩容がそのロボットに可能であるか、また、どのような制御が必要となるかについて議論できるようになった。

研究成果の概要（英文）：Gallop used by quadrupeds at high speeds is characterised by the left and right legs moving out of opposite phases, and is classified according to the touchdown order into two types: rotary, which is performed by cheetahs, and transverse, which is performed by horses. We hypothesise that the rotational degree of freedom of the trunk in the roll direction plays an important role as a dynamical factor in generating this difference. A simple model with torsional degrees of freedom of the trunk in the roll direction was proposed, and periodic solutions were searched for by numerical calculation. The dynamical characteristics of each gait has been revealed by the difference in roll degree of freedom.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ギャロップ 4脚ロボット チーター ウマ シンプルモデル

### 1. 研究開始当初の背景

四足動物は高速域の走行でギャロップと呼ばれる歩容を用いる。この歩容は低・中速域のウォークやトロットと違って左右の脚の運びが逆位相から外れる特殊な歩容（非対称歩容）であり、脚の接地パターンによって2種類に分類される。チーターが行うロータリーでは後肢が離地したあと、Extended flight と呼ばれる飛翔期を経て同じ側の前肢が接地し、Gathered flight に至る（図1a）。これに対し、ウマが行うトランスバースでは Gathered flight しか存在せず、後肢が離地する前に反対側の前肢が接地する（図1b）。これらの歩容の違いは古くから調べられてきたが、なぜギャロップは非対称性を持つのか、そしてなぜ2種類のギャロップが存在し、動物がこれらを選択的に用いるのか、その原理は明らかではなかった。

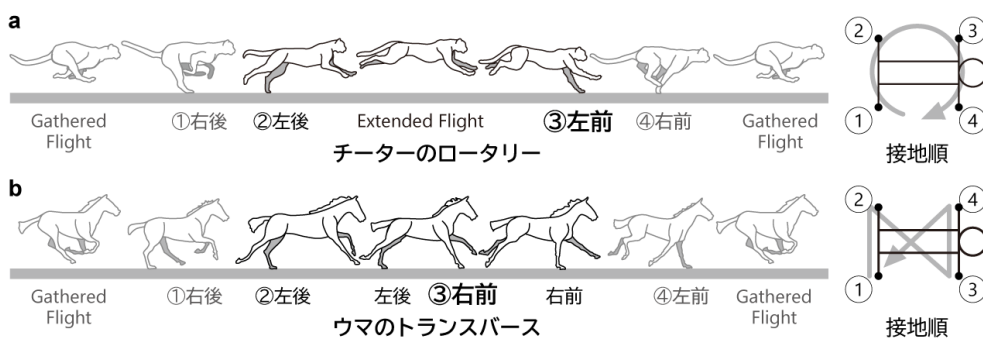


図1 四足動物が行う2種類のギャロップ。(a) ロータリーは後肢が離地したあと Extended flight を経て同じ側の前肢が接地する。(b) トランスバースは Extended flight を含まず、後肢が離地する前に反対側の前肢が接地する。

ギャロップ歩容の非対称性と2種類のギャロップの違いは、差異 : Extended flight の有無と、差異 : 接地する左右脚の順番の2点から形成されていると考えた。動物の運動の支配原理は力学的に説明できる。四足動物の走行は、ピッチ方向とロール方向にそれぞれ体幹の全体回転と相対回転の2つの回転自由度を持ち、ピッチ方向だけでなく、ロール方向においても歩容に依存して全体回転あるいは相対回転のいずれかが主要な運動として現れることで、差異 と がそれぞれ形成されていると考えられる。しかしこれらの差異が形成されるメカニズムと、動物種によって2種類の歩容を選択的に用いる理由は明らかではない。ギャロップにおいて2種類の差異を形成する2方向の主要な回転が現れるメカニズムを明らかにすることで、これらの未解明な問題を説明できるようになると考えた。

### 2. 研究の目的

2種類のギャロップの間に存在する差異が生まれる力学原理を明らかにする。特に、体幹部のピッチ方向とロール方向の運動がギャロップに与える影響に着目する。チーターとウマがそれぞれ選択的にいずれかのギャロップを用いる理由を明らかにする。さらに、それぞれのギャロップのパラメータ依存性を明らかにすることによって、今後の四足ロボット開発の指針とする。

### 3. 研究の方法

シンプルなモデルを構築し、解析的に求めた周期解を用いて、ピッチとロールそれぞれの方向の体幹自由度がギャロップに与える影響を明らかにする。ここから、2種類の差異が形成され、それらによってギャロップの非対称性と2種類の歩容が生成されるメカニズムが数理的に理解できる。また、得られた条件について動物の運動データを用いて検証を行うことで、動物種によって2種類のギャロップが選択的に用いられる理由を明らかにする。

#### 【ピッチ方向の運動を検証するためのモデル】

ピッチ方向の曲げ運動については、矢状面に拘束され、体幹部にピッチ方向の曲げ自由度を持つ前後2脚のシンプルモデルを構築した（図2）。なお、このモデルの解析は研究活動スタート支援（20K22392）でも行ったが、そこでは体幹部が一般的な剛性を持つバネで近似されていた。これに対して実際のチーターは、背側に強い背筋を持つ背骨周りの筋骨格系構造の特徴を考慮できておらず、運動解析に限界があった。そこで、シンプルモデルを改良し、チーターのような体幹曲げ剛性の非対称性が走行に与える影響を調べた。いずれのモデルにおいても数値計算によって周期解を求め、得られた解における進行速度や安定性を比較した。

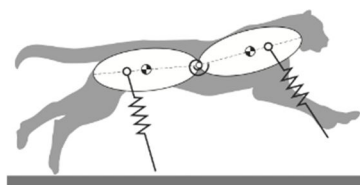


図2 体幹部にピッチ方向の曲げ自由度を持つ前後2脚モデル

【ロール方向の運動を検証するためのモデル】

ロール方向の曲げ運動については、図3に示すような、体幹部にねじれ自由度を持ち、脚が4本ついたモデルを構築した。このモデルは、4本の脚が異なるタイミングで接地・離地を行い、数値計算によって周期解を探索し、得られた解はそれぞれ脚の接地順によって歩容を特定し、分類した。さらに、チーターとウマのパラメータを用いて、それぞれの動物種において得られるギャロップの種類と、そのような結果が得られる力学原理について検証した。

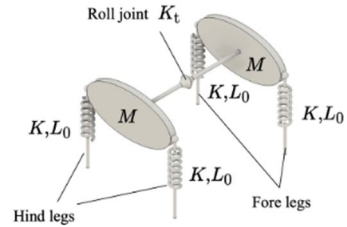


図3 体幹部にロール方向のねじれ自由度を持つ4脚モデル

【ロボットの構築】

シンプルモデルで得られた知見を実機実験によって検証するために、ロボット実機の開発を行った。特に、脚がバネのように振る舞うという身体の受動的な振る舞いはモデル解析でも重要な役割を果たすため、ロボットの脚はバックドライバビリティの高い準ダイレクトドライブのサーボモータ (RMD-X8, MyActuator, 減速比 6:1) を用いて、コンプライアンス制御を行い、仮想的にバネのように振る舞うように設計した。ロボットはまず矢状面のダイナミクスについて検証するため、前後2脚で構築し、体幹部はトレッドミル上で矢状面に拘束した。

4. 研究成果

【ピッチ方向の運動】

ピッチ方向に一樣な体幹曲げ剛性を持つシンプルモデルについて、周期解を探索した結果、それらの解は解空間内の連続性から2種類に大別され、さらにこれらは接地期における体幹の姿勢が異なることが明らかになった(図4)。これらのうち、接地期に体幹を山形に曲げている解では、床反力と体幹部のバネが及ぼす力がいずれも体幹を伸ばそうとする向きで一致するため、床反力が小さく抑えられる。このため、過度な床反力を受けにくくなることに加えて床反力による過度な加減速が発生しにくくなるというメカニズムが明らかになった。上記の結果は原著論文としてまとめ、Frontiers in Bioengineering and Biotechnology に採録された。さらに、体幹自由度を活用したチーターの高速走行についてのこれまでの研究成果を日本ロボット学会誌特集の解説記事としてまとめた。

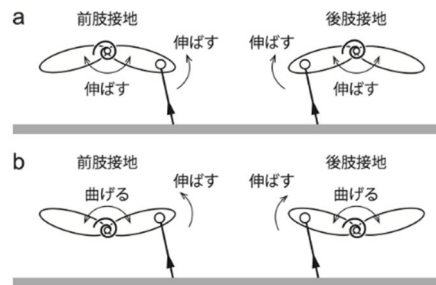


図4 接地期に体幹を曲げている解(a)と、伸ばしている解(b)

続いて、体幹曲げの非対称性によってもたらされる効果を調べた。前後体幹が直線上にならぶ瞬間をしきい値として、曲げるときと伸ばすときに体幹バネの剛性が変化するようなモデルを構築し、そのモデルに対して周期解探索を行った。結果として、チーターと同様に曲げるときに硬く、伸ばすときに柔らかい体幹剛性をもたせた場合には、図4aのような振る舞いをする解において、体幹剛性が対称な場合と比較して移動速度や安定性が向上するという結果が得られた。この結果は国内学会 ROBOMECH2023 と第36回自律分散システムシンポジウムにおいて口頭発表を行った。また、現在原著論文を執筆中である。

【ロール方向の運動】

体幹部にロール方向のねじれ自由度を持つシンプルな力学モデル(図3)について周期解を探索した結果、2種類のギャロップを含む様々な歩容の周期解が得られた。それぞれのギャロップは、2番目に接地する後肢が離地する瞬間のロール方向の運動に顕著な差が見られた(図5)。すなわち、チーターのようなロータリーでは、前後体幹のねじれが小さいため、同側の脚が連続して接地する。これに対して、ウマのようなトランスバースでは、体幹ねじれが大きいため、対角の脚が連続して接地する。これらの解は、解空間内の異なる部分空間に存在することから、2種類のギャロップは、力学的に異なる運動であることが示された。

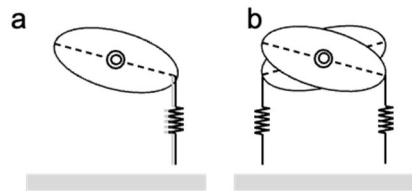


図5 先に接地する前肢が接地する直前の体幹姿勢。(a)ロータリー。(b)トランスバース。

また、モデルにチーターのパラメータを代入すると、ロータリーの解のみが、ウマのパラメータを代入するとトランスバースのみが得られた。この結果から、動物種によってギャロップが選択的に用いられるのは、動物の意図的な制御によるものではなく、力学的にいずれか一方しか実現できないためである可能性が示唆された。

上記内容は、第35回自律分散システムシンポジウム、第41回日本ロボット学会、第36回自

律分散システムシンポジウムに加えて、国際学会 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation で口頭発表を行った。現在原著論文を執筆中である。

#### 【ロボットの構築】

矢状面で拘束された前後2脚ロボットを構築した(図6)。前後脚はそれぞれ2リンクで構成され、脚のコンプライアンスを再現するため、膝関節はバネのように振る舞うようにトルク制御を行った。肩(股)関節部は、一定のリズムを刻む神経系 Central Pattern Generator の働きを模した位相振動子の位相に従って前後に動く。体幹部は一つの剛体として設計した。このモデルについて走行実験を行った結果、時速 1.6 km で安定して走行することが確認された。また、走行開始時には、1周期のうちに前肢が2回、後肢が1回接地するような挙動であったが、やがて前肢・後肢ともに1回ずつ接地するという自然な運動に引き込まれていく様子も確認された。この成果については第35回自律分散システムシンポジウムと、国際学会 The 11th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation で口頭発表を行った。また、アウトリーチ活動として、2024年3月に名古屋市で開催された、小中高校生向けロボットコンテストの一つであるロボカップジュニアジャパンオープン2024の併設イベントでデモンストレーションを行った。

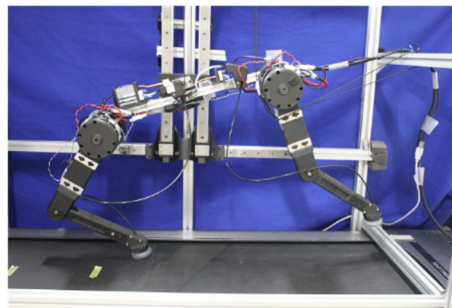


図6 モデルの挙動に基づいて設計した、前後2脚ロボット

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 1件）

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 -

1. 著者名 上村知也	4. 巻 41
2. 論文標題 チーターが体幹運動を活用して高速に走行する力学原理	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 266～270
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.41.266	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 Sakurai Yusuke, Kamimura Tomoya, Sakamoto Yuki, Nishii Shohei, Sato Kodai, Fujiwara Yuta, Sano Akihito	4. 巻 38
2. 論文標題 Bipedal Robot running: human-like actuation timing using fast and slow adaptations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 577～588
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2024.2336255	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

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
4. 発表年 2022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 シンプルな4足モデルを用いたチーターとウマのギャロップの動力学解析
3. 学会等名 第35回自律分散シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡大地, 上村知也, 中村優真, 佐野明人, 松野文俊
2. 発表標題 神経振動子とチーター身体のシンプルモデルに基づくロボットの自律走行
3. 学会等名 第35回自律分散シンポジウム
4. 発表年 2023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 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 Daichi Oka, Tomoya Kamimura, Yuma Nakamura, Akihito Sano, Fumitoshi Matsuno
2. 発表標題 Bounding of a two-legged robot using CPG-based controller inspired by a cheetah simple model
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoya Kamimura
2. 発表標題 Dynamical difference between two types of quadrupedal galloping is determined by torsional dynamics of torso: a modeling study
3. 学会等名 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2024), Workshop on "Agile Movements II: Animal Behavior, Biomechanics, and Robot Devices" (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tomoya Kamimura, Yuma Nakamura, Yuya Oshita, Daichi Oka, Shutaro Shinagawa, Akihito Sano, and Fumitoshi Matsuno
2. 発表標題 Bounding of a Sagittal Robot Using CPG-based Controller Inspired by a Cheetah Simple Model
3. 学会等名 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2024), Workshop on "Agile Movements II: Animal Behavior, Biomechanics, and Robot Devices"
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大下悠也, 上村知也, 佐野明人, 松野文俊
2. 発表標題 非対称な体幹剛性がチーターの走行に与える影響の動力学解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023 (ROBOMECH2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上村知也, 安達真永, 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 チーターとウマのギャロップを生み出す動力学原理のシンプルモデルを用いた解析
3. 学会等名 第41回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上村知也, 安達真永, 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 体幹ねじれ運動がキャンター・トランスパース・ロータリーの3種類のギャロップを規定する力学原理
3. 学会等名 第36回自律分散シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大下悠也, 上村知也, 安達真永, 和田直己, 佐野明人, 松野文俊
2. 発表標題 チーターの走行における体幹剛性の非対称性の動力的役割
3. 学会等名 第36回自律分散シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 品川秋太郎, 上村知也, 安達真永, 佐野明人, 松野文俊
2. 発表標題 イヌが用いる2種類のギャロップのシンプルモデルによるパラメータ依存性解析
3. 学会等名 第36回自律分散シンポジウム
4. 発表年 2024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
---------	---------