

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月21日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656185

研究課題名（和文） ムカデなど多足歩行生物の蛇行生成メカニズムの解明とその工学的応用

研究課題名（英文） Elucidation of body undulation mechanism in centipede locomotion and application to robotics

研究代表者

青井 伸也 (AOI SHINYA)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60432366

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、ムカデなど多足歩行生物の蛇行生成メカニズムの解明と工学的応用に向けて、次の4つのテーマを実施した。1. ムカデの数理モデルに基づく力学特性の把握、2. シンプルモデルに基づく力学構造の明確化、3. ロボット実験に基づく工学的実証、4. ムカデ計測データに基づく生物学的妥当性の検証。これらの結果から、数理モデルやロボットでは、ある速度を超えると超臨界ホップ分岐を介して蛇行が出現し、速度に依存する蛇行の出現や蛇行の振幅や波数の変化などムカデと同様の傾向を持つことが明らかにされた。これらの研究成果をまとめたものは Physical Review E に採録され、更には、Nature Physics の News & Views で紹介された。

研究成果の概要（英文）：The following four themes were performed for elucidation of body undulation mechanism in centipedes and application to robotics: 1. Simulation using a centipede model, 2. Analysis using a simple model, 3. Experiment using a robot, and 4. Comparison with measured data of centipedes. The results showed that body undulations in the simulation and robot were produced by a supercritical Hopf bifurcation and the simulation and robot had similar trends to centipedes in the appearance, amplitude, and wave length of body undulations with locomotion speed. These results were accepted in Physical Review E, which has been highlighted in News & Views of Nature Physics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

ムカデは多くの体節と足を持つ節足動物であり、その陸上歩行において体節を曲げ、足を動かし、進行波を作るという非常に特徴的な歩行形態を取りながら、素早く機動性の高い運動を実現している。このようなムカデの体節に見られる蛇行運動は、足の素早い運動のために体節が蛇行せざるを得なくなっているためであり、ムカデにとってこれはむしろ有害で、体節を駆動する筋はこの蛇行運

動を阻止するように働いていることが従来から示唆されている (Manton, J. Linn. Soc., 1965)。これは体幹と四肢を調和して動かすことで効率の良い歩行を実現している陸上4足動物とは根本的に異なっている。なぜ、ムカデは進化の過程でこのような歩行形態を獲得したのだろうか？また歩行中、蛇行することに重要な意味はあるのだろうか？更には、ムカデの体節の筋は、蛇行運動を阻止するのではなく、むしろ促進させる働きを持

っているというこれまでの予測に反する報告も得られている (Anderson *et al.*, J. Exp. Biol., 1995). このようなムカデの蛇行運動に関する生物学的な未解決問題は、これまで多くの研究者の興味を引きつけているが、従来研究からは未だ明確な答えは得られておらず、新しい研究パラダイムの構築が必要とされていた。

2. 研究の目的

これまで生物の有する優れた運動生成能力の解明に向けて、バイオメカニクスや運動神経生理学など、多くの分野で研究が行われてきた。バイオメカニクスでは、骨格系の材料・構造力学的な研究と共に、筋肉のエネルギー効率の検討など力学的な視点から研究を行い、運動神経生理学では、筋骨格系の動きを支配し調整する神経系の役割に関して神経生理学的な視点から研究を行っている。しかしながら、歩行運動は神経系と筋骨格系、そして環境との相互作用によって形成される秩序だった力学現象であり、従来のような要素的な研究のみから真に理解するには限界がある。近年これらの研究を統合した、より統一的な視点から歩行生成に関する全体像を理解することを目指したシステム論的な研究が始まりつつある。そこで本研究では、数理モデリング・動力学シミュレーション・数理解析・ロボット実験・生体計測に基づく多角的な研究アプローチを相補的に進めていくことで、ムカデなど多足歩行生物の蛇行生成メカニズムにおける力学構造を明らかにし、その力学原理を脚型ローバなどロボティクスに応用することで新しい設計論の開発を目指し、生物学にも工学にも寄与する新しい研究パラダイムの構築を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、1. ムカデの数理モデルに基づく動力学シミュレーションによる蛇行の力学特性の把握、2. シンプルモデルに基づく数理解析による力学構造の明確化、3. ロボット実験に基づく工学的実証、4. ムカデの計測データ解析に基づく生物学的妥当性の検証、これら4つのアプローチを相補的に進めていくことで、ムカデなど多足歩行生物の蛇行生成メカニズムを力学的に明らかにし、優れた運動機能を有する脚型ローバの開発など工学的応用を目指した。

(1) ムカデの数理モデルに基づくシミュレーションによる力学特性の把握

ムカデの実現する蛇行運動の力学原理の解明に向けて、ムカデの数理モデルを構成し、動力学シミュレーションを介してその力学特性を詳細に解析した。特に、1つの体節と1対の脚から構成されるモジュール要素が

ヨー関節を介して直列に結合されるモデルを用い、体節間のヨー関節には、ムカデの蛇行を阻止する力学要素として回転バネを用いた。

(2) シンプルモデルに基づく数理解析による力学構造の明確化

蛇行運動を生成する力学構造を明確にするために、(1)の動力学シミュレーションの解析結果に基づいて、蛇行生成において本質的な要素を抽出することで低次元化したシンプルな力学モデルを構成し、数理解析を行った。

(3) ロボット実験に基づく工学的実証

(1)、(2)より明らかにされる蛇行生成メカニズムの妥当性を検証するために、(1)で構築した1つの体節と1組の脚をモジュールとして、回転バネを介して結合されたムカデ型のロボットを構築し、実機実験を行った。

(4) ムカデの計測データ解析に基づく生物学的妥当性の検証

(1)-(3)から得られる結果の生物学的妥当性を検証するために、ムカデの歩行計測データと、シミュレーションや数理解析、ロボット実験の結果を比較した。

4. 研究成果

(1) ムカデの数理モデルに基づくシミュレーションによる力学特性の把握

後述するムカデとの関連性を調べるために、歩行速度を変えてムカデの数理モデルの動力学シミュレーションを行った。その結果、速度が遅い場合は蛇行運動は生成されず、全ての体節が平行のまま歩行する直線歩行が実現された。しかしながら、ある速度を超えると蛇行運動が出現した。この蛇行運動に関して速度依存性を調べると、歩行速度の増加に応じて蛇行運動の振幅と波長が大きくなる特性を有することが明らかにされた (図1A)。

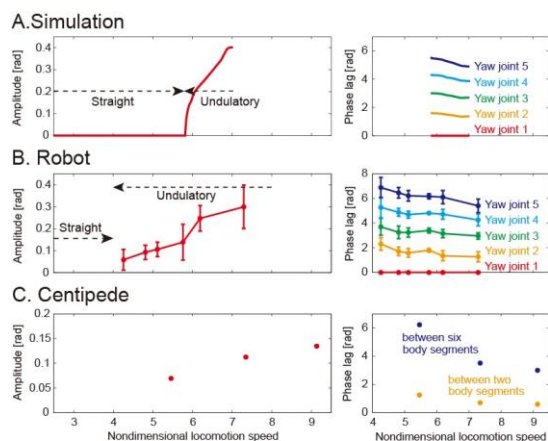


図1. 蛇行運動の振幅と位相のシミュレーション、ロボット、ムカデの比較

(2) シンプルモデルに基づく数理解析による力学構造の明確化

(1)で出現した速度に依存する蛇行運動の力学的メカニズムを明確にするために、接地時に脚が地面から受ける力学要素を幾何学的な拘束条件に置き換え、重要な運動要素のみを取り出した2次元平面(進行方向と横方向)上のシンプルな力学モデルを構築し、数理解析を行った。その結果、シミュレーションで確認された蛇行運動は、直線歩行運動の超臨界ホップ分岐を介した不安定化が原因であることが明らかにされた(図2)。更に、様々なパラメータにより記述される力学系を明確にするために無次元化を行い、この不安定化に主要なパラメータを明らかにした。

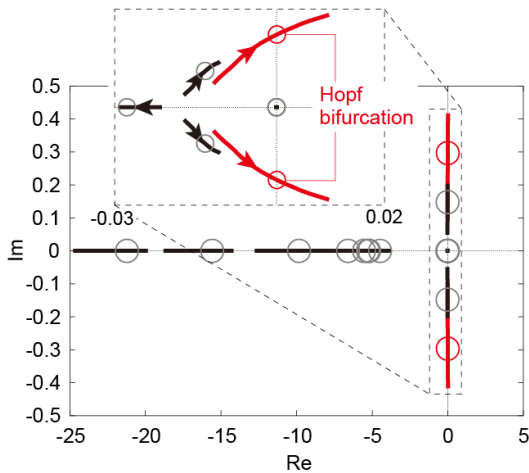


図2. 速度に対するフロケ指数の変化とホップ分岐

(3) ロボット実験に基づく工学的実証

ロボット実験の結果、(1)で得られた結果と同様に、速度が遅いと蛇行運動は見られなかったが、ある速度を超えると蛇行運動が出現した(図3)。この蛇行運動の速度依存性を調べると、(1)の結果と同様に、歩行速度の増加に応じて蛇行運動の振幅と波長が大きくなることが確認された(図1B)。

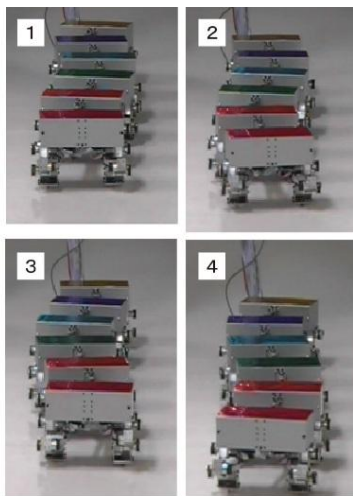


図3. ムカデ型ロボット実験における蛇行の出現

(4) ムカデの計測データ解析に基づく生物学的妥当性の検証

ムカデの歩行運動の計測から、速度が遅いと蛇行運動は生成されないが、ある速度を超えると蛇行運動が出現し、速度の増加に応じて、蛇行運動の振幅や波長が大きくなる特性を持つことが知られている(Manton, J. Linn. Soc., 1965)(図4)。これらの特性は、上述したシミュレーションやロボット実験で見られる結果と定性的に同等である。そこで、更に定量的にこれらの特性を比較するために、Andersonら(J. Exp. Biol., 1995)の計測データを用いてシミュレーションやロボット実験結果と比較した(図1C)。ただしそれぞれサイズは異なるので、全て基準長さや質量などを用いて規格化している。その結果、無次元化量を用いることで、歩行速度に依存する蛇行運動の出現や、振幅、波長の変化に対して、定量的にも同等の傾向が見られることが明らかにされた。

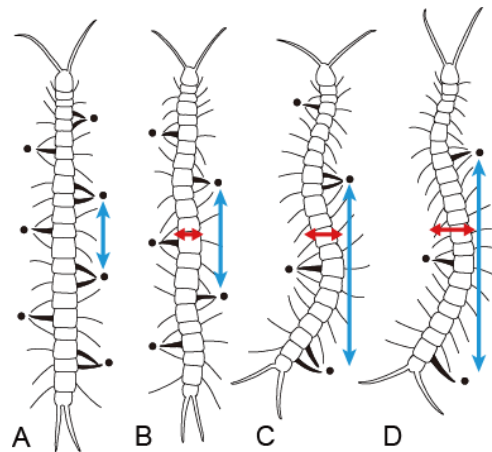


図4. 速度に対するムカデの蛇行運動の変化

これらの研究成果をまとめたものはPhysical Review Eに採録され、更には、Nature PhysicsのNews & Viewsにおいて1ページにわたって紹介された(A. Klopper, "Biomechanics: Have legs will travel", Nature Physics, 9:134, 2013)。

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2件)

- (1) S. Aoi, Y. Egi, and K. Tsuchiya, "Instability-based mechanism for body undulations in centipede locomotion", Physical Review E, 査読有, Vol. 87, No. 1, 2013, 012717-1-11
DOI:10.1103/PhysRevE.87.012717
- (2) S. Fujiki, S. Aoi, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Emergence of

hysteresis in gait transition of a hexapod robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting”, Proceedings of the 4th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 査読有, 2012, 1638-1643

DOI:10.1109/BioRob.2012.6290733

[学会発表] (計4件)

- (1) 青井伸也, “ヒトや動物、ロボットの歩行力学と制御”, GCOE 集中講義「数学と自然科学・社会科学 III」, 2012年12月25日, 京都大学理学研究科.
- (2) 青井伸也, “生物に学ぶ適応的自律移動メカニズム”, 日本航空宇宙学会 関西支部 第437回航空懇談会, 2012年7月13日, 京都大学工学研究科.
- (3) S. Fujiki, S. Aoi, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, “Emergence of hysteresis in gait transition of a hexapod robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting”, the 4th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2012年6月27日, Rome, Italy.
- (4) 藤木聡一郎, 青井伸也, 幸田武久, 泉田啓, 土屋和雄, “位相リセットを有する非線形振動子に駆動される6脚ロボットの歩容遷移に現れるヒステリシス”, 第24回自律分散システム・シンポジウム, 2012年1月27日, 神戸ファッションマート・コンベンションルーム.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青井 伸也 (AOI SHINYA)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60432366

(2) 研究分担者

土屋 和雄 (TAUCHIYA KAZUO)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 70227429

(3) 連携研究者 なし