

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630097

研究課題名(和文) 不安定性に着目した多足生物の機敏な歩行生成機序の解明と高機動性脚ロボットの開発

研究課題名(英文) Elucidation of mechanism of maneuverable multilegged locomotion based on straight walk instability and development of maneuverable multilegged robot

研究代表者

青井 伸也 (Aoi, Shinya)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：60432366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、直線歩行の不安定化という力学的性質に着目し、ムカデなど多足生物の機敏な歩行生成機序の解明と高機動性を有する脚ロボットの開発を目指した。特に、機動性の検証実験として、歩行中の旋回タスクに着目し、次の3つのテーマを実施した。1. 旋回タスクを可能とする多足ロボットの改良、2. 直線歩行の不安定化の検証、3. 旋回タスクの実施と直線歩行安定性と旋回機動性の関係の解明。これらの結果から、直線歩行不安定性が機動性に寄与することが解明され、体軸柔軟性やそれに付随した安定性の制御による機動性向上など、生物の歩行戦略とも関連した重要な示唆が得られた。現在これらの成果をとりまとめ、論文を投稿中である。

研究成果の概要(英文)：The following three themes were performed for elucidation of mechanism of maneuverable multilegged locomotion based on straight walk instability and development of maneuverable multilegged robot: 1. Improvement of a multilegged robot to perform a turning task, 2. Verification of the straight walk instability, and 3. Performance of the turning task and investigation of the relationship between straight walk stability and turning maneuverability. These results show that straight walk instability contributes to turning maneuverability, which suggests important control of body axis flexibility to manipulate straight walk stability and maneuverability related to animal locomotion strategies. We submitted a research paper based on these results.

研究分野：工学

キーワード：多足歩行生物 ムカデ 脚ロボット 不安定性 高機動性

1. 研究開始当初の背景

原発事故現場や地震・津波の被災地など人の立ち入ることが困難な場所で調査や作業を行うロボットの開発が求められている。そこでロボットは基本的に遠隔で操作されるが、瓦礫や段差などのある過酷な環境のために、未だ困難な課題である。また近年、人類の未知の領域への科学的・技術的興味から惑星探査が注目を浴びており、様々な探査ローバが活躍してきている。ただし、距離的な問題から遠隔での操作は不可能であり、完全に自律的に動き回り探査を行うことが要求される。例えば未知で過酷な環境であっても高い踏破性を持ち、柔軟に対応できる頑健な移動能力を有することが必要とされている。

このような問題に対して、多様な環境への適応性や素早く機動性が高く頑健な運動の生成など、生物の有する優れた運動生成能力を参考にしようという気風が高まっている。実際、瓦礫や岩場などの複雑な地形では、単純な車輪・クローラ構造だけでなく、生物のような脚構造を利用することの有効性が示唆されている。例えば、アメリカの Boston Dynamics では、瓦礫や岩場など様々な環境で頑健に移動できる 4 足歩行ロボット (BigDog) を開発しており、脚構造の必要性は現実のものになりつつある。ただし、生物のような優れた運動機能を実現する一般的な設計原理は未だ明らかにはされておらず、従来技術を越えるブレークスルーが求められている。

2. 研究の目的

工学的設計論において、生物の有する優れた運動生成能力を参考にする際、単に生物と同じような外見を持ち、動きを模倣するロボットを作成するよりも、むしろ生物の運動生成機序を解明してその原理を抽出し、それを工学的に応用することこそが重要である。本研究では、多様な環境において頑健で俊敏な歩行を実現しているムカデなど多足歩行生物に着目した。ヒトの 2 足歩行や動物の 4 足歩行に比べて、ムカデのような多くの脚を用いた多足歩行は転倒回避性や耐故障性 (脚の損失など) などに優れているが、歩行中地面に拘束される多くの足は、急旋回などの素早く機動性の高い運動の障害になる可能性がある。ムカデの機敏な運動生成機序は生物学的にも未だ不明確であり、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る。

ムカデと同様機敏な運動を行うゴキブリに関して、本質的な要素を抽出したシンプルな力学モデルに基づく解析が行われている (Holmes et al., Biol Cybern, 2000)。その結

果、足の動かし方を上手く調節することで胴体への力の作用を変化させ、これをパラメータとするサドルノード分岐により、真っ直ぐ歩く直線歩行の安定性が変化することが示されている。そしてこの直線歩行の不安定化こそが急旋回のような機動性の高い運動に寄与することが示唆されている。すなわち、素早い旋回を実現するために力学的不安定性を積極的に利用しているということであり、生物の優れた運動知能をうかがわせるものである。それに対して本研究代表者は、これまでムカデの力学モデルや多足ロボットを用いた実験から、歩行速度もしくは体節間剛性をパラメータとする超臨界ホップ分岐により、ゴキブリと同様直線歩行が不安定化することを示している (Aoi et al., Phys Rev E, 2013)。そこで本研究課題では、ゴキブリから示唆される直線歩行の不安定性と機動性の関係、並びにムカデの直線歩行の不安定化に基づいて、ムカデなど多足生物の機敏な歩行生成機序を解明し、この不安定性を利用することで、高機動性を有する脚ロボットの開発を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、多足歩行生物の機敏な運動の生成原理を力学的観点から明らかにし、その力学原理を工学的に応用することを目的として、次の 3 つのテーマを実施した。

(1) 旋回タスクを可能とする多足ロボットの改良

本研究では、脚ロボットの機動性を検証する実験系として、歩行中の旋回タスクに着目した。ただし、研究代表者がこれまでに構築してきた多足歩行の詳細な数理モデルやロボットは、一对の脚を持つ体節が回転バネを搭載した関節を介して結合されたものであり、外界からの入力を持たなかった。そのため、例えば地面におかれたターゲットの位置を取得し、それに追従することで旋回タスクを実施するような実験が行えなかった。そこで本研究では、このような旋回タスクが実施できるように、これまでの多足ロボットを改良した。

(2) 直線歩行の不安定化の検証

本研究代表者のこれまでの数理モデルに基づくフロケ解析から、体幹柔軟性をパラメータとする超臨界ホップ分岐より、直線歩行が不安定化することが示唆されていた。改良したロボットの回転バネ定数を変えることで、実際に不安定化することを実証し、その分岐点を同定した。

(3) 旋回タスクの実施と直線歩行安定性と旋回機動性の関係の解明

初期の進行方向から離れたところにあるターゲットに追従させる急旋回実験を様々な回転バネ定数に対して行い、旋回完了時間や進行方向、軌道の目標値からのずれを評価指標として定め、直線歩行の不安定性と旋回性能との関係を調べた。

4. 研究成果

(1) 旋回タスクを可能とする多足ロボットの改良

図 1 に改良した多足歩行ロボットを示す。具体的には、先頭モジュールに新たに測域センサを搭載することで、地面におかれたターゲットの位置を取得し、更に先頭モジュールの進行方向を変化させる関節をその両脚に追加して、測域センサから情報に基づいてそれらを制御することで、ロボットの進行方向を変化させることを可能とした。

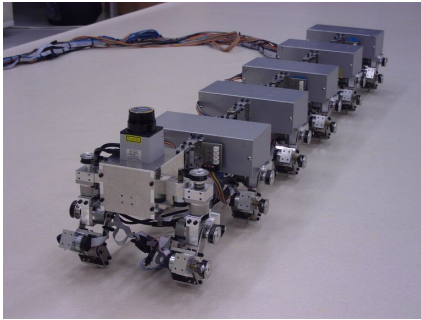


図 1. 改良した多足歩行ロボット

(2) 直線歩行の不安定化の検証

回転バネ定数が大きいと、直線歩行は安定に存在したが (図 2A), ある値を超えて小さくなると蛇行運動が出現した (図 2B). そこで、バネ定数毎の蛇行運動の振幅を用いて、ホップ分岐が生じる分岐点を同定した (図 3).

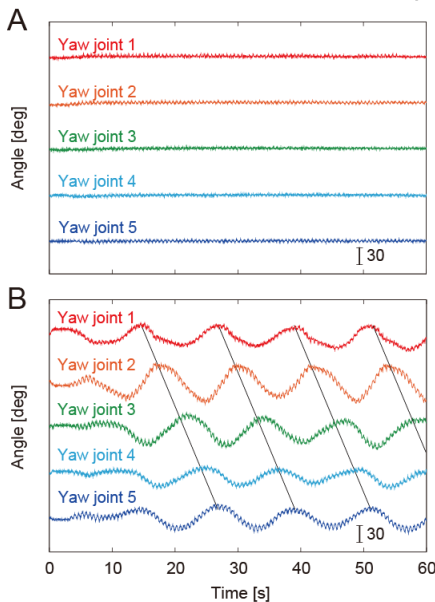


図 2. 大きいバネ定数では直線歩行が安定で蛇行は見られないが (A), ある値を超えて小さくなると蛇行が出現する (B).

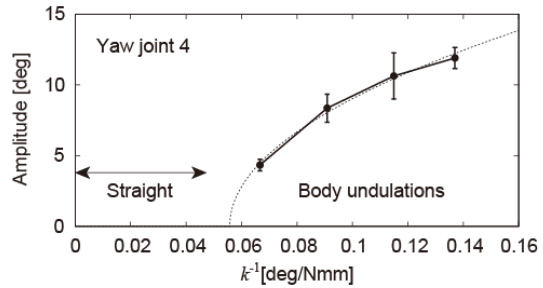


図 3. 蛇行振幅に基づく分岐点の同定

(3) 旋回タスクの実施と直線歩行安定性と旋回機動性の関係の解明

旋回実験を行った結果、直線歩行が不安定化する分岐点近傍では、進行方向が容易に変えられ (図 4B), 先頭モジュールの床の上の軌道もターゲットからそれほど外れることなく追従した (図 5B). それに対して、回転バネ定数が大きく、直線歩行が安定な場合には、進行方向を変えるのに時間がかかり (図 4A), 軌道もターゲットに対して大きく膨らんでしまった (図 5A). そして、直線歩行の不安定性が強く、回転バネ定数がとても小さい場合には、進行方向は容易に変えられるが (図 4C), 直線歩行の不安定性のために軌道はとても揺らいでしまった (図 5C). このような回転バネ定数に依存した旋回性能を、旋回完了時間や進行方向、軌道の目標値からのずれを評価指標として定めて調べた結果、直線歩行の不安定性が旋回性能に寄与することが確認できた (図 6). ただし、不安定性が強い場合は、歩行形態を維持できず、安定性と機動性はトレードオフの関係にあることも明らかになった。

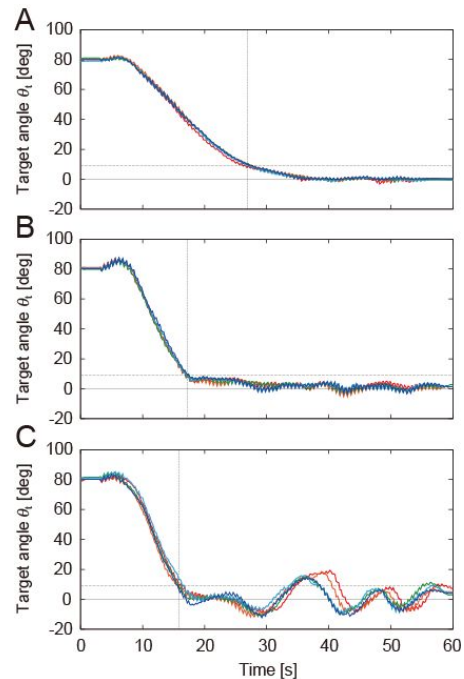


図 4. 旋回タスクにおける進行方向の変化. A: 回転バネ定数が大きく、直線歩行が安定な場合, B: 不安定化する分岐点近傍の場合, C: 直線歩行の不安定性が強く、回転バネ定数がとても小さい場合

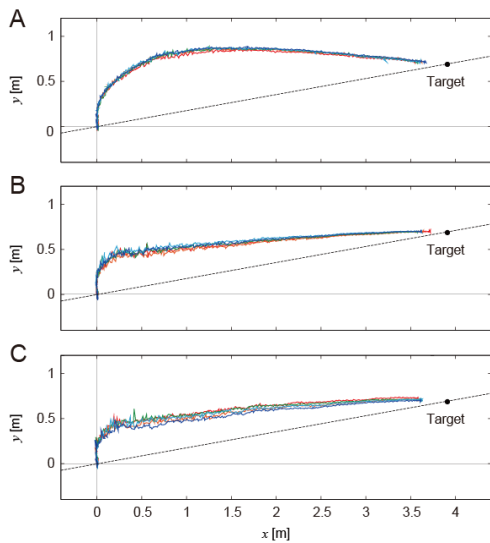


図 5. 旋回タスクにおける先頭モジュールの床上の軌道. A: 回転バネ定数が大きく, 直線歩行が安定な場合, B: 不安定化する分岐点近傍の場合, C: 直線歩行の不安定性が強く, 回転バネ定数がとても小さい場合

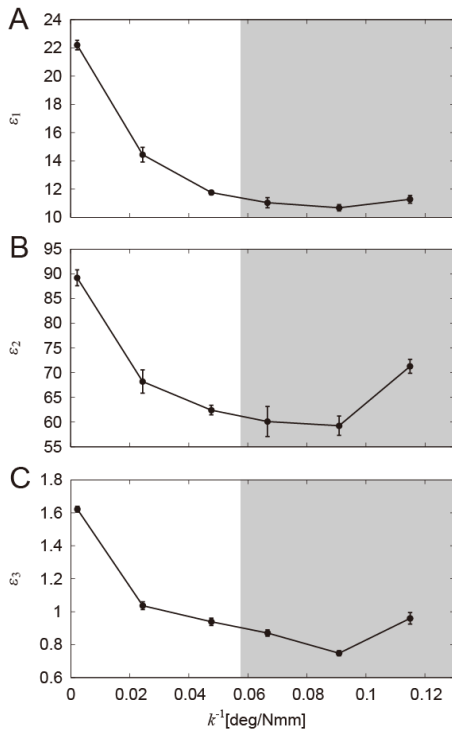


図 6. 旋回タスクにおける回転バネ定数に依存した評価指標 (灰色領域は直線歩行が不安定と判定されたもの). A: 旋回完了時間, B: 進行方向の目標値からのずれ, C: 軌道の目標値からのずれ. いずれも小さい値が旋回性能が良いことを示す.

体軸柔軟性やそれに付随した安定性の制御による機動性の向上など, 生物の歩行戦略とも関連した重要な示唆が得られた. 現在, これらの研究成果をとりまとめ, 論文を投稿中である.

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 1 件)

青井伸也, “生物の歩行と力学系”, 数理学, No. 626, pp. 47-52, 2015

〔学会発表〕(計 2 件)

S. Aoi, “Instability and maneuverability of a multi-legged robot”, APS March Meeting 2016, 2016 年 3 月 18 日, Baltimore, MD, USA, 2016.

田中隆浩, 青井伸也, 藤木聡一郎, 船戸徹郎, 泉田啓, 土屋和雄, “多脚ロボットの直線歩行不安定性と旋回機動性の関係の実験的考察”, 第 27 回自律分散システム・シンポジウム, 2015 年 1 月 22 日, 東京理科大学 森戸記念館.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青井 伸也 (Aoi Shinya)

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号: 60432366