

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13723

研究課題名(和文) 多足生物に見られる多様な波の生成原理と機能の解明、およびその応用

研究課題名(英文) Elucidation of generation mechanism and functions of various waves observed in multi-legged locomotion and its application to robots

研究代表者

安部 祐一 (Ambe, Yuichi)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：90778622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、多足生物の歩行に見られる多様な波(進行波、後退波、わきだし波)の生成原理と機能を数理的に解明し、その知見をロボットに応用することを目的に、以下の課題に中心的に取り組んだ。(1)波の生成原理：単純な数理モデルを作成し、感覚フィードバックの効果により進行波、後退波、わき出し波に対応する3種類の歩容が生成されることを明らかにした。また解析解の導出により原理を脚数に対して一般化し、さらに沈み込み波が存在しない理由を力学系の写像構造から明らかにした。(2)波の機能：進行波と後退波が胴体振動に与える影響の相違を調べ、後退波の方が胴体の振動を抑制し、速度向上に寄与する効果があることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

感覚フィードバックを通じた身体と神経系の相互作用は、脚をもつ生物の歩容生成や適応的な歩容に重要な役割を果たしており、その効果を理解してロボット制御に応用することは、学術的にも社会的にも重要な課題である。本研究では、シンプルな数理モデルを用いることによって、感覚フィードバックにより多足生物で観測される多様な波を生成できることを示し、さらにこの原理を脚数に対して一般化することに成功した。また、生物の歩行戦略を理解してロボットの運動機能を向上させることも重要な課題であり、本研究では、特に後退波がもつ胴体運動に対する機能(振動抑制機能と速度向上)を数理モデルで明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to understand the generation mechanism and functions of various waves (direct-wave, retrograde-wave, and source-wave) observed in the multi-legged locomotion and to apply the findings to robots. The main results of the study are as follows. (1) Wave generation mechanism: The study designed a simple mathematical multi-legged model and clarified that the effect of sensory feedback generated three types of gait corresponding to direct-wave, retrograde-waves, and source-wave gaits. Furthermore, the mechanism is generalized to the number of legs by deriving analytical solutions. In addition, the derivation of the mapping structure of the dynamical system clarified the reason why sink-wave did not exist. (2) Function of waves: The study investigated the effects of direct-wave and retrograde-wave on the body's lateral undulation and found that the retrograde-wave suppressed the body's undulation and contributed to the increase locomotion speed.

研究分野：ロボティクス

キーワード：多足歩行 進行波 後退波 肢間協調 感覚フィードバック 波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多数の脚をもつ生物は、歩く時にそれらの脚をある規則で順番に動かす(脚を前に出す)ため、脚の動きは波のように伝わっていく。例えば、6本の脚をもつ昆虫が低速で歩く時は、脚の動きは後ろから前へと伝わっていく(進行波)。もっと多くの脚をもつ多足生物は多様かつ複雑で、ヤスデは後ろから前へ伝わる歩き方、すなわち進行波(図1A)を形成するが、ムカデは前から後ろに伝わる歩き方(後退波)(図1B)をする。また、ムカデは速度の増加とともに胴体の形状が波打つ蛇行のような歩き方をする(図1C)が、ヤスデではそのような胴体の動きは見られない。さらに、ヤスデの胴体の形状が途中で曲がってU字になった場合には、前方が進行波、後方が後退波を作ること、進行波と後退波が共存する現象(わき出し波)(図1C)も見られている。しかしながらその一方で、前方が後退波、後方が進行波を作るわき出しとは逆の現象(沈みこみ波)はどの多足生物でも観測されていない。

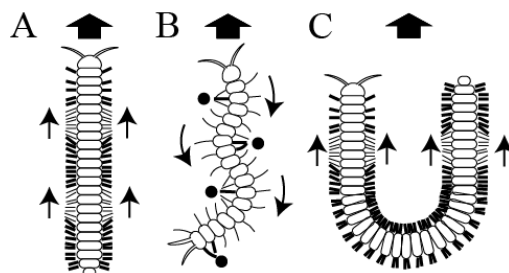


図1 A:進行波, B:後退波, C:わき出し波の模式図

多足生物は脚の数が多いためどのような歩き方でも進むことができるはずだが、上述のような特徴をもった歩き方をする。なぜそのような歩き方をするのか? その効果は何なのか? また、多数の脚をもっているにも関わらず、どうやってそのような秩序だった歩き方を形成しているのか? 歩き方を作り出す原理と、その歩き方によって得られる効果は生物学的にまだ未解明であり、新たな研究パラダイムが求められている。

さらに近年では、災害現場やプラント事故、惑星探査など人間にとって危険な場所でも活躍できるロボットが注目されている。しかしながら、そこでの環境は必ずしも整備されているものではなく、予測できない未知のものであり、ロボットにとって走破することは難しい。その一方で、多足生物は多様な環境に適応して頑強な移動能力を有していることから、多足生物の優れた歩行原理を理解することは、過酷な環境でも走破可能なロボットの移動戦略を考案するうえで非常に有用である。

2. 研究の目的

本研究では、多足生物の歩行に見られる多様な波の(1)生成原理と(2)機能を数理的に解明し、そこから明らかになる知見をロボットに応用することを目的とする。

- (1) 節足動物の歩容はCPG(Central pattern generator)の概念に従うと、それぞれの脚を制御する分散した振動子系と身体との感覚フィードバックを介した相互作用から自己組織的に発現すると考えられる(Delcomyn, Annual Review of Entomology, 2004)。脚の運動による進行波、後退波、わき出し波、沈みこみ波は、振動子系の位相関係から説明できるはずであり、シンプルな数理モデルを用いた解析により、それぞれの波の生成原理を解明する。
- (2) 進行波を用いるヤスデは比較的遅い速度で胴体を振動させずに歩く一方で、後退波を用いるムカデは早い速度で胴体を振動させて歩く。進行波と後退波の相違は、胴体に対する脚の接地位置を変え、胴体への力学的寄与を変える。数理モデルのシミュレーションよりそれぞれの波が持つ機能を解明する。

3. 研究の方法

(1) 波の生成原理の解明

「脚の接地情報に基づく分散した振動子系の位相調整より、自己組織的に多足生物にみられるような秩序だった波が得られる」という作業仮説の下、図2Aのシンプルな数理モデルを生成した。本モデルは柔軟な胴体を模擬して弾性体により接続される質点と、上下に動く脚から構成される。それぞれの脚は分散した振動子によって駆動され、その振動子の位相は脚の接地情報(感覚フィードバック)をもとに調整される。振動子間には直接の相互作用はなく、振動子系と身体との感覚フィードバックを介した相互作用から、上述した進行波、後退波、わき出し波、沈みこみ波が生成するかを、シミュレーションと解析解の導出により調べた。

(2) 波の機能の解明

「多足生物は多様な波によって柔軟な胴体の形状(特に水平面での形状に着目)を作り出すことで多様な運動能力を実現している」という作業仮説の下、図2Bのような、水平面上における柔

軟索状体の力学モデルと動力学シミュレーションを構築した。モデルにて、脚運動による周期的な駆動力を進行波と後退波で伝播させたときに、胴体運動や運動性能にどのような機能的相違が生じるかについて調べた。

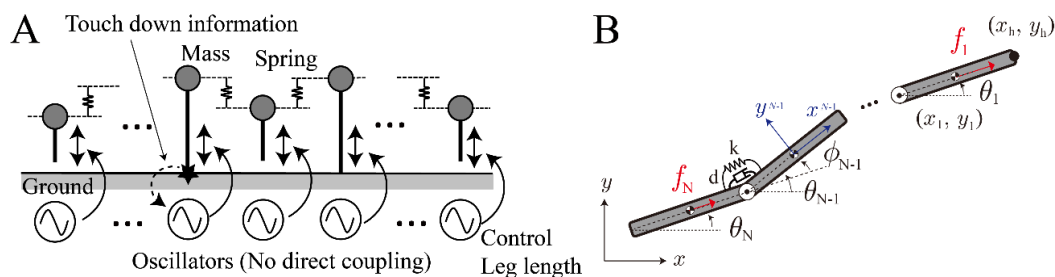


図2 分析に用いる多足数理モデル。A: 上下に動く脚とバネで連結された質点により構成される。各脚は独立した振動子によって独立に制御され、脚が接地した時に振動子の位相がリセットする。B: 関節部に弾性成分を持つ多体リンクにより胴体の横方向の形状をモデル化。各リンクの軸方向に脚運動を模して周期的な外力が加わり、生物の歩行と形状変化の関係をシミュレーションする。

4. 研究成果

(1) 波の生成原理の解明

図3に示すような動力学シミュレーションを構築して解析した結果、進行波、後退波、わき出し波に対応する3種類の歩容が生成された(図4)。一方で、沈みこみ波に対応する歩容は解として存在しなかった。これらの波の解は解析的に導出され、脚の数が増えたとしてもこれら3種類の波が生成される点、また、これらの波が生成されるには胴体が柔軟であることが重要であることを解明した。

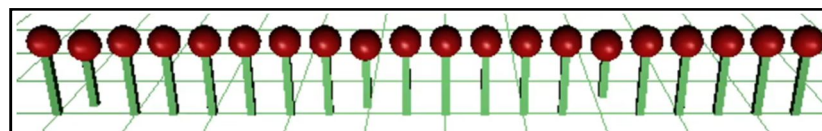


図3 構築した動力学シミュレータの様子

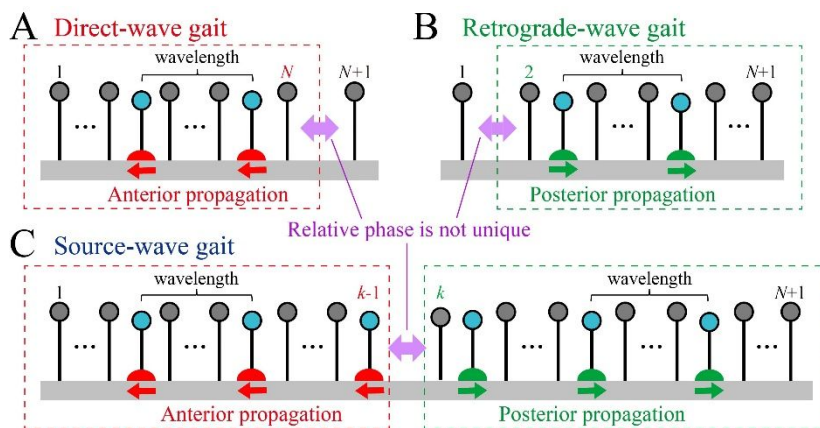
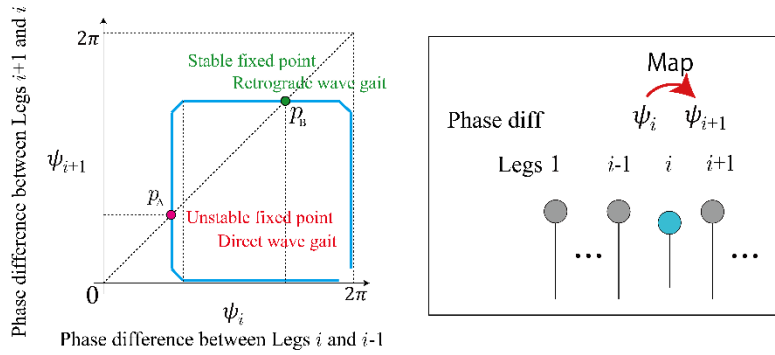


図4 シミュレーションと解析解導出により得られた3種類の波の模式図。A: 進行波, B: 後退波。C: わき出し波を表している。それぞれの波において、1つの浮いている脚が順に前(後)に進んでいくような歩容が得られた。

さらに、進行波と後退波の選択原理について議論するため、シンプルモデルを非対称にした際の挙動について動力学シミュレーションを用いて調べた。モデルの前方(後方)の質量を一方に比べて重くした場合に、進行波(後退波)のみが創発することを確認した。前後の非対称性によって波が選択される可能性が示唆された。

また、数理モデルの力学構造を解析的に調べ、沈みこみ波が存在できない理由を明らかにした。具体的には、脚の接地時の位相調整が同一タイミングで起きるという仮定でモデルを単純化し、周期解条件下で隣り合う振動子の位相差の2次元写像関係を理論的に導出した(図5)。この2次元写像構造の特徴から、沈み込み波が周期解となりえないことを理論的に明らかにした。一方、進行波、後退波、わき出し波は、写像構造から解として存在することも明確になった。

A Map structure



B Example of how the source point of waves appears

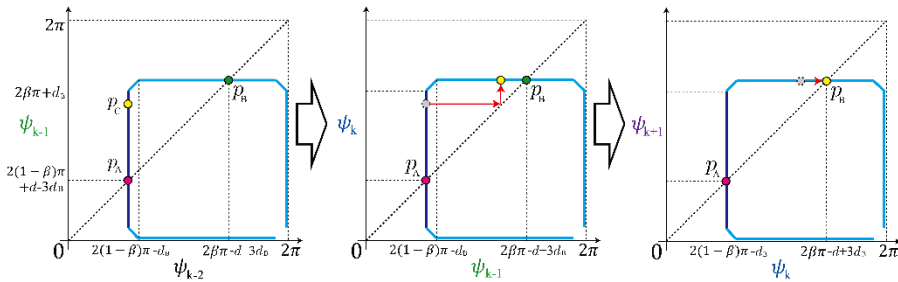


図5 A: 周期解条件下での隣り合う脚の位相差同士の二次元写像構造とB: わきだし点が起きる場合の位相差発展の例。本写像構造では、進行波と後退波の位相差に対応する2つの平衡点（常にこの点にとどまり続けることができる）が存在する。そのため、進行波と後退波が周期解として存在できた。さらに、進行波に対応する平衡点付近の写像線は鉛直線であるため、図Bの左の黄色い点 p_c のように、進行波に対応する不安定平衡点から位相関係を少しずつずらすことができる。その場合、図Bの右図のように写像が発展していき、後退波に対応する平衡点に到達することができる（わきだし点が存在することが示された）。一方、沈み込み波が存在するためには、後退波の平衡点から進行波の平衡点に移る必要がある。しかし、後退波の平衡点付近の写像線は水平線であるため、この平衡点から写像で移動することは不可能である、よって沈み込み波は存在できない。

(2) 波の機能の解明

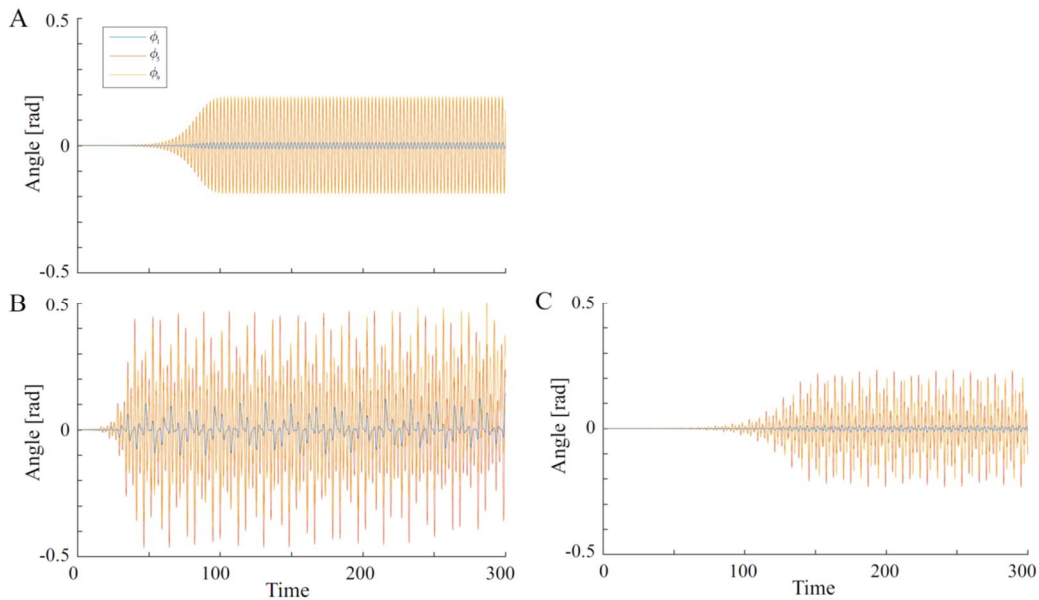


図6 胴体振動の時間発展の様子。A: すべての胴体リンクに軸方向で一定の力を加えた場合。B: 周期的な力を各リンクに入れ、進行波に対応する位相差を与えた場合。C: Bと同様で後退波に対応する位相差を与えた場合。線種により、前方(ϕ_1)、中間(ϕ_5)、後方(ϕ_9)のリンク間角度を表している。

図2Bのモデルを動力学シミュレーションをもちいて解析した結果の例を図6に示す。柔軟体

の長軸方向に一定の力を発生させて運動させた場合、駆動力を長軸方向にしか発生させていないにもかかわらず、胴体の柔軟性によって時間とともに胴体の横振動が生まれてしまう(図 5A)。しかし、この力の入力を周期入力にし、かつ、この力入力の位相差を後退波に対応する波にすれば、この横振動の振幅を小さくできることが分かる(図 6C)。一方で、進行波で位相差を与えた場合には横振動が大きくなることが分かる(図 6B)。後退波で脚を動かすことで、胴体の振動を抑制する効果があることが分かった。さらに、これらの波の移動速度を比べると、後退波の方が胴体振動を小さくできる分移動速度を大きくできることが示された(図 7)。興味深いことに一定の駆動力を入れる場合よりも速度が改善している。これらの結果をロボットに適応して検証するために、12 脚ロボットの設計と一部製作を行った。

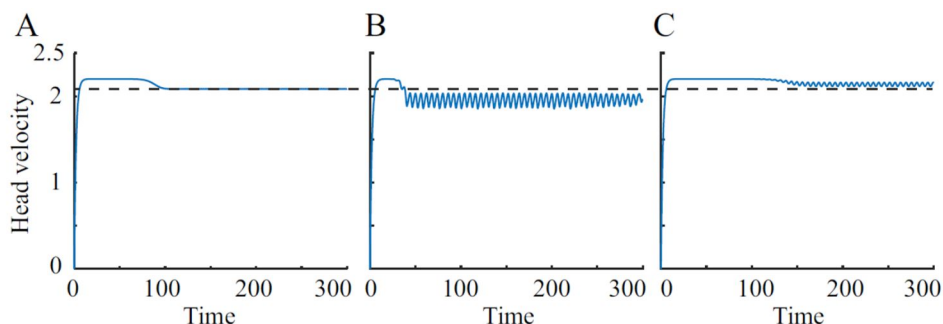


図7 先端速さの時間発展の様子。A: すべての胴体リンクに軸方向で一定の力を加えた場合。B: 周期的な力を各リンクに入れ、進行波に対応する位相差で動かした場合。C: Bと同様で後退波に対応する位相差で動かした場合。点線はAの条件における到達速度を表す

脚数に対して一般化された感覚フィードバックによる多様な波の生成原理や、後退波による胴体振動抑制による運動速度向上など、生物の歩行戦略に関連した重要な示唆が得られた。本研究で得られた複数の成果は、現在学術論文誌に投稿中、および執筆中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 安部祐一, 青井伸也, 昆陽雅司, 田所諭
2. 発表標題 進行波と後退波が多足歩行に及ぼす機能的相違の分析
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichi Ambe and Shinya Aoi
2. 発表標題 Simple Multi-legged Model Reveals that Retrograde-wave Gait Rather Attenuates Body Oscillation than Direct-wave Gait
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on SWARM Behavior and Bio-inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安部祐一, 青井伸也, 土屋和雄, 松野文俊
2. 発表標題 センサフィードバックによる多足歩行の多様な波の創発とその存在理由
3. 学会等名 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安部祐一
2. 発表標題 多脚ロボットの制御方法
3. 学会等名 日本ロボット学会主催 第127回ロボット工学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2020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
---------	---------