

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14177

研究課題名（和文）スーパーモードリッチロコモーション：動物の未知環境踏破能力の源泉

研究課題名（英文）Super mode-rich locomotion: how animals navigate unpredictable environments

研究代表者

安井 浩太郎（Yasui, Kotaro）

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：70876739

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：動物は、多様な運動戦略を自律的に生み出すことで、状況変化に対して適応的に動くことができる。この適応的運動知能に内在する制御構造を抽出するため、本研究では、ムカデに着目し、脳などが担う上位の中枢制御と下位の自律分散制御の連関様式の解明を行動実験および数理モデリングにより試みた。具体的には、不整地歩行において、環境との接触感覚に基づいて頭部運動を制御する上位中枢制御則を下位の歩行制御則と統合することで、環境踏破能力が向上することを示した。また、歩行・走行・遊泳時に示す異なる身体協調パターンの生成に関して、脳や食道下神経節が果たす役割や、それらと下位の分散制御則の統合様式を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、動物の状況適応的な振る舞いが、脳などの上位中枢からの指令と脊髄や神経節に内在する自律分散的な運動制御システムがどのように相互作用することで生み出されるのかを明らかにするものであり、動物らしい運動知能の設計のありように対して重要な示唆を与える。また、生物規範型ロボットの振る舞いの適応性や自律性を大幅に向上させる点において、工学的にも意義深い。

研究成果の概要（英文）：Animals can adapt to changes in their environment by autonomously generating a variety of movement strategies. To extract the control structures inherent in this adaptive motor intelligence, this study focused on centipedes and attempted to elucidate the interaction between higher-level central control, such as that performed by the brain, and lower-level autonomous distributed control through behavioral experiments and mathematical modeling. Specifically, the study demonstrated that integrating a higher-level central control rule, which regulates head movement based on sensory feedback from environmental contact, with lower-level walking control rules improved the ability to navigate rough terrain. Additionally, the research clarified the role of the brain and subesophageal ganglion in generating different patterns of body coordination during walking, running, and swimming, as well as how these are integrated with lower-level distributed control rules.

研究分野：生物規範型ロボティクス

キーワード：適応的運動知能 分散・中枢融合制御 自律分散制御 自己組織化 生物規範型ロボティクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

動物は、きわめて多様な運動戦略を自律的に生み出すことで、無限定な環境変化に対して適応的かつタフに動き続けることができる。この運動知能の発現機序を理解すべく、脊髄などに存在する分散神経回路網に着目した自律分散的な制御方策が研究されてきた。しかしながら、従来研究では、平地での歩行速度に応じた歩容遷移や、歩行・遊泳といった特定の少数の運動様式間の遷移など、特定の定型的な運動パターン内での議論に終始しており、動物に比肩しうる超多様な振る舞いの実現には至っていない。

では、一体何が足りていないのだろうか？それは、動物が無限定な状況変化に対して、どう動くべきかを自律的に判断し身体を自在に操る能力である(本研究では、この自律的な状況判断から生み出される超多様な運動を「スーパーモードリッチロコモーション」と呼ぶ)。この状況判断を伴う適応的運動知能を実現するためには、脳などが担う上位の中枢制御を導入し、それがどのように下位の自律分散制御と相互に関連することで合理的な運動戦略が生み出されているのかについて考察する必要がある(図1)。しかるにこれまでは、下位の分散神経系に偏重した議論がなされてきたため、その本質はいまだ謎に包まれている。

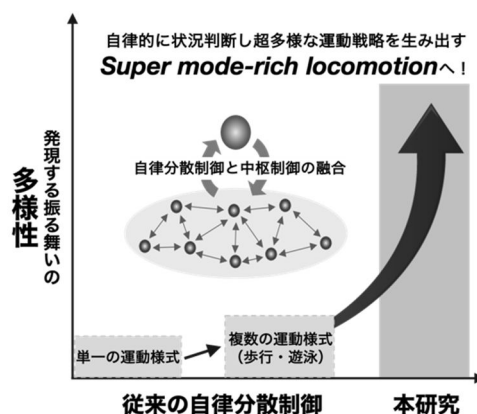


図1：本研究の位置付け

2. 研究の目的

本研究では、ムカデのスーパーモードリッチロコモーションに内在する自律分散制御と中枢制御が融合した運動制御則(「分散・中枢融合制御則」と呼ぶ)の抽出を目的とした。以下に、モデル生物としてムカデに着目する利点を述べる：

1) スーパーモードリッチロコモーションが観察しやすい
ムカデは、多数の脚と胴体の運動自由度を巧みに動かし超多様な運動を行うことができる。例えば、陸上では脚による歩行や走行を行うが、水中ではヘビのように胴体をくねらせて遊泳し、地中などの狭い空間ではミミズのように胴体を伸縮させて移動する。また、移動継続困難な状況に遭遇した場合にも巧みな身のこなしにより状況を打開する運動知能を有している。それゆえ、状況判断を伴う適応的運動知能の観察・検証実験が容易である。

2) 中枢制御がきわめてシンプルであると予想される
ムカデは、同質の体節が繰り返された身体構造を有しており、神経系は各体節に神経節が配置された明確な自律分散制御構造をなす(図2)。そして、進化的に早期に出現した原初的な節足動物ゆえに、昆虫と比較しても脳は極めて小さい。つまり、ムカデは自律分散制御を土台として僅かにシンプルな中枢制御を獲得することで、劇的に状況判断能力を向上させ、振る舞いを超多様化した動物なのである。それゆえ、自律分散制御と中枢制御のシンプルベストな融合様式が抽出できると期待される。

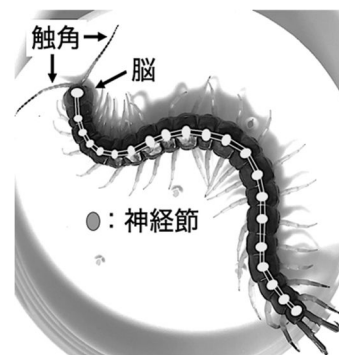


図2：ムカデの特徴的な身体・神経構造

3. 研究の方法

上記の研究目的達成のため、本研究では、行動観察実験・数理モデリング・シミュレーション実験(ロボット実装実験)を組み合わせ、運動制御メカニズムを構成論的に理解するアプローチを採用した。行動観察実験では、健常個体を用いた運動計測に加えて、脳や食道下神経節を外科的に切除した際の運動変化も観察することで、上位中枢制御と下位の自律分散制御系の関連解明を試みた。そして、得られた行動生理学的知見に基づき、下位の自律分散制御と上位中枢指令が融合した分散・中枢融合制御則を数理モデル化し、環境変化や移動速度に応じた多様な運動パターンが自律的に生み出されるかをシミュレーション実験およびロボット実験により検証した。

4. 研究成果

(1) 不整地における適応的な歩行運動を生み出す分散・中枢融合制御則

ムカデは、多数ある脚と胴体の運動自由度を巧みに操ることで、不整地においても優れた歩行能

力を有する。この適応的な不整地歩行に内在する分散・中枢融合制御則の抽出を目指した。まず、下位の自律分散的な脚運動制御による環境適応能力を調べるため、歩行中に足場環境が変化する状況での振る舞いを観察した。その結果、ムカデは、柔軟な身体と環境の相互作用により得られた、脚と腹部の接地感覚を活用することで、限られた足場を効果的に使う歩容を適応的に生み出していることが示唆された。そこで、本知見に基づき、脚と腹部の接地感覚フィードバックを導入した歩行制御則を構築した。提案制御則によりシミュレーション実験を行った結果、ムカデの不整地歩行の特徴を概ね再現することに成功するとともに、同制御則による歩行は移動パフォーマンスも優れていることが明らかとなった(図3)。本研究成果は、動物規範型多脚ロボットの不整地環境踏破能力の向上に資すると期待される。さらに、ムカデが歩行時に示す頭部の上下運動に着目した考察を進めた。具体的には、上記の不整地歩行制御モデルを土台として、頭部運動を環境との接触感覚に基づいて制御する上位中枢制御則を考案した。シミュレーション実験の結果、頭部運動の中枢制御則を加えることで、不整地踏破能力が更に向上することが明らかとなった。

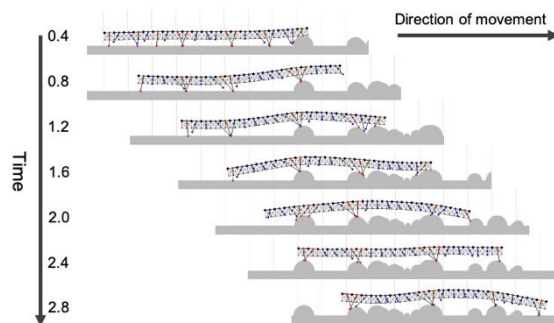


図3：不整地歩行のシミュレーション結果

(2) 多様な脚・胴体協調運動を自己組織化する下位の自律分散制御則

ムカデは、環境特性や種、歩行速度などの違いにより、歩行時に示す脚と胴体の協調パターンが異なることが知られている。本研究では、ムカデが示す多様な脚と胴体の協調パターンに通底する制御原理の抽出を目指した理論的研究にも取り組んだ。具体的には、いかなる歩行パターンにおいても脚と胴体は推進に効果的な協調関係を成しているとの仮説に基づき、各脚と胴体が各々の感覚情報を相互にフィードバックすることで力学的に合理的な協調運動を生み出す自律分散制御則を考案した。シミュレーション実験の結果、脚と胴体の運動強度に応じて質的に異なる運動パターンが発現しうることが明らかとなった。この数理モデルは、多様な歩行パターンの背後にある下位分散制御構造の本質を捉えている可能性があり、今後生物実験による妥当性検証が期待される。

(3) 歩行・走行・遊泳パターンを生み出す分散・中枢融合制御則

ムカデは、低速歩行時には主に脚運動を用いるが、高速で走行する際には脚運動のみならず胴体の屈曲運動を組み合わせ、遊泳時には脚を折りたたんで胴体側部に沿わせ胴体の屈曲運動のみを用いる。この状況に応じた多様な身体協調パターンを生み出す分散・中枢融合制御則の解明を目指した。まず、上位中枢である脳と食道下神経節を段階的に切除した際の行動変化について計測した。その結果、1) 食道下神経節は高速歩行時や遊泳時の胴体の屈曲運動に対して抑制性の働きを持っていること、2) 脳は食道下神経節を抑制することで胴体の屈曲運動の強度を制御している可能性、また、3) 遊泳時の脚の折りたたみは、脳と食道下神経節の双方からの信号により制御されていることを見出すことができた。数理モデリングにおいては、上位中枢制御に関するこれらの新規の知見を、これまで構築してきた下位の自律分散的な運動制御則と統合することを試みた。その結果、シミュレーション実験において、上位中枢からの少数の制御信号の入力を変化させるだけで、環境変化に応じた歩行・遊泳間の遷移や、歩行速度に応じた脚・胴体間協調運動を再現することに成功した。このように状況依存的に身体協調運動を多様かつ自律的に変化させることのできる運動制御モデルは、少なくともムカデに関しては世界初であり、他の動物種に関する研究事例を含めても極めて優位性と新規性の高いものである。

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 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Michael Mangan, Dario Floreano, Kotaro Yasui, Barry A Trimmer, Nick Gravish, Sabine Hauert, Barbara Webb, Poramate Manoonpong, Nicholas Stephen Szczecinski	4. 巻 18
2. 論文標題 A virtuous cycle between invertebrate and robotics research: perspective on a decade of Living Machines research	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 35005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-3190/acc223	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 該当する

1. 著者名 Yasui Kotaro, Takano Shunsuke, Kano Takeshi, Ishiguro Akio	4. 巻 9
2. 論文標題 Adaptive Centipede Walking via Synergetic Coupling Between Decentralized Control and Flexible Body Dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 797566
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frobt.2022.797566	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12件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kotaro Yasui, Shunsuke Takano, Takeshi Kano, Akio Ishiguro
2. 発表標題 Simple Reactive Head Motion Control Enhances Adaptability to Rough Terrain in Centipede Walking
3. 学会等名 The 11th International Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems (Living Machines2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kotaro Yasui
2. 発表標題 Towards understanding the adaptive navigation control mechanisms in centipedes (<i>Scolopendra subspinipes mutilans</i>)
3. 学会等名 日本比較生理生化学会第44回高知大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安井浩太郎
2. 発表標題 動物の自律的運動知能の設計原理を求めて：ムカデを用いた事例研究
3. 学会等名 第35回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清野源太, 山一竜光, 杉山悠聖, 安井浩太郎, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 多脚歩行に通底する脚と胴体の協調制御則を探る
3. 学会等名 第35回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山一竜光, 杉山悠聖, 清野源太, 安井浩太郎, 石黒章夫
2. 発表標題 ムカデの歩行制御則はヤスデにも適用できるのか？
3. 学会等名 第35回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kotaro Yasui
2. 発表標題 Decoding flexible motor control for mode-rich locomotion: lessons from amphibious centipedes
3. 学会等名 The 10th international conference on biomimetic and biohybrid systems (Living Machines2021), Invertebrate Robotics workshop (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野篤史, 安井浩太郎, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 多足類の負荷適応的口コモーションに内在する自律分散制御則
3. 学会等名 第34回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kotaro Yasui, Genta Seino, Tatsumi Yamaichi, Yusei Sugiyama, Takeshi Kano, Akio Ishiguro
2. 発表標題 Exploring Common Control Principles Underlying Versatile Body-limb Coordination in Many-legged Locomotion
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kotaro Yasui, Kozue Shiomi
2. 発表標題 Centipede-inspired active sensing mechanism for exploratory navigation using antennal and body bending motion
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安井浩太郎
2. 発表標題 ムカデから探る自律的運動知能と多義的身体のありよう
3. 学会等名 第41回日本ロボット学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kotaro Yasui, Kozue Shiomi
2. 発表標題 Towards understanding embodied navigation mechanisms in centipedes
3. 学会等名 日本比較生理生化学会第45回大阪大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安井浩太郎, 塩見こずえ
2. 発表標題 ムカデの探索的ナビゲーションから探る運動生成と状況判断の連関
3. 学会等名 第36回自律分散システム・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			
スイス	スイス連邦工科大学ローザンヌ校			
カナダ	オタワ大学			