

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21974

研究課題名（和文）自由な身体形態をもつ生物・ロボットのロコモーション：進化の隙間から空想生物まで

研究課題名（英文）On morpho-free locomotion of animals and robots : from aperture in evolution to non-biomimetic robots

研究代表者

石川 将人 (Ishikawa, Masato)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：20323826

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：生物やロボットのロコモーション制御のメカニズムに着目し、四脚・六脚・蛇型といった実在の生物の身体構造にとらわれることなく、与えられた身体構造に応じて自発的にロコモーションを創発する制御について研究を行った。身体各部に分散的に埋め込まれて機能を発現する制御モジュールの開発、ウマや古生物などの現存・既存の生物の制御メカニズムの解析を行った。またこれらを通して、自然界に実在しない三放射相称の身体においても分散制御による歩容発現が可能であることを示したほか、確率的に生成されたランダムな身体群において発現するロコモーションの分類についても検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然界にみられる生物のロコモーション（移動）は多彩であるが、これらは進化の果てに得られた一つの結果でしかない。本研究で試みた、その前提になるべくとらわれずに制御メカニズムを実現しようとする本研究のアプローチは、特に実在の生物構造を模倣しなくともよい工学的応用の可能性を広げるほか、実在生物であっても、身体の使用部位が一時的に変化した場合の運動のありようについても、示唆を与え得るものであると考える。

研究成果の概要（英文）：In concern with the locomotion control mechanisms for animals and robots, we studied self-organization of locomotion patterns in response to a given body structure, without pre-assuming the body structures of existing animals such as tetrapods, hexapods, or serpentine locomotion, and so on. We developed embedded control modules that function in various parts of the given body plan, analyzed the control mechanisms of existing (or once existed) animals such as horses and paleontopods. Through these studies, we showed that gait expression by distributed control is valid even in tri-radial symmetric bodies that do not exist in nature, and we also verified the classification of locomotion expressed in a stochastically generated random body group.

研究分野：制御工学，ロボティクス

キーワード：生物とロボットのロコモーション 自律分散制御 モルフォフリー制御 空想生物

1. 研究開始当初の背景

生物のロコモーション（移動）は多彩である。哺乳類や節足動物による脚式移動は言うに及ばず、ヘビの蛇行、ミミズの蠕動、カタツムリの這行、と枚挙に暇がない。そのいずれも、置かれた環境に巧みに適応し、多少の障害はものともせず動き続けるという、しなやかさとしぶとさを有している。多くの工学研究者もこれらの生物の移動メカニズムに学び、ヒューマノイドや四脚歩行、ヘビ型ロボットといった生物模倣型ロボットの実現を目指してきた。

しかし、それだけでよいのだろうか、というのが本研究のきっかけとなった問いである。現存する生物たちの姿は、進化の果てに得られた結果の一つでしかない。生物模倣ロボットの発想では、原理的にあり得る形態の一部しか実現できないことに懸念が残る。

研究代表者らは、三放射相称の身体形態を持つ三又ヘビロボットや三脚歩行ロボットを提案し、実在の生物を範とし、純粋に数理的なアプローチによって移動制御アルゴリズムを設計する研究を過去に行ってきた。そこから引き出された種々の移動様式は興味深いものではあったが、フィードフォワード的かつ対象の身体形態に密着した制御方式にとどまっていた。一方、研究分担者らは、実在生物の徹底した観察を経て得た知見をもとに、環境情報を取り入れて自発的かつ適応的な歩容創発を実現する自律分散型のフィードバック制御を多数実現してきた。両者の融合により実在・非実在を問わず通底する制御原理の知見獲得を期して、本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、現存する動物のロコモーションのありようにとらわれることなく、ロコモーション（移動）のための自由な身体形態の可能性を考察する。研究代表者らがこれまで蓄積してきた知見をもとに、どのような身体構造であってもそれぞれに応じた移動パターンを発現させる「モルフォフリー制御（形態によらない制御）」の概念を掲げる。これによって、実在しない形状の生物においてもどのような走行パターンが力学的・制御的に妥当であるかを論じ、また様々な身体形態の組み合わせの自由な生成（ランダムモルフォロジー）に基づいて、非自明なロコモーション様式の創出を目指す。

3. 研究の方法

上記の目的を実現するため、本研究では、主に以下のようなアプローチで取り組む。

(1) 分散型制御モジュールの開発

身体形態によらないロコモーション制御を実現するためには、身体形態の情報をもとに全身の制御を統括する中央司令部ではなく、身体各部位で自律分散的な制御器と、それらの連携が不可欠である。本研究では、制御器を実装するためには、自律分散的な制御器の身体に遍く埋め込まれて機能を発現する、反射型のモジュールの開発とその基礎特性を検証する。

(2) 実在生物のロコモーション解明と知見の獲得

実在する生物におけるロコモーション機序の解析を行いつつ、形態の情報を前提としない普遍的な制御原理の抽出を行う。そのためのカギとなるのは、脚のようにロコモーションに直接的に用いる以外の部位（たとえば頸部）や、機能が自明でない部位（たとえばヒレ）などの寄与と協調のメカニズムを明らかにすることである。本研究では、ウマなどの現生動物の四脚ロコモーションにおける脚部・頸部の協調、また特徴的な古生物である首長竜の泳動におけるヒレ間協調などの解析を行う。

(3) 非実在生物型ロボットのロコモーション創出

これまでに得られた研究知見をふまえ、奇数脚・三放射相称のように実在しない形態の生物において、身体部位に埋め込まれた自律分散的な制御器がどのように機能し、全身運動が生成されるかの検証を行う。

(4) ランダムモルフォロジーの探求

可能な限り先入観を排して身体形態の自由な可能性を探求するために、自由度の高い身体形態のパラメータ化モデルと、神経接続構造のパラメータ化モデルを考え、これをランダム生成した場合に発現するロコモーションの系統的な考察を行う。

4. 研究成果

(1) 分散型制御モジュールの開発

生物の身体を駆動するものは筋骨格系であり、それを制御するのは脳神経系である。仮に、脳にあたる中枢制御部が大域的な全身協調運動を指令せずとも、身体の各部位に埋め込まれた分散型の動作規則によって、全身運動が創発しうることがさまざまな文脈で示唆されてきた。本研究では、空気圧人工筋で構成された筋骨格系に対し、動物の筋肉に生来備わる基本的な反射特性（たとえば、外力による伸展に対して収縮で抗おうとする伸張反射）を、空気圧回路モジュールとして機械的に実装することを提唱した。たとえば、四脚動物の形態と筋骨格配置に倣ってこのモジュールを実装すると、センサ・マイコンを含め一切の電子部品を用いることなく、一定の空気圧を供給するだけで脚間ならびに脚内（関節間）協調が生じて歩行・走行運動が創発した。このほか、ウマ後脚の筋骨格構造の要点を忠実に反映した準四脚歩行機を開発した関連研究においては、大腿骨相当部分のみを一自由度駆動し他の自由度は腱によって従属に駆動するだけで、脚内の各可動部がみごとに連動した歩容が発現することを示した。これらと合わせ、「適切に設計された分散型制御モジュールのもとでは、身体（形態と筋骨格の構造）自体が歩容生成のカギを握っている」ことがわかり、多くの知見を得るに至った。

(2) 実在生物のロコモーション解明と知見の獲得

① ウマの走行における頭頸部と脚部の協調運動

ウマは、四脚動物の中でも高い走行能力と、状況に応じた多彩な移動様式をもつことで知られる動物である。特に、速度に応じて walk, trot, canter および gallop と歩容を遷移させることが知られている。この分野における力学的モデルに基づく研究では胴体と脚のみを抽出した単純化モデルを用いることも多いが、本研究では、ウマの身体において無視できない要素である太い頭頸部に着目し、脚部のみならず頭頸部のピッチング運動が可能な矢状面モデルを用いて考察した。各脚の制御としては、先行研究から用いられている基本の走行制御則（脚先が検知する反力に応じて遊脚・支持脚の位相を調整する）に加えて、前後脚にかかる反力分布が望ましいものになるように頭頸部制御へのフィードバック項を導入した。この結果、実際のウマの運動に酷似した、速度に応じた歩容遷移と、脚部と首部の高効率な協調運動が観察された。

② 首長竜の遊泳におけるヒレ間・ヒレ内協調

首長竜は、四肢に大きなヒレをもつ中生代の水生爬虫類である。ウミガメやペンギンのように比較的大きな前肢によって遊泳する現生の水生動物と異なり、サイズの点からは前肢と後肢の間に有意な差が見られないため、四肢を均等に活用した独特の遊泳様式を持っていたのではないかということが示唆される。本研究では、実験用流水槽とロボットによる検証プラットフォームを用いて、四肢のヒレ制御則と発生する推進力との関係を検証した。特に、前後ヒレ間の位相差に加えて、各ヒレの制御における 2 自由度運動（上下動とピッチング）位相差が顕著な影響をもつこと、また二肢優勢な現生生物の遊泳に比べて四肢の均等活用が推進力の点で有利であること、などを見出した。

(3) 非実在型ロボットのロコモーション創出

三叉ヘビロボットは、三角形のベースブロックの各頂点に能動関節をもち、これによって駆動される放射状に伸びたリンクと、リンク先端に取り付けられた受動車輪（キャスター）からなる、広義の車輪型平面移動体である。非線形システムである。いわば、3 体の車輪型ヘビロボットがベースブロックでつなぎ合わされた構造をしている。受動車輪は横滑りをしない（各瞬間で向いている方向への転がり、鉛直軸まわりの旋回のみが許容される）という非ホロノミックな力学的拘束を受ける。ロボットが床から受ける力は、滑らない車輪にかかる横拘束力のみであるから、これは拘束力を推進力に変換して移動する機構であるともいえる。研究代表者は、過去に非線形制御理論による非線形可制御性解析に基づいて能動関節の制御アルゴリズムを導出していた。

本研究では、位相振動子モデルと感覚（反力）フィードバックからなる分散型フィードバック制御器を各能動関節に実装することを試みた。上述したように、三叉ヘビロボットの推進力の源は、車輪が床から受ける横拘束力のみである。そこで、位相振動子によって能動関節を揺動させる運動を基本におき、ここに横拘束力の「手応え」を強めるフィードバック、すなわち、車輪にかかる横拘束力が大きくなるように位相変化速度を増減する制御則を実装した。その結果、各脚の制御則は身体全体の情報も、他の脚の情報も全く用いない自律分散制御則であるにもかかわらず、回転ロコモーションのパターンが自己組織化的に、かつ即時に得られるという興味深い結果を得た。

(4) ランダムモルフォロジーの探求

最後に、可能な限り先入観を排して身体形態の自由な可能性を探求するため、身体形態によらない制御則をランダムに生成した身体と組み合わせた場合に、どのようなロコモーションが創発するかを確率的なアプローチによって解析することを試みた。具体的には、可動部位を制御する駆動モジュールと、部位間を接続する神経に相当する結合パスを結合振動子系と仮定し、結合強度とグラフネットワークの隣接行列をパラメータとしてモデル化した。単純なモデルではあるが、このモデルが持ちうる構造の可能性は膨大な組み合わせ則に従う。そこで本研究では、パラメータを生成する確率的規則を導入し、ランダムサンプリングに基づいてロコモーションの解析を行った。その結果、ネットワークとしての特性（結合密度や吸引／反発結合の比）と、生じるロコモーションの定性的性質（直進ロコモーション、回転、不規則運動など）との間に一定の傾向が見いだされた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Toyoaki Tanikawa, Yoichi Masuda, Masato Ishikawa	4. 巻 15
2. 論文標題 A Reciprocal Excitatory Reflex Between Extensors Reproduces the Prolongation of Stance Phase in Walking Cats: Analysis on a Robotic Platform	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurorobotics	6. 最初と最後の頁 636864
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnbot.2021.636864	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17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yoichi Masuda, Masato Ishikawa
2. 発表標題 Autonomous Intermuscular Coordination and Leg Trajectory Generation of Neurophysiology-based Quasi-quadruped Robot
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬場智主, 鈴木朱羅, 福原洸, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 安定かつ適応的な高速走行の実現を目指した四脚ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷川豊章, 増田容一, 石川将人
2. 発表標題 四脚歩行メカニズム探求のためのトルク出力型ロボットプラットフォームの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮下和大, 増田容一, 福原洸, 郡司芽久, 多田隈建二郎, 石川将人
2. 発表標題 ウマの脚内連動機構を活用可能な後半身ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷川豊章, 増田容一, 石川将人
2. 発表標題 反射・筋特性を再現した四脚ロボットの即時適応的な運動生成
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮下和大, 増田容一, 郡司芽久, 福原洸, 多田隈建二郎, 石川将人
2. 発表標題 ウマ後肢の筋・腱構造による支持/遊脚機能の即時転換
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田容一, 石川将人
2. 発表標題 バルブでつくるロボットの神経基盤第一報: 抑制性介在神経の機能を模倣した物理デバイスの開発
3. 学会等名 計測自動制御学会自律分散システムシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田容一, 石川将人
2. 発表標題 空気圧反射デバイスをを用いた拮抗駆動系の協調的運動生成
3. 学会等名 計測自動制御学会自律分散システムシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮下和大, 増田容一, 福原洸, 郡司芽久, 多田隈建二郎, 石川将人
2. 発表標題 馬の後肢を模倣した脚内運動機構の開発
3. 学会等名 計測自動制御学会自律分散システムシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村上浩基, 増田容一, 石川将人
2. 発表標題 反射による即時適応メカニズム探求のための2脚ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 若本稜生, 増田容一, 郡司芽久, 福原洸, 多田隈建二郎, 石川将人
2. 発表標題 脚軌道生成のための2関節筋を備えたネコ後肢型無脳ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横田陸矢, 福原洸, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 首長竜の遊泳におけるヒレ間・ヒレ内協調運動に関する一考察
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮下和夫, 増田容一, 郡司芽久, 福原洸, 多田隈建二郎, 石川将人
2. 発表標題 ウマの腱特性を再現可能なバネ直列型腱モジュールの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田容一, 宮下和夫, 石川将人
2. 発表標題 バルブでつくるロボットの神経基盤 第二報: 連続的な外力フィードバックが可能な受容器デバイスの開発
3. 学会等名 計測自動制御学会自律分散システムシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 乗田篤志, 浅岡雄也, 鈴木朱羅, 福原洸, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 ウマが示す移動速度に応じた頭頸部と脚部の協調運動を再現可能な自律分散制御モデル
3. 学会等名 計測自動制御学会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 山田泰勢, 石川将人
2. 発表標題 結合振動子ネットワークのランダム生成によるロコモーションの考察
3. 学会等名 計測自動制御学会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 鈴木朱羅, 石川将人
2. 発表標題 非生物ロコモーションのための手応え制御：三叉ヘビを用いたケーススタディ
3. 学会等名 計測自動制御学会自律分散システムシンポジウム
4. 発表年 2022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
研究分担者	石黒 章夫 (Ishiguro Akio) (90232280)	東北大学・電気通信研究所・教授 (11301)	

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
---------	---------