東北大学 TOHOKU UNIVERSITY　神奈川大学 KANAGAWA UNIVERSITY

Press Release

2024 年 10 月 29 日

報道機関　各位

国立大学法人東北大学
神奈川大学

生物規範型制御方式から首長竜の遊泳様式を復元
古生物の新たな運動復元手法として期待

【発表のポイント】

- 中生代に生息していた首長竜はほぼ同じ大きさのヒレに変化した四肢を持っていましたが、それらをどのように動かして泳いでいたのかは今も論争が続く古生物学上の大きな問題の一つです。
- 首長竜の遊泳様式を復元（注１）するために、現生の四足動物を参考にして四肢のヒレを協調させる生物規範型自律分散制御則（注２）を構築し、首長竜型ロボットに実装して生成される運動様式を調べました。
- ヒレの羽ばたき周期や前後ヒレの間隔に応じて、前ヒレの羽ばたきが生み出した渦列（注３）を活用するタイミングで後ろヒレの羽ばたき方を柔軟に変化させてことで効果的な推進力を生み出す様子が観察されました。

【概要】

絶滅した古生物の動きの復元では、類似した形態を持つ現生種を手がかりに類推するという手法が広く用いられています。現生種に見られない特異な形態を持つ古生物の場合、この手法を用いることはできないため、それらの動きの復元は非常に困難でした。このため、フタダバスズキリュウなどの首長竜が四肢にある翼のような大きなヒレをどのように動かして泳いでいたのかは、今も論争が続く古生物学上の大きな問題の一つとなっています。

東北大学電気通信研究所の佐藤光暁、小川久介大学院生（当時）、福原洸助教、石黒章夫教授と神奈川大学の佐藤たまき教授、マンチェスター大学の William Sellers 教授らの研究グループは、イヌやネコをはじめとする様々な現生四足動物種の足並みを再現可能な生物規範型の自律分散制御(注２)を基盤に設定することで、首長竜型ロボットに羽ばたき周期や形態の変化に呼応した前後ヒレ間の合理的な協調パターンを生成させることに成功しました。絶滅動物が状況依存的に運動様式を柔軟に調整していた様子を復元しうる新たな手法として期待されます。

本研究成果は、科学誌 Scientific Reports に 2024 年 10 月 28 日付けで掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

古生物の運動様式を復元することは、絶滅した動物の動きに理解だけでなく、生活様式や当時の生態系や環境（古生態、古環境）を復元するための重要な手がかりとなります。従来の古生物学での運動復元手法としては、足跡などの生痕化石や形態の近しい現生動物の動きを基に復元する方法がありますが、運動の痕跡が化石として残り難い身体部位の動きを、高い説明能力を持って復元することは困難でした。また、近年では、ロボットやシミュレーションといった工学的手法を取り入れることによって、古生物の運動様式に関する仮説を物理現象として検証する復元手法が開発されています。しかしながら、移動方向や移動速度の変化や、形態の変化に対して古生物がどのように運動を調整していたのかという運動の柔軟性を含めた復元には大きな課題がありました。

このような古生物の運動復元に関する題の一つに「四翼問題(four-wing problem)」と呼ばれるものがあります。これはフタバスズキリュウに代表される恐竜時代の海生爬虫類である首長竜の四肢の大きなヒレを活用した遊泳パターンを論じた問題です（図 1）。ウミガメやペンギンなどの現生動物は、主に大きな前足のヒレで推進力を生み出し、小さな後ろ足のヒレを舵取りとして活用しています。一方で首長竜は、前足と後ろ足のヒレがどちらも大きいという特異な形態を持つため、四肢の大きなヒレの協調パターンは現生動物を参照して復元することが非常に困難です（四翼問題）。四肢の大きなヒレ状の形態は、生物進化の長い歴史をみても首長竜だけにみられるユニークなものですが、ジュラ紀から白亜紀の長い期間に世界中に生息しており、その運動様式の復元は生物進化の理解を紐解くうえで非常に重要な課題の一つになっています。

今回の取り組み

首長竜の四翼問題に対して、東北大学電気通信研究所の佐藤光暁、小川久介（当時大学院生）、福原洸助教、石黒章夫教授と神奈川大学の佐藤たまき教授、マンチェスター大学の William Sellers 教授らの研究グループは、イヌやネコなどの現生の四足性動物の足並みを再現可能な生物規範型の自律分散制御(注2)を基盤とした運動復元手法を開発しました（図 2）。これまでの生物学とロボット学の融合領域研究から、現生動物の状況依存的な運動パターンは、脳の中枢神経系からの信号だけでなく、脊髄内の分散的な運動回路網や、四肢の局所的な感覚情報に基づいた運動調整によって生み出されていることが示唆されています。こうした現生動物の自律分散的な運動制御は古生物の特異な形態においても有用であると仮説を立てた同グループは、各ヒレが自らの羽ばたき運動の手応えに応じて運動パターンを調整する制御を提案し、開発した首長竜ロボットへ実装・検証しました。

検証の結果、首長竜型ロボットに羽ばたき周期や形態の変化に呼応した前後

ヒレ間の合理的な協調パターンを生成させることに成功しました。提案制御によって生み出された前後ヒレの協調パターンでは、前ヒレの羽ばたきによって生み出された渦列（注３）を後ろヒレが活用することで、後方への流れが強まることが確認されました。また、羽ばたき周期や前後のヒレの距離を変更しても、提案制御によって前後のヒレの協調パターンが柔軟に調整され、様々な状況に対応して推進力の高い泳ぎが実現されました。古生物の柔軟な運動様式を復元したのは世界で初めての成果です。

今後の展開

本研究で新たに提案された自律分散制御に基づく古生物の運動復元手法は、首長竜の運動復元に留まらず、古動物の柔軟な運動様式を復元しうる新たな手法として期待されます。

また、現生動物にはみられない特異な形態での合理的な運動様式を生成し得る本手法は、生物規範ロボットの参照先をこれまでの現生生物だけでなく、古生物をも含めた幅広い生物種へと拡大しうることが期待されます。未来の動物型ロボットの姿かたちは、今よりもずっとバリエーションが豊かになるかもしれません。

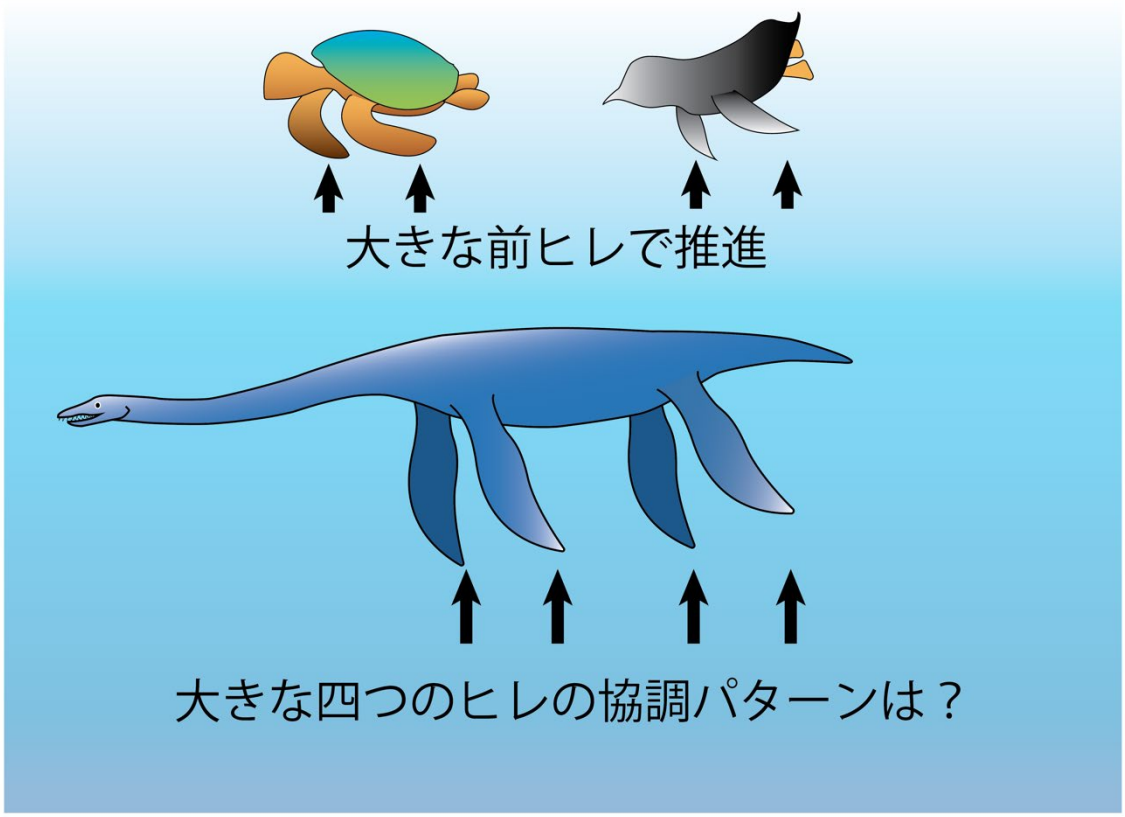

図 1. 特異な形態を持つ首長竜。ヒレで遊泳する現生動物は、前ヒレを活用して推進するが、首長竜は前ヒレも後ろヒレも非常に大きく、どちらも推進に活用し得ると考えられている。首長竜の四肢の協調問題は「四翼問題（four-wing problem）」として議論されており、古生物学における長年の運動復元課題の一つである。

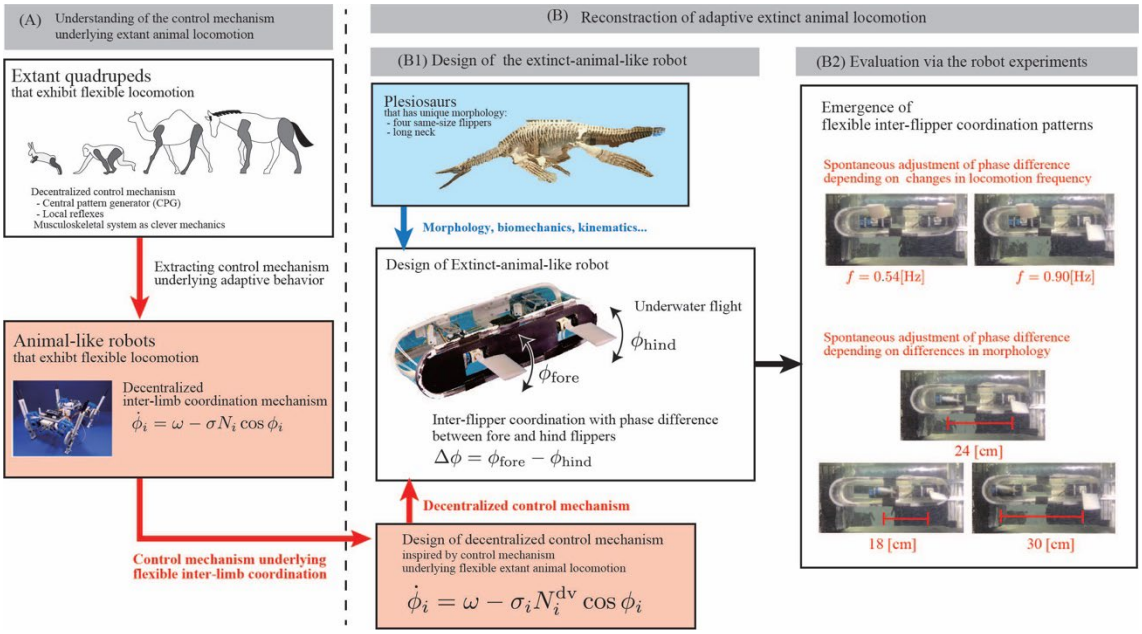

図 2. 生物規範運動制御に基づく古生物の運動復元。（A）現生動物が示す柔軟な足並み（歩容）を再現可能な運動制御則の抽出。（B）古生物型ロボットによる運動復元。(B1)古生物の形態を参考にした移動ロボットを開発し、(A)で抽出した生物規範運動制御を実装する。(B2)ロボットの運動周期や形態の変化といった様々な状況に対して効率的な運動様式が自己組織的に生成される。

【謝辞】
This study was supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers JP19K15010 and JP18K03822, JP22H00203, Innovation inspired by Nature" Research Support Program, SEKISUI CHEMICAL CO. LTD, and the Japan Science and Technology Agency, CREST (JPMJCR14D5).

【用語説明】

注1.　復元：古生物の形態や動きを何かしらの指標やアルゴリズムから構成する手法である。構成されたものは実際の古生物の形態や動きと比較することは原理的にできないため、再現とは異なる。

注2.　渦列：同じ循環を持つ渦糸が、直線上で等間隔に並んだものを渦列という。ヒレの羽ばたき運動では、打ち下ろし運動と打ち上げ運動のそれぞれで循環方向が逆転した渦列が生み出される。

注3.　自律分散制御: システムを構成する個々の要素（自律個）が局所的に知覚される情報に対して判断・行動することで、システムの大域的な振る舞いを生み出す制御方策である。

【論文情報】

タイトル：Rethinking the four-wing problem in plesiosaur swimming using bio-inspired decentralized control

著者：Akira Fukuhara*, Mitsutoshi Sato, Hisayuki Ogawa, Tamaki Sato, William Sellers, Akio Ishiguro

*責任著者：東北大学電気通信研究所　助教　福原 洸

掲載誌：Scientific Reports

DOI：101038/s41598-024-55805-z

URL: https://doiorg/101038/s41598-024-55805-z

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学電気通信研究所

教授 石黒章夫

TEL:022-217-5465

Email: akio.ishiguro.b1@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学電気通信研究所

総務係

TEL:022-217-5420

Email: riec-somu@grp.tohoku.ac.jp

神奈川大学企画政策部広報課

TEL:045-481-5661

Email：kohou-info@kanagawa-u.ac.jp