

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15010

研究課題名（和文）現存生物に内在する自律分散制御則から切り拓く古生物の運動様式の革新的再現手法

研究課題名（英文）Reconstruction of extant animals locomotion based on decentralized control mechanism extracted from extant animals

研究代表者

福原 洸（Fukuhara, Akira）

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：10827611

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、自律分散制御の観点から絶滅した海棲爬虫類「首長竜」の適応的な遊泳様式の復元を試みた。首長竜の特異な形態の特徴の1つである四肢の大きなヒレを協調させた遊泳様式復元を自律分散制御の観点から取り組んだ。具体的には、開発した首長竜型ロボットに、現生陸棲動物の四肢間協調から抽出した自律分散制御速を起点とし、ヒレの運動位相の調整制御則を実装し、様々な遊泳条件において発現する遊泳パターンとその推進効率を評価した。その結果、ヒレの羽ばたき周期やヒレの間の距離に応じて、最適な協調関係を自律的に発現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とした首長竜はその特異な形態から、その運動様式は多くの謎に包まれていた。こうした絶滅動物の運動復元は、絶滅動物の生活様式や絶滅動物を含む古環境の復元に対する重要な手がかりとなる。また、特異な身体構造を持つ古生物の適応的・合理的な運動様式を追求することは、現生動物のみを対象とした生物規範ロボットからは生まれぬ形態と制御の在りようについて考察を深めることが可能となる。

研究成果の概要（英文）：We attempted to reconstruct the swimming style of the plesiosaurs from the viewpoint of autonomous decentralized control by coordinating the large fins of the four limbs, which is one of the characteristics of its unique morphology. In this study, we implemented an autonomous decentralized control law based on the autonomous decentralized control speed extracted from the limb coordination of terrestrial animals to the developed plesiosaurs-like robot. The robot experiments demonstrated that the inter-flipper coordination spontaneously changes in response to various swimming conditions, realizing efficient swimming patterns. In addition, visualization experiments using Particle Image Velocimetry (PIV) revealed that the interference of vortex trains generated by the fore and hind flippers is important for the efficient swimming patterns of the plesiosaurs-like robot.

研究分野：生物規範ロボット

キーワード：自律分散制御 生物ロコモーション 古生物 首長竜

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太古の地球を生きた動物は、どのように動き回っていたのだろうか?これまでの古生物の運動復元は、形態に近い現生生物の運動や、足跡などの痕跡化石から得られる情報から検討されてきた。しかしながら、現生生物と比較が難しい特異な形態を持つ古生物や、遊泳などのそもそも痕跡が残らない運動については、従来手法の適用が困難である[1, 2, 3]。古生物の運動様式について合理性を担保しつつ議論し得るためにはどのような方法論が有効なのであるか? (図1)

そこで本研究は、現生生物が示す適応的な移動運動に着目し、その背後にある運動制御メカニズムを自律分散制御則として数理言語化してきた。この現生生物から抽出した運動制御が、古生物の運動様式を再現・理解するための突破口となり得る。なぜならば、いつの時代の生物であっても、身体に有する運動自由度を巧みに操り、周囲の環境とリアルタイムで合理的な折り合いをつける適応能力が不可欠だからである。

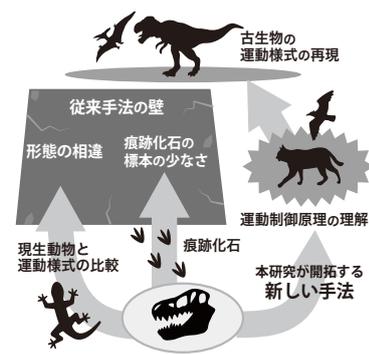


図1：古生物の運動再現手法

2. 研究の目的

本研究は、身体や環境に呼応した運動様式を生み出す運動制御メカニズムの視座から、古生物の運動様式の新たな再現手法の構築を目的とする。本課題の取り組みは、構成論的古生物学ともいふべき新たな学門領域の創成に大いに資するものと期待される。

3. 研究の方法

研究目的達成のために本課題では、首長竜(図2)と呼ばれる水棲爬虫類の遊泳様式に着目する。首長竜は、世界中に広く分布し中生代三畳紀から白亜紀の長い時代にかけて繁栄した。しかしながら、その遊泳様式は、次に挙げる2点の特異な形態により理解が阻まれている：

特異な形態1) 非常に長く発達した頸部

特異な形態2) 同じ大きさのヒレ状の四肢

本申請では、首長竜の四肢と長大な頸部がどのように協調し、適応的な遊泳を実現していたのか? という問題を解き明かすために、研究項目1) 前後のヒレ状の四肢がどのように協調するのか、そして、研究項目2) 翼と頭頸部の協調運動はいかなるものかという2つの要素に着目し、現生動物から抽出した運動制御メカニズムから復元を試みる。

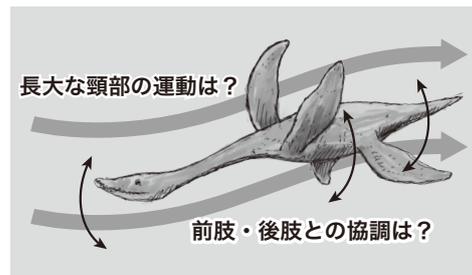


図2：首長竜の遊泳様式は?

4. 研究成果

研究成果1) 首長竜の四肢の協調関係について

首長竜は、そのヒレ状の四肢の形状から、ペンギンやウミガメのように、羽ばたきながら遊泳していたと考えられている[4]。すなわち、首長竜の遊泳様式は、前肢のヒレと後肢のヒレのそれぞれの羽ばたきの位相関係から整理することができる。これまで先行研究によって様々な前後のヒレの協調関係が提案されてきた[5, 6, 7, 8]。

本研究では、研究代表者らがこれまで行ってきた「現生の陸上四脚動物の示す適応的な歩行・走行様式を再現可能な脚間制御メカニズム」を起点として、前後のヒレが自律分散的に協調可能なヒレ間協調メカニズムを構築・検証を行った。その結果、開発した首長竜ロボットの前後のヒレが、羽ばたきの周期やヒレの間隔に応じて、効率的な協調関係を自律的に生成することに成功した[9]。また、ロボットのヒレ周りの流体の可視化・解析から(図3)、前肢のヒレの作り出した渦列が後肢のヒレの遊泳効率に大きく影響することが明らかとなった。これらの結果は、古生物のような特異な形態であっても、環境と身体の力学的相互作用を考慮したシンプルな自律分散制御によって、合理的な運動様式が生成可能であることを示唆しており、制御の観点から古生物



図3：首長竜ロボットの遊泳実験とヒレ周りの渦列の干渉計測

の運動様式を復元する新しい手法の有用性を示すものである。

研究成果2) 首長竜の頭部と翼の協調関係について

これまでの首長竜の頭頸部に関する遊泳への影響に関する考察は流体中における抵抗の算出等に留まっており[10]、翼と頭部の協調運動に関する考察は十分にされていない。この課題に対して本研究では、現生動物であるペンギンの遊泳様式の理解から取り組んだ。ペンギンが示すポーポイジングと呼ばれる遊泳様式を観察したところ、本研究では、水中において翼の羽ばたき運動に対して頭頸部がピッチ方向に屈曲運動することを世界で初めて明らかとなった(図4)[11]。

また、ペンギンが示す翼と頭部の協調関係の物理的合理性をシミュレーションによって検証したところ、頭部の屈曲運動によって、遊泳中の圧力抵抗が低減されること、そして、体幹の姿勢が調整されるという頭部の役割を示唆する結果が得られた[12]。これらの成果は、長い間なぞであった首長竜の長大な頭頸部の運動機能を明らかにする突破口となると期待される。

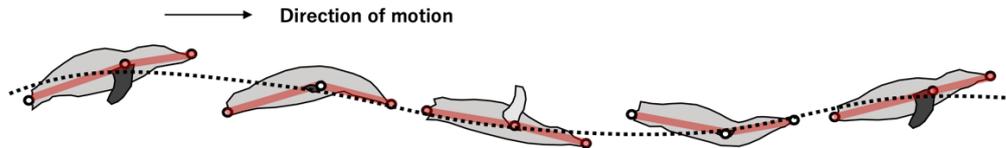


図4：ペンギンが示す翼と頭部の協調運動

参考文献：

1. Hutchinson J. R. and Gatesy S. M., "Dinosaur locomotion: Beyond the bones," *Nature*, 440, pp. 292-294, 2006.
2. Falkingham P. L. and Gatesy S. M., "The birth of a dinosaur footprint: Subsurface 3D motion reconstruction and discrete element simulation reveal track ontogeny," *PNAS*, 111, 51, pp. 18279-18284, 2014.
3. Nuakatura, J. A., Melo K., Horvat T., Karakasikiotis K., Allen V. R., Andikfar A., Andrada E., Arnold P., Laustroer J., Jutchinson J. R., Fischer M. and Ijspeert A. J., "Reverse-engineering the locomotion of a stem amniote," *Nature*, 565, pp.351- 355, 2019.
4. Motani R., "The evolution of marine Reptiles," *Evolution: Education and Outreach*, 2, pp. 224-235, 2009.
5. Muscutt, L. E., Dyke G., Weymouth G. D., Naish D., Palmer C., and Ganapathisubramani B., "The four-flipper swimming method of plesiosaurs enabled efficient and effective locomotion," *Proc Biol Sci* **284**, doi:10.1098/rspb.2017.0951 (2017).
6. Carpenter K. and Sanders F., "Plesiosaur Swimming as Interpreted from Skeletal Analysis and Experimental Results," *Transactions of the Kansas Academy of Science* **113**, doi:10.1660/062.113.0201 (2010).
7. Liu S., Smith A.S., Gu Y., Tan J., Liu C. K., and Turk G., "Computer Simulations Imply Forelimb-Dominated Underwater Flight in Plesiosaurs." *PLoS Comput Biol* **11**, e1004605, doi:10.1371/journal.pcbi.1004605 (2015).
8. Newman, B. and Tarlo, L. A. "Giant marine reptile from Bedfordshire." *Animals* **10**, 61-63 (1967).
9. 佐藤光暁, 福原洗, 小川久介, 佐藤たまき, ウィリアム セラーズ, 石黒章夫, "自律分散制御の視座に基づく古生物の適応的な運動様式の復元手法," 第32回自律分散システム・シンポジウム, 2A1, 2020.
10. Troelsen P.V., Wilkinson D.M., Seddighi M., Alanson D.R., and Falkingham P.L., "Functional morphology and hydrodynamics of plesiosaur neck: does size matter?" *Journal of Vertebrate Paleontology*, 39(2), e1594850, 2018.
11. 小川久介, 福原洗, 加納剛史, 石黒章夫, "ペンギンの遊泳における翼と頭部の協調運動," 第41回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会, 2020.
12. 小川久介, 福原洗, 加納剛史, 石黒章夫, "翼と頭部の協調によるペンギンの高速遊泳メカニズム," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2020, 1A1-E09, 2020.
13. 小川久介, 福原洗, 加納剛史, 石黒章夫, "翼と頭部を協調して遊泳するペンギン型ロボットの開発," 第43回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐藤光暁, 福原洸, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 ヒレ型ロボットから探る首長竜の遊泳様式
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019 in Hiroshima
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川久介, 佐藤光暁, 福原洸, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 ペンギンの高速遊泳における翼と頭部の協調運動
3. 学会等名 第25回創発システムシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤光暁, 福原洸, 小川久介, 佐藤たまき, William SELLERS, 石黒章夫
2. 発表標題 自律分散制御の視座に基づく古生物の適応的な運動様式
3. 学会等名 第32回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川久介, 福原洸, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 ペンギンの遊泳における翼と頭部の協調運動
3. 学会等名 第 41 回 エアロ・アクアバイオメカニズム学会 定例講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川久介, 福原洸, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 翼と頭部の協調によるペンギンの高速遊泳メカニズム
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川久介, 福原洸, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 翼と頭部を協調して遊泳するペンギン型ロボットの開発
3. 学会等名 第43回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会
4. 発表年 2020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 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Fukuhara
2. 発表標題 Study on Reconstruction of Extinct Marine Reptile's Adaptive Locomotion Based on Decentralized Control Mechanism
3. 学会等名 IMS Workshop Toward an integration of fluids, ecology, and evolution in Biofluids 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ：<http://www.cmplx.riec.tohoku.ac.jp/jp/>

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			
英国	The University of Manchester			