

令和 5 年 5 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K19336

研究課題名（和文）超高速運動の進化から探る身体バネの局所計算機構

研究課題名（英文）Exploration of Local Computational Mechanisms in the Evolution of Ultrafast Movement in Elastic Bodies

研究代表者

加賀谷 勝史（Kagaya, Katsushi）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任研究員

研究者番号：00580177

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：動物行動は脳だけでなく、身体、そして環境との相互作用の中で発現する。目的は、しなやかに変形する身体を中心に起きる相互作用を計算と捉え、その内容を明らかにすることである。とくに外骨格身体バネが神経筋肉系と環境と相互作用して発現する、筋肉収縮スピードを超える超高速運動の機構を明らかにすることである。対象系のモデリングをし、そこから本質的と考えられる設計を抜き出し、機構系を構築し実証する、構成論的アプローチをとった。節足動物(シャコやアギトアリ)の超高速運動機構系、タコの腕を対象に研究を展開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

身体に embodied された機構系の進化、発生・発達がデザイナーなき自己組織化過程であることを考えると、同レベルの人工物を人類がまだつくっていないことから、本研究はその自己組織化原理解明へとつながる重要な萌芽的成果が得られたといえる。計算や情報処理というと脳を含む神経系だけが行うことと考えられがちであるが、本研究成果は身体や環境そのものが計算を行っていることを示している。生物系の観察から洞察を得るだけには止まらずに、機構系を構成して計算を現実に行わせることによってプルーフオブコンセプトを提供したという学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Animal behavior manifests not only in the brain but also through interactions with the body and the environment. The goal is to perceive the interactions occurring around a flexibly deforming body as computations and to clarify their nature. In particular, we aim to elucidate the mechanisms of ultrafast movements that surpass muscle contraction speeds, manifested through the interaction of an exoskeletal body spring with the neuromuscular system and the environment. We took a constructive approach, modeling the target system, extracting what we believe to be essential designs, and building and demonstrating the mechanism system. We have carried out our research focusing on the ultrafast movement mechanisms of arthropods (such as mantis shrimps and trap-jaw ants) and the arms of octopuses.

研究分野：動物生理学

キーワード：リザバーコンピューティング 超高速運動 バイオインスパイアードロボット バイオミメティクス  
機械学習

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。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

あらゆる階層・次元に存在する生物多様性の理解は、現代社会および生物学の重要課題である。しかし、その理解のための情報は、静的なものにほとんど依存している。動物の運動のような動的情報を分類体系化する方法は確立していない。その方法確立の足掛かりとして、人工ニューラルネットワークを使った機械学習技術のリザーコンピューティングを用いた方法を当初提案した。

動的情報は、関心ある系をさらに部分系に分解してしまうと、内部が強く連結している場合には、失われてしまう。したがって、このような還元論的手法をとらずに、動的情報を科学的に適切に扱うひとつの方法として、関心ある系を部分系として使って計算機を構成するような構成論的アプローチがある。申請者が当初研究対象としていた系は、口脚類のシャコである。なぜシャコを対象とするとよいかには二つの理由があった：

(1) 図式の一致：リザー計算の図式は、入出力に対して中に高次元の力学系(リザー)があり、そのリザーの計算能力を特徴づけるというものである。一方、シャコの捕脚は、筋肉-ばねネットワーク-パンチ運動であり、図式として一致している。

(2) 豊富な静的情報：先行研究で、外骨格の形態学的、分子系統学的知見について、他のグループによって知見が蓄積しており、その基盤の上に本研究が展開できる。静的知見とは相補的に動的計算機構の探求につなげられる。

これらの二つの理由によりシャコの超高速運動を当初の対象系として定めた。

### 2. 研究の目的

その方法確立の足掛かりとして、生物多様性の中でも、やわらかく変形を伴う運動の多様性を計算能力として特徴づける枠組みを、リザーコンピューティングというリカレントニューラルネットワーク(RNN)を核とした機械学習技術を用いて構築することが目的である。

### 3. 研究の方法

背景で少し述べた構成論的アプローチをとった。シャコは感染症流行のせいで入手が困難となり、研究対象を別に考える必要が出た。シャコ以外にも同様の超高速運動を行うアギトアリについて研究を展開した。シャコロボットの構成実験を行った。そしてタコの腕を模したシリコン製のロボットアームを用いた研究も展開した。シャコにおいては、人工筋肉を用いた機構系を構築してその動作検証実験を行った。タコ腕では物理リザー計算機を構成して、水中と空気中という環境条件の違いによって計算能力の変化があるかを検証した。また、統計的モデル構成、データを用いたパラメータ推測と、ベイズ学習したモデルによる予測、その能力の情報量規準によるモデル評価法を活用して、動物行動の個性の解析、疫学的データの解析、細胞生物学的データの解析などを行った。

### 4. 研究成果

シャコ：シャコロボットのリンケージが純粹な回転だけではなく並進もすることで円軌道ではなく楕円のより直線に近い運動をしていることがシャコの運動から見出された。特に、スマッシャーのほうスピアラーシャコよりも7倍速い運動をしますが、スマッシャーのほうがこの並進運動の割合が増えて楕円軌道に近くなることから、この機能的効果を調べるためロボットを構成し検証すると、運動のパフォーマンスが上がるのが分かった。また、水中での運動を実現し、急加速による圧力低下が引き金となるキャビテーションの生成にも成功した。

アギトアリ：マイクロCTスキャンにより筋肉と骨格の微細構造を明らかにした。特に、超高速運動では、弾性エネルギーを蓄積するためのバネに必須の新たなラッチ構造を複数持つボールジョイントが見出された。このジョイントのラッチ構造を3Dプリントで拡大印刷し動作を確認し、ハイスピード撮影によってラッチする時の速度変化を明らかにすることで、構造と運動がよく一致した。複数のラッチが共同動作することが初めて明らかになったが、複数のラッチが齟齬なく動作するようになることから、これは一つの自己組織化過程を経てこのような形態と動的機能の一致が起きると言える。

タコ：シリコン製のタコ腕がリザーバー計算の意味で計算能力（メモリと非線形性）を持つこと自体は先行研究によって明らかになっていた。本研究成果で、その能力が空気中では落ちることが判明した。また、腕の長さにも依存して計算能力は変化し長くなるとメモリが増した。シリコン製では海水と淡水では能力差が見出されなかったが、死体のタコ腕を用いた実験ではメモリフアンクション（遅延時間に対応した短期記憶能力の関数）に違いがあり、海水で記憶の減衰が穏やかになった。この結果は、脳と身体だけでなく、身体と環境との動的相互作用が計算能力には重要であることを示している。

すべての期間を通して、さまざまな対象系において局所的で動的な相互作用（計算）をデータに基づいて定量化する方法論確立の確かな萌芽を実現できた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Aonuma Hitoshi, Naniwa Keisuke, Sugimoto Yasuhiro, Ohkawara Kyohsuke, Kagaya Katsushi	4. 巻 in press
2. 論文標題 Embodied latch mechanism of the mandible to power at an ultrahigh speed in the trap-jaw ants <i>Odontomachus kuroi</i>	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Biology	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1242/jeb.245396	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Katsushi Kagaya, Tomoyuki Kubota, Kohei Nakajima	4. 巻 -
2. 論文標題 Self-organized criticality for dendritic readiness potential	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2209.09075	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 加賀谷 勝史	4. 巻 37
2. 論文標題 環境へと開く脳・身体 -ザリガニとソフトロボットタコ腕	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 人工知能	6. 最初と最後の頁 721 ~ 726
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11517/jjsai.37.6_721	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ito Fumio, Ishii Yusuke, Kurumaya Shunichi, Kagaya Katsushi, Nakamura Taro	4. 巻 7
2. 論文標題 Instantaneous Force Generation Mechanism Based on the Striking Motion of Mantis Shrimp? Design and Control Method of Cavitation by Simulation and Experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 9342 ~ 9349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3190614	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fumio Ito, Shunichi Kurumaya, Riki Ono, Katsushi Kagaya, Taro Nakamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Instantaneous force generation mechanism based on the striking motion of mantis shrimp - Analytical and experimental verification of the increase in instantaneous force using exoskeleton spring mechanism-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/lra.2021.3094740	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsushi Kagaya, Bowei Yu, Yuna Minami, Kohei Nakajima	4. 巻 -
2. 論文標題 Echo state property and memory in octopus-inspired soft robotic arm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RoboSoft	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/RoboSoft54090.20	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Harada Keita, Hayashi Naoki, Kagaya Katsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Individual behavioral type captured by a Bayesian model comparison of cap making by sponge crabs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PeerJ	6. 最初と最後の頁 e9036 ~ e9036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7717/peerj.9036	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 -

1. 著者名 Mizumoto Kenji, Kagaya Katsushi, Chowell Gerardo	4. 巻 97
2. 論文標題 Effect of a wet market on coronavirus disease (COVID-19) transmission dynamics in China, 2019?2020	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Infectious Diseases	6. 最初と最後の頁 96 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijid.2020.05.091	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 Mizumoto Kenji, Kagaya Katsushi, Chowell Gerardo	4. 巻 18
2. 論文標題 Early epidemiological assessment of the transmission potential and virulence of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in Wuhan City, China, January?February, 2020	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 BMC Medicine	6. 最初と最後の頁 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s12916-020-01691-x	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 Kagaya Katsushi, Noma-Takayasu Naoto, Yamamoto Io, Tashiro Sanki, Ishikawa Fuyuki, Hayashi Makoto T	4. 巻 3
2. 論文標題 Chromosome instability induced by a single defined sister chromatid fusion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Life Science Alliance	6. 最初と最後の頁 e202000911
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.26508/lisa.202000911	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 -

1. 著者名 Inoue Katsuma, Kuniyoshi Yasuo, Kagaya Katsushi, Nakajima Kohei	4. 巻 -
2. 論文標題 Skeletonizing the Dynamics of Soft Continuum Body from Video	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soft Robotics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/soro.2020.0110	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 -

1. 著者名 Wakita D., Kagaya K., Aonuma H.	4. 巻 17
2. 論文標題 A general model of locomotion of brittle stars with a variable number of arms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Royal Society Interface	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsif.2019.0374	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 -

1. 著者名 Harada K., Hayashi N., Kagaya K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Individual behavioral type captured by a Bayesian model comparison of cap making by sponge crabs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PeerJ	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7717/peerj.9036	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 -

1. 著者名 Mizumoto K., Kagaya K., Chowell G.	4. 巻 -
2. 論文標題 Early epidemiological assessment of the transmission potential and virulence of 2019 Novel Coronavirus in Wuhan City: China, 2019-2020	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 BMC Medicine (in press)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s12916-020-	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mizumoto K., Kagaya K., Chowell G.	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Euro Surveillance	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2807/1560-7917.es.2020.25.10.200018	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 Daiki Wakita, Katsushi Kagaya, Hitoshi Aonuma	4. 巻 -
2. 論文標題 Generalized locomotion of brittle stars with an arbitrary number of arms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/616383	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Katsushi Kagaya, Naoto Noma, Io Yamamoto, Sanki Tashiro, Fuyuki Ishikawa, Makoto T Hayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 A single defined sister chromatid fusion destabilizes cell cycle through micronuclei formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/607341	査読の有無 無
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11件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Hannah Sasaki, Katsushi Kagaya, Ryo Terajima, Kohei Nakajima, Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 Signatures of self-organized criticality in spontaneous walking behavior of Porcellio scaber
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsushi Kagaya, Tomoyuki Kubota, Kohei Nakajima
2. 発表標題 Self-organized criticality for dendritic readiness potential
3. 学会等名 Workshop on Unconventional Computing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Bowe Yu, Katsushi Kagaya, Yuna Minami, Kohei Nakajima
2. 発表標題 Preliminary report of difference of memory capacity among sea and tapwater in dead octopus arm
3. 学会等名 Workshop on Unconventional Computing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加賀谷勝史
2. 発表標題 超高速運動での神経・身体統合性へのアプローチ
3. 学会等名 基礎生物学研究所 動物行動学研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田桂太, 林直輝, 加賀谷勝史
2. 発表標題 カイカムリの帽子づくり行動個性へのベイズ的アプローチ
3. 学会等名 日本動物学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsushi Kagaya
2. 発表標題 Latch-mediated spring-driven movements by mantis/snapping shrimp
3. 学会等名 RIMS Research Project “Mathematical Biofluid Mechanics”（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunichi Kurumaya, Fumio Ito, Riki Ono, Katsushi Kagaya, Taro Nakamura
2. 発表標題 Antagonistic Drive Mechanisms to Increase Impulsive Force Inspired by Exoskeleton Spring System of Mantis Shrimp
3. 学会等名 CLAWAR（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加賀谷勝史
2. 発表標題 ばね駆動の超高速運動における神経、筋肉、外骨格、水の相互作用
3. 学会等名 進化学会、進化の流体力学的側面：バクテリアから恐竜まで（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kagya K.
2. 発表標題 Individualities in ultrafast movement and camouflaging behavior in crustaceans
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kagaya K.
2. 発表標題 Double-latch-mediated ultrafast movement in mantis shrimp
3. 学会等名 Annual Meeting of Japanese Society for Comparative Physiology and Biochemistry
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsushi Kagaya
2. 発表標題 Compression and Extension Control of Exoskeletal Spring
3. 学会等名 比較生理生化学会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 京都大学フィールド科学教育研究センター瀬戸臨海実験所創立100周年記念出版編集委員会	4. 発行年 2022年
2. 出版社 京都大学学術出版会	5. 総ページ数 706
3. 書名 海産無脊椎動物多様性学	

〔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
---------	---------