

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2021～2023

課題番号：20KK0256

研究課題名（和文）人間の環境適応学習法の数理解析と検証による統一的理解

研究課題名（英文）Unified Understanding through Analysis and Verification of Human Environmental Adaptation Learning Methods

研究代表者

林部 充宏（Hayashibe, Mitsuhiro）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：40338934

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,000,000円

渡航期間： 5ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究の基課題「環境モデルや振動子モデルに依存しない環境適応学習による多様な運動の発現機序」は、環境適応可能なリズム運動生成をどのような計算方法で実現できるかという環境協調運動制御メカニズムを解明するものである。本国際共同研究により3つの観点で人間の環境適応学習法の数理解析と検証による統一的理解につながる成果を得ることができた。イタリアのd'Avella教授とは全身の運動シナジー構造発現プロセスの理解と再現に関する成果、英国のBurdet教授とは触覚情報の共有による運動学習の効率化に関する成果、スイスのIjspeert教授とは生物の動きを模倣する生成AIの基盤技術を開発することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、深層強化学習や模倣学習をそれぞれ用いたロボット制御の応用研究が活発に行われ注目されています。深層強化学習を活用する場合には環境適応可能な運動が生成できるものの、広大な入力空間の探索に膨大な計算コストを要することが問題となります。一方、模倣学習を用いる場合には学習した運動に近い範囲に環境適応性が制限されるという問題が一般的に知られています。今回の提案手法は深層強化学習と模倣学習の両面の利点を生かすことができ、またその欠点を補いあうことができる新しい運動生成の手法となり、多自由度系で生体の自己組織的な振る舞いの生成をAIにより実装する技術につながります。

研究成果の概要（英文）：The main theme of this research, "Mechanism of Expression of Diverse Movements through Environment-Adaptive Learning Independent of Environment Models and Oscillator Models," aims to elucidate the mechanism of environment-coordinated motion control by investigating how environment-adaptive rhythmic motion generation can be achieved through what computational methods. This international collaborative research has yielded results contributing to a unified understanding of human environmental adaptation learning methods from three perspectives. With Professor d'Avella from Italy, achievements have been made in understanding and replicating the synergy structure of whole-body movement expression processes. With Professor Burdet from the UK, achievements have been made in enhancing motor learning efficiency through shared tactile information. With Professor Ijspeert from Switzerland, foundational technologies for developing AI capable of mimicking biological movements have been developed.

研究分野：ロボティクス

キーワード：運動学習 模倣学習 深層強化学習 同期現象 運動シナジー CPG 環境適応

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

本研究の基課題「環境モデルや振動子モデルに依存しない環境適応学習による多様な運動の発現機序」は、環境適応可能なリズムな運動生成をどのような計算方法で実現できるかという環境協調運動制御メカニズムを解明するものである。環境情報が未知でも、人間が関節間の協調運動を学習アルゴリズムで発現することができる手法を開発している。四足歩行動作ではその運動学習法の有効性を示すことができたが、本国際共同研究ではさらに一歩進んで、「人間の環境適応学習法の数理解析と検証による統一的理解」と題し、一般的な身体モデルの同期現象の学習による生成モデルへと拡張し、多自由度の同期現象を統一的に理解する数理モデルを構築する。またヒトの運動学習特性を再現できるかどうかを検証する必要性があり、その実現に向け国際共同研究を行うことを目指したことから始まった。

2. 研究の目的

さまざまな動物や人間が日々行っている運動の中には、環境に適応する自然発生的な同期現象やそれに伴う運動の低次元化構造が多種多様にあり、それがいかなる数理メカニズムによって引き起こされているのかという学術的問いは本質的な数理問題である。本研究ではヒトの力学的環境適応を深く理解するため、非線形数理科学、数理工学的な手法により、様々な生体運動の同期現象や運動シナジー構造を統一的に理解する数理モデルを構築する。未知の環境ダイナミクスを知覚と感覚・運動の時空間的同期現象を創出する自己組織的数理モデルの構築を実現することは環境適応型周期運動生成メカニズムの理解において意義がある。本研究ではパラダイムシフトによりモデルをすでに想定した問題設定でスタートさせるのではなく、学習アルゴリズムによってより拡張性のある感覚運動同期制御法の開発を目指すものである。

3. 研究の方法

大きく三つの方針で研究を行った。

● 全身の運動シナジー構造発現プロセスの理解と再現

人間など生物は運動や環境条件に応じて自己組織的に身体の関節駆動のパターンを巧みに切替えています。人間の姿勢制御は主に足首関節と股関節の協調運動により行われています。身体の揺動が小さくバランスの余裕がある時には足首関節と股関節は同じ方向に同相で制御され、身体の揺動が大きくバランスの余裕がなくなる時には逆相で制御されていることが知られています。このような生物の自己組織的振る舞いには、常に“いつ”、“どのように”なめらかに切替えるかを自己組織的に判断することが必要とされます。そのうえ成長・加齢による身体特性の変化など様々な要因も加わるため、力学条件に応じた自動的な運動モード切替えをAIで再現することは容易ではありません。

本テーマについてはイタリアのFondazione Santa LuciaのAndrea d'Avella教授を訪問し、多自由度系の歩行運動に関して運動学習について運動シナジーが発現する過程を構成論的に検証する研究について意見交換と共同研究を実施した。

● 生物の動きを模倣する生成AIの基盤技術

深層強化学習は、深層学習と強化学習を組み合わせた手法です。強化学習は行動結果を評価することで試行錯誤的に学習を行うことができ、未知の環境にも適応できることが利点ですが、特にシステムの自由度が高い場合には広大な入力空間の探索に膨大な計算コストを要することが欠点となっています。また別のアプローチとして人間が同じ運動タスクを行った際の運動計測データを模倣することでロボットの学習を行う模倣学習が知られています。模倣学習は運動タスクや環境が変化しない場合にはその有効性が知られていますが、学習の際の探索範囲は基本的には狭いために、未知の環境への適応性は低いことが知られています。

スイス連邦工科大学ローザンヌ校Auke Ijspeert教授はCPG（中枢パターン発生器）に関する研究で知られている。しかし事前に設定したパターンの調整を活用しているケースが多く、パターン自体を学習で生成する研究は行っていない。環境学習性に基づき運動の同期現象を発現する数理モデルを実現するために、CPGモデルをすでに選んだ問題設定でスタートさせるのではなく、運動学習によってより拡張性のある感覚運動協調法の開発とその理解を行うこととした。

- 触覚情報の共有による運動学習の効率化

英国インペリアルカレッジの Etienne Burdet 教授の研究室ではこれまで人の運動学習についての実験や解析を行っている。リーチング運動中の運動の特性解析や、最近では同じ物体操作タスクを二者で協調して運動学習するとその運動学習効果が高まるという興味深い研究を行っている。しかしその背後にある数理的メカニズムの解明にはいたっていない。本プロセスの計算論的再現に向けてのアドバイザーの役割を依頼する。環境の変化を与えることで運動学習のプロセスが起こり、それにより運動の時空間パターンが変化することが想定できる。

4. 研究成果

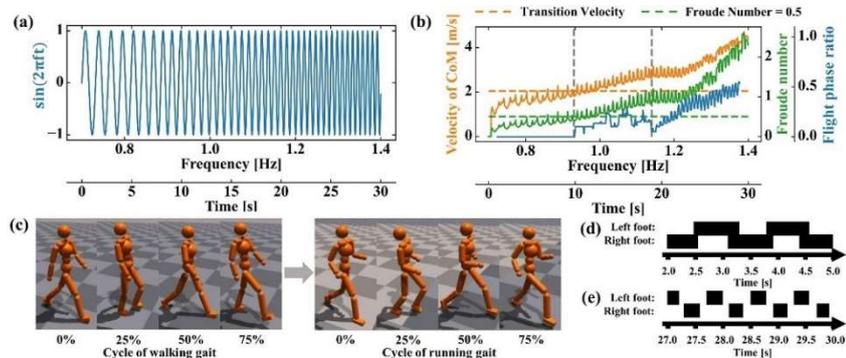
- 全身の運動シナジー構造発現プロセスの理解と再現

身体に関する力学方程式を事前知識として想定することなく、運動モードを適応的に調整できる自己組織化ニューラルネットワークを構築することを試みました。人間の姿勢制御は主に足首関節と股関節の協調運動により行われており、身体の揺動が小さくバランスの余裕がある時には足首関節と股関節は同じ方向に同相で制御され、身体の揺動が大きくバランスの余裕がなくなる時には逆相で制御されていることが知られています。この自己組織的プロセスは、先行研究ではバイオメカニクス（人体力学）モデルに基づいた数学的最適化計算でこれを再現するものが報告されています。一方、本研究では事前知識を用いずに運動経験と深層強化学習によりこの自己組織化現象をニューラルネットワークにより再現できるか検証を行いました。学習後のニューラルネットワークは運動周波数の増加に伴い、同相制御から逆相制御に遷移していく振る舞いを示し、人間と同様の運動モード遷移プロセスを再現することができました。またモード遷移に関与する要因として運動周波数、エネルギー効率が大きく関与していることがわかりました。

また全身の歩行運動の学習過程での運動シナジー低次元構造の発現プロセスの再現についても成功しました。現在、国際共著論文を執筆しおわり、査読中の状況である。

- 生物の動きを模倣する生成 AI の基盤技術

深層強化学習と模倣学習の両面の利点を生かすことができ、またその欠点を補いあうことができる新しい運動生成の手法を開発しました。本研究ではCPGの表現形式を用いた上でそのパラメータを人間の運動に模倣するように



学習する新しい計算方式を採用したことから、運動周波数を連続的に変更可能というCPGの利点を維持しながら、その出力は人間の運動を模倣するように学習することに成功しました。国際共著論文としてロボット分野の国際学術誌 IEEE Robotics and Automation Letters に2024年4月15日付けで掲載されました。

- 触覚情報の共有による運動学習の効率化

英国インペリアルカレッジの Etienne Burdet 教授の研究室に計5か月滞在し、触覚情報の共有による運動学習の効率化現象についての理解を深めた。先行研究では片手のトラッキング運動でこの現象を確認しているが、両手のステアリング操作を必要とする運動学習における触覚を介した相互作用の影響について明らかにすることを目的に実験を行い、ステアリングによって操作を行うターゲットの追従ゲームおよびフォースフィードバックシステムを作成しゲームにおける追跡誤差の評価を行った。その結果、触覚を介した相互作用によるステアリング操作を用いた運動学習の向上が確認された。また本実験における運動性能は仮想のバネの接続相手によらず向上し、視覚情報と触覚情報を上手く使用していることが考えられる。本研究成果についても、現在国際共著論文出版に向けた準備を行っているところで、本年中の出版を目指しているところである。

備考：スイスとの共同研究の部分が先方とのスケジュールが合わずリモートで実施したため、1か月分程度、合計の滞在期間が短くなった。研究自体は計画通り完了することができ、国際共著で Journal 誌に発表することができた。英国とイタリアとの共同研究期間はほぼ予定通りであった。滞在期間計 180 日未満でも研究を完了することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Li Guanda, Shintake Jun, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Soft-body dynamics induces energy efficiency in undulatory swimming: A deep learning study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	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) 10.3389/frobt.2023.1102854	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 Ahmed Muhammad Hannan, Chai Jiazheng, Shimoda Shingo, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 23
2. 論文標題 Synergy-Space Recurrent Neural Network for Transferable Forearm Motion Prediction from Residual Limb Motion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 4188 ~ 4188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23094188	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 Ahmed Muhammad Hannan, Kutsuzawa Kyo, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Transhumeral Arm Reaching Motion Prediction through Deep Reinforcement Learning-Based Synthetic Motion Cloning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biomimetics	6. 最初と最後の頁 367 ~ 367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/biomimetics8040367	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 Zhu Wei, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Autonomous Navigation System in Pedestrian Scenarios Using a Dreamer-Based Motion Planner	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3836 ~ 3843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2023.3273514	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 Shen Keli, Li Guanda, Chemori Ahmed, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Self-organizing neural network for reproducing human postural mode alternation through deep reinforcement learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-023-35886-y	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 Guo Yan, Hutabarat Yonatan, Owaki Dai, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Speed-Variable Gait Phase Estimation During Ambulation via Temporal Convolutional Network	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 5224 ~ 5236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSEN.2023.3343721	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 Tada Kenya, Sorimachi Yuhei, Kutsuzawa Kyo, Owaki Dai, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Integrated Quantitative Evaluation of Spatial Cognition and Motor Function with HoloLens Mixed Reality	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 528 ~ 528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s24020528	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 Li Guanda, Ijspeert Auke, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 9
2. 論文標題 AI-CPG: Adaptive Imitated Central Pattern Generators for Bipedal Locomotion Learned Through Reinforced Reflex Neural Networks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 5190 ~ 5197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2024.3388842	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 Zhu Wei, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 70
2. 論文標題 A Hierarchical Deep Reinforcement Learning Framework With High Efficiency and Generalization for Fast and Safe Navigation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 4962 ~ 4971
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2022.3190850	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 Zhu Wei, Guo Xian, Owaki Dai, Kutsuzawa Kyo, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 1
2. 論文標題 A Survey of Sim-to-Real Transfer Techniques Applied to Reinforcement Learning for Bioinspired Robots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems	6. 最初と最後の頁 1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNNLS.2021.3112718	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

[学会発表] 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 W. Zhu, M. Hayashibe
2. 発表標題 Learn to Navigate in Dynamic Environments with Normalized LiDAR Scans
3. 学会等名 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 C. Herneth, M. Hayashibe, D. Owaki
2. 発表標題 Learnable Tegotae-based Feedback in CPGs with Sparse Observation Produces Efficient and Adaptive Locomotion
3. 学会等名 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 L. Sulpice, D. Owaki, M. Hayashibe
2. 発表標題 Deep Reinforcement Learning for Tailorable Natural Quadruped Gait Generation
3. 学会等名 11th Int. Symposium on Adaptive Motion of Animals and Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中裕人, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏
2. 発表標題 機械学習を用いた物理振子群における同期現象の予測と評価
3. 学会等名 計測自動制御学会 東北支部 第341回研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平野貴也, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏
2. 発表標題 スパイク形式による画像の潜在表現を用いたモデルベース強化学習の性能評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中裕人, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏
2. 発表標題 機械学習を用いた物理振子群の同期ダイナミクス予測
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 W. Zhu, M. Hayashibe
2. 発表標題 Deep Reinforcement Learning based Robot Navigation in Dynamic Environments with Raw Laser Observations
3. 学会等名 第41回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平野貴也, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏
2. 発表標題 スパイク形式による画像の潜在表現を用いたモデルベース強化学習の性能評価
3. 学会等名 計測自動制御学会 東北支部 第344回研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 利根川太, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏
2. 発表標題 二輪脚倒立振り型ロボットにおける膝関節制御の導入による不整地走破性および安定性の向上
3. 学会等名 第24回計測自動制御学会SI部門講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Kojima, K. Kutsuzawa, D. Owaki, M. Hayashibe
2. 発表標題 Game-Based Evaluation of Whole-Body Movement Functions with CoM Stability and Motion Smoothness
3. 学会等名 44th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Furuhashi, K. Kutsuzawa, D. Owaki, M. Hayashibe
2 . 発表標題 Systematic Motion Integration with Multiple Depth Cameras Allowing Sensor Movement for Stable Skeleton Tracking
3 . 学会等名 44th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Hutabarat, D. Owaki, M. Hayashibe
2 . 発表標題 Temporal Variation Quantification During Cognitive Dual-Task Gait Using Two IMU Sensors
3 . 学会等名 44th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Shen, A. Chemori, M. Hayashibe
2 . 発表標題 Classification of Human Balance Recovery Strategies through Kinematic Motor Synergy Analysis
3 . 学会等名 44th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Zhu Wei、Raza Fahad、Hayashibe Mitsuhiro
2 . 発表標題 Reinforcement Learning based Hierarchical Control for Path Tracking of a Wheeled Bipedal Robot with Sim-to-Real Framework
3 . 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

備考：スイスとの共同研究の部分が先方とのスケジュールが合わずリモートで実施したため、1か月分程度、合計の滞在期間が短くなった。研究自体は計画通り完了することができ、国際共著でJournal誌に発表することができた。英国とイタリアとの共同研究期間はほぼ予定通りであった。滞在期間計180日未満でも研究を完了することができた。

Neuro-Robotics Lab, Tohoku University
<http://neuro.mech.tohoku.ac.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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	バーデット エティエンヌ (Burdet Etienne)	インペリアルカレッジロンドン・Department of Biomedical Engineering・教授	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ダヴェイラ アンドレア (d'Avella Andrea)	ローマ大学・Department of Biology・教授	

6. 研究組織（つづき）

	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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	イシュパート アウケ (Ijspeert Auke)	スイス連邦工科大学ローザンヌ校・Biorob Lab・教授	

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	Imperial College London			
イタリア	Fondazione Santa Lucia	University of Rome		
スイス	Ecole polytechnique federale de Lausanne			