

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：32689

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H05138

研究課題名（和文）脳・身体・環境の相互作用に基づく認知・運動発達の全体性理解

研究課題名（英文）Holistic approach towards understanding cognitive and motor development based on interaction among brain, body, and environment.

研究代表者

森 裕紀 (Mori, Hiroki)

早稲田大学・次世代ロボット研究機構・客員主任研究員

研究者番号：80610849

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 26,130,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、物理シミュレーションエンジンであるMujocoを基盤として、マウスの全身筋骨格シミュレーションを開発した。このシミュレーションには、853本の筋肉が全身に実装されており、マウスの動作を詳細に再現することが可能である。さらに、マウスの全身に皮膚を実装し、リアルな外観を実現した。このモデルは神経系モデルとの結合による動作を確認している。触覚の再現に関しては、マウスの肉球部分に触覚細胞を実装した。この結果、触覚モデルが適切に動作していることを確認した。本研究で開発されたマウス全身筋骨格シミュレーションと触覚モデルは、マウスの行動や感覚情報処理の研究に有用なツールとなることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発されたマウス全身筋骨格シミュレーションと触覚モデルは、マウスの行動や感覚情報処理の研究に有用なツールとなることが期待される。今後は、このモデルを用いて様々な実験を行い、マウスの行動メカニズムの解明に貢献していきたい。また、本モデルはマウスの運動制御や感覚情報処理の基礎研究に留まらず、ヒトの疾患メカニズムの解明にも応用できる可能性がある。例えば、運動障害や感覚障害を持つ疾患モデルマウスのシミュレーションを行うことで、病態の理解が深まり、新たな治療法の開発につながることを期待される。本研究の成果が、様々な分野の研究者との共同研究を促進し、神経科学研究の発展に寄与することを期待している。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a whole-body musculoskeletal simulation of a mouse based on the Mujoco physics simulation engine. This simulation incorporates 853 muscles implemented throughout the body, enabling detailed reproduction of mouse movements. Furthermore, we implemented skin on the entire body of the mouse to achieve a realistic appearance. The model has been validated by coupling it with a neural system model to confirm its functionality. Regarding the reproduction of tactile sensation, we implemented tactile cells in the mouse's paw pads. As a result, we confirmed that the tactile model functions appropriately. The whole-body musculoskeletal simulation and tactile model of the mouse developed in this study are expected to serve as valuable tools for researching mouse behavior and sensory information processing.

研究分野：構成論的発達科学

キーワード：構成論的発達科学 全身筋骨格マウスシミュレーション 神経系シミュレーション 触覚シミュレーション

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

これまでに代表者(森)は、胎児初期の行動発達について、全身筋骨格モデルと神経系モデルに基づく発達シミュレーションが行ってきた(Mori and Kuniyoshi 2010, 森・國吉 2010, Yamada et al. 2016)。しかしながら、胎児からの発達をシームレスにつなぎ、定型発達から発達障害までを一貫して説明するモデルは未だ実現しておらず、そうした相互作用全体のモデルの構築は喫緊の課題である。

ロボット研究においては、Brooks が環境とロボット身体の相互作用と内部の異なる機能を持つサブシステム間の相互作用を重視した包摂アーキテクチャを提唱(Brooks1991)し、環境の変化に適応的な行動を実現したが、その設計は試行錯誤的にならざるをえず、応用面では一部のロボットに限られている。また、機械学習によるロボット知能の獲得はごく狭い機能の実現に終始しているのが現状である。そこで考えられるのが単一の目的関数ではなく、目的関数の上位の規範を見出すことである。例えば我々は好奇心を始めとする内発的動機に基づいて目的関数を創造していくが、内発的動機モデルを内臓感覚から実装することでメタ目的関数化できれば、自律的に全体性を備えるような知能が創発する可能性がある。

2. 研究の目的

質的に異なるダイナミクスを持つシステムが互いに衝突、調整を繰り返しながら、均一なシステム単独では到達できない複雑かつ統合された認知システムが自己組織的に現れる全体性アプローチによる発達観の構築を目的とする。

3. 研究の方法

行動を通した身体と環境の相互作用の中から注意が創発する深層学習モデルと全身筋骨格マウスモデルを開発した。

4. 研究成果

以下では本プロジェクトの代表的な研究成果を紹介する

(1) 注意モデルに基づく道具身体化

この研究では、人間の視覚的注意の認知構造に着想を得た、ロボットの動作生成のための新しいモデルを提案している。このモデルでは、タスクの状態に基づいて能動的に注意対象を変更できる状態駆動型の能動的トップダウン視覚的注意モジュールを提案し組み込んでいる。このような注意を「役割に基づく注意」と呼んでおり、モーション全体を通して一貫した役割を果たし、必要な対象に能動的に注意を切り替えることができる。

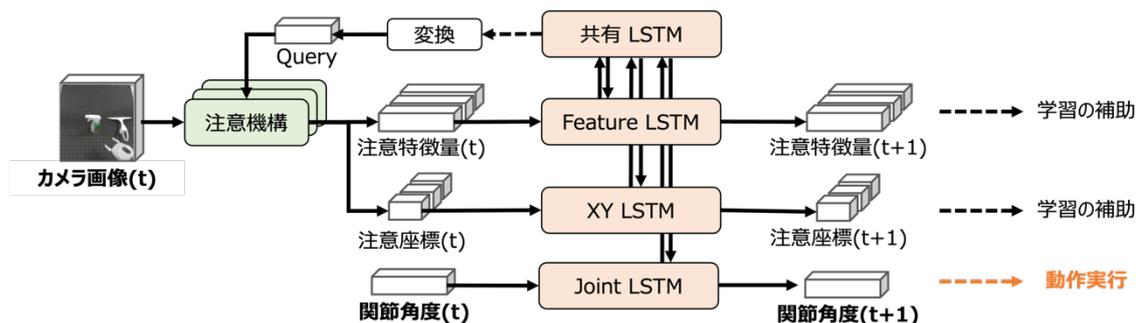


図1：能動的トップダウン注意動作生成モデル

提案モデルは、能動的トップダウン注意モジュールと、動作予測モジュールで構成される（図1）。注意モジュールは、画像から注意領域の特徴量と座標値を選択的に抽出する。動作モジュールは、複数の LSTM で構成される階層型の構造を持ち、注意を向けた特徴量、座標値、関節角度のデータを統合し、次の時間ステップでのそれぞれの値を予測する。予測された関節角度は動作生成に、注意の予測値はモデル全体の学習の補助に用いられる。また、動作モジュールの内部状態が注意モジュールにフィードバックされ、注意対象を能動的に制御する。

モデルの振る舞いを検討するため、ロボットによる道具使用タスクを学習させた（図2）。このタスクは対象物をロボット胴体の方へ引き寄せるタスクであり、対象物が近くにある場合はロボットグリッパーで直接掴んで胴体の近くへ引き寄せ、遠くにある場合は道具により手の届く範囲まで引き寄せてから掴んでさらに引き寄せる。したがって、掴んで引き寄せる動作ではグリッパーと対象物、道具で引き寄せる動作では道具と対象物の情報抽出が必要となる。

実験の結果、4つの注意点のうち2つが一貫して同じ対象に注意を向け、残りの2つが動作に応じて異なる対象に注意を向けることが示された。後者の注意点は、掴んで引き寄せる動作ではグリッパー、道具で引き寄せる動作では道具に注意を向けており、両者を一種のエンドエフェクターとして認識していた。Maravita and Iriki 2004 における、マカクザルで観察された「道具身体化」に類似している。

さらに、学習済みのモデルに未学習の道具を与えて動作させたところ、注意点は道具の先端部分に向けられ、引き寄せる動作に成功した。これは、モデルが道具を柔軟にエンドエフェクターとして再定義できることを示唆している。

以上の結果から、提案モデルは従来の外見ベースの注意の安定性を向上させるだけでなく、状況に応じて能動的に注意対象を変更する役割ベースの注意を獲得できることが示された。これにより、学習していない道具を与えられたり、妨害にさらされたりしても、安定した注意と動作を維持できる。本研究は、人間の視覚的注意の特徴を取り入れることで、ロボットがより柔軟かつ適応的に環境を認識できることを示したと言える。

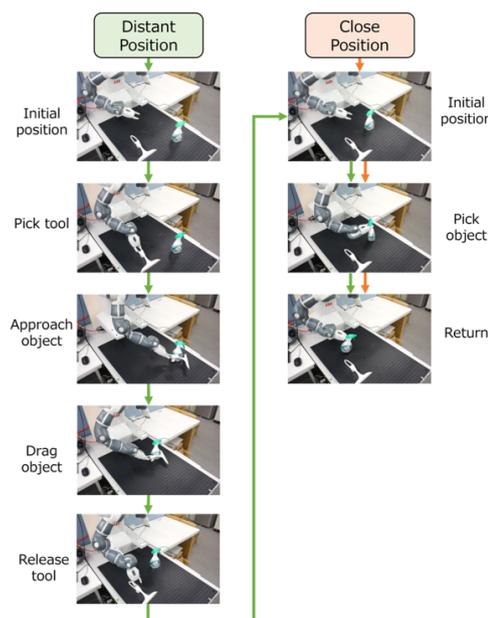


図2：道具使用タスク

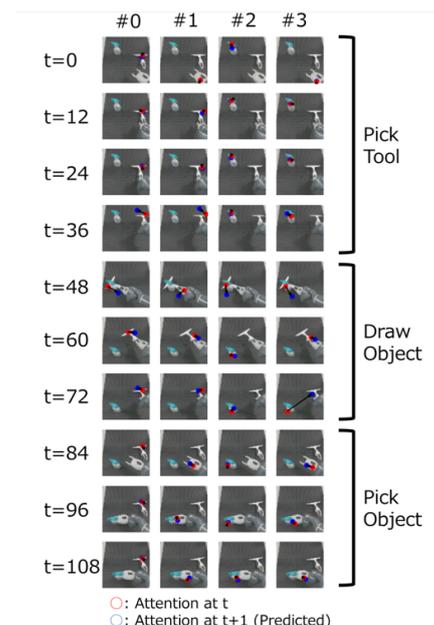


図3：各注意モジュールの注意の移り変わり

(2) 触覚を有する全身筋骨格マウスモデルの開発

本研究は、生物学的データに基づいた大規模全身筋骨格マウスモデルを構築し、機械受容器の一種であるメルケル細胞を実装することで、より生物学的に忠実なシミュレーションの実現を目指したものである。近年、動物の運動行動メカニズムを解明するために、シミュレーションモデルを用いた構成論的アプローチが注目されている。このアプローチでは、動物の身体と環境の相互作用を考慮することが重要であり、そのためには、生物学的に忠実なモデルが必要である。

コンピュータマウスモデルを構築した先行研究 Ramalingasetty et al. 2021 のモデルでは、四肢の筋骨格のみが再現されたのみでありシミュレーションも実行されていなかった。また、ラットモデルを使用して複数のタスクを深層強化学習により学習し、神経系モデル内の内部表現を検討した Merel et al. 2020 の身体モデルでは、筋肉が未実装であった。

上記に見られる身体モデルの詳細さの欠如を是正するため、本研究では、遺伝子組み換えマウスを用いて生物学的データを収集し、それに基づいた大規模な全身筋骨格モデルを構築することを目指した。

モデル構築には、腱組織に発現する緑色蛍光タンパク質 (Scx-GFP) を導入した遺伝子組み換えマウスが用いられた。このマウスでは、腱組織が緑色に蛍光するため、骨と筋腱組織の付着点を特定することが可能である。我々は、マウスの遺伝子発現イメージ、白色光イメージ、CT スキャンイメージを統合し、その統合イメージを基に既存の骨格モデルを再構成することで、全身筋骨格モデルを作成した。その結果、853 個の筋肉を持つ大規模なモデルが完成した。これは、先行研究と比べて非常に多くの筋肉を実装したモデルであり、生物学的な忠実性の高さを示している。



図4：左前脚の筋肉を動作させた様子（左から右へ）

モデルの物理シミュレーションには、MuJoCo が採用された。MuJoCo は、高速性と安定性に優れた物理シミュレーションエンジンであり、OpenSim と比べて 600 倍の速度で計算できる。また、MuJoCo には「tendon」と呼ばれる腱駆動システムが実装されており、筋肉のパラメータを設定するだけで容易に筋肉を実装できる。本研究では、この tendon 機能を活用して全ての筋肉を実装した。

動作の検証としてランダム入力を生成して駆動する実験や神経振動子（非線形振動子）を含む脊髄延髄モデルを用いて、モデルの筋肉を駆動する実験を行った。神経振動子は脊髄や脳幹に存在する神経回路網であり、歩行やスイミングなどのリズム的な運動の生成に関与している。実験では、モデルの筋肉に神経振動子と筋骨格系の相互作用によりマウスモデルの行動を創発させたところ、歩行に類似した運動パターンが生成された。この結果は、構築したモデルが、生物学的に妥当な運動を再現できることを示唆している。

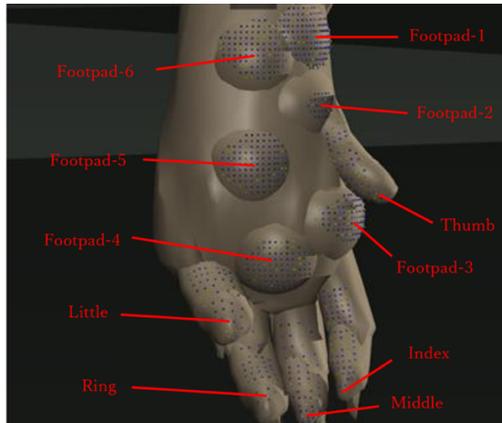


図5：左前足肉球における触覚分布



図6：レバーを押す実験の様子

さらに、本研究では、メルケル細胞の実装にも取り組んだ。メルケル細胞は、表皮の基底層に存在する機械受容器の一種であり、触覚に重要な役割を果たしている。モデルの足裏には、メルケル細胞を模した **Touch Grid** が実装された。**Touch Grid** は、接触力を計測するためのセンサーであり、モデルが環境と相互作用する際の触覚情報を取得することができる。メルケル細胞の実装により、モデルはより生物学的に忠実な感覚機能を備えることになった。

本研究の意義は、生物学的データに基づいた大規模な全身筋骨格モデルを構築し、メルケル細胞を実装したことで、より生物学的に忠実なシミュレーションを実現した点にある。このようなモデルを用いることで、動物の運動行動メカニズムをより深く理解することが可能になる。また、本研究で構築されたモデルは、ロボティクスや人工知能の分野にも応用可能である。例えば、動物の運動メカニズムを模倣したロボットの開発や、人工知能による運動制御の研究などに活用できる。

今後の展望として、研究チームは、モデルのさらなる検証と改良を行うとともに、AIによる感覚フィードバックを組み込んだ大規模シミュレーションプラットフォームの構築を目指している。具体的には、全脳モデルと筋骨格モデルを組み合わせたシミュレーションを実行し、動物の運動行動メカニズムをより包括的に理解することを目指す。このようなプラットフォームが実現すれば、生物学やロボティクス、人工知能など、様々な分野の発展に大きく貢献すると期待される。

本研究は、生物学とロボティクスの融合により、生物の運動メカニズムに迫る新たなアプローチを提示するものである。生物学的データに基づいたモデルの構築は、シミュレーションの生物学的妥当性を高めるために不可欠であり、今後もこのような研究が進められることが期待される。また、本研究で得られた知見は、動物の運動メカニズムの理解に留まらず、ヒトの運動機能の理解やリハビリテーションへの応用など、幅広い分野に波及効果をもたらすことが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 0件）

1. 著者名 Yasutomi Andre Yuji, Ichiwara Hideyuki, Ito Hiroshi, Mori Hiroki, Ogata Tetsuya	4. 巻 8
2. 論文標題 Visual Spatial Attention and Proprioceptive Data-Driven Reinforcement Learning for Robust Peg-in-Hole Task Under Variable Conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 1834 ~ 1841
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2023.3243526	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 Hiruma Hyogo, Ito Hiroshi, Mori Hiroki, Ogata Tetsuya	4. 巻 7
2. 論文標題 Deep Active Visual Attention for Real-Time Robot Motion Generation: Emergence of Tool-Body Assimilation and Adaptive Tool-Use	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 8550 ~ 8557
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2022.3187614	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Satoshi Oota, Hiroki Mori, Yuko Okamura-Oho, Sakiko Nakamura, Hideo Yokota
2. 発表標題 Developmental Biomechanics: A New Approach to Studying Rodent Development through Machine Learning-Based Fine-Grained Motion Analysis
3. 学会等名 The IEEE International Conference on Development and Learning 2024（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 太田聡史, 山本怜哉, 森裕紀, 横田秀夫, 平理一郎
2. 発表標題 新しい生体力学的アプローチによる実験用マウスの運動解析
3. 学会等名 Neuro2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hiroki Mori, Masaki Osawa, Hiroshi Ito, Jun Yoshiki, Hideo Yokota, Tetsuya Ogata, Satoshi Ota
2. 発表標題 Development of a mouse whole-body musculoskeletal model simulator: Estimation of tendon attachment points and validation of behavior based on Scx-GFP fluorescent genes
3. 学会等名 Neuro2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 太田聡史、吉木淳、森裕紀、平理一郎、姫野龍太郎、横田秀夫
2. 発表標題 遺伝子発現パターンを用いた実験用マウス筋骨格モデルの開発
3. 学会等名 第76回日本人類学会大会・第38回日本霊長類学会大会連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiruma Hyogo, Mori Hiroki, Ito Hiroshi, Ogata Tetsuya
2. 発表標題 Guided Visual Attention Model Based on Interactions Between Top-down and Bottom-up Prediction for Robot Pose Prediction
3. 学会等名 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 一藁秀行、伊藤洋、山本健次郎、森裕紀、尾形哲也
2. 発表標題 モダリティ注意による深層予測学習の解釈性とノイズロバスト性の向上
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 2022年

1. 発表者名 森 裕紀、昼間 彪吾、伊藤 洋、尾形 哲也
2. 発表標題 深層予測動的注意モデルによる道具身体化：身体と道具に関わらない「エンドエフェクタ」注意モジュールの創発
3. 学会等名 NEURO2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ichiwara Hideyuki、Ito Hiroshi、Yamamoto Kenjiro、Mori Hiroki、Ogata Tetsuya
2. 発表標題 Contact-Rich Manipulation of a Flexible Object based on Deep Predictive Learning using Vision and Tactility
3. 学会等名 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (国際学会)
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	太田 聡史 (Oota Satoshi) (30391890)	国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・特別嘱託研究員 (82401)	

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