

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11495

研究課題名（和文）乳児自発運動時の感覚-運動ダイナミクスを利用した行動発達モデルの構築

研究課題名（英文）Modeling Infant Behavior Development through Sensorimotor Dynamics

研究代表者

金沢 星慶（Kanazawa, Hoshinori）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号：60744993

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、乳児の自発運動が感覚と運動の発達にどのように影響するか、またその背景にあるメカニズムがどんなものかを解明する目的で行った。具体的には、新生児や乳児の運動から筋肉の活動やその感覚を推定し、それらの感覚運動入出力が作り出す具体的なパターンや変化を明らかにしている。また、赤外線カメラなどの高価で複雑なシステムではなく、通常のカメラを用いた簡易的な乳児の運動計測方法を提案した。さらに、運動学習のシミュレーションを通じて、乳児の行動発達を部分的に説明するモデルを構築した。本研究は、全体を通してヒトの新生児や乳児の発達の理解や支援に繋がる新たな手がかりに繋がる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の社会的意義は、新生児や乳児における感覚運動ダイナミクスの調査を通じて、発達初期に重要な役割を果たすメカニズムを理解することである。この理解が進むことで、発達障害の早期発見や適切な介入に役立った、あるいは育児支援に貢献したりする可能性がある。また、シミュレーションを利用してのみ解明できるメカニズムもあり、新たな科学的知見が発達心理学や神経科学の分野での基礎データとなり、医療や福祉の現場での発達支援にも役立つことが期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to uncover how infants' spontaneous movements contribute the sensorimotor development, as well as the underlying mechanisms. Specifically, the research involved estimating muscle activity and sensory input from the spontaneous movements of human neonates and infants, revealing the specific patterns and changes created by these sensorimotor inputs and outputs. Additionally, a simplified method for measuring infant movements using a standard camera was proposed, instead of expensive and complex systems like infrared cameras. Furthermore, a model was developed to partially explain infant behavior development through simulation of motor learning. Overall, this research provides new insights into understanding and supporting the development of human neonates and infants.

研究分野：発達科学

キーワード：新生児 乳児 感覚運動学習 感覚運動ダイナミクス 筋骨格 シミュレーション

様式 F-19-1

1. 研究開始当初の背景

ヒトの新生児や乳児は生後初期から数ヶ月間に特有の自発的な全身運動を見せることが知られている。この自発運動は運動パターンの経時的変化や障害予測への利用可能性から、中枢神経系の成熟を反映していると考えられている。さらに、この自発運動時に生じる神経活動が、骨格筋群の協調を伴う感覚運動モジュールの獲得を促すことで、その後の行動獲得に寄与しているとも予想されている。以上の仮説が信じられている一方で、新生児や乳児の自発運動時に生じる神経ダイナミクスの発達の変化を支える要因についてはほとんど明らかにされていない。

本申請研究では、ヒト新生児および乳児の自発運動に内在している感覚運動モジュールやそのダイナミクスの発達要因の追及を目的に、①発達初期の自発運動における感覚運動系神経活動の推定技術を基にした感覚-運動時空間パターンの抽出とその定量化、②感覚-運動ダイナミクスの発達の変化の関連要因を身体-神経シミュレーションを基にした強化学習の観点での検証を行う。

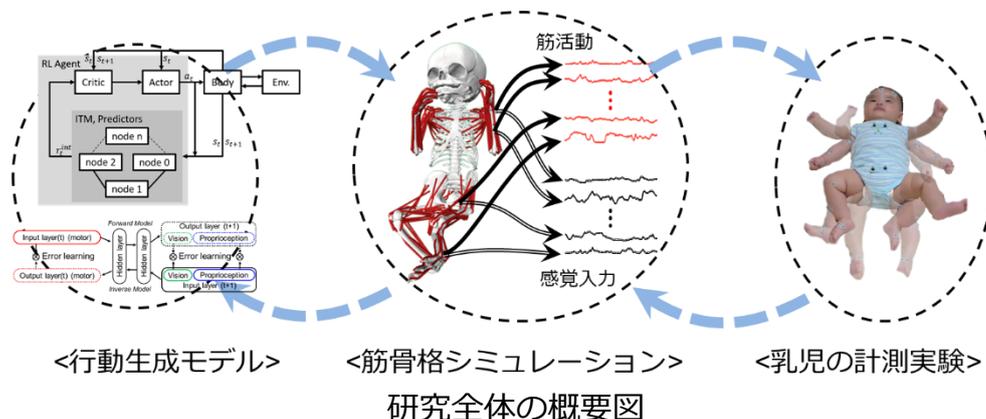
2. 研究の目的

fMRI や EEG を用いた研究から、中枢神経系の構造的および機能的ネットワークが神経律動のダイナミクスを構築し、ヒトの認知/行動や統合失調症などの病態に関与することが分かってきた。早産児や発達障害児などについても特異的な構造的/機能的ネットワークが確認されており、認知/行動の発達の変化や異常と神経系ネットワーク形成の関連に注目が集まっている。発達初期の感覚運動経験に伴い生じる『脳-身体-環境の相互ダイナミクス』が認知/行動の発達に寄与するという概念も提唱されており、脳-身体-環境間を繋ぐ中間要素である『感覚入力』と『運動出力』が発達の行動変容の基盤になりえると考えられている。この感覚運動ダイナミクスの発達が重要視される一方で、脳-身体-環境間に生じている相互ダイナミクスが急峻に変化する発達初期において、連続的に変化する感覚入力や運動出力が作り出す相互作用の具体的な形状や動的变化は不明であり、後の行動発現にどのように寄与しているかの検証や理論的モデルの確立も進んでいない。発達初期には急激に進む身体発育に加えて、自発運動が持つ多様性や複雑性の影響もあり、新生児や乳児の感覚運動経験が運動制御の獲得や認知/行動に寄与する機序の解明は難解な課題となっている。

本研究では、発達初期の感覚運動ダイナミクスの性質や発達機序は何か？という学術的問いに対して、本申請研究は、新生児や乳児の自発運動で生じる感覚運動出力とその発達の変化の特徴を抽出すると同時に、その動的变化や後に続く発達の行動変容を再現するモデルの提案を目的とする。具体的には、実際の新生児および乳児を対象とした計測実験データから「感覚運動ダイナミクスの時空間パターンの抽出および定量化」を行い、実データを基にした行動生成シミュレーションを構築することで「乳児行動生成モデルにおける報酬の探索」を行う。

3. 研究の方法

新生児・乳児の自発的な全身運動で生じている感覚入力および運動出力を定量化した上で、その相互作用が作る感覚運動ダイナミクスの特徴をクラスタリング手法などによって抽出する。さらに抽出した感覚運動ダイナミクスが後の行動獲得に寄与するという仮説を検証するため、強化学習をベースとした行動生成モデルを構築し、脳-身体-環境間の相互作用が早期発達においてどのような報酬として影響しているかをシミュレーションする。以上を追求するため、新生児・乳児を対象とした『計測実験』として、計測①：筋骨格モデルとシミュレーションを用いた感覚入力および運動出力推定、計測②：感覚入力と運動出力で構成される感覚運動ダイナミクスの特徴抽出を行い、『モデル構築』として、実験①：実測値を基にした筋骨格身体の行動生成シミュレーションの構築、実験②：筋骨格身体発達の発達の変化に対して頑強な乳児行動生成モデルの探索の4つの計画を進める。最終的には、身体発育を伴った感覚運動ダイナミクスを利用して頑強かつ柔軟に行動獲得する機序をモデル化する（下図：概要図）。



4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ・胎児・新生児・乳児を対象とした感覚運動シミュレーションの開発

胎児期および新生児期の自発運動時で生じる感覚情報をシミュレーションするため、胎児・乳児の筋骨格モデルおよび柔軟な子宮壁モデルの作成を進めた。この開発により、胎児の空間的制約や環境との相互作用について従来の球型子宮モデルに比べてより現実的に近づけることができた。胎児運動によって生じる子宮壁との相対的な位置関係がより自由かつ多様となり、触覚入力についてもより空間的に連続性を示すようになった。自発運動シミュレーションにおける以上の向上はより多種多様な運動情報および感覚情報の生成を可能とし、その後生じる学習や統合の検証をより精緻なものにすることが期待される。

- ・乳児自発運動計測の簡易化

乳児自発運動の計測について簡易化を進め、これまで乳幼児の詳細な運動計測にはモーションキャプチャ用赤外線カメラを10台程度必要としていたが、1台のRGBカメラで可能にした。さらに乳幼児の運動計測において皮膚モデルを導入したよりリアルなモーションキャプチャを実現した。これにより、様々な運動だけでなく感覚の推定も容易となる。

- ・強化学習モデルをもとにした行動創発シミュレーション

感覚運動学習を強化学習ベースで実装し、一定の行動獲得を再現することができた。乳児の記憶や運動主体感に関する研究に用いられるモバイル課題を想定し、内発的動機づけを用いた強化学習モデルによるシミュレーションを構築した。これまでモバイル課題における運動創発や学習を説明するモデルには物理的要素が含まれていなかったが、昨年度までに開発した物理シミュレータを用いることで、モバイル-乳児間の物理的相互作用を導入した。その結果、これまでのモデルでは説明されていなかったモバイル切断直後の一時的な運動増加を再現することに成功した。

<業績一覧>

[論文]

- Kanazawa H, Yamada Y, Tanaka K, Kawai M, Niwa F, Iwanaga K, Kuniyoshi Y, Open-ended movements structure sensorimotor information in early human development, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2023
- Yoshida N, Kanazawa H, Kuniyoshi Y, Homeostatic Reinforcement Learning through Soft Behavior Switching with Internal Body State, International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2023
- 金沢 星慶、國吉康夫、自発性・身体性・相互作用からみる遊びの初期発達、バイオメカニズム学会誌、2022年
- 金沢 星慶、知っておきたいデータサイエンスとAIの学び方、理学療法、2022年
- 金沢 星慶、自発運動に現れる多彩な情報を読み解く、ベビーサイエンス、2022年
- Kim D, Kanazawa H, Kuniyoshi Y, Simulating a Human Fetus in Soft Uterus, 2022 IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL), 2022

[招待講演]

- Early spontaneous movements shapes embodied sensorimotor information structures, The IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL) conference, 2024
- 金沢 星慶、赤ちゃんが運動から得ているもの、第23回日本赤ちゃん学会、2023年
- 金沢 星慶、感覚と運動のつながりの初期発達、第17回Motor Control研究会、2023年
- The IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL) conference, 2024
- 金沢 星慶、感覚運動経験のメカニズムと役割、第22回赤ちゃん学会、2022年
- 金沢 星慶、発達初期の自発運動にみる行動の起源、第10回新胎児研究会、2022年

[図書]

- 金沢 星慶 (章担当)、儀間 裕貴 (編集)、大城 昌平 (編集)、子どもの感覚運動機能の発達と支援—発達の科学と理論を支援に活かす—改訂第2版、メジカルビュー社、2024年

[学会発表]

- Huang E, Kanazawa H, Kim D, Abe Y, Kuniyoshi Y, Intrinsic Motivation-Based Model in Physical Interaction for Early Development of a Sense of Agency, The IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL) conference, 2024
- Kim D, Kanazawa H, Kuniyoshi Y, Self-Generated Prediction Error: Internal Belief as

Isolated Predictor, The IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL) conference, 2024

-Arikawa E, Yoshida N, Kanazawa H, Kuniyoshi Y, Homeostatic reinforcement learning explains foraging strategies, The 11th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machine, 2023

-Julg T, Walter F, Kim D, Kanazawa H, Knoll S, Kuniyoshi Y, Multi-Modal Representation Learning for Mapping Between Body Motion and Visual Imagery, The 11th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, 2023

-吉田尚人、金沢星慶、國吉康夫、深層恒常性強化学習と内受容感覚に基づく方策選択機構、2023年度人工知能学会全国大会、2023年

-金沢 星慶、山田 康智、田中 一敏、河井昌彦、丹羽房子、岩永甲午郎、國吉康夫、発達初期の”sensorimotor wandering”が全身の感覚運動情報構造を形作る、Motor Control 研究会、2022年

-金沢 星慶、國吉康夫、発達初期に生じる”sensorimotor wandering”、第11回日本発達神経科学会、2022年

-金 東敏、金沢 星慶、國吉 康夫、胎児シミュレーションにおける筋骨格モデルの精緻化と柔軟な子宮モデルの構築、第11回日本発達神経科学会、2022年

-金沢 星慶、金 東 敏、國吉 康夫、筋骨格シミュレーションを用いた発達初期の運動感覚経験に対する関節角度制限の影響、第8回日本小児理学療法学会学術大会、2021年

-金沢 星慶、金 東敏、國吉 康夫、筋骨格シミュレーションを用いた早産児の運動-感覚情報構造に対する最大筋力増減の影響、第26回日本基礎理学療法学会学術大会、2021年

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshida Naoto, Kanazawa Hoshinori, Kuniyoshi Yasuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Homeostatic Reinforcement Learning through Soft Behavior Switching with Internal Body State	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)	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/IJCNN54540.2023.10191925	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 Kanazawa Hoshinori, Yamada Yasunori, Tanaka Kazutoshi, Kawai Masahiko, Niwa Fusako, Iwanaga Kougoro, Kuniyoshi Yasuo	4. 巻 120
2. 論文標題 Open-ended movements structure sensorimotor information in early human development	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	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） 10.1073/pnas.2209953120	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 Kim Dongmin, Kanazawa Hoshinori, Kuniyoshi Yasuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Simulating a Human Fetus in Soft Uterus	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL)	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/ICDL53763.2022.9962201	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 金沢 星慶	4. 巻 21
2. 論文標題 自発運動に現れる多彩や情報を読み解く	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ベビーサイエンス	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） なし	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 金沢 星慶	4. 巻 39
2. 論文標題 知っておきたいデータサイエンスとAIの学び方	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 理学療法	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) なし	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 金沢 星慶、國吉 康夫	4. 巻 46
2. 論文標題 自発性・身体性・相互作用からみる遊びの初期発達	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 バイオメカニズム学会誌	6. 最初と最後の頁 63-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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15件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Arikawa E, Yoshida N, Kanazawa H, Kuniyoshi Y.
2. 発表標題 Homeostatic reinforcement learning explains foraging strategies
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 Julg T, Walter F, Kim D, Kanazawa H, Knoll S, Kuniyoshi Y
2. 発表標題 Multi-Modal Representation Learning for Mapping Between Body Motion and Visual Imagery
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 吉田尚人, 金沢星慶, 國吉康夫
2. 発表標題 深層恒常性強化学習と内受容感覚に基づく方策選択機構
3. 学会等名 2023年度人工知能学会全国大会 (第37回)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金沢星慶
2. 発表標題 赤ちゃんが運動から得ているもの
3. 学会等名 第23回日本赤ちゃん学会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金沢 星慶
2. 発表標題 感覚と運動のつながりの初期発達
3. 学会等名 第17回Motor Control研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Huang E, Kanazawa H, Kim D, Abe Y, Kuniyoshi Y
2. 発表標題 Intrinsic Motivation-Based Model in Physical Interaction for Early Development of a Sense of Agency
3. 学会等名 The IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL) conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kim D, Kanazawa H, Kuniyoshi Y
2. 発表標題 Self-Generated Prediction Error: Internal Belief as Isolated Predictor
3. 学会等名 The IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL) conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 金沢 星慶、國吉康夫
2. 発表標題 発達初期に生じる "sensorimotor wandering"
3. 学会等名 第11回日本発達神経科学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金 東敏、金沢 星慶、國吉康夫
2. 発表標題 胎児シミュレーションにおける筋骨格モデルの精緻化と柔軟な子宮モデルの構築
3. 学会等名 第11回日本発達神経科学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金沢 星慶、山田康智、田中一敏、河井昌彦、丹羽房子、岩永甲午郎、國吉康夫
2. 発表標題 発達初期の "sensorimotor wandering" が全身の感覚運動情報構造を形作る
3. 学会等名 Motor Control研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金沢 星慶
2. 発表標題 発達初期の自発運動にみる行動の起源”
3. 学会等名 第10回新胎児研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金沢 星慶
2. 発表標題 感覚運動経験のメカニズムと役割”
3. 学会等名 第22回赤ちゃん学会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國吉 康夫, 金沢 星慶, 金 東敏
2. 発表標題 ヒト胎児シミュレーションモデルによる構成論的発達科学
3. 学会等名 第9回新胎児学研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金沢 星慶, 金 東敏, 國吉 康夫
2. 発表標題 筋骨格シミュレーションを用いた発達初期の運動感覚経験に対する関節角度制限の影響
3. 学会等名 第8回日本小児理学療法学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金沢 星慶, 金 東敏, 國吉 康夫
2. 発表標題 筋骨格シミュレーションを用いた早産児の運動-感覚情報構造に対する最大筋力増減の影響
3. 学会等名 第26回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 金沢星慶(章担当), 儀間 裕貴(編集), 大城 昌平(編集)	4. 発行年 2024年
2. 出版社 メジカルビュー社	5. 総ページ数 384
3. 書名 子どもの感覚運動機能の発達と支援 - 発達の科学と理論を支援に活かす - 改訂第2版	

〔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
---------	---------