

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13104

研究課題名（和文）新生児・乳児における感覚-運動ダイナミクスに見る発達の個人差

研究課題名（英文）Individuality in development of sensory-motor dynamics during early infancy

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、運動感覚計測技術の開発・解析手法の提案・発達個人差の理解を通じた発達理論の検証を目標に、新生児・乳児の詳細な関節運動計測、個人差を反映する身体モデル作成、乳児運動における運動出力/感覚入力の推定、脳モデルを利用した運動感覚統合シミュレーションによる皮質上情報構造の変化の検証、ニューラルネットワークを併用した感覚運動予測ベースの発達モデル提案を遂行した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトの発達過程には環境や遺伝、その他さまざまな要因が影響することが分かっている一方で、個人差が発達過程にどのように影響するか、あるいはその過程でどのように個人差が形成されていくのかは明らかにされていない。本研究では身体形状やサイズ、体重などの個人的特徴が新生児から乳児期の早い段階で感覚運動統合過程にどのように影響しうるのかを計測実験およびシミュレーションを併用することで検証可能とした。検証の結果、脳構造だけでなく身体パラメータが骨格筋間の感覚運動入出力や大脳皮質上の情報構造に影響することが分かった。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to develop a technique for measuring sensory-motor interaction of human infants and to deepen understand the early human developmental with individuality, we conducted (1) detailed joint motion capture in human neonates and infants, (2) construction of a body model which can be adapted to individual parameters, (3) estimation of sensory-motor information structure during infantile spontaneous movements, (4) simulation of motor-sensory integration using a cortical model, and (5) developmental model based on sensory-motor prediction using a deep neural network.

研究分野：発達神経科学

キーワード：発達 乳児 新生児 シミュレーション ダイナミクス 運動 感覚

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

古くからヒトの自由な運動制御や認知/行動の獲得において、発達初期の運動感覚経験が重要な役割を果たすと考えられている<sup>1)</sup>。また、近年の神経科学的知見から、運動感覚経験運動が運動自体の熟達だけでなく、中枢神経系の解剖学的・機能的成熟にまで寄与することが示唆されており、Byrgeらは発達初期の運動感覚経験に伴って自然発生する『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を提唱している<sup>2)</sup>。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神経成熟の礎になるという主張であるが、これらの概念を支持する具体的検証はほとんど行われていなかった。ヒトが自己身体を自由自在に制御出来る背景には、環境や外界から受ける感覚入力に対して正しく運動出力するための感覚-運動ダイナミクスの無意識的理解が関連している。この感覚-運動ダイナミクスは、発達初期に運動感覚経験を通じて獲得・学習していると考えられている一方で、これらの概念を支持する具体的検証はほとんど進んでいない。ヒトの発達を説明する概念の具体的検証を阻害する要因として、新生児・乳児計測における技術的制約、計測対象である自発運動が持つ複雑性や多様性、そして、発達初期に生じる身体発育の個体差などが挙げられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、『新生児・乳児における感覚-運動ダイナミクスに見る発達の個人差』の検証を大目標として、運動感覚計測技術の開発・解析手法の提案・発達個人差の理解を試みた。具体的には、①新生児・乳児の詳細な関節運動計測、②個人差を反映する身体モデル作成、③乳児運動における運動出力/感覚入力の推定、④脳モデルを利用した運動感覚統合シミュレーションによる皮質上情報構造の変化の検証、⑤ニューラルネットワークを併用した感覚運動予測ベースの発達モデル提案を遂行した。

### 3. 研究の方法

#### 研究-1：新生児・乳児の詳細な関節運動計測

新生児と乳児を対象に独自に開発した、新生児および乳児向けモーションキャプチャシステムを用いて運動計測し、逆運動学を用いた関節運動計測を行った。計測運動は60秒間の自発運動とし、計測対象とした関節数は12関節、20自由度とした。

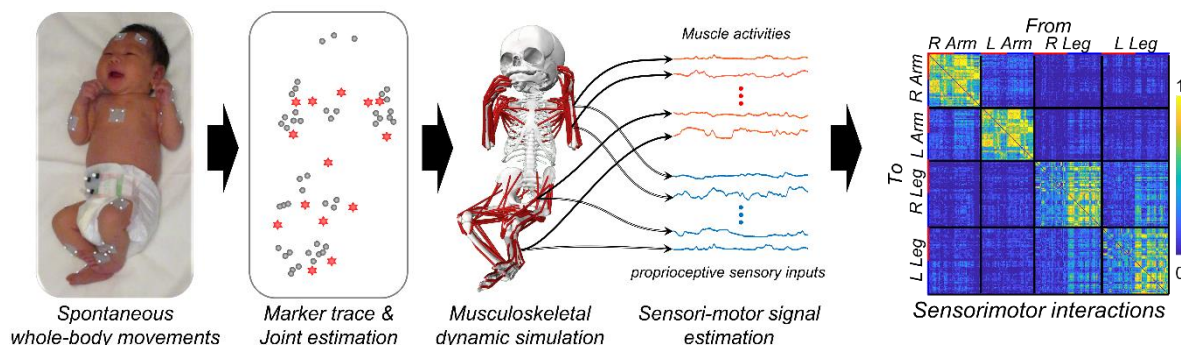
#### 研究-2：個人差を反映する身体モデル作成

研究-1で計測した運動データを適応可能な身体モデルを作成した。本モデルは成人筋骨格モデルをベースに、新生児および乳児向けに変形、修正したもので、全身144筋(上肢32筋、下肢40筋)を持ち、各身体パーツおよび筋のパラメータを体重、身長、頭位、腹囲などの乳児各個人の特徴に適応することが可能である。

#### 研究-3：乳児運動における運動出力/感覚入力の推定と情報構造の抽出

研究-1で計測した運動データを研究-2で作成した新生児・乳児筋骨格モデルに適応し、逆動力学計算および順動力学シミュレーションを反復計算することで、筋長、筋張力、筋活動度、固有感覚入力の順に推定した。推定した筋活動度および固有感覚入力に対してGranger causalityを用いて情報流を算出し、情報構造を抽出した。

研究-1~3の流れを下図にまとめる。



#### 研究-4：運動感覚統合シミュレーションによる皮質上情報構造の変化の検証

研究-1~3で推定した筋活動度、固有感覚入力をスパイクングニューロンで構成した大脳皮質モデルに入力し、シナプス前後の発火タイミング依存で学習する Spike timing dependent plasticity を用いてニューロン間のシナプス重みを更新させ、大脳皮質上に生じる情報構造の変化をシミュレーションした。

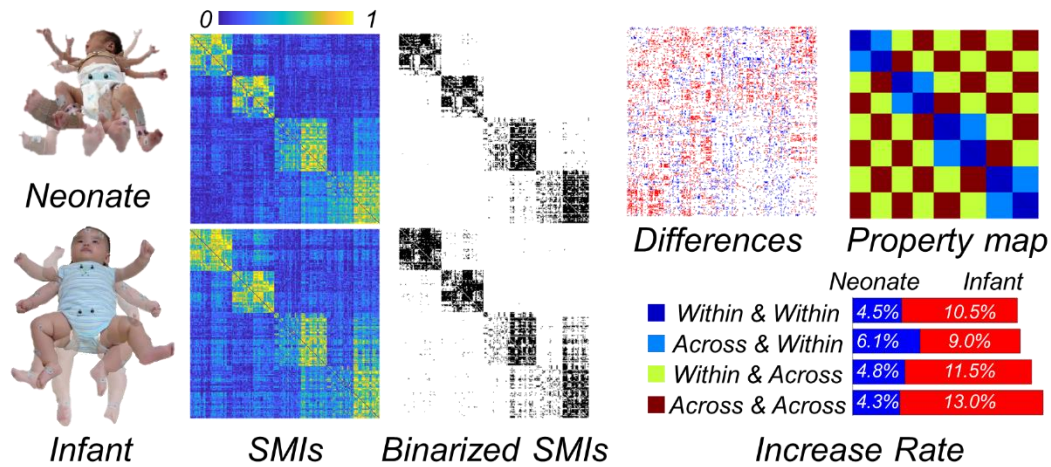
#### 研究-5：ニューラルネットワークを併用した感覚運動予測ベースの発達モデル提案を遂行した。

研究-2で作成した乳児筋骨格モデルの右上腕を用いて、筋活動、固有感覚、手先位置の予測誤差を最小化するよう学習するニューラルネットワークモデルに接続し、感覚運動予測ベースの発達モデルを提案した。

#### 4. 研究成果

##### 成果-1：感覚運動モジュールの発達的变化

逆力学および筋張力推定を介して推定した感覚運動入出力に対して、グラフ理論をもとにしたネットワーク解析を適応することで、新生児および乳児の自発運動時に生じている全身の感覚運動モジュールを抽出した上で比較したところ、生後 0 か月から生後 3 か月の間に感覚運動モジュールが増加すること、分離・統合が進んでいることを示した。また、感覚運動モジュールの発達的变化において、上肢筋に比べて下肢筋の変化が顕著であることも分かった(下図<sup>3)</sup>)。



##### 成果-2：乳児自発運動によって生じる感覚運動入出力が大脳皮質上の情報構造に与える影響

乳児運動時の感覚運動を基に脳モデル上のシナプス結合を学習させることで、取りえるアトラクタ数が増加することを示した。

##### 成果-3：乳児自発運動によって生じる感覚運動入出力が大脳皮質上の情報構造に与える影響

乳児筋骨格モデルとニューラルネットワークを接続して、ランダム運動時の感覚運動学習の発達のモデルを提案した。ランダム運動によって生じる感覚運動予測が相互結合した三層ニューラルネットワークで学習可能なこと、また、その学習精度がランダム運動で抽出可能な motor primitive や拮抗抑制機構によって向上することを示した<sup>5)</sup>。

#### <引用文献>

1. Thelen E, Smith LB, Dynamic System Approach to the Development of Cognition and Action, (1994)
2. Byrge L, Sporns O, Smith LB, Trends Cogn Sci. 18(8), 395-403, (2014)
3. Kanazawa H, Yamada Y, Tanaka K, Kawai M and Kuniyoshi Y, Early developmental change in inter-muscle sensorimotor modules of human infants, Society for the Neural Control of Movement, 2019
4. Fujii K, Kanazawa H, Kuniyoshi Y, Spike Timing Dependent Plasticity Enhances Integrated Information at the EEG Level: A Large-scale Brain Simulation Experiment, 9th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics
5. Higuchi K, Kanazawa H, Suzuki Y, Fujii K, Kuniyoshi Y, Musculoskeletal Bias on Infant Sensorimotor Development Driven by Predictive Learning, 2019 Joint IEEE 9th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Fujii Keiko, Kanazawa Hoshinori, Kuniyoshi Yasuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Spike Timing Dependent Plasticity Enhances Integrated Information at the EEG Level: A Large-scale Brain Simulation Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 Joint IEEE 9th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics	6. 最初と最後の頁 137-142
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/DEVLRN.2019.8850724	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 Higuchi Kaoruko, Kanazawa Hoshinori, Suzuki Yuma, Fujii Keiko, Kuniyoshi Yasuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Musculoskeletal Bias on Infant Sensorimotor Development Driven by Predictive Learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 Joint IEEE 9th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics	6. 最初と最後の頁 177-182
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/DEVLRN.2019.8850722	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 Niwa F., Kawai M., Kanazawa H., Okanoya K., Myowa-Yamakoshi M.	4. 巻 vol13
2. 論文標題 The development of the hypothalamus-pituitary-adrenal axis during infancy may be affected by antenatal glucocorticoid therapy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Neonatal-Perinatal Medicine	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3233/NPM-180040	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 Nakagawa Satoshi, Enomoto Daiki, Yonekura Shogo, Kanazawa Hoshinori, Kuniyoshi Yasuo	4. 巻 -
2. 論文標題 New Telecare Approach Based on 3D Convolutional Neural Network for Estimating Quality of Life	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neurocomputing	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） 10.1016/j.neucom.2019.09.112	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 -

[学会発表] 計11件(うち招待講演 2件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Tanaka K, Karino I, Kanazawa H, Niiyama R and Kuniyoshi Y
2. 発表標題 Learning multiple tasks by self-goal-setting based on self-evaluation
3. 学会等名 IEEE IC DL-EpiRob, Oslo, Norway, August, Aug, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fujii K, Kanazawa H and Kuniyoshi Y
2. 発表標題 Spike Timing Dependent Plasticity Enhances Integrated Information at the EEG Level: A Large-scale Brain Simulation Experiment
3. 学会等名 IEEE IC DL-EpiRob, Oslo, Norway, August, Aug, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Higuchi K, Kanazawa H, Suzuki Y, Fujii K and Kuniyoshi Y
2. 発表標題 Musculoskeletal Bias on Infant Sensorimotor Development Driven by Predictive Learning
3. 学会等名 IEEE IC DL-EpiRob, Oslo, Norway, August, Aug, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kanazawa H, Yamada Y, Tanaka K, Kawai M and Kuniyoshi Y
2. 発表標題 Early developmental change in inter-muscle sensorimotor modules of human infants
3. 学会等名 Society for the Neural Control of Movement (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金沢 星慶
2. 発表標題 赤ちゃんが感じる世界を如何にして捉えるか
3. 学会等名 日本赤ちゃん学会2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kanazawa H, Tanaka K, Kawai M, Kuniyoshi Y
2. 発表標題 Detailed full body motion analysis technique for human neonates and infants
3. 学会等名 World Confederation for Physical Therapy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Morioka T, Kanazawa H, Fujii K, and Kuniyoshi Y
2. 発表標題 EEG simulation reveals that changes in cortical morphology and global connectivity during de-velopment affect neonatal EEG
3. 学会等名 28th annual computational neuroscience meeting (CNS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hoshinori Kanazawa, Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 Embodied Brain Model (for developmental science)
3. 学会等名 Lorentz Center workshop Learning Body Models: Humans, Brains, and Robots (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高培鐘, 藤井敬子, 大村吉幸, 金沢星慶, 國吉康夫
2. 発表標題 大脳皮質モデルにおける感覚運動学習を通じた情報統合構造の変化
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木裕真, 金沢星慶, 藤井敬子, 森岡智陽, 國吉康夫
2. 発表標題 内発的動機付けを用いた探索行動による感覚運動発達モデル
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shih-Yin Chang, Kazunori Naganuma, Hoshinori Kanazawa, Masaki Sekino, Hiroshi Onodera, Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 Applying Multichannel Optogenetic System for Epidural Spinal Cord Stimulation in Rats
3. 学会等名 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yasunori Yamada, Hoshinori Kanazawa, Yasuo Kuniyoshi	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Newgen Publishing UK	5. 総ページ数 840
3. 書名 The Cambridge Handbook of Infant Development	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/~kanazawa/>

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
研究協力者	河井 昌彦  (Masahiko Kawai)		

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