

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24680024

研究課題名(和文) 神経・身体・環境の構造的制約が発達を導く胎児から新生児に至る構成的発達研究

研究課題名(英文) Constructive developmental research: Structural of nervous system, body, environment limitation induces human development from a fetus to an infant.

研究代表者

森 裕紀(Hiroki, Mori)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80610849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：赤ちゃんのGeneral movements (GMs)のモデルとして、神経系を非線形振動子の複雑ネットワークとし、身体モデルと結合したシミュレーションにより振る舞いを観察した結果、条件によりに運動の多様性が変化することがわかった。この多様性はネットワーク条件や身体との相互作用により変化し、GMsのU字発達現象や発達障
碍リスク児における複雑性の減少との関連が示唆される。また、大規模スパイクニューラルネットワークのシミュレーションでは自閉症スペクトラム障
碍に見られる脳波の複雑性減少が局所結合の強いネットワークで観察された。これらの結果は神経系の所与の構造的制約が発達過程へ与える影響を示唆している。

研究成果の概要(英文)：First, we modeled infant's General movements by a combination of a complex nonlinear oscillator network and musculoskeletal body model. We observed that the model generates diverse behaviors depending on the condition of the networks and the interaction between the network and the body. The experiments indicated that the structure with strong local connectivities and interactions ruled by either side of the dynamics induces poor repertoire of the movements. We discussed about structural origin of the developmental change of the infants's movements based on the experimental results.

Second, we conducted experiments with spiking neural network connected by complex network structure. We observed that the complexity of the activity of the network decrease when the network has relatively strong local connectivities. The result corresponds to the brain wave analysis for Autistic Spectrum Disorder or schizophrenia and shows the developmental process based on structural starting point.

研究分野：構成論的発達科学

キーワード：胎児 新生児 複雑ネットワーク ニューラルネットワーク 行動創発 General movements

1. 研究開始当初の背景

胎児から新生児の発達過程は単調ではない。U字発達と呼ばれる現象は、一旦現れた認知や運動についての機能や振る舞いが消失した後、再び現れる現象であるが、このメカニズムは明らかでない。本研究では、妊娠期から新生児期における神経・身体・環境の構造的制約を通じたインタラクションがU字発達を導くという自己組織的発達構成論の立場から仮説を立て、発達シミュレーションにより再現し、メカニズムを解明する。U字発達を、複数の要素の相互作用による自己組織化の過程における協調と競合の結果として構造的に解明する事で、発達科学に新たな視点を与える事ができる。

胎児期には、受胎後20週までは様々な種類の運動が順に現れ、単位時間当たりの運動頻度が単調増加するが、20週以後は減少し、生後には再び運動が複雑となる。また、新生児の運動発達においては、生後すぐGeneral Movementsと呼ばれる複雑な運動をするが、2ヶ月頃に運動パターンは一旦単純になり、この時期を過ぎると再び複雑な運動となる。このような現象は、U字発達と呼ばれており、環境や神経系を含む身体構造の変化に伴うダイナミカルシステムの再組織化過程における協調と競合として考える事ができ、高度な知能の構築のために必要な過程だと考えられているが、メカニズムは解明されていない。「自己組織的発達観」からこの過程を考えると、少なくとも以下の3つの側面が関係している。

(1) 感覚器と運動を介した低次神経系、身体、環境のループ構造(外部ダイナミクス)

無脳症児でもぎこちない無作為な運動は可である事から、胎児や新生児は脊髄延髄系に存在するといわれる神経振動子等の低次神経系のみで身体を駆動できる。このような運動はGeneral Movementsと呼ばれ、身体と環境の構造を自身の感覚運動情報として露にする。身体の形状や筋配置、感覚器の配置が感覚運動情報に偏りを与え、行動を導き、それに伴い反射的行動の神経回路が形成され、さらに振る舞いも変化する。また、子宮内から子宮外等の環境構造変化によっても感覚運動情報は変化し、相互作用により現れる振る舞いが変わり、環境に合わせて行動が収束する。

(2) 神経系内部のネットワーク構造の構築(内部ダイナミクス)

中枢神経系では、ミクロにはニューロン間のフィードバック構造により自発発火が起きているが、マクロにも大脳皮質領野間や大脳皮質-大脳基底核-視床系等の内部のフィードバックループも複雑な認知や行動に必要なと考えられている。また、神経系のネットワークはスモールワールド性を持っているといわれるが、それが機能を発現するための

十分な条件であるか、また、そのような構造が胎児期の時点でどの程度用意されているのかは明らかでない。胎児期の時点でどのような神経構造が用意され、どのような情報が供給されるべきかを解明する事は、発達科学にとって大きなチャレンジである。

(3) 外部ダイナミクスと内部ダイナミクスの相互作用

胎児神経系では、大脳皮質から脊髄への経路である錐体交差が完成するのが受胎後15週頃であり、感覚系と大脳皮質が結合するのは視床から大脳皮質に軸索が到達する21週頃である。そのため、中枢神経系レベルの内部ダイナミクスと身体的外部ダイナミクスが接続されるのがそれ以降となり、行動も変化するが、その詳しい振る舞いやメカニズムは明らかでない。胎児期と新生児期のU字発達は、子宮内から子宮外へ等の環境変化により外部ダイナミクスと内部ダイナミクスの相互作用における協調・競合関係のバランスの変化と全体のダイナミクスの再組織化の現れである可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、上記3つの観点からのモデル化を試みたが、顕著な成果を挙げた「(2)内部ダイナミクス」と「(3)内部ダイナミクスと外部ダイナミクスの相互作用」に関する以下の2点の研究を報告する。自己組織的発達観の観点から構造的制約の下での自己組織化モデルを構築し、振る舞いを観察することで、自閉症スペクトラム障害の脳活動やGeneral Movementsの発達理解に対して示唆を与えることを目的とする。

(a) 複雑ネットワークにより結合されたスパイキングニューラルネットワークの複雑性解析

自閉症スペクトラム障害(ASD)の被験者の脳波をMultiscale Entropy(MSE)による複雑性の観点から解析すると定型発達者に比較して、複雑性が低下することが知られている(Bosl et al. 2011, Catarino et al. 2011)。MSEはコロモゴロフ・シナイ情報量に基づいたサンプルエントロピーを複数の粗視化を行った信号に適応するもので、乱雑でも規則的でもない信号が現れる場合には特徴的な解析結果となる。

ASDの神経系の器質的特徴はマクロスコピックなネットワーク構造とミクロスコピックな生理学的構造に分けられる。マクロスコピックな特徴としては、被験者の大脳皮質をMRIを用いて解析した研究において、前頭葉の局所的な結合が大きく、長距離の結合が少ないことが示唆されている。ミクロスコピックな特徴としては、興奮性シナプスと抑制性シナプスの割合が定型発達と異なり興奮性が異常に増えているとの報告がある。このような器質的な違いが活動の違いを生み、

活動の複雑性も変化すると考えられているが、明確な因果関係はまだ推測の域を出てはいない。

本研究では白質繊維のグローバルな構造が制約となって自己組織化された結果、複雑性にも影響が現れるとの仮説のもと、スモールワールド構造のモデルとして知られる Watts-Strogatz モデル (Watts and Strogatz 1999) に基づいてスパイクニューラルネットワークを構成し、モデルのパラメータ p によりネットワークの性質を変化させた上で、活動を MSE により解析する。また、所与として与えられたマクロな構造がシナプスとしてのミクロな構造にどのような変化を与えるかを調査する。

(b) 非線形振動子複雑ネットワークと身体との相互作用による多様な行動創発

胎児期から生後 5 ヶ月頃に現れる自発運動である General Movements の特徴とその後顕著となる発達障害の間に関係があることが示唆されている (Precht et al. 1999)。また、のちに ASD となる新生児では、General Movements の発生時期と重なる生後数ヶ月の大脳の白質の構造が異なっており (Wolff et al. 2012)、General Movements との関係も示唆される。そこで、本研究では神経系モデルとして非線形振動子を複数の複雑ネットワーク構造で接続した上で筋骨格系としての身体と相互作用させた場合の振る舞いを検討する。特に、General Movements で重要となる運動の多様性について特に解析を行い、ネットワークの活動との関連を調査する。

3. 研究の方法

(a) Izhikevich 2006 で提案された興奮性細胞 800 個、抑制性細胞 200 個のスパイクニューラルネットワークモデルを一つのニューロングループとして 100 個用意し、それらをさらに Watts-Strogatz モデルにより結合する。シミュレーション開始から 1100 秒間はランダムに選択されたニューロンにシナプス電流を与え、シナプス結合は Spike-Timing-Dependent Plasticity (STDP) により変化させる。STDP は生理学的に裏付けられたシナプス結合強度の学習側であり、因果関係がより強まるように結合荷重を変化させる。ランダム入力によるスパイク発火によりマイクロサーキットが形成され、十分に自己組織化した後では自発的に発火が持続することが知られている。開始から 1000 秒後に STDP を停止し、ランダム入力も停止した 1100 秒から 1200 秒の間の自発発火を解析の対象とする。

Watts-Strogatz モデルでは、まずレギュラーネットワークとして円環状のグラフを構成した上で確率 p により繋ぎかえるエッジを決定し、エッジの片方の端をランダムなノードに繋ぎかえることでネットワークを構成

する。パラメータ p により複雑ネットワークの性質が変化することが知られており、実験条件として、この p 以外を全く変化させずにモデルを構築して実験を行い、最初に与えられたグローバルな構造の制約のみの違いに対して、自己組織化による活動の変化やミクロなシナプスの変化がどのように起こるかを観察する。シミュレーションは p の条件それぞれでランダム性を変えたネットワークを 10 個生成して行った。自発活動に関しては、それぞれのニューロングループで LAP (膜電位の平均値) に対して MSE とスペクトラム解析を行い、自己組織化後のシナプスに関しては興奮性シナプスの違いを解析する。

(b) Bonhoffer van der Pol equation (BVP) 方程式による非線形振動子をノードとし、Scale free network (Barabasi and Albert 1999)、Regular ネットワーク、Small-world ネットワーク、Random ネットワークにより接続したネットワークとヘビ型の筋骨格モデルを結合して現れた運動を解析した。また、筋と直接つながった振動子のみのネットワークなしのモデルも構成し運動を観察した。ヘビ型モデルは二関節筋により構成され、協調的な運動が創発されやすくなっている。筋と接続された振動子からは筋への運動指令が出力され、身体からは筋の長さ情報がフィードバックされる。

それぞれのネットワークを異なるランダム性により生成し、BVP 方程式への定数入力 (Tonic Input) と身体からのフィードバックのゲインを調整し、身体ダイナミクスと振動子ネットワークのダイナミクスのバランスを変更して 100 回ずつシミュレーション実験を行った。一定時間以上持続する周期的な運動を抽出して、その数を比較した。また、振動子内部の活動に関して相互情報量とトランスファーエントロピーに基づくネットワーク解析を行い、運動の持続性と情報的なネットワークにどのような関係があるのかも解析を行った。

4. 研究成果

(a) MSE 解析の結果の例を図 1 と図 2 に示す。 $p=0.0$ のレギュラーネットワークの場合、結果がニューロングループ間でばらついていなのに対して、 $p=1$ のランダムネットワークの場合、全てにおいて一定の傾向を示した。このばらつきは p が大きくなるに従ってなくなっており、初期に与えられたグローバルなネットワーク構造が影響を与えていることがわかる。 $p=0.0$ の場合にはエントロピーが低いニューロングループの値は明らかに $p=1.0$ に比べて低くなっており、複雑性が低下したと考えられる。

それぞれのネットワーク条件で MSE の値の上位 10 と下位 10 のニューロングループで周波数解析を行い平均と分散を図 3 と図 4 に示す。周波数の傾向が顕著に異なっているこ

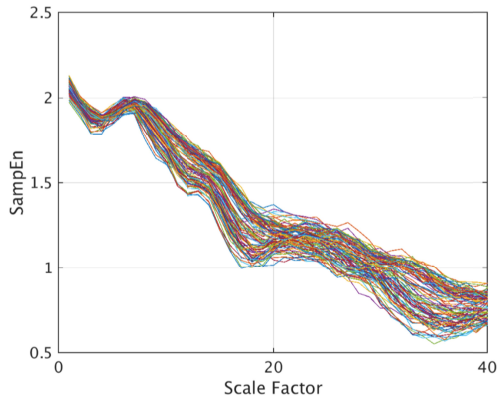


図 1 : MSE 解析結果 ($p=0.0$)

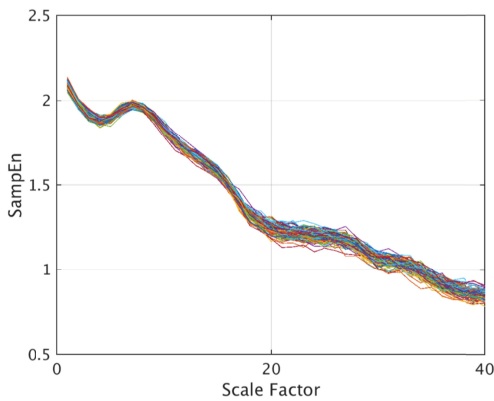


図 2 : MSE 解析結果 ($p=1.0$)

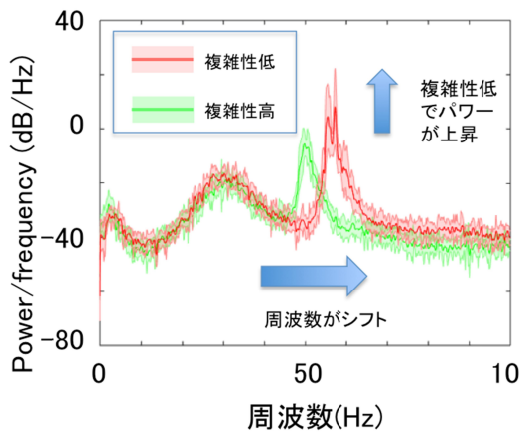


図 3 : スペクトラム ($p=0.0$)

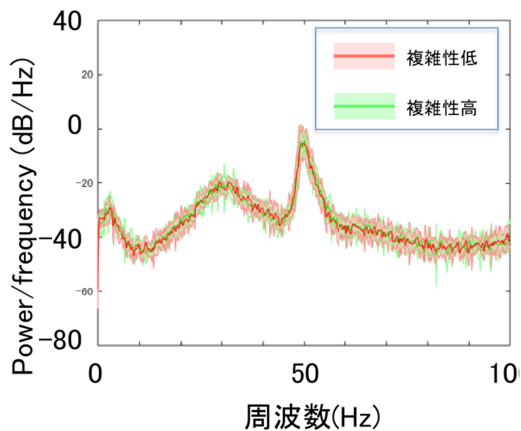


図 4 : スペクトラム ($p=0.0$)

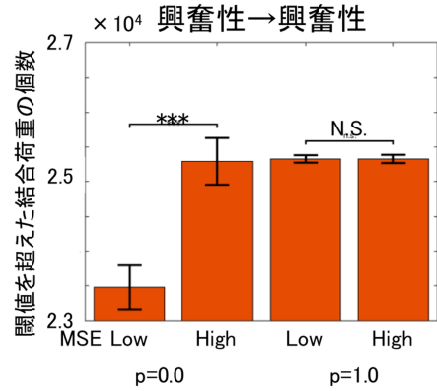


図 5 : 興奮性ニューロンから興奮性ニューロンへの結合

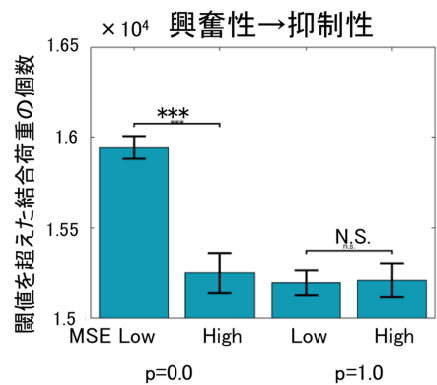


図 6 : 興奮性ニューロンから抑制性ニューロンへの結合

とが分かる。

さらに、興奮性から興奮性、興奮性から抑制性へのシナプスの結合荷重を MSE によって分類して一定の閾値を超えた数を比較したところ、MSE が低下した場合には興奮性へのシナプスが減少し、抑制性へのシナプスが増加したことがわかった。

このような結果より、グローバルなネットワークの制約がマイクロな構造を導き、ニューロンのスパイク活動の複雑性を変化させる可能性が示唆された。このモデルにおける減少がヒトの脳内で同様に起こっているかどうかを確かめる事は今後の検討課題だが、マイクロからマクロだけでなく、マクロからマイクロへの影響が確認された事で、マイクロとマクロの相互作用によって発達が促される事は理論的には可能である事が示された。

(b) 図 7 にスケールフリーネットワークにおける持続した運動レパトリーの数を示す。センサのゲインによってバランスが変化すると持続する運動のレパトリーの数が減ることがわかる。ピークを持つことから多様かつ持続的な運動のためには最適なダイナミクスのバランスがあることが分かる。

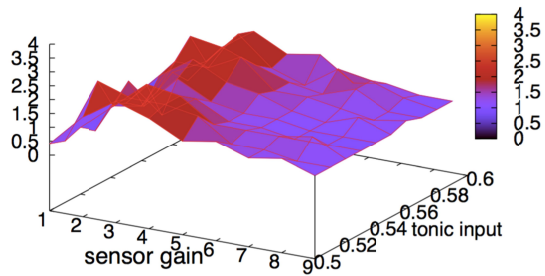


図7:スケールフリーネットワークにおける持続的な運動のレパトリーの数

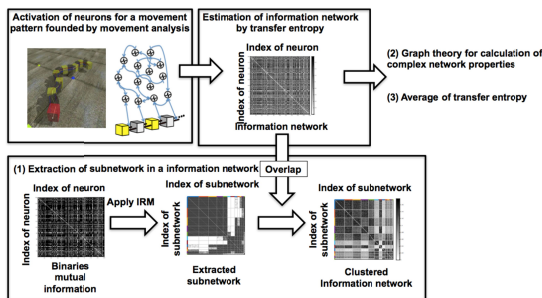


図8:持続した運動に基づいた時間的セグメンテーションとIRMによるマトリックスの分割

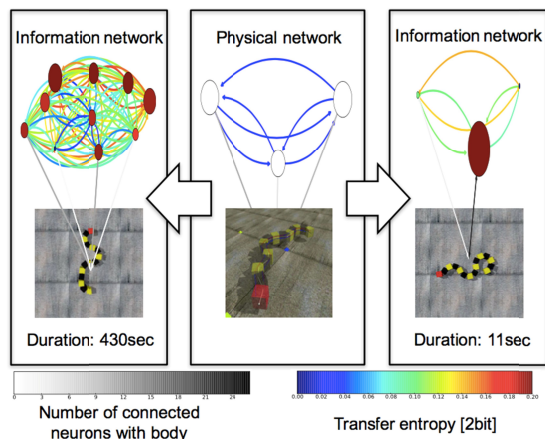


図9:(中央)物理的ネットワークをIRMによりクラスタリングとネットワーク抽出した結果(左)持続時間が長い運動におけるネットワークの活動を相互情報量に基づいて情報的なネットワークを抽出(右)持続時間が短い運動におけるネットワークの活動を相互情報量に基づいて情報的なネットワークを抽出

図8は振動子ネットワークの活動から情報的なネットワークを抽出する様子を示し

ている。物理的にネットワークが接続されているにも変わらず、情報的にはつながっていない場合があり、情報的なネットワークの構造と運動の持続性には関係があった。

図9は抽出されたネットワーク構造を示す。ノードの円の大きさはクラスタにまとめられた振動子群の数を表し、エッジの色は接続の強さ(トランスファーエントロピー)を表している。持続時間が長い場合には様々な独立して活動するクラスタに分かれており、持続時間が短い場合はほとんどすべての振動子同士が情報をやり取りしていることが分かる。これは、

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2件)

國吉康夫, 森裕紀

「胎児発達の構成論的研究と発達障害理解」人工知能学会誌, Vol.27, No.1, pp.20-27, 2012

國吉康夫, 森裕紀

「対人的共創知能研究 胎動から社会性認知基盤に至る発達モデルの構築」

日本ロボット学会誌, Vol.30, No.1, pp.14-19, 2012

〔学会発表〕(計 8件)

Jihoon Park, Hiroki Mori, Minoru Asada

“ Analysis of causality network from interactions between nonlinear oscillator networks and musculoskeletal system, ” In Proceedings of the European Conference on Artificial Life (ECAL 2015), Paper 162, York University, 2015

森裕紀

「胎児・新生児の発達を

どのように理解したらよいか」

日本発達心理学会 大会主催シンポジウム

「赤ちゃん学が発達心理学に期待するもの」

東京大学本郷キャンパス, Mar. 20, 2015

森裕紀

「胎児・新生児発達への構成論的アプローチ」

計測自動制御学会中部支部 制御理論研究委員会

・組込みシステムと制御研究委員会 合同研究会,

Dec. 17, 2014

Hiroki Mori

“ A synthetic approach toward fetal development: Can whole body fetal simulation lead to new insights for human development studies? ”

Computational Models of Infant

Development, International Conference on Infant Studies (ICIS 2014) Pre-Conference, 2 Jul, 2014

Hiroki Mori, Yuzi Okuyama, and Minoru Asada¹

“ Emergence of diverse behaviors from interactions between nonlinear oscillator complex networks and a musculoskeletal system.” In Proceedings of the European Conference on Artificial Life (ECAL 2013), pp.324-331, Taormina, Italy, Sep. 2-6, 2013.

森裕紀

胎児・新生児シミュレーションを用いた構成論的発達研究
情報処理学会関西支部 支部大会, 大阪大学中之島センター, Sep. 25, 2013

森裕紀

触覚が導く初期胎児行動発達構成論
第76回日本心理学会, Sep. 11-13, 2012

奥山裕二, 森裕紀, 浅田稔

「非線形振動子ネットワークと身体の相互作用における行動創発」
第30回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 4N2-4, 札幌コンベンションセンター, 北海道札幌市, Sep. 17-20, 2012

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/hiroki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森裕紀 (Hiroki Mori)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 80610849