

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：37112

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540123

研究課題名(和文)脳神経ネットワークの機能分化に関する情報数理モデル

研究課題名(英文)Mathematical modeling for functional differentiation of neural networks

研究代表者

山口 裕 (Yamaguti, Yutaka)

福岡工業大学・情報工学部・助教

研究者番号：80507236

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：脳において機能分化したヘテロな構造が発達する過程を計算論的な観点から再構成するため、双方向の情報量伝搬最大化原理に基づいて数理モデルを進化させる数値実験を行った。サブネットワーク間に相互に伝達される情報量を最大化するようにネットワークを発展させると、2つの異なったモジュール構造が出現し、それぞれが異なった構造に分化することが確認できた。これらの結果は、情報理論的な観点から導出される変分原理がネットワークにおけるヘテロ構造の形成原理として作用する可能性を示唆している。システム全体にかけられた拘束条件の下でその要素成分が生成される過程を新たな自己組織化原理と捉え、理論の構築を行った。

研究成果の概要(英文)：To understand a mechanism of functional differentiations in the brain, we develop a mathematical model of heterogeneous modules in the brain. We study how heterogeneous modules develop in coupled-map networks via a genetic algorithm, where the selection is based on maximizing bidirectional information transmission. Two functionally differentiated modules evolved from two homogeneous systems with random couplings, which are associated with symmetry breaking of intrasystem and intersystem couplings. From the viewpoint of system development, the present study shows how system components emerge under the presence of constraints that act on a whole system. Based on the modeling study, we construct a theory on a novel type of self-organization, where the overall development of a system follows a certain variational principle.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：機能分化 伝送エントロピー 数理モデル 結合振動子 変分原理 自己組織化 複雑系

1. 研究開始当初の背景

動物における分化万能性の研究は、近年爆発的に進展し、新しい再生医療の道を開くと期待されている。特に、幹細胞による神経回路の再生は様々な脳疾患、痴呆症の原因解明と根本治療への道を切り開くものとして期待されている。幹細胞が分化を繰り返し、臓器になるためには細胞の階層的なネットワーク化が必要である。また、胚発生における脳の発生機構や脳における機能モジュールの分化に関する研究は、脳機能の解明と共に新しい情報創成原理の解明としても注目されてきた。さらに近年、脳とこころの健康社会を目指す世界的な研究動向が見られ(例えば、岡部 2013)、その中で人の社会行動に関する脳機能モジュールの同定、創造性を有する機械の原理と開発、人と共生し発達するロボットの機構と開発、新しいコミュニケーション能力およびツールの開発等が解決すべき課題として指摘されている。

一方、大脳新皮質の階層的ネットワーク構築の事実は Felleman and van Essen (1991) に典型的にみられる。そこではフィードフォワード型ネットワークとフィードバック型ネットワークの非対称性が明瞭に認められ、これが機能モジュールの形成の鍵になっていると推測されている。また、このヘテロ結合系の抽象化された数理モデルとして本申請研究の代表者と分担者らによる神経振動子の位相のずれ方向と情報伝搬方向の間の関係に関する先駆的な研究がある(Yamaguti、Tsuda and Takahashi、2013)。

2. 研究の目的

本研究は分化性をもつ幹細胞からニューロン等の細胞のネットワークが生成される原理を情報原理として抽出し、それによって創造性のある機械が有すべき情報のダイナミクスと構造を解明することを目的とする。本研究では細胞分化の情報原理を数理科学の立場から研究する。近年、健康社会を目指す社会的要請から脳研究の情報学への応用が注目されており、その中でも、人の知的な行動に関する脳機能モジュールの生成原理を解明し創造性のある機械を開発することが期待されている。本研究では、脳の機能モジュールやニューロンの分化ダイナミクスを解析することでシステムの新しい自己組織原理を解明する。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、幹細胞の培養実験における知見を参考にしながら、(1)大脳皮質機能モジュールの自己組織に関する数理モデル、(2)興奮型ならびに振動型ニューロンの自己組織に関する数理モデルを構築する。(1)に関しては、低次元カオス力学系や興奮性を示すニューロンモデルを素子とし、そのネットワークの進化を、遺伝的アルゴリズムを適用して研究する。(2)に関しては、さまざまな関数形を表現できる関数の族を考え、それらのネットワークに遺伝的アル

ゴリズムを適用して研究する。ともに、システム全体への拘束条件として伝搬情報量最大化原理を適用する。研究の最終局面では、次のステップにつなげるために、数理モデルで得られた機能分化可能なシステムパラメータによって培養実験をコントロールし、実際の幹細胞からの分化に隠された制御パラメータの推定を行う。研究を複数の研究項目に分けて実行する。研究項目ごとに説明する。

(1) モデルシステムの決定

神経幹細胞や筋幹細胞の培養で観測される分化様式を参考にしながら、動的素子のランダムネットワークを構成し、制御可能なパラメータを導入する。動的素子としては例えば Rossler モデルのようなカオス振動子モデルやサドルノード分岐を示す興奮性素子を採用する。伝送エントロピーや時間付相互情報量 (K.Matsumoto and I. Tsuda、1985;1988;1989)を用いてモジュール間を流れる情報を定量的に評価する。

(2) システムの振る舞いの解析・相図の作成

ネットワーク内の素子間結合に現れる非対称性を調整するパラメータなどシステム変化の要となる複数のパラメータの変化に対するネットワークダイナミクスの変化の特徴を数値シミュレーションにより観測し、各素子間の位相同期、各モジュール内、各モジュール間の位相同期、さらには脱同期の特徴を調べる。次に、各素子や各モジュールの振る舞いの間の情報理論的な解析を行ない、情報伝達構造を明らかにするとともに情報伝達構造と位相同期・脱同期の関係を明らかにする。具体的な分岐構造を調べる。パラメータの変化に対する振る舞いの変化を示す相図を作成する。

(3) 進化的アルゴリズムによる情報伝達ネットワークの発展

進化的アルゴリズムを用いてネットワークのパラメータを発展させる実験を行う。進化的アルゴリズムとしては既存の遺伝的アルゴリズムを適宜改良して用いる。変分原理を導入しネットワークを発展させる。一例として、モジュール間の情報伝達量最大をネットワーク全体に与える拘束条件とする。モジュール内、モジュール間の素子間結合にどのような結合がどのような比率で含まれるか、結合強度、結合の数等を進化的に変化させるパラメータとして設定する。進化的アルゴリズムによって得られた最終段階のネットワーク構造を詳細に調べ上げ、どのようなネットワークがどのような比率で実現されているかを計量することで、分化した最終ネットワークの情報伝達様式を解析する。

4. 研究成果

脳において機能分化したヘテロな構造が発達する過程を計算論的な観点から再構成するため、双方向の情報量伝搬最大化原理に基づいて数理モデルを進化させる数値実験を行った。ネットワークの進化の過程を同

期・非同期ダイナミクスの遷移の観点や適応度のランドスケープの観点から特徴付けを行った。サブネットワーク間に相互に伝達される情報量を伝送エントロピーにより定量化を行い、これを最大化するように振動子ネットワークを発展させると、ネットワークに2つの異なったモジュール構造が出現し、それぞれが異なった構造に分化することが確認できた。一方のモジュールではタイトに振動を同期させるような結合が現れた。しかしもう一方のモジュールでは同期型の結合が最も多いが、それ以外の結合も存在する、ルーズな同期をもたらすネットワークが形成された。進化過程は、情報理論的な観点から導出される変分原理を実現するための計算過程と捉えられる。本研究の結果は、この変分原理がネットワークにおけるヘテロ構造の形成原理として作用する可能性を示唆しており、未だ未解明な点の多い神経系の自己組織化について理論的な指針を提供するものと考えられる。以上の成果は主に論文、にまとめ、公表した。

興奮型ならびに振動型ニューロンの自己組織化に関する数理モデル研究においては、1次元のカオス的写像力学系を1次元上に結合した系において、ノイズの影響下において入力情報を伝達する構造を、遺伝的アルゴリズムを利用して進化的に生成した。結果として、ノイズが中程度の時は、振動的なダイナミクスによって情報を伝搬するシステムが出現し、一方でノイズ強度が高い場合には、ニューロンと類似した興奮型のダイナミクスによって情報を伝搬するシステムが進化した。これはニューロンに典型的にみられる振動的、あるいは興奮のダイナミクスが情報論的な量の最大化という制約条件の元で自己組織的に発達することを示しており、神経系ネットワークの機能的特徴の数理的原因を考察する上で興味深い。これらの成果は主に論文、において公表した。

これら2種のモデルに典型的な、システム全体にかけられた拘束条件の下でシステムが発展する中で、その要素成分が内部に生成される過程は、自己組織化の新たな1形態と捉えられる。この自己組織化過程を、変分原理のもとでのシステムの発展と捉え、新たな自己組織化理論の構築を行い、数理的な定式化を行った。この成果は論文、において公表した。

また、分化した複数のシステムが動的にスイッチングしながら機能する機構の数理的記述を目指すという観点から、従来フラクタル構造の理解や画像圧縮に使われてきた数学モデルである反復関数系を拡張し、実際の神経活動の時系列を記述する試みを行った。そして課題遂行中のラット海馬CA1錐体細胞にみられる特徴的なダイナミクスを、反復関数系(IFS)からなる数理モデルにより再現することに成功した。一方このモデルを、戦略を時間的に変動する状況下の強化学習モデ

ルに適用し、過去の数理モデルを拡張することに成功した。そして学習の結果として表れるシステムの内部状態の分布が、時間的に変化するフラクタル的な分布によって表現されることを明らかにした。この成果は論文にて公表した。

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 7 件)

Ichiro Tsuda, Yutaka Yamaguti, Hiroshi Watanabe, Self-Organization with Constraints—A Mathematical Model for Functional Differentiation, Entropy, 18(3), 74 (2016), 査読有
DOI:10.3390/e18030074

Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Mathematical Modeling for Evolution of Heterogeneous Modules in the Brain, Neural Networks, 62, 3-10 (2015), 査読有

DOI:10.1016/j.neunet.2014.07.013

Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Application of an Iterated Function System with Dynamic Selection Probability to Deliberative Decision-Making, Advances in Cognitive Neurodynamics(V), ed. R. Wang and X pan, Springer, 735-740 (2015) 査読有

DOI: 10.1007/978-981-10-0207-6_99

Ichiro Tsuda, Self-organization of a Second Kind: General Scope and a Cortical Case Study, Advances in Cognitive Neurodynamics(V), ed. R. Wang and X pan, Springer, 13-15 (2015) 査読有

DOI:10.1007/978-981-10-0207-6_3

Ichiro Tsuda, Chaotic itinerancy and its roles in cognitive Neurodynamics, Current Opinion in Neurobiology, 31, 67-71 (2015) 査読有

DOI:10.1016/j.conb.2014.08.011

Yutaka Yamaguti, Evolution of Heterogeneous Network Modules via Maximization of Bidirectional Information Transmission, Advances in Cognitive Neurodynamics(IV), ed. Hans Liljenström, Springer, 605-608 (2015) 査読有

DOI:10.1007/978-94-017-9548-7_87

Ichiro Tsuda, Yutaka Yamaguti, Hiroshi Watanabe, Modeling the genesis of components of networks of interacting units, Advances in Cognitive Neurodynamics(IV), ed. Hans Liljenström, Springer, 583-587 (2015) 査読有

10.1007/978-94-017-9548-7_84

〔学会発表〕(計 14 件)

山口 裕, 情報伝達最大化原理に基づくネットワークの分化, 「非線形・統計力学とその周辺」セミナー、2016 年 3 月 15 日、京都大学工学部(京都府・京都市)
山口裕, 西田洋司, 高橋宗良, ローレンス・ヨハン, 津田 一郎, Iterated function systems with dynamic selection probability in the hippocampus, 「非線形発振現象を基盤としたヒューマンネイチャーの理解」第一回領域会、議 2016 年 1 月 14-15 日、ザ・ルイガンズ スパ & リゾート(福岡県・福岡市)

津田一郎, 自己組織化再考 第二種自己組織化の可能性、招待講演、京都大学基礎物理学研究所研究会「複雑システムにおける創造的破壊現象の原理に迫る」、2015 年 8 月 6 日~7 日、コープイン京都(京都府・京都市)

津田一郎, 自己組織化再考、第 14 回現象数理学コロキウム、2015 年 7 月 3 日明治大学中野キャンパス高層棟(東京都・中野区)

Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Application of an iterated function system with dynamic selection probability to deliberative decision making, invited talk, The 5th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'15), 3-7 Jun. (2015), Sanya(China)

津田一郎, 招待講演、「第二種自己組織化：脳の機能分化とアプリオリな時間空間概念」、2015 年度人工知能学会全国大会(第 29 回) 2015 年 5 月 30 日~6 月 2 日公立ほこだて未来大学(北海道函館市)

Ichiro Tsuda, Self-organization of a second kind: a mathematical model for functional differentiation in the brain, Invited talk, Toward a New Paradim for Self-Organization, May 19-21 (2015), RIMS Kyoto University(京都府・京都市)

津田一郎, 「第二種自己組織化について」招待講演、複雑系研究会「内と外の動的対性、その向こう側」、2015 年 3 月 24 日~25 日、早稲田大学西早稲田キャンパス内 62 号館 W1 階大会議室(東京都新宿区)

Yutaka Yamaguti, Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Ichiro Tsuda, Mathematical modeling of rat's internal activity: iterated function system with dynamic selection probability, The 15th RIES-Hokudai International Symposium [Hibiki], 16-17 Dec. (2014), シャト

レーゼガトーキングダムサッポロ(北海道・札幌市)

山口裕, 西田洋司, 高橋宗良, ローレンス・ヨハン, 津田一郎, 動的な選択確率を持つ Iterated Function System による課題遂行中のラット海馬神経活動の数値モデル、2014 年度包括脳ネットワーク冬のシンポジウム、2014 年 12 月 11 日-12 月 13 日、東京医科歯科大学湯島キャンパス(東京都・文京区)

Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Evolution of Heterogeneous Modules via Maximization of Bi-directional Information Transmission, invited talk, 4th Symposium on Artificial Life and Biomimetic Functional Materials, Nov. 28, (2014), Advanced Research Laboratory, Komaba Campus, The University of Tokyo(東京都・目黒区)

山口裕 津田一郎, 情報伝達最大化原理に基づくネットワークの分化, 第 2 回アライアンス若手研究交流会~モノを創る、観る、識る~, 2014 年 11 月 26 日~27 日、大阪大学産業科学研究所(大阪府・吹田市)

津田一郎, 数値モデリングから見た神経振動現象の多様性と普遍性、招待講演、神経オシレーションカンファレンス 2014、2014 年 7 月 17 日-18 日、自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター(愛知県・岡崎市)

山口裕 渡部大志 津田一郎, 情報伝達最大化原理に基づくネットワークの進化、附置研究所間アライアンスによるナノとマクロをつなぐ物質・デバイス・システム創製戦略プロジェクト平成 25 年度成果報告会、2014 年 5 月 30 日、大阪大学会館(大阪府・豊中市)

〔図書〕(計 1 件)

津田一郎, 「心はすべて数学である」, (株)文芸春秋、218 ページ、2015 年

〔その他〕

ホームページ等

研究業績一覧:

<http://www.fit.ac.jp/~y-yamaguchi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 裕 (YAMAGUTI, Yutaka)

福岡工業大学・情報工学部・助教

研究者番号: 80507236

(2) 研究分担者

津田 一郎 (TSUDA, Ichiro)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号: 10207384

(3) 連携研究者

清水 正宏 (SHIMIZU, Masahiro)

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号: 50447140