

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：33919

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870260

研究課題名(和文) ネットワークモジュラリティ形成理論の確立とスマートグリッド設計への適用

研究課題名(英文) Analysis of Modular Network Evolution and Application to Smart-grid Design

研究代表者

池本 有助 (Ikemoto, Yusuke)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：10377822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：人工物や生物における物質や情報の流れのネットワークは、リンクがランダムな構造ではなく、むしろモジュラー構造を有していることが明らかになってきた。

本研究では、(1)ノイズを付与した線形モデルにおける適応制御を理論的に解析した。その結果、システム外部から混入するノイズとシステム内部で発生するノイズに対する、両方の低感度設計間のトレードオフ関係が、ネットワーク進化に制約を与え、その制約がシステムマトリックスにモジュラー構造を露呈させることを示した。(2)ノイズに対する低感度設計により、モジュラーネットワークが進化する示唆を得た。

研究成果の概要(英文)：Biological networks often represent modular networks, which is defined as the degree of decomposing a network into several subnetworks. We investigate an alternative evolutionary constraint entailing increased robustness to noise.

To examine this, we study noise-interfused network models involving an analytically solvable linear system and biologically inspired nonlinear systems. (1) It was shown that the evolutionary constraint enforces to find well-balanced noise-sensitivities of multiple noise sources, and leads to a modular network underlying a modular structure in goals. (2) The simple model was proposed for the modular network evolution based on non-linearity denosing in a node-activity. The model suggest that the modular networks can evolve under conditions; if the given goals to networks, input and target output pairs, involve modular feature; and if the signal transfer in a node is carried out with non-linear manners in the sense of a saturation at upper and lower bounds.

研究分野：制御理論

キーワード：制御理論 ネットワーク モジュラリティ

1. 研究開始当初の背景

(1) ネットワークモジュラリティとは、モジュール内の密な繋がりとモジュール間の疎な繋がりの特徴とするネットワークの区画化度合いである。申請者は最近、コオロギにおける外敵からの逃避行動を数理モデル化するとともに、ノイズに対するロバスト性の向上が、制御ネットワークモジュラリティを上昇させることを、線形適応制御システムの枠組みで数理的に明らかにした(引用文献①)。本研究では、それらの研究成果を非線形システムに発展させ、ノイズに対するロバスト性に基づいたネットワークモジュラリティ形成理論を確立する。さらに、その理論を電力送電ネットワーク(スマートグリッド)設計問題に適用し、ノイズを積極的に活用したネットワーク設計手法の構築および実システムでの評価が期待される。

(2) 申請者のこれまでの研究成果である、ロバストネスに基づくモジュラリティ形成理論の、線形システムから非線形システムへの拡張である。本研究では、システムバイオロジーのなかでも特に制御システム理論アプローチに主眼をおき、モジュラリティ形成原理の定式化を試みる。これにより、生物における機能的側面を考慮したネットワーク推定手法への貢献が期待されるとともに、そのモジュラリティの成り立ちに関する新たな示唆を与えることが期待できる。さらに、太陽光・風力発電のさらなる実社会での普及には、天候の変化による供給量の不確定さの影響を減少させることが必要不可欠である。実システムへの適用の試みは、理論提唱とその社会貢献の両立を目指すという点で意義がある。スマートグリッド設計手法は、近年の電力エネルギー安定的供給問題を背景に、技術発展が急務であると考えられる。本提案手法によって電力網整備の安定供給に基づく事前的設計方法論が提案され、これは電力網構築コストの低減につながるという点で社会的意義が大きいと考えられる。

2. 研究の目的

(1) ネットワークモジュラリティの成り立ちの解明や工学応用など、今日の研究対象分野は、システムバイオロジー、進化発生生物学、医薬創成学、サービス工学など多岐にわたる。一方、制御理論アプローチでは最適制御分野に含まれ、従って、所望の出力安定性を満たすことに加えて、ネットワークモジュラリティ形成へと至らしめる、何らかの制約を見いだすことが、一般的な方法論である。これに対して申請者は、単にノイズに対するロバストネス向上がモジュラリティを上昇させる、という結果のみならず、複数の混入ノイズの低感度性設計における相補的関係が動的に形成されること明らかにし、そのト

レードオフによってもたらされる制約条件がモジュラリティ形成を実現することを数理的に解明する。

3. 研究の方法

(1) ノイズと故障を考慮した非線形制御システムモデルの構築する。ノイズに対して低感度を有する制御ネットワークはモジュラリティを形成することを線形システムにおいて示した。H25年度初期ではこれを非線形に拡張し、非線形システムにおけるネットワークモジュラリティ形成理論を考察する枠組みを、下記(b)とインタラクティブに遂行して決定する。モデルでは、非線形要素のシグモイド関数を、さらにノイズとしてガウス分布を有する確率変数を導入する。

(2) 計算機シミュレーションによるモジュラリティ形成条件を推定する。上記(2)並行して確率非線形微分方程式によって記述されるシステムの適応制御の枠組みを構築する。ノイズを有する制御システムの振る舞いは、系の複雑さ故、解析の計画的遂行が困難な場合が多いことをこれまでの研究で経験した。従って、体系的な現象理解を促進するべく、上記の(a)で構築した制御モデルの動的振る舞いを、計算機シミュレーションによって逐次確認する研究手順をとる。ネットワーク形成の定量的評価は Newman によって定式化されたモジュラリティ指標をもちいる。

(3) 感度解析によるモジュラリティ形成条件の定式化を行う。ネットワークモジュラリティ形成を実現する擾乱(ノイズ・故障)の場所を特定し、それらの大きさ(分散値・頻度)との関係を数理的に明らかにする。申請者のこれまでの研究では、個々のノイズ入力から出力までの伝達関数のパワースペクトル行列をもとめ、それから得られる出力分散値の大きさを適応制御の評価関数に取り入れた。この手法を非線形システムでも適用可能にするために、ノイズが微量であるという仮定を導入し、定点周りでのテイラー展開を施し線形近似する。これらの手順によって、申請者が展開してきた解析手法の枠組みをそのまま援用可能になる。

4. 研究成果

(1) ノイズを付与した線形モデル及び遺伝子発現モデルにおける適応制御を理論的に解析した。その結果、システム外部(入力)から混入するノイズとシステム内部(状態変化)で発生するノイズに対する、両方の低感度設計間のトレードオフ関係が、ネットワーク進化に制約を与え、その制約がシステムマトリックスにモジュラー構造を露呈させることを示した(雑誌論文①、学会発表⑥)。

本研究の焦点はノイズに対するロバスト

ネスの進化とモジュラーネットワークの進化の関係を調査することであった。そのため、ノイズを付与した線形及び遺伝子発現ネットワークモデルを導入した。

その結果、ロバストネスの増加という進化制約は、複数の箇所から混入するノイズに対する低感度に関するトレードオフ関係が内在することを示した。また、そのトレードオフ関係がネットワーク進化に(拘束条件としての)制約を与え、モジュラーネットワーク進化を導きうることを示した。

これまでに、ノイズを有するシステムのアドバンテージを探求する研究が行われてきた。なかでも、主要な機構として、ノイズによる確率的状態遷移モデルが挙げられる。ここでは、ノイズはアトラクタからの脱出するための駆動力としての役割が論じられてる。これに対し、本研究におけるノイズは間接的にモジュラーネットワーク進化のための役割を担う要因として働いている。

本研究結果は、ノイズの存在があるが故の現象として、ネットワークシステムの構造化が実現されることが示唆された。

本モデルでは適応度の変動の重要性が強調される。これまでの研究では、MVG に代表されるように環境の変化が注目されてきた。いわば外界の変化に起因するネットワーク適応度の変動である。これに対し、本研究ではシステム内部で発生するノイズにより生じる適応度の変動に注目した。

本研究により、ノイズによって生じる出力(形質)の変動が進化するシステム(遺伝子発現)ネットワークの幾何学的特徴に影響を与えるという示唆を得た。

(2) ノードに付与されたノイズに対する低感度設計に基づくモジュラーネットワーク進化に関する研究を推進してきた(雑誌論文②)。そこでは、ノードにノイズを意図的に注入して、システム擾乱に対するロバストネス向上に注目しているが、対象とするネットワークのノードは入力または出力に含まれており、隠れ(入力・出力ノードのいずれにも属さない)ノードを含むネットワークのモジュール構造進化は説明されていない。本研究では、隠れノードを含むモジュラーネットワーク進化モデルを提案する。提案するモデルは、各ノードにおける非線形的ノイズ低感度の実現が、隠れノードの符号的な振る舞いを助長することを進化シミュレーションによって示すとともに、ノイズ低感度設計の副産物として、モジュラーネットワークが進化し得ることを示した(雑誌論文①, 学会発表①, ②)。

本研究で提案したモデルはノイズとノード活性化の非線形性というありふれた仮定に基づいている。加えて、非線形主成分分析とも深い関係を有する。主成分分析では、ネットワークのリンク重みベクトルに主成分の固有ベクトルが表象されるが、その主成分

が共分散行列に基づき算出される点は、本研究における入出力間の共分散行列に基づき適応度が計算されているという点で類似性がある。しかしながら、一般的な主成分分析手法では、固有ベクトルによって表される行列が直行行列に収束するように、計算上、陽に仕向けられている。一方で本研究で提案したモデルは、ノイズに対する低感度設計の副産物としての、リンク重みのスパース性進化が実現されており、リンク重みが陽にスパースになるようには適応度は設定されていないという点で異なる。

本研究の成果は、飽和的振る舞いを示すノードの活性関数の非線形性とノイズに対する低感度設計に着目し、隠れノードを含むモジュラーネットワーク進化モデルを提案した。提案したモデルでは、各ノードにおける非線形的ノイズ低感度の実現が、隠れノードの符号的な振る舞いを助長することを進化シミュレーションによって示した。

本研究で用いたネットワークモデルは、極めてシンプルであるにも関わらず、モジュラーネットワーク進化が観察され、ノイズに対するロバストネスとネットワーク進化の関係に関してより良い理解へつながることを期待している。本研究のモデルは、ネットワーク進化におけるノイズが果たすポジティブな役割を有している示唆を得た。

<引用文献>

- ① Y. Ikemoto, and K. Sekiyama, Optimal Regulator Dredges Underlying Modularity in Input-outputs, International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (2012)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Y. Ikemoto and K. Sekiyama, Evolution of Modular Networks under Selection for Non-linearly Denoising., Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics. (accepted)

【査読有】

- ② Y. Ikemoto and K. Sekiyama, Modular network evolution under selection for robustness to noise., Physical Review E, Vol.89 (4) 042705 (2014-4)

【査読有】

[学会発表] (計7件)

- ① Y. Ikemoto and K. Sekiyama, Modular Networks Emerge from Non-linearly Noise Reductions., International Symposium on Swarm

- behavior and Bio-inspired Robotics, Kyoto, Japan (2015-4)
- ② 池本有助, 関山浩介,
ノイズ低感度設計に基づくモジュラーネットワーク進化., インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN2015), 仙台,
(web 公開予稿集) (2015-9)
 - ③ 池本有助, 伊藤悦郎,
モノアラガイの学習・記憶を成立させる細胞内遺伝子発現制御の数理モデル
第 27 回自律分散システム・シンポジウム,
東京 (2015-1)
 - ④ 池本有助, 関山浩介,
ノイズに対するロバストネスとネットワーク進化, 第 33 回日本動物行動学会,
長崎 (2014-11)
 - ⑤ Y. Ikemoto,
Division-of-labor Control for Multi-robot Systems: Research Meeting on Distributed Computing by Mobile Robots 2014 (MAC2014), co-located with 21th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO2014), 岐阜 (2014-8)
 - ⑥ 池本有助, 関山浩介,
モジュラーネットワーク進化のコトミメティクス, 第 26 回自律分散システム・シンポジウム, 東京 (2014-1)
 - ⑦ 黒田裕介, 梅村勇哉, 池本有助, 笹木亮, 神代充,
協調マニピュレーションタスクにおける制御器のモジュラリティ評価, 第 14 回システムインテグレーション部門講演会,
神戸 (2013-12)

[図書] (計 1 件)

- ① E. Ito, M. Yamagishi, and Y. Ikemoto,
Transcription Mechanism in a Single Neuron to Control. Memory Consolidation, Chapter 7, pp. 111-126. Nova Science Publishers, Inc. New York, ISBN: 978-1-63482-596-2, (2015)

[その他]

ホームページ等

<https://kyoinjoho.meijo-u.ac.jp/search/profile/ja.52d7203965eee3ba.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池本 有助 (IKEMOTO, Yusuke)

名城大学理工学部機械工学科・准教授

研究者番号 : 10377822