

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：34437

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K20278

研究課題名（和文）自然科学データから導出される動的ネットワーク解析と可視化

研究課題名（英文）Dynamic network analysis and visualization derived from natural science data

研究代表者

夏川 浩明（Natsukawa, Hiroaki）

大阪成蹊大学・データサイエンス学部・准教授

研究者番号：90712951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、計測された時系列データのデータ間の動的な関係性を定量化し背景のシステムの理解を深めるために、非線形状態空間再構成を用いた解析手法であるEDMを用いて動的ネットワークを構築し、視覚的に分析するワークフローを提案した。これらの解析手法とインタラクティブな可視化技術を結び付けてユーザー理解を促進することで、生態学等の自然科学分野における知見創出を目指した動的ネットワークの可視化システムの構築を行った。提案手法を生態学データに適用することで、生態系の状態特定やその遷移の分析に有用であることを確認でき、自然科学データへの適用による知見創出が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

持続可能な開発目標達成のための科学技術イノベーション（STI for SDGs）の優先課題である「健康・長寿の達成」や「生物多様性、森林、海洋等の環境保全」の課題において、真に持続可能なものを目指すためには、対象システム（例えば生態系や神経系）の理解が必須である。自然界の多くのシステムは複雑系からなり、計測された時系列データ間の関係性は一般的に静的ではなく動的で状態依存的に変化するものとなる。本研究では、定量化の難しいデータから時間変化するネットワークを構築し、それを視覚的に分析する可視化システムを開発することで、専門家が生態系の動態を分析し、その移り変わりを理解できることを実証した。

研究成果の概要（英文）：We proposed a workflow for constructing and visually analyzing dynamic networks using EDM, an analysis method based on nonlinear state space reconstruction, in order to quantify the dynamic relationships among data in measured time series data and to better understand the background system. By combining these analysis methods with interactive visualization techniques to promote user understanding, we constructed a dynamic network visualization system aimed at creating knowledge in natural science fields such as ecology. By applying the proposed method to ecological data, we confirmed that it is useful for identifying the state of ecosystems and analyzing their transitions, and demonstrated that it is possible to create knowledge by applying the method to natural science data.

研究分野：情報可視化

キーワード：情報可視化 非線形状態空間再構成 動的ネットワーク 視覚的分析

1. 研究開始当初の背景

持続可能な開発目標達成のための科学技術イノベーション (STI for SDGs) の推進への期待が高まっている。その中の優先課題である「健康・長寿の達成」や「生物多様性、森林、海洋等の環境保全」など自然科学におけるこれらの課題において、真に持続可能なものを目指すためには、対象システム (例えば生態系や神経系など) の理解が必須である。自然界の多くのシステムは複雑系からなり、計測された時系列データ間の関係性は一般的に静的ではなく動的で状態依存的に変化するものとなる。生態学の例を挙げると、種間競争関係は常に一定ではなく、環境要因や被食捕食者の個体数に依存して時間的に変化することが知られている [1]。また神経科学の文脈では、脳の領野間の機能的結合は、注意条件などにより変化することが知られている [2]。しかし、計測時系列データから、このような状態依存的に時間変化する関係性を同定することは、従来の動的線形モデル等 [3] を用いても容易ではない。また、ひとたび時間変化する関係性を定量化できたとしても、「観測変数」と「その変数間の関係性」の双方が時間変化する「動的ネットワーク」で表される高次元のデータとなるため、その系の状態やネットワーク特徴を理解することは従来の可視化システムでは困難である。

まず、時間変化する関係性の定量化の問題に対して、2016年に非線形状態空間再構成法 (SSR) により計測時系列データ間の時間変化する関係性を計算する手法 (Empirical Dynamic Modeling: EDM) が、米国カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD) のグループにより提案され、従来の動的線形モデルよりも精度よく、時間変化する関係性が推定できることが報告されている [4]。この手法では図 1A に示すように時系列データを状態空間上に埋め込み (embedding) を行うことで構成されたアトラクタに沿って、ヤコビアンを計算し、変数間の関係性の变化を定量化する。この SSR に基づく手法はシステムの駆動するメカニズムを事前に仮定することなく、アトラクタのトポロジカルな情報に基づき、モデルフリーで計算可能なため、注目されている解析手法の一つである。この EDM の解析アプローチでは、埋め込みに使用する変数の選定のため、事前に SSR を用いた時系列データ間の因果推論の手法 [5] と組み合わせて使用される (図 1B)。しかし、様々な自然科学データへの適用性を示すには埋め込みに使用する変数選択の方法やノイズに対するロバスト性など更なる検討が必要である。

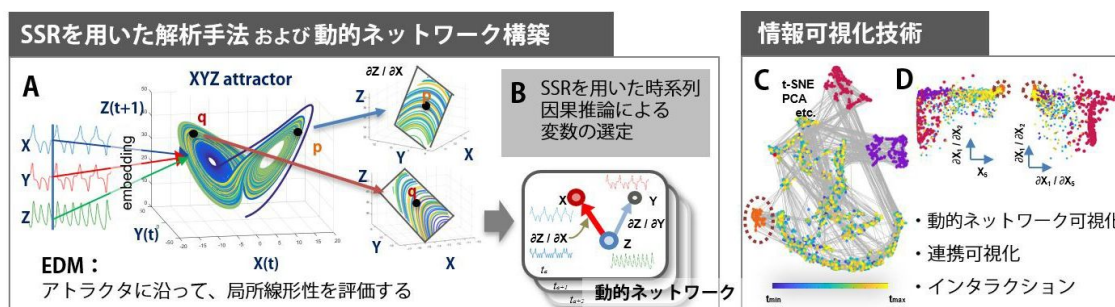


図 1. (A) EDM を用いた変数間の関係性の定量化. (B) SSR を用いた時系列因果推論による変数の選定. (C) 次元削減による動的ネットワークの可視化. (D) 散布図などの連携可視化.

また、解析法が優れていても、結果を効率的に解釈する枠組みが無ければ、研究者やユーザーにとって真に有用なものとなりえない。特に大規模に収集されたデータに対して、得られた動的ネットワークという高次元の情報からネットワーク特徴を理解するには従来の可視化技術では難しい。情報可視化や視覚的分析の分野において、動的ネットワークの高次元の情報を低次元に削減することでネットワークの状態の遷移を捉える可視化技術 (snapshot-to-point approach) が提案されている [6] (図 1C)。この手法はネットワークの状態を低次元可視化の遷移や特徴点として表現でき特定できる。しかし、特定した動的ネットワークの状態がどのような変数に関連があるか詳細に解析するのは困難である。

これらは、複雑系を有する動的システムを扱う自然科学の世界に共通する根源的な問題であり、これらに答えることのできるシステムダイナミクスの定量化や特徴化を通じて、システムの振る舞いを理解することが求められる。

2. 研究の目的

本研究では、非線形状態空間再構成 (SSR) を用いた解析手法により、計測時系列データ間の動的な関係性を定量化する手法を開発し、定量化した関係性から動的ネットワークを構築する。これらの解析手法とインタラクティブな可視化技術を結び付けることで、ユーザー理解を促進し、自然科学分野での知見創出に資する動的ネットワーク分析のための可視化システムの構築

を目指す。

3. 研究の方法

本研究ではまず、非線形状態空間再構成法 (SSR) を用いた解析手法および動的ネットワークの構築の研究を行う。計測時系列データ間の時間変化する関係性を計算する EDM は、埋め込みに使用する変数選択に鋭敏な手法であるので、変数選択の方法の選択を検討する必要がある。これらの検討を通じて時系列データから「動的ネットワーク」を構築するワークフローを提案する。

次に、解析手法とインタラクティブな可視化技術を統合した可視化システムの構築を行う。動的ネットワークを分析し解釈を支援するためのインタラクティブな可視化システムを構築する。動的ネットワークの高次元の情報を t-SNE や PCA、Isomap 等の低次元削減法を用いて二次元にマッピングし、ネットワークの状態を特定するネットワーク可視化に、変数間の散布図等の連携可視化を組み合わせることで、動的ネットワークの状態を特定するとともに、その状態の解釈を支援する可視化システムを構築する。システムを評価として、生態学分野の実データ等に対して適用することで、手法の有用性を検討する。

最後に共同研究関係にあるソーク研究所 (米国) UCSD のスクリップス海洋研究所 (米国) の共同研究者が有する、海洋生物の個体群動態のデータに対して本研究で構築した可視化システムを適用する。生態系の動的ネットワークを定量化し、システムの状態の同定とその解釈を行う。例えば生態系の食物連鎖網モデルにおいては、被食個体が多い (少ない) と種間競争関係が小さく (大きく) なるという顕著な特徴を有することが知られている。上述の可視化システムによる解析を通じて、実際の生態系において新たなエコシステムの特徴を発見し、そのシステムのダイナミクスを理解を目指す。

4. 研究成果

まず、非線形状態空間再構成法 (SSR) により計測時系列データ間の時間変化する関係性を計算する EDM により、動的ネットワークを構築し、t-SNE や PCA、UMAP などの種々の次元削減法を利用し、動的ネットワークの状態を特定し解釈するためのワークフローを提案し (図 2)、それを実現する可視化分析システムのプロトタイプ (図 3) を実装した。特に使用する変数は SSR の

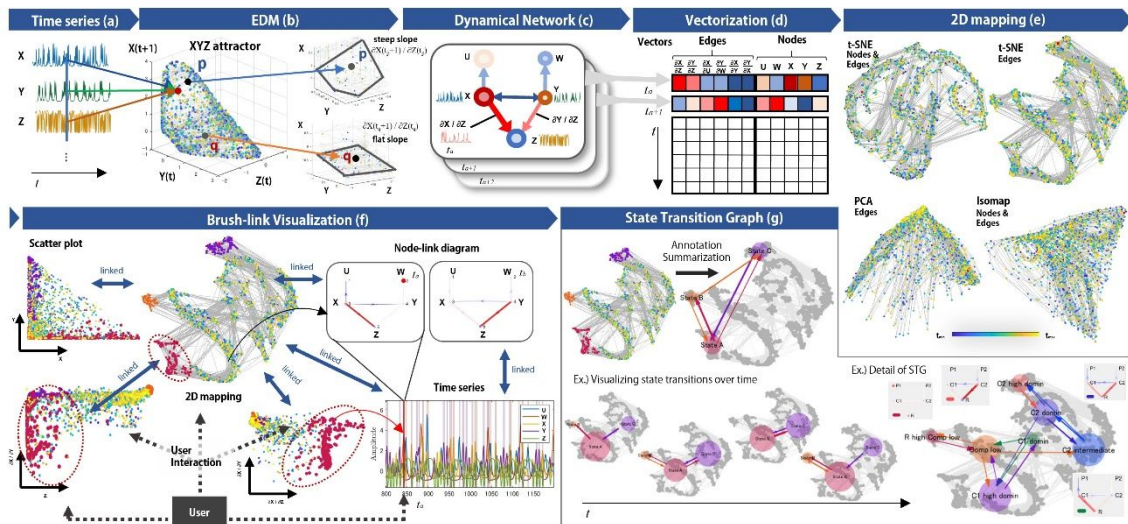


図 2. 動的ネットワークの視覚的分析システムのワークフロー

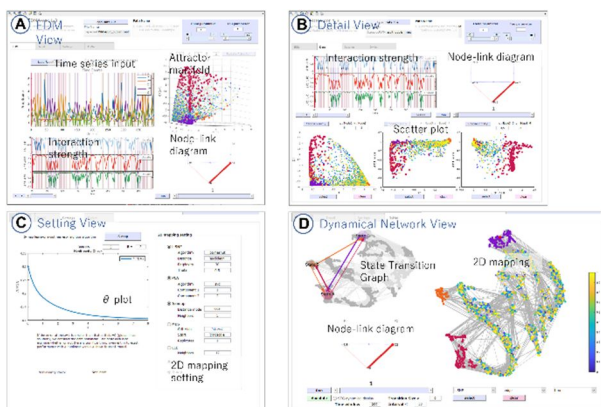


図 3. 可視化分析システムのプロトタイプ

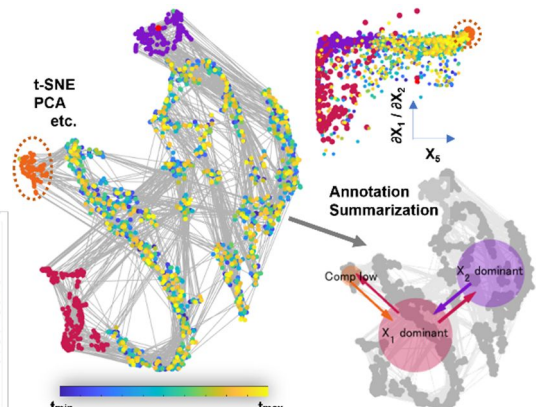


図 4. データへの適用結果と状態遷移

手法[5]で選択しつつも、EDM の分析パラメータを確認できるビューを設けることで、分析を支援する仕組みを加えている。また、動的ネットワークの状態と遷移の解釈を支援する可視化分析システムのプロトタイプに、動的ネットワークの要約グラフを表示する機能(図3D)を加えることで、動的ネットワークの大域的な特徴をアノテーションしつつ、その特徴間の遷移情報の要約を視覚的に提供することができる。開発したプロトタイプを生態学シミュレーションや海洋メソコスム実験データに適用することで、生態系の状態特定やその遷移の分析に有用であることを確認できた。特に、リソースとなる種が豊富で種間競争が少ない状態など、生態学的に顕著な状態を特定でき、それに至る状態遷移の傾向を把握することができた(図4)。種間関係が対称的な食物連鎖網モデルにおいて、そのパラメータの違いから状態変化の非対称性が生まれるなど、複雑な個体群動態の特徴が可視化結果により捉えることができるほか、それらの特徴は生態学実データにおいても観察された。これらの結果にユーザフィードバックも含めた内容を国際会議 IEEE VIS や学術論文にて発表を行った[7]。

今後はEDMと可視化技術を組み合わせて実現した、動的ネットワークの状態と遷移の解釈を支援する可視化分析システムについて、複数の分析者が自然な環境で協働することを可能とするため、状態空間上でのデータ特徴を多人数で観察するためのVR (Virtual Reality) 可視化システムの作成を目指す。特に視覚的分析のための多人数協働作業を可能とするため、サーバクライアントの環境を構築し、EDMで分析した動的ネットワークの結果をVR上において複数人で探索でき、状態の遷移の特徴分析やデータ解釈における議論を促進するプロトタイプを作成している。これらの取り組みを通じて、自然科学の複雑なデータの特徴を視覚的分析する先進的な環境構築の議論を続ける。

参考文献

- [1] M. Lima, SKM. Ernest, JH. Brown, A. Belgrano, NC. Stenseth. Chihuahuan desert kangaroo rats: Nonlinear effects of population dynamics, competition, and rainfall. *Ecology*, 89(9):2594-2603, 2008.
- [2] J. Plailly, JD. Howard, DR. Gitelman, JA. Gottfried. Attention to odor modulates thalamocortical connectivity in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 28(20):5257-5267, 2008.
- [3] EC. Lamon III, SR. Carpenter, CA. Stow. Forecasting PCB concentrations in Lake Michigan salmonids: a dynamic linear model approach. *Ecological Applications*, 8(3):659-668, 1998.
- [4] ER. Deyle, RM. May, SB. Munch, G. Sugihara. Tracking and forecasting ecosystem interactions in real time. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1822):20152258, 2016.
- [5] G. Sugihara, R. May, H. Ye, C. Hsieh, E. Deyle, M. Fogarty, S. Munch. Detecting causality in complex ecosystems. *Science*, 338(6106):496-500, 2012.
- [6] S. van den Elzen, D. Holten, J. Blaas, JJ. van Wijk. Reducing snapshots to points: A visual analytics approach to dynamic network exploration. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 22(1):1-10, 2015.
- [7] H. Natsukawa, ER. Deyle, GM. Pao, K. Koyamada, G. Sugihara. A visual analytics approach for ecosystem dynamics based on empirical dynamic modeling. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(2):506-516, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Natsukawa Hiroaki, Deyle Ethan R., Pao Gerald M., Koyamada Koji, Sugihara George	4. 巻 27
2. 論文標題 A Visual Analytics Approach for Ecosystem Dynamics based on Empirical Dynamic Modeling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 506-516
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TVCG.2020.3028956	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 該当する

1. 著者名 夏川浩明	4. 巻 42(2)
2. 論文標題 非線形ダイナミクス分析と可視化技術を統合して見るダイナミクス	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 シミュレーション = Journal of the Japan Society for Simulation Technology	6. 最初と最後の頁 76-82
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11件（うち招待講演 4件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hiroaki Natsukawa
2. 発表標題 Understanding system dynamics by combining empirical dynamic modeling and data visualization
3. 学会等名 Manifolds in Nature (OIST Workshop) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hiroaki Natsukawa
2. 発表標題 Ecosystem Dynamics Revealed by Combining Data-Driven Analysis and Visualization Techniques
3. 学会等名 China-Japan Joint Visualization Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki natsukawa
2. 発表標題 Understanding System Dynamics by Combining Data-Driven Analysis and Information Visualization
3. 学会等名 The 40th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wang Ting, 夏川 浩明, 小山田 耕二
2. 発表標題 睡眠データにおける状態遷移のビジュアル分析
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 夏川 浩明
2. 発表標題 データ駆動型解析と可視化技術を融合して見る生態系のうごき
3. 学会等名 第5回ビジュアリゼーションワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 夏川 浩明, 王 てい, 小山田 耕二
2. 発表標題 データ駆動型科学を推進する大規模ネットワークの可視化と分析
3. 学会等名 第16回ICTイノベーション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀨地瞬, 夏川浩明, 小山田耕二
2. 発表標題 トピック抽出とCNNを用いた学术论文の進化モデル
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 WANG TING, 夏川 浩明, 馬場 一貴, 小山田 耕二
2. 発表標題 Twitterデータにおける話題遷移のビジュアル分析
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Natsukawa Hiroaki, Deyle Ethan R., Pao Gerald M., Koyamada Koji, Sugihara George
2. 発表標題 A Visual Analytics Approach for Ecosystem Dynamics based on Empirical Dynamic Modeling
3. 学会等名 IEEE Visualization 2020, VAST (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 WANG TING;, 夏川 浩明, 小山田 耕二
2. 発表標題 Identification and Understanding about the Dynamical System
3. 学会等名 第47回可視化情報シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 WANG TING, 夏川 浩明, 小山田 耕二
2. 発表標題 Visual Analytical System for Analyzing State-Transition in Dynamical Systems
3. 学会等名 日本応用数理学会 2019年度年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://natsukawa-lab.jp/

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