

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24650116

研究課題名(和文) 複雑ネットワークの時間発展法則の同定とその予測

研究課題名(英文) Identification and Prediction of Complex Network Evolution

研究代表者

池口 徹 (Ikeguchi, Tohru)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：30222863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：人間関係や電力網、WWWやニューラルネットなど、要素が複雑に繋がった複雑ネットワークに関する研究が盛んに行われている。現実のネットワークでは、要素間の繋がりが時間と共に変化するため、ネットワークが過去どのように変化してきたのか、将来どのように変化するのかわかることは、その形成メカニズムや複雑ネットワーク上で起る諸現象の数理構造解明に非常に重要である。本研究は、非線形時系列解析論を拡張し、ネットワークの時間発展法則を同定・予測のための新しい複雑現象の予測技法のフレームワークを提案した。ネットワークを時系列データに変換し、それに基づいてネットワークの時間発展法則を同定するものである。

研究成果の概要(英文)：We propose a new framework to analyze characteristics of temporal networks and to predict how the temporal networks evolve. Using the theory and techniques of nonlinear time series analysis, we first show that the proposed method in the framework can effectively transform complex networks to time series. The results show that we can analyze the temporal evolution of complex networks by the time series analysis theory. In addition, we also analyze real temporal network data (sending and receiving records of electronic mails in a private company) and model its statistical behavior. Analyzing the real data of the temporal networks, we discovered that the records have several interesting temporal features. Then, we propose m The results show that our model can reproduce several characteristics of the real network data.

研究分野：非線形数理工学

キーワード：複雑ネットワーク 時間発展 時系列 予測 状態同定

1 研究開始当初の背景

人間関係や電力網, WWW やニューラルネットワークなど, 多数の要素が複雑に繋がった複雑ネットワークに関する研究が盛んに行われている (Watts et. al., *Nature*, **393**, 440–442, 1998; Barabasi et. al., *Science*, **286**, 506–512, 1999). 現実の複雑ネットワークでは, 要素間の繋がりが時間と共に変化するため, 複雑ネットワークが過去どのように変化してきたのか, 将来どのように変化するかを知ることは, その形成メカニズムや複雑ネットワーク上で起る諸現象の数理構造解明に非常に重要である. しかし, このような複雑ネットワークの時間発展法則の同定・予測は, 種々の複雑現象の解析とその予測にとって学術的な突破口となり得るにも関わらず, 現在まで殆ど考慮されていないのが実情である.

研究代表者はこれまでに複雑ネットワーク論とその応用に関する研究に携わってきた. 一方, 一見ランダムな挙動を示す時系列信号が, 少数自由度の決定論的非線形力学系から生じたと考える「カオス時系列解析」と呼ばれる非線形時系列解析手法の研究にも, 約 20 年に渡り携わってきている. 具体的には, 複雑ネットワーク論の観点からのカオス時系列の解析, マルチスパイク列からのネットワーク構造の推定, 統計的リサンプリング法を用いた非線形予測, 学習則により自己組織化されるニューラルネットの構造解析などである.

これらの二分野において研究活動を行ってきた結果, 非線形時系列解析における予測理論を導入することで複雑ネットワークの時間発展予測理論の確立が可能であるという認識に至っている. その契機は, 平成 20~22 年度に科学研究費補助金 (挑戦的萌芽研究) の援助を受けて成果をあげた非線形時系列解析論と複雑ネットワーク論の融合による複雑現象の解析技法に関する研究である. この研究を遂行する中で, 上記の融合論をベースに, 非線形時系列解析と複雑ネットワーク解析の両分野を繋ぐ全く新しい理論を構築できる.

2 研究の目的

本研究は, 非線形時系列解析論を拡張することで, 複雑ネットワークの時間発展法則を同定・予測のための新しい複雑現象の予測技法のフレームワークを提案することが目的である.

3 研究の方法

本研究課題は, 非線形時系列解析論の観点から複雑ネットワークの時間発展法則を同定する理論を構築し, 種々の複雑現象の予測に応用するものである. そこで, 複雑ネットワークの時間発展法則の同定法を開発し, それを複雑ネットワークの時間発展予測への応用することを考える.

4 研究成果

(1) ネットワークから時系列への変換によるネットワーク時間発展同定手法

複雑ネットワークを時系列信号に変換することで, ネットワークの時間発展を同定するための基本技法を提案した. 具体的には用いた基本技法は, 古典的多次元尺度法である. まず初めに, 提案技法を Watts と Strogatz (*Nature*, **393**, 1998) が提案したモデルに対して適用する. さらに, 提案技法が解析的にも成立することを示す.

あるネットワークの隣接情報を $A (= \{a_{ij}\})$ とする. A は $N \times N$ 行列であり, 頂点 v_i と v_j が隣接しているときは $a_{ij} = 1$, それ以外は $a_{ij} = 0$ である. 次に, v_i と v_j の間の頂点間距離 d_{ij} を以下で定義する. $a_{ij} = 0 (i \neq j)$ のとき $d_{ij} = w (> 1)$, それ以外は $d_{ij} = a_{ij}$ である.

古典的多次元尺度法 (Classical Multidimensional Scaling, CMDS) を用いることで, 座標値を定めることができる. まず, A を正方行列 $D = \{d_{ij}^2\}$ に変換する. 次に行列 D を

$$G = -\frac{1}{2}J_N D J_N^T$$

により G に変換する. ただし,

$$J_N = E - \frac{1}{N}\mathbf{1}_N \mathbf{1}_N^T$$

で, E は $N \times N$ の単位行列, $\mathbf{1}_N$ は, N 次元縦ベクトルである. 行列 G は固有値 0, 固有ベクトル $\mathbf{1}_N/\sqrt{N}$ となる. 行列 G が半正定値となるように w を定めると, 座標値は行列 G を固有値分解することにより求めることができる. ここで, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_h)$, $\Lambda^{(1/2)} = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_h})$, $P = (\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_h)$, $\mathbf{p}_m = (p_{m1}, p_{m2}, \dots, p_{mN})^T$ であり, h は行列 G の非零固有値の数である.

この時, 座標行列 X は,

$$X = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)^T$$

である. ただし, $\mathbf{x}_m (= (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mh})^T)$ は, 頂点 v_m の h 次元座標値であり, 非零固有値数は各点が配置されるユークリッド空間の次元に対応する. 最後に, N 個の座標値の変化パターンを時系列

$$s_m(t) = \sqrt{\lambda_m} p_{mt} (1 \leq m \leq h, 1 \leq t \leq N)$$

として定義する. ここで, 各頂点のインデックスは時間となる (擬時間).

提案手法の有効性を WS モデル (Watts と Strogatz (*Nature*, **393**, 1998)) を用いて確認した. 図 1(a) に WS モデルにおいて繋ぎかえ確率が 0 に対応するレギュラーネットワークから変換された時系列 (赤), スモールワールドネットワークから変換された時系列 (黄色), ランダムネットワークから変換された時系列の例 (青) を示す. なお, これらの図では, 最大固有値に対応する固有ベクトルを時系列信号として採用した. 図 1 を見ると, 時系列信号のパターンとネットワークの構造が一致・対応していることがわかる. すなわち, レギュラーネットワークでは, 時系列信号は周期的となり, ランダムネットワークでは, 時系列信号はランダムとなり, スモールワールドネットワークでは, 時系列信号はランダムと周期的の間となつている.

図 1(b)–(d) は対応するパワースペクトラムを示しているが, これらの結果をみても, 時系列信号の

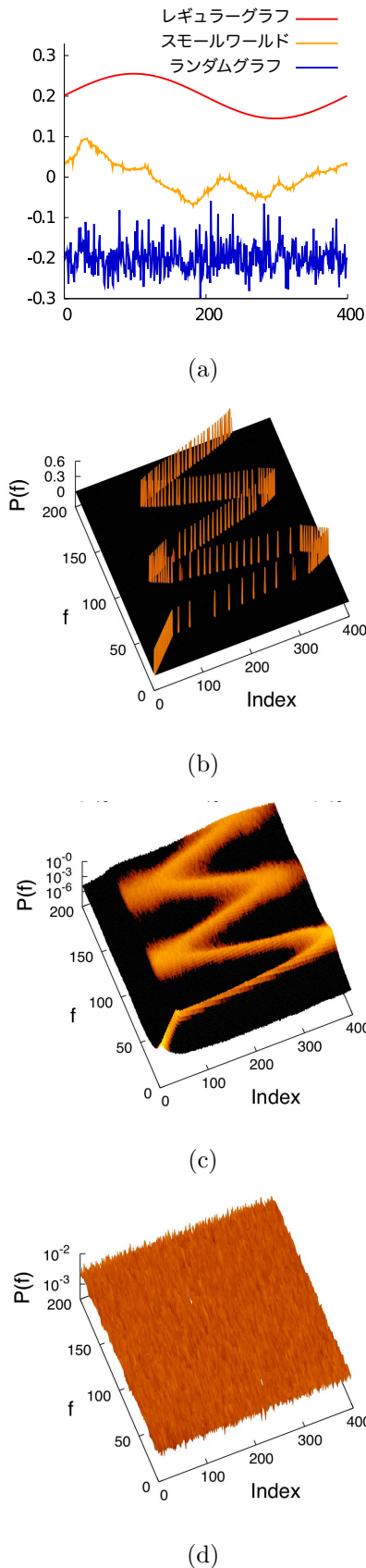


図 1: レギュラーグラフ, スモールワールドネットワーク, ランダムグラフの時系列を提案手法により変換した際に得られる (a) 時系列信号と各パワースペクトラム ((b),(c),(d)).

パターンとネットワークのトポロジーが対応していることがわかる。

(2) 電子メールネットワークの構造的・時間的解析と数理モデリング

二つの電子メールネットワークを用いて, 時間的特徴に関する調査を行った. この電子メールネットワークでは, 電子メールの送・受信により結合が生じると定義し, 各頂点の (入・出) 次数分布, メール送信間隔分布, メール受信間隔分布, 重み分布, (入・出) 強度分布などをまず調査した. その結果, 解析対象とした電子メールネットワークは, (入・出) 次数分布, メール送信・受信間隔分布がべき乗則に従うことを明らかにした.

次に, 2つの性質を実現することができる数理モデルを提案した. 提案モデルでは, 人々の電子メールの利用頻度は異なると仮定を導入し, 受信したメールに対してはある確率で返信するという仮定を導入した. 従ってこのモデルでは, 各頂点は異なるメール送信確率でメールを送信するというダイナミクスを実現している. また, 直前に受け取ったメールに対してある確率で返信を行うというダイナミクスを実現している. さらに, 提案モデルを用いた数値実験により, 提案モデルから生成されるネットワークがどのような時間的特徴を有しているかを調査した (図 2(a)).

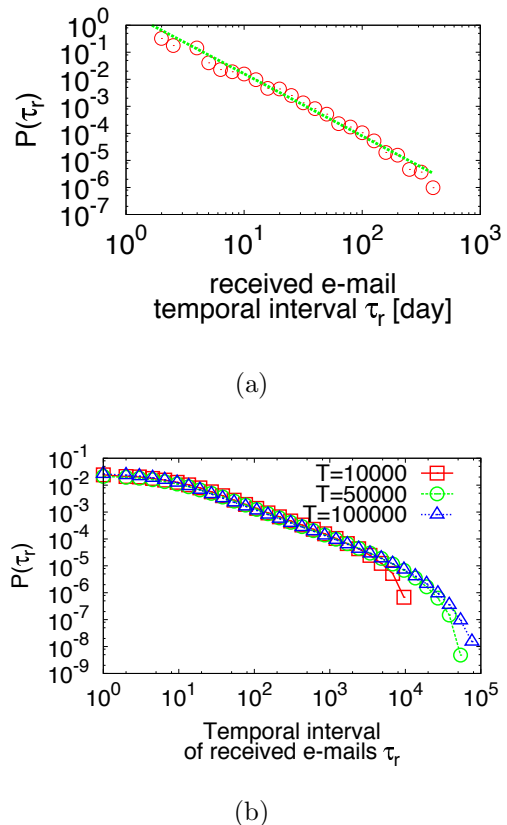


図 2: (a) エンロン社における電子メールの送受信記録より算出したメールの受信間隔の分布 (実データ) と, (b) 提案したモデルから求めたメールの受信間隔の分布.

この結果, 上記の二つの仮定を導入することで, 実電子メールネットワークと同様に (入・出) 次数分

布, メール送信・受信間隔分布がべき則に従うことも明らかとなった. 結果の一例が図 2(b) である. 観測期間を種々変化させた場合にも実データ (図 2(a)) とよく整合していることがわかる. さらに, メールに対する返信について, 送信者に対する返信ではなく, ランダムに返信先を決定した場合に, 入次数分布, メール受信間隔分布はべき則にはならないことも明らかにした. これらの結果により, 時間とともに変化するネットワークデータの特徴を予測できることを明らかにした.

5 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 44 件)

(注) 査読があるもののみ, 査読有と記載.

- H. Kato and T. Ikeguchi, "Oscillation, Conduction Delays, and Learning Cooperate to Establish Neural Competition in Recurrent Networks," *PLoS One*, Vol.11, No.2, p.e0146044, 10.1371/journal.pone.0146044, 2016, 査読有.
- K. Fujiwara, H. Suzuki, T. Ikeguchi and K. Aihara, "Method for analyzing time-varying statistics on point process data with multiple trials," *Nonlinear Theory and its Applications*, IEICE, Vol. 6, pp. 38-46, 10.1587/nolta.6.38, 2015, 査読有.
- ブアリ ソフィエン, 島田 裕, 藤原 寛太郎, 池口 徹, "時変統計量を用いた大規模地震の予測の可能性について," 電子情報通信学会, 技術研究報告, vol. 114, no. 414, NLP2014-123, pp. 59-64, 2015.
- 島田 裕, 藤原 寛太郎, 池口 徹, "次数の高い 1 次元格子状での結合写像の振舞いについて," 電子情報通信学会, 技術研究報告, vol. 114, no. 414, NLP2014-122, pp. 53-57, 2015.
- 阿部晃士, 島田 裕, 藤原 寛太郎, 池口 徹, "テンポラルネットワーク上での伝染病感染ダイナミクス," 電子情報通信学会, 技術研究報告, vol. 114, no. 484, NLP2014-143, pp. 1-6, 2015.
- 阿部晃士, 島田 裕, 藤原 寛太郎, 池口 徹, "コンタクトネットワーク上での伝染病感染ダイナミクスの解析," 電子情報通信学会 総合大会講演論文集, A-2-22, 2015
- 小林稔啓, 島田 裕, 藤原 寛太郎, 池口 徹, "STDP 学習則による脳内の低周波リズム生成機構の解明," 電子情報通信学会 総合大会講演論文集, A-2-42, 2015
- K. Kuroda, H. Hasiguchi, K. Fujiwara and T. Ikeguchi, "Reconstruction of network structures from marked point processes using multi-dimensional scaling," *Physica A*, Vol.415, pp.194-204, 10.1016/j.physa.2014.08.001, 2014, 査読有.
- 藤原 寛太郎, 黒河 徳大, 山田 泰司, 池口 徹, "リカレンスプロットを用いたニューロンへの入力信号の検出," *日本神経回路学会誌*, Vol.21, No.2, pp.79-86, 10.3902/jnms.21.79, 2014, 査読有.
- Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Classification of Bursting Electrical Activity in Pancreatic β -cell," *Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014)*, pp. 450-453, 2014, 査読有.
- Yutaka Shimada and Tohru Ikeguchi, "Analysis on temporal effects in time-varying social networks," *Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014)*, pp. 541-544, 2014, 査読有.
- Tsubasa Kawai, Kantaro Fujiwara, Yutaka Shimada, Kenya Jin'no and Tohru Ikeguchi, "Phase synchronization in chaotic oscillators induced by common noise," *Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014)*, pp. 241-244, 2014, 査読有.
- 黒河 徳大, 柳沼 選, 藤原 寛太郎, 山田 泰司, 池口 徹, "発火率を用いた RP によるカオスの ISI からの入力信号検出," 電子情報通信学会 総合大会講演論文集, A-2-22, 2014.
- Suguru Yaginuma, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "A mathematical model of e-mail networks with reply dynamics," 電子情報通信学会, 技術研究報告, vol. 113, no. 486, pp.37-42, NLP2013-171, 2014.
- Yutaka Shimada, Yoshito Hirata, Tohru Ikeguchi and Kazuyuki Aihara, "Collective Decay in Citation Networks," *Proceedings of the 3rd International Symposium on Innovative Mathematical Modelling*, 2013.
- Yutaka Shimada, Yoshito Hirata, Tohru Ikeguchi and Kazuyuki Aihara, "Detecting Growth of Groups in Networks by Using a Transformation Method from Networks to Time Series," *Proceedings of the International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013)*, pp. 231-234, 2013, 査読有.
- Kaori Kuroda, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Detection of Learning in Neural Networks Only from Spike Sequences," *Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013)*, pp. 142-145, 2013, 査読有.
- Akiyoshi Tanaka, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Analysis on Information Diffusion of a Mathematical Model with Dynamical Sending Probability," *Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013)*, pp. 298-301, 2013, 査読有.

19. Yong Gao, Kaori Kuroda, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Classification of Real Networks by Using Classical Multidimensional Scaling," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013), pp. 126-129, 2013, 査読有.
20. Kaori Kuroda, Kantaro Fujiwara, and Tohru Ikeguchi, "Estimation of Neural Network Structures and Direction of Couplings using Spike Time Metric," 2013 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP '13), pp. 504-507, 2013, 査読有.
21. Takayuki Kimura and Tohru Ikeguchi, "An optimization method for packet delivery on scale-free networks," Technical report of IEICE, vol. 113, no. 341, pp. 81-85, NLP2013-128, 2013.
22. Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Noise Enhances Regular Bursting in Heterogeneous Pancreatic β -cell Networks," 電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会講演論文集, AS-1-5
23. Yutaka Shimada, Tohru Ikeguchi, Yoshito Hirata and Kazuyuki Aihara, "Relations between the Method for Transforming Networks to Time Series and Communities in a Network," 電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会講演論文集, AS-2-6, 2013.
24. Kaori Kuroda, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Estimation of connectivity of systems from distance relation between marked point processes," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会講演論文集, AS-1-7, 2013.
25. 黒河 徳大, 藤原 寛太郎, 山田 泰司, 池口 徹, "出力発火間隔時系列リカレンスプロットによるニューロンへの入力の検出" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, AS-2-8, 2013.
26. Suguru Yaginuma, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "A mathematical model of an e-mail network with scale-free and bursting properties," 電子情報通信学会 総合大会講演論文集, A-2-21, 2013.
27. Yong Gao, Kaoli Kuloda and Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara, Tohru Ikeguchi, "Analysis on real networks by classical multidimensional scaling," 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 112, no. 487, NLP2012-162, pp. 91-96, 2013.
28. Suguru Yaginuma, Kaori Kuroda, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Prediction of growth of complex networks," 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 112, no. 487, NLP2012-163, pp. 97-102, 2013.
29. 黒田 佳織, 藤原 寛太郎, 池口 徹, "Spike Time Metric を用いたマーク付き点過程からのネットワーク構造の推定," 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 112, no. 389, NLP2012-129, pp. 143-148, 2013.
30. 田中 亮吉, 島田 裕, 藤原 寛太郎, 池口 徹, "動的に変化する伝播確率が情報伝播に与える影響," 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 112, no. 389, NLP2012-130, pp. 149-154, 2013.
31. Hideyuki Kato and Tohru Ikeguchi, "Neural Competition Reflects Conduction Delay Distribution in Oscillatory STDP Recurrent Networks," 電子情報通信学会 総合大会講演論文集, A-2-5, 2013.
32. Kaori Kuroda, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Estimation of complex neural network structures and direction of couplings," 電子情報通信学会 総合大会講演論文集, A-2-19, 2013.
33. Akiyoshi Tanaka, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Analysis on diffusion speed and convergence time of a mathematical model with dynamical sending probability," 電子情報通信学会 総合大会講演論文集, A-2-17, 2013.
34. Y. Shimada, T. Ikeguchi, and T. Shigehara, "From networks to time series," Physical Review Letters, Vol.109, No.158701, 2012, 査読有.
35. Y. Shimada, T. Yamada and T. Ikeguchi, "Detecting Stretch-and-fold Mechanism in Chaotic Dynamics," International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol.22, No.11, 2012, 査読有.
36. Takayuki Kimura and Tohru Ikeguchi, "A Routing Strategy with Load-Balancing Effects by Chaotic Neural Networks." 第 25 回 回路とシステムワークショップ講演論文集, pp. 256-260, 2012.
37. Yutaka Shimada, Tohru Ikeguchi, Yoshito Hirata, and Kazuyuki Aihara, "Analysis on Evolution Processes of Evolving Networks," Proceedings of the 2nd International Symposium on Innovative Mathematical Modelling, pp. 76, 2012.
38. Kaori Kuroda, Kantaro Fujiwara, and Tohru Ikeguchi, "Identification of neural network structure from multiple spike sequences," Lecture Notes in Computer Science, Vol.7664, pp.184-191, 2012, 査読有.
39. Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, "Effects of Shift in the Excitatory-Inhibitory Balance on Firing Statistics," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2012), pp. 489-492, 2012, 査読有.
40. Takayuki Kimura and Tohru Ikeguchi, "Traffic Dynamics on Effective Routing Strategy for Complex Networks," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and

its Applications (NOLTA2012), pp. 539-542, 2012, 査読有.

41. Hideyuki Kato and Tohru Ikeguchi, “Spike Timing-Dependent Plasticity in Sparse Recurrent Neural Networks,” Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2012), pp. 485-488, 2012, 査読有.
42. Yutaka Shimada, Takuya Kobayashi, Tohru Ikeguchi and Kazuyuki Aihara, “Visualization Analysis on Stretch-and-Fold Mechanism of Chaotic Attractors,” Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2012), pp.57-60 2012, 査読有.
43. Kaori Kuroda, Hiroki Hashiguchi and Tohru Ikeguchi, “Estimation of Connectivities of Neurons Using Multi-Dimensional Scaling,” Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2012), pp.382-385, 2012, 査読有.
44. Akiyoshi Tanaka, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, “Analysis on Network Topology and Dynamics of Information Diffusion,” Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2012), pp.57-60 2012, 査読有.

(学会発表) (計 32 件)

1. Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, “Classification of Bursting Electrical Activity in Pancreatic β -cell,” International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), 2014 年 9 月 17 日, スイス, ルツェルン.
2. Yutaka Shimada and Tohru Ikeguchi, “Analysis on temporal effects in time-varying social networks,” International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), 2014 年 9 月 17 日, スイス, ルツェルン.
3. 黒河 徳大, 柳沼 選, 藤原 寛太郎, 山田 泰司, 池口 徹, “発火率を用いた RP によるカオスの ISI からの入力信号検出,” 電子情報通信学会 2014 年 総合大会, 2014 年 3 月 20 日, 新潟大学 (新潟県新潟市).
4. Suguru Yaginuma, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, “A mathematical model of e-mail networks with reply dynamics,” 電子情報通信学会 2014 年 総合大会, 2014 年 3 月 20 日, 新潟大学 (新潟県新潟市).

他 28 件.

(図書) (計 1 件)

1. 堀尾 喜彦, 安達 雅春, 池口 徹, “カオスニューロ計算 (ナチュラルコンピューティング・シリーズ),” 近代科学社, 2013.

(その他)

ホームページ等 <http://www.hisenkei.net/~tohru/>

6 研究組織

(1) 研究代表者

池口 徹 (Tohru IKEGUCHI)
東京理科大学・工学部・教授
研究者番号: 30222863