

令和元年5月13日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03964

研究課題名(和文) クープマンモード解析に基づく電力ネットワークのデータ駆動型運用技術の構築

研究課題名(英文) Data-Driven Technologies of Power Network Operation Using Koopman Mode Analysis

研究代表者

薄 良彦 (Susuki, Yoshihiko)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40402961

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：電力ネットワークは、電気エネルギーの供給を担う大規模工学システムである。近年、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの大量導入や2018年北海道で発生したような供給停止事象の頻発により、電力ネットワークの従来の運用技術の限界とそれを打破する新しい技術の構築が求められきた。本研究の目的は、実計測により取得されるデータを全面に活用した電力ネットワーク運用システムの構築に関する基盤研究である。特に、同期フェーザ計測装置により得られる高解像度時系列データを最大限活用するために、非線形力学系理論に基づくクープマンモード解析に着眼し、データより電力ネットワークの安定性を把握し、制御する技術を新規に提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた結果はいずれも、電力ネットワークで取得されたデータを全面に活用した運用技術に資するものである。このようなデータを全面に活用した運用技術の研究は、従来の物理モデルをベースとした運用が難しい状況、例えば、不確定性を有する再生可能エネルギー源が大量導入された小規模電力ネットワーク(マイクログリッド)や大規模停電に至るような極限的環境下にある電力ネットワークに対して、運用に関する新しい指針を与えるものである。このような複雑電力ネットワークに対するシステム構築に資する本研究は、AIを含むデータサイエンスとの接点から学術的意義を有し、エネルギーの安定供給に資する観点から社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：An electric power network is a man-made system for delivering electrical energy from producers to consumers. Due to high penetration of renewable resources such as solar and wind, and to occurrence of wide-area disturbances such as Hokkaido in 2018, it was required to explore new principle and methodology for operation of power networks. The purpose of this project was to explore a data-centric approach to the operation of power networks, especially, based on massive quantity of data collected with Phasor Measurement Units (PMUs). The novelty of this project was to focus on the so-called Koopman Mode Analysis (KMA) that was a novel technique of nonlinear time-series analysis and was guided by the rigor mathematical theory of nonlinear dynamical systems. This project proposed novel methodology and tool for monitoring and control the stability in synchronization of power networks based on KMA of PMU data and for learning the voltage dynamics based on single-bus measurement.

研究分野：システム工学

キーワード：電力工学 制御工学 計測工学 クープマンモード フェーザ計測装置

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、2014年度の申請時点までに、電力ネットワークのデータ駆動型動特性解析技術をクープマンモード解析（Koopman Mode Analysis; KMA）に基づき提案していた。この技術は、実測データに基づく方法であり、出力不確定性からモデル化が困難な再生可能エネルギーを含む電力ネットワークに対して適用可能である。このようなデータ駆動型方法論は、2003年北米大停電の発生要因として広域監視・協調運用の欠如が指摘されたことを受けて、同期フェーズ計測装置（Phasor Measurement Unit; PMU）に代表されるセンシングや情報通信を活用した広域監視技術として世界的に活発に研究されていた。代表者らの提案は、このような広域監視技術に不可欠な実測データに基づくネットワーク解析技術を提供するものであった。しかしながら、申請時点において解析に留まっており、状態監視や制御技術へのKMAの適用、そして状態監視から診断、制御技術までを統合したKMAに基づく運用システムの設計は未検討であった。また、太陽光・風力等の出力不確定性を有する再生可能エネルギーの大量導入を受けて従来運用方式の限界が指摘されており、本研究のようなデータ駆動型運用技術の構築は喫緊の課題で早急の解決が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電力ネットワークの状態監視、診断、及び制御に関するデータ駆動型技術のKMAに基づく構築である。本研究で対象とする基盤技術は、観測又は予測（シミュレーション）データから上記3つの機能を実現するアルゴリズムに関わるものであり、研究期間である4年間に次の5つの項目について研究を実施することを申請した。

- (A) PMUデータのKMAに基づく状態監視技術の構築
- (B) 観測データに基づく周波数安定性診断技術の構築
- (C) 観測データに基づく電圧安定性診断技術の構築
- (D) 観測・予測データに基づく周波数・電圧制御技術の構築
- (E) (A)から(D)の技術統合によるデータ駆動型運用システムの設計指針の確立

以上の項目を通して、分散型再生可能エネルギーが大量に普及した次世代電力ネットワーク運用のベースとなる技術の確立を目指した。

3. 研究の方法

本研究の方法は数理と計測に大別される。

数理的手法としては、数理科学で用いられてきたクープマン作用素に基づくクープマンモード解析（KMA）と非線形安定性解析に関するエネルギー関数法を採用した。前者については、クープマン作用素とは、電力ネットワークの動特性モデルに相当する非線形力学系に対して定義される無限次元線形作用素である。対象とする力学系のいくつかの条件の下で、クープマン作用素は、元の非線形力学系の情報を完全に保持することが理論的に示され、非線形力学系のモデルと等価な電力ネットワークの線形モデルを与える。KMAとは、クープマン作用素の固有値（離散スペクトル）に基づく時系列データ解析法であり、電力ネットワークの非線形性に起因する複雑な振る舞いの時系列データをクープマンモードと呼ぶ複数の単一周波数時系列に分解することを可能とする。また、エネルギー関数とは、非線形力学系に対するリアプノフ関数と類似の概念であり、非線形力学系の有する漸近安定平衡点の吸引領域を定量的に評価することを可能とし、電力ネットワークの同期（過渡）安定性の診断・制御技術に従来より利用されてきた。

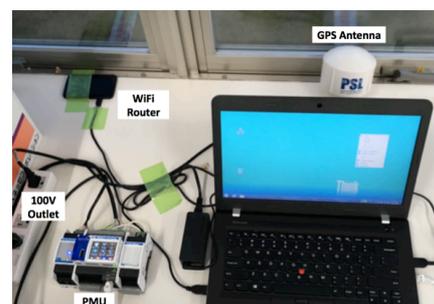
計測手法としてはフェーズ計測装置（PMU）を採用した。PMUは、GPSを活用した分散同期サンプリングを目的とした計測装置であり、交流電圧の振幅、周波数、位相を収集する。同期サンプリングにより、交流電力ネットワークの異なる地点における電圧位相差を計測することが可能となり、ネットワークにおける電力潮流や同期・周波数・電圧安定性の監視、診断、制御に向けた応用が検討されている。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を上記2.(A)から(E)の項目に関連づけて以下に記述する。なお、下記の[35][31]などは「5. 主な発表論文等」の論文ラベルを表す。

(A-1) PMUに基づく状態監視技術と慣性推定技術

本研究では、変電所や需要家コンセントの電圧階級に対応し、ネットワーク/FTP/ストリーミング/Webサーバ機能を標準で有しており、配電系統における微小な位相差を検出可能な測定精度と時間分解能を有する



Power Standards Lab 製の PMU を採用し、国内 6 箇所に設置した（前頁の写真）。そして、外乱発生時の PMU 時系列データに対して KMA を実施した[35]。また、連携研究機関より提供を受けた PMU 時系列データの KMA を実施し、西日本 60Hz 系統の広域動揺モードの特性評価を行った[31]。

さらに、PMU 時系列データの KMA に基づいて電力ネットワークの慣性定数を推定するアルゴリズムを新規に提案し、その有効性を実測電圧位相データならびに実測潮流データに基づき示した[6,32,33]。

(A-2) PMU 時系列データのための KMA アルゴリズム

PMU 時系列データの特徴として、同期サンプリングされる測定地点数（空間サンプル数）に比較して、時間サンプル数が極めて大きいことが挙げられる。このような時系列データに対して KMA を実行するために、電力システム工学で従来用いられてきたプロニ（Prony）解析と密接に関連するアルゴリズムを新規に提案し、その有効性を 2006 年欧州で発生した広域故障前の連系線潮流ならびに 2015 年日本における連系線（幹線）潮流の実測データを用いて示した[14,16,18,49]。

さらに、分散配置された PMU 取得データに対して KMA を分散協調的に実行するアルゴリズムを国際共同研究により新規に提案した[3,38]。

(B) 同期安定性診断技術

多機電力ネットワークにおける（非線形）同期安定性喪失の診断技術をエネルギー関数の分解に基づいて実行することを新規に提案し、その有効性を New England 39 母線ベンチマークを含む非線形モデルを用いて示した[15,17,19]。さらに、この診断技術をデータ駆動で実行するために、エネルギー関数のデータに基づく構成アルゴリズムを国際共同研究により新規に提案した[12,36]。

また、同期安定性喪失の診断ならびに制御に従来から用いられている、線形モデルに基づく寄与率（Participation Factor）に着眼し、KMA に基づいて非線形モデルに対する一般化寄与率を提案し、データ駆動型方法論として整備し、その有効性を電力ネットワークの非線形モデルを用いて示した[1,22]。

さらに、電力ネットワークに対する非線形動特性モデルの新しい表現を与える、クープマン作用素に基づく非線形システムのラプラス領域表現を導出した[21]。

(C) 電圧安定性診断技術

電圧安定性喪失の診断技術として、電圧崩壊（Voltage Collapse）現象の予兆検知アルゴリズムに関する研究を実施し、クープマン作用素の連続（Continuum）スペクトルに基づく理論とデータ駆動型方法を提案した[39,42]。さらに、遅れ座標による埋め込み（Delay Embedding）と Extended Dynamic Mode Decomposition（拡張型動的モード分解）に基づくことで、電力ネットワークの電圧動特性解析を単一母線の計測データのみで実行するデータ駆動型方法を提案し、その有効性を電力ネットワークの非線形モデルに関する数値シミュレーションにより示した[5,47,50]。

(D) 緊急時制御技術

非線形モデルに対する等価線形モデルがクープマン作用素により推定できることに着眼した、モデル予測制御（Koopman Model Predictive Control）に着眼し、電力ネットワークの制御、特に(B)に関わる緊急時制御に対する有効性を国際共同研究により示した[4,24,30]。

(E) システム統合技術（機械学習と信号処理との融合研究）

本研究の状態監視、診断、ならびに制御の統合技術をデータサイエンスの観点で整備するために、機械学習ならびに信号処理との融合研究を実施した。

機械学習におけるガウス過程回帰に基づく KMD アルゴリズムを国際共同研究により新規に提案し、その有効性を電力ネットワークの非線形モデルに対して示した[8,23,25,30]。また、マルチタスク・ガウス過程回帰による KMA アルゴリズムについても提案し、その有効性を検討した。

KMA をオンラインで実行するためのアルゴリズムを提案し、その有効性検討を本研究で配置した PMU の取得データに基づく西日本 60Hz 系統の広域動揺モードの推定により実施した[20]。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 19 件）（国際会議論文を含む）

- [1] Marcos Netto, Yoshihiko Susuki, and Lamine Mili, Data-driven participation factors for nonlinear systems based on Koopman mode decomposition, IEEE Control Systems Letters, 査読有, vol.3, issue 1, pp.198-203, January 2019.
DOI: 10.1109/LCSYS.2018.2871887

- [2] Alexandre Mauroy and Yoshihiko Susuki, Introduction to the Koopman operator in systems and control, Proceedings of SICE Annual Conference, 査読有, pp.59-63, September 2018.
- [3] Yoshihiko Susuki and Aranya Chakraborty, Introduction to Koopman mode decomposition for data-based technology of power system nonlinear dynamics, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol.51, issue 28, pp.327-332, September 2018.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.723
- [4] Milan Korda, Yoshihiko Susuki, and Igor Mezic, Power grid transient stabilization using Koopman model predictive control, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol.51, issue 28, pp.297-302, September 2018.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.718
- [5] Yoshihiko Susuki and Kyoichi Sako, Data-based voltage analysis of power systems via delay embedding and extended dynamic mode decomposition, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol.51, issue 28, pp.221-226, September 2018.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.705
- [6] Yoshihiko Susuki, Ryo Hamasaki, and Atsushi Ishigame, Estimation of power system inertia using nonlinear Koopman modes, Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting, 査読有, August 2018.
DOI:10.1109/PESGM.2018.8586007
- [7] Fredrik Raak, Yoshihiko Susuki, Kazuhisa Tsuboki, Masaya Kato, Shinya Eguchi, and Takashi Hikihara, Assessment of offshore wind farm characteristics with the cloud resolving storm simulator: A case study in Japan, Wind Energy, 査読有, vol.21, issue 7, pp.531-543, July 2018.
DOI: 10.1002/we.2176
- [8] Satomi Sugaya, Yoshihiko Susuki, Atsushi Ishigame, Andrea Mammoli, and Manel Martinez-Ramon, Modeling nonlinear dynamic system in RKHS through the Koopman operator, Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 査読有, pp.7-10, December 2017.
<http://www.ieice.org/nolta/symposium/archive/2017/articles/5146.pdf>
- [9] 薄 良彦, クープマン作用素による大規模非線形ダイナミカルシステムの解析, 計測と制御, 査読有, vol.56, no.12, pp.931-936, December 2017.
DOI: 10.11499/sicejl.56.931
- [10] Fredrik Raak, Yoshihiko Susuki, Kazuhisa Tsuboki, Masaya Kato, and Takashi Hikihara, Quantifying smoothing effects of wind power via Koopman mode decomposition: A numerical test with wind speed predictions in Japan, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 査読有, vol.8, no.4, pp.342-357 October 2017.
DOI: 10.1587/nolta.8.342
- [11] 薄 良彦, クープマン作用素による非線形ダイナミクスの解析, システム/制御/情報, 査読有, vol.61, no.5, pp.175-181, May 2017.
DOI: 10.11509/isciesci.61.5_175
- [12] Chiaki Kojima, Yoshihiko Susuki, and Aranya Chakraborty, A data-driven construction of energy functions for power grid collective behavior via synchrophasors, Proceedings of SICE International Symposium on Control Systems, 査読有, article no.2A2-4, March 2017.
- [13] Fredrik Raak, Yoshihiko Susuki, Igor Mezic, and Takashi Hikihara, On Koopman and dynamic mode decompositions for application to dynamic data with low spatial dimension, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, pp.6485-6491, December 2016.
DOI: 10.1109/CDC.2016.7799267
- [14] Fredrik Raak, Yoshihiko Susuki, Kazuhisa Tsuboki, Masaya Kato, and Takashi Hikihara, On smoothing effects of wind power via Koopman mode decomposition, Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 査読有, pp.366-369, November 2016.
<http://www.ieice.org/nolta/symposium/archive/2016/articles/1142.pdf>
- [15] Chiaki Kojima, Yoshihiko Susuki, Koji Tsumura, and Shinji Hara, Decomposition of energy function and hierarchical diagnosis of power grid swing instabilities, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 査読有, vol.7, no.4, pp.523-547, October 2016.
DOI: 10.1587/nolta.7.523
- [16] Yoshihiko Susuki, Igor Mezic, Fredrik Raak, and Takashi Hikihara, Applied Koopman operator theory for power systems technology, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 査読有, vol.7, no.4, pp.430-459, October 2016.
DOI: 10.1587/nolta.7.430
- [17] Chiaki Kojima, Yoshihiko Susuki, Koji Tsumura, and Shinji Hara, Hierarchical transient stability diagnosis for interconnected loop power grids, Proceedings of SICE International Symposium on Control Systems, 査読有, article no.2A3-5, March 2016.
- [18] Yoshihiko Susuki and Igor Mezic, A Prony approximation of Koopman mode decomposition, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, pp.7022-7027, December 2015.

DOI: 10.1109/CDC.2015.7403326

- [19] [Chiaki Kojima](#), [Yoshihiko Susuki](#), Koji Tsumura, and Shinji Hara, Decomposition of energy function and hierarchical transient stability diagnosis for power networks, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, pp.3266-3271, December 2015.
DOI: 10.1109/CDC.2015.7402710
- [学会発表] (計 31 件) (国内外学会・研究会・セミナー発表, 招待講演を含む)
- [20] 下村 昂大, 薄 良彦, 太田 豊, 石亀 篤司, クープマンモード分解のオンラインアルゴリズムに関する検討と広域動揺モード推定への適用, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 広島, 2019 年 9 月 (発表予定).
- [21] [Yoshihiko Susuki](#), Igor Mezic, and Alexandre Mauroy, Expansion formula of the resolvents of Koopman operators: towards applications in analysis and synthesis of nonlinear dynamical systems, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, United States, May 22, 2019.
- [22] Marcos Netto, [Yoshihiko Susuki](#), and Lamine Mili, Data-driven participation factors for nonlinear systems based on Koopman mode decomposition, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, United States, May 21, 2019.
- [23] Manel Martinez-Ramon, [Yoshihiko Susuki](#), Akitoshi Masuda, Satomi Sugaya, Andrea Mammoli, and Atsushi Ishigame, Gaussian process for Koopman spectral analysis with application to smart grids, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (SIAM DS19), Snowbird, United States, May 21, 2019.
- [24] 薄 良彦, クープマン作用素による非線形ダイナミカルシステムの解析と制御, 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会, 東京, 2019 年 3 月 27 日 (招待講演).
- [25] Akitoshi Masuda, [Yoshihiko Susuki](#), Satomi Sugaya, Manel Martinez-Ramon, Andrea Mammoli, and Atsushi Ishigame, Gaussian process regression for dynamic mode decomposition, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 徳島, 2018 年 9 月 12 日.
- [26] [Yoshihiko Susuki](#), Koopman operator techniques in data-driven power systems technology, CURRENT Seminar, Rensselaer Polytechnic Institute, United States, July 6, 2018.
- [27] [Yoshihiko Susuki](#), Koopman operator techniques in data-driven power systems technology, IGERT Seminar, The University of Vermont, United States, July 5, 2018.
- [28] [Yoshihiko Susuki](#), Koopman operator techniques in data-driven energy systems technology, INFORMS International Conference, Taipei, Taiwan, June 18, 2018.
- [29] 薄 良彦, クープマン作用素による非線形力学系の制御と解析: 最近の話題から, 共同研究「力学系---理論と応用の融合---」, 京都大学数理解析研究所, 2018 年 6 月 5 日.
- [30] 薄 良彦, クープマン作用素による非線形ダイナミクスの解析と制御, システム制御情報学会 研究発表講演会, 京都, 2018 年 5 月 18 日 (招待講演).
- [31] Akash Lohani, [Yoshihiko Susuki](#), Atsushi Ishigame, Masayuki Watanabe, and Yasunori Mitani, Koopman mode decomposition of power grid phasor data on Japan's western power system, システム制御情報学会 研究発表講演会, 京都, 2018 年 5 月 16 日.
- [32] 浜崎 凌, 薄 良彦, 寺師 純, 石亀 篤司, 渡邊 政幸, 三谷 康範, クープマンモード分解による系統慣性定数推定の実測データへの適用, 電気学会 全国大会, 福岡, 2018 年 3 月 15 日.
- [33] 浜崎 凌, 薄 良彦, 石亀 篤司, クープマンモード分解による系統慣性定数の代数的推定に関する一検討, 電気関係学会 関西連合大会, 東大阪, 2017 年 11 月 25 日.
- [34] [Yoshihiko Susuki](#), Data-driven Koopman spectral analysis in power and energy systems, 8th Workshop on Set Oriented Numerics, Santa Barbara, United States, September 15, 2017 (招待講演).
- [35] 太田 豊, 薄 良彦, クープマンモード解析に基づく電力ネットワークのデータ駆動型監視制御システムの構築, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 東京, 2017 年 9 月 7 日.
- [36] 小島 千昭, 薄 良彦, Aranya Chakraborty, 大規模電力システムに対するエネルギー関数のデータ駆動型構成とその数値的検証, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 東京, 2017 年 9 月 5 日.
- [37] 浜崎 凌, 薄 良彦, Fredrik Raak, 石亀 篤司, クープマンモード分解による系統慣性定数の推定に関する一検討, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 東京, 2017 年 9 月 5 日.
- [38] Aranya Chakraborty and [Yoshihiko Susuki](#), A data-driven distributed algorithm for nonlinear Koopman mode estimation in power systems, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, United States, May 25, 2017.
- [39] [Yoshihiko Susuki](#), Kyoichi Sako, Fredrik Raak, and Takashi Hikiyara, Assessment of voltage collapse phenomena in power grids based on continuous spectrum of the Koopman operator, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, United States, May 25, 2017.
- [40] Fredrik Raak, [Yoshihiko Susuki](#), Igor Mezic, and Takashi Hikiyara, Comparison of dynamic mode decomposition, Koopman mode decomposition, and vector Prony analysis, SIAM Conference on

Applications of Dynamical Systems, Snowbird, United States, May 24, 2017.

- [41] Yoshihiko Susuki and Igor Mezic, Koopman operator theory for nonlinear dynamical systems: An introduction with engineering applications, International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Yugawara, Japan, November 29, 2016.
- [42] 佐孝 恭一, 薄 良彦, Fredrik Raak, 引原 隆士, クープマン作用素の連続スペクトルに基づく電圧崩壊現象の時系列データ解析, 電気関係学会 関西連合大会, 堺, 2016年11月23日.
- [43] 薄 良彦, クープマン作用素による非線形力学系の解析と電力・エネルギーシステムへの応用, 計測自動制御学会 非線形制御理論調査研究会 第2回研究会, 大阪大学, 2016年11月18日 (招待講演).
- [44] Fredrik Raak, Yoshihiko Susuki, Kazuhisa Tsuboki, Masaya Kato, Shinya Eguchi, and Takashi Hikihara, Wind power simulation and analysis incorporating highly-resolved weather prediction and measurement data of Japan, World Wind Energy Conference and Exhibition, Tokyo, Japan, November 1, 2016.
- [45] 薄 良彦, クープマン作用素による非線形時系列データの解析と電力・エネルギーシステムへの応用, 共同研究「統計的モデリングと予測理論のための統合的数理研究」, 京都大学数理解析研究所, 2016年8月9日.
- [46] Fredrik Raak, Yoshihiko Susuki, Shinya Eguchi, and Takashi Hikihara, Statistical test of dynamic model of a wind turbine incorporated with measurement data in Japan, システム制御情報学会 研究発表講演会, 京都, 2016年5月27日.
- [47] 佐孝 恭一, 薄 良彦, 引原 隆士, クープマン作用素に基づく電力システムの電圧不安定化現象に関する一検討, システム制御情報学会 研究発表講演会, 京都, 2016年5月25日.
- [48] Fredrik Raak, Yoshihiko Susuki, Kazuhisa Tsuboki, Masaya Kato, and Takashi Hikihara, Quantifying smoothing effects of wind power via Koopman modes, 電気学会 全国大会, 仙台, 2016年3月18日.
- [49] 薄 良彦, 太田 豊, 連系線潮流データのクープマンモード分解: ベクトルフローニ解析の適用, 電気学会 全国大会, 仙台, 2016年3月16日.
- [50] 佐孝 恭一, 薄 良彦, 引原 隆士, クープマン作用素に基づく電力システムの電圧ダイナミクスに関する解析, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 若手研究発表会, 大阪, 2016年1月8日.

〔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 <https://researchmap.jp/read0093083/?lang=japanese>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 小島 千昭
ローマ字氏名: (KOJIMA Chiaki)
所属研究機関名: 富山県立大学
部局名: 工学部
職名: 講師
研究者番号 (8桁): 00456162

研究分担者氏名: 太田 豊
ローマ字氏名: (OTA Yutaka)
所属研究機関名: 東京都市大学
部局名: 工学部
職名: 准教授
研究者番号 (8桁): 50372537

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。