

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | モデルベース制御における機械学習とダイナミクスの融合に向けての基礎研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Sub Title        | Fundamental study of fusion of machine learning and dynamics for model-based control                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Author           | 足立, 修一(Adachi, Shūichi)<br>丸田, 一郎(Maruta, Ichirō)<br>井上, 正樹(Inoue, Masaki)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Publisher        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Publication year | 2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Jtitle           | 科学研究費補助金研究成果報告書 (2020. )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| JaLC DOI         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Abstract         | <p>ロバスト制御やモデル予測制御などのようなモデルに基づく制御 ( Model-Based Control: MBD ) やカルマンフィルタのようなモデルに基づく状態推定を行うためには, 対象の高精度な数学モデルが必要になる。本研究では, データに基づく機械学習とダイナミクスを考慮した制御理論を融合することにより, 新たなモデリングの方法論の構築を目指した。具体的に, 自動車用エンジンや電気自動車用リチウム二次電池などといった非線形性の強い対象のモデリング問題を検討した。エンジンに対しては能動学習を用いたエンジンデータ収集の方法を検討した。二次電池に対しては電池の通電抵抗を適応的に推定する新しい方法を提案した。</p> <p>In order to utilize Model-Based-Control (MBD) such as robust control and model predictive control, and Model-Based-State-Estimation (MBSE) such as Kalman filter, it is necessary to build a precise mathematical model of the target plant. In this study, we aim to construct new modeling methods for practical systems by combining the data-based machine-learning in AI and system identification of the dynamic control theory. In particular, two modeling problems of nonlinear systems are considered. One is a gasoline engine of automobile and the other is lithium-ion secondary battery for electric vehicles. For the modeling of gasoline engine which has heavy nonlinearity, Gaussian process regression with active learning method is applied to design an effective modeling experiment. An adaptive identification method in consideration of the physical property of the lithium-ion battery is proposed, and the effectiveness if the method is examined through experiments with real battery.</p> |
| Notes            | <p>研究種目 : 基盤研究 (C) (一般)</p> <p>研究期間 : 2018 ~ 2020</p> <p>課題番号 : 18K04211</p> <p>研究分野 : 制御工学</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Genre            | Research Paper                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| URL              | <a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_18K04211seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_18K04211seika</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：3 2 6 1 2

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：1 8 K 0 4 2 1 1

研究課題名（和文）モデルベース制御における機械学習とダイナミクスの融合に向けての基礎研究

研究課題名（英文）Fundamental study of fusion of machine learning and dynamics for model-based control

研究代表者

足立 修一（Adachi, Shuichi）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：4 0 2 2 2 6 2 4

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）： ロバスト制御やモデル予測制御などのようなモデルに基づく制御（Model-Based Control: MBD）やカルマンフィルタのようなモデルに基づく状態推定を行うためには、対象の高精度な数学モデルが必要になる。本研究では、データに基づく機械学習とダイナミクスを考慮した制御理論を融合することにより、新たなモデリングの方法論の構築を目指した。具体的に、自動車用エンジンや電気自動車用リチウム二次電池などといった非線形性の強い対象のモデリング問題を検討した。エンジンに対しては能動学習を用いたエンジンデータ収集の方法を検討した。二次電池に対しては電池の通電抵抗を適応的に推定する新しい方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

対象とするプラントの入出力データを利用してモデリングを行う方法として、制御の分野ではシステム同定理論が研究されている。一方、AIの機械学習の分野においても、データからモデリングを行う方法が活発に研究されて注目を集めている。システム同定の対象は動的線形システムであり、機械学習の対象は非線形静的システムが主な対象である。両者の担当分野は異なり、互いの得意不得意も存在する。システム同定と機械学習を融合すれば相補的な強力なモデリング法が誕生することが期待される。本研究では、モデリングの新しい分野を開拓し、実用に供するモデリング法を検討しており、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）： In order to utilize Model-Based-Control (MBD) such as robust control and model predictive control, and Model-Based-State-Estimation (MBSE) such as Kalman filter, it is necessary to build a precise mathematical model of the target plant. In this study, we aim to construct new modeling methods for practical systems by combining the data-based machine-learning in AI and system identification of the dynamic control theory. In particular, two modeling problems of nonlinear systems are considered. One is a gasoline engine of automobile and the other is lithium-ion secondary battery for electric vehicles. For the modeling of gasoline engine which has heavy nonlinearity, Gaussian process regression with active learning method is applied to design an effective modeling experiment. An adaptive identification method in consideration of the physical property of the lithium-ion battery is proposed, and the effectiveness of the method is examined through experiments with real battery.

研究分野：制御工学

キーワード：制御 システム同定 機械学習 自動車 非線形システム

1．研究開始当初の背景

- (1) 人工知能（AI）への関心が高まり、機械学習や強化学習に関する理論研究や応用研究が活発に行われている。特に、ビッグデータを活用・高速処理できる高性能な計算機環境のもとで、対象システムのモデリングを行う機械学習が精力的に研究されている。
- (2) 一方、制御の分野においても、モデルベース制御の枠組みで、対象となるシステムのモデリングに関する研究が行われている。制御では対象が従う物理的な法則（ダイナミクス）を活用したモデリングが重要である。これにより、得られたモデルの可解釈性が担保されるからである。機械学習とダイナミクスを考慮した制御的なモデリングの融合が望まれていた。

2．研究の目的

- (1) 対象が従う物理と、対象の入出力データがもつ情報を融合した新しいモデリングの方法論を構築することである。その大目的のために、対象がもつダイナミクスを機械学習に導入する方法を検討することを目的とする。
- (2) AI 分野の機械学習では主に静的非線形システムのモデリングを取り扱い、制御分野のシステム同定では主に動的線形システムのモデリングを取り扱っている。この二つの分野の相違点を調べることによって、制御分野で機械学習理論を活用するための方法論を検討していくことも本研究の目的である。
- (3) ガソリン自動車のエンジンや、自動車のリチウムイオン二次電池という具体的な対象に対して、ダイナミクスを考慮したモデリングの方法を提案し、検討することも目的である。

3．研究の方法

- (1) 計測自動制御学会制御部門に設置された「モデルベース制御における機械学習とダイナミクスの融合調査研究会（DML 研究会）」の第 1 期（2017～18）の主査として、第 2 期（2019～20）の委員として、この研究会活動に参加し、講演会、研究会などを通して、機械学習とシステム同定の類似点と相違点に関する最新の動向を調査した。
- (2) 自動車ガソリンエンジンのシリンダ吸入空気量のモデリング問題を考えた。ガウス過程帰帰に基づく非線形モデリング法を用い、同定実験計画を行うために能動学習を活用する方法について検討した。
- (3) 自動車に用いられている二次電池を対象として、その電池からどれだけ多くのパワーを出し入れできるかを表す充放電可能電力（State of power: SOP）を、電池の端子電圧と電流から適応的に推定する方法について検討した。

4．研究成果

- (1) 制御と AI の類似点と相違点に関する検討  
システム同定と機械学習の類似点と相点

制御の分野のシステム同定と AI の分野の機械学習の比較を図 1 にまとめた。両者とも、データを用いて対象システムのモデルを構築することが目的であるが、いくつかの面において違いがある。特に、制御では主に「動的線形システム」を対象としており、AI では「静的非線形システム」を対象としている点が大きな相違点である。線形を対象としている制御では、「周波数領域」という「時間領域」以外の仮想世界を利用できるという特徴をもつ。それに対して、より複雑な非線形システムを対象とする機械学習では、時間領域、あるいは空間領域といった実世界を使わざるを得ない。この事実が、得られたモデルの可解釈性の議論を困難にしている。また、非線形システム同定と機械学習には類似点も多く、互いに参考になる。

制御と強化学習

重要なことは理系の方言問題である。表 1 に制御理論と強化学習の用語の大まかな対応関係をまとめた。表より、同じ概念を違う分野では異なる専門用語で表現している。特に、制御工学のように分野横断的に研究しようとする、異分野の方言のために混乱してしまう。さまざまな場面で分野横断的な研究開発の重要性が認識されているが、異分野の研究を理解する第一歩は、その分野の専門用語理解することである。そのとき「標準語」ができれば、境界領域の研究は加速するだろう。その標準語の最有力候補が本研究で対象としている「モデル」である。

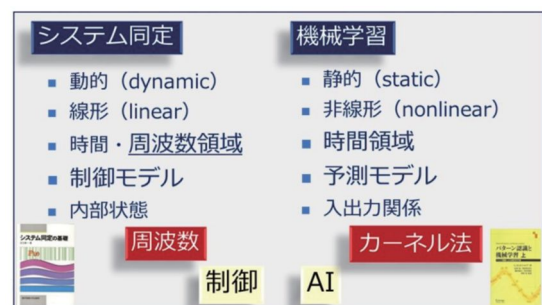


図 1 システム同定と機械学習

表 1 制御と人工知能における方言問題

| 制御     | 強化学習             |
|--------|------------------|
| 制御対象   | 環境 (environment) |
| コントローラ | エージェント (agent)   |
| 制御入力   | 行動 (action)      |
| 制御則    | 政策 (policy)      |

## (2) 自動車ガソリンエンジンのシリンダ吸入空気量のモデリング

自動車のガソリンエンジンでは、エンジンの強い非線形性のために制御用のモデルを構築することが困難である。そのため、自動車産業の現場では、対象の非線形入出力関係を記述するマップが多用されている。しかし、強い非線形性をもつ入出力関係を表現できるマップを作成するために、多くの実験とマンパワーが必要であるという問題点を抱えている。そのため、マップを作成するために、いかにデータを効率よく取得するかが課題となっている。

本研究では、シリンダ吸入空気量のマップを作成する問題を具体的な対象として、そのデータ収集のための実験時間を減らすために、機械学習を適用する。現場では、対象の物理的な法則に基づいた系統的な方法をとることが難しいので、ある動作点で実験を行ってデータを取得し、つぎに別の動作点に移ってマップを更新するというサイクルを繰り返している。

本研究では、機械学習用の実験データを効率よく取得するために能動学習を活用することを考えた。能動学習を用いることで、つぎにどの動作点で実験を行えば、モデルの精度を最も高められるのかを理論的に与えることができる。このようにして選ばれた動作点では、ガウス過程回帰に基づく機械学習を適用してモデリングを行う。図2において、シリンダ吸入空気量は、吸気バルブタイミングの位相 ( $x_1$ )、排気バルブタイミングの位相 ( $x_2$ )、インテークマニフォールド圧力 ( $x_3$ ) によって決定される。これら3変数を入力、シリンダ吸入空気量を出力 ( $y$ ) として、3入力1出力システムを対象とする。実機では ( $x_1, x_2$ ) を固定し、 $x_3$  を変化させてデータを収集している。以上より、本研究で考える問題は「実験候補の集合  $\Lambda$  が与えられたとき、つぎに実験を行なう動作点として、シリンダ吸入空気量のモデル  $\hat{f}(x)$  の精度を上げるような動作点 ( $x_1^*, x_2^*$ ) を選択せよ」である。

機械学習モデルとしてガウス過程回帰を使用した。そして、ガウス過程回帰に基づく能動学習である Active Learning Mckay (ALM) と Active Learning Cohn (ALC) を使用した。本研究では、現在の状態のつぎに実験を行なう動作点として ( $x_1, x_2$ ) の組を求めることを目的としている。そこで、動作点 ( $x_1, x_2$ ) を選択するために、まず、すべての ( $x_1, x_2$ ) の候補において  $x_3$  を固定する。つぎに、 $x_3$  を固定したすべての候補に関して ALM と ALC の評価関数を計算し、最適な ( $x_1, x_2, x_3$ ) の組を求める。最後に、得られた ( $x_1, x_2, x_3$ ) の組が属する ( $x_1, x_2$ ) を新しく実験を行なう動作点とする。

数値シミュレーション例として、実システムを模擬したつぎの非線形関数を用いた。

$$f(x) = \frac{1}{6 \times 101.3} x_3 + \frac{1}{6 \times 60 \times 45} x_1 x_2 + \frac{2}{15 \times 45^2 \times 101.3^3} x_2^2 x_3^3$$

ALM と ALC に基づいて5回候補選択をしてモデルを更新したときと、ランダムに5回候補選択をしてモデルを更新したときの RMSE を図3で比較した。図において、ランダム選択は5回の試行の平均値とその標準偏差の範囲を示している。図より、ランダムな選択ではばらつきが大きく、ALM では最初の数回において RMSE が大きくなっている。一方、ALC を用いたときは ALM やランダム選択よりも少ない回数で良いモデルを作成できている。この結果から、本問題に対して ALC が有効であることが示された[1]。

## (3) 自動車用二次電池の充放電可能電力の推定

電気自動車を筆頭に自動車のエネルギー源としての二次電池の重要性が増している。自動車のさまざまな場面で二次電池を有効活用するために、二次電池の充電率、健全度、そして充放電可能電力 (State of power: SOP) などの推定が重要になる。本研究では、特に SOP に着目した。たとえば、自動車が停車時にエンジンを停止し、再発進時にエンジンを再始動するアイドルストップ機能では、停車する前に、再始動可能な SOP があるかどうかを調べる必要がある。この問題は、二次電池の端子電圧を起電力と内部インピーダンスの和とする等価回路において、内部インピーダンスの推定問題として定式化することができる。

具体的には、ある有限時間 (たとえば1秒間)、一定電流を二次電池に流したときの、内部インピーダンスによる電圧降下量と一定電流の大きさの比を有限時間通電抵抗と呼ぶ。これは内部インピーダンスの動的な特徴量になり、これを推定できれば SOP を推定することができる。この有限時間通電抵抗を自動車が走行中にオンラインで推定することを本研究の目的とする。

この問題を制御工学的に解釈すると、有限時刻後のステップ応答の値を推定する問題になる。ステップ応答はインパルス応答の積分であるため、本研究では有限個のインパルス応答を入出力データから推定する問題を考える。本研究の独創的な点は、このインパルス応答を推定するた

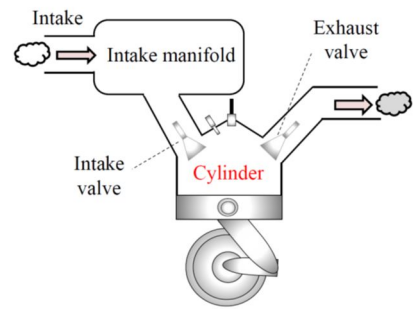


図2 自動車エンジンの模式図

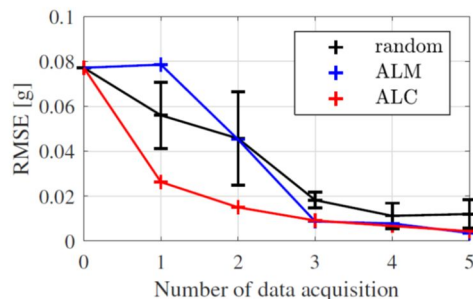


図3 推定結果の比較

めに、通常用いられる FIR (Finite Impulse Response) モデルではなく、 $\mu$  マルコフモデルを利用したことであり、これにより比較的少ないパラメータで高精度な推定を行うことが可能になった。また、内部インピーダンスは温度や電池の充電率などにより変化する時変特性をもつため、本研究では、ベクトル型忘却要素を用いて逐次推定する方法を提案した。

ここでは詳細なアルゴリズムを紹介することなく、数値実験結果を紹介する。実際の二次電池を模擬する数値シミュレーション例を作成し、提案法により内部インピーダンスの時変特性が逐次推定できるかを確かめた。その結果を図 4 に示す。図の横軸は時間であり、縦軸は 1 秒後の通電抵抗の値である。図では、時変特性をもつ設定値を黒破線で、提案法による推定値(ベクトル型忘却要素を赤線、スカラー型忘却要素が青破線)でプロットした。特に、提案法であるベクトル型忘却要素を用いた推定値(赤線)は、設定値(黒破線)によく追従していることが図よりわかる [2]。

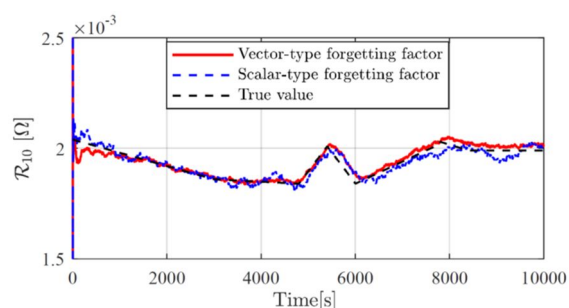


図 4 通電抵抗の推定結果

さらに、二次電池を用いた実験データに対して提案法を適用した結果、高精度に推定できることも確認している。

この問題のように、二次電池の物理的特性を考慮して、対象の入出力データからモデリングを行うことにより、物理現象と矛盾しない高精度が推定を行うことができる。

#### <引用文献>

- [1] 蟹江将哲, 上野将樹, 足立修一: ガウス過程回帰に基づく能動学習による自動車エンジンのシリンダの吸入空気量のモデリング, 計測自動制御学会第 8 回制御部門マルチシンポジウム (2021)
- [2] 佐々木理沙子, 川口貴弘, 丸田一郎, 足立修一, 片芝惇平, 長村謙介:  $\mu$ -マルコフモデルを用いた自動車用二次電池の内部インピーダンスの推定, 計測自動制御学会論文集, Vol.56, No.2, pp.67-69 (2020)

# 5. 主な発表論文等

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

|                                               |                     |
|-----------------------------------------------|---------------------|
| 1. 著者名<br>佐々木理沙子，川口貴弘，丸田一郎，足立修一，片芝惇平，長村謙介     | 4. 巻<br>Vol. 56     |
| 2. 論文標題<br>μ-マルコフモデルを用いた自動車用二次電池の内部インピーダンスの推定 | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>計測自動制御学会論文集                         | 6. 最初と最後の頁<br>67-69 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし                 | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

|                                                       |
|-------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>蟹江将哲，上野将樹，足立修一                             |
| 2. 発表標題<br>ガウス過程回帰に基づく能動学習による自動車エンジンのシリンダの吸入空気量のモデリング |
| 3. 学会等名<br>SICE 第8回制御部門マルチシンポジウム                      |
| 4. 発表年<br>2021年                                       |

|                                                  |
|--------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>蟹江将哲，丹羽慶始，足立修一，上野将樹，堤 優二郎，山田雄輝，豊嶋弘    |
| 2. 発表標題<br>ガウス過程回帰を用いた残差学習による自動車エンジンのシリンダ吸入空気量推定 |
| 3. 学会等名<br>第 64 回システム制御情報学会 研究発表講演会              |
| 4. 発表年<br>2020年                                  |

|                                             |
|---------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>大山隆景，佐々木理沙子，丸田一郎，足立修一，片芝惇平，長村謙介  |
| 2. 発表標題<br>μ-マルコフモデルを用いた二次電池の内部インピーダンスの逐次推定 |
| 3. 学会等名<br>第 64 回システム制御情報学会 研究発表講演会         |
| 4. 発表年<br>2020年                             |

|                                           |
|-------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>上野将樹, 足立修一                     |
| 2. 発表標題<br>物理的特性を考慮した過給ガソリンエンジンの非線形システム同定 |
| 3. 学会等名<br>第63回自動制御連合講演会                  |
| 4. 発表年<br>2020年                           |

|                                        |
|----------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>大山隆景, 足立修一, 丸田一郎, 片芝惇平      |
| 2. 発表標題<br>ベクトル型忘却要素を用いた時変インピーダンスの逐次推定 |
| 3. 学会等名<br>第63回自動制御連合講演会               |
| 4. 発表年<br>2020年                        |

|                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Risako Sasaki, Takahiro Kawaguchi, Ichiro Maruta, Shuichi Adachi, Jumpei Katashiba, and Kensuke Osamura |
| 2. 発表標題<br>System Identification of Rechargeable Batteries in Vehicles using Semi-parametric Approach              |
| 3. 学会等名<br>SICE Annual Conference 2019 (国際学会)                                                                      |
| 4. 発表年<br>2019年                                                                                                    |

|                                                      |
|------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>原 啓太, 八田羽謙一, 足立修一, 上野将樹, 堤優二郎, 山田雄輝, 豊嶋弘和 |
| 2. 発表標題<br>ロバスト MPC による自動車エンジンのトルク制御系設計              |
| 3. 学会等名<br>SICE 第6回制御部門マルチシンポジウム                     |
| 4. 発表年<br>2019年                                      |

|                                               |
|-----------------------------------------------|
| 1．発表者名<br>佐々木理沙子 ，川口貴弘 ， 丸田 一郎，足立修一，片芝惇平，長村謙介 |
| 2．発表標題<br>μ・マルコフモデルを用いた自動車用二次電池のシステム同定        |
| 3．学会等名<br>SICE 第6回制御部門マルチシンポジウム               |
| 4．発表年<br>2019年                                |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6．研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                  | 備考 |
|-----------|------------------------------------------------|----------------------------------------|----|
| 研究<br>分担者 | 丸田 一郎<br><br>(MARUTA Ichiro)<br><br>(20625511) | 京都大学・工学研究科・准教授<br><br><br>(14301)      |    |
| 研究<br>分担者 | 井上 正樹<br><br>(INOUE Masaki)<br><br>(80725680)  | 慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授<br><br><br>(32612) |    |

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 |
|---------|---------|