

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02170

研究課題名（和文）最適軌道データベースに基づく非線形大域的最適制御

研究課題名（英文）Globally Optimal Control of Nonlinear Systems Based on Optimal Trajectory Database

研究代表者

丸田 一郎 (Maruta, Ichiro)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20625511

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非線形最適制御問題において局所最適軌道が複数存在することを前提とし、大域的な最適解を得るための実用的な方法を開発した。最適軌道データベースの構築や価値関数のモデリングに、フォーメーション制御の援用やニューラルネットワークの活用などの新たなアプローチを導入し、より複雑な非線形システムに対する最適制御を可能にした。また、機械学習の知見を活用し、非線形システムに対してモデル予測制御に適したモデルを生成するモデリング方法を開発した。さらに、開発した方法の有効性を高機動ドローンや1次元のカメラ画像を出力とするミニチュアカーを製作して実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くのシステムは性能限界付近で非線形性が無視できず、その性能を最大限に引き出すには非線形最適制御が必要となる。本研究では、非線形最適制御問題の多くが複数の局所最適解を持ち、従来法での取り扱いが困難であることに着目し、複数の局所解を陽に考慮した新たなアプローチを開発した。さらに、従来モデル化が困難だった非線形システムのモデル予測制御を可能にする、非線形システムのモデリング手法も開発した。本研究の成果により、強い非線形性を持つ安価または複雑なシステムを、より効率的かつ安全に制御できるようになり、幅広い分野でのコストや消費エネルギーの削減に貢献すると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed practical methods to obtain globally optimal solutions for nonlinear optimal control problems, assuming the existence of multiple locally optimal trajectories. We introduced novel approaches, such as the utilization of formation control and neural networks, for constructing optimal trajectory databases and modeling value functions, enabling optimal control for more complex nonlinear systems. Furthermore, we developed a modeling method that leverages machine learning knowledge to generate models suitable for model predictive control of nonlinear systems. The effectiveness of the developed methods was demonstrated by constructing highly maneuverable drones and miniature cars with one-dimensional camera image outputs.

研究分野：制御工学

キーワード：非線形最適制御 非線形システム同定

### 1. 研究開始当初の背景

非線形最適制御問題において、局所最適軌道が複数存在することは珍しくない。例えば、単純な倒立振子の振り上げ問題でさえ、複数の局所最適軌道を持つことが知られている。(図1参照)

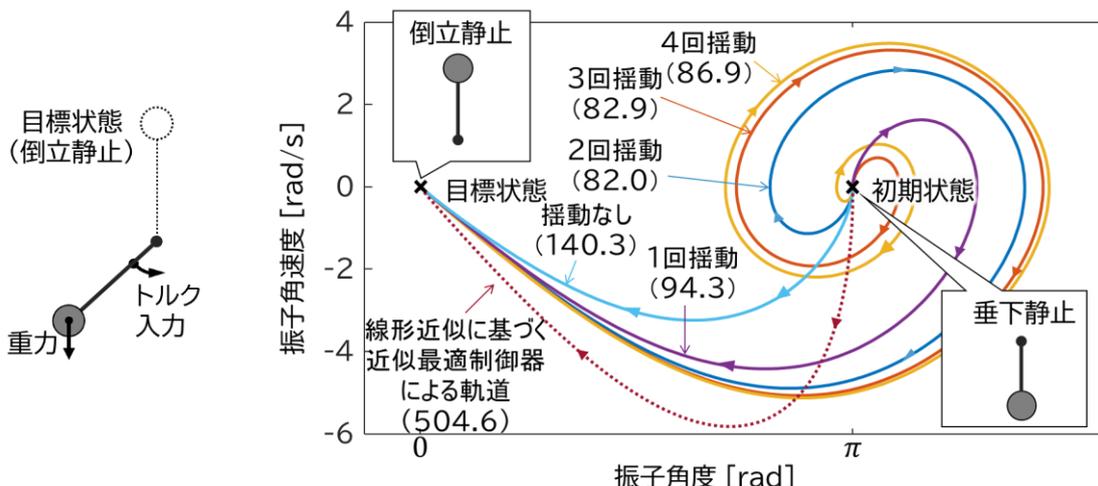


図1 倒立振子の最適制御問題における局所最適軌道の一部 (括弧内は所要コスト・2回揺動が大域的に最適)

しかし、既存の非線形最適制御法の多くは局所最適解の一意性を前提としており、この前提が成り立たない問題への適用は危険である。複数の局所最適軌道の存在を陽に考慮した実用的な方法の開発は、最適制御の適用可能範囲を広げ、効率を改善する鍵となる。

計算機技術の活用と解の大域的な最適性の考慮について、歴史的な経緯から制御分野と機械学習分野には相違があった。制御分野では大域的な最適性は重視されるが計算機技術の活用は軽視される一方、機械学習分野では計算機技術の活用は重視されるが大域的な最適性は軽視される傾向にあった。大域的な最適性を改善するための計算集約的なアプローチは、両分野の重複領域として研究の余地が大きく残されていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、非線形最適制御問題に対し、局所最適軌道が複数存在することを前提として大域的な最適解が得られる実用的な方法を開発することである。具体的には、最適軌道データベースの導入によって、局所最適解の複数性に起因する問題を可視化し、近年著しく発達した計算機技術を活用する計算集約的なアプローチによる解決を目指す。

研究代表者は予備的な研究において、最適軌道データベースが複数の局所最適軌道をもつ問題の困難さを可視化し、解決するツールとなり得ることを発見した。例えば、倒立振子の振り上げ問題について作成した最適軌道データベースでは、対象が単純であっても最適制御問題の解が複雑な構造を持つことが明らかになった(図2参照)。

本研究では、この知見を踏まえ、より広範なシステムへの適用を可能にする方法の開発を目的とする。

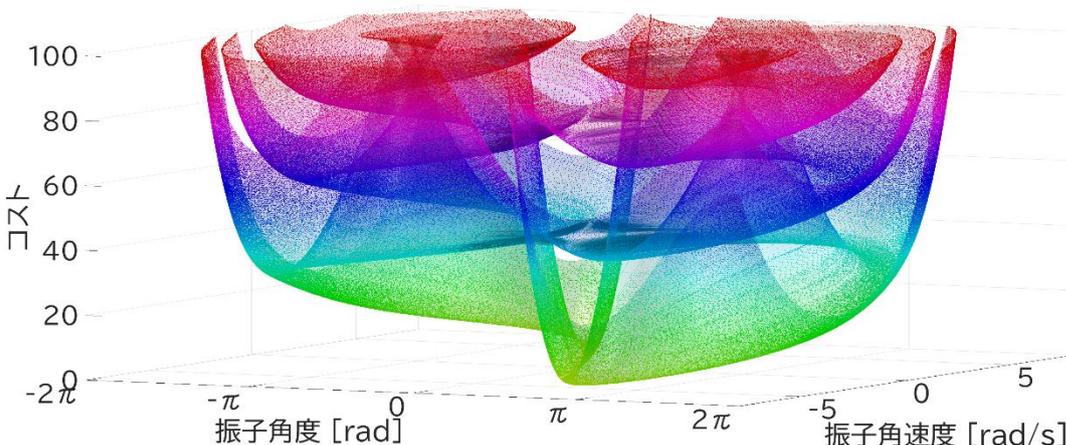


図2 倒立振子振り上げ問題における最適軌道データベース。点はある状態からの最適軌道データの存在と、その所要コストを示す。複数の局所最適軌道がデータの多層構造として現れる

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の2つの方向から研究を行った。

(1) 高次元の状態空間や複雑な挙動を持つ非線形システムに対して、より効率的に最適軌道や最適制御入力を得る方法の開発:本研究では、軌道データベースの構築に基づく方法について研究を進めた。特に、より効率的に非線形最適制御器を表現する方法として、データベースに収録されている軌道付近の方策によって安定化可能な領域を推定し、データベースの密度を管理することで、より小規模なデータベースで広い領域を安定化できる方法を開発した。また、ニューラルネットワークによる価値関数のモデリングと、価値関数の等位面に着目した効率的な探索の2つのアプローチについても検討を行い、計算機上でのシミュレーションに基づいて検証を行った。さらに、検討の過程で見出されたフォーメーション制御を援用した探索法についても研究を進めた。

(2) 実用的な非線形システムのモデリング方法の開発:制御器の設計には対象システムのモデルが必要不可欠であり、近年では計算機技術の発達とともにモデル予測制御の有用性も増している。本研究では、機械学習分野で重用されるニューラルネットを用いた自己符号化器のアイデアを、システム同定分野で一般的な部分空間同定法と組み合わせるアプローチを中心に研究を行った。

また、ミニチュアのカメラ付き前輪操舵車とPCから自動操縦可能な高機動ドローンを製作し、開発した方法を検証するための簡易な実験装置として利用した。

### 4. 研究成果

(1) 高次元の状態空間や複雑な挙動を持つ非線形システムに対する最適軌道・最適制御入力の効率的な探索法の開発

- 開発した方法の有効性を検証するため、自動操縦可能な高機動ドローンを製作し、非線形性が強く表れる宙返りなどの動作における挙動を検証した。(図3参照)
- フォーメーション制御を援用した探索法について研究を進め、価値関数の曲率をフォーメーションにおいて近傍に居るエージェントの情報から内挿することで、簡便かつ精度よく探索できることを示した。さらに、この方法を簡略化し、エージェント間の距離に基づく軌道の操作ではなく、疎な領域へのエージェントの生成に注力することで、より複雑なシステムへの適用を可能にした。
- ニューラルネットワークを用いたアプローチでは、価値関数の多価性を考慮し、付加情報を含めた学習を行うことにより、より複雑なシステムへの適用を可能にする方法を開発した。

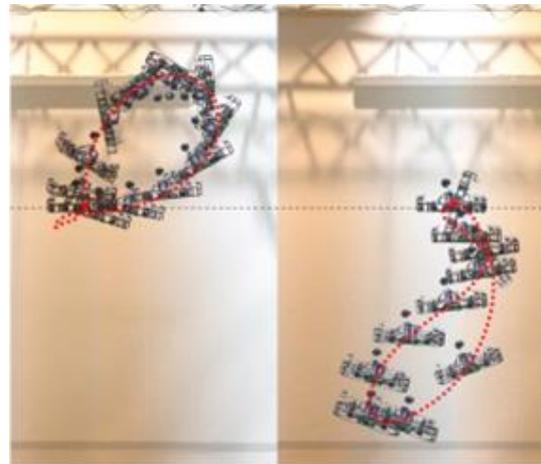


図3 軌道データベースに基づく最適制御(左)と線形近似最適制御(右)による360度回転状態から復帰実験:非線形最適制御では高度を失うことなく迅速に復帰が行われている。

(2) 実用的な非線形システムのモデリング方法の開発

- 部分空間同定法と自己符号化器をベースにした方法を、ミニチュアのカメラ付き前輪操舵車で検証

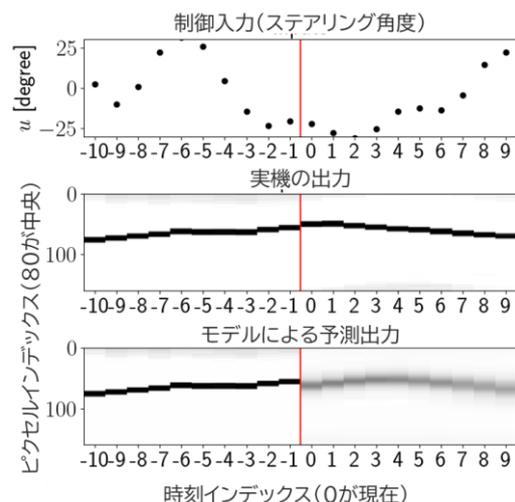


図4 1次元画像を出力する模型4輪車のモデリング結果

し、得られたモデルに基づく実時間でのモデル予測制御が可能であることを実証した。(図 4 参照)

- 変分オートエンコーダのアイデアを導入することで、システムの不確実性を反映したモデルを構築する方法を開発した。
- ヒステリシスを持ち、長期記憶を必要とするシステムに対して、極値保持機構をモデルに組み込むことで対処する方法を開発した。
- 実証において明らかになった出力変数が特に多い場合の課題について、出力変数に関する自己符号化器をモデルに組み込むことによって解決する方法を開発した。
- 制御系の稼働中に得られたデータをモデル構築に用いる際に必要となる閉ループ同定法について、非線形系への適用が可能なシンプルなアプローチを開発した。

本研究では、非線形最適制御問題において局所最適軌道が複数存在することを前提とし、大域的な最適解を得るための実用的な方法を開発した。最適軌道データベースの構築や価値関数のモデリングにおいて、フォーメーション制御の援用やニューラルネットワークの活用などの新たなアプローチを導入することで、より複雑な非線形システムに対する最適制御を可能にした。また、実用的な非線形システムのモデリングにおいても、機械学習の知見を活用した新たな方法を開発し、その有効性を実証した。本研究の成果は、非線形最適制御問題に対する実用的なアプローチを提供するものであり、制御工学の発展に寄与するものと期待される。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Maruta Ichiro, Sugie Toshiharu	4. 巻 10
2. 論文標題 Closed-Loop Subspace Identification for Stable/ Unstable Systems Using Data Compression and Nuclear Norm Minimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 21412 ~ 21423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3154017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Maruta Ichiro, Sugie Toshiharu	4. 巻 9
2. 論文標題 A Simple Framework for Identifying Dynamical Systems in Closed-Loop	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 31441 ~ 31453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3060153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計36件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Haruyuki Yamasaki
2. 発表標題 Deep Neural Network-Based System Identification for Nonlinear MPC: Enhancements for Massive Multi-Output Systems and Experimental Validation with 1D Camera Image Outputs
3. 学会等名 The 8th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中尾 悠達
2. 発表標題 周期軌道を目標とする非線形スパース最適制御のための軌道データベース構築
3. 学会等名 第68回 システム制御情報学会 研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤 瑛起
2. 発表標題 風外乱下での軌道データベースに基づくドローンの非線形最適制御
3. 学会等名 第68回 システム制御情報学会 研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 秋山 直樹
2. 発表標題 疑似単体分割を利用した疎密検査に基づく非線形最適レギュレータ用効率的軌道データベースの構築方法
3. 学会等名 第68回 システム制御情報学会 研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 井池 隆太
2. 発表標題 ニューラルネットワークによる HJB 方程式の複数解の表現と非線形大域的最適制御
3. 学会等名 第11回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (MSCS2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 辻 康生
2. 発表標題 極値保持機構を組み込んだニューラルネットワークモデルによるヒステリシスを含むアクチュエータの同定
3. 学会等名 第11回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (MSCS2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Keito Yamada
2. 発表標題 Neural Network-Based Nonlinear System Identification for Generating Stochastic Models with Distribution Estimation
3. 学会等名 The 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haruyuki Yamasaki
2. 発表標題 Identification and Control Experiment of a Camera-Equipped Front-Wheel Steering Vehicle as a Nonlinear Massive Multiple Output System Using Deep Neural Networks
3. 学会等名 The 2023 62nd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Eiki Sato
2. 発表標題 Nonlinear Optimal Control Using a Trajectory Database Dealing with Time Delays and Disturbances: Experimental Application to a Quadcopter
3. 学会等名 The 2023 62nd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 瑛起
2. 発表標題 むだ時間を考慮した軌道データベースに基づく非線形最適制御法のドローンへの実装
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会研究発表講演会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎 陽之
2. 発表標題 深層ニューラルネットを用いたカメラ付き前輪操舵車の非線形超多出力システムとしての同定と制御実験
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会研究発表講演会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻 康生
2. 発表標題 深層ニューラルネットを用いたヒステリシスを含む非線形動的システムの同定
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kosei Tsuji
2. 発表標題 Aerospace industrial benchmarking and fault-tolerant control design using NARX model-based observer
3. 学会等名 The 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kosei Tsuji
2. 発表標題 Aerospace industrial benchmarking and fault-tolerant control design using NARX model-based observer
3. 学会等名 The 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Eiki Sato
2. 発表標題 Nonlinear Optimal Control Using a Trajectory Database Dealing with Time Delays and Disturbances: Experimental Application to a Quadcopter
3. 学会等名 The 2023 62nd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haruyuki Yamasaki
2. 発表標題 Identification and Control Experiment of a Camera-Equipped Front-Wheel Steering Vehicle as a Nonlinear Massive Multiple Output System Using Deep Neural Networks
3. 学会等名 The 2023 62nd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keito Yamada
2. 発表標題 Neural Network-Based Nonlinear System Identification for Generating Stochastic Models with Distribution Estimation
3. 学会等名 The 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎 陽之
2. 発表標題 深層ニューラルネットを用いたカメラ付き前輪操舵車の非線形超多出力システムとしての同定と制御実験
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会研究発表講演会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 瑛起
2. 発表標題 むだ時間を考慮した軌道データベースに基づく非線形最適制御法のドローンへの実装
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会研究発表講演会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻 康生
2. 発表標題 深層ニューラルネットを用いたヒステリシスを含む非線形動的システムの同定
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻 康生
2. 発表標題 極値保持機構を組み込んだニューラルネットワークモデルによるヒステリシスを含むアクチュエータの同定
3. 学会等名 第11回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (MSCS2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 井池 隆太
2. 発表標題 ニューラルネットワークによる HJB 方程式の複数解の表現と非線形大域的最適制御
3. 学会等名 第11回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (MSCS2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 服部 達哉
2. 発表標題 非線形部分空間同定法で得られた状態推定器および出力予測器に基づくモデル予測制御
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井池 隆太
2. 発表標題 最適制御器を構築するニューラルネットワークの軌道データベースに基づく効率的な訓練法
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Wada
2. 発表標題 Uniformization of Data Points in Trajectory Database for Optimal Control Using Coverage Control
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryuta Iike
2. 発表標題 An Efficient Training Method of Optimal Neural Network Controller Based on Trajectory Database
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田拓巳
2. 発表標題 被覆制御を用いた最適制御のための軌道データベースのデータ点の一様化
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田佳士
2. 発表標題 非線形システム同定のためのフィードフォワードニューラルネットに対する因果関係知識の注入
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keito Yamada
2. 発表標題 Subspace State-Space Identification of Nonlinear Dynamical System Using Deep Neural Network with a Bottleneck
3. 学会等名 The 12th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS 2022) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井池 隆太
2. 発表標題 データ駆動型最適制御のためのニューラルネットワークによる並列軌道生成に基づく軌道データベース内の準最適解除法
3. 学会等名 2022年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田 佳士
2. 発表標題 状態・出力の不確実性を考慮したニューラルネットワークによる 非線形システム同定
3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (MSCS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 和田 拓巳
2. 発表標題 最適制御問題における安定多様体上の解の 被覆制御を用いた網羅的な探索
3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (MSCS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 和田 拓巳, 丸田 一郎, 藤本 健治
2. 発表標題 最適制御のための等コスト面上でのデータ点分布の一様化に基づく軌道データベースの構築
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Otsu, Ichiro Maruta, Kenji Fujimoto
2. 発表標題 Globally Optimal Control of Nonlinear Input-Affine Systems Under Quadratic Objective Functions Based on Trajectory Database
3. 学会等名 IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西田 周平, 丸田 一郎, 藤本 健治
2. 発表標題 逆時間積分を用いたフィードバック行動計画
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西田 周平, 丸田 一郎, 藤本 健治
2. 発表標題 軌道データベースに基づく非線形最適制御器の効率的な表現と構築法
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>EPNet (water float example)  <a href="https://github.com/maruta/epnet-water-float">https://github.com/maruta/epnet-water-float</a></p>
---

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
研究分担者	藤本 健治  (Fujimoto Kenji)  (10293903)	京都大学・工学研究科・教授    (14301)	

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