

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：14303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656271

研究課題名(和文) アルゴリズムモデルに基づくダイナミカルシステムの解析・設計法の開発

研究課題名(英文) Development of Analysis and Design Methods for Dynamical Systems Based on Algorithm Models

研究代表者

黒江 康明 (KUROE, Yasuaki)

京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・教授

研究者番号：10153397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、シミュレータを対象システムのモデル、すなわちアルゴリズムで表されたモデルとして捉え、これを対象としてダイナミカルシステムを解析、設計する方法を開発することである。まず問題を具体化するため対象のシステムを、筆者がこれまで取り組んできている非線形システムあるいはハイブリッドシステムとしている。いくつかの解析の問題と設計の問題に対し、これらを解くためのアルゴリズムを、シミュレータ、すなわちアルゴリズムモデルを基にして導く方法を開発している。また他のアプローチとして、強化学習を導入し、シミュレータを用いてモデルを学習によって獲得することによりシステムを設計する方法を開発している。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop analysis and design methods for dynamic systems by regarding their simulators as their models, that is to say, to develop analysis and design methods based on the models described by algorithms. In order to make the purpose specific issues, several nonlinear systems and hybrid systems which we have been pursuing so far are chosen as the targets of the research. For some analysis and design problems of those systems we develop methodologies to derive solutions based on their simulators, that is, their algorithm models. As another approach we also developed methodologies to derive solutions for some design problems by introducing reinforcement learning methods, which are those by acquiring their models through learning.

研究分野：システム制御工学 知能情報学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：ダイナミカルシステム 解析・設計 システムモデル アルゴリズム ハイブリッドシステム シミュレータ

1. 研究開始当初の背景

近年、システムの解析、設計に関する研究は著しく発展し、そのための多くの理論、方法が構築されてきた。ところが一方で、取り扱うべきシステムは、ますます大規模化、複雑化し、それらに対応可能な解析、設計のための理論、方法の開発がますます望まれるようになってきている。このためには、これまでの枠組みとは異なる方法論を確立することが必須である。

システムの解析、設計における通常のアプローチは、対象に対してまず適切な数学モデルを構築し、それをもとにして解析、設計法を考えるというものである。ところが、大規模、複雑なシステムに対しては、その数学モデルを導くこと自体が非常に困難となる。また、たとえ数学モデルが得られたとしても、複雑な数学モデルでは、それをもとに、解析、設計法を導くことは非常に困難となる。

一方、最近の計算機技術および計算科学の発展により、システムを計算機を用いてシミュレーションする技術が著しく発展している。それにともなって、様々なシステムのシミュレータが開発されるようになってきた。このような背景のもと、筆者らは、従来とはまったく異なるアプローチでシステムを解析、設計する着想を得た。すなわち、シミュレータを対象システムのモデル、すなわちアルゴリズムで表されたモデルとして捉え、このモデルを対象として解析、設計法を開発するアプローチである。

2. 研究の目的

本研究のめざすところは、アルゴリズムで表現されたシステムのモデルをもとに、そのシステムを解析、設計するための計算機アルゴリズムを直接導くための方法を開発することである。この課題に、一般的な問題の枠組みでアプローチするのは非常に困難が予想されるので、対象システムを具体的に設定し、次のようなことに研究を絞る。

筆者らがこれまで開発してきた非線形ダイナミカルシステム、ハイブリッドダイナミカルシステムのシミュレータをアルゴリズムモデルと捉え、これに基づいて、これらを解析、設計するための計算機アルゴリズムを導く方法を検討する。上記の研究から得られる知見をもとにして、アルゴリズムモデルから、直接、システム解析、設計のアルゴリズムを導くための一般的な方法を開発する。

3. 研究の方法

従来の解析、設計におけるモデリングは二つの段階がある。第1段階は出来るだけ現実のシステムに忠実な比較的複雑なモデルで、これはシミュレータの開発に用いられる。また、第2段階は解析・設計に用いることができるようさらに理想化、単純化されたモデルである。本研究において、最初から第1段階のモデルを対象とするのは非常に困難である

と予想されるので、まず簡単なモデルである第2段階を対象とし研究をすすめた。すなわち、これまでダイナミカルシステムの第2段階の数学モデルに対して開発されてきた解析・設計法に対し、シミュレータをアルゴリズムモデルとみなした場合に、それらの方法を、直接、計算機アルゴリズムとして解析・設計法を実現する方法の基礎的な検討を行うとともに、この方法論の第1段階のモデルへ展開を検討するとの方針で、研究をすすめた。

また、本研究の目的を達成するためには、対象とするシステム、対象とする解析、設計の問題をいくつか具体的に設定して研究をすすめ、それら研究から得られた知見をもとに、対象とするシステム、対象とする解析、設計の問題を広げる、あるいは一般化するというアプローチをとった。具体的な対象とするシステムや解析、設計の問題は、著者がこれまで取り扱ってきたものを中心としたものを取り上げた。その主なものとして、カオスシステムを対象とし、カオス状態を安定周期状態に遷移させる安定化制御器に設計のためのアルゴリズムを導出する方法の検討、ハイブリッドシステムとしてモデル化できる遺伝子ネットワークを対象とし、その解析・設計法の検討およびそのためのアルゴリズムの導出の検討、任意に結合したニューラルネットワークを対象とし、その設計法、学習法の検討などがある。

さらに他のアプローチとして、モデルを用いずにシステムを設計する方法の検討も行った。具体的には強化学習の考え方を導入して学習により、対象の数学的モデルを用いず対象のシミュレータ、すなわちアルゴリズムモデルをもとにしてシステムを設計しようとするアプローチである。

4. 研究成果

研究方法の項でのべたように、本研究の目的を達成するため、対象とする解析、設計の問題をいくつか具体的に設定して研究を進めた。以下ではとりあげたいいくつかの解析、設計問題に対し、それらの目的、意義、またどのような成果が得られたかを説明する。

(1) カオスシステムの安定化制御器の設計法

カオス現象は、物理システムにのみならず、生体システム、工学システム、経済システム、社会システムなどありとあらゆるシステムみられる。これらの現象の複雑さは様々な場面で見られ、カオスを安定化する制御器の設計法の開発が強く望まれている。本研究の目的は、連続時間のカオスシステムを対象として、カオスを安定化する制御器の設計法を開発することである。本研究では、従来の研究とは全く異なるアプローチをとることによりこの問題の解決をはかっており、まずそのアプローチを説明する。

非線形システムのカオスアトラクタには、無限個の不安定な周期軌道が埋め込まれていることが知られている。そこで、カオスアトラクタに埋め込まれている不安定周期軌道の1つを見つけそれを安定化することができる、システムをカオス状態から安定な周期状態に遷移させることができる。このような考えのもと、本研究では、ステップ1として、カオスアトラクタに埋め込まれている不安定周期解をみつける方法を提案し、ステップ2として見つけた不安定周期軌道を安定化する制御器を設計する方法を提案している。

まず、ステップ1を説明する。周期軌道を解析する重要なツールとしてポアンカレマップがある。ポアンカレ写像の基本的な考え方は、連続時間システムの周期軌道の解析をそれより1次元低い離散時間システムに置き換えて解析することであり次のように定義される。対象とする周期軌道の一点でこの軌道に横断する超平面（ポアンカレ断面と呼ばれる）を定義し、周期軌道と交点の近傍の任意の点をシステムの軌道に沿って動かし最初にポアンカレ写像に戻ってくる点を考え、ポアンカレ写像を出発点から戻ってくる点への写像として定義する。この定義より、周期軌道上の点はポアンカレ写像の不動点となり、周期軌道を見つける問題は、ポアンカレ写像の不動点を見つける問題に帰着される。この問題は、不動点が満たすべき方程式を解く問題となり、これは最適化問題として定式化できる。本研究では、このように定式化した最適化問題を勾配法に基づく方法で解くアルゴリズムを開発している。

次に、ステップ2を説明する。周期軌道の安定性は、その軌道上の任意の一点におけるポアンカレ写像のヤコビ行列の固有値を調べることで判定できることが知られている。そこで本研究では、極配置の考え方を導入し、ステップ1で見つけた不安定周期軌道のポアンカレ写像のヤコビ行列に望ましい安定な固有値を持たせるフィードバック制御器の設計法を提案している。具体的には、行列とその固有値を根として持つ特性多項式の係数の関係を表すLeverrieの公式を用いて、対象とする周期軌道のポアンカレ写像のヤコビ行列に望ましい固有値を持たせるため制御器が満たすべき関係式を導いた。これを用いて問題を最適化問題として定式化し、この最適化問題を勾配法に基づく方法で解くアルゴリズムを開発している。

以上のステップ1および2の開発において、まず簡単のため2段階で単純化された標準的な数学的モデルを対象としてすすめた。開発した方法を、Rosslerシステム、Lorenzシステムなどに発生するカオスに適用し、カオス状態を安定な周期状態に遷移させることができることを確認している。さらに、一般的なシミュレータに用いられるモデルに対しても拡張することを検討し、アルゴリズム

ムモデルに対しても、提案方法のアルゴリズムを導くことができることを確認している。

(2) 遺伝子ネットワークの解析と設計

近年、遺伝子発現の調整機構である遺伝子ネットワークを対象とした研究が盛んに行われている。その中で、細胞を実際に制御するための第一歩として、また遺伝子の機能の理解のための構成論的アプローチとして、所望の機能をもつ遺伝子ネットワークを人工的に設計、実現する研究がある。本研究の目的は、所望の動作として発現パターン遷移列が与えられたとして、それを持つ遺伝子ネットワークの設計法を開発することである。

対象とする遺伝子ネットワークは任意の数の遺伝子が互いにある相互作用関数を通じて相互作用し、各遺伝子の出力があるしきい値を超えると発現しているとし、しきい値を超えないと発現していないとするモデルである。ネットワーク内のすべての遺伝子の発現、非発現を表すベクトルをネットワークの発現パターンと定義する。遺伝子ネットワークはダイナミカルシステムであるので、ある初期状態からネットワークが動作すると、それにしたがって発現パターンが遷移し、これを繰り返し発現パターン遷移列を生成する。本研究では、対象とする遺伝子ネットワークが所望の発現パターン遷移列をとるようなネットワークを設計する問題を、各遺伝子の相互作用を表す相互作用関数のパラメータを決定する問題として、この解法を提案している。また、対象とするネットワークに対し、制御用の遺伝子ネットワークを設定し対象のネットワークが所望の発現パターン遷移列をもつような制御用ネットワークを設計する問題も考え、この解法も提案している。いずれの問題も最適化問題として定式化し、これを解くための効率の良いアルゴリズムを導いている。提案法は、所望の発現パターンとして任意の発現パターン列に対応できるようにしているが、より現実の問題を扱えるようにするため、所望の発現パターン遷移列に加えて、遷移時刻、すなわち所望のパターン遷移時刻も与えられた問題についても検討し、その解法を提案している。

遺伝子ネットワークのモデルとしては、簡易モデルであるブーリアンネットワークモデルから詳細モデルである微分方程式モデル、様々なモデルがこれまで提案されている。設計においては、より詳細なモデルを対象とするのが望ましいが、詳細モデルを対象とすると設計が複雑になる。本研究では、中間的なモデルである発現パターンの遷移により微分方程式が切り替わるハイブリッドモデルを対象としている。これにより遷移時刻など時刻の情報が扱うことができ、ブーリアンネットワークなどの簡易モデルより、より現実的な問題が扱える。さらに、提案した設計法は、最適化問題を解く際、発現パターン遷移に対応した離散時間モデルを導きこれを解くことに最適解を求める方法となってい

る。そのため対象とするモデルの微分方程式を解く必要がなく、プリアンネットワークなどの簡易なモデルを扱うのと同等の簡易性を持つ計算効率が高い方法となっている。したがって、2段階で簡易化されたモデルを用いて、より現実に近い複雑さを持つハイブリッドモデルの設計問題が解ける方法となっている。この方法を拡張することにより、遺伝子ネットワークのハイブリッドモデルが扱えるシミュレータを用いて、より現実に近い詳細なモデルに対し、種々の設計要件を入れた設計法を導けることが期待でき、これは今後の課題となる。

(3) ニューラルネットワークのモデル内包学習法

人間の脳の情報処理機能を模倣したニューラルネットワークの研究が非常に注目され、計測や制御、信号処理など様々な分野へ応用が盛んになっている。その基盤となっているのは、ニューラルネットワークの学習による非線形写像、非線形ダイナミックスの獲得能力である。ところが、未知対象の入出力データを教師データとして、直接ニューラルネットワークに与えられる場合は、以上の学習が容易に実現できるが、現実の問題においては、直接教師データが与えられない場合も多く、この場合は学習において特別な考慮が必要となる。また、単に対象の入出力データだけでなく、対象に対して何らかの事前知識が与えられている場合、これを学習に組み込みこむことができると、より対象を忠実にネットワーク上に実現でき、ニューラルネットワークの更なる応用の可能性が広がると考えられる。本研究では、未知なる対象に対し、何らかの事前知識が与えられている場合や、対象のモデルの一部が既知である場合に対し、これらのモデルをモデル化し、ニューラルネットワークの学習ループに内包させて学習する方法を提案している。またそれを、モデル内包学習法と呼んでいる。提案しているモデル内包学習問題を最適化問題として定式化し、それを解くためのアルゴリズムを系統的に導出する方法を開発している。この方法はニューラルネットワークのシミュレータがあれば構築できる方法となっており、ニューラルネットワークのシミュレータ、すなわちアルゴリズムモデルを対象とした設計法となっている。

(4) 強化学習を導入したシステムの設計法
これまでに説明した方法は、システムのシミュレータをアルゴリズムで表されたモデルと捉え、これを対象としてシステムの解析、設計法を開発しようとするものである。それに対し、本研究はモデルを用いることなしに、システムの設計法を開発することを目指す研究である。すなわち、強化学習の考え方を導入し、対象のモデルを学習により獲得しながら設計をしようとするアプローチである。このアプローチは、対象とするシステムのシミュレータを用いて強化学習におけるエー

ジェントと環境を構築し、それをもとにして強化学習をすすめるというアプローチで、アルゴリズムで表されたモデルを直接用いてシステムを設計する方法となっている。このアプローチ沿った研究をいくつかすすめてきているが、ここではマルチエージェントシステムのフォーメーション制御に関する成果について説明する。

近年、マルチエージェントシステムのフォーメーション制御への関心が高まり、これに関する研究が盛んに行われている。これは、群ロボット、複数の飛行機、複数の人工衛星のフォーメーション制御など、様々な応用が考えられるからである。ここで取り扱う問題は、複数台存在するロボットが各自の与えられた初期位置から移動して、ロボットの台数と同じ個数だけ存在する目標位置の一つに到達して何らかのフォーメーションを形成する問題である。このような問題は、人文字のように複数のロボットが文字や絵を描くような場合に現れる。各ロボットがどの目標位置を目標とするかはあらかじめ与えられておらず、各ロボットが学習することにより、全てのロボットが目標位置に到達するまでの時間が最小となる各ロボットの移動経路を獲得できるようにする。

この問題に対し、筆者らが従来提案している群強化学習法を適用して解く方法を提案している。群強化学習法は多点探索型最適化法にヒントを得た方法で、強化学習におけるエージェントと環境の組を学習世界と呼ぶことにすると、この学習世界を複数用意し、次のように学習をすすめる。すなわち、各学習世界で各エージェントが通常の強化学習法で同時並列に学習するとともに、各学習世界の学習成果に関する何等かの情報を学習世界間でやりとりする、すなわち情報交換することでも学習を進める。これにより、多点探索型の最適化法と同様な効果により、従来の強化学習では最適な方策を得ることが困難な問題に対して、より短時間でより優れた方策を得られる。

フォーメーション形成問題においては、各ロボットの最適方策が、ロボット全体にとっての最適方策とはならないという問題がある。そのため、ロボット全体が最短時間で目標位置に到達するためには、各ロボットが向かうべき目標位置をそれぞれ適切に学習する必要がある。この問題を群強化学習法を用いることにより次のように解決している。すなわち、全てのロボットが最適な目標位置に最短時間で到達できている場合は、各ロボットの初期位置から目標位置までの行動時間のばらつき、すなわち分散は小さいと考えられる。したがって、全ロボットの行動時間の総和が小さければ小さい学習世界ほど、また各ロボットの行動時間の分散が小さければ小さい学習世界ほど優れた学習を行っていると考えられる。この考えに基づいて優れた学習世界を選別し、その学習世界の情報を用

いて各学習世界間の情報交換し学習を進めていく方法を提案している。先に述べたようにこの方法は、問題の対象システムのシミュレータを構築すれば、設計法を構築できる方法となっている。

(5) まとめ

先に述べたように、本研究の目的を達成するため、対象とする解析、設計の問題をいくつか具体的に設定して研究を進めた。以上の

(1)、(2)、(3)でそれらの主な問題とその成果を説明したが、これらの他、パワーエレクトロニクスシステムを対象として安定解析や、安定化制御法についても検討し、同様な成果を得ている。これらの成果をさらに一般のシステムの解析、設計論とするためには、それらに共通するアプローチを抽出、また共通する問題点を抽出して、問題解決をはかる方法を検討していく必要がある。(1)、(2)、(3)で共通しているのは、問題を何らかの最適化問題として定式化し、それを解くためのアルゴリズムを、対象システムのシミュレータの適用を前提として導く方法を示したことである。その意味でシミュレータ、すなわちアルゴリズムで表されたモデルに基づく解析、設計法になっている。ところが、問題の定式化はアルゴリズムモデルを直接対象としたものとはしておらず、この点を今後検討し研究をすすめていく必要がある。そのためには、計算機科学で展開されている種々の知見を用いる必要があると考えられる。

また、(4)では、強化学習を導入し、モデルを学習によって獲得することによりシステムを設計する方法を取り扱っている。この方法は対象の数学モデルを必要とせず、アルゴリズムモデルだけをもとにして設計できる方法となっている。このアプローチと先に述べたアプローチは互いに相補するものとして、これら二つのアプローチを融合させることが今後の有力なアプローチと考えられ、この方向でさらに検討を進める予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計16件)

Hitoshi Iima and Yasuaki Kuroe, Swarm Reinforcement Learning Method, for a Multi-Robot Formation Problem, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 査読有り, pp.1165-1170, 2013

DOI: 10.1109/SMC.2013.393

Yasuaki Kuroe and Hajimu Kawakami, Shape from Shading by Model Inclusive Learning -Simultaneous Estimation of Reflection Parameters-, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 査読有

り, pp.1165-1170, 2013

DOI: 10.1109/SMC.2013.202

Yoshihiro Mori and Yasuaki Kuroe, Synthesis Method of Gene Regulatory Networks Having Desired Expression-Pattern Transition Sequences, Proceedings of 9th Asian Control Conference, 査読有り, MoA3.3, 6 pages, 2013

DOI: 10.1109/ASCC.2013.6606266

山分翔太、黒江康明、飯間 等、マルチエージェントタスクに対する群強化学習法 - ジレンマ問題の解法 -, 計測自動制御学会論文集, 査読有り, Vol.49, No.3, pp.370-377, 2013

DOI: 10.9746/sicetr.49.370

飯間 等、黒江康明、連続状態行動空間を有する問題に対する群強化学習法、計測自動制御学会論文集、査読有り、Vol.48, No.11, pp.790-798, 2012

DOI: 10.9746/sicetr.48.790

Yoshihiro Mori and Yasuaki Kuroe, A Synthesis Method of Gene Regulatory Networks Having Cyclic Expression Pattern Sequences and Its Evaluation, Proceedings of 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems, 査読有り, pp.1694-1699, pp.1694-1699, Oct. 2012

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=6375948>

Yusuke Mukai, Yasuaki Kuroe and Hitoshi Iima, Multi-Objective Reinforcement Learning Method for Acquiring All Pareto Optimal Policies Simultaneously, Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 査読有り, pp.1917-1923, Oct. 2012

DOI: 10.1109/ICSMC.2012.6378018

Yoshihiro Mori and Yasuaki Kuroe, Synthesis Method of Gene Regulatory Networks Having Desired Periodic Expression Pattern Sequences, Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 査読有り, pp.1159-1164, Oct. 2012

DOI: 10.1109/ICSMC.2012.6377888

Yasuaki Kuroe, Computer-Aided Design Method of Stabilizing Controllers for Chaotic Systems, Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC) Part of 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 査読有り, pp.282-288, Oct. 2012

DOI: 10.1109/ISIC.2012.6398263

Yasuaki Kuroe, A Design Method of Stabilizing Controllers for Chaotic

Systems, Proceedings of the third IFAC CHAOS Conference, 査読有り, pp.240-244, Jun. 2012

DOI:10.3182/20120620-3-MX-3012.00055
Hitoshi Iima, Yasuaki Kuroe and Kazuo Emoto, Swarm Reinforcement Learning Methods for Problems with Continuous State-Action Space, Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 査読有り, pp.2173-2180, 2011

DOI: 10.1109/ICSMC.2011.6083999
Yasuaki Kuroe and Hajimu Kawakami, Versatile Neural Network Method for Recovering Shape from Shading by Model Inclusive Learning, Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, 査読有り, pp.3194-3199, 2011

DOI: 10.1109/IJCNN.2011.6033644

〔学会発表〕(計 23 件)

飯間 等、フォーメーション形成問題に対する強化学習法 優れた状態行動価値の抽出に基づく方法、計測自動制御学会第 41 回知能システムシンポジウム、2014 年 3 月 14 日、筑波大学東京キャンパス

森 禎弘、遺伝子ネットワークにおけるアイソクロンの簡単な計算法、計測自動制御学会第 4 回コンピューショナル・インテリジェンス研究会、2013 年 12 月 5 日、九州大学伊都キャンパス

高尾 晃、いくつかのクラスのジレンマ問題に対するマルチエージェント強化学習法とその評価、計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013、2013 年 11 月 19 日、ピアザ淡海

森 禎弘、発現パターンに基づく遺伝子ネットワークの設計問題 - 解法と解の存在性 -、第 56 回自動制御連合講演会、2013 年 11 月 17 日、新潟大学

黒江康明、遺伝子ネットワークにおけるアイソクロンの計算法、第 23 回インテリジェント・システム・シンポジウム、2013 年 9 月 26 日、九州大学

飯間 等、フォーメーション形成問題に対する Particle Swarm Optimization に基づく群強化学習法、第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会、2013 年 5 月 17 日、兵庫県民会館

高尾 晃、あるクラスのジレンマ問題に対するマルチエージェント強化学習法、計測自動制御学会第 40 回知能システムシンポジウム、2013 年 3 月 15 日、京都工芸繊維大学

森 禎弘、所望の周期発現パターンをもつ遺伝子ネットワークの設計法、第 55 回自動制御連合講演会、2012 年 11 月 17 日、京都大学

飯間 等、複数ロボットのフォーメーション形成問題に対する群強化学習法とその評価、計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2012、2012 年 11 月 22 日、ウィル愛知 愛知県女性総合センター

黒江康明、ニューラルネットワークによる離散事象システムの実現と同定法 - 高次結合表現とスパース実現、計測自動制御学会第 2 回コンピューショナル・インテリジェンス研究会、2012 年 9 月 28 日、岡山大学

森 禎弘、周期発現パターンをもつ遺伝子ネットワークの設計と安定解析、計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2011 講演論文集、2011 年 11 月 23 日、東京都国立オリンピック記念青少年総合センター

飯間 等、高次元連続状態行動空間の問題に対する群強化学習法、計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2011 講演論文集、2011 年 11 月 22 日、東京都国立オリンピック記念青少年総合センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒江 康明 (KUROE, Yasuaki)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号: 10153397

(2) 研究分担者

飯間 等 (IIMA, Hitoshi)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授
研究者番号: 70273547

森 禎弘 (MORI, Yoshihiro)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授
研究者番号: 40273544