

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15011

研究課題名（和文）ディザリングを用いた分散協調システムのフォールトトレラント制御

研究課題名（英文）Fault tolerant control of distributed cooperative systems with dithering methods

研究代表者

森田 亮介（Morita, Ryosuke）

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：00713801

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：マルチエージェントシステムにおいて、ディザ信号と呼ばれる意図的に付加される雑音を識別キーとして利用した方法について解析を行い、識別キーを持たない不正なエージェントが混入している場合を判別可能であることを示した。エージェント間の通信に関しては、周波数変調と量子化を組み合わせることで、複数の制御信号が混合・圧縮された中から所望の信号を取り出し制御可能となることを示した。また、ディザ信号の生成法について、モデル情報を用いて未来の量子化の影響を予測し、制御性能が向上することを示した。さらに、クアドコプターを用いた実験を行い、故障の原因となる衝突を回避するためのアルゴリズムの構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果は、今後の普及が見込まれている、複数の小型デバイスがネットワークを形成して作られるIoTシステムに対して用いられる技術への貢献が期待される。本研究の結果をベースとして、不正なデバイスが仕掛けられた場合や、デバイスの故障の検知への応用が期待できる。デバイス間の通信の情報量の削減にも応用可能であり、通信方法そのものの新たな創出も期待できる。また、周波数変調を量子化制御と組み合わせた点については、アナログ通信の時代の古い技術を再注目させる点で重要な成果であり、社会的のみならず、学術的にも今後新たな視点が生まれることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：We analyzed multi-agent systems where artificial additive noises called dither signals are used for identification keys. As a result, we showed that the system with an irregular agent could be detected. For communication between agents, we showed that the combination of quantization and frequency modulation enables us to control systems by extracting desired signals from mixed and compressed signals. In addition, we presented a new dither signal generation method that predicts the future quantization effects using a system model. We showed that the proposed method improves control performance under signal quantization. Furthermore, we developed an algorithm for quadcopters to avoid collisions and demonstrated its effectiveness through experiments.

研究分野：制御工学

キーワード：ディザリング 量子化制御 マルチエージェントシステム ネットワーク化システム

1. 研究開始当初の背景

マルチエージェントシステムとは、エージェントと呼ばれる複数のシステムが互いにネットワーク構造を構成し、協調することで、ネットワーク全体で共通のタスクを実現するシステムである。全体の情報を一カ所に集約することなく、各エージェントがそれぞれ情報交換を行なうことで目標を達成することができるため、タスク実現のための負荷をネットワーク全体に分散することができる。近年ではセンサネットワークやスマートグリッド、群ロボットシステム、システムバイオロジーなど、社会的影響力の大きい分野での幅広い応用が期待されている。

システムの情報を一カ所に集約する必要がないため、システムの拡張性に優れており、エージェントの追加という形でシステムの拡張が実現ができる。その一方で、第三者により、システム管理者の意図とは異なるエージェントが追加され、攻撃を受ける危険もはらんでいる。こうした攻撃に対し、ロバストなシステムを構築することが、大規模なマルチエージェントシステムには必要不可欠である。

マルチエージェントシステムでは、それぞれのエージェントが異なる環境にさらされていたり、物理的に離れた位置にあることが多く、従来のシステムと同じようにメンテナンスすることは容易ではない。ゆえに、各々のエージェントが故障した場合や、悪意ある第三者による攻撃に備えて、何らかの異常検知を行なう仕組みをシステムに持たせることは重要である。

システムに異常が発生した場合の対策の一つとして、エージェントを監視するためのネットワークを本来のマルチエージェントシステムに加えて新たに構築する方法が考えられるが、監視用システムにも異常が発生しうするため、結果として、さらにシステムを冗長化する必要がある。このため、ネットワークの構築コストは、異常検知機能のないシステムの場合に比べて2倍以上となり、あまりよい方法とは言えない。また、他の方法として、システムの主たる目的とは別に、監視用のプロトコルを、本来のタスクを実現するためのプロトコルと平行して、同一のネットワークを介してやりとりする方法も考えられるが、これには異なるプロトコルでネットワークを共有する必要がある。結果として、エージェント間でのプロトコルの同期が問題となったり、エージェントそのものに複数のタスクを処理させるために、高い演算性能が要求されるため、他の方法による解決が望ましいと考えられる。

そこで本研究では、ディザリング技術を用いた方法に着目する。ディザリングとは、信号処理において、通常用いる信号に対して、ディザ信号と呼ばれる意図的にノイズのような信号を加えることで、なんらかの有益な効果を期待する技術であり、音声処理のDA変換の際の信号の劣化を抑える目的や、画像印刷において、明暗(濃淡)画像をきれいに表現する目的で用いられる。どちらも解像度(階調)の低い環境において高解像な信号を表現するための量子化技術の一つであるが、本研究ではこれをシステムの異常検出のためのツールとして用いる。

例えば、コピー防止技術が施された印刷物では、原本では見た目にはほとんど確認できない絵や文字が、コピーするとはっきり浮かびあがることがある。つまり、ある特定の操作をすると、元々の信号とは異なった信号を得ることが可能である。逆に「ある特定の操作を行わない限り、正常な信号を取り出すことができない」ような仕組みも可能であると考えられる。これをマルチエージェントシステムの制御に応用し、特定のエージェント(=正常なエージェント)のみに、エージェント間の通信が正しく行われ、故障したエージェントや攻撃者とは正常な通信が行われず、異常を判定できるようなシステムの構築を目指す。また、そのような状況下においても、残りのエージェントのみである程度の制御が継続可能となるような仕組みを作る。

2. 研究の目的

本研究では、マルチエージェントシステムの制御において、ディザリング技術を用いて、制御信号そのものに、システムを構成するエージェントを相互に監視する仕組みを備えた方法を考える。すなわち、一つのプロトコルのみで、本来のタスクである計測・制御に加えて、システムを構成するエージェントに異常がないか監視し、検出するための理論の構築を行なう。また、異常発生下においても、目標の制御が実現可能な制御方法を提案する。具体的な方法として、エージェント間の通信に用いるディザ信号と、それに対応するエージェントのダイナミクスを対にして設計し、正しい組み合わせのみにおいて制御が可能となるようなシステムの設計方法確立する。同時に、正しくない組み合わせの場合であっても、そのことが判別でき、かつ、安全にシステムを稼働し続けられるための制御方法について考える。さらに、マルチロボットによる実験を行ない、様々なシナリオの下で、構築したシステム設計理論、制御方法について正しく運用できるかを検証する。

3. 研究の方法

本研究はディザリングを用いた分散協調システムのフォールトトレラント制御を実現するため、(1)マルチエージェントシステムの異常検知、(2)フォールトトレラント制御理論の構築と(3)複数台のマルチコンピュータを用いた制御実験を行なう。

(1) マルチエージェントシステムの異常検知

本研究では確定的なディザ信号を用いた異常検出方法に取り組む。ランダムディザでは、ディザ信号が常にランダムであるために、エージェント間で全く同一のディザ信号を用意する以外にシステムの正当性を評価する方法を構築することが難しい。これに対し、確定的ディザでは、ある特定のシステム構造に特徴的な応答を示すようにディザ信号を設計すれば、通信相手のエージェントの正当性を評価し得ると考えられる。すなわち、送信側のディザ信号がエンコーダの役割を担い、受信側のダイナミクスの一部がデコーダの役割を担うような仕組みを考える。エンコード用ディザ信号とエージェントのデコードダイナミクスの適切な組み合わせを探し、かつ、エージェントがもともと持っている協調制御のためのダイナミクスに影響を与えないような仕組みを構築する。

(2) フォールトトレラント制御理論の構築

システムの異常検出のみでは、システム管理者の助けを借りて異常を取り除かない限り、システムを稼働させ続けることができない。それどころか、適切な対処をとらなければ、重大事故に繋がる恐れもある。そこで本研究では、異常があった場合でも安全に制御が可能なフォールトトレラント制御の実現を目指す。異常があった場合に、単純に安全に停止するように切り替えるのではなく、緩やかに縮退運転に遷移する構造を各エージェントがそれ自身のダイナミクスに備えているようなシステムの構築を目指す。

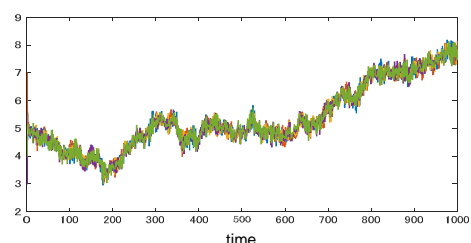
(3) 複数台のマルチコプターを用いたフォーメーション制御実験

複数台のマルチコプターを用いたフォーメーション制御実験を行ない、構築した理論的結果の検証を行なうとともに、異常発生シナリオとして様々な状況の試験を行なう。マルチコプターのフォーメーション制御は、車両ロボットなどに比べて、見た目にもわかりやすい題材であり、障害物との衝突や墜落などの異常が発生しやすく、本研究の検証実験として効果的である。

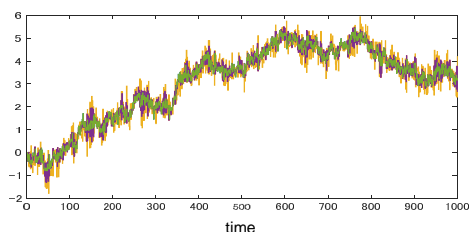
4. 研究成果

(1) Subtractive dither を用いたマルチエージェントシステムの異常検知

通常のランダムディザ法では信号の量子化を行う直前にディザ信号と呼ばれる確率的な信号を付加するのみであるが、subtractive dither法は、量子化された信号がシステムに入力される直前に、量子化の前に加えたディザ信号と同一の信号の正負を反転させた信号を加える方法である。通常のランダムディザ法に比べて、信号の変換による影響が少ない方法であり、これをマルチエージェントシステムの通信に用いて、システムに含まれる異常なエージェントの検知に利用可能かを検討した。エージェント間での通信を行う際は、互いのエージェントの正当性を識別するための識別キーとして、全エージェントが同一のディザ信号を持っているとし、正当な識別キーを持たない異常なエージェントがシステムに混入した場合には、その影響がどの程度現れるかについて解析を行った。図1はマルチエージェントシステムにおいて基礎的な問題とされる合意問題について、エージェント数5の場合の各エージェントの状態変数の変化を示したものであり、(a)は正常なエージェントのみで構成されるシステム、(b)は異常なエージェントが混入している場合のシステムの結果である。すべて正常であれば、5つのエージェントの状態はほぼ同じ値になり、5つの線が重なるはずであるが、異常なエージェントが混入している場合では、該当のエージェント（黄）のみ他のエージェントとは異なる挙動を表した。これを明確に判別できるようにするため、エージェントの散らばり具合を測る評価関数を導入し、通信にディザ量子化を用いない場合を基準として、異常なエージェントが混入した場合としていない場合での比較を行った。図2はその値をグラフに表したものであり、青線がディザ量子化を用いていない基準となる値、赤線がすべて正常な場合、黄線が異常なエージェントが混入した場合である。異常なエージェントが混入した場合は明らかに基準値よりも大幅に大きな値となっており、この評価関数を用いることで、異常があるかどうかの判別が可能であるとの結果が得られた。



(a) 正常なエージェントのみのシステム



(b) 異常なエージェントが混入したシステム

図1：エージェントの状態変数の変化

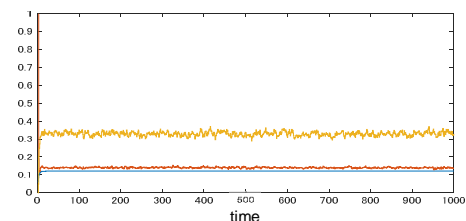


図2：エージェントの散らばり具合

(2) ブルーノイズを用いた量子化制御

画像処理の分野において、ディザリングの効果を向上させる目的で、ブルーノイズと呼ばれる高周波の雑音を用いることがある。画像処理においては、これをフィードバック制御に援用し、制御入力の変換度が低い場合の制御性能について、従来用いられるホワイトノイズを用いた場合との比較を行った。

図3に制御対象の入出力応答を示す。赤線がホワイトノイズ、青線がブルーノイズを用いて制御入力を量子化した場合の結果であり、ブルーノイズをディザ信号として用いて量子化を行った場合のほうが、制御入力の量子化を施していない理想の出力（黒線）に近い出力が得られていることがわかる。一般に機械システムなどでは、高周波の入力に対して反応しにくいローパス特性を有していることが多く、この結果により、入力がより高周波になるブルーノイズを用いた場合の方が望ましい結果が得られる場合が多いとの予想が裏付けられた。

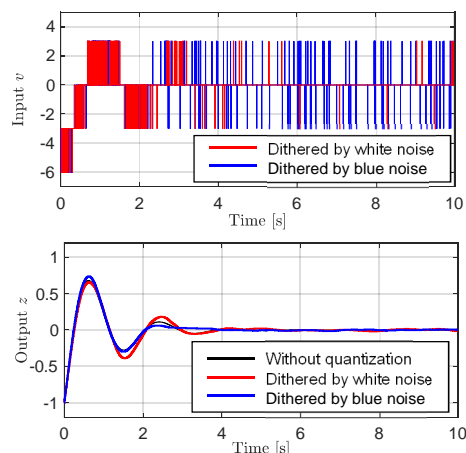


図3：ディザ信号としてホワイトノイズを用いた場合（赤）及びブルーノイズを用いた場合（青）の入出力応答

(3) フィードバック制御系におけるモデル情報を用いた最適ディザリングの性能評価

ランダムディザ量子化器は、制御対象のモデル情報を用いないため、どんな制御対象であってもほとんどの場合はある程度の効果があるが、モデル情報を用いた量子化器を用いた場合に比べると、制御性能の改善の程度は低い。そこで、制御対象のモデル情報を用いて量子化による制御性能の低下の度合いをあらかじめ予測し、制御性能の低下が軽減できるディザ信号を生成する方法を考案した。ディザ信号量子化器の内部に制御対象のモデルを含むことで、未来の出力を予測し、量子化される場合に信号値の切り上げ／切り捨てのどちらかより制御性能を維持できるかの評価を行い、意図的に切り上げ／切り捨てが適切に選択されるようなディザ信号を生成するよう量子化器を構成した。

この方法を用いて、フィードバック制御系のシミュレーションを行った。図4は従来のランダムディザ量子化を用いた場合（青線）と提案法による量子化を行った場合（赤線）の制御対象の入出力応答を比較したものであり、提案法の方がわずかながら連続値入力を用いた場合の出力（黒線）により近い出力が得られている。また、提案法によって生成したディザ信号がどのような信号であるか、(1)の結果との関連性の面において考察を行った。図4は従来法のランダムディザ信号と提案法において生成したディザ信号の周波数分布を比較したものであり、提案法では、高周波成分を多く含む信号であったことが分かった。

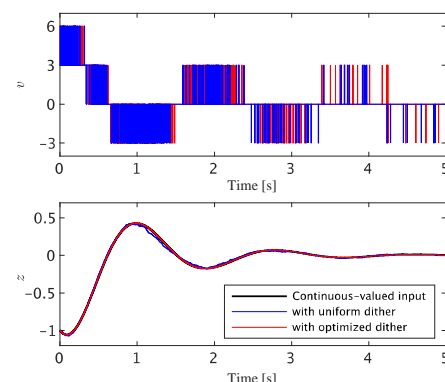


図4：従来のランダムディザ量子化器（青）とモデル情報を用いたディザ量子化器を用いた場合（赤）の入出力応答

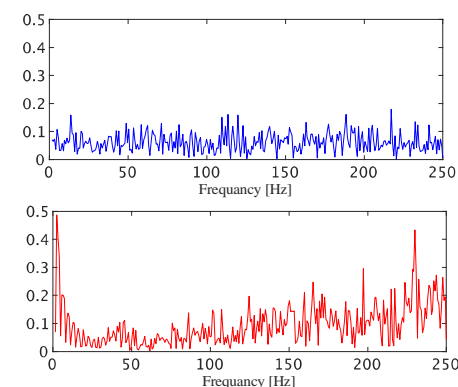


図5：従来型のランダムディザ量子化器とモデル情報を用いたディザ量子化器のディザ信号の周波数分布（左：従来法、右：提案法）

画像処理の分野におけるディザリングで用いられるブルーノイズは、画像の見た目がディザリングの前後で近くなるよう最適化を行うことで、結果としてブルーノイズとなることが知られているが、本研究で得られた結果もそのことと矛盾しないものであった。すなわち、制御対象の出力がディザリングの前後で変化しないよう、未来の出力を予測し、最適なディザ信号の値を選択することで、制御性能が低下しにくいシステムを構築できるといえる。

(4) 周波数変調を介した量子化制御システムの評価

分散協調システムの構築にはシステム間の通信が必要不可欠である。そこで本研究では無線通信の方法として古くから用いられている周波数変調に着目し、量子化された信号を周波数変調を用いて伝送することで、フィードバック系を構成し、シミュレーションを行った。構成したシステムは図6に示すような、二組のフィードバック系であり、制御対象と制御器との間の伝送

路において、互いのシステムの信号が混合されているものとし、それぞれの制御対象・制御器が対応する信号を取り出せるか、なおかつ信号が混合されない場合や量子化されていない場合に比べて制御性能が低下しないかどうかの検証を行った。図7は二つの制御対象の出力をそれぞれ示したものであり、周波数変調を施さない、すなわち制御信号を混合しない場合を黒線、周波数変調を用いて制御信号を混合して伝送した場合を赤線、さらに、信号を伝送前に量子化した場合を青線で示しているが、赤線と青線はほぼ完全に重なっている。つまり、周波数変調により、制御対象の出力結果は多少異なるものの、周波数変調を用いて伝送した場合には信号の量子化の影響をほとんど受けないことが分かった。

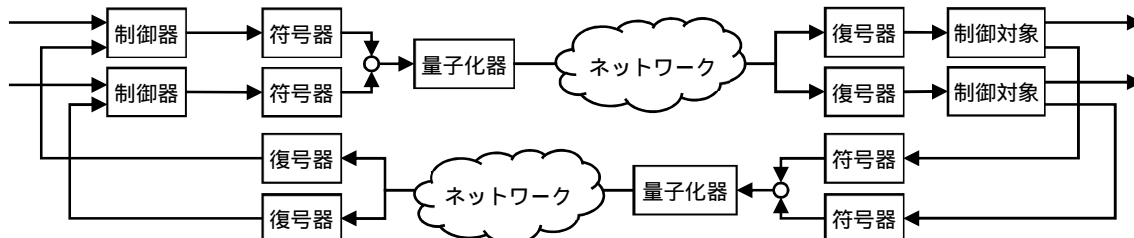


図6：周波数変調を用いた二種類の混合フィードバック量子化制御システム

この結果から、周波数変調と量子化を組み合わせることで、ネットワークを流れる情報量を大幅に削減できることが期待できる。また、複数の制御信号が混合されたその情報から、必要な情報のみを取り出し、適切な制御入力を復元することが可能となることが期待される。伝送される信号は量子化されているため、通常のアナログ信号の周波数変調による伝送に比べて、どの周波数で変調されているのかはわかりにくくなっており、外部からの制御信号の隠蔽のための新たな方法の手がかりになると考えられる。その一方で、量子化の方法を、単純な量子化のみの場合とディザ量子化を用いた場合で比較を行ったが、結果にほとんど違いは見られなかった。このことは、周波数変調がノイズに非常に強い方法であることを示す一方、ディザリング技術は周波数変調が含まれるシステムにおいてあまり有益でない可能性を示唆する結果であったといえる。

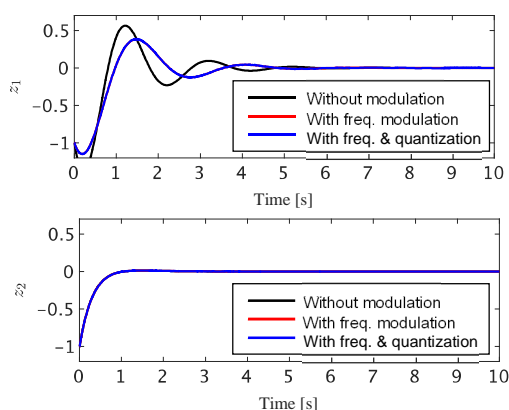


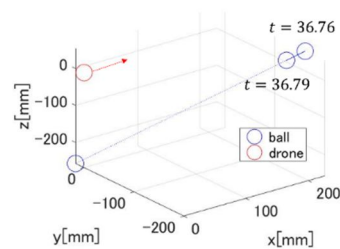
図7：周波数変調を行わない場合（黒線）、周波数変調を行った場合（赤線）、周波数変調の後に量子化を行った場合（青線）の制御対象の出力

(5) クアッドコプターのフォールトトレラント・故障回避のための制御

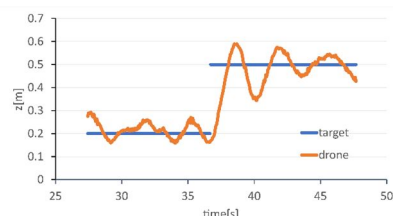
クアッドコプターの故障の原因として、バードストライクなどの、空中での飛来物との衝突があげられる。本研究では、衝突を回避するためのアルゴリズムの構築を行い、実機実験を行った。飛来物は既知であるとし、クアッドコプターの前面に搭載したカメラによって飛来物を認識し、その運動を推定することで未来の軌跡を予測し、その軌跡から遠ざかる方向へ避けるためのアルゴリズムの実装を行った。図8(a)において、青線は飛来物（ボール）の軌跡を示しており、赤丸は機体の初期位置である。図8(b)はクアッドコプターの高さの目標値（青）と実際の計測値（橙）であり、37秒付近で飛来物を認識し、回避が行えたことがわかる。

また、故障を想定してあらかじめ機体のバランスを崩しておき、制御器のオートチューニングにより、故障状態に適応して飛行可能とするような制御方法の開発を試みた。適応制御の方法の一つであるVIMTを実装し、シミュレーションを行ったところ、安定した飛行の実現には至らなかった。実装していた制御系がVIMTのアルゴリズムに対して適切ではなかったことが考えられるが、今後のさらなる考察が必要である。

当初の予定である複数台での実験は実現できなかったが、実施した実験において、ロボットのためのミドルウェアであるROSを用いており、複数台の互いの通信を伴う実験へ拡張可能な環境は構築することができた。



(a) 機体の初期位置と飛来物の軌跡



(b) 回避実験での機体の高度

図8：クアッドコプターで実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ryosuke Morita, Fuya Horie, Satoshi Ito
2. 発表標題 Analysis of Quantized Consensus with Subtractive Dither
3. 学会等名 The 21st IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋田裕介, 森田亮介, 伊藤聡
2. 発表標題 周波数変調による複数システムの選択的フィードバック制御
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 2020年

1. 発表者名 森田亮介
2. 発表標題 数値最適化に基づくランダムディザ量子化制御の考察
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 2020年

1. 発表者名 Ryosuke Morita, Fuya Horie, Satoshi Ito
2. 発表標題 Detection of Irregular Agents for Consensus Problem by Random Dither Quantization
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1．発表者名 堀江風哉，森田亮介，伊藤聡
2．発表標題 マルチエージェントシステムにおける量子化誤差による合意値への影響
3．学会等名 第62回自動制御連合講演会
4．発表年 2019年

1．発表者名 森田亮介
2．発表標題 ブルーノイズを用いたディザ量子化制御に関する考察
3．学会等名 第62回自動制御連合講演会
4．発表年 2019年

1．発表者名 Ryosuke Morita
2．発表標題 Numerical Study on Combination of Quantization and Frequency Modulation
3．学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4．発表年 2021年

1．発表者名 加藤祐一，森田亮介，伊藤聡
2．発表標題 画像認識を用いた飛来物の軌道予測によるドローンの回避制御
3．学会等名 第9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 2022年

1. 発表者名 森田亮介
2. 発表標題 量子化制御のための最適デザインへ向けた理論的考察
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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