

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01277

研究課題名（和文）ナノ光学とレーザーカオスを用いた超高集積・超高速意思決定の創製

研究課題名（英文）Decision making using nano-optics and laser chaos

研究代表者

成瀬 誠（Naruse, Makoto）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：20323529

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、波長より小さな微細寸法での光学 - ナノ光学 - 及び極めて高速で複雑な動特性を有するレーザーカオス技術に基づき、人工知能で重要な強化学習の本質である多本腕バンディット問題（意思決定問題）を、光の極限性能とともに物理的に実現するための基盤技術を開発した。具体的には、（1）光の微細化の極限としての近接場光による超高集積意思決定、並びに（2）光の高帯域性の極限による超高速意思決定に関し、基本原理やスケーラビリティを実証した。さらに、（1）、（2）の基盤となる理論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

意思決定の高速化・高効率化は不確実性の高まる現在及び今後の社会及び情報通信技術において重要であり、本研究は、光の物理的特徴が意思決定の高度化に寄与できる可能性を示した。また、光を用いた意思決定に限らず、自然系を用いた情報処理機能構築の構築は今後の重要課題であり、圏論を用いて、新たな理論的アプローチを示した。

研究成果の概要（英文）：The present study physically resolves decision making problem, which is one of the most important elements in information and communications technology (ICT) including artificial intelligence (AI), by utilizing the unique physical nature of photons. Specifically, diffraction-limit-free nano-scale photonic decision making is investigated by utilizing photochromic materials and near-field photons. Furthermore, ultrafast decision making is developed whereby the ultrahigh-bandwidth nature of photons and chaotic dynamics of lasers are exploited. Also, theoretical fundamentals for such photon-based intelligent abilities are examined.

研究分野：情報物理学

キーワード：意思決定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、自然界で環境情報を効率的に処理している単細胞アメーバ生物・粘菌の計算原理を探る「粘菌コンピューティング」の研究を契機とし、粘菌の解探索機能や意思決定機能をもたらすダイナミクスを、光電子系において実現できるという画期的知見を見出し(Phys. Rev. B 2012)、NP 完全問題の求解などの新機能を世界に先駆けて示した(Langmuir 2013)。その上で、多本腕バンディット問題(Multi-Armed Bandit problem: MAB)と呼ばれる意思決定問題が、光を用いて解決可能であることを発見し(Sci. Rep. 2013)、その後実証実験に成功(J. Appl. Phys. 2014, Sci. Rep. 2015)し注目を集めた。MAB とは、スロットマシンからの獲得報酬を最大化する問題である。報酬の最大化には有利な台を知るための探索が必要だが、過度な探索は損失であり、他方で性急な判断はよい選択を阻む。すなわち、探索(exploration)と決断(exploitation)に難しいトレードオフが存在する。本研究のアイデアは、近接場光あるいはレーザーカオスにおける物理的な複雑性を直接に用いることで意思決定の解空間を適応的かつ効率的に探索させることにある(Sci. Rep. 2013)。レーザーカオスでは電子デバイスでは不可能な超高速性も備わる。

MAB を物理的メカニズムによって解決するというオリジナルなアイデアが、最小規模の実験による実証にまで至った研究開始前の実績を踏まえ、現実の意思決定問題解決を見据えたスケラビリティの実現や理論基盤の強化などが、本研究開始時の重要研究課題であった。

2. 研究の目的

MAB を物理的メカニズムによって解決するというオリジナルなアイデアが、最小規模の実験による実証にまで至った前節の研究状況を踏まえ、本研究は、現実の意思決定問題解決と将来のより大きな展開を明確に見据え、次の重要3課題を明らかにすることを目的とした。

(1) レーザーカオスによる超高速意思決定

先行研究における超高速な光 MAB の予備実験は、光遅延帰還によるカオス光を用いて毎秒 100G 個の意思決定を実現した。しかし、カオスによる性能加速の背景原理の解明は不十分である。さらに、予備検討における選択肢の数は最小個数の 2 に留まっており、現実の意思決定に必要な多数の選択肢への対応を可能とさせるスケラビリティ原理の構築は重要課題である。

(2) ナノ光学による超高集積意思決定

ナノ光学に基づいた先行研究では、量子ドット間のエネルギー移動を活用したが、現実には、ナノ微粒子配列構築の難易度の高さにより、原理実験は、波長より大きなマクロ寸法に留まっていた。また、意思決定に不可欠な履歴に関する一定の記憶に関しては、外部システムに依存していた。これらの課題の解決に向け、本研究では、光によるナノ領域での構造変化とその保持を可能とする材料であるフォトクロミックナノ結晶に注目し、基礎となる機能の実証を行う。

(3) 基盤理論の構築

本研究が注目している上記(1)(2)の光現象を含め、電子移動に限らない物理現象を情報処理機能に応用するアプローチは、フォンノイマンボトルネックの打破やポストムーア時代の新たなコンピューティング原理として重要性が高まっている。また、意思決定は脳科学なども関連する学際領域であり、分野を融合する基礎理論構築が重要である。そこで本研究では、圏論を用いてこれらの新研究領域の基礎理論構築への足掛かりを得る。

3. 研究の方法

(1) レーザーカオスによる超高速意思決定

カオス時系列の時間相関構造と MAB における適応性の関連を分析し、MAB の高速化の背景原理の解明を進める。先行研究における超高速な光 MAB の予備実験では、光遅延帰還によるカオス光を用いて毎秒 100G 個の意思決定を実現した。しかし、カオスによる性能加速の背景原理の解明は不十分である。さらに、現実の意思決定に必要な多数の選択肢への対応を可能とさせるスケラビリティに関して、光の多重性に着目した新原理を検討する。

(2) ナノ光学による超高集積意思決定

フォトクロミックナノ結晶において、近接場光プローブを用いた局所光異性化を実証する。単一箇所での局所異性化が確認された場合、光の回折限界より小さな寸法において、複数箇所での局所光異性化を試み微細な空間構造の形成を実証する。さらに、フォトクロミック材料の特徴である「透明状態 着色状態」、「着色状態 透明状態」のスイッチングを試み、意思決定における情報の記憶及び忘却に関わる基本機能を実証する。

(3) 基盤理論の構築

圏論において三角圏と呼ばれる構造に着目し、光を用いた意思決定システムの基本構造の解明を試みる。また、このような圏論に基づいた意思決定の理解に基づいて、選択による選好性の変化(Choice-induced preference change)と呼ばれる人間の意思決定において観測されている現象の新たな数理モデル化を試み、人間に限らず、光系においても、適当な条件が満たされるときには選択による選好性の変化が生じることを示す。また、自然系を用いたコンピューティングに関するより基礎的な理論基盤構築を指向し、圏論の中心概念の一つである自然変換を用いた基礎付けを目指す。

4. 研究成果

(1) レーザーカオスによる超高速意思決定

半導体レーザーから生成したレーザーカオス光を高速にサンプリングし、閾値との大小判定のみで意思決定を行う(図1(a))。計測した信号レベルが「閾値より大きいとき」にはマシン0を選択すると意思決定し、「小さいとき」はマシン1を選択すると意思決定する。閾値が十分大きいときは計測される信号レベルは閾値より小さくなる場合が多くなり、従って「マシン1」を選択するケースがほとんどとなる。ところが入力信号はカオス時系列のため、時として信号レベルは閾値よりも大きくなることもあり、逆側の「マシン0」を選択することも生じる。このような意思決定における一定の注意深さが、カオスの不確かさによってもたらされることになる。

実験では半導体レーザーと光遅延系により生成したレーザーカオス光を高速にサンプリングし閾値判定のみで意思決定を行う。実験に用いたレーザーカオスの波形を特徴づける量である自己相関の値は、サンプリング間隔(50ピコ秒)において負の最大値を示し、この時間間隔において意思決定性能が最大化した。一様乱数並びに負の自己相関を含むように計算機上で構築するカラーノイズは、レーザーカオスのような高速生成は不可能だが、絶対時間ではなくステップ数として評価しても、カオスの方が優れた適応性能を実現した[Sci. Rep. 2017]。これらにより、カオス時系列が含む時間構造が意思決定性能の向上に寄与することが分かった。

実際の応用に対応するためのスケラビリティの実現は重要な課題である。レーザーカオスからのサンプリングを時間多重化することによるスケラブルな意思決定原理を実証した[Sci. Rep. 2018]。 2^N 個のスロットマシン(N は自然数)から報酬確率の最も高い台を選択する問題を考え、各マシンのIDを2進数で表す。時刻 t_1 でサンプリングした光強度が閾値 TH_1 より大きいときは、選択する台の最上位ビットを0とする。次に時刻 t_2 での光強度が閾値 $TH_{2,0}$ より大きいときは、選択する台の上位から2ビット目を0とする。これを必要なビット数だけ繰り返すことにより最終的に選択する台を決める(図1(b))。選んだ台から得られた報酬に基づいて閾値を更新する。実験では64台までの動作を確認した。

また、擬似周期信号、計算機上で生成したカラーノイズ及び一様乱数を入力時系列として用いると、特に腕数が大きいときには正しい意思決定に至ることが全く出来ていない様子が見られる(図1(c))。このことは、カオス時系列の時間構造が意思決定に影響することを際だつた形で示すものであり、意思決定性能を最大化する不確か信号の存在可能性を示唆している。

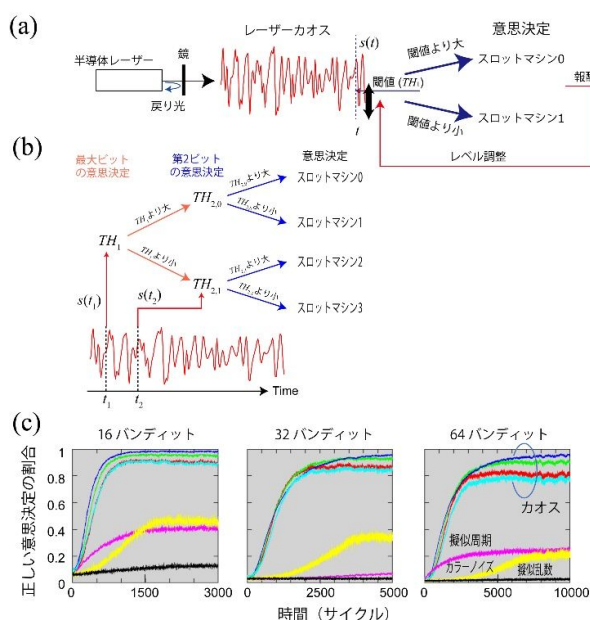


図1 レーザーカオスを用いた超高速意思決定 (a) 基本原理 (b) 時分割多重によるスケラビリティ原理 (c) 性能評価実験 (Sci. Rep. 2018)

(2) ナノ光学による超高集積意思決定

光の波長よりも小さな寸法における光学(近接場光学・ナノ光学)は、高集積性・省エネ性の極限を実現する光技術として期待が高い。実際、研究代表者らは先行研究において量子ドットを用いた近接場光利用型意思決定を示した[J. Appl. Phys. 2014]。しかし、ナノ微粒子の詳細な位置制御など技術的難易度の高さが障壁であることも明らかとなった。そこで本研究では、デバイス側には材料そのものが有している特長だけを要請し、自律的な構造形成が可能なシステムとして、固体状態でフォトクロミズムを示す材料「ジアリールエテン」を用いた光機能の実現を指向した。フォトクロミック材料では、着色状態と透明状態の2状態が光照射によって可逆的に光異性化する。

本研究では、まず、フォトクロミックナノ結晶上の固定の一カ所において近接場光励起による光異性化を確認し[Appl. Phys. A 2017]、その後、近接場光励起を波長寸法より小さな領域内で複数回行うことで、アルファベットのパターンを記録及び消去することに成功した(Sci. Rep. 2018)(図2)。山梨大・龍谷大・NICTより合同プレスリリース(2018年10月4日「アルファベットパターンを光記憶結晶にナノメートルスケールで描画 - 微小な光による意思決定デバイスの実現につながる成果 - 」)を行った。フォトクロミック材料のナノ領域での局所的な可逆的光異性化は意思決定の重要な要素となる。

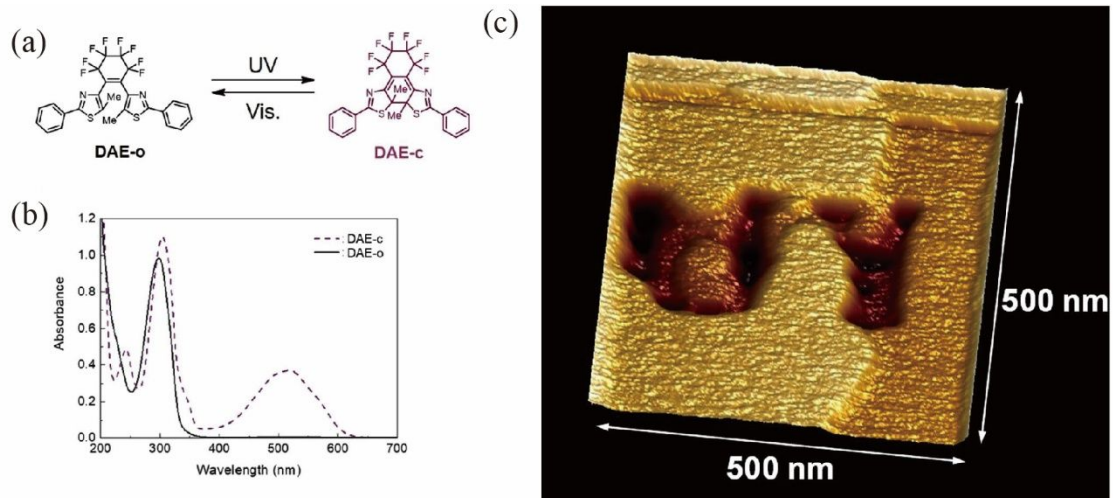


図 2 フォトクロミックナノ結晶表面への近接場光を用いた微細パターンの書き込み及び消去 (Sci. Rep. 2018)

(3) 基盤理論の構築

三角圏による光意思決定システムの構造理解

光を用いた意思決定では、(1)のレーザーカオスや(2)の近接場光に見られる物理プロセス、それらの制御システム、さらに意思決定の対象となる不確実に変化する外部環境という複数の要素が複雑に絡み合っている。これらの全体構造を適切に理解することは、工学的なシステム的设计や最適化に向け不可欠であり、またレーザーカオス及びナノ光学に共通した理論基盤としても重要である。そこで本研究では、対象間の関連性を射として表現する圏論に注目し、光を用いた意思決定の構造分析を進めた。その結果、三角圏における 8 面体図式によって光を用いた意思決定のメカニズムを説明できることを見出し、モデル計算による定量評価を行った (Int. J. Info. Tech. & Decision Making 2019)(図 3)。

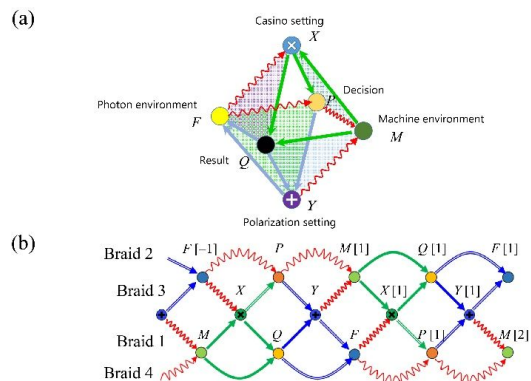


図 3 三角圏による光意思決定システムの構造理解 (Int. J. Info. Tech. & Decision Making 2019)

選択による選好性の偏りの圏論的理解と光システムへの応用

さらに、選択による選好の偏り (Choice-induced preference change / Choice-based learning) と呼ばれる、精神医学や心理学における意思決定で広く知られた現象 (自らが選んだものをより選びやすくなる傾向性) に、圏論から得られた知見を応用し「局所リザーバモデル」と名付けた新たなモデルを構築し実験との整合性を示すことに成功した (Plos ONE 2018)。この結果によれば、人間の意思決定に限らず、物理システムにおいても「局所リザーバ」としての性質があれば、選好性の偏りに相当する現象が生じることを意味する。実際、単一光子を用いたシステムで同様の現象が生じることを数値実験により示した (Plos ONE 2018)。

自然変換を用いた自然系に基づく機能システムの理論

圏論の中核となる概念の一つに自然変換 (Natural transformation) があり、様々な観点からの同一性を厳密に取り扱うことを可能とさせる。光を含めた意思決定を含め、自然現象を活用するシステムには、自然系における状態や状態遷移の豊かさが存在すると思われ、自然系な多様な状態を機能的には同様と指定させる数学的手段の有効性が期待できる。そこで本研究では、自然変換を用いて、自然系に基づく機能システムの基礎付けを行った。

微粒子をゴム状のエンドエフェクタの先端に詰め込んだユニバーサルグリッパーと呼ばれるソフトロボットは、把持対象が如何なる形状であれ、およそミスすることなく掴み取ることができる。ここではソフトロボットは柔らかい媒体を構成する極めて多くの自由度からなり、この点で、無限自由度系としての光との繋がりがある。同様の把持タスクを従来のロボット (ハードロボット) で実現するには、ロボットの個々の関節を把持対象の形状等に応じて極めて精緻に制御することが不可欠である。

従来のハードロボットの理論に関しては、古典制御理論、現代制御理論、モデルベース制御理

論などが整備され、システムアーキテクチャについても様々な研究がなされている。これに対し、ソフトロボットは柔らかな媒体からなり、その構成要素の個別の厳密な統制はおよそ不可能であり、いわば自然系に機能の一部をアウトソースしている。ソフトロボットの特徴を反映した理論的枠組みはほとんど開拓されていない。

そこで本研究では、自然変換を用いて、ユニバーサルグripperを例題に、ソフトロボットの理論的特徴付けを示した。ハードロボットでは「対象を把持する」という目標（あるいは結果）とロボットの姿勢や軌道（謂わばロボットの状態）は毎回ほぼ1対1に対応する。「対象の把持」と「ロボット」が同型（isomorphic）である（図4(a)）。したがって、ロボットの自由度の精密な制御が不可欠である。

これに対しユニバーサルグripperでは、グripper内部の微粒子の配列（ソフトロボットの状態）は自律的に形成されまた毎回異なると考えるべきだが、それでもなお対象の把持は同様に達成される。しかも、対象の形状が異なっても、把持という目標は微粒子の自律的な再配列によって達成される。このような機能構造の特徴づけには、個別要素の厳密な指定を必要とする「同型」の概念は現実的に適応不可能である。微粒子の不均一性や自律的再配列などを含めた多様な状態が「掴む」という事象と対応することを特徴づけなければならない。

ここに自然変換が威力を発揮する。掴むという事象に対して多様な実現形態が存在するが、その実現形態の出現を関手（圏を別の圏に移す射）によって表せば、ソフトロボットとは、出現形態の間の遷移（すなわち関手と関手の間の遷移）を適度に許すことに相当する。関手の間の関連は自然変換と呼ばれる。さらに圏と圏の間の本質的な同一性を示す「圏同値」（Categorical equivalence）によってユニバーサルグripperにおける把持が特徴付けられる（図4(b)）。ハードロボットにおける把持が「同型」に基づいたこととの際だった違いが明らかとなる。実際の理論構築では、自然変換を用いた議論を展開するために、状態をオブジェクト、状態間の遷移を射としたモビリティの圏（Category of mobility）を定義した。また微粒子の配列のモデルを数値的に構築し、対象のスケールを反映した自律的遷移が生じることや、微粒子の寸法が過剰に小さいときには可能な状態遷移が極めて大きくなり定常的状态への収束に時間を要することを示した[Complexity 2019]。このような考察及び結果に圏論的着想なしで到達することは困難だと思われる。

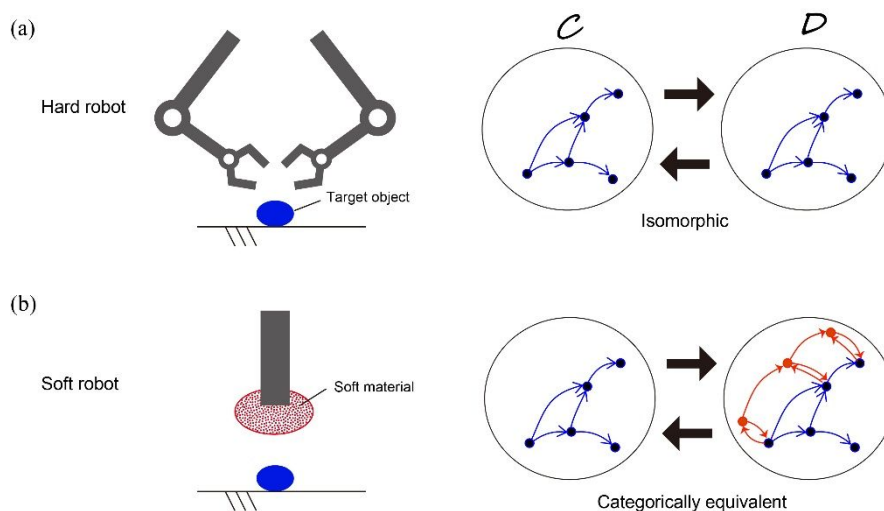


図4 自然変換による自然系に基づく機能システムの基礎付け（Complexity 2019）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 27件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 17件）

1. 著者名 Homma Ryutaro, Kochi Satoshi, Niiyama Tomoaki, Mihana Takatomo, Mitsui Yusuke, Kanno Kazutaka, Uchida Atsushi, Naruse Makoto, Sunada Satoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 On-chip photonic decision maker using spontaneous mode switching in a ring laser	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-45754-3	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 N. Chauvet, D. Jegouso, B. Boulanger, H. Saigo, K. Okamura, H. Hori, A. Drezet, S. Huant, G. Bachelier, and M. Naruse	4. 巻 9
2. 論文標題 Entangled-photon decision maker	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-48647-7	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 Naruse Makoto, Matsubara Takashi, Chauvet Nicolas, Kanno Kazutaka, Yang Tianyu, Uchida Atsushi	4. 巻 9
2. 論文標題 Generative adversarial network based on chaotic time series	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12963
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-49397-2	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 Mihana Takatomo, Mitsui Yusuke, Takabayashi Mizuho, Kanno Kazutaka, Sunada Satoshi, Naruse Makoto, Uchida Atsushi	4. 巻 27
2. 論文標題 Decision making for the multi-armed bandit problem using lag synchronization of chaos in mutually coupled semiconductor lasers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 26989 ~ 26989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.026989	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 Kitayama Ken-ichi, Notomi Masaya, Naruse Makoto, Inoue Koji, Kawakami Satoshi, Uchida Atsushi	4. 巻 4
2. 論文標題 Novel frontier of photonics for data processing - Photonic accelerator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 090901 ~ 090901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5108912	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 Northoff Georg, Tsuchiya Naotsugu, Saigo Hayato	4. 巻 21
2. 論文標題 Mathematics and the Brain: A Category Theoretical Approach to Go Beyond the Neural Correlates of Consciousness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 1234 ~ 1234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e21121234	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 該当する

1. 著者名 Naruse Makoto, Chauvet Nicolas, Uchida Atsushi, Drezet Aurelien, Bachelier Guillaume, Huant Serge, Hori Hirokazu	4. 巻 26
2. 論文標題 Decision Making Photonics: Solving Bandit Problems Using Photons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSTQE.2019.2929217	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Niiyama Tomoaki, Furuhashi Genki, Uchida Atsushi, Naruse Makoto, Sunada Satoshi	4. 巻 89
2. 論文標題 Lotka-Volterra competition mechanism embedded in a decision-making method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 014801 ~ 014801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.014801	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Takeuchi Shungo, Hasegawa Mikio, Kanno Kazutaka, Uchida Atsushi, Chauvet Nicolas, Naruse Makoto	4. 巻 10
2. 論文標題 Dynamic channel selection in wireless communications via a multi-armed bandit algorithm using laser chaos time series	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-58541-2	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 Uchiyama Kazuharu, Suzui Hirotsugu, Nakagomi Ryo, Saigo Hayato, Uchida Kingo, Naruse Makoto, Hori Hirokazu	4. 巻 10
2. 論文標題 Generation of Schubert polynomial series via nanometre-scale photoisomerization in photochromic single crystal and double-probe optical near-field measurements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-59603-1	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 M. Naruse, M. Berthel, H. Hori, A. Drezet, and S. Huant	4. 巻 13
2. 論文標題 Experimental demonstration of random walk by probability chaos using single photons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 042006 ~ 042006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab7bf8	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Naruse Makoto, Mihana Takatomo, Hori Hirokazu, Saigo Hayato, Okamura Kazuya, Hasegawa Mikio, Uchida Atsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Scalable photonic reinforcement learning by time-division multiplexing of laser chaos	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10890
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-29117-y	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 Naruse Makoto, Kim Song-Ju, Aono Masashi, Berthel Martin, Drezet Aur?lien, Huant Serge, Hori Hirokazu	4. 巻 17
2. 論文標題 Category Theoretic Analysis of Photon-Based Decision Making	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Information Technology & Decision Making	6. 最初と最後の頁 1305 ~ 1333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0219622018500268	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Nakagomi Ryo, Uchiyama Kazuharu, Suzui Hirotsugu, Hatano Eri, Uchida Kingo, Naruse Makoto, Hori Hirokazu	4. 巻 8
2. 論文標題 Nanometre-scale pattern formation on the surface of a photochromic crystal by optical near-field induced photoisomerization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-32862-9	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 Naruse Makoto, Yamamoto Eiji, Nakao Takashi, Akimoto Takuma, Saigo Hayato, Okamura Kazuya, Ojima Izumi, Northoff Georg, Hori Hirokazu	4. 巻 13
2. 論文標題 Why is the environment important for decision making? Local reservoir model for choice-based learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0205161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0205161	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 該当する

1. 著者名 Naruse Makoto, Ishii Satoshi, Motte Jean-Francois, Drezet Aur?lien, Huant Serge, Hori Hirokazu	4. 巻 12
2. 論文標題 Unidirectional light transmiission by two-layer nanostructures interacting via optical near-fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 022007 ~ 022007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/aafca0	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Saigo Hayato, Naruse Makoto, Okamura Kazuya, Hori Hirokazu, Ojima Izumi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Analysis of Soft Robotics Based on the Concept of Category of Mobility	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Complexity	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2019/1490541	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 成瀬 誠、内田淳史、S. Huant	4. 巻 33
2. 論文標題 光を用いた意思決定 - バンディット問題を光で解く -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 人工知能	6. 最初と最後の頁 592~599
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Naruse Makoto, Terashima Yuta, Uchida Atsushi, Kim Song-Ju	4. 巻 7
2. 論文標題 Ultrafast photonic reinforcement learning based on laser chaos	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8772~8772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-08585-8	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 Mihana Takatomo, Terashima Yuta, Naruse Makoto, Kim Song-Ju, Uchida Atsushi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Memory Effect on Adaptive Decision Making with a Chaotic Semiconductor Laser	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Complexity	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2018/4318127	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 K. Kuroda, H. Kato, S. J. Kim, M. Naruse, M. Hasegawa	4. 巻 9
2. 論文標題 Improving throughput using multi-armed bandit algorithm for wireless LANs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 74 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.9.74	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Nakagomi Ryo, Uchiyama Kazuharu, Kubota Satoru, Hatano Eri, Uchida Kingo, Naruse Makoto, Hori Hirokazu	4. 巻 124
2. 論文標題 Nano-optical functionality based on local photoisomerization in photochromic single crystal	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 10 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00339-017-1431-2	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Akimoto Ryota, Handa Hiroaki, Shindo Satoshi, Sutou Yuji, Kuwahara Masashi, Naruse Makoto, Saiki Toshiharu	4. 巻 25
2. 論文標題 Implementation of pulse timing discriminator functionality into a GeSbTe/GeCuTe double layer structure	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 26825 ~ 26825
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.25.026825	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 Naruse Makoto, Aono Masashi, Kim Song-Ju, Saigo Hayato, Ojima Izumi, Okamura Kazuya, Hori Hirokazu	4. 巻 2
2. 論文標題 Category Theory Approach to Solution Searching Based on Photoexcitation Transfer Dynamics	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Philosophies	6. 最初と最後の頁 16 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/philosophies2030016	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 Kubota Akihiro, Hori Hirokazu, Naruse Makoto, Akiba Fuminori	4. 巻 2
2. 論文標題 A New Kind of Aesthetics - The Mathematical Structure of the Aesthetic	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Philosophies	6. 最初と最後の頁 14 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/philosophies2030014	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 D' Acunto Mario, Fuso Francesco, Micheletto Ruggero, Naruse Makoto, Tantussi Francesco, Allegrini Maria	4. 巻 8
2. 論文標題 Near-field surface plasmon field enhancement induced by rippled surfaces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Beilstein Journal of Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 956 ~ 967
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3762/bjnano.8.97	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Takahashi Taiki, Kim Song-Ju, Naruse Makoto	4. 巻 130
2. 論文標題 A note on the roles of quantum and mechanical models in social biophysics	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress in Biophysics and Molecular Biology	6. 最初と最後の頁 103 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pbiomolbio.2017.06.003	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計41件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 M. Naruse, N. Chauvet, A. Uchida, S. Huant, H. Hori
2. 発表標題 Decision Making by Photons
3. 学会等名 Conference Proceedings of The 1th International Conference on Multimedia Information Technology and Applications (MITA2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Chauvet, M.Cornny, G. Laurent, A. Drezet, G. Nogues, G. Dantelle, T.Gacoin, A. Uchida, H. Hori, S. Huant, G. Bachelier, and M. Naruse
2. 発表標題 Single hybrid plasmonic structures for efficient photon pair production at the nanoscale
3. 学会等名 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yamasaki, K. Kanno, A. Matsumoto, M. Naruse, N. Yamamoto, and A. Uchida
2. 発表標題 Experimental investigation of nonlinear dynamics and bifurcation in a quantum-dot laser with optical feedback
3. 学会等名 Frontiers in Optics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Mihana, Y. Mitsui, M. Takabayashi, K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2. 発表標題 Decision making using lag synchronization of chaos in mutually-coupled semiconductor lasers
3. 学会等名 Frontiers in Optics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高林 瑞穂、三井 湧方、巳鼻 孝朋、菅野 円隆、成瀬 誠、内田 淳史
2. 発表標題 相互結合された半導体レーザーの遅延カオス同期を用いた意思決定実験
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王 允卓、中村文彦、志賀信泰、安田 哲、Nicolas Chauvet、成瀬 誠
2. 発表標題 時刻同期を用いた単一ワードアービトレーション光ネットワーク
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田 章裕、巴鼻 孝朋、岩見 龍吾、菅野 円隆、成瀬 誠、内田 淳史
2. 発表標題 動的当たり確率の多腕バンディット問題におけるレーザカオスを用いた意思決定方式の性能向上
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩見 龍吾、巴鼻 孝朋、小田 章裕、菅野 円隆、成瀬 誠、内田 淳史
2. 発表標題 マルチモード半導体レーザのモード競合ダイナミクスを用いた多腕バンディット問題における意思決定
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本 敦、赤羽 浩一、山崎 和人、菅野 円隆、山本 直克、堀 裕和、成瀬 誠、内田 淳史
2. 発表標題 量子ドットレーザを用いた戻り光によるカオス生成におけるヒステリシス現象の観測
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Chauvet, A. Uchida, H. Hori, A. Drezet, S. Huant, G. Bachelier, and M. Naruse
2. 発表標題 Entangled Photons, a New Resource for Social Decision Making
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原 紳介、重 鋭冰、松本 敦、笠松 章史、伊藤 浩之、関根 かをり、成瀬 誠
2. 発表標題 超高速意思決定に向けたシリコンCMOS高速履歴記憶の回路設計
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴井 沈胤、内山 和治、中込 亮、河野 瑠菜、内田 欣吾、成瀬 誠、堀 裕和
2. 発表標題 フォトクロミック単結晶薄膜における開環体-閉環体境界の動的形成の解明
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成瀬 誠、N. Chauvet、S. Huant、砂田 哲、内田淳史、長谷川 幹雄、堀 裕和
2. 発表標題 光を用いた意思決定メカニズム
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会(MIKA) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Naruse, N. Chauvet, S. Sunada, K. Uchiyama, K. Uchida, M. Hasegawa, A. Uchida, and H. Hori
2. 発表標題 Decision Making based on Photonics
3. 学会等名 第4回JSAPフォトニクスワークショップ「光の新時代を切り拓く!!」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Sunada, A. Uchida, and M. Naruse
2. 発表標題 Photonic machine learning with microcavities
3. 学会等名 The 6th International Workshop on Microcavities and Their Applications (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kochi, T. Niiyama, A. Uchida, M. Naruse, and S. Sunada
2. 発表標題 Optimal complex dynamics for solving multi-armed bandit problems using chaotic time series
3. 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2019)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2. 発表標題 Adaptive selection of dynamical models based on decision making in laser-based reservoir computing
3. 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2019)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Mihana, K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2 . 発表標題 Laser network for lag synchronization of chaos and decision making
3 . 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Oda, T. Mihana, K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2 . 発表標題 Decision making for multi-armed bandit problem with variable hit probabilities using chaotic laser signals
3 . 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Takabayashi, Y. Mitsui, T. Mihana, K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2 . 発表標題 Experiment on decision making using lag synchronization of chaos in mutually-coupled semiconductor lasers with time delay
3 . 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Narisawa, N. Chauvet, M. Hasegawa, and M. Naruse
2 . 発表標題 Order recognition in multi-armed bandit problem with chaotic laser time series
3 . 学会等名 The 8th Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Takeuchi, M. Naruse, K. Kanno, A. Uchida, and M. Hasegawa
2. 発表標題 Channel selection in wireless communications by multi-armed bandit algorithm using chaotic time series
3. 学会等名 The 8th Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Koyama, N. Shiga, S. Yasuda, N. Chauvet, and M. Naruse
2. 発表標題 Information network using precision time synchronization via wireless interferometry: delay tolerance and skew evaluations
3. 学会等名 The 8th Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Naruse, N. Chauvet, S. Huant, S. Sunada, A. Uchida, and H. Hori
2. 発表標題 Decision making using classical and quantum light
3. 学会等名 AI and Optical Data Science conference, SPIE Photonics West (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 巳鼻孝朋、藤井聖広、菅野円隆、成瀬 誠、内田淳史
2. 発表標題 一方向リングレーザーネットワークにおける遅延カオス同期と意思決定
3. 学会等名 レーザー学会第541回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩見龍吾、巳鼻孝朋、菅野円隆、成瀬 誠、内田淳史
2. 発表標題 戻り光を有するマルチモード半導体レーザーにおけるモード競合ダイナミクスと意思決定への応用
3. 学会等名 レーザー学会第541回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河内聡志、新山友暁、内田淳史、成瀬 誠、砂田 哲
2. 発表標題 多本腕バンディット問題における最良選択に対する複雑ダイナミクスの効果
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小田章裕、巳鼻孝朋、成瀬 誠、内田淳史
2. 発表標題 非正常な報酬確率のバンディット問題における半導体レーザカオスを用いた意思決定
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 巳鼻孝朋、藤井聖広、菅野円隆、成瀬 誠、内田淳史
2. 発表標題 綱引き理論に基づく半導体レーザネットワークを用いた意思決定
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴井 洸胤、内山 和治、中込 亮、河野 瑠菜、内田 欣吾、成瀬 誠、堀 裕和
2. 発表標題 フォトクロミック単結晶薄膜における開環体-閉環体境界の動的形成
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎和人、菅野円隆、松本 敦、成瀬 誠、山本直克、内田淳史
2. 発表標題 戻り光を付加された量子ドットレーザーのダイナミクス実験
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Naruse, N. Chauvet, D. Jegouso, A. Uchida, H. Hori, A. Drezet, B. Boulanger, S. Huant, and G. Bachelier
2. 発表標題 Decision Making by Classical and Quantum Light
3. 学会等名 15th international conference of Near-field Optics and Nanophotonics (NF0-15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Hori, M. Naruse
2. 発表標題 Category Theory of Decision Making
3. 学会等名 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Takeuchi, M. Naruse, T. Mihana, K. Kanno, A. Uchida, M. Jing, M. Hasegawa
2. 発表標題 Dynamical channel selection in wireless communications by multi-armed bandit algorithm using chaotic time series
3. 学会等名 7th Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication Sciences (JKCCS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成瀬 誠、内田淳史、S. Huant、堀 裕和
2. 発表標題 光を用いた意思決定
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Naruse, A. Uchida, and S.-J Kim
2. 発表標題 Decision Making by Photonics
3. 学会等名 12th IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Naruse, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, H. Hori, and S.-J. Kim
2. 発表標題 Decision making by photonics: experiment and category theoretic foundation
3. 学会等名 Unconventional Computation and Natural Computation 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Naruse, T. Nakao, H. Hori, E. Yamamoto, T. Akimoto, and G. Northoff
2. 発表標題 Local reservoir modeling for choice-based learning of internally- and externally-guided decision making
3. 学会等名 11th International Workshop on Natural Computing (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 堀 裕和 (分担執筆)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 近代科学社	5. 総ページ数 336
3. 書名 23の先端事例がつなく計算科学のフロンティア 第22章	

1. 著者名 成瀬 誠 (分担執筆)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 近代科学社	5. 総ページ数 336
3. 書名 23の先端事例がつなく計算科学のフロンティア 第23章	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 解探索システム及び方法	発明者 成瀬誠、内田淳史	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、037643	出願年 2018年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 モデル選択装置、及びモデル選択方法	発明者 成瀬誠、菅野円隆、 内田敦史	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、118755	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Makoto Naruse Web Site
<https://sites.google.com/site/makotonaruseweb/>
 東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻成瀬研究グループ
<http://www.inter.ipc.i.u-tokyo.ac.jp/>

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	堀 裕和 (Hori Hirokazu) (10165574)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	
研究分担者	内山 和治 (Uchiyama Kazuharu) (70538165)	山梨大学・大学院総合研究部・助教 (13501)	
研究分担者	西郷 甲矢人 (Saigo Hayato) (80615154)	長浜バイオ大学・バイオサイエンス学部・准教授 (34204)	
研究分担者	松本 敦 (Matsumoto Atsushi) (30580188)	国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム 研究所ネットワーク基盤研究室・研究員 (82636)	
研究分担者	岡村 和弥 (Okamura Kazuya) (90725178)	名古屋大学・情報学研究科・特任助教 (13901)	平成31年4月1日より削除

6. 研究組織（つづき）

	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	金 成主 (Kim Song-Ju) (30455456)	慶應義塾大学・政策・メディア研究科・特任准教授 (32612)	平成30年4月1日より削除
研究 分担者	赤羽 浩一 (Akahane Kouichi) (50359072)	国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム 研究所ネットワーク基盤研究室・主任研究員 (82636)	平成30年4月1日より削除