

令和 6 年 4 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K21269

研究課題名（和文）レーザネットワークに基づく自律的競合回避メカニズムの創成と協調的意思決定への応用

研究課題名（英文）Creation of autonomous conflict-free mechanism and cooperative decision-making using laser network

研究代表者

巳鼻 孝朋（Mihana, Takatomo）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号：30963277

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、提案者が先駆的業績を有する半導体レーザネットワークにおいて、遅延カオス同期とゼロ遅延同期という2つの同期現象を利用することで、協調的意思決定システムの考案及び実証に至った。さらに、ネットワーク理論とカオス理論を用いることで理論的に競合回避を可能とするレーザネットワークの構築方法の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今までレーザネットワークのダイナミクスや性質を調査する研究はセキュリティへの応用のために行われてきたが、意思決定や機械学習の進展により、再度、応用の視点を持った調査研究が必要であることを十分に示した。一方で、今まで協調的意思決定は量子システムでの考案にとどまっていたため、本研究のような実証まで行えた例はない。協調的意思決定を必要としている通信分野への展開は、「光情報は光で処理する」という光アクセラレータを体現する応用が見えており、欧米で電子AIアクセラレータが考えられている中で重要な社会的意義のある研究であるといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we devised and demonstrated a collaborative decision-making system that utilizes two synchronization phenomena, lag-synchronization of chaos, and zero-lag synchronization, in semiconductor laser networks. Furthermore, we proposed a method for constructing a laser network that theoretically enables collision avoidance using network and chaos theory.

研究分野：レーザカオス

キーワード：レーザネットワーク 意思決定 強化学習 同期現象 レーザカオス

1. 研究開始当初の背景

近年、多くのコンピュータを接続するクラウドコンピューティングを用いた大規模コンピューティングが進展しているが、即時的な処理には適していない。そこでエッジ・フォグコンピューティングに見られる小規模コンピューティングが注目されている。大規模コンピューティングに比べ低遅延である一方で、CPUの処理能力は劣る。したがって、CPUだけでなくGPUやFPGAのような外部電子アクセラレータの利用が高まっている。このような外部電子アクセラレータに対し、光の特徴を生かす光アクセラレータの研究が行われている[1]。特に光の高速性や波長・空間多重性は電子アクセラレータに対する利点として挙げられる。

光アクセラレータの中で、光を用いた多腕バンディット問題に対する意思決定が提案されている。多腕バンディット問題は、プレーヤが複数台のロットマシンから報酬を最大化する問題である。光アクセラレータとして単一光子を用いた意思決定[2]では、ビームスプリッタから分岐する単一光子が水平方向と垂直方向のどちらの検出器で観測されるかでロットマシンを選択する。また、ビームスプリッタをトーナメント上に配置することで多くのロットマシンへの対応がなされている。さらに、競合バンディット問題の解決が行われている。競合バンディット問題では複数人のプレーヤが多腕バンディット問題を解決する。ただし、数人のプレーヤが同じロットマシンを選択した場合にはそれらのプレーヤの報酬は山分けとなる。したがってプレーヤ間の競合を回避しながら、協調的に報酬最大化を目指す必要がある。特に競合バンディット問題は無線チャネルへの割り当てやペアリングの Beyond 5G における通信の問題から帰着されるため、重要性が高まっている。この問題の解決に関し、軌道角運動量を有する光子とその量子干渉を用いる手法[3]が提案されている。軌道角運動量によるシステムは、光の物理現象を直接に活用した光アクセラレータとなり、競合を回避した制御という機能を提供している。ただし、光の量子性を前提とし、光の生成系及び検出系に関し現状では多大なコストを必要とし実用には困難が伴う。

本研究では、このような競合を回避する光システムとして、半導体レーザネットワークにおける2つの同期現象に新たに着目する。その1つは、一方のレーザが他方のレーザに遅れて同期する遅延カオス同期[4]である。相互結合された半導体レーザでは、先行振動するレーザが自発的にスイッチングすることが知られている。提案者は、遅延カオス同期をバンディット問題における選択と探索と結びつけ、その解決に理論及び実験の両面で世界に先駆け成功した[5,6]。ただし、競合回避のためには新たなメカニズムが必要である。そこで本研究では、ゼロ遅延同期[7]に注目する。半導体レーザネットワークの構成により、半導体レーザは部分的に遅延時間ゼロで同期する。この2種類の同期(遅延同期とゼロ遅延同期)を組み合わせることで、競合を回避する新たな光システムの構築が可能であると考えられる。これにより、光の量子性の利用で不可欠なハイエンドな実現技術を用いることなく、成熟した集積化光技術を新たな形で活用することで光アクセラレータとしての高度な機能の実現が期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究では、半導体レーザネットワークを用いた競合を回避する協力的光システムの創成と意思決定への応用を目的とする。より具体的には、まず、競合回避を行うスケーラブルな半導体レーザネットワークの構築を行う。そして、この半導体レーザネットワークを用いた競合バンディット問題に対する意思決定を行う。

3. 研究の方法

(1) 競合回避を行うスケーラブルな半導体レーザネットワークの構築

まず、本研究では競合を回避できる光システムとして半導体レーザネットワークの構築を行う。ネットワーク構造の一般化と理論基盤構築、数値計算による検証、実験による実証、による3つのステップで構成する。

(1)- 隣接行列に基づいた半導体レーザネットワークの同期理論の一般化

半導体レーザネットワークの同期状態は、ネットワーク構造を規定する隣接行列により判定することができる。提案者はこれまでに「リング型」のネットワークにおけるレーザの同期現象の理論と実験を示してきた[6]。本研究では複数プレーヤの選択を考量するため、レーザネットワークの構造の一般化が不可欠である。まず、プレーヤとロットマシンの台数が同じである正

方な場合を考え、次に、スロットマシンの台数が多い場合へと発展させていく。正方形でない半導体レーザネットワークについては、理論上の一般化は可能と見込んでいるが、(1)- 及び(1)- において過剰なリソースを伴う可能性があり、工学的実現性を見極めながら議論を進捗させる。

(1)- 数値計算による半導体レーザネットワークの検証

上記(1)- のネットワーク構築の一般化により得られた半導体レーザネットワークを数値計算により検証する。検証項目として、ネットワーク構築が所望の同期状態であるかの確認だけでなく、構築したネットワークの結合が同期状態にどのような影響を与えるかを調査する。結果を(1)- に帰還し、必要に応じてネットワーク構築の一般化の理論の修正する。

(1)- 実験による半導体レーザネットワークの実証

半導体レーザネットワークを実際に実験的に構築し、光デバイスを用いた実証を行う。本実験では、半導体レーザの個体差や光コンポーネントの非対称性が同期状態に影響する可能性がある。提案原理の実証を明確化するため、光部品のキャリブレーションに十分な注意するとともに、明確に異なる複数種類の同期状態の実証を完遂する。

(2) 半導体レーザネットワークによる競合バンディット問題の解決

競合を回避する光システムを半導体レーザネットワークで構築した後、光アクセラレータの応用への展開として競合バンディット問題の解決を行う。問題解決では、数値計算による検証と実験による実証の2ステップで構成する。

(2)- 数値計算による問題解決への検証

競合回避する制御光システムの応用として、半導体レーザネットワークを用いた競合バンディット問題への解決を行う。ソフトウェアアルゴリズムでは初期状態においてプレイヤーの選択はランダムであるが、本システムを用いることで、初期状態においても競合回避が働くため、総報酬最大化に対して大きな利点を有していると考えられる。また、問題解決のためのソフトウェアアルゴリズムの負担を低減させたとき、半導体レーザネットワークが光アクセラレータとしてどこまで機能できるのかを調査する。

(2)- 実験による問題解決への実証

競合バンディット問題への解決を実験により実証する。特に2プレイヤー及び2台のスロットマシンよりも大きなサイズの競合バンディット問題においては、光システムの実証実験が行われていないため、大規模問題の解決はインパクトが大きい。本研究では、サイズの拡大を見据えた実験実装を行う。

4. 研究成果

本研究の初年度では、2プレイヤー2台における意思決定手法について研究を行った。まず、図1に示されるレーザネットワークにおいて数値計算を行った。このレーザネットワークは想定通り競合回避を達成できることが分かった。今までの意思決定システムでは結合強度を変化させることで知識利用を行うことができたが、本レーザネットワークでは結合強度変化により、レーザネットワークにおけるゼロ遅延同期が破壊される恐れがあった。しかしながら、2つの結合強度を同時に操作することで競合回避を維持しながらもそれぞれのレーザが先行振動する確率を制御できることが分かった。一方で、このレーザネットワークにおけるパラメータ偏差による影響を調査すると、微量の偏差が生まれることで競合回避が成されなくなっていくことが示された。さらに、多体化へ向けて数値計算を進めると、3プレイヤー3台の競合バンディット問題に対

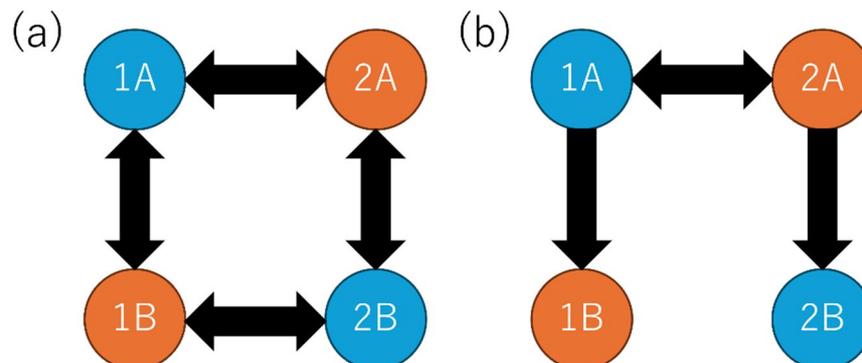


図1. 研究当初に考案されたレーザネットワーク

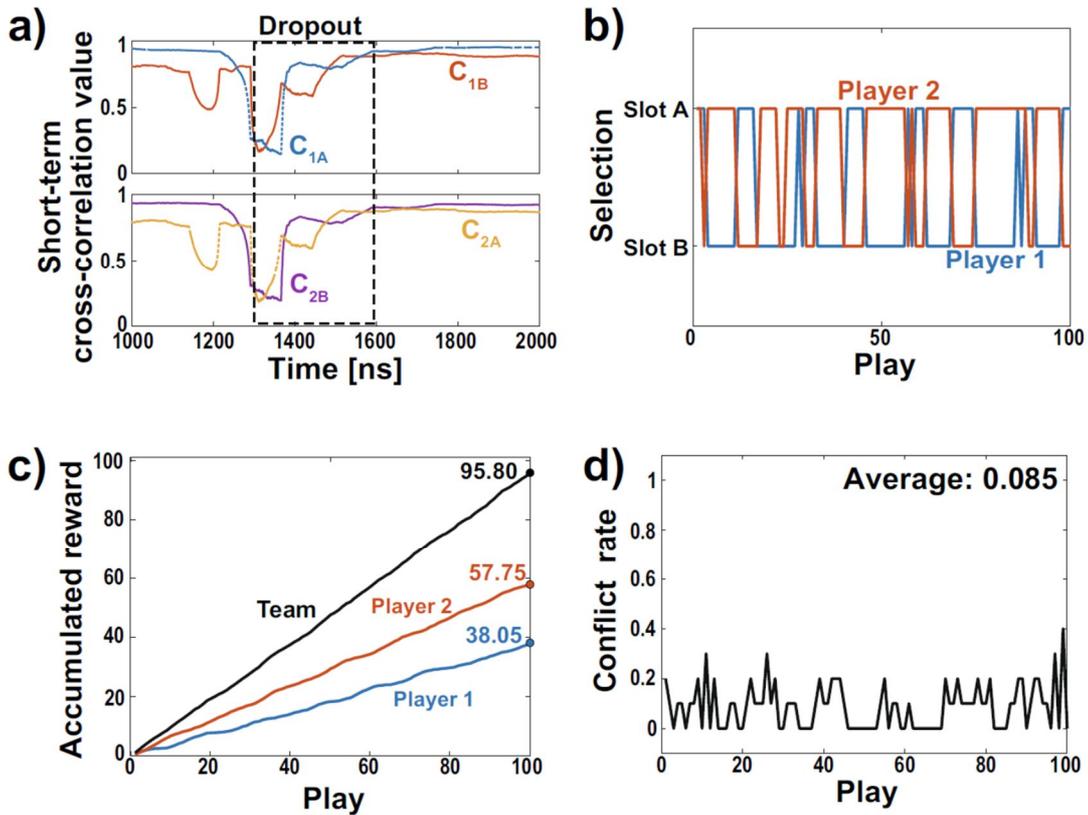


図2. 図1(b)のネットワークによる協力的意思決定実験結果[8]

しては、複数のレーザネットワークが達成可能であることが分かった。

これらの結果から、競合回避可能なレーザネットワークの構築と意思決定への実験を行った。しかしながら、図1(a)に示すレーザネットワークでは十分な競合回避機能を示すことができなかった。これは、レーザネットワークにおける8本のパスが等しいことがゼロ遅延同期達成に要請されるため、一般的なファイバコンポーネントでは合わせる事が困難なためであった。しかしながら、新たに、図1(b)4本のパスで構成される競合回避可能なレーザネットワークを発見した。この場合、各レーザが受ける入力パスが必ず1本となるため、原理検証が成功した。図2には実験により得られた競合回避の結果を示している。2プレイヤーはゼロ遅延同期とリーダー・ラガード関係により図2(b)に示す、競合選択の回避が行われている。厳密にすべてのパラメータを一致することはできなかったため、10%弱の競合が生じているが、2プレイヤーが無関係にランダムで選択した場合が50%の競合であるため、レーザネットワークシステムにより競合回避が十分に働いているといえる[8]。

これらの意思決定の結果の一方で、実験を行ったレーザネットワークはあくまで発見的に見つかっただけであり、理論的に競合回避機能を有するレーザネットワークを見つけることはしていなかった。そこで、ネットワーク理論とカオス理論から競合回避機能を有するレーザネットワークの構築手法を提案した。まず、2プレイヤー2台のスロットマシンの場合、4台の半導体レ

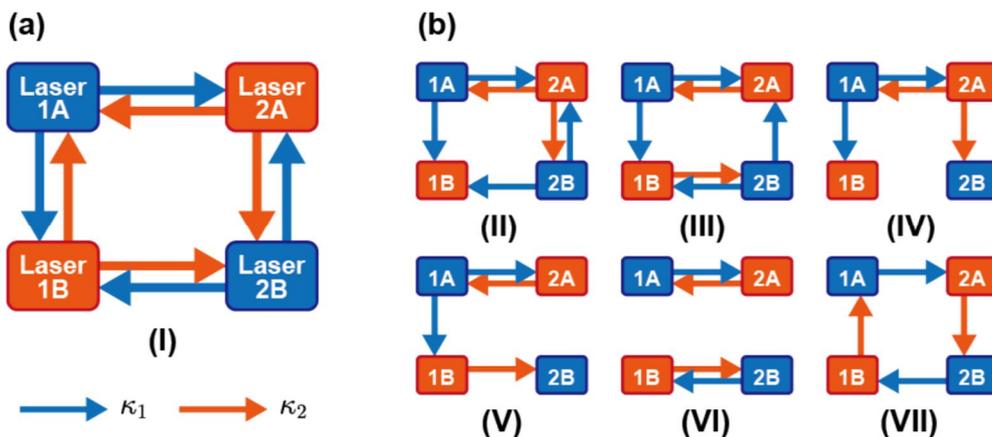


図3. 競合回避の可能性のある4台のレーザネットワーク[9]

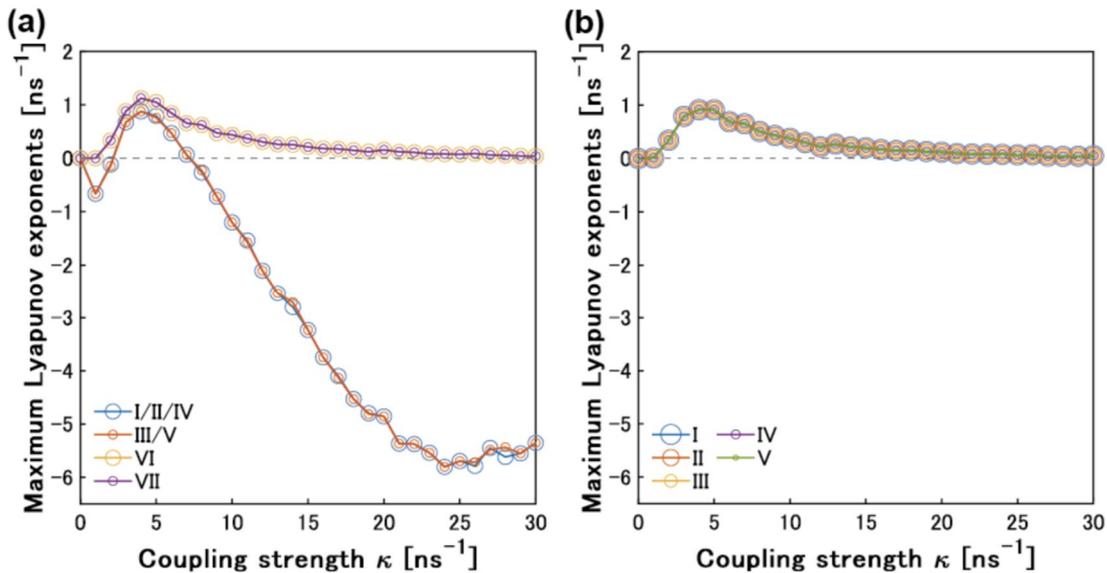


図 2. 競合回避の可能性がある 4 台のレーザネットワーク [9]

ーザ(Laser 1A, 1B, 2A, 2B とする)が必要となる。ここで、レーザネットワークの議論では、各レーザのパラメータは同じとし、結合させるファイバはすべて同じ長さ・結合強度とすることで、有向グラフにおけるネットワーク理論に落とし込むことができる。その中で、Laser 1A-2B と Laser 1B-2A の組がゼロ遅延同期を起こすことができれば、リーダー・ラガード関係を満たす発振すれば、競合回避が達成される。これを達成できるレーザネットワークは組となっている光入力力が同じであればよい。ここでは、組同士が同じ発振をすると仮定してレーザネットワークを組み上げると、図 2 のネットワークに限られる。しかしながら、ネットワーク (VI) のように 2 つのネットワークに分断されている場合、ゼロ遅延同期が達成されるとはいえない。(ただし、すべてのレーザの初期状態が全く同じであれば達成される。)そこでカオス理論におけるリアプノフ指数に着目した。リアプノフ指数は初期状態から微小に離れた別の初期状態を用意し、これが元の軌道に戻ってくるのか(リアプノフ指数は負)、離れていく(リアプノフ指数は正=カオス)のかを数的に判断し、その系がカオスであるかどうかを判断する手法である。今回は各組の 2 つレーザの軌道差を系とみなすことで、各組のレーザがゼロ遅延同期を安定的に達成できるか(最大条件付きリアプノフ指数)を調査した。最大条件付きリアプノフ指数はリアプノフ指数が負の場合に安定的な同期を達成でき、正の場合には同期が達成されないことを示す。図 3(a)は 7 つのレーザネットワークにおける最大条件付きリアプノフ指数を示している。ネットワーク (I)-(V) に対して結合強度が小さい場合には同期が達成されないが、結合強度が大きくなることで同期が達成することがわかる。一方でネットワーク (VI)・(VII) はどの結合強度においても同期が達成できないことが分かった。さらに、各ネットワークではすべてのレーザが同期してしまう可能性が考えられる。これについても最大条件付きリアプノフ指数を調査すると図 3(b) のようになる。最大条件付きリアプノフ指数が正であることから、すべてのレーザが同期することは無いことが分かった。したがって、ネットワーク (I)-(V) が 2 プレーヤ 2 台のスロットマシンにおける競合回避を達成できるレーザネットワークであることが分かった [9]。この最大条件付きリアプノフ指数の手法は任意の場合でも確認できる手法であり、様々な競合回避を必要とするバンディット問題に対して適応できる。

以上より、半導体レーザネットワークを用いた競合を回避する協力的光システムの創成と意思決定を達成し、レーザネットワークによる協調的意思決定の基盤が構築された。

参考文献

- [1] K. Kitayama, et al., APL Photonics, Vol. 4, pp. 090901 (2019).
- [2] M. Naruse, et al., Sci. Rep., Vol. 5, Article no. 13253 (2015).
- [3] T. Amakasu, et al., Sci. Rep., Vol. 11, Article no. 21117 (2021).
- [4] T. Heil, et al., Phys. Rev. Lett., Vol. 86, pp.795 (2001).
- [5] T. Mihana, et al., Opt. Exp., Vol. 27, No. 19, pp. 26989-27008 (2019).
- [6] T. Mihana, et al., Opt. Exp., Vol. 28, No. 26, pp. 40112-40130 (2020).
- [7] M. Nixon, et al., Phys. Rev. Lett. Vol. 106, pp. 223901 (2011).
- [8] H. Ito, et al., Sci. Rep., Vol. 14, Article no. 4355 (2024).
- [9] S. Kotoku, et al., Opt. Exp., Vol. 32, No. 8, pp. 14300-14320 (2024).

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 Ito Hisako, Mihana Takatomo, Horisaki Ryoichi, Naruse Makoto	4. 巻 14
2. 論文標題 Conflict-free joint decision by lag and zero-lag synchronization in laser network	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-024-54491-1	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 Kotoku Shun, Mihana Takatomo, Roehm Andre, Horisaki Ryoichi, Naruse Makoto	4. 巻 32
2. 論文標題 Asymmetric leader-laggard cluster synchronization for collective decision-making with laser network	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 14300 ~ 14300
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.515261	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9件（うち招待講演 4件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 巳鼻 孝朋
2. 発表標題 レーザネットワークの同期現象を用いた瞬時情報処理担体と意思決定
3. 学会等名 日本学術会議公開シンポジウム 光がもたらす未来社会～IC0の新たな発展に向けて～（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神徳 駿、巳鼻 孝朋、レーム アンドレ、堀崎 遼一、成瀬 誠
2. 発表標題 レーザネットワークによる協調的意思決定系における選択の非対称化
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Ito, T. Mihana, R. Horisaki, and M. Naruse
2. 発表標題 Experimental Demonstration of Conflict-Free Joint Decision by Laser Network
3. 学会等名 2023 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 巳鼻 孝朋
2. 発表標題 レーザー光のカオス的狀態を用いた光意思決定
3. 学会等名 第169回微小光学研究会 「光コンピューティングの新たな潮流」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神徳 駿、巳鼻 孝朋、レーム アンドレ、堀崎 遼一、成瀬 誠
2. 発表標題 レーザーネットワーク協調的意思決定系のためのクラスタ同期安定性解析
3. 学会等名 第583回レーザー学会研究会「自然に学ぶレーザーカオスと量子ダイナミクス」
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤 向子、巳鼻 孝朋、レーム アンドレ、堀崎 遼一、成瀬 誠
2. 発表標題 レーザーネットワークのゼロ遅延同期を用いた協力的意思決定実験
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 巳鼻 孝朋, アンドレレーム, 菅野 円隆, 内田 淳史, 堀崎 遼一, 成瀬 誠
2. 発表標題 レーザーネットワークによる瞬時情報処理担体の構築と応用
3. 学会等名 電子情報通信学会2023年総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 巳鼻 孝朋, レーム アンドレ, 堀崎 遼一, 菅野 円隆, 内田 淳史, 成瀬 誠
2. 発表標題 瞬時情報処理担体としてのレーザーネットワークとそのコンピューティング応用
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2022 (OPJ2022) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神徳 駿, 巳鼻 孝朋, Roehm Andre, 堀崎 遼一, 菅野 円隆, 内田 淳史, 成瀬 誠
2. 発表標題 レーザーネットワークのゼロ遅延同期を用いた協調的意思決定メカニズム
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022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
---------	---------