

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01106

研究課題名（和文）誤り許容・高バンド幅の光通信を用いた不確実容認コンピューティング

研究課題名（英文）Uncertainty Tolerant Computing using Error-Prone High-Bandwidth Optical Communication

研究代表者

鯉渕 道紘 (Koibuchi, Michihiro)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号：40413926

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,860,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、不確実容認計算機システムにより、近似計算の実行性能を大幅に向上させることを目的に実施した。成果は、不確実容認計算機システムの設計と、不確実容認計算アルゴリズムの2つに大別される。不確実容認計算機システムの設計の研究では、不確実容認の概念に基づくネットワークのアーキテクチャの開発と、一部の計算をプロセッサで実行せずにネットワーク内で近似処理することで高速化を実現する分散システム・アーキテクチャの二つを開発した。不確実容認計算アルゴリズムの研究では、Bloom filterなどを対象としたケーススタディを通して、その有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

NP困難な問題に対して近似率が定数、あるいは任意の近似率に対する多項式時間アルゴリズムについて「完璧に動作する」コンピュータのモデルを対象とした先行研究は多数存在する。しかし、これらはエラーを許容する不確実容認計算機システムにおける近似アルゴリズムとは一線を画したものである。開発した不確実容認計算アルゴリズムは高速性、精度の両面において効果が認められ、学術的意義が高い。不確実容認コンピューティングは、成熟度の低いデバイスを計算機システムに利用することを可能にする基盤技術であるため応用範囲が広い。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to significantly improve the performance of approximate computation using uncertainty-tolerant computing systems. We obtained two research outputs: the design of uncertainty-tolerant computing systems and the uncertainty-tolerant algorithms. In the study of the uncertainty-tolerant computing system, we presented network architecture using the uncertainty-tolerant concept and parallel and distributed system architecture using approximate in-network processing. In the study of uncertainty-tolerant algorithms, we investigated the case studies for a bloom filter and other applications and illustrated their efficiency.

研究分野：計算機システム・ネットワーク

キーワード：相互結合網 Approximateコンピューティング 光通信 計算機システム・ネットワーク データセンタ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現状の計算機システムの設計では、その正確さを保証するために、素子の大きさやタイミング制約のマージンを大きく取っている。このマージンをあえて取らないことにより、動作周波数を大きく向上することが可能になるが、計算機システム上の個々の計算および通信ステップにおいて不確実な動作を取るようになってしまう。そこで、そのような計算機システムの設計技術と、不確実な計算機システム上においても、ある精度保証をもつ計算アルゴリズムクスが必要である。

2. 研究の目的

ビッグデータ計算に代表される全体としての結果が重要な計算では近似処理が今後重要となる。これらの並列計算は計算ノード間の通信に膨大な処理時間を要する。そのため、システム内の通信が性能向上の鍵となる。しかし、2020年代後半には半導体の集積度の向上が終焉する。つまり、正確な動作のために大きいマージンを取る従来の設計では計算機システム・ネットワークの大幅な性能向上が困難となる。そこで、本研究ではマージンを削り、相応のビット化けを許容することで高バンド幅低遅延を実現する通信技術を用いる計算機システムの設計技術を確立し、不確実性を容認する並列計算技術を開発する。

3. 研究の方法

不確実容認コンピューティング(Uncertainty Tolerate Computing)は、素子の大きさやタイミング制約のマージンをあえて取らないことにより、素子の数や動作周波数を大きく向上することを目指す。本研究では(1)不確実容認計算機システムの設計と計算機シミュレーションによる評価、(2)本計算機システムの不確実な動作を許容する計算処理アルゴリズムクスと精度保証の検証という、2つの大きな課題に取り組む。ここで精度保証とは、ある確率で正しい解もしくは一定の近似率の解が得られることを保証することとする。

4. 研究成果

本研究成果は、不確実容認計算機システムの設計と、不確実容認計算アルゴリズムクスの2つに大別される。

(1) 不確実容認計算機システムの設計

計算機システムは、プロセッサ、メモリ、それらを相互結合するネットワークで構成される。本研究ではネットワーク構成を研究した上で、そのネットワーク構成を中心に据えた不確実容認計算機システム・アーキテクチャを研究するという2段階で実施した。

ネットワーク構成

電気ネットワークスイッチにおいて、入力波長単位でルーティング処理を行うことでポートあたり1Tbpsを越えるラインレート処理を可能にする技術を開発した。具体的には、スイッチングチップにキャッシュを搭載するアーキテクチャ、結合網内の一部の高速処理可能なスイッチのみを用いてallreduce、allgatherといった集合通信の効率化を達成する技術を開発し、我々が開発したシミュレータを用いて有効性を示すことができた。以上により、不確実容認の概念に基づくネットワークのアーキテクチャを明らかにした。

不確実容認コンピューティングでは、正確な処理が必要な通信は低速動作させ、近似可能なデータ送信を高速動作させることが可能である。もっとも単純な実現法は、独立した高低速2系統のネットワークを用いることである。一方、本提案では1系統のネットワークにおいて2つの動作をサポートする点に特徴がある。

さらに、メモリを分散配置するために、PCIe/CXL(Compute Express Link)バス接続のコンピューティングコンポーネント間接続切替に光スイッチを適用する手法を検討し、ネットワークの低消費電力化効果を定量的に示した。この基盤技術は、分散配置された計算機要素間を短距離光通信技術で相互接続し、アプリケーションにとって最適なシステム構成を動的に採用可能にする点で、並列分散システム設計においてインパクトの大きい技術であると考えられる。

今後、Co-Packaged Optics (CPO)や高密度シリコンフォトニクストランシーバーを用いることで並列計算システムのネットワークスイッチの次数が大幅に上がることが予想される。そこで、次数増加に対応する並列近似アプリケーションのジョブスケジューリングとマッピングも開発した。現時点では、CPOを活用した光電融合技術のためのネットワーク構成について世界的に決定打となる提案がない。そのような中で、本成果は、デバイスの習熟度(例:低ビットエラー率)が低くとも計算機システムの構成要素として利用でき、かつ、高スループット通信を達成できることを示した。

システムアーキテクチャ

不確実容認コンピューティングの応用アーキテクチャとして、計算の一部をネットワーク内で処理する並列計算技術を開発した。具体的には分散深層学習におけるパラメータの最適化にFPGAベースのネットワークスイッチを使用する方式、パラメータの集約にDPDK(Data Plane

Development Kit) を用いたソフトウェアスイッチを使用する方法を提案した。さらに、不確実容認コンピューティングでは、送信データの値を近似することでフォトニクス通信の高速処理を達成可能である。そこで、分散ディープニューラルネットワーク計算に対して、DPDK (Data Plane Development Kit) を用いて構成したネットワークスイッチにより、CPU、リモート GPU 処理の一部を代行することで勾配集約については 2 倍以上の高速化を達成した。

さらに、その応用としてルータにおいて計算する方式を提案した。現状、多くのルータ機器は、パケット転送に留まらず、多少の計算能力を有する。そこで、結合網内の限られた計算資源を用いて学習可能な強化学習手法を開発し、ネットワークのパケットルーティングに応用した。そして、様々なトラフィックパターンに対して輻輳を抑えることが期待できることを定量的に示した。

このように近似処理で性能ボトルネックとなる処理を高速化し、システム全体の性能を向上させるアプローチは応用範囲の広い技術である。近似コンピューティングのネットワーク技術としては、従来、成熟度が低いデバイスの利用、並列処理におけるデータ一貫性処理、データ圧縮の 3 つが主流であった。その点で、本成果は、近似コンピューティングのネットワーク技術の新たな方向性を示したといえる。

(2) 不確実容認計算アルゴリズムクス

我々は不確実性を有するアプリケーションとして Bloom filter などを対象として研究を実施した。

Bloom filter は大量のデータを登録できるデータ構造である。Bloom filter は与えられた質問データに対して、登録済みかどうかを極めて高速に判定できるが、一定の確率で誤検出が生じる点で不確実性を有する。本研究ではコンピュータウイルスや侵入者のパターン等の大量のデータ列を登録することが可能なデータ構造として Bloom Filter を FPGA に実装した。具体的には、データの登録を均一化することにより、Bloom filter の高速化と誤検出の確率を小さくするハードウェアアルゴリズムを考案した。この実装では、ネットワークに流れるパケット内の登録パターンを高速に検出できる一方、誤検出する確率がある。しかし、評価結果より、不確実容認コンピューティング上にて誤検出する可能性が極めて低いことが分かった。

畳み込みニューラルネットワークの中で重要でない部分の計算を省略することにより、精度の悪化を最小限に抑えたまま計算処理を軽量化する方法を開発し、ポケ画像の自動生成や水彩画生成のアプリケーションへ適用した。

今後は系統的に対象となるアプリケーションを分類し、不確実容認コンピューティングシステムの構築と有効活用を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Shoichi Hirasawa, Hayato Yamaki, Michihiro Koibuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Packet Forwarding Cache of Commodity Switches for Parallel Computers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Cluster Computing	6. 最初と最後の頁 366, 376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/Cluster48925.2021.00041	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 Hu Yao, Koibuchi Michihiro	4. 巻 -
2. 論文標題 The Case for Disjoint Job Mapping on High-Radix Networked Parallel Computers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP)	6. 最初と最後の頁 123, 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-95388-1_9	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 Niwa Naoya, Amano Hideharu, Koibuchi Michihiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Low-Latency High-Bandwidth Interconnection Networks by Selective Packet Compression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ninth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)	6. 最初と最後の頁 56, 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDAR53791.2021.00015	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 ITSUBO Tomoya, KOIBUCHI Michihiro, AMANO Hideharu, MATSUTANI Hiroki	4. 巻 E104.D
2. 論文標題 An FPGA-Based Optimizer Design for Distributed Deep Learning with Multiple GPUs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 2057, 2067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2021PAP0008	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 Furukawa Masaki、Itsubo Tomoya、Matsutani Hiroki	4. 巻 11
2. 論文標題 An In-Network Parameter Aggregation using DPDK for Multi-GPU Deep Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Networking and Computing	6. 最初と最後の頁 516,532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15803/ijnc.11.2_516	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 Matsumura Naoki、Tokura Hiroki、Kuroda Yuki、Ito Yasuaki、Nakano Koji	4. 巻 33,12
2. 論文標題 Tile art image generation using parallel greedy algorithm on the GPU and its approximation with machine learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Concurrency and Computation: Practice and Experience	6. 最初と最後の頁 1,20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cpe.5623	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 Wada Takuma、Matsumura Naoki、Yasudo Ryota、Nakano Koji、Ito Yasuaki	4. 巻 33,12
2. 論文標題 Efficient implementations of Bloom filter using block RAMs and DSP slices on the FPGA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Concurrency and Computation: Practice and Experience	6. 最初と最後の頁 1,15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cpe.5475	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 Masaki Furukawa、Tomoya Itsubo、Hiroki Matsutani	4. 巻 -
2. 論文標題 An In-Network Parameter Aggregation using DPDK for Multi-GPU Deep Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of the 8th International Symposium on Computing and Networking (CANDAR'20)	6. 最初と最後の頁 108,114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDAR51075.2020.00021	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 Yuan Ye, Ito Yasuaki, Nakano Koji	4. 巻 -
2. 論文標題 Art Font Image Generation with Conditional Generative Adversarial Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Eighth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW)	6. 最初と最後の頁 151,156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW51189.2020.00039	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 Yasudo Ryota, Nakano Koji, Koibuchi Michihiro, Matsutani Hiroki, Amano Hideharu	4. 巻 Early View
2. 論文標題 Designing low diameter interconnection networks with multi ported host switch graphs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Concurrency and Computation: Practice and Experience	6. 最初と最後の頁 1,17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cpe.6115	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 HU Yao, KOIBUCHI Michihiro	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 Application Mapping and Scheduling of Uncertain Communication Patterns onto Non-Random and Random Network Topologies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 2480 ~ 2493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2020PAP0006	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 CUI Ke, KOIBUCHI Michihiro	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 Efficient Two-Opt Collective-Communication Operations on Low-Latency Random Network Topologies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 2435 ~ 2443
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2020PAP0004	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 平澤 将一, 八巻 隼人, 鯉淵 道紘	4. 巻 13 (2)
2. 論文標題 HPCスイッチにおけるルーティングテーブルキャッシュの研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌 コンピューティングシステム (ACS)	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) 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 -

1. 著者名 Naoya Niwa, Yoshiya Shikama, Hideharu Amano, Michihiro Koibuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Case for Low-Latency Network-on-Chip using Compression Routers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing (PDP)	6. 最初と最後の頁 134, 142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PDP52278.2021.00029	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 Tomoya Itsubo, Michihiro Koibuchi, Hideharu Amano, Hiroki Matsutani	4. 巻 -
2. 論文標題 Accelerating Deep Learning using Multiple GPUs and FPGA-Based 10GbE Switch	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing (PDP 2020)	6. 最初と最後の頁 102-109
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 -

1. 著者名 KAWANO Ryuta, YASUDO Ryota, MATSUTANI Hiroki, KOIBUCHI Michihiro, AMANO Hideharu	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 A Generalized Theory Based on the Turn Model for Deadlock-Free Irregular Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 101 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2018EDP7367	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 Hu Yao, Koibuchi Michihiro	4. 巻 -
2. 論文標題 The Impact of Application Mapping on Non-Random and Random Network Topologies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 17th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA)	6. 最初と最後の頁 16-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISPA-BDCIoud-SustainCom-SocialCom48970.2019.00015	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 Hu Yao, Koibuchi Michihiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Diameter/ASPL-Based Mapping of Applications with Uncertain Communication over Random Interconnection Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)	6. 最初と最後の頁 249-258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICPADS47876.2019.00044	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 Hayashikawa Masatoshi, Nakano Koji, Ito Yasuaki, Yasudo Ryota	4. 巻 -
2. 論文標題 Folded Bloom Filter for High Bandwidth Memory, with GPU Implementations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 2019 Seventh International Symposium on Computing and Networking, CANDAR 2019	6. 最初と最後の頁 18-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDAR.2019.00011	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 Wada Takuma, Matsumura Naoki, Yasudo Ryota, Nakano Koji, Ito Yasuaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Efficient implementations of Bloom filter using block RAMs and DSP slices on the FPGA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Concurrency and Computation: Practice and Experience	6. 最初と最後の頁 e5475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cpe.5475	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12件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Michihiro Koibuchi
2. 発表標題 Graph Golf Competition Seeking for Small-Diameter Graphs
3. 学会等名 23rd Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models (APDCM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀山祐己, 四釜快弥, 丹羽直也, 鯉淵道紘, 天野英晴
2. 発表標題 メモリネットワークを用いたコピーレンスディレクトリの最適配置
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告CPSY2020-57
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鯉淵 道紘
2. 発表標題 近似コンピューティングとフォトニクス
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会「フォトニクスとコンピューティングの先端動向」セッション (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鯉淵 道紘
2. 発表標題 ポストムーア時代のスーパーコンピュータの結合網
3. 学会等名 電子情報通信学会研究会 (情報ネットワーク研究会/複雑コミュニケーションサイエンス研究会) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鯉淵 道紘
2. 発表標題 Approximate Computing と関連する通信技術
3. 学会等名 電子情報技術産業協会(JEITA)「非ノイマン型情報処理へ向けたデバイス技術分科会」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鯉淵 道紘
2. 発表標題 ネットワーク視点からの取り組み「不完壁なスーパーコンピュータ」
3. 学会等名 825回マルチメディア推進フォーラム「ポスト・ムーアの切り札：Approximate Computing」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹羽直也, 平澤将一, 鯉淵道紘, 天野英晴
2. 発表標題 選択的な低遅延データ圧縮による高バンド幅相互結合網
3. 学会等名 研究報告VLD2019-126, pp.185-190
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 四釜 快弥, 河野 隆太, アクラムベン アメド, 松谷 宏紀, 鯉淵 道紘, 天野 英晴
2. 発表標題 パイパシングによる低遅延メモリパケットネットワーク
3. 学会等名 研究報告システム・アーキテクチャ (ARC), 2020-ARC-240(2), pp.1-6
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鯉淵 道紘
2. 発表標題 スーパーコンピュータの光速相互結合網
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会(BCI-1, データセンター間通信とその周辺技術) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鯉淵 道紘
2. 発表標題 高バンド幅低遅延Approximate相互結合網
3. 学会等名 第18回情報科学技術フォーラム(トップコンファレンスセッション7 コンピュータシステム) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野隆太, 松谷宏紀, 鯉淵道紘, 天野英晴
2. 発表標題 Infinibandネットワークでのデッドロックフリーな階層型ルーティング
3. 学会等名 信学技報, vol.119, no.147, CPSY2019-28, pp.147-152
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michihiro Koibuchi
2. 発表標題 Low-Latency Error-Prone Optical Networks for Fast Approximate Computation on HighEnd Datacenters
3. 学会等名 OECC/PSC 2019, WG2-4(2page) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

不確か実容認コンピューティングに関する研究(国立情報学研究所鯉淵研究室)
<http://research.nii.ac.jp/~koibuchi/research08.html>

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	中野 浩嗣 (Nakano Koji) (30281075)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授 (15401)	
研究分担者	天野 英晴 (Amano Hideharu) (60175932)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	
研究分担者	松谷 宏紀 (Matsutani Hiroki) (70611135)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	
研究分担者	石井 紀代 (Ishii Kiyoo) (90612177)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	

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1件

国際研究集会 Workshop on Uncertainty-Tolerant Computing using Error-Prone Optical Communication, Co-located with CANDAR2021	開催年 2021年～2021年
--	--------------------

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			
米国	ハワイ大学マノア校			