

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11750

研究課題名（和文）超低遅延双方向ストリーミングの性能保証手法の研究

研究課題名（英文）Study on Performance Guarantee Methods for Ultra-Low Latency Bidirectional Streaming

研究代表者

藤田 聡 (fujita, satoshi)

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：40228995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：1) 遠隔ユーザ間の双方向のコミュニケーションのサポートを目標とする複数台のエッジサーバから構成される連携型ソーシャルネットワークを設計し、プロトタイプシステムの実装とその上でのレイテンシーとスループットの実測を行った。2) 三次元オブジェクトの共同操作を通じた遠隔ユーザ間のコミュニケーションのプロトタイプを完成させ、性能評価を行った。3) ビデオストリーミングのピアツーピア技術による支援を効果的に行うため、Solanaブロックチェーン上で実行されるスマートコントラクトをT-chainと呼ばれる既存技術と組み合わせた新しいインセンティブ機構を実装し、その性能を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インターネット上の双方向コミュニケーションに関して三つの異なる側面から研究を遂行し、次のような学術的な知見を得た：1) アクセスパターンの変化に従って動的に構造を変えるオーバーレイネットワーク上で因果関係の保証されたメタデータの伝播が実現可能であること、2) ビデオストリーミングの端末間の転送ではなく、仮想オブジェクトの遠隔共有という方法によって、柔軟性の高い遠隔指導システムが実現できることが確認されたこと、3) ビデオストリーミングのピアツーピア支援を促進するインセンティブ機構がブロックチェーンを用いて実現できることが確認されたこと。いずれも具体的な実装を伴っている点に社会的な価値があると考えている。

研究成果の概要（英文）：1. We designed a collaborative social network consisting of multiple edge servers to support two-way communication between remote users, implemented a prototype system, and measured the latency and throughput on the prototype system. 2. We implemented a prototype of communication between remote users through collaborative manipulation of 3D objects and evaluated its performance. 3. To effectively support peer-to-peer technology for video streaming, we implemented a new incentive mechanism that combines smart contracts executed on the Solana blockchain with an existing technology called T-chain, and evaluated its performance.

研究分野：情報工学，並列・分散システム

キーワード：双方向コミュニケーション P2P エッジサーバ

1. 研究開始当初の背景

本研究課題の申請時(2019 年秋)の背景は、ビデオストリーミング技術の普及に伴って、ネットワーク上の複数ノードから発信される高品質のビデオストリームをそれぞれの受信ノードとの間で超低遅延かつ双方向に配信する手法が求められていたことである。この問題は、ビデオゲームや拡張現実などのインタラクティブコンテンツを遅延の存在を意識させることなく配信・共有する状況を想定しており、目標とする遅延時間としては、現在のクラウドサーバ経由で実現される 100ms よりも一桁小さい 10ms から 20ms を目指していた。また本課題の独創的・創造的な点として、単に既存手法の改良や組み合わせのみを行うのではなく、理論的な性能限界を評価の基軸にするという点を想定していた。

2. 研究の目的

第一の目的は、上記の背景のもとで、ネットワーク上の複数ノードから発信される高品質のビデオストリームをそれぞれの受信ノードとの間で超低遅延かつ双方向に配信する手法を明らかにしていくことである。加えて本研究では二次的な目的として、ビデオストリーミング以外の手法を用いた双方向コミュニケーションについても多面的に取り組むことにした。これは 2020 年初頭に発生したパンデミックに伴ってインターネットユーザの行動が大きく変容したことに伴って浮かび上がった現実的な要請でもある。2020 年当時の日本では、職場や通勤時の密な状態を避けるためリモートワークが推奨され Zoom などのクラウド型のビデオ会議システムが一気に普及した。また初等中等教育の現場にもオンライン授業が積極的に導入され、Teams などのシステムが 100ms を超える遅延や配信に多少の不具合があっても十分使えるツールであることが広く周知された。そのような状況を受けて本研究課題では、ビデオストリーミングの配信遅延の短縮に限らず、双方向コミュニケーションの質的な充実を図ることを考えた。具体的に設定した目標は以下の三点である：

1. 特定の場所に設置されたエッジサーバを使ったオンラインソーシャルネットワークとそれらのエッジサーバを適切なオーバーレイネットワークで接続して得られた連携型ソーシャルネットワークの基礎理論の構築とプロトタイプ実装による評価、
2. 体の動きや手技などを遠隔指導する際に必要なシステム要件の洗い出しと、プロトタイプ実装による評価、
3. ビデオ配信をピアツーピア技術を使って効果的に支援する際に課題となっているインセンティブメカニズムの提案とプロトタイプ実装による評価

いずれの目標も遠隔ユーザ間のスムーズな協調を実現する上でクリアすべき重要な項目であり、アカデミックな貢献と社会的な意義のいずれも高いと考えた。

3. 研究の方法

低遅延ビデオ配信を可能にするためにはサーバのアップロード帯域を補完するためのピアツーピア技術の利用が不可欠であり、第一の目的に係るオーバーレイの構築については引き続き検討を進めていく(研究の方法としては多くの理論的な研究と同様、解明すべき性質や証明すべき定理を適切に特定し、その解決に向けて段階的に進めていくという方法を取ることにした)。また質的向上に関する三つの目標に関しては、システムの基本設計を行なって双方向コミュニケーションのあり方の新しい方向性を示した上でプロトタイプシステムを実装し、提案する手法のフィジビリティを確認するという手法を取ることにした。

4. 研究成果

第一の目的に関しては、我々の過去の研究を含む既存研究によってある程度の知見がすで得られていたため、研究成果は既存結果の改良にとどまっている。したがって本報告書では、第二の目的の三つの目標のそれぞれについて、本研究で得られた主要な成果をまとめることにする。

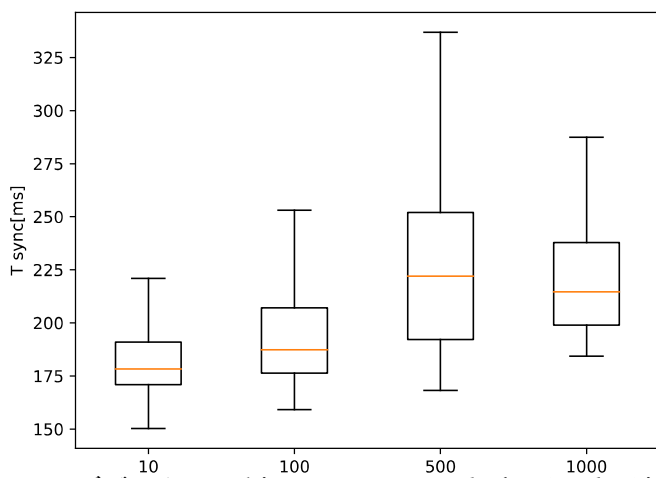
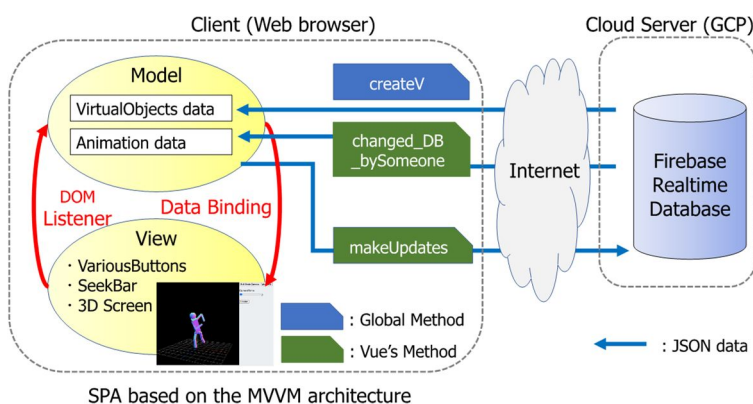
第一の目標に関しては、遠隔ユーザ間の双方向コミュニケーションの可能性を探るため、複数台のサーバから構成される連携型ソーシャルネットワークを新たに設計し、プロトタイプシステムの実装とその上でのレイテンシーとスループットの実測を行った。提案シス

テムはインターネット接続された複数のローカルチャットサーバで構成されており、各サーバは地理的に分散した場所に設置される。またサーバたちはオーバーレイネットワークで論理的に接続されており、オーバーレイリンク上のメッセージ通信には、Mastodon なども採用されている ActivityPub を用いることにした。

各サーバには複数のクライアントが(局所的に)接続しており、一種のコミュニティを形成している。各クライアントは自分のサーバ上にメッセージを投稿したり、他のクライアントが投稿したメッセージに対してリツイートなどのアクションをしたりすることができる。また ActivityPub を使ったメタデータの伝播によって他のサーバ上でなされたアクティビティを(多少の時間遅れのもとで)知ることができる。そのような階層型システムでは、投稿されたメッセージを受信時刻の昇順で一元管理している限り、1台のサーバ内での因果関係の違反は発生しない。しかしリツイートなどのアクションが複数サーバに跨ってなされた場合、クライアントの物理的な位置によっては因果関係に違反するイベント系列が観測される可能性がある。特にオーバーレイの構造が動的に変化した場合などにそのような状況は顕著である。本研究ではそのような状況を回避するため Ne'delec らが 2018 年に提案した FIFO ベースの因果ブロードキャストプロトコルに着目し、このプロトコルを ActivityPub を用いてサーバ間連携の部分に実装した。プロトタイプでは、サーバマシンとしてラズベリーパイを用いた。実験結果からは、オーバーレイの構造が動的に変化する困難な状況下でも、オーバーレイの1ホップあたりのメタデータ転送を 300ms 程度に抑えられることが確認された。上記の結果の一部は[6]で発表済みであり、AWS を用いた追加実験の結果を含むフルバージョンは現在ジャーナルに投稿中である。

二つ目の目標は、教育現場における ICT 技術の利用可能性の探究を行うものである。具体的には体育や美術などの実習を伴う科目のオンラインでの履修を想定し、体の動きや手技などの遠隔指導を想定した双方向コミュニケーションシステム的设计とプロトタイプ実装を行った。我々は特に、そのような機能を一般的な端末に備えられている Web ブラウザ上で実現することに興味がある(特殊な装置やアプリの利用は、普及を妨げる要因の一つである)。

提案システムでは、各ユーザが保持するタブレット端末上の Web ブラウザに表示されたアバターを介して双方向コミュニケーションを行う。ブラウザには 3D 仮想オブジェクトがユーザのモデルとして対応づけられている。このモデルと DOM 要素を対応づけることで、画面のタッチを通じたオブジェクトの操作を実現することができる。ただし通常のウェブアプリで用いられている MVC モデルではモデルの双方向の更新が難しいことから、ここでは MVVM モデルをサポートするプログレッシブフレームワークである Vue.js を用いてユーザとのインタラクションを実現した。3D オブジェクトの操作と表示を行う GUI には Three.js ライブラリを用い、ビデオ映像からリアルタイムに取得される線画データのデータストリームから線分を切り出す処理には PoseNet を用いた。また遠隔ユーザ間の仮想オブジェクトの共有には Google Cloud Platform の Firebase を用い、非同期な編集や表示が可能になっている。システム構成の概要を上にも示す。



3D オブジェクトに対しても、300ms 程度の遅延で遠隔ユーザの端末上への編集結果の表示

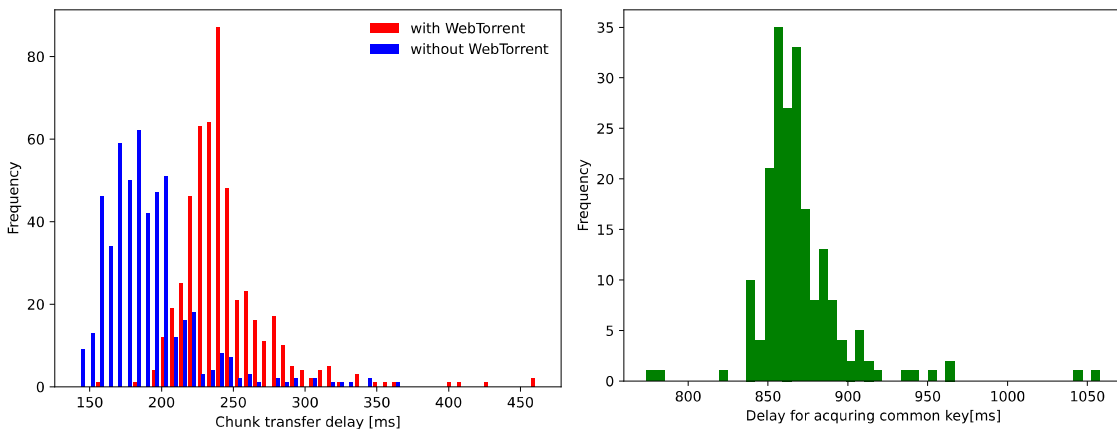
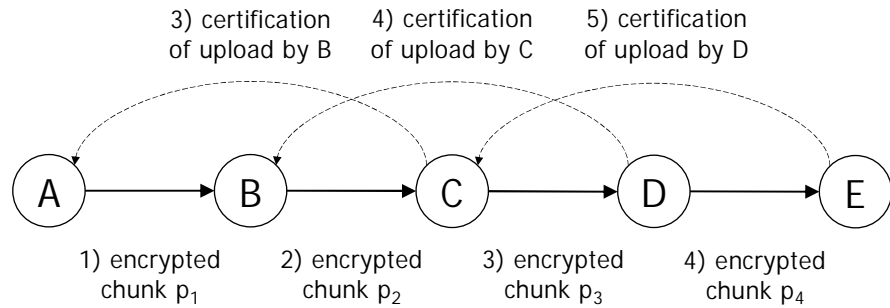
提案システムのプロトタイプを JavaScript を用いて実装し、その性能を実験的に評価した。実験結果の一部を左図に示す。この図には二人のユーザが Firebase を介して 3D モデルの編集と表示を非同期に行なったときのレイテンシーの実測値が示されており、横軸は共有される 3D オブジェクトを構成する基本コンポーネント数である(コンポーネント数が多いほどアバターの動きは滑らかになるが、その分処理が複雑になり、レイテンシーは増加する)。図からも分かるように、1000 個の基本コンポーネントからなる比較的複雑な

が行えている。研究背景のところでも触れた 10ms 単位の遅延は達成できていないが、遅延の多くはクラウドサーバとの間の転送遅延であることから、Firebase の代わりにエッジサーバを用いることによってこの遅延は十分短縮できると考えている（対象は少し異なるが、我々には画面上に表示された絵の共同編集をクラウドを介さずピアツーピアを行うシステムを実装した経験[3]があり、そこで得られた知見と今回の実装で得られた知見を組み合わせることは、将来的には十分見通しのある方向だと考えている）。なお上記の結果の一部は[8]で発表済みであり、追加機能の記述を含むフルバージョンはジャーナルに投稿中である。

三つ目の目標は、ビデオストリーミングのピアツーピア(P2P)技術による支援を効果的に行うためのインセンティブメカニズムの開発である。P2P 技術によってビデオストリーミ

ングを支援する際にまず問題となるのは、誰に対して何を貢献させたいのかを明確にすることである。BitTorrent などのチャンクベースのシステムでは、取得したチャンクを他のノードにアップロードして共有するという形のコンテンツレベルの貢献をさせることが多いが、提案システムではより広い概念であるアップロード帯域の貢献を考えることにした。具体的には、アップロード帯域の貢献を受けた側がその事実をブロックチェーンに記録し、その貢献が事実であることが第三者によって確認されれば、確認者が仮想通貨のポイント口座に振り込むという基本処理フローを考えた。この仕組みをうまく機能させるためには帯域を貢献することへのインセンティブを参加者に対して与える必要があるが、その点については、送信されるビデオチャンクを AES で暗号化し、復号鍵を取得するためには貢献の確認が必須であるという形のロジックを使うことにした（そのような三角形の依存関係を連鎖させていくことで P2P ビデオストリーミングのインセンティブメカニズムを実現しようというアイデアは T-chain と呼ばれる既存システムで提案されており、我々のシステムは、そのアイデアをブロックチェーン上で実装するものである。参考のため T-chain の概念図を上に表示す）。

プロトタイプ実装では、上記の一連のロジックを Solana ブロックチェーンスマート上のコントラクトとして記述した。Ethereum ではなく Solana を採用した理由は、トランザクションの承認速度が Ethereum より 2 桁近く速く、実時間で数秒以内に抑えられるためである。またここでは具体的なビデオストリーミングプロトコルとして、Web ブラウザベースで P2P ストリーミングを行うことができる WebTorrent を用いている。



プロトタイプシステム上で行った評価実験の結果の一部を図に示す。左の図は WebTorrent プロトコルに起因するオーバーヘッドがレイテンシーに与える影響の大きさを示しており、WebTorrent を使ったビデオチャンクのストリーム配信では、同量のチャンクを普通にファイル転送した場合に比べて 50ms 程度のオーバーヘッドが余分にかかることが確認された（横軸がレイテンシー、縦軸が頻度を表している）。また右の図は Solana ブロックチェーン上のスマートコントラクトを使って AES 復号鍵の受け渡しをした場合の遅延を示しており、アップロードの事実が発生してからアップロードが復号鍵を受け取るまでの遅延がほぼ一秒以内に収まることが確認される。WebTorrent のチャンクあたりの再生時間長はビデオストリーミングの品質に大きな影響を与えるパラメータであり必要とされる要件によって決まるべきものであるが、この実験結果からは、1 チャンクに対応する再生時間が 2 秒

程度であれば、受信→貢献→貢献の確認→復号鍵の配布→復号という一連のサイクルが問題なく回ることがわかる。上記の結果の一部は[9]で発表済みであり、国際会議バージョンを拡張したフルバージョンは、現在ジャーナルに投稿中である。

発表論文

[1] Satoshi Fujita, Similarity Search in InterPlanetary File System with the Aid of Locality Sensitive Hash, IEICE Transactions on Information and Systems, E104.D(10): 1616-1623 (2022).

[2] Satoshi Fujita, Semi-Structured BitTorrent Protocol with Application to Efficient P2P Video Streaming, IEICE Transactions on Information and Systems, E104.D(10): 1624-1631 (2022).

[3] Shougo Inoue and Satoshi Fujita, Collaborative Illustrator with Android Tablets Communicating through WebRTC, IEICE Trans. Inf. Syst. 103-D(12): 2518-2524 (2020).

[4] Hironori Ando and Satoshi Fujita, Tight Bounds on the Upload Capacity to Enable Two-Hop Delivery in Peer-to-Peer Video Streaming Systems, Int. J. Found. Comput. Sci. 31(3): 341-354 (2020).

[5] Fukuyama Hiromi and Satoshi Fujita, Causality-Aware Metadata Propagation Scheme for Federated Social Network Servers, in Proc. CANDAR Workshops, 2022, pages 7-13.

[6] Yushan Li and Satoshi Fujita, Design of Elixir-Based Edge Server for Responsive IoT Applications, in Proc. CANDAR Workshops, 2022, pages 185-191.

[7] Kobayashi Kakeru and Satoshi Fujita, An Enhancement of Physical Web with Stateful BLE Beacons, in Proc. CANDAR 2021 Workshops, pages 21-27.

[8] Nagaki Kentaro and Satoshi Fujita, Browser-Based Manipulation of Virtual Objects Through MVVM Architecture with Data Binding, in Proc. CANDAR 2021, pages 134-140.

[9] Ma Yunqi and Satoshi Fujita, Distributed Rewarding for Browser-Based P2P Video Streaming with Ethereum Blockchain, in Proc. CANDAR Workshops, 2021, pages 484-486.

[10] Seiji Saito and Satoshi Fujita, Realtime Physics Simulation of Large Virtual Space with Docker Containers, in Proc. PDCAT 2021, pages 249-260.

[11] Taiki Iwao and Satoshi Fujita, Realtime Congestion Forecasting of Remote Space Through BLE Beacons, in Proc. CANDAR Workshops, 2020, pages 21-27.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Satoshi Fujita	4. 巻 E104.D 巻 10 号
2. 論文標題 Similarity Search in InterPlanetary File System with the Aid of Locality Sensitive Hash	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and System	6. 最初と最後の頁 1616-1623
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2020EDP7198	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 Satoshi Fujita	4. 巻 E104.D 巻 10 号
2. 論文標題 Semi-Structured BitTorrent Protocol with Application to Efficient P2P Video Streaming	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and System	6. 最初と最後の頁 1624-1631
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2021EDP7011	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 Kobayashi Kakeru, Satoshi Fujita	4. 巻 1
2. 論文標題 An Enhancement of Physical Web with Stateful BLE Beacons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. CANDAR 2021 Workshops	6. 最初と最後の頁 21-27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CANDARW53999.2021.00011	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 Nagaki Kentaro, Satoshi Fujita	4. 巻 1
2. 論文標題 Browser-Based Manipulation of Virtual Objects Through MVVM Architecture with Data Binding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. CANDAR 2021	6. 最初と最後の頁 134-140
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CANDAR53791.2021.00026	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 Ma Yunqi, Satoshi Fujita	4. 巻 1
2. 論文標題 Distributed Rewarding for Browser-Based P2P Video Streaming with Ethereum Blockchain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. CANDAR 2021 Workshops	6. 最初と最後の頁 484-486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW53999.2021.00091	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 Seiji Saito, Satoshi Fujita	4. 巻 1
2. 論文標題 Realtime Physics Simulation of Large Virtual Space with Docker Containers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. PDCAT 2021	6. 最初と最後の頁 249-260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-96772-7_23	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 YOSHIHARA Tsuyoshi and FUJITA Satoshi	4. 巻 12(6)
2. 論文標題 Towards Fog-Assisted Virtual Reality MMOG with Ultra-Low Latency	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Networks& Communications	6. 最初と最後の頁 33-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5121/ijcnc.2020.12603	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 Shougo INOUE, Satoshi FUJITA	4. 巻 E103D(12)
2. 論文標題 Collaborative Illustrator with Android Tablets Communicating through WebRTC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 2518-2524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2020PAP0009	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 Taiki Iwao and Satoshi Fujita	4. 巻 1
2. 論文標題 Realtime Congestion Forecasting of Remote Space Through BLE Beacons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. CANDAR Workshops	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW51189.2020.00018	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 Fukuyama Hiromi, Satoshi Fujita	4. 巻 1
2. 論文標題 Causality-Aware Metadata Propagation Scheme for Federated Social Network Servers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. CANDAR Workshops	6. 最初と最後の頁 7-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW57323.2022.00027	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 Yushan Li, Satoshi Fujita	4. 巻 1
2. 論文標題 Design of Elixir-Based Edge Server for Responsive IoT Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. CANDAR Workshops	6. 最初と最後の頁 185-191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW57323.2022.00039	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 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 井上 彰吾, 藤田 聡
2. 発表標題 相互作用型XR アプリのためのフォグクラウドコンピューティング環境の構築
3. 学会等名 2020年度 (第71回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2020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
---------	---------