

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：27101
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K11872
研究課題名（和文）IoT/CPSサービスのための階層化ネットワーククラスタ形成による情報流通基盤

研究課題名（英文）Information Distribution Architecture Based on Hierarchical Network Cluster for IoT/CPS Services

研究代表者
古閑 宏幸（KOGA, Hiroyuki）
北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：20433401
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）：本研究では、各サービスの要求特性や地理的特性に応じた階層化ネットワーククラスタ形成により、多種多様な分散情報をリアルタイムかつ効率的に探索・収集・配信可能な新しいネットワーク制御機構を実現することを目指し、3つの研究課題に分割して研究開発に取り組んだ。（1）サービス特性に応じたネットワーククラスタ形成技術、（2）ネットワーククラスタ環境に適したサービス品質制御技術、（3）階層化ネットワーククラスタ形成による情報流通基盤に関する手法を提案し、その有効性および実現可能性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果である階層化ネットワーククラスタ形成による情報流通基盤を用いることにより、サービス要求特性や地理的特性に応じて各ユーザを中心としたネットワーククラスタを適切に形成し、さらにネットワーク環境の変動に応じて最適なクラスタを維持することで、低遅延かつ効率的な情報流通が可能となる。これはサービス形成に必要な情報の流通を自動的に支援可能であることを意味しており、今後のさらなる多種多様なコンテンツ流通においてもサービス品質の改善が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we aimed to realize a novel network architecture that efficiently searches, collects, and distributes a wide variety of information in real time by forming hierarchical network clusters according to the required characteristics and geographical area of each service. We proposed schemes and demonstrated their effectiveness and feasibility for dividing three research topics: (1) network clustering technology according to service characteristics, (2) service quality control technology suitable for network cluster environments, and (3) information distribution architecture based on hierarchical network clusters.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：情報指向ネットワーク ネットワーククラスタ エッジコンピューティング IoT CPS

1. 研究開始当初の背景

我々の生活環境の向上には、インターネットを通じて情報の取得・処理を行うサイバー空間の活用だけではなく、IoT (Internet of Things) によって各種センサーから得られるフィジカル空間の莫大な情報も同時に解析・活用することが期待されている。そのようなサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させることで、より質の高い生活環境を提供するCPS (Cyber Physical System) の実現は、我が国においても「Society 5.0」として推進されており、世界的に重要な研究開発分野となっている。例えば、IoT・AIなどの技術を融合させたスマートシティ構想などがある。その実現により、従来とは質的に異なる新しいサービスの提供が可能となり、例えば、車の自動運転や多様なロボットの遠隔制御、MR (Mixed Reality) などの実現が期待されている。

そのような革新的サービスを実現するためには、(1)莫大な数のセンサーデバイスからIoT情報を効率的に収集し、(2)AI等を活用した高速なビッグデータ処理・解析を行い、(3)生成された新たな情報・価値をリアルタイムにフィードバックすることが必要不可欠である。これらに関する技術としては、主に(1)、(2)に対応する第5世代携帯電話網による超広帯域かつ低遅延の無線アクセス技術やエッジコンピューティングによる高速かつ高度な情報処理技術などに関して国内外で活発な研究が行われてきたが、(3)に対応する革新的サービスの要求を満たすような超低遅延な情報流通技術に関しては実現に至っていない。そのような情報流通を実現するためには、多地点に分散した多種多様な情報をリアルタイムかつ効率的に探索・収集・処理し、必要とする人・モノに対し配信する必要があるが、従来のネットワーキング技術ではその設計指針および構造上の制約から性能を十分に発揮することができず、IoT/CPSの実現に欠かせないリアルタイムな情報流通を支える新しい基盤技術の確立が重要な課題となっている。

そこで、本研究では情報をもつサーバとその情報を利用したいユーザ間の個々の情報伝送を前提とした従来の制御機構を見直し、各ユーザやサービスに必要とされる情報をそれらの近傍のネットワーク上に適切に分散キャッシュさせ、その分散情報を要求特性に応じて効率的に多重伝送することで、遠隔のクラウドサーバに依存することなくリアルタイムに探索・収集・配信可能な情報流通基盤の研究開発に取り組む。

2. 研究の目的

本研究では、各サービスの要求特性や地理的特性に応じて、ユーザ近傍に配置されたエッジサーバ群を中心とし、分散キャッシュを保持するルータ群および伝送リンク群からなる論理的なネットワーククラスタ形成により、多種多様な分散情報をリアルタイムかつ効率的に探索・収集・配信可能な新しいネットワーク制御機構を提案する。具体的には、階層化された各論理クラスタにおいて、適切な複数の情報源からネットワーク状況に応じて要求特性を満たす最適な伝送リンクを選択し、効率的に多重伝送することによって、分散情報をリアルタイムかつ効率的に流通させるための手法を研究開発する。

3. 研究の方法

本研究では、適切なネットワーククラスタ形成手法や輻輳制御手法、ネットワーク容量設計法を明らかにするため、大きく以下の3つの研究課題に分割して段階的に取り組む。

- (1) サービス特性に応じたネットワーククラスタ形成技術
- (2) ネットワーククラスタ環境に適したサービス品質制御技術
- (3) 階層化ネットワーククラスタ形成による情報流通基盤

4. 研究成果

本研究では、各サービスの要求特性や地理的特性に応じてネットワーク資源も含めた階層化ネットワーククラスタ形成により、多種多様な分散情報をリアルタイムかつ効率的に探索・収集・配信可能なネットワーク制御機構を実現することを目指し、3年間の研究期間において以下に示す通りの研究成果を得た。

(1) サービス特性に応じたネットワーククラスタ形成技術

各サービスの要求特性や地理的特性に応じて多種多様な分散情報をリアルタイムに流通させる適切なネットワーククラスタを形成するための手法について検討した。

まず、多種多様な情報をネットワーククラスタ内で効率的に分散キャッシュする方法を検討するため、多種多様な情報を特性要素に基づき分類し、それらが同時に流通する状況下におけるキャッシュ基礎特性を調査した。従来より当該領域では様々な評価が行われてきたが、それらの多くは任意の特性をもつ情報のみが流通する環境を想定した限定的な評価となっており、実環境のような多種多様な情報が流通する場合におけるキャッシング性能については深く議論されていなかった。これに対し、本研究では、情報の特性をIoT、ストリーミング(ST)、ダウンロード(DL)の特徴的な3種に分類し、これらが混在して流通する環境において、代表的なキャッシュ置換ポリシーであるLRU、LFUに対してどのような影響を与えるかについて調査を行った。

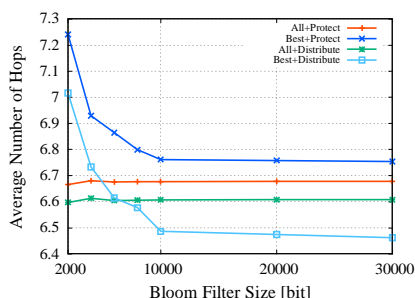
特性評価の結果、情報の特性ごとにキャッシュ置換ポリシーとの相性があり、ST はネットワーク内のキャッシュ置換ポリシーが LRU の場合に、DL は LFU の場合に、IoT はその両方を含む場合にキャッシュの利用効率が改善し、情報の取得性能が向上することを明らかにした。さらに、流通する情報特性の混在割合に応じて、ルータの位置ごとにキャッシュ置換ポリシーを適切に選択することで情報の流通をさらに効率化できることを明らかにした。

また、多種多様な分散情報が流通するネットワーククラスタにおいて、分散情報を効率的に発見するための手法を検討した。関連する既存経路制御手法では、ユーザの要求を受信したルータが本目的を達成するための最も良い転送先を選択できるようにするために、新たに情報をキャッシュしたルータはその情報をキャッシュしたことに加えて何らかのメトリックを含む制御情報を周囲に共有し、周囲のルータの経路表を動的に更新することで実現している。しかし、これらのルータの転送先の判断は、ホップ数等をはじめとした任意の単一メトリックに基づいているため、複数の要求がひとつの転送先に偏る可能性があり、ネットワーク負荷や取得遅延の増加を引き起こす可能性があった。これに対し、本研究では複数のメトリックを考慮し転送先の判断を行う手法を検討した。

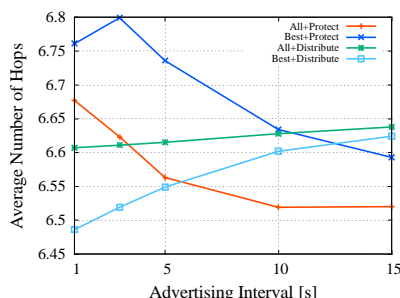
本手法では、ルータは新たにコンテンツを受信した際に、ホップ数や遅延、キャッシュ利用率等をメトリックとして定義し、これらを制御情報に含めて周囲に共有する。要求を受信したルータはそれら複数のメトリックと各メトリックに設定した重みを考慮して計算し、最も良いとされる転送先を選択する。従来手法と比較評価した結果、各メトリックの重みを適切に設定することによって、取得性能の改善が見込めることを確認した。

さらに、各サービスの要求特性や地理的特性にリアルタイムに応じるクラスタ形成やルーティング技術の実現には、前述したようなルータ間における情報共有に基づいた制御が必要であるため、この共有によって引き起こされるネットワークへの負荷に対処するための情報共有手法を検討した。制御情報の交換等によるネットワーク負荷を削減するために、ルータ間共有を伴う経路制御手法では制御情報を Bloom Filter (BF) 化して情報量を圧縮するという考え方が主流となっており、BF を用いた解決策が多様に提案されている。それらの主な議論点は制御情報を BF 化することによって発生する偽陽性が誤った経路形成を引き起こし、取得性能が低下するという課題に対し、できる限り情報を圧縮しつつ性能を維持するという目的を達するための機能を考案することである。しかし、各手法の機能に焦点を当てた横断的な評価はこれまで行われておらず、それぞれの性能や特性が不明瞭な状態であることから、機能選択のための情報が十分に整理されていない状態である。そこで本研究では、各手法の主要な機能に焦点を当てた評価を通して各機能の性能と特性を明らかにし、BF を用いた経路制御手法の効率化に必要な設計指針を示すことを目指した。複数の BF を用いた手法から性能に大きく影響を与えられられる機能として、要求パケットの転送機能については BF で検出したすべての転送先に対し要求を複製して転送する方法 (ALL) と制御情報にメトリック等の情報を付加し最も良いとされる転送先を選択して転送する方法 (Best) に分類し、キャッシング機能については共有している情報を次の共有時まで保護する方法 (Protect) と保持すべき情報を周辺ルータに分散して割り当てることでルータあたりのキャッシュ更新頻度を削減する方法 (Distribute) に分類した。

これらの機能の特性を調査するために、ネットワークシミュレータ ns3 を用いて評価を行った。評価環境は、複雑な経路制御が必要とされるような環境を想定し、20 台のルータで構成された 5 つの AS からなるネットワークトポロジをトポロジ生成ツール BRITTE によって形成した。各ルータにはサーバとユーザを接続し、キャッシュサイズは情報の総量に対し約 1% とした。比較対象は、前述した機能を組み合わせた 4 パターンとした。比較評価の結果、All は制御情報を大幅に圧縮し偽陽性が発生しやすい状態であっても、可能性のあるすべての転送先に要求を複製して転送することで取得遅延を改善できるが、複製された要求によって必要以上に返送される情報がネットワーク帯域幅を大幅に消費することから、制御情報はメトリックなどの付加情報による情報量の増加を犠牲にしても Best のように要求の複製なしに最も良い転送先のみへ転送できるほうが良いことを明らかにした (図 1 (a))。しかし、大きな制御情報の頻繁な共有は依然として高いネットワーク負荷を引き起こすため、実現性を考慮すると、キャッシュの更新頻度を緩めることができる Distribute だけでなく、更新を一時的に止める Protect のような考え方を取り入れ、頻繁な情報共有が不要となるように設計すべきと結論付けた (図 1 (b))。



(a) 制御情報のサイズによる影響



(b) 共有間隔による影響

図 1 各手法におけるコンテンツ取得性能の比較

(2) ネットワーククラスタ環境に適したサービス品質制御技術

本研究では、複数の分散資源を同時に利用することが可能となるため、従来のように各資源に対して個々のフローを生成するのではなく、各伝送経路上で競合するフローを集約し、それぞれの要求に対して効率性の高い集約フローを形成し、サービス品質を向上させる手法について検討した。

自動運転などで活用されるデータストリームサービスでは低遅延かつリアルタイムな通信を必要とするため、高いサービス品質を提供するために可能な限りロス率を低減することが重要となる。近年の主な通信方式である TCP や QUIC では信頼性を提供するために再送制御を行う。しかし、再送制御はパケットロスを検出後に再度そのパケットを送信するというリアクティブなアプローチであるため、回復した制御情報はリアルタイム性を損ない、サービス品質の低下を引き起こす恐れがある。したがって、IoT 環境下におけるサービスの通信方式には、可能な限りロス率を低減するプロアクティブなアプローチを通して制御情報のリアルタイム性の低下を抑制しつつ信頼性を担保する考え方が必要である。そこで、ネットワークの中継ルータにおいて前方誤り訂正技術 (Forward Error Correction: FEC) を利用することで、ロスを抑えつつ、低遅延かつリアルタイムな準信頼性を提供する手法を提案した。

提案手法の有効性を明らかにするために、ネットワークシミュレータ ns3 を用いて TCP, UDP, QUIC と QUIC 上に FEC を導入した提案手法で比較評価を行った。評価環境を図 2 に示す。点線で囲まれた階層の中継ルータにおいて FEC 機構を実装し、各送信者は対となる位置に存在する受信者に向けて 8 ms ごとに 1000 Byte のパケットを送信する。また、FEC の有効性を評価するために、中央のボトルネックリンクでは 1% の確率でパケットロスが発生する環境を想定する。

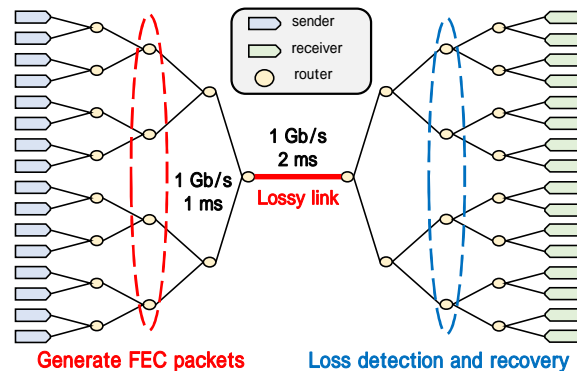


図 2 評価環境

図 3 より、提案手法は FEC パケットによってすべてのロスパケットに対する 35.1% を回復したため、再送遅延の影響を抑え、パケット伝送時間は従来の TCP および QUIC よりも改善し、UDP と近接した結果を示し、リアルタイムな準信頼性通信の有効性が明らかになった。

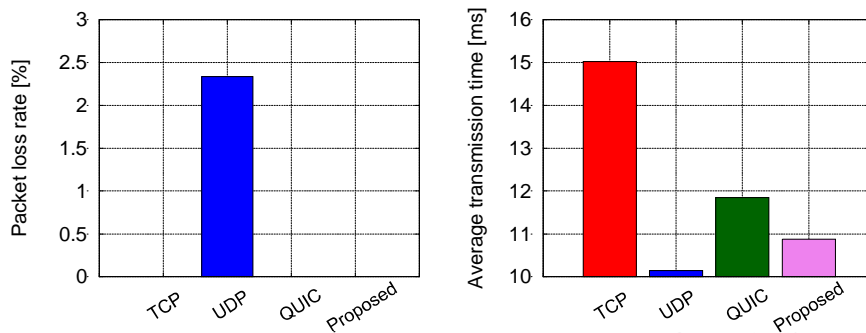


図 3 従来手法と提案手法の性能比較

さらに、中継ルータにおいて TCP 上に FEC を実装する手法を提案し、スループット特性が改善されることを示した。また、エッジサーバにおいてフィードバック遅延により生じる余剰時間を活用した適応型フィードバックに基づくデッドラインスケジューリング手法を提案し、その有効性を示した。

(3) 階層化ネットワーククラスタ形成による情報流通基盤

サービス特性に応じて適切なクラスタ形成となるように、資源利用の最適化や遅延特性の改善を図るための手法を検討した。

ネットワーク内の記憶資源をもつルータをグループ化 (クラスタ) し、ストレージプールのように扱うクラスタリング手法はこれまでにもいくつか提案されてきた。通常、各クラスタはネットワークの厳密な分割によって形成され、クラスタ内の分散情報を効率的に取得するための経路制御が適用されている。しかし、この設計には 2 つの課題が存在する。1 つ目は、ユーザ位置により情報の取得性能に不平等性が発生することである。具体的には、クラスタの端に位置するユーザはクラスタの対角の位置に存在するルータで保持された情報を取得するために時間を要する可能性がある。これに対し、管理者視点でネットワークを厳密に分割するのではなく、各ユーザを中心に周囲のルータ群でクラスタを形成するクラスタリング手法を提案した。本手法は、ユーザの位置とそのユーザに必要なとされる情報の配置位置 (記憶資源をもつルータ) までの総距離

が最小となる情報の配置位置を解くことによって、各ユーザを中心として折り重なったクラスタ群を形成する。2つ目の課題は、情報の要求傾向の変動により、情報の取得性能が低下することである。例えば、ユーザがクラスタ内のルータ群で保持可能な情報の総容量を超えるほどに多様に情報を要求する場合、ユーザは近接するクラスタのみで情報を取得できなくなる。これに対し、時々で変動するユーザの要求傾向に適応するために、クラスタを適切なクラスタサイズへの移行を可能とするシンプルな閾値ベースのアルゴリズムを考案した。本手法は、クラスタに十分な情報量を保持できているかどうかを秒間のキャッシュ更新量を用いて推定・判断し、不可と判断した場合には、クラスタを拡大または縮小するという動作を続けることで最適なクラスタを発見する。図4は提案手法の概要を示している。

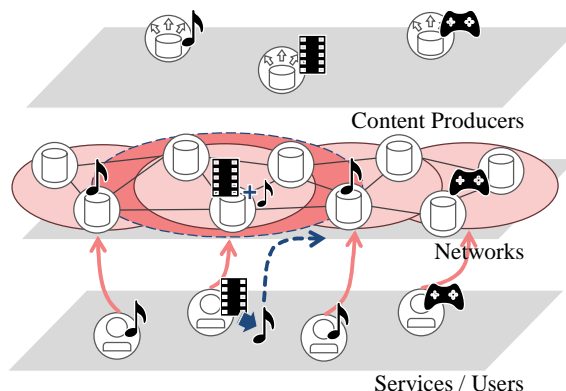


図4 提案手法の概要

提案手法の有効性を評価する

ため、ネットワークシミュレータns3を用いて性能評価を行った。評価環境は実環境への適用性を考慮し、110台のルータからなる実際のネットワークトポロジのデータセットを用いた。各ルータを記憶資源をもつルータとし、各ルータにはサーバとユーザを接続し、キャッシュサイズは情報の総量に対し約1%とした。時々の変動を実現するために60秒ごとに人気度分布を変更した(図5)。比較対象は、情報指向ネットワークのオリジナルのキャッシング手法であるLCEと従来のクラスタリング手法(HRC)、および提案手法(Proposed)とした。

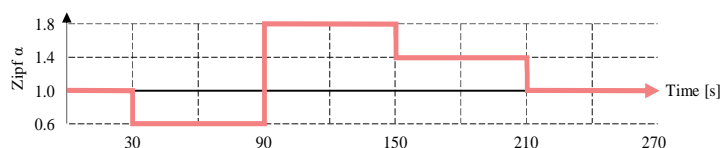
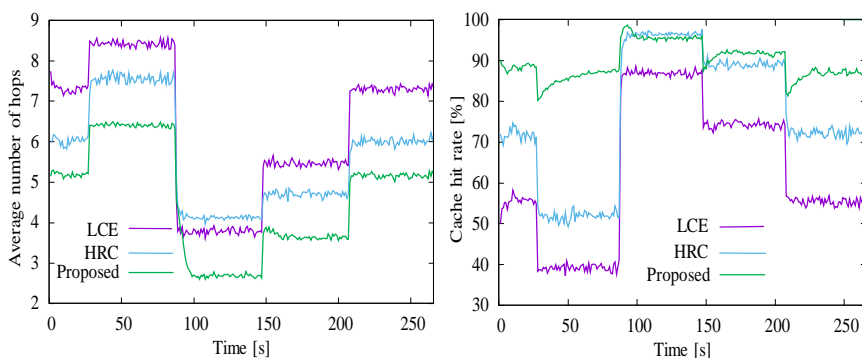


図5 シミュレーション中のコンテンツ要求傾向の変動

評価の結果、提案手法は従来手法よりも取得効率を大幅に改善しており、各ユーザを中心としたクラスタ群を要求傾向の変動に応じて適切に形成することで、サービス形成に必要な情報の流通を自動的に支援可能であることを確認した(図6)。



(a) コンテンツ取得性能

(b) キャッシュ利用効率

図6 従来手法と提案手法の性能比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mikiya Yoshida, Yusuke Ito, Yurino Sato, Hiroyuki Koga	4. 巻 E107-B(5)
2. 論文標題 PopDCN: Popularity-Aware Dynamic Clustering Scheme for Distributed Caching in ICN	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 398-407
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/transcom.2023EBP3152	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19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 香川敦史, 伊藤友輔, 古閑宏幸
2. 発表標題 ICNにおける遅延メトリックに基づく経路制御手法の基礎特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 合澤勝之, 伊藤友輔, 古閑宏幸
2. 発表標題 情報指向ネットワークにおける複数コンテンツ属性に対するキャッシュ基礎特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古賀舜也, 吉田未希也, 古閑宏幸
2. 発表標題 情報指向ネットワークにおける符号化を用いたキャッシュ効率向上手法の検討
3. 学会等名 電気・情報関係学会 九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大槻郁弥, 伊藤友輔, 古閑宏幸, 長谷川幹雄
2. 発表標題 ICN上のストリーミング配信におけるファジィ理論に基づくパケットスケジューリング手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 超知性ネットワーキングに関する分野横断型研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mikiya Yoshida, Yusuke Ito, Yurino Sato, Hiroyuki Koga
2. 発表標題 Popularity-Aware Dynamic Clustering Scheme for Distributed Caching in ICN
3. 学会等名 ACM Conference on Information-Centric Networking (ICN2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yurino Sato, Hiroyuki Koga
2. 発表標題 A Content Popularity Classification-Based Content Search Scheme for CCN
3. 学会等名 IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mikiya Yoshida, Yusuke Ito, Yurino Sato, Hiroyuki Koga
2. 発表標題 Performance Evaluation of Popularity-Aware Dynamic Clustering Scheme for Distributed Caching in ICN
3. 学会等名 APSIPA Annual Summit and Conference (ASC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田嗣雲, 伊藤友輔, 古閑宏幸, 長谷川幹雄
2. 発表標題 モバイルエッジコンピューティングにおける符号化キャッシングの最適化手法に関する検討
3. 学会等名 電気学会 通信研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐当百合野, 中村俊介, 古閑宏幸
2. 発表標題 コンテンツ指向ネットワークにおけるクラス化した人気度情報を用いた分散キャッシュ探索手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐当百合野, 伊藤友輔, 古閑宏幸
2. 発表標題 情報指向ネットワークにおける予約機能を用いた分散キャッシュ取得効率向上手法の性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉井篤志, 吉田未希也, 伊藤友輔, 古閑宏幸
2. 発表標題 分散エッジコンピューティングのためのフィードバック遅延を考慮したデッドラインスケジューリング手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安山雄翔, 吉田未希也, 古閑宏幸
2. 発表標題 ICNにおける制御負荷軽減のためのブルームフィルタを用いた経路制御手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐当百合野, 大賀政弥, 古閑宏幸
2. 発表標題 コンテンツ指向ネットワークにおけるクラス化した人気度情報を用いた分散キャッシュ探索手法の性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 内田耕太郎, 吉田未希也, 古閑宏幸
2. 発表標題 [ポスター講演]リアルタイムデータストリームのための準信頼性通信に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長岡輝, ラスエドジャメルエディン, 佐当百合野, 古閑宏幸
2. 発表標題 高機能ルータにおけるパケットレベルFECを用いたTCPスループット改善の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kotaro Uchida, Mikiya Yoshida, Hiroyuki Koga
2. 発表標題 A Study on Semi-Reliable Communications for Real-Time Data Stream Services
3. 学会等名 IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Taketo Yasuyama, Mikiya Yoshida, Hiroyuki Koga
2. 発表標題 A Study on Bloom Filter-Based Routing Scheme to Reduce Network Overhead in ICN
3. 学会等名 IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 安山雄翔, 吉田未希也, 伊藤友輔, 古閑宏幸
2. 発表標題 ICNにおけるブルームフィルタを用いた効率的な経路制御手法の性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉井篤志, 伊藤友輔, 古閑宏幸
2. 発表標題 分散エッジコンピューティングにおける適応型フィードバックに基づくデッドラインスケジューリング手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2024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
---------	---------