

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11266

研究課題名(和文) エッジコンピューティングで実現するモバイルタイルドディスプレイの開発

研究課題名(英文) A Development of the Mobile Tiled Display on the Edge Computing Platform

研究代表者

近堂 徹 (Kondo, Tohru)

広島大学・情報メディア教育研究センター・准教授

研究者番号：90437575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：複数の携帯デバイスを物理的かつ論理的に連携させたモバイルタイルドディスプレイの開発を行った。リアルタイムストリーム制御や携帯デバイス連携制御(属性ベース暗号によるデバイスグループ制御、ネットワーク品質に基づく画面配置制御、再生同期)にエッジコンピューティングを適用する。本システムの開発と実験的評価を通して、通信遅延や帯域変動等の外的要因に対する提案手法の効果や利用者に対する利便性・操作性への影響について明らかにした。主観的な効果が見られ、提案手法の有効性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、今後一層加速することが予想されるエッジコンピューティングにおける技術的課題を、適用アプリケーションを見据えた形で具体的に洗い出し、それを解決するシステム開発を行ったことに特徴がある。リアルタイムストリームデータは遅延変動や帯域変動の影響を受けやすいデータのひとつであり、エッジコンピューティング技術が効果的に機能すると考えられる。高精細映像を用いたリアルタイムストリームデータによるモバイルタイルドディスプレイはこれまで実現されておらず、本技術開発を通して得られる客観的かつ定量的な成果は、エッジコンピューティングの適用分野として現実的なものとなることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a mobile tiled display which physically and logically works among multiple mobile devices. Edge computing is applied to real-time stream processing and mobile device control (including device group control using attribute-based cryptography, screen placement control based on network quality, and tiled synchronization). Through the system development and experimental evaluation, we showed the effect of the proposed method on the quality control against degradation due to such as communication latency and bandwidth fluctuation, as well as on the usability and operability for users. From these results, subjective effects were observed and the effectiveness of the proposed method was demonstrated.

研究分野：情報科学

キーワード：エッジコンピューティング ストリーミング 属性ベース暗号 タイルドディスプレイ

## 1. 研究開始当初の背景

コンピュータの高度化、低価格化による爆発的な普及、モバイルブロードバンド接続の整備を背景に、ICT 環境は市民生活や企業活動を根底から支える重要な社会基盤として我々の生活に溶け込んでいる。今後、インターネット上で流通する多種多様なデータとコンピュータを連携させるサイバーフィジカルシステムへの応用がより一層加速されることは想像に難しくない。

その背景のひとつにエッジコンピューティングの台頭が挙げられる。エッジコンピューティングに関する研究はすでに多数の研究開発が進められているものの、アプリケーション分野によって求められる要件が異なるために、いまだ多数の技術的課題が残されている。特に、「処理のオフロード判断機構と資源割当」や「エッジサーバ配下のデバイス間連携」は今後のエッジコンピューティング技術の発展には避けて通れない。「オフロードの判断機構と資源割当」とは、デバイスにおける処理の一部を要求要件や負荷状況に応じてエッジサーバやクラウドへ適切に分担させることを判断することであり、「エッジサーバ配下のデバイス間連携への対応」とは、エッジサーバに処理をオフロードした端末群が相互に連携したアプリケーション実行を可能にすることである。今後これらの課題を、適用アプリケーションを見据えた形で具体的に解決していく必要がある。

一方、スマートフォンやタブレットなどのモバイルデバイス(以下、携帯デバイス)で映像を視聴するモバイルストリーミングが広く普及するようになった。4G や Wi-Fi を経由してフル HD や 4K 映像などの高精細ストリームを携帯デバイスまで配信可能になり、今後は 5G を利用した 8K 映像や多地点(マルチアングル)映像の配信など、より大容量データの配信やサービス品質の向上に向けた取り組みが加速すると考えられる。しかしながら、それらの多くは携帯デバイス単体を配信対象としたものであり、複数の携帯デバイスを物理的かつ論理的に連携させるための管理手法や配信に必要な同期制御は考慮されておらず、解決すべき課題が残されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、複数の携帯デバイスを物理的かつ論理的に連携させたモバイルタイムディスプレイ(以下、MTD)の開発を行う。4K 映像などの高精細ストリームを対象とし、リアルタイムストリーム制御や携帯デバイス連携制御(セキュアグループの定義、再生同期)にエッジコンピューティングを応用する。さらに、端末特性やネットワーク特性を考慮して端末の画面構成を制御する手法を実現する。本システムの開発と実験的評価を通して、通信遅延や帯域変動等の外的要因に対する提案手法の効果や利用者に対する利便性・操作性への影響について明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、図 1 に示すシステム構成を最終目標とし、(ア)属性ベース暗号を用いたデバイスグループ管理技術、(イ)端末特性を考慮した画面構成技術、(ウ)エッジノードでのストリーム処理技術に細分化した研究開発を行う。

(ア)では、端末の解像度やサイズなどの端末特性や端末が接続するネットワーク状態(帯域や遅延、接続メディアなど)を MTD の構成端末の属性と定義し、その組み合わせで表現される条件を満たす端末のみがグループに参加できタイムディスプレイを構成できる手法を提案する。本手法を実現するために暗号文ポリシー属性ベース暗号(CP-ABE)を活用する。CP-ABE は属性を秘密鍵、復号条件(ポリシー)を暗号文に設定することで、属性がポリシーを満たすと復号できる暗号方式である。これにより、MTD のグループに参加するための情報を暗号文に関連付けることにより、条件を満たす属性を持つ端末のみが MTD を動的に構成することが可能となる。この際、グループの認可処理のフローや処理時間の検討が必要になる。

一方で、(ア)での一定条件を満たす端末のみで構成されるグループ内であっても性能・機能差やネットワーク遅延の差が端末の同期処理に影響を与え MTD の品質を低下させる恐れがある。そこで、(イ)では、端末特性やネットワーク特性を考慮して端末の画面構成を制御する手法を提案する。提案手法では、画面配置を決定するための指標として、通信の安定性を考慮しサーバと端末間のジッタ値を利用し、端末の画面位置の優先度を決定する。(ウ)では、(ア)・(イ)の機能に加えてストリームの分割や各端末への配送処理を行う MTD システムをエッジサーバで実現するためのプロトタイプ実装と評価を行う。

## 4. 研究成果

### (1) システム概要

本研究で構築したシステム構成を図 1 に示す。提案するシステムは、ストリーミングサーバ、グループングやストリーミング制御を管理するエッジサーバ、スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末で構成される。本研究の特徴となるエッジサーバは以下の 3 つの機能を持つ。

- ・ 機能 1: 端末からの MTD 参加要求に対するグループングのためのアクセス制御
- ・ 機能 2: ストリーミングサーバから取得する映像を複数のディスプレイ向けに分割し、適切なフォーマットにトランスコードして配信
- ・ 機能 3: MTD 端末の特性管理、画面レイアウトの制御

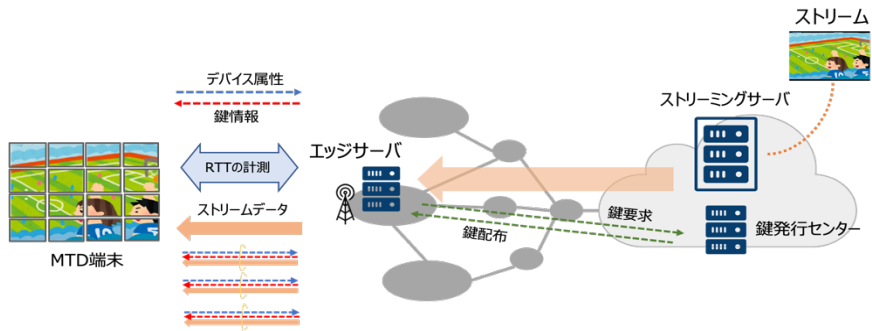


図 1 システム概要

(2) CP-ABE を用いた MTD グループ制御手法

本システムでは異なる特性を持つ端末群で MTD を構成するため、一定条件を満たす端末のみでグルーピングする制御手法を実装した。暗号文ポリシー属性ベース暗号(CP-ABE)を用いて、ポリシーに MTD を構成する端末が最低限満たすべき条件を埋めこむことにより、端末特性が条件を満たさない端末を除外することを可能にした。例えばポリシーとして、画面サイズの範囲を小さくすれば画面サイズに大きな差があるものを除外することができ、通信品質が悪く MTD の表示品質を下げるような端末もグルーピングによって除外できる。

取得する端末特性と定義できるポリシー項目については表 1 に示す。また、グルーピング時にしているポリシーの例を以下に示す。このように AND や OR を使って複数の条件を指定することができ、柔軟な制御を可能としている。

(1800 <= width < 2600) and (1200 <= height < 1600) and (30 <= networkSpeed < 60)  
and (pingJitter < 100) and (au or docomo or wifi)

表 1 端末特性やポリシーで利用する値

値	説明
width	端末の横幅 [px]
height	端末の縦幅 [px]
networkSpeed	ネットワーク速度 [Mbps]
pingJitter	RTT のジッタ [ms]
carrier	docomo, au, softbank などの携帯キャリア, Wi-Fi 接続時は wifi

(3) ネットワーク特性を考慮した端末の画面構成手法

MTD を構成する場合、各端末でタイル毎のストリームを受信することになるが、端末の特性が同じであることは稀であるため、端末の性能差による映像の品質劣化が視聴体験に直接的な影響を与える可能性がある。そこで本研究では、CP-ABE によるグルーピング後の画面構成配置を決定する機能を組み込んだ。各タイルを担当する端末位置は以下のように決定する。

各端末間の状態を、端末特性を管理するエッジサーバに集約した後、画面配置を決定する指標として、端末特性管理サーバ(エッジサーバ)と端末間の遅延変動(ジッタ)を測定する。端末側の起動から、各端末から端末特性管理サーバまでの ICMP による RTT を 1 秒ごとに計測し、その結果から、ジッタの小さい端末を中心に集めることで同期ずれによる映像表示への影響を軽減する。

今回の実装では、端末をまず画面の中心から配置する。縦横の接続数が奇数か偶数かで中心位置の数が変わるが、偶数×偶数の場合は4ヶ所となる。そのため中心位置が複数ある場合は、左上から時計回りに配置するようにした。その後、中心の位置からマンハッタン距離が小さい位置から順に端末を配置していく。マンハッタン距離  $d(A,B)$  は、座標平面上の 2 点  $A(a1, a2)$  と  $B(b1, b2)$  の距離で、 $d(A,B) = |a1-b1|+|a2-b2|$  で計算される。一例として 6×6 のタイルディスプレイを構成する場合の画面優先順を図 2 に示す。

	X=0	X=1	X=2	X=3	X=4	X=5
Y=0	33	21	22	23	24	34
Y=1	20	13	7	8	14	25
Y=2	19	6	1	2	9	26
Y=3	18	5	4	3	10	27
Y=4	17	16	12	11	15	28
Y=5	36	32	31	30	29	35

図 2 画面配置の優先順位 (6x6 の場合)

#### (4) プロトタイプシステムの実装

図 3 にプロトタイプシステムにおける処理フローを示す。開発したシステムでは、以下の 6 つのステップで処理が行われる。

- **Step1. MTD グループのための公開鍵配布** 鍵生成センター (KGC) は、CP-ABE による MTD グループ化で使用するマスター公開鍵とマスター秘密鍵 を作成し、あらかじめ配布する。
- **Step2. RTT の計測** 端末がアプリケーションを起動すると、エッジサーバ間の RTT 計測を開始する。グループが確立するまでのバックグラウンド処理として、1 秒間隔で RTT を計測する。
- **Step3. マスター端末による MTD グループの作成** マスター端末はグループを構成する端末の参加条件 (CP-ABE ポリシー) を設定し、エッジサーバに送信する。エッジサーバは参加条件を受信すると、一意のグループを示す Display ID を生成する。マスター端末は Display ID を受信すると、その ID を画面に表示する。
- **Step4. 構成端末のグループ参加** MTD に参加したい端末は、アプリケーションウィンドウに参加したいグループの Display ID を入力し、エッジサーバに送信する。この時、端末属性を取得して KGC (鍵発行センター) に送信し、KGC は属性をもとに秘密鍵を生成して各端末に送り返す。そして、エッジサーバは、MTD グループ参加条件とマスター公開鍵を用いてランダムな文字列を暗号化し、端末に送信する。端末は暗号文を受信すると、秘密鍵を用いて復号化し、復号化結果をエッジサーバに送信する。エッジサーバは、受信した復号結果と暗号化前のランダム文字列を比較し、一致した場合のみ端末のグループ参加を許可する。
- **Step5. MTD 画面の構成** 参加端末数が予定数に達すると、エッジサーバは構成端末にネットワーク特性取得要求を送信する。要求を受けた端末は RTT 測定を終了し、取得した RTT のジッターを計算し、エッジサーバに結果を送信する。エッジサーバは、構成端末の端末特性であるジッターを用いて端末の優先度を決定する。そして、前述の画面配置方法に従って、優先度の高い端末を中心から順番に割り当てる。配置が完了すると。エッジサーバは各構成端末に配置通知 (配置位置) を送信する。ユーザーは、その情報をもとに手動で配置を変更する。
- **Step6. エッジサーバと端末間の時刻同期処理** エッジサーバは、構成端末間の時刻同期処理を行う。時刻同期は SNTP 方式で端末とエッジサーバ間の時差を計算し、エッジサーバと端末群が同期するように調整する。各構成端末はエッジサーバからストリーミング情報を受信すると、ストリームを受信しながら開始時刻に映像を表示する。

なお、上記ステップの 3 から 6 は、図 3 の A(3,4), B(5), C(6)に相当している。図 4 に実装した MTD システムによる動画再生の様子を示す。

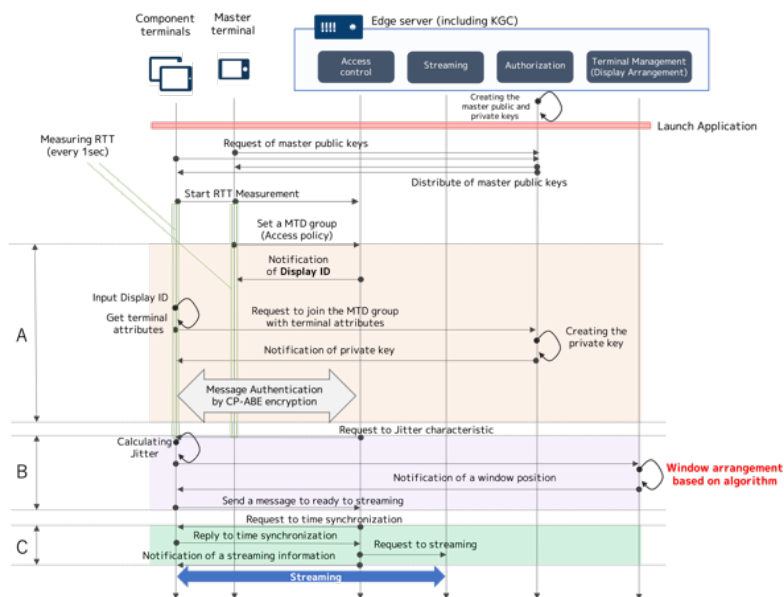


図 3 処理フロー



図 4 MTD システムによる動画再生の様子

## (5) 評価実験

### (5-1) MTD グループおよび画面構成に要する処理時間

本システムを用いて MTD を構成する際のオーバーヘッドについて評価を行った。端末毎にネットワーク遅延が異なる環境(100±50ms が 4 台, 80±30ms が 8 台, 50±0ms が 4 台)で、最大 16 台の端末による、MTD の動画再生までに要する時間を計測した。なお、ユーザー自身が操作を行う部分の時間は除外した。

図 5 に測定結果(計測 5 回分の平均値)を示す。図中の A, B, C は図 3 の処理フローの各セクションに対応する。測定結果より、端末台数増加による(A)および(B)の増加はみられなかった。また、全体にかかる時間は 16 台の時で約 4.5 秒であるが、ユーザー入力が必要な画面遷移の時間などを考慮すると、処理時間としては許容できる値であると考えられる。

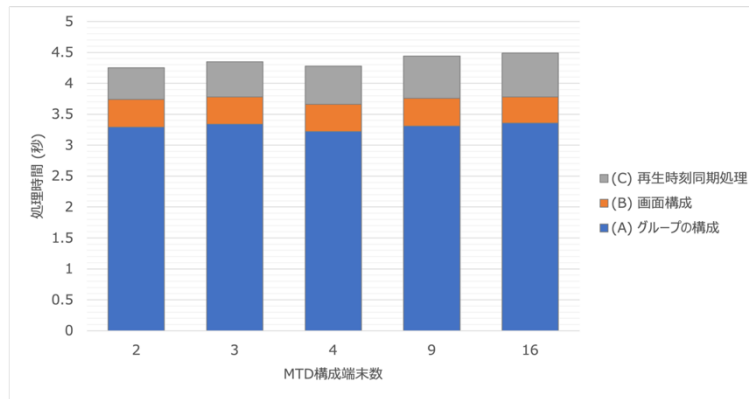


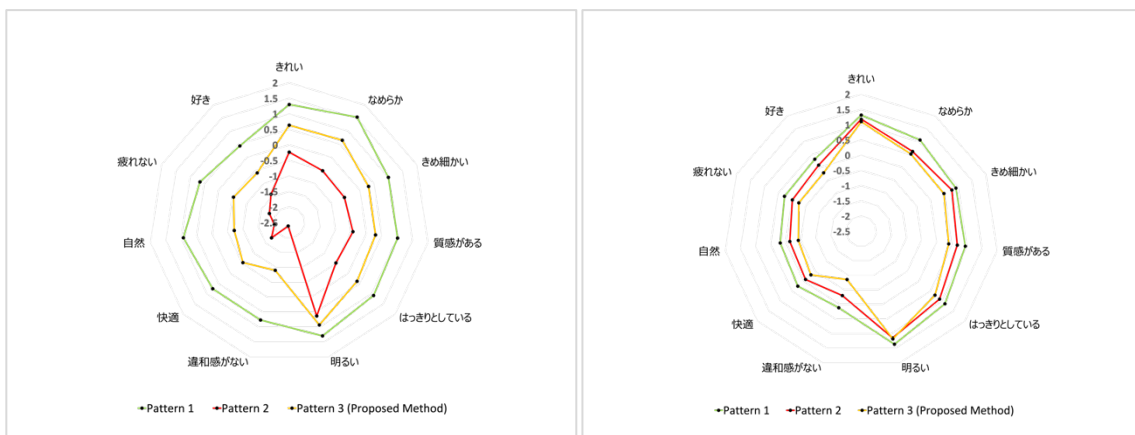
図 5 MTD 構成端末数と処理時間

### (5-2) MTD システムの主観評価

次に提案システムの画面配置による主観評価を行うために、60 名の被験者を対象に視聴アンケートを実施した。このアンケートでは、2 つの映像ソース(画面変化が大きい映像と小さい映像)について、それぞれ特性の異なる 3 つの映像(計 6 本)を用意した。各映像には、完全同期の MTD 映像(パターン 1)、端末ごとに遅延が異なる環境で提案手法を用いない映像(パターン 2)、端末ごとに遅延が異なる環境で開発システムによる置き換えを行った映像(パターン 3)を用意した。各映像を視聴した後、11 項目の評価項目について 7 段階(-3~3)で被験者から回答を得た。本アンケートの項目は、先行研究である高精細大型映像の感性評価に基づいて定義した。

まず、図 6(a)の映像タイプ 1(画面変化の大きい映像)の結果について説明する。レーダーチャートの広がり大きいほど評価が高いことを表している。この結果から、提案手法を用いることでパターン 2 よりもパターン 3 の方が、評価結果が高くなっていることがわかる。この結果は、提案手法による画面配置の変更処理が映像の視聴品質の維持に貢献したことを意味している。一方で、映像タイプ 2(画面変化の小さい映像)の結果を図 6(b)に示す。この場合は、提案手法の方が低評価の項目が多くなっているが、手法間で大きな有意差は見られなかった。低評価の項目が多くなっているのは、RTT ジッタの大きい(低品質の)端末が再生する映像が用意した映像の特性により大きく変化したためと考えられる。

これらの結果から、特に動きのある映像に対して主観的な効果が見られ、提案手法の有効性を示すことができた。



(a) 映像タイプ 1(画面変化の大きい映像)

(b) 映像タイプ 2(画面変化の小さい映像)

図 6 MTD システムの主観評価



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tohru Kondo, Kaori Maeda	4. 巻 1
2. 論文標題 Cloud-based Dynamic Tiled Display Adapting to Grouping by Distinction of Mobile Devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the IEEE 2019 Twelfth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network (ICMU)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/ICMU48249.2019.9006637	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 Tohru Kondo, Hidenobu Watanabe, Kai Kobayashi, Hayato Kimura, Toshihiro Ohigash	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of the Edge Computing Platform with Dynamic Modular Configuration for an IoT Platform	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1-6
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 林 健汰, 加森 剛徳, 前田 香織, 近堂 徹, 相原 玲二	4. 巻 60
2. 論文標題 CP-ABEを用いたVDIの使用権限委譲機構の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 750-757
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 加森 剛徳, 前田 香織, 近堂 徹, 相原 玲二	4. 巻 2019-10T-44
2. 論文標題 CP-ABEによる認可機構を備えたクラウドアプリケーション共有基盤の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 情報処理学会研究報告	6. 最初と最後の頁 1-7
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 無
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 Kondo Tohru, Murakami Hiroki, Maeda Kaori	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of a window positioning method considering network characteristics for a mobile tiled display	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	6. 最初と最後の頁 671-674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCNC49033.2022.9700620	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 多々納 啓人, 前田 香織, 近堂 徹, 高野 知佐,	4. 巻 1
2. 論文標題 ユーザの要求を反映するデータフロー処理基盤の提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOM02021)シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 1486-1491
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 多々納 啓人, 前田 香織, 近堂 徹, 高野 知佐	4. 巻 2022-10T-56
2. 論文標題 データフロー処理の広域展開を可能にする プラットフォームコントローラの開発と実装	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 情報処理学会研究報告	6. 最初と最後の頁 1-7
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 無
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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Tohru Kondo
2. 発表標題 Development and Evaluation of the MEC Platform with Dynamic Modular Configuration
3. 学会等名 APAN 48 Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多々納 啓人, 前田 香織, 近堂 徹, 相原 玲二
2. 発表標題 ポリベースマイグレーションを備えるクラウドアプリケーション共有基盤の提案
3. 学会等名 第21回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土手貴裕, 前田香織, 近堂 徹
2. 発表標題 障害につながる状態変化を表現可能な FIT システムの提案
3. 学会等名 第21回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta Hayashi, Kaori Maeda, Tohru Kondo
2. 発表標題 A Design of Failure Injection Testing considering Edge Computing Environment
3. 学会等名 Internet Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上洋希, 近堂 徹, 前田香織
2. 発表標題 ネットワーク特性を考慮したモバイルタイルドディスプレイ構成の提案と実装
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021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
研究協力者	前田 香織 (Maeda Kaori)	広島市立大学・大学院情報科学研究科・教授  (25403)	
研究協力者	村上 洋希 (Murakami Hiroki)	広島市立大学・大学院情報科学研究科・博士課程前期  (25403)	
研究協力者	多々納 啓人 (Tatano Yoshihito)	広島市立大学・大学院情報科学研究科・博士課程前期  (25403)	
研究協力者	土手 貴裕 (Dote Takayuki)	広島市立大学・大学院情報科学研究科・博士課程前期  (25403)	
研究協力者	林 健汰 (Hayashi Kenta)	広島市立大学・大学院情報科学研究科・博士課程前期  (25403)	
研究協力者	加森 剛徳 (Kamori Gotoku)	広島市立大学・大学院情報科学研究科・博士課程前期  (25403)	

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
---------	---------