

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11931

研究課題名（和文）面的で詳細な状態把握に基づく多層ネットワークコンピューティング基盤

研究課題名（英文）Fundamental Technology of Multi-layered Network Computing for Advanced Network Applications

研究代表者

萬代 雅希（Bandai, Masaki）

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：90377713

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、質・量の両面で高度化するアプリケーションを実現するために、面的で詳細なネットワーク状態把握に基づく多層的なネットワークコンピューティング基盤技術を確立することが目的である。本研究では、複合現実（MR）、モノのインターネット（IoT）、2次元映像のライブストリーミング、360度拡張現実（VR）ストリーミングにおけるネットワークコンピューティングを意識した各種方式を提案し、有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、仮想現実や複合現実、映像ストリーミング技術、IoT等の具体的なユースケースを設定し、階層的に位置するネットワークノードのどこでどのような情報処理を実行するかを明らかにする取り組みである。多様化するネットワークアプリケーションのための基盤技術として学術的に意義深いだけでなく、各種提案方式を実システムに実装し詳細に性能評価した点は社会的にも意義あるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is constructing the fundamental technology of multi-layered network computing for advanced network applications. This research proposed the methods for mixed reality (MR), IoT, video live streaming, and 360-degree virtual reality (VR) streaming, and evaluated the performance of the proposed methods using both computer simulations and actual system implementations.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：エッジコンピューティング

## 1. 研究開始当初の背景

近年、ネットワークを使ったアプリケーションが質・量の両面から高度化している。質の観点では、主として映像ストリーミングの高度化が挙げられる。具体的には、現実空間と仮想空間が融合した複合現実 (MR: Mixed Reality) の実現に向けて、映像ストリームをネットワーク内のノード (エッジサーバー) に送り情報処理をするネットワーク内情報処理の必要性が高まっている。また、2次元映像のストリーミングの高解像度化やリアルタイムなライブストリーミング配信への拡張、360度拡張現実 (VR: Virtual Reality) 映像のストリーミングなどへの進展が顕著である。量の観点では、モノのインターネット (IoT: Internet of Things) に代表されるセンサーなどで取得された情報を機械学習などで処理し、高度なサービスを実現する要求が高まっている。このような背景から、本研究ではネットワークを使った高度なアプリケーションを実現するためには、エンドデバイス、エッジサーバー、サーバー (クラウド) の多層的なシステムでネットワークとコンピューティングが連携する必要があるとの認識に至った。

## 2. 研究の目的

本研究は、質・量の両面で高度化するアプリケーションを実現するために、面的で詳細なネットワーク状態把握に基づく多層的なネットワークコンピューティング基盤技術を確立することを目的とする。具体的には下記の研究課題に取り組んだ。

- (1) 複合現実 (MR) のための物体検出におけるエッジサーバーへのオフロード手法
- (2) IoT アプリケーションのためのエッジコンピューティングの活用手法
- (3) HTTP アダプティブライブストリーミングにおける帯域推定および動画品質選択法
- (4) 360度仮想現実 (VR) ストリーミングにおける動画品質選択手法

## 3. 研究の方法

本研究で提案する各種システムおよびアプリケーションを実機上に実装し評価した。複合現実の研究では Microsoft HoloLens 2、360度 VR ストリーミングの研究では HTC 社のヘッドマウントディスプレイ (HMD) を使用した。エッジサーバーとしては、高性能 GPU を備えたデスクトップ型コンピューターを使用した。IoT 関連の実験においては、Amazon Web Services (AWS) のサーバを活用した実験環境を使用した。また、Python 言語でネットワークシミュレータを実装し、計算機シミュレーションにより性能評価した。

## 4. 研究成果

- (1) 複合現実 (MR) のための物体検出におけるエッジサーバーへのオフロード手法

本課題では、MR のための物体検出処理のエッジサーバーへのオフロード手法を提案した。MR とは物理空間に仮想物体や各種情報提示することで、現実空間をより高度な情報空間へと拡張するものである。ユーザーはシースルー型 HMD などの MR デバイスを装着し、視野内の物体を検出しリアルタイムで情報を提示する。一般に、画像内の物体検出にはニューラルネットワークなどの負荷の高い処理を必要とする。しかし、処理能力の制約がある MR デバイスでは単体でのリアルタイムでの物体検出処理の実行は難しい。本課題では、MR デバイスに搭載されたカメラでユーザーの視野の静止画像をエッジサーバーに送信し、エッジサーバーで物体検出処理を行い、処理の結果を MR デバイスに送信するシステムを考案した。提案手法では、MR デバイスのカメラやセンサを用いてユーザーの視線の方向を認識し、現在の視界がすでに物体検出が実行されているかどうかを判定する。また物体検出が行われていない場合だけエッジサーバーでの物体検出を行うことで検出の重複を防ぐ。さらに提案方式では、ユーザが見ている物体までの距離に応じて、エッジサーバーに送信する画像の解像度を適応的に変更する。これらにより、物体検出の回数 (フレームの送信回数) と送信データ量を削減して MR デバイスの負荷を軽減する。

Microsoft HoloLens 2 を用いた実システムに提案方式を実装し、室内での 3 つの状況で、物体検出の回数、送信データ量、処理時間を評価した。評価結果より、提案手法が特に視線の変化が比較的少ない状況で、エッジサーバーへのオフロード回数を極力低減した上で効率的に物体検出処理を実現できることがわかった。また、適応的な画像の解像度の変更手法に関して、画像の解像度と物体検出精度にはトレードオフがあることを確認した上で、提案方式が必要な物体検出精度を実現する必要最小限のデータ送信量の画像をエッジサーバーにオフロードできることを確認した。

- (2) IoT アプリケーションのためのエッジコンピューティングの活用手法

本課題では、IoT アプリケーションのためのエッジコンピューティング活用手法について、二つのサブテーマに取り組んだ。

サブテーマ 1 として、取得した位置情報に紐づいた IoT センサーデータ収集のためのエッジコンピューティングシステムを提案した。提案システムは、各種情報を取得するセンサーノードと情報を収集するエンドデバイス間にエッジサーバーを設置する。提案方式では、複数のエッ

ジサーバーでクラスターを構成し、位置に紐づいたデータの名前付けを導入することで、エッジサーバーの負荷の軽減と、エンドデバイスによる情報収集の遅延の低減、さらにはシステム全体の可用性を向上する。性能評価では、理論的な数値計算に加えて、AWS 上に提案方式を実装し、有効性を確認した。

サブテーマ 2 として、スマートシティにおける多数の車両等で取得された画像データをエッジサーバーに送信し、エッジサーバーで前処理をする複数層のエッジコンピューティング形態に関して検討を行った。提案方式では、エッジサーバーにおいて類似画像を削除することで、クラウドサーバーに至るネットワークにかかる負荷を低減する。エッジサーバーにおける処理がクラウドサーバーにおける機械学習の性能に与える影響について評価し、有効性を確認した。

### (3) HTTP アダプティブライブストリーミングにおける帯域推定および動画品質選択法

本課題では、2次元映像のリアルタイムライブストリーミングに関して検討した。ライブストリーミングでは、サーバーで映像が生成されてからエンドデバイス(クライアント)で映像が再生されるまでの遅延を短くすることが求められる。CMAF(Common Media Application Format)は、一般的な動画配信で用いられる数秒程度の動画セグメントをさらに短い百数ミリ秒程度のチャンク単位に分割することで低遅延のライブストリーミングを実現する。本課題では、CMAF におけるチャンク間の空白の時間に着目し、この空白の時間によりエンドデバイスでのネットワーク帯域の推定に過小評価が起こる問題を定量的に明らかにした上で、新たに HTTP アダプティブライブストリーミングにおけるネットワーク帯域の推定精度の向上手法を提案した。提案方式はチャンクのグループ化を適用したライブストリーミングである。提案方式では、エンドデバイスからの HTTP リクエストの送信を一定時間遅らせる。遅延して送信された HTTP リクエストを受信したサーバは、受信した時点で既にエンコードが完了している複数個のチャンクをまとめて送信する。クライアントは、サーバからのチャンク群を用いてネットワーク帯域を推定する。これにより、チャンク間の空白の時間の影響を除去した正確なネットワーク帯域が予測できる。さらに、提案したネットワーク帯域予測手法を映像ストリーミングの動画品質選択手法に適用した映像ストリーミング手法を考案した。

提案方式の性能を Python で作成したネットワークシミュレーターで評価した。性能評価から、提案方式は既存の CMAF と比較して正確なネットワーク帯域予測を実現し、高い動画視聴品質を実現できることを明らかにした。本課題では、エンドデバイスで動作するライブストリーミングにおけるネットワーク帯域の推定手法について提案した上で、それを拡張したエッジサーバーでのネットワーク帯域の予測精度手法について検討した。しかし現段階では、エンドデバイスで HTTP 送信を遅延させる提案方式が簡易で良好な性能が得られたことから、提案手法に注力して研究を進めた。エッジサーバーでのネットワーク帯域の予測にはさらになる検討が必要である。

### (4) 360 度仮想現実 (VR) ストリーミングにおける動画品質選択手法

本課題では、ユーザーが HMD を装着し自由な視点で VR コンテンツを視聴する 360 度 VR 映像ストリーミングの高度化に関して検討した。本課題では、球面状の 360 度全方向映像を複数のタイルと呼ばれる領域に分割し、数秒ごとに分割された複数品質(動画の解像度や符号化ビットレート)のタイル状動画セグメントを、ネットワーク帯域、ダウンロード済み再生待ちデータ量およびユーザの視線情報に応じて HTTP により適応的に要求するタイルベースの VR アダプティブストリーミング手法を扱う。三つのサブテーマに取り組んだ。

サブテーマ 1 では、ネットワーク帯域およびユーザーの視線予測に基づいて、ユーザの視野内タイルとその周辺のタイルの品質差を小さくする動画タイル品質選択アルゴリズムを提案した。複数ユーザーの動画視聴時の視線情報を測定したデータセットを用いて性能評価を行い、提案方式が、ユーザが視聴する視野内タイルの品質差を小さくし、さらに連続するセグメント間での品質変動を小さくできることを示した。

サブテーマ 2 では、ネットワーク帯域およびユーザーの視線情報に加えて、過去のユーザーの視線情報の履歴を利用したタイル品質選択法を提案した。本提案方式に関しても、ユーザーの視聴情報を測定したデータセットを用いた性能評価により、ユーザが視聴した視野内のタイルの平均品質をほとんど劣化させることなく、視野内タイルの品質差および連続するセグメント間での品質変動を向上できることを示した。

サブテーマ 3 では、VR コンテンツにおける現実感の向上を目的として、ユーザーが見ている物体までの距離を考慮する被写体深度効果を付与する手法を提案し、複数ユーザーによる主観評価で有効性を評価した。

これら三つのサブテーマで扱った 360 度 VR ストリーミングでは、ネットワーク帯域の予測に加えてユーザの視線予測が性能に大きく影響する。VR コンテンツ視聴時のユーザの視線予測には、過去のユーザーの視聴履歴データを活用することが有用である。本課題ではこれらの情報をサーバーで収集することを仮定してシステムを考案したが、エッジサーバーで収集する手法への拡張が可能である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 HATTORI Daichi、BANDAI Masaki	4. 巻 E106.B
2. 論文標題 Chunk Grouping Method to Estimate Available Bandwidth for Adaptive Bitrate Live Streaming	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1133 ~ 1142
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2023EBP3021	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 Dziubinski Kiana、Bandai Masaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Viewport History as a Heuristic for Quality Enhancement and Quality Variation Control in Viewport-Aware Tile-Based 360-Degree Video Streaming	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 94652 ~ 94667
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3204331	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 SEKINE Arisa、BANDAI Masaki	4. 巻 E104.B
2. 論文標題 Suppression in Quality Variation for 360-Degree Tile-Based Video Streaming	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 616 ~ 623
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2020EBP3115	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13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 D. Hattori, M. Bandai
2. 発表標題 Adaptive Chunk Grouping Method for Low-Latency HTTP-Based Live Streaming
3. 学会等名 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Yamashita, M. Bandai
2. 発表標題 Edge-Assisted Object Detection Using Eye Tracking Function of Mixed Reality Devices
3. 学会等名 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kawabata and M. Bandai
2. 発表標題 Depth of Field Blur Effect Considering Convergence Distance in Virtual Reality
3. 学会等名 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下光大, 萬代雅希
2. 発表標題 MRデバイスでの物体検出におけるエッジサーバへのオフロード手法の評価
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 服部大地, 萬代雅希
2. 発表標題 HTTPアダプティブライブストリーミングにおける帯域推定に関する検討
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 2022年

1. 発表者名 D. Hattori and M. Bandai
2. 発表標題 Chunk Grouping Method for Low-Latency HTTP-Based Live Streaming
3. 学会等名 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Yamashita and M. Bandai
2. 発表標題 Implementation and Evaluation of Object Detection Using Mixed Reality Devices with Edge Computing
3. 学会等名 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Dziubinski and M. Bandai
2. 発表標題 Advancing User Quality of Experience Using Viewport Archives in Viewport-Aware Tile-Based 360-Degree Video Streaming
3. 学会等名 IEEE International Workshop Technical Committee on Communications Quality and Reliability (CQR 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Kashino and M. Bandai
2. 発表標題 Data Validation Scheme Considering Edge Computing for Mobile Crowdsensing Application in Smart Transportation
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Sekine and M. Bandai
2. 発表標題 Tile Quality Selection Method in 360-Degree Tile-Based Video Streaming
3. 学会等名 International Workshop on Telecommunication Networking, Applications and Systems (TeNAS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Kawaguchi and M. Bandai
2. 発表標題 Edge Based MQTT Broker Architecture for Geographical IoT Applications
3. 学会等名 International Conference on Information Networking (ICOIN 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川口遼, 萬代雅希
2. 発表標題 地理的なIoTアプリケーションのためのエッジベースMQTTブローカーアーキテクチャの性能評価
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 2020年

1. 発表者名 関根ありさ, 萬代雅希
2. 発表標題 タイルベースの360度動画ストリーミングにおけるタイルクオリティ選択方法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
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
---------	---------