

令和元年5月31日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00136

研究課題名（和文）複数の通信経路を弾力的に活用する高速大容量無線ネットワーク機構

研究課題名（英文）Wireless Network Architecture Using Multiple Communication Paths

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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、多様な通信品質の要求に対応可能な無線ネットワーク技術を構築するために、複数の通信経路を弾力的に活用するネットワーク機構を確立することが目的である。本研究では、複数経路を用いるトランスポート層プロトコルにおいて不均一な複数経路とミリ波リンク切断への対応手法を提案した。さらに、動画ストリーミングにおけるユーザ体感品質向上手法の提案とその複数経路環境での性能について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、多様な通信品質の要求に対応可能な無線ネットワーク基盤技術を見出すものである。今後、ネットワーク技術が多様な用途で生活インフラとして不可欠なものになることが予想される中で、実際のアプリケーションを視野に入れた通信インフラの検討は社会的に意義深いと考えられる。また、シミュレーションと実機実験の両面から有効性を検証した点は、学術的にも意義が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 proposing wireless network architectures using multiple communication paths for satisfying various communication qualities. This research proposed transport protocols for heterogeneous multipath environment. In addition, this research proposed adaptive video streaming methods to improve quality of experience of users, and investigated how multipath environment affects the quality of experience.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：モバイルネットワーク

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、無線ネットワークの高速大容量化が大きく進展している。一方で、無線ネットワークの適用領域が質と量の両面で広がりを見せている。4K/8K といった高品位なモバイル動画ストリーミングでは、ネットワークの高速大容量化に加えて、ユーザの体感品質を満たすための安定した通信が要求される。また、モノのインターネット IoT (Internet of Things) や車車間ネットワークにおいては、各種センサ等からの情報や移動する車両からの情報などを確実に伝える必要がある。このような多様かつ厳しい通信品質要求に対応可能な無線ネットワーク技術の確立が急務であるとの認識に至った。

2. 研究の目的

本研究は、多様な通信品質の要求に対応可能な高速大容量無線ネットワーク技術を構築するために、複数の通信経路を弾力的に活用する新しいネットワーク機構を確立することが目的である。具体的には、下記の研究課題に取り組んだ。

- (1) 複数経路を用いる無線ネットワークにおけるトランスポート層プロトコル
- (2) 動画ストリーミングアプリケーション方式の複数経路への対応
- (3) IoT および車車間ネットワークにおける複数経路の活用

3. 研究の方法

本研究で提案する各種プロトコルを、ネットワークシミュレータである ns-3 もしくは C 言語で自作したネットワークシミュレータ上に実装し、計算機シミュレーションにより定量的に性能評価した。動画ストリーミングに関しては、ストリーミングサーバ、ネットワーク帯域を制御するネットワークエミュレータ、dash.js を用いたクライアントアプリケーションを実機上に実装し、動画ストリーミング実験を行なった。シミュレーションによる性能評価に加えて、実機上に提案手法を実装し実験評価することで、多面的にその実現性や実用性を検証した。

4. 研究成果

(1) 複数経路を用いる無線ネットワークにおけるトランスポート層プロトコル

本課題では、トランスポート層での複数経路の活用に着目し、二つのサブテーマに取り組んだ。

サブテーマ 1 として、遅延時間差のある複数経路を活用するマルチパス TCP (MPTCP) を提案した。MPTCP は TCP フローを多重化することで耐障害性とスループット性能の向上が期待される。しかし、MPTCP は Wi-Fi とセルラ通信のように通信帯域や遅延時間等の性質が異なる通信経路を同時に利用するとき、TCP フローにおけるパケット送信が停止し、MPTCP コネクション全体のスループット性能が低下する問題がある。本サブテーマでは、データ送信者がデータ到達通知 (ACK) に記載された受信可能データ量の情報をもとにデータ受信者の受信バッファサイズの圧迫を検知し、遅延の大きな TCP フローの送信データ量の制御を行うことで、パケット送信の停止を早期に解消しスループットを向上させる方式を提案した。図 1 に ns-3 シミュレーションによる性能評価の結果を示す。2 経路の帯域が 10Mbps で等しく、サブフロー 1 の往復の伝搬遅延 (RTT) を 25ms とする。この時、両フローの RTT の差が大きい場合に、最大で約 58.9% のスループット改善の効果が得られることを確認した。

次に、サブテーマ 2 として、ミリ波帯を用いた無線ネットワークにおけるネットワーク状態予測に基づく複数経路トランスポートプロトコルを提案した。ミリ波リンクは、広帯域無線通信を実現できる利点を有するが、一方でその直進性の高さ起因して、遮蔽によるリンク切断が発生しやすい課題がある。本サブテーマではまず、単一経路でのミリ波の特質を考慮したミリ波切断後の通信再開までの時間を短縮する方式を提案した。提案方式は、再送タイムアウトの原因がネットワークの輻輳かミリ波の切断によるものなのかを判断し、ミリ波の切断によるものと判断した場合は再送タイムアウト時間を変更しないことで、ミリ波の切断からの復旧後の通信再開にかかる時間を短縮する方式である。再送タイムアウトの原因を判断する手法として、通信経路の RTT を用いる手法を考案した。ネットワークシミュレータ ns3-802.11ad 上に提

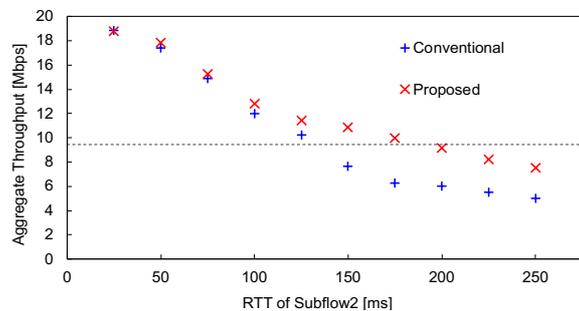


図 1 遅延時間差がある場合の MPTCP のスループット性能

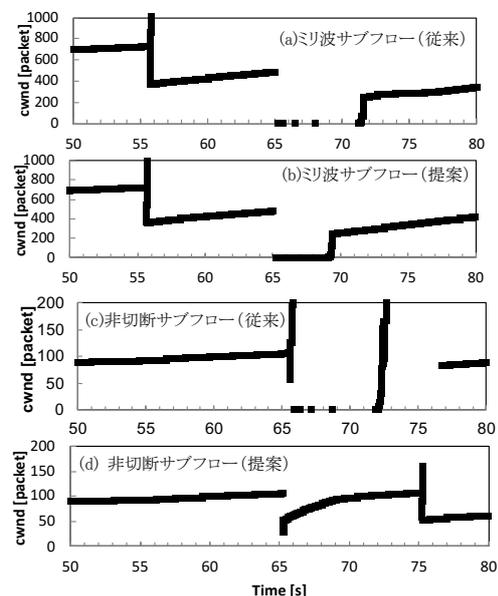


図 2 ミリ波サブフロー切断時の輻輳ウィンドウの変化

案方式を実装し性能評価した。まず、ミリ波通信の特質を明らかにするために、ミリ波リンクの第2層の再送処理が第4層にどの程度遅延の揺らぎとして影響するかのシミュレーション予備実験を行い、実験結果を使って遅延時間を確率的に与えるモデルを作成した。次に、作成モデルを用いて ns-3 上でシミュレーション評価し、ミリ波リンクの切断時間を1~4秒間で1秒おきに変化させた場合、リンク切断から通信再開にかかる時間を平均で850ミリ秒短縮できることを示した。

次に、提案手法を複数経路環境に拡張した。拡張した提案方式は、ミリ波サブフローの再送タイムアウトの原因をネットワークの輻輳かミリ波の切断によるパケットロスかを判断し、ミリ波の切断が原因だと判断した場合は、ミリ波サブフローの再送タイムアウト時間を保持し、非切断サブフローの輻輳ウィンドウサイズの上限設定を行う手法である。複数経路使用時においてミリ波リンクの切断時に他リンクに与える影響に関して、ミリ波リンクの通信切断時にミリ波リンクおよび他リンクの両方の通信経路で通信再開までに要する時間を ns-3 シミュレーションで評価した。図2に、ミリ波と非ミリ波リンクの2経路利用時に、実験開始から65秒の時点から4秒間ミリ波サブフローを切断した場合の輻輳ウィンドウサイズの変化を示す。比較対象は従来の Linked Increase (LIA) 方式である。図2(a)(b)より、提案方式はミリ波サブフローの通信不能時間を約2.2秒短縮できた。さらに、図2(c)(d)より、提案方式は非切断サブフローの通信不能時間を約6秒短縮でき、その有効性が確認された。

(2) 動画ストリーミングアプリケーション方式の複数経路への対応

本課題では、アプリケーションとして HTTP を用いた動画のアダプティブストリーミング (MPEG-DASH) を想定し、複数経路のネットワークの状況をアプリケーションで活用し、動画エンコードレートを動的に制御することで、ユーザの体感品質を向上する手法について検討した。まず単一経路での動画アダプティブストリーミング手法を提案した。次に、複数経路環境が動画アダプティブストリーミング手法の性能に与える影響について検討した。

まず、単一経路での動画アダプティブストリーミング手法について検討した。本課題では、あらかじめサーバ上に複数品質の動画を数秒単位のセグメントに分割して置いておき、クライアントは測定したネットワークスループットやクライアントでのバッファ量に応じて、適切な品質の動画セグメントをダウンロードする動画アダプティブストリーミングアルゴリズムを構築した。提案方式では、主な体感品質の低下要因である急激な動画品質の低下と頻繁な動画品質の変動の二つに着目した方式を提案した。さらに、動画の階層符号化を適用したアダプティブストリーミング方式を提案した。提案方式は、各動画フレーム間でのシーンの動きの大きさに着目し、アプリケーションレベルで動画の内容に応じて要求する動画品質を適応的に選択する。これらの提案方式の性能評価のために、基本的な実験用ネットワークを構築した。実験用ネットワークは、3台のPCを有線で接続し、それぞれにストリーミングサーバ、ネットワーク帯域を設定するネットワークエミュレータ、dash.js を用いたクライアントアプリケーションを実機上に実装した。無線環境をネットワークエミュレータで再現するために、市街地でのスマートフォンを使ったスループット測定実験を行い、無線ネットワークの時間変化を調査した。測定データに基づいてネットワークエミュレータを設定した実験用ネットワークでストリーミングに関する性能評価を行った。評価の結果、無線環境を想定した変動するネットワーク環境において、それぞれの提案方式が、平均視聴画質、急激な画質低下回数、画質変動回数、動画停止時間等のユーザの体感品質の向上に有効であることを定量的に確認した。次に、複数経路環境が動画アダプティブストリーミング手法の性能に与える影響について検討した。一般に、動画アダプティブストリーミングは、測定したネットワークスループットを基に要求する動画品質を制御するレートベース方式と、クライアントで一時的にダウンロードしたデータを格納するバッファに蓄えられたデータ量を基に要求する動画品質を制御するバッファベース方式の二つに分類される。本課題では、動画アダプティブストリーミング方式として、バッファベースとレートベースの両方を考え、MPTCP において LIA 設定を適用した場合のユーザ体感品質への影響をシミュレーションにより定量的に評価した。評価には、ns-3 ベースで AMuSt-DASH フレームワークに MPTCP モジュールを追加したネットワークシミュレータを用いた。2ノードが RTT の等しい二本のサブフローで LIA 型 MPTCP 通信をした際に、サブフロー間のリンク帯域に大きな偏りがある場合、レートベースおよびバッファベースの両方で、平均視聴画質、画質変動回数、動画停止時間等のユーザの体感品質が著しく低下することがわかった。特にバッファベース方式の体感品質の低下が大きいことがわかった。これは、アプリケーションレベルでのアダプティブストリーミングは動画セグメント単位で行い、トランスポート層での各動画セグメントの送信はパケット単位で行うことに起因して、動画セグメントのダウンロード時間が狭帯域サブフローのリンク帯域で制限されるためと考えられる。

本課題では、動画アダプティブストリーミング手法を提案した上で、複数経路の利用がアプリケーションのレベルでユーザの体感品質に与える影響を定量的に明らかにした。なお、動画アダプティブストリーミングが複数経路環境で高いユーザ体感品質を達成する拡張方式には至らなかった。今後、アプリケーションでの各種情報をトランスポート層以下で利用するクロスレイヤ設計など、複数経路を想定したアプリケーションの実現に向けた展開が期待される。

(3) IoT および車車間ネットワークにおける複数経路の活用

本課題では、多様なアプリケーションにおける複数通信経路の活用について検討した。まず、IoTの実現に向けた複数経路活用の一形態としてPub/Sub型通信に着目し、軽量アプリケーションプロトコルMQTTにおいて、ブローカ間での同期処理が不要なシンプルな地理的分散型ブローカシステムを考案し、その有効性を実機実験により確認した。さらに、車車間通信ネットワークでの複数経路活用として、車車間通信とセルラ通信の二つの無線通信経路を活用するヘテロジニアス車車間ネットワークにおけるクラスタヘッドの引き継ぎ時間を短縮するネットワーク制御法を考案し、その有効性を計算機シミュレーションにより確認した。他のアプリケーションでの複数経路の活用に関しても検討を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① Takumi Kurosaka, Shungo Mori, and Masaki Bandai, A Video-quality controller for QoE enhancement in HTTP Adaptive Streaming, IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol. E101-B, pp. 1163-1174, 2018.
DOI: 10.1587/transcom.2017EBP3099
- ② Hiroaki Sato and Masaki Bandai, A Transport Protocol for Millimeter-wave Links, IEICE Communications Express, 査読有, vol. 6, pp. 473-477, 2017.
DOI: 10.1587/comex.2017xbl0069
- ③ Takumi Kurosaka and Masaki Bandai, Multipath TCP for Heterogeneous Environments, IEICE Communications Express, 査読有, vol. 4, pp. 211-216, 2015.
DOI: 10.1587/comex.4.211

[学会発表] (計12件)

- ① Ryo Kawaguchi, Masaki Bandai, A Distributed MQTT Broker System for Location-based IoT Applications, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2019), 2019.
- ② Toshihide Inake, Masaki Bandai, A Cluster Management Method for Heterogeneous Vehicular Networks, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2019), 2019.
- ③ Shungo Mori, Yu Mizoguchi, Masaki Bandai, An HTTP Adaptive Streaming Method Considering Motion Intensity, IEEE International Conference on Cloud Networking (CloudNet 2018), 2018.
- ④ 川口遼, 萬代雅希, MQTTにおける地理的分散 Broker システムの開発, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2018.
- ⑤ 溝口侑, 黒坂拓巳, 萬代雅希, アダプティブストリーミングにおけるQoEの特徴に基づいたクオリティ選択, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2017.
- ⑥ Shungo Mori, Masaki Bandai, QoE-aware Quality Selection Method for Adaptive Video Streaming with Scalable Video Coding, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2018), 2018.
- ⑦ Yu Mizoguchi, Takumi Kurosaka, Masaki Bandai, A QoE-aware Quality Selection Controller for HTTP Adaptive Streaming, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2018), 2018.
- ⑧ 佐藤広明, 萬代雅希, ミリ波の切断による通信不能時間を短縮するマルチパスTCP, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2018.
- ⑨ 佐藤広明, 萬代雅希, ミリ波の切断による通信不能時間を短縮するトランスポートプロトコル, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2017.
- ⑩ Hiroaki Sato and Masaki Bandai, A TCP Enhancement for Millimeter Wave Links, International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2016), 2016.
- ⑪ 黒坂拓巳, 萬代雅希, 体感品質向上のための配信動画品質決定法, 電子情報通信学会総合大会, 2016.
- ⑫ Minoru Azumi, Takumi Kurosaka and Masaki Bandai, A QoE-aware Quality-level Switching Algorithm for Adaptive Video Streaming, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2015), 2015.

[その他]

上智大学理工学部情報理工学科萬代雅希研究室ホームページ <https://bandailab.jp>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。