

令和元年6月24日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00131

研究課題名(和文) 複数経路の高効率多重化を実現するレイヤ間協調資源割り当て制御手法の研究

研究課題名(英文) Research on Cross Layer Resource Allocation Method to Realize Highly Efficient Network Resources Multiplexing

研究代表者

池永 全志 (Ikenaga, Takeshi)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50284716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数のネットワーク資源を同時に多重利用することによって、通信性能の向上と資源利用の効率化を実現することを目指し、三つのサブテーマを設定して研究開発に取り組んだ。

(1) 端末が有する利用可能な資源情報を複数レイヤを横断的に参照しながら収集し、多重利用可能な通信資源の発見および割り当てを行う技術を開発した。(2) レイヤ間の連携により、通信インタフェースやネットワーク内部の把握可能な情報を活用した輻輳制御技術を開発した。(3) アプリケーションおよび端末からネットワークまでを統合して資源の多重利用を可能にする手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来の負荷分散やトラヒック振り分け、回線切り替え等にとどまらず、複数のネットワークインタフェースを同時に多重利用するという、これまでと全く異なる視点でのネットワーク資源制御技術の開発に取り組んだ。本研究の成果は、スマートフォン等の一般的な端末において利用可能なものであり、また、利用者の通信品質を改善するとともに、特定の端末やアプリケーションのための偏った性能改善となること無く、大域的な観点に基づく適切な資源配分を可能にする輻輳制御、経路制御、通信品質制御として、広く活用可能な技術である。

研究成果の概要(英文)：In this research, with the aim of realizing improvement of communication performance and efficiency improvement of resource utilization by simultaneously multiple utilization of available network resources. (1) We developed a scheme for finding and assigning multiple available communication resources by collecting available resource information of a terminal by cross-referencing multiple layers. (2) We developed congestion control technology which utilizes the information which can be collectable in the communication interface and inside the network by the cooperation between layers. (3) We developed a method to integrate applications, terminals and networks to enable multiple use of resources.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：ネットワークアーキテクチャ マルチパス経路制御 マルチパスTCP 輻輳制御 通信品質制御

## 1. 研究開始当初の背景

情報通信の基盤であるインターネット技術は、光ファイバや無線、高速交換技術などのデータリンク技術の革新に適応しながら、多様なアプリケーションの出現や端末の高度化などの進化を支えてきた。しかし現在では、移動通信トラフィックが1年間で1.4倍以上[Soumu2015a]と爆発的に増加しているのをはじめ、インターネットにおけるトラフィック量は増加し続けており[Soumu2015b]、これに対応するための通信回線拡充や機器の増設等によるネットワーク規模の拡大がこれまで以上に急速に進んでいる。このように拡大するネットワークおよび高機能化する端末の能力に対して、既存のネットワーク層およびトランスポート層のプロトコルではその性能を十分に発揮できない状態が生じており、今後のネットワークと端末の進化を支える新しい技術の研究開発が重要な課題になっている。特に、端末間の通信が単一の論理回線を使用することを前提とした様々な制御機構を見直し、複数のネットワーク資源を同時に利用することによって、通信性能の向上と資源利用の効率化を図る技術の開発が求められている。ネットワーク内部で複数の資源を活用する技術としては、以前からネットワーク層の経路制御プロトコルである OSPF による ECMP (Equal Cost Multi Path) 機能に代表される、負荷分散のためのトラフィックエンジニアリング技術として、国内外で活発な研究が行われており、我々の研究グループにおいても複数経路の効果的な利用方法に関する提案と性能評価を行ってきた。また、それとは独立に、トランスポート層における複数パスの同時利用についても、SCTP (IETF, RFC4960) および Multipath TCP をはじめとして、活発に研究開発が進められている [NSDI2012]。その中でも Multipath TCP については、Linux OS で利用可能であるほか、世界中に広く普及しているスマートフォン端末における特定のアプリケーションで利用可能な実装が展開されるなど、既に一部では実用化に向けた取り組みが始まっている。しかしながら、これらの取り組みは既存のプロトコル階層の制約により、協調して動作することはなく、通信の端点であるアプリケーション間における使用可能なネットワーク資源の公平かつ最適な利用の実現には至っていない。現在のインターネットを形成する各要素に着目すると、基幹網は同一の始点・終点間に多数の冗長経路を確保可能な構成を取っており、アプリケーションサービス提供事業者は、データセンタ内で構築するサーバ群の接続に Fat-tree 構成等の複数経路を選択可能な接続形態を取り、さらに一般ユーザが利用する端末の多くは、有線 LAN と無線 LAN あるいは携帯電話網と無線 LAN といった複数の接続インタフェースを有するものが一般的となっている。このように、ネットワーク全体では、複数の資源を利用可能な環境が整っていることから、これらの状態を的確に判断し、複数のネットワーク資源の中から適切なものを複数同時に多重利用することによって通信性能の向上と資源利用の効率化が可能であると考えられる。そこで、複数経路の同時利用を前提に、複数のプロトコル階層が協調して動作し、資源利用の効率化と高い通信品質を提供可能なネットワーク制御技術の研究開発に取り組む。

## 2. 研究の目的

本研究では、ネットワークシステム全体で利用可能な資源を適切かつ柔軟に活用することを目指し、複数の資源を同時に使用可能とする新しいネットワーク制御手法を提案する。その際、通信の終端となる端末におけるインタフェース選択、ネットワーク層における複数経路探索・割り当て、トランスポート層における複数論理回線構成およびフロー制御・輻輳制御に関するそれぞれについて、実現性および実用性の高い制御手法を確立する。さらに、それぞれの機能を有機的に結びつける、レイヤ間統合制御方式として、利用可能なネットワーク資源を適切に判断し、必要に応じて複数の資源を多重して公平かつ高品質な通信を提供する方式の実現を目指す。具体的には、これまでの研究成果等から、ネットワーク層およびトランスポート層のそれぞれで実現可能な機能として、端末自身による利用可能なネットワークおよび通信インタフェースの識別や、資源の重複利用の無い経路 (Disjoint path) の探索と、輻輳制御機構等の要素技術を確立し、それらの情報を相互に活用して複数の論理回線の利用を統合的に制御する。このように、End-to-End で利用可能な通信資源の適切な配分と多重利用を、端末とネットワークが協調して適切に利用可能にする手法を開発する。

## 3. 研究の方法

本研究では、複数のプロトコル階層が協調しながら、利用可能なネットワーク資源を同時に多重利用することを可能にするレイヤ間協調資源割り当て制御技術を実現するために、大きく下記の三つの項目に着目して、新たな手法の検討と性能評価を行う。

- (1) 多重利用可能な通信資源の発見および割り当て技術
- (2) 複数資源の多重利用を考慮した輻輳制御技術
- (3) 複数資源の多重利用を可能とするレイヤ間統合制御技術

## 4. 研究成果

ネットワークシステム全体で利用可能な資源を適切かつ柔軟に活用し、複数のプロトコル階層が協調しながら、複数の資源を同時に使用可能とする新しいネットワーク制御手法を実現することを目指し、三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) 多重利用可能な通信資源の発見および割り当て技術

ネットワーク資源の多重利用を実現するためには、まず、利用可能な通信資源を適切に把握する必要がある。複数の資源が利用可能な環境であっても、その全てを同時に利用することが必ずしも最良の選択になるとは限らず、それぞれの資源の特性を考慮した判定機構が必要となる。そこで、端末側においては、インタフェースが有する物理的な特性に関する静的な情報と、接続環境等に応じて変化する動的な情報を組み合わせることによって、適切な多重化の判断を行う機構を考案した。ネットワーク層においては、複数経路間の排他性や各経路の利用可能帯域等の通信品質情報を用いた多重利用の判断機構について検討した。

提案手法では、複数のインタフェースを有する端末での通信において、End-to-End で複数の通信路（サブフロー）を設定する。その際、端末内で複数のアプリケーションが同時に動作する状態を想定し、データを送信するアプリケーションごとに利用するサブフローを適切に選択することによって、端末全体の通信性能を向上させることを目指した。具体的には、次の手順でパス選択を行う手法を考案した。

- (i) 端末内で新しい通信が発生すると、自身が有するインタフェース及び宛先ホストのインタフェース情報から利用候補となる全てのサブフローを抽出。
- (ii) 自身の各インタフェースを使用しているフロー数を計測し、新しく通信が発生した場合における推定スループットを算出。
- (iii) 算出した推定スループットの値が最大となるサブフローの組合せを選択して使用。

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。評価環境の例を図1に示す。この例では、複数の宛先に対する通信のうち、シングルパス通信とマルチパス通信が競合する場合を想定し、Src1 から Dst1 および Src1 から Dst2 への通信を同時に複数発生させた場合の性能を評価した。図2に各フローの平均スループット特性を示す。通常のシングルパス TCP や MPTCP と比較して、良好なスループットが得られることが確認できる。また、提案手法では、端末内部で発生する複数のアプリケーションからの通信フローが発生する際に、利用可能な帯域の状況を確認して適切なサブフローを選択して通信することにより、スループット特性が改善するだけでなく、アプリケーション間の通信性能の公平性も改善可能であることを確認した。

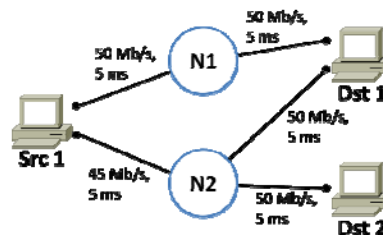


図1. 評価環境の例

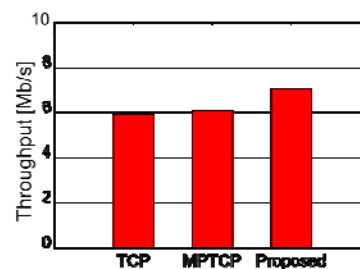


図2. 平均スループット特性

### (2) 複数資源の多重利用を考慮した輻輳制御技術

ネットワーク内部での利用者間の適切な資源配分を実現するために、複数資源の多重利用に適した輻輳制御手法を開発した。既存の SCTP や Multipath TCP 等で考慮されている制御ポリシーとは異なり、利用可能な資源の特性に合わせて動作し、資源ごとの帯域の有効利用のほか、総合的な転送性能と公平性の均衡を保つ輻輳制御手法の実現を目指して方式開発を行った。

本サブテーマでは、複数資源を同時に利用可能なトランスポートプロトコルにおいて生成されるサブフロー間の輻輳制御に影響を与える、パケットスケジューリング手法の開発に取り組んだ。既存の MPTCP で用いられている Low-RTT-First スケジューラでは、各サブフローの RTT (Round Trip Time) を調査し、その RTT が最小のサブフローに優先的に送信する。しかし、この方式では、RTT のみを基準に送信するサブフローを決定するため、複数サブフローの RTT の変動によって単一ストリームのデータを必要以上に分散させることになり、Head-of-Line Blocking が頻発し、性能が低下する可能性がある。そこで提案手法では、通信初期において、RTT が最小のサブフローを選択した後、その後のパケット転送状態を観測し、パケット廃棄やパケット廃棄に伴う再送処理が生じているサブフローの使用を控えるようなパケットスケジューリングを行う。この手法では、パケット再送中のパスを性能が不安定な状態にあるパスであると判断し、別のパスを優先的に使用することで、アプリケーションに必要な性能を確保可能なパスを選択することで、データ転送に使用するサブフローの変更回数を減少させ、Head-of-Line Blocking の発生を抑制する。また、サブフローの残余帯域が無くなった場合には、そのサブフロー以外の最小 RTT のサブフローを選択し、同様な動作を行う。

提案手法の有効性を評価するために、通信品質の影響を受けやすいビデオストリーミングアプリケーションを対象として実際の通信環境を構築し、実証実験を行った。構築した実験環境を図3に示す。本実験ではビデオサーバからビデオクライアントに MPTCP によるビデオストリーミング (ビデオ再生レート 5.24 Mb/s) を行い、クライアント側におけるビデオ品質を調査する。ビデオ品質の評価指標として Picture discard と Buffer underflow が発生した回数を用いる。提案するパケットスケジューリングを実装した MPTCP と、MPTCP で用いられる既存の各種パケットスケジューラを用いた場合を対象として性能評価を行う。

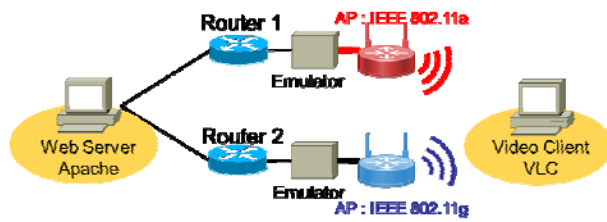


図 3. 実験環境

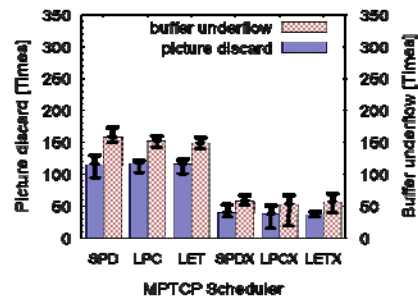


図 4. ビデオ品質の評価結果

評価結果の例を図 4 に示す。図 4 の結果は、MPTCP で用いられる既存の packetscheduler リング手法として、SPD (Shortest Packet Delay), LPC (Largest Packet Credits), LET (Largest Estimated Throughput) の性能と、それらに対して提案手法である、RTX aware 機構を導入した、SPDx, LPCx, LETx の各手法のビデオ通信品質性能を示している。この結果より、既存の各種 scheduler に対して、提案手法を導入することにより、全ての手法で性能が改善することを確認した。

### (3) 複数資源の多重利用を可能とするレイヤ間統合制御技術

アプリケーションおよび端末からネットワークまでを統合して資源の多重利用を実現することを目指し、ネットワーク資源の情報を複数の階層間で共有可能な方式を検討した。さらに、それらの情報を活用し、トランスポート層およびネットワーク層のそれぞれで提供可能な複数資源を効果的に組み合わせる手法を検討し、End-to-End での統一的な複数資源の多重利用を実現する方式の開発に取り組んだ。

複数資源を利用可能な環境で提供されるサービスの多くは、負荷分散や信頼性確保のために、CDN に代表される複数のサーバが連携した分散システムによって構築され、サービス利用者が接続する通信先として複数のサーバを選択して接続している。このような通信に際して、通常は通信開始時に特定の条件に基づいて接続先サーバ選択が行われるが、接続先が決定し、通信を開始した後の性能低下には対処することができなかった。そこで、このような場合に対応するために、端末と通信先サーバまでの経路だけでなく、良好な通信性能を確保可能な接続先サーバを変更する手法を提案した。提案手法では、OpenFlow によって構成されたネットワークを対象として、既存の通信中に接続サーバが変更された場合でも継続してアプリケーションが利用可能なフローマイグレーション機能を有するものとする。ネットワークを構成する各 OpenFlow Switch (OFS) でネットワークに流入する各フローのスループットとリンクの利用可能帯域幅を取得した OpenFlow Controller (OFC) は OFS から収集した情報を元に各フローに対して適切なサーバを選択し、通信経路を変更する。このとき、OFC は、フローの単位時間あたりのスループットから移動平均を用いて現在の通信の状態を判断する指標を求め、通信品質の劣化を判断すると、同一のサービスを提供可能な別のサーバを探索し、通信品質を改善可能なサーバおよび端末からそのサーバまでの通信経路を再設定する。

提案方式の有効性を評価するために、ネットワークシミュレータ ns3 を使用して、6 台の OFS と 3 台のクライアント端末、6 台のサーバからなるネットワーク環境を構築し、既存手法と、提案手法のスループット特性を計測した。その結果、提案手法を用いることにより、通信中の品質劣化に対応して、複数の資源を活用し、適切なサーバおよびパス選択を実施することにより高い品質を獲得できることを示した。

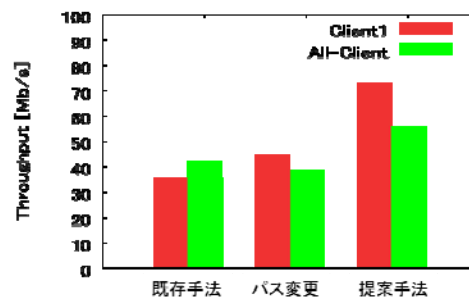


図 5. スループット特性

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Ryota Matsufuji, Shinichi Nagayama, Dirceu Cavendish, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, "TCP State Driven MPTCP Packet Scheduling for Streaming Video," Proc. of IARIA The Tenth International Conference on Evolving Internet (INTERNET2018), 査読有, 2018, pp.9-14, ISBN: 978-1-61208-644-6
- ② Daiki Ishida, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, "Path-Selection Method Based on the Available Bandwidth of Interfaces," Proc. of the 5th Annual Conference on Computational Science & Computational Intelligence (CSCI2018), 査読有, 2018

- ③ Yuya Ishida, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, “Experimental Performance Evaluation of the Collisions in LoRa Communications,” Proc. of the 5th Annual Conference on Computational Science & Computational Intelligence (CSCI2018), 査読有, 2018
- ④ Ryota Matsufuji, Dirceu Cavendish, Kazumi Kumazoe, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, “Multipath TCP Path Scheduling for Streaming Video,” Proc. of 2017 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM2017), 査読有, 2017, DOI: 10.1109/PACRIM.2017.8121920
- ⑤ Ryota Matsufuji, Dirceu Cavendish, Kazumi Kumazoe, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, “Multipath TCP Packet Scheduling for Streaming Video,” Proc. of IARIA The Ninth International Conference on Evolving Internet (INTERNET2017), 査読有, 2017, pp.14-19, ISBN: 978-1-61208-574-6
- ⑥ Ryota Matsufuji, Dirceu Cavendish, Kazumi Kumazoe, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, Yuji Oie, “Performance Characterization of Streaming Video over Multipath TCP,” Proc. of IARIA The Eighth International Conference on Evolving Internet (INTERNET2016), 査読有, 2016, pp.42-47, ISBN: 978-1-61208-516-6

〔学会発表〕(計 11 件)

- ① 西牟田 裕之, 野林 大起, 池永 全志, “CDNにおける通信中の通信品質の劣化を改善するサーバ及びパス切替手法,” 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2019
- ② Shinichi Nagayama, Dirceu Cavendish, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, “MPTCP Packet Scheduler by Sub-flow Switching for Video Streaming,” International Joint Workshop on Kyutech Research Centers, 2018
- ③ Hiroyuki Nishimuta, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, “Adaptive Server and Path Selection Based on Available Bandwidth for Content Delivery,” International Joint Workshop on Kyutech Research Centers, 2018
- ④ Yuya Ishida, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, “Experimental Evaluation of Competing Performance between LoRa Communications,” International Joint Workshop on Kyutech Research Centers, 2018
- ⑤ Daiki Ishida, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, “Path-Selection Method Based on the Available Bandwidth of Interfaces for Multipathing,” International Joint Workshop on Kyutech Research Centers, 2018
- ⑥ 長山 進一, カベンディッシュ ジルセウ, 野林 大起, 池永 全志, “ビデオストリーミングのためのサブフロー切替を考慮した MPTCP パケットスケジューラに関する研究,” 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会, 2018
- ⑦ 石田 裕也, 野林 大起, 池永 全志, “LoRa 無線通信の競合時における通信性能の実証評価,” 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会, 2018
- ⑧ 石田 大騎, 野林 大起, 池永 全志, “複数インタフェースを有する端末における通信負荷を考慮したパス選択手法,” 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会, 2018
- ⑨ 西牟田 裕之, 野林 大起, 池永 全志, “通信中の通信品質の劣化を改善するサーバおよびパス選択手法についての研究,” 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会, 2018
- ⑩ 松藤 諒太, カベンディッシュ ジルセウ, 熊副 和美, 野林 大起, 池永 全志, “ビデオストリーミング品質改善のためのマルチパス TCP パケットスケジューリング方式の検討,” 電子情報通信学会インターネットアーキテクチャ研究会, 2018
- ⑪ 松藤 諒太, カベンディッシュ ジルセウ, 熊副 和美, 野林 大起, 池永 全志, “マルチパス TCP を用いたビデオストリーミング品質特性評価,” 電子情報通信学会 2017 年総合大会, 2017

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.net.ecs.kyutech.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

無し

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名： 古閑 宏幸

ローマ字氏名： Hiroyuki Koga

研究協力者氏名： 野林 大起

ローマ字氏名： Daiki Nobayashi

※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。