

モバイルネットワークにおけるビデオストリーミングのための MPTCP スケジューラの性能評価

近藤 優吉[†] カベンディッシュジュルセウ^{††} 野林 大起^{†††} 池永 全志^{†††}

[†]九州工業大学大学院 工学府 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

^{††} ^{†††}九州工業大学大学院 工学研究院 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

E-mail: [†]kondo.masayoshi146@mail.kyutech.jp, ^{††}cavendish@ndrc.kyutech.ac.jp, ^{†††}{nova,ike}@ecs.kyutech.ac.jp

あらまし ビデオコンテンツの需要は高まっており、インターネットトラフィックの大部分をビデオストリーミングが占めている。さらに、ほとんどのビデオストリーミングは、HTTP/TCP (Hypertext Transfer Protocol/Transmission Control Protocol) で伝送されているため、TCP の性能がビデオ品質に大きな影響を与える。そこで、TCP の拡張手法であるマルチパス TCP (MPTCP) の研究開発が進められており、End-to-End 間のスループットの向上、及び冗長性の向上が期待されている。しかし、パケットを送信するための経路を選択する役割である MPTCP 標準スケジューラは各経路の RTT (Round Trip Time) を基準に転送経路を決定するため、選択経路の通信品質が劣化しているとパケットロスが多発し、受信側で Head-of-Line Blocking (HOL Blocking) が増加し、ビデオ品質が低下する可能性がある。本稿では、LTE 及び Wi-Fi のインターフェースを搭載する端末を用いて、標準スケジューラと我々がこれまで提案してきたスケジューラと、MPTCP の様々な輻輳制御を組み合わせた環境で性能評価を行い、MPTCP ビデオストリーミングに適した MPTCP の制御について検討する。

キーワード ビデオストリーミング, マルチパス TCP, パケットスケジューラ, 輻輳制御

Performance Evaluation of MPTCP Scheduler for Video Streaming in Mobile Networks

Masayoshi KONDO[†], Dirceu CAVENDISH^{††}, Daiki NOBAYASHI^{†††}, and Takeshi IKENAGA^{†††}

[†] Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology 1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushushi, Fukuoka, 804-8550 Japan

^{††} ^{†††} Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology 1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushushi, Fukuoka, 804-8550 Japan

E-mail: [†]kondo.masayoshi146@mail.kyutech.jp, ^{††}cavendish@ndrc.kyutech.ac.jp, ^{†††}{nova,ike}@ecs.kyutech.ac.jp

Abstract With the increasing of the demand for video contents, the amount of video streaming traffic occupies the large portion of Internet traffic. In addition, most of the video streaming is carried over HTTP/TCP (Hypertext Transfer Protocol/Transmission Control Protocol), the performance of TCP affects the video quality directly. On the other hand, with the spread of smartphones and tablet PCs, terminals having multiple communication interfaces such as Wi-Fi and LTE are generally used. Therefore, multi-path TCP (MPTCP) that is an extension of TCP has been researched to improve the throughput and redundancy. However, the default packet scheduler of MPTCP decides the path based on the Round Trip Time (RTT) of each path. If a difference in the performance of the selected path causes out-of-order in the incoming packets in the receiver, the quality of the video may be degraded due to packet loss or HOL Blocking. In this paper, we evaluate video streaming performance over MPTCP by combining the existing and our proposed packet schedulers and various congestion control algorithms for MPTCP.

Key words Video Streaming, multipath TCP, MPTCP Packet Scheduler, Congestion Control

1. ま え が き

TCP (Transmission Control Protocol) は様々なアプリケーションで活用されており、信頼性の高いデータ転送を保証する。Cisco 社によると、2022 年にはインターネットトラフィックのうちビデオストリーミングが大部分を占めることが予想されており [1]、その通信のほとんどが TCP により転送されている。そのため、ビデオストリーミングの品質に着目すると、データ転送の遅延や廃棄等によるビデオ再生の停滞が発生しないよう、TCP による適切なデータ転送が必要となる。一方で、スマートフォンやタブレット端末のような携帯型端末のハードウェアが高性能化していることで、LTE/5G や Wi-Fi のような複数の広帯域インターフェースを搭載するようになった。そのため、複数のインターフェースを用いることで大容量且つ効果的なデータ転送を実現できるようになっている。

そこで、複数経路を同時に利用可能な Multiple Path TCP (MPTCP) が提案され、一部のオペレーティングシステムに実装されている。これにより、End-to-End 間の通信帯域を増やすだけではなく、一時的な転送経路の障害が発生した場合の冗長性を向上することができる。MPTCP では、送信側の端末において、End-to-End 間で構成される複数の転送経路（以降サブフローと呼ぶ）の中から、パケットスケジューラに基づき送信するサブフローをパケット単位で決定する。そのため、各サブフローのパケット損失や遅延の特性が異なる場合、Head-of-Line Blocking (HOL Blocking) が発生し、通信性能が低下する可能性がある。HOL Blocking は、送信側において連続するデータを異なるサブフローに割り振ることにより、受信側で受け取るデータがサブフロー毎に異なる通信特性によって順番通りに届かないことによって発生する。ビデオストリーミングにおいて、HOL Blocking が発生すると、不完全なビデオフレームや遅延したフレームは廃棄され、ビデオ品質が低下する可能性がある。

そこで、本研究では、MPTCP で使用される様々な輻輳制御方式とパケットスケジューラを対象にモバイル端末における MPTCP ビデオストリーミングを想定し、パケットロスや遅延が発生する実機環境を用いて、ビデオ通信品質の評価を行った。実機環境として、LTE と Wi-Fi の複数インターフェースが利用可能な実験環境を構築し、MPTCP の標準スケジューラと利用可能なパスの空き容量や RTT、パスの切り替え回数などの通信特性を考慮した様々なスケジューラを、複数の MPTCP 輻輳制御方式と組み合わせて性能を評価することで、MPTCP ビデオストリーミングに適した MPTCP の制御について検討する。

以降では、2 節において、関連研究について述べる。3 節は MPTCP におけるビデオストリーミングについて、4 節では提案スケジューラについて述べる。5 節では、標準スケジューラと提案スケジューラを、Wi-Fi および LTE を使用した実機環境でビデオストリーミングを行い、性能評価を行う。6 節では、我々の研究についてまとめ、今後の方針について述べる。

2. 関 連 研 究

MPTCP については様々な研究が行われており、モバイルネッ

トワーク上のデータ転送のスループット性能に焦点を当てた研究 [2] のほか、特に、パケットスケジューラの研究が MPTCP の重要な要素として認識されている。例えば、[3] では、ロススペースの輻輳制御と MPTCP における標準のパケットスケジューラである Low-RTT-First (LRF) スケジューラとの相互作用を分析している。

アドホックネットワーク上でのマルチパスビデオストリーミングの研究として、運転支援システムにおける車両通信が提案されている [4]。Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs) のビデオストリーミングにおいて、ルーティング及びチャネル干渉を考慮することで、ビデオのノイズや遅延を最小限に抑えることを目的として、新しいマルチパスビデオストリーミング手法を提案している。この提案では、複数の経路を使用するビデオストリーミングのスループットを評価する際に、隣接する車両間の干渉、信号対雑音比、データ遅延を考慮している。

[5] では、ビデオストリーミングのアプリケーション層とトランスポート層の統合に焦点を当て、MPEG メディアトランスポート (MMT) プロトコルと MPTCP を組み合わせて、サブフローとビデオ品質を考慮した経路選択を提案している。この提案では、各サブフローの経路品質を推定し、品質の低い経路へのフレームの送信を選択的に回避する。同様の提案手法として、Silva [6] は、Augmented Reality/Virtual Reality (AR/VR) ストリーミングの優先パケットを分割するために、異なるサブフローを使用することを提案している。これに対して、我々の以前および現在の研究では、アプリケーションと MPTCP を組み合わせておらず、高品質のビデオストリーミングを提供するために、一般的なスケジューラと TCP に焦点を当てている。

Ferlin [7] らが、各サブフローの HOL Blocking 予測に基づく経路選択方式を導入している。彼らは、バルクデータ、Web トランザクション、および Constant Bit Rate (CBR) を伝送する際の、提案されたスケジューラと LRF スケジューラと性能を比較している。

Kimura [8] らは、バルクデータ転送アプリケーションに焦点を当て、パス送信レートとウィンドウスペースで動作するスケジューラのスループット性能の向上を示した。Xue [9] らは、経路が送信可能なデータ量の予測に基づいたスケジューラを提案し、シミュレーションでスループット性能を評価している。また、Frommgen [10] らは、[3] の研究と同様に、古い RTT 情報が HTTP トラフィックなどのストリーミングにおいて、経路選択を妨害していることを示している。その中で、ストリーミングの遅延とスループットの性能を向上させるために、RTT プロービングを行っている。

これと同様に、Dong [11] らは、ロス率の高い経路を選択するためのパケットロス推定法を提案した。彼らは、いくつかのビデオストリーミングの実験を行っているが、アプリケーションからビデオストリーミング性能を測定していない。

一方、我々の先行研究として、ビデオストリーミングの品質を向上させるために、さまざまなマルチパススケジューリング方式を提案してきた。これらの方式を用いて、[12] では輻輳ウィンドウサイズや推定パススループットなどの動的経路特性

に基づいた MPTCP スケジューラを提案した。また, [13] では, パスが高速再送中か高速回復中といった TCP の状態情報を用いてスケジューラの動作を変更することを提案している。[14] では, パスの切り替えが発生すると新しいパスの帯域がなくなるまで, そのパスを使用する STICKY スケジューラを提案している。

本稿では, Wi-Fi/LTE 経路において, 我々が提案したスケジューラをアプリケーション層のビデオ品質に焦点を当てて評価する。この評価では, 広く普及している輻輳制御を対象とし, 最適な輻輳制御とスケジューラの組み合わせを明らかにする。

3. MPTCP によるビデオストリーミング

HTTP/TCP を用いたビデオストリーミングでは, ビデオクライアントは HTTP リクエストによって HTTP サーバに格納されたビデオデータを要求し, HTTP サーバとの間で TCP によるストリーミング転送を行う。ビデオストリーミングサーバとクライアント間のデータ転送量は TCP におけるフロー制御によって決定されるが, クライアント側のビデオアプリケーションは, トランスポート層のバッファからアプリケーション層のプレイアウトバッファを介してデータを取り出すことで, 一定のレートでビデオを再生する (図 1 (a))。

MPTCP は, 複数の TCP セッションによるデータ転送を可能にするものである [15]。MPTCP は, アプリケーション層からは単一の TCP ソケットとして使用できるため, トランスポート層において複数のセッションを使用していることを意識すること無く, ビデオストリーミングサーバでも利用することができる。図 1 (b) に, MPTCP によるビデオストリーミングの流れを示す。ビデオストリーミングアプリケーションが MPTCP ソケットを介してパケットを送出すると, MPTCP パケットスケジューラが複数のフロー (サブフロー) から一つを選択してパケットを転送する。フロー制御はサブフロー単位で行われているが, 通常の TCP で使用される輻輳制御アルゴリズムによって, 各サブフローで独立にフロー制御を行う uncoupled 方式の他に, サブフロー間で連携してウィンドウサイズの調整を行う coupled 方式も提案されている。既存の coupled 方式には, Linked Increase Algorithm (LIA) [16], Opportunistic Linked Increase Algorithm (OLIA) [17], Balanced Linked Adaptation algorithm (BALIA) [18] 等がある。

ビデオストリーミングアプリケーションにおける MPTCP の活用は, 複数インタフェースの利用によるスループット特性の向上や, 接続性の維持などの利点が考えられるが, MPTCP 特有のパケットスケジューリングや複数パスのフロー制御によって, ビデオ通信の品質に対してどのような影響が生じるのかについては, 詳細な評価が必要である。

4. 提案手法

本研究では, MPTCP によるビデオストリーミングにおいて, パケットスケジューリングアルゴリズムと輻輳制御アルゴリズムの違い, および, それらの組合せによるパケット転送性能の違いがビデオ通信品質に与える影響を調査する。標準の MPTCP では, 平均遅延時間 (RTT) が最も小さいサブフローを選択す

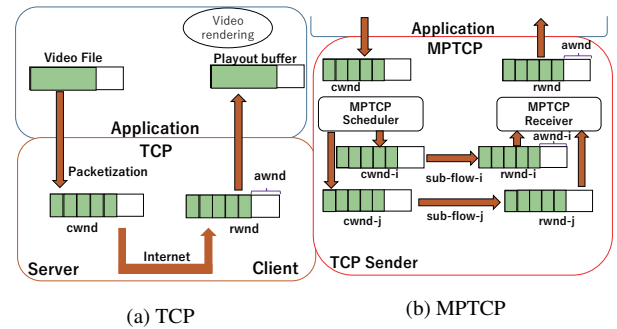


図 1 TCP 及び MPTCP を用いたビデオストリーミング

る Low RTT First (LRF) スケジューラが用いられており, 輻輳制御アルゴリズムは, Linux であれば CUBIC [19] が使用されている。ここでは, 我々がこれまでに提案した複数のパケットスケジューラ [12] [13] [14] と, coupled 方式および uncoupled 方式を含む複数の輻輳制御アルゴリズム [20] [21] を組合せた各種方式を対象に実証評価を行う。本研究で使用した MPTCP スケジューラを以下に示す。

- **Low RTT First (LRF)** : RTT が最も短いサブフローを選択する。ただし, 最小 RTT のサブフローの輻輳ウィンドウサイズ (cwnd) に空きが無い場合は, 次に RTT が最も小さいサブフローを選択する。
- **Largest Packet Credits (LPC)** : LPC スケジューラは, 遅延によらず, cwnd の空きがもっとも大きいサブフローを選択する。このときの利用可能空き容量は, cwnd サイズから算出する。
- **Largest Estimated Throughput (LET)** : LET スケジューラは, 各サブフローのスループットを $cwnd/sRTT$ (smooth RTT) として, 計算をし, 推定スループットが高いサブフローへパケットを転送する。
- **Greedy Sticky Throughput (GR-STY)** : GR-STY スケジューラは, LRF スケジューラと同様に RTT が最も小さいサブフローを選択する。サブフローが選択されると, バッファが満たされるまで, 同じサブフローにパケットを転送する。
- **Throughput Sticky (TP-STY)** : TP-STY スケジューラは, GR-STY スケジューラと同様の動作をする。しかし, バッファが満たされ, 新しいサブフローが選択される際には, 現在のサブフローと他のサブフローの推定スループットを比較し, 大きい場合のみ新しいサブフローを選択する。
- **Throughput RTT Sticky (TR-STY)** : TR-STY スケジューラは, TP-STY スケジューラと同様の動作をする。しかし, バッファが満たされ, 新しいサブフローが選択される際には, 現在のサブフローと他のサブフローの推定スループットを比較し, 大きい場合かつ RTT が小さい場合のみ, 新しいサブフローに切り替える。

標準のスケジューラでは, 経路の RTT が大きい場合, その経路が十分な帯域幅を有していても選択されない。また, RTT を基準に経路を選択するため, cwnd が小さい場合でも, RTT が小さい経路にパケットを転送し続ける可能性がある。LPC スケジューラでは, RTT が大きく, 十分な帯域幅をもつ経路を選択するため, RTT が大きく, 高帯域を有する経路では効率

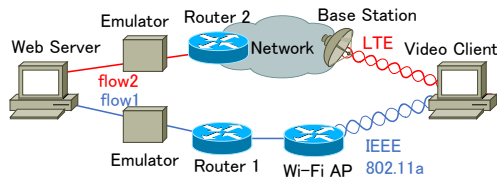


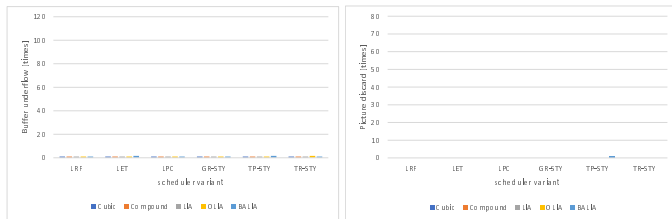
図2 実験ネットワーク環境

表1 ビデオデータ諸元と調査対象

データサイズ	409 MBytes
ビデオ再生レート	5.24 Mbps
ビデオ再生時間	10 mins 24 secs
コーデック	H.264 MPEG-4 AVC
輻輳制御方式	CUBIC, compound, LIA, OLIA, BALIA
スケジューラ	LRF, LPC, LET, GR-STY, TP-STY, TR-STY

表2 実験シナリオ

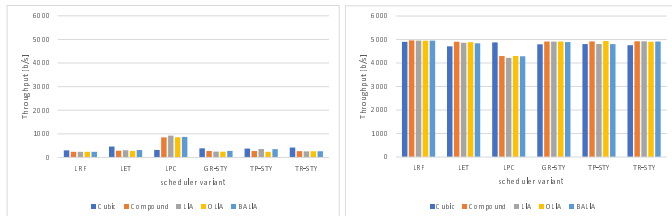
シナリオ	各経路のエミュレータ設定値 (RTT, パケットロス率)	経路情報 (RTT)
A-2 経路 (LTE/Wi-Fi) パケットロスなし	LTE) Delay 0 ms Wi-Fi Delay 20 ms	RTT 80 ms RTT 40 ms
B-2 経路 (LTE/Wi-Fi) パケットロスなし	LTE) Delay 0 ms Wi-Fi Delay 30 ms	RTT 80 ms RTT 60 ms
C-2 経路 (LTE/Wi-Fi) Wi-Fi パケットロス率 6%	LTE) Delay 0 ms Wi-Fi Delay 30 ms, Loss 6%	RTT 80 ms RTT 60 ms
D-2 経路 (LTE/Wi-Fi) パケットロスなし	LTE) Delay 0 ms Wi-Fi Delay 40 ms	RTT 80 ms RTT 80 ms
E-2 経路 (LTE/Wi-Fi) Wi-Fi パケットロス率 6%	LTE) Delay 0 ms Wi-Fi Delay 40 ms, Loss 6%	RTT 80 ms RTT 80 ms



(a) Buffer Underflow

(b) Picture Discard

図3 シナリオ A におけるビデオ品質特性



(a) Throughput LTE

(b) Throughput Wi-Fi

図4 シナリオ A における各スループット測定結果

的に経路を使用することができる。LET では、RTT が小さく、かつ十分な帯域幅をもつ経路を選択している。RTT は小さいが、帯域の狭い経路がある場合は、その経路を避けるため、標準スケジューラよりも効率的に帯域を使用することができる。GR-STY、TP-STY、TR-STY スケジューラは、サブフローの切り替え回数を、可能な限りに減らすように動作するため、HOL Blocking を抑制することができる。

5. 性能評価及び考察

複数のインタフェースを有するモバイル端末によるビデオストリーミングを想定し、実機を用いて MPTCP スケジューラおよび輻輳制御アルゴリズムの性能評価を行う。

5.1 実験環境

構築した実験環境を図2に示す。Webサーバおよびビデオクライアントはどちらも2つのインタフェースを有しており、クライアントはアクセス回線としてWi-FiとLTE回線でネットワークに接続する。WebサーバではApacheを使用し、ビデオクライアントはVLCを使用する。Apacheビデオサーバは2台のルータに接続されており、ルータのうち1台はWi-Fi (IEEE 802.11a) アクセスポイントを経由してクライアントに接続し、もう1台のルータはインターネットを経由してLTE回線で通信するクライアントと接続している。これらの経路中にネットワークエミュレータを接続することにより、遅延、パケットロスを変化させ、輻輳制御、スケジューラがビデオストリーミングに与える影響を評価する。

実験に使用したビデオデータとMPTCPスケジューラおよび輻輳制御方式、実験シナリオをそれぞれ表1、表2に示す。実験は、Wi-Fi経路中のネットワークエミュレータにより、パケットロス率と遅延時間を設定し、一つのシナリオについて5回のビデオストリーミングを実施する。

今回の実験で使用した性能評価指標を以下に示す。

- **Picture discards:** ビデオクライアントデコーダによって破棄されたフレーム数

- **Buffer underflow:** ビデオクライアントのバッファで発生したバッファアンダーフロー数

- **Sub-flow throughput:** 各サブフローのスループット

全てのシナリオにおいて、Wi-Fi、LTEの2経路を使用する。ここで、LTE回線は一般の商用回線を使用しており、実験実施時のサーバ・クライアント間の平均RTTは約80msである。シナリオAは、実験の基準となるシナリオであり、Wi-Fi経路に20msの遅延を設定し、RTTが約40msとなる環境である。シナリオBでは、Wi-Fi経路に30msの遅延を加える。シナリオCでは、シナリオBに加えて、Wi-Fi経路に6%のパケットロスを加える。シナリオDでは、Wi-Fi経路に40msの遅延を加えて、LTE経路と同程度のRTTに設定する。シナリオEでは、シナリオDに加えて、Wi-Fi経路に6%のパケットロスを加える。

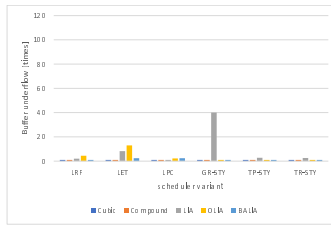
5.2 実験結果と考察

5.2.1 シナリオ A

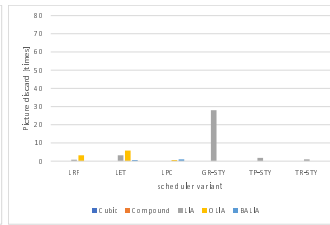
図3(a)および(b)は、ビデオストリーミングのBuffer underflowとPicture discardの発生回数を示している。ビデオの品質は、全ての輻輳制御とスケジューラにおいて優れている。図4(a)および(b)は、LTEおよびWi-Fi経路のスループットを示している。全ての輻輳制御とスケジューラにおいて、ほとんどのパケットがWi-Fi経路を使用している。

5.2.2 シナリオ B

図5(a)および(b)は、Wi-Fi経路に20msの遅延を加えた場合におけるシナリオBのビデオストリーミングの性能を示している。ほとんどの輻輳制御とスケジューラにおいて、良好な性能を示しているが、GR-STYスケジューラを使用したLIAでは、深刻ではないものの、ビデオの劣化が見られる。図6(a)および(b)は、LTEおよびWi-Fiのスループットを示している。スケジューラごとで、輻輳制御とは無関係に、選択する経路が

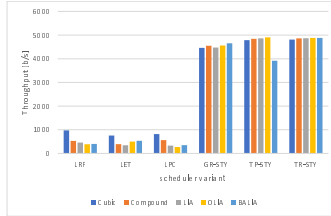


(a) Buffer Underflow

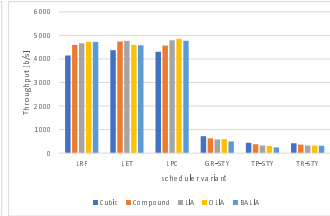


(b) Picture Discard

図5 シナリオ B におけるビデオ品質特性

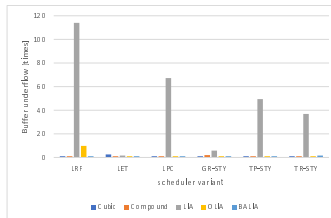


(a) Throughput LTE

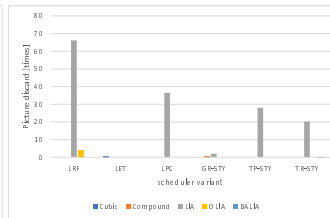


(b) Throughput Wi-Fi

図6 シナリオ B における各スループット測定結果

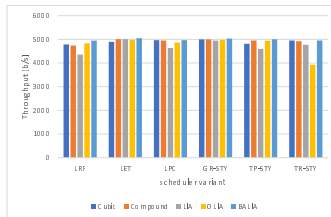


(a) Buffer Underflow

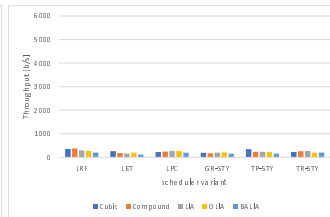


(b) Picture Discard

図7 シナリオ C におけるビデオ品質特性



(a) Throughput LTE



(b) Throughput Wi-Fi

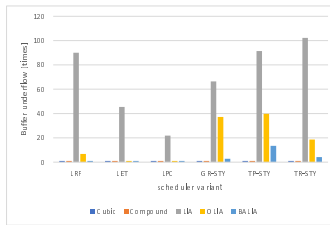
図8 シナリオ C における各スループット測定結果

異なっている。特に、LRF, LET, LPC スケジューラでは Wi-Fi 経路を使用しているが、GR-STY, TP-STY, TR-STY スケジューラは主に LTE 経路を使用している。これはスケジューラごとに経路の遅延差に対してどれほど敏感かを示している。

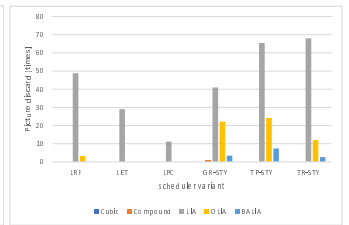
5.2.3 シナリオ C

図 7 (a) および (b) は、シナリオ B に加えて Wi-Fi 経路に 6% のパケットロスを加えたシナリオ C のビデオストリーミングの性能を示す。スケジューラと輻輳制御の組み合わせによって、ビデオ品質が異なることが確認できる。これは、パケットロスが輻輳制御の性能に影響を与え、遅延がスケジューラに影響を与えるためと考えられる。LET と GR-STY を除く全てのスケジューラにおいて、LIA のビデオの品質が悪い。

図 8 (a) および (b) に、LTE および Wi-Fi のスループットを示す。図より、Wi-Fi 経路の通信品質劣化により、ほとんどのパケットが LTE 経路を使用していることが確認できる。輻輳制御の種類によらず、どのスケジューラでも、遅延およびパケットロスの少ない高品質な経路を選択している。

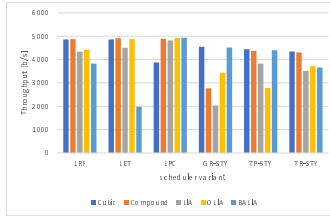


(a) Buffer Underflow

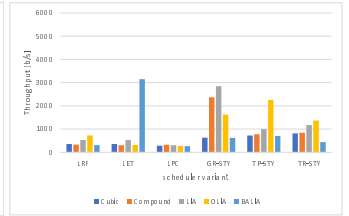


(b) Picture Discard

図9 シナリオ D におけるビデオ品質特性

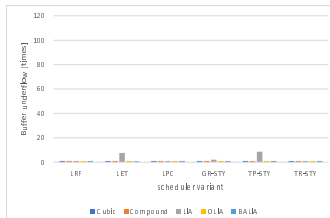


(a) Throughput LTE

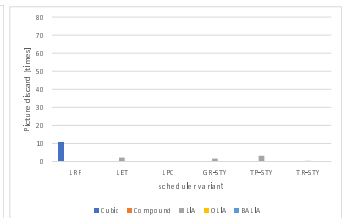


(b) Throughput Wi-Fi

図10 シナリオ D における各スループット測定結果

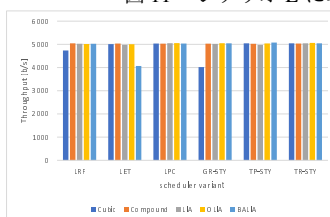


(a) Buffer Underflow

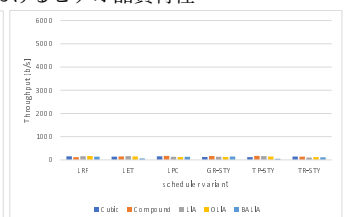


(b) Picture Discard

図11 シナリオ E におけるビデオ品質特性



(a) Throughput LTE



(b) Throughput Wi-Fi

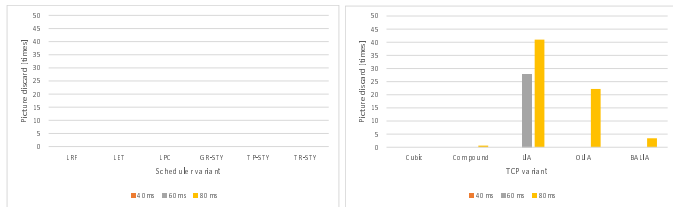
図12 シナリオ E における各スループット測定結果

5.2.4 シナリオ D

図 9 (a) および (b) は、Wi-Fi 経路に 40ms の遅延を加えたシナリオ D のビデオストリーミングの性能を示す。ほとんどの輻輳制御とスケジューラで、良好な性能を示しているが、LIA に関して、全てスケジューラにおいて、ビデオの品質が悪い。また、OLIA に関して GR-STY, TP-STY, TR-STY のスケジューラにおいてビデオ品質が低下している。図 10 の結果により、LTE 経路が主に使用されていることを示している。しかし、一部のスケジューラと輻輳制御の組み合わせでは、RTT が大きいにもかかわらず、GR-STY, TP-STY, TR-STY スケジューラが Wi-Fi 経路を使用していることが確認できる。

5.2.5 シナリオ E

図 11 (a) および (b) は、シナリオ D に加えて、Wi-Fi 経路にパケットロス 6% を加えたシナリオ E のビデオストリーミングの性能を示す。全てのスケジューラにおいて、ビデオ品質は優れている。これは、図 12 のスループットより、Wi-Fi 経路の通信品質が劣化したため、LTE 経路が主に使用されていることが



(a) TCP CUBIC - Picture Discard (b) GR-STY - Picture Discard

図 13 TCPスケジューラの Picture discard の測定結果

確認できる。

図 13 に、パケットロスがないシナリオ A, B, D において、CUBIC と GR-STY スケジューラにおける Picture discard の発生回数をそれぞれ示す。CUBIC は高い性能を発揮し、GR-STY は coupled 方式である LIA, OLIA, BALIA を除く全ての輻輳制御で高い性能を発揮した。以上より、CUBIC と GR-STY の組み合わせが、推奨される輻輳制御/スケジューラの選択肢となる。

6. ま と め

本研究では、スケジューラと輻輳制御が MPTCP ビデオストリーミングの性能に与える影響について評価を行った。その結果、スケジューラと輻輳制御の組み合わせによっては、特定のシナリオにおいてビデオストリーミングの性能に悪影響を与えることが確認された。特に、MPTCP における coupled 方式である LIA と OLIA では、ビデオの品質が低下することがわかった。これらの輻輳制御では、輻輳ウィンドウサイズが全ての経路に依存するという coupled 方式の動作により、パケットロスからの回復が遅くなっていると考えられる。今後は、多様な環境での調査を実施する予定である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 20K11792、及び国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究による成果を含む。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends," 2017-2022. 2018
- [2] M. R. Palash and K. Chen, "MPWiFi: Synergizing MPTCP Based Simultaneous Multipath Access and WiFi Network Performance," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 19, No. 1, pp. 142-158, January 2020.
- [3] R. Lubben and J. Morgenroth, "An Old Couple: Loss-Based Congestion Control and Minimum RTT Scheduling in MPTCP," IEEE 44th Conference on Local Computer Networks, pp.300-307, October 2019.
- [4] A. Aliyu et al., "Interference-Aware Multipath Video Streaming in Vehicular Environments," In IEEE Access Special Section on Towards Service-Centric Internet of Things (IoT): From Modeling to Practice, Volume 6, pp. 47610-47626, 2018.
- [5] S. Afzal et al., "A Novel Scheduling Strategy for MMT-based Multipath Video Streaming," In Proceedings of IEEE Global Communications Conference - GLOBECOM, pp. 206-212, 2018.
- [6] F. Silva, D. Bogusevski, and G-M. Muntean, "A MPTCP-based RTT-aware Packet Delivery Prioritization Algorithm in AR/VR Scenarios," In Proceedings of IEEE Intern. Wireless Communications & Mobile Computing Conference - IWCMCC 18, pp. 95-100, June 2018.
- [7] S. Ferlin et. al., "BLEST: Blocking Estimation-based MPTCP Scheduler for Heterogeneous Networks," In Proceedings of IFIP Network-

ing Conference, pp. 431-439, 2016.

- [8] Kimura et al., "Alternative Scheduling Decisions for Multipath TCP," IEEE Communications Letters, Vol. 21, No. 11, pp. 2412-2415, Nov. 2017.
- [9] Xue et al., "DPSAF: Forward Prediction Based Dynamic Packet Scheduling and Adjusting With Feedback for Multipath TCP in Lossy Heterogeneous Networks," IEEE/ACM Trans. on Vehicular Technology, Vol. 67, No. 2, pp. 1521-1534, Feb. 2018.
- [10] A. Frommgen, J. Heuschkel and B. Koldehofe, "Multipath TCP Scheduling for Thin Streams: Active Probing and One-way Delay-awareness," IEEE Int. Conference on Communications (ICC), pp.1-7, May 2018.
- [11] E. Dong et. al., "LAMPS: A Loss Aware Scheduler for Multipath TCP over Highly Lossy Networks," *Proceedings of the 42th IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp. 1-9, October 2017.
- [12] Matsufuji et al., "Multipath TCP Packet Schedulers for Streaming Video," IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), August 2017, pp. 1-6.
- [13] Nagayama et al., "TCP State Driven MPTCP Packet Scheduling for Streaming Video," IARIA 10th International Conference on Evolving Internet, pp. 9-14, June 2018.
- [14] Nagayama et al., "Path Switching Schedulers for MPTCP Streaming Video," IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), August 2019, pp. 1-6.
- [15] A. Ford et. al., "Architectural Guidelines for Multipath TCP Development," IETF RFC 6182, 2011.
- [16] C. Raiciu, M. Handly, and D. Wischik, "Coupled Congestion Control for Multipath Transport Protocols," IETF RFC 6356, 2011.
- [17] R. Khalili, N. Gast, and J-Y Le Boudec, "MPTCP Is Not Pareto-Optimal: Performance Issues and a Possible Solution," IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 21, No. 5, pp. 1651-1665, Aug. 2013.
- [18] A. Walid, Q. Peng, J. Hwang, and S. Low, "Balanced Linked Adaptation Congestion Control Algorithm for MPTCP," IETF draft draft-walid-mptcp-congestion-control, 2014.
- [19] I. Rhee, L. Xu, and S. Ha, "CUBIC for Fast Long-Distance Networks," Internet Draft, draft-rhee-tcpm-ctcp-02, August 2008.
- [20] M. Sridharan, K. Tan, D. Bansal, and D. Thaler, "Compound TCP: A New Congestion Control for High-Speed and Long Distance Networks," Internet Draft, draft-sridharan-tcpm-ctcp-02, November 2008.
- [21] D. Cavendish, K. Kumazoe, M. Tsuru, Y. Oie, and M. Gerla, "Capacity and Congestion Probing: TCP Congestion Avoidance via Path Capacity and Storage Estimation," IEEE Second International Conference on Evolving Internet, pp. 42-48, September 2010.
- [22] M. Allman, V. Paxson, and W. Stevens, "TCP Congestion Control," IETF RFC 2581, April 1999.
- [23] Arzani et al., "Deconstructing MPTCP Performance," In Proceedings of IEEE 22nd ICNP, pp. 269-274, 2014.
- [24] J. Hwang and J. Yoo, "Packet Scheduling for Multipath TCP," IEEE 7th Int. Conference on Ubiquitous and Future Networks, pp.177-179, July 2015.
- [25] R. K. P. Mok, E. W. W. Chan, and R. K. C. Chang, "Measuring the Quality of Experience of HTTP Video Streaming," Proceedings of IEEE International Symposium on Integrated Network Management, Dublin, Ireland, pp. 485-492, May 2011.
- [26] Z. Lu, V. S. Somayazulu, and H. Moustafa, "Context Adaptive Cross-Layer TCP Optimization for Internet Video Streaming," In Proceedings of IEEE ICC 14, pp. 1723-1728, 2014.
- [27] H. Sinky, B. Hamdaoui, M. Guizani, "Proactive Multipath TCP for Seamless Handoff in Heterogeneous Wireless Access Networks," In Proceedings of IEEE Transactions on Wireless Communications, Volume 15, Issue 7, pp. 4754-4764, 2016.