

Web-QoEに基づいたMPTCPにおける輻輳制御の比較

村木 康臣^{1,a)} 伊藤 嘉浩^{1,b)}

概要: 本論文は, Web サービスに対して, 次世代のトランスポート層プロトコルの1つである Multipath TCP における輻輳制御方式の違いが QoE に及ぼす影響を, 被験者を用いた実験により評価している. 輻輳制御方式としては, LIA, TCP NewReno, TCP Vegas を扱い, ユーザビリティを用いて QoE の評価を行っている. 2つの Web サービスに対する実験結果から, 既存の輻輳制御方式では QoS には影響があるものの QoE に及ぼす影響は大きくないことを確認している.

キーワード: MPTCP, QoE, 輻輳制御

Comparison with Congestion Control of Multipath TCP on Web-QoE

YASUOMI MURAKI^{1,a)} YOSHIHIRO ITO^{1,b)}

Abstract: This paper studies effect of congestion control of Multipath TCP(MPTCP) on QoE by experiments for Web services. In the experiment, the authors treat three congestion controls of MPTCP: TCP NewReno, TCP Vegas and MPTCP LIA and target two actual Web services; they utilize the Web usability as QoE parameters. The experimental results show that the difference between congestion controls affects QoS but it does not affect QoE.

Keywords: MPTCP, QoE, Congestion control

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末などの携帯端末の普及により, 4G 回線, WiMAX や WiFi など通信環境が多様化し, トラフィック量も増加している [1]. 通信環境の多様化に伴い, 例えば, 一台の端末で 4G 回線と WiFi などの複数のネットワークを利用することも可能になっている.

このように通信環境の多様化が進む中で, 現在もなお, インターネットのトラフィックのほとんどは TCP のものである. しかしながら, TCP は単一の経路のみを用いる通信であり, 上記のような複数の通信形態を持つ端末において, これらを効率よく使うことができない.

TCP に代わる新たなトランスポート層プロトコルとして SCTP [2] や DCCP [3], Multipath TCP (MPTCP) [4] などの標準化が進められている. その中でも, MPTCP は TCP の拡張ヘッダを利用するものであり, 複数の経路を利用した通信を行うことができる. MPTCP により, 耐故障性や複数の経路を利用することでスループットの向上が期待されている.

MPTCP に関する研究は多く行われている [5][6][7][8]. 文献 [5] は, 異なる特徴を持つネットワークにおいて輻輳制御を用いたときの複数の経路における負荷分散の割合, また, その要因となる関係性を議論している. 文献 [6] では, MPTCP とマルチメディアアプリケーションの QoS との関係が議論がされている. また, [7] では既存の輻輳制御方式と MPTCP を融合した方式が研究されている. 文献 [8] は, MPTCP を用いた場合の QoE を TCP を用いた場合のものと比較をしている.

¹ 名古屋工業大学 大学院情報工学専攻, Department Computer Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

^{a)} muraki@en.nitech.ac.jp

^{b)} yoshi@nitech.ac.jp

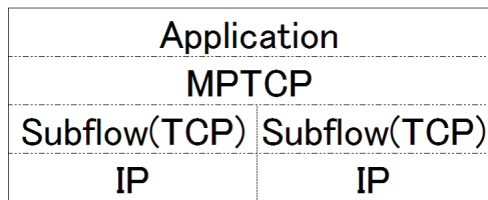


図 1 MPTCP のプロトコルスタック

一方、インターネットが人々に身近なものになるにつれて、我々にとって重要なサービスの多くが Web サービスとして提供されており、これらに対して高いサービス品質が要求されている。特に Web サービスを利用するのはユーザであり、ユーザ視点でのサービス品質、すなわち、Web サービスの体感品質 [9] 向上が要求される。

一般に、Web-QoE に影響を及ぼす要因として、Web サービスの品質、サービスのコンテンツの内容、ユーザの利用環境などがある [10][11]。その中でも、Web サービスにおけるトランスポート層プロトコルの性能は、Web-QoE に影響を及ぼす要因の 1 つである [12]。特に、MPTCP における輻輳制御は MPTCP の性能を決める大きな要因の 1 つである。したがってトランスポート層プロトコルとして MPTCP を採用する場合もその輻輳制御が Web-QoE に影響を及ぼすものと考えられる。

本研究では、MPTCP における輻輳制御方式の違いが Web-QoE に及ぼす影響を被験者を用いた評価実験により調査し、それらの関係性を明らかにする。以降、第 2 章では MPTCP を紹介する。第 3 章では使用する輻輳制御方式を紹介する。第 4 章では Web-QoE の評価尺度である Web ユーザビリティを述べる。第 5 章では評価実験を示し、第 6 章では実験結果と考察を、第 7 章では本研究の結論と今後の課題を述べる。

2. MPTCP

MPTCP は TCP の拡張ヘッダを用いたプロトコルと位置づけられており、複数のパスを同時に接続し伝送を可能にするものである。図 1 に MPTCP のプロトコルスタックを示す。MPTCP はトランスポート層のプロトコルであるので、既存のアプリケーションやルータに変更を加えることなく、エンドツーエンドの実装で MPTCP を利用する環境を実現できる。また、MPTCP は各経路ごとにサブフロー (subflow) と呼ばれる TCP セグメントフローを形成し、データは分割され、サブフロー群を用いて伝送され、それを受信側で組み立てを行うことによりデータの送受信を行う。

MPTCP の標準である RFC6182[13] では、MPTCP の機能目標として以下のものが定義されている。

- スループットの向上
複数の経路を使用する MPTCP は、最適な経路を用い

た単一の TCP コネクションよりもスループットが高くあるべきである。

- 耐故障性の向上

MPTCP は複数の経路を同時に使用するので、通常の単一経路の TCP よりも耐故障性が高くあるべきである。また、MPTCP は送受信側のいずれかが MPTCP に対応していない場合、ユーザが操作することなく、TCP にフォールバックされなければならない。

MPTCP では、最初のコネクションの確立は TCP と同様にスリーウェイハンドシェイクを用いるが、通信相手が MPTCP に対応するときのみサブフローを確立し、MPTCP として通信を行う。

3. 輻輳制御方式

MPTCP における輻輳制御方式の一つとして、LIA (Linked Increases Algorithm) が IETF により提案されている [14] が、これ以外の方式を使うこともできる。本研究では LIA と TCP で用いられている 2 つの方式、TCP NewReno[15] と TCP Vegas[16] を MPTCP の輻輳制御方式として扱う。以下に本研究で用いる輻輳制御方式について述べる。

MPTCP LIA

MPTCP LIA は、MPTCP における輻輳制御方式の一つとして IETF が提案しているものである。図 1 にある各々のサブフローでは輻輳制御方式は後述する TCP NewReno を採用しており、輻輳制御を簡単なものにするために、Additive Increase Multiplicative Decrease (AIMD) 方式 [17] を採用している。AIMD とは輻輳ウィンドウサイズの増加は加算で行い、減少させる場合は乗算を用いるアルゴリズムである。

TCP NewReno

TCP NewReno は輻輳制御方式の中でロスベース方式に分類され、パケットの破棄を輻輳の指標とする方式である。NewReno は LIA と同様に AIMD 方式を用いている。

TCP Vegas

TCP Vegas は、輻輳制御方式の中で遅延ベース方式に分類され、RTT の増加を輻輳の指標とする方式である。パケットが破棄されたときにはすでに輻輳が発生しているという仮定から、パケット破棄が発生する前に輻輳ウィンドウを小さくする方式である。安定した状態では、パケットの破棄が発生せず、かつ低遅延伝送も可能になる。

4. Web-QoE

Web-QoE の評価尺度の一つとしてユーザビリティ [18] を用いるものがある。ユーザビリティとは、サービスや製

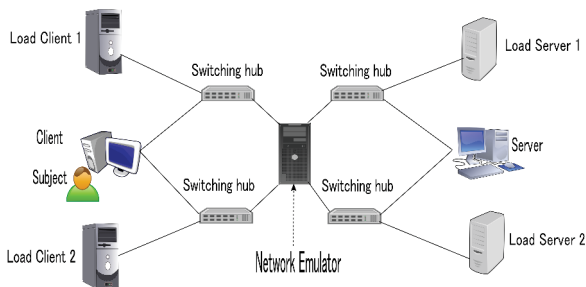


図 2 実験環境の構成

品、インタフェースなどに対する評価尺度であり、あるサービスや製品などを利用したときにユーザが使いやすさを表すものであり、ISO9241-11でも標準化をされている。ISO9241-11 勧告は、ユーザビリティを「特定のユーザが、特定の目的に到達するために特定の利用状況における有効さ (effectiveness), 効率 (efficiency), 満足度 (satisfaction) をもって、製品を利用できる度合」と定義しており、ユーザビリティの評価においてはこれらの尺度が明確に定義されていなければならないとしている。「有効さ」とはユーザが目的に到達するための正確さと達成度を意味する。「効率」はユーザが目的に到達するために正確さと達成度に費やした資源を意味する。「満足度」はユーザの製品利用に対する不快のなさを意味する。本研究ではISO9241-11 勧告に準拠するユーザビリティを用いて、Web-QoEを評価する。

5. 実験

5.1 実験環境

実験環境を図2に示す。図2において、被験者 (Subject) は評価用端末 (Client) からネットワークエミュレータ (Network Emulator) を通じて Web サーバ (Server) にアクセスし、対象の Web サービスを利用する。輻輳制御方式は Web サーバで変更することができる。ネットワークエミュレータはルータとして動作し、クライアントと Web サーバ間に4本の経路を構成する。また、ネットワークエミュレータはここを通過するパケットに対して往復遅延とパケット損失を付与させることで通信品質を変化させる。ネットワークエミュレータとしてはDummysnet[19]を用いる。負荷クライアント (Load Client) と負荷サーバ (Load Server) は、共にネットワークエミュレータに接続されており、負荷トラフィックを生成させることでネットワークを輻輳させる。負荷トラフィックは、ベンチマーク用のアプリケーションである autobench[20] を用いて生成する。

5.2 ユーザの利用状況

ISO9241-11 勧告に基づき、本実験のユーザの利用状況、ユーザ、ユーザの目的、ユーザが行うタスク、ユーザの利用環境を記述する。本実験では、2つの Web サービス (マッ

表 1 実験環境

環境	片道遅延	パケット損失率	帯域幅	負荷トラフィック
Env.1	0ms	0 %	10Mbps	有
Env.2	20ms	1 %	10Mbps	有
Env.3	0ms	0 %	10Mbps	無
Env.4	20ms	1 %	10Mbps	無

表 2 端末一覧

端末	CPU	OS
Client	Core2 Duo	Linux Ubuntu 14.04 LTS
Network Emulator	Core2 Duo	FreeBSD9.2
Server	Core2 Duo	Linux Ubuntu 12.04 LTS
Load Client 1	Pentium	Linux Ubuntu 12.10
Load Client 2	Core i3	Linux Ubuntu 12.04 LTS
Load Server 1	Core i3	Linux Ubuntu 12.04 LTS
Load Server 2	Core i3	Linux Ubuntu 12.04 LTS

プサービス、ショッピングサービス) を対象とする。マップサービスは OpenStreetMap[21] で公開されている情報を基に Apache を用いて地図サーバを構築したものである。ショッピングサービスは Amazon から取得した商品情報を基にショッピングサーバを構築したものである。

- ユーザ：本実験における被験者である。ユーザはインターネット経験のある 20 代の男女 20 名とする。
- ユーザの目的：被験者が指定された Web サービスで指定された条件のものを見つけることとする。
- ユーザが行うタスク：マップサービスにおけるタスクは、被験者は指定された条件を満たす施設を見つけるものである。また、ショッピングサービスにおけるタスクでは被験者は指定された条件を満たす商品を探し、これをショッピングカートに入れる。
- ユーザの利用環境：本実験ではネットワークエミュレータにより、表1に示す4つの利用環境を構成する。便宜上、各実験環境を Env.1~Env.4 と表す。Env.1 と Env.2 は、負荷生成器がクライアント-サーバ間のネットワーク上に輻輳を発生させる環境である。また、Env.2 においては通信品質が劣化した環境で輻輳が発生しやすい状況、Env.4 は、通信品質が劣化した環境で輻輳が発生しにくい状況を考える。以上の4つの各環境に対し、前述した3つの輻輳制御方式を用いて評価を行う。

5.3 Web-QoE の評価尺度

本研究では、Web-QoE の評価尺度として ISO9241-11 勧告より、満足度、有効さ、効率の3つの尺度を採用する。満足度は質問に対して評定尺度法 [22] により5段階で評価する。また、評定尺度法の評価語は「とても満足」、「満足」、「どちらとも言えない」、「不満」、「とても不満」の五つとし、評点をそれぞれ5, 4, 3, 2, 1とする。有効さは、各タスクに課した条件に対して、被験者が達成することのできた条件の数を有効さとして用いる。本実験において効

率は、タスクに要した時間を消費した資源と考え、単位時間当たりの有効さとする。

5.4 QoS の評価尺度

本研究では QoS の評価尺度として輻輳制御時のウィンドウサイズとスループットを用いる。

6. 実験結果と考察

本実験の実験結果を図 3~図 12 に示す。これらの図において横軸は表 1 の環境を表す。また、各図には 95% 信頼区間も併せて示すものとする。図 3 から図 6 までは QoS の評価結果を表す。図 7 から図 12 までは QoE の評価結果を表す。

図 3 と図 4 はそれぞれマップサービスとショッピングサービスにおける輻輳ウィンドウサイズの平均である。図 3 のマップサービスにおいて、Env.2 では TCP NewReno と MPTCP LIA, TCP Vegas と TCP LIA に、Env.4 ではすべての組み合わせのパターンで、輻輳ウィンドウサイズに有意な差が見られた。どちらの場合においても MPTCP LIA の輻輳ウィンドウサイズの値が他の 2 つの輻輳制御方式よりも低くなっていることがわかる。しかし、その差は非常に小さい。これは、輻輳制御の効果が出る前にコネクションが解放されてしまったためである。

図 5 と図 6 は各環境における平均スループットを表す。これらは 4 つのパスの平均である。図 5 と図 6 のマップサービスとショッピングサービスのどちらのサービスにおいても、Env.2 で TCP NewReno と MPTCP LIA, TCP Vegas と MPTCP LIA, Env.4 では 3 つの輻輳制御方式のすべての組み合わせで、スループットに有意な差が見ら

れた。また、Env.3 のときにどちらのサービスにおいても TCP Vegas の値がほかの 2 つの輻輳制御方式よりも非常に高いスループットを示している。これは、Env.3 は 4 つの実験環境の中で通信品質の劣化が最も小さく、遅延ベース方式である TCP Vegas が安定状態になり、ロスベース方式である TCP NewReno や MPTCP LIA よりも安定したスループットを得ることができたためである。

以上より、本研究で輻輳制御方式の違いにより QoS に、差が生じることを確認できた。

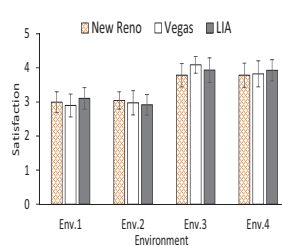


図 7 満足度
(マップ)

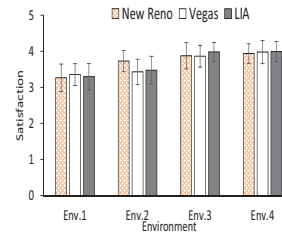


図 8 満足度
(ショッピング)

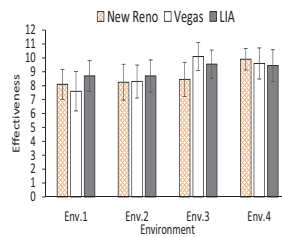


図 9 有効さ
(マップ)

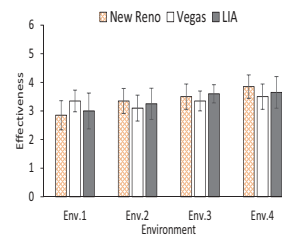


図 10 有効さ
(ショッピング)

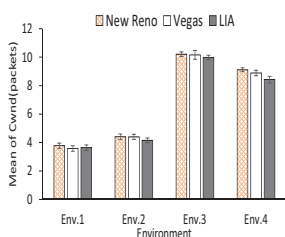


図 3 輻輳ウィンドウサイズ
(マップ)

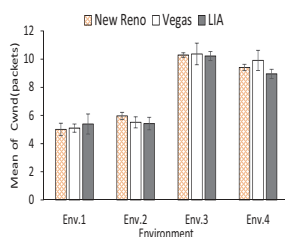


図 4 輻輳ウィンドウサイズ
(ショッピング)

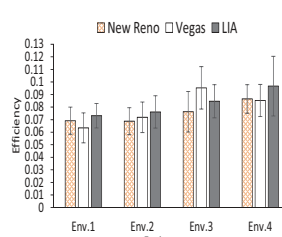


図 11 効率
(マップ)

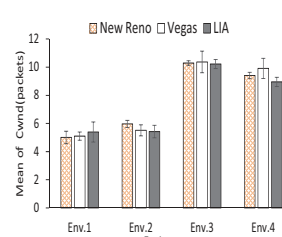


図 12 効率
(ショッピング)

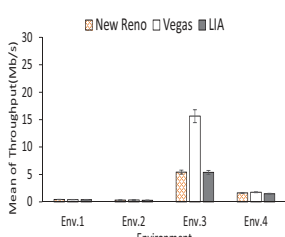


図 5 スループット
(マップ)

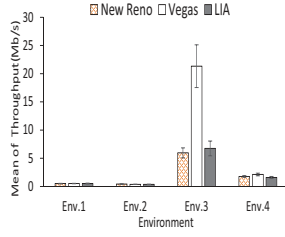


図 6 スループット
(ショッピング)

図 7 と図 8 に満足度、図 9 と図 10 に有効さ、図 11 と図 12 に効率を示す。図 7 と図 8 を見ると、負荷のある環境のほうが負荷トラヒックのないものよりも満足度が低くなっていることがわかる。この結果は図 3 から図 6 までの QoS 尺度の結果と類似しているが、各環境ごとの輻輳制御方式の違いによる差は見られない。そこで、この結果に対して信頼水準 95% で t-検定を行ったところ、すべての環境で輻輳制御方式の違いによる有意な差はなかった。同様

に、有効さ、効率においても有意差検定を行ったところ、有効さにおいて、TCP NewReno と TCP Vegas で有意差が見られ TCP Vegas のほうが高い値を示しているが、効率においてはどの環境でも有意な差は見られなかった。

以上より、今回用いた輻輳制御では、QoS の評価結果に差は見られたが、満足度、有効さ、効率において、Web-QoE への影響はないことがわかった。

7. まとめ

本実験では、MPTCP における輻輳制御方式の違いが Web-QoE に及ぼす影響を被験者による実験から評価した。その結果、本研究で用いた 3 つの輻輳制御方式では、QoS の評価尺度には差が見られたが、Web-QoE には差が見られないことがわかった。

今後の課題としては、ほかの輻輳制御方式や今回の実験で使用した Web サービスとは異なる特徴をもったサービスを使用して実験を行うことが考えられる。

参考文献

- [1] 総務省: “平成 26 年版情報通信白書情報通信統計”, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/>.
- [2] Stewart, R.: “Stream Control Transmission Protocol”, RFC 4960 (2007).
- [3] E. Kohler, M. Handley and S. Floyd: “Datagram Congestion Control Protocol (DCCP)”, RFC 4340 (2006).
- [4] Ford, A., Raiciu, C., Handley, M. and Bonaventure, O.: “TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses”, RFC 6824 (2013).
- [5] Nguyen, S. C. and Nguyen, T. M. T.: “Evaluation of multipath TCP load sharing with coupled congestion control option in heterogeneous networks”, *Global Information Infrastructure Symposium (GIIS), 2011*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/GIIS.2011.6026698 (2011).
- [6] Diop, C., Mezghani, E., Exposito, E., Chassot, C. and Drira, K.: “QoS-driven Autonomic Abilities through a Multi-homed Transport Protocol”, *Proc. of IEEE AINA 2013*, pp. 645–652 (online), DOI: 10.1109/AINA.2013.104 (2013).
- [7] Shailendra, S., Bhattacharjee, R. and Bose, S.: “MP-SCTP: A multipath variant of SCTP and its performance comparison with other multipath protocols”, *Proc. of IEEE ICCS 2012*, pp. 280–284 (online), DOI: 10.1109/ICCS.2012.6406154 (2012).
- [8] Yamauchi, D. and Ito, Y.: “A study of effect of MPTCP on Web usability”, *Consumer Electronics (GCCE), 2014 IEEE 3rd Global Conference on*, pp. 12–15 (online), DOI: 10.1109/GCCE.2014.7031214 (2014).
- [9] ITU-T: <http://www.itu.int/en/ITU-T/Pages/default.aspx>.
- [10] ISO-9241-11: “Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs), Part 11: Guidance on usability” (1998).
- [11] Killelea, P.: *Web Performance Tuning*, O'Reilly & Associates Inc, 2nd revised edition (2002).
- [12] Koshimura, R. and Ito, Y.: Empirical Study on Clarification of Relationship Between QoS and QoE for Web Services by Path Analysis, *Consumer Electronics (GCCE), 2014 IEEE 3rd Global Conference on* (2014).
- [13] A. Ford, C. Raiciu, M. Handley, S. Barre and J. Iyengar: “Architectural Guidelines for Multipath TCP Development”, RFC 6182 (2011).
- [14] Raiciu, C., Handley, M. and Wischik, D.: “Coupled Congestion Control for Multipath Transport Protocols”, RFC 6356 (Experimental) (2011).
- [15] Henderson, T., Floyd, S., Gurtov, A. and Nishida, Y.: “The NewReno Modification to TCP’s Fast Recovery Algorithm”, RFC 6582 (Proposed Standard) (2012).
- [16] Brakmo, L. S., O’Malley, S. W. and Peterson, L. L.: “TCP Vegas: New Techniques for Congestion Detection and Avoidance”, *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 24–35 (1994).
- [17] Handley, M., Padhye, J. and Floyd, S.: “TCP Congestion Window Validation”, RFC 2861 (Experimental) (2000).
- [18] ヤコブ・ニールセン: “ウェブ・ユーザビリティ顧客を逃がさないサイト作りの秘訣”, MdN コーポレーション (2000).
- [19] L. Rizzo: “Dummynet”, <http://info.iet.unipi.it/lui-gi/dummynet/>.
- [20] Julian T J Midgley: “Autobench”, <http://www.xenoclast.org/autobench/> (2004).
- [21] OpenStreetMap: <http://www.openstreetmap.org/>.
- [22] 難波精一郎, 桑野園子: “音の評価のための心理学的測定法 (音響テクノロジーシリーズ)(音響テクノロジーシリーズ)”, コロナ社 (1998).