

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11786

研究課題名（和文）バッファリング遅延ゼロ・100%リンク利用率を達成する理想的な輻輳制御の追求

研究課題名（英文）Pursuing an ideal congestion control algorithm achieving no buffering delay and full bottleneck bandwidth utilization

研究代表者

内海 哲史（Utsumi, Satoshi）

福島大学・共生システム理工学類・准教授

研究者番号：60605971

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、遅延時間が小さく、100%の回線利用率を達成する理想的な輻輳制御アルゴリズムを実現することを目的とした。従来の輻輳制御アルゴリズムでは用いられていないネットワーク計測手法を活用し、数学的裏付けのある正確な輻輳状態推定方法を提案した。その結果を、新たな輻輳制御アルゴリズムへ応用した。提案手法の有効性を数学的に保証すると共に、実ネットワーク環境下での実験により実用性の検証を行った。また、従来型の輻輳制御アルゴリズムであるCUBICと遅延を抑える輻輳制御アルゴリズムであるBBRとの競合時における公平性の改善について、研究を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案アルゴリズムの実機での実現し、その性能を評価した。その結果、Google社が2016年に発表した遅延を抑える輻輳制御アルゴリズムであるBBRの性能（バッファリング遅延とフロー間の公平性）を大幅に改善できることを確認した。提案アルゴリズムが実機でも高性能を実現できることを確認したことで、BBRよりも小さいバッファリング遅延・100%に近い回線利用率、フロー間の優れた公平性を達成する手段を実現したと言える。また、従来型の輻輳制御アルゴリズムとの公平性を改善する手法を発表したことで、BBRや提案アルゴリズムの普及に貢献できたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to realize an ideal congestion control algorithm that achieves minimal delay and 100% link utilization. Utilizing network measurement techniques not previously employed in traditional congestion control algorithms, we proposed a precise method for estimating congestion states backed by mathematical principles. These findings were then applied to a new congestion control algorithm. The efficacy of the proposed method was guaranteed mathematically, and its practicality was verified through experiments in real network environments. Additionally, we investigated improvements in fairness when competing with conventional congestion control algorithms such as CUBIC and delay-reducing congestion control algorithms BBR.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：輻輳制御アルゴリズム BBR CUBIC 性能評価 インターネット

1. 研究開始当初の背景

インターネットが誕生して以来、輻輳制御はインターネットにおける輻輳崩壊を回避するために広く用いられてきた。TCP Tahoe [Jacobson], TCP Reno, TCP NewRenoなどの初期のインターネット輻輳制御はロススペース輻輳制御と呼ばれ、パケットロスを検出するまで、パケット送信速度を大きくし、パケットロスを検出すると送信速度を小さくする。これは、有線回線のようなエラーのほとんどない環境では、パケットロスのそのほとんどは輻輳によって発生するバッファオーバーフローによることに起因している。ロススペース輻輳制御は、現在も広く使われており、TCP CUBIC [cubic]やその亜種は、Windows, MacOS, Android OS, iOS, Linuxにおけるデフォルトのインターネット輻輳制御として用いられている。

ところが、2009年頃からバッファブloatと呼ばれるインターネットにおける輻輳問題が表面化してきた。バッファブloatとは、ルータやスイッチの大容量バッファをパケットが埋め尽くすことで、バッファリング遅延が数秒クラスまで増大する問題である [bufferbloat]。この問題の背景には、メモリ価格の低下に伴い、ルータやスイッチのバッファに大容量のメモリが搭載されてきていることが挙げられる。図1は、近年のルータやスイッチにおけるリンク容量とそのバッファ容量(最大バッファリング遅延時間として換算)をその仕様に基づいて示したものである。大きなものでは数百ミリ秒～数十秒分の巨大なメモリがバッファとして搭載されていることがわかる。これは、パケットロスを削減することには一定の効果がある反面、大きな遅延が発生する要因となる。なぜなら、ロススペース輻輳制御はバッファを埋め尽くすように動作するため、大きなパケットバッファを埋め尽くすまでパケット送信速度を大きくするためである。

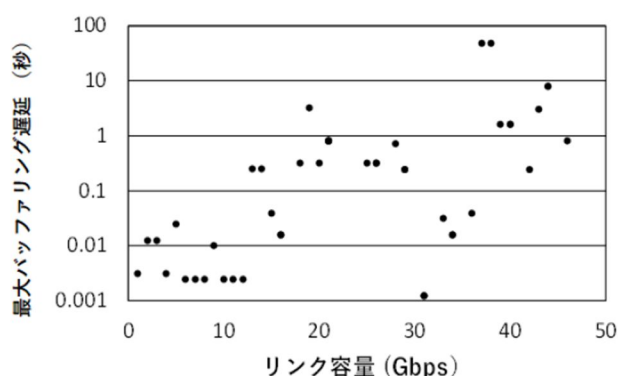


図1: ルータ・スイッチ製品のバッファリング遅延

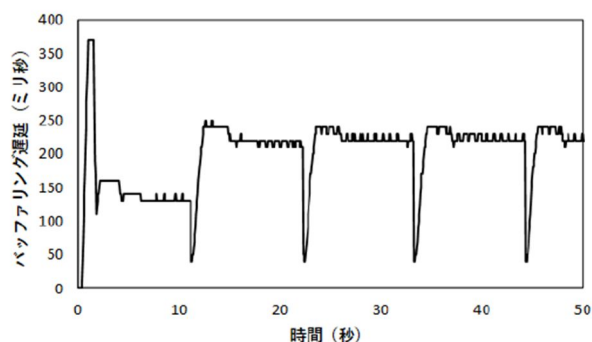


図2: BBRフローのバッファリング遅延

2016年Google社によって開発されたBBR (Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time) [cardwell]は、バッファブloatを回避するインターネット輻輳制御の1つとして期待されている。BBRは、バッファリング遅延がなく、かつ、ボトルネックリンク帯域の利用率が100%である状態を最適動作点と捉え、パケット送信速度をその最適動作点に到達するようにパケット送信速度を調整する。

BBRは、Google社の自社ネットワークにおける運用実験を通じて、その有効性が検証され、既に実用化されているが、複数の研究者によって様々な問題点が指摘されている。その中でも深刻なのが、ボトルネックリンクを多数のBBRフローが共有すると、ボトルネックリンク帯域を過大推定し、バッファリング遅延が発生する問題である[hock]。内海らの予備実験によると、128本のBBRフローが100Mbpsのリンクを共有する環境において、バッファリング遅延が数百ミリ秒に達することが確認されている(図2)。このような遅延時間の増大は、LINEやSkype等のインターネ

ット通話やオンラインゲーム、遠隔医療のようなアプリケーションにとっては致命的である。

これらの問題は、BBRがその制御のために必要とする、ネットワーク状態（ボトルネックリンク帯域及び往復伝搬遅延時間）の推定手法に起因している。この問題に対して、Google社においてもBBRの改良が行われており、BBRv2が2019年7月に公開されたが、その改良内容は極めて場当たり的であり、問題の本質的な解決には至っていない。内海らはこの点を問題視し、数学的な理論に基づくインターネット輻輳制御アルゴリズムの確立が急務であると考えている。

[参考文献]

[Jacobson] V. Jacobson, “Congestion Avoidance and Control,” Sigcomm `88, August 1988.

[cubic] S. Ha et al., “CUBIC: A New TCP-Friendly High-speed TCP Variant,” ACM SIGOPS Operating Systems Review – Research and developments in Linux kernel, July 2008.

[bufferbloat] J. Gettys, “Bufferbloat: Dark Buffers in the Internet,” IEEE Internet Computing, May/June 2011.

[cardwell] N. Cardwell, “BBR: Congestion-Based Congestion Control,” ACM Queue, December 2016.

[hock] M. Hock et al., “Experimental Evaluation of BBR Congestion Control,” IEEE ICNP, Oct. 2017.

2．研究の目的

既存のインターネット輻輳制御手法では用いられていない継続的なネットワーク計測を活用し、数学的理論に基づいてネットワークの輻輳状態を正確に推定する。さらに、その結果を、既存の発見的手法に基づく輻輳制御アルゴリズムとは一線を画する、新たな輻輳制御アルゴリズムへ応用する。提案手法の有効性を数学的に保証すると共に、コンピュータシミュレーション及び実ネットワーク環境下での実験により実用性の検証を行う。

さらに、BBR フローの TCP CUBIC フローとのスループット公平性にも着目し、数学的解析に基づいたその改善方法についても、コンピュータシミュレーションにより実用性の検証を行う。

3．研究の方法

1. で述べたように、BBRにはネットワーク状態の推定手法に問題がある。具体的には、BBRでは、ボトルネックリンク帯域及び往復伝搬遅延時間と言ったネットワーク状態を推定するために、最新の観測結果のみを用いているため、競合フロー数や背景トラヒックの変動に大きく影響を受ける。それに対し、本研究では、継続的に観測して収集されたデータを統計処理することによって、ネットワーク状態の推定精度を向上させる。また、計測誤差が原因で表面化する遅延時間の増大も観測することによって、計測結果の補正を行う。具体的には、以下の項目について研究を遂行する。

- 1) 観測データの統計的処理によるネットワーク状態の推定手法の確立
- 2) 往復遅延時間の変動に基づいた推定ボトルネックリンク帯域の補正手法の提案
- 3) ネットワーク状態の推定に基づく新しいBBR輻輳アルゴリズムの提案
- 4) 3)で提案するBBR輻輳制御アルゴリズムの性能評価

さらに、BBR フローの TCP CUBIC フローとのスループット公平性の問題に対しては、以下の項目について、研究を遂行する。

- 5) TCP CUBIC の新しいスループット解析モデルの構築
- 6) 5)の解析モデルに基づいた、TCP CUBIC と公平な BBR 輻輳制御アルゴリズムの提案
- 7) 6)で提案する BBR 輻輳制御アルゴリズムの性能評価

4. 研究成果

(1) 往復遅延時間の変動に基づいた推定ボトルネックリンク帯域の補正手法をもちいた新しい BBR 輻輳アルゴリズム

オリジナルの BBR 輻輳制御アルゴリズムでは、直近で観測した最大スループットをパケット送信速度として設定していた。本研究で提案した、改良版 BBR である L3DR (Low Latency and Low Drop Rate) においては、直近で観測した最大スループットの代わりに、観測したスループットの重みづけ移動平均をもちいる。L3DR により、多数のフローが共存する場面におけるボトルネック回線でのバッファリング遅延時間やパケット廃棄率を抑えることに成功した [utsumi1, utsumi2]。 (図 3-4)

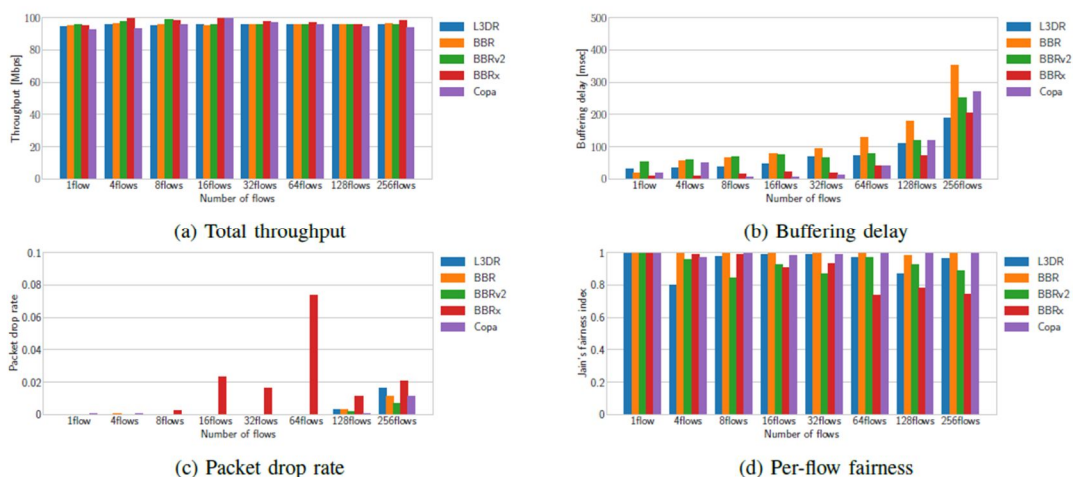


図 3: L3DR フローの評価結果 (ボトルネックにおけるバッファサイズ: 10BDP のとき)

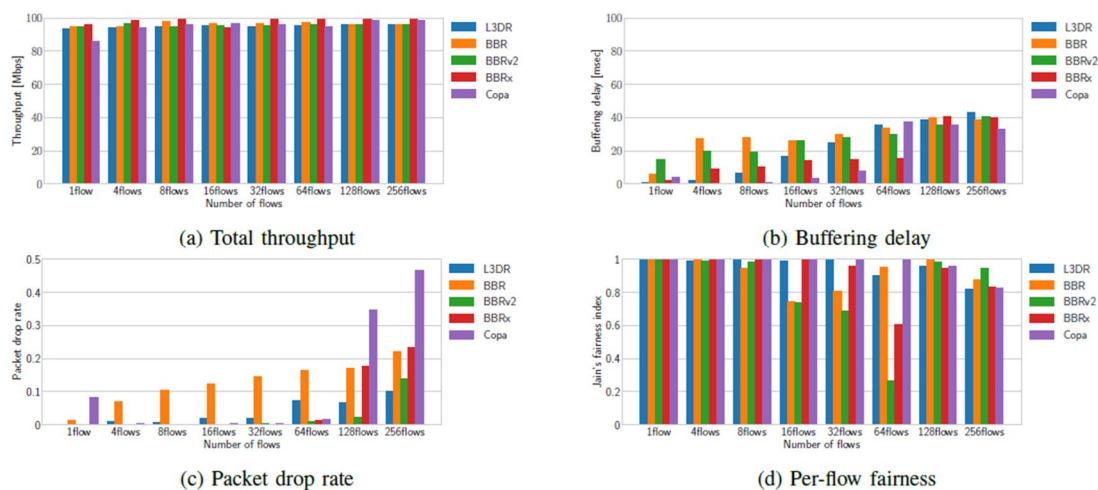


図 4: L3DR フローの評価結果 (ボトルネックにおけるバッファサイズ: 1BDP のとき)

[utsumi1] S. Utsumi and G. Hasegawa, “Refining Calculation Algorithm for Packet Pacing Rate of BBR,” IEEE CQR, June 2021.

[utsumi2] S. Utsumi and G. Hasegawa, “A New Congestion-Based Congestion Control for Low Latency and Low Packet Drop Rate,” ICUFN, July 2023.

(2) スループット解析モデルに基づいた TCP CUBIC と公平な BBR 輻輳制御アルゴリズム
 文献 [utsumi3]において、パケットロス検出間隔に基づいた新しい TCP CUBIC のスループット解析モデルを構築(図5)し、そのスループット解析モデルをもちいた TCP CUBIC と公平な BBR 輻輳制御アルゴリズム BBR-FCA (Fair to CUBIC based on mathematical Analysis) を提案した。性能評価の結果、オリジナル BBR や既存の BBR 改変版と比べ、TCP CUBIC との高い公平性を実現できた。(図6)

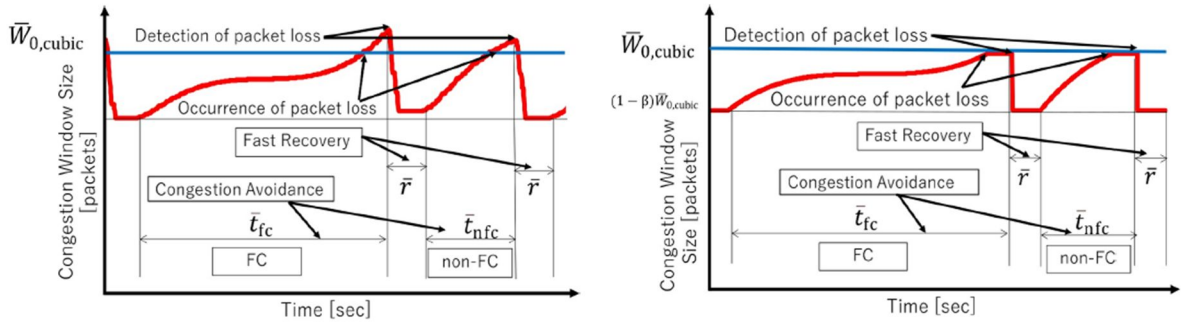


図5: 仮定した TCP CUBIC の輻輳ウィンドウのダイナミクス (左) と TCP CUBIC のスループット解析モデル構築でもちいた近似的な輻輳ウィンドウダイナミクス (右)

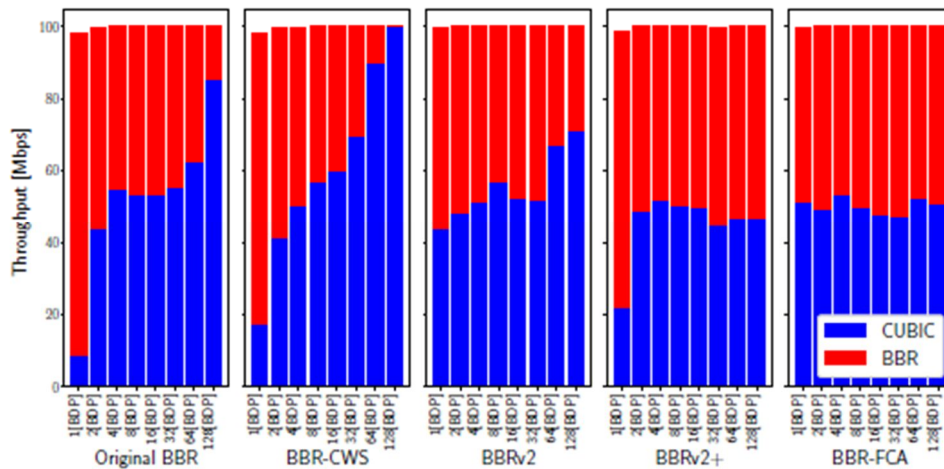


図6: BBR フローと TCP CUBIC フロー競合時のそれぞれのフローのスループット

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 内海 哲史	4. 巻 65
2. 論文標題 インターネットにおけるふくそう制御アルゴリズム	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジンB-plus	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Satoshi Utsumi, Go Hasegawa
2. 発表標題 A New Congestion-Based Congestion Control for Low Latency and Low Packet Drop Rate
3. 学会等名 2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Utsumi, Go Hasegawa
2. 発表標題 Improving Inter-Protocol Fairness Based on Estimated Behavior of Competing Flows
3. 学会等名 International Federation for Information Processing (IFIP) Networking 2022 Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内海 哲史
2. 発表標題 輻輳制御アルゴリズムと解析モデルと公平性（あるいは親和性）
3. 学会等名 電子情報通信学会（IEICE）/ ネットワークシステム研究会（NS）（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Utsumi, Go Hasegawa
2. 発表標題 Refining Calculation Algorithm for Packet Pacing Rate of BBR
3. 学会等名 IEEE ComSoc International Communications Quality and Reliability Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内海 哲史、長谷川 剛
2. 発表標題 高スループット及び低遅延を実現するためのBBRの送信レート算出アルゴリズムの提案
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会 (IN) / インターネットアーキテクチャ研究会 (IA)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>福島大学理工学群共生システム理工学類 内海研究室 https://sss.fukushima-u.ac.jp/~u-satoshi/ 共生システム理工学類 数理・情報科学コース 内海 哲史 准教授 https://www.youtube.com/watch?v=PU7fTEb18gE</p>
--

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
研究分担者	長谷川 剛 (Hasegawa Go) (00294009)	東北大学・電気通信研究所・教授 (11301)	

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
---------	---------