

令和元年6月13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：16K00129

研究課題名(和文) 省電力技術によるパケット反転に適応するフロー制御アルゴリズムの提案

研究課題名(英文) Proposal of Flow Control Algorithm Adapted to Packet Reordering with Power Saving Technology

研究代表者

福田 豊 (Fukuda, Yutaka)

九州工業大学・情報科学センター・助教

研究者番号：90372763

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)：5G環境による膨大な情報の収集と、その機器における消費電力削減のため、ネットワークを要求トラフィックに応じて柔軟に再構成する技術の研究開発が進んでいる。一方でこうした動的な構成変更は、受信側でパケット到着順序の反転を招き、TCP通信特性に悪影響を与える可能性がある。そこで本研究ではパケット反転に対応可能なフロー制御アルゴリズムを提案した。まず潜在的なパケット反転の可能性を調査し、それがTCP通信性能に及ぼす影響を実機実験で検証した。得られた知見を基にパケット反転が発生する環境でも、良好な通信性能を提供できるフロー制御アルゴリズムを考案し、シミュレーションによってその有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インターネットのトラフィック流量は社会活動に応じて時間や曜日ごとに大きく変動することが知られている。そこで要求トラフィックに応じてネットワークを柔軟に再構成することが検討されているが、動的に経路や転送性能が組み替えられていくため、データの送出順と到着順が異なってしまうことがあり得る。本研究では、送受信間の信頼性ある通信を提供するTCP (Transmission Control Protocol) に異なる到着順序を与える影響を調査し、到着順序の反転に対応出来るアルゴリズムを考案した。

研究成果の概要(英文)：Packet reordering in a short fixed period is considered in this study. We believe that the data will be transmitted by dynamic and parallel ways in the near future, which will require more frequent and periodical packet reordering. This in turn will lead to unnecessary retransmissions and throughput degradation to the TCP (Transmission Control Protocol). There has been much research to improve the TCP performance with packet reordering, but the considered reorder intervals have been based on measurements on the existing Internet, and the short, fixed reorder intervals caused by the flexible transmission schemes have not been studied sufficiently. Therefore, in this study, we vary the fixed reorder interval from within the Round-Trip Time (RTT) to over the RTT, and evaluate the communication performance of TCP NewReno and Cubic. From the simulation results, we show that the performance of TCP Cubic is highly affected by the packet reordering.

研究分野：コンピュータネットワーク

キーワード：省電力 TCP パケット反転

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

パケットリオーダーリングは受信側に送信時とは異なる順番でパケットが到着することであり、計測実験によりインターネットでは一定の割合で発生することが知られている。原因は幾つかあるが、主にネットワーク層での経路発振によるパケットの異経路の経由が挙げられる。これに対して TCP は順序制御を行うが、3 パケット以上のパケットリオーダーリングが発生すると、重複 ACK により送信側はパケット廃棄が発生したと認識して送信レートを下げってしまうため、不必要にスループットが低下してしまう。この性能低下を避けるために先行研究では様々な手法が提案されている [1] ~ [7]。

一方、近年のネットワーク技術の開発動向に目を向けると、従来の耐障害性や遅延などの通信特性だけでなく、省電力化など多様な要素に基づく経路制御や複数経路の活用が積極的に検討されている。また携帯端末で LTE と無線 LAN など異種メディアを同時に利用しながら通信を継続する研究開発も盛んに行われている。よって今後のネットワークでは複数経路の動的な活用が一段と進み、経路中でのパケットリオーダーリングの増加と発生パターンの変化が生じると予想される。特に通信の高速化と効率化を目指すとして、複数経路の同時利用等により継続的に一定の間隔でパケットリオーダーリングが発生する可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では一定間隔で発生するパケットリオーダーリングが TCP の通信特性に与える影響を調査する。具体的には TCP の輻輳制御アルゴリズムとして NewReno と Cubic を対象とし、RTT 内外で多数のパケットリオーダーリングが継続的に発生する場合の通信特性を調査し、どのような対応が必要となるのかを明らかにする。得られた知見を基にパケット反転が発生する環境でも、省電力性能と良好な通信性能を両立できるフロー制御アルゴリズムを考案し、シミュレーションによってその有効性を検証する。

3. 研究の方法

(1) パケットリオーダーリングを再現するシミュレーション環境の構築

本研究ではネットワークシミュレータ ns3 にパケットリオーダーリング機能を追加してシミュレーションを行った。本研究で用いたシミュレーショントポロジを図 1 に示す。先行研究では、実際の計測によって得られた到着分布からパケットリオーダーリング発生間隔を定めて評価を行っている。それに対して本研究では、一定の間隔で常に到着順序が反転する場合を想定する。具体的には予め定める変数 RI (Reorder Interval) よりも R1 のバッファサイズが大きい場合 R1 の先頭パケットは RI パケット分後ろに移動する。なお移動したパケットの R1 からの送信が終了するまでは他のパケットの反転は行わない。

この挙動を図 2 より説明する。まず図 2(a)より R1 には 10 ~ 20 までの 11 個のパケットが存在し、RI = 4 であるとする。バッファサイズは 11 で RI よりも大きく、かつ先頭の packet10 は以前にパケットリオーダーリングによる移動を経験していないため、パケットリオーダーリングが発生しパケット 10 は RI = 4 パケット分後ろに移動して (b) の状態へと遷移する。その後、packet10 まで順次パケットは送信される (c)。packet10 が送信された後、R1 には 15 ~ 20 までの 6 個のパケットが存在するため、パケットリオーダーリング発生条件を満たし、(d) に示すように先頭の packet15 が 4 パケット分後ろに移動する。この方式により R1 にバッファがある限り、RI ごとにパケットが RI 個分だけ後ろに移動し、パケットリオーダーリングが定期的に発生する環境を再現できる。

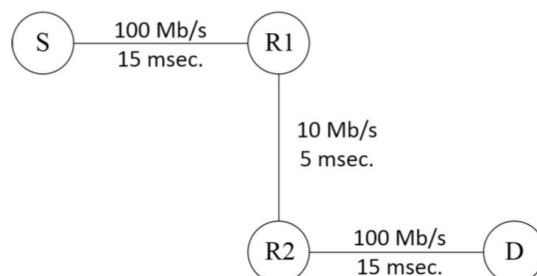


図 1 ネットワークトポロジ。

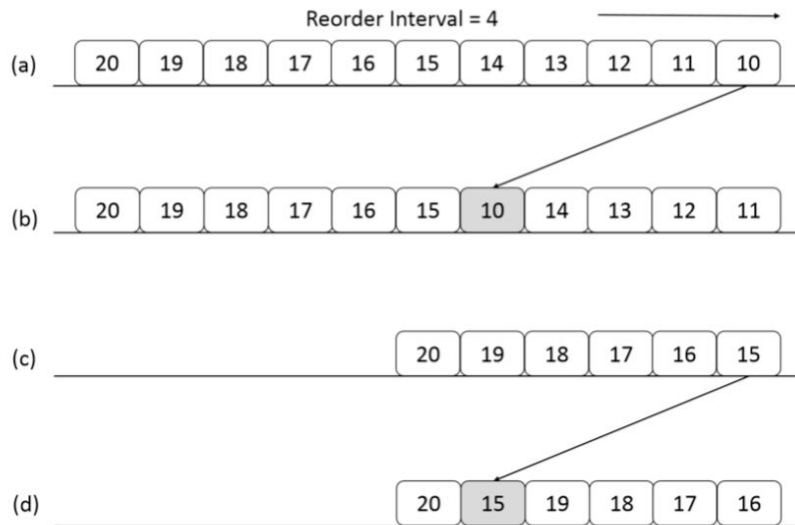


図2 パケットリオーダリング。

(2) シミュレーション環境

シミュレーション環境として図1を用い、送信端末 S は 1,500 Bytes の TCP セグメントを受信端末 R に向けて送信する。複数経路の同時利用を想定しているパケットリオーダリングはルータ R1-R2 間のボトルネックリンクで発生するとし、リンク速度は 10 Mb/s、遅延は 5 msec. とした。一方、各端末とルータ R1, R2 間のアクセスリンクのリンク速度は 100 Mb/s、遅延は 15 msec. であるため、端末間の RTT は 70 msec. となる。調査対象の TCP 輻輳制御アルゴリズムは NewReno と Linux 標準である Cubic とした。シミュレーション時間は 10.2 秒、TCP はシミュレーション開始後 0.2 秒 から送信を開始するとした。表1にシミュレーション要件を示す。

表1 シミュレーション要件。

Segment Size	1,500 Bytes
RTT	70 msec.
Reorder Interval	4 ~ 100 packets
TCP variants	NewReno, Cubic
シミュレーション時間	10.2 秒
シミュレータ	ns3

4. 研究成果

(1) 継続的なパケットリオーダリング発生が TCP に与える影響調査

事前準備として、同じシミュレーション環境でパケットリオーダリングが発生しない場合のスループットを計測し、Cubic, NewReno とともに 9.54455 Mb/s であることを確認した。最初に図3に RI を 4 ~ 100 まで変化させたときの正規化スループット (=パケットリオーダリング発生時のスループット/パケットリオーダリング無しのスループット) を、図4に Fast Recovery を実行した回数を示す。

図3より、パケットリオーダリングの発生によって NewReno は最大約 50%、Cubic は最大約 60% スループットが低下し、Cubic は殆どの場合 NewReno を下回っており、従来の重複 ACK を利用したレート制御では変化に対応できていないことがわかる。また図4より RI < 100 まではパケットリオーダリングによる Fast Recovery への遷移が発生しており、RI が短いほど Fast Recovery を実行する回数が多い傾向を示す。なお RI = 100 の場合は図4より Fast Recovery が発生しておらず、R1 でパケットリオーダリングが発生しないため両者の正規化スループットは 1 となる。さらに図3と4を比較すると、Cubic では Fast Recovery の回数に関わりなくスループット特性は低下している。よって (i) パケットリオーダリングの頻繁な発生 (RI が小さい場合) と、(ii) TCP cwnd (congestion window size) が開いている状況でのパケットリオーダリングの発生 (RI が大きい場合) 双方が Cubic のスループット特性に影響を与えていると考えられる。

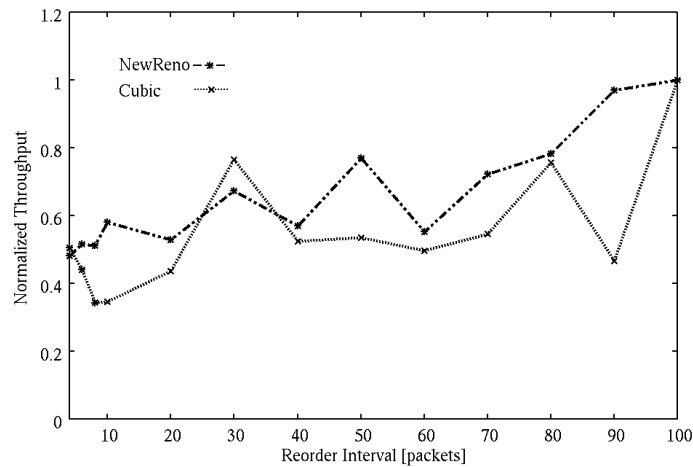


図 3. Normalized throughput [Mb/s] .

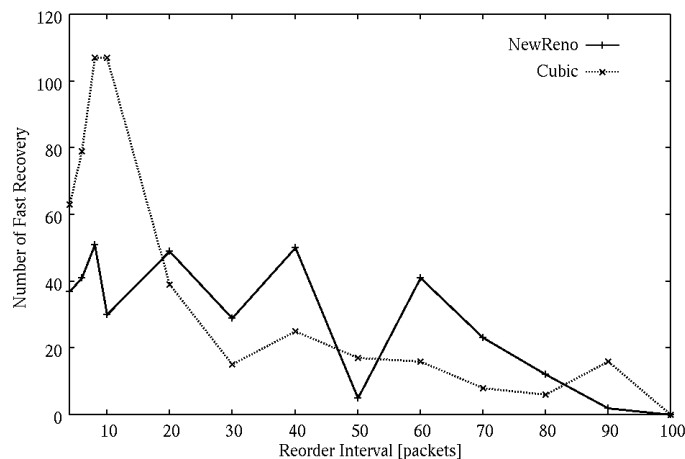


図 4 Fast Recovery 回数 .

(2) パケットリオーダリングに対応できるフロー制御アルゴリズム

(1)の実験結果より、重複 ACK に頼らずにパケットリオーダリングを検出する機能が必要であることがわかった。そこでタイマーによるパケット廃棄検出を提案している RACK (Recent ACKknowledge) [8] を参考にしたパケット廃棄検出機能を Cubic に追加した (以降 Cubic+と表記)。具体的にはパケットの送信時間を予め記録しておき、ACK 受信時に式 (1) より各送信中パケットのタイムアウト時間を計算し、超過している場合は該当パケットを再送するとした。

$$\text{timeout} = \text{Packet.xmit_ts} + \text{RACK.RTT} + \text{RACK.reo_wnd} \quad (1)$$

ここで Packet.xmit_ts は各パケットの送信時間、RACK.RTT は最新の ACK パケット受信時刻から算出した RTT、RACK.reo_wnd はパケット廃棄と判断するまでの猶予期間で [8] より初期値は 1ms.、以後パケットリオーダリング検出時に RACK.min_RTT / 4 に設定した .RACK.min_RTT は最小の RACK.RTT である。なお、パケット廃棄による Fast Recovery 中に式 (1) よりタイムアウトが発生した場合は、Slow Start に遷移して通信を再開するようにした。

図 5 に RI を 4 ~ 100 まで変化させたときの正規化スループット (=パケットリオーダリング発生時のスループット/パケットリオーダリング無しのスループット) を、図 6 に RI=70 時の cwnd を示す。図 5 より、RI が 30 以上の場合、Cubic+は約 90%のスループットを達成し、Cubic よりも最大 2 倍以上、通信性能を改善できることが分かった。Cubic ではパケットリオーダリングにより Fast Recovery が連続する場合は図 6 に示すように cwnd が縮退して小さくなる (1 ~ 2 秒付近)。それに対して Cubic+ は Fast Recovery 中にタイムアウトが発生すると Slow Start から通信を再開するため、cwnd が縮退する Cubic よりも cwnd を広く推定し維持できることがわかった。一方、RI が 30 未満の場合は改善が見られなかった。これは RI が RTT の半分以下になるとタイムアウトよりも先にパケットリオーダリングによる重複 ACK が頻発し、Cubic+のタイマーとそれによる再送機能が殆ど動作しなかったためだと考えられる。

これらの結果より、パケットリオーダーリングが片道遅延時間よりも長い間隔で発生する場合は、パケット廃棄をタイマーで検出する機能により通信特性を大幅に向上出来ることを明らかにした。

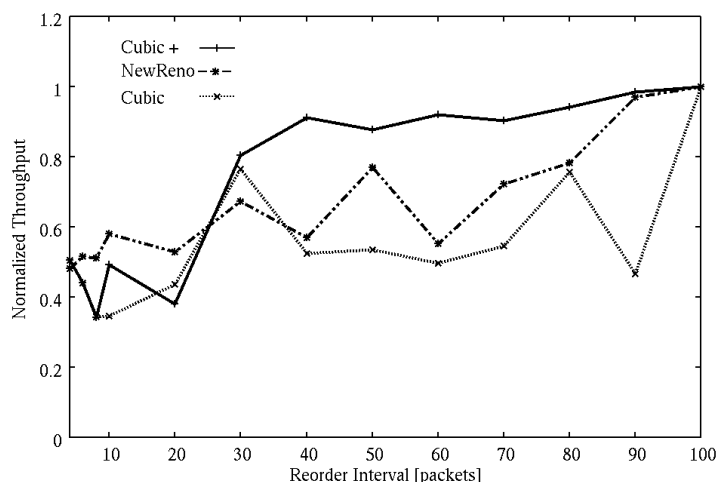


図 5. Normalized throughput [Mb/s] .

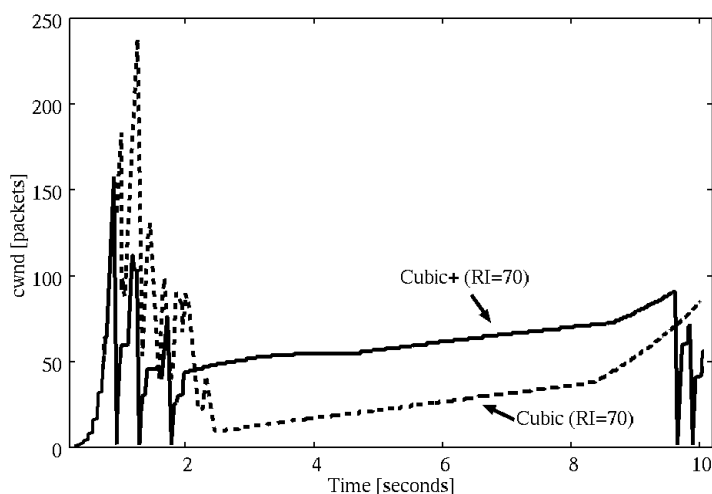


図 6. cwnd (RI = 70) .

< 引用文献 >

- [1] E. Blanton and M. Allman, "On making TCP more robust to packet reordering," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 32 no. 1, pp.20-30, 2002.
- [2] R. Ludwig and R. H. Katz, "The Eifel algorithm: making TCP robust against spurious retransmissions," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 30, no. 1 (January 2000), pp.30-36.
- [3] M. Zhang, B. Karp, S. Floyd and L. Peterson, "RR-TCP: a reordering-robust TCP with DSACK," 11th IEEE International Conference on Network Protocols, Proceedings, pp. 95-106, 2003.
- [4] K. C. Leung and C. Ma, "Enhancing TCP performance to persistent packet reordering," in Journal of Communications and Networks, vol. 7, no. 3, pp. 385-393, Sept. 2005.
- [5] S. Bohacek, J. P. Hespanha, J. Lee, C. Lim, and K. Obraczka, "A new TCP for persistent packet reordering," IEEE/ACM Transaction on Networking, Vol. 14, no. 2, pp.369-382, Apr. 2006.
- [6] K. c. Leung, V. O. k. Li and D. Yang, "An Overview of Packet Reordering in Transmission Control Protocol (TCP): Problems, Solutions, and Challenges," in IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 18, no. 4, pp. 522-535, Apr. 2007.
- [7] J. Feng, Z. Ouyang, L. Xu, and B. Ramamurthy, "Packet Reordering in High-Speed Networks and Its Impact on High-Speed TCP Variant," Computer Communications, Vol. 32, no. 1, pp. 62-68, 23 Jan. 2009.
- [8] Y. Cheng, N. Cardwell, and N. Dukkupati, "RACK: a time-based fast loss detection algorithm for TCP," Work in Progress, draft-ietf-tcpm-rack-02, March 2017.

5 . 主な発表論文等

[学会発表](計 3 件)

Y. Fukuda, D. Nobayashi, T. Ikenaga, “ Performance Evaluation of TCP Variants with Packet Reordering, ” ICN 2018, The Seventeenth International Conference on Networks, Apr. 2018、査読有

福田 豊、池永 全志、“ パケットリオーダーリングを考慮した TCP Cubic の改良、” 2018 年電子情報通信学会 総合大会、B-16-4、 Mar. 2018、査読無

福田 豊、野林 大起、池永 全志、“ パケットリオーダーリングが TCP に与える影響調査、” 電子情報通信学会 技術研究報告、Vol. 116、 No. 491、 IA2016-90、 pp. 1-6、 Mar. 2017、査読無

6 . 研究組織

研究分担者，研究協力者なし．

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。