

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：34416
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22500076
 研究課題名（和文）
 ユーザ間公平性を指向したP2Pトラフィック制御
 研究課題名（英文）
 P2P Traffic Control Realizing Fairness among Users
 研究代表者
 山本 幹（ YAMAMOTO MIKI ）
 関西大学・システム理工学部・教授
 研究者番号：30210561

研究成果の概要（和文）：

P2P トラフィックの増大は、現在のネットワークオペレーションにおける重要な技術課題となっており、ユーザのコスト負担の問題からネットワーク中立性の議論を引き起こしている。本研究は、「P2P においてユーザの公平性を実現するトラフィック制御を実現できないか？」というユーザの公平なコスト負担に向けた重要な技術課題に対し、ネットワークサイドならびにエンドホストサイドの双方から様々なアプローチを試みた。具体的には、多対1すなわち多数のポイントからコンテンツを受信する P2P の状況においては受信側のみがトータルで使用できるネットワーク資源を把握できることから、受信駆動型トラフィック制御による P2P スループットの公平性実現手法を開発するなど、公平性に着目したトラフィック制御手法の開発に取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：

Recent increase of P2P traffic volume is one of the most important technical issues for telecommunications operation. Unfair condition for P2P users might cause traffic control making use of deep inspection of traffic, which is evoking hot discussion for network neutrality recently. In this study, we try to find technical solutions for “traffic control realizing fairness among P2P users” from both of network side and end-host side. In P2P content distribution system, one receiver receives some portion of content from each of multiple sources, which means only a receiver can obtain content distribution status of the whole P2P system. So, we develop receiver-driven congestion control system with which P2P receiver fairly shares bottleneck link bandwidth with non-P2P flows. We also develop several traffic control schemes achieving fair share of network resources for content distribution, e.g. AQM at router resolving fairness among TCP sessions using different OS and fair congestion control for data center networks.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目： 情報学 ・ 計算機システム・ネットワーク

キーワード：P2P, トラフィック制御, 輻輳制御, 公平性

1. 研究開始当初の背景

一部のヘビーユーザが P2P 上で交換するトラフィック量が ISP 間を流れるトラフィックの相当量を占めるようになり、定額制コスト負担のユーザ間に広がる不公平間を解消するため P2P トラフィックに対し制限をかけるプロバイダも出てきている。このような動きは、本来透過的サービスを提供すべきネットワークにおいて、ユーザトラフィックの中身をみて制限をかけることから、ネットワーク中立性の議論を引き起こしている。ユーザの不公平感から導入された P2P トラフィックの制限は、ネットワークサイドから見た重要課題の一つと認識されている。

2. 研究の目的

本研究では、P2P トラフィックに対し公平性を実現する技術をネットワークサイドならびにエンドサイドの双方に取り入れることで、P2P ユーザの不公平感をなくし、ひいてはユーザトラフィックに制限をかけるというオペレーションの方向性から脱却することを目的とする。すなわち、P2P トラフィックの公平性をネットワーク内ならびにエンドホスト間で実現することで、ネットワーク中立性の議論を引き起こした P2P の不公平感への一つの解を与えることを目的としている。

3. 研究の方法

P2P トラフィックに対して、エンドホスト側からのアプローチとして P2P 受信駆動型トラフィック制御手法の開発を行った。また、ネットワーク側からのアプローチとして、OS の違いによるスループット差異を解消し公平なスループットを実現する手法、アドホックネットワークにおける公平性の検討、データセンタにおける公平性実現手法を検討した。

(1) P2P 受信駆動型トラフィック制御

P2P トラフィックがもたらす不公平感の最も大きな問題点は、非 P2P トラフィックに比べ P2P トラフィックがネットワーク資源を大きく消費することにある。具体的には、輻輳制御に TCP を用いたとしても、P2P は複数の送信者が個々に用意する TCP セッションを通して並列にコンテンツを取得することから、単一 TCP セッションを使用する非 P2P トラフィックに比べ、大きな帯域を利用できる。この問題点を解決するには、P2P セッションがいくつ張られており、それがどの程度のスループットを得ているかを把握する必要があるが、各送信者は該当するセッションのみの情報しか知りえないことから、それを知りえるのは受信者のみである。この観点から、本研究では多対 1 通信すなわち P2P を対象とした、受信駆動型輻輳制御を開発した。

(2) OS の違いによるスループット差異の解消

P2P においては、複数 TCP セッションを張ってコンテンツダウンロードを並列に行うが、エンドホストが使用する OS によってデフォルトでインストールされる TCP バージョンが異なることから、セッション間に不公平が生じる可能性がある。この点を解決するために、ネットワーク側のルータに TCP バージョンの差異により生じるキュー長変化の特徴に応じたパケット廃棄確率を設定する新しい手法を提案する。

(3) アドホックネットワークにおける公平性改善手法

アドホックネットワークにおいて P2P システムを運用した場合を対象に、①様々な無線干渉が発生することにより TCP スループット自体が低いことから、TCP スループットそのものを改善する必要性、②一部の TCP のみのスループット改善につながらないよう TCP セッション間の公平性を実現すること、の二つの問題点を同時に解決する方法が可能かどうかを検討した。

(4) データセンタにおける公平性実現手法

P2P を含むコンテンツ配信において重要な役割を果たすデータセンタでは、イーサネットをスイッチにより接続し多段ネットワークを構成する。このような状況では、スイッチにおいてトラフィックの偏り、すなわち輻輳が生じるため、2 層プロトコルで動作しているものの輻輳制御が必要となる。本研究では、データセンタネットワークにおける輻輳制御を対象に、公平性に関する詳細検討を行った。

4. 研究成果

以下に本研究で得られた研究成果を示す。

(1) P2P 受信駆動型トラフィック制御

① 開発方式の具体的説明

多対 1 通信においては、それぞれのセッションの RTT やロス率が異なることが一般的であり、セッションの状況に応じて帯域配分を考える必要がある。このため、本研究では以下のポリシーで、受信駆動型輻輳制御を開発した。

- 受信ホストが主体的に輻輳制御を行う受信駆動型とする。
- 同一輻輳リンクを共有するフローをクラスタリングし、これらで統合的に輻輳制御を行う。
- 輻輳リンクを共有しないフロー間では、独立に輻輳制御を行う。
- 同一輻輳リンクを共有するフローの間では、Resource Pooling の概念を適用し状況に応じた柔軟な資源配分を行う。

- e. 同一輻輳リンクを共有するフローについては、輻輳制御アルゴリズムとして Linked Increase, すなわちウィンドウ増加のみ統合制御を行い、ウィンドウ減少についてはフローごとに独立に制御を行う。これにより、複数フロー間の適切な資源配分を可能とする

なお、受信側で送信側が管理する輻輳ウィンドウを制御することは困難であるため、広告ウィンドウを用いて受信側から送信側のウィンドウサイズを制御することを実現する。具体的には以下の動作を行う。

- ウィンドウ増加

受信ホストがフロー r でデータパケットを受信したとき、 w_r^{ad} を $\min(a/w_r^{ad}, 1/w_r)$ だけ増加させる

- ウィンドウ減少

フロー r でロスが発生した場合、 w_r^{ad} を半減ここで w_r^{ad} はフロー r に対する広告ウィンドウサイズ、 w_r^{ad} は全フローの合計広告ウィンドウサイズであり、 a は以下の式で与えられる。

$$a = w_r^{ad} \left(\frac{\max_r \frac{\sqrt{w_r^{ad}}}{RTT_r}}{\sum_r \frac{w_r^{ad}}{RTT_r}} \right)^2$$

上記のようにフロー間でウィンドウを連携して変化させる制御は、同一輻輳リンクを共有するセッションを一つのクラスタとして扱い、クラスタ単位で行う。同一輻輳リンクを共有するフローを同定する手法として、RTT の自己相関関数と相互相関関数を比較することで同定する手法を用いた。

② 開発方式の性能評価

NS-2 を用いた計算機シミュレーションにより、開発方式の性能評価を行った。まず二つの TCP セッション A, B と P2P の複数セッションが存在し、単一ボトルネックリンクをこれら全セッションが共有する、簡単な Butterfly モデルを用いて評価を行った。図 1 に示すように、P2P のセッション数（横軸の数値）が増加した場合でも、P2P 全体で獲得する帯域（白色の棒グラフの合計）と、TCP セッション A ならびに B が獲得する帯域がほぼ等しくなっており、P2P と通常 TCP セッション間の公平性が実現できている。

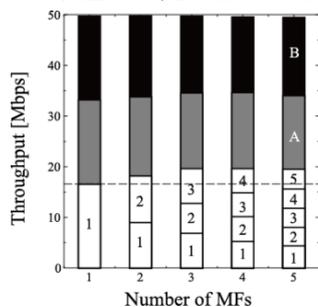


図 1 帯域配分 (全セッション共有時)

次に、図 2 に示すような二つのボトルネックリンクが存在するモデルを対象に、評価を行った。図 3 に示すように、TCP セッション A が P2P の単一セッションとボトルネックリンクを共有するリンク 1 においても、TCP セッション B が複数の P2P セッションとボトルネックリンクを共有するリンク 2 においても、P2P 全体と各 TCP セッションがほぼ均等に帯域を配分できており、P2P に対する不公平感が解決できている。

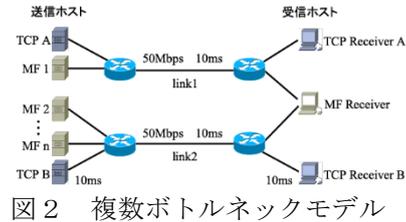
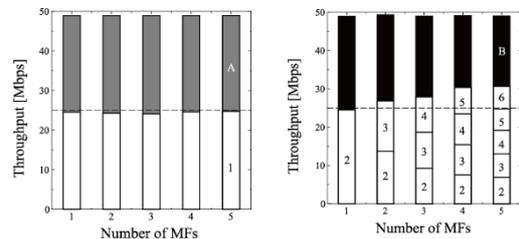


図 2 複数ボトルネックモデル



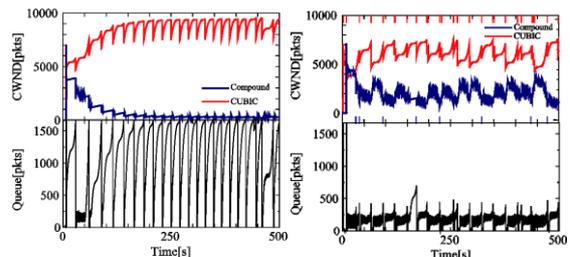
(a) リンク 1 (b) リンク 2

図 3 帯域配分 (複数ボトルネック)

(2) OS の違いによるスループット差異の解消

Windows では Compound TCP (以下 CTCP) が、Linux では CUBIC が、それぞれデフォルト TCP として用意されている。P2P において各ピアの使用する OS が異なり、これらが混在した場合、TCP の違いによるスループット不均衡が生じ、P2P 内のみならず P2P セッションと非 P2P セッション間の不公平性も引き起こす。

本研究では、CTCP は遅延ベースでキュー長が比較的低いところにあわせるようレート調整するのに対し、CUBIC はロスが発生したタイミングでレートを下げることから、両者が共存した場合 CTCP が抑制されることを初めて明らかにした (図 4 (a))。CTCP の抑制効果が効いているキュー長の低いところではロス率を低く抑え、Compound が CTCP より高いレートをもつキュー長の高いところではロス率を比較的高くし Compound に比較的高



(a) Drop Tail (b) 提案方式

図 4 提案方式のウィンドウとキュー長

い確率でロスを発生させてレート抑制を誘発する方法を開発した。本提案方式により、図4 (b)に示すようにキュー長が低く抑制され、かつCTCPとCUBICのレートがかなり近いところになるよう改善されており、公平性の観点で大きく改善された。

(3) アドホックネットワークにおける公平性改善手法

アドホックネットワークにおいて、P2Pを用いてコンテンツ取得を行う場合、TCPセッションそのもののスループット劣化がまず懸念される。本研究では、研究代表者がすでに提案している、アドホックネットワークにおけるTCPスループット改善手法としての、プロキシ型TCPを対象に検討を行った。プロキシ型TCPは、エンドエンドTCPセッションを数ホップごとのサブセッションに分割し、分割点に位置するノードにプロキシを配置するものである。分割された各サブセッションにTCPを動作させ、RTTの減少によるスループットの向上を狙ったものである。

本研究では、図5に示すように複数TCPセッションが途中で交差するモデルを対象に、プロキシ型TCPの性能を評価した。図6に示すように、二つのセッションの合計スループットについてはプロキシ型TCP（研究代表者の提案する手法をいれたもの）が最も高くなっている。ただし、両セッションのスループットに偏りが大きくなっており、スループットの向上と、公平性にはトレードオフの関係がある。このため、P2Pを効率的に運用するためには、アドホックネットワークにおいてはいたずらにセッション数を増やすことなく、できるだけ少ないTCPセッションでダウンロードを行い、公平性を実現したうえで高いスループットを得ることが得策である。

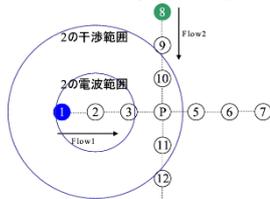


図5 複数セッションが交差するモデル

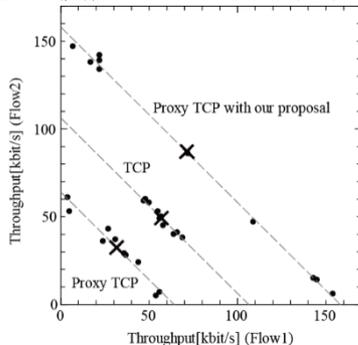


図6 2セッションのスループット特性

(4) データセンタにおける公平性改善手法

データセンタで用いられるネットワークは、データセンタ建屋内に限られるという地理的制約とともに高速イーサネットを用いるという点から、低遅延大容量であるという特徴をもつ。このため、スイッチのキューで被る遅延を極力低く抑えることが求められる。また、非常に多くのサーバ(仮想サーバ)が運営され、これらの間の通信をサポートするという要件から、高い利用率を実現することも要求条件となる。これらの条件を満足する輻輳制御として、QCN(Quantized Congestion Notification)がIEEE802.1Qauにおいて標準化されている。QCNは、スイッチからのフィードバックに基づき、送信側がレート制御を行う方式である。効率的運用のため、フィードバックは確率的に返送される。

本研究では、QCNには、同一ボトルネックを共有する同条件のフローについて、図7に示すように送信レートに不公平が生じる場合のあることを明らかにした。

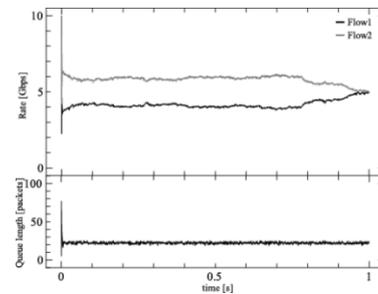


図7 QCNにおける送信レートとキュー長

本研究では、この不公平な状態が長く続く原因を調査し、QCNのレート増加アルゴリズムにおいて送信レートに依存してレート増加タイミングを調整している点が原因であることを明らかにした。すなわち、レートが高いフローはより短い時間間隔でレート増加を行い、逆にレートが低いフローはより長い時間間隔でレート増加を行っており、これが不公平な状態を長く維持される原因である。この問題点を解決したフロー増加アルゴリズムを提案し、図8に示すように公平な帯域配分を実現するデータセンタ輻輳制御を実現した。

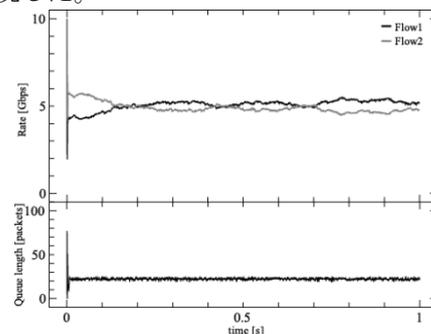


図8 提案方式における送信レート

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Yuki Hayashi, Hayato Itsumi and Miki Yamamoto, “Improvement of Flow Fairness in Quantized Congestion Notification for Data Center Networks,” IEICE Transactions on Communications, Vol. E96-B, No. 1, pp. 99-107, January. 2013. (査読有)
DOI: 10.1587/transcom.E96.B.99
- [学会発表] (計 16 件)
1. 木村健, 谷澤佑樹, 三原大輝, 山本幹, “データセンタ輻輳制御におけるフロー数増加時の遅延抑制手法の検討,” 電子情報通信学会 2013 年総合大会, B-6-101, 2013 年 3 月 20 日.
 2. 於久野精隆, 山本幹, “コンテンツオリエンテッドサービスにおける受信駆動型輻輳制御の検討,” 信学技報, vol. 112, no. 392, NS2012-154, pp. 75-80, 2013 年 1 月 25 日.
 3. Yuki Tanisawa, Yuki Hayashi and Miki Yamamoto, “Quantized Congestion Notification for Multicast in Data Center Networks,” Proc. International Conference on Cloud Networking(IEEE CLOUDNET), Paris, France, 2012 年 11 月 29 日. (査読有)
 4. Shunsuke Fujiwara, Yuho Yamashita and Miki Yamamoto, “Performance Evaluation of Load-Balancing Gateway Selection Method in Multi-hop Wireless Networks,” Proc. International Conference on Communications, Computation, Networks and Technologies, Venice, Italy, 2012 年 10 月 22 日. (査読有)
 5. Hiroki Mihara, Yuki Hayashi and Miki Yamamoto, “Performance Evaluation of Fairness between High-speed TCPs in Wireless Environment,” Proc. International Conference on Advanced Infocomm Technology, Paris, France, 2012 年 7 月 25 日. (査読有)
 6. 藤原俊輔, 山下悠歩, 山本幹, “無線マルチホップネットワークにおける負荷分散型ゲートウェイ選択方式の性能評価,” 信学技報, vol. 112, no. 131, NS2012-48, pp. 19-24, 2012 年 7 月 20 日.
 7. 於久野精隆, 中島慧, 森俊貴, 山本幹, “オフセット時間考慮したピア選択による P2P ストリーミングの公平性改善の検討,” 電子情報通信学会 2012 年総合大会 B-6-112, 2012 年 3 月 20 日.

8. 三原大輝, 吉新陽介, 林佑樹, 山本幹, “無線環境下における高速 TCP 間の公平性評価” 信学技報, vol. 111, no. 468, NS2011-235, pp. 313-318, 2012 年 3 月 20 日.
9. 中島慧, 山本幹, “P2P ストリーミングにおけるアップロード公平性改善手法” 信学技報, vol. 111, no. 468, NS2011-246, pp. 375-380, 2012 年 3 月 9 日.
10. 林佑樹, 山本幹, “[奨励講演] データセンタにおけるマルチキャスト通信を考慮した 2 層輻輳制御方式 QCN/BS の提案” 信学技報, vol. 111, no. 408, NS2011-171, pp. 151-156, 2012 年 1 月 27 日.
11. 山本幹, “[特別招待講演] 輻輳制御の研究動向” 信学技報, vol. 111, no. 198, NS2011-71, pp. 61-66, 2011 年 9 月 1 日.
12. Masato Matsumoto, Miki Yamamoto, “Performance Evaluation of Flow Fairness in Proxy-based TCP for Ad Hoc Networks,” Proc. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PacRim), pp. 780-785, Victoria, USA, 2011 年 8 月 24 日. (査読有)
13. Yuki HAYASHI, Hayato ITSUMI, and Miki YAMAMOTO, “Improving Fairness of Quantized Congestion Notification for Data Center Ethernet Networks,” in Proc. IEEE The first international workshop on Data Center Performance (DCperf), pp. 20-25, Minneapolis, MN, USA, 2011 年 6 月 18 日. (査読有)
14. 林佑樹, 逸身勇人, 山本幹, “レート増加アルゴリズムに着目したデータセンタ輻輳制御方式 QCN の公平性改善手法,” 信学技報, vol. 110, no. 448, NS2010-288, pp. 711-716, 2011 年 3 月 4 日.
15. 中島慧, 山本幹, “ストリーミング型 P2P におけるオフセットを考慮したピア選択,” 電子情報通信学会 2011 年総合大会 B-6-102, 2011 年 3 月 14 日.
16. 逸身勇人, 山本幹, “CUBIC と Compound TCP 間の公平性改善手法の提案,” 信学技報, vol. 110, no. 372, NS2010-160, pp. 103-108, 2011 年 1 月 21 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 幹 (Yamamoto Miki)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 30210561