

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：62615

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26730008

研究課題名(和文)競合比を用いたオンライン・バッファ管理問題の解析に関する研究

研究課題名(英文)Research on the online buffer management problems using competitive analysis

研究代表者

小林 浩二(Kobayashi, Koji)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・研究員

研究者番号：00547391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：インターネット上のアプリケーションに対して理論的に品質保証を実現する手段として、現実にかかる事象をオンライン問題と呼ばれる問題として定式化した上で、その問題に対するアルゴリズムを設計し、最悪値(競合比)を用いてそのアルゴリズムの性能を評価する研究が盛んに行われている。本研究は、その様な問題の中において最も重要な問題群であるバッファ管理問題について、(a)新たな問題の定式化(問題の作成)とそれに対するアルゴリズムの設計と性能評価、(b)2つの主要な未解決問題に対するアルゴリズムの設計と性能評価、の2点に取り組み、新たな研究成果を得た。

研究成果の概要(英文)：To guarantee that we use applications on the Internet supporting the quality of service, the following researches have been conducted extensively: we formulate a situation related to such applications as an online problem, and design and analyze the performance of an algorithm for the problem using the worst performance ratio of the algorithm (called competitive ratio). In this research, we have focused on the buffer management problem (BMP), which is one of the most significant online problems. Then, we have obtained the following results: (a) we have formulated a new variant of the BMP and designed an efficient algorithm for this variant, and (b) we have studied two open variants of the BMP and obtained improved results for them.

研究分野：アルゴリズム

キーワード：バッファ管理 インターネット オンライン問題 競合比解析 アルゴリズム スイッチ ルータ

1. 研究開始当初の背景

インターネット上で機能するアプリケーションでは利用者の要求する品質(例えば、映像のストリーミングでは、遅延、パケットロスの発生など)を保証することが求められる。この要求とそれに対する供給はある種の問題と見なすことが出来、この問題を理論的な問題として定式化し、その問題に対する解を与える(アルゴリズムを考案する)ことで本来の問題を理論的に解決を図るという研究が行われている。更に、ネットワークの状況が時間経過に応じて変化することを考慮し、定式化した問題に対する入力時間の経過と共に徐々に与えられると仮定した**オンライン問題**に関する研究が盛んに行われている。オンライン問題に対するアルゴリズムの性能評価には、その性能の最悪値である**競合比**を用いる。オンライン問題の中でも、インターネット上のルータやスイッチで扱うパケット管理をオンライン問題として定式化した、**バッファ管理問題(BMP)**と呼ばれる問題群に対する研究は近年特に盛んである。BMPは主要な組み合わせ最適化問題であるスケジューリング問題、ビンパッキング問題などと密接に関係している重要な問題であるが、多くの問題が未解決であり未だに十分に研究がなされているとは言い難かった。

2. 研究の目的

研究ではBMPの解明のために、未解決問題の解決と新たな問題の定式化を行う。具体的には以下の通りである。

(A)未解決問題の解明 BMPの中で、以下の2つの未解決問題の解明を行う。

(a)優先度総量最大化問題[1] ルータの複数の入力ポートと1つの出力ポートに着目し、各入力ポートには到着したパケットを保持

するFIFOキューが備わっている。一定時間毎に出力ポートは1つの入力ポートを選択し、そのキュー内のパケットを送信する。各パケットには実数値で**優先度**が記載されている。大量にパケットが到着した場合、アルゴリズムは各キュー毎に優先度を基にパケットの取捨選択を行う必要がある。アルゴリズムの得る利得を出力ポートから送信出来たパケットの優先度の総和と定義する。

(b)期限付バッファ管理問題[2] ルータ内のバッファに到着する各パケットに、品質保証のための優先度と有効期限が設定されている。大量にパケットが到着すると、期限内に全てのパケットを送信することができない為、アルゴリズムは取捨選択を行う必要がある。アルゴリズムの得る利得は期限内に送信できたパケットの優先度の総和と定義する。

(B)新たな問題の定式化 最近のネットワーク環境の報告を踏まえた場合、トラフィック量が激増した環境化において特に重要な3つの事象、(1)データの送信元での分割と送信先での再構成、(2)ルータ内における効率的なパケット転送、(3)ネットワーク資源の効率的な利用、を定式化したBMPと、それに対する有効なアルゴリズムが考案されることが望ましいが、まだ十分な研究が行われていないことが事前調査によって判明している。そこで本研究では、これらに焦点を当てた新しい問題の定式化を行い、それらに対して優れた性能を発揮するアルゴリズムの設計を行う。

[参考文献]

- [1] Y. Azar et al., "Management of multi-queue switches in QoS networks," *Algorithmica* 43(1-2), pp.81-96, 2005.
- [2] A. Kesselman et al., "Buffer Overflow Management in QoS Switches," *SIAMJ.Comp.* 33(3), pp.563-583, 2004.

3. 研究の方法

(1) 独自のアルゴリズム設計法

優れた競合比を達成するオンラインアルゴリズムを考案する際、設計法とその競合比の評価法が重要となる。本研究ではその鍵となる設計と解析の手法として研究代表者が考案した独自の手法を用いた。簡単に言えば、この手法を用いることで無限に存在するアルゴリズムの状況（動作パターン）を、有限に変換して競合比を評価することが出来る。

(2) 研究方法

(A)未解決問題の解決 優先度総量最大化問題と期限付バッファ管理問題について、まず、既存の未解決問題の原因である、問題固有の「難しさ」を明らかにした。具体的には、本来の問題から派生した、より解析の簡単な特殊な問題を定義し、それに対する優れたアルゴリズムの設計を行うことで「難しさ」を明らかにした。その上で、前述の設計法を適用して両問題に対するアルゴリズムの設計を行った。

(B)新たな問題の定式化 上述のネットワーク上の重要な3つの事象に焦点を当て新たなBMPの問題の定式化を行う為に、理論・実践両面から研究協力者と共に調査を行い、問題の定式化を行った。定式化後は、上述(A)と同様の方法で、問題に対するアルゴリズムの設計と解析を行った。

4. 研究成果

本研究において以下の成果を得た。

(B)新たな問題の定式化 上述の最近のネットワーク環境において重要な事象に焦点を当てた新たなBMPの定式化を行い、その解析を行った。具体的には、以下の通りである。

第一に小規模なネットワーク上において実際に用いられているルータ上のバッファ管理を理論的な問題として定式化を行った。この問題は本研究でも扱った優先度総量最

大化問題と、別の主要なBMPの問題との中間に位置づけられる問題である。この問題に対して、実際のルータ上において用いられている実用的なアルゴリズムPriority Queuing (PQ)の厳密な性能評価を行うことに成功した。具体的には、本問題においてPQの競合比が厳密に $1 + \frac{\sum_{j=1}^m \alpha_j}{\sum_{j=1}^{m+1} \alpha_j}$ であることを示した。ただし、 m はルータのキューの数であり、 α_j はj番目に大きい価値を持つパケットの価値の大きさであり、 $m' \in \arg \max_{x \in [1, m-1]} \frac{\sum_{j=1}^x \alpha_j}{\sum_{j=1}^{x+1} \alpha_j}$ が成立する。この研究成果は、理論研究でありながら、実践面を強く意識した研究として高く評価され、国際会議において発表を行った後、査読付き学術論文誌に掲載された。

第二に、送信されたデータを送信先で再構成する事象に着目し、従来の理論的な問題をより実用的な形の特殊な問題として定式化し、それに対する現実的な貪欲アルゴリズム(GR)の性能評価を行い、その最適性を証明した。具体的には、GRの競合比が厳密に3であることを示した。その成果もやはり理論・実践両面から高く評価され、査読付き学術論文誌に掲載された。また、その研究において得た知見を活かし、基になった問題に対する理論的に最適なアルゴリズムMFの設計を行い、その競合比が漸近的にkであることを証明した。その成果は、アルゴリズムの学界において高く評価され、査読付き学術論文誌に掲載された。

(A)未解決問題の解決 (1) 優先度総量最大化問題については、既存のアルゴリズムよりも優れた競合比を発揮するアルゴリズムの設計に成功した。具体的には、2つの優先度から構成される問題設定において、過去に示された全ての場合のアルゴリズムよりも

優れた競合比を達成するアルゴリズムを示した。例えば、確率を用いたアルゴリズムの競合比 2.270 であることを示し、これは従来のアルゴリズムの競合比 2.50 を大きく下回っている。これらの成果について査読付き学術雑誌において発表を行った。

(2)期限付バッファ管理問題については、当初計画していた最終年度（平成 28 年度）に別の研究チームによって、本研究に直接関係する研究成果が発表され^[3]、本研究計画の変更を余儀なくされた。そこで本研究では、平成 29 年度中にその研究チームの成果を改良することに成功したが、その成果については現在査読審査中であり、成果の発表を本最終報告の提出までに間に合わせる事が出来なかった。一方、この研究過程において得ることが出来た知見を活かし、関連研究について成果を得ることに成功した（査読付き学術雑誌採録 1 本、査読付き国際会議採択 2 本）。例えば、前述の通り、本問題はスケジューリング問題と密接に関係しており、その関係性を重視した新しいスケジューリング問題を定式化し、実用的な貪欲アルゴリズムの競合比が 3 であることを証明した。

[参考文献]

[3] M. Bohm et al., "Online packet scheduling with bounded delay and lookahead," In Proc. of ISAAC2016, pp. 21:1--21:13, 2016.

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 11 件)

Koji M. Kobayashi, Improved Lower Bounds for Online Scheduling to Minimize Total Stretch, Theoretical Computer Science, Vol.705, pp. 84-98, Elsevier, 2018. 査読あり

Koji M. Kobayashi, Shuichi Miyazaki, Yasuo Okabe, Competitive Buffer Management for Multi-Queue Switches in QoS Networks Using Packet Buffering Algorithms, Theoretical Computer Science, Vol. 675, pp. 27-42, Elsevier, 2017. 査読あり

Jun Kawahara, Koji M. Kobayashi, Shuichi Miyazaki, Better Bounds for Online k-Frame Throughput Maximization in Network Switches, Theoretical Computer Science, Vol. 657, pp. 173-190, Elsevier, 2017. 査読あり

Tetsuya Araki, Koji M. Kobayashi, Online Unit Clustering with Capacity Constraints, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E100-A, No.1, pp.301-303, IEICE, 2017. 査読あり

Tetsuya Araki, Koji M. Kobayashi, A Tight Analysis of Kierstead-Trotter Algorithm for Online Unit Interval Coloring, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E99-A, No.10, pp. 1885-1887, IEICE, 2016. 査読あり

Jun Kawahara, Koji M. Kobayashi, Tomotaka Maeda, Tight Analysis of Priority Queuing Policy for Egress Traffic, Computer Networks, Vol. 91, pp. 614-624, Elsevier, 2015. 査読あり

Jun Kawahara, Koji M. Kobayashi, Optimal Buffer Management for 2-Frame Throughput Maximization, Computer Networks, Vol. 91, pp. 804-820, Elsevier, 2015. 査読あり

Jun Kawahara, Koji M. Kobayashi, An Improved Lower Bound for One-Dimensional

Online Unit Clustering, Theoretical
Computer Science, Vol. 600, pp. 171-173,
Elsevier, 2015. 査読あり

〔学会発表〕(計 4 件)

Koji M. Kobayashi, Improved Bounds for
Online Dominating Sets of Trees, ISAAC2017,
2017.

川原純, オンラインフレーム転送量最大
化問題における競合比の改良, コンピュテ
ーション研究会, 2014

〔図書〕(計 1 件)

Hiroshi Fujiwara, Koji M. Kobayashi,
"Bin Packing with Cardinality
Constraints," pp.211-214, 2016, In
Encyclopedia of Algorithms, Springer.

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 浩二 (Kobayashi, Koji)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究
系・外来研究員

研究者番号: 00547391

(4)研究協力者

宮崎 修一 (Miyazaki, Shuichi)

京都大学・学術情報メディアセンター・准教
授