

平成 30 年 8 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12417

研究課題名(和文) 情報指向ネットワーク用の軽量キャッシュアルゴリズム

研究課題名(英文) Light weight cache algorithm for Information Centric Networking

研究代表者

長谷川 亨 (HASEGAWA, TORU)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：70576264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：次世代インターネットアーキテクチャの候補である情報指向ネットワーク(Information Centric Networking: ICN)においては、ICNルータにおいて、トラフィック量を削減するパケット単位のキャッシュ機能を高速に実現することが課題である。この課題に対して、パケット受信時に、人気度の低いパケットをキャッシュに挿入しないアドミッションアルゴリズムを開発し、本アルゴリズムが高いキャッシュヒット率と高速なパケット転送を両立できることを、シミュレーションならびにプロタイプ実装により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：High speed cache algorithm implementation is an important research challenge for Information Centric Networking (ICN), i.e., a candidate of the future Internet architecture. We design a cache algorithm which inserts the only popular packets in to a cache. This algorithm called a cache admission algorithm provides both high cache hit rates and high-speed packet forwarding. We validate the designed algorithm with simulations and prototype implementation.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：情報指向ネットワーク キャッシュアルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

情報指向ネットワークング(Information Centric Networking: ICN)は次世代インターネットアーキテクチャの最有力候補であり、市販のPCをベースにしたプラットフォーム上で高速なICNルータを開発する研究が積極的に進められていた。パケットの宛先検索の高速化については、ビット単位のトライ木による検索や、ブルームフィルタを用いた検索など新たな手法が開発されていたのに対して、トラフィック量を削減するパケット単位のキャッシュアルゴリズムの高速化については、ほとんど検討されていなかった。すなわち、ソフトウェアベースのICNルータが40ギガビット/秒のパケット転送速度を実現するには、パケット単位のキャッシュ処理がICNルータの性能のボトルネックとなっていた。

2. 研究の目的

人気度が高くヒットする可能性が高いデータパケットだけをフィルタしてキャッシュに蓄積することで、キャッシュとして約160ギガビット/秒のアクセス速度のDRAM(Dynamic Random Access Memory)を用いたPCベースのICNルータにおいて、約40ギガビット/秒のスループットを達成する手法を明確化する。具体的には、高速性と高いキャッシュヒット率を両立するパケット単位のキャッシュアルゴリズムを開発し、プロタイプを実装することで、パケット転送速度の高速性を実証する。さらに、ビデオのような大容量のオブジェクトが大半を占める将来ネットワークにおいても、高速性に加えて、高いキャッシュヒット率を提供できることを検証する。

3. 研究の方法

(1) ICNルータ処理の解析

第一ステップとして、PCベースのハードウェアプラットフォームに実装したICNソフトウェアの性能を解析することで、宛先検索、キャッシュ処理を含むICNパケット処理負荷を測定し、40ギガビット/秒のスループットを阻むボトルネックを明らかにする。ボトルネック解析の過程で、ICNルータのパケット転送速度を処理時間およびメモリアクセスマ量の観点で評価する、パケット転送の性能モデルを開発する。

(2) 軽量キャッシュアルゴリズムの設計

第二ステップとして、ICNルータの処理の内、キャッシュ処理の高速化を目的として、人気度が高いパケットだけをキャッシュへの蓄積対象として抽出するアルゴリズムを設計するとともに、キャッシュ置き換えアルゴリズムと組み合わせた軽量なキャッシュアルゴリズムを設計する。

(3) 大容量オブジェクトへの適用性

最終的に、軽量なキャッシュアルゴリズムを、(1)で開発した性能モデルを用いて、

所望のパケット転送速度を達成することを検証するとともに、長時間のビデオがインターネットトラフィックの主流になることを想定して、大容量オブジェクトがコンテンツの大半を占める将来ネットワークにおいて、軽量なキャッシュアルゴリズムが高いキャッシュヒット率を達成できることを検証する。

4. 研究成果

(1) ICNルータの処理時間の解析

ICNルータのパケット転送エンジンのプロタイプ実装を作成し、ICNルータのパケット転送を構成する宛先検索、キャッシュにおけるパケット検索、キャッシュへのパケット挿入、Pending Interest Table(PIT)処理等の各ブロックに対して、処理時間ならびに処理におけるDRAMへのアクセス量を、キャッシュヒット率が0%の条件で測定した。

図1に示す各ブロックの処理時間とDRAMのアクセス量の測定結果が示すように、キャッシュを処理するブロックの処理時間が長いこと、また、蓄積したとしても後にヒットしないパケットをキャッシュに挿入する処理時間が無駄になっていることを明らかにした。さらに、CPUにおける処理時間が、DRAMへのアクセス時間よりも長くなっており、高速なパケット転送の実現には処理を軽量することが、DRAMアクセス数削減と比較して、重要であることを明らかにした。

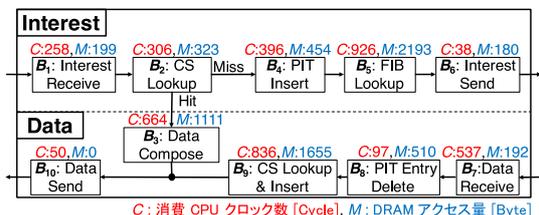


図1 ICNルータのプロトコル処理時間

(2) フィルタアルゴリズムの設計

(1)で発見した無駄なパケットの挿入の問題を解決するため、ICNルータが受信したパケットの中から、人気度の高いパケットを抽出するアルゴリズムを設計した(フィルタアルゴリズムと呼ぶ)。フィルタアルゴリズムは、一定時間(直前q個:ヒストリと呼ぶ)の要求の内、しきい値θ回以上要求されたデータパケットだけを人気度が高いと判定し、判定したパケットだけをキャッシュに蓄積するフィルタアルゴリズムである(図2に処理を示す)。一方、人気度が低いと判定されたパケットは、キャッシュに蓄積されない。

さらに、フィルタアルゴリズムとFIFOでキャッシュ内のパケット置換するキャッシュ置換アルゴリズムと組み合わせて、無駄なパケットをキャッシュに蓄積しないことにより、パケット転送の高速性と高いキャッシュヒット率を両立する、軽量なキャッシュアルゴリズムを設計した。

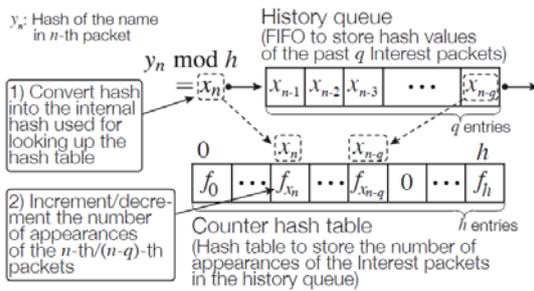


図2 フィルタアルゴリズム

(3) フィルタアルゴリズムによるパケット転送速度の向上

設計した軽量キャッシュアルゴリズムのパケット転送の高速性を、以下の通り検証した。

まず、提案した軽量キャッシュアルゴリズムを ICN ルータのパケット処理の中に、図3に示すように組み込んで、プロトタイプを実装した。図3においてブロック  $B_{13}$ :CS Admission がフィルタアルゴリズムに相当する。(1)で実装したフィルタアルゴリズムを持たないプロトタイプ(without Filter)と、新たに実装したプロトタイプ(with Filter)のパケット転送速度を、キャッシュヒット率0%の条件で、実験により測定した。

この結果、人気の低いパケットの処理を省くことにより、約10%程度、パケット転送速度を向上させた。この結果、40ギガビット/秒のスループット達成の見通しを得た(図4)。

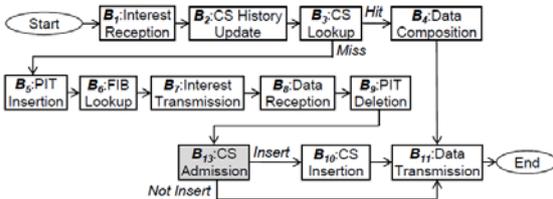


図3 フィルタを用いたICNルータのパケット処理

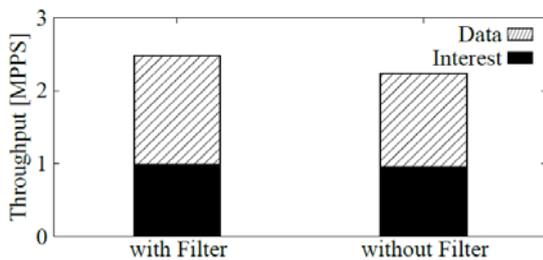


図4 パケット転送速度の比較

(4) フィルタアルゴリズムによるキャッシュヒット率

フィルタアルゴリズムを組み込んだ軽量キャッシュアルゴリズムが提供するキャッシュヒット率を評価するために、アルゴリズムをモデル化し、パケットのフィルタ通過率  $P_{filter}$ 、キャッシュヒット率  $P_{hit}$  を理論的に解析した。要求パケットの発生を定常的なポワソン過程と仮定し、データの人気度の分布を

Zipf 則に基づくと仮定して、提案した軽量キャッシュアルゴリズムと Least Frequency Used (LFU), TinyLFU, FIFO の3種類の代表的なキャッシュアルゴリズムと、キャッシュヒット率を比較した。

図5に示すように、この結果、処理量のオーダーが  $O(1)$  の提案した軽量キャッシュアルゴリズムは、処理量のオーダーが  $O(N)$  で低速で、高速パケット転送に向かない LFU と比較しても、遜色ないヒット率を達成できることを明らかにした。また、処理量のオーダーが同等である LRU より高いヒット率を達成している。同様に無駄なパケットを蓄積しない TinyLFU と比較して、少しキャッシュヒット率が低くなっているが、処理時間は短くなっている。

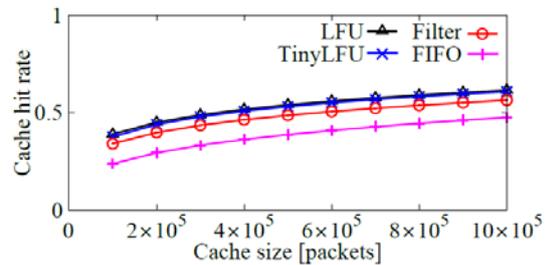
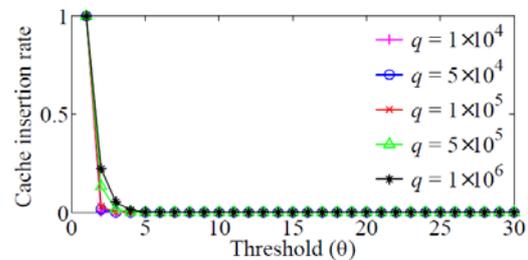
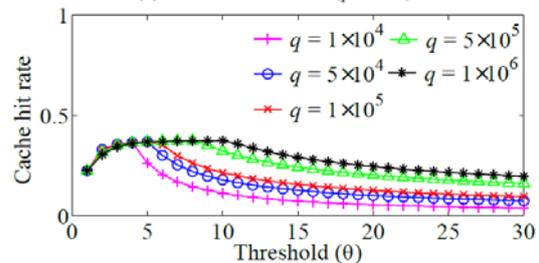


図5 キャッシュヒット率の比較

フィルタアルゴリズムが提供するフィルタ率とキャッシュヒット率は、履歴長  $q$  としきい値  $\theta$  に依存することが予想される。このため、 $q$  と  $\theta$  を変更させて解析を行い、これらの値とフィルタ率とキャッシュヒット率の関係を解析した。



(a) Cache insertion rate ( $p^{Insertion}$ )



(b) Cache hit rate ( $p^{Hit}$ )

図6  $q$ ,  $\theta$  とフィルタ率, キャッシュヒット率の関係

図6に示す通り、解析の結果、しきい値  $\theta$  を2以上にするすることで、無駄なパケットを挿入する確率  $(1 - P_{filter})$  をほぼ0%に削減し、キャッシュヒット率も向上させている。これは、1回しか要求されないパケットをキャッシュに挿入しないことにより、十分高いキャッシュヒット率を得ることができていることを示唆

している。

(5) 大容量オブジェクトへの適用

ビデオオンデマンド (VoD) の普及により、オブジェクトの容量は拡大を続けている。これに対して、ICN において、大容量のオブジェクトをパケット単位でキャッシュする場合に、自己置換が発生することが問題となっている。

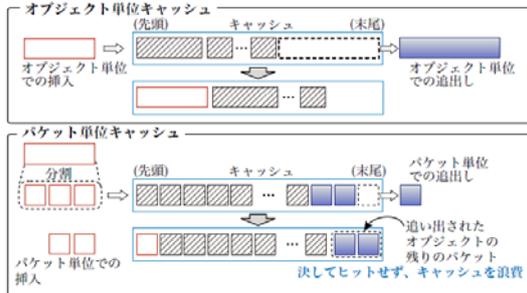


図 7 自己置換の発生メカニズム

自己置換は、オブジェクトがパケット単位に分割されることより発生する。具体的には、オブジェクトの先頭の packets がキャッシュから追い出されているが、残りの packets がキャッシュに残存している状態で、新たにこのオブジェクトを構成する packets が先頭から要求される現象である。この時、新たな要求がヒットせず、その要求に対応して送信された packets が残存する packets を押し出すため、本来はヒットする可能性があったキャッシュ内の packets もヒットしないことが問題である。

これに対して、キャッシュ置き換えアルゴリズム Least Recently Used (LRU) を対象として、図 7 に示す自己置換のメカニズムをモデル化し、LRU における自己置換の発生確率ならびにキャッシュヒット率を解析した。

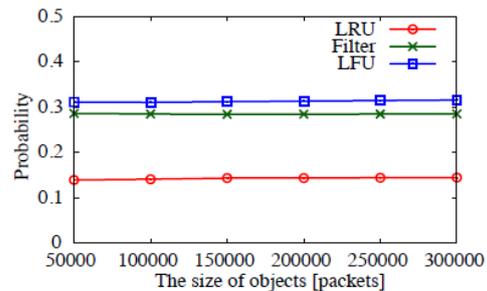
解析の結果、LRU において、人気度が低く後にヒットする可能性の低いものにもかかわらず、キャッシュに蓄積されキャッシュの容量を無駄に使用しているオブジェクトが、人気度が高く後にヒットする可能性の高いオブジェクトに対して自己置換を発生させていることが判明した。

自己置換の解決には、(2) で提案した人気度低い packets をキャッシュに挿入させないフィルタアルゴリズムや、LFU が有効である。これに対して、フィルタを用いたキャッシュアルゴリズム (提案アルゴリズム)、LFU の自己置換発生率、ならびにキャッシュヒット率をシミュレーションで評価した (図 8)。図 8 に示す通り、提案したキャッシュアルゴリズムは、LRU と比較して、自己置換発生率を削減して、キャッシュヒット率を向上させている。

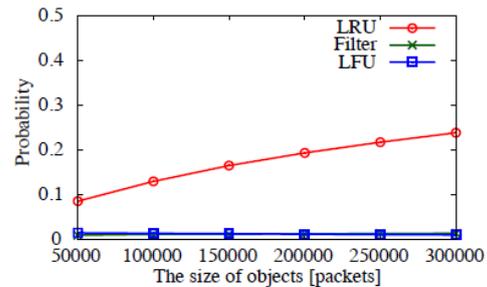
5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

①武政淳二, 小泉佑揮, 長谷川亨, Is Caching a key to Energy Reduction of NDN Networks,



(a) Cache hit probability



(b) Looped replacement probability

図 8 自己置換率とキャッシュヒット率  
IEICE Trans. On Comm. Vol. E99-B, No. 12, 2016.

[学会発表] (計 5 件)

①山本瑤司, 武政淳二, 小泉佑揮, 長谷川亨, On an impact of large content on packet-level caching of information-centric networking, In Proceeding of IEEE ICNP 2017 (poster), Oct. 2017.

②山本瑤司, 武政淳二, 小泉佑揮, 長谷川亨, NDN ルータの packets 単位のキャッシュに起因する自己置換の発生確率の解析法に関する一考察, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-7-31, 2017 年 9 月.

③谷口航介, 武政淳二, 小泉佑揮, 長谷川亨, NDN プロトコル処理が要する CPU クロック数と DRAM アクセス量のモデル化に関する一考察, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-7-24, 2016 年 9 月.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 亨 (Toru Hasegawa)

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 70576264

(2) 研究分担者

小泉 佑揮 (Yuki Koizumi)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 50552072