

ユーザ間のキャッシュヒット率公平化を目的とした CCNにおける協調キャッシュ割当手法の提案

青木 美帆^{1,a)} 重安 哲也^{2,b)}

概要：大容量コンテンツの配信などに起因するサーバダウンや処理遅延を解決する新世代ネットワーク技術として注目されている NDN では、ネットワーク上の中継ルータはネットワークに流れるコンテンツをキャッシュすることで、ネットワーク全体のトラフィック量と応答時間を削減する。これまで我々は、重要コンテンツをキャッシュするための容量を隣接するルータ同士で仮想的に増加させキャッシュヒット率を向上する協調キャッシュ手法を提案した。これに対して、本稿では仮想キャッシュ容量増加手法によって発生する、ユーザのネットワーク上の位置に起因するキャッシュヒット率の不公平状態を明らかにする。また、それを解消するためにネットワーク上のユーザ位置に基づいてキャッシュ容量を割り当てる手法を提案するとともに、計算機シミュレーションを用いて、同手法によってユーザ間の公平度が改善することを明らかにする。

1. はじめに

今日、インターネットは重要なインフラの1つとなり、現代社会から切り離すことのできない存在に成長した [1]。現在のインターネットは、通信相手をロケーションに基づいた識別子である IP アドレスによって指定して行うホストセントリック型の通信形態をとる。しかし、近年では動画配信などの大容量コンテンツの配信やスマートフォンなどの移動端末、また、IoT (Internet of Things) の普及によって、ネットワークのトラフィック量が急増している [2]。このような状況下において、従来のホストセントリック型通信のみでは、多数のユーザからの通信要求が単一のサーバに集中し、サーバダウンや処理遅延の増加といった重大な問題が発生する可能性が高い。

そこで、これらの問題を解決する新たなネットワークとして、ICN (Information Centric Networking) [3], [4], [5] の開発が進められている。ICN では、どのサーバと通信を行うかではなく、何のコンテンツを取得したいかをユーザが指定するコンテンツセントリックな形態で通信する。ICN は各国で研究され、その中でも特に、NDN (Named Data

Networking) [6], [7], [8] の研究が注目を集めている。

NDN では、コンテンツそのものを識別子とした通信を行う。ネットワーク上の中継ルータ CR (Contents Router) は、ネットワークに流れるコンテンツのキャッシュを行い、それを将来の配信に利用することでコンテンツ要求とコンテンツ配信によるトラフィック量と応答時間を削減することができる。しかし、CR のバッファサイズは有限であるため、ユーザからのコンテンツ要求頻度が増加するとキャッシュヒット率は低下する。さらに、NDN では、一般的にキャッシュ管理方式に LRU (Least Recently Used) [9], [10] を採用しているため、リクエスト頻度の高いコンテンツは、ネットワーク上に多く存在することになり、そうでないものと比べて相対的に短いホップでユーザに配信することができる。

NDN におけるインターネットワークキャッシュでは、ユーザに近い CR 上のキャッシュほどその後再利用される可能性と、その際の応答時間の短縮効果が高くなる。そこで、これまで我々は、ユーザと隣接する CR にキャッシュされるコンテンツを重要コンテンツとみなし、それがバッファオーバーフローによって削除される場合には、上流 CR に重要キャッシュを転送し保持を依頼することで、仮想的に重要コンテンツのキャッシュ容量を増加しキャッシュヒット率を向上させる手法を提案した。

しかしながら、同手法では、一度重要コンテンツと設定されたキャッシュはそれを保持した CR のバッファオーバーフローが発生するたびに、繰り返し、上流の CR に転送さ

¹ 県立広島大学大学院総合学術研究科
Graduate School of Comprehensive Scientific Research, Prefectural University of Hiroshima

² 県立広島大学経営情報学科
Department of Management and Information Systems, Prefectural University of Hiroshima

^{a)} q722001ni@ed.pu-hiroshima.ac.jp

^{b)} sigeyasu@pu-hiroshima.ac.jp

れる。そのため、ネットワーク的にサーバから遠く離れたユーザが要求することでキャッシュされたコンテンツほど、より多くの CR 上で保持されることになる。結果として、要求されるコンテンツのパターンがユーザ間で異なる場合は、より遠くに位置するユーザの方がキャッシュヒット率が高くなり、ユーザ間で不公平状態を生じてしまう。

そこで、本稿では、従来の仮想キャッシュ容量増加手法が不公平状態を生じることを明らかにする。また、その不公平状態を解決するためにコンテンツを要求するユーザのネットワーク上の位置に基づいた新しいキャッシュ割当手法を提案するとともに、計算機シミュレーションによって提案手法はユーザ間のキャッシュヒット率の不公平状態を改善できることを明らかにする。

2. NDN (Named Data Networking)[6], [7], [8]

NDN では、図 1 のように Interest と Data の 2 種類のパケットを用いてコンテンツの送受信を行う。

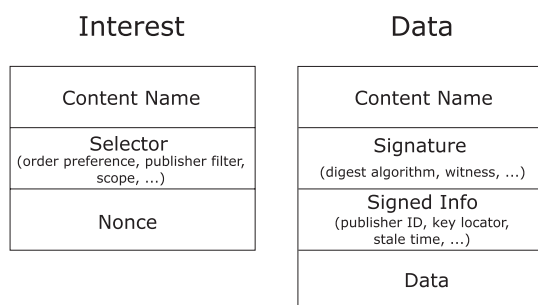


図 1 NDN における Interest と Data のフレームフォーマット

Interest は、ユーザがコンテンツを要求する際に用いる。ユーザがコンテンツを所望するときネットワーク上に送信された Interest は、後述する FIB (Forwarding Information Base) に従って、コンテンツを所有するオリジナルサーバまたは当該キャッシュを保持する CR へ向けて転送される。Data は、Interest によって要求されたコンテンツを返送する際に用いる。オリジナルサーバまたはキャッシュを持つ CR は Interest を受信すると、対応する Data を作成し、これを Interest が転送された経路の逆順で要求元へ返送する。

NDN では、コンテンツ名を識別子として通信する。コンテンツ名は、「/」で区切られた可読性のある階層構造の文字列で構成されている。階層型の識別子を使用することで、ルータがパケットの転送先を選択する情報を FIB 上で集約するなどの prefix (コンテンツ名の先頭部分) 単位の経路制御が可能となる。

図 2 のように NDN における CR は、以下のように 3 つのテーブルを用いることで経路制御を実現する。

- FIB

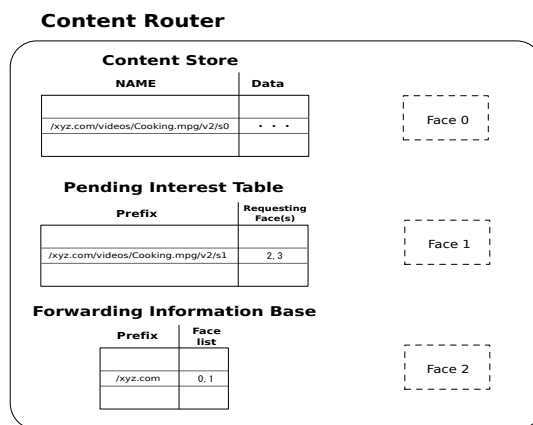


図 2 NDN ルータ (CR)

オリジナルサーバからの広告に基づいて作成されたテーブルである。取得を希望するコンテンツ名が記載された Interest を転送するために使用される。コンテンツ名の prefix とそれに対応する Interest の転送方向の face (インターフェース) 番号の組がエン트리として格納されている。CR は、FIB 上のエントリに従って次ホップを選択することで、Interest は冗長な経路を通ることなくコンテンツ保有者へ向けて転送される。

- PIT (Pending Interest Table)
転送済みの Interest に関する情報を記録したテーブルである。転送を完了した Interest のコンテンツ名とそれを自身が受信した際の到着元 face 番号の組がエン트리として格納されている。PIT エントリを参照すれば、Data が返送されてきた際にもそれを適切なユーザ方向に返送できる。
- CS (Content Store)
コンテンツを一時的にキャッシュするために使用するバッファである。バッファにはコンテンツ名とコンテンツそのものの組が格納される。Data の返送を中継する CR は、中継した Data のキャッシュを自身が保持していない場合、新たにその Data をバッファにキャッシュする。これにより以降同様のコンテンツ取得リクエストがユーザから到着した場合、バッファからキャッシュコンテンツを配送することでネットワークのトラフィックを軽減できる。

2.1 NDN の基本動作

NDN におけるコンテンツ要求からコンテンツ取得までの基本動作を図 3 を用いて示す。

- (1) オリジナルサーバからの広告により各 CR に FIB が作成される。
- (2) ユーザは隣接する CR に Interest を転送する。
- (3) Interest を受け取った CR は、Interest に記載されたコンテンツ名を参照し、それと一致するコンテンツが自身の CS にキャッシュされているかを確認し以下の

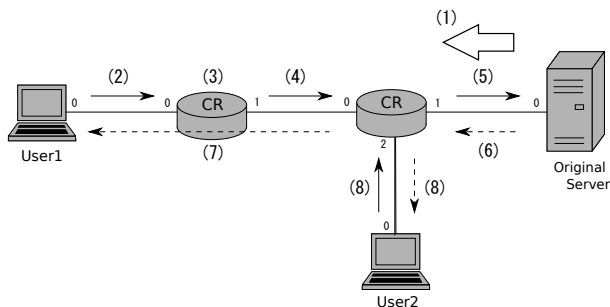


図 3 NDN の基本動作

いずれかの処理を行う。

- 保持している場合：Data を作成し，これを Interest が到着した face に返送し，Interest は破棄する。
- 保持していない場合：Interest に記載されたコンテンツ名と受け取った face を PIT に保存し，(4) の処理に進む。

(4) Interest を次ホップへと転送する。

- 自身の FIB を参照し，Interest のコンテンツ名と最長一致する prefix を探索することで転送先を決定する。
- 複数のユーザから同一コンテンツに対する要求が到着した場合は，PIT の該当エントリに face 番号のみを追記し，その後の Interest の転送は行わない。

(5) Interest の転送経路上のいずれの CR もキャッシュを有しない場合，Interest はオリジナルサーバまで転送されたのちに，コンテンツが返送される。

(6) CR は，Interest に対応した Data を受信すると，PIT を参照して，対応するすべての face へ Data を返送するとともに，自身の CS にコンテンツをキャッシュする。

- Data パケットを次ホップへ転送した後は，コンテンツに対応する自身の PIT エントリを削除する。

(7) ユーザに Data が返送されるまで，(6) を繰り返す。

(8) 次回以降，再度当該コンテンツに対する配信要求が発生すると，経路上にある当該コンテンツを保持する CR からのコンテンツ配信が可能となる。

また，NDN では，キャッシュによるコンテンツ配信機会の増加や，PIT 参照による重複 Interest の転送回避を行うことで，転送コストやネットワーク負荷の削減が可能となる。NDN では，ユーザに近い CR に人気コンテンツをキャッシュすることがキャッシュのコンテンツ配信時の転送性能の大幅な向上に寄与する。

2.2 キャッシング手法

NDN のキャッシングは 2 つの部分で構成される。1 つ目は，Data を返送する際に経路上のどの CR にコンテンツをキャッシュするかを決定するキャッシュ判断である。一般的に，NDN には Data が通過したすべての CR にコンテンツをキャッシュする LCE (Leave Copy Everywhere)[13]

が採用される。

2 つ目は，キャッシュ容量の上限に達した際に，どのコンテンツを破棄し新たなコンテンツの挿入場所を確保するかを決定するキャッシュ管理である。NDN では，バッファに空き容量が存在しない場合，バッファ中のコンテンツのうち最終参照時刻から最も時間が経過したものを破棄する LRU (Least Recently Used)[9], [10] が一般的に採用される。

キャッシング手法にこれらの LCE と LRU を採用すると，要求頻度の高いコンテンツほどネットワーク内の多くの CR に存在することになる。つまり，人気コンテンツはそうでないものに比べて，相対的に短いホップでユーザに転送することが可能となる。

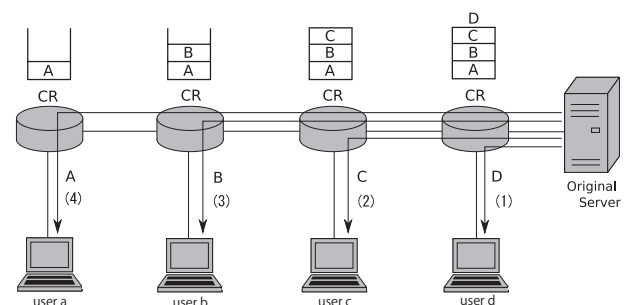


図 4 LRU キャッシュ

しかし，単純な LRU による管理ではいくつかの問題が生じる [11], [12]。この問題点を図 4 を用いて示す。同図は，ユーザ a, b, c, d へ配信された Data をそれぞれ A, B, C, D とした場合のキャッシュ状態を表す。このとき丸括弧で囲まれた数字はユーザにコンテンツが返送された順番を示していることとする。

さて，同図に示すように，オリジナルサーバからネットワーク的に離れたユーザがリクエストしたコンテンツのキャッシュ (A) は，その他のユーザのものよりもネットワーク内に多く流通することがわかる。そのため，単純な LRU によるキャッシングでは，ユーザのネットワーク上の位置によってキャッシュコンテンツ流通に不公平状態を生じる。

これに加えて，オリジナルサーバに近い CR では他のユーザが要求したコンテンツが通過することによって，キャッシュ更新が頻繁に発生し，自身には必要のないコンテンツが多くキャッシュされる。それにより，キャッシュのオーバフローを引き起こし本当に必要なコンテンツが破棄されてしまうという問題も発生する。

3. 仮想的なキャッシュ容量増加によるキャッシュヒット率向上手法

NDN におけるインターネットワークキャッシュでは，前述のようにユーザに近い CR 上のキャッシュほどその後再

利用される可能性と、その際のレスポンス時間の短縮効果が高くなる。

コンテンツの人気はユーザの所在地によって大きく影響を受ける [14] という空間的局所性を考慮すると、コンテンツをキャッシュする CR の場所は、それを要求したユーザにできる限り近い CR に優先的にキャッシュされることが効果的であると考えられる。そこで、我々はこれまでにユーザと隣接する CR を ER (Edge Router) と定義し、ER にキャッシュされるコンテンツを EC (Edge Cache)、それ以外の中継 CR にキャッシュされるコンテンツを RC (Relay Cache) と呼び、任意の CR においてキャッシュオーバーフローが発生した際には、RC を EC に比べて優先的に破棄するというそれぞれの優先度を踏まえたキャッシュ管理手法を提案した [15]。

具体的には、ユーザからの Interest パケットに応じてネットワーク上を返送されるコンテンツは、通常の NDN と同様に返送経路上の全ての CR 上のバッファに保管するが、そのコンテンツを要求したユーザが直接 Interest を送信した ER 上にキャッシュするコンテンツのみ EC として保管する。同手法では、優先度を踏まえたキャッシュに加え、EC がオーバーフローによって ER または任意の CR から破棄される場合、自身の上流に位置する中継 CR に該当する EC を転送し、保持を依頼することで EC のためのキャッシュ容量を仮想的に増加させる。同手法を VCM (Virtual Capacity Multiplication) と呼ぶ。

なお、VCM ではコンテンツの送受信は、NDN 同様、Interest と Data の2種類のパケットを用いて行い、キャッシュ判断のアルゴリズムには LCE を採用することとする。

3.1 VCM の基本動作

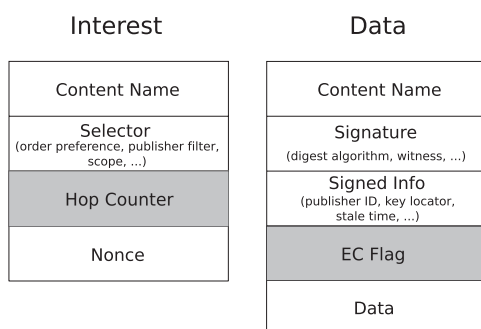


図 5 VCM の Interest パケットと Data パケット

VCM では、図 5 のように、Interest パケットのヘッダには Interest 送信元のユーザからのホップ数をカウントするために Hop Counter が追加される。Hop Counter は、ユーザが新たに Interest を送信する際は 0 が設定されるが、転送されるたびにその値がインクリメントされる。Interest を受信した任意の CR では、Hop Counter の値が 1 の場合は PIT にエントリを登録する際に EC Flag を True にし、

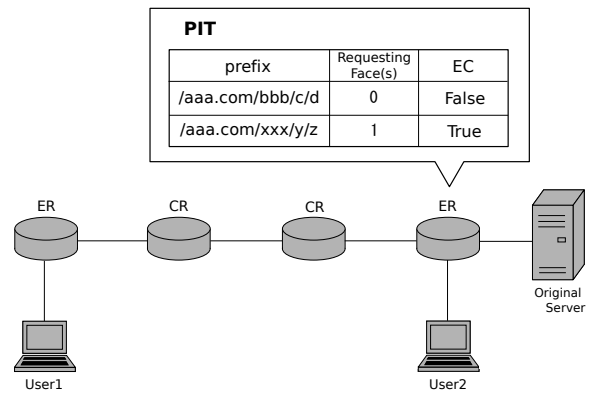


図 6 VCM の PIT

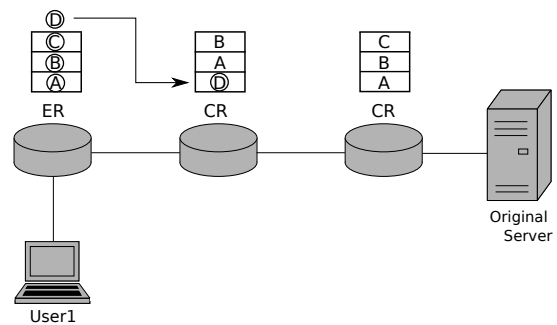


図 7 VCM のキャッシュ管理

そうでない場合は False とする (図 6 参照)。そのため、CR は任意の PIT エントリに記載された EC Flag が True の場合、自身がいずれかのユーザの ER であると認識ができる。

返送された Data パケットが任意の CR に到着した際、CR は Data パケットに対応する PIT エントリの EC Flag を参照し、その値が True であれば、Data パケットの該当 Flag をセットすることで EC として自身のバッファにキャッシュする。

図 7 に EC を丸囲みで明示した図を示す。提案手法において、ER または CR でオーバーフローが生じ、かつ、EC Flag が設定された任意のコンテンツ (EC) が破棄対象となった場合、ER または CR は、これを自身の上流 CR に転送する。

4. 提案手法

本節では、VCM の問題点を明らかにし、それを改善するユーザ位置に基づいたキャッシュ割当手法を提案する。

4.1 VCM の問題点

前述のように VCM では、任意の CR がオーバーフローを起こした際、EC が破棄対象として選定される場合は、それを上流 CR へ転送する。そのため、特にオリジナルサーバから遠いユーザが短時間で多くのコンテンツを取得するような場合は、そのユーザのコンテンツのキャッシュがネットワーク上の CR のバッファを占有することとなる。その結果、ユーザのネットワーク上の位置がキャッシュヒット

率に大きな影響を及ぼすことになる。

したがって、VCMはキャッシュヒット率を向上できるものの、ユーザ間のキャッシュヒット率に不公平状態を生じることになる。

4.2 ユーザ位置に基づいたキャッシュ割当手法

本稿では、前節で述べたVCMの抱える問題点を軽減するために、新たにVCMにユーザ位置に基づいたキャッシュ割当を導入した手法を提案する。具体的には、図8のように、各CRが自身とコンテンツを要求したユーザとの距離(ホップ数)を記載するテーブルHOP COUNTを新たに設け、それに従いバッファ容量を割り当てる。

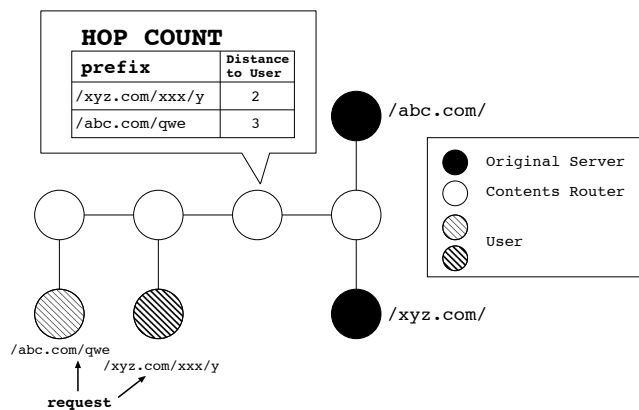


図8 HOP COUNT テーブル

同図のように、HOP COUNT テーブルは、prefixとユーザならびに自身との距離を格納する。prefixとユーザとの距離は、VCMと同様の手順でカウントされるInterestのHop Counterを参照する。提案手法において、各CRは自身近くのユーザが要求したコンテンツに対して、これをキャッシュするためのバッファ容量を多く割り当てる。このようにすることで、各ユーザに対して割り当てるネットワークのバッファの総和が均等となり、結果として、ユーザ間でのキャッシュヒット率の差の軽減が期待できる(図9参照)。図8のトポロジの場合、図9に本提案手法が目指すバッファ割り当てのイメージを示す。

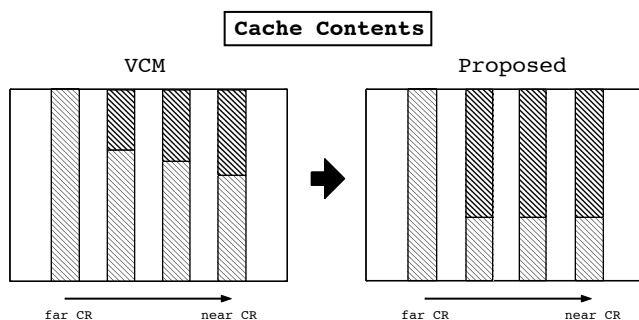


図9 図8のトポロジに対するバッファ容量割り当てイメージ

提案手法では、バッファが全てECで埋まった場合は、図

9右のように割り当てられた領域内でLRUによるキャッシュ管理を行う。一方、バッファに空きがある場合、あるいはキャッシュがバッファの上限まで達しているがRCが存在する場合は、空きの部分、またRCを削除してECを挿入するものとする。

5. 性能評価

本章では、VCMと提案手法の性能評価を行う。シミュレーション諸元を表1、シミュレーショントポロジを図10に示す。

Parameter	Value
Original Server	2
CR	4
User	2
Buffer Size	100 contents
Interest Packet	1024 bytes
Data Packet	1024 bytes
Link Delay	1msec
Cache Decision Strategy	LCE
Simulation Period	100 sec

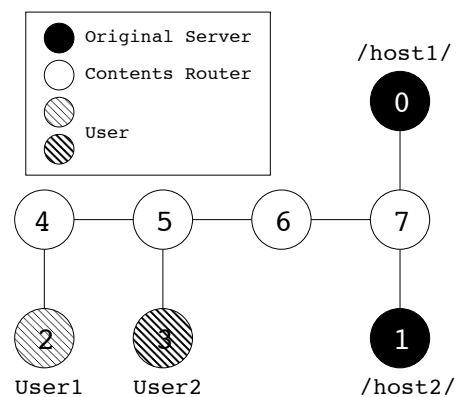


図10 シミュレーショントポロジ

同図に示すように、ノード0, 1はオリジナルサーバであり、それぞれ'host1', 'host2'の文字列をコンテンツ名のprefixに含むコンテンツをそれぞれ500個保有する。また、ノード2, 3はユーザとし、ノード2は'/host1/0'から'/host1/499'までのコンテンツを、ノード3は'/host2/0'から'/host2/499'までのコンテンツを指数乱数に従った間隔でランダムに要求する。Interestの生成間隔は、10[pkt/sec]を基本生成間隔とし、User1: User2のInterestの生成数を基本生成間隔に対して1:1, 2:1, 3:1, 4:1の倍数となるように変化させる。なお、シミュレーションの試行回数は100回とした。

5.1 VCM の性能評価

図 11 に、LRU と VCM の既存の 2 手法を比較した場合のキャッシュヒット率を示す。同図より、VCM は、LRU に比べて CR でヒットする可能性が高まりキャッシュヒット率が約 2 倍に向上することがわかる。

次に、VCM のユーザごとのキャッシュヒット率を図 12、シミュレーション終了時の CR のキャッシュコンテンツを図 13 に示す。

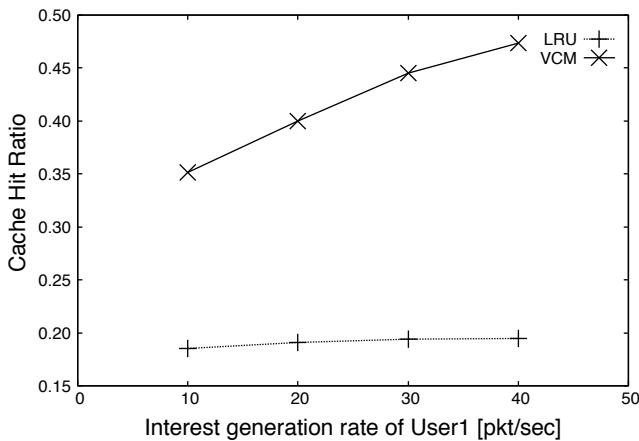


図 11 LRU と VCM のキャッシュヒット率

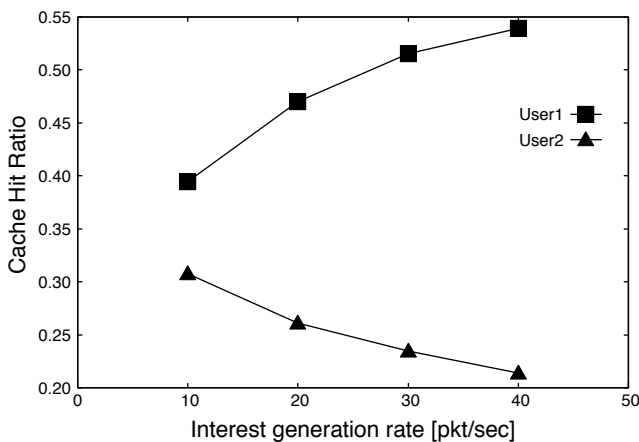


図 12 VCM におけるユーザごとのキャッシュヒット率

両図より、VCM では User1 の Interest の生成数が多くなるほど User2 のキャッシュコンテンツを駆逐すること、特に生成数が 4 : 1 の場合は、User1 と User2 のキャッシュヒット率に 2 倍以上の差を生じることがわかる。

5.2 提案手法の性能評価

本節では、VCM と本稿で新たに提案した 2 つの手法を比較する。

本節の評価では、提案手法におけるルータ 5 から 7 までのキャッシュ容量割り当てを、User1 : User2 = 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 2 : 3 の 4 パターンとした場合の結果を示す。

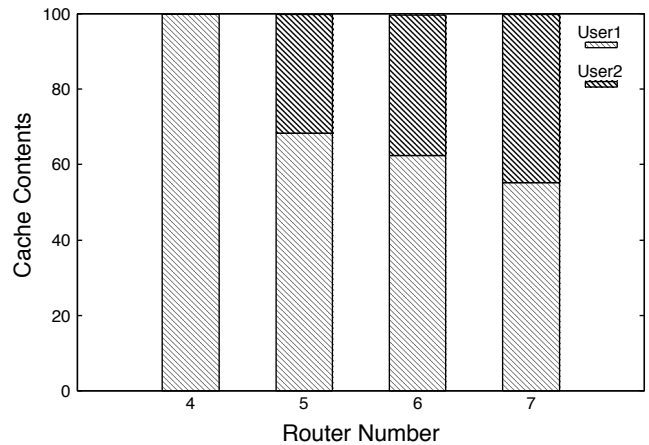


図 13 VCM におけるシミュレーション終了時の CR のキャッシュコンテンツ (Interest 発生数 User1 : User2 = 4 : 1)

評価によって得られたキャッシュヒット率を図 14 に示す。同図より、提案手法では、VCM よりキャッシュヒット率が低下することがわかる。これは、提案手法では、各ユーザのキャッシュヒット率を公平にすることを目的に各 CR のバッファ容量を固定的に割り当てたため、VCM よりネットワーク全体の User1 のキャッシュヒット率が低下したためである。

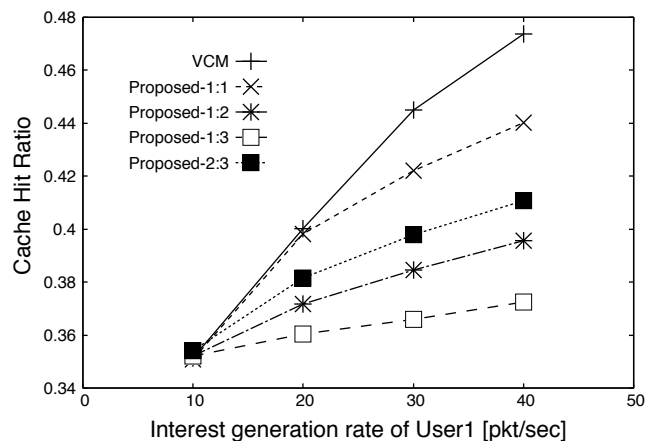


図 14 キャッシュヒット率

次に、ユーザ間のキャッシュヒット率の公平性を測る指標として、Jain の Fairness Index[16] を使用する。Fairness Index F は、 n をネットワーク内のユーザ数、 x_i ($1 \leq i \leq n$) をユーザ i のキャッシュヒット率とした場合、以下の式で算出できる。

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1 \leq i \leq n)$$

上式は、0 から 1 の値を示し、1 に近いほどネットワークが公平であることを示す。

本シミュレーションの結果を図 15 に示す。同図より、VCM は、User1 の Interest 生成数が増加するほど Fairness Index が大きく低下することがわかる。

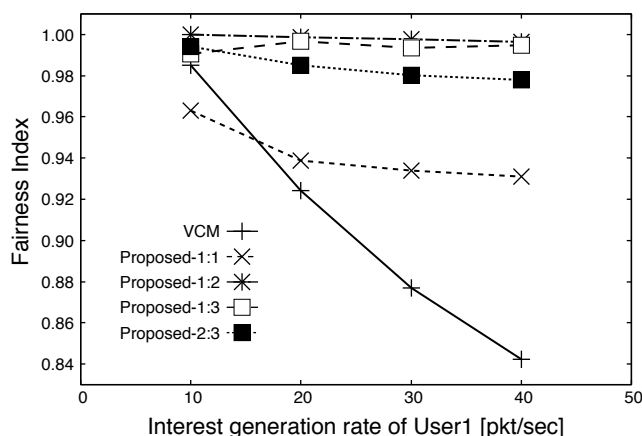


図 15 Fairness Index

一方、提案手法は、バッファ割当パターンに関わらずほとんどの場合でVCMより高いFairness Indexとなった。これに加え提案手法では、Interestの生成数を増加させてもあまり公平性の低下は起こらないことも分かる。特に、バッファ容量割り当てが1:2の場合は、User1のInterestの生成数に関わらずFairness Indexが約1となることがわかる。これは、今回のトポロジではネットワーク全体のキャッシュを見たときに、User1とUser2が利用できるキャッシュ容量が均等となるように割り当てられたのがバッファ容量割り当てを1:2とした場合であったためであると考えられる。

6. 終わりに

本稿では、これまでに我々が提案したVCMによるキャッシュ管理の問題点である、ユーザのネットワーク上の位置によるキャッシュコンテンツヒット率の不公平状態を明らかにした。また、その問題を解決するユーザの位置によるキャッシュ容量割当手法を提案した。

性能評価結果より、提案手法は、VCMと比べて全体のキャッシュヒット率は低下するもののユーザ間のキャッシュヒット率の公平度が大きく向上することを明らかにした。

今後は、ユーザのネットワーク上の距離だけでなく、Interestの発生間隔を加味した上でのキャッシュ割当アルゴリズムの検討が必要である。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP17K00132の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Internet World Stats : WORLD INTERNET USAGE AND POPULATION STATISTICS, Internet World State (Online), 〈入手先〈<http://www.internetworldstats.com/stats.htm>〉〉。
- [2] 総務省 : 情報通信の状況・政策の動向,

総務省 (オンライン), 入手先〈入手先〈<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc255320.html>〉〉。

- [3] Yaqub, M. A., Ahmed, S. H., Bouk., S. H., and Kim, D : Information-Centric Networks (ICN), Content-Centric Networks, *SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering*, pp.35-80 (2006).
- [4] Ahlgren, B., Dannewitz, C., Imbrenda, C., et al : A survey of information-centric networking, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 50, pp.26-36 (2012).
- [5] Yamamoto, M. : [Special Invited Talk] Research Trends in Content Oriented Networks, *Institute of Electronics Information and Communication Engineers Technical Report*, Vol. 114, No.18, pp.35-40 (2014).
- [6] NAMED DATA NETWORKING : Named Data Networking (NDN) Project - A Future Internet Architecture, NAMED DATA NETWORKING (Online), 〈入手先〈<http://www.named-data.net/>〉〉。
- [7] Jacobson, V., Smetters, D., Thornton, J., et al : Networking named content, *Proc. of 5th International Conference on Emerging networking experiments and technologies*, pp.1-12 (2009).
- [8] Zhang, L., Estrin, D., Burke, J., et al : Named Data Networking (NDN) Project, *NDN Project, Technical Report. NDN-0001*, (2010).
- [9] R, J., Lv, N., Zhang, D., et al : On Performance of Cache Policies in Named Data Networking, *International Conference on Advanced Computer Science and Electronics Information*, (2013).
- [10] Shailendra, S., Sengottuvelan, S., Rath, H. K., et al : Performance evaluation of caching policies in NDN - an ICN architecture, *arXiv preprint arXiv:1612.00352* (2016).
- [11] 宮崎貴博, 竹下秀俊, 岡本聡, 山中直明 : コンテンツセントリックネットワークにおけるユーザ位置を生存時間に反映したキャッシュ手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.114, No.17, pp.51-56 (2014).
- [12] Hu, Q., Muqing, W., Dongyang, W., et al : Lifetime-based greedy caching approach for content-centric networking, *Telecommunications (ICT), International Conference on. IEEE*, pp.426-430 (2014).
- [13] Arif, S., Hassan, S., and Abdullahi, I. : Cache Replacement Positions in Information-Centric Network, *4th International Conference on Internet Applications, Protocol and Services*, pp.54-58 (2015).
- [14] INTERNET Watch : 「2016年都道府県別Google検索ランキング」発表, INTERNET Watch (オンライン), 入手先〈入手先〈<http://internet.watch.impress.co.jp/docs/news/1034935.html>〉〉。
- [15] Aoki, M., and Shigeyasu, T., : Effective content management technique based on cooperative caching on Content Centric Networking, *Proc. of 5-th International Workshop on Collaborative Enterprise Systems*, (2017).
- [16] Chiu, D. M., and Jain, R. : Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks, *Computer Networks and ISDN Systems*, Vol. 17, pp. 1-14 (1989).